

## بررسی اثر رطوبت در فرآیند تخلیه الکتریکی با استفاده از سد دی الکتریک در فشار اتمسفری

فوزیه شافعی<sup>۱</sup>؛ علی مهری<sup>۲</sup>؛ حامد سلطانی احمدی<sup>۳</sup>؛ فرشاد صحبت زاده<sup>۴</sup>

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل [fouziyehshafeei@gmail.com](mailto:fouziyehshafeei@gmail.com)

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل [alimehri@nit.ac.ir](mailto:alimehri@nit.ac.ir)

گروه فیزیک اتمی مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابل [hamed.soltani@stu.umz.ac.ir](mailto:hamed.soltani@stu.umz.ac.ir)

گروه فیزیک اتمی مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابل [f.sohbat@umz.ac.ir](mailto:f.sohbat@umz.ac.ir)

کلید واژه: اثر رطوبت، تخلیه سد دی الکتریک (DBD)، برنامه شبیه سازی کامسول

### چکیده

در این پژوهش به بررسی تاثیر رطوبت در فرآیند تخلیه الکتریکی با استفاده از سد دی الکتریک در فشار اتمسفری پرداخته شده است. به منظور بررسی فرآیند مورد نظر از نرم افزار COMSOL MULTYPHYSICS استفاده شده است. شبیه سازی را با در نظر گرفتن یک مدل یک بعدی انجام دادیم و برای شناسایی واکنش های مورد نظر از پایگاه های اطلاعاتی Lxcat و Tanfonline استفاده کردیم. فرکانس 1kHz و ولتاژ پیک تا پیک 6KV را به عنوان منبع ولتاژ ورودی به یکی از الکترودها در نظر گرفتیم و الکترود دیگر را به زمین متصل کردیم. تاثیر دمای محیط را در دو دمای 30 و 50 درجه سانتی گراد بر جریان الکتریکی و تولید ازن مورد بررسی قرار دادیم. همچنین در دماهای مورد نظر دو سطح رطوبت 20 و 50 درصد را نیز مورد ارزیابی قرار دادیم. نتایج شبیه سازی نشان می دهد با افزایش درصد رطوبت جریان الکتریکی و چگالی ازن کاهش می یابد.

## Investigation of the effect of humidity in the process of electrical discharge using a dielectric barrier at an atmospheric pressure

Fouziyeh Shafeei<sup>1</sup>, Ali Mehri<sup>2</sup>, Hamed Soltani Ahmadi<sup>3</sup>, Farshad Sohbatzadeh<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Noshirvani University of Technology, Babol, 47148-73113, Mazandaran, Iran

<sup>3,4</sup>Department of Atomic and Molecular Physics, Faculty of Basic Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, 47416-95447, Mazandaran, Iran

\*corresponding e-mail: [hamed.soltani@stu.umz.ac.ir](mailto:hamed.soltani@stu.umz.ac.ir) and [fouziyehshafeei@gmail.com](mailto:fouziyehshafeei@gmail.com)

### Abstract

In this study, the effect of humidity on the process of electrical discharge using a dielectric barrier at an atmospheric pressure has been explored. COMSOL MULTYPHYSICS software was used to examine the process. We performed the simulation using a one-dimensional model and used the Lxcat and Tanfonline databases to identify the intended reactions. We considered the frequency of 1 kHz and the peak-to-peak voltage of 6KV as the input voltage source to one of the electrodes and connected the other electrode to the ground. We investigated the effect of ambient temperature at 30 and 50 °C on electric current and ozone production. We also evaluated the humidity levels of 20 and 50% at the intended temperatures. The simulation results show that the electric current decreases and the ozone density decreases with increasing moisture content.

**Keywords:** Humidity effect, Dielectric Barrier Discharge (DBD), Comsol Multiphysics simulation.

مقدمه

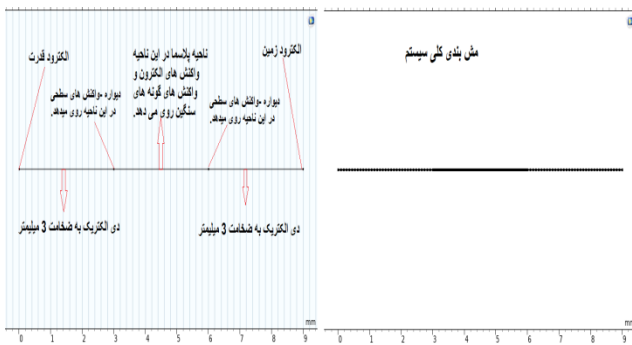
تخلیه سد دی الکتریک (DBD) یا تخلیه خاموش، تکنولوژی بسیار وسیعی است که بیش از یک قرن شناخته شده است، در این زمینه اولین تحقیقات تجربی توسط زیمنس<sup>۱</sup> در سال ۱۸۵۷ گزارش شده است، که در سالهای بعد تمرکز خود را روی ازن ژنراتورها معطوف کرد که می توان آن را مهم ترین اختراعات زیمنس در نظر گرفت. تخلیه سد دی الکتریک در مقیاس صنعتی بزرگ قابل استفاده هستند. از ویژگی های مهم، مقیاس پذیری ساده از راکتورهای آزمایشگاهی کوچک به تاسیسات بزرگ و صنعتی با توان ورودی مگاوات است. منابع تغذیه قدرتمند و مقرون به صرفه در دسترس است مانند (DC, AC, pulsed high voltage). [1]

دامنه فرکانس ترجیحی بین 1KHz تا 10MHz و محدوده فشار مطلوب بین 10KPa (1atm) تا 500KPa است. کاربردهای صنعتی عبارتند از ژنراتورها، کنترل آلودگی، پردازش سطح، لیزرهای CO<sub>2</sub> با توان بالا، صفحه نمایش پلاسما بزرگ مسطح نام برد. [2] تخلیه سد دی الکتریک یک پلاسما غیرحرارتی است که در فشارهای متفاوت با گازهای مختلف عمل می کند و در هوا معمولاً از تعداد زیادی میکرو کانال (رشته ها) با شعاع تا 100µm ایجاد می شوند. [3] جنس سد دی الکتریک روی الکترودها معمولاً شیشه، کوارتز، سرامیک و همچنین لعاب نازک یا پوشش های پلیمری نیز مورد استفاده قرار می گیرند. [4] در مقایسه با یک فرآیند تخلیه فشار پایین، تخلیه فشار اتمسفری در هوا بعضی از معایب مانند چگالی پایین الکترون ها با انرژی جنبشی بالا، فرونشاندن مؤثر گسیل نوری، جذب فوتون VUV و سینتیک شیمیایی پیچیده در هنگام انتشار ذرات بر روی سطح پردازش شده را دارد. شرایط پلاسما تخلیه سد دی الکتریک در هوا به دامنه و فرکانس ولتاژ به کاررفته، فاصله الکترودها، نوع دی الکتریک و جنس الکترودها بستگی دارد. [4] طی دو دهه گذشته، تخلیه سد دی الکتریک (DBD)، یک نمونه معمول از پلاسما غیرحرارتی، به عنوان یک راکتور شیمیایی مبتنی بر پلاسما در بسیاری از کاربردهای زیست محیطی و بیولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته

است. DBD با وجود یک ماده دی الکتریک در مسیر تخلیه بین دو الکترودها در تنظیمات مختلف مشخص می شود. [5]

مواد و روش ها

در این پژوهش به بررسی تأثیر رطوبت و دمای محیط در فرآیند تخلیه الکتریکی با استفاده از سد دی الکتریک در فشار اتمسفری پرداخته شده است. به منظور بررسی فرآیند مورد نظر از نرم افزار COMSOL MULTYPHYSICS استفاده شده است. شبیه سازی را با در نظر گرفتن یک مدل یک بعدی انجام دادیم. فرکانس 1kHz و ولتاژ پیک تا پیک 6KV را به عنوان منبع ولتاژ ورودی به یکی از الکترودها در نظر گرفتیم و الکترودهای دیگر را به زمین متصل کردیم. تأثیر دمای محیط را در دو دمای 30 و 50 درجه سانتی گراد بر جریان الکتریکی و تولید ازن مورد بررسی قرار دادیم. همچنین در دماهای مورد نظر دو سطح رطوبت 20 و 50 درصد را نیز مورد ارزیابی قرار دادیم. هندسه و مش بندی سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است. جدول ۱ المان های مش بندی یک بعدی را نشان می دهد. جدول ۲ نیز واکنش های تولید و نابودی ازن را نشان می دهد. جدول ۳ درصد ترکیب گازهای نیتروژن، اکسیژن و بخار آب را در شرایط مختلف دمایی و رطوبتی نشان می دهد.



شکل ۱) هندسه و مش بندی سیستم

جدول ۱) المان های مش بندی سیستم را نشان می دهد.

Description	Value
Maximum element size	0.09
Minimum element size	1.8E-4
Curvature factor	0.2
Predefined size	Extremely fine

<sup>1</sup>.Werner von Siemens

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

$$\frac{\partial n_\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{\Gamma}_\varepsilon + \vec{E} \cdot \vec{\Gamma}_\varepsilon = R_\varepsilon - (\vec{u} \cdot \nabla) n_\varepsilon \quad (4)$$

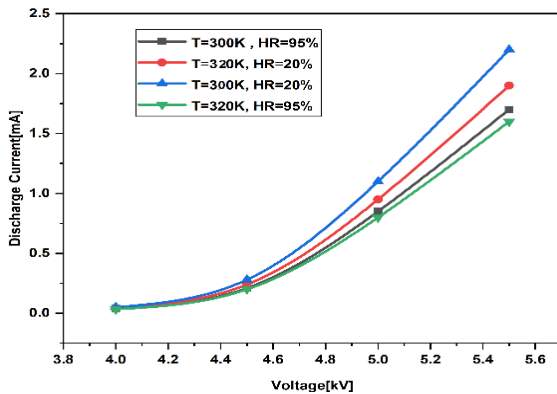
معادله‌ی پیوستگی برای گونه‌های یونی به شکل زیر است:

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

در این معادلات  $n_e$  چگالی الکترون؛  $\vec{\Gamma}_e$  شار الکترون؛  $\vec{u}$  سرعت میانگین گونه‌ها؛  $R_e$  نرخ تولید الکترون؛  $\vec{D}_e$  ضریب پخش الکترون؛  $R_\varepsilon$  نرخ انرژی برخوردهای غیر الاستیک؛  $Q_{gen}$  منبع اصلی گرما؛  $n_e$  چگالی انرژی الکترون؛  $S_i$  منبع تولید یون؛  $n_i$  چگالی یونی؛  $\phi$  پتانسیل الکترواستاتیکی؛  $S_{en}$  اتلاف توان است.

### بحث و نتیجه‌گیری

شکل زیر تغییرات جریان تخلیه الکتریکی را در ولتاژهای ۴ تا ۵.۵ کیلوولت به ازای درصد‌های مختلف بخار آب نشان می‌دهد.



شکل ۲) تغییرات جریان تخلیه را در ولتاژهای مختلف در شرایط دما و رطوبت مورد نظر نشان می‌دهد.

شکل زیر توزیع دوبعدی تولید ازن در رطوبت‌های مختلف را نشان می‌دهد. محور افقی فاصله بین دو الکتروود و محور عمودی زمان ۴ دوره تناوب را به تصویر می‌کشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار ازن در دوره چهارم تناوب و نزدیک به دیواره دی الکتریک‌ها تولید شده است. همچنین بیشترین مقدار تولید ازن در دمای 300K و رطوبت 20٪ و کمترین مقدار نیز در دمای 320K و رطوبت 95٪ رخ داده است.

جدول ۲) واکنش‌های تأثیرگذار در ازن را نشان می‌دهد.

Number	Reaction	Collision Type <sup>1</sup>	Reaction Rate <sup>2</sup>
<b>R<sub>1</sub></b>	O+O+O <sub>2</sub> →O <sub>3</sub> +O <sub>2</sub>	Reaction	199.7
<b>R<sub>2</sub></b>	O+N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> →O <sub>3</sub> +N <sub>2</sub>	Reaction	199.7
<b>R<sub>3</sub></b>	O+O <sub>3</sub> →O <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>	Reaction	4700
<b>R<sub>4</sub></b>	N+O <sub>3</sub> →O <sub>3</sub> +N <sub>2</sub>	Reaction	120
<b>R<sub>5</sub></b>	NO+O <sub>3</sub> →NO+O <sub>2</sub>	Reaction	1.2×10 <sup>4</sup>
<b>R<sub>6</sub></b>	NO <sub>2</sub> +O <sub>3</sub> →NO <sub>3</sub> +O <sub>2</sub>	Reaction	21
<b>R<sub>7</sub></b>	N <sub>2</sub> S <sup>+</sup> +O <sub>3</sub> →NO+NO+O	Reaction	4.8×10 <sup>6</sup>
<b>R<sub>8</sub></b>	OH+O <sub>3</sub> →HO <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>	Reaction	4×10 <sup>4</sup>
<b>R<sub>9</sub></b>	HO <sub>2</sub> +O <sub>3</sub> →O <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> +OH	Reaction	1.2×10 <sup>3</sup>
<b>R<sub>10</sub></b>	H+O <sub>3</sub> →OH+O <sub>2</sub>	Reaction	1.2×10 <sup>6</sup>
<b>R<sub>11</sub></b>	H+O <sub>3</sub> →HO <sub>2</sub> +O	Reaction	1×10 <sup>7</sup>

۱. واکنش گونه‌های سنگینی که در تولید و کاهش ازن نقش دارند.
  ۲. برای دو گونه واکنش‌دهنده واحد آن  $\frac{m^3}{s.mol}$  و برای سه گونه واکنش‌دهنده واحد آن  $\frac{m^6}{s.mol^2}$
  ۳. هدف گونه برانگیخته N<sub>2</sub> است.
- جدول ۳) درصد حضور نیتروژن، اکسیژن و بخار آب در ۴ حالت دما و رطوبت

دما و رطوبت	درصد N <sub>2</sub> (%)	درصد O <sub>2</sub> (%)	درصد H <sub>2</sub> O(%)
T=300K,HR=20%	77.7	21.7	0.6
T=300K,HR=95%	76.3	20.7	2.6
T=320K,HR=20%	77.05	21.05	1.9
T=320K,HR=95%	74.5	17.5	9

### معادلات تعریف‌شده

در این قسمت تعدادی از معادلات به کاررفته در این شبیه‌سازی را بررسی می‌کنیم. تغییرات شیمی سطح به واکنش‌های رخ داده در سطوح (الکتروودها) اشاره دارد که شرایط مرزی برای گونه‌های مختلف و نرخ تولید و نابودی را بررسی می‌کند [6]. چگالی و انرژی میانگین الکترون با حل جفت معادلات سوق و پخش محاسبه می‌شوند.

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

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

نرخ انرژی ناشی از برخوردهای غیر الاستیک در معادله‌ی ۳ و چگالی انرژی الکترون در معادله‌ی ۴ نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۴ ملاحظه می شود با افزایش درصد بخار آب جریان کاهش و با کاهش درصد بخار آب جریان افزایش میابد. بنابراین در حالت دمای 300K و رطوبت 20 درصد بیشترین جریان که پیک مقدار آن حدود 0.01 میلی آمپر محاسبه شده است. همچنین در حالت دمای 320K و رطوبت 95 درصد که بیشترین درصد بخار آب در ۴ حالت را دارد جریان کمترین مقدار و پیک آن حدود 0.07 میلی آمپر به دست آمده است.

### نتیجه گیری

نتایج شبیه سازی نشان می دهد با افزایش درصد رطوبت جریان الکتریکی و چگالی ازن کاهش می یابد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد با ۱۵ برابر شدن درصد رطوبت محیط جریان الکتریکی در حدود ۱.۵ برابر و چگالی گونه ازن در حدود ۱۴ برابر کاهش یافته است.

### مرجع ها

[1] Roth, J. R. (2001). *Industrial plasma engineering: Volume 2: Applications to nonthermal plasma processing* (Vol. 2). CRC press.

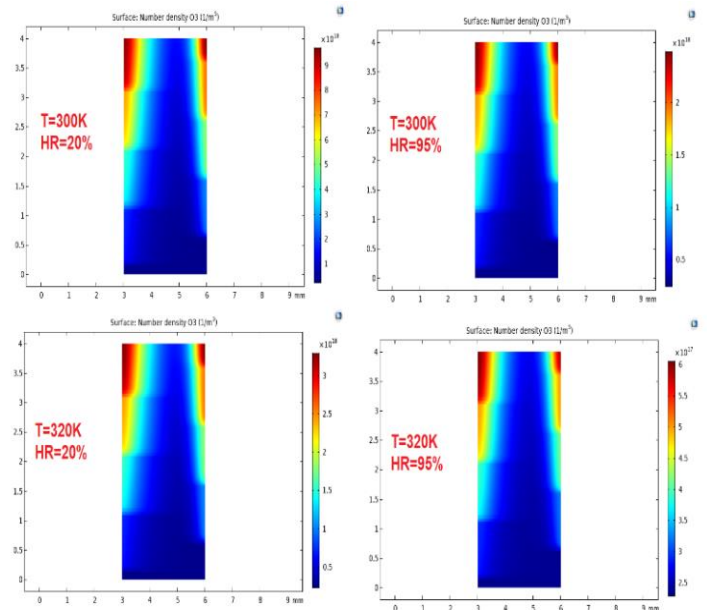
[2] Kogelschatz, U. (2003). Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma chemistry and plasma processing*, 23(1), 1-46.

[3] Kuchenbecker, M., Bibinov, N., Kaemling, A., Wandke, D., Awakowicz, P., & Viöl, W. (2009). Characterization of DBD plasma source for biomedical applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(4), 045212.

[4] Kogelschatz, U. (2002). Filamentary, patterned, and diffuse barrier discharges. *IEEE Transactions on plasma science*, 30(4), 1400-1408.

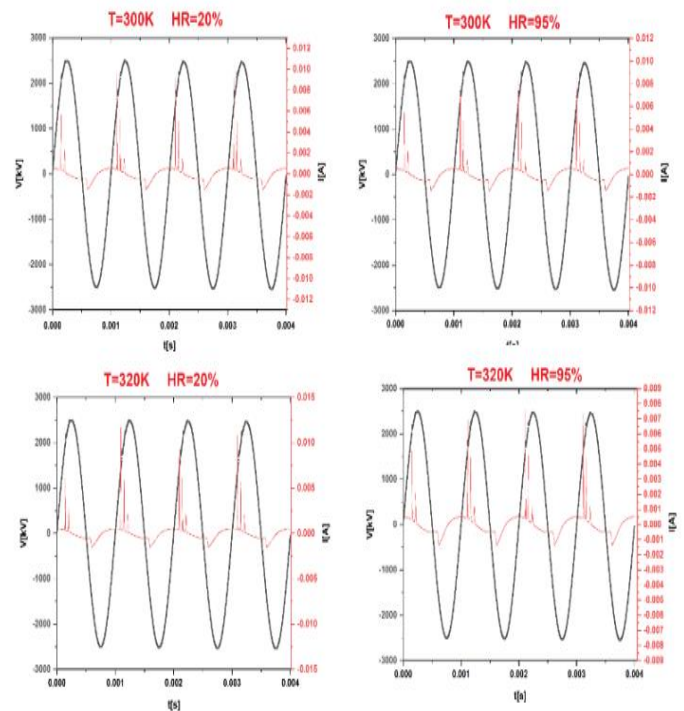
[5] Abdelaziz, A. A., Ishijima, T., & Seto, T. (2018). Humidity effects on surface dielectric barrier discharge for gaseous naphthalene decomposition. *Physics of Plasmas*, 25(4), 043512.

[6] Rosnagel S M, Cuomo J J and Westwood W D (eds) 1770 *Handbook of plasma Processing Technology* (Park Ridge: Noyes)



شکل ۳) توزیع دوبعدی تولید ازن به ازای ۴ دوره تناوب در ۴ سطح رطوبت مختلف

شکل زیر منحنی مشخصه V-I را در ۴ حالت رطوبت مختلف نشان می دهد.



شکل ۴) منحنی مشخصه V-I در ۴ حالت مختلف حضور بخار آب به ازای Vpp=6KV