

بررسی تجربی تأثیر آرایش‌های مختلف عملگر پلاسمای کرونا بر میزان نیروی پیشران تولیدشده بر روی صفحه تخت

پریسا باباصفیری^۱، روح‌الله خوشخو^{۲*}، حمزه اشراقی^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا-گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- استادیار مهندسی هوافضا-گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- دانش‌آموخته دکتری مهندسی هوافضا-گرایش جلوبرندگی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱)

چکیده

در دودهم گذشته، استفاده از محرک‌های پلاسمایی به‌عنوان یک فناوری نوین در عرصه هوافضا ظهور یافته است. یک نمونه از عملگرهای پلاسمای عملگرهای پلاسمای کرونا می‌باشد که در آن، تخلیه کرونا به‌وسیله یک الکتروود دارای ولتاژ بالا با شعاع انحنای کوچک به‌عنوان ساطع‌کننده و الکتروود دیگر به‌عنوان جمع‌کننده که در فاصله معینی از یکدیگر قرار دارند، ایجاد می‌شود و منجر به تولید باد یونی می‌گردد. در این تحقیق، به بررسی تجربی تأثیر دو آرایش بهینه شده برای اندازه‌گیری نیروی پیشران در کرونای مثبت و منفی پرداخته شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که عملگر کرونا می‌تواند باعث ایجاد نیروی پیشران شود و میزان نیروی پیشران به‌طور مستقیم با میزان ولتاژ در ارتباط است. رابطه بین تغییرات ولتاژ با نیروی پیشران به‌صورت تقریباً خطی می‌باشد و افزایش ولتاژ باعث رشد بیشتر نیروی پیشران، توان مصرفی و جریان الکتریکی می‌شود. در هر دو آرایش، میزان نیروی پیشران و توان الکتریکی مصرفی در کرونای منفی از کرونای مثبت بیشتر است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت، تعداد عملگرهای پلاسمای در آرایش اول از آرایش دوم بیشتر است، این امر منجر به افزایش نیروی پیشران و میزان توان الکتریکی در آرایش اول نسبت به آرایش دوم می‌شود.

واژه‌های کلیدی: عملگر پلاسمای کرونا، بررسی تجربی، نیروی پیشران، باد یونی

Experimental Investigation of the Effect of Different Arrangements of the Corona Plasma Actuator on Thrust Produced on the Flat Plate

Abstract

In the last two decades, the use of plasma actuators has emerged as a new technology in the aerospace field. An example of plasma actuator is corona plasma actuators, in which corona discharge is created by a high-voltage electrode with a small radius of curvature as an emitter and another electrode as a collector, which are located at a certain distance from each other and leads to the production of ion wind. In this research, the effect of two optimized arrangements for measuring the driving force in positive and negative corona has been investigated experimentally. The results show that the corona actuator can create thrust and the amount of thrust is directly related to the amount of voltage. The relationship between voltage changes and thrust is almost linear and the increase in voltage causes more growth in thrust, electric power, and electric current. In both arrangements, the amount of thrust and electrical power in the negative corona is more than the positive corona. Finally, it can be concluded that as the number of plasma actuators in the first arrangement is more than the second arrangement, this leads to an increase in the thrust and the amount of electric power in the first arrangement compared to the second arrangement.

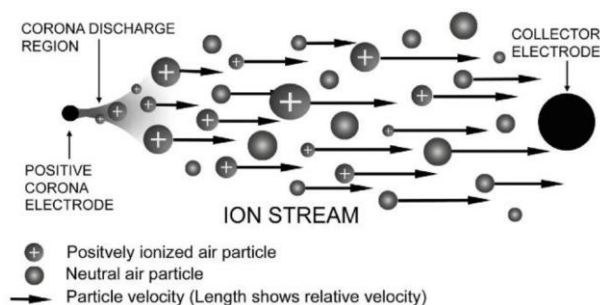
Keywords: Corona Plasma Actuator, Experimental Survey, Thrust, Ionic Wind

مقدمه

استفاده از تکنولوژی برتر جهت کاهش صدای هواپیما، افزایش اختفاء، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، افزایش راندمان در مصرف انرژی جزء اهداف اصلی صنعت هوایی می‌باشد. یکی از اقسام پیشران که بعد از جنگ جهانی دوم همواره مورد توجه بشر بوده است، استفاده از پیشران‌های پلاسما است. یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد پیشران پلاسمایی، نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی بالای آن نسبت به موتورهای جت و عدم داشتن بخش‌های متحرک می‌باشد. یک نمونه از پیشران‌های پلاسمایی، استفاده از عملگر پلاسمای کرونا می‌باشد 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 و ... دارد.

تخلیه کرونا یک تخلیه الکتریکی موضعی است که به همراه یونیزاسیون هوا در مجاورت الکتروود 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 سوزن و صفحه استفاده می‌شود. شعاع انحنای کوچک تضمین‌کننده تغییرات شدید پتانسیل الکتریکی در اطراف الکتروود است. یونیزه شدن هوای مجاور الکتروود به صورت ظاهری قطر الکتروود را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب، به شعاع انحنای الکتروود افزوده شده و پیشروی فرآیند 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 توده‌ها را به نام باد کرونا ایجاد می‌کنند. ولتاژ اعمالی به الکتروود با شعاع انحنای کوچک تعیین‌کننده نوع کرونا می‌باشد. 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 الکتروودیدرودینامیک در سال ۱۷۰۹ توسط هاگزبی صورت گرفت [۲]. وی متوجه تولید جریان هوایی با سرعت کم هنگام اعمال ولتاژ بین دو الکتروود شد که بعدها این پدیده توسط نیوتن "باد الکتریکی" نامیده شد [۳]. در اواخر قرن نوزدهم، چتوک برای نخستین بار باد الکتریکی را به صورت کمی مطالعه کرد [۴]. در سال ۱۹۵۷ هارنی مشخصات الکتریکی تخلیه کرونا و تغییر پارامترهای آیرودینامیکی جریان را برای بررسی میزان نیروی تولیدشده توسط این پدیده بررسی نمود [۵].

در سال ۱۹۶۶، سانبرون و همکاران به بررسی اصول فیزیکی حاکم بر عملگر پلاسمای کرونا پرداختند [۶]. در سال ۱۹۶۷، کارهای تحقیقاتی در زمینه عملگر پلاسمای کرونا توسط کریستنسون و همکاران انجام گرفت که در این تحقیقات متوجه شدند که میزان تولید پلاسما با مقدار ولتاژ کاربردی برای عملگر متناسب می‌باشد [۷].

بوندار و باستین در پژوهش خود با استفاده از سرعت ورودی 50 m/s توانستند میزان راندمان رانشگر را تا $7/5$ درصد بهبود بخشند. در این پژوهش پیشنهاد استفاده از نیروی الکتروودیدرودینامیک در سیستم پیشران کنترلی بال‌ها و هواپیماهای کوچک با در نظر گرفتن انرژی خورشیدی و سامانه‌های تبدیل انرژی فتوولتائیک^۱ (به منظور تولید ولتاژ لازم برای شروع تخلیه کرونا) جهت تأمین انرژی لازم نیز مطرح شد [۸].

ویلسون و همکاران در سال ۲۰۰۹، با حمایت و پشتیبانی ناسا، به بررسی استفاده از عملگر پلاسمای کرونا جهت تولید نیروی تراست به عنوان سیستم پیشران هواپیما اقدام نمودند. آنها توانستند میزان نیروی پیشران ۵ نیوتن بر هر کیلوولت را از

دانشگاه کالیفرنیا در آمریکا توانستند یک میکروروبات پرنده با استفاده عملگرهای الکتروهایدرودینامیک و بدون استفاده از اجزای متحرک به پرواز در آورند [۱۷].

در کلیه تحقیقات قبلی، الکترودها در فضای آزاد قرار داشتند، اما در این تحقیق، الکترودها بر روی صفحه تخت در نظر گرفته شد و سعی شد، با بررسی تجربی شکل، اندازه و میزان ضخامت الکترودها، بهترین عملگر پلاسمای کرونا برای تولید تراست انتخاب و بر روی سطح صفحه تخت به دو صورت آرایش داده شود، تا به این طریق بتوان بیشترین میزان نیروی پیشران را بر روی صفحه تخت محاسبه نمود. در ادامه، نتایج تجربی حاصل از این دو آرایش برای دو کرونا مثبت و منفی به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شده است.

روش تحقیق

در این تحقیق، دو آرایش مختلف از عملگر پلاسمای کرونا بر روی سطح صفحه تخت استفاده شده است. در آرایش اول، از چهار عملگر پلاسمای در فاصله دو سانتی‌متر از یکدیگر و عملگرهای پلاسمای کرونا به صورت روبه‌روی هم قرار گرفته‌اند. در آرایش دوم، از سه عملگر پلاسمای در فاصله دو و نیم سانتی‌متر از یکدیگر و عملگرهای پلاسمای کرونا پشت سر هم قرار گرفته‌اند. در هر دو آرایش، صفحه تخت با استفاده از عملگر پلاسمای کرونا به طور کامل پوشانیده شد. سپس میزان نیروی پیشران با استفاده از یک دستگاه اندازه‌گیری نیروی پیشران اندازه‌گیری شد. جهت جلوگیری از آسیب به دستگاه به علت امواج الکترومغناطیس، دستگاه مربوطه در یک قفس فارادی قرار داده شده است.

تجهیزات آزمون

در این بخش، مجموعه‌ی تجهیزات و ابزار موردنیاز برای آزمون‌ها و سیستم داده‌برداری به طور خلاصه ارائه شده است.

مدل صفحه تخت

مدل موردبررسی، از جنس پلکسی‌گلس با ضخامت ۵ میلی‌متر و دارای ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر مربع ساخته شد، همچنین قسمت بالای صفحه به صورت جداشونده طراحی شد

عملگر پلاسمای کرونا به دست آورند [۹]. در سال ۲۰۱۳، بارت و همکارش، شکل‌های مختلفی از عملگر پلاسمای کرونا را جهت ایجاد سامانه‌ی پیشران موردبررسی قراردادند تا بیشترین میزان تراست را بر واحد ولتاژ الکتریکی تولید نماید [۱۰]. بارت و همکارش در سال ۲۰۱۵، میزان تراست بر واحد حجم را توانستند به میزان معقولی برسانند که قابل‌رقابت با سیستم پیشران متعارف باشد و موفق به طراحی و ساخت یک بالارونده^۲ با استفاده از پیشران یونی شدند [۱۱].

کولاس و همکاران 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 الکتروهایدرودینامیک را تا ۳۵۰ میلی‌نیوتن بر واحد طول الکتروود محاسبه نمودند [۱۲].

کیوسیس و همکاران در سال ۲۰۱۴، پژوهشی مشابه انجام دادند؛ با این تفاوت که در این پژوهش به مطالعه پارامتریک مشخصه‌های هندسی الکترودها توجه بیشتری نشان داده شد. تأثیرات تغییر شعاع آند و کاتد و فاصله بین الکترودها بر نیروی پیشران تولیدی در پژوهش مذکور بررسی شد و یک رابطه خطی بین جریان الکتریکی و نیروی پیشران تولیدی مشاهده گردید. سرعت ایجادشده ناشی از تخلیه کرونا در این پژوهش تا میزان $2/88 \text{ m/s}$ اندازه‌گیری شد [۱۳].

همچنین گیلومر و برت سعی کردند با تغییر پارامترهای هندسی، مقدار بیشینه چگالی نیروی پیشران را برای یک رانشگر الکتروهایدرودینامیکی به صورت تجربی اندازه‌گیری کنند. آنها موفق شدند مقادیر نیروی پیشران بر واحد سطح را تا $3/3 \text{ N/m}^2$ و نیروی پیشران بر واحد حجم را تا 15 N/m^3 محاسبه نمایند [۱۴].

در سال ۲۰۱۷، پراود و همکاران در فرانسه توانستند اثرات آیرودینامیکی استفاده از عملگر پلاسمای کرونا بر روی سطح هواپیمای بدون سرنشین فوق سبک موردبررسی 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 می باشد [۱۵]. در همان سال، پریولت و همکاران در آمریکا توانستند یک مدل ولتاژ بالا با وزن کم و ابعاد کوچک جهت نصب بر روی هواپیمای بدون سرنشین ایجاد نمایند [۱۶]. در سال ۲۰۱۸، دانشمندان برای اولین بار در

برای ایجاد سازگاری الکترومغناطیس و در واقع به حداقل رساندن تأثیرات ناخواسته و تداخلات الکترومغناطیس ناشی از عملکرد منبع تغذیه‌ی 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

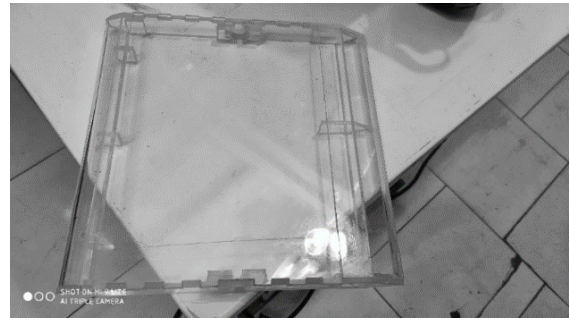


ب) منبع تغذیه ولتاژ بالا منفی
 شکل ۳- منابع تغذیه مورد استفاده.

عملگرهای پلاسمای کرونا

آرایه عملگرهای تخلیه کرونا با فویل آلومینیومی با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر بر روی صفحه تخت ساخته شدند. پس از بررسی و مطالعه مقالات، دو آرایش مختلف در نظر گرفته شد. به دلیل بررسی بیشترین میزان تراست، حداکثر تعداد عملگر تخلیه کرونا روی قسمت تخت صفحه نصب شد، تا سطح صفحه تخت تا حد ممکن دارای بیشترین پوشش تخلیه کرونا شود. عکس‌هایی از دو آرایش متفاوت ساخته شده در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشند. در آرایش اول تعداد ۴ فویل آلومینیومی (جمع کننده) با پهنای ۱/۵ سانتی‌متر ۴ رشته سیم فولادی با قطر ۰/۲۰ میلی‌متر نصب شد که فاصله بین آن‌ها، جهت جلوگیری از برهم‌کنش میدان‌های الکتریکی آن‌ها بر یکدیگر، ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که محل قرارگیری آن‌ها به صورت صفحه-سیم است. در آرایش دوم، تعداد ۳ فویل آلومینیومی با پهنای ۱/۵ سانتی‌متر و ۳ سیم فولادی روی مدل نصب گردید

تا بتوان مدل‌های عملگرهای پلازما را راحت‌تر تعویض کرد. در زیر تصاویری از مدل صفحه تخت با عملگرهای پلاسمای کرونا و بدون آن در شکل ۲ نمایش داده شده است.



الف) صفحه تخت بدون عملگر پلازما



ب) صفحه تخت مورد استفاده با عملگرهای پلاسمای کرونای نصب شده

شکل ۲- مدل صفحه تخت مورد استفاده برای تست

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 پولاریته مثبت و هم پولاریته 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 می‌باشد که دارای نمایشگر ولتاژ خروجی با دقت دهم کیلوولت (۱۰۰ ولت) و نمایشگر جریان خروجی با دقت هزارم میلی‌آمپر می‌باشد. میزان توان مصرفی عملگر پلاسمایی با استفاده از مدار الکتریکی واسط، که به همین منظور طراحی و در خروجی منبع تغذیه تعبیه شده، اندازه‌گیری شده است. شکل ۳ الف) مربوط به منبع تغذیه مثبت و شکل ۳ ب) مربوط به منبع تغذیه منفی می‌باشد.

در رابطه فوق، P نشان‌دهنده نیروی الکتریکی مصرف‌شده، I نشان‌دهنده جریان الکتریکی و V میزان ولتاژ است.



شکل ۵- ترازوی دیجیتال (EK-3200i)

که فاصله بین آن‌ها ۲ سانتی‌متر و فاصله تا عملگر بعدی ۲/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و محل قرارگیری آن‌ها به صورت سیم-صفحه و فاصله متفاوت است تا میزان تأثیر فاصله بین عملگرها در تست‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد.



الف) فاصله بین عملگرهای پلازما دو سانتی‌متر



ب) فاصله بین عملگرهای پلازما دو و نیم سانتی‌متر

شکل ۴- چیدمان‌های مختلفی از نحوه قرارگیری عملگر پلازما

تکرارپذیری نتایج آزمایشگاهی

جهت بررسی تکرارپذیری نتایج آزمایشگاهی هر آزمایش، چندین بار صورت گرفته و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است تا از دقت و صحت نتایج اطمینان حاصل گردد. سپس، مقادیر اندازه‌گیری شده جهت ارزیابی میانگین‌گیری شده است تا یک مقدار معرف به دست آید. نمونه‌ای از نتایج نیروی پیشران و میزان جریان الکتریکی به دست آمده برای کرونای مثبت به ترتیب در جدول ۱ نشان داده شده است. تمامی آزمایشات انجام شده در بالا، هر آزمایش حداقل دو مرتبه تکرار شده است.

جدول ۱- نمونه‌ای از مقادیر به دست آمده با ولتاژ مثبت

الف) آرایش اول					
ولتاژ (kV)	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴
تراست (mN)	۰/۱۱۹	۰/۰۹۸۳	۰/۰۶۸	۰/۰۵۴۲	۰/۰۵۳۷
جریان (mA)	۰/۶۹	۰/۴	۰/۳۱	۰/۲۱	۰/۲۰
ب) آرایش دوم					
ولتاژ (kV)	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴
تراست (mN)	۰/۱۱۷	۰/۰۹۸۰	۰/۰۶۷	۰/۰۵۴۱	۰/۰۵۳۶
جریان (mA)	۰/۶۷	۰/۳۸	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۲۰

نتایج و بحث

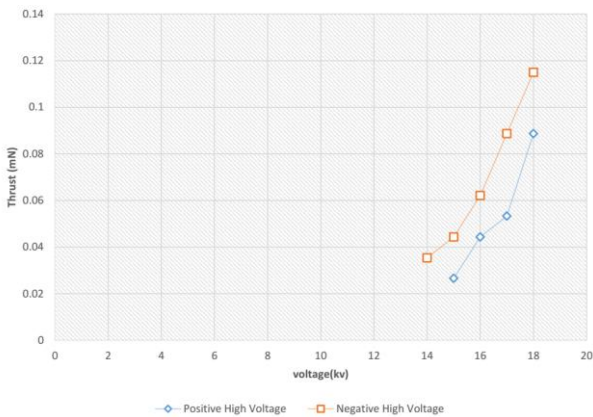
دو آرایش اول و دوم، با دو منبع تغذیه برق مستقیم مثبت و منفی آزمایش شد. نمودارهای نیروی پیشران، جریان الکتریکی و میزان توان مصرفی بر حسب ولتاژ در ادامه ارائه شده است. محدوده، ولتاژ از ۱۳ تا ۱۸ کیلوولت مورد بررسی

دستگاه اندازه‌گیری نیروی پیشران

اندازه‌گیری نیروی پیشران تولیدشده به وسیله محرک پلاسمایی، پارامتر مهمی در ارزیابی عملکرد آن می‌باشد. برای اندازه‌گیری نیروی پیشران ترازوی دیجیتال (EK-3200i) با دقت صدم گرم برای محاسبه نیرو که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، استفاده شده است. به دلیل ولتاژ و فرکانس بالای عملکردی محرک پلاسمایی، همواره تابش امواج الکترومغناطیس از سیستم محرک پلاسمایی، سیم‌های انتقال ولتاژ روی می‌دهد. به منظور جلوگیری از این آثار بر روی ترازوی دیجیتالی آن را درون قفس فارادی قرار داده شده است. دقت اندازه‌گیری نیروی پیشران با این روش $\pm 0.2 \text{ mN/m}$ است. مقادیر توان الکتریکی از معادله زیر محاسبه می‌شود:

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

آبی نشان‌دهنده کرونا مثبت و خط نارنجی نشان‌دهنده کرونا منفی می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تا قبل از تشکیل کرونا، نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود و پس‌از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا، شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود در کرونا مثبت ابتدا در ولتاژ ۱۵ کیلوولت، کرونا تشکیل می‌شود و با افزایش آن تا ۱۸ کیلوولت شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم. با وصل کردن آرایش دوم به منبع تغذیه ولتاژ بالای منفی، کرونا زودتر تشکیل می‌گردد و در کرونا منفی از ۱۴ کیلوولت شاهد نیروی پیشران هستیم که با افزایش میزان ولتاژ، میزان نیروی پیشران نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌گردد، میزان نیروی پیشران حاصل از کرونا منفی از کرونا مثبت بیشتر است.



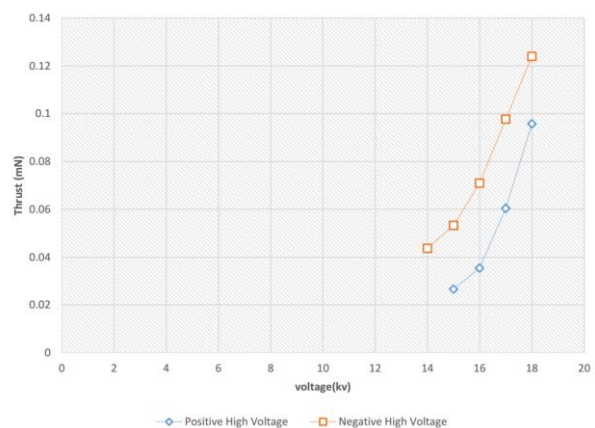
شکل ۷- نمودار نیروی پیشران بر حسب ولتاژ در آرایش دوم

در شکل ۸ الف) و ب) نمودار نیروی پیشران بر حسب ولتاژ مربوط به آرایش‌های اول و دوم در کرونا مثبت و منفی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نکته جالب توجه این است که افزایش ولتاژ در هر دو آرایش، تأثیر بسزایی در میزان نیروی پیشران تولیدی توسط عملگرهای پلاسما کرونا دارد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در کرونا منفی، مدل اول و دوم به یک‌میزان تولید نیروی پیشران می‌کنند. در نمودار مربوط به کرونا مثبت مشاهده می‌گردد، میزان تولید نیروی پیشران در آرایش اول نسبت به آرایش دوم کمی بیشتر است.

قرار گرفت. زیرا در کمتر از ۱۳ کیلوولت، تخلیه کرونا صورت نمی‌پذیرد.

نتایج مربوط به اندازه‌گیری نیروی پیشران آرایش اول در شرایط کرونا مثبت و منفی

در ابتدا، آرایش اول مورد تست و آزمایش قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در آرایش اول، با افزایش ولتاژ، شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم. خط آبی نشان‌دهنده کرونا مثبت و خط نارنجی نشان‌دهنده کرونا منفی می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تا قبل از تشکیل کرونا، نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود و پس‌از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود در کرونا مثبت ابتدا در ولتاژ ۱۵ کیلوولت، کرونا تشکیل می‌شود و با افزایش آن تا ۱۸ کیلوولت شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم. با وصل کردن آرایش اول به منبع تغذیه ولتاژ بالای منفی، کرونا زودتر تشکیل می‌گردد و در کرونا منفی از ۱۴ کیلوولت شاهد نیروی پیشران هستیم که با افزایش میزان ولتاژ، میزان نیروی پیشران نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌گردد، میزان نیروی پیشران حاصل از کرونا منفی از کرونا مثبت بیشتر است. همچنین میزان نیروی پیشران بر حسب ولتاژ، هر دو نمودار به صورت تقریباً خطی می‌باشند.

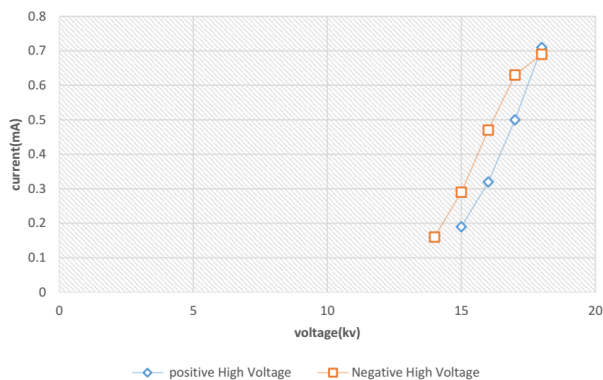


شکل ۶- نمودار نیروی پیشران بر حسب ولتاژ در آرایش اول

آرایش دوم در شرایط کرونا مثبت و منفی

در مرحله بعد، آرایش دوم مورد تست و آزمایش قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در آرایش دوم، با افزایش ولتاژ شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم. خط

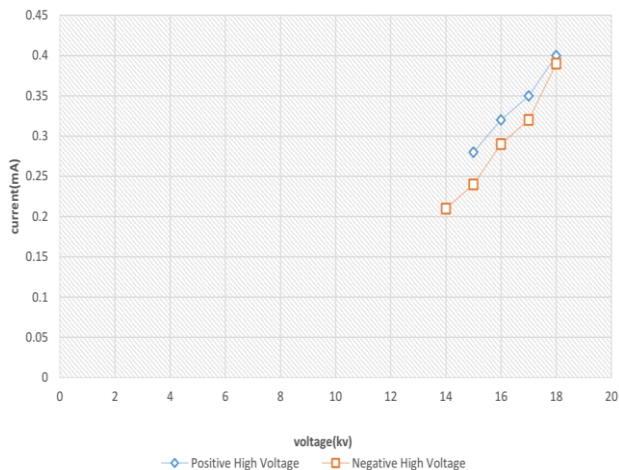
افزایش جریان الکتریکی هستیم که با استفاده از دستگاه‌های ولتاژ بالا قابل مشاهده است. در کرونا منفی، از ۱۴ کیلوولت تولید جریان الکتریکی بین دو الکتروود برقرار می‌گردد.



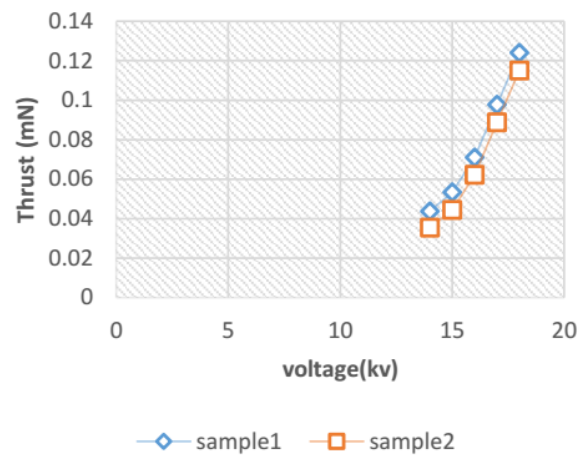
شکل ۹- نمودار تغییرات جریان برحسب ولتاژ در آرایش اول

آرایش دوم در شرایط کرونا مثبت و منفی

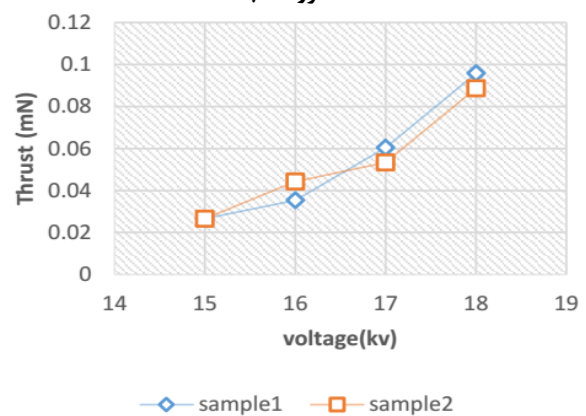
جهت بررسی میزان جریان الکتریکی، در مرحله دوم، آرایش دوم مورد بررسی قرار گرفت. خط آبی نشان‌دهنده کرونا مثبت و خط نارنجی نشان‌دهنده کرونا منفی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود تا قبل از تشکیل کرونا، چون نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود، جریان الکتریکی بین دو الکتروود برقرار نیست و پس‌از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل تخلیه کرونا، شاهد افزایش جریان الکتریکی هستیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در کرونا مثبت از ولتاژ ۱۵ کیلوولت و منفی ابتدا در ولتاژ ۱۴ کیلوولت با شروع تخلیه کرونا با ایجاد جریان الکتریکی روبه‌رو می‌شویم و با افزایش ولتاژ تا ۱۸ کیلوولت شاهد افزایش جریان الکتریکی هستیم ولی در کرونا مثبت، روند صعودی بیشتر از کرونا منفی است.



شکل ۱۰- نمودار جریان الکتریکی برحسب ولتاژ در آرایش دوم



الف) کرونا مثبت



ب) کرونا منفی

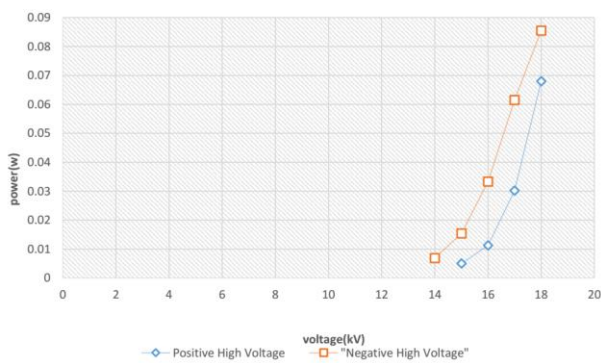
شکل ۸- نمودار مقایسه تغییرات نیروی پیشران برحسب ولتاژ در آرایش اول و دوم. نمودار آبی (آرایش اول) و نمودار قرمز (آرایش دوم)

نتایج جریان الکتریکی

آرایش اول در شرایط کرونا مثبت و منفی

جهت بررسی میزان جریان الکتریکی، در ابتدا، آرایش اول مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۹، نمودار جریان الکتریکی برحسب ولتاژ برای آرایش اول نشان داده شده است. خط آبی نشان‌دهنده کرونا مثبت و خط نارنجی نشان‌دهنده کرونا منفی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تا قبل از تشکیل کرونا، چون نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود جریان الکتریکی هم نداریم و پس‌از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا شاهد افزایش جریان الکتریکی هستیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ، میزان جریان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. همچنین، در کرونا مثبت ابتدا در ولتاژ ۱۵ کیلوولت، با شروع تخلیه کرونا، جریان الکتریکی بین دو الکتروود برقرار می‌شود و با افزایش ولتاژ تا ۱۸ کیلوولت شاهد

جهت بررسی میزان توان الکتریکی مصرفی، در ابتدا، آرایش اول مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، تا قبل از تشکیل تخلیه کرونا، چون نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود، افزایش جریانی الکتریکی نداریم و در نتیجه توان مصرفی نیز صفر است 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 ۱۵ کیلوولت، با شروع تخلیه کرونا با توان الکتریکی قابل محاسبه می‌شود و با افزایش آن تا ۱۸ کیلوولت شاهد افزایش مقدار توان الکتریکی مصرفی هستیم و در کرونا منفی، ولتاژ شروع، ۱۴ کیلوولت می‌باشد. هر دو نمودار مرتبط به میزان توان مصرفی بر حسب ولتاژ، به صورت تقریباً خطی بوده و نشان‌دهنده این است که، با افزایش ولتاژ، میزان جریان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد.

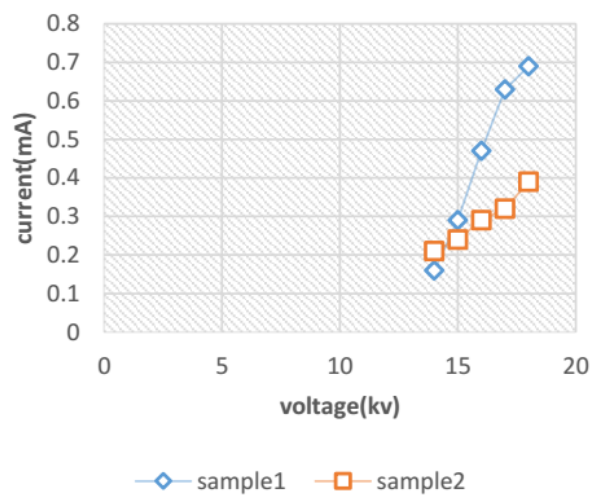


شکل ۱۲- نمودار تغییرات توان مصرفی بر حسب ولتاژ در آرایش اول

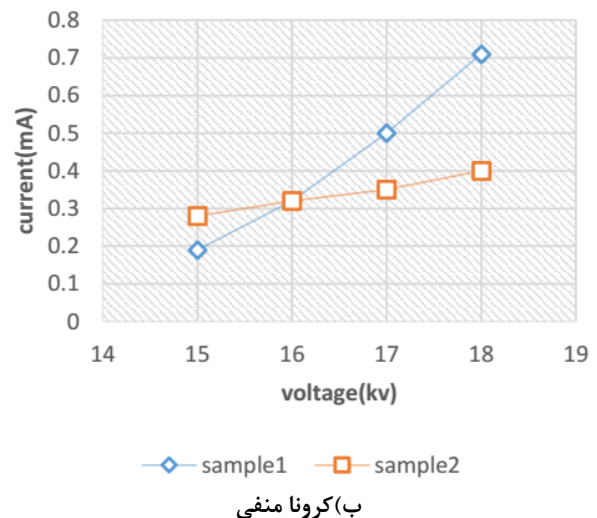
آرایش دوم در شرایط کرونا مثبت و منفی

در مرحله بعد، برای محاسبه میزان توان مصرفی، از آرایش دوم استفاده شد. همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، تا قبل از تشکیل کرونا، چون نیروی پیشران وجود ندارد، افزایش جریانی 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. همان طور که مشاهده می‌شود، در کرونا مثبت، ابتدا در ولتاژ ۱۵ کیلوولت، با شروع کرونا با افزایش توان الکتریکی روبه‌رو می‌شویم و با افزایش آن تا ۱۸ کیلوولت شاهد مقدار توان مصرفی بیشتر هستیم و در کرونا منفی در ولتاژ ۱۴ کیلوولت شاهد توان الکتریکی هستیم. همان گونه که مشاهده می‌شود، در کرونا منفی روند صعودی بیشتر از کرونا مثبت است.

در شکل ۱۱، جریان الکتریکی مربوط به آرایش‌های اول، دوم در کرونای مثبت و منفی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نکته جالب توجه این است که افزایش ولتاژ در آرایش اول، نسبت به آرایش دوم تأثیر بسزایی در جریان تولیدی توسط عملگرهای پلاسمای کرونا دارد و منجر به افزایش جریانی الکتریکی به دست آمده از کرونا می‌گردد. با توجه به کرونای منفی، میزان تولید جریانی الکتریکی در آرایش اول بیشتر است و همچنین در کرونا مثبت هم آرایش اول روند صعودی تری نسبت به آرایش دوم داشته است.



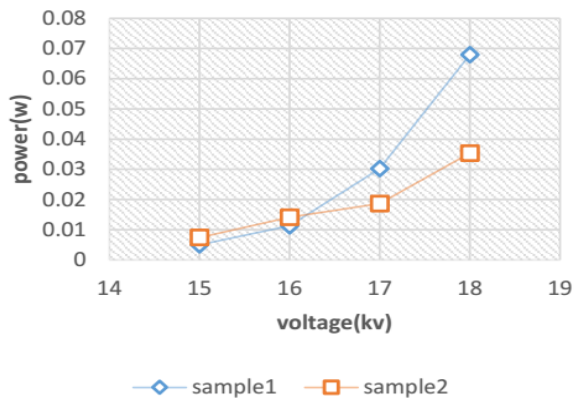
الف) کرونا مثبت



ب) کرونا منفی

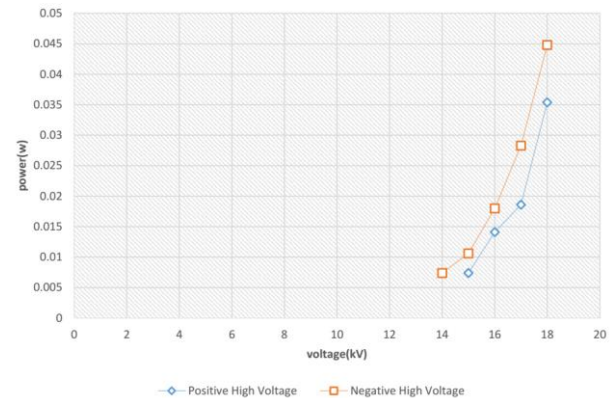
شکل ۱۱- نمودار مقایسه جریانی الکتریکی بر حسب ولتاژ در آرایش اول و دوم. نمودار آبی (آرایش اول) و نمودار قرمز (آرایش دوم)

نتایج آزمایش‌های توان الکتریکی
 آرایش اول در شرایط کرونا مثبت و منفی



ب) کرونا منفی

شکل ۱۴- نمودار مقایسه تغییرات توان الکتریکی برحسب ولتاژ در آرایش اول و دوم. نمودار آبی (آرایش اول) و نمودار قرمز (آرایش دوم)



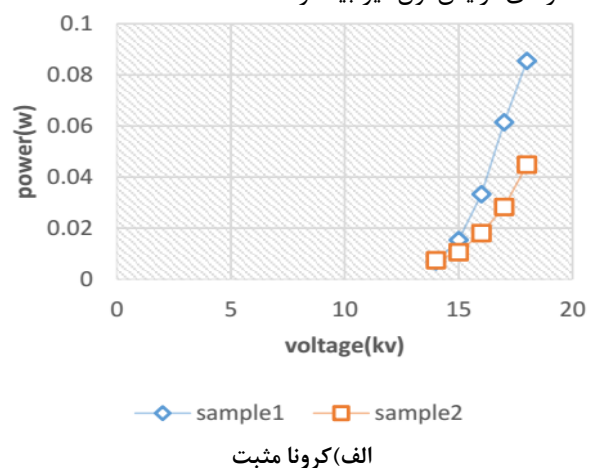
شکل ۱۳- نمودار تغییرات توان مصرفی برحسب ولتاژ در آرایش دوم

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر عملگرهای تخلیه کرونا در دو آرایش الکترودها و همچنین تأثیر آن‌ها بر نیروهای آیرودینامیکی پرداخته شده است. با توجه به آنچه در مقالات، آزمایش‌ها و تحلیل‌ها بررسی شد و همچنین نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی آیرودینامیکی دلالت بر این نکته دارد که کرونا باعث به وجود آمدن یک باد یونی روی سطح مدل می‌شود، نسبت به ولتاژی که با آن کرونا تشکیل می‌شود این باد می‌تواند کم یا زیاد شود.

با توجه به نیروهای آیرودینامیکی به‌دست‌آمده از نتایج می‌توان نتیجه گرفت که عملگرهای کرونا می‌تواند باعث ایجاد نیروی پیشران نیز می‌شود که به‌طور مستقیم با میزان ولتاژ آن در ارتباط است. رابطه بین تغییرات ولتاژ با نیروی پیشران به‌صورت تقریباً خطی می‌باشد و افزایش ولتاژ باعث رشد بیشتر نیروی پیشران می‌گردد. همچنین در آزمایش‌های آیرودینامیکی انجام‌شده، مشاهده گردید که پس از تشکیل کرونا و اندازه‌گیری نیروی پیشران، توان مصرفی و جریان الکتریکی پس از تشکیل کامل کرونا، شاهد افزایش نیروی پیشران و توان مصرفی برحسب ولتاژ هستیم و همچنین مقایسه‌ای بین آرایش‌های مختلف و ولتاژهای مختلف نیز بررسی گردید. در هر دو آرایش، میزان نیروی پیشران و توان الکتریکی مصرفی در کرونای منفی از کرونای مثبت بیشتر است. چون تعداد عملگرهای پلاسمای کرونا در آرایش اول از آرایش دوم بیشتر است، به نظر می‌رسد منجر به افزایش نیروی

در شکل ۱۴، میزان توان الکتریکی مصرفی مربوط به آرایش اول و دوم در کرونا مثبت و منفی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. خط آبی نشان‌دهنده کرونای مثبت و خط نارنجی نشان‌دهنده کرونای منفی می‌باشد. نکته جالب توجه این است که افزایش ولتاژ در آرایش‌های اول و دوم، تأثیر بسزایی در توان تولیدی توسط عملگرهای پلاسمای کرونا دارد و منجر به افزایش نیروی به‌دست‌آمده از تخلیه کرونا می‌شود. نکته جالب توجه این است که با وجود افزایش میزان نیروی پیشران در مدل دوم در تخلیه کرونای هر دو مدل، در مدل اول توان الکتریکی بیشتری مصرف می‌شود، که طبیعی است چون تعداد عملگرهای آرایش اول نیز بیشتر است.



الف) کرونا مثبت

atmospheric pressure”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 108, No. 10, pp. 1-6, 2010.

[13]. K. Kioussis, N. A. X., Moronis and W. G. Fruh, “Electro-Hydrodynamic (EHD) thrust analysis in wire-cylinder electrode arrangement”, *Journal of Plasma Science and Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 363-369, 2014.

[14]. C. K. Gilmore and S. R. H. Barrett, “Electro hydrodynamic thrust density using positive corona-induced ionic winds for in-atmosphere propulsion”, *Proceeding of the Royal Society A*, Vol. 471, No. 20140912, 2015.

[15]. O. Praud, N. Monrolin and F. Ploouraboue, “Electrohydrodynamic thrust for in-atmosphere propulsion”, *Journal of AIAA*, AIAA No. 554296-4305, 2017.

[16]. D. J. Perreault, Y. He and M. R. Woolston, “Design and implementation of a lightweight high-voltage power converter for electro-aerodynamic propulsion”, *IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, IEEE*, 2017.

[17]. D. S. Drew, N. O. Lambert, C. B. Schindler and K. J. Pister, “Toward controlled flight of the ionocraft: a flying micro robot using electro hydrodynamic thrust with onboard sensing and no moving parts”, *IEEE Robotics Automation Letter*, Vol. 3, pp. 2807-2813, 2018.

پیشران و میزان توان الکتریکی در آرایش اول نسبت به آرایش دوم می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

- ۱ Photovoltaic
- ۲ lifter

منابع و مراجع

- [1]. F. Hauksbee, *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects*, First Edition, pp. 46-47, London: Brugis, 1709.
- [2]. F. Hauksbee, *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects*, First Edition, pp. 46-47, London: Brugis, 1709.
- [3]. I. Newton, *Optics*, London: Printers to the Royal Society, pp. 25-27, 1718.
- [4]. A. P. Chattock, “On the velocity and mass of the ions in the electric wind in air,” *Philosophical Magazine*, Vol. 48, No. 294, pp. 401-420, 1899.
- [5]. D. J. Harney, “An aerodynamic study of the electric wind”, PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 1957.
- [6]. L. Sanborn, C. Brown, “Electrical coronas: Their basic physical mechanisms”, *Academic Press*, Vol.19, No. 1, 1966.
- [7]. E. A. Christenson and P. S., Moller, “Ion-Neutral propulsion in atmospheric media”, *Journal of AIAA*, Vol. 5, pp.1768-1773, 1967.
- [8]. H. Bondar, F. Bastein, “Effect of neutral fluid velocity on direct conversion from electric to fluid kinetic energy in an electro-fluid-dynamic device,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 19, No. 9, pp. 1657-1663, 1986.
- [9]. J. Wilson, H. D. Perkins and W. K. Thompson, “An investigation of ionic wind propulsion,” *Report No. NASA/TM 2009-215822*, NASA, 2009.
- [10]. S. H. Barrett, K. Masuyama, “On the performance of electrohydrodynamic propulsion,” *Proceeding of the Royal Society A*, Vol. 469, No. 20120623, 2013.
- [11]. S. H. Barrett and C. K. Gilmore, “Electro hydrodynamic thrust density using positive corona-induced ionic winds for in-atmosphere propulsion”, *Proceeding of the Royal Society A*, Vol. 471, No. 20140912, 2015.
- [12]. D. F. Colas, A. Ferret, D. Z. Pai, D. A. Lacoste and C. O. Laux, “Ion wind generation by a wire-cylinder-plate corona discharge in air at