



مدل سازی دو بعدی و بررسی تاثیر پارامترهای الکتریکی و هندسی دستگاه تخلیه سد دی الکتریک از نوع جت پلاسما بر پارامترهای پلاسما

یاسمن امیری*، بهجت قاسمی، زهرا شهبازی راد

گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهیدبهشتی، ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش مدل سازی و بررسی تأثیر پارامترهای الکتریکی و هندسی دستگاه تخلیه سد دی الکتریک از نوع جت پلاسما انجام شده است. این دستگاه در فشار اتمسفر و با گاز آرگون کار می‌کند. دو پیکربندی الکتروود سوزنی و حلقوی از دستگاه جت پلاسما مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل سازی جت پلاسما از ماژول پلاسمای نرم افزار کامسول نسخه ۵.۴ که بر اساس روش المان محدود کار می‌کند، استفاده شده است. پارامترهای پلاسما مانند چگالی الکترون، دمای الکترون و پتانسیل الکتریکی با توجه به تغییرات پارامترهای هندسی و پارامترهای الکتریکی مانند فرکانس و ولتاژ اعمالی مورد بررسی قرار گرفته است. فرکانس اعمالی به الکتروودها بین ۱۰-۲۵kHz و بیشینه ولتاژ سینوسی اعمال شده بین ۹-۱۵kV می‌باشد.

کلید واژه‌ها: پلاسمای سرد، جت، تخلیه سد دی الکتریک، شبیه سازی دو بعدی، فشار اتمسفر

Two-dimensional modeling and the influence of electrical characterization of dielectric barrier discharge on plasma parameters

Yasaman Amiri*, Behjat Ghasemi, Zahra Shahbazi Rad

Department of radiation application, faculty of nuclear engineering, shahid beheshti university

Abstract

In this study, 2-D modeling of atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma jet worked in Ar gas and the effect of electrical parameters and geometric parameters have been investigated. The plasma module of COMSOL multi-physics (version 5.4) which is based on the finite element method has been used for the modeling of the plasma jet. The plasma parameters, such as, electron density, electron temperature and electrical potential have been analyzed with respect to the electrical parameters (voltage supply & frequency) and geometric parameters. The applied frequency was selected between 10 kHz and 25 kHz and the maximum sinusoidal applied voltage was selected between 9 kV and 15 kV.

Keywords: Cold plasma, Jet, Dielectric barrier discharge, 2-D modeling, Atmospheric pressure.

۱. مقدمه

در چند سال گذشته انواع مختلفی از جت پلاسماهای فشار اتمسفری مانند جت‌های DFE^1 ، جت‌های DBD، جت‌های شبه DBD و جت‌های تک الکترودی SE^2 توسعه یافته‌اند. از جت پلاسماهای سرد فشار اتمسفری (NAPPJ)^۳ در فرایندهای بهبود زخم، ضد عفونی کردن سطوح، تولید نانو ساختارها و ... استفاده می‌شود [۱-۴]. در این مقاله دو پیکربندی متفاوت از دی‌الکتریک پلاسما جت مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای الکتریکی اعمال شده به پلاسما جت مانند فرکانس و ولتاژ اعمالی برای دستیابی به بهبود پارامترهای درمانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. لو و لاروسی در سال ۲۰۰۶، دینامیک جت پلاسما فشار اتمسفری تولید شده زیر میکروثانیه را با استفاده از ویژگی‌های ولتاژ-جریانی مورد مطالعه قرار دادند [۵]. آن‌ها از دوربین‌های CCD برای بررسی تحولات مکانی و زمانی پلاسما در داخل محفظه تخلیه استفاده کردند. تندرو و همکارانش در سال ۲۰۰۶، راکتور تخلیه سد دی‌الکتریک را که در آن‌ها هوا جریان داشت توسط نرم افزار کامپوسول شبیه‌سازی کردند. در همان سال ساکیاما شبیه‌سازی پلاسما سوزنی رادیوفرکانسی (۱۳/۵۶MHz) را با استفاده از نرم افزار کامپوسول انجام داد. در مدل ساکیاما گاز هلیوم و مقدار کمی از ذرات نیتروژن وجود داشت [۶]. تاکنون شبیه‌سازی‌های کمی در مورد تخلیه سد دی‌الکتریک از نوع جت‌های فشار اتمسفری انجام شده است. در این پژوهش شبیه‌سازی دوبعدی تخلیه سد دی‌الکتریک از نوع جت فشار اتمسفری با دو پیکربندی، با استفاده از نرم افزار کامپوسول صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از پارامترهای الکتریکی مانند ولتاژ و فرکانس جت پلاسما سرد فشار اتمسفری با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۲. روش کار

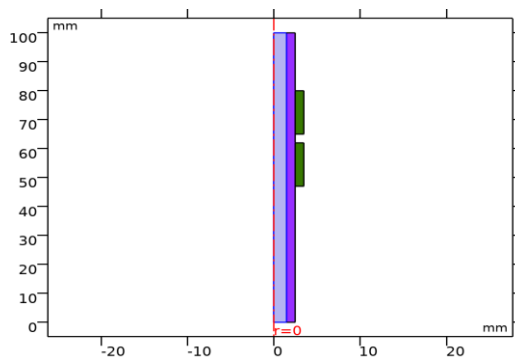
۱.۲. هندسه شبیه‌سازی

پیکربندی دستگاه تخلیه سد دی‌الکتریک از نوع جت پلاسما سوزنی، در شکل ۱ با جزئیات نشان داده شده است. بدنه اصلی جت پلاسما شامل یک تیوب کوارتزی به طول ۱۰۰mm و به ترتیب شعاع داخلی و خارجی ۱/۵mm و ۲/۵mm می‌باشد. یک الکتروود مرکزی ساخته شده از مس به طول ۸۰mm و ضخامت ۱mm در وسط تیوب کوارتز قرار گرفته است. یک الکتروود رینگ مانند به طول ۱۵mm و ضخامت ۱mm بیرون از تیوب کوارتز قرار گرفته است. فاصله الکتروود سوزنی و الکتروود رینگ مانند با ۲mm که شامل ۱mm شکاف بین دیواره داخلی تیوب کوارتز و الکتروود سوزنی و ۱mm ضخامت دی‌الکتریک، می‌باشد. دومین پیکربندی جت پلاسما در شکل ۲ با جزئیات نشان داده شده است. بدنه اصلی این دستگاه شامل یک تیوب کوارتزی به طول ۱۰۰mm و به ترتیب قطر داخلی و خارجی ۳mm و ۵mm می‌باشد. دو الکتروود حلقوی مانند به طول ۱۵mm و ضخامت ۱mm بیرون از تیوب کوارتز قرار گرفته‌اند. گاز آرگون درون شکاف تیوب کوارتز قرار گرفته است.

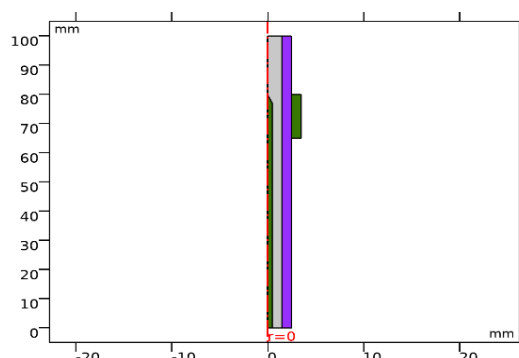
¹ dielectric-free electrode

² dielectric-free electrode

³ Non thermal atmospheric pressure plasma jet



شکل ۲. هندسه پیکربندی جت پلاسما با الکتروود حلقوی



شکل ۱. هندسه پیکربندی جت پلاسما سوزنی

۲.۲. آنالیز و معادلات حاکم بر شبیه‌سازی تخلیه

در این پژوهش از ماژول پلاسما نرم افزار کامسول که شامل فیزیک‌های الکترواستاتیک، گونه‌های سنگین و دریافت دیفیوژن می‌باشد استفاده شده است. با استفاده از این ماژول می‌توان شبیه‌سازی‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی انجام داد. با توجه به این امر شبیه‌سازی جت‌های پلاسما با پیکربندی‌های متفاوت امکان پذیر است. رابط‌های فیزیک شامل ابزارهای لازم برای مدل سازی تخلیه‌های پلاسما است که در این شبیه‌سازی با استفاده از معادله بولتزمن و تقریب دو ترم آن حل می‌شود [۷]. خصوصیات انتقال الکترون و ضرایب منبع از داده‌های سطح مقطع برخورد الکترون‌ها محاسبه می‌شود. چگالی الکترون و انرژی میانگین الکترون از حل جفت معادله دریافت دیفیوژن به دست می‌آید [۴].

(۱)

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla[-n_e(\mu_e E) - D_e \nabla n_e] = R_e$$

(۲)

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla[-n_e(\mu_e E) - D_e \nabla n_e] + E \Gamma_e = R_e$$

(۳)

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

در اینجا چگالی الکترون و n_e چگالی انرژی الکترون و μ_e تحرک پذیری الکترون و μ_e تحرک پذیری انرژی الکترون، E میدان الکتریکی، R_e بیانگر نرخ الکترون‌ها و R_e انرژی از دست رفته یا به وجود آمده در طی برخوردهای غیرالاستیک می‌باشد. D_e ضریب انتشار الکترون و D_e نفوذپذیری انرژی الکترون‌ها و Γ_e شار الکترون‌ها می‌باشد. ضرایب منبع در معادلات بالا با استفاده از شیمی پلاسما مشخص می‌شوند.

(۴)

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_e$$

در اینجا x_j کسر مولی گونه‌های هدف در واکنش z ام k_j ضریب نرخ برای واکنش z ام و N_n چگالی کل گونه‌های خنثی است. اتلاف انرژی الکترون از مجموع اتلاف انرژی برخوردی در تمام واکنش‌ها به دست می‌آید و به صورت زیر بیان می‌شود:

(۵)

$$R_e = \sum_{j=1}^P x_j k_j N_n n_e \Delta \varepsilon_j$$

در اینجا $\Delta \varepsilon_j$ اتلاف انرژی واکنش z ام می‌باشد. ضرایب نرخ با استفاده از داده‌های سطح مقطع طبق رابطه انتگرالی زیر محاسبه می‌شوند:

$$(۶) \quad k_k = \gamma \int_0^\infty \varepsilon \delta_k(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon$$

$$(۷) \quad \gamma = (2q/m_e)^2$$

در اینجا m_e جرم الکترون، ε انرژی (ژول)، δ_k ، سطح مقطع برخوردی و f تابع توزیع انرژی الکترون می‌باشد. در پژوهش ما، تابع توزیع انرژی الکترون با استفاده از معادلات ماکسول حل شده است. در پلاسماهای تخلیه سد دی الکتریک، درجه یونیزاسیون زیاد بوده در نتیجه برخوردهای بین الکترون و الکترون توزیع را به سمت توزیع ماکسولی سوق می‌دهد و تابع توزیع انرژی الکترون می‌تواند با حل معادله بولتزمن محاسبه شود [۷]. تحرک پذیری انرژی، نفوذ الکترون و نفوذ انرژی با استفاده از تحرک پذیری الکترون طبق رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$(۸) \quad D_e = \mu_e T_e, \mu_e = (5/3)\mu_e, D_\varepsilon = \mu_\varepsilon T_e$$

در اینجا T_e دمای الکترون می‌باشد. میانگین انرژی الکترون و دمای الکترون به ترتیب با استفاده از معادلات ۹ و ۱۰ به دست می‌آید:

$$(۹) \quad \bar{\varepsilon} = \frac{n_\varepsilon}{n_e}$$

$$(۱۰) \quad T_e = \left(\frac{2}{3}\right)\bar{\varepsilon}$$

۳.۲. شرایط مرزی

الکترون‌ها در چند میانگین مسافت آزاد به دلیل حرکت‌های تصادفی و برخورد به دیواره از بین می‌روند و همچنین الکترون‌ها با توجه به اثرات انتشار ثانویه تولید می‌شوند. در نتیجه شرایط مرزی برای شار الکترون‌ها طبق معادله ۱۱ حاصل می‌شود.

$$(۱۱) \quad -n\Gamma_e = \left((1/2)v_e\right)n_e - \sum_P \gamma_P (\Gamma_P n)$$

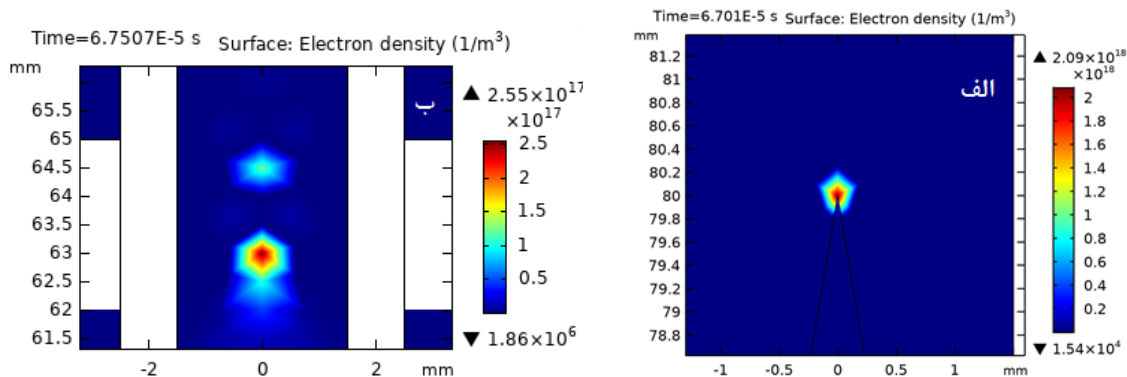
و شار انرژی الکترون‌ها از رابطه ۱۲ به دست می‌آید:

$$(۱۲) \quad -n\Gamma_\varepsilon = \left((5/6)v_e\right)n_\varepsilon - \sum_P \varepsilon_P \gamma_P (\Gamma_P n)$$

در اینجا v_e فرکانس برخورد می‌باشد، γ_P ضریب تابش ثانویه و ε_P میانگین انرژی الکترون‌های ثانویه می‌باشد. در دیواره‌ها، آرگون برانگیخته به حالت پایه برگشته و به اتم آرگون پایدار تبدیل می‌شود. یون‌های آرگون در طی تابش ثانویه الکترون‌ها به آرگون خنثی تبدیل می‌شوند. شبیه‌سازی تخلیه پیکربندی الکترون سوزنی با بررسی‌های وابسته به زمان انجام شده است. با توجه به این موضوع که نرم افزار کامسول از روش المان محدود برای حل مسائل استفاده می‌کند مش مناسب برای هندسه در نظر گرفته شد.

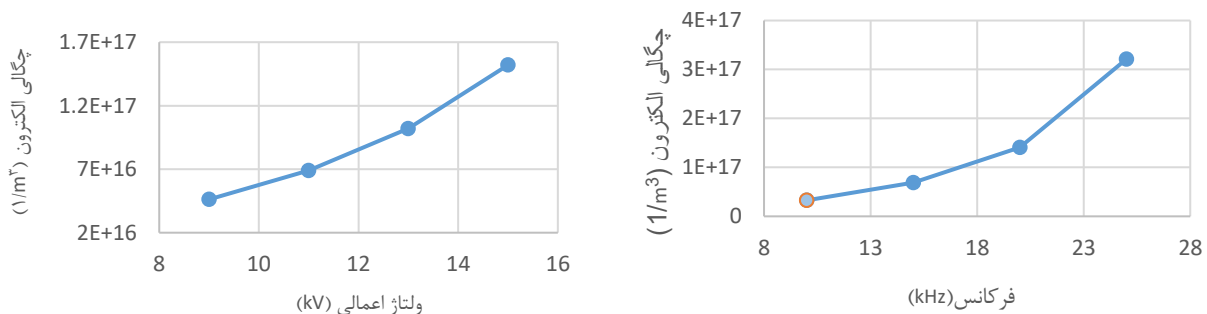
۳. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی

در مقادیر اولیه شبیه‌سازی، ولتاژ اعمالی در مقدار ۱۱ kV ثابت نگه داشته شده است و فرکانس اعمالی بین ۱۰-۲۵ kHz تغییر کرده است. اثرات تغییر فرکانس اعمالی بر روی پارامترهای پلازما مانند چگالی الکترون، دمای الکترون و پتانسیل الکتریکی بر روی هر دو پیکربندی مورد مطالعه قرار گرفت. توزیع مکانی چگالی الکترون در جت سوزنی و جت پلازما حلقوی در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ الف مشخص است چگالی الکترون جت سوزنی در نوک سوزن پلازما و چگالی الکترون جت حلقوی در بین الکترودها بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشد (شکل ۳ ب).



شکل ۳. الف) توزیع مکانی چگالی الکترون در فرکانس ۱۵ kHz و ولتاژ اعمالی ۱۱ kV در جت پلازما سوزنی، ب) توزیع مکانی چگالی الکترون در فرکانس ۱۵ kHz و ولتاژ اعمالی ۱۱ kV در پیکربندی الکترودها حلقوی

نمودار ۱ تغییرات چگالی الکترون در ولتاژ ثابت ۱۱ kV و فرکانس‌های متغیر بین ۱۰-۲۵ kHz را در جت پلازما سوزنی نشان می‌دهد. چگالی الکترون با توجه به نمودار با افزایش فرکانس مشخصاً افزایش می‌یابد، علت این امر این است که الکترون‌ها با افزایش فرکانس در مدت زمان کمتری جابه‌جا می‌شوند، در نتیجه تجمع بار باعث افزایش توان مصرفی پلازما جت می‌شود. این افزایش انرژی توسط الکترون‌های آزاد جذب می‌شود. جذب انرژی توسط الکترون‌ها منجر به افزایش یونیزاسیون ثانویه و پدیده بهمن الکترونی و متعاقب آن افزایش چگالی الکترون می‌شود.

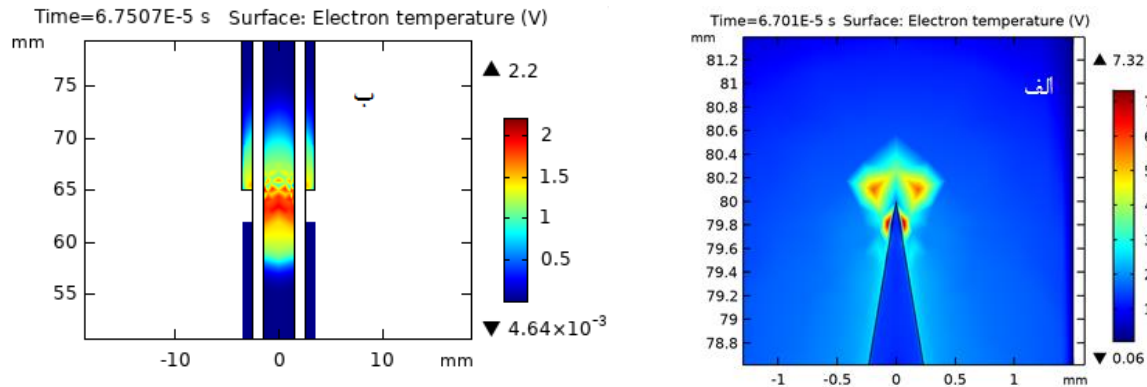


نمودار ۱. چگالی الکترون جت سوزنی در فرکانس‌های مختلف در ولتاژ ۱۱ kV. نمودار ۲. چگالی الکترون جت سوزنی در ولتاژهای مختلف در فرکانس ۱۵ kHz

رابطه‌ی بین چگالی الکترون و ولتاژ اعمالی در جت پلازما سوزنی در نمودار ۲ نشان داده شده است. در این نمودار فرکانس اعمالی در ۱۵ kHz ثابت نگه‌داشته شده است و اثر تغییرات ولتاژ بر روی چگالی الکترون نشان داده شده است. نمودار ۲ نشان می‌دهد که با افزایش

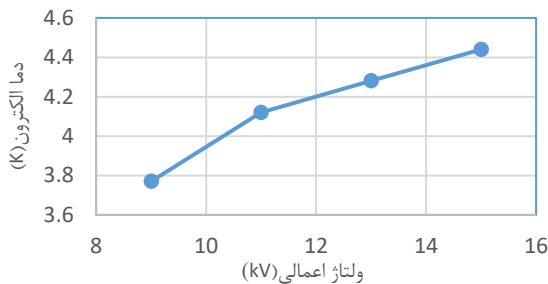
ولتاژ، چگالی الکترون نیز افزایش یافته است. با افزایش ولتاژ، انرژی الکترون‌ها افزایش یافته و به دنبال آن اتم‌های آرگون بیشتر یونیزه شده و چگالی الکترون‌ها نیز افزایش می‌یابد.

شکل ۴ توزیع مکانی دمای الکترون در لحظه شکست گاز آرگون در فرکانس ۱۵ kHz و ولتاژ اعمالی ۱۱ kV را نشان می‌دهد. شکل ۴.الف در نزدیکی نوک الکتروود سوزنی مقدار دمای الکترون به بیشترین مقدار خود در جت پلاسمای سوزنی رسیده است و در شکل ۴.ب دمای الکترون‌ها ما بین دو الکتروود بیشترین مقدار خود را در جت پلاسمای حلقوی داراست.

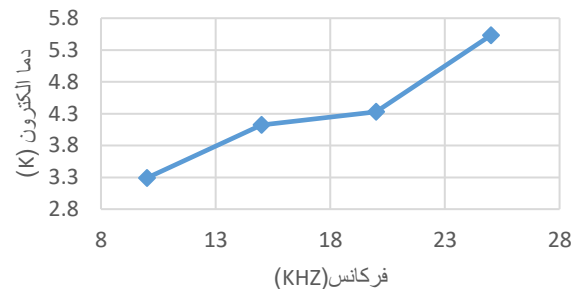


شکل ۴.الف) توزیع مکانی دمای الکترون در فرکانس ۱۵ kHz و ولتاژ اعمالی ۱۱ kV در جت پلاسمای سوزنی و ب) توزیع مکانی دمای الکترون در فرکانس ۱۵ و ولتاژ اعمالی ۱۱ kV در پیکربندی الکتروود حلقوی

نمودار ۳ رابطه‌ی بین دمای الکترون و فرکانس اعمالی را در جت پلاسمای سوزنی نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، دمای الکترون با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. دمای الکترون تابعی از میانگین انرژی الکترون‌ها است و انرژی الکترون به چگالی الکترون و چگالی انرژی الکترون وابسته است. همانطور که نمودار ۱ نشان می‌دهد با افزایش فرکانس، چگالی الکترون افزایش می‌یابد که خود به دلیل افزایش انرژی الکترون‌ها در نتیجه یونیزاسیون بیشتر اتم‌های آرگون است. این افزایش یونیزاسیون منجر به افزایش برخورد بین الکترون‌ها و افزایش انرژی هر یک از الکترون‌های برخوردی می‌شود. از آنجایی که دما تابعی از انرژی الکترون‌ها می‌باشد با افزایش انرژی الکترون‌ها، دمای الکترون افزایش می‌یابد.



نمودار ۴. دمای الکترون در ولتاژهای مختلف در فرکانس ۱۵ kHz



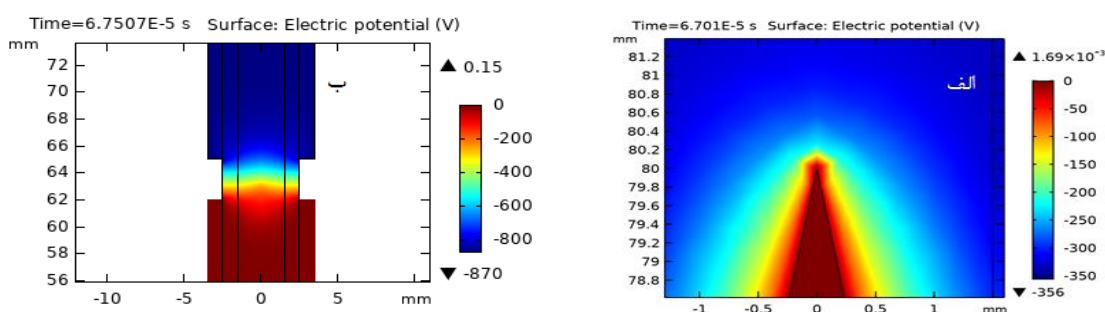
نمودار ۳. دمای الکترون در فرکانس‌های مختلف در ولتاژ ۱۱ kV

نمودار ۴ رابطه‌ی بین دمای الکترون و ولتاژ اعمالی در فرکانس ثابت ۱۵ kHz را در جت پلاسمای سوزنی نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار مشاهده می‌شود که دمای الکترون با افزایش ولتاژ افزایش یافته است. در ولتاژهای بالای اعمال شده، الکترون‌های آزاد انرژی بیشتری کسب

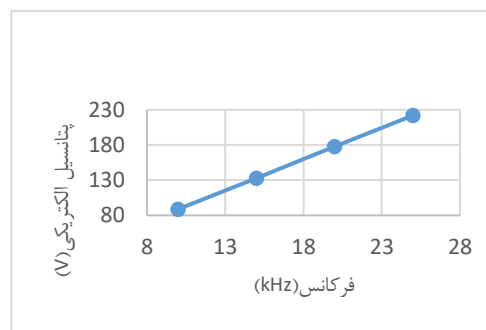
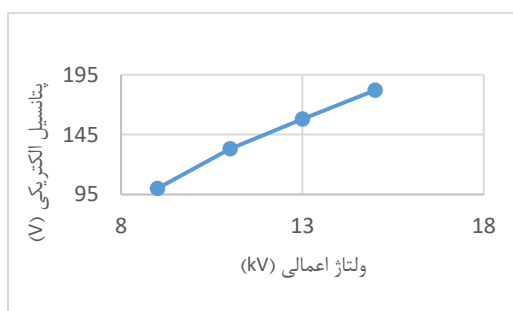
می‌کنند و موجب افزایش یونیزاسیون یا برانگیختگی اتم‌های آرگون می‌شوند. با افزایش برخورد‌ها، انرژی الکترون‌ها و در نتیجه دمای آن‌ها افزایش می‌یابد.

شکل ۵ توزیع مکانی پتانسیل الکتریکی در فرکانس ۱۵ kHz و ولتاژ اعمالی ۱۰ kV را نشان می‌دهد. پتانسیل الکتریکی در زمان ۱/۲۸۷۵e۷ ثانیه در الکتروود مرکزی بیشترین مقدار خود را دارد.

نمودار ۵ و ۶ رابطه بین فرکانس و ولتاژ اعمالی را با پتانسیل الکتریکی در جت سوزنی نشان می‌دهد. از آنجایی که ولتاژ اعمالی به الکتروودها به صورت سینوسی بوده و برابر است با $V_{max} \times \sin(\omega_0 \times t)$ در نتیجه با افزایش بیشینه ولتاژ و فرکانس اعمالی پتانسیل الکتریکی افزایش می‌یابد.



شکل ۵. الف) توزیع مکانی پتانسیل الکتریکی در فرکانس ۱۵ kHz و ولتاژ اعمالی ۱۱ kV در جت پلاسما سوزنی و ب) توزیع مکانی پتانسیل الکتریکی در فرکانس ۱۵ kHz و ولتاژ اعمالی ۱۰ kV در پیکربندی الکتروود حلقوی



نمودار ۶. پتانسیل الکتریکی در ولتاژهای مختلف در فرکانس ۱۵ kHz

نمودار ۵. پتانسیل الکتریکی در فرکانس‌های مختلف در ولتاژ ۱۱ kV

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبیه‌سازی دو بعدی تخلیه سد دی الکتریک از نوع جت پلاسما، با استفاده از نرم افزار کامسول صورت گرفت. با تغییر هر یک از پارامترهای الکتریکی دستگاه مانند فرکانس و ولتاژ اعمالی، اثر آن‌ها بر روی پارامترهای پلاسما بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی به ما نشان می‌دهد که در ولتاژ ثابت ۱۱ kV و فرکانس‌های اعمالی متفاوت، چگالی الکترون همراه با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد (نمودار ۱)، در فرکانس ثابت ۱۵ kHz و ولتاژهای اعمالی متفاوت، با افزایش ولتاژ چگالی الکترون افزایش می‌یابد (نمودار ۲). همچنین مشاهده شد که دمای الکترون با افزایش ولتاژ در فرکانس ثابت ۱۵ kHz و با افزایش فرکانس در ولتاژ ثابت ۱۱ kV، افزایش می‌یابد (نمودار ۳ و ۴). یکی



دیگر از پارامترهای پلاسما پتانسیل الکتریکی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پتانسیل الکتریکی با افزایش فرکانس در ولتاژ ثابت ۱۱ kV و افزایش ولتاژ اعمالی در فرکانس ثابت ۱۵ kHz، افزایش می‌یابد (نمودار ۵ و ۶). همچنین مقایسه دو پیکربندی نشان می‌دهد چگالی الکترون و دما الکترون در جت پلاسما سوزنی نسبت به جت پلاسما حلقوی مقدار بیشتری دارد زیرا در ساختار سوزنی با حذف الکتروود حلقوی و جایگزین کردن آن با الکتروود سوزنی در مرکز تیوب کوارتز، میدان الکتریکی اعمال شده به پلاسما افزایش یافته و تخلیه قوی‌تری در داخل تیوب داریم که منجر به تولید بیشتر اجزای واکنش‌پذیر می‌شود.

مراجع

1. J. Park, I. Henins, H. W. Herrmann, G. S. Selwyn, and R. F. Hicks, J. Appl. Phys. 89, 20 (2001).
2. B. Eliasson and U. Kogelschatz, IEEE Trans. Plasma Sci. 19, 1063 (1991).
3. A. Schutze, J. Y. Jeong, S. E. Babayan, J. Park, G. S. Selwyn, and R. F. Hicks, IEEE Trans. Plasma Sci. 26, 1685 (1998).
4. M. A. Lieberman, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (Wiley, New York, 1994) p. 135
5. X. P. Lu and M. Laroussi, Journal of Applied Physics 100, 063302 (2006).
6. C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, and P. Leprince, Spectraclinica Acta Part B: Atomic Spectroscopy **61**, 2(2006).
7. G. J. M. Hagelaar and L. C. Pitchford, Plasma Sources Science and Technology **14**, 722 (2005).