

بررسی عددی خواص فیزیکی و شیمیایی تخلیه الکتریکی با سد دی الکتریک در ترکیب کم فشار آرگون-اکسیژن

آزاده برجسته^۱ و حامد سلطانی احمدی^۲

۱. دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم آباد

۲. دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر

پست الکترونیکی: Barjasteh.a@lu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۵/۰۱/۱۸)

چکیده:

با توجه به پیشرفت روزافزون فناوری پلاسما و گسترده‌ی کاربرد آن در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی و صنعتی، بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی پلاسمای تولیدشده در شرایط مختلف و با ترکیب‌های گازی متفاوت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مطالعه، شبیه‌سازی تخلیه الکتریکی با سد دی الکتریک در فشار ۴۰۰ پاسکال و اعمال ولتاژ سینوسی با دامنه ۳۵۰ ولت و فرکانس ۷ کیلوهرتز، خواص فیزیکی و شیمیایی ترکیب گازی آرگون-اکسیژن در پلاسمای تولیدشده مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، گاز آرگون به عنوان گاز زمینه در نظر گرفته شد و اکسیژن را در پنج سطح مختلف با درصدهای ۱٪، ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۵۰٪ به آن افزوده شد. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار تجاری COMSOL Multiphysics انجام شد و پارامترهایی از قبیل منحنی مشخصه ولتاژ-جریان، توزیع چگالی گونه‌های مختلف، و توزیع دمای الکترون، بررسی شدند. هدف از این پژوهش، بررسی تحول زمانی ویژگی‌های سینتیکی و چگالی گونه‌های مختلف تولید شده، مانند اوزون و اکسیژن تک‌اتمی است که نقش اساسی در فرایندهای استریلیزاسیون ایفا می‌کنند و کنترل مقادیر آنها می‌تواند بازده سامانه را افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: تخلیه الکتریکی با سد دی الکتریک، شبیه‌سازی COMSOL، ترکیب آرگون-اکسیژن، خواص فیزیکی-شیمیایی، تخلیه کم فشار

۱. مقدمه

تخلیه الکتریکی با سد دی الکتریک (DBD)^۱، که گاهی اوقات به عنوان تخلیه سد یا تخلیه خاموش نیز شناخته می‌شود، فناوری گسترده‌ای است که بیش از یک قرن قدمت دارد نام‌گذاری این نوع از تخلیه به این خاطر است که در آن، حداقل یک لایه دی الکتریک در فضای تخلیه، بین دو الکتروود، قرار می‌گیرد. این لایه دی الکتریک بار و جریان منتقل شده توسط تخلیه را محدود کرده و بدین ترتیب، از

تشکیل جرقه یا تخلیه قوس الکتریکی جلوگیری می‌کند. از سوی دیگر، انرژی الکتریکی جفت‌شده در پلاسمای DBD عمدتاً به الکترون‌های پرانرژی منتقل می‌شود، در حالی که گاز خنثی نزدیک به دمای محیط باقی می‌ماند. از همین رو، این تخلیه به عنوان پلاسمای سرد نیز در نظر گرفته می‌شود. حضور این الکترون‌های پرانرژی سبب می‌شود واکنش‌هایی که در دمای معمولی در گازها رخ نمی‌دهند، در این تخلیه‌ها به راحتی انجام شوند. از جمله کاربردهای این راکتور پلاسمایی می‌توان به تولید اوزون [۱-۳]، کاربردهای پزشکی [۴]، استریلیزاسیون سطوح [۵] و ... اشاره کرد. به طور کلی

۱. Dielectric Barrier Discharge

است. جدول ۱ شرایط اولیه و پارامترهای ورودی به نرم افزار را نشان می‌دهد.

مطابق با شکل ۱، در قسمت دیواره‌ها واکنش‌های سطحی به‌منظور گسیل ثانویه الکترون و در ناحیه پلاسما، سایر واکنش‌های بین گونه‌های سنگین، یونیزاسیون، برانگیختگی و چسبندگی تعریف شده‌اند. در این مطالعه، از ۶۹ واکنش مختلف در ترکیب گازی آرگون-اکسیژن، مطابق با منبع [۱۰] استفاده شد که در جدول ۱ نیز به طور کامل آورده شده‌اند. ذراتی از جمله الکترون با چگالی اولیه 10^{13} cm^{-3} ، یون‌های آرگون Ar^+ ، Ar^{2+} با چگالی اولیه 10^{10} cm^{-3} و یون‌های اکسیژن O^+ ، O_2^+ ، O^- با چگالی اولیه 10^{10} cm^{-3} در نظر گرفته شدند. شرط شبه‌خستگی‌ای نیز برقرار است. همچنین، حالت‌های برانگیخته آرگون شامل اتم‌های آرگون فوق پایدار Ar_m^* و حالت تابشی آرگون از جمله Ar_n^* و نیز اتم‌های اکسیژن O و مولکول‌های اوزون در نظر گرفته شدند.

۱.۲. معادلات به کاررفته

در ماژول پلاسما در نرم افزار COMSOL، تحرک الکترون و چگالی انرژی الکترون بر اساس سطح مقطع برخورد واکنش‌ها و تحت تأثیر میدان الکتریکی اعمال‌شده محاسبه می‌شوند. همچنین، تغییرات شیمی سطح به واکنش‌های رخ داده در سطوح (الکترودها) اشاره دارد که در آن، شرایط مرزی برای گونه‌های مختلف و نرخ تولید و نابودی آن‌ها بررسی می‌شود [۱۱، ۶].

چگالی و انرژی میانگین الکترون با حل جفت معادلات سوق و پخش به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

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

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

نرخ انرژی ناشی از برخوردهای کشسان در معادله ۳ و چگالی انرژی الکترون در معادله ۴ نشان داده شده است.

$$R_e = S_{en} + (Q + Q_{gen})/q \quad (3)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{\Gamma}_e + \vec{E} \cdot \vec{\Gamma}_e = R_e - (\vec{u} \cdot \nabla) n_e \quad (4)$$

معادله پیوستگی گونه‌های یونی، به شکل معادله ۵ حل می‌شود:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i \vec{u}) = -\nabla \cdot (\mu_i n_i q_i \nabla \phi - D_i \nabla n_i) n_e + S_i \quad (5)$$

به دلیل مزایای خاص DBD مانند پایداری، هزینه کم و توان بالا، این نوع تخلیه‌ها به‌طور گسترده برای افزایش بازده انرژی در کاربردهای مختلف استفاده می‌شود. در سامانه/دستگاه DBD، الکترون‌های زمینه انرژی مورد نیاز را برای برخورد‌های یونیزاسیون در کانال تخلیه، از میدان الکتریکی دریافت می‌کنند و با تولید الکترون‌های بیشتر تحت فرآیند بهمن الکترونی، محیط تاحدی یونیزه شده و پلاسما تولید می‌شود [۶]. انتخاب گاز عامل و ترکیب گازی مناسب می‌تواند نقش حیاتی در بهینه‌کردن بازده تولید گونه‌های مختلف، به‌ویژه اوزون، و افزایش بهره‌وری انرژی سامانه داشته باشد [۷]. بسیاری از مطالعات تجربی و شبیه‌سازی پیرامون تخلیه DBD با ترکیب گازی، از مقایسه ترکیب‌های گازی آرگون-اکسیژن یا هلیوم-اکسیژن استفاده کرده‌اند [۸، ۹] و گزارش شده است که ترکیب گازی آرگون-اکسیژن نسبت به هلیوم-اکسیژن دارای بازده انرژی بیشتر و تولید اتم اکسیژن بالاتری است. در پژوهش حاضر، به دنبال آن هستیم تا با تغییر درصد اکسیژن ترکیب‌شده با گاز زمینه آرگون، خواص فیزیکی و شیمیایی محیط پلاسمای ایجاد شده را بررسی کنیم. برای این منظور، توصیف مدل شبیه‌سازی و معادلات به کاررفته در بخش دوم و بحث و نتیجه‌گیری در بخش سوم ارائه شده‌اند.

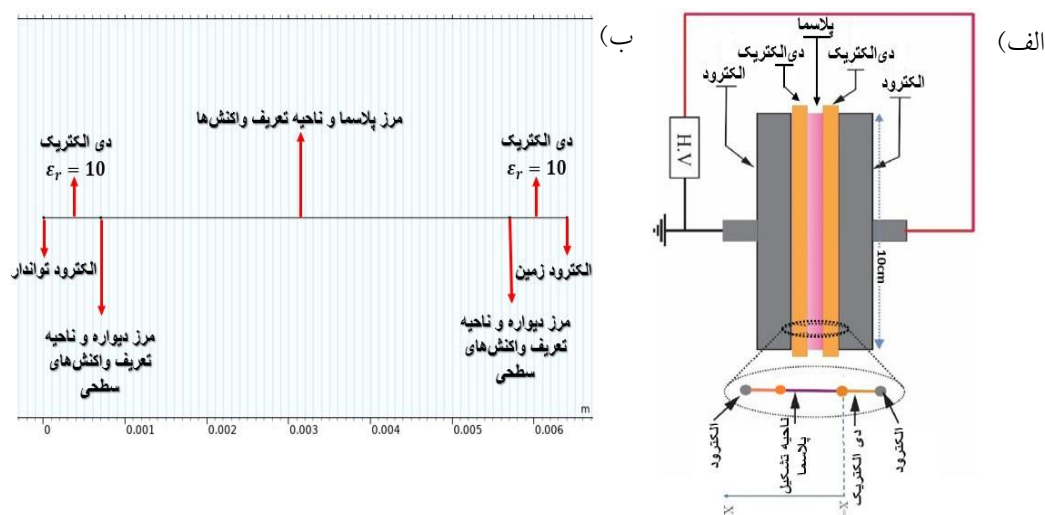
۲. مواد و روش‌ها

شبیه‌سازی با استفاده از ماژول پلاسما در نرم افزار COMSOL نسخه ۶.۲ انجام شده است. به‌منظور بررسی تأثیر درصدهای مختلف گاز اکسیژن (شامل ۱، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ درصد) در گاز زمینه آرگون در یک تخلیه DBD با فشار پایین (۴۰۰ Pa)، از یک مدل یک بعدی شامل نقطه و خط استفاده کردیم. مطابق با شکل ۱ که هندسه کلی سامانه و شرایط مرزی را نشان می‌دهد، ضخامت دی‌الکتریک‌ها و کانال تخلیه به ترتیب ۷/۰ و ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. الکترودها سمت راست به زمین متصل شده است و الکترودها سمت چپ به یک منبع ولتاژ سینوسی با فرکانس ۷ KHz و ولتاژ قله تا قله ۷۰۰ V متصل

۳۲	$e+O \Rightarrow OD+e$	$4.2 \times 10^{-9} \exp(-2.25/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۳۳	$e+OD \Rightarrow O+e$	$8 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$
۳۴	$e+OD \Rightarrow O^++2e$	$9 \times 10^{-9} T_e^{-V} \exp(-11.6/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۳۵	$e+O \Rightarrow O^++2e$	$9 \times 10^{-9} T_e^{-V} \exp(-13.6/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۳۶	$e+O_r \Rightarrow O_r+O$	$1 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$
۳۷	$e+O^+ \Rightarrow O+2e$	$2 \times 10^{-V} \exp(-5.5/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۳۸	$e+O_r^+ \Rightarrow 2O+e$	$2.2 \times 10^{-9} T_e^{-V} \exp(-5.5/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۳۹	$O+O_2^+ \Rightarrow O+O_r$	$2 \times 10^{-V} (T_e/T_g)^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
۴۰	$O+O \Rightarrow e+O_r$	$5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
۴۱	$O+O_r^+ \Rightarrow 2O$	$1 \times 10^{-V} \text{ cm}^3/\text{s}$
۴۲	$O+O^+ \Rightarrow 2O$	$2 \times 10^{-V} (T_e/T_g)^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
۴۳	$O^++O_r \Rightarrow O+O_r^+$	$2 \times 10^{-11} (T_e/T_g)^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
۴۴	$O_r^++O_r \Rightarrow 2O_r^+$	$2.2 \times 10^{-10} (T_e/T_g)^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
۴۵	$O_r^++O \Rightarrow O+O_r^+$	$7 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
۴۶	$OD+O \Rightarrow 2O$	$8 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
۴۷	$OD+O_r \Rightarrow O+O_r$	$6.4 \times 10^{-10} \exp(6.7/T_g) \text{ cm}^3/\text{s}$
۴۸	$OD+O_r \Rightarrow O+O_r^+$	$1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
۴۹	$O+O_r \Rightarrow O_r+e$	$5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
۵۰	$O+O_r^+ \Rightarrow O_r+e$	$3 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
۵۱	$O+O_r^+ \Rightarrow O_r+O$	$1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
۵۲	$O_r+O_r \Rightarrow 2O_r+O$	$7.3 \times 10^{-11} \exp(-11.4/T_g) \text{ cm}^3/\text{s}$
۵۳	$O_r+O \Rightarrow 2O_r$	$1.8 \times 10^{-11} \exp(-23/T_g) \text{ cm}^3/\text{s}$
۵۴	$O_r+O+O \Rightarrow 2O_r$	$2.5 \times 10^{-13} T_g^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
۵۵	$O_r+O_r+O \Rightarrow O_r+O_r$	$6.9 \times 10^{-13} (T_e/T_g)^{-1.25} \text{ cm}^3/\text{s}$
۵۶	$O_r^++O_r \Rightarrow 2O_r+O$	$6 \times 10^{-11} \exp(-28.3/T_g) \text{ cm}^3/\text{s}$
۵۷	$O+O_r \Rightarrow O_r+O$	$8 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
۵۸	$O+O_r \Rightarrow O_r^++O_r$	$1 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$
۵۹	$O_r+O_r^+ \Rightarrow 2O_r$	$2 \times 10^{-V} (T_e/T_g)^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
۶۰	$O^++O_r \Rightarrow O_r+O$	$2 \times 10^{-V} (T_e/T_g)^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
۶۱	$O_r^++O_r \Rightarrow O_r+2O$	$1 \times 10^{-V} \text{ cm}^3/\text{s}$
۶۲	$O_r+O_r^+ \Rightarrow O_r^++O_r$	$3.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
۶۳	$OD+O_r \Rightarrow O_r+2O$	$1.2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
۶۴	$OD+O_r \Rightarrow 2O_r$	$1.2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
۶۵	$O_r+Ar^+ \Rightarrow O_r+Ar$	$1 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$
۶۶	$O+Ar^+ \Rightarrow O+Ar$	$8.1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
۶۷	$O_r+Ar^+ \Rightarrow 2O+Ar$	$5.8 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$
۶۸	$O_r+Ar^+ \Rightarrow O_r^++Ar$	$1.2 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$
۶۹	$O+Ar^+ \Rightarrow O+Ar$	$1.2 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$

جدول ۱- واکنش های استفاده شده در شبیه سازی به همراه نرخ آنها

شماره واکنش	فرمول واکنش	ضریب نرخ
۱	$e+Ar \Rightarrow 2e+Ar^+$	$2.3 \times 10^{-9} T_e^{-0.5} \exp(-15.76/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۲	$e+Ar \Rightarrow e+Ar_m^*$	$2.5 \times 10^{-9} T_e^{-0.5} \exp(-11.56/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۳	$e+Ar \Rightarrow e+Ar_r^*$	$2.5 \times 10^{-9} T_e^{-0.5} \exp(-11.56/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۴	$e+Ar \Rightarrow e+Ar^*$	$1.4 \times 10^{-9} T_e^{-0.5} \exp(-13.2/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۵	$e+Ar_r^* \Rightarrow 2e+Ar^+$	$6.8 \times 10^{-9} T_e^{-0.5} \exp(-4.2/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۶	$e+Ar_r^* \Rightarrow e+Ar$	$4.3 \times 10^{-11} T_e^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
۷	$e+Ar_r^* \Rightarrow e+Ar_m^*$	$3 \times 10^{-V} \text{ cm}^3/\text{s}$
۸	$e+Ar_r^* \Rightarrow e+Ar^+$	$8.9 \times 10^{-9} T_e^{-0.5} \exp(-1.59/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۹	$e+Ar^* \Rightarrow 2e+Ar^+$	$6.8 \times 10^{-9} T_e^{-0.5} \exp(-4.2/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۱۰	$e+Ar_m^* \Rightarrow e+Ar$	$4.3 \times 10^{-11} T_e^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
۱۱	$e+Ar_m^* \Rightarrow e+Ar_r^*$	$2 \times 10^{-V} \text{ cm}^3/\text{s}$
۱۲	$e+Ar_m^* \Rightarrow e+Ar^+$	$8.9 \times 10^{-9} T_e^{-0.5} \exp(-1.59/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۱۳	$e+Ar^* \Rightarrow 2e+Ar^+$	$1.8 \times 10^{-9} T_e^{-0.5} \exp(-2.6/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۱۴	$e+Ar^* \Rightarrow e+Ar$	$3.9 \times 10^{-11} T_e^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
۱۵	$e+Ar^* \Rightarrow e+Ar_r^*$	$1.5 \times 10^{-V} T_e^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
۱۶	$e+Ar^* \Rightarrow e+Ar_m^*$	$1.5 \times 10^{-V} T_e^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{s}$
۱۷	$Ar_r^* \Rightarrow Ar+h\nu$	$2 \times 10^{-9} \text{ s}$
۱۸	$Ar_m^* \Rightarrow Ar+h\nu$	$2 \times 10^{-9} \text{ s}$
۱۹	$Ar^* \Rightarrow Ar_r^*+h\nu$	$3 \times 10^{-9} \text{ s}$
۲۰	$Ar^* \Rightarrow Ar_m^*+h\nu$	$3 \times 10^{-9} \text{ s}$
۲۱	$Ar^++e \Rightarrow Ar_r^*+h\nu$	$1 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$
۲۲	$Ar^++e \Rightarrow Ar_m^*+h\nu$	$1 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$
۲۳	$Ar^++e \Rightarrow Ar^*+h\nu$	$1 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$
۲۴	$e+O_r \Rightarrow O_r^++e$	$1.7 \times 10^{-9} \exp(-3.1/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۲۵	$e+O_r \Rightarrow O+OD+e$	$5 \times 10^{-9} \exp(-8.4/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۲۶	$e+O_r \Rightarrow 2O+e$	$4.2 \times 10^{-9} \exp(-5.6/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۲۷	$e+O_r \Rightarrow O+O$	$8.8 \times 10^{-11} \exp(-4.4/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۲۸	$e+O_r \Rightarrow O_r^++2e$	$9 \times 10^{-11} T_e^{0.5} \exp(-12.6/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۲۹	$e+O_r \Rightarrow O+O^++e$	$7.1 \times 10^{-11} T_e^{0.5} \exp(-17/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۳۰	$e+O_r \Rightarrow O+O^++2e$	$5.3 \times 10^{-11} T_e^{0.5} \exp(-2/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$
۳۱	$e+O_r^* \Rightarrow e+O_r$	$5.6 \times 10^{-9} \exp(-2.2/T_e) \text{ cm}^3/\text{s}$



شکل ۱. (الف) تصویر شماتیک سامانه تخلیه DBD با دو دی الکتریک و (ب) شرایط مرزی شبیه سازی مدل یک بعدی

در این معادلات، n_e چگالی الکترون؛ $\vec{\Gamma}_e$ شار الکترون، $\vec{u}$ سرعت میانگین گونه ها، R_e نرخ تولید الکترون، D_e ضریب پخش الکترون، R_e نرخ انرژی برخورد های غیر الاستیک کشسان، Q_{gen} منبع اصلی گرما، Q_e چگالی انرژی الکترون، S_i منبع تولید یون، n_i چگالی یونی، ϕ پتانسیل الکترواستاتیکی، و S_{en} اتلاف توان هستند. به عنوان شرایط مرزی، گسیل الکترون های ثانویه ناشی از برخورد یون ها و ذرات فوق پایدار در نظر گرفته می شود. ضریب گسیل ثانویه در این شبیه سازی برای تمام یون های مثبت و ذرات فوق پایدار ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است [۱۲].

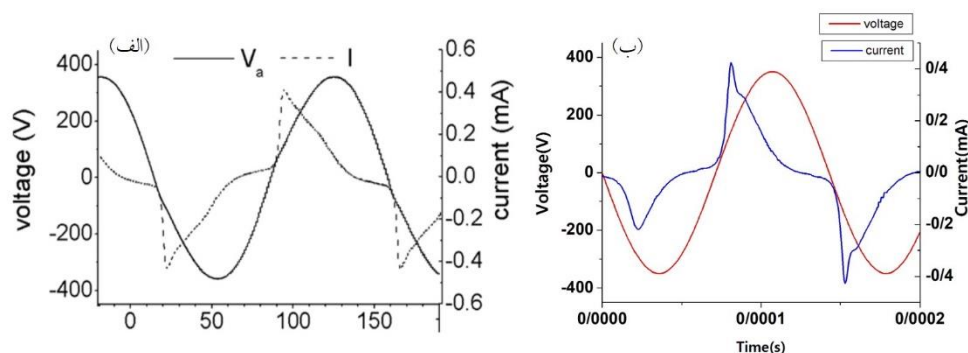
۳. بحث و نتایج

جهت اعتبار سنجی مدل شبیه سازی شده، منحنی جریان-ولتاژ به دست آمده از نرم افزار COMSOL با نتایج به دست آمده از پژوهش تجربی در مرجع [۱۲] با هم مقایسه شد. شکل ۲ این مقایسه و اعتبار نتایج شبیه سازی را نشان می دهد.

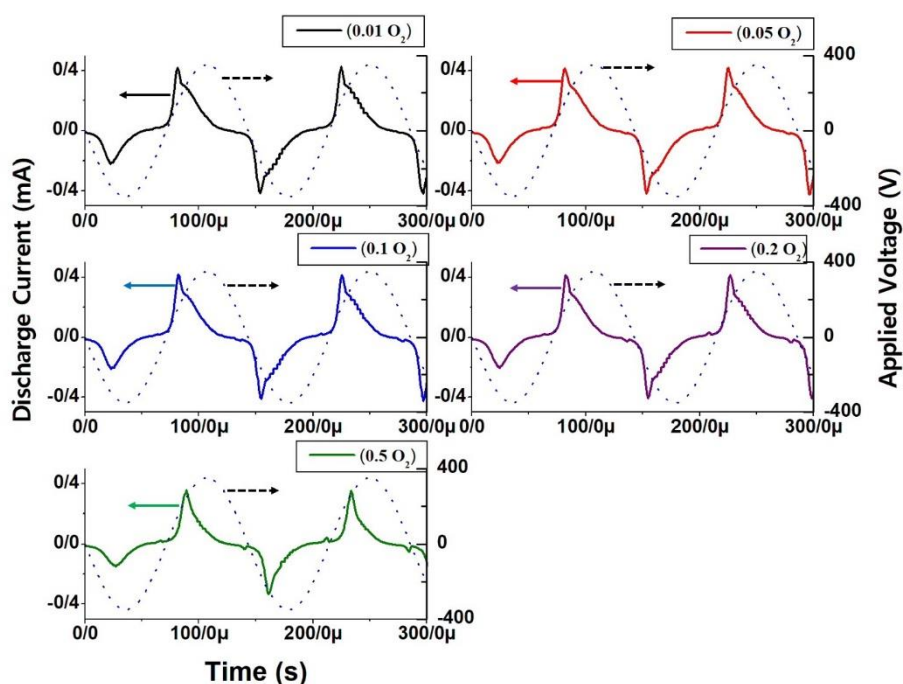
همان طور که در این شکل مشاهده می شود، تخلیه در هر نیم چرخه از ولتاژ اعمال شده دارای یک پالس جریان است که دامنه جریان برای هر دو قطب مثبت و منفی یکسان است. این رفتار بیانگر برقراری تخلیه glow یا درخشان در فشار کم است.

در این نمودار، اختلاف فازی نزدیک به $\pi/2$ بین ولتاژ اعمال شده و جریان وجود دارد که بیانگر ماهیت خازنی DBD است. زمانی که ولتاژ گاز از ولتاژ شکست عبور می کند، فرآیند شکست ایجاد می شود. در این لحظه، جریان به بیشینه مقدار خود می رسد و سپس، به دلیل تجمع بار روی سطوح دی الکتریک، ولتاژ گاز و در نتیجه جریان کاهش می یابد. پس از اعتبار سنجی مدل، به منظور بررسی اثر افزودن اکسیژن بر، منحنی مشخصه ولتاژ-جریان برای ۵ مقدار درصد اکسیژن ترکیب شده با گاز آرگون در شکل ۳ ترسیم شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، در هر چرخه از ولتاژ اعمال شده، یک قله جریان متناظر با شکست گاز وجود دارد. به وضوح مشخص است که با افزایش مقدار اکسیژن از ۱٪ تا ۵٪، بیشینه مقدار جریان به ترتیب از ۰/۴۱ میلی آمپر به ۰/۳۵ میلی آمپر کاهش می یابد. به منظور بررسی بهتر اثر افزودن اکسیژن، منحنی های جریان یونی کل و جریان الکترونی در شکل ۴ رسم شده اند. در این شکل، به وضوح کاهش چگالی جریان یونی و الکترونی با افزایش مقدار اکسیژن مشاهده می شود. به طور کلی، جریان در تخلیه های DBD از سه بخش کلی، شامل جریان الکترونی، جریان یونی و جریان جابجایی ناشی از تغییر میدان الکتریکی، تشکیل می شود و به صورت

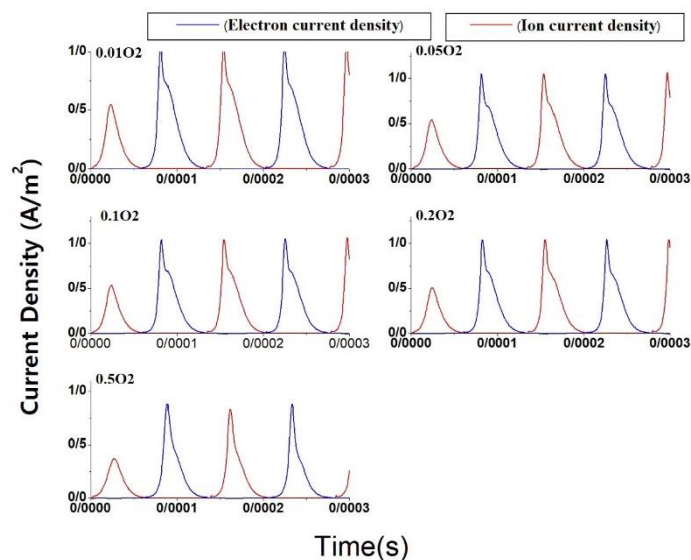
$$I_{total} = I_e + I_{ion} + I_{dis} \text{ مقابل بیان می گردد:}$$



شکل ۲. الف) منحنی ولتاژ- جریان به دست آمده از کار تجربی [۱۲] (ب) منحنی ولتاژ- جریان به دست آمده از شبیه سازی



شکل ۳. منحنی جریان- ولتاژ برای ترکیبات گازی مختلف آرگون- اکسیژن



شکل ۴. تغییر جریان یونی کل و الکترون ها برای ترکیبات مختلف آرگون- اکسیژن

است، بیشتر بوده و به سمت مرکز تخلیه، تعداد آن‌ها کاهش می‌یابد. با افزایش میزان اکسیژن، سهم واکنش‌های جذب الکترونی آن‌قدر افزایش می‌یابد که حتی الکترون‌های به شدت پرنرژی تولیدشده در نواحی نزدیک به الکترودها نیز توسط اتم‌های اکسیژن جذب می‌شوند.

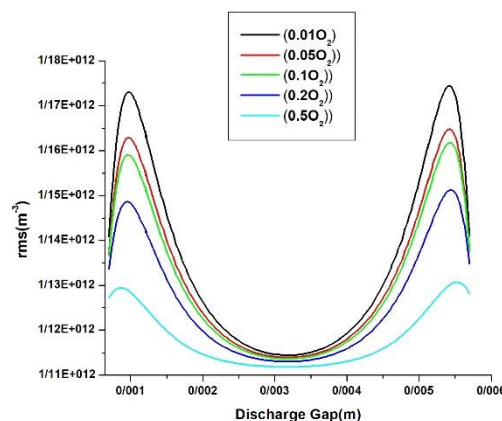
برای بررسی اثر افزودن اکسیژن بر دمای الکترون‌ها در فضای تخلیه، تحول فضا-زمانی دمای الکترونی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار اکسیژن، دمای الکترون‌ها افزایش می‌یابد؛ به این معنا که الکترون‌ها در هر نیم‌چرخه از ولتاژ اعمال شده، انرژی کمتری از دست می‌دهند. افزایش دمای الکترون به دو دلیل رخ می‌دهد [۱۳]:

الف) حذف ترجیحی الکترون‌های کم‌انرژی از طریق سازوکار چسبندگی الکترونی.

ب) کاهش راندمان سرد شدن جمعیت الکترونی به دلیل تغییر در سازوکارهای اتلاف انرژی.

همان‌طور که از شکل‌های ۶ و ۷ مشخص است افزایش دمای الکترونی به معنای افزایش تعداد الکترون‌ها نیست؛ چراکه برای افزایش یونیزاسیون، نه تنها باید الکترون‌ها پرنرژی باشند، بلکه تعداد ذرات گازی هدف نیز باید به مقدار کافی در دسترس باشند. همان‌طور که در مراجع [۱۴، ۱۵] بیان شده است، اتم‌های اکسیژن و مولکول‌های اوزون نقش اساسی را در فرایندهای استریلیزاسیون ایفا می‌کنند؛ زیرا این ذرات فعال، با آسیب‌رساندن به غشای سلولی و اکسید کردن دیواره سلولی میکروارگانیسم‌ها، موجب نابودی آن‌ها می‌شوند. به همین منظور، جذر میانگین مربعی چگالی اتم‌های اکسیژن و مولکول‌های اوزون در زمان 3×10^{-4} ثانیه در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار اکسیژن، جذر میانگین مربعی چگالی اتم‌های اکسیژن و مولکول‌های اوزون افزایش می‌یابد.

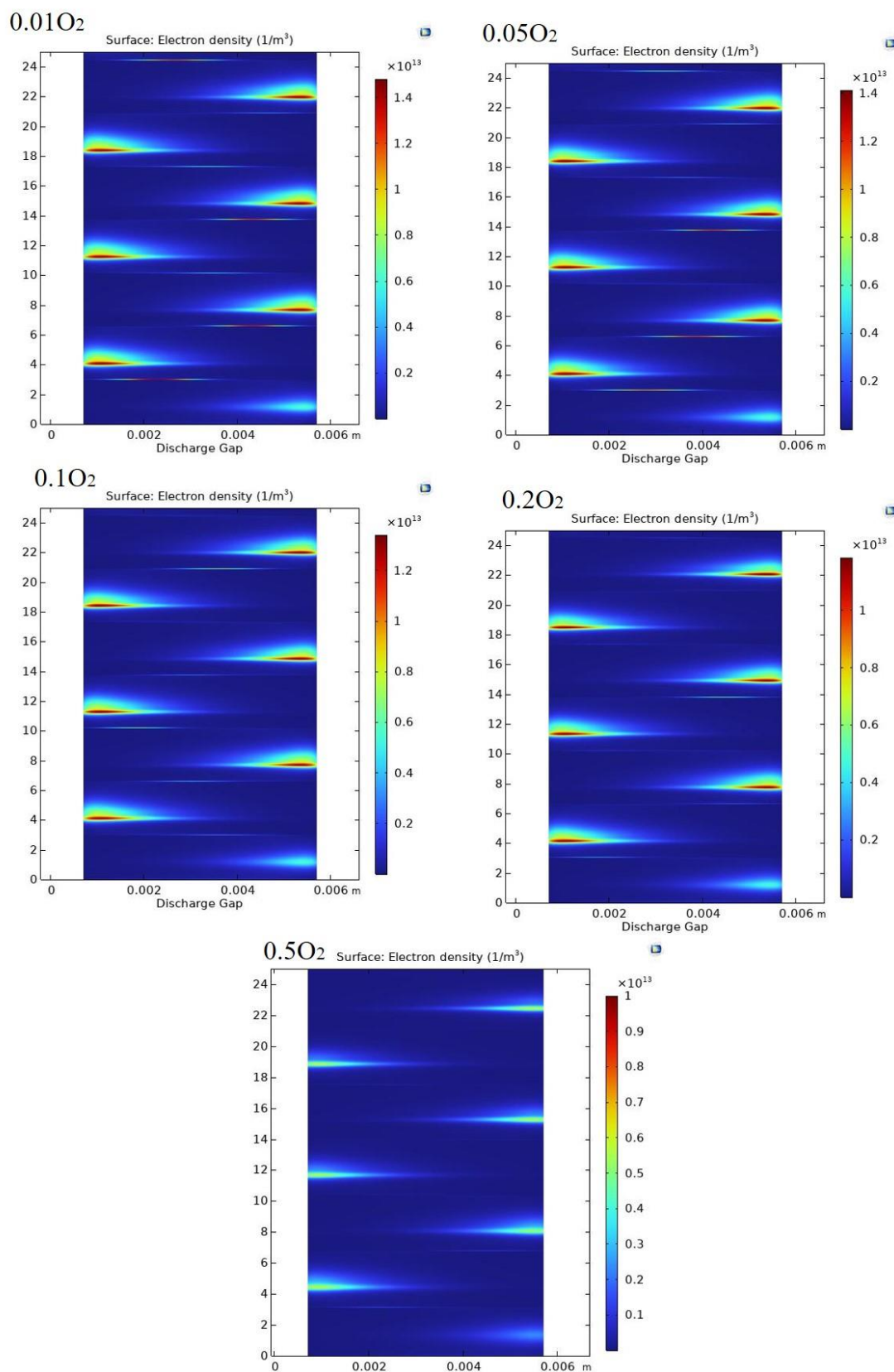
اما آنچه به طور واضح از این شکل مشهود است، این است که چگالی اتم‌های اکسیژن، به جز برای ترکیب ۱٪ اکسیژن-۹۹٪ آرگون، در سایر ترکیب‌های آرگون- اکسیژن در مرتبه 10^{16} cm^{-3} قرار دارد.



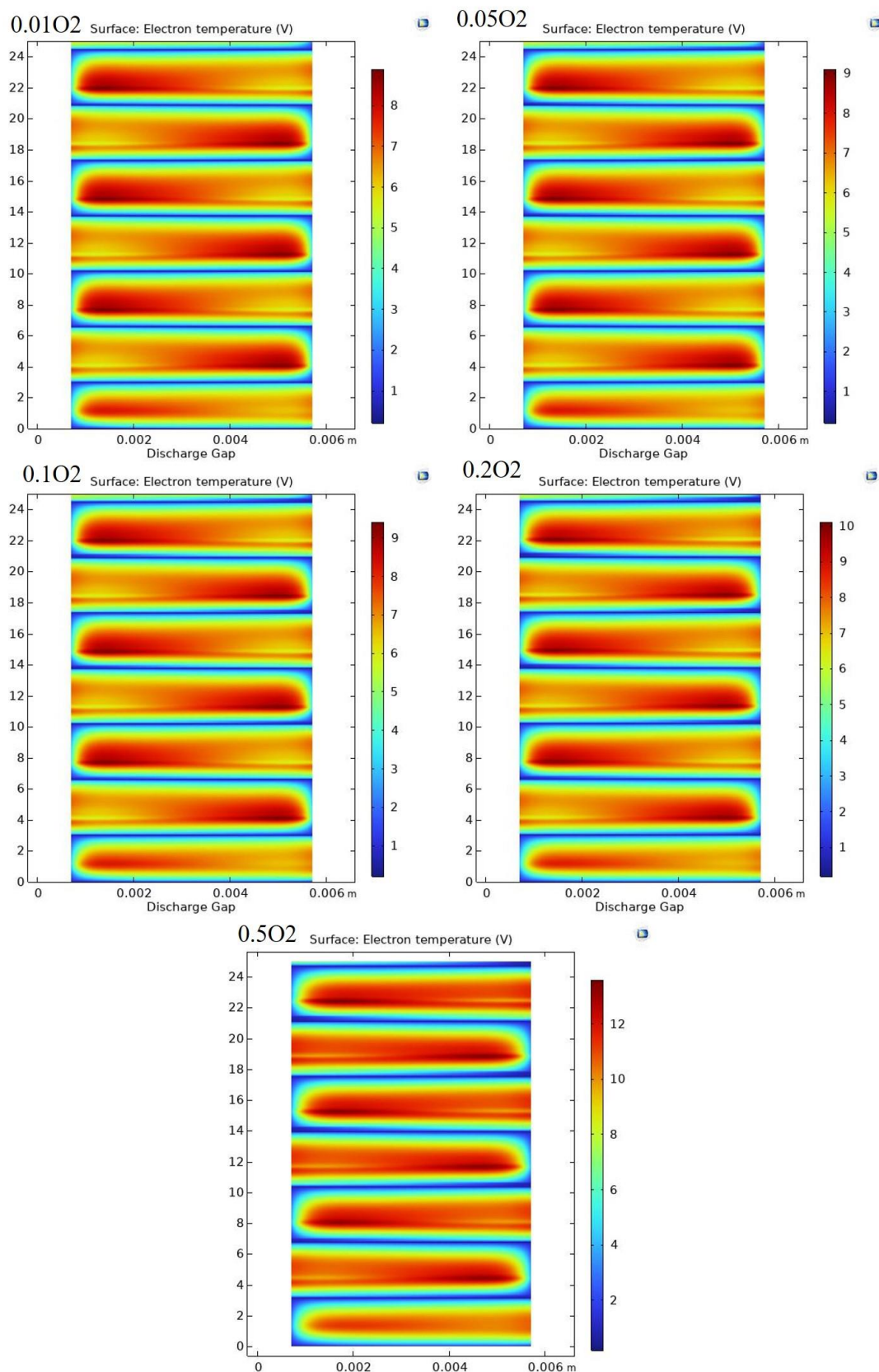
شکل ۵. تغییر جذر میانگین مربعی (rms) چگالی الکترون‌ها برای ترکیبات مختلف آرگون- اکسیژن تا زمان 3×10^{-4} ثانیه

با افزایش میزان اکسیژن، چگالی جریان کل کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند به دلیل تغییر در هر یک از مؤلفه‌های جریان ایجاد شود. در این تخلیه، با توجه به ثابت بودن ولتاژ اعمال‌شده، کاهش جریان کل را می‌توان ناشی از کاهش جریان یونی کل و جریان الکترونی دانست. کاهش جریان ناشی از کاهش تعداد الکترون‌ها، به جذب آن‌ها توسط مولکول‌های اکسیژن از طریق فرآیند الکترون‌خواهی مربوط می‌شود؛ زیرا این الکترون‌ها از طریق واکنش‌های $e + O_2 \rightarrow O^- + O$ و $e + O_2 \rightarrow O^- + O^+ + e$ و $e + O_2 \rightarrow O^- + O$ مولکول‌های اکسیژن متصل می‌شوند. بنابراین، تعداد الکترون‌های آزاد در محیط کاهش می‌یابد.

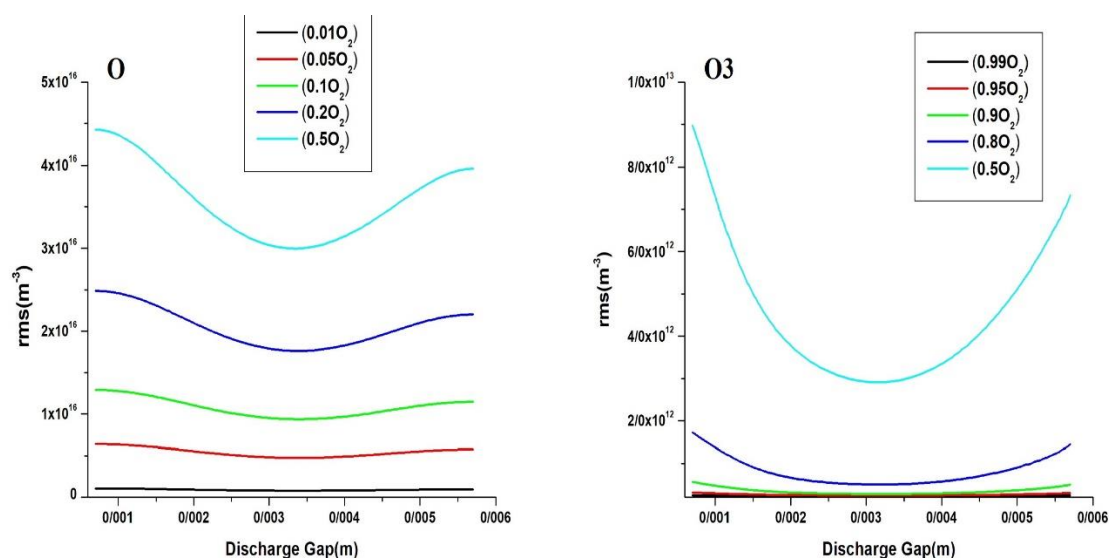
درستی این موضوع در شکل ۵ و ۶ نیز نشان داده شده است. شکل ۵ تغییرات جذر میانگین مربعی چگالی الکترون‌ها را در زمان 3×10^{-4} ثانیه برای ترکیب گاز آرگون با درصدهای مختلف گاز اکسیژن نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش میزان اکسیژن، چگالی الکترون‌ها در محیط و به دنبال آن، چگالی جریان کاهش می‌یابد. کاهش تعداد الکترون‌ها به معنای افزایش چسبندگی الکترونی به اتم‌ها و مولکول‌های اکسیژن از طریق واکنش‌های ۲۷، ۲۹ و ۳۶ است. بنابراین، سهم این واکنش‌ها در مقادیر بالاتر اکسیژن بیشتر خواهد بود و به عنوان یک نتیجه خاصیت الکترون‌خواهی پلاسما افزایش می‌یابد. شکل ۶ نیز توزیع فضا-زمانی چگالی الکترون‌ها در سه دوره متوالی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تولید الکترون‌ها در نواحی نزدیک به الکترودها، که در آن‌ها میدان الکتریکی بیشینه



شکل ۶. تحول فضا-زمانی چگالی الکترون‌ها در فضای تخلیه



شکل ۷. توزیع فضا-زمانی دمای الکترون‌ها در ترکیب‌های مختلف آرگون-اکسیژن



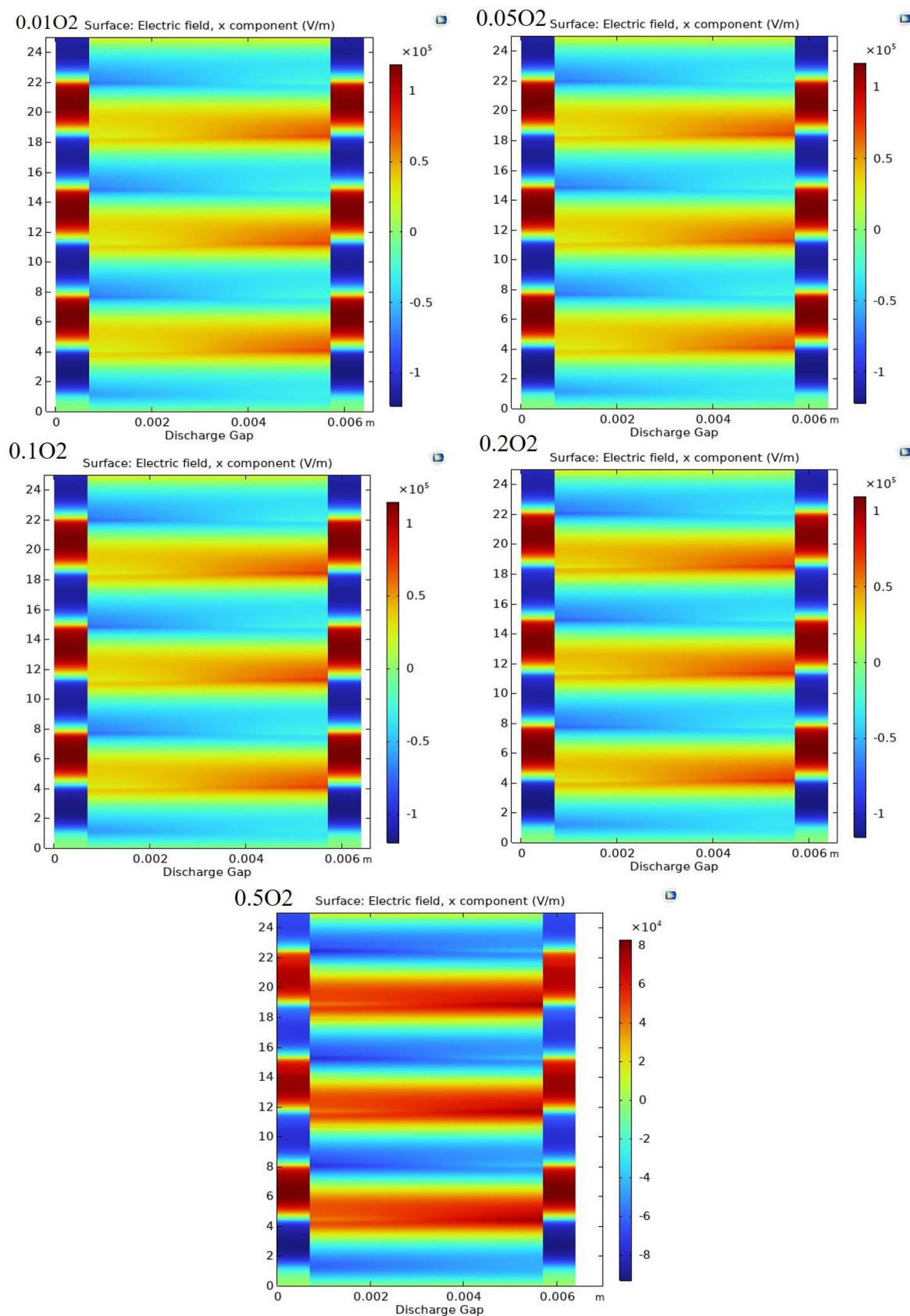
شکل ۸. جذر میانگین مربعی اتم‌های اکسیژن و مولکول‌های اوزون تا زمان $10^{-4} \times 3$ ثانیه

استفاده شد تا اثر افزودن اکسیژن در مقادیر ۱٪، ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ بر مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی تخلیه بررسی شود. نتایج نشان می‌دهند که افزودن اکسیژن سبب کاهش تعداد الکترون‌ها در فضای تخلیه و به دنبال آن کاهش جریان تخلیه می‌شود. بدین ترتیب، با افزودن اکسیژن به تخلیه آرگون در فشار کم، خاصیت دی‌الکتریکی پلاسما افزایش می‌یابد. از طرفی، با افزایش مقدار اکسیژن، دمای الکترون‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، بررسی‌های ما نشان می‌دهند که در تمام تخلیه‌های بررسی شده، به جز ترکیب ۱٪ اکسیژن-۹۹٪ آرگون، چگالی اکسیژن تک‌اتمی از مرتبه 10^{16} cm^{-3} است که برای فرایندهای استریلیزاسیون، اصلاح سطوح، و حذف آلاینده‌ها حیاتی است. مطالعات نشان می‌دهند که حضور اکسیژن تک‌اتمی به‌تنهایی برای استریلیزاسیون کافی نیست، بلکه پایداری پلاسما نیز نقش اساسی دارد. بنابراین، زمانی که میزان اکسیژن افزایش می‌یابد چگالی الکترون‌ها درون پلاسما به‌شدت کاهش می‌یابد و پلاسما به سمت ناپایداری پیش می‌رود [۱۲].

این موضوع می‌تواند اهمیت ویژه‌ای در فرایندهای استریلیزاسیون داشته باشد چراکه این اتم‌ها نقش مهمی در این فرایندها ایفا می‌کنند. شکل ۹، توزیع دو بعدی میدان الکتریکی را در پنج دوره تناوب، به‌منظور بررسی تغییرات میدان الکتریکی در فضای تخلیه با افزودن اکسیژن، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، میدان الکتریکی در ناحیه دی‌الکتریک قوی‌تر از کانال تخلیه پلاسما است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش مقدار اکسیژن، میدان الکتریکی در فضای تخلیه کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند به‌دلیل تغییر در نرخ جمعیت الکترونی و یونی باشد که تغییراتی را در گسیل ثانویه ایجاد می‌کند که در غلظت‌های بالای اکسیژن، به کاهش نسبی میدان الکتریکی درون پلاسما منجر می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، از نرم‌افزار COMSOL برای شبیه‌سازی یک بعدی تخلیه الکتریکی با مانع دی‌الکتریک در گاز آرگون کم‌فشار



شکل ۹. توزیع فضا-زمانی میدان الکتریکی برای ترکیب‌های مختلف آرگون-اکسیژن

مراجع

1. B Eliasson and U Kogelschatz, IEEE. Trans. Plasma. Sci, **19**(2) (1991)309–23.
2. D Braun, U Kuchler, and G Pietsh, J. Phys D. Appl. Phys, **24** (1991) 564–72.
3. J Moon, IEEE. Trans. Indust. Appl, **3** (6) (1998)1829–36.
4. D Graves and A tutorial, rev. Phys. Plasmas, **21** (2014) 080901.
5. F Rossi, O Kylián, and Hasiwa, Phys. Rev. B **87** (2013) 224416.
6. Y P Raizer and J E Allen, Gas Discharge. Phys. Springer. Berlin (1997).
7. A Fernández-Rueda, F Pontiga, and S Baadj, 47th EPS Conference. Plas. Phys, **45A**:979-10-96389-13-1 (2021).
8. J Walsh, D Liu, F Iza, M Rong, and M Kong, J. Phys D. Appl. Phys, **43** (3) (2010) 032001.
9. A Nisa, K Firdausi, M Kanie, A Susan, E Yulianto, and M Nur, IOP. Journ. Phys. Conf Series, **1170** (2019) 012017.
10. J Pan, Z Tan, Y Liu, G Pan and X Wang, Phys. Plasmas, **22** (9) (2015).
11. J R Roth, Industrial Plasma Engineering. Nontherm. Plas. Proc, (2001).
12. E Wagenaars, R Brandenburg, W Brok, M D Bowden, and H E Wagner. Jour. Phys D. App. Phys. **39** (4), (2006) 700.
13. A Fridman and L A Kennedy, Plasma. Phys. & eng. CRC press (2004).
14. A L Garner and T A Mehlhorn. Rev. Fron. Phys. **9** (2021), 786381.
15. M Akter, D K Yadav, S H Ki, E H Choi, and I Han, Int. Jour. Molecular Sci. **21** (21) (2020) 8321.