

محاسبه‌ی دما و چگالی پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک با استفاده از کامسول

ابوالفضل مازندرانی^۱، شروین گودرزی*^۱، حسن غفوری فرد^۲، علی اسکندری^۳، شیوا شه‌شناس^۴

۱. پژوهشکده‌ی پلاسمای و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران-ایران

۲. دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران - ایران

۳. پژوهشکده‌ی کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۴۹۸-۳۱۴۸۵، کرج-ایران

۴. گروه علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، صندوق پستی: ۵۳۸۱۶۳۷۱۸۱، شبستر - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۹/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۲/۱۰

چکیده: شبیه‌سازی یک بعدی پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک صفحه‌ای با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شد. تأثیر ضخامت و ضریب دی‌الکتریک، ولتاژ و بسامد اعمال‌شده به الکترودها بر تغییرات دما و چگالی الکترون مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه‌های به دست آمده نشان داد که افزایش ولتاژ، بسامد، ضریب گسیل الکترون ثانویه‌ی الکتروود و ضریب دی‌الکتریک باعث افزایش چگالی الکترون می‌شود درحالی که افزایش ضخامت دی‌الکتریک، چگالی الکترون را کاهش می‌دهد. افزایش ولتاژ از ۵ تا ۵۰ kV، سبب افزایش چگالی الکترون از 4×10^{17} به $3.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ شد، با افزایش بسامد از ۲۰ تا ۵۰ kHz، چگالی الکترون از حدود 1.96×10^{17} تا حدود $3.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ افزایش یافت. در این شبیه‌سازی‌ها مشاهده‌شد که افزایش ولتاژ، بسامد و ضخامت دی‌الکتریک باعث افزایش دمای الکترون می‌شود درحالی که افزایش ضریب دی‌الکتریک و ضریب گسیل الکترون ثانویه‌ی الکتروود، اثرهای متفاوتی دارند. از نتیجه‌های به دست آمده مشخص شد که بدون نیاز به اعمال ولتاژ و بسامد بالا؛ با تغییر جنس و ابعاد دی‌الکتریک و جنس الکترودها می‌توان چگالی الکترون را تا مرتبه‌ی 10^{18} m^{-3} افزایش داد.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی، چگالی الکترون، دمای الکترون، پلاسمای کامسول

Calculation of temperature and density for dielectric- barrier discharge (DBD) plasma using COMSOL

A. Mazandarani¹, Sh. Goudarzi*¹, H. Ghafoorifard², A. Eskandari³, Sh. Shahshenas⁴

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran, Iran

2. Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran

3. Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 31485-498, Karaj - Iran

4. Department of Basic Science, Azad Islamic University of Shabestar, P.O.Box: 5381637181, Shabestar - Iran

Abstract: In this paper, a one-dimensional simulation for discus plate dielectric barrier discharge (DBD) is done by COMSOL Multiphysics software. The effects of different parameters such as voltage, frequency, dielectric thickness, dielectric constant and electrode's material on the temperature and density of electrons are investigated, it is found that secondary electron emission coefficient of the electrode, dielectric constant and the thickness of dielectric have a direct impact on the density of electron. The voltage increment from 5 to 50 kV, causes electron density growing from $4 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ to $3.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$. Based on this study, electron density could reach up to the orders of 10^{18} m^{-3} by optimizing material and dimensions of dielectric and electrodes without applying high voltage and frequency which results a significant lower production cost.

Keywords: Simulation, Electron density, Electron temperature, Plasma, COMSOL

*Email: sgoudarzi@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

دستگاه پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک^۱ (DBD)، متشکل از دو الکتروود است؛ سطح یکی از این الکتروودها یا هردوی آنها از یک لایه‌ی دی‌الکتریک پوشیده شده است. با اعمال ولتاژ متناوب به الکتروودها، بارهای الکتریکی بر روی سطح دی‌الکتریک تولید می‌شوند. به دلیل محدودیت حرکت بارهای روی دی‌الکتریک، در هر نقطه از دی‌الکتریک که تجمع بار ایجاد شود تخلیه‌ی الکتریکی رخ داده و جرقه‌هایی در فضای خالی بین دو الکتروود شکل می‌گیرد. در واقع دی‌الکتریک دو نقش کلیدی در عملیات تخلیه دارد: از طریق ریزتخلیه‌ها^۲ مقدار بار انتقال یافته از یک سطح الکتروود به سطح دیگر را محدود، و همچنین این ریزتخلیه‌ها را در کل سطح الکتروود توزیع می‌کند. پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک یکنواخت نبوده و شامل انبوهی ریزتخلیه‌هایی با عمر حدوداً ۱۰ ns است که در فضای بین الکتروودها پراکنده می‌شوند. ثابت دی‌الکتریک و ضخامت آن می‌تواند مقدار جریانی را که از دی‌الکتریک می‌گذرد تعیین کند. برای انتقال جریان در فاصله‌ی تخلیه، به علت شکست در گاز، میدان الکتریکی بین دو صفحه‌ی تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک باید به اندازه‌ی کافی بالا باشد. وجود دی‌الکتریک، بزرگی جریان، ظرفیت خازن دستگاه و حجم بار ذخیره شده را تغییر می‌دهد [۱-۳].

تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک که در سال ۱۸۵۷ توسط ارنست زیمنس^۳ اختراع شد، در طول سال‌ها به عنوان منبع تولید اوزون و نیتروژن اکسید به کار گرفته شده است. این سیستم به دلیل کاربردهای گسترده در کشاورزی، پردازش سطح‌ها، صنایع غذایی، پزشکی، محیط زیست، تولید اوزون، دندانپزشکی و فناوری نانو بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از جمله‌ی مزیت‌های دستگاه تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک می‌توان به بازده بالا، مصرف انرژی بسیار پایین، سادگی کار، کوچک و قابل حمل بودن، قیمت پایین و توانایی کار در فشارهای اتمسفری اشاره نمود. چگالی و دمای الکترون و میزان همگن بودن پلاσμα در سراسر فضای بین الکتروودها از عامل‌های تعیین‌کننده‌ی نحوه‌ی عملکرد بهینه‌ی سیستم هستند. ولتاژ و بسامد منبع تغذیه، جنس الکتروودها، جنس و ضخامت دی‌الکتریک تأثیر زیادی بر عملکرد دستگاه تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک دارند.

اندازه‌گیری چگالی و دمای الکترون و بهینه‌سازی پارامترهای تعیین‌کننده‌ی آنها به صورت تجربی بسیار دشوار و پرهزینه (عملاً غیرمقرون به صرفه) است و استفاده از شبیه‌سازی به مراتب ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر خواهد بود [۱-۵]. مطالعه‌های متعددی برای شبیه‌سازی پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک انجام شده است. گولابوسکی و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۲ و ژانگ هونگ یان و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۷ پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک صفحه‌ای را برای گاز هلیوم با مدل سیال شبیه‌سازی عددی نموده و در شرایط ثابت پارامترهای پلاσμα را به دست آوردند. پترویک و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۹ پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک استوانه‌ای را برای گاز هلیوم به همراه ناخالصی نیتروژن با مدل سیال دو بعدی شبیه‌سازی کرده و پارامترهای پلاσμα را به دست آوردند. پال و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۹ با شبیه‌سازی عددی پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک استوانه‌ای برای گاز آرگون نمودار جریان-ولتاژ را به دست آوردند. اییدات و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۳ پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک صفحه‌ای را برای گاز هلیوم در محیط نرم‌افزار کامسول به صورت یک‌بعدی شبیه‌سازی کرده و تأثیر ضریب دی‌الکتریک و فاصله‌ی بین الکتروودها را بر روی نمودار لیسازور به دست آوردند [۱۰]. پان و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۶ با شبیه‌سازی عددی پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک صفحه‌ای با مدل سیال برای گاز CH_۴ در شرایط ثابت پارامترهای پلاσμα را به دست آوردند. گادکاری و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۷ پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک استوانه‌ای هم‌محور را برای گاز هلیوم در محیط نرم‌افزار کامسول به صورت دوبعدی شبیه‌سازی کردند؛ در این شبیه‌سازی تمام پارامترها به جز پتانسیل و بسامد اعمال شده به الکتروودها، ثابت در نظر گرفته شد. صحبت‌زاده و سلطانی [۱۳] در سال ۲۰۱۸ پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک صفحه‌ای را برای ترکیب گاز نیتروژن، اکسیژن و بخار آب در محیط نرم‌افزار کامسول به صورت یک‌بعدی شبیه‌سازی کرده و در شرایط ثابت پارامترهای پلاσμα را به دست آوردند. در مقاله‌ی حاضر، پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک صفحه‌ای برای گاز آرگون در محیط نرم‌افزار کامسول به صورت یک‌بعدی شبیه‌سازی و اثر ولتاژ و بسامد اعمال شده به الکتروودها، ضخامت و ضریب دی‌الکتریک و ضریب گسیل الکترون ثانویه‌ی الکتروود بر چگالی و دمای الکترون بررسی شده است.

1. Dielectric-barrier discharge
2. Microdischarges
3. Ernst Werner von Siemens

۲. شبیه‌سازی

۱.۲ هندسه

در این مقاله پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکترونیک، در فشار یک اتمسفر برای گاز آرگون به صورت یک‌بعدی شبیه‌سازی شده است. در شکل ۱ هندسه یک‌بعدی برای شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار کامسول مشخص شده است. شکل ۱ طرح‌واره‌ی دستگاه تخلیه‌ی سد دی‌الکترونیک را نیز نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی، دی‌الکترونیک بر روی یکی از الکترودها قرار گرفته و الکترودها به صورت صفحه‌های دایره‌ای با قطر ۱۰ cm و ضخامت ۱ cm در نظر گرفته شده‌اند. فاصله‌ی بین الکترودها دی‌الکترونیک (فضای خالی برای تشکیل پلازما) در تمام قسمت‌ها ثابت و ۵ mm در نظر گرفته شده است. هم‌چنین محدوده‌ی ولتاژ سینوسی اعمال شده به الکترودها ۵ تا ۵۰ kV، بسامد ۱۰ تا ۵۰ kHz، ضریب گذرده‌ی نسبی دی‌الکترونیک بین ۳ تا ۹، ضخامت دی‌الکترونیک بین ۰/۵ تا ۲ mm و ضریب گسیل الکترون ثانویه‌ی الکترودها بین ۰/۵ تا ۲/۵ در نظر گرفته شده و تأثیر این تغییرها بر چگالی و دمای الکترون مورد بررسی قرار گرفته است.

۲.۲ معادله‌های حاکم

نرم‌افزار کامسول با حل معادله‌های نیروی محرکه و انتشار، چگالی و انرژی میانگین الکترون را محاسبه می‌کند. معادله‌های پیوستگی و شار الکترون به ترتیب زیر هستند:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{I}_e = R_e - (\vec{u} \cdot \nabla) n_e \quad (1)$$

$$\vec{I}_e = -(\vec{\mu}_e \cdot \vec{E}) n_e - \vec{D}_e \cdot \nabla n_e \quad (2)$$

در این جا n_e چگالی الکترون، D_e ضریب پخش الکترون، \vec{I}_e بردار شار الکترون، \vec{u} سرعت میانگین سیال ذره‌ها و R_e نرخ تولید الکترون هستند.

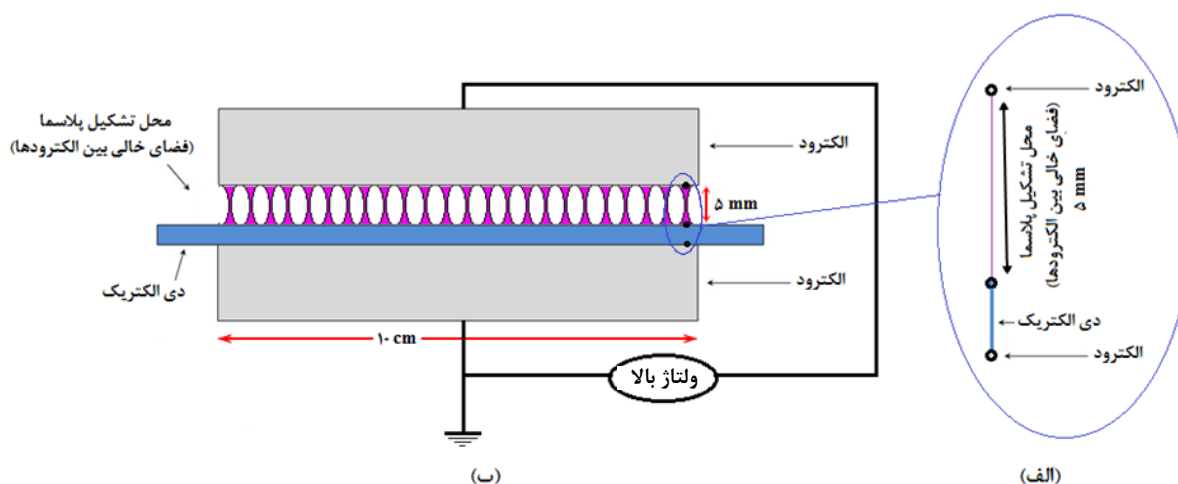
شار الکترون شامل دو جمله است: یک جمله با میدان الکترونیکی و جمله‌ی دیگر به دلیل شیب چگالی به وجود می‌آید. چگالی انرژی الکترون از معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_e) + \nabla \cdot \vec{I}_e + \vec{E} \cdot \vec{I}_e = R_e - (\vec{u} \cdot \nabla) n_e \quad (3)$$

در این جا، جمله‌ی $\vec{E} \cdot \vec{I}_e$ نشان‌دهنده‌ی انرژی الکترون است که از طریق میدان الکترونیکی کسب می‌کند [۶، ۹].

۳. نتیجه‌ها

در این جا یکی از الکترودها زمین در نظر گرفته شده و به الکترودهای دیگر یک ولتاژ سینوسی اعمال می‌شود. در شبیه‌سازی انجام شده با تغییر پارامترهای ولتاژ، بسامد، ضریب دی‌الکترونیک، ضخامت دی‌الکترونیک و جنس الکترودها، مقدار چگالی و دمای الکترون (که در ادامه‌ی مقاله چگالی و دما نامیده می‌شوند) محاسبه و نتیجه‌ها با یک‌دیگر مقایسه شده‌اند. دما و چگالی الکترون در فضای تخلیه‌ی سد دی‌الکترونیک (ناحیه‌ی تشکیل پلازما) میانگین‌گیری شده و تغییرات آن‌ها با زمان نشان داده شده است.



شکل ۱. الف) هندسه‌ی یک‌بعدی برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول و ب) طرح‌واره‌ی دستگاه تخلیه‌ی سد دی‌الکترونیک.

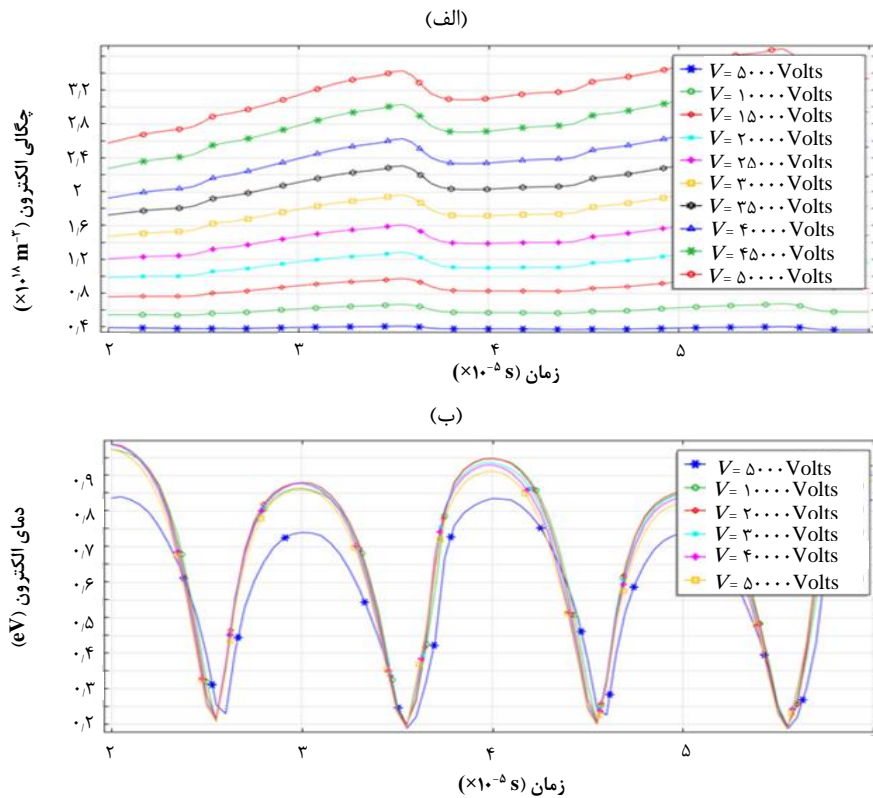
۱.۳ اثر ولتاژ

اعمال ولتاژ به الکترودها موجب تولید میدان الکتريکی در فضای بين الکترودها می‌شود. افزایش ولتاژ منجر به افزایش این میدان شده و تأثیر زیادی بر تخلیه خواهد داشت. اثر ولتاژ بر چگالی و دما در محدوده‌ی ولتاژ ۵ تا ۵۰ kV مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور شبیه‌سازی در شرایط ثابت بسامد ۵۰ kHz، ضریب دی‌الکتريک ۵، ضخامت عایق ۱ mm و ضریب گسیل الکترون ثانویه‌ی ۱/۵، انجام شد. شکل ۲، تغییرات چگالی و دما برای ولتاژهای مختلف در طول دو دوره‌ی تناوب را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۲ الف مشاهده می‌شود، با تغییر ولتاژ از ۵ تا ۵۰ kV، چگالی از حدود 4×10^{17} تا $3.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان افزایش میدان الکتريکی در فضای بين الکترودها دانست. شکل ۲، دمای الکترون را نیز برای ولتاژهای ذکر شده نشان می‌دهد. براساس داده‌های به‌دست آمده از شکل ۲ ب، دمای الکترون در این شبیه‌سازی برای تمام ولتاژها زیر ۱ eV بوده و در محدوده‌ی ولتاژهای بالاتر از ۱۰ kV تغییرهای چندانی در دمای الکترون مشاهده نمی‌شود.

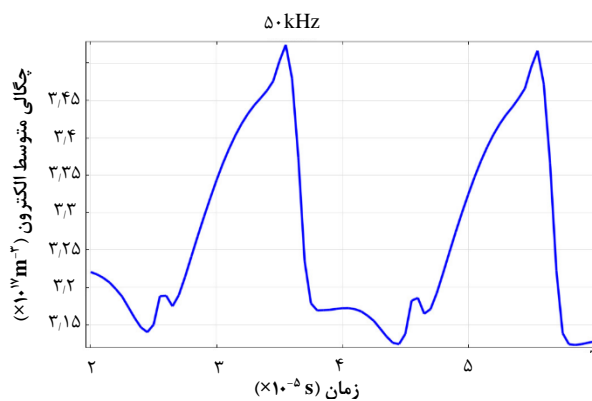
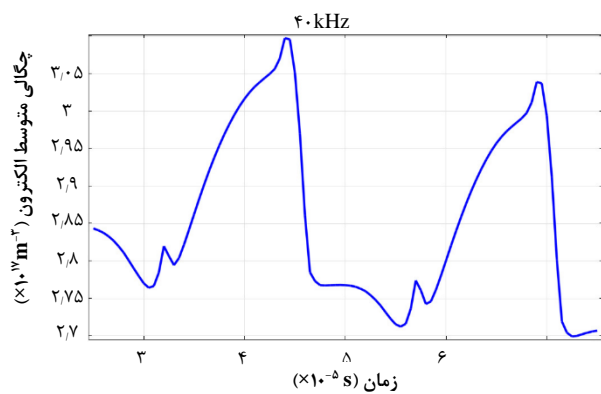
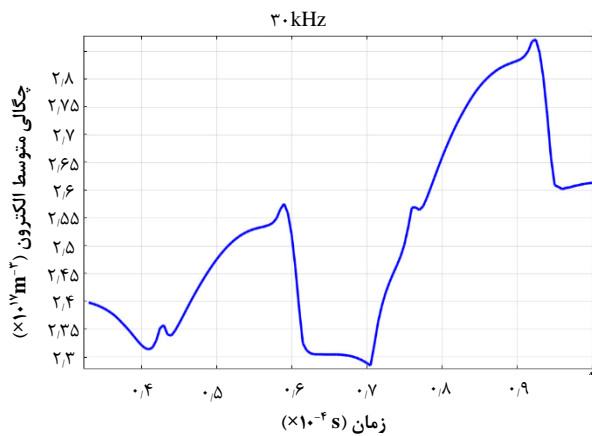
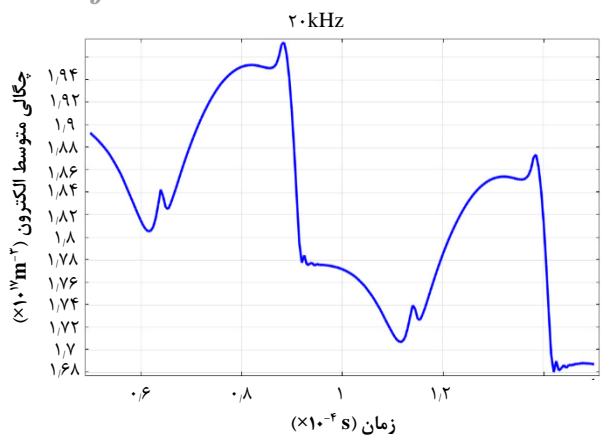
۲.۳ اثر بسامد

ولتاژ اعمال شده به دستگاه دارای شکل موج سینوسی است که می‌تواند گستره‌ای از بسامدها را در بر گیرد. بسامد می‌تواند

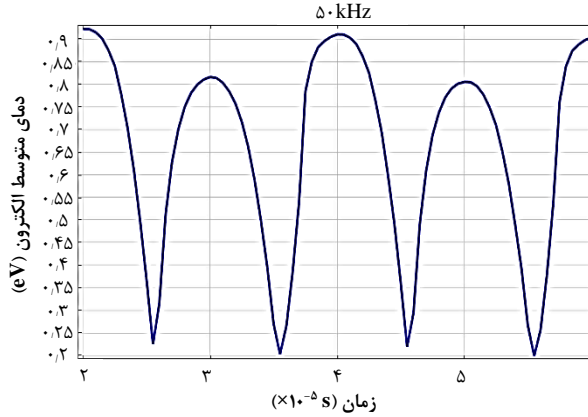
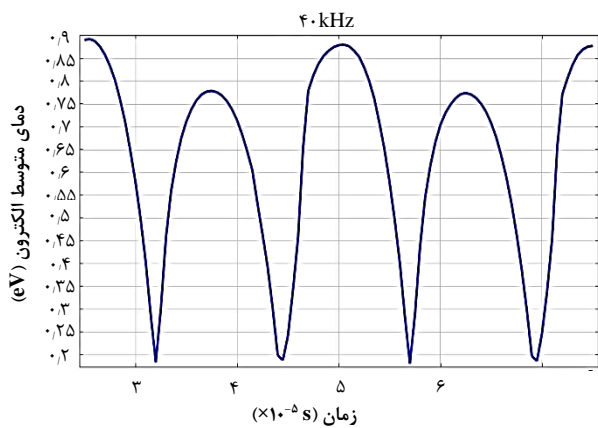
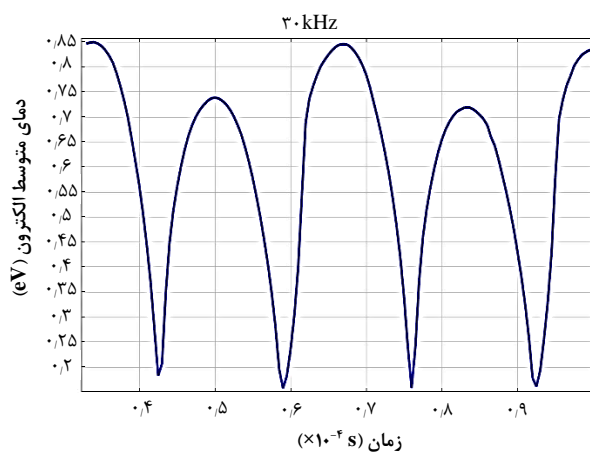
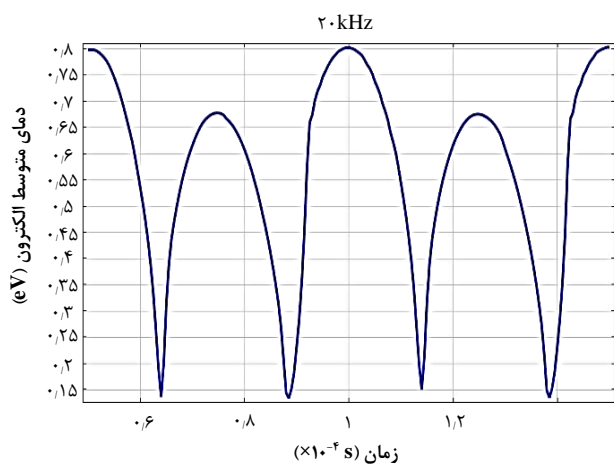
همانند ولتاژ بر تخلیه و مقدار دما و چگالی تأثیر بگذارد. اثر بسامد بر دما و چگالی، با در نظر گرفتن ولتاژ ثابت ۱۰ kV، ضریب دی‌الکتريک ۳، ضخامت دی‌الکتريک ۱ mm و ضریب گسیل الکترون ثانویه‌ی ۱/۵، در ۴ بسامد از ۲۰ تا ۵۰ kHz، در دو دوره‌ی تناوب متوالی مورد بررسی قرار گرفت. هنگامی‌که جهت ولتاژ بين دو صفحه تغییر کند، الکترون‌هایی که هنوز به صفحه‌ی مثبت نرسیده‌اند به اصطلاح در پلازما به دام می‌افتند. در شکل ۳ تغییرات چگالی برای بسامدهای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ kHz نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش بسامد، چگالی الکترون افزایش می‌یابد زیرا با بالا رفتن بسامد، سرعت تغییر جهت ولتاژ بين دو صفحه افزایش می‌یابد و در نتیجه تعداد الکترون‌هایی که قادر خواهند شد به صفحه‌ی مثبت برسند کاهش می‌یابد و الکترون‌های بیش‌تری در درون پلازما به دام می‌افتند و چگالی پلازما بالاتر می‌رود. شکل ۴ تغییرات دمای میانگین الکترون در بسامدهای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ kHz را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش بسامد منجر به افزایش دمای الکترون می‌شود، زیرا افزایش سرعت تغییر جهت ولتاژ سبب افزایش سرعت نوسان‌های ذره‌های باردار و در نتیجه انرژی جنبشی (دمای) آن‌ها می‌شود.



شکل ۲. تغییرات (الف) چگالی و (ب) دما در طول دو دوره‌ی تناوب و در ولتاژهای مختلف.



شکل ۳. تغییرات چگالی میانگین الکترون در طول دو دوره‌ی تناوب در بسامدهای مختلف.



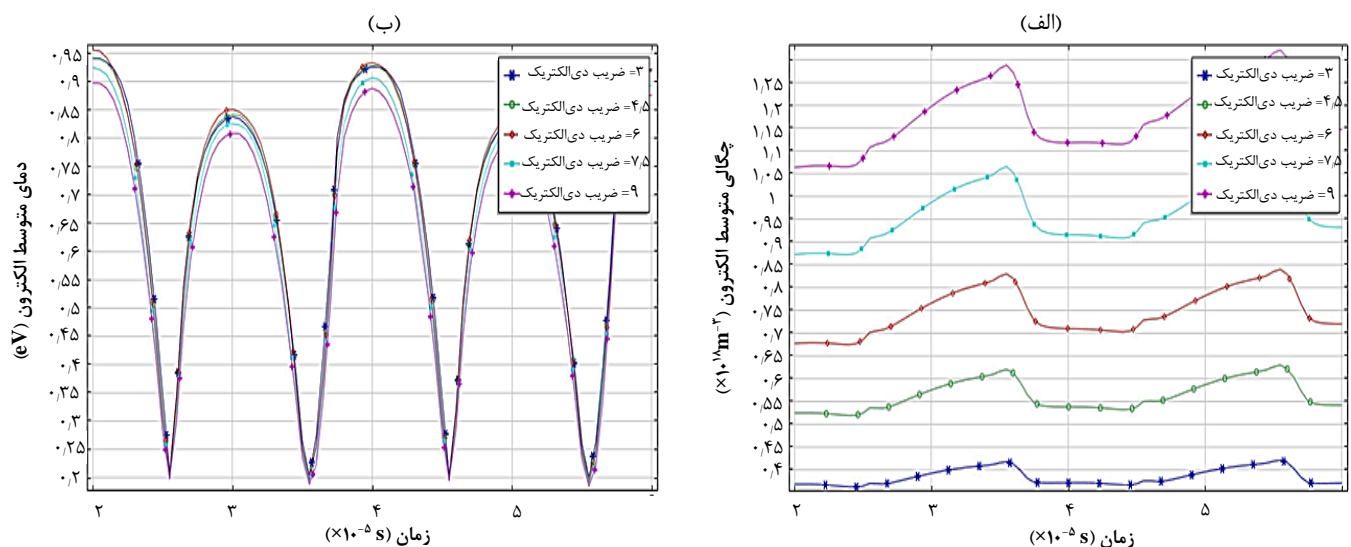
شکل ۴. تغییرات دمای متوسط الکترون در طول دو دوره‌ی تناوب در بسامدهای مختلف.

۳.۲ اثر ضریب دی‌الکتریک

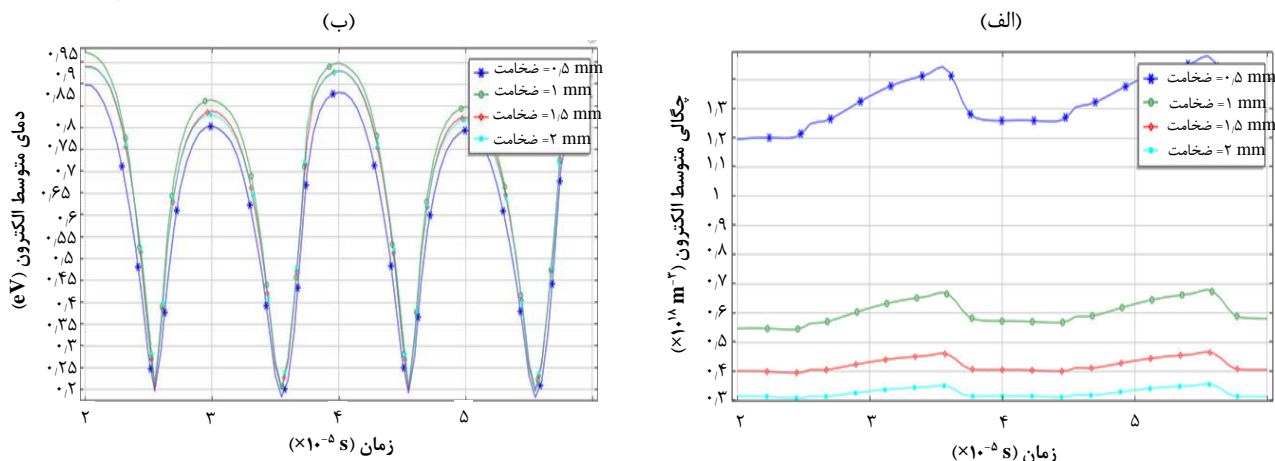
دی‌الکتریک نقش بسیار مهمی در ذخیره و تجمع بار و افزایش ظرفیت خازنی دستگاه بازی می‌کند. با افزایش ضریب دی‌الکتریک بارهای زیادی روی سطح دی‌الکتریک ذخیره می‌شوند. تجمع بارهای زیاد می‌تواند تأثیر مثبت و افزایش‌دهنده روی چگالی داشته باشد. برای مشخص شدن اثر ضریب دی‌الکتریک بر دما و چگالی، با ثابت در نظر گرفتن ولتاژ (۱۰kV)، فرکانس (۵۰kHz)، ضخامت دی‌الکتریک (۱mm) و ضریب گسیل الکترون ثانویه ی (۱/۵)، برای ضریب‌های دی‌الکتریک ۳، ۴/۵، ۶، ۷/۵ و ۹، دما و چگالی الکترون در دو دوره‌ی تناوب متوالی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵ الف چگالی الکترون را در طول دو دوره‌ی متناوب برای ضریب‌های دی‌الکتریک مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است افزایش ضریب دی‌الکتریک منجر به افزایش چگالی می‌شود، زیرا افزایش ضریب دی‌الکتریک منجر به افزایش ظرفیت خازنی و در نتیجه افزایش ذخیره‌ی بار دستگاه می‌شود. بنابراین در هر مرحله از تخلیه مقدار بیش‌تری بار در ناحیه‌ی تشکیل پلازما تخلیه‌شده و چگالی افزایش می‌یابد. شکل ۵ ب دمای متوسط الکترون را در طول دو دوره‌ی متناوب برای ضریب‌های دی‌الکتریک مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ضریب دی‌الکتریک با دمای الکترون رابطه‌ی خاصی ندارد.

۴.۲ اثر ضخامت دی‌الکتریک

اثر ضخامت دی‌الکتریک بر دما و چگالی، در ولتاژ ثابت ۱۰kV، بسامد ۵۰kHz، ضریب دی‌الکتریک ۵ و ضریب گسیل الکترون ثانویه ی ۱/۵، در ضخامت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ mm در دو دوره‌ی تناوب متوالی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶ الف چگالی متوسط الکترون را در طول دو دوره‌ی تناوب برای ضخامت‌های مختلف دی‌الکتریک نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است افزایش ضخامت دی‌الکتریک منجر به کاهش چگالی متوسط الکترون می‌شود. شکل ۶ ب دمای متوسط الکترون را در طول دو دوره‌ی تناوب برای ضخامت‌های مختلف دی‌الکتریک نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت دی‌الکتریک، دمای متوسط الکترون افزایش می‌یابد. دلیل کاهش چگالی متوسط الکترون آن است که همان‌طور که در بخش پیشین نیز ذکر شد هرگونه تغییر در پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک که ظرفیت خازنی آن را افزایش دهد منجر به افزایش چگالی الکترون می‌شود. ظرفیت خازنی با ضخامت دی‌الکتریک رابطه‌ی معکوس دارد. بنابراین در نتیجه‌ی افزایش ضخامت دی‌الکتریک که سبب کاهش ظرفیت خازنی پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک می‌شود، چگالی متوسط الکترون نیز کاهش خواهد یافت.



شکل ۵. تغییرات زمانی (الف) چگالی و (ب) دمای متوسط الکترون در طول دو دوره‌ی تناوب و در ضریب‌های دی‌الکتریک مختلف.



شکل ۶. تغییرات زمانی (الف) چگالی و (ب) دمای متوسط الکترون در طول (دو) دوره‌ی تناوب و در ضخامت‌های مختلف دی‌الکتریک.

۵.۳ اثر جنس الکتروود

۸ توزیع چگالی برای ولتاژهای ۵، ۸، ۱۰ و ۲۰ kV، در بسامد ۵۰ kHz، ضریب دی‌الکتریک ۳، ضخامت دی‌الکتریک ۱ mm و ضریب گسیل الکترون ثانویه ۱/۵ و در شکل ۹ برای بسامدهای ۱۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ kHz، در شرایط ثابت ولتاژ و ۸ kV، ضریب دی‌الکتریک ۳، ضخامت دی‌الکتریک ۱ mm و ضریب گسیل الکترون ثانویه ۱/۵ نشان داده شده است.

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش ولتاژ، تخلیه سریع‌تر رخ داده و پلاسما در مدت زمان کوتاه‌تری به بیشینه چگالی خود می‌رسد. به‌طور مثال چگالی پلاسما در ولتاژ ۵ kV تا پیش از مدت زمان ۴۰ μs بسیار ناچیز بوده و به نظر می‌رسد که هنوز تخلیه شروع نشده است. همچنین برای ولتاژهای ۸، ۱۰ و ۲۰ kV، حدوداً به ترتیب در زمان‌های ۲۵، ۳۵ و ۱۵ μs چگالی به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

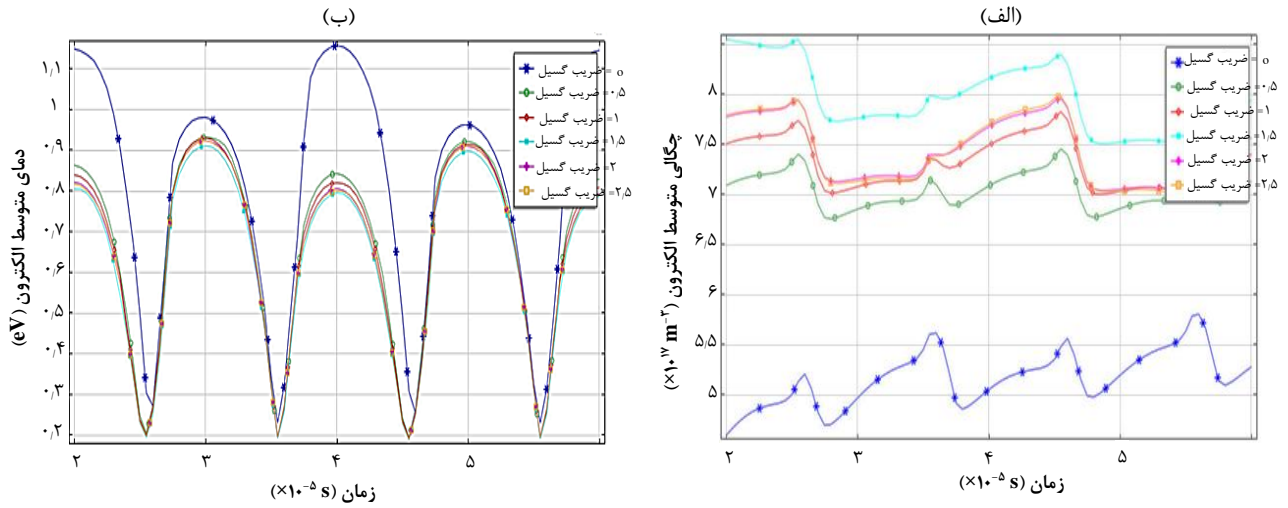
با بررسی چگونگی توزیع چگالی مشاهده می‌شود که در ولتاژ ۵ kV، چگالی در ناحیه‌ی مرکزی متمرکز بوده و در ولتاژهای ۸ تا ۱۰ kV توزیع چگالی تقریباً یکنواخت می‌شود و در ولتاژ ۲۰ kV بیشینه‌ی چگالی در مجاورت الکتروودها متمرکز است.

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که در بسامد ۱۰ kHz در عمل، پلاسمایی در سه دوره‌ی تناوب وجود نداشته و با افزایش بسامد به ۲۵ kHz، پلاسمای بسیار رقیقی در فضای بین دو الکتروود تشکیل می‌شود. چگالی در بسامدهای ۳۰ و ۴۰ kHz قابل‌توجه بوده و می‌توان گفت که چگالی در فضای بین الکتروودها تقریباً ثابت بوده و در نزدیکی الکتروودها مقدار آن افزایش می‌یابد.

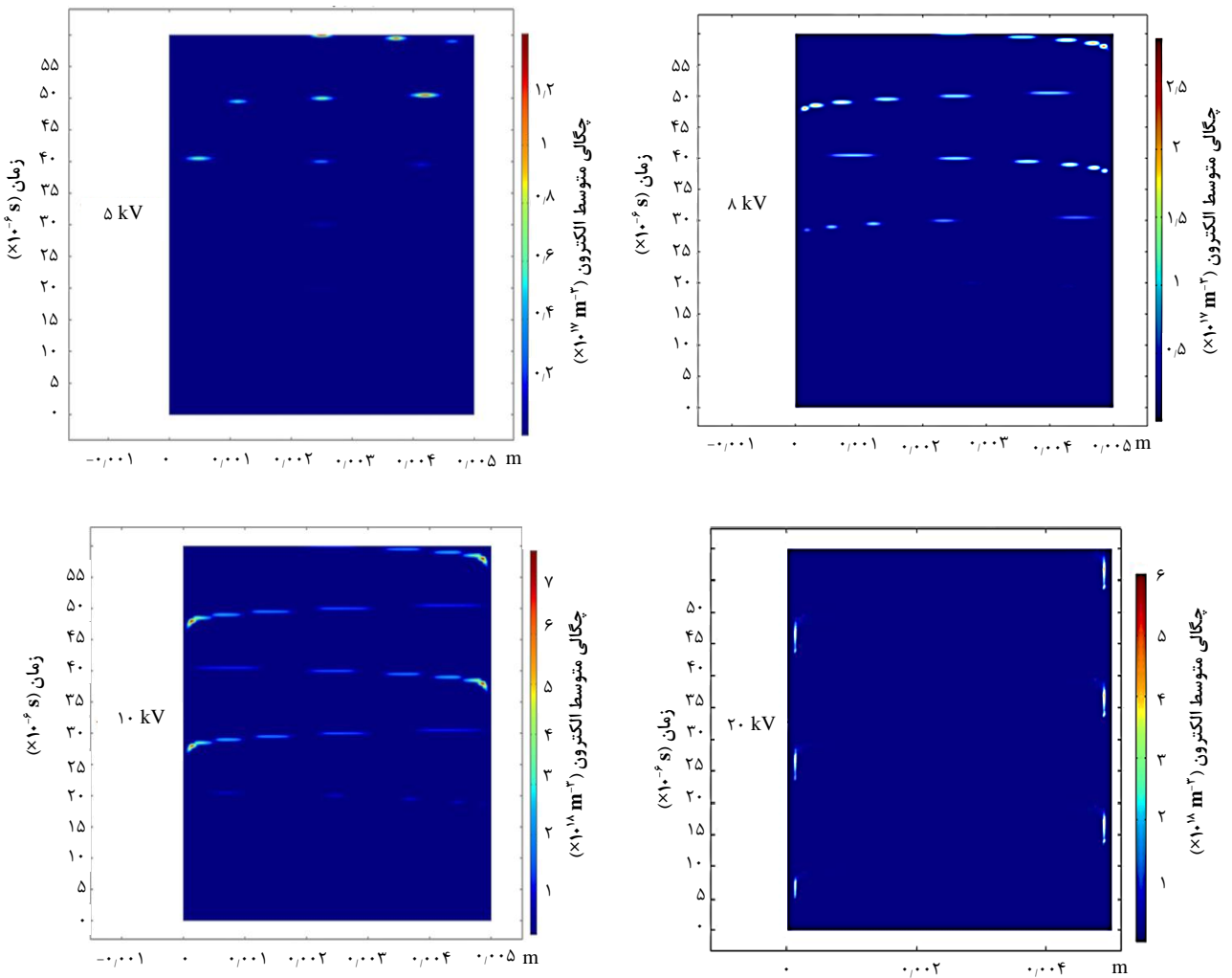
جنس الکتروودی که مستقیماً با پلاسما در تماس است نیز بر پارامترهای پلاسما مؤثر است. اثر جنس الکتروود، در ضریب گسیل الکترون ثانویه نمایان می‌شود. در اثر برخورد الکترون‌های پراورژی به سطح الکتروود، الکترون‌های ثانوی، که تعداد آن‌ها به جنس الکتروود وابسته است، گسیل می‌شوند. در این بخش اثر ضریب گسیل الکترون ثانوی بر چگالی و دما مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی در شرایط ثابت ولتاژ ۱۰ kV، بسامد ۵۰ kHz، ضریب دی‌الکتریک ۵ و ضخامت دی‌الکتریک ۱ mm برای ضریب‌های ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ انجام شد. شکل ۷ چگالی و دمای الکترون را در طول دو دوره‌ی تناوب برای مقادیر مختلف ضریب گسیل الکترون ثانوی نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش این ضریب، چگالی افزایش و دما کاهش می‌یابد.

۶.۳ نمایه‌ی چگالی در طول زمان

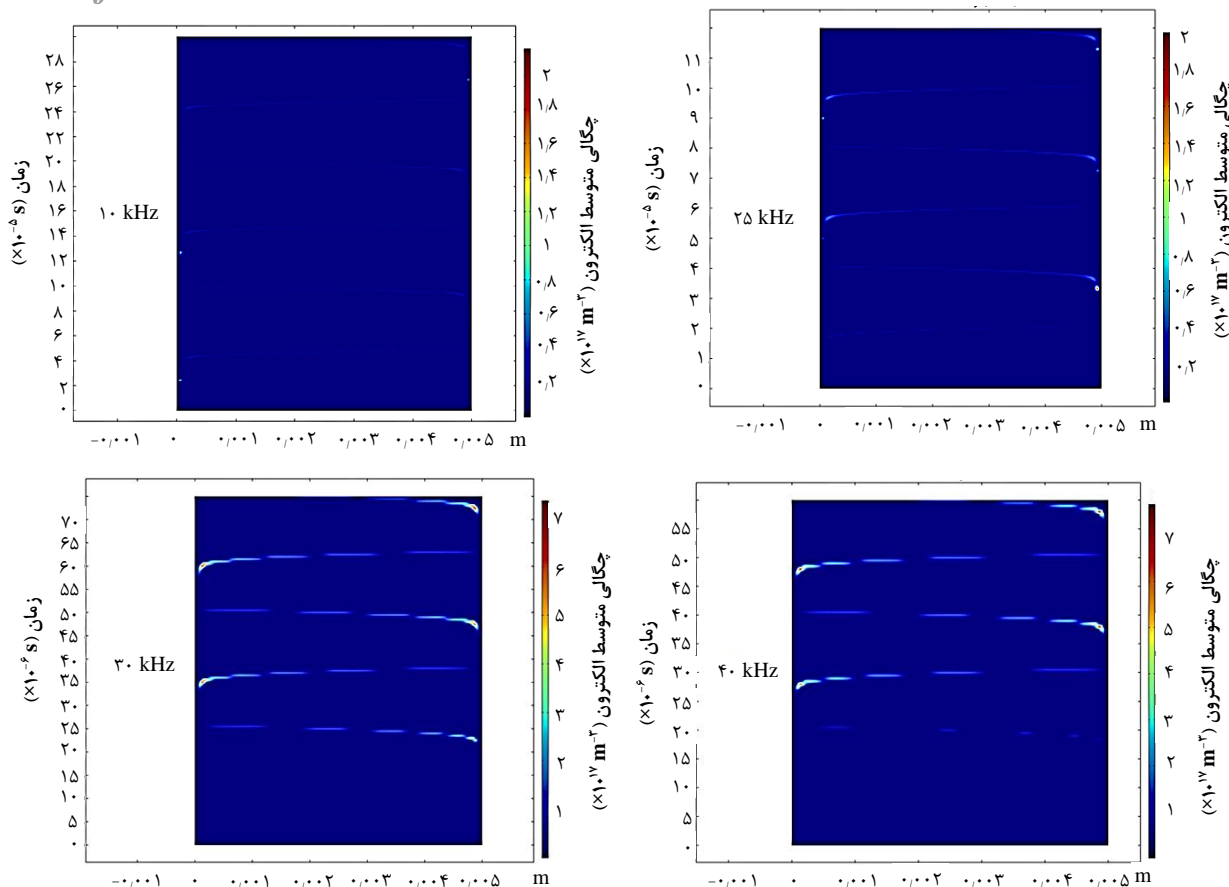
در این بخش نمایه‌ی (پروفایل) چگالی برای مطالعه‌ی یکنواختی و نحوه‌ی توزیع آن در فضای تخلیه برحسب زمان‌های مختلف بررسی شده است. شکل‌های ۸ و ۹ چگونگی توزیع چگالی در فضای بین دو الکتروود را در طول سه دوره‌ی تناوب برای به ترتیب ولتاژ و بسامدهای مختلف به صورت دوبعدی نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، محور افقی عرض فضای تخلیه‌ی الکتروودها (محل تشکیل پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک) و محور عمودی سمت راست نشان‌دهنده‌ی چگالی و محور عمودی سمت چپ معرف زمان است. در شکل



شکل ۷. تغییرات زمانی (الف) چگالی متوسط و (ب) دمای متوسط الکترون در طول دوره‌ی تناوب برای مقادیرهای مختلف ضریب گسیل الکترون ثانوی.



شکل ۸. نمایه‌ی چگالی در طول سه دوره‌ی تناوب برای ولتاژهای مختلف اعمال شده.



شکل ۹. نمایه‌ی چگالی در طول سه دوره‌ی تناوب به ازای بسامدهای مختلف.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، شبیه‌سازی یک بعدی پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شد. تأثیر ضخامت و ضریب دی‌الکتریک، ولتاژ و بسامد اعمال‌شده به الکترودها بر تغییرات دما و چگالی الکترون مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان داد که افزایش ولتاژ، بسامد، ضریب دی‌الکتریک و ضریب گسیل الکترون ثانوی به‌طور مستقیم بر افزایش چگالی مؤثر هستند. با تغییر ولتاژ از ۵ تا ۵۰ kV، چگالی متوسط از حدود 4×10^{17} تا $3/2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ و با افزایش بسامد از ۲۰ تا ۵۰ kHz، چگالی و دما افزایش می‌یابند. با افزایش ضریب دی‌الکتریک از ۳ تا ۹، چگالی و دما به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. با افزایش ضخامت دی‌الکتریک چگالی کاهش یافت و درحالی‌که روند تغییرات دما ثابت نبود، حداکثر دما برای ضخامت ۱ mm به‌دست آمد.

کاهش ضخامت دی‌الکتریک نیز به دلیل افزایش ظرفیت خازنی و افزایش بار ذخیره‌شده‌ی تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک منجر به افزایش چگالی می‌شود. در بسامد و ولتاژ ثابت، هر گونه تغییر ساختاری دستگاه که منجر به افزایش چگالی شود دمای الکترون را کاهش می‌دهد. اما با تغییر ولتاژ و بسامد، دما

و چگالی هر دو به‌طور مشابه تغییر می‌کنند و رابطه‌ی مستقیم با بسامد و ولتاژ دارند.

بررسی نمایه‌ی چگالی در طول زمان بیان‌گر آن است که توزیع الکترون در فضای بین الکترودها به شدت وابسته به ولتاژ بوده و تغییرات بسامد نمایه را تنها در نزدیکی الکترودها کمی دچار تغییر می‌کند. هم‌چنین سرعت تشکیل تخلیه‌ی کامل با ولتاژ رابطه‌ی مستقیم دارد.

گرچه از نتیجه‌های به دست آمده مشاهده شد که افزایش ولتاژ و بسامد، چگالی و دمای الکترون را افزایش می‌دهد، اما در عمل ساخت منبع تغذیه با ولتاژهای بیش‌تر از ۱۰ kV در بسامدهای بالا مقرون به صرفه نیست. بررسی نتیجه‌های شبیه‌سازی حاکی از آن است که می‌توان به جای تغییر ولتاژ یا بسامد با تغییر پارامترهای ساختاری دستگاه مانند ضریب دی‌الکتریک و ضخامت آن و هم‌چنین جنس الکترودها، در ولتاژ و بسامد پایین‌تر چگالی را تا حد زیادی افزایش داد. با در نظر گرفتن نتیجه‌های نمایه‌ی چگالی نیز می‌توان نتیجه گرفت که در ولتاژ پایین‌تر پلاسمای یکنواخت‌تر حاصل خواهد شد. بدین ترتیب می‌توان با هزینه‌ی کم‌تر سیستم بهینه‌ای را فراهم نمود.

1. U. Kogelschatz, B. Eliasson, W. Egli, *Dielectric-Barrier Discharges, Principle and Applications*, Journal de Physique IV Colloque, **07** (C4), C4-47-C4-66, (1997).
2. U. Kogelschatz, *Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications*, Plasma Chemistry and Plasma Processing, **23** (1), (March 2003).
3. A. Ozkan, et al, *How do the barrier thickness and dielectric material influence the filamentary mode and CO₂ conversion in a flowing DBD?*, Plasma Sources Sci. Technol. **25**, 025013 (2016).
4. N.N. Misra, O. Schluter, P.J. Cullen, *Cold Plasma in Food and Agriculture Fundamentals and Applications*, Academic Press is an imprint of Elsevier, 2th edition, (2016).
5. T.C. Corke, *Overview of plasma flow control: concepts, optimization and applications*, In: AIAA Paper 2005-563. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV (2005).
6. Yu.B. Golubovskii, et al, *Modelling of the homogeneous barrier discharge in helium at atmospheric pressure*, Journal of Physics D: Applied Physics, **36** (1) (2002).
7. H.-Y. Zhang, D.-Z. Wang, X.-G. Wang, *Numerical studies of atmospheric pressure glow discharge controlled by a dielectric barrier between two coaxial electrodes*, Chin. Phys. **16** (4), 1089-1096 (2007).
8. D. Petrović, et al, *Fluid modelling of an atmospheric pressure dielectric barrier discharge in cylindrical geometry*, J. Phys. D: Appl. Phys. **42** (20), 205206 (2009).
9. U.N. Pal1, et al, *Electrical modelling approach for discharge analysis of a coaxial DBD tube filled with argon*, J. Phys. D: Appl. Phys. **42** (4), 045213 (2009).
10. R. Abidat, S. Rebiai, L. Benterrouche, *Numerical simulation of atmospheric Dielectric Barrier Discharge in helium gas using COMSOL Multiphysics*, 3rd International Conference on Systems and Control, IEEE, (Oct 2013).
11. J. Pan, et al, *Numerical simulation of evolution features of the atmospheric-pressure CF₄ plasma generated by the pulsed dielectric barrier discharge*, The European Physical Journal D, Springer, (June 2016).
12. S. Gadkari, S. Gu, *Numerical investigation of coaxial DBD: Influence of relative permittivity of the dielectric barrier, applied voltage amplitude, and frequency*, Physics of Plasmas, **24**, 053517, (2017).
13. F. Sohbatzadeh, H. Soltani, *Time-dependent one-dimensional simulation of atmospheric dielectric barrier discharge in N₂/O₂/H₂O using COMSOL Multiphysics*, Journal of Theoretical and Applied Physics, **12**, 53-63 (2018).