

**ORIGINAL ARTICLE**

# Numerical Simulation of Voltage Variations on DBD Plasma Properties

Noushin Dadashzadeh Gargari<sup>1\*</sup>

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

**Correspondence**

Noushin Dadashzadeh Gargari

Email:

[noushindadashzadeh@yahoo.com](mailto:noushindadashzadeh@yahoo.com)

**How to cite**

Dadashzadeh Gargari, N. (2024). Numerical Simulation of Voltage Variations on DBD Plasma Properties, Optoelectronic, 7(1), 27-34.

**ABSTRACT**

This research explores the fundamental mechanisms underlying electrical discharges in dielectric barrier discharge (DBD) reactors. Specifically, we investigate how voltage parameters, such as amplitude, frequency, and waveform, affect plasma characteristics. Numerical simulations reveal that alterations in these parameters can significantly impact the spatial distribution of energy within the plasma. These findings demonstrate that precise control over plasma properties can be achieved through fine-tuning voltage parameters, thereby optimizing DBD reactor performance for applications such as treating water contaminated with volatile organic compounds, generating high-purity ozone for medical purposes, and depositing thin polymer films. This research represents a significant step forward in the design and operation of DBD reactors across various industries.

**KEYWORDS**

Dielectric Barrier Discharge (DBD), Voltage Parameters, Energy Distribution, Numerical Simulation.

فصلنامه علمی  
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

## شبیه‌سازی عددی تغییرات ولتاژ بر ویژگی‌های پلاسمای DBD

نوشین داداش زاده گرگری<sup>\*1</sup>

1 استادیار، گروه آموزشی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارس، شهر جلفا، ایران.

### چکیده

این پژوهش، مکانیزم‌های بنیادین حاکم بر تخلیه‌های الکتریکی در راکتورهای تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) را بررسی می‌کند. به طور خاص، ما بررسی می‌کنیم که پارامترهای ولتاژ مانند دامنه، فرکانس و شکل موج چگونه بر ویژگی‌های پلاسمای تأثیر می‌گذارد. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که تغییرات در این پارامترها می‌تواند به طور قابل توجهی بر توزیع فضایی انرژی تأثیر بگذارد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که با تنظیم دقیق پارامترهای ولتاژ، می‌توان به کنترل دقیق مشخصه‌های پلاسمای دست یافت و در نتیجه عملکرد راکتور DBD را برای کاربردهایی مانند تصفیه آب‌های آلوده به ترکیبات آلی فرار، تولید ازن با خلوص بالا برای مصارف پزشکی و پوشش‌دهی سطوح با لایه‌های نازک پلیمری بهینه نمود. این پژوهش می‌تواند به عنوان یک گام مهم در جهت طراحی و بهره‌برداری بهینه از راکتورهای DBD در صنایع مختلف تلقی شود.

### واژه‌های کلیدی

تخلیه سد دی‌الکتریک، پارامترهای ولتاژ، توزیع انرژی، شبیه‌سازی عددی.

نویسنده مسئول:

نوشین داداش زاده گرگری

رایانامه: [noushindadashzadeh@yahoo.com](mailto:noushindadashzadeh@yahoo.com)

استناد به این مقاله:

نوشین داداش زاده گرگری (1403). شبیه‌سازی عددی تغییرات ولتاژ بر ویژگی‌های پلاسمای DBD. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 7(1)، 34-27.

<https://jphys.journals.pnu.ac.ir>

اعمال شده است، از معادله (3) محاسبه می‌شود.

$$V_g(t) = V_e(t) \frac{C_d}{C_d + C_g} \quad (3)$$

که در آن  $V_e(t)$  نشان دهنده ولتاژ تحریک خارجی است. با استفاده از مدل شبکه معادل الکتریکی و حل یک جفت معادله انتشار-کشش، می‌توان چگالی و میانگین انرژی الکترون را در پلاسما محاسبه کرد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot n_e[-(\mu_e \cdot E) - D_e \cdot \nabla n_e] = R_e \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot [-(n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \nabla n_e)] + E \cdot \Gamma_e = R_e \quad (5)$$

که در معادله 4 چگالی الکترون،  $D_e$  ضریب انتشار الکترون  $R_e$  منبع الکترون و در معادله 5 شار الکترون است. شار الکترون از دو بخش شامل میدان الکتریکی اعمال شده و بخش دیگر گرادیان چگالی تشکیل شده است.  $E \cdot \Gamma_e$  نشان دهنده چگونگی تاثیر میدان الکتریکی بر انرژی جنبشی الکترون‌ها است. این عبارت، انرژی به دست آمده الکترون‌ها از میدان الکتریکی را محاسبه می‌کند.  $R_e$  اتلاف انرژی ناشی از برخوردهای غیرالاستیک است که از معادله (6) به دست می‌آید [14].

$$R_e = S_{en} + \frac{Q + Q_{gen}}{q} \quad (6)$$

که در آن  $S_{en}$  توان تلف شده،  $Q_{gen}$  نرخ کلی تولید گرما در واحد حجم و  $q$  بار الکترون است [14].

از پدیده همرفتی<sup>1</sup> الکترون‌ها صرفه‌نظر می‌گردد. پخش‌شدگی الکترون‌ها، پویایی<sup>2</sup> انرژی، پخش‌شدگی انرژی از روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$D_e = \mu_e T_e \quad (7)$$

$$\mu_e = 5/3 \mu_e \quad (8)$$

$$D_e = \mu_e T_e \quad (9)$$

تصور کنید که تعداد  $M$  واکنش در رشد و کاهش جمعیت الکترون‌ها دخیل باشد و  $P$  تعداد برخوردهای غیرالاستیک الکترون است.

در حالت کلی  $P \gg M$  است. در مورد ثوابت نسبت، منبع<sup>3</sup> الکترون به صورت زیر بیان می‌گردد [15]:

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_e \quad (10)$$

در رابطه بالا،  $x_j$  بخش مولی گونه‌های هدف برای واکنش  $j$ ،  $k_j$  ثابت نسبت برای واکنش  $j$  و  $N_n$  چگالی کل تعداد ذرات خنثی است [15].

## مقدمه

پلاسما به عنوان حالت چهارم ماده، در سال‌های اخیر به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، از جمله وجود گونه‌های فعال مانند رادیو کال‌های آزاد، یون‌ها و الکترون‌ها، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [1-4]. کاربردهای متنوع پلاسما در صنایع مختلف از جمله نساجی، الکترونیک، پزشکی و غذایی، نشان از اهمیت روزافزون این فناوری دارد [5-8]. یکی از کاربردهای مهم پلاسما، اصلاح سطح مواد از جمله دی‌الکتریک‌ها و پلیمرها است که منجر به بهبود خواص سطحی مانند چسبندگی، آب‌گریزی و زیست‌سازگاری می‌شود [9-11].

تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) به عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای تولید پلاسما سرد در فشار اتمسفر شناخته شده‌اند. در این نوع راکتورها، با اعمال ولتاژ بالا بین دو الکتروود که توسط یک لایه عایق از هم جدا شده‌اند، تخلیه‌های پلاسمایی موضعی ایجاد می‌شود. وجود سد دی‌الکتریک باعث محدود شدن جریان و جلوگیری از تبدیل تخلیه به قوس می‌شود [12].

در این پژوهش، با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی عددی دقیق، تأثیر تغییرات در دامنه و فرکانس ولتاژ روی ویژگی‌های پلاسمایی تولید شده در DBD بررسی شده است. با تغییر دادن مقدار دامنه و فرکانس ولتاژ در مدل شبیه‌سازی، تغییرات ایجاد شده در ثابت دی‌الکتریک، توزیع انرژی الکترون‌ها، توان و سایر پارامترهای کلیدی تخلیه تحلیل شده است.

## ساختار و معادلات استفاده شده در مسئله

برای برآورد دقیق ظرفیت‌های معادل در یک DBD با پیکربندی صفحه موازی، از دو معادله برای محاسبه ظرفیت سد دی‌الکتریک  $C_d$  و ظرفیت شکاف گاز تخلیه  $C_g$  استفاده می‌شود. این معادلات به ترتیب به صورت زیر هستند [13]

$$C_g = \frac{\epsilon_0 k_1 A}{d_g} \quad (1)$$

$$C_d = \frac{\epsilon_0 k_2 A}{d_b} \quad (2)$$

که در آن  $k_1$  ثابت دی‌الکتریک گاز در شکاف تخلیه،  $k_2$  ثابت دی‌الکتریک ماده عایق به کار رفته،  $A$  «مساحت ناحیه تخلیه» یا به عبارت ساده‌تر «مساحت پلاسما» نشان دهنده وسعت ناحیه‌ای است که در آن تخلیه الکتریکی رخ می‌دهد.  $d_b$  و  $d_g$  به ترتیب نشان دهنده ضخامت عایق دی‌الکتریک و شکاف تخلیه و ثابت گذردهی خلا  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$   $c^2/N \cdot m^2$  است. ولتاژ گاز  $V_g(t)$  که پاسخ پلاسما به ولتاژ

1 Convection

2 Mobility

3 Source

است و  $\epsilon_p$  میانگین انرژی الکترون‌های ثانویه را نشان می‌دهد. در مورد ذرات سنگین، یون‌ها به دلیل جرم بیشتری که نسبت به الکترون‌ها دارند، کمتر تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی قرار می‌گیرند. با این حال، واکنش‌های سطحی و میدان الکتریکی ایجاد شده به سمت دیواره‌ها می‌تواند باعث از دست رفتن یون‌ها شوند. تجمع بار سطحی نیز می‌تواند بر توزیع پتانسیل در نزدیکی سطوح و در نتیجه بر حرکت الکترون‌ها و یون‌ها تأثیر بگذارد. شرط مرزی معادله 16 به این نکته اشاره دارد که تجمع بار سطحی بر روی سطوح دی‌الکتریک مجاور شکاف تخلیه تأثیر می‌گذارد.

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = \rho_s \quad (17)$$

چگالی بار سطحی با نماد  $\rho_s$  نشان داده می‌شود که طبق معادله (17) با حل معادله دیفرانسیل توزیع شده روی سطوح محاسبه می‌شود.

$$\frac{d\rho_s}{dt} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_i + \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_e \quad (18)$$

عبارت  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_i$  در معادله (17) نشان دهنده مؤلفه عمودی چگالی جریان کل یون در دیواره و  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_e$  نشان دهنده مؤلفه عمودی چگالی جریان کل الکترون در دیواره است. فرآیند تخلیه توسط یک پتانسیل سینوسی شکل اعمال شده به مرز خارجی یکی از صفحات دی‌الکتریک تشکیل می‌شود.

### نتایج شبیه‌سازی

با توجه به اینکه فاصله تخلیه در DBD مطالعه شده بسیار کوچک‌تر از ابعاد صفحات الکترواست، برای ساده‌سازی تحلیل‌ها، مدل‌سازی به صورت یک‌بعدی انجام می‌شود. با گسترش راه‌حل یک‌بعدی به دو بعد (اضافه کردن بعد زمان) و استفاده از روش اجزای محدود و تکنیک برون‌کشی پارامتری یک‌بعدی (نمایش سه‌بعدی نتایج تک‌بعدی)، امکان بررسی تغییرات پارامترهای مختلف در طول زمان فراهم می‌شود.

### بهینه‌سازی ثابت دی‌الکتریک بر اساس توان خازنی

#### تخلیه DBD

هنگامی که یک ولتاژ متناوب با فرکانس بالا به پلاسمای گازی اعمال می‌شود، یک میدان الکتریکی نوسانی در محیط ایجاد می‌شود. این میدان الکتریکی باعث شتاب‌گیری الکترون‌های آزاد در پلاسمای و برخورد آن‌ها با اتم‌های گاز می‌شود. در اثر این برخوردها، اتم‌های یونیزه شده و الکترون‌های آزاد بیشتری تولید می‌شوند. این فرایند به صورت زنجیره‌ای ادامه می‌یابد و باعث ایجاد یک پلاسمای پایدار می‌شود. وجود این پلاسمای باعث می‌شود تا گاز به یک رسانای

$$R_\epsilon = \sum_{j=1}^P x_j k_j N_n n_e \Delta \epsilon_j \quad (11)$$

در معادله بالا،  $\Delta \epsilon_j$  اتلاف انرژی واکنش  $j$  است. نسبت ثوابت با انتگرال زیر محاسبه می‌گردد [14]:

$$k_k = \gamma \int_0^\infty \epsilon \sigma_k(\epsilon) f(\epsilon) d\epsilon \quad (12)$$

در معادله بالا،  $\gamma = \sqrt{2q/m_e}$ ،  $m_e$  جرم الکترون،  $\epsilon$  انرژی،  $\sigma_k$  مربع برخورد  $f$  تابع توزیع انرژی الکترون است. میدان الکتریکی استاتیکی از معادله زیر محاسبه می‌گردد.

$$-\nabla \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \nabla V = \rho \quad (13)$$

در معادله 13  $\epsilon_r$  ثابت دی‌الکتریک نسبی است. چگالی بار فضایی  $\rho$  با استفاده از معادله (14) محاسبه می‌شود.

$$\sum_s q_s n_s = e(Zn_i - n_e) \quad (14)$$

که در آن  $q_s$  حالت بار ذره  $(s)$ ،  $Z$  بار کل سیستم و  $n_i$  چگالی تعداد یون‌ها است [16].

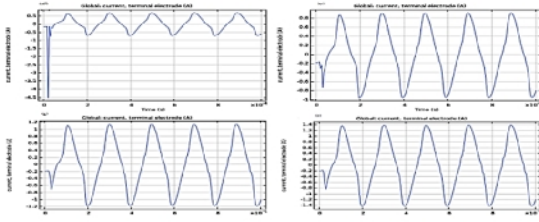
### شرایط مرزی

هنگامی که یک الکترون به دیواره برخورد می‌کند، می‌تواند انرژی خود را از دست داده و به سطح دیواره جذب شود. این پدیده به عنوان جذب الکترون شناخته می‌شود. همچنین الکترون می‌تواند با اتم‌های دیواره برهم‌کنش کرده و باعث ایجاد تغییرات در ساختار اتمی آن‌ها شود که منجر به از بین رفتن الکترون اولیه می‌شود. در برخی موارد، برخورد الکترون با دیواره می‌تواند باعث شود که الکترون‌های دیگری از سطح دیواره جدا شده و به داخل محفظه پرتاب شوند. این پدیده نشر ثانویه نامیده می‌شود. انرژی جنبشی الکترون اولیه باید به اندازه‌ای باشد که بتواند الکترون‌های دیگری را از سطح دیواره جدا کند. معادلات 15 و 16 به طور دقیق بیان می‌کنند که چگونه شار الکترون‌ها در نتیجه این پدیده‌های فیزیکی تغییر می‌کند. این معادلات معمولاً شامل اصطلاحاتی هستند که نرخ جذب الکترون‌ها، نرخ تولید الکترون‌های جدید و همچنین شار الکترون‌هایی که به سمت دیواره حرکت می‌کنند را توصیف می‌کنند [14]:

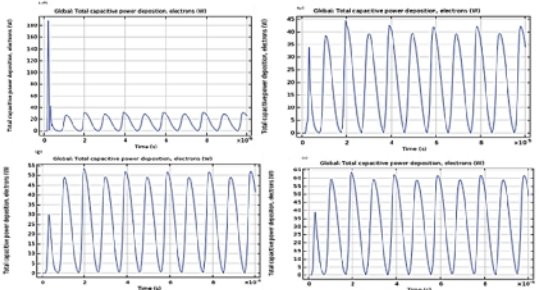
$$\mathbf{n} \cdot \Gamma_e = (1/2)V_{e.th} n_e - \sum_P \gamma_P (\Gamma_P \cdot \mathbf{n}) \quad (15)$$

$$\mathbf{n} \cdot \Gamma_\epsilon = (5/6)V_{e.th} n_\epsilon - \sum_P \epsilon_P \gamma_P (\Gamma_P \cdot \mathbf{n}) \quad (16)$$

جمله دوم در سمت راست معادله (15) نشان دهنده افزایش الکترون‌ها به دلیل اثرات انتشار ثانویه است،  $\gamma_P$  ضریب انتشار ثانویه و  $V_{e.th}$  سرعت حرارتی الکترون است. عبارت دوم در معادله (16) نشان دهنده شار انرژی نشر ثانویه



شکل 1. شکل موج جریان کل در الکتروود زمین شده را برای مقادیر مختلف ثابت دی‌الکتریک از (الف) 6، (ب) 8، (ج) 10، (د) 12.



شکل 2. نمودارهای توان بر حسب زمان برای (DBD) با تغییر ثابت دی‌الکتریک از (الف) 6، (ب) 8، (ج) 10، (د) 12.

شکل 1 تغییرات شکل موج جریان را در الکتروود زمین شده، تحت تأثیر تغییرات ثابت دی‌الکتریک و حضور پلاسما نشان می‌دهد. این نمودار، اطلاعات ارزشمندی را در مورد رفتار سیستم ارائه می‌دهد.

در شرایط ایده‌آل و بدون حضور پلاسما، شکل موج جریان در الکتروود زمین شده، کاملاً سینوسی خواهد بود. این بدان معناست که جریان با فرکانس مشخصی نوسان می‌کند و مقدار آن به صورت سینوسی با زمان تغییر می‌کند. این رفتار ساده، نتیجه مستقیم اعمال یک ولتاژ متناوب به الکتروود و پاسخ خطی سیستم به آن است. حضور پلاسما در محیط اطراف الکتروود، باعث ایجاد یک محیط ناهمگن و غیرخطی می‌شود. حرکت تصادفی ذرات باردار در پلاسما، به ویژه الکترون‌ها، باعث ایجاد جریان‌های الکتریکی اضافی می‌شود. این جریان‌های اضافی، بر جریان اصلی ناشی از ولتاژ اعمال شده، اضافه می‌شوند و در نتیجه، شکل موج جریان کلی از حالت سینوسی ایده‌آل خارج شده و اعوجاج پیدا می‌کند.

**تأثیر بر شکل موج:** تغییر ثابت دی‌الکتریک محیط اطراف الکتروود، بر نحوه تعامل میدان الکتریکی با پلاسما تأثیر می‌گذارد. با افزایش ثابت دی‌الکتریک، شدت میدان الکتریکی در محیط کاهش می‌یابد و در نتیجه، برهم‌کنش بین میدان الکتریکی و ذرات باردار پلاسما کمتر می‌شود. این امر می‌تواند

الکتریکی تبدیل شود و جریان الکتریکی بتواند از آن عبور کند. این جریان الکتریکی تنها در مدت کوتاهی از هر نیم‌سیکل ولتاژ عبور می‌کند و در بقیه زمان، پلاسما به عنوان یک عایق عمل می‌کند.

ماده‌ی الکتریک که بین دو الکتروود قرار دارد، نقش بسیار مهمی در این فرایند ایفا می‌کند. این ماده، با توجه به ثابت دی‌الکتریک خود، می‌تواند میدان الکتریکی را تقویت یا تضعیف کند. ثابت دی‌الکتریک بالاتر به معنای توانایی بیشتر ماده در ذخیره انرژی الکتریکی در میدان الکتریکی است. اگر ثابت دی‌الکتریک ماده‌ی الکتریک بالا باشد، مقدار بیشتری بار الکتریکی در سطح آن تجمع می‌یابد و در نتیجه، میدان الکتریکی القایی قوی‌تری ایجاد می‌شود. این میدان الکتریکی القایی، میدان الکتریکی اصلی را بیشتر خنثی می‌کند و در نتیجه، ولتاژ مؤثر روی پلاسما کاهش می‌یابد. این امر باعث کاهش جریان عبوری از پلاسما و در نتیجه، کاهش توان منتقل شده به تخلیه می‌شود. برعکس، اگر ثابت دی‌الکتریک ماده‌ی الکتریک پایین باشد، مقدار کمتری بار الکتریکی در سطح آن تجمع می‌یابد و در نتیجه، میدان الکتریکی القایی ضعیف‌تری ایجاد می‌شود. این امر باعث می‌شود تا ولتاژ مؤثر روی پلاسما افزایش یابد و در نتیجه، جریان عبوری از پلاسما و توان منتقل شده به تخلیه افزایش یابد.

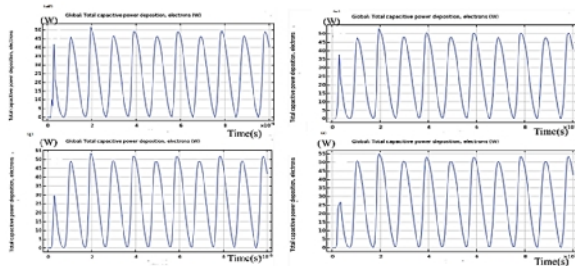
برای یافتن مقدار بهینه ثابت دی‌الکتریک، باید یک تعادل بین دو عامل برقرار شود: اولاً با کاهش ثابت دی‌الکتریک، توان منتقل شده به تخلیه افزایش می‌یابد. ثانياً اگر ثابت دی‌الکتریک خیلی پایین باشد، ممکن است تخلیه ناپایدار شده و به صورت جرقه‌های تصادفی رخ دهد. بنابراین؛ مقدار بهینه ثابت دی‌الکتریک به پارامترهای مختلفی مانند فرکانس ولتاژ، فشار گاز، فاصله بین الکتروودها و جنس ماده‌ی الکتریک بستگی دارد.

هنگامی که ولتاژ متناوب با فرکانس بالا به پلاسما آرگون اعمال می‌شود، تخلیه الکتریکی ایجاد شده و پلاسما جریانی با مقدار متوسط تقریبی  $4/0$  تا  $6/0$  آمپر را در هر نیم‌سیکل ولتاژ عبور می‌دهد. این جریان باعث می‌شود گاز رسنا شده و بار الکتریکی روی سطح ماده‌ی الکتریک تجمع یابد.

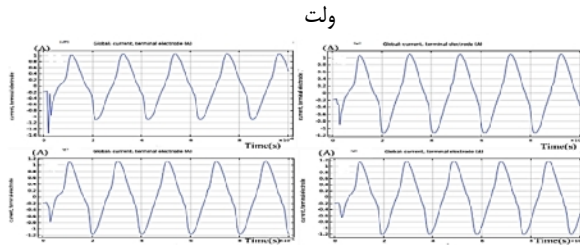
باعث کاهش اعوجاج شکل موج شود

بیشتری رخ می‌دهند.

شکل 2 توزیع توان لحظه‌ای در پلاسمای تولید شده در راکتور تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) را برای نیم‌سیکل‌های مثبت و منفی ولتاژ اعمالی به تصویر می‌کشد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار توان منتقل شده به پلازما در این دو نیم‌سیکل متفاوت است. این عدم تقارن در توزیع توان، عمدتاً به دلیل اختلاف در ضرایب نشر ثانویه الکترون از صفحات بالایی و پایینی راکتور نسبت داده می‌شود. تفاوت در ضرایب نشر ثانویه منجر به ایجاد اختلاف در شدت یونیزاسیون و در نتیجه تفاوت در مقدار توان مصرف شده در هر نیم‌سیکل می‌شود.



شکل 3. نمودارهای جریان تخلیه بر حسب زمان با ثابت دی‌الکتریک و فرکانس ثابت و ولتاژهای مختلف (الف) 700 (ب) 720 (ج) 740 (د) 760 ولت



شکل 4. نمودارهای توان بر حسب زمان برای تخلیه الکتریکی گازی (DBD) با ثابت دی‌الکتریک و فرکانس ثابت و ولتاژهای مختلف (الف) 700 (ب) 720 (ج) 740 (د) 760 ولت.

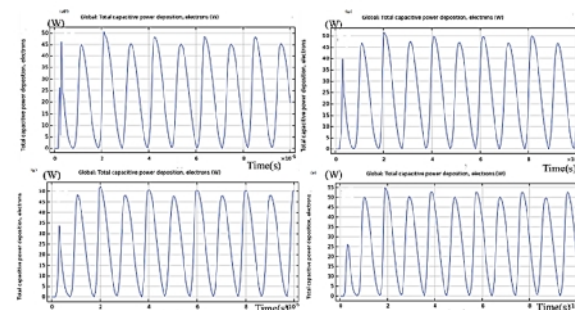
با نادیده گرفتن اولین چرخه فرکانس رادیویی (RF)، میانگین توان توزیع شده در پلازما حدود 18 تا 25 وات برآورد می‌شود. این مقدار نسبتاً کم به دلیل ماهیت کم‌انرژی تخلیه‌های دی‌الکتریکی سد است. تحلیل شکل‌های 2 الف تا 2 د نشان می‌دهد که بیشترین مقدار میانگین توان توزیع شده زمانی حاصل می‌شود که ثابت دی‌الکتریک ماده دی‌الکتریک برابر با 12 باشد. بنابراین؛ در محدوده ثابت‌های دی‌الکتریک بررسی شده، مقدار 12 به عنوان مقدار بهینه ثابت دی‌الکتریک برای بیشترین توزیع توان در نظر گرفته می‌شود.

### تأثیر ولتاژ محرک بر توزیع توان در پلازما

در این بخش، به بررسی تأثیر پارامترهای ولتاژ سینوسی اعمال شده، از جمله دامنه و فرکانس، بر جریان تخلیه و توزیع توان در پلاسمای تولید شده می‌پردازیم.

همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است، با ثابت نگه داشتن ثابت دی‌الکتریک در مقدار 10 و اعمال ولتاژ سینوسی با دامنه‌های مختلف بین 700 تا 760 ولت و فرکانس ثابت 51 کیلوهرتز، تغییرات قابل توجهی در جریان تخلیه پلازما مشاهده می‌شود. با افزایش دامنه ولتاژ، هم میانگین جریان افزایش می‌یابد و هم پیک‌های جریان به مقدار بیشتری می‌رسد. این افزایش جریان نشان‌دهنده افزایش یونیزاسیون در پلازما و در نتیجه افزایش چگالی بار سطحی روی دی‌الکتریک است. دلیل این امر آن است که با افزایش دامنه ولتاژ، الکترون‌ها انرژی کافی برای برانگیختگی و یونیزاسیون اتم‌ها و مولکول‌های گاز را به دست می‌آورند.

شکل 4 نیز تأیید می‌کند که با افزایش ولتاژ اعمال شده، توزیع توان در پلازما به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این بدان معناست که با افزایش ولتاژ، انرژی بیشتری به پلازما منتقل می‌شود و فرآیندهای پلاسمایی با شدت



شکل 5. نمودارهای جریان تخلیه بر حسب زمان با ثابت دی‌الکتریک ثابت 10 و فرکانس‌های مختلف از (الف) 47 (ب) 49 (ج) 50 (د) 51 هرتز.

### تأثیر فرکانس محرک بر توزیع توان در پلازما

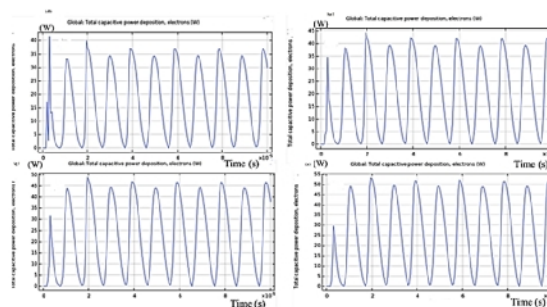
در این بخش، به بررسی تأثیر تغییر فرکانس ولتاژ اعمالی بر رفتار پلازما پرداخته‌ایم. برای این منظور، با ثابت نگه داشتن ولتاژ اعمالی (740 ولت) و ثابت دی‌الکتریک (10)، فرکانس ولتاژ را در محدوده‌ای مشخص تغییر داده‌ایم.

همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس ولتاژ، میانگین جریان تخلیه و همچنین دامنه نوسانات جریان افزایش می‌یابد. این پدیده نشان‌دهنده افزایش یونیزاسیون در پلازما با افزایش فرکانس است.

ذرات شده و در نتیجه چگالی الکترون‌ها و یون‌ها افزایش می‌یابد. افزایش چگالی ذرات باردار باعث افزایش جریان تخلیه و در نتیجه افزایش توان منتقل شده به پلاسما می‌شود.

### نتیجه‌گیری

با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی چند فیزیکی Comsol Multiphysics نسخه 5.6 به صورت شبیه‌سازی عددی، به بررسی فرآیند تشکیل پلاسمای گاز در فشار اتمسفری پرداخته شد. به منظور یافتن شرایط بهینه برای تولید پلاسما، تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله ثابت دی‌الکتریک، ولتاژ و فرکانس اعمال شده بر مشخصات پلاسما بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش ثابت دی‌الکتریک تا مقدار بهینه، میزان توزیع توان در پلاسما به حداکثر می‌رسد. همچنین افزایش ولتاژ و فرکانس اعمال شده باعث افزایش جریان تخلیه و توزیع توان در پلاسما می‌شود.



شکل 6. نمودارهای توان بر حسب زمان با ثابت دی‌الکتریک ثابت 10 و فرکانس‌های مختلف (الف) 47 (ب) 49 (ج) 50 (د) 51 هر تتر.

شکل 6 نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس، هم میانگین توان خازنی و هم دامنه نوسانات توان افزایش می‌یابد. این بدین معناست که با افزایش فرکانس انرژی بیشتری به پلاسما منتقل می‌شود. افزایش فرکانس ولتاژ منجر به افزایش تعداد برخوردهای الکترون‌ها با ذرات گاز در واحد زمان می‌شود. این برخوردها باعث یونیزاسیون و برانگیختگی بیشتر

### References

- [1] M. M. Nasiru, E. B. Frimpong, U. Muhammad, J. Qian, A. T. Mustapha, W. Yan, H. Zhuang and J. Zhang, Compr. Impact of dielectric barrier discharge cold plasma on the lipid oxidation, color stability, and protein structures of myoglobin-added washed pork muscle. *Rev. Food Sci. Food Saf*, 20, 2626 (2021).
- [2] R. Snoeckx and A. Bogaerts, Plasma technology – a novel solution for CO<sub>2</sub> conversion *Chem. Soc. Rev* 46, 5805 (2017).
- [3] 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 convers. manage*, 183, 529-560 (2019).
- [4] N. Dadashzadeh, E. Poorreza, Vahide Mohadesi, The Investigating and Simulating the Corona Phenomenon in The Power Transmission Lines of Power Networks Using the Finite Element Method, *Majlesi Journal of Telecommunication Devices. Vol. 12, No. 1, pp.49-52*, (2023). DOI: [10.30486/mjtd.2023.1981758.1030](https://doi.org/10.30486/mjtd.2023.1981758.1030)
- [5] N. Dadashzadeh and E. Poorreza, Comparative analysis and simulation of a dielectric discharge barrier reactor using the finite element method, *Quarterly Journal of Optoelectronic* 6 (3), 7-16 (2024). <https://doi.org/10.30473/jphys.2024.69563.1172>
- [6] E. Poorreza and N. Dadashzadeh Gargari, Computational Study of an Inductively Coupled Plasma with Different Copper Coil Designs and Dielectric Thickness *Russian Journal of Physical Chemistry A* 98, pp. 249-256. (2024). <https://doi.org/10.1134/S00360244240>

### منابع

- [7] E. Poorreza and N. Dadashzadeh, Modeling and Finite element analysis of argon gas plasma produced by inductively coupled plasma method with variable input power, coil position and dielectric thickness, *Quarterly Journal of Optoelectronic* 6 (1), 33-40 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1990793123030235>.
- [8] Noushin Dadashzadeh, Optimization of Electricity Consumption using Dielectric Barrier Discharge Method (DBD), *Majlesi Journal of Electrical Engineering* 17 (1), 117-121 (2023) <https://doi.org/10.30486/mjee.2023.1975011.1024>.
- [9] G. Neretti, A. Popoli, S.G. Scaltriti, A. Cristofolini, "Real Time Power Control in a High Voltage Power Supply for Dielectric Barrier Discharge Reactors: Implementation Strategy and Load Thermal Analysis," *Electronics*, 11(10) (2022) 1536.
- [10] E. Poorreza and N. Dadashzadeh Gargari, Modeling and simulation of a microwave-assisted plasma with different input power for plasma-based applications, *Russ. J. Phys. Chem. B* 17 719–724 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1990793123030235>.
- [11] J. Hnilica, J. Schäfer, R. Foest, L. Zajíčková, V. Kudrle, PECVD of nanostructured SiO<sub>2</sub> in a modulated microwave plasma jet at atmospheric pressure, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(33) (2013) 335202.
- [12] A. M. Lopez, H. Piquet, D. Patino, R. Diez and X. Bonnin, Parameters identification and gas behavior characterization of DBD systems. *IEEE* 50224

- Trans plasma sci* 41, 2335 (2013).
- [13] N. Jidenko, C. Jimenez, F. Massines, J. Borra, "Nano - particle size -dependent charging and electro - deposition in dielectric barrier discharges at atmospheric pressure for thin SiO<sub>x</sub> film deposition," *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(14) (2007) 4155.
- [14] F. Sohbatzadeh and H. Soltani, Time-dependent one-dimensional simulation of atmospheric dielectric barrier discharge in N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O using COMSOL Multiphysics, *Journal of Theoretical and Applied Physics*, vol. 12, no. 1, 53-63, 2018.
- [15] S. Das, G. Dalei, 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, *IOP Publishing*, (2018), 012004.
- [16] 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, *Russ. J. Phys. Chem. B* 17 (3) (2023). DOI:10.1134/S1990793123030107.