

بررسی و آنالیز ولتاژ بحرانی شکست و توان اتلافی مقره‌های پلیمری با حضور لایه‌ی بهینه ریزدانه‌های اکسیدروی

مرتضی قایدی^۱

^۱ استادیار، دانشگاه بیرجند، بیرجند، m.ghayedi@birjand.ac.ir

چکیده

از آنجایی که میدان الکتریکی در مجاورت ترمینال‌های فشارقوی و زمین از سایر نقاط بیشتر است؛ کاهش میدان الکتریکی در مجاورت این ترمینال‌ها یک فرایند مفید برای عملکرد بهتر مقره است. با کاهش این میدان و کاهش تخلیه‌های الکتریکی، مقره می‌تواند ولتاژ بیشتری را تحمل کند و به تبع آن ولتاژ بحرانی تخلیه الکتریکی مقره تحت تأثیر قرار خواهد گرفت.

تحقیقات سال‌های اخیر ثابت کرده است که استفاده از تکنولوژی ریزدانه جهت کنترل تنش الکتریکی، عملکرد مقره‌های کامپوزیتی را نیز بهبود داده است [۳-۶]. در [۳] با تزریق لایه ریزدانه، کاهش ۲۳٪ ماکزیمم میدان الکتریکی سطح مقره گزارش شده است.

ویژگی اصلی یک ماده با مقاومت غیرخطی بدین صورت است که بیشتر از یک میدان الکتریکی آستانه، رسانایی الکتریکی آن افزایش می‌یابد، از این رو می‌تواند برای کاهش تنش ماکزیمم میدان در نقاط بحرانی اطراف عایق مورد استفاده قرار گیرد [۷]. استفاده از یک لایه ریزدانه با دو ضخامت متفاوت در یک مقره کامپوزیتی در [۸] ارائه شده است و نتایج به‌دست‌آمده تأثیر ریزدانه در کاهش میدان ماکزیمم در نزدیکی ترمینال‌های مقره را نشان داده است. در [۹] تزریق یک لایه ریزدانه در یک مقره کامپوزیتی تحت شرایط خشک و آلوده با تست آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته که نتایج کاهش قابل ملاحظه ماکزیمم میدان الکتریکی روی سطح مقره را نشان می‌دهد.

در این مقاله به منظور تحلیل میدان الکتریکی و بررسی تأثیر تزریق لایه ریزدانه در مقره کامپوزیتی از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics استفاده شده است. سپس به‌وسیله ارتباط MATLAB با نرم‌افزار COMSOL ابعاد بهینه لایه مذکور توسط الگوریتم اجتماع ذرات تسریع یافته به هدف بیشینه کردن مقدار ولتاژ بحرانی شکست و همچنین کمینه کردن توان اتلافی مقره تعیین شده است.

مدل‌سازی مقره

در این مقاله تجزیه و تحلیل اجزاء محدود در حالت الکترواستاتیکی انجام شده است. مقره کامپوزیتی دارای چهار قسمت اصلی میله‌ی فایبرگلاس، غلاف پلیمری، چترک‌های پلیمری و اتصالات فلزی می‌باشد [۱۰]:

در این مقاله تأثیر حضور ریزدانه‌های اکسیدروی بر کاهش میدان الکتریکی سطح مقره کامپوزیتی و ولتاژ بحرانی شکست مقره مورد بررسی قرار گرفته است. ریزدانه دارای یک مشخصه غیرخطی می‌باشد که در فضای بین هسته و پوشش سیلیکونی خارجی مقره به کار رفته است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش اجزاء محدود بر روی یک مقره ۲۰ کیلوولتی انجام شده و ابعاد مناسب لایه‌ی ریزدانه نیز با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات تسریع یافته به‌دست آمده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که ریزدانه استفاده شده باعث کاهش گرادیان ولتاژ سطح مقره و افزایش ولتاژ بحرانی شکست مقره داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که با حضور ریزدانه و طراحی ابعاد آن به هدف کاهش گرادیان ولتاژ، توان اتلافی مقره نیز کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

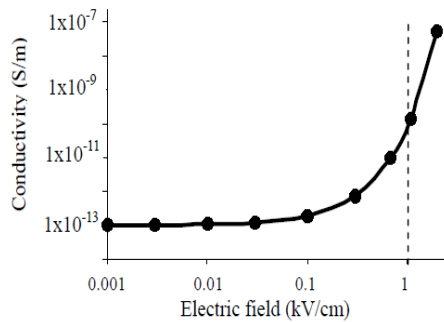
ریزدانه اکسیدروی، اجزاء محدود، اجتماع ذرات تسریع یافته، مقره کامپوزیتی، ولتاژ بحرانی.

مقدمه

یکی از مهمترین تجهیزات مورد استفاده در شبکه توزیع مقره‌های کامپوزیتی است. در ابتدا مقره‌های کامپوزیتی به دلیل نشکن بودن جایگزین مقره‌های شیشه‌ای و چینی شدند؛ اما به تدریج این مقره‌ها خواص مختلفی از خود نشان دادند که باعث شدند تقاضا برای استفاده از مقره‌های کامپوزیتی افزایش یابد.

مقره‌های کامپوزیتی نسبت به مقره‌های چینی سنتی و شیشه‌ای دارای مزایای زیادی از جمله عملکرد بهتر تحت شرایط آلودگی به دلیل خاصیت آبریزی، وزن سبک و استقامت مکانیکی بالا هستند [۱].

تنش‌های وارده بر مقره‌های کامپوزیتی عبارتند از: تنش‌های مکانیکی، الکتریکی و محیطی. تنش‌های الکتریکی در حضور یک میدان الکتریکی قوی در ترمینال‌های فشارقوی و زمین قابل مشاهده است. در شرایط نامساعد، میدان الکتریکی روی سطح مقره موجب تخلیه‌های جزئی شده و با گسترش تخلیه‌های الکتریکی ممکن است به تخلیه الکتریکی کامل یا فروپاشی عایقی منجر شود [۲].



شکل ۲: مشخصه عملکرد ریزدانه بر حسب میدان (ولتاژ شکست ۱ kV/cm) [۲]

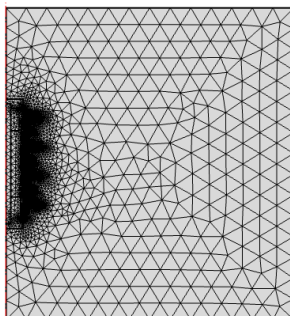
خواص الکتریکی مواد استفاده شده در مدل سازی مفره در جدول ۲ آورده شده است [۱۲].

جدول ۲: خواص الکتریکی مواد استفاده شده [۱۲]

ضریب رسانایی (S/m)	ضریب دی الکتریک	ماده
1×10^{-13}	۳	سیلیکون رابر
7×10^{-9}	۱	قطعات فلزی
۰	۱	هوا
σ (E)	۱۲	ریزدانه اکسیدروی
1×10^{-13}	۵	فایبرگلاس

در این مطالعه برای بررسی استقامت عایقی مفره، شرایط مرزی در الکتروود فشارقوی به صورت پتانسیل معلوم و در الکتروود زمین به صورت پتانسیل صفر اعمال شده‌اند.

پس از تعیین خواص الکتریکی مواد و اعمال شرایط مرزی، مش بندی مفره طبق شکل ۳ انجام می‌گیرد. در شکل مشخص است که تراکم مش‌ها در نواحی مجاور سطح مفره که تغییرات میدان شدیدتر است، بیشتر در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: مش بندی فضای مسأله

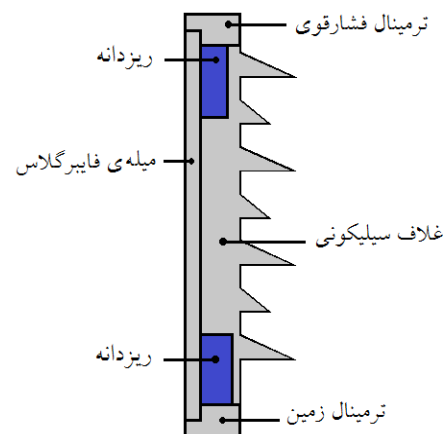
جدول ۱: ابعاد مفره مورد مطالعه

اندازه (mm)	پارامتر
۳۰۰	ارتفاع مفره
۱۳۸	قطر چترک بزرگ
۱۰۷	قطر چترک کوچک
۱۵	فاصله‌ی بین چترک‌ها
۲۴	عرض لایه‌ی فایبر گلاس

مفره کامپوزیتی مورد مطالعه در این مقاله یک مفره ۲۰ kV و دارای ۷ سیر است که به دلیل تقارن به صورت ۲ بعدی در نرم‌افزار COMSOL مدل شده است (شکل ۱).

با توجه به اینکه شدت میدان الکتریکی در مجاورت ترمینال‌های مفره نسبت به سایر نقاط مفره از شدت بیشتری برخوردار است که این امر باعث توزیع آلودگی در نزدیکی این ترمینال‌ها بیشتر از قسمت‌های میانی مفره باشد [۱۱]، لایه‌های ریزدانه در مجاورت ترمینال‌های مفره و در فضای بین هسته و پوشش سیلیکونی تزریق شده است. جدول ۱ ابعاد مفره مورد بررسی را نشان می‌دهد:

همچنین برای مدل سازی آلودگی، مشابه [۳] یک لایه با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و با ضریب رسانایی $0.16 \mu S/m$ روی سطح مفره در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: نمای شماتیکی مفره ۲۰ کیلوولت مورد مطالعه

ریزدانه‌ها دارای مشخصه غیرخطی شدیدی هستند. در صورتی که میدان الکتریکی اعمالی به ریزدانه بیشتر از ولتاژ شکست آن شود، رسانایی الکتریکی ریزدانه افزایش یافته و وارد ناحیه هدایت می‌شود. شکل ۲ شمای کلی از مشخصه عملکرد ریزدانه را نشان می‌دهد.

حل مسأله

شبیه‌سازی مقرر و محاسبه ماکزیمم شدت میدان الکتریکی سطح مقرر در نرم افزار اجزاء محدود COMSOL انجام شده است. سپس با استفاده از قابلیت لینک‌شدن COMSOL با MATLAB نتایج مورد نیاز جهت محاسبه و بهینه‌سازی ابعاد لایه‌های ریزدانه در MATLAB فراخوانده شده و الگوریتم بهینه‌سازی اجرا می‌گردد. به منظور بهینه‌کردن ابعاد ریزدانه‌های تزریق شده از الگوریتم اجتماع ذرات تسریع‌یافته استفاده شده است.

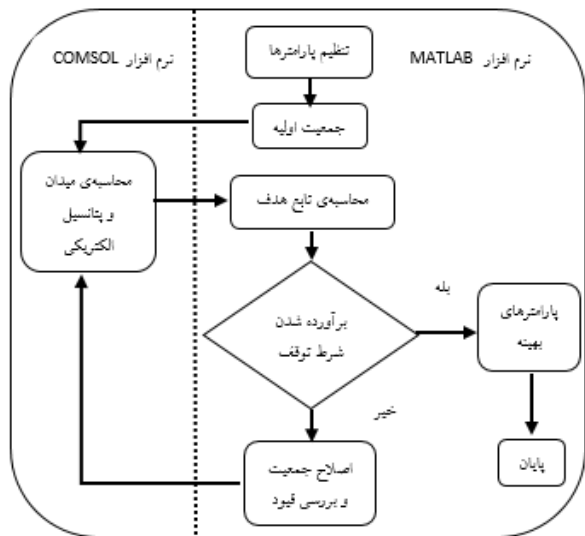
الگوریتم اجتماع ذرات تسریع‌یافته، APSO، شکل ساده‌شده الگوریتم اجتماع ذرات استاندارد است. در الگوریتم اجتماع ذرات تسریع‌یافته جهت همگرایی سریع، موقعیت جدید ذرات تنها تحت تأثیر بهترین موقعیتی است که کل جمعیت در هر مرحله به‌دست آورده است. نحوه کدبندی و روش کلی حل مسئله بهینه‌سازی در [۱۴] آورده شده است که به‌طور کلی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

- مرحله اول: ایجاد جمعیت اولیه؛
- مرحله دوم: محاسبات میدان و ولتاژ در COMSOL؛
- مرحله سوم: برازش تابع هدف؛
- مرحله چهارم: ایجاد جمعیت جدید؛
- مرحله پنجم: بررسی قیود؛
- مرحله ششم: انتخاب.

هدف از بهینه‌سازی، حداکثر کردن ولتاژ بحرانی شکست مقرر تحت شرایط آلودگی می‌باشد که طبق رابطه (۷) با ثابت بودن ولتاژ اعمالی و استقامت الکتریکی، ولتاژ بحرانی فقط تحت تأثیر ماکزیمم شدت میدان است؛ بنابراین تابع هدف مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Objective Function} = \text{Min} (E_{\max})$$

متغیرهای بهینه‌سازی ابعاد ریزدانه‌های در مجاورت ترمینال فشارقوی و زمین می‌باشند که به‌ترتیب با اندیس‌های ۱ و ۲ نمایش داده می‌شوند. X_1 و Y_1 به‌ترتیب عرض و ارتفاع لایه ریزدانه تزریقی در مجاورت ترمینال فشارقوی و X_2 و Y_2 به‌ترتیب عرض و ارتفاع لایه ریزدانه تزریق شده در مجاورت ترمینال زمین می‌باشند. فلوجارت طراحی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: فلوجارت طراحی

قیود مسأله که حدود تغییرات متغیرها می‌باشند با توجه به محدودیت‌های ساخت جهت چسبندگی پوشش سیلیکونی بر روی لایه ریزدانه به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$10 \text{ mm} < X_1 < 20 \text{ mm} \quad (1)$$

$$10 \text{ mm} < X_2 < 20 \text{ mm} \quad (2)$$

$$10 \text{ mm} < Y_1 < 100 \text{ mm} \quad (3)$$

$$10 \text{ mm} < Y_2 < 100 \text{ mm} \quad (4)$$

$$Y_1 + Y_2 + 1 = L \quad (5)$$

در این رابطه L و 1 به‌ترتیب ارتفاع مقرر و فضای باقی‌مانده بین ریزدانه‌های تزریقی است.

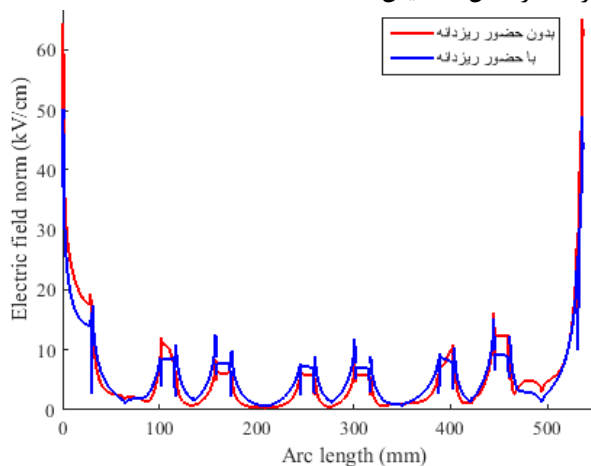
نتایج شبیه‌سازی

در قسمت بعد اثر تزریق لایه ریزدانه بر توزیع خطوط هم‌پتانسیل و میدان الکتریکی سطح مقرر بررسی شده و تأثیر آن بر CFO و توان تلف‌شده مقرر مورد بحث قرار گرفته است. شکل‌های ۵ و ۶ کانتورهای خطوط هم‌پتانسیل را در اطراف مقرر نشان می‌دهند. در این شکل‌ها ۲۰ کانتور ولتاژ رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد که تراکم خطوط هم‌پتانسیل در لایه‌ی عایقی مجاورت ترمینال‌های مقرر بدون حضور لایه ریزدانه بیشتر از مقرر دارای ریزدانه می‌باشد. همچنین جابه‌جایی خطوط هم‌پتانسیل از سمت ترمینال‌های مقرر به قسمت‌های میانی در شکل ۶ قابل مشاهده می‌شود؛ جابه‌جایی خطوط هم‌پتانسیل و به تبع آن کاهش گرایان ولتاژ، سبب کاهش

جدول ۳: ابعاد لایه‌های ریزدانه تزریقی، مقدار ماکزیمم میدان و نسبت E_{max} / E_{mean} قبل و بعد از بهینه‌سازی

پس از تزریق ریزدانه		قبل از تزریق ریزدانه	E_{max} (kV/cm)
بعد از بهینه‌سازی	قبل از بهینه‌سازی		
۵۰/۳۸۵	۵۴/۴۸۹	۶۴/۲۴۷	E_{max} (kV/cm)
۳/۵۷۳	۳/۶۴۵	۳/۸۷۱	E_{max} / E_{mean}
۱۸/۰۲۱۵	۱۵	-	X_1 (mm)
۲۲/۷۷۲۵	۱۵	-	X_2 (mm)
۷۲/۳۷۵۶	۸۰	-	Y_1 (mm)
۵۵/۵۳۴۳	۸۰	-	Y_2 (mm)

توزیع میدان روی سطح مقره آلوده، با و بدون حضور لایه‌ی بهینه‌ی ریزدانه در شکل ۷ نمایش داده شده است.



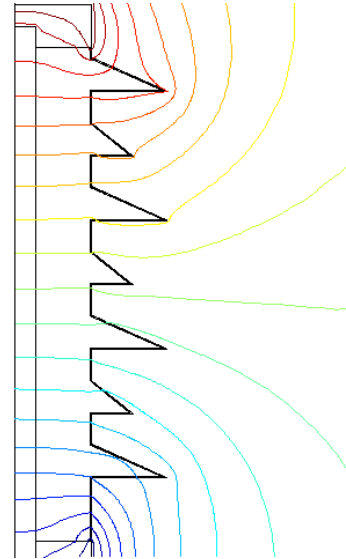
شکل ۷: توزیع میدان در امتداد سطح مقره با و بدون حضور لایه ریزدانه

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۳، ولتاژ بحرانی شکست و توان تلف شده در واحد حجم مقره‌ی آلوده به ترتیب طبق روابط (۷) و (۱۴) محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است.

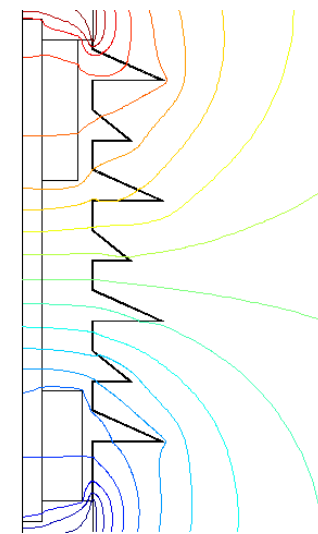
جدول ۴: مقدار CFO و Pv مقره آلوده قبل و بعد از انجام بهینه‌سازی

پس از تزریق ریزدانه		قبل از تزریق ریزدانه	CFO (kV)
بعد از بهینه‌سازی	قبل از بهینه‌سازی		
۱۵۱/۲۴	۱۳۹/۸۴	۱۱۸/۶۰	CFO (kV)
۱۵/۲۳	۱۷/۸۱	۲۴/۷۶	Pv (W/cm ³)

شدت میدان الکتریکی در مجاورت الکترودها و توزیع یکنواخت میدان الکتریکی را در امتداد طولی مقره می‌شود.



شکل ۵: خطوط هم‌پتانسیل مقره بدون حضور لایه ریزدانه



شکل ۶: خطوط هم‌پتانسیل مقره با حضور لایه ریزدانه

جدول ۳ ماکزیمم شدت میدان الکتریکی روی سطح مقره آلوده و همچنین نسبت میدان ماکزیمم به متوسط میدان مقره قبل و بعد از انجام بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

طبق جدول ۳ با مقایسه‌ی مقدار E_{max} / E_{mean} و مقدار E_{max} مشاهده می‌شود که حضور لایه ریزدانه علاوه بر کاهش ماکزیمم شدت میدان سبب یکنواخت‌تر شدن شدت میدان روی سطح مقره شده است. طبق نتایج به دست آمده، در صورت تزریق یک لایه‌ی بهینه‌شده ریزدانه، مقدار E_{max} به میزان ۲۱/۵٪ کاهش پیدا می‌کند.



کاهش توان اتلافی مقره و بهبود عملکرد آن در سیستم قدرت مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع و منابع

- [1] Marungsri, B., & Onchantuek, W. (2008). Simulation of Electric Field and Potential Distributions on Silicone Rubber Polymer Insulators under Contamination Conditions Using Finite Element Method. WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS, (9), 608-621.
- [2] Abd-Rahman, R., Haddad, A., & Harid, N. (2011). Performance of nonlinear grading coating on polymeric outdoor insulators under lightning impulse voltages. CIRED, 6-9.
- [3] Abd-Rahman, R., Haddad, A., Harid, N., & Griffiths, H. (2012). Stress control on polymeric outdoor insulators using Zinc oxide microvaristor composites. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 19(2).
- [4] Weida, D., Nevoigt, J., Ye, H., Clemens, M., Stefanini, D., & Seifert, J. (2010, May). Effects of microvaristor material on the occurrence of partial discharges upon insulators in rain test. In Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), 2010 IEEE International (pp. 497-500). IEEE.
- [5] Debus, J., Hinrichsen, V., Seifert, J. M., & Hagemeyer, M. (2010, July). Investigation of composite insulators with microvaristor filled silicone rubber components. In Solid Dielectrics (ICSD), 2010 10th IEEE International Conference on (pp. 1-4). IEEE.
- [6] Boettcher, B., Malin, G., & Strobl, R. (2001). Stress control system for composite insulators based on ZnO-technology. In Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES (Vol. 2, pp. 776-780). IEEE.
- [7] Pradhan, M., Greijer, H., Eriksson, G., & Unge, M. (2016). Functional behaviors of electric field grading composite materials. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 23(2), 768-778.
- [8] Schulte-Fischedick, J., Lehretz, F., Denndörfer, H., Seifert, J., Ye, H., Clemens, M., ... & Bornowski, M. (2013, June). Electric field grading using insulators with microvaristor filled silicon rubber. In Solid Dielectrics (ICSD), 2013 IEEE International Conference on (pp. 226-229). IEEE.
- [9] Ahmad, H., Haddad, A., Griffiths, H., Robson, S., Nishimura, T., & Tsukamoto, N. (2015, October). Electrical characterisation of ZnO microvaristor materials and compounds. In Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2015 IEEE Conference on (pp. 688-692). IEEE.

همان گونه که در جدول ۴ مشاهده می شود، پس از تزریق لایه‌ی بهینه شده ریزدانه، CFO مقره از ۱۱۸/۶۰ kV به ۱۵۱/۲۴ kV رسیده است که افزایش ۲۷/۵ درصدی را نشان می دهد. در همین شرایط، P_v مقره از ۲۴/۷۶ به ۱۵/۲۳ کاهش پیدا کرده که بیانگر کاهش حرارت و گرما در سطح مقره است. تأثیر تزریق لایه‌ی ریزدانه بر مقره بدون آلودگی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج آن در جدول ۵ قابل مشاهده است.

جدول ۵: مقدار CFO و P_v مقره تمیز با و بدون تزریق ریزدانه

پس از تزریق ریزدانه	قبل از تزریق ریزدانه	
۳۹/۶۷۹	۴۶/۲۸۱	E_{max} (kV/cm)
۱۹۲/۰۴	۱۶۴/۶۴	CFO (kV)

طبق جدول ۵ با بهینه سازی حجم ریزدانه تزریق شده، مقدار ماکزیم میدان مقره نسبت به حالتی که ریزدانه در پوشش سیلیکونی وجود نداشت از ۴۶/۲۸۱ به ۳۹/۶۷۹ کاهش پیدا کرد. در همین شرایط، CFO مقره ۱۶/۶۴٪ افزایش یافته است.

نتیجه گیری

در این مقاله تأثیر استفاده از یک لایه‌ی ریزدانه بر توزیع میدان، ولتاژ بحرانی شکست و توان اتلافی مقره کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی‌ها نشان می دهند که در صورت تزریق لایه‌ی ریزدانه علاوه بر کاهش ماکزیم شدت میدان، نسبت میدان ماکزیم به متوسط میدان مقره نیز کاهش می یابد که این نسبت نشان دهنده یکنواخت تر شدن توزیع میدان در سطح مقره با استفاده از تزریق ریزدانه است و در نتیجه از فرسایش زودرس مقره جلوگیری می شود. به علاوه ابعاد بهینه ریزدانه‌های تزریق شده با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات تسریع یافته به دست آمد. طبق نتایج به دست آمده، حضور ریزدانه اکسیدروی باعث بالابردن سطح ولتاژ بحرانی شکست مقره تحت شرایط آلودگی و بدون آلودگی می شود که تأثیر تزریق یک لایه بهینه ریزدانه بر CFO مقره تحت آلودگی نسبت به مقره بدون آلودگی بیشتر است. لازم به ذکر است با تزریق ریزدانه و کاهش ماکزیم شدت میدان، نشست آلودگی در اطراف الکترودها کمتر خواهد شد که این امر از جمله عوامل بالارفتن سطح CFO مقره است. همچنین نتایج بررسی مؤثر بودن تزریق یک لایه‌ی ریزدانه بر کاهش توان اتلافی مقره را نشان داد. استفاده از نتایج این تحقیق می تواند توسط سازندگان مقره به منظور افزایش ولتاژ بحرانی شکست،



- Communication Systems (ICIECS), 2017 International Conference on (pp. 1-5). IEEE.
- [13] Volat, C. (2013, June). Comparison between the use of surface and volume conductivity to compute potential distribution along an insulator in presence of a thin conductive layer. In Electrical Insulation Conference (EIC), 2013 IEEE(pp. 409-413). IEEE.
- [14] Yang, X. (2008). Introduction to mathematical optimization. From Linear Programming to Metaheuristics.
- [10] Muniraj, C., & Ch, S. (2011). Finite element modeling for electric field and voltage distribution along the polluted polymeric insulator.
- [11] Samakosh, J. D., & Mirzaie, M. (2019). Investigation and analysis of AC flashover voltage of SiR insulators under longitudinal and fan-shaped non-uniform pollutions. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 108, 382-391.
- [12] Rao, M. N., Sumathi, N., & Chaitanya, V. S. N. K. (2017, March). Pollutions contamination effects and microvaristor applications on polymer insulators. In Innovations in Information, Embedded and