بررسی تجربی میزان نیروی پیشران و سرعت باد یونی با استفاده از تخلیه کرونا در چینشهای مختلف در کرونای مثبت و منفی

روحالله خوشخو ۗ	استادیار، مهندسی هوافضا، گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر،
	r.khoshkhoo@aut.ac.ir ايران،
محمدجواد معماري	دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران، meamarijavad@gmail.com
معصومه آقايى ملكآبادى	کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران، masoomaghaie17@gmail.com

چکیدہ

در دو دهه اخیر، استفاده از تخلیه کرونا بهعنوان یک سیستم پیشران پلاسمایی موردتوجه بسیاری از محققین هوافضا قرار گرفته است. در این تحقیق، بهمنظور دست یافتن به نیروی پیشران بیشتر و ضریب اثربخشی بالاتر، مطالعاتی در زمینه تخلیه کرونا در فشار اتمسفری با ایجاد شرایط هندسی متفاوت الکترودها، در چینش آرایهای و اعمال ولتاژهای مختلف با قطبشهای متفاوت انجامشده است. یکی از رایجترین پیکربندیها در تخلیه کرونا، پیکربندی سیم-استوانه است. در تحقیق حاضر با استفاده از پیکربندی سیم-استوانه به شکل آرایهای و در چینشهای مختلف و با استفاده از ولتاژهای اعمالی مثبت-زمین، منفی-زمین و مثبت-منفی به بررسی نیروی پیشران تولیدشده در شرایط متفاوت پرداختهشده است. در این تحقیق، میزان نیروی پیشران تولیدشده و نسبت نیروی پیشران تولیدشده به توان مصرفی سیستم بررسی شد. همچنین سری و موازی قرار گرفتن الکترودها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بهدستآمده نشان میدهد، اعمال کرونای مثبت-منفی، نیروی پیشران و سرعت باد یونی بیشتری نسبت به اعمال ولتاژ مثبت-زمین یا منفی-زمین ایجاد کرده است. الکترودها، ضریب اثربخشی (راندمان) سیستم افزایش میابد که البته این افزایش به شکل غیرخطی است. در نهرین یمزان نیروی پیشران مولیده با افزایش تعداد الکترودها در شرایط یکسان و سرعت باد یونی بیشتری نسبت به اعمال ولتاژ مثبت-زمین یا منفی-زمین ایجاد کرده است. همچنین با افزایش تعداد الکترودها در شرایط یکسان نسبت به حالت موازی، مقدار نیروی پیشران مولیه مین امنی می مود ارزیابی قرار گرفت. نتایج بهدستآمده نشان میدهد، اعمال روازه مثبت-زمینی، نیروی پیشران و سرعت باد یونی بیشرین نسبت به اعمال ولتاژ مثبت-زمین یا منفی-زمین ایجاد کرده است. همچنین با افزایش تعداد الکترودها در شرایط یکسان نسبت به حالت موازی، مقدار نیروی پیشران حدود ۴۰ درصد و توان مصرفی حدود ۲۵ درصد افزایش میابد.

Experimental Investigation of the Thrust and Ion Wind Velocity Using Corona Discharge in Different Arrangements in Positive and Negative Coronas

R. Khoshkhoo	Aerospace Engineering, Aerodynamics, Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran
M. J. Memari	Aerospace Engineering, Aerodynamics, Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran
M. Aghaei Malekabadi	Aerospace Engineering, Aerodynamics, Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

Abstract

In the last two decades, the use of corona discharge as a plasma propulsion system has attracted the attention of many aerospace scientists. In this research, in order to achieve more thrust and higher effectiveness, studies have been conducted on corona discharge in atmospheric pressure by creating different geometrical conditions of electrodes, in array arrangement and applying different voltages with different polarities. One of the most common configurations in corona discharge is wire-cylinder configuration. In this research, by using wire-cylinder configuration in array form and in different arrangements and using positive-ground, negative-ground and positive-negative applied voltages, the thrust produced in different conditions has been investigated. In this research, the amount of thrust and the effectiveness of the system were investigated. Also, the series and parallel positioning of the electrodes was evaluated. The obtained results show that applying positive-negative corona or negative corona. Also, with the increase in the number of electrodes, the effectiveness coefficient (efficiency) of the system increases, although this increase is non-linear. Finally, the results show that by making the electrodes in series in the same conditions compared to the parallel mode, the thrust increases by about 40% and the power consumption increases by about 25%.

Keywords: Corona Discharge- Plasma Propulsion- Ionic Wind- Experimental Survey- positive corona- negative corona.

۱- مقدمه

و بدون نیاز به سوخت و احتراق، پیشنهادشده است. نوعی از پیشرانهای الکتروآیرودینامیک، استفاده از عملگرهای کرونا است. عملگر پلاسمای کرونا، عملگرهایی هستند که بر پایه تخلیه الکتریکی کرونا میباشند. در این نوع عملگر، با افزایش اختلاف ولتاژ بین دو الکترود باضخامتهای متفاوت تا جایی که قوس الکتریکی رخ ندهد، میدان الکتریکی در اطراف الکترود آند افزایش مییابد که بهتبع آن

در ۱۰۰ سال گذشته، برای پرواز از سطوح متحرک مثل پروانهها و توربینها استفاده میشده که اکثراً با سوخت فسیلی کار میکنند. امروزه، الکتروآیرودینامیک که در آن نیروهای الکتریکی به یونها در سیال سرعت می خشند، بهعنوان یک روش جایگزین برای تولید نیروی پیشران نسل جدید وسایل پرنده، بدون قطعات متحرک، تقریباً بی صدا

[®] نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: r.khoshkhoo@aut.ac.ir تاریخ دریافت: ۲۰/۰۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۲/۱۰۲/۱۰

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 جریانی را بین دو الکترود به وجود میآورد.

معمولاً عملگرهای کرونا از دو الکترود تشکیل شدهاند که توسط یک منبع اختلاف پتانسیل مستقیم(DC) تحریک می شود به الکترود با قطر کوچکتر، گسیل کننده (امیتر) و به الکترود با قطر بزرگتر، جمع-کننده (کالکتور) گفته می شود. به این عملگرها را عملگر باد کرونا (باد یونی) می گویند. چگونگی شکل گیری باد یونی و پلاسما به عوامل زیادی همچون: شکل و جنس الکترودها، میزان جریان برق مستقیم، نوع گاز اطراف الکترودها، محدودیتهای هندسی ایرفویل، خصوصیات هوای اطراف و غیره بستگی دارد. یک نمونه از تولیدکننده باد یونی در شکل ۱ ارائه شده است. عملگر پلاسما تحت تأثیر نوع تخلیه کرونا نیز می باشند. درصورتی که امیتر به قطب مثبت و کالکتور به زمین متصل شود، کرونای مثبت و درصورتی که که امیتر به قطب منفی و کالکتور به زمین متصل شود، کرونا از نوع منفی می باشد؛ و درصورتی که که امیتر به قطب مثبت و کالکتور به قطب منفی می باشد؛ و درصورتی که که امیتر به قطب مثبت و کالکتور به قطب منفی می باشد؛ و درصورتی که که امیتر به قطب مثبت و کالکتور به قطب منفی می باشد؛ و درصورتی که که امیتر به قطب مثبت و کالکتور به قطب منفی می باشد؛ و درصورتی که که امیتر



شکل ۱- طرحوارهای از عملگر کرونا

اولین مشاهده جریان الکتروهیدرودینامیک در سال ۱۷۰۹، توسط هاکزبی صورت گرفت. وی متوجه تولید جریان هوایی با سرعت کم هنگام اعمال ولتاژ بین دو الکترود شد که بعدها این پدیده توسط نیوتن "باد یونی" نامیده شد[1].

با توسعه روشهای عددی، تحقیق و بررسی جریان الکتروهیدرودینامیک بهصورت عددی نیز آغاز شد تا در سال ۱۹۸۳، دیویس 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 الکترود سیم-سیلندر پرداختند. نتایج نشان داد که میزان میدان الکتریکی وابسته به فاصله پرداختند. نتایج نشان داد که میزان میدان الکتریکی وابسته به فاصله پرداختند. نتایج نشان داد که میزان میدان الکتروهیدرودینامیک را بین دو الکترود و میزان ولتاژ ورودی میباشد[۳]. در سال ۲۰۰۸، جول لارسن و همکارانش، شبیه سازی عددی جریان الکتروهیدرودینامیک را با دقت بالایی انجام دادند. سپس نتایج حاصله را با نتایج تجربی مقایسه کردند. میانگین خطا بین نتایج تجربی و شبیه سازی، چهار درصد گزارش شده است[۴].

تامپسون و پرکینز در سال ۲۰۰۹، با حمایت و پشتیبانی ناسا، به

بررسی استفاده از عملگر پلاسمای کرونا جهت تولید نیروی پیشران برای سیستم پیشران هواپیما اقدام نمودند. آنها توانستند میزان نیروی پیشران ۵ نیوتن بر هر کیلوولت را از عملگر پلاسمای کرونا بدست آورند[۵]. در سال ۲۰۱۰، کلاس و همکارانش در چینش پنج الکترودی 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 باد یونی با سرعت ۱۰ متربرثانیه دست یافتند[۶].

کاچی 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، مبزان ولتاژ آستانه تخلیه کرونا کاهش مییابد و میزان جریان الکتریکی افزایش مییابد[۲]. موریاو در پژوهش تجربی خود در سال ۲۰۱۵، سعی کرد با تغییر تعداد و نحوهی چیدمان کاتدها، میزان راندمان 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 در سال ۲۰۱۷، 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 الکترود سیم(امیتر) میتواند به کاهش ضخامت لایه مرزی گرمایی و افزایش شیب سرعت لایه مرزی کمک کند و درنتیجه باعث افزایش انتقال گرما شود[۹].

در سال ۲۰۱۸، زو و همکاران با مطالعه نظری عملکرد عملگرهای کرونا به این نتیجه رسیدند که در فضای یک بعدی، تئوری الکتروآیرودینامیک نشان داد که بازده یک پیشرانش ایده آل بیشتر از ۵۰ درصد خواهد بود[۱۰]. در سال ۲۰۱۸ برای نخستین بار درو و همکارانش، یک میکرو ربات را با استفاده از نیروی پیشران حاصل از تخلیه کرونا با حسگر پردازنده و بدون نیاز به بخش متحرک به پرواز ممکاران 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 چشم گیری در میزان نیروهای هیدرودینامیک، سرعت باد یونی و همچنین نیروی پیشران را شاهد بود[۲].

کوگلو 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[۱۳]. گو و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی تاثیر کرونای مثبت و منفی بر میزان نیروی پیشران در پیکربندی صفحه-سوزن پرداختند. نتایج نشان داد که کرونای منفی میزان نیروی پیشران بیشتری در این پیکربندی نسبت به کرونای مثبت تولید میکند[۱۴].

در ایران در سال ۲۰۱۹، رژیم تخلیه الکتریکی کرونا در یک پیکربندی سیم-سیلندر در دانشگاه شهید بهشتی شبیهسازی شد و مشاهده شد که میزان اختلاف نتایج شبیهسازی با مقدار نتایج اندازهگیری شده در حدود شش درصد بود[۱۵]. در سال ۲۰۱۹، فتحی و همکارش، به شبیهسازی جریان پلاسما در یک رانشگر الکتروهیدرودینامیک به صورت دو الکترود کاتد و یک الکترود آند پرداختند. نتایج نشان داد که در صورت افزایش تعداد کاتدها، میزان نیروی پیشران و راندمان افزایش مییابد[۱۶]. در سال ۱۴۰۲، آقایی و همکاران به شبیهسازی عددی تخلیه کرونا برای پیکربندی سیم- ایرفویل پرداختند؛ و فاصله بین دو الکترود موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان میدهد که افزایش هر کیلوولت ولتاژ، میزان نیروی نتایج حاصل از تحقیقات نشان میدهد، نیروی تولیدشده

یع می رابط مستقیم بهوسیلهی باد یونی، با مقدار جریان الکتریکی سیستم رابطه مستقیم دارد، زیرا شدتجریان الکتریکی وابسته به نوع پیکربندی، شکل و نحوه قرارگیری ساطع کنندهها و صفحه جمع آوری کنندهها (کالکتورها) می باشد. با وجود تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، هنوز ابهامات زیادی در رابطه با نحوه چینش و تأثیر آن بر میزان نیروی پیشران، سرعت باد یونی و ضریب اثربخشی وجود دارد. هدف از انجام این تحقیق، بررسی پارامتری تأثیر چینش در تخلیه کرونای مثبت و منفی و در دو حالت سری و موازی می باشد.

۲- ابزار و تجهیزات آزمایشگاهی

در این بخش، وسایل و تجهیزات آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش بر روی سیستم تخلیه کرونا موردبررسی قرار میگیرد.

۲−۱− منبع تغذيه ولتاژ بالا

برای ایجاد تخلیه کرونا برای تولید نیروی پیشران باید از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا که ولتاژ مستقیم تولید میکند، استفاده نمود. منابعی که هم قابلیت تولید پولاریته مثبت و هم پولاریته منفی را داشته باشند. این منابع که بهصورت دو دستگاه جدا مثبت و منفی با ولتاژ خروجی مثبت ۳۵ کیلوولت و منفی ۳۵ کیلوولت و همچنین توان دستگاه ۳۵ وات میباشد که دارای نمایشگر ولتاژ خروجی با دقت دهم میلولت (۱۰۰ ولت) و نمایشگر جریان خروجی با دقت هزارم مثبت و منبع تغذیه منفی میباشد. قابلذکر است که ایجاد قوس در مثبت و منبع تغذیه منفی میباشد. قابلذکر است که ایجاد قوس در الکتریکی بیشتر از حد میکروآمپر خواهد شد که میتواند منجر به خرابی میکروآمپر و حتی ولتمتر شود. لذا برای جلوگیری از وقوع این بهصورت سری به هم متصل شدهاند، استفاده شده است ؛ که در شکل ۲ ایشان دادهشده است.



شكل ٢- منبع تغذيه ولتاژ بالا مثبت



شكل ٣- منبع تغذيه ولتاژ بالا منفى



شکل ۴-پنج عدد مقاومت با ظرفیت ۱مگا اهم که بهصورت سری به هم متصل شدهاند.

۲-۲- اسیلوسکوپ

اسیلوسکوپ یک دستگاه اندازه گیری است که از آن برای مشاهده شکل موجها و اندازه گیری ولتاژ، زمان تناوب، اختلاف فاز و همچنین مشاهده منحنی مشخصه ولت-آمپر مدارهای الکتریکی و پلاسما، استفاده میشود. اسیلوسکوپها در نوع آنالوگ و دیجیتال ساخته میشوند که در این تحقیق از نوع دیجیتال آن استفاده شده که تصویر آن در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- اسیلوسکوپ مورداستفاده در آزمایشگاه

۲-۳- لوله پیتو استاتیک

اندازه گیری های سرعت با روش های مختلفی مانند سرعتسنجی تصویر ذره، سیم داغ و لوله پیتو انجام می شود. در این تحقیق، از لوله پیتو، جهت بررسی میزان سرعت جریان سیال استفاده شد. یک نمونه از لوله پیتو به همراه میکرو مانومتر MP-110 ساخت شرکت KIMO در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶- میکرو مانومتر در کنار لوله پیتو.

شريه مهندسى

وسعت انتخاب در این زمینه با توجه به چیدمان آزمایشگاهی میتواند متفاوت باشد. یک نمونه ترازو و میکرو نیروسنج آنالوگ در شکل ۷ نشان دادهشده است.

برای اندازه گیری نیروی پیشران، از نیروسنج میلی نیوتونی استفاده شد و یا از ترازو با دقت صدم گرم بهعنوان یک نیروسنج استفاده نمود.

۲-۴- نیروسنج یا ترازو



۲-۵- الکترودهای عملگر پلاسمای کرونا

تخلیه کرونا بین الکترود سیم مسی با طول ۲۰ سانتیمتر و قطر ۰/۱ میلیمتر و الکترود استوانهای با طول ۲۰ سانتیمتر و قطر ۱۰ میلیمتر ایجاد می شود. فاصله بین هر الکترود سیم ۳ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۸، هر دو الکترود توسط بازوهای عایق به دوپایه عایق نگهداشته میشوند و از هم ۳ سانتیمتر فاصلهدارند. مطابق با شكل ٩، الكترود سيم از جنس مس و الكترود استوانه از جنس آلومینیوم در نظر گرفتهشده است. وزن سیستم طراحی شده بدون الکترودها ۳۹۰ گرم اندازه گیری شده است. وزن هر الکترود استوانه ۱۳ گرم و هر الکترود سیم ۰/۵گرم است.



شکل ۸- تصویری از پایه نگهدارنده الکترودها



شکل ۹- تصویر الکترودهای سیم (مس) و استوانه (آلومینیوم)

۳- روشهای اندازهگیری و چیدمان آزمایشگاهی ۳-۱- طراحی سیستم تخلیه کرونا

تخلیه کرونا بین الکترود سیم مسی با طول ۲۰ سانتیمتر و ضخامت ۰/۲ میلیمتر و الکترود استوانه ای با طول ۲۰ سانتیمتر و ضخامت ۱۰ میلیمتر ایجاد می شود. مطابق شکل ۱۰، هر دو الکترود توسط بازوهای عایق (شماره ۲ در شکل) به دوپایه عایق (شماره ۱ در شکل) نگهداشته می شوند که از یکدیگر ۳ سانتی متر فاصله دارند. میله فلزی (شماره ۳ در شکل) که روی یک تکیه گاه قرار دارد (شماره ۴ در شکل)، ازیک طرف به سیستم تخلیه کرونا و از طرف دیگر به چندین وزنه ۵ گرم متصل است (شماره ۷ در شکل). کل مجموعه در ترازو دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم متعادل است (شماره ۶ در شکل). بهمنظور محافظت از ترازوی دیجیتالی، در درون قفس فارادی قرار داده شده است (شماره ۵ در شکل). کلیه آزمایشات در دمای ۲۲ درجه سلسیوس و رطوبت ۷۵ درصد انجامشده است. این چیدمان بهمنظور اثبات مفهومی و نمونه اولیه اندازهگیری استفادهشده است.



الف) سیستم آزمایش ب) جهت باد یونی و نیروی پیشران شکل ۱۰- طرحواره سیستم آزمایش و نحوه ایجاد نیروی پیشران

۲-۳- نحوه اندازه گیری نیروی پیشران

یکی از نیروسنجهای مناسب برای اندازه گیری نیروی پیشران، نیروسنج میلی نیوتونی SI-603 است. طرحوارهای از روش اندازه گیری نیروی پیشران در شکل ۱۱ نشان دادهشده است. برای جلوگیری از نویزها و الزامات حفاظهای الکترومغناطیسی، در چیدمان اندازهگیری نیرو می توان از یک نیروسنج فنری ساخت شرکت Leybold با دقت ۱ میلینیوتون بهجای ترازوهای دیجیتالی که بهطور رایج در اندازه گیری نيرو به كار مىروند، استفاده كرد. نيروسنج و نحوه نصب آن در شكل ۱۲ نشان دادهشده است. طبق شکل ۱۲، سامانه تخلیه کرونا به انتهای میلهای نصب شده و از آنجایی که اندازه نیروی پیشران تولیدشده کوچک است، تکیهگاه و نیروسنج در نقاط معینی از طول میله قرار داده میشوند تا نیروی مؤثر بزرگتری تولید شود. با استفاده از این روش، نیروی اندازهگیری شده سه برابر بزرگتر از نیروی پیشران واقعی بهدست آمد. با توليد نيرو، سيستم از حالت تعادل خارج مى شود؛ بنابراین نیروسنج در جهتی حرکت داده می شود که سیستم را به حالت تعادل اولیهاش برگرداند. با توجه به میزان جابجایی نیروسنج، میتوان نیروی پیشران تولیدشده را به دست آورد.



شکل ۱۲- طرحواره اندازهگیری نیرو



شکل ۲۳- تصویری از نیروسنج میلی نیوتونی leybold در چیدمان آزمایش

۳-۳- اندازهگیری سرعت باد یونی

میانگین سرعت باد یونی با استفاده از روش لوله پیتو اندازه گیری شد که یک روش معمول برای اندازه گیری سرعت جریان غیرقابل تراکم است. در آزمایشات انجامشده، لوله پیتو به یک میکرومانومتر متصل شد تا تغییرات سرعت ثبت شود. فشار استاتیک توسط لوله فشار استاتیک نزدیک محل محاسبه شد. یک موقعیتیاب در راستای محور y با دقت ۱/۰ میلیمتر برای جابجایی لوله شیشهای در امتداد محور افقی استفادهشده است. با این روش میتوان سرعت عمودی باد یونی تولیدشده از الکترود سیم به سیلندر را اندازه گیری کرد.

۳-۴- تکرارپذیری و عدم قطعیت نتایج آزمایشگاهی

بهمنظور اطمینان از اندازه گیری مقادیر نیروی پیشران و سرعت باد یونی، کلیهی اندازه گیریها در ۵ روز متوالی تکرار شد و شرایط فاصله

بین الکترودها ۳ سانتیمتر و طول الکترودها ۲۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد و دمای محیط ۳۰۰ کلوین بود. جدول ۱ اندازه نیروی پیشران و سرعت باد یونی در پیکربندی تک سیم و تک استوانه کرونا منفی را در ۵ روز متوالی نشان میدهد.

با توجه بهدقت و خطای اندازه گیری تجهیزات مورداستفاده، مقادیر خطای مربوط به هر یک از تجهیزات در جدول ۲ ارائهشده است. تأثیر مقادیر خطا در نتایج بهدستآمده لحاظ شده است.

V(KV)	Day	T(mN/m)	V(m/s)	T(mN/m)	∇(m/s
14	1	5.2	0.55	5.5	
	2	5.7	0.71		
	3	5.3	0.66		0.68
	4	5.6	0.79		
	5	5.5	0.69		
10	1	8.8	0.83		105.
16	2	8.5	0.88		
	3	8.9	0.91	8.7	0.86
-	4	8.8	0.86	7	
	5	8.5	0.82		
18	1	13.2	1.13	13.3	
	2	12.8	1.16		
	3	13.4	0.99		1.1
	4	13.8	1.1		
	5	13.3	1.12		
20	1	19.3	1.36	_	
	2	19.1	1.2/	18.9	1 2
	3	10.7	1.38		1.5
	4	18.6	1.2/	-	
	5	18.8	1.22		
22		24.2	1.46	-	
	3	24.0	1 /0	24.5	15
	4	24.6	1.46	1	
	5	24.0	1 56		

جدول ۱- اندازه گیری نیروی پیشران و سرعت باد یونی در ۵ روز ۱۱ - اندازه گیری نیروی پیشران و سرعت باد یونی در ۵ روز

جدول ۲ - میزان دقت تجهیزات استفادهشده

دقت	دستگاه		
•/\ kv	ولتاژ	منبع	
۰/۰۰۱ mA	جريان	تغذ	
		يە	
۰/۰۱ gr	ترازو		
۳٪.	اسيلوسكوپ		
≤ %r (+-ra kv)	پراب		

۴- نتایج آزمایشگاهی و تحلیل آنها

در این بخش نتایج بهدستآمده از تولید باد یونی و نیروی پیشران تولیدشده ناشی از سیستم تخلیه کرونا فشار اتمسفری با چینشهای مختلف الکترودی در دو حالت سری و موازی و با اعمال قطبشهای مختلف ولتاژ (کرونای مثبت، کرونای منفی و کرونای مثبت-منفی) موردبررسی قرارگرفته است. هدف، رسیدن به بیشترین مقدار سرعت باد یونی و نیروی پیشران تولیدشده با حداقل وزن چینش نهایی سیستم است و نتایج بهدستآمده با یکدیگر مقایسه شده است.

۴-۱- موازی قرار گرفتن الکترودها

در این بخش، چینشهای با دو، چهار، پنج و شش الکترود در دو کرونای مثبت و منفی در حالت موازی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۳. تغییرات نیروی پیشران تولیدشده در محدوده ولتاژ ۱۴ تا ۲۲ کیلوولت را در چینشهای مختلف نشان میدهد. مطابق با این منحنی، با افزایش ولتاژ، نیروی پیشران تولیدشده در تمامی چینشها بهصورت غیرخطی افزایش مییابد. همچنین بیشترین نیروی پیشران تولیدشده

در ولتاژ ۲۲ کیلوولت، چیدمان پنج الکترودی و کمترین مقدار مربوط به چیدمان دو الکترودی است. بهطور تقریبی، میزان نیروی پیشران اندازه گیری شده در کرونای مثبت و منفی برای هر چیدمان، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. نتایج حاصله نشان می دهد که با افزایش تعداد الکترودها، میزان نیروی پیشران تولیدی در کرونای منفی از کرونای مثبت بیشتر می شود؛ که این امر می تواند به دلیل تفاوت ذرات بار الکتریکی در ناحیه تولید نیروی پیشران باشد.



ممن ۲۰۱۰ میروی پیسر،ی بر حسب وندر در چینس،عنی منعوف به کرو. مثبت و کرونا منفی در شرایط موازی بودن الکترودها

پارامتر مهمی که بهخصوص در صنعت هوافضا کاربرد دارد، نسبت نیروی پیشران تولیدشده به وزن سامانه الکترودها است. شکل ۱۴، نسبت نیروی پیشران تولیدشده به وزن سیستم را در شرایط مختلف اعمال ولتاژ و چینش الکترودها نشان میدهد. مطابق با این منحنی میتوان گفت بالاترین نسبت نیروی پیشران به وزن در حالت پنج-الکترودی و با اعمال ولتاژ مثبت-منفی گزارششده است. در مرحله بعد، بیشترین نسبت نیروی پیشران به وزن مربوط به استفاده از چهار الکترود مثبت و منفی میباشد؛ اما در صورت عدم استفاده از هر دو کرونای مثبت و منفی میباشد؛ اما در صورت عدم استفاده از هر دو استفاده از پنج الکترود میباشد.



شکل ۱۴- نیروی پیشران تولیدشده به وزن سیستم برحسب ولتاژ و در شرایط چینش و قطبشهای متفاوت در شرایط موازیبودن الکترودها

۲-۴ سری قرار گرفتن الکترودها

در این بخش، چینشهای با چهار و شش الکترود در دو کرونای مثبت و منفی در دو حالت سری و موازی با یکدیگر مقایسه شد. شکلهای ۱۵ و ۱۶، تغییرات نیروی پیشران تولیدشده با اعمال ولتاژ مثبت-زمین و منفی-زمین را در شرایط سری و موازی بودن الکترودها در ولتاژهای مختلف و به ترتیب در یک چینش شش و چهار الکترودی نشان میدهد. مطابق با این منحنی، مقادیر نیروی پیشران تولیدشده در حالت سری بیشتر از موازی است که میتواند به دلیل اختلاف پتانسیل و توان مصرفی بیشتر حالت سری نسبت به حالت موازی باشد. توان مصرفی بیشتر یعنی الکترون هایی با میانگین انرژی جنبشی بالاتر که میتوانند فرآیندهای یونیزاسیون و چسبندگی بیشتری را با گونههای خنثی هوا داشته باشند. بیشترین مقدار نیروی پیشران تولیدشده در سیستم شش الکترودی در ولتاژ ۲۲ کیلوولت حالت سری و کمترین مقدار در ولتاژ ۱۴ کیلوولت حالت موازی به ترتیب با مقادیر ۲۵۰ و ۸ میلی نیوتون بر متر گزارششده است. همچنین در هر دو حالت سری و موازی، میزان نیروی پیشران مربوط به کرونای منفی از کرونای مثبت، بیشتر است. با توجه به مشابه بودن نتایج مربوط به پنج الکترود، چهار الكترود و دو الكترود، از ارائه ساير نتايج خوددارى شده است.



شکل ۱۵- نیروی پیشران برحسب ولتاژ در دو حالت سری و موازی در دو کرونای مثبت و منفی در چینش شش الکترودی



شکل ۱۶- نیروی پیشران برحسب ولتاژ در دو حالت سری و موازی در دو کرونای مثبت و منفی در چینش چهار الکترودی

در شکلهای ۱۷ و ۱۸، نسبت نیروی پیشران به وزن سیستم برحسب ولتاژ، مطابق با شکلهای ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. همان گونه که قابل تصور بود، میزان نیروی پیشران به وزن مربوط به حالت سری از حالت موازی بیشتر است، چرا که از نظر وزن الکترودها، تغییری اعمال نشده است؛ بنابراین بدیهی است که میزان نیروی پیشران به وزن، در صورت استفاده از تعداد الکترود ثابت، وابسته به میزان نیرو باشد.



شکل ۱۷-نیروی پیشران به وزن برحسب ولتاژ در دو حالت سری و موازی در دو کرونای مثبت و منفی در چینش شش الکترودی



شکل ۱۸- نیروی پیشران به وزن برحسب ولتاژ در دو حالت سری و موازی در دو کرونای مثبت و منفی در چینش چهار الکترودی

۴-۳- سرعت باد یونی

در این بخش، به بررسی میزان سرعت باد یونی ناشی از تخلیه کرونا برحسب ولتاژ در چینش دو، چهار و پنج و شش الکترودی در سه حالت کرونای مثبت، منفی و کرونای مثبت-منفی پرداختهشده است. جهت محاسبه میانگین سرعت، میزان باد یونی از وسط سیستم الکترودها بهدستآمده است. شکل ۱۹، سرعت میانگین باد یونی برحسب ولتاژ در چینشهای مختلف و در شرایط موازی بودن الکترودها را نشان می دهد. مطابق با این منحنیها، بیشترین مقدار سرعت باد یونی تولیدشده در

شرایط پنج الکترودی و با اعمال ولتاژ مثبت-منفی حدود ۴/۵ متر بر ثانیه گزارششده است. پس از چینش پنج الکترود، چینش شش الکترود نیز بیشترین میزان سرعت باد یونی را تولید مینماید. همچنین، همه شکلها، تغییرات سرعت برحسب ولتاژ، بهصورت خطی است. به غیر از چینش پنج الکترودی، در سایر چینشها، نتایج میانگین سرعت مربوط به کرونای مثبت و منفی با هم مساوی است. همچنین میزان سرعت برحسب ولتاژ در کرونای مثبت - منفی از کرونای مثبت و میزان سرعت برحسب ولتاژ در کرونای مثبت منفی از کرونای مثبت و منبع تغذیه مستقیم مثبت و منفی بهطور جداگانه استفاده شده که این امر منجر به افزایش میزان توان الکتریکی ورودی می شود. در نتیجه، میزان نیروی پیشران و میزان سرعت باد یونی نیز نسبت به کرونای میزان زیرو ی یشران و میزان سرعت باد یونی نیز نسبت به کرونای





شکل ۱۹– میانگین سرعت باد یونی برحسب ولتاژهای در شرایط موازی بودن الکترودها a) سیستم دو الکترودی b) سیستم چهار الکترونی c) سیستم پنج الکترودی d) سیستم پنج الکترودی

شکل ۲۰، تغییرات سرعت میانگین باد یونی برحسب ولتاژ در چینشهای مختلف و در شرایط سری بودن الکترودها نشان میدهد. در این حالت نیز بیشترین مقدار سرعت باد یونی در شکل ۲۰، تغییرات میانگین سرعت باد یونی مربوط به چهار، پنج و شش الکترود در حالت سری در صورت استفاده از کرونای مثبت-منفی با هم مقایسه شده است. چینش ۵ الکترودی و با اعمال ولتاژ مثبت-منفی در بیشترین سرعت، حدود ۸/۵ متر بر ثانیه گزارششده است. مطابق با شکلهای استوانه در شرایط چینش ۵ الکترودی و اعمال ولتاژ مثبت-منفی گزارششده است. با توجه به نتایج گذشته که حالت سری از موازی بهتر بود، در شکل ۲۰، فقط نتایج سری ارائهشده است.



شکل ۲۰۵- میانگین سرعت باد یونی برحسب ولتاژ در شرایط سری بودن الکترودها با چینشهای متفاوت

۴-۴- جریان الکتریکی و ضریب اثربخشی سیستم

در این بخش به بررسی میزان جریان الکتریکی و ضریب اثربخشی برحسب ولتاژ در دو کرونای مثبت و منفی پرداختهشده است. در عملگرهای الکتریکی، پارامتر عملکردی ضریب اثربخشی طبق رابطهی زیر تعریف میشود:

$$\theta = \frac{1}{P} \tag{1}$$

که T میزان نیروی پیشران و P میزان توان میزان توان مصرفی است. شکل ۲۱، جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ در چینشهای متفاوت در دو حالت سری و موازی نشان می دهد. در این منحنیها، الکترودهای سیم به منبع ولتاژ و الکترودهای استوانه به زمین متصل هستند. بیشترین جریان الکتریکی مربوط به چینش شش الکترودی و حالت سری بودن الکترودها گزارش شده است. در همه چینشها، میزان جریان الکتریکی کرونای منفی از کرونای مثبت بیشتر است. در همه نمودارها، با افزایش میزان ولتاژ، میزان جریان الکتریکی نیز افزایش می ابد. درنهایت، نمودار نشان می دهد، میزان جریان الکتریکی مصرفی در حالت سری از حالت موازی برای یک تعداد مساوی الکترود، بیشتر است.



شکل ۲۱۶- جریان الکتریکی مصرفی برحسب ولتاژهای مختلف در چینشهای متفاوت در شرایط سری و موازی بودن الکترودها

با توجه به مشخص بودن نسبت جریان الکتریکی و میزان نیروی پیشرانش به ولتاژ، میزان ضریب اثربخشی برحسب ولتاژ نیز قابل محاسبه است. شکل ۲۲، ضریب اثربخشی سیستم با توجه به نیروی پیشران تولیدشده بر توان الکتریکی مصرفی را با اعمال ولتاژهای مختلف نشان می دهد. بیشترین ضریب اثربخشی سیستم برحسب ولتاژ در حالت شش الکترودی کرونا منفی و در شرایط سری قرار گرفتن الکترودها (منحنی آبی کمرنگ) نشان می دهد. سپس مربوط به استفاده از دو الکترود در حالت موازی می باشد. همچنین کمترین مقدار ضریب اثربخشی در سیستم چهار الکترودی کرونا منفی و در حالت موازی قرار گرفتن الکترودها نشان می دهد. در همه موارد، با افزایش میزان ولتاژ، میزان ضریب اثربخشی نیز کاهش می بابد.



شکل ۲۲۷- تغییرات ضریب اثربخشی سیستم در ولتاژهای مختلف و چینشهای متفاوت در شرایط سری و موازی بودن الکترودها

شکل ۲۳، تغییرات ضریب اثربخشی برحسب توان مصرفی در چینشهای مختلف در دو کرونای مثبت و منفی مطابق شکل ۲۲ نشان میدهد. بیشترین ضریب اثربخشی در حالت شش الکترودی کرونا منفی، جایی که توان مصرفی حدود ۱۰ وات بر متر است، گزارششده است. مطابق با این منحنی با افزایش توان مصرفی، ضریب اثربخشی کلیه چینشها کاهش مییابد.



شکل ۲۳۸- ضریب اثربخشی برحسب توان مصرفی در چینشهای متفاوت و در شرایط سری و موازی بودن الکترودها

۴–۵– نتیجهگیری

نتایج نشان میدهد که نیروی پیشران و سرعت باد یونی تولیدشده با هم رابطه مستقیم دارند. بهطورکلی میتوان گفت:

- بیشترین نیروی پیشران و سرعت باد یونی تولیدشده در شرایط یکسان و در حالت موازی بودن الکترودها در چینش پنج الکترودی بهدستآمده است. حدود ۴ درصد، سرعت باد یونی در چینش پنج الکترودی بیشتر از شش الکترودی گزارششده است.
- ۲. با ایجاد شرایط کاملاً یکسان، نتایج نشان میدهد که اعمال کرونای مثبت-منفی، نیروی پیشران و سرعت باد یونی بیشتری نسبت به اعمال ولتاژ مثبت-زمین یا منفی-زمین ایجاد کرده است. این در حالی است که تغییرات جریان الکتریکی چندان محسوس نیست. بهطور مثال در شرایط شش الکترودی با اعمال

ولتاژ ۲۲ کیلوولت سرعت باد یونی در حالت مثبت-منفی حدود ۴۵ درصد بیشتر از حالت مثبت-زمین با منفی-زمین است.

- ۲. همچنین با سری کردن الکترودها و در شرایط یکسان نسبت به حالت موازی، مقدار نیروی پیشران بیشتری ایجاد میشود که در این حالت توان مصرفی نیز افزایش مییابد. بهطور مثال در شرایط کرونا منفی، سیستم شش الکترودی و با اعمال ولتاژ ۲۲ کیلوولت با افزایش حدود ۲۵ درصد توان مصرفی، مقدار نیروی پیشران حدود ۴۰ درصد افزایش پیداکرده است. بااینوجود، میزان ضریب اثربخشی سیستم در چینش شش الکترودی حالت سری بیشتر از حالت موازی است.
- بیشترین میزان جریان الکتریکی مصرفی در حالت شش الکترودی سری و در شرایط کرونا منفی گزارش شده است. البته، این امر طبیعی است؛ زیرا با افزایش تعداد الکترودها، میزان جریان الکتریکی مصرفی نیز افزایش می یابد.
- م. بیشترین ضریب اثربخشی سیستم در شرایط سری قرار گرفتن الکترودها و در یک چینش شش الکترودی گزارش شده است.

۵- مراجع

- Newton I, Opticks: or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light, W. & J. Innys, London, 2nd Edition; 1718, 25-27.
- [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.
- [3] Javadi H, Farzaneh M, Measuring of Corona Discharge Inception Voltage to Determine Electric Field over the nonhomogenous Electrodes in the Air Insulation, 19th International Power System Conference, 2004.
- [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.
- [5] Wilson J, Perkins H D, and Thompson W K. An Investigation of Ionic Wind Propulsion. No. NASA/TM-2009-215822. 2009.
- [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.
- [7] Kachi M, Dascalescu L, Corona Discharge in Asymmetric Electrode Configurations, Journal of Electrostatics, 2014; 72: 6-12.
- [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.
- [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.
- [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.
- [11] Drew D S, et al. Toward Controlled Flight of the Ionocraft: a Flying Microrobot Using Electrohydrodynamic Thrust with Onboard Sensing and No Moving Parts. IEEE Robotics and Automation Letters 3.4, 2018:2807-2813.

- [12] Shintaro S, et al. Successively Accelerated Ionic Wind with Integrated Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuator for Low-Voltage Operation. Scientific reports 9.1, 2019: 1-11.
- [13] Cogollo M, Balsalobre P, Lantada A, Puage H, Design and Experimental Evaluation of Innovative Wire-to-Plane Fins' Configuration for Atmosphere Corona-Discharge Cooling Devices, Journal of Applied Science, 2020; 10, 1010: 1-15.
- [14] Gu L, Tan W, Jiang Z, Chen X, Ren W, Jin Z, Relationship between Corona Discharge Thrust and Applied Voltage's Polarity, Journal of Energies, 2023; 16:1-11.
- [۱۵] فتحی ع، مهدی آهنگر م، شبیهسازی عددی رژیم تخلیه کرونا ایجادشده توسط سکریندی سیم-سیلندر، در شرایط اتمسفری، م*حله مهندسی*

- [۱۶] فتحی ع، آهنگر م، مدلسازی جریان پلاسما در یک رانشگر الکتروهیدرودینامیک دو کاتده، فصلنامه علمی-پژوهشی علوم و فناوری فضایی.۱۳۹۸، د. ۱۲، ش. ۲، ص. ۱–۱۰.
- [۱۷] آقایی ملکآبادی م، خوشخو ر، سلطانی احمدی ح، شبیه سازی عددی رژیم تخلیه کرونا در پیکربندی سیم-سیلندر در شرایط اتمسفریک، مجله دانش و فناوری هوافضا. ۱۴۰۲، د.۱۲، ش. ۲، ص ۱۸ – ۳۶.