ماهنامه علمى پژوهشى





mme.modares.ac.ir

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

علىرضا فتحى¹، مهدى آهنگر^{2*}

1– دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران 2– استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* تېران، صندوق پستى m_ahangar@sbu.ac.ir ،1983969411

| چکیدہ | اطلاعات مقاله |
|--|--|
| 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 | مقاله پژوهشی کامل دریافت: 15 آذر 1396 پذیرش: 25 دی 1396 ارائه در سایت: 21 بهمن 1396 |
| 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 زدی میتران 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 بیشینه دما در اطراف الکترود آند رخ می دهد. | <i>کلید واژگان:</i> جریان پالاسما مدلسازی عددی تخلیه کرونا جریان هیدرودینامیک الکتریکی |

Numerical simulation of electrohydrodynamic flow produced by wire-tocylinder 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 | ABSTRACT |
|---|---|
| Original Research Paper Received 06 December 2017 Accepted 15 January 2018 Available Online 10 February 2018 | 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 |
| Keywords: Plasma Flow Numerical Modeling Corona Discharge Electro-Hydro-Dynamic Flow | 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 |
| | 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, be considering the effect of Ohmic heating in the energy equation, it has been found that the maximum temperature raise happens around anode. |

الكترود به وجود مى آورد.

1- مقدمه

تخلیه کرونا در سیستمهای فشار قوی و خطوط انتقال قدرت پدیدهای نامطلوب و خطرناک محسوب می گردد؛ اما یک تخلیه کرونای کنترل شده می تواند 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) می گویند و امروزه کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف دارد.

اولین مشاهده یجریان EHD در سال 1709 توسط هاکزیی صورت

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

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شكل 1 شماتيك تخليه كرونا [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 کمی 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 توسعه یرانشگرها در حوزه یمهندسی هوافضا توجیه پذیر است یا خیر؟ از طرفی این رانشگرها دارای وزن سبک و سهولت در ساخت هستند، فاقد قطعات متحرک میباشند و قادر به فعالیت در گستره ی وسیعی از فشارها میباشند؛ اما از طرف دیگر راندمان پایینی دارند و به علت افزایش تحرک پذیری یون ها 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 %5.5 بهبود بخشند [7]. در این پژوهش پیشنهاد استفاده از نیروی EHD در سیستم پیشرانش کنترلی بالن ها و هواپیماهای کوچک با در نظر گرفتن انرژی خورشیدی و سامانههای تبدیل انرژی فتوولتائیک^۱ (به منظور تولید ولتاژ لازم برای شروع تخلیه کرونا)

در سال 2008، جول لارسن و همکاران برای اولین بار از نرمافزار کامسول برای شبیه سازی 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

1 Photovoltaic

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 اندازه گیری 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 4V، میزان نیروی پیشران حاصل تا mN/m 10 اندازه گیری شد.

موریاو در پژوهش تجربی بعدی خود سعی کرد با تغییر تعداد و نحوه ی چیدمان کاتدها، میزان راندمان بدست آمده برای رانشگر را افزایش دهد [10]. نتایج بدست آمده 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 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.

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 sm/s 2.88 اندازه گیری 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/m² و نیروی پیشران بر واحد حجم را تا 15 N/m³ 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^۲ 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

² Perturbation Method

(mm)

Length (

50 40 30 20 10 0 -10 -20 -30 -40 -50 -150 -100 -50 0 Length (mm)

Fig. 3 Generated Mesh



نرمافزار، در اطراف آند و کاتد تعداد سلولها بیشتر و ابعاد آنها ریزتر و در باقی دامنهی حل ابعاد سلولها درشت تر در نظر گرفته شده است.

2-2- معادلات حاكم

شبیهسازی عددی رژیم تخلیه کرونا نیازمند در نظر گرفتن همزمان معادلات الكترواستاتيك و نوير-استوكس مي باشد. در جريان هاى پلاسما، ميدان الکتریکی و چگالی بار الکتریکی از طریق رابطه پواسون (1) به یکدیگر مرتبط مىشوند:

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

که $q = e(n_i - n_e)$ نشان دهنده چگالی بار الکتریکی و ε_0 ثابت گذردهی qهوا مىباشد.

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

$$J = \mu_p E q + U q - D \nabla q \tag{2}$$

D در این معادله، μ_p ضریب تحرکپذیری^۲ یونهای هوا، U سرعت جریان و ضریب نفوذپذیری یونها می باشد. 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 می گردد:

$$\nabla \cdot J = 0 \tag{3}$$

با توجه به این که 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:

$$7 \cdot U = 0 \tag{4}$$

با تركيب كردن معادلات (2)، (3) و (4)، رابطه (5) بدست مي آيد:

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

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

$$pU \cdot \nabla U = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + qE \tag{6}$$

qE كه ho چگالى هوا، p فشار هوا و μ لزجت ديناميك هوا مىباشد. ضمناً pنشانگر نیروی الکترواستاتیک یا نیروی کولمب است.

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

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

ماسویاما و برت [14] اشاره کرد. آنها با بررسی عملکرد رانشگرهای الكتروهيدروديناميكي دريافتند كه نسبت نيروى پيشران به توان مصرفي 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 نحومی قرارگیری آنها را بر روی ضخامت لایه مرزی حرارتی و تغییرات گرادیان های سرعت در آن مطالعه كردند [16]. در اين پژوهش بر خلاف مرجع [13] تعداد آندها افزايش يافت 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 حرارتي تا %39.8 كاهش يافت.

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 بکارگرفته شده 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 الكتروهيدروديناميك بين دو الكترود، الكو و رفتار جريان سيال، مشخصه هاى الكتريكي رژيم تخليه كرونا و اثرات اتلافات الكتروگرمايي در قالب تغييرات دمای جریان سیال به طور همزمان مد نظر قرار گیرند.

2- مشخصات مسئله

1-2- هندسه مسئله و شبكه محاسباتي

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 نظر گرفته شده و دو الکترود در فاصلهی mm 30 از یکدیگر قرار گرفتهاند.

شبکه تولیدشده که از نوع بی سازمان و مثلثی می باشد در شکل 3 نشان داده شده است برای تولید این شبکه از گزینه یساخت شبکه برای مطالعه ی جریان پلاسما در نرمافزار کامسول استفاده شده است. شبکهی تولیدی دارای 4824 سلول محاسباتي بوده و با اعمال گزينه توزيع (روى سطح الكترودها در



شكل 2 هندسەى مسئلە

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.42.1

² Mobility Coefficient

¹ Distribution

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 الكترود است.

2-3- مكانيزم توليد چگالى بار الكتريكى

فاصله ی بین دو الکترود را از لحاظ چگالی بار الکتریکی می توان به دو ناحیه تقسیم کرد. در نزدیکی کاتد به دلیل وجود تعداد تقریباً برابری از الکترونها و یونهای مثبت، می توان 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 ([17] می توان شدت میدان الکتریکی را روی الکترود آند با شرط صاف بودن سطح آن تخمين زد:

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

در اين رابطه R_e شعاع آند و V/m V/m شدت الكتريكي شکست^۲ هوا میباشد. شرایط مرزی چگالی بار الکتریکی میتواند با استفاده از فرض کاپتسوف^۳ در ناحیهی یونیزاسیون اعمال شود. طبق این فرض قبل از شروع رژیم کرونا، میدان الکتریکی متناسب با اختلاف پتانسیل اعمالی افزایش می یابد، اما پس از شروع کرونا مقدار آن ثابت می ماند. در این پژوهش فرض می شود که ناحیه ی یونیز اسیون کوچک است و می توان از آن صرف نظر 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 نمی باشد، از یک روش تکراری برای مشخص کردن مقدار این متغیر استفاده شده است. در این روش ابتدا مقدار چگالی بار الکتریکی حدس زده می شود و سپس به ازای این مقدار، معادلات تا رسیدن به حالت پایا حل می شوند. در صورتی که مقدار متوسط میدان الکتریکی محاسباتی بر روی آند با مقدار بدستآمده از فرمول پیک برابر باشد، حل پایان می پذیرد؛ 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- شرايط مرزى و اوليه

با توجه به اینکه شبیهسازی در شرایط اتمسفریک انجام می شود، فشار ثابت بر روی تمامی مرزهای خارجی اعمال شده است. در مرزهای p = 1 atmخارجی فرض می شود که چگالی اتم های خنثی بیشتر از ذرات باردار است و لذا جريان هوا تحت تأثير ميدان الكتريكي قرار نمى گيرد، بنابراين 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 می توان 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 الكتريكي و جريان آرام در كل دامنه نشان داده شده است.

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.42.1



Fig. 4 Space Charge Density Calculation

No

شکل 4 محاسبه چگالی بار الکتریکی آند

Guess a Value for q_0

Solve Equations (1) to (7) using COMSOL

Apply Kaptsov's assumption

and Solve Equation (8) for Anode

 $E_a = E_e$

Calculate the EHD flow Characteristics

Finish

Yes

2-5- روش حل عددی

حل عددى معادلات حاكم با استفاده از نرمافزار كامسول[†] 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^۵ پاردیسو^۶ 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" در تنظیمات حلگر مذکور فعال گردید. همچنین در قسمت تنظيمات معادله غير خطى، از تلرانس نسبى 0.01 استفاده شد.

3- نتايج

چنان که در انتهای بخش مقدمه ذکر گردید، در این پژوهش، مطالعهی تجربی صورت گرفته در مرجع [9] به صورت عددی شبیه سازی شده است. در ادامه ابتدا سه پارامتر عملکردی رانشگر مورد اعتبارسنجی واقع شده و اختلاف آن با مقادیر تجربی بررسی می گردد. سپس نتایج مربوط به رفتار مشخصههای الكتروهيدروديناميكي و الگوى جريان سيال مورد بحث قرار مي گيرد.

جدول 1 شرايط مرزى

| Table 1 Boundary Conditions | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------|--|
| جريان | پتانسيل الكتريكي | چگالی بار الکتریکی | مرز | |
| جريان عمودي | $\frac{\partial V}{\partial x} = 0$ | $q{=}0$ | ورودی جریان | |
| p=1 atm | $\frac{\partial V}{\partial x} = 0$ | $q{=}0$ | خروجی جریان | |
| جريان آزاد | $\frac{\partial V}{\partial y} = 0$ | $q{=}0$ | مرزهای باز | |
| عدم لغزش | $V = V_0$ | روش تکراری (بخش 2- 3) | آند | |
| عدم لغزش | V = 0 | $q{=}0$ | کاتد | |

⁴ Comsol Multiphysics

¹ Peek's Formula

² Breakdown Electric Strength 3 Kaptsov's assumption

Direct Solver

PARDISO

⁷ Highly Non-linear

1-3- 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 اندازه گیری شده در مرجع [9] مقایسه شدهاند و خطای بیشینهی هر کدام از آن ها 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.

 $F = C \times V(V - V_0)d/\mu$ (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 می شود که با زیاد شدن مقدار ولتاژ اعمالی، جریان الکتریکی افزایش می الله می سد. همچنین، در می یابد. بیشترین مقدار خطا در ولتاژ 18 kV به 14% می سد. همچنین، در این نمودار با استفاده از رابطهی (10) [9]، جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ رسم شده است.

$$= C \times V(V - V_0) \tag{10}$$

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 می شود 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



شکل 6 نمودار جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ



شکل 7 نمودار راندمان نیروی پیشران بر حسب ولتاژ

$$\Theta = \frac{F_{\rm EHD}}{P} \tag{11}$$

مشاهده می شود که بر خلاف نیروی پیشران و جریان الکتریکی، با افزایش ولتاژ اعمالی مقدار راندمان کم می شود. اگرچه با افزایش ولتاژ اعمالی نیروی پیشران افزایش یافته اما بازده آن کاهش می یابد، 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 kV 15 kv می رسد. علاوه بر این، نتایج عددی به دست آمده با نتایج حاصل از رابطهی تحلیلی (12) [9] نیز مقایسه شده است.

$$\theta = \frac{d}{\mu V} \tag{12}$$

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

2-3- بررسی رفتار و الگوی جریان سیال پلاسما

در شکل 8 توزیع سرعت جریان در حالت پایا نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود 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 زاویه دار خارج می شود. مقدار سرعت در مجاورت الکترود کاتد حداکثر شده و به 1.42 m/s می رسد.

خطوط جریان و بردارهای سرعت در شکل 9 رسم شدهاند. همان طور 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 می گردد که خطوط جریان در بین دو الکترود کاملا کشیده و موازی می باشند. همان طور که در شکل 9 مشاهده می شود اعمال نیروی کولمب بر جریان باعث حرکت نقطهی جدایش به سمت پایین دست 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]

$$v_G = D_{\rm cte} \sqrt{\frac{d \times I}{\mu}} \tag{13}$$



شکل 8 کانتور سرعت در ولتاژ kV 15 kV



شکل 9 خطوط جریان در ولتاژ kV 15



Fig. 10 Maximum Velocity Versus Applied Voltage شكل 10 نمودار سرعت ماكزيمم 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 می،باشد.

همانطور که در شکل 8 دیده شد، بردارهای سرعت در نزدیکی سطح کاتد دارای گرادیانهای شدیدی هستند. برای بررسی دقیق تر پروفیل سرعت در این ناحیه، تغییرات سرعت به ازای مقادیر مختلف ولتاژ در امتداد خط A (به طول mm 35 و زاویه $^{\circ}0 = \alpha$ 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 می گردد؛ اما ضخامت لایه مرزی سرعت تقریباً ثابت می ماند و در ولتاژهای مختلف، سرعت سیال در فاصلهی معینی از سطح کاتد به بیشترین مقدار خود می رسد.

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 می یابد 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 می کند.



شکل 11 خط برش در مسیر جریان



Fig. 12 Velocity versus distance



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 1.61×10.51 پیشرینی 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



شکل 14 کانتور چگالی بار الکتریکی در ولتاژ 15 kV

نیروی کولمب در این ناحیه حداکثر میباشد.

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. همان طور که پیش تر 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 می کند.

به طور کلی از رابطهی (2) میتوان نتیجه گرفت که E ∞ J , بنابراین حرارت اهمی (EJ) با مربع میدان الکتریکی (E²) 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 V& 21، دمای جریان هوا حدودا K 5 افزایش مییابد.



شكل 15 kV كانتور دما در ولتاژ 15 kV



Fig. 16 Maximum Temperature versus Applied Voltage شكل 16 نمودار دماى بيشينه برحسب ولتاژ

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-19

علیرضا فتحی و مہدی آھنگر

4-3- جمع بندى

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. شبیه سازی انجام شده بیانگر این است که با زیاد شدن مقدار ولتاژ ورودی از 12 kV تا 12 kV، مقدار نیروی پیشران از mN/m 12 m/m 64 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 می شود 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 علايم

- $(Jkg^{-1}K^{-1})$ ظرفیت گرمایی مخصوص C_p
 - (m²s⁻¹) ضريب نفوذ يونها (D
 - *E* ميدان الكتريكي (Vm⁻¹)
 - $(Wm^{-1}K^{-1})$ ضريب انتقال حرارت K
- (m^{-3}) چگالی تعداد ذرات یون ها و اتم های خنثی n_i
 - m_e چگالی تعداد ذرات الکترون (m^{-3})
 - p فشار (Pa)
 - *q* چگالی بار الکتریکی (Cm⁻³)
 - *qE* نیروی کولمب (Nm⁻³)
 - (m) شعاع آند R_e
 - T دما (K)

- سرعت (ms⁻¹) ل
- (kV) پتانسيل الکتريکي (kV)

علايم يونانى

(Nsm⁻²) لزجت دینامیکی (μ

چگالی (kgm⁻³)

$$^{2}V^{-1}s^{-1}$$
 تحرکپذیری یونهای هوا ($^{1}s^{-1}$

راندمان نيروي پيشران (
$$^{-1}$$
mNW) راندمان ($^{-1}$

5- مراجع

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

(m

- [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 electric wind in the second second
- 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.