مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1397، دوره 18، شماره 02، ص‌ص 323-330

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی عددی رژیم تخلیه کرونا تولیدشده توسط پیکربندی سیم-سیلندر در شرایط اتمسفریک

علیرضا فتحی[1]، مهدی آهنگر[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
2- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
* تهران، صندوق پستی 1983969411، m_ahangar@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 15 آذر 1396
پذیرش: 25 دی 1396
ارائه در سایت: 21 بهمن 1396

کلید واژگان:
جریان پلاسما
مدلسازی عددی
تخلیه کرونا
جریان هیدرودینامیک الکتریکی

چکیده

اختلاف ولتاژ بین دو الکترود با ضخامت‌های ناهمسان، در صورتی که میدان الکتریکی در اطراف الکترود تخلیه‌کننده (آند) به حدی قوی باشد که باعث یونیزه شدن گازهای اطراف خود شود اما توانایی ایجاد قوس الکتریکی را نداشته باشد، موجب پدیده تخلیه کرونا می‌گردد. تخلیه کرونا در ابتدا به عنوان پدیده‌ای ناخوشایند شناخته می‌شد، اما امروزه کاربردهای مختلفی از جمله استفاده در رانشگرها دارد. در تحقیق حاضر مشخصات جریان ناشی از تخلیه کرونا از قبیل سرعت، تراست، دما، جریان الکتریکی، خطوط جریان و راندمان مورد مطالعه‌ی عددی قرار گرفته است. بدین منظور معادلات الکترواستاتیکی و معادلات نویر استوکس به صورت کوپل و با استفاده از روش المان محدود حل شده‌اند. اعتبارسنجی نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که بیشترین مقدار خطا در اندازه‌ی جریان الکتریکی، نیروی پیشران و راندمان نیروی پیشران در مقایسه با مقادیر تجربی به ترتیب کمتر از 14، 2 و 6 درصد می‌باشند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ولتاژ اعمالی بر آند، نیروی پیشران و جریان افزایش، و راندمان نیروی پیشران کاهش می‌یابد. علاوه بر این با در نظر گرفتن اثر گرمایش اهمی در معادله‌ی انرژی مشاهده شد که بیشینه‌ی دما در اطراف الکترود آند رخ می‌دهد.

Numerical simulation of electrohydrodynamic flow produced by wire-to-cylinder in atmospheric condition

Alireza Fathi, Mahdi Ahangar*

Department of Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
* P.O.B. 1983969411, Tehran, Iran, m_ahangar@sbu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 December 2017
Accepted 15 January 2018
Available Online 10 February 2018

Keywords:
Plasma Flow
Numerical Modeling
Corona Discharge
Electro-Hydro-Dynamic Flow

ABSTRACT

Applying an Electric potential between two electrodes with different thicknesses will cause corona discharge if the electric field around the corona electrode is strong enough to ionize the surrounding gas and weak enough to avoid arcing. Corona discharge used to be known as an unpleasant phenomenon but it has lots of applications today including the ionic thrusters. In this research, the specifications of the flow resulted from corona discharge such as velocity, thrust, and temperature, electric current, flow streamlines and thrust effectiveness have been numerically studied. To do so, the electrostatic and Navier-Stokes equations have been coupled and solved by finite element method (FEM) using the COMSOL Multiphysics software version 5.2. Data validation shows that the maximum errors between the numerical and experimental results in computing thrust, current and thrust effectiveness are respectively below 2%, 14% and 6%. Also the results show that with rising the applied Voltage, the resulted thrust and electric current will increase and the thrust effectiveness decreases. Furthermore, by considering the effect of Ohmic heating in the energy equation, it has been found that the maximum temperature raise happens around anode.

1- مقدمه

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 فرایند در شکل 1 قابل مشاهده می‌باشد. مطابق این شکل، 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.

تخلیه کرونا در سیستم‌های فشار قوی و خطوط انتقال قدرت پدیده‌ای نامطلوب و خطرناک محسوب می‌گردد؛ اما یک تخلیه کرونای کنترل‌شده می‌تواند از طریق باردار کردن ذرات اطراف آند و انتقال مومنتم آن‌ها به ذرات خنثی دورتر از آند، جریانی را ایجاد کند که به آن جریان الکتروهیدرودینامیکی (EHD) می‌گویند و امروزه کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف دارد.

اولین مشاهده‌ی جریان EHD در سال 1709 توسط هاکزبی صورت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Fathi, M. Ahangar, Numerical simulation of electrohydrodynamic flow produced by wire-to-cylinder in atmospheric condition, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 323-330, 2018 (in Persian)

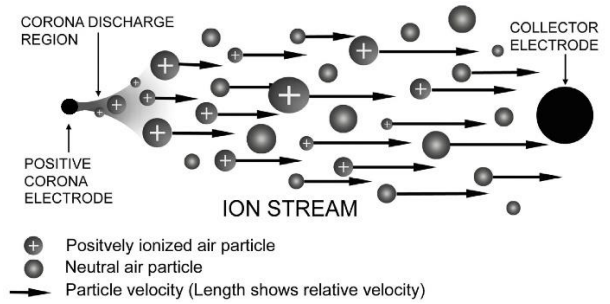

Fig. 1 Schematic of Corona Discharge [1]

شکل 1 شماتیک تخلیه کرونا [1]

گرفت [2]. وی متوجه تولید جریان هوایی با سرعت کم هنگام اعمال ولتاژ بین دو الکترود شد که بعدها این پدیده توسط نیوتن "باد الکتریکی" نامیده شد [3]. در اواخر قرن نوزدهم، چتوک برای نخستین بار باد الکتریکی را به صورت کمّی مطالعه کرد [4] و در سال 1957 هارنی مشخصات الکتریکی تخلیه کرونا و تغییر پارامترهای آیرودینامیکی جریان را برای بررسی میزان نیروی تولید شده توسط این پدیده بررسی نمود [5]. وی رابطه‌ای بین فشار و جریان الکتریکی در تخلیه کرونا بین دو الکترود صفحه‌ای پیدا کرد که تبدیل به مبنایی برای پژوهش‌های آینده گردید.

روابطی که طی این سال‌ها بر اساس پژوهش‌های تجربی بدست آمدند تنها قادر به حل تحلیلی مسائل بسیار ساده بودند و در مسائل دو یا سه‌بعدی کارایی لازم را نداشتند. از این رو توسعه‌ی روش‌های عددی برای مطالعه‌ی جریان EHD به یک ضرورت بدل شد. در همین زمان روش المان محدود نیز ابداع شد و دیویس یکی از نخستین پژوهش‌های عددی در زمینه تخلیه کرونا را با این روش انجام داد [6].

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 تحرک‌پذیری یون‌ها با افزایش ارتفاع، این راندمان کمتر هم می‌شود. به هر حال برخی محققان ادعا کردند که می‌توان راندمان رانشگر EHD را افزایش داد. بوندار و باستین در پژوهش خود با استفاده از سرعت ورودی 50 m/s توانستند میزان راندمان رانشگر را تا 7.5% بهبود بخشند [7]. در این پژوهش پیشنهاد استفاده از نیروی EHD در سیستم پیشرانش کنترلی بالن‌ها و هواپیماهای کوچک با در نظر گرفتن انرژی خورشیدی و سامانه‌های تبدیل انرژی فتوولتائیک[1] (به منظور تولید ولتاژ لازم برای شروع تخلیه کرونا) جهت تامین انرژی لازم نیز مطرح شد.

در سال 2008، جول لارسن و همکاران برای اولین بار از نرم‌افزار کامسول برای شبیه‌سازی عددی جریان الکتروهیدرودینامیک استفاده و سپس آن را با نتایج تجربی مقایسه کردند [1]. در این پژوهش با اعمال ولتاژ 8 kV سرعت هوای ساکن در شرایط اتمسفریک به 1.1 m/s افزایش داده شد و در محدوده ولتاژ 4 تا 8 کیلوولت، میانگین درصد خطای 4% بین نتایج عددی و تجربی حاصل شد.

کولاس و همکاران در یک پیکربندی متشکل از 5 الکترود 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 [8]. آن‌ها سرعت را تا 10 m/s اندازه گرفتند و با استفاده از پروفیل‌های سرعت، نیروی EHD را تا 350 mN بر واحد طول الکترود محاسبه نمودند. در این پژوهش توان مصرفی به میزان 210 W/m اندازه‌گیری شد که در نتیجه مقدار راندمان 1.7 mN/W به ثبت رسید.

موریاو و همکاران برای درک بهتر پدیده الکتروهیدرودینامیک، آن را در یک پیکربندی سوزن-صفحه‌ای به صورت تجربی مطالعه کردند [9]. در این پژوهش جامع، رابطه‌ی جریان الکتریکی حاصل از تخلیه کرونا با ابعاد کاتد و فاصله‌ی بین دو الکترود، تأثیر افزایش فاصله الکترودها 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 24 kV، میزان نیروی پیشران حاصل تا 90 mN/m اندازه‌گیری شد.

موریاو در پژوهش تجربی بعدی خود سعی کرد با تغییر تعداد و نحوه‌ی چیدمان کاتدها، میزان راندمان بدست‌آمده برای رانشگر را افزایش دهد [10]. نتایج بدست‌آمده حاکی از آن است که با افزایش تعداد الکترودها از دو به سه، نیروی درگ ناشی از کاتد کاهش می‌یابد. ضمن اینکه بهترین راه برای افزایش راندمان رانشگر الکتروهیدرودینامیکی در یک پیکربندی سه الکترودی، افزایش فاصله بین آند و کاتدها می‌باشد. 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 امکان‌پذیر است که ولتاژ اعمالی موجب قوس الکتریکی نشود.

کیوسیس و همکاران در سال 2014 پژوهشی مشابه با مرجع [9] انجام دادند؛ با این تفاوت که در این پژوهش به مطالعه پارامتریک مشخصه‌های هندسی الکترودها توجه بیشتری نشان داده شد [11]. تأثیرات تغییر شعاع آند و کاتد و فاصله‌ی بین الکترودها بر نیروی پیشران تولیدی در پژوهش مذکور بررسی شد و یک رابطه‌ی خطی بین جریان الکتریکی و نیروی پیشران تولیدی مشاهده گردید. سرعت ایجادشده ناشی از تخلیه کرونا در این پژوهش تا میزان 2.88 m/s اندازه‌گیری شد.

همچنین گیلمور و برت سعی کردند با تغییر پارامترهای هندسی، مقدار بیشینه‌ی چگالی نیروی پیشران را برای یک رانشگر الکتروهیدرودینامیکی به صورت تجربی اندازه‌گیری کنند [12]. آن‌ها موفق شدند مقادیر نیروی پیشران بر واحد سطح را تا $3.3\ N/m^2$ و نیروی پیشران بر واحد حجم را تا $15\ N/m^3$ محاسبه نمایند. در نتایج این پژوهش، رانشگرهای EHD هم از لحاظ راندمان انرژی و هم از لحاظ چگالی نیروی پیشران، به عنوان سامانه‌هایی قابل اطمینان تایید شدند و پهپادها به عنوان بهترین گزینه برای بکارگیری آن‌ها معرفی گشتند.

شیباتا و همکاران در سال 2016 روشی جدید را برای مطالعه‌ی عددی تخلیه کرونا برای استفاده در یک رانشگر الکتروهیدرودینامیکی به کار گرفتند [13]. مدلسازی عددی در این پژوهش بر اساس روش اغتشاشات[2] انجام شد. همچنین، تأثیر اضافه کردن یک کاتد متصل به ولتاژ منفی به رانشگر بررسی گردید؛ نتایج حاکی از آن بودند که اگر اندازه‌ی ولتاژ منفی اعمالی بر کاتد از مقدار خاصی بیشتر باشد، راندمان رانشگر دو مرحله‌ای از رانشگر تک‌مرحله‌ای بیشتر خواهد شد. بنابراین نویسندگان این تحقیق پس از موفقیت در مدلسازی رانشگرهای الکتروهیدرودینامیکی تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای با روش اغتشاشات، این روش را به عنوان روشی مناسب برای مطالعه‌ی رانشگری با تعداد مراحل بیشتر پیشنهاد دادند. از دیگر تلاش‌های انجام‌شده برای مطالعه‌ی رانشگرهای الکتروهیدرودینامیک می‌توان به پژوهش تجربی

[1] Photovoltaic

[2] Perturbation Method

ماسویاما و برت [14] اشاره کرد. آنها با بررسی عملکرد رانشگرهای الکتروهیدرودینامیکی دریافتند که نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی آن‌ها بین 2 تا 5 برابر پیشران‌های جت می‌باشد. همچنین گرانادوس و همکاران [15] در پژوهشی عددی به بررسی آثار تغییر شکل کاتد و استفاده از گازهایی همچون آرگون، نیتروژن و اکسیژن در شرایط شبه خلاء بر نیروی پیشران تولیدشده توسط یک رانشگر الکتروهیدرودینامیک پرداختند.

وانگ و همکاران به منظور بهبود عملکرد انتقال حرارت با کمک تخلیه کرونا، تأثیر تعداد الکترودهای کاتد و نحوه‌ی قرارگیری آن‌ها را بر روی ضخامت لایه مرزی حرارتی و تغییرات گرادیان‌های سرعت در آن مطالعه کردند [16]. در این پژوهش بر خلاف مرجع [13] تعداد آندها افزایش یافت و فقط یک کاتد استفاده شد. طبق نتایج بدست آمده با اعمال ولتاژ 11- kV و استفاده از سه آند، ضریب انتقال حرارت تا 8 برابر و ضخامت لایه مرزی حرارتی تا 39.8% کاهش یافت.

بررسی پژوهش‌های ذکرشده نشان می‌دهد که مرجع [9] به صورت جامع اثرات پارامترهای عملکردی و هندسی در رژیم تخلیه کرونا را مورد مطالعه‌ی تجربی قرار داده است. با این حال، در پژوهش مذکور رفتار مشخصه‌ها و الگوی جریان الکتروهیدرودینامیک مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. از این رو برای درک بهتر فیزیک حاکم بر جریان پلاسمای بین دو الکترود، در پژوهش حاضر نمونه آزمایش بکارگرفته‌شده در مرجع [9] برای اولین بار به صورت عددی شبیه‌سازی شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی تلاش شده تا علاوه بر مطالعه پارامترهای عملکردی جریان الکتروهیدرودینامیک بین دو الکترود، الگو و رفتار جریان سیال، مشخصه‌های الکتریکی رژیم تخلیه کرونا و اثرات اتلافات الکتروگرمایی در قالب تغییرات دمای جریان سیال به طور همزمان مد نظر قرار گیرند.

2- مشخصات مسئله

2-1- هندسه مسئله و شبکه محاسباتی

هندسه بکارگرفته شده در مرجع [9] بصورت شماتیک در شکل 2 قابل مشاهده است. در این چیدمان شعاع آند 12.5 µm و شعاع کاتد 6 mm در نظرگرفته شده و دو الکترود در فاصله‌ی 30 mm از یکدیگر قرار گرفته‌اند.

شبکه تولیدشده که از نوع بی‌سازمان و مثلثی می‌باشد در شکل 3 نشان داده شده است برای تولید این شبکه از گزینه‌ی ساخت شبکه برای مطالعه‌ی جریان پلاسما در نرم‌افزار کامسول استفاده شده است. شبکه‌ی تولیدی دارای 4824 سلول محاسباتی بوده و با اعمال گزینه توزیع[1] روی سطح الکترودها در

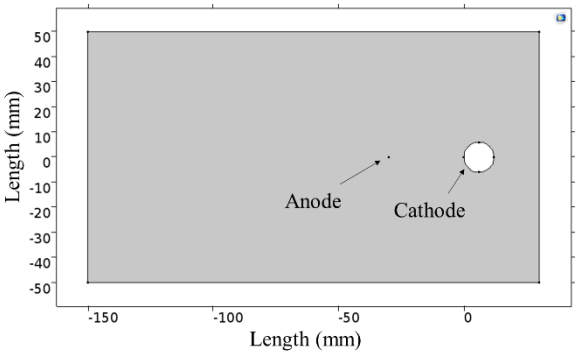

Fig. 2 Schematic of Geometry

شکل 2 هندسه‌ی مسئله

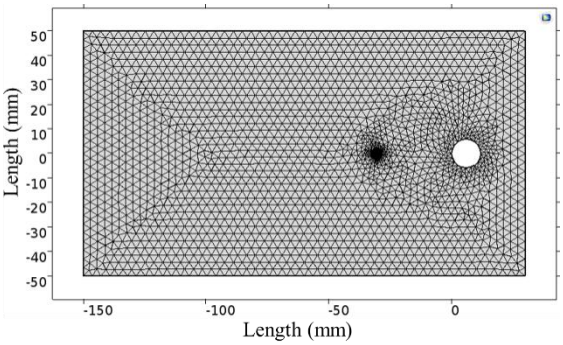

Fig. 3 Generated Mesh

شکل 3 شبکه‌بندی

نرم‌افزار، 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.

2-2- معادلات حاکم

شبیه‌سازی عددی رژیم تخلیه کرونا نیازمند در نظر گرفتن همزمان معادلات الکترواستاتیک و نویر-استوکس می‌باشد. در جریان‌های پلاسما، میدان الکتریکی و چگالی بار الکتریکی از طریق رابطه پواسون (1) به یکدیگر مرتبط می‌شوند:

$$\nabla \cdot E = -\nabla^2 V = \frac{q}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

که $q = e(n_i - n_e)$ نشان‌دهنده‌ی چگالی بار الکتریکی و ε_0 ثابت گذردهی هوا می‌باشد.

همچنین چگالی جریان الکتریکی از رابطه (2) قابل محاسبه است:

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

در این معادله، μ_p ضریب تحرک‌پذیری[2] یون‌های هوا، U سرعت جریان و D ضریب نفوذپذیری یون‌ها می‌باشد. سه عبارت سمت راست رابطه‌ی (2) به ترتیب نشانگر سهم حرکت یون‌ها بر اثر میدان الکتریکی، حرکت بار الکتریکی ناشی از جریان سیال، و نفوذ بارهای الکتریکی می‌باشند. پیوستگی چگالی بار الکتریکی با در نظر گرفتن معادله‌ی (3) تضمین می‌گردد:

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

با توجه به این‌که تغییرات چگالی جریان هوا در پیرامون الکترودها ناچیز است، جریان به صورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده و معادله‌ی پیوستگی به شکل رابطه (4) می‌باشد:

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

با ترکیب کردن معادلات (2)، (3) و (4)، رابطه (5) بدست می‌آید:

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

همچنین با در نظر گرفتن اثر نیروی حجمی ناشی از میدان الکترواستاتیکی، معادله‌ی مومنتم به صورت رابطه (6) در می‌آید:

$$\rho U \cdot \nabla U = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + qE \quad (6)$$

که ρ چگالی هوا، p فشار هوا و μ لزجت دینامیک هوا می‌باشد. ضمناً qE نشانگر نیروی الکترواستاتیک یا نیروی کولمب است.

در نهایت برای بررسی تأثیر تخلیه کرونا بر دمای جریان، معادله‌ی انرژی بصورت رابطه (7) نوشته می‌شود:

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

[1] Distribution

[2] Mobility Coefficient

در این معادله C_p ظرفیت گرمایی مخصوص هوا و K ضریب انتقال حرارت هوا می‌باشند. همچنین عبارت EJ بیانگر حرارت اهمی ناشی از افت ولتاژ بین دو الکترود است.

2-3- 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 صرف‌نظر 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. برای تخلیه جریان الکتریکی در رژیم کرونا در هوا تحت شرایط استاندارد، با استفاده از فرمول پیک[1] [17] می‌توان شدت میدان الکتریکی را روی الکترود آند با شرط صاف بودن سطح آن تخمین زد:

$$E_e = E_0(1 + (0.0262/\sqrt{R_e})) \quad (8)$$

در این رابطه R_e شعاع آند و $E_0 = 3.31 \times 10^6\ \mathrm{V/m}$ شدت الکتریکی شکست[2] هوا می‌باشد. شرایط مرزی چگالی بار الکتریکی می‌تواند با استفاده از فرض کاپتسوف[3] 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 صرف‌نظر کرد. تحت این شرایط، شدت میدان الکتریکی در سطح آند را می‌توان با استفاده از معادله (8) 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 بدست‌آمده از فرمول پیک برابر باشد، حل پایان می‌پذیرد؛ در غیر این صورت حدس اولیه تصحیح شده و الگوریتم ذکرشده مجددا تکرار خواهد شد. روندنمای روش مذکور، در شکل 4 نشان داده شده است.

2-4- شرایط مرزی و اولیه

با توجه به اینکه شبیه‌سازی در شرایط اتمسفریک انجام می‌شود، فشار ثابت $p = 1\ \mathrm{atm}$ 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 2- 3 مقدار چگالی بار الکتریکی را می‌توان برابر صفر در نظر گرفت. همچنین با توجه به چیدمان شرایط آزمایشگاهی در مرجع [9] ولتاژ اعمالی بر این الکترود برابر صفر می‌باشد. لازم به ذکر است که دمای آزمایش نیز 293.15 درجه‌ی کلوین گزارش شده است. در جدول 1 شرایط مرزی پتانسیل الکتریکی، چگالی بار الکتریکی و جریان آرام در کل دامنه نشان داده شده است.

[1] Peek's Formula
[2] Breakdown Electric Strength
[3] Kaptsov's assumption

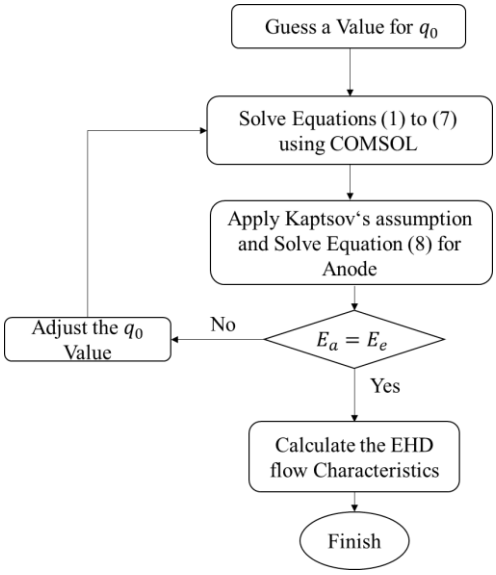

Fig. 4 Space Charge Density Calculation

شکل 4 محاسبه چگالی بار الکتریکی آند

2-5- روش حل عددی

حل عددی معادلات حاکم با استفاده از نرم‌افزار کامسول[4] نسخه 5.2 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 (1) تا (7)، برای کوپل کردن آن‌ها از حلگر مستقیم[5] پاردیسو[6] استفاده شده است [18]. برای دستیابی به حل پایای معادلات ذکرشده، با توجه به غیرخطی بودن آن‌ها و سختی بالای مساله‌ی حاضر، گزینه‌ی "شدیداً غیر خطی[7]" در تنظیمات حلگر مذکور فعال گردید. همچنین در قسمت تنظیمات معادله غیر خطی، از تلرانس نسبی 0.01 استفاده شد.

3- نتایج

چنان‌که در انتهای بخش مقدمه ذکر گردید، در این پژوهش، مطالعه‌ی تجربی صورت‌گرفته در مرجع [9] به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. در ادامه ابتدا سه پارامتر عملکردی رانشگر مورد اعتبارسنجی واقع شده و اختلاف آن با مقادیر تجربی بررسی می‌گردد. سپس نتایج مربوط به رفتار مشخصه‌های الکتروهیدرودینامیکی و الگوی جریان سیال مورد بحث قرار می‌گیرد.

جدول 1 شرایط مرزی

Table 1 Boundary Conditions

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 atm
مرزهای باز	q=0	$\frac{\partial V}{\partial y} = 0$	جریان آزاد
آند	روش تکراری (بخش 2- 3)	$V = V_0$	عدم لغزش
کاتد	q=0	$V = 0$	عدم لغزش

[4] Comsol Multiphysics
[5] Direct Solver
[6] PARDISO
[7] Highly Non-linear

3-1- اعتبارسنجی مدل عددی

برای بررسی صحت مدل عددی به کار گرفته شده، در این قسمت سه پارامتر عملکردی نیروی پیشران، جریان الکتریکی و بازده نیروی پیشران با نتایج اندازه‌گیری‌شده در مرجع [9] مقایسه شده‌اند و خطای بیشینه‌ی هرکدام از آن‌ها محاسبه شده است.

در شکل 5 نمودار تغییرات نیروی پیشران بر حسب مقادیر ولتاژ نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که نیروی پیشران تولید شده بر اثر تخلیه کرونا با افزایش ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد. بیشترین میزان خطا بین نتایج عددی و تجربی مربوط به نیروی پیشران، کمتر از 2% می‌باشد که حاکی از تطابق خوب نتایج عددی با مقادیر تجربی است. همچنین، تغییرات نیروی پیشران برحسب ولتاژ که از رابطه‌ی تحلیلی (9) به دست آمده، در شکل 5 به صورت خط پیوسته رسم شده است. این رابطه تحت فرضیات ساده کننده‌ای در مرجع [9] استخراج شده است.

$$F = C \times V(V - V_0)d/\mu \quad (9)$$

در این رابطه V_0 مقدار ولتاژ شروع تخلیه کرونا و C ضریبی ثابت است که به تحرک‌پذیری یون‌ها، ابعاد و فاصله‌ی دو الکترود بستگی دارد. انطباق نتایج تحلیلی با سایر نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی به خوبی رفتار سهمی شکل جریان برحسب ولتاژ را پیش‌بینی کرده است.

همچنین تغییرات جریان الکتریکی حاصل از شبیه‌سازی عددی بر حسب ولتاژ و مقایسه‌ی آن با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در مرجع [9] در شکل 6 قابل رویت می‌باشد.

مشاهده می‌شود که با زیاد شدن مقدار ولتاژ اعمالی، جریان الکتریکی افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار خطا در ولتاژ 18 kV به 14% می‌رسد. همچنین، در این نمودار با استفاده از رابطه‌ی (10) [9]، جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ رسم شده است.

$$I = C \times V(V - V_0) \quad (10)$$

ملاحظه می‌شود که جریان الکتریکی محاسبه شده نیز همچون نیروی پیشران به صورت سهمی شکل برحسب ولتاژ تغییر می‌کند.

در رانشگرهای الکتریکی پارامتر عملکردی راندمان نیروی پیشران طبق رابطه‌ی (11) تعریف می‌شود که نتایج مربوط به آن در شکل 7 نشان داده شده است.

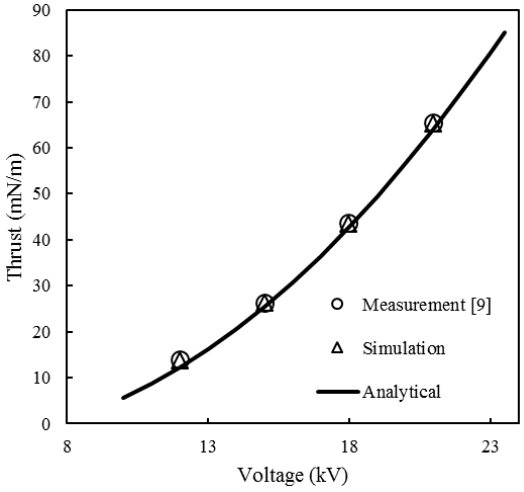

Fig. 5 Thrust Versus Applied Voltage

شکل 5 نمودار نیروی پیشران بر حسب ولتاژ

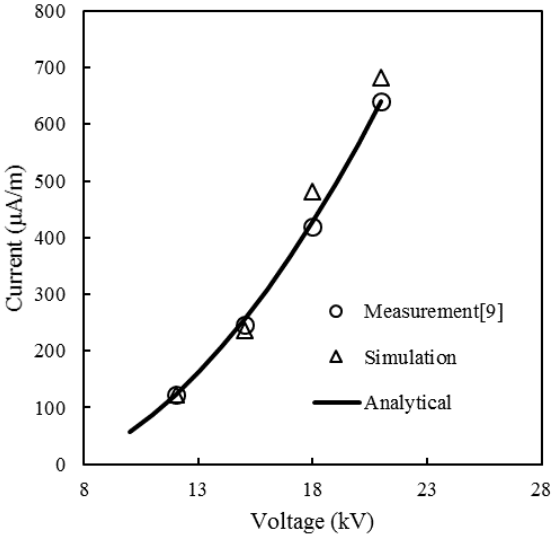

Fig. 6 Electric Current Versus Applied Voltage

شکل 6 نمودار جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ

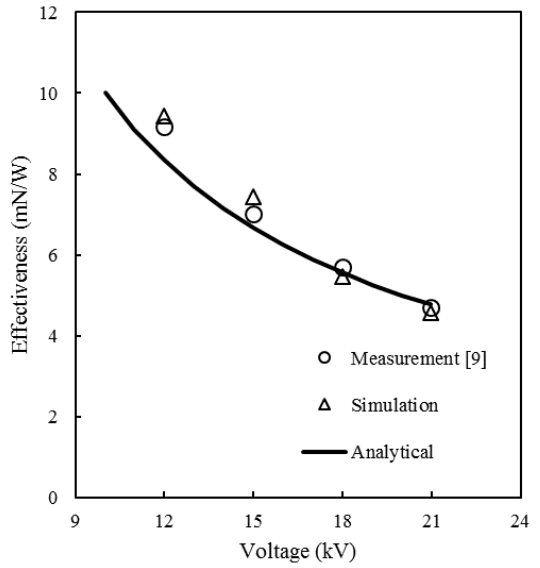

Fig. 7 Thrust Effectiveness versus Applied Voltage

شکل 7 نمودار راندمان نیروی پیشران بر حسب ولتاژ

$$\theta = \frac{F_{\mathrm{EHD}}}{P} \quad (11)$$

مشاهده می‌شود که بر خلاف نیروی پیشران و جریان الکتریکی، با افزایش ولتاژ اعمالی مقدار راندمان کم می‌شود. اگرچه با افزایش ولتاژ اعمالی نیروی پیشران افزایش یافته اما بازده آن کاهش می‌یابد، بنابراین عملکرد بهینه تخلیه کرونا مستلزم پیدا کردن یک نقطه بهینه برای ولتاژ اعمالی است که در پژوهش‌های آتی به آن پرداخته خواهد شد. بیشترین میزان خطا در ولتاژ 15 kV به 6% می‌رسد. علاوه بر این، نتایج عددی به دست آمده با نتایج حاصل از رابطه‌ی تحلیلی (12) [9] نیز مقایسه شده است.

$$\theta = \frac{d}{\mu V} \quad (12)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج عددی به خوبی ارتباط معکوس بین ولتاژ و بازده در معادله‌ی (12) را نشان می‌دهند. در حقیقت، این رابطه معکوس به این معناست که رانشگر برای تولید نیروی پیشران بیشتر، نیازمند توان ورودی مصرفی بالاتری می‌باشد.

3-2- بررسی رفتار و الگوی جریان سیال پلاسما

در شکل 8 توزیع سرعت جریان در حالت پایا نشان داده شده است. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود جریان در فضای بین دو الکترود به دلیل وجود نیروی کولمب وارده بر ذرات باردار، شتاب گرفته و پس از عبور از اطراف کاتد به صورت دو جت زاویه‌دار خارج می‌شود. مقدار سرعت در مجاورت الکترود کاتد حداکثر شده و به 1.42 m/s می‌رسد.

خطوط جریان و بردارهای سرعت در شکل 9 رسم شده‌اند. همان‌طور که بیان شد بدلیل وقوع سرعت بیشینه در مجاورت سطح الکترود کاتد، بردارهای سرعت در این ناحیه نسبت به سایر نواحی دارای اندازه بزرگتری هستند. در حقیقت مومنتم (در جهت محوری) حاصل از نیروی الکترواستاتیکی بین دو الکترود، در هنگام عبور جریان از روی سطح کاتد، به مومنتم در جهت مماسی تبدیل می‌شود. لذا ملاحظه می‌گردد که خطوط جریان در بین دو الکترود کاملا کشیده و موازی می‌باشند. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود اعمال نیروی کولمب بر جریان باعث حرکت نقطه‌ی جدایش به سمت پایین‌دست جریان شده و خطوط جریان در نیمه پشتی الکترود کاتد (زاویه بزرگتر از 90 درجه) از سطح جدا شده‌اند.

تغییرات سرعت بیشینه بر حسب ولتاژ اعمالی در شکل 10 قابل مشاهده است.

ملاحظه می‌شود رابطه‌ی سرعت با ولتاژ در جریان الکتروهیدرودینامیک رابطه‌ای خطی می‌باشد. این موضوع را از لحاظ تحلیلی نیز می‌توان بررسی کرد. طبق رابطه‌ی (10) جریان الکتریکی با مربع ولتاژ متناسب است. همچنین در رابطه‌ی (13) مشاهده می‌شود که سرعت جریان گاز با مجذور جریان الکتریکی تغیر می‌کند [9]

$$v_G = D_{\text{cte}} \sqrt{\frac{d \times I}{\mu}} \qquad (13)$$

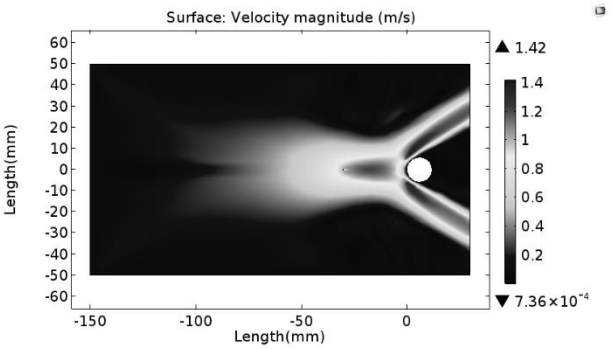

Fig. 8 Velocity Contour in 15 kV

شکل 8 کانتور سرعت در ولتاژ 15 kV

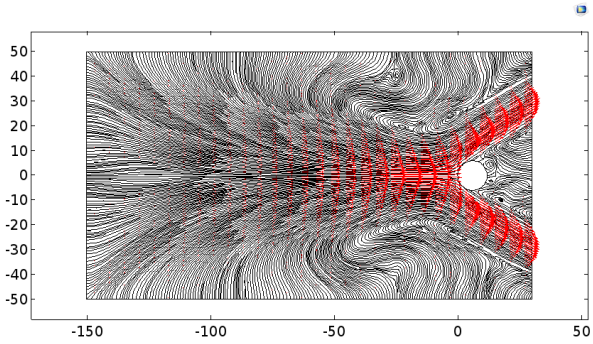

Fig. 9 Flow Streamlines in 15 kV

شکل 9 خطوط جریان در ولتاژ 15 kV

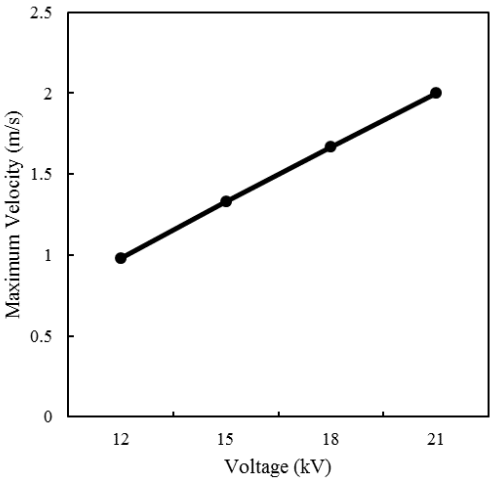

Fig. 10 Maximum Velocity Versus Applied Voltage

شکل 10 نمودار سرعت ماکزیمم بر حسب ولتاژ

که در این رابطه D_{cte} یک مقدار ثابت است. با جایگذاری رابطه‌ی (10) در رابطه‌ی (13) مشخص است که سرعت و ولتاژ تقریباً بطور خطی با یکدیگر ارتباط دارند و این امر موید نتایج بدست‌آمده در شکل 10 می‌باشد.

همان‌طور که در شکل 8 دیده شد، بردارهای سرعت در نزدیکی سطح کاتد دارای گرادیان‌های شدیدی هستند. برای بررسی دقیق‌تر پروفیل سرعت در این ناحیه، تغییرات سرعت به ازای مقادیر مختلف ولتاژ در امتداد خط A (به طول 35 mm و زاویه $\alpha = 60^{\circ}$ که در شکل 11 قابل رویت است) در شکل 12 رسم شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ولتاژ اعمالی بر آند، گرادیان سرعت در مجاورت کاتد شدیدتر می‌گردد؛ اما ضخامت لایه مرزی سرعت تقریباً ثابت می‌ماند و در ولتاژهای مختلف، سرعت سیال در فاصله‌ی معینی از سطح کاتد به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

در شکل 13 الگوی توزیع پتانسیل الکتریکی در دامنه حل پس از رسیدن به شرایط پایا مشاهده می‌شود.

مقدار پتانسیل الکتریکی در سطح آند 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 پتانسیل در این مرزها نیز به صفر میل می‌کند.

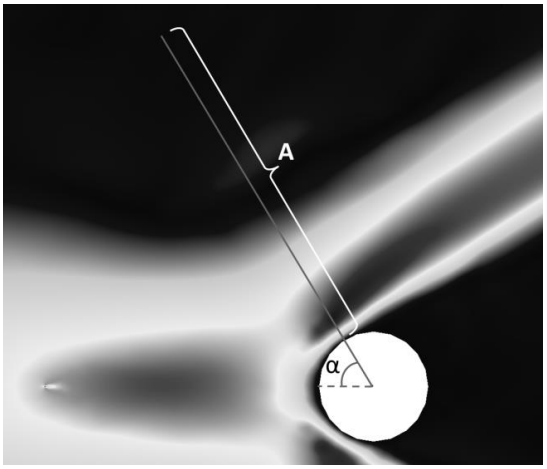

Fig. 11 Cut line

شکل 11 خط برش در مسیر جریان

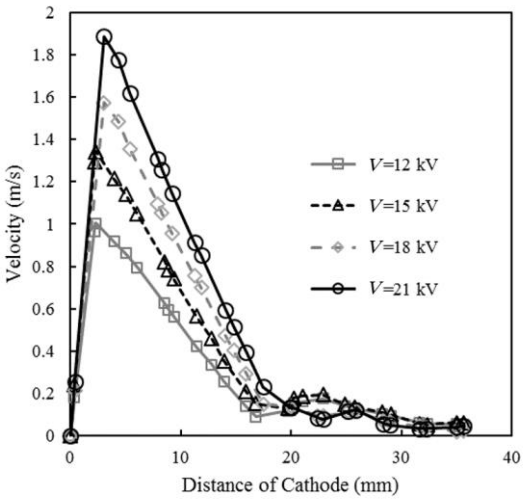

Fig. 12 Velocity versus distance

شکل 12 تغییر پروفیل سرعت با ولتاژ

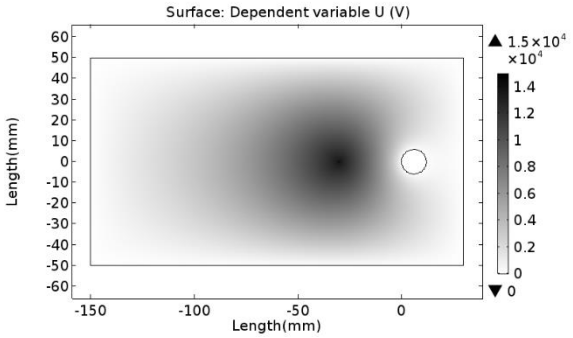

Fig. 13 Potential Contour in 15 kV

شکل 13 کانتور پتانسیل الکتریکی در ولتاژ 15 kV

در شکل 14 توزیع چگالی بارالکتریکی در شرایط پایا رسم شده است.

با توجه به توضیحات ذکرشده در بخش 2-3، چگالی بار الکتریکی بیشترین مقدار خود را در ناحیه‌ی یونیزاسیون (در سطح آند) اختیار می‌کند. الگوریتم تکرارپذیر ذکرشده، مقدار این متغیر فیزیکی را در ولتاژ 15 kV برابر با $1.61\times10^{-3}\mathrm{C/m^3}$ پیش‌بینی کرده است.

علاوه بر این در شکل 14 بردارهای نیروی الکترواستاتیکی نمایش داده شده‌اند. اندازه‌ی این بردارها در اطراف الکترود آند نسبت به سایر نواحی در دامنه‌ی حل بزرگ‌تر است. همان‌طور که در معادله‌ی (6) مشاهده می‌شود نیروی کولمب متناسب با مقادیر میدان الکتریکی و چگالی بار می‌باشد. بنابراین به دلیل بیشینه بودن کمیات مذکور در نزدیکی سطح آند مقادیر نیروی کولمب در این ناحیه حداکثر می‌باشد.

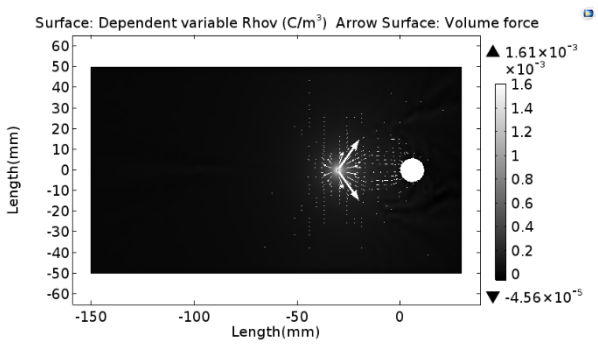

Fig. 14 Space Charge Density Contour in 15 kV

شکل 14 کانتور چگالی بار الکتریکی در ولتاژ 15 kV

3-3- بررسی اثر تخلیه کرونا بر دمای جریان سیال

در شکل 15 توزیع دمای جریان سیال در اطراف الکترود آند نشان داده شده است. با توجه به معادله‌ی انرژی (7) می‌توان افزایش چند درجه‌ای دما را ناشی از اثر عبارت مربوط به حرارت اهمی دانست. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، افزایش میدان الکتریکی در نزدیکی سطح آند بر اساس رابطه‌ی (2) 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.

به طور کلی از رابطه‌ی (2) می‌توان نتیجه گرفت که $J\propto E$، بنابراین حرارت اهمی (EJ) با مربع میدان الکتریکی (E^2) متناسب می‌باشد.

باتوجه به رابطه‌ی 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 16 که مقادیر بیشینه‌ی دما بر حسب ولتاژ در آن رسم شده است، مؤید بحث ذکرشده می‌باشد.

با این حال باید در نظر داشت که چون جریان الکتروهیدرودینامیک در خانواده‌ی جریان‌های پلاسمایی رژیم سرد قرار دارد، افزایش دما به واسطه‌ی افزایش ولتاژ اعمالی در این نوع از جریان‌ها چشم‌گیر نمی‌باشد و در نهایت به ازای ولتاژ اعمالی 21 kV، دمای جریان هوا حدودا 15 K افزایش می‌یابد.

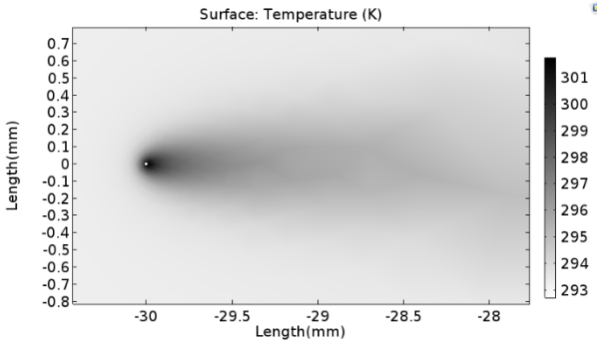

Fig. 15 Temperature Contour in 15 kV

شکل 15 کانتور دما در ولتاژ 15 kV

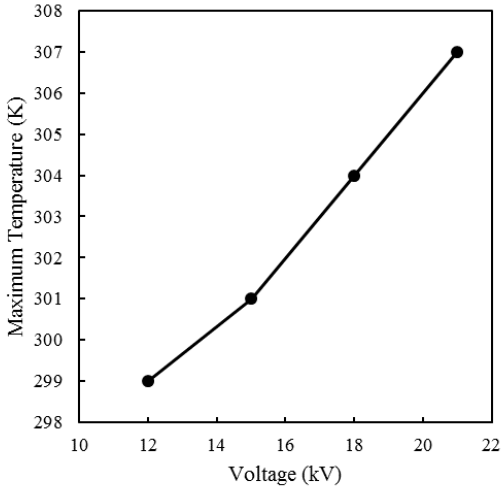

Fig. 16 Maximum Temperature versus Applied Voltage

شکل 16 نمودار دمای بیشینه برحسب ولتاژ

3-4- جمع‌بندی

در پژوهش حاضر مشخصات جریان الکتروهیدرودینامیک ناشی از رژیم تخلیه کرونا بین دو الکترود با پیکربندی سیم-سیلندر، به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. با بررسی و رفتارسنجی مشخصه‌های الکتریکی و الگوی جریان سیال نتایج زیر حاصل شد:

- میزان چگالی بار الکتریکی در سطح الکترود 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.
- افزایش ولتاژ با تأثیرگذاری بر روی چگالی بار الکتریکی موجب افزایش نیروی کولمب و به تبع آن افزایش سرعت جریان می‌گردد. شبیه‌سازی انجام شده بیانگر این است که با زیاد شدن مقدار ولتاژ ورودی از 12 kV تا 21 kV، مقدار نیروی پیشران از 12 mN/m به 64 mN/m افزایش یافته و همچنین بیشینه‌ی سرعت نیز از 0.98 m/s به 2 m/s رشد داشته است.
- مشاهده شد که با افزایش ولتاژ اعمالی، سرعت بیشینه در نزدیکی سطح کاتد (در زاویه‌ی حدودا 60 درجه) رخ داده اما ضخامت لایه‌ی مرزی سرعت در این ناحیه تغییر نکرده و همچنان ثابت می‌ماند. این در حالی است که با افزایش ولتاژ در بازه‌ی مذکور، مقدار بیشینه‌ی سرعت در این ناحیه تقریباً دو برابر شده است.

در نهایت پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی با اضافه کردن معادلات بقای اجزاء شیمیایی موجود در پلاسما، اثر فرایند یونیزاسیون در این دو الکترود مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین می‌توان اثر تغییر پارامترهای هندسی از جمله تغییر تعداد الکترودها، قطر الکترودها و فاصله بین آنها را بر روی پارامترهای عملکردی مورد بحث قرار داد. علاوه بر این می‌توان با حل غیردائمی معادلات رفتار ناپایای جریان کرونا و اثر اتلافات حرارتی ناشی از آن را بر روی راندمان نیروی پیشران بررسی کرد.

4- فهرست علایم

C_p	ظرفیت گرمایی مخصوص ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
D	ضریب نفوذ یون‌ها (m^2s^{-1})
E	میدان الکتریکی (Vm^{-1})
K	ضریب انتقال حرارت ($Wm^{-1}K^{-1}$)
n_i	چگالی تعداد ذرات یون‌ها و اتم‌های خنثی (m^{-3})
n_e	چگالی تعداد ذرات الکترون (m^{-3})
p	فشار (Pa)
q	چگالی بار الکتریکی (Cm^{-3})
qE	نیروی کولمب (Nm^{-3})
R_e	شعاع آند (m)
T	دما (K)
U	سرعت (ms^{-1})
V	پتانسیل الکتریکی (kV)

علایم یونانی

μ	لزجت دینامیکی (Nsm^{-2})
ρ	چگالی (kgm^{-3})
ε_0	ثابت گذردهی هوا ($C\ V^{-1}m^{-1}$)
μ_p	تحرک‌پذیری یون‌های هوا ($m^2V^{-1}s^{-1}$)
θ	راندمان نیروی پیشران (mNW^{-1})

5- مراجع

[1] F. Hauksbee, *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects*, First Edition, pp. 46-47, London: Brugis, 1709.

[2] I. Newton, *Optics*, pp. 25-27, London: Printers to the Royal Society, 1718.

[3] A. P. Chattock, On the velocity and mass of the ions in the electricwind in air, *Philosophical Magazine*, Vol. 48, No. 294, pp. 401–420, 1899.

[4] D. J. Harney, *An Aerodynamic Study of the Electric Wind*, PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA ,1957.

[5] 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, Aug. 1983.

[6] H. Bondar, F. Bastein, Effect of neutral fluid velocity on direct conversion from electric to fluid kinetic energy inan electro-fluid-dynamic device *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 19, No. 9, pp. 1657-1663, 1986.

[7] N. E. Jewell-Larsen, S. V. Karpov, I. A. Krichtafovitch, V. Jayanty, C. P. Hsu, A. V. Mamishev, Modeling of corona-induced electrohydrodynamic flow with COMSOL multiphysics, Proceedings *ESA Annual Meeting on Electrostatics*, Minneapolis, Minnesota, June 17-19, 2008.

[8] 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.

[9] E. Moreau, N. Benard, J. D. Lan-Sun-Luk, J. P. Chabriat, Electrohydrodynamic 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.

[10] 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.

[11] K. Kiousis, N. A. X. Moronis, W. G. Fruh, Electro-Hydrodynamic (EHD) thrust analysis in Wire–Cylinder electrode arrangement, *Plasma Science and Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 363–369, 2014.

[12] 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.

[13] 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.

[14]K. Masuyama, S. R. Barrett, On the performance of electrohydrodynamic propulsion, *The Royal Society A*, Vol. 469, No. 2154, 2013.

[15] V. H. Granados, M. J. Pinheiro, P. A. Sá, Electrostatic propulsion device for aerodynamics applications, *Physics of Plasmas*, Vol. 23, No. 7, pp. 1-11, 2016.

[16]W. Wang, L. Yang, K. Wu, C. Lin, P. Huo, S. Liu, D. Huang, M. Lin, Regulation-controlling of boundary layer by multi-wire-to-cylinder negative corona discharge, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 119, pp.438-448, 2017.

[17] F. W. Peek, *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*, pp. 8-38, New York: McGraw-Hill Book Company, 1920.

[18] C. G. Petra, O. Schenk, M. Anitescu, Real-time stochastic optimization of complex energy systems on high-performance computers, *IEEE Computing in Science & Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 32-42, 2014.