

شبیه‌سازی عددی رژیم تخلیه کرونا در پیکربندی سیم-ایرفویل در شرایط اتمسفریک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

معصومه آقایی ملک آبادی^۱، روح الله خوشخو^{۲*}، حامد سلطانی احمدی^۳

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

۲- استادیار، مهندسی هوافضا، گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران. r.khoshkhoo@mut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، فیزیک، گرایش فیزیک پلاسما، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران

چکیده

اختلاف ولتاژ قوی بین دو الکتروود با ضخامت های ناهمسان موجب پدیده تخلیه کرونا می‌گردد. امروزه تخلیه کرونا، کاربردهای مختلفی از جمله استفاده در رانشگرها دارد. در یک دهه اخیر، استفاده از عملگرهای پلاسمای کرونا جهت کنترل جریان سیال و تولید نیروی پیشران مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، جهت انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار کامسول استفاده شده است. ابتدا، نتایج حاصل از شبیه‌سازی، در پیکربندی سیم-استوانه مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و سپس رژیم تخلیه کرونا در پیکربندی سیم-ایرفویل، شبیه‌سازی شده است. در این تحقیق، تأثیر فاصله بین دو الکتروود بر مشخصات جریان هوای عبوری ناشی از تخلیه کرونا مانند جریان الکتریکی، نیروی پیشران، سرعت جریان سیال و توان الکتریکی مصرفی مورد مطالعه‌ی عددی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که با افزایش فاصله بین دو الکتروود، جریان الکتریکی و سرعت باد الکتریکی کاهش می‌یابد، اما میزان راندمان و میزان توان مصرفی، افزایش می‌یابد، در نهایت، میزان تغییرات نیروی پیشران به ازای افزایش هر کیلوولت ولتاژ اعمالی ۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی، شرایط اتمسفریک، عملگر پلاسمای کرونا، پیکربندی سیم-ایرفویل، نیروی پیشران

Numerical simulation of corona discharge produced in wire-airfoil configuration in atmospheric conditions

Masoumeh Aghaei Malekabadi¹, Rouhollah Khoshkhoo^{2*}, Hamed Soltani Ahmadi³

1. MSc. Student, Aerospace Engineering, Aerodynamics, Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

2. Assistant Professor, Aerospace Engineering, Aerodynamics, Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

3. PhD Student, Physics, Plasma, Department of Basic Science, Mazandaran University

Abstract

The strong voltage difference between two electrodes with different thicknesses causes the corona discharge phenomenon. Today, corona discharge has various applications, including use in thrusters. In the last decade, the use of corona plasma actuators to control flow and generate thrust has received much attention. In the present study, COMSOL software has been used to perform the simulation. First, the simulation results are validated in the wire-cylinder configuration and then the corona discharge in the wire-airfoil configuration is simulated. In the present study, the effect of the distance between the two electrodes on the airflow characteristics due to corona discharge such as electric current, thrust, fluid flow velocity and electrical power consumption is studied numerically. The results show that if the distance between the two electrodes increases, the electric current and the electric wind speed decrease, but the efficiency and power consumption increase. The rate of change of thrust increases by 15% for each kilo volt increase in applied voltage.

Keywords: Numerical Simulation, Atmospheric Conditions, Corona Plasma Actuator, Wire-Airfoil Configuration, Thrust

۳۹

سال ۱۴- شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۲

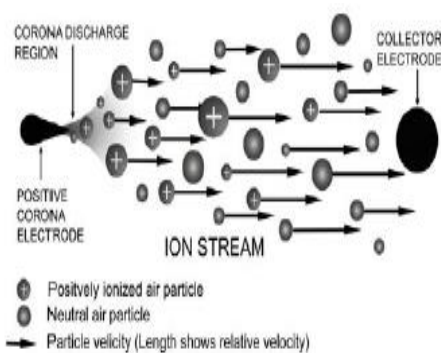
نشریه علمی

دانش و فناوری هوافضا



۱. مقدمه

روی سطح ایرفویل استفاده می‌شود. در این تحقیق، از عملگر پلاسمای کرونا استفاده شده است. عملگر پلاسمای کرونا، عملگرهایی هستند که بر پایه تخلیه الکتریکی کرونا می‌باشند. در این نوع عملگر، با افزایش اختلاف ولتاژ بین دو الکترود با ضخامت‌های متفاوت تا جایی که قوس الکتریکی رخ ندهد، میدان الکتریکی در اطراف الکترود آند افزایش می‌یابد که به تبع آن گازهای اطراف آند یونیزه شده و پدیده تخلیه کرونا بوجود می‌آید. این فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱، 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 [۵]. تخلیه کرونای کنترل شده می‌تواند از طریق باردار کردن ذرات اطراف آند و انتقال مومنتم آنها به ذرات خنثی دورتر از آند، جریان سیالی را ایجاد کند که به آن جریان الکتروهدرودینامیکی^۲ می‌گویند و امروزه کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف دارد.



شکل ۱. شماتیک تخلیه کرونا [۵]

کاربردهای فرآیند کرونا روی این دو نوع تخلیه تأکید دارد: یون‌ها و الکترون‌های انرژی‌دار. انرژی الکترون‌ها به مشخصه‌های گاز و به شیوه‌ی تولید کرونا بستگی دارد. مشخصه‌های یون به

تولید سامانه‌های پیشران نوین، یکی از مسائل اساسی در علم هوافضا می‌باشد، که از دیرباز مورد توجه و علاقه دانشمندان قرار گرفته است. هدف اصلی از آن، ایجاد نیروی پیشران، جهت استفاده در وسایل هوایی و یا فضایی می‌باشد. یکی از روش‌های جدید تولید پیشران، استفاده از عملگرهای پلاسمای کرونا می‌باشد. همچنین باید در نظر داشت، که ایرفویل‌ها در واقع سازه‌هایی هستند که با هدف ایجاد نیروی برآ به هنگام حرکت درون سیال استفاده می‌شوند، اما می‌توان از آن با استفاده از جریان الکتریکی، جهت تولید نیروی پیشران نیز استفاده نمود.

عملگرهای الکتروهدرودینامیکی از دو الکترود تشکیل شده‌اند، که توسط یک منبع اختلاف پتانسیل قوی تحریک می‌شوند. معمولاً اگر این تحریک توسط منبع اختلاف پتانسیل مستقیم صورت گیرد، این عملگرها را عملگرهای باد کرونا، و در صورتی که توسط منبع اختلاف پتانسیل متناوب صورت گیرد، این عملگرها را عملگرهای تخلیه سد دی‌الکتریک^۱ می‌نامند [۱]. در عملگرهای تخلیه سد دی‌الکتریک یکی از الکترودها در معرض جریان سیال قرار دارد و الکترود دیگر درون ماده دی‌الکتریک جاسازی می‌شود. ماده دی‌الکتریکی که بین این دو الکترود وجود دارد، موجب پایداری فرآیند تخلیه پلاسمای (انتقال بار) و مانع از گرم شدن الکترودها خواهد شد. در عملگرهای تخلیه سد دی‌الکتریک به دلیل اینکه فاصله میان الکترودها با یک ماده عایق که مقاومت الکتریکی آن نسبت به تخلیه الکتریکی زیاد است، پوشیده شده است، می‌توان از الکترودهایی با فاصله بسیار کمتر استفاده نمود، بنابراین شدت میدان الکتریکی که برای یونیزاسیون مولکول‌های هوا مورد نیاز است، افزایش می‌یابد. از این عملگرها جهت کنترل گردابه [۲]، افزایش زاویه واماندگی [۳ و ۴] بر

پلاریته تخلیه و مشخصه‌های ترکیب گاز به ویژه به الکترون‌ها در جذب گونه‌ها وابسته می‌باشد. اولین مشاهده‌ی جریان الکتروهیدرودینامیکی توسط هاگزبی در سال 1709 صورت گرفت [۶]. 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 [۷]. در اواخر قرن نوزدهم، چتوک برای نخستین بار باد الکتریکی را به صورت کمی مطالعه کرد [۸] و در سال ۱۹۵۷، هارنی مشخصات الکتریکی تخلیه کرونا و تغییر پارامترهای آیرودینامیکی جریان را برای بررسی میزان نیروی تولید شده توسط این پدیده بررسی نمود. وی رابطه‌ای بین فشار و جریان الکتریکی در تخلیه کرونا بین دو الکتروود صفحه‌ای پیدا کرد که تبدیل به مبنایی برای پژوهش‌های آینده گردید [۹]. در سال ۱۹۶۷، کریستنسون و همکاران به بررسی تئوری و تجربی تخلیه آیرودینامیکی کرونا یک سیستم پیشراننده پرداختند. مدل تحلیلی، از دو صفحه‌ی الکتروود موازی با فاصله‌ی L که صفحه‌ی بالایی کاتد، که روی آن الکتروود ساطع‌کننده قرار دارد و صفحه‌ی پایینی آنند، که یون‌ها را تولید می‌کند، تشکیل شده است. آنها متوجه شدند که میزان تولید پلاسما با مقدار ولتاژ کاربردی کرونا متناسب است و تحرک یونی عامل مهمی در میزان نیروی رانش است [۱۰].

روابطی که طی این سال‌ها بر اساس پژوهش‌های تجربی بدست آمدند، تنها قادر به حل تحلیلی مسائل بسیار ساده یک بعدی بودند و در مسائل دو یا سه بعدی کارایی لازم را نداشتند. از این رو توسعه‌ی روش‌های عددی برای مطالعه‌ی

جریان الکتروهیدرودینامیک به یک ضرورت تبدیل شد. در همین زمان، روش المان محدود نیز ابداع شد و دیویس یکی از نخستین پژوهش‌های عددی در زمینه تخلیه کرونا را انجام داد. وی با روش المان محدود برای محاسبه ساختار پتانسیل الکتریکی برای توزیع چگالی بار فرضی و از روش مشخصه‌ها برای محاسبه ساختار چگالی بار برای توزیع میدان الکتریکی فرضی استفاده کرد [۱۱].

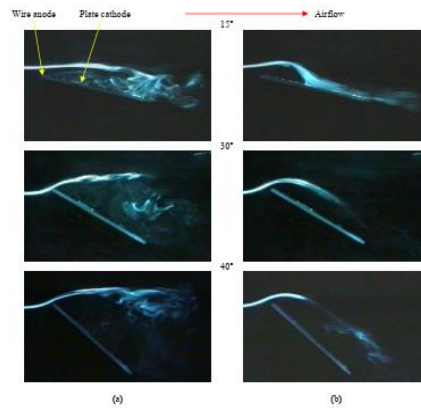
بحث دیگری که در اواخر قرن بیستم مطرح شد این بود که آیا استفاده از تخلیه کرونا برای توسعه‌ی رانشگرها در حوزه‌ی مهندسی هوافضا توجیه‌پذیر است یا خیر؟ از طرفی این رانشگرها دارای وزن سبک و سهولت در ساخت هستند، فاقد قطعات متحرک می‌باشند و قادر به فعالیت در گستره‌ی وسیعی از فشارها می‌باشند؛ اما از طرف دیگر راندمان پایینی دارند و به علت افزایش تحرک پذیری یون‌ها با افزایش ارتفاع، این راندمان کمتر هم می‌شود. به هر حال برخی محققان ادعا کردند که می‌توان راندمان رانشگر الکتروهیدرودینامیک را افزایش داد. بوندار و باستین در پژوهش خود با استفاده از سرعت 50 m/s توانستند میزان راندمان رانشگر را تا $7/5$ درصد بهبود بخشند [۱۲].

لگر و همکاران در سال ۲۰۰۱، به بررسی تجربی تأثیر تخلیه کرونا‌ی DC بر جریان هوا در امتداد یک صفحه تخت شیب‌دار پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که تأثیر تخلیه کرونا بر مشخصه‌های جریان در اعداد رینولدز پایین در قالب کاهش دنباله‌های جریان و نیروی پسا بوده و با افزایش زاویه، سرعت جریان کمتر می‌شود [۱۳]. در شکل ۲ شماتیکی از نتایج به دست آمده نشان داده شده است.



دو الکتروود، تأثیر افزایش فاصله الکتروودها بر راندمان رانشگر و تفاوت میزان نیروی پیشران حاصل از اعمال ولتاژهای مثبت و منفی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با افزایش ولتاژ اعمالی تا ۲۴ kV، میزان نیروی پیشران حاصل تا 90 mN/m اندازه گیری شد [۱۶]. موریو و پژوهش تجربی بعدی خود سعی کرد با تغییر تعداد و نحوه چیدمان کاتدها، میزان راندمان بدست آمده برای رانشگر را افزایش دهد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که با افزایش تعداد الکتروودها از دو به سه، نیروی درگ ناشی از کاتد کاهش می یابد. ضمن اینکه بهترین راه برای افزایش راندمان رانشگر الکتروویدرودینامیکی در یک پیکربندی سه الکتروودی، افزایش فاصله بین آند و کاتدها می باشد. البته به این نکته نیز اشاره شد که با افزایش این فاصله باید ولتاژ اعمالی به آند نیز افزایش یابد و این روند تا جایی امکان پذیر است که ولتاژ اعمالی موجب قوس الکتریکی نشود [۱۷]. در سال ۲۰۱۵، بارت و همکاران سعی کردند با تغییر پارامترهای هندسی، مقدار بیشینه چگالی نیروی پیشران را برای یک رانشگر الکتروویدرودینامیکی با هندسه الکتروود سیم- استوانه با استفاده از تخلیه کرونای مثبت برای جفت های الکتروود که به صورت سری و موازی فعالیت می کنند، به صورت تجربی اندازه گیری کنند. آنها توانستند میزان نیروی پیشران بر واحد حجم را به میزان معقول برسانند و موفق به طراحی و ساخت یک بالا برنده^۳ با استفاده از نیروی پیشران شدند [۱۸].

شیباتا و همکاران در سال ۲۰۱۶، روشی جدید را برای مطالعه عددی تخلیه کرونا برای استفاده



شکل ۲. آشکارسازی جریان هوا حول صفحه تخت در حالت و زوایای مختلف الف) بدون تخلیه کرونا ب) همراه با تخلیه کرونا [۱۳]

در سال ۲۰۰۸، جول لارسن و همکاران برای اولین بار از نرم افزار کامسول برای شبیه سازی عددی جریان الکتروویدرودینامیک استفاده و سپس آن را با نتایج تجربی مقایسه کرد. در این پژوهش با اعمال ولتاژ ۸ kV سرعت هوای ساکن در شرایط اتمسفریک به $1/1\text{ m/s}$ افزایش داده شد و در محدوده ولتاژ ۴ تا ۸ کیلوولت، میانگین درصد خطای ۴ درصد بین نتایج عددی و تجربی حاصل شد [۱۴]. 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 بهینه سازی کردند. سرعت جریان را تا 10 m/s اندازه گرفتند. در این پژوهش، توان مصرفی به میزان 210 W/m اندازه گیری شد که در نتیجه مقدار راندمان $1/7\text{ mN/W}$ به ثبت رسید [۱۵]. موریو و همکاران برای درک بهتر پدیده الکتروویدرودینامیک، آن را در یک پیکربندی سیم- سیلندر به صورت تجربی مطالعه کردند. در این پژوهش جامع، رابطه ی جریان الکتریکی حاصل از تخلیه کرونا با ابعاد کاتد و فاصله ی بین

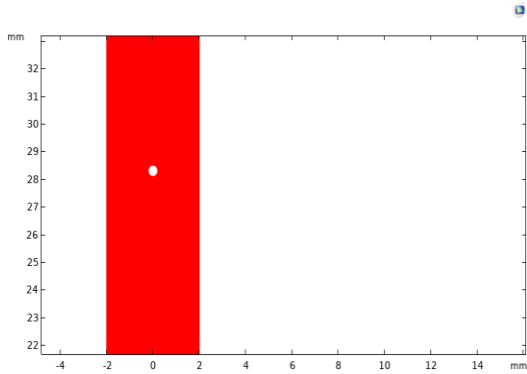
در یک رانشگر الکتروهیدرودینامیکی به کار گرفتند. مدل‌سازی عددی در این پژوهش، بر اساس روش اغتشاشات^۴ انجام شد. همچنین، تأثیر اضافه کردن یک کاند متصل به ولتاژ منفی به رانشگر بررسی گردید؛ نتایج حاکی از آن بودند که اگر اندازه‌ی ولتاژ منفی اعمالی بر کاند از مقدار خاصی بیشتر باشد، راندمان رانشگر دو مرحله‌ای از رانشگر تک مرحله‌ای بیشتر خواهد شد. بنابراین در مدل‌سازی رانشگرهای الکتروهیدرودینامیکی تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای با روش اغتشاشات، این روش را به عنوان روشی مناسب برای مطالعه‌ی رانشگری با تعداد مراحل بیشتر پیشنهاد دادند [۱۹].

از دیگر تلاش‌های انجام شده برای مطالعه‌ی رانشگرهای الکتروهیدرودینامیک می‌توان به پژوهش تجربی پرواد و همکاران اشاره کرد. آنها نیروی الکتروهیدرودینامیکی تولید شده توسط پیکربندی الکتروود سیم - سیلندر تحت ولتاژ بالا DC را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها توانستند اثرات آیرودینامیکی استفاده از محرک کرونا را بر روی سطح هواپیما بدون سرنشین فوق سبک بررسی کنند و به این نتیجه رسیدند که با توجه به تغییرات در شکل محرک و مدار الکتریکی آن، استفاده از آن مقرون به صرفه است [۲۰]. همچنین گراندوس و همکاران در پژوهشی عددی به بررسی آثار تغییر شکل کاند و استفاده از گازهایی همچون آرگون، نیتروژن و اکسیژن در شرایط شبه خلاء بر نیروی پیشران تولیدشده توسط یک رانشگر الکتروهیدرودینامیک پرداختند [۲۱].

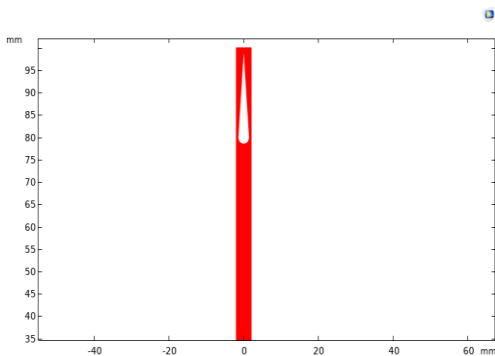
وانگ و همکاران به منظور بهبود عملکرد انتقال حرارت با کمک تخلیه کرونا، تأثیر تعداد الکترودهای کاند و نحوه‌ی قرارگیری آنها را بر روی ضخامت لایه مرزی حرارتی و تغییرات گرادیان‌های سرعت در آن مطالعه کردند. در این پژوهش بر خلاف مرجع [۱۹]، تعداد آندها افزایش یافت و فقط یک کاند استفاده شد. طبق نتایج بدست آمده با اعمال ولتاژ ۱۱kV- و استفاده از سه آند، ضریب انتقال حرارت تا ۸ برابر و ضخامت لایه مرزی حرارتی تا ۳۹/۸ درصد کاهش یافت [۲۲]. در سال ۱۳۹۷، فتحی و آهانگر، به شبیه‌سازی عددی محرک پلاسمای کرونا برای درک فیزیک حاکم بر جریان پلاسمای بین دو الکتروود با پیکربندی سیم - سیلندر پرداختند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش ولتاژ اعمالی بر آند، نیروی پیشران و جریان الکتریکی افزایش، و راندمان نیروی پیشران کاهش می‌یابد [۲۳].

همان‌گونه که در ابتدا ذکر گردید، در دهه اخیر، پیشران یونی در جهت طراحی و ساخت هواپیماهای بدون سرنشین بسیار حائز اهمیت شده‌اند. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد پیشران یونی، راندمان بالای آن نسبت به پیشران‌های هوایی و عدم داشتن بخش‌های متحرک می‌باشد. از دیگر ویژگی‌های این نوع پیشران، عدم تولید صدا و امواج مادون قرمز و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن می‌باشد. در پژوهش حاضر، رژیم تخلیه کرونا در پیکربندی سیم- ایرفویل، برای اولین بار به صورت عددی شبیه‌سازی شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. علت انتخاب این پیکربندی، جهت تولید نیروی پیشران





الف) شماتیکی از هندسه الکتروود سیم مورد استفاده



ب) شماتیکی از هندسه ایرفویل مورد استفاده

شکل ۳. شماتیکی از هندسه مورد استفاده برای پیکربندی سیم-ایرفویل

شبکه تولید شده از نوع بی سازمان و مثلثی می‌باشد. در این شبکه، تعداد سلول‌ها ۲۸۸۴ سلول در نظر گرفته شده است. در شبکه تولیدی با اعمال گزینه‌ی توزیع روی سطح الکتروودها در نرم افزار، در اطراف آند و کاتد تعداد سلول‌ها بیشتر و ابعاد آن‌ها ریزتر و در باقی دامنه‌ی حل ابعاد سلول‌ها درشت‌تر در نظر گرفته شده است. از حل دوبعدی متقارن نرم افزار کامسول به منظور کاهش زمان شبیه‌سازی استفاده شده است. نمایی از شبکه مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است.

در جلوی بال و کاهش پسا و یا استفاده از این پیکربندی به عنوان یک سیستم پیشران جدید در هواپیماهای بدون سرنشین می‌باشد. در این شبیه‌سازی تلاش شده تا علاوه بر مطالعه پارامترها عملکردی جریان الکتروودیدینامیک بین دو الکتروود، اثرات فاصله بین دو الکتروود، بر رفتار جریان سیال، مشخصه‌های الکتریکی رژیم تخلیه کرونا، اثرات اتلافات الکتروگرایی در قالب تغییرات دمای جریان سیال، به طور همزمان مورد تحقیق و بررسی قرار گیرد.

۲. روابط حاکم و روش حل مسئله

۲-۱. هندسه مسئله و شبکه محاسباتی

هندسه بکار گرفته شده شامل، الکتروود سیم دارای طول ۶۰ میلی‌متر و نوک با شعاع انحنای ۱۰۰ میکرومتر است. برای الکتروود دیگر، از یک الکتروود دوکی شکل با طول ۲۰ میلی‌متر و عرض ۲ میلی‌متر که نقش ایرفویل را در این شبیه‌سازی انجام می‌دهد، در نظر گرفته شده است. فاصله بین دو الکتروود سیم و ایرفویل، ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

شماتیکی از هندسه مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی، رطوبت نسبی هوا ۶۲ درصد فرض شده و در این سیستم، جریان هوا به سیستم وارد نشده و تنها تخلیه کرونا مورد بررسی قرار گرفته است.

یون هاست. پیوستگی چگالی بار الکتریکی با در نظر گرفتن معادله‌ی (۳) تضمین می‌گردد:

$$\nabla \cdot j = 0 \quad (3)$$

بافرض جریان به صورت تراکم ناپذیر در پیرامون الکترودها، معادله‌ی پیوستگی به صورت معادله (۴) به دست می‌آید:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4)$$

باترکیب معادلات (۲)، (۳) و (۴) رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید:

$$\nabla \cdot (\mu_p E q - D \nabla q) + U \cdot \nabla q = 0 \quad (5)$$

همچنین با در نظر گرفتن نیروی حجمی ناشی از میدان الکترواستاتیکی، معادله‌ی ممنوم به صورت رابطه‌ی (۶) خواهد بود:

$$\rho U \cdot \nabla U = \nabla P + \mu \nabla^2 U + q E \quad (6)$$

که در این رابطه، ρ چگالی هوا، P فشار هوا و μ لزجت دینامیکی هوا می‌باشد. ضمناً qE نشانگر نیروی کولمب می‌باشد. در نهایت برای بررسی تاثیر تخلیه‌ی کرونا بر دمای جریان، معادله‌ی انرژی به صورت رابطه‌ی (۷) به شکل رابطه‌ی (۷) نوشته می‌شود:

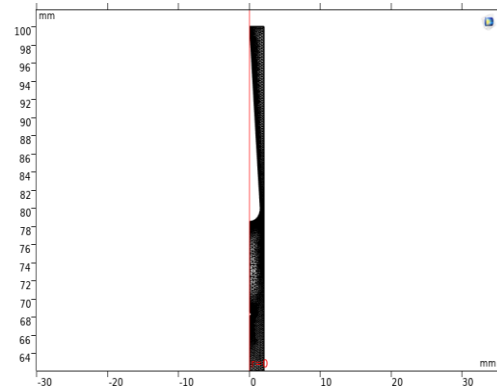
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = -\nabla \cdot (K \nabla T) + E j \quad (7)$$

در این معادله C_p ظرفیت گرمایی ویژه‌ی هوا و K ضریب انتقال حرارت هوا می‌باشد. همچنین عبارت $E j$ بیانگر حرارت اهمی ناشی از افت ولتاژ بین دو الکتروده است. در ادامه، تعدادی از روابط و معادلاتی که جهت بررسی نتایج به دست آمده مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارائه گردیده است.

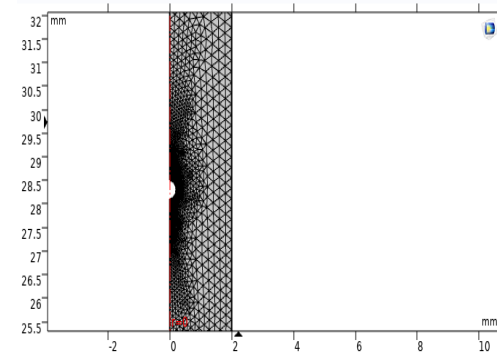
شدت میدان الکتریکی روی الکتروده آند با شرط صاف بودن سطح آن، با استفاده از فرمول پیک^۵ [۲۴]، در رژیم کرونا در هوا تحت شرایط استاندارد، از رابطه (۸) تخمین زده می‌شود:

$$E_e = E_0 (1 + (0/0262 / \sqrt{R_0})) \quad (8)$$

در این رابطه R_e شعاع آند و $E_0 = 3/31 \times 10^6$ شدت الکتریکی شکست^۶ هوا می‌باشد. جهت بررسی تغییرات نیروی پیشران نسبت به



الف) شبکه بندی اطراف الکتروده ایرفویل



ب) شبکه بندی اطراف الکتروده سیم

شکل ۴. شبکه بندی هندسه سیم-ایرفویل

۲-۲. معادلات حاکم بر مسئله

شبه‌سازی عددی تخلیه کرونا نیازمند در نظر گرفتن همزمان معادلات الکترواستاتیک و ناویر-استوکس می‌باشد. در جریان‌های پلاسما، میدان الکتریکی و چگالی بار الکتریکی از طریق رابطه پواسون (۱) به یکدیگر مرتبط می‌شوند:

$$\nabla \cdot E = -\nabla^2 V = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1)$$

که q نشان دهنده‌ی چگالی بار الکتریکی و ϵ_0 ثابت گذردهی هوا می‌باشد. همچنین چگالی جریان از رابطه‌ی (۲) قابل محاسبه است:

$$j = \mu_p E q + U q - D \nabla q \quad (2)$$

در این معادله، μ_p ضریب تحریک پذیری یون‌های هوا، U سرعت جریان و D ضریب نفوذپذیری





جریان الکتریکی، برای فاصله‌های مختلف بین الکترودها، رابطه مربوطه به صورت زیر می‌باشد، که در قسمت نتایج برای بررسی تغییرات نیروی پیشران مورد استفاده قرار گرفته است.

$$F_{EHD} = \int_V f_{EHD} dV = \frac{j \times A_G \times d}{\mu} \quad (9)$$

$$= \frac{Id}{\mu}$$

که در این رابطه A_G سطح مقطع تخلیه کرونا، d فاصله بین الکترودها، I میزان جریان الکتریکی μ میزان تحریک پذیری می‌باشد.

همچنین، در عملگرهای الکتریکی، پارامتر عملکردی ضریب تاثیر نیروی پیشران طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$\theta = \frac{F_{EHD}}{P} = \frac{d}{\mu V} \quad (10)$$

که F_{EHD} بیانگر نیروی الکتروهایدرودینامیکی و P توان الکتریکی مصرفی می‌باشد. طبق معادله (۱۰)، ضریب اثربخشی با فاصله الکترودها، d افزایش می‌یابد و هنگامی که تحریک یونی μ افزایش می‌یابد، میزان اثربخشی کاهش می‌یابد.

میزان توان الکتریکی مصرفی، از حاصل ضرب ولتاژ در جریان الکتریکی طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P = V \times I = C \times V^2 (V - V_0) \quad (11)$$

که در آن I کل جریان الکتریکی تخلیه، V_0 ولتاژ شروع تخلیه الکتریکی و C یک مقدار ثابت است که به هندسه الکترودها و تحرک یونی بستگی دارد. برای بهینه‌سازی بهتر و تولید بیشترین نیروی پیشران به کمترین توان الکتریکی نیاز است.

در انتها، تغییرات نیروی پیشران نسبت به توان الکتریکی مصرفی، در فاصله‌های مختلف بین الکترودها با استفاده از معادله (۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله بین الکترودها، توان الکتریکی مصرفی متناسب با نیروی پیشران افزایش می‌یابد. این رابطه نشان می‌دهد که افزایش فاصله بین

دوالکترودها، منجر به تبدیل الکترومکانیکی بهتر می‌شود.

$$\frac{T}{P} = \frac{d}{\mu \Delta V} \quad (12)$$

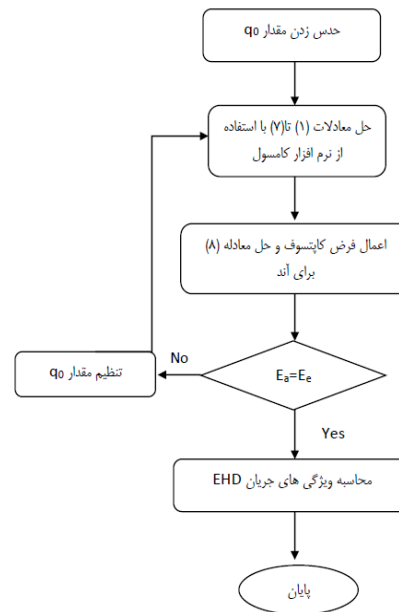
۲-۳. مکانیزم تولید چگالی بار الکتریکی

فاصله‌ی بین دو الکترودها را از لحاظ چگالی بار الکتریکی می‌توان به دو ناحیه تقسیم کرد. در نزدیکی کاتد به دلیل وجود تعداد تقریباً برابری از الکترون‌ها و یون‌های مثبت، می‌توان از چگالی بار الکتریکی صرف نظر کرد، اما در اطراف آند، مقادیر چگالی یون‌های هم‌نام و اتم‌های خنثی هوا، غالب می‌باشند. بنابراین مقدار چگالی بار در این ناحیه قابل چشم‌پوشی نیست.

شرایط مرزی چگالی بار الکتریکی می‌تواند با استفاده از فرض کاپتسوف^۷ در ناحیه‌ی یونیزاسیون اعمال شود. طبق این فرض، قبل از شروع رژیم کرونا، میدان الکتریکی متناسب با اختلاف پتانسیل اعمالی افزایش می‌یابد، اما پس از شروع کرونا، مقدار آن ثابت می‌ماند. در این پژوهش فرض می‌شود که ناحیه‌ی یونیزاسیون کوچک است و می‌توان از آن صرف نظر کرد. تحت این شرایط، شدت میدان الکتریکی در سطح آند را می‌توان با استفاده از معادله (۸) تخمین زد.

لازم به ذکر است که با توجه به اینکه معادله‌ی صریحی برای تعیین مقدار چگالی بار الکتریکی بر روی سطح آند در دسترس نمی‌باشد، از یک روش تکراری برای مشخص کردن مقدار این متغیر استفاده شده است. در این روش، ابتدا مقدار چگالی بار الکتریکی حدس زده می‌شود و سپس به ازای این مقدار، معادلات تا رسیدن به حالت پایا حل می‌شوند. در صورتی که مقدار متوسط میدان الکتریکی محاسباتی بر روی آند با مقدار بدست

آمده از فرمول پیک برابر باشد، حل پایان می‌پذیرد؛ در غیر این صورت حدس اولیه تصحیح شده و الگوریتم ذکر شده مجدداً تکرار خواهد شد. روند نمای روش مذکور، در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. محاسبه چگالی بار الکتریکی آند

۴-۲. شرایط مرزی و اولیه

با توجه به اینکه شبیه‌سازی در شرایط اتمسفریک انجام می‌شود، فشار ثابت $p = 1 \text{ atm}$ بر روی تمامی مرزهای خارجی اعمال شده است. در مرزهای خارجی فرض می‌شود که چگالی اتم‌های خنثی بیشتر از ذرات باردار است و لذا جریان هوا تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار نمی‌گیرد، بنابراین مقدار پتانسیل و چگالی بار الکتریکی بر روی آنها برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. بر روی سطح کاتد نیز با توجه به توضیحات. بخش قبلی مقدار چگالی بار الکتریکی را می‌توان برابر صفر در نظر گرفت. همچنین ولتاژ اعمالی بر این الکتروود برابر صفر می‌باشد. لازم به ذکر است که دمای آزمایش نیز $293/15$ درجه‌ی کلوین

گزارش شده است. در جدول ۱، شرایط مرزی پتانسیل الکتریکی، چگالی بار الکتریکی و جریان آرام در کل دامنه نشان داده شده است.

جدول ۱. شرایط مرزی

| مرز | چگالی بار الکتریکی | پتانسیل الکتریکی | جریان |
|-------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------|
| ورودی جریان | $q=0$ | $\frac{\partial V}{\partial x} = 0$ | جریان عمودی |
| خروجی جریان | $q=0$ | $\frac{\partial V}{\partial x} = 0$ | $P=1 \text{ atm}$ |
| مرزهای باز | $q=0$ | $\frac{\partial V}{\partial x} = 0$ | جریان آزاد |
| آند | روش تکراری | $V = V_0$ | عدم لغزش |
| کاتد | $q=0$ | $V = 0$ | عدم لغزش |

۳. روش حل عددی

حل عددی معادلات حاکم با استفاده از نرم‌افزار کامسول^{۵،۵} نسخه انجام شده است. این نرم‌افزار مسائل را به روش المان محدود حل کرده و برای مطالعه‌ی جریان‌های پلاسما مناسب می‌باشد. با توجه به ماهیت متفاوت معادلات (۱) تا (۷)، برای کوپل کردن آنها از حلگر مستقیم^۹ پارادیسو^{۱۰} استفاده شده است [۲۵]. برای دستیابی به حل پایای معادلات ذکر شده، با توجه به غیرخطی بودن آنها و سختی بالای مساله‌ی حاضر، گزینه‌ی "شدیداً غیر خطی"^{۱۱} در تنظیمات حلگر مذکور فعال گردید. همچنین در قسمت تنظیمات معادله غیر خطی، از محدوده خطای نسبی 0.1 استفاده شد.

۳-۱. انواع واکنش‌های صورت گرفته در شبیه‌سازی

برای انجام شبیه‌سازی در شرایط اتمسفریک از ۷۸ درصد گاز نیتروژن و ۲۲ درصد گاز اکسیژن



| | |
|-----------------------------------|----------------------|
| $N+O_2 \Rightarrow NO+O$ | ۴۲/۳۵ |
| $N+O_3 \Rightarrow NO+O_2$ | ۱۴۰ |
| $N+NO_3 \Rightarrow NO+NO_2$ | $۵/۴ \times 10^6$ |
| $O+NO_2+N_2 \Rightarrow NO_3+N_2$ | $۵/۴ \times 10^5$ |
| $Os+NO_2 \Rightarrow NO+O_2$ | $۴/۵ \times 10^7$ |
| $NO+O_3 \Rightarrow NO_2+O_2$ | $۱/۲ \times 10^4$ |
| $O+O_2+N_2 \Rightarrow O_3+N_2$ | ۱۸۹ |
| $O+O+N_2 \Rightarrow O_2+N_2$ | ۲۴۲ |
| $N+NO_2 \Rightarrow NO+NO$ | $۱/۳ \times 10^6$ |
| $e+N_2^+ \Rightarrow N_2$ | ۳×10^{16} |
| $N_2^++N_2^- \Rightarrow 2N_2$ | $۱/۲ \times 10^{18}$ |

۳-۱-۳. واکنش سطحی^{۱۳}

همان‌طور که از اسم این نوع واکنش مشخص است، واکنش روی سطح اجسام رخ می‌دهد. واکنش‌های سطحی که شامل فرآیندهای گسیل ثانویه می‌شوند. منظور از فرآیندهای گسیل ثانویه کنده شدن الکترون، از سطح الکتروود است که در پایسته شدن پلاسما نقش تعیین‌کننده ای دارد، که در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. در این جدول، یون اکسیژن یک بار یونیزه مثبت به صورت O_2^+ ، یون نیتروژن یک بار یونیزه مثبت به صورت N_2^+ و یون اکسیژن و نیتروژن یک بار یونیزه منفی به ترتیب به صورت O_2^- و N_2^- نشان داده شده‌اند. اتم اکسیژن یک بار منفی نیز به صورت O^- نشان داده شده است.

جدول ۴. واکنش‌های سطحی

| Reaction | Secondary Emission Coefficient | Mean Energy of Secondary Electron |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| $O_2^+ \Rightarrow O_2$ | ۰/۰۱ | ۳ |
| $O_2^+ \Rightarrow O_2$ | ۰/۰۵ | ۳ |
| $N_2^+ \Rightarrow N_2$ | ۰/۰۱ | ۳ |
| $N_2^+ \Rightarrow N_2$ | ۰/۰۵ | ۳ |
| $N_2^- \Rightarrow N_2$ | ۰/۰۱ | ۲/۵ |
| $O^- \Rightarrow O$ | ۰/۰۱ | ۲/۵ |

استفاده شده است. نهایتاً تعدادی واکنش که در این سیستم رخ می‌دهد، به آن اضافه شده‌است. واکنش‌های شیمیایی به دو نوع عمده واکنش‌های مکانیکی و کولنی تقسیم‌بندی می‌شود. در واکنش‌های مکانیکی، برخورد بین گونه‌های سنگین و در واکنش‌های کولنی، برخورد بین گونه‌های سنگین و الکترون‌ها است.

همه واکنش‌های شیمیایی صورت گرفته، همگی بر روی دما، انرژی الکترون‌ها و متعاقباً بر روی یون‌ها تاثیرگذار می‌باشند. بنابراین در معادله ۵ بر روی μp ضریب تحریک پذیری یون‌های هوا تاثیر دارند. برخوردهای مکانیکی نیز یا منتج به برخوردهای کولنی شده و بر روی آنها تاثیرگذارند و در غیر این صورت، به عنوان یک گونه ذره، دارای چگالی، دما و .. می‌باشند و در معادلات، میزان چگالی، به صورت مجموع کل چگالی گونه-ها در مسئله ظاهر می‌شود. واکنش‌های اضافه شده به سیستم به شرح زیر است:

۳-۱-۱. برخورد الکترون

واکنش‌های الکترون با گونه‌های خنثی که منجر به فرآیندهایی نظیر یونیزاسیون - چسبندگی - برانگیختگی و ... می‌شود. که در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲. واکنش‌های برخورد الکترون

| Reaction ^{۱۴} | Collision Type |
|---------------------------------|-------------------|
| $e+O_2 \Rightarrow 2e+O_2^+$ | Ionization |
| $e+O_2 \Rightarrow O+O^-$ | Attachment |
| $e+O_2 \Rightarrow e+O+O$ | Excitation |
| $O+O_2+N_2 \Rightarrow O_3+N_2$ | ۱۹۹/۷ |
| $N+O_2 \Rightarrow NO+O$ | ۵۱/۲ |
| $N+O_3 \Rightarrow NO+O_2$ | ۱۲۰ |
| $O+O_3 \Rightarrow O_2+O_2$ | ۴۷۰۰ |
| $O+NO_2 \Rightarrow O_2+NO$ | $۵/۴ \times 10^6$ |
| $O+NO_3 \Rightarrow O_2+NO_2$ | $۱/۲ \times 10^7$ |



در چهار واکنش اولیه، گسیل ثانویه اتفاق افتاده است. در واکنش‌های ۵ و ۶ گسیل ثانویه روی کاتد وجود دارد، اما روی آند نداریم. نهایتاً، بر روی الکتروود با شعاع کمتر، ولتاژ منفی اعمال گردیده است.

۴. اعتبارسنجی و استقلال از شبکه

جهت انجام اعتبارسنجی، از پیکربندی سیم-استوانه استفاده شد. هندسه بکارگرفته شده در مرجع [۱۶] به صورت شماتیک در شکل ۶ قابل مشاهده است. فاصله‌ی دو الکتروود از هم ۲۵ میلی‌متر و قطر هریک از الکتروودها به ترتیب ۲۵ میکرومتر و ۱۲ میلی‌متر است. شبکه تولیدشده، از نوع بی‌سازمان و مثلثی می‌باشد، در شکل ۷ نشان داده شده است. شبکه‌ی تولیدی دارای ۲۶۹۶ سلول محاسباتی بوده و در اطراف آند و کاتد تعداد سلول‌ها بیشتر و ریزتر و در باقی دامنه‌ی حل ابعاد سلول‌ها درشتتر در نظر گرفته شده است. برای بررسی صحت مدل عددی، دو پارامتر نیروی پیشران و جریان الکتریکی با نتایج مرجع [۱۶] مقایسه شده‌اند و خطای بیشینه‌ی آنها محاسبه شده است.

در شکل ۸، نمودار تغییرات نیروی پیشران بر حسب ولتاژ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نیروی پیشران با افزایش ولتاژ اعمالی، افزایش می‌یابد. بیشترین میزان خطا برای کرونا‌ی مثبت ۶/۶ درصد است که حاکی از تطابق خوب نتایج عددی با مقادیر تجربی است.

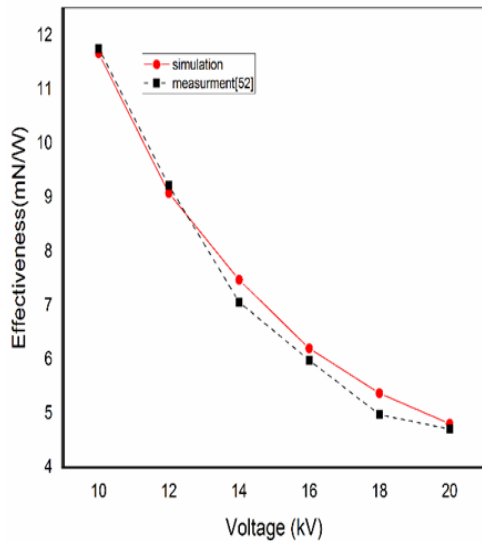
در شکل ۹، نمودار تغییرات جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ نشان داده شده است. با افزایش ولتاژ، جریان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. بیشترین میزان خطا برای کرونا‌ی مثبت در حدود ۵/۱۴ درصد است. جریان الکتریکی نیز همچون

نیروی پیشران به صورت سهمی بر حسب ولتاژ تغییر می‌کند.

در شکل ۱۰، نمودار تغییرات ضریب اثربخشی نیروی پیشران بر حسب ولتاژ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که برخلاف نیروی پیشران و جریان الکتریکی، با افزایش ولتاژ اعمالی، مقدار راندمان کم می‌شود. اگرچه با افزایش ولتاژ اعمالی، نیروی پیشران افزایش یافته، اما بازده یا ضریب اثربخشی، کاهش می‌یابد. بنابراین عملکرد بهینه‌ی تخلیه‌ی کرونا مستلزم پیدا کردن یک نقطه بهینه برای ولتاژ اعمالی است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی، در شکل قابل مقایسه می‌باشند. بیشترین میزان خطابین نتایج عددی و آزمایشگاهی برای کرونا‌ی مثبت، در حدود ۸/۶ درصد است که حاکی از تطابق خوب نتایج عددی با مقادیر تجربی است.

جهت بررسی استقلال از شبکه، از تعداد شبکه بندی‌های مختلف استفاده شده است. به همین دلیل، میزان نیروی پیشران، در سه شبکه متفاوت به دست آورده و در جدول ۵، ارائه شده است. با توجه به تغییرات زیر ۵ درصد مقدار نیروی پیشران در تعداد سلول‌های متفاوت، مستقل بودن جواب‌ها از شبکه حل ارائه شده است. مقدار نیروی پیشران در ولتاژ ۱۲ کیلوولت بر حسب واحد میلی‌نیوتن بر متر مربع، به عنوان یک مثال مطرح و از آوردن بقیه‌ی نتایج صرف نظر شده است.





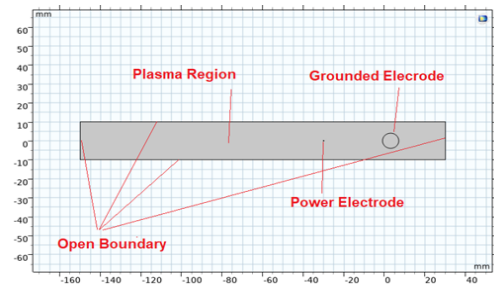
شکل ۱۰. نمودار تغییرات ضریب اثر بخشی نیروی پیشران بر حسب ولتاژ

جدول ۵. استقلال از شبکه

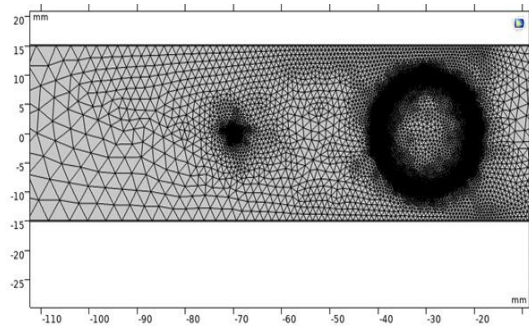
| درصد تغییرات | نیروی پیشران | تعداد المان |
|--------------|--------------|-------------|
| - | ۱۲ | ۱۸۹۰ |
| ۲/۵ | ۱۲/۳ | ۲۶۹۶ |
| ۲/۴ | ۱۲/۶ | ۳۵۰۰ |

۵. نتایج

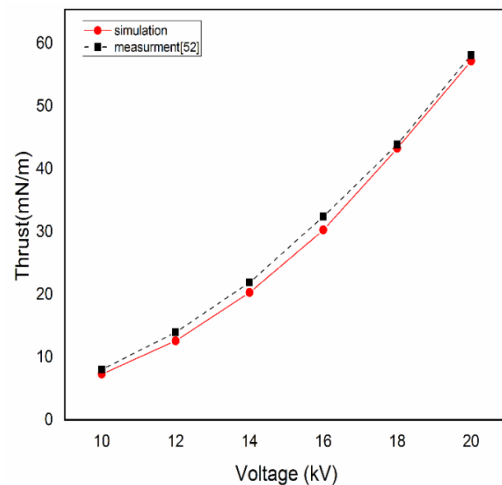
در این شبیه‌سازی، تلاش شده است علاوه بر مطالعه پارامترهای عملکردی جریان الکترو هیدرو دینامیک بین دو الکتروود، تأثیر فاصله بین دو الکتروود که یکی از ویژگی‌های مهم و موثر بر متغیرهای مکانیکی مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور، اثر فاصله بین دو الکتروود را نسبت به متغیرهای مختلفی مانند سرعت باد الکتریکی، جریان الکتریکی، نیروی پیشران در مورد تخلیه کرونای مثبت در سه فاصله‌ی بین دو الکتروود ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متری در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از این تحقیقات در ادامه بیان شده است:



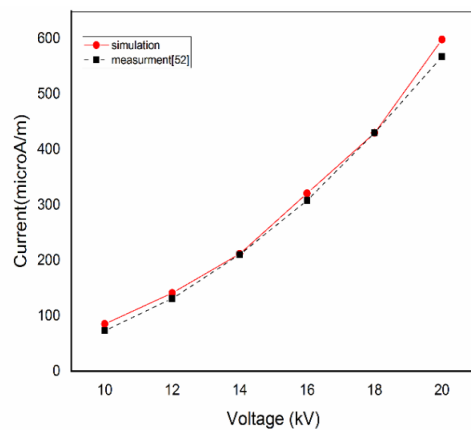
شکل ۶. هندسه‌ی پیکربندی سیم-استوانه جهت اعتبارسنجی



شکل ۷. شبکه‌ی پیکربندی سیم-استوانه جهت اعتبارسنجی



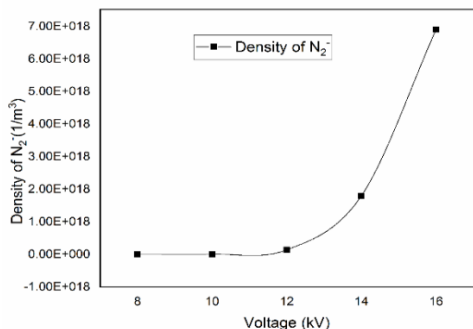
شکل ۸. نمودار تغییرات نیروی پیشران بر حسب ولتاژ



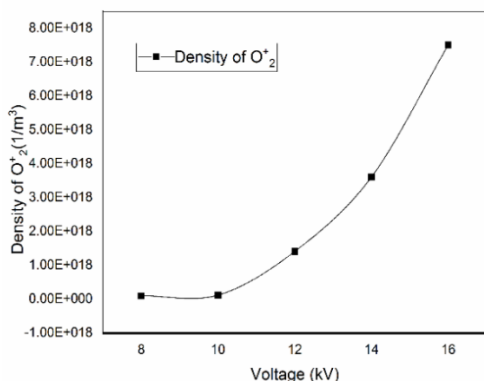
شکل ۹. نمودار تغییرات جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ

۵-۱. مکانیزم تولید چگالی بار الکتریکی

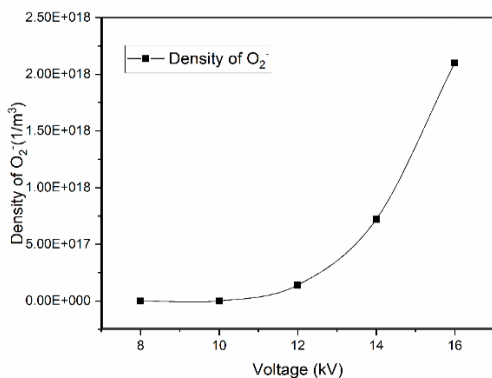
فاصله‌ی بین دو الکترود را از لحاظ چگالی بار الکتریکی می‌توان به دو ناحیه تقسیم کرد. در نزدیکی کاتد، به دلیل وجود تعداد تقریباً برابری از الکترون‌ها و یون‌های مثبت، می‌توان از چگالی بار الکتریکی صرف نظر کرد. اما در اطراف آند، مقادیر چگالی یون‌های هم‌نام و اتم‌های خنثی هوا غالب می‌باشند. بنابراین مقدار چگالی بار در این ناحیه قابل چشم پوشی نیست. در شکل ۱۱، نمودار چگالی الکترون و چگالی گونه‌های مختلف N_2 ، O_2 اطراف آند نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ اعمالی، چگالی الکترون اطراف آند افزایش می‌یابد.



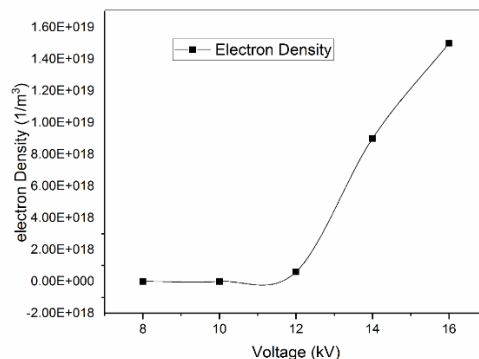
ج) چگالی گونه‌ی یونی N_2^- بر حسب ولتاژ



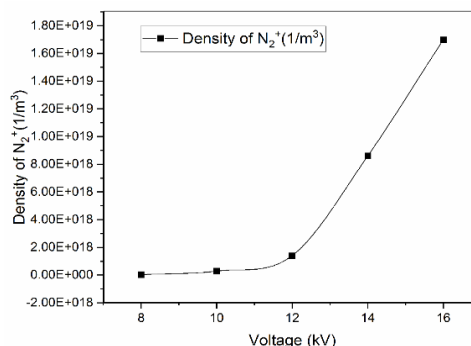
د) چگالی گونه‌ی یونی O_2^- بر حسب ولتاژ



ه) چگالی گونه‌ی یونی O_2^+ بر حسب ولتاژ



ف) چگالی الکترون نسبت به ولتاژ



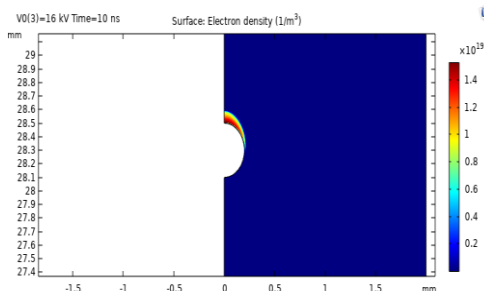
ب) چگالی گونه‌ی یونی N_2^+ بر حسب ولتاژ

شکل ۱۱. تغییرات چگالی الکترون و چگالی گونه‌های یونی N_2 و O_2 نسبت به ولتاژهای مختلف برای پیکربندی سیم-ایرفویل در شکل ۱۲، منحنی دوبعدی توزیع چگالی الکترون و چگالی گونه‌های مختلف N_2 ، O_2 اطراف آند در ۱۶ کیلو ولت نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین میزان چگالی الکترون و گونه‌های مختلف N_2 ، O_2 در اطراف آند می‌باشد.

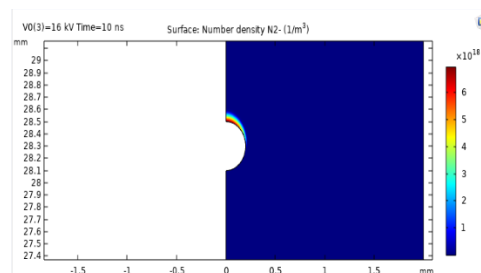
۵-۲. بررسی توزیع دمایی الکترون

در شکل ۱۳، توزیع دمای جریان سیال در اطراف الکتروند آندهای آند و کاتد نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۳ الف مشاهده می‌شود، کانتورهای دمایی الکترون بین سیم و ایرفویل به خوبی نشان شده است. با توجه به معادله انرژی (۷) می‌توان افزایش چند درجه‌ای دما را ناشی از اثر عبارت مربوط به حرارت اهمی دانست. همان طور که پیشتر ذکر شد، افزایش میدان الکتریکی در نزدیکی سطح آند بر اساس رابطه (۲) منجر به ازدیاد جریان الکتریکی در این ناحیه شده و در نتیجه اتلافات الکتروگرایی در نزدیکی سطح آند، افزایش می‌یابد و به تبع آن، مقدار دما در اطراف آن رشد می‌کند.

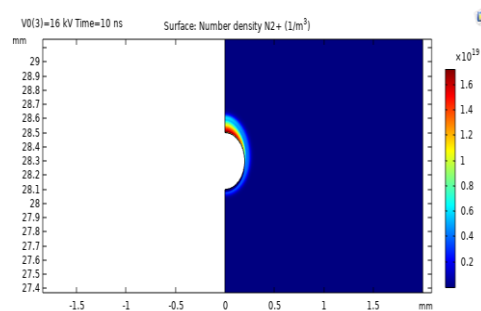
به‌طور کلی از رابطه (۲) می‌توان نتیجه گرفت که $j \propto E$ ، بنابراین حرارت اهمی Ej با مربع میدان الکتریکی E^2 متناسب می‌باشد. با توجه به رابطه مستقیم دما و ولتاژ به ترتیب با حرارت اهمی و میدان الکتریکی، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ولتاژ اعمالی، دما روندی صعودی دارد. نتایج شکل ۱۴ که مقادیر بیشینه‌ی دما بر حسب ولتاژ در آن رسم شده است، مؤید بحث ذکر شده می‌باشد. با این حال باید در نظر داشت، که چون جریان الکترویدرودینامیک در خانواده‌ی جریان‌های پلاسمایی رژیم سرد قرار دارد، افزایش دمای الکترونی به واسطه‌ی افزایش ولتاژ اعمالی در این نوع از جریان‌ها چشم‌گیر نمی‌باشد.



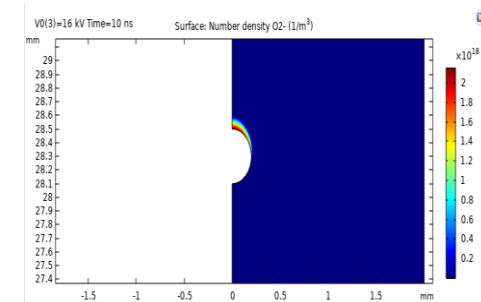
الف) توزیع چگالی الکترون اطراف آند



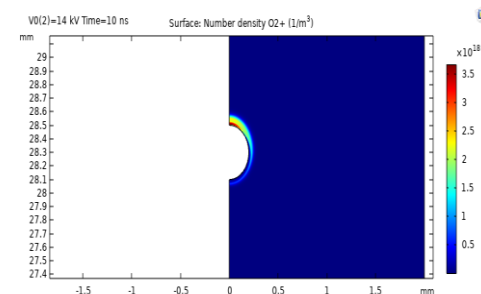
ب) توزیع چگالی N₂⁻ اطراف آند



ج) توزیع چگالی N₂⁺ اطراف آند



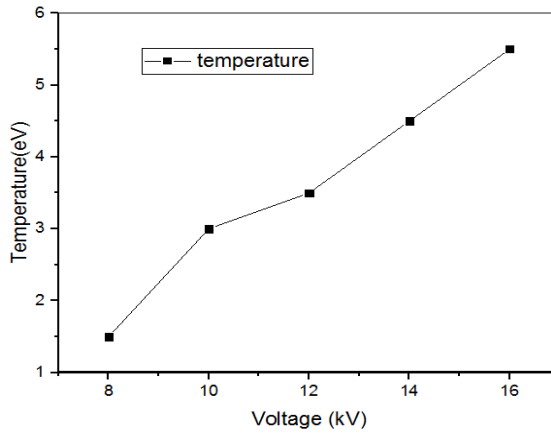
د) توزیع چگالی O₂⁻ اطراف آند



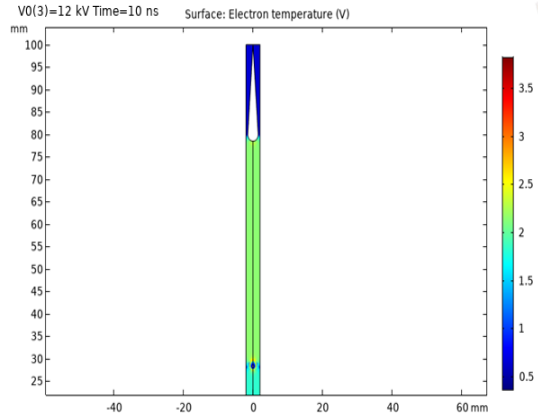
ه) توزیع چگالی O₂⁺ اطراف آند

شکل ۱۲. منحنی دوعبده‌ی توزیع چگالی الکترون و چگالی گونه‌های مختلف N_2 , O_2 اطراف آند در ۱۶ کیلو ولت

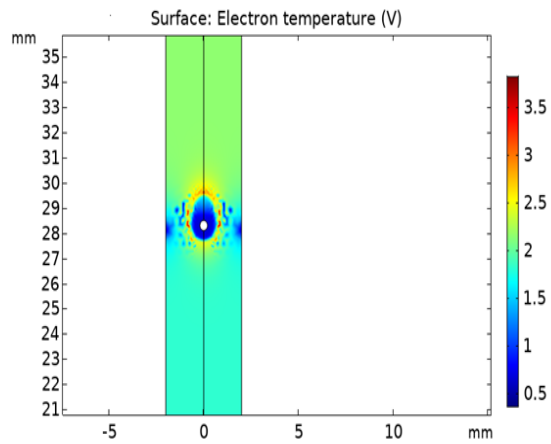




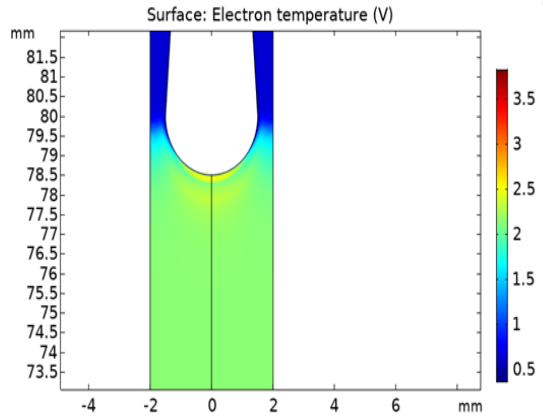
شکل ۱۴. نمودار تغییرات دمای بیشینه نسبت به ولتاژ در پیکربندی سیم-ایرفویل



الف) توزیع میدان الکتریکی اطراف سیم-ایرفویل در ۱۲ کیلوولت



ب) توزیع دمای الکترون اطراف سیم در ۱۲ کیلوولت

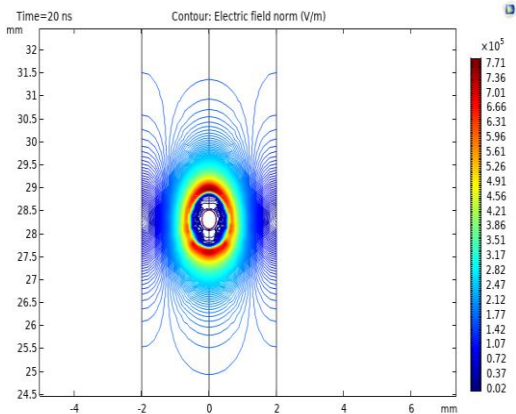


ج) توزیع دمای الکترون اطراف ایرفویل در ۱۲ کیلوولت

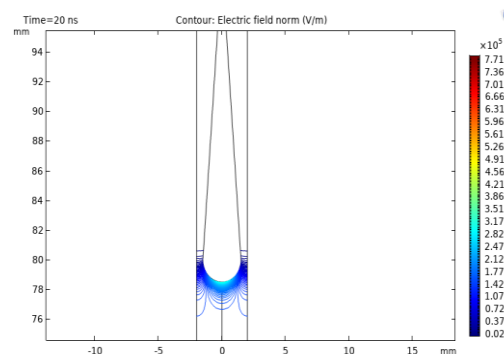
شکل ۱۳. منحنی توزیع دمای الکترون برای پیکربندی سیم-ایرفویل

۵-۳. الگوی توزیع میدان الکتریکی

کانتور توزیع میدان الکتریکی در دامنه حل در پیکربندی سیم-ایرفویل، پس از رسیدن به شرایط پایا در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار میدان الکتریکی در سطح آند به دلیل شعاع کمتر سیم و به وجود آمدن گرادیان میدان الکتریکی، بیشینه است و با حرکت به سمت کاتد، رفته رفته کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. همچنین با توجه به اینکه مرزهای بیرونی در بی‌نهایت فیزیکی واقع شده‌اند، مقدار میدان الکتریکی در این مرزها نیز به صفر میل می‌کند.



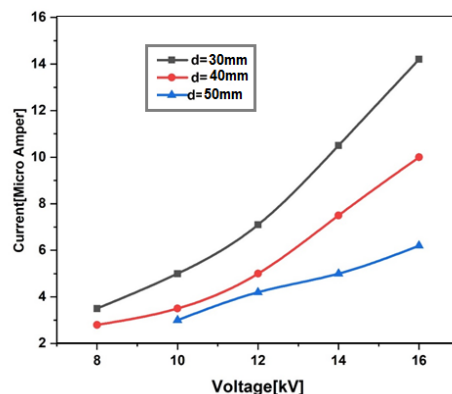
الف) میدان الکتریکی اطراف سیم



ب) میدان الکتریکی اطراف ایرفویل

شکل ۱۵. کانتور میدان الکتریکی اطراف سیم-ایرفویل
۴-۵. بررسی جریان الکتریکی و تأثیر فاصله دو الکترود بر آن

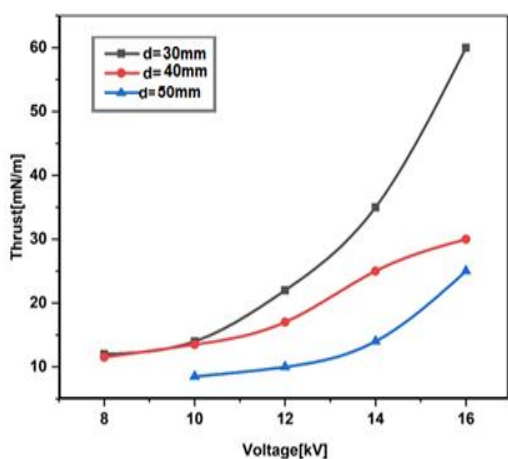
در شکل ۱۶، منحنی تغییرات جریان الکتریکی نسبت به ولتاژ، برای فاصله‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ، میزان جریان الکتریکی افزایش می‌یابد و به صورت سهمی بر حسب ولتاژ تغییر می‌کند. هم‌چنین در مورد اثر فاصله بین دو الکترود بر تغییرات جریان نیز ملاحظه می‌شود که با افزایش فاصله بین دو الکترود، جریان الکتریکی تخلیه کاهش می‌یابد. این بدین معناست که هرچه فاصله کمتر باشد، برای تولید جریان تخلیه‌ی مشابه، توان کمتری مورد نیاز است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که افزایش فاصله الکترود منجر به افزایش توان و نیروی مصرفی می‌شود.



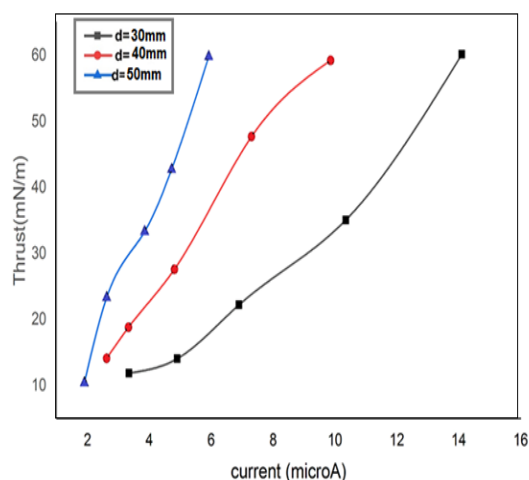
شکل ۱۶. منحنی تغییرات جریان الکتریکی نسبت به ولتاژ در فاصله مختلف بین الکترود سیم-ایرفویل

۵-۵. بررسی نیروی پیشران و تأثیر فاصله دو الکترود بر آن

منحنی تغییرات نیروی پیشران نسبت به ولتاژ در فاصله‌های مختلف بین الکترودها، در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیروی پیشران تولید شده بر اثر تخلیه‌ی کرونا با افزایش ولتاژ اعمالی، افزایش می‌یابد. میزان تغییرات نیروی پیشران به ازای هر کیلوولت ولتاژ اعمالی، ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. هم‌چنین در مورد اثر فاصله بین دو الکترود بر تغییرات نیروی پیشران نیز ملاحظه می‌شود که در یک ولتاژ ثابت، با افزایش فاصله بین الکترودها، نیروی پیشران کاهش می‌یابد. در شکل ۱۸، نمودار تغییرات نیروی پیشران نسبت به جریان الکتریکی در فواصل مختلف بین دو الکترود کاتد و آند نشان داده شده است، همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، همان‌طور که از معادله زیر انتظار می‌رفت، نیروی پیشران با افزایش فاصله بین دو الکترود، متناسب با جریان الکتریکی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷. منحنی تغییرات نیروی پیشران نسبت به ولتاژ در فاصله‌های مختلف بین الکترود سیم-ایرفویل



شکل ۱۸. نمودار تغییرات نیروی پیشران نسبت به جریان الکتریکی در فاصله های مختلف بین الکترودها در پیکربندی سیم-ایرفویل

۵-۶. بررسی سرعت باد الکتریکی و تأثیر فاصله دو الکترود بر آن

منحنی تغییرات سرعت باد الکتریکی نسبت به ولتاژ، در فاصله های مختلف بین الکترود در شکل ۱۹ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می گردد، رابطه ی سرعت با ولتاژ در جریان الکترو هیدرو دینامیک رابطه ای خطی می باشد. این موضوع را از لحاظ تحلیلی نیز می توان بررسی کرد. طبق رابطه ی (۱۳)، جریان الکتریکی با مربع ولتاژ متناسب است.

$$I = C \times V(V - V_0) \quad (13)$$

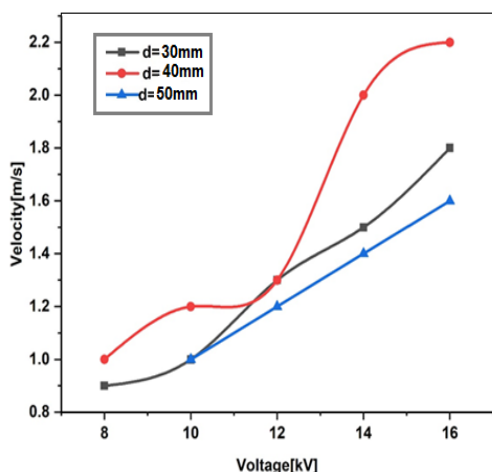
که I جریان کل تخلیه است و V_0 ولتاژ شروع و C یک مقدار ثابت است که به تحرک پذیری یونها μ ، ابعاد و فاصله ی دو الکترود بستگی دارد.

همچنین در رابطه ی (۱۴) مشاهده می شود که سرعت جریان گاز با مجذور جریان الکتریکی تغییر میکند [۱۶]. عبارت (۱۴) نیز نشان می دهد که سرعت جریان با ریشه مربع فاصله الکترود d و جریان الکتریکی تخلیه، I افزایش می یابد.

$$v_G = D_{cte} \sqrt{\frac{d \times I}{\mu}} \quad (14)$$

که در این رابطه D_{cte} یک مقدار ثابت است. با جایگذاری رابطه ی (۱۳) در رابطه (۱۴) مشخص است که سرعت و ولتاژ تقریباً بطور خطی با یکدیگر ارتباط دارند و این امر مؤید نتایج بدست آمده در شکل ۱۹ می باشد.

با افزایش فاصله، سرعت باد الکتریکی، کاهش می یابد. که طبق رابطه سرعت بیان شده در معادله (۱۴) ارائه شده است، با افزایش فاصله بین الکترودها، پروفیل سرعت باد الکتریکی کاهش می یابد. این واقعیت به این دلیل است، که هرچه فاصله بین دو الکترود کمتر می شود، ناحیه ای که در آن تخلیه الکتریکی اتفاق می افتد، کوچک تر می شود. از طرف دیگر، می توان فهمید که سرعت باد الکتریکی با ریشه مرجع فاصله بین دو الکترود افزایش نمی یابد، مانند آنچه که در معادله (۱۴) پیش شده است. این موضوع تعجب آور نیست چون طبق مطالعات، هیچ کس این رابطه را به طور آزمایشی تأیید نکرده است [۱۶].



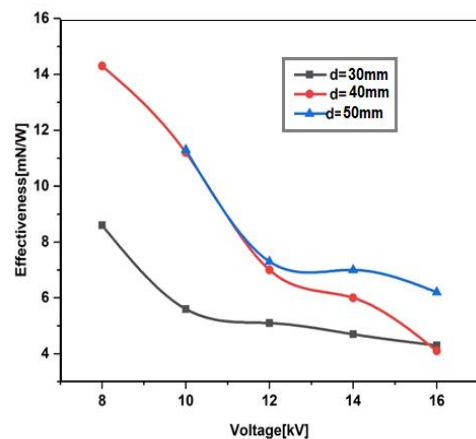
شکل ۱۹. منحنی سرعت باد الکتریکی نسبت به ولتاژ در فاصله های مختلف بین الکترود سیم-ایرفویل

۵-۷. بررسی ضریب تأثیر نیروی پیشران و تأثیر فاصله دو الکترود بر آن

در شکل ۲۰، منحنی تغییرات ضریب تأثیر بر

حسب ولتاژ در فاصله های مختلف بین دو الکتروود نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برخلاف نیروی پیشران و جریان الکتریکی، با افزایش ولتاژ اعمالی، مقدار راندمان کم می‌شود. اگرچه با افزایش ولتاژ اعمالی، نیروی پیشران افزایش یافته، اما بازده یا ضریب اثربخشی، کاهش می‌یابد. بنابراین عملکرد بهینه‌ی تخلیه‌ی کرونا مستلزم پیدا کردن یک نقطه بهینه برای ولتاژ اعمالی است. در حقیقت این رابطه معکوس به این معناست که رانشگر برای تولید نیروی پیشران بیشتر، نیازمند توان ورودی مصرفی بالاتر است.

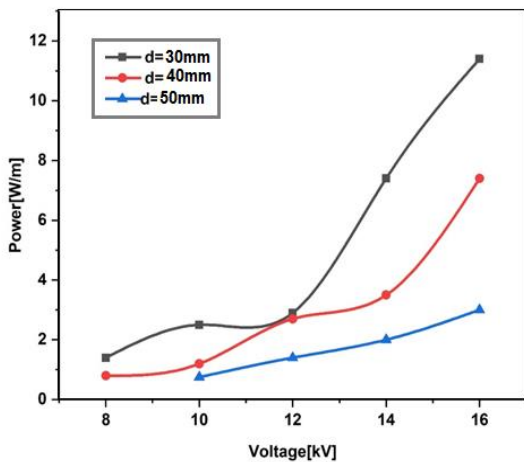
همچنین، در مورد اثر فاصله بین دو الکتروود بر تغییرات ضریب تاثیر نیز ملاحظه می‌شود که طبق معادله‌ی (۱۰)، ضریب تأثیر با افزایش فاصله افزایش می‌یابد و هنگامی که تحرک یونی μ افزایش می‌یابد، ضریب اثربخشی کاهش می‌یابد. به طور کلی افزایش فاصله بین دو الکتروود منجر به تبدیل الکترومکانیکی بهتر و اثر بخشی بهتر می‌شود. میزان تغییرات ضریب اثربخشی نیروی پیشران به ازای افزایش هر کیلوولت ولتاژ اعمالی، حدوداً ۴ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۲۰. منحنی تغییرات ضریب تاثیر نیروی پیشران نسبت به ولتاژ در فاصله‌های مختلف بین الکتروود سیم-ایرفویل

۵-۸. بررسی توان الکتریکی مصرفی و تأثیر فاصله دو الکتروود بر آن

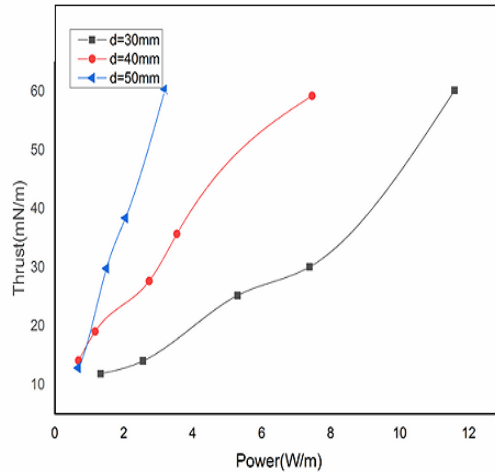
نمودار تغییرات توان الکتریکی مصرفی نسبت به ولتاژ، در فاصله‌های مختلف بین الکتروودها، در شکل ۲۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طبق رابطه‌ی (۱۱) با افزایش ولتاژ، توان الکتریکی مصرفی نیز افزایش می‌یابد. همچنین، در مورد تأثیر فاصله بین دو الکتروودها بر تغییرات توان الکتریکی مصرفی نیز ملاحظه می‌شود که در یک ولتاژ ثابت، با افزایش فاصله بین الکتروودها، توان الکتریکی مصرفی کاهش می‌یابد.



شکل ۲۱. نمودار تغییرات توان الکتریکی مصرفی نسبت به ولتاژ در فاصله‌های مختلف بین الکتروودها برای

پیکربندی سیم-ایرفویل

در شکل ۲۲، تغییرات نیروی پیشران نسبت به توان الکتریکی مصرفی، در فاصله‌های مختلف بین الکتروودها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله بین الکتروودها، توان الکتریکی مصرفی متناسب با نیروی پیشران افزایش می‌یابد که این منحنی‌ها، معادله (۱۲) را به درستی بیان می‌کنند. این امر نشان می‌دهد، که افزایش فاصله بین دو الکتروود منجر به تبدیل الکترومکانیکی بهتر می‌شود.



شکل ۲۲. نمودار تغییرات نیروی پیشران نسبت به توان الکتریکی مصرفی در فاصله‌های مختلف بین الکتروود برای پیکربندی سیم-ایرفویل

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار کامسول، تأثیر پارامترهای مختلف دما، سرعت باد الکتریکی و چگالی ذرات باردار، میزان توان مصرفی، نیروی پیشران و ضریب تاثیر برحسب ولتاژ برای پیکربندی سیم-ایرفویل در تخلیه کرونای مثبت تحقیق و بررسی شد و علاوه بر آن، تأثیر فاصله بین دو الکتروود بر این پارامترها در این پیکربندی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. میزان تغییرات ولتاژ تا محدوده ۱۶ کیلوولت در نظر گرفته شد. در این تحقیق، هوا به طور کامل در نظر گرفته شده است و کلیه برخوردها و واکنش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی و رفتارسنجی مشخصه‌های الکتریکی و الگوی جریان سیال نتایج زیر حاصل شد:

- میزان چگالی بار الکتریکی در سطح الکتروود آند، بیشترین مقدار خود را دارد و با حرکت از سمت آند به کاتد مقدار آن کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ولتاژ اعمالی، مقدار چگالی بار الکتریکی در اطراف آند افزایش

می‌یابد. همانطور که مشاهده شد با افزایش ولتاژ، به طور سهمی، چگالی بار الکترون و گونه‌های یونی در اطراف آند افزایش می‌یابد. همانگونه که مشاهده می‌گردد، بیشترین میزان توزیع چگالی الکترون در اطراف آند و سپس در مکان روبه‌روی آند در جلوی ایرفویل می‌باشد.

افزایش میدان الکتریکی در نزدیکی سطح آند، منجر به ازدیاد جریان الکتریکی در این ناحیه شده و در نتیجه اتلافات الکتروگرمایی در نزدیکی سطح آند افزایش می‌یابد و به تبع آن مقدار دما رشد می‌کند. همانگونه که مشاهده شد، با افزایش میزان ولتاژ، میزان تغییرات دما نیز در مجاورت آند، بیشتر می‌شود.

در تخلیه کرونا، با افزایش ولتاژ، میزان جریان الکتریکی افزایش می‌یابد و به صورت سهمی بر حسب ولتاژ تغییر می‌کند. همچنین در مورد تاثیر فاصله بین دو الکتروود بر تغییرات جریان الکتریکی در پیکربندی سیم-ایرفویل نیز ملاحظه شد که با افزایش فاصله بین دو الکتروود، جریان تخلیه کاهش می‌یابد. این بدین معناست که هرچه فاصله کمتر باشد، برای تولید جریان تخلیه‌ی الکتریکی مشابه، توان کمتری مورد نیاز است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که افزایش فاصله الکتروودها منجر به افزایش توان و نیروی مصرفی می‌شود.

نیروی پیشران تولید شده بر اثر تخلیه‌ی کرونا با افزایش ولتاژ اعمالی، افزایش می‌یابد. همچنین، در مورد اثر فاصله بین دو الکتروود بر تغییرات نیروی پیشران در پیکربندی سیم-ایرفویل ملاحظه شد، در یک ولتاژ ثابت، با

- توان الکتریکی مصرفی کاهش می‌یابد.

۷. مآخذ

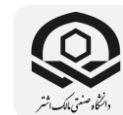
- [1] A.S.Taleghani, A. Shadaram, M. Mirzaei, and S. Abdolahipour, Parametric Study of a Plasma Actuator at Unsteady Actuation by Measurements of the Induced Flow Velocity for Flow Control, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 40, No.4, pp. 1-13, 2018.
- [2] M. Mirzaei, A. S. Taleghani, and A. Shadaram. Experimental Study of Vortex Shedding Control Using Plasma Actuator. Applied Mechanics and Materials, Vol. 186, Trans Tech Publications Ltd, 2012.
- [3] A. S. Taleghani, A. Shadaram, and M. Mirzaei, Experimental Investigation of Active Flow Control for Changing stall Angle of a NACA0012 Airfoil, Using Plasma-Actuator. Vol.1, No.1, pp.89-97, 2012.
- [4] A. Salmasi, Numerical and experimental Investigation on the Effect of a Plasma Actuator on NLF0414 Airfoils' Efficiency after the Stall. Modares Mechanical Engineering, Vol. 12, No.6, pp.104-116, 2013.
- [5] F. Yang, N. Larsen, D. Brown, D. Parker, K. Pendergrass, I. A. Krichtafovich, and A. V. Mamishev, Corona Driven Air Propulsion for Cooling of Electronics. 8th International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, 2003.
- [6] F. Hauksbee, Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects, First Edition, London: Brugis, pp.46-47.1709.
- [7] I. Newton, Opticks: a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light, W. and J. Innys, London, 2nd Edition, pp.25-27.1718.
- [8] 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.
- [9] D. J. Harney, An Aerodynamic Study of the Electric Wind, PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 1957.
- [10] E.A. Christenson, P.S. Moller, Ion-Neutral Propulsion in Atmospheric Media, AIAA Journal, Vol. 5, No. 10, 2012.
- [11] J. L. Davis, J. F. Hoburg, Wire-Duct Precipitator Field and Charge Computation Using Finite Element and Characteristics Methods, Journal of Electrostatics, Vol. 14, No.2, pp. 187-199, 1983.

افزایش فاصله الکترودها، نیروی پیشران کاهش می‌یابد. میزان تغییرات نیروی پیشران به ازای افزایش هر کیلوولت ولتاژ اعمالی ۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

- افزایش ولتاژ با تأثیرگذاری بر روی چگالی بار الکتریکی موجب افزایش نیروی کولمب و به تبع آن افزایش سرعت جریان سیال می‌گردد. با افزایش فاصله، سرعت باد الکتریکی و پروفیل سرعت کاهش می‌یابد. این واقعیت به این دلیل است که هرچه فاصله بین دو الکترودها کمتر می‌شود، ناحیه‌ای که در آن تخلیه الکتریکی اتفاق می‌افتد، کوچک‌تر می‌شود.

- در عملگرهای الکتریکی، ضریب تاثیر نیروی پیشران نشان می‌دهد، هرچه نیروی پیشران بیشتری ایجاد کنیم با توان الکتریکی مصرفی کمتر به شرایط بهینه دست یافته‌ایم. هم‌چنین در مورد اثر فاصله بین دو الکترودها بر تغییرات ضریب تاثیر نیز ملاحظه شد، ضریب تاثیر با افزایش فاصله الکترودها، افزایش می‌یابد و هنگامی که تحرک یونی μ افزایش می‌یابد، ضریب اثربخشی کاهش می‌یابد. به طور کلی افزایش فاصله بین دو الکترودها منجر به تبدیل الکترومکانیکی بهتر و اثر بخشی بهتر می‌شود.

- در تخلیه کرونا، برای بهینه سازی بهتر و تولید بیشترین نیروی پیشران به کمترین توان الکتریکی نیاز است. هم‌چنین در مورد تاثیر فاصله بین دو الکترودها بر تغییرات توان الکتریکی مصرفی در پیکربندی سیم - ایرفویل نیز ملاحظه شد که در یک ولتاژ ثابت، با افزایش فاصله بین الکترودها، توان الکتریکی مصرفی کاهش می‌یابد.



6. Breakdown Electric Strength
7. Kaptsov's Assumption
8. Comsol Multiphysics
9. Direct Solver
10. PARDISO
11. Highly Non-Linear

۱۲. مولکول ها و اتم هایی که پسوند S به حالت برانگیختگی اشاره دارند.

13. Surface Reaction

- [12] 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.
- [13] E. Moreau, G. Artana, G. Touchard, and L. Leger, Influence of a DC Corona Discharge on the titttttAirflow along an Inclined Flat Plate, J. Electrostatics, Vol. 50-51, pp. 300-306,2001.
- [14] N. E. Jewell-Larsen, S. V. Karpov, I. A. Krichtafovitch, V. Jayanty, C. Hsu, A. V. Mamishev, Modeling of Corona-Induced electrohydrodynamic Flow with COMSOL Multiphysics, Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics, Paper E1, 2008.
- [15] D. F. Colas, A. Ferret, D. Z. Pai, D. A. Lacoste, C. O. Laux, Ion wind generation by a wire-cylinder-plate corona discharge in air at atmospheric pressure, Journal of Applied Physics, Vol. 108, No. 10, pp. 1-6, 2010.
- [16] E. Moreau, N. Benard , J. D. Lan-Sun-Luk, J. P. Chabriat, Electrohydro dynamic force Produced by a Wire-to-Cylinder DC Corona Discharge in Air at Atmospheric Pressure, Journal of Physics D Applied Physics, Vol. 46, No. 47, pp.1-14,2013.
- [17] E. Moreau, N. Benard, F. Alicalapa, A. Douyère, Electrohydrodynamic Force Produced by a Corona Discharge between a Wire Active Electrode and Several Cylinder Electrodes. Application to Electric Propulsion, Journal of Electrostatics, Vol.76, pp.194-200, 2015.
- [18] C. K. Gilmore, S. R. H. Barrett, Electrohydrodynamic Thrust Density Using Positive Corona-induced Ionic Winds for in-Atmosphere Propulsion, Proceedings of Royal Society A, Vol. 471, No. 2175, pp. 1-24, 2015.
- [19] H. Shibata, Y. Watanabe, K. Suzuki, Performance Prediction of Electrohydrodynamic Thrusters by the Perturbation Method, Physics of Plasmas, Vol. 23, No. 5, pp. 1-7.2016.
- [20] I. Monrolin, F. Plouraboune, O. Praud, Electrohydrodynamic Thrust for in Atmosphere Propulsion, AIAA J ,Vol.55,pp. 4296-4305 ,2017.

۸. پی نوشت

- 1 .DBD
2. Electro Hydro Dynamics
- 3 . Lifter
4. Perturbation Method
5. Peek's Formula

