

ORIGINAL ARTICLE

Comparative Analysis and Simulation of a Dielectric Discharge Barrier Reactor Using the Finite Element Method

Noushin Dadashzadeh Gargari^{1*}, Elnaz. Poorreza²

1 Assistant Professor, Department of Electrical Engineering Aras Branch, Islamic Azad University, Jolfa, Iran.

2 Ph.D. of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Correspondence

Noushin Dadashzadeh Gargari

Email:

noushindadashzadeh@yahoo.com

How to cite

Dadashzadeh Gargari, Poorreza, N. (2024). Comparative Analysis and Simulation of a Dielectric Discharge Barrier Reactor Using the Finite Element Method, *Optoelectronic*, 6(3), 7-16.

ABSTRACT

In this comparative study, our objective is to design a dielectric barrier discharge (DBD) reactor under atmospheric pressure. The current need is to characterize the plasma properties and optimize the designed plasma system under variable conditions. In this paper, a one-dimensional time-dependent simulation of a DBD device, driven by a sinusoidal RF voltage with an amplitude of 755 kV at 52 kHz, in argon gas is shown. The DBD device, with two electrodes, covered by dielectric material and with variable dielectric constant between 2, 5 and 8 was considered, and the discharge parameters were simulated in terms of time across the plasma space to find an optimal dielectric constant for delivering maximum power deposition. Using a sinusoidal voltage to DBD device with different dielectric constant, electric field profiles, electron density, electron temperature, mass fraction of argon atoms, average electron energy, ion current density, electron current density, plasma, and power deposition are shown.

KEYWORDS

Dielectric Barrier Discharge Reactor, Electron Density, Simulation, Plasma, Dielectric Constant.

فصلنامه علمی
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

آنالیز و شبیه‌سازی مقایسه‌ای یک راکتور سد تخلیه دی‌الکتریک با استفاده از نرم‌افزار کامسول

نوشین داداش زاده گرگری^{1*}، الناز پوررضا²

چکیده

در این مطالعه مقایسه‌ای، هدف ما طراحی یک راکتور تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) تحت فشار اتمسفر است. نیاز فعلی، مشخص کردن ویژگی‌های پلاسما و بهینه‌سازی سیستم پلاسمای طراحی شده در شرایط متغیر است. در این مقاله، شبیه‌سازی تک بعدی وابسته به زمان یک دستگاه DBD، هدایت شده توسط یک ولتاژ RF سینوسی با دامنه 755 کیلو ولت در 52 کیلوهرتز، در گاز آرگون نشان داده شده است. دستگاه DBD با دو الکتروود پوشیده شده توسط ماده دی‌الکتریک و با ثابت دی‌الکتریک متغیر بین 2، 5 و 8 در نظر گرفته شد و پارامترهای تخلیه بر حسب زمان شبیه‌سازی شدند. در سراسر شکاف پلاسما برای یافتن یک ثابت دی‌الکتریک بهینه برای رسوب حداکثر توان، با استفاده از اعمال یک ولتاژ سینوسی به دستگاه DBD با ثابت دی‌الکتریک مختلف، پروفایل‌های میدان الکتریکی، الکترون چگالی، دمای الکترون، کسر جرمی اتم‌های آرگون، میانگین انرژی الکترون، چگالی جریان یون، چگالی جریان الکترون، پلاسما، جریان کل و رسوب توان نشان داده شده‌اند.

واژه‌های کلیدی

راکتور سد تخلیه دی‌الکتریک، چگالی الکترون، شبیه‌سازی، پلاسما، ثابت دی‌الکتریک.

1 استادیار، گروه آموزشی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارس، شهر جلفا، ایران.
2 دکتری، دانشکده مهندسی برق الکترونیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران.

نویسنده مسئول:

نوشین داداش زاده گرگری

رایانامه:

noushindahdashzadeh@yahoo.com

استناد به این مقاله:

نوشین داداش زاده گرگری، الناز پوررضا (1403). آنالیز و شبیه‌سازی مقایسه‌ای یک راکتور سد تخلیه دی‌الکتریک با استفاده از نرم‌افزار کامسول. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 6(3)، 16-7.

مقدمه

پلازما گاز شبه‌خنثایی از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود ارائه می‌دهد. واژه پلازما به گاز یونیزه‌شده‌ای گفته می‌شود که همه یا بخش قابل توجهی از اتم‌های آن یک یا چند الکترون از دست داده و به کاتیون تبدیل شده باشند، یا به گاز به‌شدت یونیزه‌شده‌ای که تعداد الکترون‌های آزاد آن، تقریباً برابر با تعداد یون‌های مثبت آن باشد [3-1]. در حقیقت پلازما در فیزیک، یک رسانای الکتریکی است که در آن تقریباً تعداد مساوی ذرات دارای بار مثبت و منفی وجود دارد. گاهی از پلازما به عنوان چهارمین حالت ماده اسم برده می‌شود که از حالت جامد، مایع و گازی متمایز است [3, 4].

سد تخلیه الکتریکی DBD تکنیکی نوین برای تولید پلازما محسوب می‌شود که توجه صنعت‌گران را در زمینه‌های مختلف به خود معطوف کرده است [5]. پلاسمای سرد یا پلاسمای سد دی‌الکتریک در فشار اتمسفری بین دو الکتروود که حداقل یکی از آنها توسط عایقی مانند کوارتز یا شیشه پوشانده می‌شود، تشکیل می‌شود [9-6]. دشارژهای الکتریکی با اعمال یک ولتاژ بالای متناوب بین دو الکتروود صورت گرفته و وجود عایق از ایجاد جریان بالا جلوگیری می‌نماید. وجود دی‌الکتریک در بین الکتروودها از ایجاد قوس الکتریکی جلوگیری می‌کند. به دلیل ویژگی غیر حرارتی آنها، مدت‌هاست که به عنوان راکتورهای شیمیایی استفاده می‌شوند در واقع، این راکتورها در دمای اتاق کار می‌کنند در حالی که الکترون‌ها بسیار پرانرژی هستند [10]. این الکترون‌های بسیار پرانرژی منجر به تولید برخی از گونه‌های بسیار فعال از جمله رادیکال‌ها می‌گردند که برای کاربردهای راکتورهای شیمیایی بسیار مطلوب هستند [11-14].

تخلیه الکتریکی بین دو الکتروود اتفاق می‌افتد که توسط یک سد دی‌الکتریک عایق از هم جدا شده‌اند. در ابتدا تخلیه ساکت نامیده می‌شد [15, 16]. از ویژگی‌های آن می‌توان به ساده بودن ساختار آن، زمان پاسخ‌گویی سریع، توان مصرفی کم و نداشتن بخش‌های متحرک اشاره نمود [17].

این پلازما از جمله پلاسماهای غیرتعادلی محسوب می‌شود که در آن دمای الکترون بالا اما دمای گاز در حدود دمای اتاق است [3, 8]. این ویژگی پلاسمای سد دی‌الکتریک آن را برای کاربردهای زیستی و پزشکی مناسب ساخته است [18-20]. تخلیه الکتریکی با اعمال یک پتانسیل متناوب ولتاژ بالا بین دو الکتروود صورت می‌گیرد. رخ دادن تخلیه الکتریکی بین دو الکتروود پوشیده شده با دی‌الکتریک سبب تولید ذرات باردار پرانرژی، پرتوهای فرابنفش و گونه‌های فعال شیمیایی

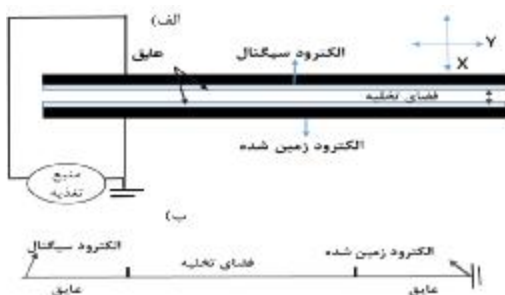
نظیر O و OH می‌شود [21].

طرح‌های مختلف DBD در کاربردهای عملی استفاده می‌شود. تحقیقات و کاربردهای صنعتی DBDها با الکتروودهای استوانه‌ای شکل مناسب‌تر هستند.

آرایش و ساختار راکتور سد تخلیه دی‌الکتریک

در پژوهش انجام شده، مطابق با شکل 1، به یکی از صفحات راکتور، ولتاژ سینوسی اعمال می‌گردد. صفحه دیگر زمین در نظر گرفته می‌شود. در این ولتاژ سینوسی V0 برابر 755 ولت و فرکانس 52000 هرتز در محدوده RF در نظر گرفته می‌شود.

با اعمال ولتاژ الکتریکی بر صفحه بالایی، یک میدان الکتریکی قوی بین دو صفحه ایجاد شده و باعث افزایش الکترون‌های آزاد در بین دو صفحه می‌گردند. با افزایش میدان الکتریکی، این الکترون‌های آزاد انرژی لازم برای یونیزه شدن را به دست می‌آورند. به طوری که در زمان بسیار کوتاه نانو ثانیه به صورت نمایی بر تعدادشان افزوده می‌گردد. این الکترون‌های آزاد در جهت عکس میدان الکتریکی بر صفحه دی‌الکتریک قرار می‌گیرند. به همان تعداد الکترون آزاد، یون‌ها در صفحه مخالف در جهت میدان الکتریکی مستقر می‌گردند. در نتیجه این کار بار سطحی بر صفحات مستقر می‌گردد. همین قضیه باعث می‌گردد تا میدان الکتریکی در فضای بین دو صفحه اصطلاحاً کمتر از میدان الکتریکی شکست گاز بین دو صفحه گردد. میدان الکتریکی شکست تابعی از خاصیت سطحی ماده دی‌الکتریک است. انباشته شدن بار سطحی، به تدریج باعث اتمام دشارژ گشته به طوری که میدان الکتریکی تغییر جهت داده و پروسه دوباره تکرار می‌گردد. به دلیل جلوگیری از پیچیدگی مسئله و زمان لازم در همگرایی مسئله، این مدل‌سازی و شبیه‌سازی در یک بعد انجام می‌گیرد. هندسه صفحات در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل 1. چیدمان الکتروودها و آرایش و ساختار راکتور سد تخلیه دی‌الکتریک

$$-\nabla \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V = \rho \quad (9)$$

$$\rho = \sum_{K=1}^N z_K n_K - n_e \quad (10)$$

در معادله بالا، ε_0 گذردهی خلاء و ε_r گذردهی نسبی هستند. چگالی بار فضایی به صورت اتوماتیک بر اساس شیمی پلاسما و فرمول بالا تعیین می‌گردد.

شرایط مرزی

بر اساس برخورد تصادفی الکترون‌ها به دیوار از دست می‌روند. و بر اساس اثر انتشار ثانویه الکترون‌ها دوباره الکترون‌های آزاد شکل می‌گیرند که منجر به شرط مرزی زیر می‌گردد [1]:

$$\mathbf{n} \cdot \Gamma_e = (1/2) V_{e,th} n_e - \sum_P \gamma_P (\Gamma_P \cdot \mathbf{n}) \quad (11)$$

و فلو انرژی الکترون از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mathbf{n} \cdot \Gamma_e = (5/6) V_{e,th} n_e - \sum_P \varepsilon_P \gamma_P (\Gamma_P \cdot \mathbf{n}) \quad (12)$$

عبارت دوم در قسمت راست معادله (11) نشانگر تجمع الکترون‌های ثانویه است؛ و عبارت دوم در رابطه (12) نشانگر فلو انرژی ساطع شده ثانویه است.

انباشتگی بار سطحی بر سطوح دی‌الکترونیک که در همسایگی فاصله بین دو دی‌الکترونیک هستند، جایی که پلاسما تشکیل می‌شود، اضافه می‌گردد. این پدیده از معادله زیر تبعیت می‌کند.

$$\mathbf{n} \cdot (D1 - D2) = \rho_s \quad (13)$$

که در معادله بالا ρ_s چگالی بار سطحی از حل معادله ODE بر سطح محاسبه می‌گردد:

$$\frac{d\rho_s}{dt} = \mathbf{n} \cdot J_i + \mathbf{n} \cdot J_e \quad (14)$$

در معادله بالا، عبارت $\mathbf{n} \cdot J_i$ قسمت نرمال کل چگالی جریان یون بر دیوار و $\mathbf{n} \cdot J_e$ قسمت نرمال کل چگالی جریان الکترون بر دیوار است.

عمل تخلیه گاز و شکست گازی با اعمال پتانسیل الکترونیکی بر سطح خارجی صفحه دی‌الکترونیک روی می‌دهد.

$$V = V_0 \sin(\omega t) \quad (15)$$

معادله بالا به یک صفحه اعمال و صفحه دیگری زمین در نظر گرفته می‌شود.

شیمی پلاسما

گاز آرگون به دلیل اینکه واکنش‌ها و گونه‌های کمتری برای حل مسئله پلاسما مورد نیاز است، در تحلیل مسئله از جذابیت بیشتری برخوردار است و به همین دلیل برای شبیه‌سازی انتخاب می‌شود. از طرفی دیگر، به دلیل پیچیدگی و محدودیت‌های نرم‌افزار و همگرا شدن سریع‌تر مسئله این گاز انتخاب می‌شود. در شبیه‌سازی برای مابقی گازها هم چنین فرایندهایی در نظر گرفته می‌شود. لیست واکنش‌های نشان داده شده در جدول 1، در طی فرایند تشکیل پلاسما در نظر

ساختار و معادلات استفاده شده در مسئله

چگالی الکترون‌های آزاد و انرژی متوسط آنها با حل معادلات پخش‌شدگی¹ برای چگالی الکترون و انرژی متوسط الکترون‌ها طبق معادلات زیر محاسبه می‌گردد [8]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_e) + \nabla \cdot [-n_e (\mu_e \cdot \mathbf{E}) - D_e \cdot \nabla n_e] = R_e \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_e) + \nabla \cdot [-(n_e (\mu_e \cdot \mathbf{E}) - D_e \nabla n_e)] + \mathbf{E} \cdot \Gamma_e = R_e \quad (2)$$

در روابط بالا، n_e چگالی الکترون، n_e چگالی انرژی الکترون، μ_e تحرک الکترون، Γ_e فلو الکترون، D_e ثابت دیفیوژن الکترون و \mathbf{E} میدان الکترونیکی هستند.

از پدیده همرفتی² الکترون‌ها صرف‌نظر می‌گردد. پخش‌شدگی الکترون‌ها، پویایی³ انرژی، پخش‌شدگی انرژی از روابط زیر محاسبه می‌گردد:

از پدیده همرفتی الکترون‌های آزاد صرف‌نظر می‌گردد.

$$D_e = \mu_e T_e \quad (3)$$

$$\mu_e = \frac{5}{3\mu_e} \quad (4)$$

$$D_e = \mu_e T_e \quad (5)$$

در روابط بالا، ثابت منبع با شیمی پلاسما تعیین می‌گردد. تصور کنید که تعداد M واکنش در رشد و کاهش جمعیت الکترون‌ها دخیل باشد؛ و در این حالت P تعداد برخوردهای غیر الاستیک الکترون است.

در حالت کلی $P \gg M$ در نظر گرفته می‌شود. در مورد ثوابت نسبت، منبع⁴ الکترون به صورت زیر بیان می‌گردد [8]:

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_e \quad (6)$$

در رابطه بالا، x_j بخش مولی گونه‌های هدف برای واکنش j است. K_j ثابت نسبت برای واکنش j است. N_n چگالی کل تعداد ذرات خنثی است [8].

$$R_e = \sum_{j=1}^P x_j k_j N_n n_e \Delta \varepsilon_j \quad (7)$$

در معادله بالا، $\Delta \varepsilon_j$ اتلاف انرژی از واکنش j است. نسبت ثوابت با انتگرال زیر محاسبه می‌گردد [8]:

$$k_k = \gamma \int_0^\infty \varepsilon \sigma_k(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (8)$$

در معادله بالا، $\gamma = \sqrt{2q/m_e}$ ، m_e جرم الکترون، ε انرژی، σ_k مربع برخوردها f تابع توزیع انرژی الکترون هستند. میدان الکترونیکی استاتیکی از معادله زیر محاسبه می‌گردد.

1 Diffuse
2 Convection
3 Mobility
4 Source

گرفته می‌شود:

جدول 1. برخوردها و واکنش‌های مدل شده [1]

$\Delta\epsilon(\text{eV})$	نوع	فرمول	واکنش
0	الاستیک	$e+\text{Ar}\Rightarrow e+\text{Ar}$	1
11,5	تحریک شدگی	$e+\text{Ar}\Rightarrow e+\text{Ar}^*$	2
-11,5	سوپرالاستیک	$e+\text{Ar}^*\Rightarrow e+\text{Ar}$	3
15,8	یونیزه شدن	$e+\text{Ar}\Rightarrow 2e+\text{Ar}^+$	4
4,24	یونیزه شدن	$e+\text{Ar}^*\Rightarrow 2e+\text{Ar}^+$	5
-	Penning ionization	$\text{Ar}^*+\text{Ar}\Rightarrow e+\text{Ar}+\text{Ar}^+$	6
-	Metastable quenching	$\text{Ar}^*+\text{Ar}\Rightarrow \text{Ar}+\text{Ar}$	7

در ابتدا تعداد الکترون‌های اولیه کمی، حاضر هستند. این تعداد برای شروع عمل تخلیه در سیکل اول RF ضروری هستند. واکنش‌های سطحی زیر هم انجام می‌شوند.

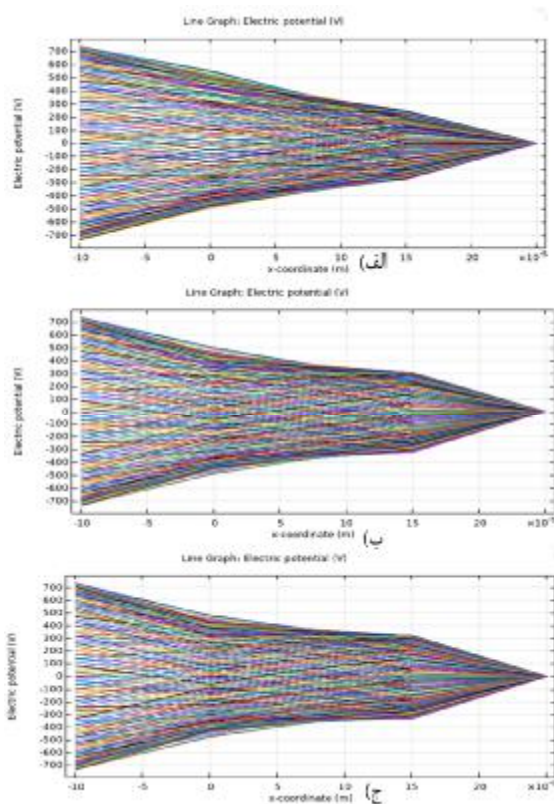
نتایج شبیه‌سازی

سیستم DBD ما به دلیل این واقعیت که شکاف تخلیه راکتور (میلی متر) کوچک‌تر از سطح صفحه الکترودها است، در یک بعد مدل شده است. بنابراین، تجزیه و تحلیل نتایج یک مسئله یک بعدی با استخراج کردن راه حل به دو بعد آسان‌تر است. بعد اضافی نشان دهنده زمان است. در تجزیه و تحلیل روش اجزای محدود، با اضافه کردن یک مجموعه داده پارامتریک استخراجی در حالت یک بعدی انجام می‌شود. برای تجزیه و تحلیل بهتر و عمیق‌تر نمودار سطحی مناسب است زیرا می‌توان فوراً مشاهده کرد که چگونه متغیرهای مورد علاقه در طول زمان تکامل می‌یابند. در این پژوهش مقایسه‌ای، با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی با روش المان محدود، تاثیر تغییر پارامترهای پلازما مانند ثابت دی‌الکتریک عایق، بر شرایط کاری دستگاه و نمودارهای پتانسیل الکتریکی، میدان الکتریکی، چگالی الکترون، دمای الکترون، جریان یونی، جریان الکترونی و پلازما مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در مش‌بندی انجام شده، سایز المان‌ها را برای داشتن دقت بیشتر به صورت بسیار ریز (Extremely fine) انتخاب کردیم. پتانسیل الکتریکی در شکل 2 با تغییر ثوابت دی‌الکتریک نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است، در سمت چپ شکل که سیگنال الکتریکی به آن وصل است، بیشینه بوده و با حرکت به سمت شکاف کمتر شده و در نهایت در سمت راست تصویر که زمین شده به صفر می‌رسد. در شکل 3، محاسبه و نمایش نمودار دوبعدی پتانسیل الکتریکی در سیکل‌های مختلف، زمانی که ثابت دی‌الکتریک عایق بین

(الف) 2 ب) 5 و ج) 8 تغییر می‌کند، نشان داده شده است. ولتاژ در فاصله بین دو دی‌الکتریک تقریباً یکنواخت است. با توجه به شکل، در هر سه حالت تغییر ناچیزی مشاهده می‌گردد. این قضیه با آزمایش میدان الکتریکی در شکل 4 مشخص می‌گردد. میدان الکتریکی در ماده دی‌الکتریک قویتر از میدان در فاصله دو صفحه دی‌الکتریک است. این مسئله، به دلیل بار سطحی جمع شده بر صفحات است. از شکل 4 می‌توان استنباط کرد که میدان الکتریکی بسیار قوی‌تری در مواد دی‌الکتریک نسبت به شکاف تخلیه وجود دارد. این مسئله به این دلیل است که بار سطحی انباشته شده روی سطوح صفحات دی‌الکتریک تمایل دارد از میدان الکتریکی تولید شده محافظت کند.

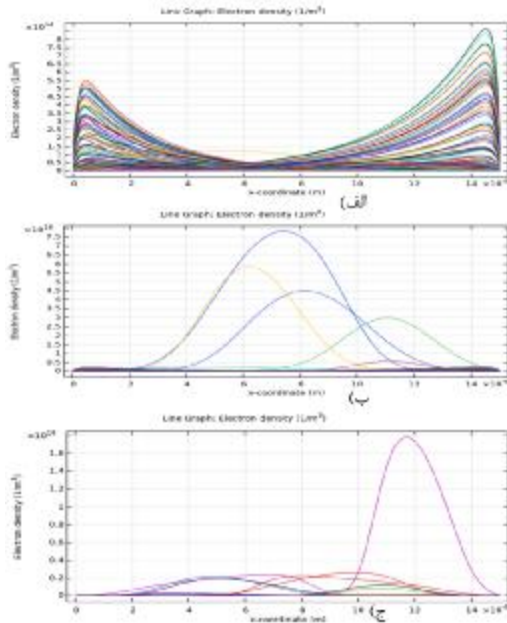
جدول 2. واکنش‌های سطحی راکتور [1]

ثابت چسبندگی ¹	فرمول	واکنش
1	$\text{Ar}^*\Rightarrow\text{Ar}$	1
1	$\text{Ar}^+\Rightarrow\text{Ar}$	2

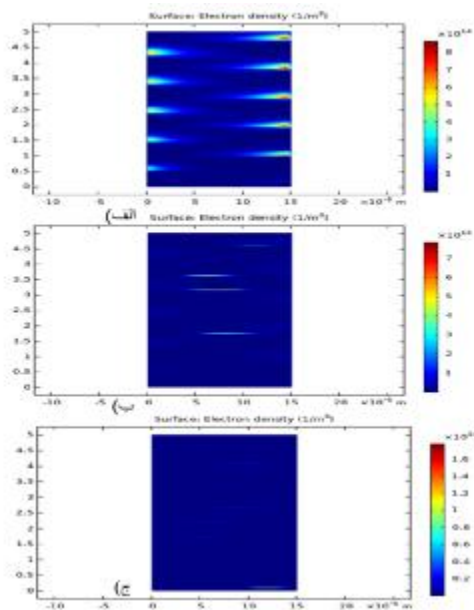


شکل 2. محاسبه و نمایش نمودار پتانسیل الکتریکی زمانی که ثابت دی‌الکتریک عایق بین (الف) 2 ب) 5 و ج) 8 تغییر می‌کند.

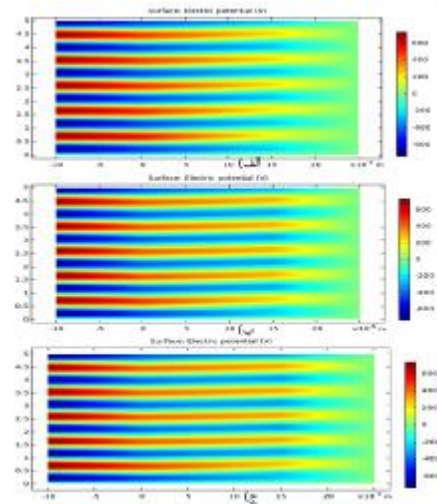
مختلف اتفاق می‌افتد و قانون کلی ندارد؛ و در حالت کلی، چگالی الکترون توزیع پارابولیک دارد. در شکل 6، چگالی الکترون‌ها در زمان‌های مختلف ارایه شده است. مطابق شکل، در حالی که ثابت دی‌الکتریک 2 در نظر گرفته می‌شود، تخلیه تابشی در سیکل‌های مختلف مشاهده می‌شود. با تغییر ثابت دی‌الکتریک به 5 و 8 از میزان تابش کاسته می‌شود.



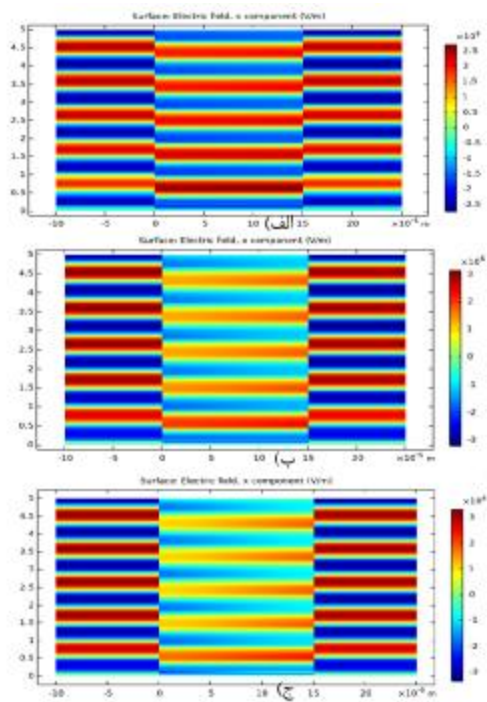
شکل 5. چگالی الکترون‌ها در فاصله بین دو الکتروود



شکل 6. نمودار چگالی الکترون بر حسب زمان‌های مختلف با تغییر ثابت دی‌الکتریک

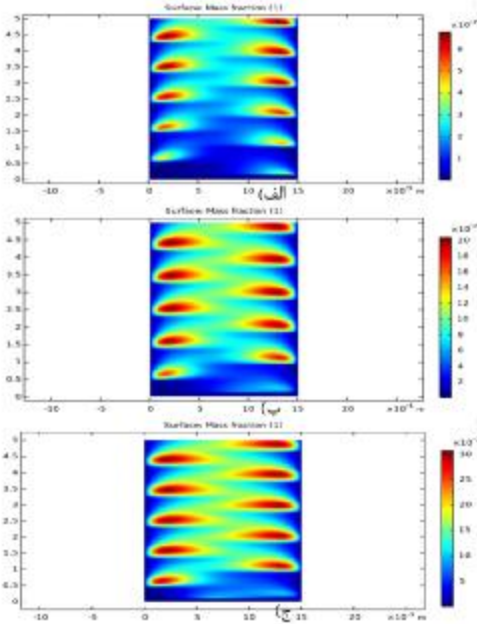


شکل 3. محاسبه و نمایش نمودار دوبعدی پتانسیل الکتریکی در سیکل‌های مختلف زمانی که ثابت دی‌الکتریک عایق بین الف) 2 (ب) 5 و ج) 8 تغییر می‌کند.



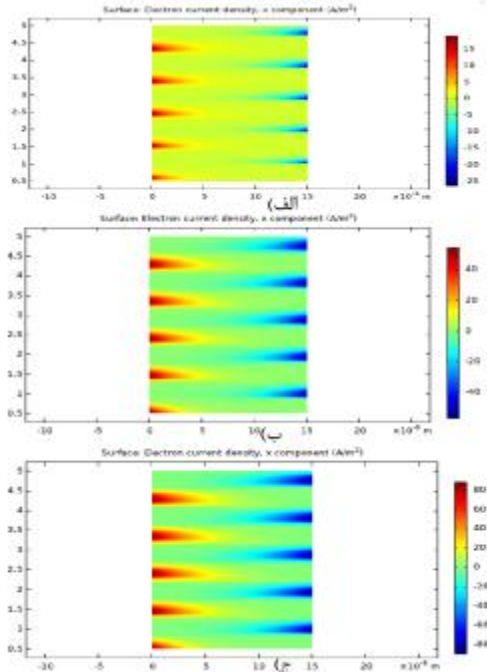
شکل 4. نمایش میدان الکتریکی تولیدی در شکاف تخلیه و دی‌الکتریک زمانی که ثابت دی‌الکتریک بین الف) 2 (ب) 5 و ج) 8 تغییر می‌کند.

در شکل 5 و 6 نمودارهای چگالی الکترون در طول شکاف در زمان‌های مختلف در سراسر شکاف تخلیه در شکل‌ها نشان داده شده است. در شکل 5، در هر تخلیه در حالت اول، چگالی الکترون در اطراف دی‌الکتریک به دلیل تخلیه تابشی بیشینه است. اما با افزایش ثابت دی‌الکتریک از اثر تخلیه تابشی کاسته و این مقادیر بیشینه به سمت درون شکاف متمایل می‌شود. این پیک‌های چگالی الکترون به صورت تصادفی در زمان‌های

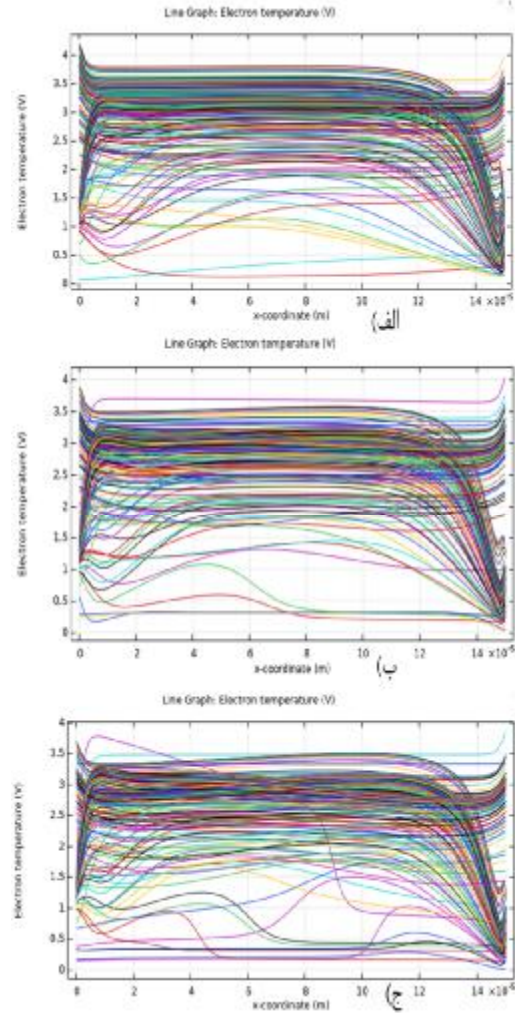


شکل 8. نمودارها یک سری از جرم آرگون بر انگیزته شده با افزایش ثابت دی الکتریک

پروفایل چگالی جریان ناشی از الکترون‌ها و یون‌ها در شکل 9 و 10 نشان داده شده است. با توجه به اشکال مربوطه، برای هر دو مورد، با افزایش ثابت دی الکتریک، چگالی جریان ناشی از الکترون‌ها و یون‌ها افزایش می‌یابد. پلاسمای ایجاد شده در شکاف تخلیه در شکل 11 نشان داده شده است. با توجه به افزایش چگالی جریان ناشی از یون‌ها و الکترون‌ها، با افزایش ثابت دی الکتریک، پلاسمای تولیدی نیز افزایش یافته است.



شکل 9. چگالی جریان ناشی از الکترون‌ها

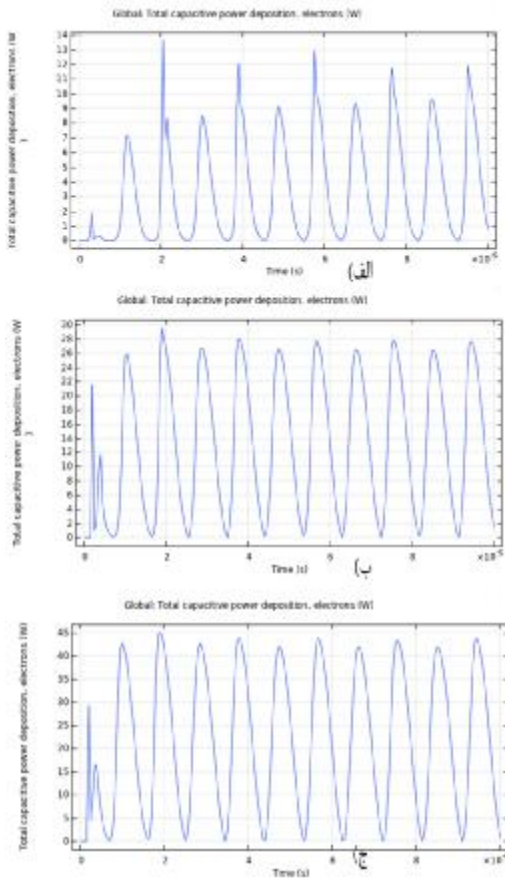


شکل 7. نمودار دمای الکترون‌ها با افزایش ثابت دی الکتریک

در شکل 7، توزیع دما در طول شکاف در زمان‌های مختلف در سراسر شکاف تخلیه نشان داده شده است. مطابق شکل، حداکثر دمای الکترون حدود 4 است و مشاهده می‌گردد که تغییرات ثابت دی الکتریک تاثیر چندانی بر دمای الکترون‌ها نمی‌گذارد.

کسری از جرم آرگون برانگیزته در شکل 8 نشان داده شده است. گونه‌های برانگیزته شده در فاصله هوایی دارای طول عمر بیشتری نسبت به الکترون‌ها و یون‌ها هستند. این قضیه به این دلیل است که مکانیزم اولیه برای متلاشی شدن گونه‌های آرگون، (de-excitation) انتقال به مداری با انرژی کمتر است. اتم‌های آرگون تحریک شده فقط از طریق پدیده نفوذ به دیوار می‌رسند در حالی که الکترون‌ها و یون‌ها بر اساس پدیده مهاجرت به دیواره برخورد می‌کنند. از روی شکل 7 مشخص است که بعد از فقط حدود دو سیکل پدیده تخلیه به حالت پایدار می‌رسد. با توجه به شکل مربوطه، با افزایش ثابت دی الکتریک، کسر جرم آرگون بر انگیزته شده، افزایش می‌یابد.

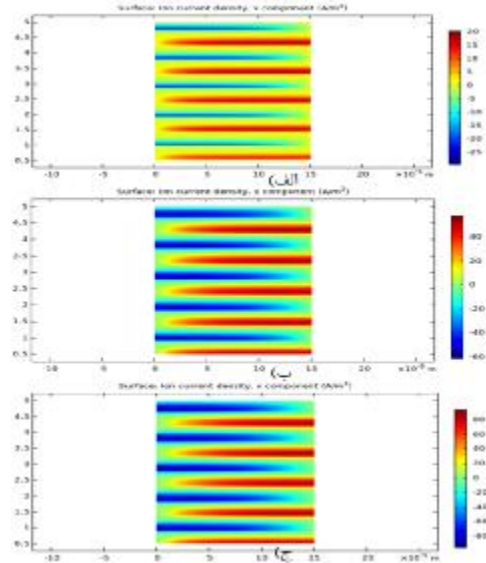
انتظار افزایش توان با افزایش ثابت دی‌الکتریک عایقی را داشتیم. بنابراین در بازه 2، 5 و 8 ثابت دی‌الکتریک 8 توان بالاتری را تولید می‌کند و بازدهی راکتور را بالا می‌برد.



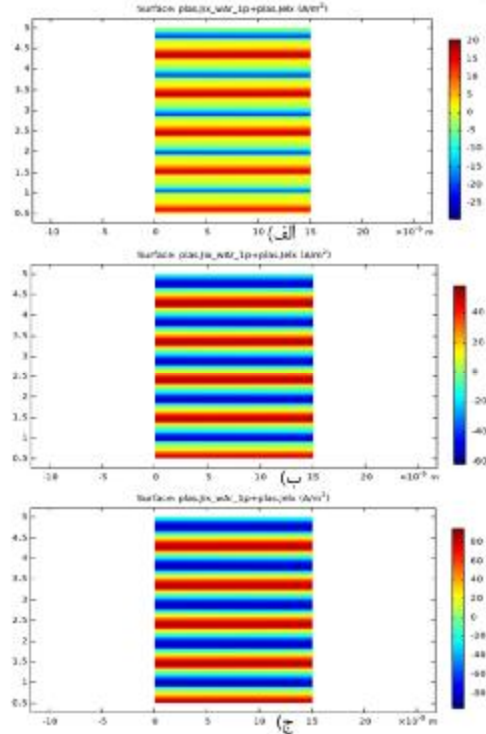
شکل 12. نمایش نمودارهای توان رسوبی یا توان تولیدی در پلاسما با افزایش ثابت دی‌الکتریک

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی مکانیزم و چگونگی تشکیل پدیده فیزیکی پلاسما یا همان گاز یونیزه شده، تحت تاثیر کلیدزنی یا مدارشکن شبکه‌های قدرت، به‌وسیله نرم‌افزار المان محدود کامسول می‌پردازد. در این مدل شکست الکتریک در یک گاز قابل یونیزه شدن بررسی می‌شود. اصولاً برای بهینه‌سازی فرایند تولید پلاسما و هر پدیده فیزیکی دیگر به مدل‌سازی و شبیه‌سازی پدیده می‌پردازیم. تاثیر افزایش ثابت دی‌الکتریک بر مقادیر تعیین کننده پلاسما نظیر چگالی الکترون، دمای الکترون، میدان الکتریک و غیره بحث و بررسی شد. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده، وقتی ثابت دی‌الکتریک عایق را 8 در نظر گرفتیم، توان رسوبی بیشتری را استخراج کردیم. بنابراین آن ثابت را به عنوان ثابت دی‌الکتریک بهینه شده برای افزایش کارکرد بهتر راکتور سد دی‌الکتریک انتخاب کردیم.



شکل 10. چگالی جریان ناشی از یونها



شکل 11. نمایش نمودارهای پلاسمای تولیدی با افزایش ثابت دی‌الکتریک

در شکل 12 نمودارهای توان رسوبی یا توان تولیدی در پلاسما، نمایش داده شده است. در نبود پلاسما، این جریان به صورت سینوسی کامل در می‌آید. اما در حضور جریان ناشی از الکترون‌ها و یون‌ها به صورت موج غیر سینوسی ظاهر می‌شود. همان طور که در شکل نشان داده شده است، با افزایش ثابت دی‌الکتریک، توان رسوبی به صورت محسوس افزایش می‌یابد. با توجه به مقادیر محاسبه شده چگالی جریان یونی و الکترونی،

منابع

- [1] E. Poorreza and N. Dadashzadeh Gargari, "Study of the Time Dependence and One Dimensional Simulation of a Dielectric Barrier Discharge Reactor Driven by Sinusoidal High-Frequency Voltage," *Russian Journal of Physical Chemistry B*, vol. 17, no. 3, pp. 631-645, 2023 doi: 10.1134/S1990793123030107.
- [2] E. Poorreza and N. Dadashzadeh Gargari, "Modeling and Simulation of a Microwave-Assisted Plasma with Different Input Power for Plasma-Based Applications," *Russian Journal of Physical Chemistry B*, vol. 17, no. 3, pp. 719-724, 2023/06/01 2023, doi: 10.1134/S1990793123030235.
- [3] N. Dadashzadeh, "Optimization of Electricity Consumption using Dielectric Barrier Discharge Method (DBD)," *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 17, no. 1, 2023.
- [4] V. Shumova, D. Polyakov, and L. Vasilyak, "Thermophoresis in plasma with structures of charged dust particles," *Russian Journal of Physical Chemistry B*, vol. 14, pp. 666-669, 2020.
- [5] K. Sergeichev, N. Lukina, L. Apasheva, E. Ovcharenko, and A. Lobanov, "Water Activated by a Microwave Plasma Argon Jet as a Factor Stimulating the Germination of Plant Seeds," *Russian Journal of Physical Chemistry B*, vol. 16, no. 1, pp. 84-89, 2022.
- [6] S. Das, G. Dalei, and A. Barik, "A dielectric barrier discharge (DBD) plasma reactor: An efficient tool to measure the sustainability of non-thermal plasmas through the electrical breakdown of gases," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 410, no. 1: IOP Publishing, p. 012004.
- [7] c. S. Ivković, B. Obradović, and M. Kuraica, "Electric field measurement in a DBD in helium and helium-hydrogen mixture," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 45, no. 27, p. 275204, 2012.
- [8] F. Sohbatzadeh and 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*, vol. 12, no. 1, pp. 53-63, 2018.
- [9] C. Hertwig, N. Meneses, and A. Mathys, "Cold atmospheric pressure plasma and low energy electron beam as alternative nonthermal decontamination technologies for dry food surfaces: A review," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 77, pp. 131-142, 2018.
- [10] S. Saidi, H. Loukil, K. Khodja, A. Belasri, B. Caillier, and P. Guillot, "Experimental and Theoretical Investigations of Dielectric Barrier Discharge (DBD) Lamp in Ne/Xe Mixture," *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2022.
- [11] A. Barjasteh and E. Eslami, "Numerical investigation of effect of driving voltage pulse on low pressure 90% Ar-10% Cl₂ dielectric barrier discharge," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 38, no. 1, pp. 261-279, 2018.
- [12] A. Barjasteh, Z. Dehghani, P. Lamichhane, N. Kaushik, E. H. Choi, and N. K. Kaushik, "Recent progress in applications of non-thermal plasma for water purification, bio-sterilization, and decontamination," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 8, p. 3372, 2021.
- [13] V. Shumova, D. Polyakov, and L. Vasilyak, "The Chemi-ionization Rate Constant of Metastable Neon Atoms in a Glow Discharge at Cryogenic Temperature," *Russian Journal of Physical Chemistry B*, vol. 15, pp. 691-695, 2021.
- [14] V. Shumova, D. Polyakov, and L. Vasilyak, "Influence of Metastable Atoms on the Heating of Microparticles in the Plasma of a Gas Discharge in Neon," *Russian Journal of Physical Chemistry B*, vol. 16, no. 5, pp. 912-916, 2022.
- [15] K. Kostov, Y. Hamia, R. Mota, A. Dos Santos, and P. Nascente, "Treatment of polycarbonate by dielectric barrier discharge (DBD) at atmospheric pressure," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 511, no. 1: IOP Publishing, p. 012075.
- [16] E. Feizollahi, N. Misra, and M. Roopesh, "Factors influencing the antimicrobial efficacy of Dielectric Barrier Discharge (DBD) Atmospheric Cold Plasma (ACP) in food processing applications," *Critical reviews in food science and nutrition*, vol. 61, no. 4, pp. 666-689, 2021.
- [17] A. H. Khoja, M. Tahir, and N. A. S. Amin, "Recent developments in non-thermal catalytic DBD plasma reactor for dry reforming of methane," *Energy conversion and management*, vol. 183, pp. 529-560, 2019.
- [18] G. Yu et al., "Effect of rotating a dielectric barrier on discharge energy and uniformity in

- an atmospheric pressure air DBD," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 56, no. 47, p. 475206, 2023.
- [19] R. A. Bernal-Orozco, I. Carvajal-Mariscal, and O. M. Huerta-Chavez, "Flow and performance effects of a phenomenological model for a DBD actuator under different operating parameters," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 45, no. 10, p. 513, 2023.
- [20] Y. Hayakawa, P. Emeraldi, T. Imai, and S. Kambara, "CO₂ conversion characteristics by micro-gap DBD plasma reactor," *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol*, vol. 17, no. e01007, p. 12pp, 2023.
- [21] A. Barjasteh, E. Eslami, and N. Morshedian, "Experimental investigation and numerical modeling of the effect of voltage parameters on the characteristics of low-pressure argon dielectric barrier discharges," *Physics of Plasmas*, vol. 22, no. 7, p. 073508, 2015.