بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

اثر پلاسمای سرد فشار اتمسفری در اصلاح آلاینده های NO_x

هما نظری[۱]، ساعد جعفری[۲]، مهدی عابدی ورکی[۳]

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران[۱] Homa.Nazari_3347@yahoo.com

دانشیار گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران[۲] Sjafari@guilan.ac.ir

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران[۳] M_abedi-varaki@phd.guilan.ac.ir

چکیده – دراین مقاله یک مطالعه ی نظری برحذف آلاینده‌ی NO_x توسط تکنولوژی پلاسمای غیرحرارتی، به ویژه تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک ارائه شده است. مدل یک‌بعدی، کاهش غلظت NO_2 و افزایش غلظت الکترون را به صورت تابعی از زمان نشان می‌دهد. آلاینده‌های هوا همچون اکسیدهای نیتروژن معمولا در مناطقی که وسایل نقلیه و کارخانجات با استفاده از سوخت‌های فسیلی کار می‌کنند، وجود دارند.

کلیدواژه - پلاسمای غیرحرارتی، راکتور تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک

The effect of Atmospheric pressure Non-Thermal plasma on treatment of NO_x pollutant

Homa Nazari[1], Saed Jafari[2], Mehdi Abedi Varaki[3]

[1]Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Guilan, Rasht
Homa.Nazari_3347@yahoo.com

[2]Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Guilan, Rasht
Sjafari@guilan.ac.ir

[3]Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Guilan, Rasht

M_abedi-varaki@phd.guilan.ac.ir

Abstract- In this paper a theoretical study on NO_x removal by non-thermal plasma technology specifically a dielectric barrier discharge, is presented. The one-dimensional model showed a reduction of NO2 concentration and increase in electron concentration as a function of time. Air pollutants such as oxides of nitrogen are commonly found in areas where vehicles and factories using fossil fuels are operating.

Keywords: Non-Thermal plasma, Dielectric barrier discharge reactor

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

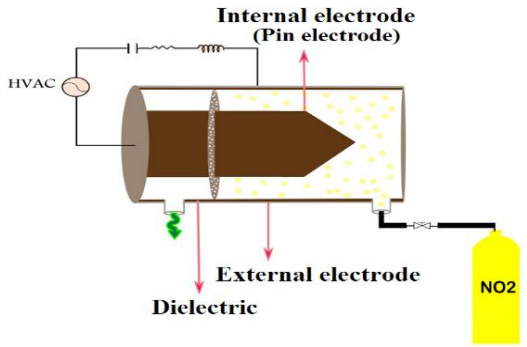
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

مقدمه

در سال های اخیرتکنیک های مختلفی همچون، کاهش کاتالیستی انتخابی، سایش مرطوب، تابش های پرتو الکترونی، تخلیه ی سد دی الکتریک، و تخلیه ی کرونای پالسی، به منظور حذف آلاینده های خروجی از اگزوز موتورهای دیزلی، با درجات مختلف موفقیت، وارد شده اند. نگرانی عمده ی بسیاری ازتکنیک ها، انرژی مورد نیازبرای حذف آلاینده ها بوده است، که این مطلب منجر به پیشرفت فناوری قوی یعنی پلاسمای غیر حرارتی شد.در پلاسمای غیر حرارتی، انرژی متوسط الکترون ها،به طور قابل توجهی بالاتر از یون ها و ذرات خنثی است، که این یک مزیت بزرگ در کاهش انرژی مورد نیاز برای حذف آلاینده ها است[۱].پلاسما حالت چهارم ماده است، وگاز یونیزه شده‌ای است که انرژی کافی برای جداسازی الکترون‌ها از اتم‌ها و مولکول‌ها را فراهم می‌کند.انواع مختلفی از اکسیدهای نیتروژن در طبیعت وجود دارند. از جمله: N_2O، NO_2، NO، N_2O_5، NO_3، N_2O_4.عمده‌ترین اکسیدهای نیتروژن موجود در جو N_2O، NO_2، NO است. اختصار ناکس به نیتریک اکسید، یا نیتروژن مونواکسید، و نیتروژن دی‌اکسید، اطلاق می‌شود.که از نقطه نظر فوتوشیمیایی، نیتروژن اکسید جدید نامیده می‌شود.نیتروژن اکسید هنگامی که سوخت در درجه حرارت بالا می سوزد، به وجود می‌آید.در میان شکل‌های مختلف NO_x، نیتریک اکسید و نیتروژن دی‌اکسید سمی هستند. حدود ۹۵٪ از NO_x منتشرشده از فرآیندهای سوختنNO، و۵٪ NO_2 است. غلظت بالای NO_2 در فضاهای باز، بیماری‌های تنفسی و قلبی و،اثرات منفی دیگر NO_x از جمله: مه‌دود فوتوشیمیایی، باران‌های اسیدی، گرمای جهانی، تشکیل فرآورده‌های سمی و... است. تکنیک پلاسمای غیرحرارتی، رویکرد خلاقانه‌ای برای این مشکلات ارائه داده است. برای بسیاری از برنامه‌های کاربردی به خصوص حذف غلظت‌های بسیار رقیق آلودگی هوا، رویکرد پلاسمای غیرحرارتی، به علت انتخاب انرژی و قابلیت آن برای حذف همزمان آلاینده‌های مختلف و همچنین مصرف کم انرژی و مقرون به صرفه بودن بسیار مناسب است.

روش بررسی

بخش‌های مختلف راکتور طراحی شده در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) : راکتور تخلیه‌ی سد دی الکتریکی (DBD)

راکتور DBD به شکل یک سیلندر استوانه‌ای، به طول ۱۰۰ میلیمتر می‌باشد، که یک الکترود سوزنی درمیانه‌ی آن متصل شده است. سطح داخلی الکترود خارجی با لایه‌ی ۱٫۵ میلیمتری از آلومینا به عنوان سد دی‌الکتریک پوشیده شده است. فاصله‌ی سد و الکترود داخلی که محل تخلیه است ۲ میلی‌متر می‌باشد. به دلیل حضور سد دی‌الکتریک بین الکترودها، انجام عمل تخلیه نیاز به منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالا دارد.با عبور گاز از سطح دی‌الکتریک، الکترودها میدان الکتریکی کافی را برای تولید پلاسما بین خود ایجاد می‌کنند. آند و کاتد هر دو به منبع تغذیه ولتاژ بالا متصل می‌گردند.طراحی پایه راکتور، شامل یک ورودی گاز به داخل راکتور است. الکترودها هر دو از جنس فولاد می‌باشند. در این آزمایش دمای واکنش‌ها ۳۰۰ کلوین و فشار ۱ اتمسفر در نظر گرفته شده است. در حین حرکت گاز در امتداد محور دودکش، عملکرد منبع تغذیه ولتاژ بالا، منجر به تخلیه درخشان الکتریکی شده و تشکیل پلاسمای غیرحرارتی را سبب می‌شود. علاوه برشکل گیری آسان پلاسما های پایدار و تخلیه ی یکنواخت در راکتورتخلیه ی سد دی الکتریک، مزایای دیگری از قبیل مقیاس پذیری، اثر بخشی و هزینه ی عملیاتی پایین، منجر شده است، محققان استفاده ازاین نوع راکتور را به راکتورهای دیگر ترجیح دهند[۲]. معادلات تعادلی برای

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

گونه‌های مختلف، همچون ذرات خنثی، رادیکال‌ها، یون‌ها و ... توسط رابطه‌ی (۱) نوشته می‌شود[۳].

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} - D_\alpha \nabla^2 n_i = R_i \qquad (۱)$$

D_α ضریب پخش دوقطبی است، و R_i سرعت واکنش برای iمین گونه است. شکل‌گیری NO_2 در سه مسیر ممکن رخ می‌دهد. در ابتدا الکترون از تخلیه‌ی الکتریکی در محیط راکتور تولید می‌شود. در مرحله‌ی دوم نیتروژن اتمی تولید می‌شود. و در آخر اکسیژن اتمی از تجزیه‌ی تولید می‌شود. بنابراین بر اساس واکنش‌های شیمیایی ارائه شده، معادلات پیوستگی برای الکترون و سایر گونه‌های باردار به صورت زیر می باشد،

جدول(۱) - واکنش های گاز NO_2 در حضور پلاسمای غیرحرارتی

$e + NO_2^+ \xrightarrow{K_1} NO + O$	$K_1 = 5.49\times10^{-36}$
$O^- + NO \xrightarrow{K_2} NO_2 + e$	$K_2 = 8.3\times10^{-40}$
$O + NO_2 \xrightarrow{K_3} NO + O_2$	$K_3 = 9.6\times10^{-18}$
$e + O_2 \xrightarrow{K_4} O^- + O$	$K_4 = 5.27\times10^{-17}$
$N_2^+ + NO_2 \xrightarrow{K_5} NO_2^+ + N_2$	$K_5 = 0.55\times10^{-39}$
$e + N_2 \xrightarrow{K_6} N_2^+ + e + e$	$K_6 = 6.66\times10^{-17}$

که K ثابت واکنش می‌باشد و یکای آن $m^3.s^{-1}$ است.

$$\frac{dn_{NO_2^+}}{dt} = R_{NO_2^+} \qquad \frac{dn_O}{dt} = R_O \qquad \frac{dn_{NO_2}}{dt} = R_{NO_2}$$
$$\frac{dn_{N_2^+}}{dt} = R_{N_2^+} \qquad \frac{dn_{NO}}{dt} = R_{NO} \qquad \frac{dn_{N_2}}{dt} = R_{N_2}$$
$$\frac{dn_{O_2}}{dt} = R_{O_2} \qquad \frac{dn_{O^-}}{dt} = R_{O^-} \qquad \frac{dn_e}{dt} = R_e + \alpha |V_d| n_e$$

معادله‌ی $R_\alpha = K_i n_\alpha n_\beta$، که درآن چگالی الکترون به صورت معادله‌ی (۲) نوشته می‌شود.

$$\frac{dn_e}{dt} = R_e + \alpha |V_d| n_e \qquad (۲)$$

V_d سرعت سوق و α ضریب یونیزاسیون اولیه می باشد.

$$R_e = -K_1 n_e n_{NO_2^+} + K_2 n_{O^-} n_{NO} - K_4 n_e n_{O_2^-} + K_6 n_{N_2} n_e + \alpha |V_d| n_e$$
$$R_{NO_2^+} = -K_1 n_e n_{NO_2^+} + K_5 n_{N_2^+} n_{NO_2}$$
$$R_{NO} = K_1 n_e n_{NO_2^+} - K_2 n_{O^-} n_{NO} + K_3 n_O n_{NO_2}$$
$$R_O = -K_3 n_O n_{NO_2} + K_4 n_e n_{O_2} + K_1 n_e n_{NO_2^+}$$
$$R_{O^-} = -K_2 n_{O^-} n_{NO} + K_4 n_e n_{O_2}$$
$$R_{NO_2} = -K_3 n_O n_{NO_2} - K_5 n_{N_2^+} n_{NO_2} + K_2 n_{O^-} n_{NO}$$
$$R_{O_2} = -K_4 n_e n_{O_2} + K_3 n_O n_{NO_2}$$
$$R_{N_2^+} = -K_5 n_{N_2^+} n_{NO_2} + K_6 n_e n_{N_2}$$
$$R_{N_2} = -K_6 n_{N_2} n_e + K_5 n_{NO_2} n_{N_2^+}$$

الکترودها، به منظور تغییر جهت سریع میدان الکتریکی شعاعی، به فرکانس منبع تغذیه متصل شده‌اند. پتانسیل اعمالی به صورت $V = V_0(2\pi t\nu)$ است، که در آن $V_0 = 60kV$ دامنه پتانسیل است. و $\nu = 60\,Hz$ فرکانس منبع تغذیه می‌باشد. عملکرد میدان الکتریکی خارجی بین دو الکترود داخلی و خارجی، منجر به یونیزاسیون در داخل راکتور و شکل‌گیری تخلیه پلاسما می‌شود. بنابراین ضریب اولیه‌ی تاونسند $\alpha\left(E/P\right)$ و سرعت سوق الکترون‌ها در معادله‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$V_d = \mu_e E \qquad \frac{\alpha}{P} = A\exp(BP/E)$$

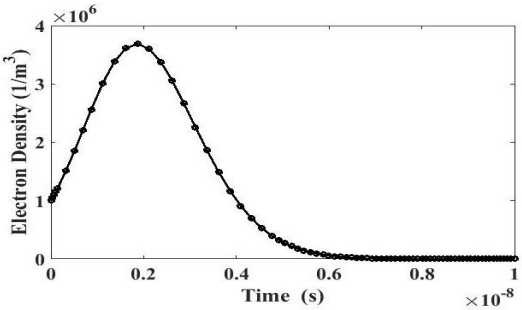
که A و B کمیت‌های ثابت می‌باشند. μ_e تحرک‌پذیری الکترون و V_i پتانسیل یونیزاسیون می‌باشد، که در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

جدول (۲) - داده‌های مدل شبیه‌سازی شده

تحرک پذیری الکترون (μ_e)	$0.134\ m^2/V.s$
کمیت ثابت (A)	2.311
کمیت ثابت (B)	119.2
دما (T)	300 K
فرکانس منبع تغذیه (ν)	60 Hz
دامنه پتانسیل (V_0)	60 kV
چگالی اولیه گونه‌ها	$10^8\ m^{-3}$
چگالی اولیه الکترون‌ها	$10^6\ m^{-3}$

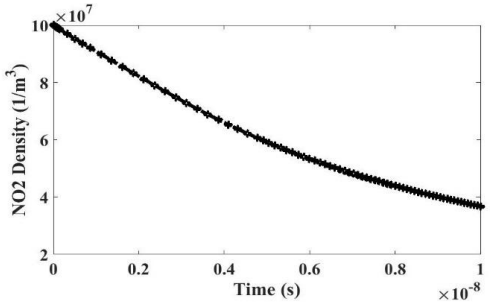
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]



شکل (۲) : نمودار تغییرات زمانی چگالی الکترون درمحیط راکتور نسبت به زمان.

این نمودار نشان می‌دهد هنگامی که میدان الکتریکی خارجی را در راستای شعاعی بین دو الکترود خارجی و داخلی اعمال می‌کنیم، به سبب یونیزاسیون گاز پس‌زمینه و تشکیل پلاسما، چگالی الکترون افزایش پیدا می‌کند. این افزایش در لحظه‌ی ۰,۲ نانوثانیه به اوج می‌رسد. و از آن پس رشد الکترون به سبب واکنش با NO_2^+ و O_2، کاهش پیدا می‌کند.در این سیستم گاز یونیزه می‌شود و پلاسما تشکیل می‌گردد. رامامیورتاهی و همکارش،با شبیه سازی راکتور پلاسمایی توان پالسی،تغییرات چگالی الکترون را به دست آوردند که دست آورد آن ها با نتیجه ی کار ما مطابقت دارد[۴].



شکل (۳) : نمودار تغییرات چگالی NO_2 نسبت به زمان.

نیتروژن دی‌اکسید NO_2 گازی سمی با بویی تند است . این گاز در دمای معمولی زرد و در دماهای بالاتر، به رنگ قهوه‌ای در می‌آید. نیتروژن دی‌اکسید از مهم‌ترین آلاینده های هوا است، و بر رشد گیاهان اثر منفی گلخانه‌ای دارد. با توجه به شکل (۳)، چگالی این گاز با گذشت زمان کاهش، و مطابق با هدف اصلی این راکتور، یعنی کاهش آلاینده‌ی سمی NO_2 است. اکوامارو و همکارانش، با استفاده از تخلیه‌ی تابان، در فشار کم به تجزیه‌ی گاز نیتروژن دی‌اکسید در هوا پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با استفاده از این روش می‌توان گاز نیتروژن دی‌اکسید را به دو گاز بی‌ضرر اکسیژن و نیتروژن تبدیل‌کرد و به این طریق این آلاینده را از چرخه‌ی طبیعت حذف کرد. نتایج به دست آمده صحت روش استفاده شده را نشان می‌دهد که با یافته‌ی این محققان مطابقت دارد. همچنین افزودن کاتالیست یا جاذب کاهش نهایی را افزایش می دهد. [۲]

نتایج

مشاهده شده است هنگامی که ولتاژ بالا به الکترود خارجی اعمال می‌شود، و گاف تخلیه‌ی کوچک برای راکتور انتخاب می‌شود، ولتاژ شکست کوچکتر موردنیاز است. بنابراین با همان ولتاژ بالا حذف NO_2 بهتری صورت می‌گیرد. به علاوه با افزایش قطر الکترود داخلی، به سبب کوچک‌شدن گاف تخلیه، راندمان حذف NO_2 افزایش می‌یابد.همچنین با آغاز تخلیه‌ی الکتریکی در داخل راکتور، غلظت مولکول‌های NO_2 بعد از یک افزایش شدید، کاهش پیدا می‌کند.این نتایج طبق بررسی های جامع ونگ و همکارانش در خصوص اثرات ساختاری راکتور تخلیه ی سد دی الکتریک بر روی حذف NO حاصل شده است.[۵]

مراجع

[1] S. Mohapatro and B. Rajanikanth, "Studies on NOX removal from diesel engine exhaust using duct-type DBD reactor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, pp. 2489-2496, 2015.

[2] P. Talebizadeh, M. Babaie, R. Brown, H. Rahimzadeh, Z. Ristovski, and M. Arai, "The role of non-thermal plasma technique in NOx treatment: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 886-901, 2014.

[3] M. Abedi-Varaki, A. Ganjovi, F. Shojaei, and Z. Hassani, "A model based on equations of kinetics to study nitrogen dioxide behavior within a plasma discharge reactor," *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 13, p. 69, 2015.

[4] B. Ramamurthi and D. J. Economou, "Pulsed-power plasma reactors: two-dimensional electropositive discharge simulation in a GEC reference cell," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 11, p. 324, 2002.

[5] T. Wang, B.-M. Sun, H.-P. Xiao, J.-y. Zeng, E.-p. Duan, J. Xin, *et al.*, "Effect of reactor structure in DBD for nonthermal plasma processing of NO in N 2 at ambient temperature," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 32, pp. 1189-1201, 2012.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]