

Effect of Electrode Configuration on Electrical and Thermal Characteristics of Cold Atmospheric Pressure Surface Dielectric Barrier Discharge Plasma Devices¹

Mohammad Mahdi Aghamolaei^{2*}, Ali Hasanbeigi³ and Fariborz Taghizadeh kenazeh⁴

Abstract

The geometrical configuration of the electrode significantly affects the physical and chemical properties of the discharge. This article presents the influence of cold atmospheric pressure Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD) plasma structures with square, hexagonal, and circular configurations, developed at the Plasma Research Institute of Kharazmi University, and their profound effects on the device's power consumption, the uniformity of micro-discharges (MD), and the plasma production temperature. Increasing the number of corner points in the electrode design led to an increase in discharge power. Experiments showed that the uniformity of the Surface Dielectric Barrier Atmospheric Micro-Discharge (SDBAMD) was strongly influenced by the electrode structure, with the most uniform discharge observed when the electrode configuration was circular. Additionally, our analysis demonstrates that different electrode configurations can alter the plasma temperature, ultimately affecting the application of this atmospheric cold plasma generation source. Finally, the results indicate that surface dielectric barrier discharge devices with circular electrode configurations exhibit the highest power consumption, the most uniform micro-discharge, and the lowest production temperature.

Keywords: *Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD), Electrode Geometry Configuration, Power Consumption, Plasma Uniformity.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2024.48194.1423

¹ Selected Paper of the 11th Conference of Plasma Engineering and Physics of Plasma

² Instructor, Institute for Plasma Research and Plasma Medicine, Kharazmi University, Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: m.ghamolaei@khu.ac.ir

³ Associate Professor, Institute for Plasma Research and Plasma Medicine, Kharazmi University, Tehran, Iran. Email: hbeigi@khu.ac.ir

⁴ M. Sc. Graduated, Institute for Plasma Research and Plasma Medicine, Kharazmi University, Tehran, Iran. Email: feri68feri68ft@gmail.com

تأثیر پیکربندی الکتروود بر مشخصه‌های الکتریکی و گرمایی دستگاه‌های پلاسما‌ی تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی فشار اتمسفری سرد^۱

محمد مهدی آقاملایی^{۲*}، علی حسن بیگی^۳ و فریبرز تقی‌زاده کنازه^۴

چکیده:

پیکربندی هندسی الکتروود به صورت قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تخلیه تأثیر می‌گذارد. مقاله ارائه شده پویایی ساختارهای پلاسما‌ی تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی فشار اتمسفر سرد با پیکربندی‌های مربعی، شش ضلعی و دایروی ساخته شده در پژوهشکده پلاسما دانشگاه خوارزمی را نمایان می‌سازد و تأثیرات عمیق آن بر توان مصرفی دستگاه، یکنواختی میکرو تخلیه و دمای تولیدی پلاسما روشن می‌کند. افزایش تعداد نقاط گوشه‌ای الکتروود منجر به افزایش توان تخلیه شد. آزمایش‌ها نشان داد که یکنواختی میکرو تخلیه اتمسفری سد دی‌الکتریک سطحی به شدت تحت تأثیر ساختار قرار دارد و یکنواخت‌ترین تخلیه زمانی بدست می‌آید که پیکربندی الکتروود دایره‌ای باشد. افزون بر این، تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که پیکربندی‌های مختلف الکتروود می‌تواند دمای پلاسما را تغییر دهد، که در نهایت بر کاربرد این نوع از منابع تولیدی پلاسما سرد اتمسفری تأثیر می‌گذارد. به عنوان اصلی‌ترین نتیجه آزمایشات مشخص شد که دستگاه‌های تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی با پیکربندی الکتروود دایره‌ای بیشترین توان مصرفی، یکنواخت‌ترین میکرو تخلیه و کم‌ترین دمای تولیدی را دارا می‌باشند.

واژگان کلیدی: تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی، پیکربندی هندسی الکتروود، توان مصرفی، یکنواختی پلاسما.

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2024.48194.1423

^۱ مقاله منتخب یازدهمین کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما‌ی ایران

^۲ مربی، پژوهشکده پلاسما و پلاسما پزشکی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). Email: m.aghamolaei@khu.ac.ir

^۳ دانشیار، پژوهشکده پلاسما و پلاسما پزشکی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. Email: hbeigi@khu.ac.ir

^۴ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده پلاسما و پلاسما پزشکی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. Email: fer168fer168ft@gmail.com

۱. مقدمه

تخلیه مانع دی‌الکتریک سطحی (SDBD)^۱ می‌تواند برای تولید پلاسما در مقیاس بزرگ، دمای اتاق و در فشار اتمسفر استفاده شود که این دستگاه‌ها دارای پتانسیل قابل توجهی برای کاربردهای مختلف چون پلاسما پزشکی، اصلاح مواد و آیرودینامیک هستند [۱-۳]. بیشتر راکتورهای SDBD از سه لایه تشکیل شده‌اند: یک الکتروود صفحه‌ای ولتاژ بالا (HV)^۲، یک صفحه دی‌الکتریک و یک الکتروود زمین [۴]. الکتروودهای متصل به زمین اغلب به شکل مربع، شش ضلعی یا دایره قرار می‌گیرند [۵-۷]. وقتی ولتاژ بالا روی الکتروود HV اعمال می‌شود، پلاسما روی سطح دی‌الکتریک سمت الکتروود زمین شده تولید می‌شود. در دستگاه‌های پلاسما تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی هیچ شکافی بین هیچ یک از الکتروودها و سد دی‌الکتریک وجود ندارد. در نتیجه، تخلیه‌ها کمابیش توزیعی دویعدی را بر روی سطح مانع و در امتداد مرز الکتروودی که در معرض گاز اطراف باقی می‌ماند، بدست می‌آورند [۸]. مزایای اصلی پلاسما سطحی نسبت به سایر روش‌های تولید پلاسما، نیازمندی آن به مصرف انرژی کم، سفارشی‌سازی (طراحی و مقیاس‌پذیری)، عدم نیاز به جریان گاز، و از همه مهم‌تر توانایی تخلیه شبه‌کرونا برای کاربرد در بسیاری از زمینه‌های پلاسما است.

تولید پلاسما و گونه‌های واکنش‌پذیر آن تا حد زیادی به نوع منبع و کمیت‌های دستگاه پلاسما چون ساختار، جنس و هندسه الکتروود و دی‌الکتریک، توان ورودی (ولتاژ و بسامد)، نرخ جریان گاز در حال کار، دما، فاصله شکاف گاز و رطوبت هوا بستگی دارد [۸-۱۲]. اندازه‌گیری دقیق دمای پلاسما به دلیل تأثیر قابل توجه آن بر واکنش‌های شیمیایی ناشی از تخلیه، یک کار بسیار مهم است. شواهد قانع‌کننده‌ای وجود دارد که نشان می‌دهد گرمای تولیدی در دی‌الکتریک می‌تواند سبب تغییر و ایجاد میکروورشته‌ها شود. پس اندازه‌گیری دقیق دما برای اطمینان از شرایط واکنش بهینه و نتایج تجربی قابل اعتماد ضروری است.

از این‌رو، SDBD باید بیشتر توسعه یابد تا توزیع یکنواخت پلاسما و گونه‌های فعال تولید شده را روی سطح هدف بدون اثرات نامطلوب ایجاد کند. تأثیر پیکربندی الکتروود بر ویژگی‌های پلاسمای سطحی نامشخص است. این پژوهش برای روشن کردن تأثیرات مش‌بندی الکتروود بر توان مصرفی و توزیع یکنواخت میکروتخلیه‌های سطحی و همچنین دمای پلاسما تولیدی طراحی و عملی شده

¹ Surface Dielectric Barrier Discharge

² High Voltage

است. در این کار، سه دستگاه منبع پلاسمای سطحی با ساختارهای مختلف مربعی، شش ضلعی و دایروی در پژوهشکده پلازما و پلازما پزشکی دانشگاه خوارزمی ساخته و استفاده شد (شکل (۱)). اثرات پیکربندی الکتروود بر توان تخلیه SDBD و یکنواختی میکروتخلیه‌های اتمسفری تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی (SDBAMD) آزمایش و بررسی شد و افزون بر این، دمای پلاسمای تولیدی هر دستگاه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.



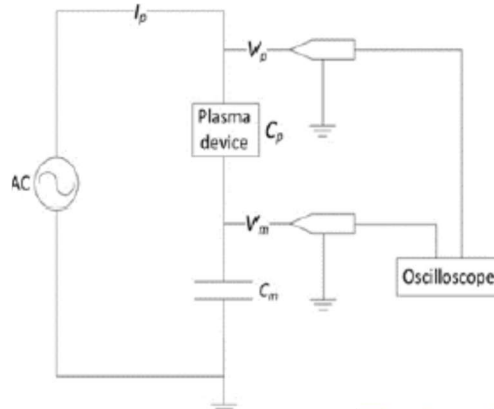
شکل ۱ دستگاه‌های پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی.

۲. مواد و روش‌ها

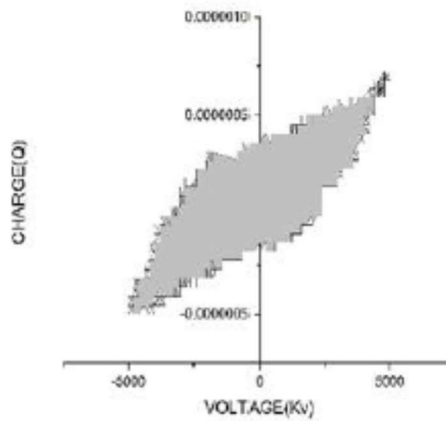
ویژگی‌های تخلیه به شدت به پیکربندی الکتروود بستگی دارد. با این حال، بیش در مورد تأثیر پیکربندی الکتروود بر پلاسمای سطحی بسیار کم است. به منظور روشن کردن تأثیر ساختار الکتروود بر توان مصرفی پلاسمای تولیدی، سه دستگاه تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی با الگوهای مربعی، شش ضلعی و دایروی در آزمایشگاه پژوهشکده پلازما دانشگاه خوارزمی طراحی و ساخته شدند. اندازه محیط داخلی به منظور برابری و قابل مقایسه بودن آزمایشات، یکسان و کاملاً برابر قرار داده شده‌اند. صفحات با ابعاد کلی ۱۲*۱۷ سانتی‌متر و اندازه الکتروود آن‌ها ۹*۱۳ سانتی‌متر در قسمت میانی دی‌الکتریک از جنس میکا ساخته شدند.

اندازه‌گیری دقیق و مطمئن ویژگی‌های الکتریکی و مکانیکی در اطمینان از تولید موفقیت‌آمیز پلازما بسیار مهم است. ولتاژ ۱۰ کیلوولت قلّه به قلّه و بسامد ۵ کیلوهرتز برای تمامی آزمایشات ثابت و یکسان اعمال شد. با انجام دو بار تکرار در اندازه‌گیری و محاسبه، توان میانگین هر دستگاه بدست آمده و ثبت شد. یک روش برای محاسبه توان اتلافی یا مصرفی هر تخلیه مانع دی‌الکتریک این است که از مدار معادل (شکل (۲)) آن استفاده شود به صورتی که بار، $Q(t)$ ، در برابر ولتاژ، $V(t)$ ، در یک سیکلوگرام شارژ-ولتاژ، یا همان نمودار Lissajous رسم شود که مساحت آن انرژی

تلف شده در هر سیکل است. تمام اندازه گیری ها با استفاده از اسیلوسکوپ GPS-1072B صورت گرفت و نمودارهای لیسازو آن ها رسم شد (شکل ۳)) تا تاثیر ساختار الکتروود بر توان مصرفی پلاسماهای سطحی با پیکربندی های مربعی، شش ضلعی و دایره ای اندازه گیری و مقایسه شوند.



شکل ۲ مدار معادل

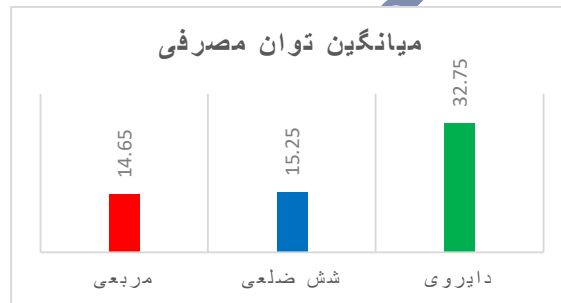


شکل ۳ نمودار لیسازو

همچنین در این پژوهش از دوربین حرارتی مادون قرمز TESTO 881 برای اندازه‌گیری دمای متوسط پلاسمای تولیدی با استفاده از سه ساختار متفاوت و مقایسه کمی و کیفی پلاسمای استفاده شده. دوربین‌های تصویربرداری حرارتی دستگاه‌هایی هستند که از فناوری مادون قرمز برای مشخص کردن بدون تماس، ضبط و نشان دادن توزیع دما روی سطوح یا اشیاء استفاده می‌کنند. از آنجا که گرمایش گاز در فرآیند فروکش کردن مولکول‌های برانگیخته ایجاد می‌شود، بیشینه افزایش دما در سطح در ناحیه پلاسمای رخ می‌دهد و در اطراف کاهش می‌یابد. افزایش دمای سطح در درجه اول ناشی از انتقال حرارت از گرمای باقیمانده در پلاسمای و سپس گرمای تولید شده به کمک تلفات دی‌الکتریک است.

۳. بحث

از راه تحلیل مقادیر بدست آمده با استفاده از آزمایشات، میانگین توان مصرفی برای هر شکل الکتروود محاسبه شد. توان مصرفی بدست آمده نشان دادند که الکتروودهای دایره‌ای به صورت متوسط بالاترین توان مصرفی را دارند (۳۲.۷۵ وات)، در حالی که الکتروودهای شش ضلعی و مربعی به ترتیب میانگین‌های ۱۵.۲۵ و ۱۴.۶۵ وات را نشان دادند (شکل ۴).



شکل ۴ نمودار میانگین توان مصرفی دستگاه‌های پلاسمای سطحی مربعی، شش ضلعی و دایره‌ای.

این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از توزیع میدان الکتریکی متفاوتی باشد که هر شکل الکتروود تولید می‌کند. در شکل‌های دایره‌ای، میدان الکتریکی ممکن است بیشتر به صورت یکنواخت توزیع شود و این امر سبب می‌شود که انرژی بیشتری به گاز وارد شود. از این رو، پلاسمای یکنواخت بیشتری تولید کند که این نشان می‌دهد که یک رابطه مثبت قوی بین شکل الکتروود و توان مصرفی وجود دارد. این مطالعه پیشنهاد می‌کند که الکتروودهای با سطح لبه الکتروود صاف تر (چون دایره‌ای که

گوشه ندارد یا در حقیقت، می توان گفت که چند ضلعی با بی نهایت گوشه است) می توانند به دلیل توزیع بهینه و یکنواخت تر میدان های الکتریکی، توان بیشتری تولید کنند. همچنین الگوی مربعی و شش ضلعی دارای گوشه هایی است که با تلنبار شدن بار در این نقاط، میدان الکتریکی را تشدید می کنند و این سبب می شود پلاسما ترجیحاً در اطراف آن ها و در قسمت میانی لبه های هر ضلع اشکال تشکیل شود.

در خصوص دمای تولیدی نیز جدول زیر (جدول (۱)) میانگین دمای کل هر ساختار الکتروود را نشان می دهد. مشخص است که الکتروود مربع دارای بالاترین دمای متوسط است و به دنبال آن الکتروود شش ضلعی و سپس دایره ای قرار می گیرد. این می تواند تفاوت هایی را در روش انتقال انرژی هر شکل به گاز اطراف جهت تولید پلاسما نشان دهد. همچنین می توان فهمید که هر چه تعداد گوشه ها یعنی نقاط تجمع بار کمتر باشد، دمای دستگاه بیشتر است.

جدول ۱ دمای میانگین دستگاه های پلاسمای سطحی مربعی، شش ضلعی و دایروی.

پیکربندی الکتروود	دمای میانگین
مربعی	۴۴.۸۳
شش ضلعی	۴۲.۸۳
دایروی	۴۱.۱۶

جدول دمایی نشان می دهد که پیکربندی مربعی ممکن است برای کاربردهایی که نیاز به انرژی حرارتی بالا دارند، ترجیح داده شود. به صورت مقابل، ساختار شش ضلعی، در حالی که دماهای متوسط میانه ای نشان داد، عملکرد متعادلی ارائه داد که ممکن است برای کاربردهایی که نیاز به حرارت متوسط با درجه ای از ثبات دارند، مناسب باشد.

ساختار دایروی، با ارائه پایین ترین دماهای متوسط می تواند برای فرآیندهایی که نیاز به تأثیر حرارتی کمتری دارند نظیر کاربردهای زیست شناختی، برتری داشته باشد، و عمیق ترین و کنترل شده ترین محیط حرارتی را در میان سه ساختار مورد مطالعه ارائه دهد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشات نشان داد که دستگاه‌های تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی با پیکربندی الکترو دایره‌ای بیشترین توان مصرفی، یکنواخت‌ترین میکروتخلیه و کم‌ترین دمای تولیدی را دارا می‌باشد. این امر به دلیل بهینه‌سازی طراحی دایروی و نداشتن نقاط گوشه‌ای که سبب تجمع بار و تقویت میدان الکتریکی می‌شوند، می‌باشد که سبب می‌شود انرژی به صورت موثرتری به پلاسما تبدیل شود و در نتیجه توان بیشتری تولید کند. همچنین ساختارهای دایروی می‌توانند میکروتخلیه‌های یکنواخت و توزیع پلاسمایی همگن‌تری تولید کنند. توان مصرفی بالاتر و یکنواختی پلاسمای تولیدی در کنار دمای پایین ساختار دایروی می‌تواند آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی چون پزشکی و صنعت تبدیل کند.

۵. تقدیر و تشکر

تشکر از استاد دانشمند و پرمایه‌ام ریاست محترم پژوهشکده پلاسما جناب آقای دکتر حسن مهدیان که از محضر پر فیض علمشان، بهره‌ها برده‌ام و شرایط را برای بهره‌مندی از امکانات و تجهیزات پژوهشکده فراهم نمودند. با امتنان بیکران از مساعدت‌های بی‌شائبه جناب آقای دکتر کمال حاجی شریفی و مهندس مهدی بخش‌زاد محمودی که با راهنمایی‌ها و کمک‌های این بزرگواران مسیر انجام تحقیقات هموارتر گردید.

مراجع

- [1] Bartis, E.A., Luan, P., Knoll, A.J., Graves, D.B., Seog, J. and Oehrlein, G.S., "A comparative study of biomolecule and polymer surface modifications by a surface microdischarge", *The European Physical Journal D* 70, 1-19, 2016. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2016-70123-5>.
- [2] Lloyd, G., Friedman, G., Jafri, S., Schultz, G., Fridman, A. and Harding, K., "Gas plasma: medical uses and developments in wound care", *Plasma Processes and Polymers* 7, 3-4, 194-211, 2010. <https://doi.org/10.1002/ppap.200900087>.
- [3] Yan, H., Yang, L., Qi, X. and Ren, C., "Improving thrust by pulse-induced breakdown enhancement in AC surface dielectric barrier discharge actuators for airflow control", *Journal of Physics D: Applied Physics* 49, 29, 295203, 2016. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/29/295203>.
- [4] Brandenburg, R., Bruggeman, P.J., Starikovskaia, S.M., "Fast pulsed discharges", *Plasma Sources Sci Technol.* 26(2), 020201, 2017. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa5377>.
- [5] Jeon, J., Rosentreter, T.M., Li, Y., Isbary, G., Thomas, H.M., Zimmermann, J.L., Shimizu, T., "Bactericidal agents produced by Surface Micro-Discharge (SMD) plasma by controlling

- gas compositions", *Plasma Process Polym.* 11(5), 426-436, 2014. <https://doi.org/10.1002/ppap.201300123>.
- [6] Wang, B., Liu, D., Zhang, Z., Li, Q., Wang, X. and Kong, M.G., "A new surface discharge source: plasma characteristics and delivery of reactive species", *IEEE Transactions on Plasma Science* 44, 12, 3295-3301, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2613964>.
- [7] Jeon, J., Klaempfl, T.G., Zimmermann, J.L., Morfill, G.E. and Shimizu, T., "Sporicidal properties from surface micro-discharge plasma under different plasma conditions at different humidities", *New Journal of Physics* 16(10), 103007, 2014. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/10/103007>.
- [8] Lieberman, M.A., Lichtenberg, A.J., "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", 2nd Edition, *Wiley-Interscience*, 2005.
- [9] Paschen, F., "Ueber die zum Funkenubergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensaure bei 13 verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz", *Annalen der Physik.*, 273(5-14), 69-96, 1889. <https://doi.org/10.1002/andp.18892730505>.
- [10] Langmuir, I., "Oscillations in ionized gases", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 14(8), 627-637, 1928. <https://doi.org/10.1073/pnas.14.8.627>.
- [11] Lei, P., Kun, H., Qiaogen, Z., Chunliang, L., "Study on the characteristics of barrier free surface discharge driven by repetitive nanosecond pulses at atmospheric pressure", *Phys Plasmas.*, 23(5), 2016. <https://doi.org/10.1063/1.4953807>.
- [12] Li, D., Liu, D., He, T., Li, Q., Wang, X., Kong, M.G., "Three distinct modes in a surface micro-discharge in atmospheric pressure He+ N2 mixtures", *Phys Plasmas.*, 22(12), 2015. <https://doi.org/10.1063/1.4938209>.

Article in Press