



رفع آلودگی‌های هسته‌ای به روش پلاسما

نیکو صفت، محمد*^(۱) - باقری، اردشیر^(۲) - شهبازی راد، زهرا^(۳) - قادری، امیرحسین^(۴)

^۱دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، گروه فیزیک

^۳دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک، گروه هسته‌ای

چکیده:

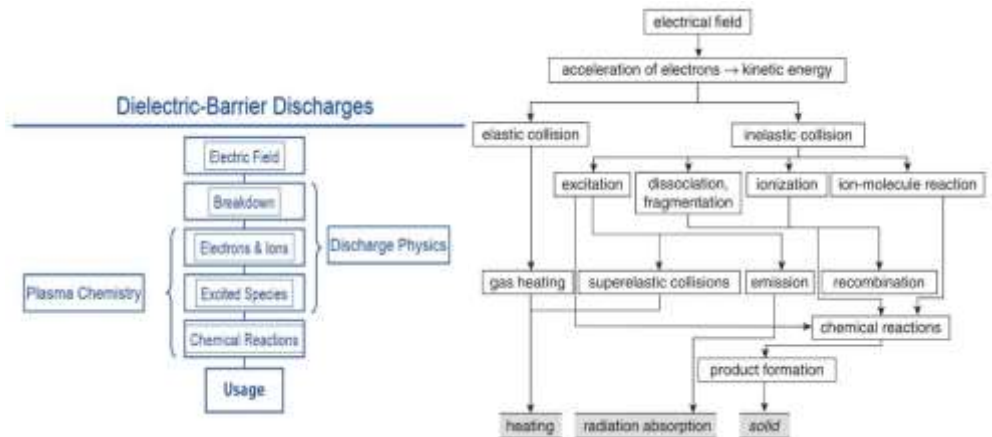
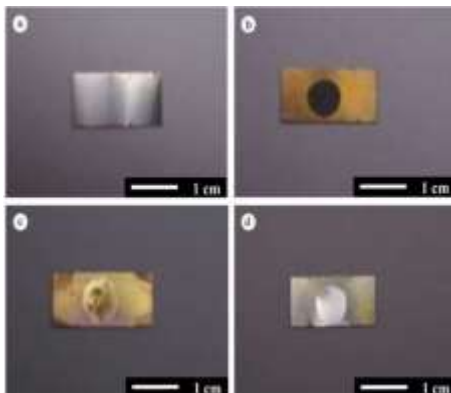
انرژی هسته‌ای که از عمده‌ترین مباحث علوم و فناوری نوین است یک فناوری امن و قابل اعتماد به شمار می‌رود، البته به شرطی که همه‌ی ملزومات ایمنی هسته‌ای به درستی رعایت شود. از میان مسائلی که صنعت هسته‌ای امروزه با آن مواجه است، هیچ‌کدام به بزرگی مشکل آلودگی‌های پرتوزا و چگونگی رفع و دفع دائمی آن‌ها نیست. در بین همه روش‌های کاهش و رفع آلاینده‌های هسته‌ای، استفاده از فناوری پلاسما یکی از روش‌های مؤثر و بدیع است. در این پژوهش ضمن بیان آخرین دستاوردهای این حوزه، رفع آلودگی ایزوتوپ مورد نظر از سطوح توسط مولد پلاسمایی سد تخلیه دی‌الکترونیک و از دیدگاه تأثیر ضخامت دی‌الکترونیک در نرخ واکنش‌های شیمیایی مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: آلودگی پرتوزا، رفع آلودگی، سد تخلیه دی‌الکترونیک، نرخ واکنش شیمیایی.

مقدمه:

نشت مواد پرتوزای ناشی از یک رویداد هسته‌ای در طبیعت، به شدت برای محیط‌زیست و حیات انسان مضر است [۱]. وجود آلودگی هسته‌ای در محیط‌زیست می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری به اقتصاد یک مملکت بزند [۲] و نیز می‌تواند اثرات روانی منفی بر تفکر و بینش عمومی جامعه ایجاد کند [۳]. بنابراین، استفاده از روش‌های مؤثر رفع آلودگی‌های هسته‌ای امری ضروری است [۱]. به محض انتشار آلودگی هسته‌ای در محیط، روش‌های رفع آلودگی باید در اسرع وقت آغاز شود و این اقدامات تا رفع کامل آلودگی ادامه خواهد یافت [۴]. انواع روش‌های رفع آلودگی هسته‌ای بر مبنای ماهیت عبارت‌اند از: شیمیایی و فیزیکی که هرکدام مزایای خاص خود را داشته و بنا به صلاح‌دید متخصصان هسته‌ای، مناسب‌ترین روش انتخاب می‌شود [۱] و [۴]. در بین همه روش‌ها، یکی از روش‌های امیدبخش و بسیار مؤثر در کاهش و رفع آلاینده‌های هسته‌ای، استفاده از فناوری پلاسما است. با استفاده از روش پلاسمایی می‌توان بیشتر از ۹۵ درصد مواد رادیواکتیو را از سطوح فلزی جدا نمود. پلاسما می‌تواند آلاینده‌ها را به اجزای غیر خطرناک تجزیه کند که البته انتخاب نوع پلاسما وابسته به نوع آلودگی است. مهم‌ترین دلایل استفاده از روش پلاسمایی به جهت رفع آلودگی‌های هسته‌ای عبارت‌اند از: کاهش چشمگیر حجم آلودگی هسته‌ای رفع شده (مهم‌ترین فاکتور در عملیات رفع آلودگی هسته‌ای)،

بهبود پارامتر رفع آلودگی (DF) و بازدهی بالا، فرآیند رفع آلودگی خشک، سازگار با محیط‌زیست، امکان رفع آلودگی از میکرو ترک‌های سطوح، عدم آسیب به سطوح حساس و امکان رفع آلودگی از سطوحی با هندسه پیچیده و سطوح وسیع [۵]. به کمک گونه‌های فعال موجود در پلاسما می‌توان پردازش‌هایی را روی سطوح مواد انجام داد که یا به روش‌های دیگر ممکن نیست و یا اگر باشد از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست. پردازش سطح به کمک پلاسما هم به خاطر عمل همین گونه‌های فعال است که به کمک تعاملات گاز و پلاسما تولید شده‌اند. گونه‌های فعال پلاسما عبارت‌اند از: فوتون‌ها، گونه‌های خنثی و ذرات باردار. تولید پلاسما به صورت اعمال انرژی به گاز خنثی به منظور شکل‌گیری حامل‌های بار و در نهایت تشکیل پلاسما خواهد بود. از بین همه‌ی روش‌های تولید صنعتی پلاسما، اعمال میدان الکتریکی و ایجاد پدیده شکست الکتریکی در گاز، یک راه متداول برای تولید پلاسما به منظور استفاده در فناوری‌های کاربردی است که از بین آن، سد تخلیه دی‌الکتریک (DBD) یا تخلیه‌ی ساکت، که در فشار اتمسفری عمل می‌کند، نوع خاصی از تخلیه‌ی AC یا RF است. این مولد پلاسمایی کاربردهای بسیار وسیعی دارد که یکی از کاربردهای بسیار جالب آن، امکان تبخیر خشک مواد پرتوزا است که در این پژوهش مدنظر بوده و مهم‌ترین مزیت‌های این تخلیه نسبت به سایر تخلیه‌ها عبارت است از: تولید پلاسما غیرحرارتی در فشار اتمسفری و این که در ابعاد کوچک و نیز ابعاد بزرگ قابل استفاده است [۶].



شکل (۱): (سمت راست) فلوجارت رفع آلودگی با پلاسما، از اعمال میدان الکتریکی به گاز (در ابتدا) تا جامد سازی و دفن نهایی آلودگی (در انتها) [۷]، (وسط) فلوجارت استفاده از مولد پلاسمایی سد تخلیه دی‌الکتریک [۸]. (سمت چپ) مثالی از رفع آلودگی تجربی عوامل هسته‌ای از سطوح فلزی توسط پلاسما: (a) سطح استیل ضدزنگ تمیز، (b) سطح فلزی آلوده شده به اکسید اورانیوم به ضخامت ۲۰ میکرومتر، (c) پس از ۵ دقیقه پردازش پلاسمایی، اکسید اورانیوم به طور کامل رفع شده است، (d) لایه قهوه‌ای رنگ ناشی از پردازش پلاسمایی توسط روش‌های مکانیکی رفع شده است و سطح فلزی کاملاً تمیز است [۹].

Decontamination Factor

Dielectric Barrier Discharge

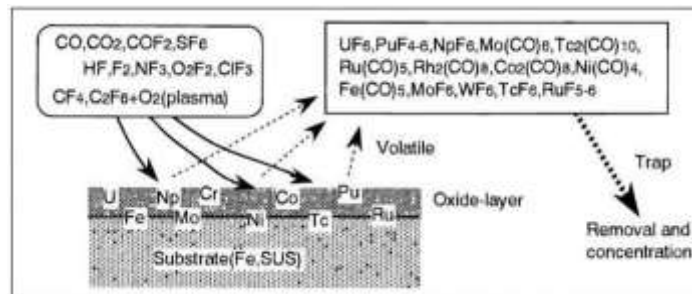


همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، رفع آلودگی سطوح خارجی اجسام با استفاده از پلازما در حالت کلی بدین صورت است که پس از شناسایی منطقه آلوده‌شده، با توجه به جنس سطح، نوع و شدت آلودگی و وسعت پخش شدن آن، از یک مولد پلاسمایی بهینه‌شده (که بتواند متناسب با آلودگی، پلاسمایی تولید کند که به بهترین شکل با مولکول‌های آلاینده درگیر شود و آن‌ها را از سطح جدا نماید) به جهت تاباندن پلازما به سطح استفاده می‌شود. پس از انجام واکنش و تولید گونه‌های فرار و به عبارتی جداسازی آلودگی از سطح (یعنی رفع آلودگی)، محصولات تولیدشده توسط واحد مکند جمع‌آوری‌شده و در یک محفظه امن به جهت استفاده در فعالیت‌های بعدی نگهداری می‌شود. پلاسمای غیرحرارتی که در فشار اتمسفری عمل می‌کنند، توسط دمای الکترونی بالا و دمای پایین سایر اجزای آن مشخص می‌شوند. درکل، با استفاده از مولدهای پلاسمایی، فرآیند رفع آلودگی مرطوب به رفع آلودگی خشک تغییر می‌یابد، فرآیندی که تمرکز بسیاری روی آن بوده و در صنعت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۰]. در سال ۲۰۰۶، لاورنس بوئینگ از آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، در پژوهش خود، نقش روش پلاسمایی در پاک‌سازی آلودگی‌های سطحی و کاربرد آن در از کار اندازی تجهیزات هسته‌ای را توضیح داد [۱۱]. در سال ۲۰۰۷، محققان دپارتمان ایمنی سرزمینی ایالات متحده، در پژوهش خود به‌طور مفصل اهمیت و کاربرد پلاسمای سرد فشار اتمسفری در رفع آلودگی‌های هسته‌ای را توضیح دادند [۱۲]. در سال ۲۰۱۸، جانیونگ پارک و همکاران، یک روش رفع آلودگی سطحی با استفاده از پلازما را ارائه نمودند که هدف اصلی آن‌ها کاهش حجم زباله‌های پرتوزا و سمی بود [۱۳]. در سال ۲۰۱۹، راجر بوئن و همکاران، با طراحی یک مولد پلاسمایی، روشی برای شیشه‌ای کردن زباله‌های فلزی و آلی ارائه نمودند. نتایج نشان می‌داد که این روش برای کاهش حجم نهایی پسماند در از کار اندازی تجهیزات هسته‌ای فرسوده مفید است [۱۴]. در سال ۲۰۱۹، جانگ کیل پارک و همکاران، امحای زباله‌های هسته‌ای با سطح پرتوزایی متوسط و کم را با استفاده از روش پلاسمایی بررسی نمودند که در این فرآیند آلاینده‌های ثانویه به حداقل رسیدند [۱۵]. در سال ۲۰۱۹، ژاله سمیر و همکاران، رفع آلودگی سطوح وسیع پس از یک حادثه پرتویی را مورد بررسی قرار دادند که از بین روش‌های ارائه‌شده، بیان شد که روش پلاسمایی بسیار مؤثر ولی پیچیده است [۱۶]. در سال ۲۰۱۹، جی یانگ لی و همکاران، رفع آلودگی کبالت با استفاده از پلاسمای NF_3 را بررسی نمودند. این آلودگی به‌طور مؤثری پاک شد و محققان بیان نمودند که از این روش در از کار اندازی نیروگاه‌های هسته‌ای قدیمی می‌توان استفاده کرد [۱۷].

روش کار :

آلودگی هسته‌ای موردنظر در این پژوهش، عنصر پرتوزای پخش‌شده در محیط (با نماد فرضی A) در اثر یک رویداد هسته‌ای فرضی است. پلازما رفع آلودگی را از دو طریق انجام می‌دهد: (۱) کربونیل (CO) دار کردن آلودگی و تبدیل آن از حالت جامد به گاز، (۲) فلوئور (F) دار کردن آلودگی و تبدیل آن از حالت جامد به گاز. با توجه به نوع گاز عامل پلازما، یکی از دو روش فوق منجر به رفع آلودگی هسته‌ای می‌شود. البته لازم به ذکر است که عامل کربونیل (شامل یون مثبت و

منفی و رادیکال‌ها) و عامل فلوتور (شامل یون مثبت و منفی و رادیکال‌ها) در طی فرآیند شکل‌گیری پلازما بر اثر تخلیه الکتریکی در گاز عامل به وجود می‌آیند. شکل (۲) واکنش‌های ذکر شده برای رفع آلودگی‌های هسته‌ای را به صورت مفهومی به تصویر کشیده است:



شکل (۲): تصویر مفهومی از فرآیند رفع آلودگی‌های هسته‌ای با پلازما [۱۸].

انتخاب گاز عامل در پلازما دارای شرط‌های بسیاری است، از قبیل ارزان، به صرفه و قابل دسترس بودن و همچنین داشتن کمترین آسیب برای کاربر و سطح. اما اصلی‌ترین معیار انتخاب گاز این است که اولاً گاز با آلودگی امکان انجام واکنش شیمیایی داشته باشد و ثانیاً آلودگی رادیواکتیو مدنظر پس از واکنش با گاز، به صورت مولکول‌های جدید فرار گازی شکل درآید. به همین جهت، مناسب‌ترین گاز برای پاک‌سازی عنصر مورد نظر، گاز فلوتور (F_2) انتخاب شد و فرآورده‌ی واکنش آن‌ها به صورت گاز فرار آزاد می‌شود که محصول نهایی واکنش، توسط فیلترها و محفظه‌های جمع‌کننده، جمع‌آوری می‌شود. معادله‌ی واکنش رفع آلودگی عنصر A توسط گاز فلوتور به صورت زیر است:



نرخ واکنش، تغییرات در مقدار مول واکنش‌دهنده‌ها یا فرآورده‌های یک واکنش شیمیایی بر واحد حجم و زمان (mol/lit.s) یا به عبارتی (M/s) است. رابطه (۲) بیانگر نرخ متوسط است:

$$\text{نرخ متوسط} = \frac{\text{مقدار مول تغییر یافته}}{\text{تغییرات زمان}} = \frac{\Delta[\text{mol}]}{\Delta t} \quad (2)$$

در نتیجه برای معادله عمومی یک واکنش که به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود:



نرخ واکنش به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\text{نرخ متوسط} = -\frac{1}{a} \frac{\Delta[A]}{\Delta t} = -\frac{1}{b} \frac{\Delta[B]}{\Delta t} = \frac{1}{c} \frac{\Delta[C]}{\Delta t} = \frac{1}{d} \frac{\Delta[D]}{\Delta t} \quad (4)$$

که در آن a, b, c و d ضرایب استوکیومتری واکنش هستند [19].



عبارت قانون نرخ واکنش، نرخ واکنش را به مقدار مول واکنش دهنده‌ها مرتبط می‌کند. برای معادله یک واکنش عمومی که همانند رابطه (۳) است، قانون نرخ واکنش به صورت رابطه (۵) خواهد بود:

$$\text{نرخ واکنش} = k[A]^X[B]^Y \quad (5)$$

که در آن، K ثابت نرخ (واکنش) است و وظیفه یکسان کردن واحد دو طرف معادله (رساندن به M/s) را دارد. Y و X توان واکنش دهنده‌ها هستند و از دو روش به دست می‌آیند. در روش اول نیاز به داده‌های تجربی از جمله مقدار واکنش دهنده‌ها و نرخ واکنش است. در روش دوم که یک روش تئوری می‌باشد، از ضرایب استوکیومتری واکنش دهنده‌ها به عنوان توان آن‌ها استفاده می‌شود. نکته قابل توجه این است که با استفاده از روش دوم، در واقع فرض کرده‌ایم که واکنش در شرایط ایدئال رخ می‌دهد و هر برخورد میان ذرات واکنش دهنده با یکدیگر منجر به وقوع واکنش می‌شود [19]. فرآیند رفع آلودگی ماده‌ی مورد نظر به طریق رابطه (۶) است:



در مورد مفهوم نرخ واکنش، این کمیت را با استفاده از ضرایب استوکیومتری به دست می‌آوریم:

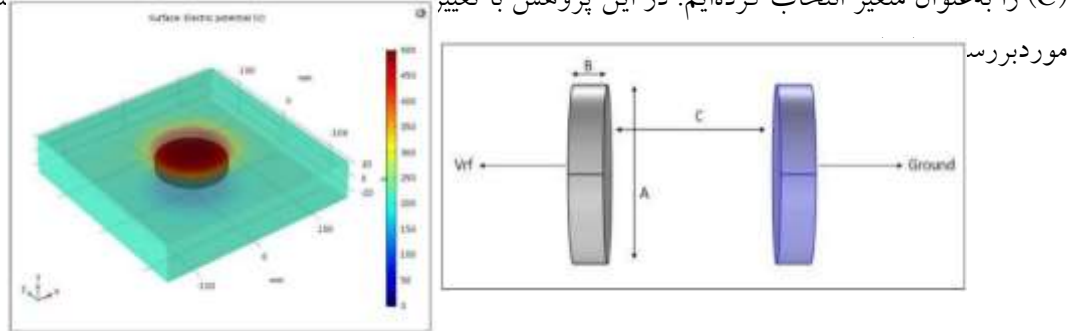
$$R = K[AO_2]^1[F_2]^3 \quad (7)$$

$$K = 2 * 10^{-3} (M^{-3} s^{-1}) \quad (8)$$

رابطه (۸) به طور تقریبی برای دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد معتبر است و M همان mol/cm^3 است. عبارت Q نیز با دیمانسیون $10^{-20} (mol/cm^3)$ تعریف می‌شود. شایان توجه است که در رابطه نرخ واکنش، برای حفظ استاندارد نوشتاری از عبارت F_2 استفاده می‌شود، اما طبیعتاً این یون‌های گاز فلئوئور هستند که در فرآیند تشکیل پلاسما شکل گرفته و وارد واکنش می‌شوند [20].

با استفاده از نرم‌افزار COMSOL 5.3a، مدل فضای تک‌بعدی و حل وابسته به زمان را انتخاب کردیم. با توجه به هدف پژوهش مبنی بر رفع آلودگی ماده‌ی مورد نظر و توضیحات داده‌شده در مورد گاز عامل، شبیه‌سازی تولید پلاسما در مولد سد تخلیه دی‌الکترونیک تخت با هندسه دایره‌ای، با جنس الکتروود مسی و جنس دی‌الکترونیک کوارتز (SiO_2) با گذردهی الکتریکی نسبی 3.8 متصل به منبع تغذیه‌ی AC با گاز عامل پلاسما فلئوئور با دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط واکنش‌های مدنظر در رفع آلودگی هسته‌ای) انجام شد. به جهت ایجاد تعادل بین مقیاس شبکه‌بندی و زمان اجرای برنامه، از شبکه‌بندی مثلثی استفاده شد. شبیه‌سازی به گونه‌ای است که نمونه آلوده‌شده به ماده‌ی مورد نظر، به جهت پردازش در درون حجم فعال تولید پلاسما قرار می‌گیرد. تخلیه توسط یک پتانسیل الکتریکی سینوسی که به مرز خارجی یکی از صفحه‌ها اعمال می‌شود، هدایت می‌شود به طوری که قله ولتاژ اعمالی ۷۵۰ ولت و فرکانس رادیویی ۵۰ کیلوهرتز است. لازم به ذکر است، مرز خارجی صفحه‌ی دیگر به زمین متصل شده است. همچنین به منظور تحلیل بهتر نتایج و نمودارها، ضریب گسیل الکترون‌های ثانویه را برای مرز چپ و راست (مرز بین گپ و دی‌الکترونیک) متفاوت در نظر گرفتیم و برای مرز راست مقدار 0.01 و مرز چپ مقدار 0.001 را اعمال کردیم. دلیل استفاده از هندسه دایره‌ای این است که قاعده

دایره‌ای شکل، همگن‌ترین میدان الکتریکی را در میان شکل‌های هندسی مختلف برای الکترودها به ارمغان می‌آورد که منجر به ایجاد بهینه‌ترین فرم تخلیه الکتریکی خواهد شد. پیکربندی طراحی شده به گونه‌ای بود که، شکل هندسی قاعده الکترودها، ابعاد قاعده (A)، ضخامت دی‌الکتریک (B) و فاصله دو الکترودها (فاصله از یک دی‌الکتریک دیگر (C) را به عنوان متغیر انتخاب کرده‌ایم. در این پژوهش با تغییر $C < A < B < 26$ ، نتایج مختلف ایجاد کرده و



شکل (۳): پیکربندی مولد DBD طراحی شده با قاعده دایره‌ای (سمت راست) و توزیع پتانسیل الکتریکی آن (سمت چپ) با استفاده از نرم‌افزار COMSOL 5.3a.

لازم به ذکر است که در تمام مراحل، دی‌الکتریک و الکترودها به صورت متصل به هم و یکپارچه در نظر گرفته شدند. الکترودها فقط وجه خارجی شکل را شامل می‌شود که محل اعمال ولتاژ است و منظور ما از کمیت B، ضخامت دی‌الکتریک است. با توجه به مطالب مطرح شده، این یون‌های گاز عامل هستند که در رفع آلودگی هسته‌ای نقش دارند و به همین دلیل نتایج حاصل از پیکربندی‌های متفاوت روی چگالی یون‌های گاز عامل پلاسما، در فضای گپ (برحسب mol/cm^3) به فاصله میان دو دی‌الکتریک (برحسب cm) را مورد بررسی قرار دادیم. لازم به ذکر است به منظور اینکه بتوانیم از نتایج و تحلیل‌های خود، قواعدی را استنباط کنیم، به فضای پلاسما اجازه داده‌ایم تا چند چرخه (تغییر جهت میدان الکتریکی با توجه به فرکانس منبع تغذیه) را تجربه کند تا اثر حافظه پلاسما شکل بگیرد و ما بتوانیم آثار این پدیده را در نتایج مشاهده کنیم. به طور دقیق اگر شروع اعمال ولتاژ را در ثانیه صفر لحاظ کنیم، نتایج خروجی از نرم‌افزار برای ثانیه 10^{-4} است، به عبارتی پس از گذشت ۵ چرخه کامل ۲۰ میکروثانیه‌ای.

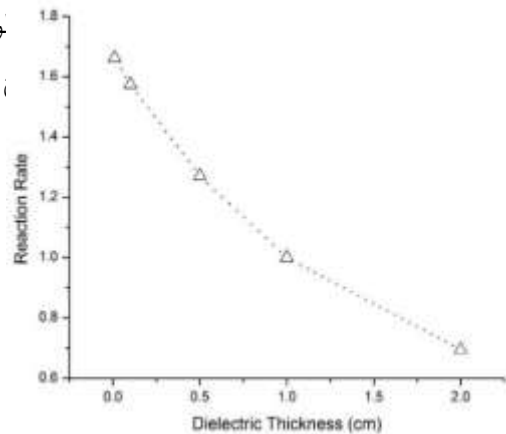
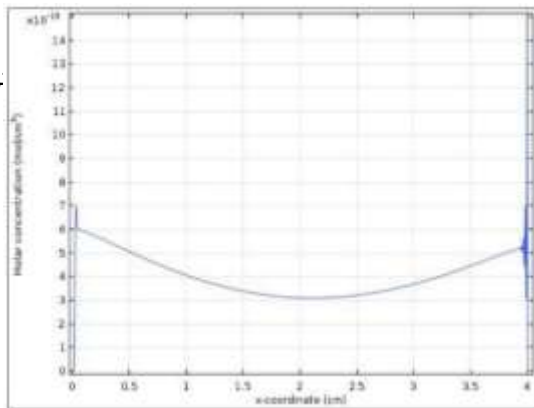
نتایج :

با استفاده از نرم افزار COMSOL 5.3a، برای رسیدن به مقدار کمی رفع آلودگی هسته‌ای در اثر تغییر پیکربندی، فرض می‌کنیم مقدار آلودگی در حدی زیاد است که رفع آلودگی ما در مقابل آن، قابل صرف نظر است و با توجه به این فرض، عبارت مربوط به آن را در رابطه نرخ واکنش حذف می‌کنیم. در نتیجه با توجه به رابطه (۷)، داریم:

$$\frac{R^n}{R^1} = \left(\frac{F_2^n}{F_2^1} \right)^3 \quad (9)$$

رابطه‌ی فوق برای مقایسه‌ی پیکربندی‌های شماره‌ی ۱ و n نوشته شده و $n = 1, \dots, 24$ است. در معادله‌ی شماره‌ی (۹)،

(۹) را برای
تریک بر نرخ



F_2 مق
همه‌ی
واکنش

شکل (۴): سمت راست) نمودار حاصل از تأثیر ضخامت دی‌الکتریک بر نرخ واکنش رفع آلودگی ماده‌ی مورد نظر، سمت چپ) نمودار چگالی مول یون فلوتور بر حسب فاصله بین دو الکترود حاصل از پیکربندی بهینه شده مولد DBD.

بحث و نتیجه گیری :

ابتدا اعوجاجات موجود در مرزهای نمودار شکل (۴)، تصویر سمت چپ، را مورد بررسی قرار می‌دهیم. این اعوجاجات ناشی از پدیده‌های به نام اثر حافظه پلاسما هستند. زمانی که استریم عرض گپ (فاصله بین دو دی‌الکتریک) را فرامی‌گیرد و به عبارتی میکروتخلیه به وقوع می‌پیوندد، به صورت هم‌زمان تجمع بار سطحی بر روی دی‌الکتریک آغاز می‌شود (به دلیل ویژگی دی‌الکتریک مبنی بر تحرک کم بارهای الکتریکی بر روی سطح آن) و همین تجمع است که با ایجاد میدانی مخالف میدان اصلی به میکروتخلیه پایان می‌دهد. زمانی که جهت میدان الکتریکی اصلی بین دو الکترود معکوس می‌شود



(به دلیل منبع تغذیه فرکانسی)، الکترون‌ها قصد شروع بهمن الکترونی در جهت جدید را دارند که در ابتدای کار با بارهایی که در سطح دی‌الکتریک وجود دارند، برخورد می‌کنند و اعوجاجات مشهود در نمودار را منجر می‌شوند. لازم به ذکر است گسیل الکترون‌های ثانویه به تشدید این پدیده، به وسیله افزایش الکترون‌ها در مرز و در پی آن افزایش برخوردها، کمک می‌کند، همان‌طور که اعوجاجات در مرز چپ و راست به دلیل ضریب گسیل الکترون‌های ثانویه مختلف، مقدار متفاوتی دارد. علاوه بر این، حالت کلی به دلیل کاهش فاصله بین دو الکتروود و در نتیجه آن افزایش نسبت فضایی از گپ که به دلیل اثر حافظه، دچار اعوجاجات و برخوردها میان الکترون‌های ثانویه و یون‌ها می‌شود، در مقابل فضای کل گپ و همین‌طور یکنواخت شدن استریمرها در مقابل کاهش شدت آن‌ها حاصل شده است. نکته قابل توجه دیگر در نمودار یادشده، کاهش تعداد یون‌ها در پلازما بر واحد حجم نسبت به پیکربندی‌ها با فاصله الکتروودی بیشتر و همچنین یکنواخت‌تر شدن فضای پلازما (از حیث تعداد یون بر واحد حجم) است. دلیل این امر را می‌توان در این نکته جستجو کرد که آزمایش‌های تجربی ثابت کرده‌اند با کاهش فاصله الکتروودی، تعداد استریمرها بیشتر (ایجاد یکنواختی در طول گپ) و شدت استریمر (توانایی یونیزاسیون و به طبع آن تعداد یون) کمتر می‌شود. یکنواختی فضای گپ از حیث تعداد یون امری بسیار مهم برای کاربردهای پردازش سطوح است و کارایی سیستم را به شدت افزایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۴)، تصویر سمت راست، مشهود است با کم شدن ضخامت دی‌الکتریک از ۲ به ۰/۰۱ سانتیمتر، نرخ واکنش و در نتیجه آن رفع آلودگی هسته‌ای، افزایش پیدا می‌کند. علت این امر را می‌توان در مفهوم ضریب اتلاف دی‌الکتریک جستجو کرد. با توجه مفهوم ضریب اتلاف دی‌الکتریک، افزایش ضخامت به معنی اتلاف بیشتر انرژی در دی‌الکتریک و به طبع آن افزایش دمای آن است. افزایش دما در دی‌الکتریک باعث می‌شود که در زمان رسیدن بارهای الکتریکی از فضای گپ به سطح دی‌الکتریک و شروع فرآیند تجمع بارها (که منجر به پایان میکروتخلیه می‌شوند)، بارها در سطح وسیع‌تری پخش شوند تا مقدار بار لازم برای پایان دادن به میکروتخلیه حاصل شود و درگیر کردن سطح بیشتر دی‌الکتریک به معنای کاهش تعداد میکروتخلیه‌ای است که در حال وقوع است و کاهش تعداد کانال‌های میکروتخلیه به معنای کاهش فرآیند یونیزاسیون و به طبع آن کاهش تعداد یون است که این کاهش تعداد یون منجر به کاهش مقدار نرخ واکنش رفع آلودگی هسته‌ای می‌شود. هرچه روند کاهش ضخامت ادامه پیدا کند، نرخ واکنش افزایش پیدا خواهد کرد و صرفاً استقامت دی‌الکتریک محدودکننده ما خواهد بود، استقامت دی‌الکتریک در واقع مقدار میدان الکتریکی است که ماده می‌تواند تحمل کند و حالت دی‌الکتریک خود را حفظ کند و به طبع آن تجمع بار سطحی روی ماده شکل بگیرد. کمترین مقدار گزارش شده برای کمیت استقامت دی‌الکتریک کوآرتز $1.5MV/mm$ است که با توجه به استفاده ما از ولتاژ بیشینه ۷۵۰ ولتی و کمترین ضخامت به کار برده شده که ۰/۰۱ میلی‌متر است، حفظ خصوصیات دی‌الکتریک را تضمین می‌کند. به عبارتی دیگر با توجه به ولتاژ ۷۵۰ ولتی، می‌توانیم ضخامت را تا ۵۰۰ نانومتر کاهش دهیم [۲۱]. با توجه به این که جسم آلوده در فضای بین دو الکتروود قرار گرفته و فرآیند رفع آلودگی صورت می‌پذیرد، مفهومی به عنوان ناحیه کاری، نقش مهمی پیدا می‌کند. ناحیه کاری، به شکل بهینه‌ترین فضا در میان فاصله دو الکتروود برای قرارگیری جسم آلوده به منظور رفع آلودگی تعریف می‌شود و این به عنوان یک نکته مثبت در انتخاب بهترین پیکربندی مدنظر قرار خواهد گرفت. با توجه به هدف پژوهش، یکنواختی



فضای کاری از حیث تعداد مول گاز فلوتور از اهمیت بسزایی برخوردار است. به منظور پایش این کمیت، ابتدا کمیت Q را به عنوان میانگین تعداد مول بر واحد حجم از گاز فلوتور تعریف می‌کنیم. سپس با استفاده از مفهوم انحراف معیار، تفاوت تعداد مول در نقاط مختلف فضای کاری را از مقدار میانگین یا همان کمیت Q محاسبه کردیم. با توجه به تفاوت پیکربندی‌ها و به طبع آن توانایی آن‌ها در یونیزاسیون گاز فلوتور، صرف بررسی میان اعداد، روشی کامل نیست و به همین منظور، کمیت Z را به عنوان درصد انحراف معیار بر روی میانگین تعداد مول تعریف کردیم. کمتر بودن میزان کمیت Z به معنی یکنواختی بیشتر در فضای کاری ماست و به عنوان نکته‌ای مثبت در انتخاب بهترین پیکربندی، مدنظر قرار خواهد گرفت. در این پژوهش ۲۴ پیکربندی متفاوت مولد سد تخلیه دی‌الکترونیک مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به مقایسه نتایج، به این مهم رسیدیم که از میان ۲۴ پیکربندی شبیه‌سازی شده در این پژوهش، پیکربندی با خصوصیات موجود در جدول (۱) پربازده‌ترین پیکربندی برای مولد سد تخلیه دی‌الکترونیک به منظور رفع آلودگی هسته‌ای ماده‌ی مورد نظر از سطوح است.

جدول (۱): پارامترهای بهینه‌ترین پیکربندی شبیه‌سازی شده‌ی مولد سد تخلیه دی‌الکترونیک

شکل هندسی قاعده	طول قطر (cm)	ضخامت دی‌الکترونیک (cm)	فاصله دو دی‌الکترونیک از هم (cm)	$Q(mol / cm^3) * 10^{-20}$	W (%)	$\sigma(mol / cm^3) * 10^{-20}$	$Z = (\sigma / Q) * 100$
دایره	۱۰	۰/۰۱	۴	۴۲/۰۲۷۶	۵۹/۲۱	۳/۳۳	۷/۹۳

مراجع :

- [1] Birsan, N, and Kadyrzhanov, Environmental Protection against Radioactive Pollution. London: kluwer Academic Publisher, 2002.
- [2] R. J. Pentreath, Nuclear power, man and the environment. Routledge, 2019.
- [3] E. J. Bromet, "Emotional consequences of nuclear power plant disasters," Health Phys., vol. 106, no. 2, pp. 206–210, 2014.
- [4] C. H. Oh, Hazardous and Radioactive Waste Treatment Technologies Handbook, 1st ed. USA: CRC Press, 2001.
- [5] J. Park, "Plasma surface decontamination: method and apparatus for reducing radioactive nuclear waste and toxic waste volume," US 2018/0096745 A1, 2018.
- [6] H. Conrads and M. Schmidt, "Plasma generation and plasma sources," Plasma Sources Sci. Technol., vol. 9, no. 4, pp. 441–454, 2000.
- [7] J. Friedrich, The Plasma Chemistry of Polymer Surfaces. Germany: WILEY-VCH, 2012.
- [8] A. Fridman and L. Kennedy, Plasma Physics and Engineering, Second. USA: CRC Press, 2011.
- [9] X. Yang, M. Moravej, S. E. Babayan, G. R. Nowling, and R. F. Hicks, "Etching of uranium oxide with a non-thermal, atmospheric pressure plasma," J. Nucl. Mater. , vol. 324, no. 2–3, pp. 134–139, 2004.



- [10] D. L. Flamm and D. M. Manos, Plasma Etching: An Introduction. Academic Press, 1989.
- [11] L. E. Boing, "Decommissioning of Nuclear Facilities/Decontamination Technologies," Int. At. Energy Agency, 2006.
- [12] A. A. Fatah, R. Arcilesi, A. Judd, L. O'Connor, C. H. Lattin, and C. Y. Wells, "Guide for the Selection of Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Decontamination Equipment for First Responders," 2007.
- [13] J. Park, "Plasma surface decontamination: method and apparatus for reducing radioactive nuclear waste and toxic waste volume." Google Patents, 2018.
- [14] R. Boen, P. Charvin, F. Lemont, and A. Russello, "Method and facility for incinerating, melting and vitrifying organic and metal waste." Google Patents, 2019.
- [15] J. K. Park et al., "Sealed plasma melting furnace for treating low-and intermediate-level radioactive waste." Google Patents, 2019.
- [16] Semmler, Jaleh, et al. "Large area decontamination after a radiological incident." Journal of environmental radioactivity 199 (2019): 66-74.
- [17] Lee, Jaeyong, Kyungmin Kim, and Yong-Soo Kim. "A Study on the NF 3 Plasma Etching Reaction with Cobalt Oxide Grown on Inconel Base Metal Surface." Plasma Chemistry and Plasma Processing (2019): 1-15.
- [18] K. Tatenuma, Y. Hishinuma, S. Tomatsuri, Developmental study of gaseous decontamination technology using carbonylation and fluorination, Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan (1995-1998) in Japanese, (1995).
- [19] K.A. Connors, Chemical kinetics: the study of reaction rates in solution, John Wiley&Sons (1990).
- [20] M. Iwasaki, N. Ishikawa, A. Takahashi, T. Sakurai, Fluorination of plutonium dioxide by fluorine, Journal of Nuclear Science and Technology, 11 403-405(1974).
- [21] Dalal, N and J Rasmussen, Dielectric strength of various material, The Electronics Workshop, 1997.