مطالعه عددي جريان جت برخوردي توليد شده توسط رژيم تخليه الكتريكي كرونا

عليرضا فتحى	دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی و فناوریهای نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
مهدی آهنگر*	استادیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی و فناوریهای نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیدہ

جریان جت برخوردی حاصل از تخلیه کرونا امروزه برای کاربردهای مختلفی همچون خنککاری، تصفیهی جریان و بهبود انتقال گرما استفاده می گردد. 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 V 500 بین دو الکترود با فاصلهی µ0 سرعت بیشینه جت بوجودآمده پس از برخورد به 2.3 m/s نیروی حجمی بیشینه وارد بر سطح کاتد حدودا برابر با 1.23×1.1 میباشد. شبیه سازی 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 پلاسما، تخلیه کرونا، مدلسازی عددی، معادلات الکتروهیدرودینامیک.

Numerical Study of Plasma Impinging Jet Generated by Corona Discharge Regime

A. R. Fathi	Department of Aerospace, Shahid Beheshti University, Tehran, Irar
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 μ m 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.

۱– مقدمه

باعث شکست الکتریکی^۱ شود رژیم تخلیه کرونا میگویند. تخلیه کرونا معمولا باعث ساطع شدن نور بنفشی نزدیک آند میشود که تنها در تاریکی قابل مشاهده است. در شکل ۱ میتوان فرایند تخلیه رژیم کرونا را بین دو الکترود سوزنی و صفحهای به صورت شماتیک مشاهده کرد.

شده که در آن قدرت میدان الکتریکی اطراف آند به قدری نیست که

با اعمال اختلاف ولتاژ بین دو الکترود با ضخامتهای متفاوت، میدان الکتریکی قوی در اطراف الکترود تخلیه کننده (آند) باعث می شود 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 تخلیه کننده قرار دارند ساکن هستند و انتقال مومنتوم از ذرات باردار است که باعث حرکت آنها می گردد. بنابراین نیروی کولمبی که به یونها وارد می شود، تبدیل به یک نیروی حجمی الکتریکی بر روی الکتروهیدرودینامیکی (EHD) شده که از آن با نامهای "باد الکتریکی" یا "باد یونی" یاد می شود و برای نخستین بار در سال ۱۷۰۹ توسط هاکزبی [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 تاریخ دریافت: ۲/۱۷/۹۵ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۱۴



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 تهنشینی 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^۲ [۶].

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[†] 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 Fuet 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 m/s دست یابند.

ژینگ-هوا و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۲ تخلیه کرونا را به عنوان یک پدیدهی 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 ۷ 0000 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 ۲۰۲۳/۷۵×9.4

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

حل عددی معادلات پیوستگی برای الکترونها و یونها و معادله پواسون برای پتانسیل الکتریکی در یک پیکربندی سوزن-صفحه ای، توزیع چگالی اجزای پلاسما و میدان الکتریکی را ارائه کردند. یافته های 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 الکترون ها و یون ها به همراه معادله پواسون لحاظ گردید و از مدلسازی توده ی جریان که مستلزم حل معادلات نویر-استوکس می باشد 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 الکتروهیدرودینامیک بر تهنشین شدن این ذرات در سیستمهای تهنشین کنندهی الکترواستاتیک 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 DED کاملا توسعهیافته بود.

همچنین در سال ۲۰۱۶ گراسی و همکاران [۱۳] از جت برخوردی یونی در یک فضای مایع برای افزایش راندمان جوشش هستهای⁶ 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 بیش تر باشد ولی شار گرمایی از شار گرمایی بحرانی کم تر 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 ۱۳/۰

نتایج پژوهشهای فوقالذکر، بیانگر بکارگیری روزافزون جتهای برخوردی در رژیم کرونا در فرآیندهای انتقال حرارتی و سیالاتی به دلیل سادگی و کارآیی بالای آنهاست. در بین پژوهشهای مطرحشده، مرجع [11] تلاش کرد تا مشخصههای الکتریکی و نحوه تولید جریان پلاسما را مدلسازی کند. با این وجود به دلیل عدم به کارگیری معادلات سیال، چگونگی شتابگیری 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 به کارگیری نرمافزار COMSOL حل شد تا رفتار مشخصههای الکتروهیدرودینامیکی جریان جت یونها به طور دقیق شناسایی شود.

۲- مشخصات مسئله

1-۲- هندسه حل و شبکه محاسباتی

طرحوارهای از هندسهی دو بعدی به کار گرفته شده در مرجع [11]، دامنه محاسباتی و محل قرار گیری آند و کاتد در شکل ۲ نمایش داده شده است. برای افزایش سرعت محاسبات و کاهش زمان همگرایی از

¹ Electrostatic Precipitation

² Electrostatics Powder Coating ³ Ionic Loudspeakers

⁴ Pin-plate

⁵ Joule Heating

⁶ Nucleate Boiling

فرض تقارن محوری استفاده شده است. در این چیدمان شعاع آند μm 250 و شعاع کاتد μm 500 در نظر گرفته شده و دو الکترود در فاصلهی μm 200 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 الکترودها 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 ذکرشده 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

بیشینه سرعت (m/s)	تعداد سلول	شبکه
۲.۳۱	10971	١
۲.۳۳	۳۲۲۴۸	٢



شکل ۵- مقایسه سرعت حالت پایا در دو شبکه مختلف

مشاهده میشود که نتایج حاصل از دو شبکه مذکور از تطابق مناسبی برخوردارند. همچنین با توجه به جدول ۱ مقادیر سرعت بیشینهی مربوط به هریک از دو شبکه، اختلاف اندکی را نشان میدهند. بنابراین با توجه به اینکه زمان محاسبات با انتخاب شبکه ۲ نسبت به شبکه ۱ حدودا ۵ برابر بیشتر شده است، برای کاهش زمان محاسبات، شبکه ۱ مد نظر قرار گرفت. همچنین خاطرنشان 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⊣ستوکس میباشد. لازم به ذکر است که مجموعه معادلات فوق تحت عنوان معادلات الکتروهیدرودینامیک شناخته می شوند که به صورت زیر بیان شدهاند [۱۴].

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

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

(٣)

(6)

(9)

(11)

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

$$\Gamma_{e} = -(\mu_{e} \cdot E)n_{e} - D_{e} \cdot \nabla n_{e} \tag{(7)}$$

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

$$\mu_e = \mu_e \cdot T_e$$
, $\mu_e = \frac{5}{3} \mu_e$, $D_e = \mu_e \cdot T_e$

محاسبهی دمای الکترون **[1]** مستلزم حل معادلهی انرژی است. برای این منظور معادلهی چگالی انرژی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \Gamma_e + E \Gamma_e = S_{en} - \langle u, \nabla \rangle n_e + \langle Q + Q_{gen} \rangle / q \qquad (f)$$

$$= -(\mu_{en} \cdot E)\mathbf{n}_e - D_{en} \cdot \nabla \mathbf{n}_e \tag{(b)}$$

در این معادلات ی شار انرژی، ی تحرک پذیری الکترون، ی نشانگر ضریب نفوذ الکترون و ی چگالی الکترون می باشد.

همچنین E بیانگر میدان الکتریکی و 📭 چگالی بار الکتریکی میباشد.

$$\boldsymbol{\rho}_{\mathrm{g}} = (\boldsymbol{C}_{\mathrm{der}} + \boldsymbol{C}_{\mathrm{g}}) \times \boldsymbol{F}_{\mathrm{g}}$$

که **F**a ثابت فارادی و برابر با C/mol×10[#]C/s65 میباشد و در این معادله غلظت مولی یون آرگون از این رابطه بدست میآید:

$$C_{ds^{\pm}} = (\omega_{ds^{\pm}} \times \rho)/M_{ds^{\pm}}$$
(V)

هی در این رابطه بیانگر نسبت جرمی یون آرگون میباشد. با استفاده از معادلهی پواسون میتوان مقادیر میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی را حساب کرد:

$$\overline{V} \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r E) = \rho_r \tag{(A)}$$

 $E = -\nabla V$

 Γ_{c}

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

$$F = \rho_c E \qquad (1 \cdot)$$

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

714

 $\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^{r})] + F \qquad (17)$

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[1۵]:

 $e + Ar \rightarrow e + Ar$

 $e + Ar \rightarrow 2e + Ar^{+}$

 $e + Ar^- \rightarrow 2e + Ar^\circ$

 $Ar^r + Ar^r \rightarrow e + Ar + Ar^4$

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

$$Ar^{\oplus} \rightarrow Ar$$

$Ar^{*} \rightarrow Ar$

ضمنا 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 الکترود میباشد.

۲-۴- شرایط مرزی و اولیه

با توجه به اینکه شبیه سازی برای جریان ساکن^۲ در شرایط اتمسفریک در نظر گرفته شده، شرط فشار ثابت **۱۵۳۳ = q** برای مرزهای ۵ و ۶ در شکل ۲ اعمال شده است. همچنین با در نظر گرفتن شرط اتصال به زمین یعنی 0 = V برای کاتد، از قانون اهم برای تعیین مقدار ولتاژ بر روی شرط مرزی آند استفاده شده است [۱۴].

$$V = V_0 - I_0 R_0 - R_0 C_0 \frac{dV}{dt}$$
(17)

مقادیر **R** و **C** به ترتیب KO و I pf در نظر گرفته شدهاند. مقدار **W** برابر با V 500 است و **I** از رابطهی زیر محاسبه میگردد [۱۴]:

$$I_p = \int (n \cdot j_l + n \cdot j_d + n \cdot j_d) dS \qquad (1f)$$

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

جدول ۲- شرایط مرزی

شرط مرزى	مرز
شرط تقارن	١
V=0	٢
معادله (۱۳)	٣٩۴
p = 1 atm	۶و۵

۲-۵- الگوریتم و روش حل

رفتار و ماهیت معادلات ذکرشده در بخش ۲-۲ با یکدیگر متفاوت است. معادلهی پواسون یک معادلهی بیضوی می باشد اما معادلات نویر-استوکس دارای ماهیت سهموی-هذلولوی هستند. بنابراین کوپل کردن این معادلات با چالش هایی همراه است و عدم انتخاب روش مناسب موجب واگرایی حل می گردد. بر این اساس دو دسته الگوریتم جدا شده⁷و کوپل⁷ در نرمافزار COMSOL قابل استفاده است.

¹ Secondary emission coefficient

² Quiescent flow

³ Segregated algorithm

⁴ Coupled algorithm

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

از این رو برای دست یافتن به حلی پایدار از حلگر پاردیسو^{([7]} که مبتنی بر الگوریتم جداشده میباشد استفاده شده است. حلگر پاردیسو روی سیستمهایی به شکل کلی Ax = b عمل کرده و برای حل دستگاههای معادلات خطی متقارن و غیر متقارن مناسب میباشد. کد حلگر پاردیسو با استفاده از زبانهای C و فرترن توسعه داده شده است. همچنین در قسمت تنظیمات حلگر غیر پایا، از تلرانس نسبی 0.001 استفاده شد.

۳- نتايج

۳-۱- اعتبارسنجی روش حل

همانطور که قبلا 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 پلاسما در نزدیکی الکترود آند نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه میشود نتایج شبیهسازی در قسمت (الف) مشابه نتایج مرجع [۱۱] در قسمت (ب) می باشند. تفاوت اندک مقادیر می تواند ناشی از اضافه کردن مدل سیال آرام در پژوهش حاضر باشد.



همچنین در شکل ۷ توزیع پتانسیل الکتریکی بوجودآمده در جریان پلاسما 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 پلاسما 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 نمی باشد، بنابراین اختلاف چشمگیری با اضافه شدن مدل سیال بین نتایج مربوط به چگالی الکترون و پتانسیل الکتریکی در این پژوهش با مرجع [۱۱] دیده نمی شود.

همچنین تغییرات پتانسیل و میدان الکتریکی در راستای خط مرکزی بین دو الکترود، 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.

¹ PARDISO



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 V 281.5 در نزدیکی کاتد اتفاق میافتد. میدان الکتریکی نیز در سطح کاتد در بیشینه مقدار خود یعنی V/۳ 53632 کاهش مییابد. لازم به ذکر است که در فاصله μ 21.49 از سطح کاتد افت ناگهانی ولتاژ شروع میشود

۲-۲- بررسی نحوه شکل گیری و ایجاد جت پلاسما

همانطور که در بخش مقدمه ذکر گردید، انتقال مومنتوم از یونهای سنگین به اترهای 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 می شود که در مجاورت آند ناحیهای پرچگال ایجاد می شود که ناحیهی شروع شکل گیری پلاسما

میباشد. بررسیها نشان میدهد که در بازهی زمانی μs 0.1905 تا μs، میباشد. چگالی ۲۰۰۰ در این ناحیه ۱۰ برابر افزایش یافته است.



شکل ۱۰- توزیع چگالی 🛹 در زمانهای مختلف

با گذشت زمان بیشتر، میزان تخلیه الکتریکی خازن افزایش یافته و مقدار یونیزاسیون و در نتیجه چگالی ۲۰۰۴ در بین دو الکترود افزایش مییابد و تودهی ۲۰۰۰ 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 ۲۰۰۳ به بیشترین مقدار خود میرسد.

چنانکه در بخش بعدی ذکر خواهد شد، پس از انبساط، چگالی ۲۳۴ نیز کاهش خواهد یافت و با اشباع شدن خازن و رسیدن به شرایط پایا، توزیع چگالی ۲۳۴ به صورت قسمت (د) شکل ۱۰ در میآید.

۳-۳- بررسی فر آیند شتابگیری جت پلاسما

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

در زمان شکل گیری اولیه یونها در مجاورت الکترود آند سرعت در تمام دامنه حل تقریبا 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 ۲۳۰۰ 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 حدودا 1 m/s ا 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 ۲۰۰ در ناحیه سکون بیشینه می شود، لذا طبق رابطهی (۱۰) مشاهده می شود که نیرو نیز در مجاورت کاتد افزایش یافته و به مقدار حداکثر ۲۰۳۰ ۲۵/۳ ۲۰/۳۰





شکل ۱۱- نیروی وارد شده بر کاتد در حالت پایا

(د)

عليرضا فتحى و مهدى آهنگر



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.



تغییر راستای جریان در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. نیروی کولمب که در جهت محوری غالب می باشد 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 می دهند.



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 تقریبا به صورت خطی افزایش مییابد. این موضوع با توجه به روابط تحلیلی (۱۵) و (۱۶) قابل توجیه است [۱۷].

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

$$u_{f} = D_{exc} \sqrt{\frac{d \times I}{\mu}}$$
(19)

در این روابط، **ت** و سر**و** دو ضریب ثابت و b فاصلهی بین دو الکترود بوده و **ب** 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 تقریبا به صورت خطی با یکدیگر رابطه دارند.



شكل ۱۴-نمودار بيشينه سرعت خروجي بر حسب ولتاژ اعمالي

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 الکتروهیدرودینامیک 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 بهدست آمده به صورت زیر می باشند:

 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 الکتروهیدرودینامیک وارد بر جت پلاسما منجر به افزایش فشار در نزدیکی کاتد میشود و به تبع آن گاز پرفشار در جهت شعاعی منبسط می گردد.

پس از شارژ شدن کامل خازن، مدار به حالت پایا رسیده و

- [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-toplate 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 highperformance 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-tocylinder 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 صرفا 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 شبیه سازی، تداوم فرآیند تخلیه کم کم میتواند باعث گرم شدن سطح کاتد و در نتیجه تلفات حرارتی بشود. پیشنهاد می شود که در پژوهشهای آتی با اضافه کردن معادله انرژی این موضوع مورد بررسی قرار گیرد.

۵– نمادها

- C ظرفیت خازن (pF)
- غلظت مولی آرگون(mol/m³) غلظت مولی آرگون
- m²/s) ضريب نفوذ انرژی الکترون (m²/s)
 - E ميدان الكتريكى (V/m)
 - F نیروی حجمی (N/m³)
 - J چگالی جریان الکتریکی (A/m²)
 - L طول (µm)
 - 👧 🕺 چگالی الکترون (1/m³)
- یه چگالی انرژی الکترون ((kg/(m×∎z×A))
 - p فشار (atm)
 - R مقاومت (ohm)
 - 🚛 افت انرژی برخورد(۳۰/۳)
 - (°K) دما (T
 - u سرعت (m/s)
 - 📭 شار الكترون (s · 📲 (1/m)
 - 🗛 🛛 چگالی بار الکتریکی (C/m³)
 - نحر کپذیری الکترون (1/V.m.s)

8- مراجع

- 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.