

مطالعه عددی جریان جت برخوردی تولید شده توسط رژیم تخلیه الکتریکی کرونا

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی و فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

علیرضا فتحی

استادیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی و فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

مهدی آهانگر*

چکیده

جریان جت برخوردی حاصل از تخلیه کرونا امروزه برای کاربردهای مختلفی همچون خنک‌کاری، تصفیه‌ی جریان و بهبود انتقال گرما استفاده می‌گردد. در پژوهش حاضر مشخصه‌های این جریان از جمله سرعت، خطوط جریان و همچنین نیروی وارده حاصل از برخورد جت در گاز آرگون به صورت عددی مطالعه شده است. بدین منظور معادلات حاکم بر جریان پلاسمای تحت میدان الکترواستاتیکی با روش المان محدود حل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط اتمسفری با اعمال اختلاف ولتاژ 500 V بین دو الکترود با فاصله‌ی 200 μm سرعت بیشینه جت بوجود آمده پس از برخورد به 2.3 m/s می‌رسد. همچنین مقدار نیروی حجمی بیشینه وارد بر سطح کاتد حدوداً برابر با $1.23 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ می‌باشد. شبیه‌سازی صورت‌گرفته بخوبی فرآیند شکل‌گیری جت را در چهار مرحله تولید یون‌ها، کشیدگی جریان یون‌ها، برخورد آن‌ها با سطح و در نهایت انبساط جت نشان داده است. **واژه‌های کلیدی:** جریان پلاسمای، تخلیه کرونا، مدلسازی عددی، معادلات الکتروهایدروپینامیک.

Numerical Study of Plasma Impinging Jet Generated by Corona Discharge Regime

A. R. Fathi

Department of Aerospace, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

M. Ahangar

Department of Aerospace, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

The impinging jet resulted from corona discharge has been used in different applications such as cooling, refining and enhancing heat transfer. In this research, the characteristics of this flow including velocity and the force applied by the impinging jet have been numerically studied. Hence, the governing equations of plasma flow under the influence of electrostatic field has been solved by using a finite element method. The final results show that in atmospheric condition, by applying a voltage of 500 V between two electrodes with a 200 μm gap, the maximum velocity after impingement reaches to 2.3 m/s. Also the maximum volume force applied on the cathode surface is almost equal to $1.23 \times 10^7 \text{ N/m}^3$. The conducted simulation has successfully shown the process of jet formation in four steps including ion production, ion flow stretching, ion flow impingement to the cathode surface and finally jet expansion.

Keywords: Plasma flow, Corona Discharge, Numerical Modeling, Electrohydrodynamic Equations.

شده که در آن قدرت میدان الکتریکی اطراف آند به قدری نیست که باعث شکست الکتریکی^۱ شود رژیم تخلیه کرونا می‌گویند. تخلیه کرونا معمولاً باعث ساطع شدن نور بنفشی نزدیک آند می‌شود که تنها در تاریکی قابل مشاهده است. در شکل ۱ می‌توان فرآیند تخلیه رژیم کرونا را بین دو الکترود سوزنی و صفحه‌ای به صورت شماتیک مشاهده کرد.

۱- مقدمه

با اعمال اختلاف ولتاژ بین دو الکترود با ضخامت‌های متفاوت، میدان الکتریکی قوی در اطراف الکترود تخلیه‌کننده (آند) باعث می‌شود که گاز یونیزه شده و یون‌ها که باری همنام با این الکترود دارند، تحت تاثیر نیروی کولمب به طرف الکترود دیگر (کاتد) حرکت کنند. اما مولکول‌های گاز خنثی که در فاصله‌ی دورتری نسبت به الکترود تخلیه‌کننده قرار دارند ساکن هستند و انتقال مومنتوم از ذرات باردار است که باعث حرکت آن‌ها می‌گردد. بنابراین نیروی کولمبی که به یون‌ها وارد می‌شود، تبدیل به یک نیروی حجمی الکتریکی بر روی مولکول‌های گاز می‌گردد. این نیرو موجب به وجود آمدن یک جریان الکتروهایدروپینامیکی (EHD) شده که از آن با نام‌های "باد الکتریکی" یا "باد یونی" یاد می‌شود و برای نخستین بار در سال ۱۷۰۹ توسط هاکنزی [۱] گزارش شد. به این رژیم تخلیه الکتریکی در گاز یونیزه

¹ Electrical Breakdown

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.ahangar@dena.kntu.ac.ir

حل عددی معادلات پیوستگی برای الکترون‌ها و یون‌ها و معادله‌ی پواسون برای پتانسیل الکتریکی در یک پیکربندی سوزن-صفحه‌ای، توزیع چگالی اجزای پلاسما و میدان الکتریکی را ارائه کردند. یافته‌های این پژوهش حاکی از این بود که گرمایش ژول^۵، مکانیزم اتلافات گرمایی غالب الکترون است و با افزایش جریان الکتریکی ولتاژ تخلیه ثابت می‌ماند. در این پژوهش تنها معادلات حاکم بر رژیم تخلیه الکتریکی شامل معادلات پیوستگی الکترون‌ها و یون‌ها به‌همراه معادله پواسون لحاظ گردید و از مدل‌سازی توده‌ی جریان که مستلزم حل معادلات نویر-استوکس می‌باشد صرف نظر شد.

میزراسزیک و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۶ در یک پژوهش تجربی با استفاده از ذرات گرد و غبار، الگوهای جریان جت برخوردی را آشکارسازی کردند. این پژوهش به منظور مشاهده‌ی اثر نیروی الکترواستاتیکی بر تنشین شدن این ذرات در سیستم‌های ته‌نشین‌کننده‌ی الکترواستاتیکی انجام شد. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده‌ی چهار مرحله‌ی گذرای تغییر جریان شامل مرحله‌ی جت آزاد، مرحله‌ی ابتدایی جت برخوردی، توسعه‌ی جت برخوردی و در نهایت جت EHD کاملا توسعه‌یافته بود.

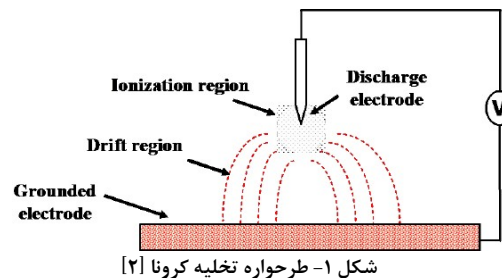
همچنین در سال ۲۰۱۶ گراسی و همکاران [۱۳] از جت برخوردی یونی در یک فضای مایع برای افزایش راندمان جوشش هسته‌ای^۶ و بهبود انتقال گرما در این فرایند استفاده کردند. جوشش هسته‌ای نوعی جوشیدن است که زمانی که دمای سطحی از دمای اشباع سیال به مقدار خاصی بیش‌تر باشد ولی شار گرمایی از شار گرمایی بحرانی کم‌تر باشد رخ می‌دهد. آن‌ها دریافتند که جریان تزریقی یون نقش بسزایی در عملکرد انتقال گرما دارد و محدوده‌ی میدان الکتریکی مورد نیاز برای فعال‌سازی جت یونی را به میزان $67.1 \text{ MV/m} \pm 1\%$ مشخص کردند.

نتایج پژوهش‌های فوق‌الذکر، بیانگر بکارگیری روزافزون جت‌های برخوردی در رژیم کرونا در فرآیندهای انتقال حرارتی و سیالاتی به دلیل سادگی و کارایی بالای آن‌هاست. در بین پژوهش‌های مطرح‌شده، مرجع [۱۱] تلاش کرد تا مشخصه‌های الکتریکی و نحوه تولید جریان پلاسما را مدل‌سازی کند. با این وجود به دلیل عدم به‌کارگیری معادلات سیال، چگونگی شناختن جریان یون‌ها و تولید جت برخوردی مورد مطالعه قرار نگرفت. از این رو در پژوهش حاضر، برای اولین بار معادلات حاکم بر میدان الکترواستاتیکی به صورت همزمان با معادلات نویر-استوکس و با به‌کارگیری نرم‌افزار COMSOL حل شد تا رفتار مشخصه‌های الکترواستاتیکی جریان جت یون‌ها به طور دقیق شناسایی شود.

۲- مشخصات مسئله

۲-۱- هندسه حل و شبکه محاسباتی

طرح‌واره‌ای از هندسه‌ی دو بعدی به‌کار گرفته‌شده در مرجع [۱۱]، دامنه محاسباتی و محل قرارگیری آند و کاتد در شکل ۲ نمایش داده شده است. برای افزایش سرعت محاسبات و کاهش زمان همگرایی از



در سال ۱۹۶۱ رابینسون [۳] توانایی تخلیه کرونا را در ایجاد دمنده‌های بدون قطعات محرک و مبتنی بر پدیده‌ی باد یونی مورد بررسی قرار داد. اگرچه سرعت میانگین بدست‌آمده برای باد یونی نسبتا پایین بود، اما این پژوهش سرآغازی برای انجام تحقیقات دیگر و یافتن کاربردهای مختلف برای تخلیه کرونا بود. این پدیده سال‌های بعد در موارد مختلفی همچون ته‌نشین الکترواستاتیکی^۱ [۴] و پوشش‌های پودری^۲ [۵] برای باردار کردن ذرات کوچک و قطرات به منظور کنترل کردن حرکت آن‌ها به سمت یک هدف مشخص استفاده شد. باد یونی همچنین کاربردهای دیگری از جمله استفاده در بلندگوهای یونی^۳ [۶]، بهبود انتقال گرما [۷] و تصفیه‌ی هوا دارد [۸].

طی دهه‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای دستیابی به یک فهم بهتر از تخلیه کرونا انجام شده و این پدیده موضوع پژوهش‌های تجربی و عددی بسیاری بوده است. برخی از این پژوهش‌ها پیکربندی سوزن-صفحه‌ای^۴ را برای استفاده در سیستم‌های ته‌نشین‌کننده به صورت عددی یا تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند. در سال ۲۰۰۵ ژائو و آدامیاک [۹] تخلیه کرونا در پیکربندی سوزن-صفحه‌ای را به وسیله‌ی نرم‌افزار Fluent مدل‌سازی کردند. آن‌ها یک الگوریتم عددی را برای پیش‌بینی مشخصه‌های جریان پلاسما در رژیم تخلیه کرونا در هوا ارائه کردند و با تغییر ولتاژ و فاصله‌ی الکترودها موفق شدند تا به سرعتی بیش از 7 m/s دست یابند.

ژینگ-هوا و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۲ تخلیه کرونا را به عنوان یک پدیده ناخوشایند در تجهیزات الکتریکی ولتاژ بالا مطالعه کردند. چرا که این پدیده می‌تواند موجب زوال سیستم عایق الکتریکی و افت توان شود. آن‌ها برای درک ماهیت الکتریکی و فیزیکی این پدیده، تخلیه کرونا ناشی از اعمال ولتاژ 6000 V در هوای اتمسفری را مورد بررسی قرار دادند. تفاوت اصلی این پژوهش نسبت به تحقیقاتی که پیش از آن در زمینه‌ی جت‌های برخوردی پلاسما تولید شده توسط تخلیه کرونا انجام شده بود، در نظر گرفتن مدل یونش غیرتعادلی برای هوا بود. در این پژوهش میزان میدان الکتریکی تا $9.4 \times 10^6 \text{ V/m}$ اندازه‌گیری شد.

در سال ۲۰۱۴ هوانگ و همکاران [۱۱] با استفاده از روش غیرخطی UMFPACK [۱۲] جت برخوردی حاصل از تخلیه کرونا در آرگون اتمسفریک را شبیه‌سازی کرده و خواصی همچون چگالی یون و الکترون، و ولتاژ و میدان الکتریکی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با

¹ Electrostatic Precipitation

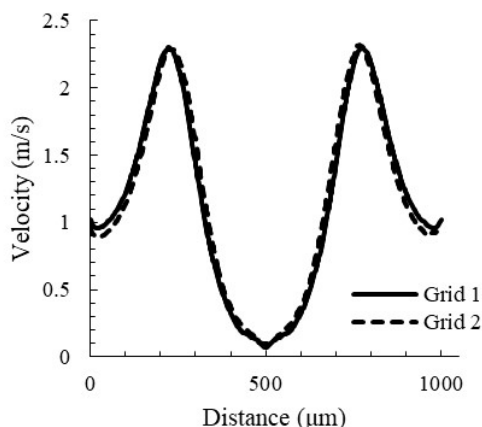
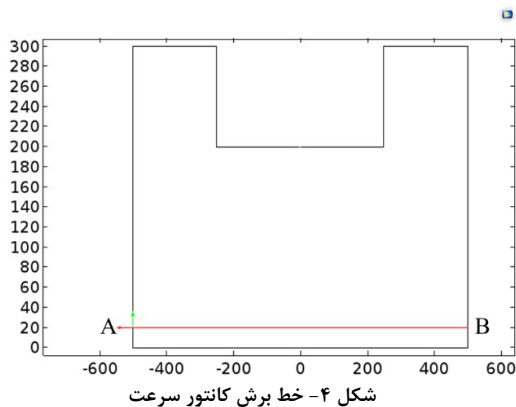
² Electrostatics Powder Coating

³ Ionic Loudspeakers

⁴ Pin-plate

⁵ Joule Heating

⁶ Nucleate Boiling



مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از دو شبکه مذکور از تطابق مناسبی برخوردارند. همچنین با توجه به جدول ۱ مقادیر سرعت بیشینه‌ی مربوط به هر یک از دو شبکه، اختلاف اندکی را نشان می‌دهند. بنابراین با توجه به اینکه زمان محاسبات با انتخاب شبکه ۲ نسبت به شبکه ۱ حدوداً ۵ برابر بیشتر شده است، برای کاهش زمان محاسبات، شبکه ۱ مد نظر قرار گرفت. همچنین خاطر نشان می‌شود که انتخاب شبکه‌های با تعداد سلول‌های کمتر از شبکه ۱ موجب واگرایی حل عددی می‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود گرادیان‌های شدید سرعت جت خروجی باشد.

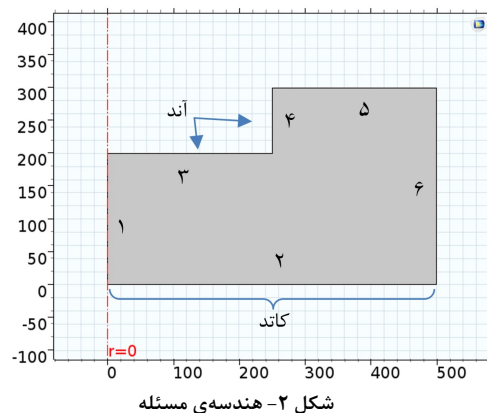
۲-۲- معادلات

شبیه‌سازی عددی جریان جت حاصل از رژیم تخلیه کرونا نیازمند در نظر گرفتن همزمان معادلات بقای اجزای پلاسما، قانون گاوس و معادلات نویر-استوکس می‌باشد. لازم به ذکر است که مجموعه معادلات فوق تحت عنوان معادلات الکترو هیدرو دینامیک شناخته می‌شوند که به صورت زیر بیان شده‌اند [۱۴].

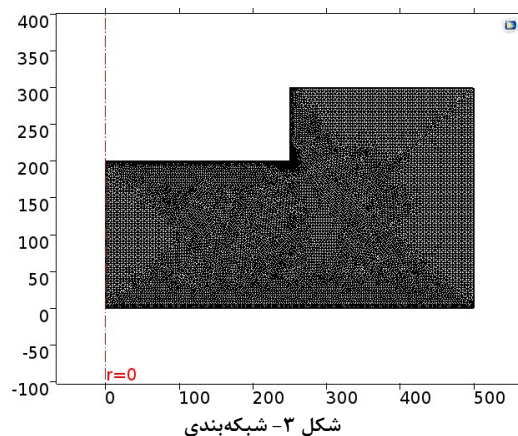
ابتدا با استفاده از معادله بقای الکترون مقدار چگالی ذرات الکترون (n_e) مشخص می‌شود:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e - (n_e - \Gamma_e) n_e \quad (1)$$

فرض تقارن محوری استفاده شده است. در این چیدمان شعاع آند 250 μm و شعاع کاتد 500 μm در نظر گرفته شده و دو الکتروود در فاصله‌ی 200 μm از یکدیگر قرار گرفته‌اند.



در شکل ۳ شبکه محاسباتی که بصورت بی‌سازمان مثلثی تولید شده و شامل ۱۵۹۷۱ سلول می‌باشد، مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که تولید شبکه محاسباتی با استفاده از خود نرم‌افزار COMSOL انجام گرفته است.



همانطور که مشاهده می‌شود در نزدیکی سطح الکتروودها و همچنین لبه‌ی آند که گرادیان شدید وجود دارد تراکم شبکه افزایش داده شده است تا دقت محاسبات افزایش یابد. به منظور آنالیز اندازه شبکه، دو شبکه با تعداد سلول‌های ذکر شده در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود مقادیر سرعت (در امتداد خط AB در شکل ۴) برای این دو شبکه استخراج شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۱- آنالیز اندازه شبکه

شبکه	تعداد سلول	بیشینه سرعت (m/s)
۱	۱۵۹۷۱	۲.۳۱
۲	۳۲۲۴۸	۲.۳۳



همچنین واکنش‌های سطحی زیر بر روی دیواره آند و کاتد لحاظ شده‌اند:



ضمناً مقدار ضریب گسیل ثانویه‌ی الکترون^۱ برای کاتد، برابر با 0.1 در نظر گرفته شده است. این ضریب معرف الکترون‌های جدا شده از کاتد، ناشی از برخورد الکترون‌های پر انرژی به سطح این الکتروود می‌باشد.

۲-۴- شرایط مرزی و اولیه

با توجه به اینکه شبیه‌سازی برای جریان ساکن^۲ در شرایط اتمسفریک در نظر گرفته شده، شرط فشار ثابت $p = 1 \text{ atm}$ برای مرزهای ۵ و ۶ در شکل ۲ اعمال شده است. همچنین با در نظر گرفتن شرط اتصال به زمین یعنی $V = 0$ برای کاتد، از قانون اهم برای تعیین مقدار ولتاژ بر روی شرط مرزی آند استفاده شده است [۱۴].

$$V = V_0 - I_p R_0 - R_0 C_0 \frac{dV}{dt} \quad (13)$$

مقادیر R_0 و C_0 به ترتیب 500 KΩ و 1 pf در نظر گرفته شده‌اند. مقدار V_0 برابر با 500 V است و I_p از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد [۱۴]:

$$I_p = \int (\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}_1 + \mathbf{n} \cdot \mathbf{j}_2 + \mathbf{n} \cdot \mathbf{j}_0) dS \quad (14)$$

در جدول ۲ می‌توان شرایط مرزی اعمال شده را به صورت خلاصه مشاهده کرد:

جدول ۲- شرایط مرزی

شرط مرزی	مرز
شرط تقارن	۱
$V=0$	۲
معادله (۱۳)	۳ و ۴
$p = 1 \text{ atm}$	۵ و ۶

۲-۵- الگوریتم و روش حل

رفتار و ماهیت معادلات ذکر شده در بخش ۲-۲ با یکدیگر متفاوت است. معادله‌ی پواسون یک معادله‌ی بیضوی می‌باشد اما معادلات نویر-استوکس دارای ماهیت سهموی-هذلولوی هستند. بنابراین کوپل کردن این معادلات با چالش‌هایی همراه است و عدم انتخاب روش مناسب موجب واگرایی حل می‌گردد. بر این اساس دو دسته الگوریتم جدا شده^۳ و کوپل^۴ در نرم‌افزار COMSOL قابل استفاده است.

که در آن مقدار شار الکترون (Γ_e) از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot E)n_e - D_e \cdot \nabla n_e \quad (2)$$

در رابطه‌ی فوق برای محاسبه‌ی ضریب نفوذ و تحرک‌پذیری الکترون و ضریب نفوذ انرژی از روابط انیشتین استفاده می‌شود:

$$D_e = \mu_e \cdot T_e \cdot \mu_e = \frac{5}{3} \mu_e \cdot D_e = \mu_e \cdot T_e \quad (3)$$

محاسبه‌ی دمای الکترون (T_e) مستلزم حل معادله‌ی انرژی است. برای این منظور معادله‌ی چگالی انرژی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e + E \cdot \Gamma_e = S_{ion} - (u_e \cdot \nabla) n_e + (Q_i - Q_{em})/q \quad (4)$$

$$\Gamma_e = -(\mu_{en} \cdot E)n_e - D_{en} \cdot \nabla n_e \quad (5)$$

در این معادلات Γ_e شار انرژی، μ_e تحرک‌پذیری الکترون، D_e نشانگر ضریب نفوذ الکترون و n_e چگالی الکترون می‌باشد. همچنین E بیانگر میدان الکتریکی و ρ_e چگالی بار الکتریکی می‌باشد.

$$\rho_e = (C_{Ar^+} - C_e) \times F_e \quad (6)$$

که F_e ثابت فارادی و برابر با $9.65 \times 10^4 \text{ C/mol}$ می‌باشد و در این معادله غلظت مولی یون آرگون از این رابطه بدست می‌آید:

$$C_{Ar^+} = (\omega_{Ar^+} \times \rho) / M_{Ar^+} \quad (7)$$

در ω_{Ar^+} در این رابطه بیانگر نسبت جرمی یون آرگون می‌باشد. با استفاده از معادله‌ی پواسون می‌توان مقادیر میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی را حساب کرد:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r E) = \rho_e \quad (8)$$

$$E = -\nabla V \quad (9)$$

با تعیین شدن مشخصه‌های اصلی پلاسما (چگالی بار و میدان الکتریکی) می‌توان نیروی کولمب را توسط رابطه زیر تعیین کرد:

$$F = \rho_e E \quad (10)$$

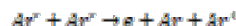
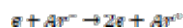
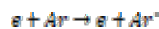
در نهایت برای تعیین پارامترهای توده‌ی جریان سیال معادلات پیوستگی و بقای مومنتوم به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (11)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-pI + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + F \quad (12)$$

۲-۳- زیرمدل شیمیایی یونش

در رژیم تخلیه کرونا اجزاء شیمیایی درون جریان (الکترون‌ها و یون‌ها) می‌توانند تولید و مصرف شوند. بدین منظور و برای مدل‌سازی فرایند غیر تعادلی یونش آرگون، از واکنش‌های زیر استفاده شده است [۱۵]:



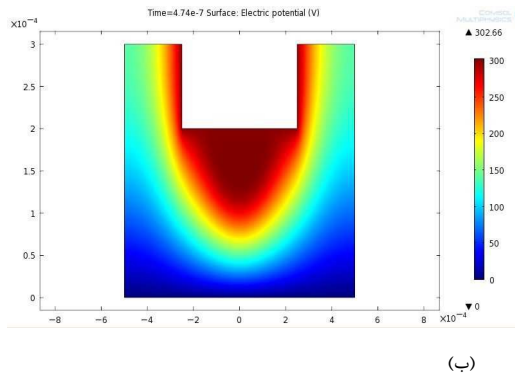
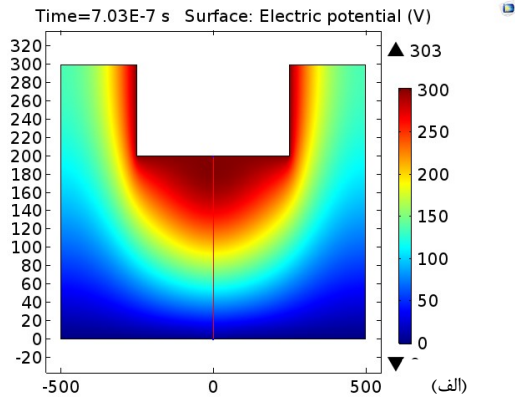
¹ Secondary emission coefficient

² Quiescent flow

³ Segregated algorithm

⁴ Coupled algorithm

همچنین در شکل ۷ توزیع پتانسیل الکتریکی بوجود آمده در جریان پلازما قابل مشاهده می‌باشد. الگوی کلی خطوط پتانسیل الکتریکی در شبیه‌سازی حاضر و مرجع [۱۱] مشابه یکدیگرند. با این وجود اندکی اختلاف در کشیدگی خطوط ملاحظه می‌شود که همانطور که قبل‌تر بیان شد می‌تواند به دلیل اضافه شدن مدل سیال باشد. اثر این مدل در آخرین جمله سمت راست معادله (۱) توسط متغیر سرعت اضافه شده است. لذا تغییرات سرعت جت پلازما بر روی چگالی الکترون و به تبع آن با توجه به معادلات (۶) و (۸) بر روی توزیع چگالی بار و پتانسیل الکتریکی اثر می‌گذارد.



شکل ۷- کانتور پتانسیل الکتریکی: (الف) شبیه‌سازی (ب) مرجع [۱۱]

با توجه به اینکه سرعت جت دارای مقادیر قابل توجهی نمی‌باشد، بنابراین اختلاف چشمگیری با اضافه شدن مدل سیال بین نتایج مربوط به چگالی الکترون و پتانسیل الکتریکی در این پژوهش با مرجع [۱۱] دیده نمی‌شود.

همچنین تغییرات پتانسیل و میدان الکتریکی در راستای خط مرکزی بین دو الکتروود، به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. نتایج بدست‌آمده با نتایج حاصل از مرجع [۱۱] مقایسه شده‌اند که بیانگر تطابق و همخوانی خوب آن‌ها با یکدیگر است.

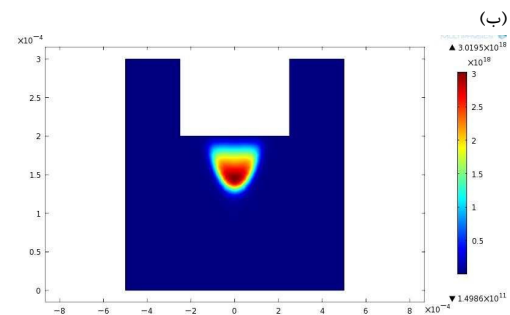
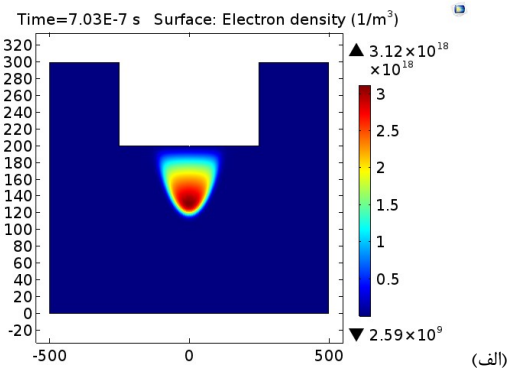
بر اساس بررسی‌های صورت‌گرفته توسط نویسندگان مشخص شد که بکارگیری الگوریتم کوپل در زمانی که مقدار ولتاژ اعمالی به الکتروود آند افزایش می‌یابد منجر به واگرایی حل عددی می‌شود.

از این رو برای دست یافتن به حلی پایدار از حلگر پارادیسو^۱ [۱۶] که مبتنی بر الگوریتم جداسازی می‌باشد استفاده شده است. حلگر پارادیسو روی سیستم‌هایی به شکل کلی $Ax = b$ عمل کرده و برای حل دستگاه‌های معادلات خطی متقارن و غیر متقارن مناسب می‌باشد. کد حلگر پارادیسو با استفاده از زبان‌های C و فرترن توسعه داده شده است. همچنین در قسمت تنظیمات حلگر غیر پایا، از تolerانس نسبی 0.001 استفاده شد.

۳- نتایج

۳-۱- اعتبارسنجی روش حل

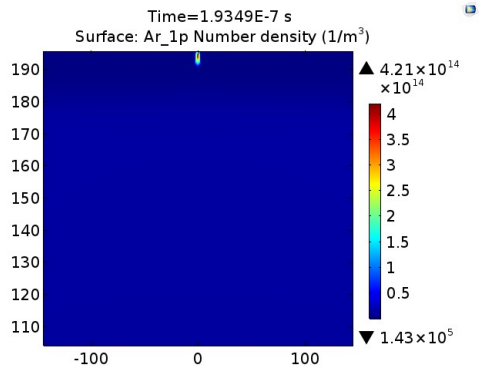
همانطور که قبلاً ذکر شد، پژوهش حاضر در راستای توسعه و بهبود مدل بکارگرفته‌شده در مرجع [۱۱] انجام شده است. بنابراین هندسه، شرایط مرزی و اولیه مشابه به شبیه‌سازی صورت‌گرفته در مرجع [۱۱] اعمال شده است. در شکل ۶ توزیع چگالی تعداد ذرات الکترون اندکی پس از تولید پلازما در نزدیکی الکتروود آند نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج شبیه‌سازی در قسمت (الف) مشابه نتایج مرجع [۱۱] در قسمت (ب) می‌باشند. تفاوت اندک مقادیر می‌تواند ناشی از اضافه کردن مدل سیال آرام در پژوهش حاضر باشد.



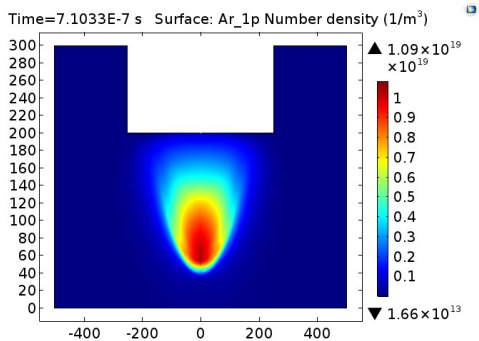
شکل ۶- توزیع چگالی الکترون: (الف) شبیه‌سازی (ب) مرجع [۱۱]

¹ PARDISO

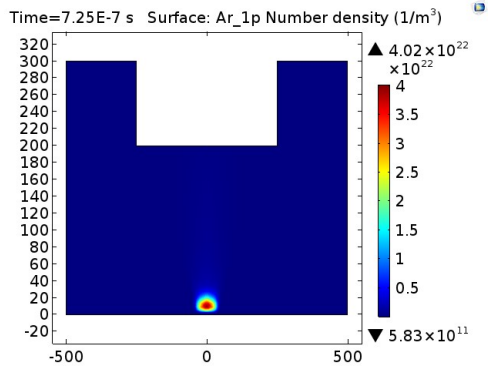
می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در بازه‌ی زمانی $0.1905 \mu\text{s}$ تا $0.1935 \mu\text{s}$ ، چگالی Ar^+ در این ناحیه ۱۰ برابر افزایش یافته است.



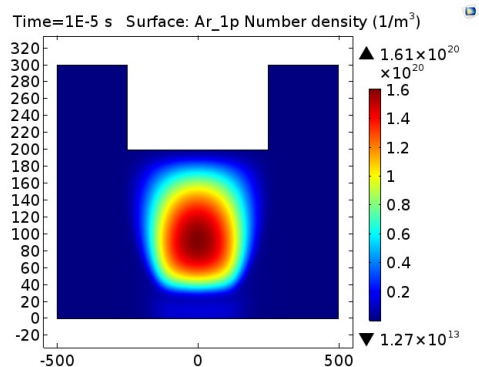
(الف)



(ب)

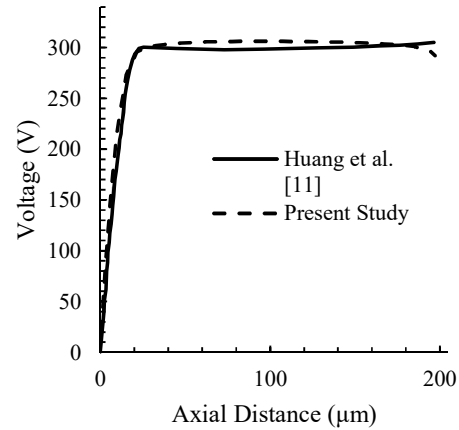


(ج)

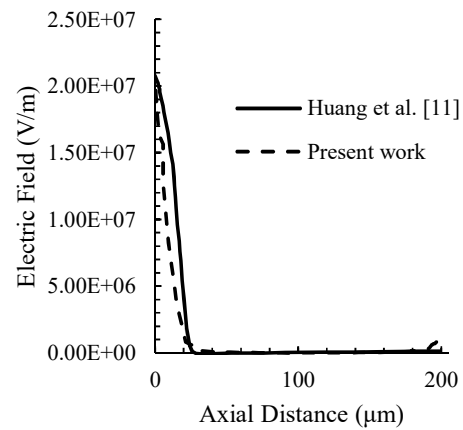


(د)

شکل ۱۰- توزیع چگالی Ar^+ در زمان‌های مختلف



شکل ۸- نمودار پتانسیل بر حسب فاصله در حالت پایا



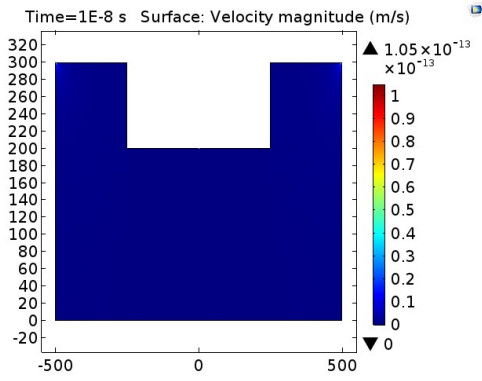
شکل ۹- نمودار میدان الکتریکی بر حسب فاصله در حالت پایا

همانطور که ملاحظه می‌شود، با حرکت از سمت کاتد به سمت آند بر روی خط مرکزی، پتانسیل الکتریکی افزایش و میدان الکتریکی کاهش می‌یابد و بیشترین گرادیان به وجود آمده در نزدیکی الکترود کاتد رخ می‌دهد. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که بیشترین میزان افت ولتاژ به مقدار 281.5 V در نزدیکی کاتد اتفاق می‌افتد. میدان الکتریکی نیز در سطح کاتد در بیشینه مقدار خود یعنی $2.08 \times 10^7 \text{ V/m}$ قرار دارد و در فاصله‌ای به اندازه $53 \mu\text{m}$ به مقدار 53632 V/m کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در فاصله $21.49 \mu\text{m}$ از سطح کاتد افت ناگهانی ولتاژ شروع می‌شود

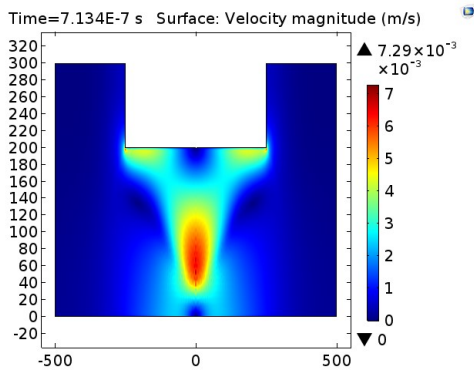
۳-۲- بررسی نحوه شکل‌گیری و ایجاد جت پلاسما

همانطور که در بخش مقدمه ذکر گردید، انتقال مومنتوم از یون‌های سنگین به اتم‌های خنثی باعث شتابگیری توده سیال پلاسما می‌شود. لذا بررسی چگونگی تولید و توسعه یون‌های مرتبه اول حائز اهمیت است.

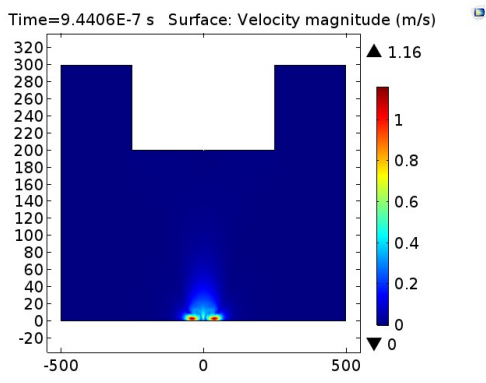
در شکل ۱۰ در قسمت (الف) مشاهده می‌شود که در مجاورت آند ناحیه‌ای پرچگالی ایجاد می‌شود که ناحیه‌ی شروع شکل‌گیری پلاسما



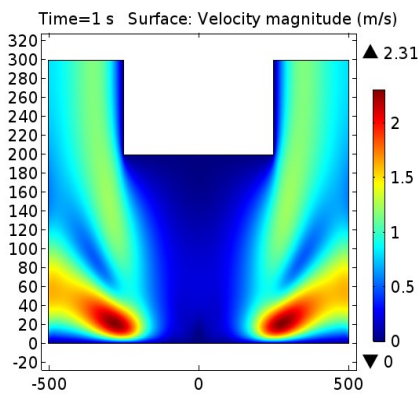
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۱- نیروی وارد شده بر کاتد در حالت پایا

با گذشت زمان بیشتر، میزان تخلیه الکتریکی خازن افزایش یافته و مقدار یونیزاسیون و در نتیجه چگالی A_{r^2} در بین دو الکترود افزایش می‌یابد و توده‌ی A_{r^2} تحت میدان الکتریکی ایجاد شده، بین دو الکترود شتاب گرفته و مطابق قسمت (ب) به سمت کاتد حرکت می‌کند.

در نهایت همانطور که در قسمت (ج) نشان داده شده است این توده با کاتد برخورد می‌کند. در این لحظه، در ناحیه‌ی سکون به دلیل افزایش فشار، چگالی A_{r^2} به بیشترین مقدار خود می‌رسد. چنانکه در بخش بعدی ذکر خواهد شد، پس از انبساط، چگالی A_{r^2} نیز کاهش خواهد یافت و با اشباع شدن خازن و رسیدن به شرایط پایا، توزیع چگالی A_{r^2} به صورت قسمت (د) شکل ۱۰ در می‌آید.

۳-۳- بررسی فرآیند شتابگیری جت پلاسما

در این بخش مطابق با آنچه که در بخش قبل بیان شد، کاتوره‌های سرعت در چهار مرحله در شکل ۱۱ ارائه شده است.

در زمان شکل‌گیری اولیه یون‌ها در مجاورت الکترود آند سرعت در تمام دامنه حل تقریباً ناچیز است (قسمت الف)، زیرا مقدار ولتاژ اعمالی بین دو الکترود هنوز کم می‌باشد.

با افزایش زمان و میزان تخلیه‌ی جریان الکتریکی خازن، میدان الکتریکی زیاد شده و یون‌های A_{r^2} اگرچه هنوز دارای سرعت کمی می‌باشند اما به سمت کاتد شتاب می‌گیرند (قسمت ب).

در مرحله سوم به دلیل اختلاف ولتاژ اعمالی بیشتر در دو سر الکترود، یون‌های مثبت گاز آرگون مومنتوم بیشتری را به واسطه‌ی نیروی کولمب کسب می‌کنند و با انتقال آن به توده‌ی جریان گاز باعث می‌شوند که سرعت جت در مرحله‌ی برخورد به سطح الکترود کاتد به حدوداً 1 m/s برسد (قسمت ج).

با اشباع شدن خازن الکتریکی و رسیدن شرایط مدار الکتریکی به حالت پایا، جت برخوردی به سطح در راستای شعاعی تغییر مسیر داده و به صورت غالب در راستای دیواره کاتد و خروجی منبسط شده و در شرایط پایا به سرعت بیشینه‌ی 2.3 m/s می‌رسد.

جزئیات بیشتر رفتار جت جریان در نزدیکی سطح کاتد در بخش بعد بحث شده است.

۳-۴- بررسی رفتار پلاسما در نزدیکی سطح کاتد

در شکل ۱۲ توزیع و بردارهای نیروی کولمب وارد بر جریان پلاسما نشان داده شده است. با توجه به اینکه مقدار چگالی A_{r^2} در ناحیه سکون بیشینه می‌شود، لذا طبق رابطه‌ی (۱۰) مشاهده می‌شود که نیرو نیز در مجاورت کاتد افزایش یافته و به مقدار حداکثر $1.23 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ رسیده است.

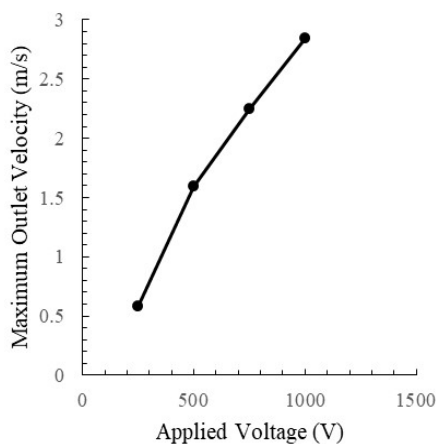
۳-۵- بررسی اثر ولتاژ اعمالی بر سرعت خروجی

در شکل ۱۵، نمودار تغییرات بیشینه سرعت جت خروجی بر حسب ولتاژ اعمالی در مرز ۶ و در شرایط پایا نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که سرعت با افزایش ولتاژ اعمالی تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. این موضوع با توجه به روابط تحلیلی (۱۵) و (۱۶) قابل توجیه است [۱۷].

$$I = C \times V(V - V_0) \quad (15)$$

$$w_j = D_{jet} \sqrt{\frac{d \times I}{\mu}} \quad (16)$$

در این روابط، C و D_{jet} دو ضریب ثابت و d فاصله‌ی بین دو الکترود بوده و w_j بیانگر سرعت جت خروجی می‌باشد. با توجه به روابط ۱۵ و ۱۶ ملاحظه می‌شود که به ترتیب جریان الکتریکی با مربع ولتاژ و سرعت گاز خروجی با مجذور جریان متناسب است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که سرعت و ولتاژ اعمالی تقریباً به صورت خطی با یکدیگر رابطه دارند.

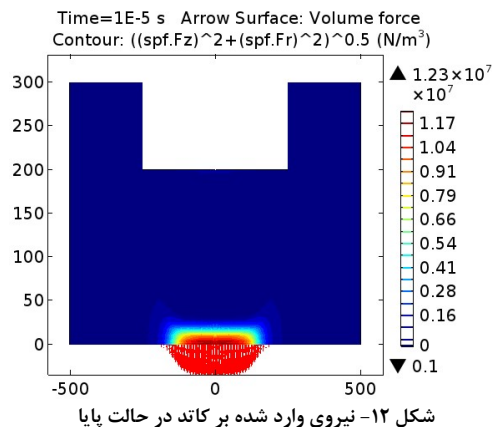


شکل ۱۴- نمودار بیشینه سرعت خروجی بر حسب ولتاژ اعمالی

۴- نتیجه‌گیری

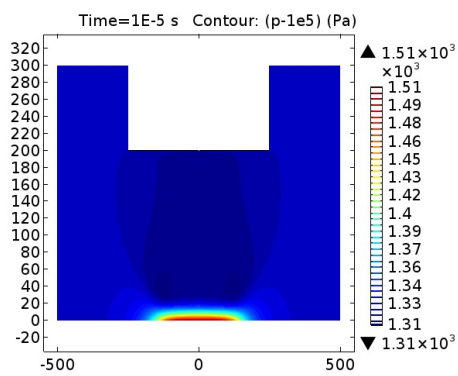
در تحقیق حاضر مشخصه‌های جریان جت برخوردی تحت تاثیر تخلیه کرونا مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا اثر تخلیه کرونا و نیروی الکترواستاتیکی حاصله بر خطوط و سرعت جریان بررسی شد. همچنین شدت نیروی وارد بر کاتد و تغییر فشار در ناحیه سکون مد نظر قرار گرفت. به طور کلی نتایج به دست آمده به صورت زیر می‌باشند:

- نیروی وارد شده بر سطح کاتد در حالت پایا به بیشترین مقدار خود می‌رسد چرا که در این شرایط چگالی بار الکتریکی پس از انجام واکنش‌های یونیزاسیون به بیشترین مقدار خود رسیده است و این کمیت با نیروی حجمی وارد شده در جریان لایه‌ای رابطه‌ی مستقیم دارد. لذا بیشترین مقدار نیرو در مرکز کاتد وارد می‌گردد.
- نیروی الکترواستاتیکی وارد بر جت پلاسما منجر به افزایش فشار در نزدیکی کاتد می‌شود و به تبع آن گاز پرفشار در جهت شعاعی منبسط می‌گردد.
- پس از شارژ شدن کامل خازن، مدار به حالت پایا رسیده و



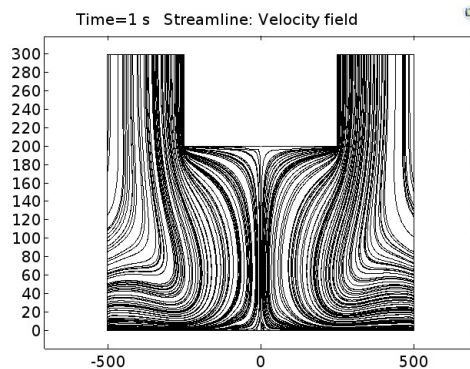
شکل ۱۲- نیروی وارد شده بر کاتد در حالت پایا

شایان ذکر است که افزایش این نیرو باعث می‌شود تا فشار نیز در ناحیه سکون بالا رود و به مقدار 151 Kpa برسد (شکل ۱۳). افزایش فشار در جهت محوری باعث می‌شود تا همانطور که در بخش ۳-۳ نشان داده شد، جریان در جهت شعاعی منبسط شده و سرعت آن زیاد شود.



شکل ۱۲- کانتور فشار در حالت پایا

تغییر راستای جریان در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. نیروی کولمب که در جهت محوری غالب می‌باشد باعث کشیدگی خطوط جریان در راستای محور تقارن شده و همانطور که ذکر شد با نزدیک شدن به سطح کاتد، این خطوط در جهت شعاعی تغییر مسیر می‌دهند.



شکل ۱۳- خطوط جریان در حالت پایا

- [4] Oglesby S., *Electrostatic Precipitation*, Marcel Dekker, New York, 1978.
- [5] Hughes J.F., *Electrostatics Powder Coating*, Wiley, New York, 1984.
- [6] Bastien F., Acoustics and gas discharges: application to loudspeakers, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 20, No. 12, pp. 1547–1557, 1987.
- [7] Darabi J., Ohadi M.M., Devoe D., An electrohydrodynamic polarization micropump for electronic cooling, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 98–106, 2001.
- [8] Mizeraczyk J., Berendt A., Podlinski J., Temporal and spatial evolution of EHD particle flow onset in air in a needle-to-plate negative DC corona discharge, *Journal of Physics D Applied Physics*, Vol. 49, No. 20, p. 205203, 2016.
- [9] Zhao L., Adamiak K., EHD flow in air produced by electrical corona discharge in pin-plate configuration. *Journal of Electrostatics*, Vol. 63, No. 3-4, pp. 337–350, 2005.
- [10] Liu X. H., He W., Yang F., Numerical simulation and experimental validation of Direct Current air corona discharge under atmospheric pressure, *Chinese Physics B*, Vol. 21, No. 8, 2012.
- [11] Huang XY, Zhang TT, Zhang X., "Modeling of Direct Current Atmospheric Pressure Argon Discharge in Two-Dimensional", *Advanced Materials Research*, Vol. 852, pp. 597-601, 2014
- [12] Davis T. A., *Direct Methods for Sparse Linear Systems*, SIAM, Philadelphia, 2006.
- [13] Grassi W., Testi D., Urbanucci L., Enhanced nucleate boiling and CHF on a small horizontal plate under ionic jet impingement, *International Community Heat Mass Transfer*, Vol. 79, No. 1, pp. 67–73, 2016.
- [14] COMSOL Multiphysics, Plasma Module User's guide, version 5.2, 2015.
- [15] COMSOL Multiphysics, Chemical Engineering Module Model Library, version 5.2, 2015.
- [16] Petra C. G., Schenk O., Anitescu M., 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.
- [17] Moreau E., Benard N., Lan-Sun-Luk J. D., Chabriat J. P., 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.

جریان با سرعت بیش از 2 m/s در جهت شعاعی حرکت می‌کند. این افزایش سرعت می‌تواند همانطور که در مقدمه اشاره شد برای مقاصد مختلفی از جمله خنک‌کاری، بهبود انتقال گرما و یا پمپ جریان سیال مورد استفاده قرار گیرد.

• با توجه به اینکه در این پژوهش صرفاً رفتار یک جت پلاسمای برخوردی مورد مطالعه قرار گرفته است، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های بعدی اثر عملکرد و راندمان جت پلاسمایی برای کاربردهای مذکور به طور خاص و دقیق مطالعه شود. همچنین در این پژوهش دما ثابت فرض شده است؛ اما با توجه به ناپایا بودن شبیه‌سازی، تداوم فرآیند تخلیه کم کم می‌تواند باعث گرم شدن سطح کاتد و در نتیجه تلفات حرارتی بشود. پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی با اضافه کردن معادله انرژی این موضوع مورد بررسی قرار گیرد.

۵- نمادها

C	ظرفیت خازن (pF)
C_{eff}	غلظت مولی آرگون (mol/m^3)
D_{en}	ضریب نفوذ انرژی الکترون (m^2/s)
E	میدان الکتریکی (V/m)
F	نیروی حجمی (N/m^3)
J	چگالی جریان الکتریکی (A/m^2)
L	طول (μm)
n_e	چگالی الکترون ($1/\text{m}^3$)
n_p	چگالی انرژی الکترون ($\text{kg}/(\text{m} \times \text{s}^3 \times \text{A})$)
p	فشار (atm)
R	مقاومت (ohm)
S_{en}	افت انرژی برخورد (W/m^2)
T	دما ($^{\circ}\text{K}$)
u	سرعت (m/s)
Γ_e	شار الکترون ($1/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
ρ_e	چگالی بار الکتریکی (C/m^3)
μ_e	تحرك پذیری الکترون ($1/\text{V.m.s}$)

۶- مراجع

- [1] Hauksbee F., *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects*, First Edition, pp. 46-47, London: Brugis, 1709.
- [2] Ould Ahmedou S. A., Rouaud O., Havet M., Electrohydrodynamic enhancement of heat and mass transfer in food processes. In *3rd International Symposium on Food and Agricultural Products*, Naples, Italy, 2007.
- [3] Robinson M., Movement of air in the electric wind of the corona discharge, *AIEE Transactions*, Vol. 80, No. 2, pp. 143-150, 1961.