



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Numerical Simulation of the Electric Field and Potential Distribution Analysis in a 20 kV Polymeric Insulator Under the Influence of Mechanical Defects and Various Non-Uniform Pollution Patterns

Mehrdad Ghorbani pashakolaei ^a, Mostafa Jazaeri ^{a,*}, Mohsen Niasati ^a, Seyed Meysam SeyedBarzegar ^b

^a Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

^b Department of Robotic and Electrical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-00-00

Revised: 2025-00-00

Accepted: 2025-00-00

Keywords:

Polymeric insulator,
Electric potential
distribution,
Electric field
distribution,
mechanical defects,
Non-uniform
pollution,
FEM analysis,

ABSTRACT

The presence of non-uniform pollution deposits on the surface of insulators, along with mechanical defects, significantly affects the performance of overhead line insulators. However until now, no comprehensive studies have been conducted on the simultaneous effect of different types of non-uniform pollution and mechanical defects on insulator performance. In this paper the effects of uniform and non-uniform pollution, including the ring-shaped (RNU) and ring-longitudinal (RLNU) types, along with mechanical defects such as a damaged shed and a defective core, on the potential distribution and electric field of a 20 kV polymeric insulator have been investigated. The simulations were performed using COMSOL Multiphysics and the results were analyzed. In the case of longitudinal non-uniform pollution, the pollution severity was assumed to be heavy in the regions near the electrodes and light in the middle region. Additionally for the ring-shaped non-uniform pollution the inner and outer areas were assumed to be equal with pollution applied to the inner region of the insulator. The results indicate that the maximum electric field in the uniform pollution condition is higher than in other pollution patterns. Moreover the presence of mechanical defects, such as damage to the shed and core, has a significant impact on the potential distribution and the maximum electric field. Specifically compared to a healthy insulator the presence of these defects leads to an increase in the maximum electric field in three regions: the high-voltage region the middle region, and the low-voltage region.

DOI:

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: mjazaeri@semnan.ac.ir

How to cite this article:

شبه‌سازی عددی میدان الکتریکی و تحلیل توزیع پتانسیل در مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت تحت تأثیر عیوب مکانیکی و الگوهای مختلف آلودگی

مهرداد قربانی پاشاکلایی^۱، مصطفی جزائری^{۱*}، محسن نیاستی^۱، سیدمیثم سیدبرزگر^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۰/۰۰	رسوب غیریکنواخت آلودگی بر روی سطح مقره‌ها، همراه با عیوب مکانیکی، عملکرد مقره‌های خطوط هوایی را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. با این حال، تاکنون مطالعات جامعی در زمینه تأثیر هم‌زمان انواع آلودگی غیریکنواخت و عیوب مکانیکی بر عملکرد مقره‌ها انجام نشده است. در این مقاله، اثر آلودگی یکنواخت و غیریکنواخت از نوع رینگ (RNU) و رینگ-طولی (RLNU)، همراه با عیوب مکانیکی نظیر چترک معیوب و هسته معیوب، بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی یک نمونه مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت بررسی شده است. شبه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics انجام شده و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. در حالت آلودگی غیریکنواخت از نوع طولی، شدت آلودگی در نواحی مجاور الکترودها سنگین و در ناحیه میانی سبک در نظر گرفته شده است. همچنین، در حالت آلودگی غیریکنواخت از نوع رینگ، مساحت نواحی داخلی و خارجی برابر فرض شده و آلودگی در ناحیه داخلی مقره اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه میدان الکتریکی در شرایط آلودگی یکنواخت نسبت به سایر الگوهای آلودگی مقدار بیشتری دارد. علاوه بر این، وجود عیوب مکانیکی، از جمله آسیب در چترک و هسته، تأثیر قابل توجهی بر توزیع پتانسیل و بیشینه میدان الکتریکی دارد. به‌گونه‌ای که در مقایسه با مقره سالم، حضور این عیوب موجب افزایش بیشینه میدان الکتریکی در سه ناحیه فشار قوی، ناحیه میانی، و فشار ضعیف می‌شود.
بازنگری مقاله: ۱۴۰/۰۰/۰۰	
پذیرش مقاله: ۱۴۰/۰۰/۰۰	
واژگان کلیدی: مقره پلیمری، توزیع پتانسیل الکتریکی، توزیع میدان الکتریکی، عیوب مکانیکی، آلودگی غیریکنواخت، روش اجزای محدود،	

DOI:

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه^۱

می‌گذارند و آن‌ها را به سمت مقره‌ها جذب می‌کنند. معمولاً در نزدیکی ترمینال‌های فشار قوی و زمین، شدت میدان الکتریکی بیشتر است و این نواحی از مقره بیشتر آلوده می‌شود، که منجر به شکل‌گیری آلودگی غیریکنواخت طولی^۲ (LNU) می‌گردد [۴]. مطالعات انجام‌شده بر روی مقره‌های آلوده نشان می‌دهد که این الگوی آلودگی عمدتاً در نواحی بالایی و پایینی مقره متمرکز می‌شود. این توزیع نامتقارن می‌تواند باعث تغییر در توزیع میدان الکتریکی و افزایش احتمال تخلیه الکتریکی شود [۵]. علاوه بر این، در برخی شرایط، میزان آلودگی در بخش‌های بالایی و پایینی مقره یکسان نیست، که این نوع آلودگی به آلودگی

مقره‌های پلیمری، به دلیل ویژگی‌های عایق‌بندی مطلوب و خواص آب‌گریزی، کاربرد وسیعی در خطوط انتقال و توزیع دارند [۱]. یکی از مشکلات عمده‌ای که مقره‌ها با آن مواجه هستند، تجمع آلودگی بر سطح مقره‌ها است که به‌عنوان عامل اصلی ایجاد قوس الکتریکی شناخته می‌شود. این پدیده می‌تواند منجر به بروز خطا در سیستم‌های انتقال و توزیع گردد [۲]. مقره‌های خطوط انتقال و توزیع تحت تأثیر شرایط محیطی مختلفی مانند باد، باران و مه قرار می‌گیرند که می‌تواند باعث رسوب ذرات آلودگی بر سطح مقره و ایجاد الگوهای مختلف آلودگی غیریکنواخت شوند [۳]. نیروی جاذبه، باد و نیروی ناشی از میدان الکتریکی از جمله نیروهای اصلی هستند که بر ذرات گرد و غبار تأثیر

² longitudinal non-uniform

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mjazaeri@semnan.ac.ir
۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

شبیه‌سازی پدیده قوس الکتریکی در مقره‌های آلوده ارائه می‌دهند [۱۳]. علاوه بر این، شرایط محیطی مانند تابش شدید خورشید، تابش فرابنفش^{۱۰} (UV)، رطوبت و باران اسیدی بر عملکرد مقره‌ها تأثیر می‌گذارند [۱۴ و ۱۵]. مطالعات پیشین نشان می‌دهند پدیده پیرشدگی در مقره‌های پلیمری که ناشی از قرارگیری طولانی‌مدت در معرض این تنش‌های محیطی است، می‌تواند منجر به کاهش آب‌گریزی، افزایش هدایت سطحی و در نتیجه ایجاد ناپیوستگی در توزیع پتانسیل سطحی شده و احتمال وقوع تخلیه جزئی و تخریب الکتریکی را افزایش می‌دهد [۱۶]. مقره‌های پلیمری نسبت به انواع سرامیکی عملکرد عایقی بهتری دارند، اما در بلندمدت تحت تأثیر عوامل محیطی دچار افت خواص الکتریکی و مکانیکی می‌شوند. این تغییرات موجب کاهش دوام و قابلیت اطمینان آن‌ها می‌گردد [۱۷]. این تغییرات در خواص دی‌الکتریک و مکانیکی مقره‌ها، همراه با تجمع آلودگی، می‌تواند تأثیر مستقیم بر توزیع میدان الکتریکی داشته باشد. مطالعات نشان می‌دهند که نحوه استقرار آلودگی تأثیر بسزایی بر روی توزیع میدان الکتریکی دارد. به‌طوری‌که توزیع میدان الکتریکی در حالت آلودگی غیریکنواخت رینگ در مقایسه با آلودگی غیریکنواخت قطاعی، یکنواخت‌تر توزیع شده و شدت میدان کمتری در نقاط بحرانی ایجاد می‌کند [۱۸]. در مطالعات دیگر در شرایط آلودگی یکنواخت مشخص شده است که شدت میدان الکتریکی حدود ۳۶ درصد بیشتر از حالت غیریکنواخت است [۱۹]. همچنین، میدان الکتریکی در حالت آلودگی رینگ تا ۲۱ درصد کمتر از آلودگی غیریکنواخت قطاعی بوده است که نشان‌دهنده پایداری بیشتر این الگو در برابر تغییرات محیطی است [۲۰]. علاوه بر تأثیر الگوهای آلودگی، شرایط محیطی نیز می‌توانند تغییرات قابل توجهی در شدت میدان الکتریکی ایجاد کنند. عوامل محیطی مانند باران سبک، مه و یخ تأثیرات متفاوتی بر توزیع میدان الکتریکی دارند [۲۱]. مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهند که مه، به دلیل یکنواختی در توزیع رطوبت، شدت میدان الکتریکی کمتری نسبت به باران سبک ایجاد می‌کند [۲۲]. علاوه بر این، افزایش ضخامت لایه‌ی آلودگی نیز تأثیر

غیریکنواخت بالا و پایین^۳ (TBNU) شناخته می‌شود [۶]. یکی دیگر از انواع آلودگی غیریکنواخت، آلودگی قطاعی^۴ (FSNU) است که در آن، میزان آلودگی در جهت موافق باد کمتر از میزان آن در ناحیه پشت به باد است [۷]. تاکنون مطالعات گسترده‌ای بر روی مقره‌ها با الگوهای مختلف آلودگی انجام شده است. یکی دیگر از این الگوهای قابل توجه، آلودگی غیریکنواخت رینگ^۵ (RNU) است که در آن ضخامت لایه آلودگی در بخش داخلی مقره بیشتر از سطح خارجی آن بوده و این توزیع نامتقارن، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر توزیع میدان الکتریکی و عملکرد عایقی مقره دارد [۸]. شرایط جوی مانند مه و غبار می‌توانند موجب افزایش تجمع آلودگی و در نتیجه، بالا رفتن احتمال وقوع قوس الکتریکی شوند [۹]. در این راستا، مرجع [۱۰] تأثیر آلودگی گرد و غبار و رطوبت بر احتمال بروز تخلیه سطحی در مقره‌های شبکه‌های خطوط انتقال را بررسی می‌کند. در این مطالعه، با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار کامسول و تحلیل حساسیت‌های مختلف، نشان داده شده که افزایش آلودگی و رطوبت می‌تواند به‌طور قابل توجهی شدت میدان الکتریکی را افزایش داده و در نتیجه احتمال بروز تخلیه سطحی را تشدید نماید. به‌طور کلی، در شرایط آلودگی خشک، احتمال وقوع قوس الکتریکی کم است، اما در محیط‌های مرطوب مانند مه، شبنم، ریزش نمک و برف، این پدیده ممکن است در ولتاژی پایین‌تر از حد معمول رخ دهد و عملکرد سیستم‌های قدرت را تحت تأثیر قرار دهد [۱۱]. علاوه بر این، عوامل الکتریکی مانند توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی نیز نقش کلیدی در عملکرد مقره‌ها دارند. این عوامل می‌توانند موجب بروز پدیده‌هایی مانند کرونا، تخلیه جزئی و توزیع غیریکنواخت ولتاژ شوند که در نهایت بر استقامت عایقی مقره تأثیر می‌گذارند [۱۲]. برای بررسی دقیق توزیع میدان الکتریکی و پتانسیل، روش‌های عددی مختلفی از جمله روش تفاضل محدود^۶ (FDM)، روش اجزای محدود^۷ (FEM)، روش اجزای مرزی^۸ (BEM) و روش شبیه‌سازی بار^۹ (CSM) به کار گرفته می‌شوند. در این میان، مدل‌های مبتنی بر روش اجزای محدود در مقایسه با سایر مدل‌ها نتایج دقیق‌تری در

³ top and bottom non-uniform

⁴ fan-shaped non-uniform

⁵ ring non-uniform

⁶ Finite Difference Method

⁷ Finite Element Method

⁶ Boundary Element Method

⁹ Charge simulation method

¹⁰ Ultraviolet

یکنواخت و غیریکنواخت بر توزیع میدان الکتریکی در مقره‌های پلیمری فراهم کرده‌اند. در همین راستا مطالعه‌ی [۲۸] تأثیر آلودگی‌های یکنواخت و غیریکنواخت بر ویژگی‌های الکتریکی یک نمونه مقره شیشه‌ای را بررسی کرده و نشان می‌دهد که آلودگی غیریکنواخت موجب تغییرات قابل توجه در توزیع میدان الکتریکی سطح مقره‌ها و افزایش خطر تخلیه سطحی می‌شود. بعلاوه در آلودگی غیریکنواخت، تغییرات پتانسیل الکتریکی در نواحی نزدیک الکترودها و تمرکز میدان در ناحیه پشت به باد بیشتر است [۲۹]. این تمرکز موضعی میدان الکتریکی رفتاری مشابه نواقص ساختاری مقره‌های پلیمری، از جمله حفره‌های داخلی، ناخالصی‌های ساختاری و ناهمگنی‌های مواد دارد، که می‌تواند منجر به تشدید میدان و افزایش احتمال تخلیه جزئی شود [۳۰]. بررسی استفاده از حسگرهای میدان الکتریکی اپتیکی برای تشخیص عیوب داخلی در مقره‌های کامپوزیتی در مرجع [۳۱] مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. این تحقیق همچنین از مدل‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار کامسول برای شبیه‌سازی تأثیر این عیوب بر توزیع میدان الکتریکی استفاده کرده و نشان می‌دهد که این فناوری‌ها می‌توانند به‌طور مؤثری به شناسایی آسیب‌های غیرقابل مشاهده کمک کرده و به بهبود عملکرد عایقی و افزایش طول عمر مقره‌ها در شبکه‌های برق‌رسانی منجر شوند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که بررسی هم‌زمان تأثیر آلودگی سطحی و عیوب ساختاری، برای بهبود عملکرد عایقی و کاهش احتمال آسیب در مقره‌های پلیمری ضروری است. با وجود تأثیر قابل توجه این عوامل، تحقیقات محدودی به بررسی اثرات ترکیبی آن‌ها بر توزیع میدان الکتریکی پرداخته‌اند. تحلیل جامع این اثرات می‌تواند به کاهش خطر قوس الکتریکی، بهینه‌سازی طراحی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های قدرت منجر شود.

در این پژوهش، توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی یک مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت در شرایط مختلف آلودگی (تمیز، یکنواخت، رینگی و رینگی-طولی) با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics و روش اجزای محدود شبیه‌سازی و تحلیل شده است. هدف پژوهش، بررسی رفتار میدان و پتانسیل در مقره‌های سالم و دارای عیوب مکانیکی در ناحیه چترک (با شدت‌های ۶.۵٪، ۱۲.۵٪ و ۲۵٪) و هسته بوده است. همچنین تأثیر ضخامت لایه‌های آلودگی

مستقیمی بر شدت میدان الکتریکی در نقاط بحرانی دارد. به‌طور خاص، افزایش ضخامت آلودگی تا دو برابر، شدت میدان را در این نواحی تا حدود ۵۰ درصد افزایش می‌دهد [۲۳]. همچنین، افزایش ضخامت و رسانایی لایه آلودگی منجر به افزایش قابل‌توجهی در شدت میدان الکتریکی نواحی بحرانی شده است [۱۴]. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که در نواحی اتصال هسته و چترک‌ها، شدت میدان الکتریکی افزایش یافته و می‌تواند موجب تخریب تدریجی مواد پلیمری و کاهش عمر مقره شود [۱۵]. علاوه بر این، طراحی هندسی مقره‌ها نقش مهمی در توزیع میدان الکتریکی دارد. مقره‌های با چترک‌های یکنواخت، توزیع متعادل‌تری ایجاد می‌کنند، در حالی که طراحی غیریکنواخت می‌تواند منجر به افزایش شدت میدان و کاهش پایداری عایقی شود [۱۷]. بررسی شرایط محیطی نشان می‌دهد که حضور قطرات آب روی مقره، همراه با تغییرات در ضخامت و رسانایی لایه آلودگی، تأثیر قابل‌توجهی بر توزیع میدان الکتریکی و عملکرد عایقی دارد [۱۸]. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که حضور قطرات آب موجب افزایش موضعی شدت میدان الکتریکی می‌شود که این افزایش ناشی از تمرکز تنش الکتریکی در لبه‌های تیز قطرات بوده و خطر وقوع تخلیه الکتریکی را بالا می‌برد [۲۳]. بعلاوه عملکرد الکتریکی مقره‌های کامپوزیتی تحت تأثیر قطرات آب با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و تحلیل آماری در مرجع [۲۴] مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که قطرات آب می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی توزیع میدان الکتریکی در سطح مقره‌ها را تغییر دهند و در نتیجه عملکرد عایقی آن‌ها را به‌طور چشمگیری کاهش دهند. از طرف دیگر یافته‌های مرجع [۲۵] حاکی از آنست که حضور قطرات آب می‌تواند باعث افزایش ۲۵ درصدی حداکثر شدت میدان الکتریکی در مقایسه با شرایط خشک شود. در مطالعه‌ای دیگر شبیه‌سازی‌های کامسول نشان می‌دهند که افزایش ضخامت آلودگی، تغییرات قابل‌توجهی در توزیع میدان الکتریکی و نقاط بحرانی ایجاد می‌کند [۲۶]. به‌منظور مدل‌سازی این تغییرات، مطالعاتی با استفاده از روش اجزای محدود و شبکه عصبی انجام شده است که نشان می‌دهد شبکه عصبی قادر است با در نظر گرفتن اثر ضخامت آلودگی، توزیع میدان الکتریکی را با دقت بالایی پیش‌بینی کند [۲۷]. نتایج این مدل‌سازی‌ها، زمینه‌ای برای بررسی بیشتر تأثیر آلودگی‌های

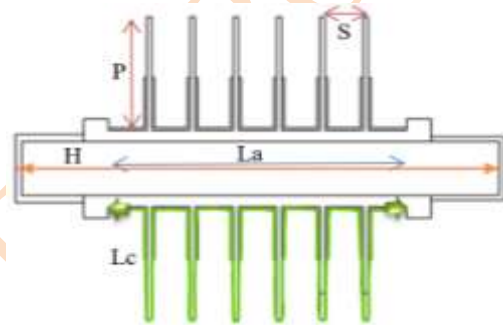
به منظور شبیه سازی آلودگی سطح مقره ها در نرم افزار کامسول، پارامترهای کلیدی مدل سازی و ارزیابی رفتار الکتریکی آن ها در شرایط عملکردی بررسی می شود این پارامترها، مطابق با استاندارد IEC 60815، شامل هدایت الکتریکی^{۱۱}، ضخامت لایه آلودگی^{۱۲} و گذردهی نسبی^{۱۳} هستند. بر اساس مقادیر این پارامترها، نوع آلودگی (نمکی، صنعتی، گرد و غبار، مرطوب) و شدت آن (سبک، متوسط، سنگین) تعیین می شود. در این مطالعه، شبیه سازی برای هر سه سطح آلودگی انجام شده و تمرکز اصلی بر آلودگی های مرطوب و نمکی است، زیرا این آلودگی ها تأثیر قابل توجهی بر عملکرد الکتریکی مقره ها دارند.

در این مطالعه، آلودگی های بررسی شده شامل آلودگی یکنواخت، آلودگی غیریکنواخت رینگی (RNU) و آلودگی غیریکنواخت رینگی-طولی^{۱۴} (RLNU) هستند. برای ایجاد توزیع غیریکنواخت آلودگی، سطح مقره در راستای طولی به سه ناحیه با مساحت تقریباً یکسان تقسیم شده است. این نواحی شامل ناحیه نزدیک به الکتروود زمین (ناحیه ۱)، ناحیه میانی (ناحیه ۲) و ناحیه نزدیک به الکتروود فشار قوی (ناحیه ۳) هستند. هر یک از این نواحی نیز به دو بخش داخلی و خارجی به صورت رینگی تقسیم شده اند. شکل (۲) نمای سه بعدی شماتیک آلودگی های مورد مطالعه در نرم افزار کامسول را نشان می دهد. در آلودگی غیریکنواخت نوع رینگی-طولی (RLNU)، شدت آلودگی در نواحی نزدیک به الکتروودها سنگین و در ناحیه میانی سبک در نظر گرفته شده است. همچنین، در آلودگی غیریکنواخت نوع رینگی (RNU)، مساحت نواحی داخلی و خارجی تقریباً برابر فرض شده و شدت آلودگی در ناحیه داخلی سنگین و ناحیه خارجی عاری از آلودگی است. تمرکز غیریکنواخت آلودگی موجب توزیع نامتقارن میدان الکتریکی و افزایش احتمال تخلیه جزئی و پیری عایقی می شود. بررسی این الگوها برای بهینه سازی طراحی و بهبود عملکرد عایقی امری ضروری است. برای محاسبه حداکثر تنش اعمالی به مقره، ولتاژ متناوب (AC) معادل ۱۶/۳ کیلوولت، به عنوان حداکثر ولتاژ فازی، به مقره اعمال شده است. جدول (۲) مشخصات و پارامترهای مواد به کاررفته در ساختار مقره پلیمری مورد

و موقعیت عیوب مکانیکی بر تمرکز و توزیع میدان الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- شبیه سازی مقره پلیمری و آلودگی های مورد مطالعه

برای شبیه سازی مقره پلیمری، از نرم افزار کامسول و ماژول فیزیک الکترواستاتیک، مبتنی بر روش اجزای محدود، استفاده شده است. جدول (۱) مشخصات فنی و هندسی مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت مورد مطالعه را، که در شبکه توزیع برق به کار می رود، ارائه می دهد. همچنین، شکل (۱) نمای هندسی این مقره را نشان می دهد.



شکل ۱- شماتیک هندسی مقره پلیمری مورد مطالعه

مقره های پلیمری از سه بخش اصلی شامل هسته، روکش و اتصالات فلزی تشکیل شده اند. هسته این مقره ها از فایبرگلاس، روکش خارجی آن ها از لاستیک سیلیکونی، و اتصالات فلزی در دو سر مقره از فولاد گالوانیزه ساخته شده اند.

جدول ۱- مشخصات هندسی مقره پلیمری مورد مطالعه

ولتاژ نامی	۲۰ کیلوولت
تعداد چترک	۶
فاصله خزشی	۷۰۰ میلی متر
فاصله جرقه خشک	۲۶۰ میلی متر
بار مکانیکی قابل تحمل	۷۰ کیلو نیوتن
عمق چترک (P)	۴۱۰ میلی متر
قطر هسته	۲۰ میلی متر
فاصله بین دو چترک (S)	۳۸ میلی متر
ارتفاع مقره	۴۸۵ میلی متر

¹⁴ ring- longitudinal non-uniform

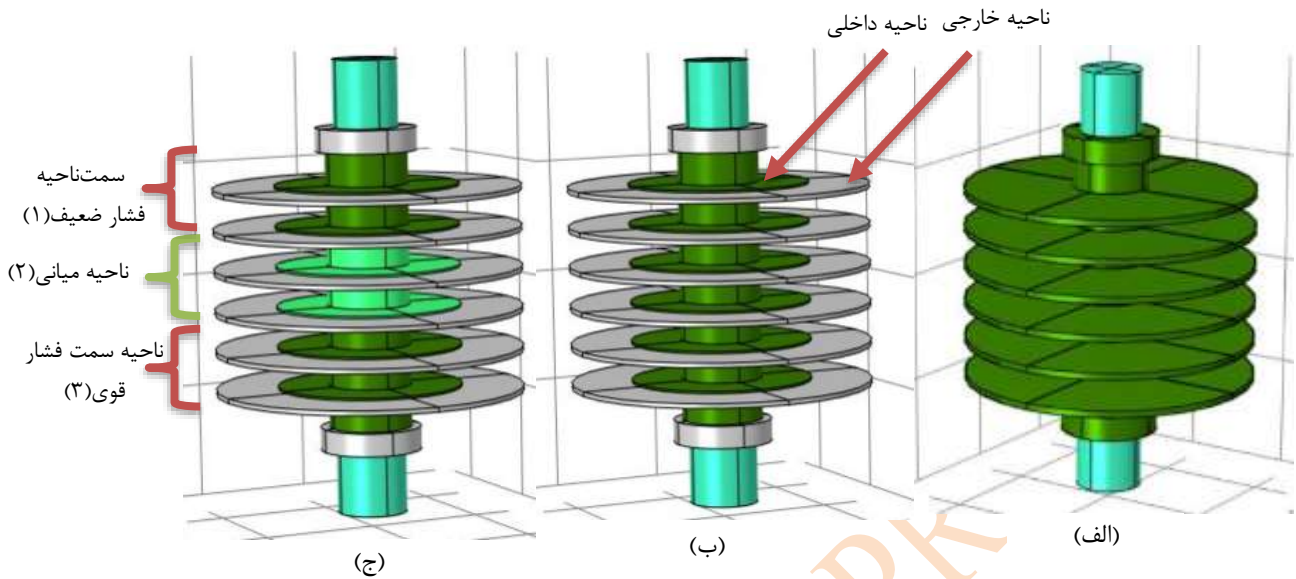
¹¹ electrical conductivity

¹² Pollution Layer Thickness

¹³ Relative Permittivity

برای تحلیل توزیع پتانسیل الکتریکی در مقره‌ها در یک محیط، معادله پواسون به‌عنوان معادله پایه برای پتانسیل

مطالعه را برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول نشان می‌دهد.



شکل ۲- شماتیک مقره پلیمری تحت آلودگی‌های مختلف؛ (الف) آلودگی یکنواخت، (ب) آلودگی غیریکنواخت رینگ، (ج) آلودگی غیریکنواخت رینگ-طولی

جدول ۲- پارامترهای مواد در ساختار مقره‌های پلیمری مورد مطالعه در شبیه‌سازی اجزا محدود [۶]

الکتریکی (V) در نظر گرفته می‌شود. این معادله به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\rho = -(\epsilon \nabla V) \cdot \nabla \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی بار الکتریکی، ϵ ثابت دی‌الکتریک ماده، V پتانسیل الکتریکی و ∇ عملگر گرادیان است. در داخل مقره، چگالی بار الکتریکی به‌طور معمول صفر است ($\rho = 0$)، زیرا مقره‌ها به‌طور طبیعی بار الکتریکی آزاد ندارند. بنابراین معادله فوق به معادله لاپلاس تبدیل می‌شود:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2)$$

این معادله بیان‌کننده این است که پتانسیل در نواحی فاقد بار (داخل مقره) باید به‌گونه‌ای توزیع شود که هیچ‌گونه تغییر در جهت میدان الکتریکی نداشته باشد. به عبارت دیگر، در این مناطق، پتانسیل به‌صورت یکنواخت توزیع می‌شود و هیچ‌گونه بار الکتریکی باعث انحراف میدان نمی‌شود. در مقره‌ها، که معمولاً از مواد عایق با دی‌الکتریک بالا ساخته می‌شوند، پتانسیل در اطراف ساختار به‌صورت غیرخطی توزیع می‌شود. این توزیع بستگی به هندسه و خواص ماده مقره دارد و می‌تواند پیچیدگی‌هایی به همراه داشته باشد. برای حل معادلات پتانسیل در نرم‌افزار

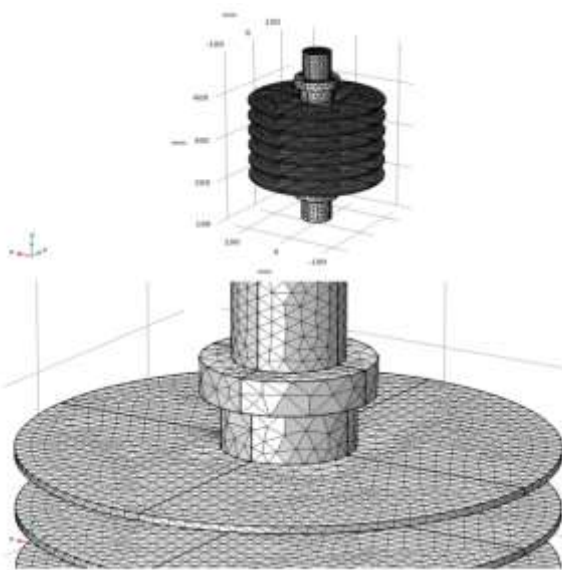
مواد مورد استفاده	ضریب گذردهی [متر/فاراد]	رسانایی [متر/زیمنس]
هوا	۱	10^{-20}
لاستیک سیلیکون	۴	10^{-12}
فایبرگلاس	۶/۵	10^{-14}
فولاد گالوانیزه	۱	$5/9 \times 10^7$

۳- روابط حاکم بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در مقره‌ها در نرم‌افزار کامسول

تحلیل میدان‌های الکتریکی و پتانسیل در مقره‌ها برای ارزیابی عملکرد آنها در شرایط مختلف محیطی، فشار، دما و بارگذاری الکتریکی، در طراحی سیستم‌های قدرت و تجهیزات الکتریکی بسیار مهم است. برای تحلیل دقیق این سیستم‌ها و پیش‌بینی عملکرد مقره‌ها، استفاده از روش‌های عددی مانند روش اجزای محدود ضروری است. نرم‌افزار کامسول یک ابزار قدرتمند برای شبیه‌سازی میدان‌های الکتریکی و تحلیل پتانسیل در مقره‌ها می‌باشد. در این بخش، روابط ریاضی حاکم بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در مقره‌ها بیان می‌گردد.

۳-۱- معادلات حاکم بر پتانسیل الکتریکی

یا مستطیلی با الگوی منظم و متقارن استفاده می‌کند. مش غیرساختاریافته از المان‌های مثلثی یا چندضلعی با الگوی نامنظم تشکیل شده است. مش هیبریدی ترکیبی از مش ساختاریافته و غیرساختاریافته است که در آن نواحی ساده با مش ساختاریافته و نواحی پیچیده با مش غیرساختاریافته پوشش داده می‌شوند. مش هیبریدی برای تحلیل‌های چند فیزیکی بسیار مناسب است. در این مقاله از مش‌بندی هیبریدی استفاده شده است، که نتایج آن در حل مسئله از نمای دور و نزدیک در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایش مش‌بندی مقره پلیمری مورد مطالعه

پس از ایجاد مش و اعمال شرایط مرزی، معادلات دیفرانسیلی مربوط به پتانسیل و میدان الکتریکی برای هر المان حل می‌شود. در نهایت، نتایج به صورت گرافیکی نمایش داده می‌شوند. این نتایج می‌توانند شامل توزیع سه‌بعدی پتانسیل و میدان الکتریکی در داخل و اطراف مقره‌ها باشند.

۵- نتایج شبیه سازی

در این مطالعه، توزیع پتانسیل و بیشینه میدان الکتریکی (که معیاری برای سنجش شدت میدان در یک ناحیه خاص است) در یک مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت، تحت شرایط مختلف آلودگی، از جمله آلودگی یکنواخت و غیریکنواخت (رینگی و رینگی-طولی)، با در نظر گرفتن عیوب مکانیکی، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج این تحلیل‌ها

کامسول، باید شرایط مرزی مناسب برای ساختار مقره تعیین شود. در بخش فشار قوی مقره، از شرایط مرزی با پتانسیل ثابت استفاده می‌شود. برای سطح مقره که به عنوان عایق عمل کرده و هیچ جریان الکتریکی از آن عبور نمی‌کند، شرایط مرزی مشتق پتانسیل اعمال می‌گردد. در این حالت، مشتق پتانسیل در راستای عمود بر سطح برابر با صفر قرار می‌گیرد، که نشان‌دهنده عدم تغییر میدان الکتریکی در این راستا است. در قسمت فشار ضعیف مقره، شرایط مرزی مشابه شرایط بخش فشار قوی است، با این تفاوت که ولتاژ معمولاً به مقدار پایین‌تری (که معمولاً صفر در نظر گرفته می‌شود) اختصاص دارد.

۳-۲- معادله میدان الکتریکی

میدان الکتریکی (E) به طور مستقیم از پتانسیل الکتریکی (V) به دست می‌آید:

$$E = -\nabla V \quad (3)$$

این معادله به این معنی است که میدان الکتریکی همیشه در جهت کاهش پتانسیل حرکت می‌کند و شدت آن نیز به تغییرات پتانسیل بستگی دارد.

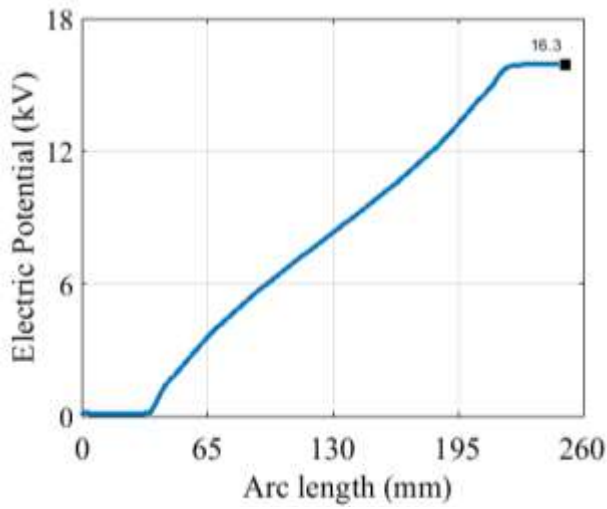
۴- روش اجزای محدود در کامسول

در نرم‌افزار کامسول، برای حل مسائل مربوط به توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی در مقره‌ها، از معادلات دیفرانسیلی معمولاً معادلات پواسون یا لاپلاس استفاده می‌شود. کامسول این معادلات را با توجه به هندسه و خواص مواد موجود حل می‌کند. در ابتدا باید هندسه مقره و ویژگی‌های مواد (از جمله دی‌الکتریک‌ها) مشخص شوند و سپس شرایط مرزی مناسب برای شبیه‌سازی میدان‌های الکتریکی اعمال گردد. پس از تعریف هندسه، خواص مواد و شرایط مرزی، مرحله بعدی مش‌بندی است، که در آن هندسه جسم به شبکه‌ای از المان‌های کوچک تقسیم می‌شود. مش‌بندی یکی از بخش‌های کلیدی فرآیند حل مسائل عددی به روش اجزای محدود در کامسول است. در این فرآیند، هندسه به منظور افزایش دقت محاسبات، بهینه‌سازی منابع محاسباتی و تحلیل مسائل پیچیده، به المان‌های کوچکتر و ساده‌تر با اشکال مختلف تقسیم می‌شود. در کامسول، مش‌بندی به سه دسته اصلی مش ساختاریافته، مش غیرساختاریافته و مش هیبریدی تقسیم بندی می‌شود. مش ساختاریافته معمولاً از المان‌های مربعی

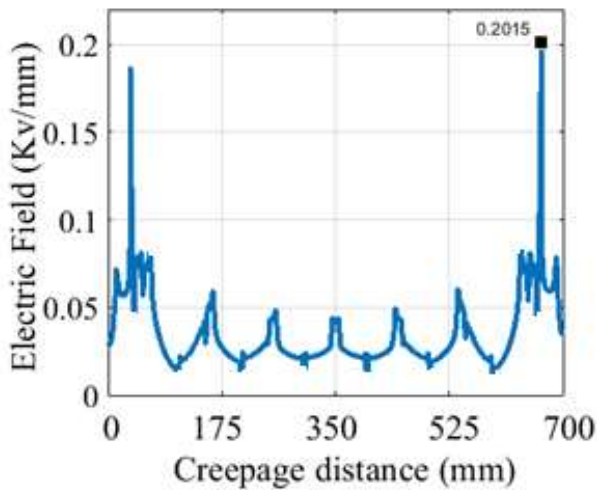
نشان می‌دهد که این کمیت‌ها نقش مهمی در ارزیابی رفتار الکتریکی مقره‌ها دارند.

۵-۱- توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی مقره مورد مطالعه در شرایط تمیز (بدون آلودگی)

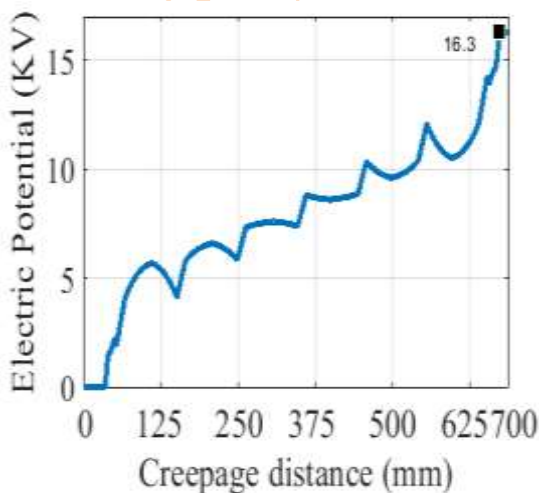
توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی بر حسب فاصله خزشی و فاصله جرقه‌زنی، همراه با شمای گرافیکی توزیع پتانسیل برای مقره پلیمری مورد مطالعه در شرایط تمیز (بدون آلودگی)، در شکل (۴) ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بیشترین پتانسیل به چند چترک ابتدایی در سمت هادی اعمال شده است. این پدیده نشان‌دهنده رفتار غیرخطی توزیع میدان الکتریکی در طول مقره است. همچنین، توزیع میدان الکتریکی در نواحی مجاور ترمینال‌های فشار قوی و ضعیف مقره بیشتر است، زیرا در این مناطق اختلاف پتانسیل بالاتر بوده و میدان الکتریکی با آن رابطه مستقیم دارد. نزدیکی به ترمینال‌ها موجب تمرکز بیشتر میدان الکتریکی شده، در حالی که در ناحیه میانی مقره، به دلیل پراکندگی میدان و کاهش اختلاف پتانسیل، شدت میدان الکتریکی کمتر است. رفتار غیرخطی توزیع میدان الکتریکی ناشی از اثرات لبه‌ای و توزیع نابرابر بارهای سطحی بوده که منجر به ایجاد نواحی با شدت میدان بالا در نزدیکی ترمینال‌ها می‌شود. علاوه بر این، در طراحی بهینه مقره‌ها، در نظر گرفتن این توزیع غیرخطی برای کاهش تنش‌های الکتریکی و افزایش طول عمر عایقی امری ضروری است.



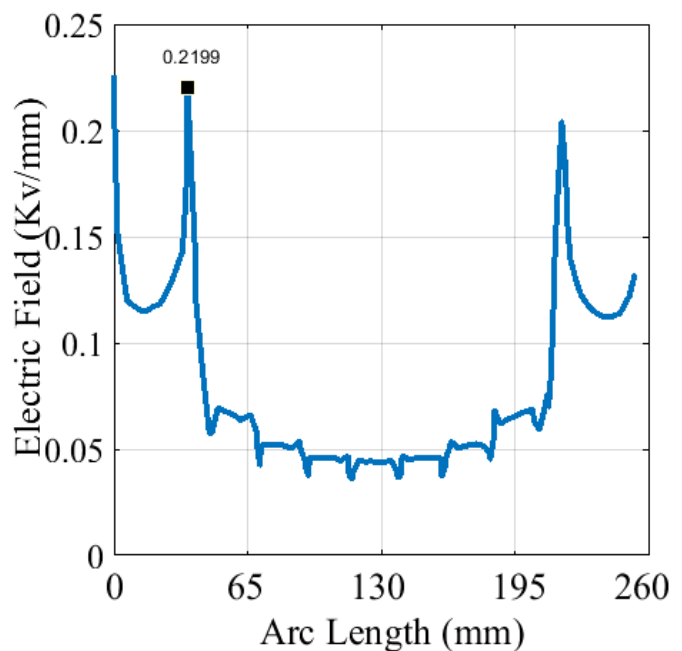
(ب)



(ج)

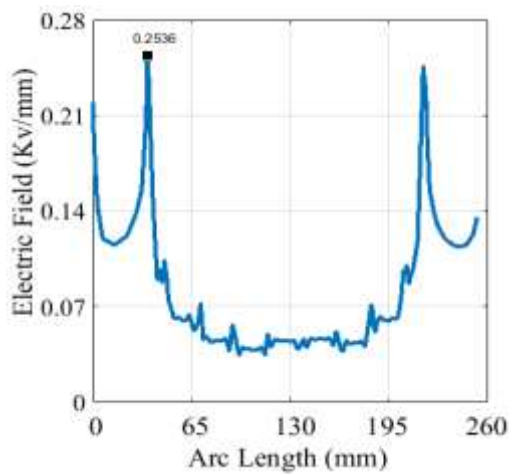


(د)

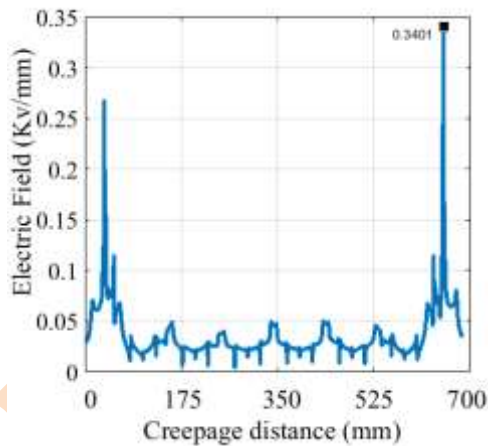


(ه)

الکتریکی را به صورت غیرخطی و نامتوازن تغییر می‌دهد، به گونه‌ای که بیشینه میدان در این شرایط نسبت به حالت تمیز بالاتر است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه میدان الکتریکی بر حسب فاصله خزشی در حضور لایه آلودگی یکنواخت، نسبت به حالت تمیز، در سمت فشار قوی، لایه میانی و سمت فشار ضعیف به ترتیب، ۶۹/۱۵ درصد، ۳۲/۵۵ درصد و ۴۳/۵۴ درصد افزایش یافته است. همچنین، این افزایش بر حسب فاصله جرقه‌زنی به ترتیب در سمت فشار قوی ۲۰/۱ درصد، لایه میانی ۵۱/۴۷ درصد و سمت فشار ضعیف ۱۵/۵۲ درصد ثبت شده است.



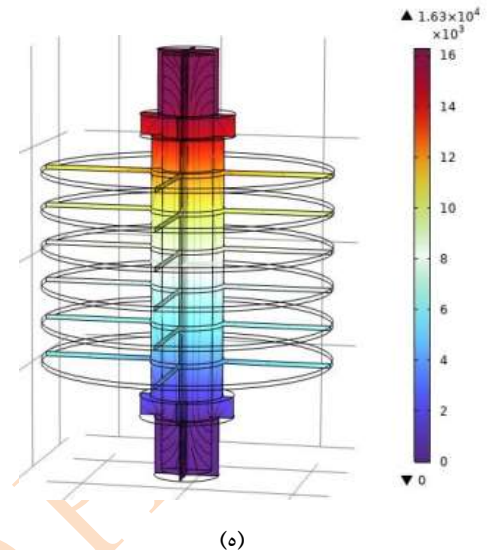
(الف)



(ب)

شکل ۵- توزیع میدان الکتریکی مقره پلیمری در آلودگی یکنواخت؛ (الف) بر حسب فاصله جرقه‌زنی، (ب) بر حسب فاصله خزشی

۵-۳- توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی مقره مورد مطالعه در شرایط آلودگی غیر یکنواخت



(ه)

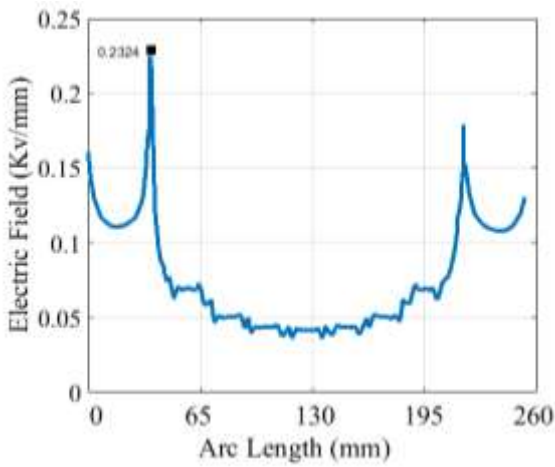
شکل ۴- توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی مقره پلیمری در حالت تمیز؛ (الف) میدان الکتریکی بر حسب فاصله جرقه‌زنی، (ب) پتانسیل الکتریکی بر حسب فاصله جرقه‌زنی، (ج) میدان الکتریکی بر حسب فاصله خزشی، (د) پتانسیل الکتریکی بر حسب فاصله خزشی، (ه) شماتیک توزیع میدان الکتریکی در کامسول

۵-۲- توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی مقره

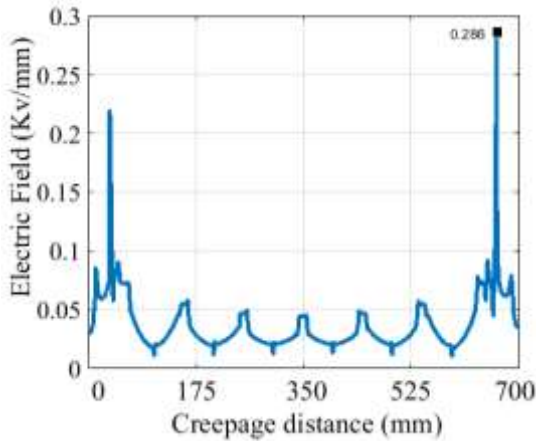
مورد مطالعه در شرایط آلودگی یکنواخت

در این بخش، تأثیر آلودگی یکنواخت بر توزیع میدان الکتریکی در مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت ارزیابی می‌شود. مقادیر هدایت الکتریکی و ضخامت لایه آلودگی به ترتیب 10^{-6} زیمنس بر متر و ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی در شرایط آلودگی یکنواخت در شکل (۵) ارائه شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، بیشینه میدان الکتریکی در حضور لایه آلودگی یکنواخت، در مقایسه با شرایط تمیز، افزایش یافته است. بیشینه میدان الکتریکی بر حسب فاصله خزشی و فاصله جرقه‌زنی در حضور لایه آلودگی به ترتیب برابر ۰/۳۴۰ کیلوولت بر میلی‌متر و ۰/۲۵۳ کیلوولت بر میلی‌متر بوده است، در حالی که این مقادیر در شرایط تمیز به ترتیب ۰/۲۰۱ کیلوولت بر میلی‌متر و ۰/۲۱۹ کیلوولت بر میلی‌متر ثبت شده‌اند. حضور لایه آلودگی منجر به تغییر خواص دی‌الکتریک محیط شده و توزیع میدان

در این مطالعه، آلودگی‌های غیریکنواخت مورد بررسی شامل آلودگی غیریکنواخت رینگ (RNU) و رینگ-طولی (RLNU) هستند که شماتیک این دو نوع آلودگی در شکل (۲) نمایش داده شده است. مقدار هدایت الکتریکی 10^{-6} زیمنس بر متر فرض شده است. ضخامت لایه آلودگی در آلودگی رینگ ۲ میلی‌متر و در آلودگی رینگ-طولی، در نواحی مجاور الکترودهای فشار قوی و ضعیف ۲ میلی‌متر و در ناحیه میانی ۰/۸ میلی‌متر تعیین شده است. این تغییرات در ضخامت آلودگی بر توزیع میدان الکتریکی تأثیر گذاشته و موجب ایجاد نواحی با شدت میدان متفاوت غیریکنواخت می‌شود. در نتیجه، توزیع میدان الکتریکی بر حسب فاصله خزشی و فاصله جرقه‌زنی در هر دو حالت آلودگی غیریکنواخت رینگ و رینگ-طولی، به ترتیب در شکل (۶) و شکل (۷) نشان داده شده است.



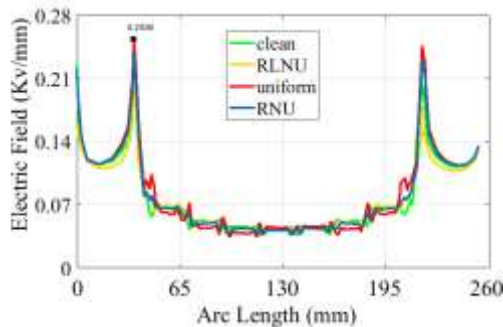
(الف)



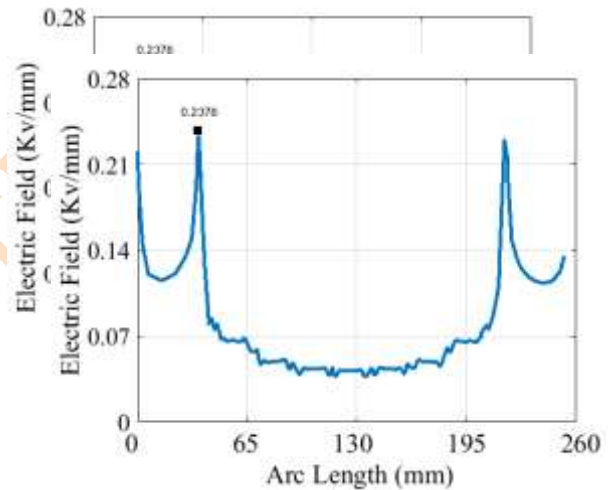
(ب)

شکل ۷- توزیع میدان الکتریکی مقره پلیمری در آلودگی غیریکنواخت رینگ-طولی؛ (الف) بر حسب فاصله جرقه‌زنی، (ب)

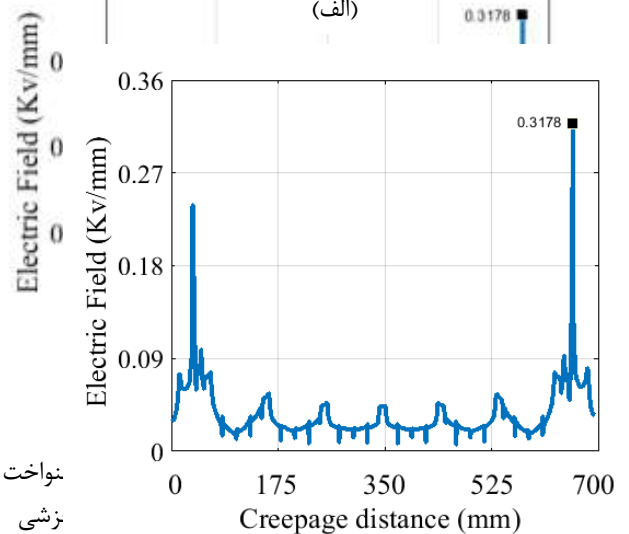
بر حسب فاصله خزشی شبیه‌سازی انجام شده به منظور بررسی جامع تأثیر استقرار آلودگی‌های مختلف بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی، در شکل (۸) نمایش داده شده است. همچنین، بیشینه میدان الکتریکی حاصل از نتایج شبیه‌سازی برای سه بخش مختلف مقره (سمت فشار قوی، بخش میانی و سمت فشار ضعیف)، به ترتیب بر حسب فاصله جرقه‌زنی و فاصله خزشی، در جدول (۳) و جدول (۴) ارائه شده است.



(الف)



(الف)



(ب)

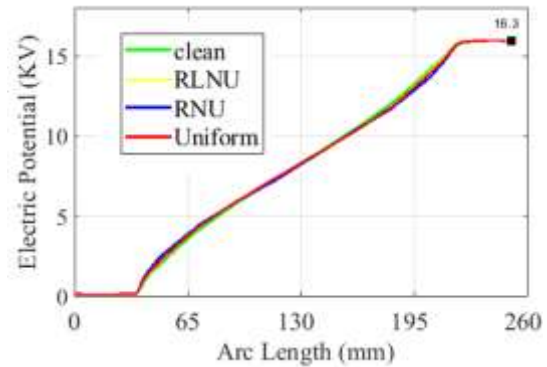
شکل ۶- توزیع میدان الکتریکی مقره پلیمری در آلودگی غیریکنواخت رینگ؛ (الف) بر حسب فاصله جرقه‌زنی، (ب) بر حسب فاصله خزشی

نواخت رینگ؛
خزشی

مطابق شکل (۸) الف، بیشینه میدان الکتریکی در شرایط آلودگی یکنواخت در مقایسه با حالت تمیز و سایر الگوهای آلودگی (رینگی و رینگی-طولی) مقدار بیشتری دارد. این امر به دلیل یکنواختی تغییرات خاص دی‌الکتریک در آلودگی یکنواخت است که منجر به توزیع یکنواخت میدان الکتریکی می‌شود. در مقابل، در شرایط آلودگی غیریکنواخت، توزیع نامنظم آلودگی موجب توزیع غیرمتوازن میدان و در نتیجه کاهش بیشینه آن می‌شود.

مطابق شکل (۷)، در شرایط آلودگی غیریکنواخت رینگی-طولی (RLNU)، تجمع آلودگی در دو انتهای مقره منجر به افزایش ضخامت لایه آلودگی و کاهش مقاومت الکتریکی سطح می‌شود. این لایه به‌عنوان یک مسیر هدایتی با مقاومت پایین عمل کرده و تغییرات پتانسیل را در نواحی مجاور الکترودها کاهش می‌دهد. نتایج شکل (۸) ب نشان می‌دهند که منحنی توزیع پتانسیل الکتریکی در شرایط تمیز نسبت به حالت آلودگی تقریباً خطی است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که نحوه استقرار آلودگی تأثیر قابل توجهی بر توزیع میدان الکتریکی دارد. به‌گونه‌ای که در شرایط آلودگی یکنواخت، شدت میدان الکتریکی ۲۵/۷ درصد بیشتر از حالت آلودگی غیریکنواخت ثبت شده است.

همچنین، در آلودگی رینگی-طولی، شدت میدان تا ۱۱ درصد کمتر از آلودگی غیریکنواخت رینگی بوده که نشان‌دهنده پایداری بیشتر این الگو در برابر تغییرات محیطی است. به‌طور خاص، در شرایط آلودگی یکنواخت، لایه آلودگی به‌طور یکنواخت بر سطح مقره توزیع می‌شود و باعث افزایش شدت میدان الکتریکی در مقایسه با حالت تمیز می‌شود. این افزایش میدان به‌ویژه در نواحی مجاور ترمینال‌ها مشاهده می‌شود که ناشی از اثر لبه‌ها و توزیع خطی ولتاژ است. در این شرایط، بیشینه میدان الکتریکی نسبت به حالت تمیز تا حدود ۳۵ درصد افزایش می‌یابد که موجب افزایش احتمال تخلیه جزئی در نواحی بحرانی و در نتیجه به خطر افتادن عملکرد مقره می‌شود. در شرایط آلودگی غیریکنواخت رینگی (RNU)، آلودگی تنها در نواحی داخلی حلقوی مقره توزیع می‌شود. عدم تقارن در توزیع آلودگی موجب تمرکز میدان الکتریکی در مرز بین ناحیه آلوده و ناحیه تمیز می‌شود. این تمرکز میدان باعث افزایش بیشینه میدان الکتریکی در این نواحی می‌شود که ممکن است در برخی مقاطع به سطحی مشابه با آلودگی یکنواخت برسد. به‌دلیل این تغییرات، خطر تخلیه جزئی



(ب)

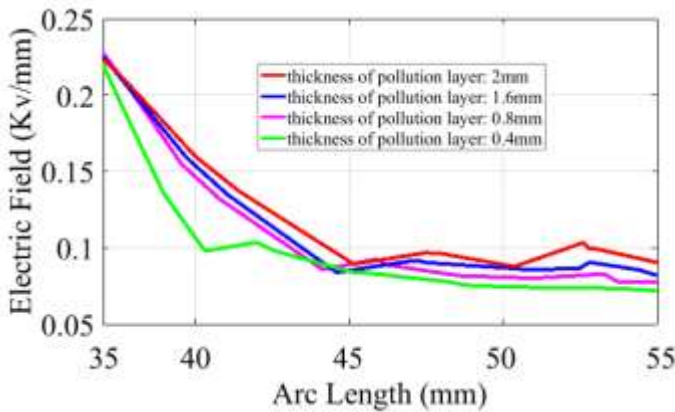
شکل ۸- مقایسه توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی تحت شرایط مختلف آلودگی؛ (الف) توزیع میدان الکتریکی، (ب) توزیع پتانسیل الکتریکی

حداکثر شدت میدان الکتریکی (کیلوولت بر میلی‌متر)			
نوع آلودگی	سمت فشار ضعیف	ناحیه میانی	سمت فشار قوی
تمیز	۰/۲۱۹	۰/۰۶۸	۰/۲۰۴
یکنواخت	۰/۲۵۳	۰/۱۰۳	۰/۲۴۵
غیریکنواخت رینگی	۰/۲۳۷	۰/۰۸۴	۰/۲۲۹
غیریکنواخت رینگی-طولی	۰/۲۳۲	۰/۰۷۲	۰/۲۰۴

جدول ۳- مقایسه بیشینه میدان الکتریکی برحسب فاصله جرقه‌زنی تحت آلودگی‌های مختلف

حداکثر شدت میدان الکتریکی (کیلوولت بر میلی‌متر)			
نوع آلودگی	سمت فشار ضعیف	ناحیه میانی	سمت فشار قوی
تمیز	۰/۱۸۶	۰/۰۸۶	۰/۲۰۱
یکنواخت	۰/۲۶۷	۰/۱۱۴	۰/۳۴۰
غیریکنواخت رینگی	۰/۲۳۹	۰/۰۸۸	۰/۳۱۷
غیریکنواخت رینگی-طولی	۰/۲۱۹	۰/۰۸۸	۰/۲۸۶

جدول ۴- مقایسه بیشینه میدان الکتریکی برحسب فاصله خزشی تحت آلودگی‌های مختلف



(ب)

شکل ۹- مقایسه توزیع میدان الکتریکی تحت لایه‌های مختلف آلودگی؛ (الف) حالت عادی، (ب) حالت بزرگنمایی

۵-۵- بررسی تأثیر عیوب مکانیکی مختلف بر توزیع میدان الکتریکی

مقره‌های خطوط هوایی، به دلیل استقرار در فضای باز و تأثیرپذیری از شرایط محیطی، در معرض آسیب‌های گوناگون قرار دارند. با توجه به ساختار مقره‌های کامپوزیتی، عیوب داخلی و خارجی مختلفی در آنها قابل شناسایی است که بر عملکردشان تأثیرگذار هستند. این عیوب شامل چترک‌های معیوب، عیب در هسته، حفره‌های داخلی، جداشدگی لایه‌های عایقی، فرسایش غلاف‌ها، ترک در میله‌های هسته و خوردگی یراق‌آلات است که موجب کاهش کارایی و دوام مقره‌ها می‌شود [۳۲ و ۳۳]. در این بخش تأثیر عیوب چترک (۰/۶/۵، ۰/۱۲/۵ و ۰/۲۵) و عیوب هسته در سمت الکتروود فشار قوی بر میدان الکتریکی مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت بررسی شده است. شماتیک عیوب مکانیکی ایجاد شده تحت الگوهای مختلف آلودگی در شکل (۱۰) نشان داده شده و نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی تحت شرایط آلودگی غیریکنواخت رینگی در شکل (۱۱) ارائه شده است. علاوه بر این، نتایج کامل شبیه‌سازی برای تمامی الگوهای مختلف آلودگی در جدول (۶) درج شده که نشان می‌دهد عیوب مکانیکی در تمامی حالات شبیه‌سازی، تأثیر قابل توجهی بر افزایش بیشینه میدان الکتریکی مقره‌ها دارند. به‌طور نمونه، بیشینه میدان الکتریکی برحسب فاصله خزشی در شرایط آلودگی غیریکنواخت رینگی، مطابق شکل (۱۱) و داده‌های مندرج در جدول (۶)، برای قسمت فشار قوی، به ترتیب برای مقره سالم، مقره با چترک معیوب با

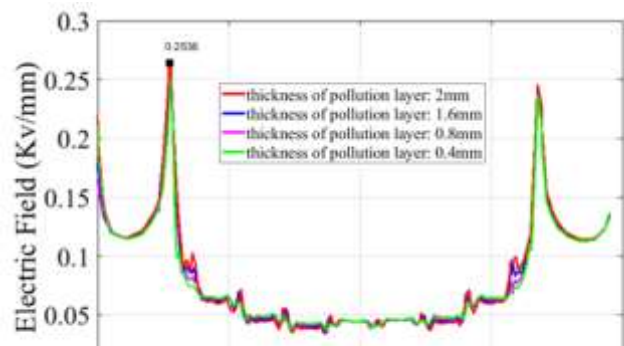
موضعی در نواحی مرزی آلودگی و مقره تمیز افزایش می‌یابد.

۴-۵- بررسی تأثیر ضخامت‌های مختلف آلودگی بر توزیع میدان الکتریکی

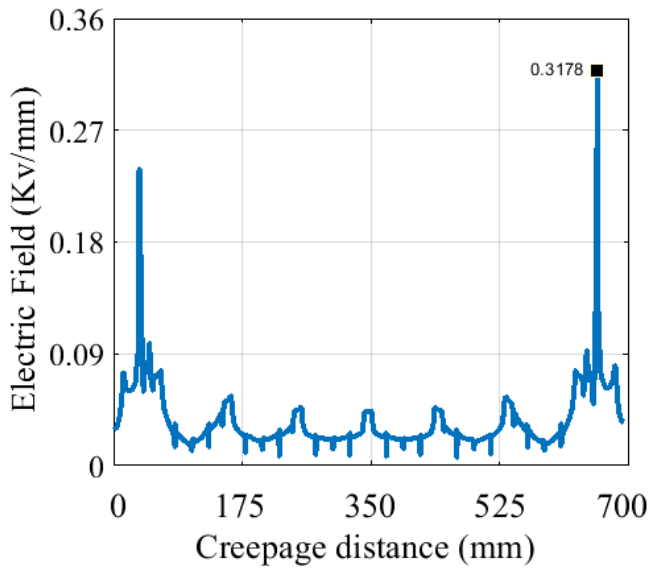
شبیه‌سازی در شرایط هدایت الکتریکی 10^{-6} زیمنس بر متر و چهار ضخامت مختلف آلودگی (۰/۴، ۰/۸، ۱/۶ و ۲ میلی‌متر) برای حالت‌های گوناگون آلودگی انجام شده و نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است. همچنین، شکل (۹) نمونه‌ای از شبیه‌سازی انجام‌شده را در شرایط آلودگی یکنواخت نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت لایه آلودگی، بیشینه میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. این امر ناشی از افزایش مقاومت سطحی مقره است که موجب شدت بیشتر میدان برای عبور جریان و حفظ پتانسیل می‌شود. به‌طور نمونه، با افزایش ضخامت لایه آلودگی از ۰/۴ به ۲ میلی‌متر، بیشینه میدان الکتریکی به ترتیب در حالت‌های آلودگی یکنواخت، آلودگی غیریکنواخت رینگی و رینگی-طولی به میزان ۶/۳ درصد، ۳/۴۹ درصد و ۴/۵ درصد افزایش یافته است.

حداکثر شدت میدان الکتریکی (کیلوولت بر میلی‌متر)			
نوع آلودگی			ضخامت آلودگی (میلی‌متر)
رینگی طولی	رینگی	یکنواخت	
۰/۲۲۲	۰/۲۲۹	۰/۲۳۸	۰/۴
۰/۲۲۵	۰/۲۳۱	۰/۲۴۱	۰/۸
۰/۲۲۹	۰/۲۳۶	۰/۲۴۹	۱/۶
۰/۲۳۲	۰/۲۳۷	۰/۲۵۳	۲

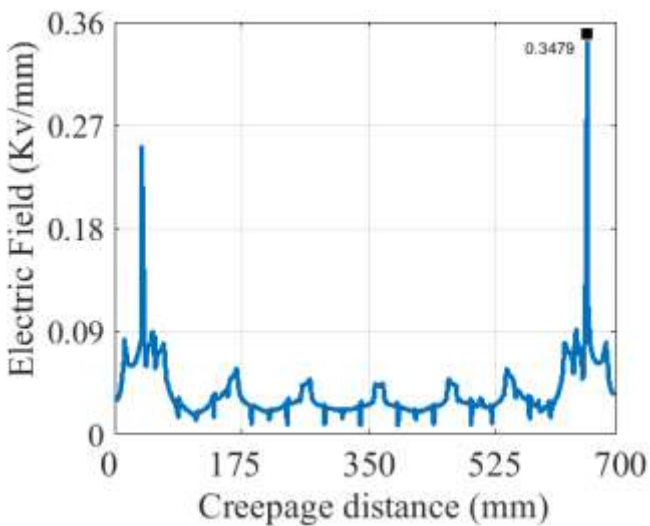
جدول ۵- مقایسه بیشینه میدان الکتریکی بر حسب فاصله جرقه زنی تحت ضخامت‌های مختلف آلودگی



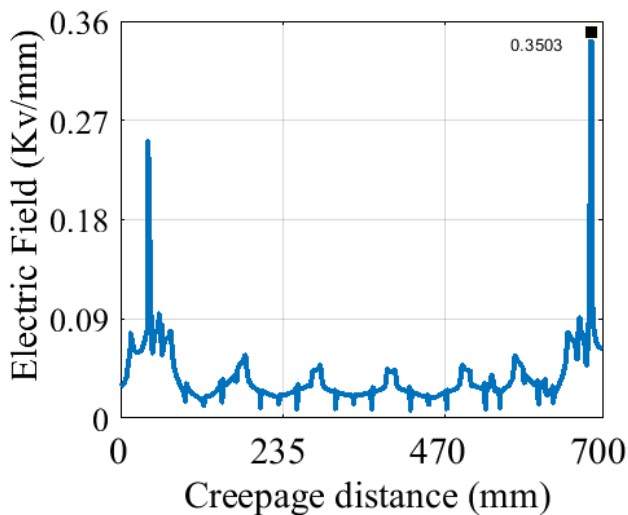
جدول ۶- مقایسه بیشینه میدان الکتریکی برحسب فاصله



(الف)

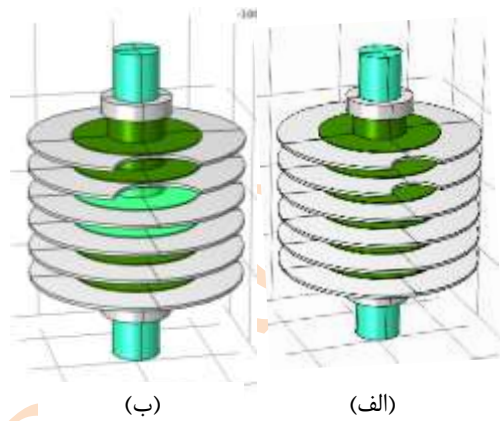


(ب)



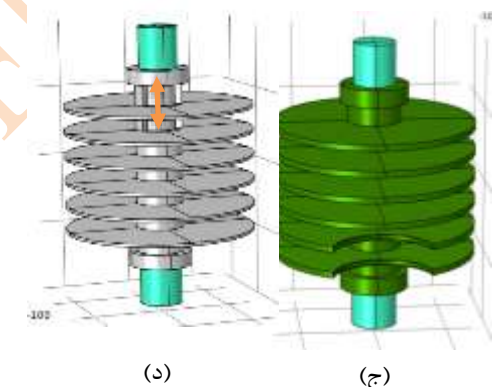
(ج)

آسیب‌های ۶/۵٪، ۱۲/۵٪ و ۲۵٪ و همچنین مقره با هسته معیوب، برابر با ۰/۳۱۷، ۰/۳۴۷، ۰/۳۵۰، ۰/۳۶۷ و ۰/۳۲۹ کیلوولت بر میلی‌متر ثبت شده است. برای قسمت میانی مقره، این مقادیر به ترتیب ۰/۰۸۸، ۰/۰۹۱، ۰/۰۹۴، ۰/۱۶۶ و ۰/۱۹۱ کیلوولت بر میلی‌متر و برای قسمت فشار ضعیف، ۰/۲۳۹، ۰/۲۴۹، ۰/۲۵۱، ۰/۲۵۲ و ۰/۲۴۴ کیلوولت بر میلی‌متر ثبت شده است.



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

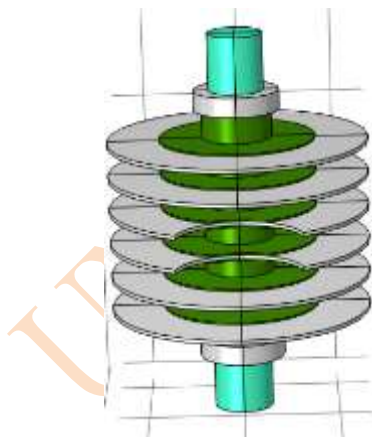
شکل ۱۰- شماتیک عیوب مکانیکی؛ (الف) چترک ۶/۵٪ (آلودگی رینگی)، (ب) چترک ۱۲/۵٪ (رینگی-طولی)، (ج) چترک ۲۵٪ (آلودگی یکنواخت)، (د) هسته معیوب (تمیز)

حداکثر شدت میدان الکتریکی (کیلوولت بر میلی‌متر)				
نوع آلودگی				نوع مقره
رینگی طولی	رینگی	یکنواخت	تمیز	
۰/۲۸۶	۰/۳۱۷	۰/۳۴۰	۰/۲۰۱	سالم
۰/۳۱۰	۰/۳۴۷	۰/۳۵۷	۰/۲۰۵	چترک معیوب ۶/۵٪
۰/۳۲۲	۰/۳۵۰	۰/۳۶۱	۰/۲۰۷	چترک معیوب ۱۲/۵٪
۰/۳۴۳	۰/۳۶۷	۰/۳۹۶	۰/۲۱۱	چترک معیوب ۲۵٪
۰/۳۳۲	۰/۳۲۹	۰/۳۷۴	۰/۲۰۷	هسته معیوب

انجام شده، افزایش مساحت عیوب مکانیکی در مقره‌ها منجر به تغییر در خواص عایقی شده و موجب توزیع غیریکنواخت میدان الکتریکی در مقره می‌شود. این تغییرات سبب تمرکز میدان در نواحی آسیب‌دیده شده و در نتیجه، بیشینه میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. تأثیر این افزایش در شرایط تمیز به مراتب کمتر از حالت‌های آلوده ثبت شده است. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی تحت تمامی الگوهای مختلف آلودگی نشان می‌دهد که بیشینه میدان الکتریکی در مقره دارای عیوب مکانیکی نسبت به مقره سالم، به ترتیب در ناحیه فشار قوی، ناحیه میانی و ناحیه فشار ضعیف ۱۶/۴۷٪، ۱۷۱/۵۹٪، ۱۵/۰۶٪ افزایش یافته است.

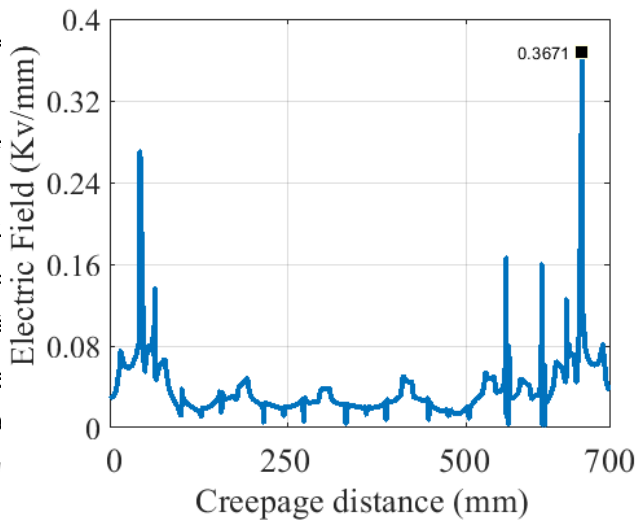
۵-۶- تأثیر مکان عیوب مکانیکی بر توزیع میدان الکتریکی

شبیه‌سازی در سه ناحیه شامل نزدیک الکتروود فشار قوی (ناحیه ۱)، ناحیه میانی (ناحیه ۲) و نزدیک الکتروود فشار ضعیف (ناحیه ۳)، در شرایط چترک معیوب با آسیب ۲۵٪ بر روی مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت، تحت آلودگی غیریکنواخت رینگی و رینگی-طولی، به‌منظور بررسی تأثیر موقعیت عیوب مکانیکی بر میدان الکتریکی انجام شده است. شکل (۱۲) نمونه‌ای از شماتیک عیوب مکانیکی ایجادشده در قسمت میانی مقره پلیمری مورد مطالعه را در شرایط آلودگی غیریکنواخت رینگی نشان می‌دهد.

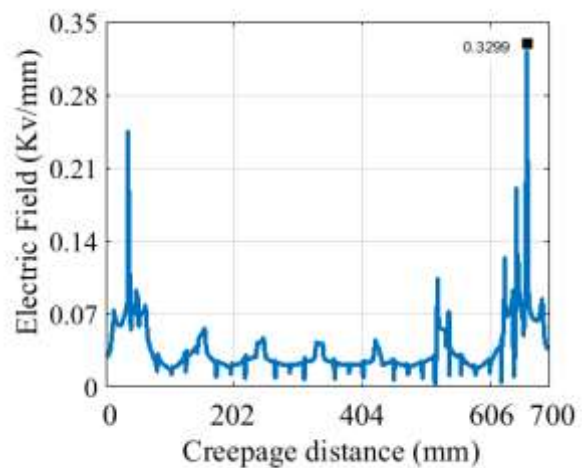


شکل ۱۲- عیب مکانیکی چترک ۲۵٪ در ناحیه میانی مقره

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که بیشینه میدان الکتریکی در ناحیه میانی و نزدیک الکتروود فشار ضعیف مقره، بیشتر از ناحیه الکتروود فشار قوی است. این امر به دلیل تمرکز بیشتر میدان الکتریکی در ناحیه میانی مقره



(د)



(ه)

شکل ۱۱- توزیع میدان الکتریکی در حالت آلودگی غیریکنواخت رینگی؛ (الف) مقره سالم، (ب) مقره چترک معیوب ۶/۵٪، (ج) مقره چترک معیوب ۱۲/۵٪، (د) مقره چترک معیوب ۲۵٪، (ه) مقره هسته معیوب

نتایج شبیه‌سازی مندرج در شکل (۱۱) در شرایط آلودگی غیریکنواخت رینگی نشان می‌دهد که حضور عیوب مکانیکی، در مقایسه با حالت سالم، منجر به افزایش بیشینه میدان الکتریکی شده است. این افزایش به ترتیب برای قسمت فشار قوی، قسمت میانی و قسمت فشار ضعیف، حداکثر ۱۵/۷۷٪، ۱۷۱/۵۹٪ و ۵/۴۳٪ بوده است. با توجه به نتایج مندرج در جدول (۶)، در تمامی حالات شبیه‌سازی

جدول ۷- مقایسه بیشینه میدان الکتریکی برحسب فاصله خزشی تحت مکان عیوب مکانیکی مختلف

حداکثر شدت میدان الکتریکی (کیلوولت بر میلی‌متر)			
نوع آلودگی		ناحیه مورد شبیه سازی	
رینگی- طولی	رینگی		
(۱)	۰/۳۴۳	سمت الکتروود فشار قوی	ناحیه (۱)
	۰/۱۶۱	ناحیه میانی	
	۰/۲۵۲	سمت الکتروود فشار ضعیف	
(۲)	۰/۳۴۴	سمت الکتروود فشار قوی	ناحیه (۲)
	۰/۱۳۱	ناحیه میانی	
	۰/۲۴۵	سمت الکتروود فشار ضعیف	
(۳)	۰/۳۴۷	سمت الکتروود فشار قوی	ناحیه (۳)
	۰/۱۲۳	ناحیه میانی	
	۰/۲۴۶	سمت الکتروود فشار ضعیف	

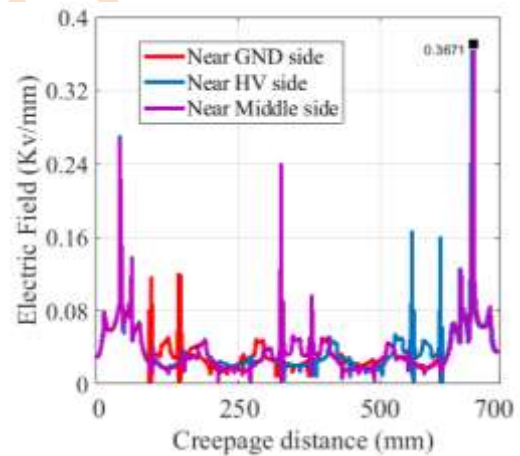
است که ناشی از آسیب‌ها و ناهماهنگی در ساختار عایقی بوده و در نتیجه، بیشینه میدان افزایش می‌یابد. در مقابل، در ناحیه الکتروود فشار قوی، میدان الکتریکی معمولاً یکنواخت‌تر و گسترده‌تر است و آسیب‌های چترک معیوب تأثیر کمتری بر افزایش بیشینه میدان دارند. علاوه بر این، در نواحی نزدیک به الکتروود فشار ضعیف، به دلیل کاهش مقاومت عایقی و اختلاف پتانسیل بین الکتروودهای فشار قوی و فشار ضعیف، میدان الکتریکی بیشتر متمرکز شده و این تمرکز موجب افزایش بیشینه میدان در این نواحی می‌شود. مقدار بیشینه میدان برای شرایط آلودگی غیریکنواخت رینگی ۰/۳۷۱ کیلوولت بر میلی‌متر و برای آلودگی غیریکنواخت رینگی-طولی ۰/۳۴۷ کیلوولت بر میلی‌متر ثبت شده است. نتایج کلی و تصویر شبیه‌سازی انجام‌شده در شکل (۱۳) و جدول (۷) نمایش داده شده است.

۶- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با

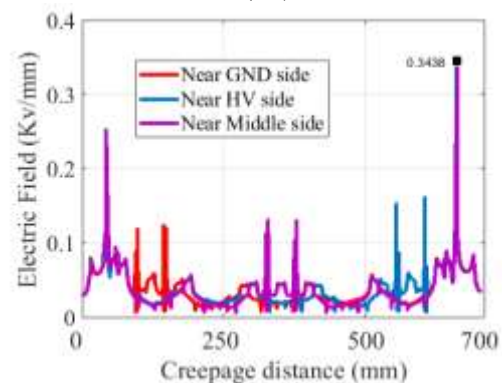
تحقیقات پیشین

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با تحقیقات پیشین در زمینه توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی تحت شرایط آلودگی، از مطالعات معتبر پیشین بهره‌گیری شده است. بررسی ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی به اثرات آلودگی سطحی بر عملکرد مقره‌ها پرداخته‌اند، بیشتر آن‌ها محدود به آلودگی یکنواخت یا مدل‌های ساده‌شده بوده‌اند. به عنوان نمونه، در مطالعه [۲۰] با بررسی آلودگی غیریکنواخت از نوع رینگی نشان داده شده است که این الگو نسبت به آلودگی یکنواخت موجب پایداری بیشتر میدان الکتریکی می‌شود؛ یافته‌ای که با نتایج این پژوهش نیز هم‌راستا است.

در مرجع [۲۸]، که شامل تحلیل تجربی و عددی میدان الکتریکی در مقره‌های شیشه‌ای تحت شرایط آلودگی مختلف است، گزارش شده که در آلودگی یکنواخت، بیشینه میدان در نزدیکی الکتروود فشار قوی به حدود ۲۵/۸ کیلوولت بر سانتی‌متر و در آلودگی غیریکنواخت به مقدار بحرانی ۴۶/۹ کیلوولت بر سانتی‌متر می‌رسد. در این پژوهش نیز، مقره‌های پلیمری تحت شرایط مشابه شبیه‌سازی شده‌اند و اگرچه در برخی نواحی افزایش میدان مشاهده شده، اما پراکندگی آن یکنواخت‌تر و مقدار پیک میدان پایین‌تر از نمونه‌های شیشه‌ای بوده است. این مقایسه کیفی، هم صحت مدل عددی به‌کار رفته را تأیید می‌کند و هم



(الف)



(ب)

شکل ۱۳- تغییرات توزیع و موقعیت عیوب مکانی در مقره پلیمری تحت شرایط مختلف آلودگی؛ (الف) آلودگی غیریکنواخت رینگی، (ب) آلودگی غیریکنواخت رینگی-طولی

عیوب مکانیکی، به‌ویژه در ناحیه میانی مقره، موجب تشدید میدان و افزایش بیشینه آن می‌شود. این افزایش به‌دلیل تمرکز بیشتر خطوط میدان در نواحی آسیب‌دیده است. محل استقرار عیوب تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر شدت میدان دارد، به‌طوری که شدت میدان الکتریکی در شرایطی که عیوب مکانیکی در لایه میانی مقره ایجاد می‌شوند، نسبت به نواحی فشار قوی و فشار ضعیف بیشتر است.

این یافته‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن اثرات هم‌زمان آلودگی محیطی و نقص‌های ساختاری در طراحی و ارزیابی عملکرد عایقی مقره‌ها تأکید دارند. بررسی‌های بیشتر می‌تواند به تحلیل‌های عمیق‌تری درباره تأثیرات شرایط مختلف آلودگی و نوع عیوب بر عملکرد بلندمدت مقره‌ها و پیشنهاد روش‌های بهینه برای طراحی مقره‌های مقاوم‌تر کمک کند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

مهرداد قربانی پاشاکلاهی: روش‌شناسی، نگارش پیش‌نویس اصلی، نرم افزار.

مصطفی جزائری: روش‌شناسی، اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش، راهنمایی

محسن نیاستی: اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش، راهنمایی

سیدمیثم سیدبزرگر: اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش، راهنمایی

منابع مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

نشان‌دهنده عملکرد مطلوب‌تر مقره‌های پلیمری در مدیریت میدان الکتریکی در شرایط آلودگی غیر یکنواخت است. در زمینه تأثیر عیوب مکانیکی، مطالعه [۳۴] بر روی مقره‌های پرسلانی بیانگر آن است که آسیب‌هایی مانند لب‌پریدگی یا ترک سطحی در ناحیه چترک می‌تواند منجر به تمرکز شدید میدان، کاهش یکنواختی پتانسیل و افزایش احتمال تخلیه جزئی شود. در مقابل، مطالعات [۳۰] بر روی مقره‌های کامپوزیتی نشان می‌دهند که اگرچه ترک‌ها یا جداسدگی‌های ساختاری موجب افزایش موضعی میدان (تا حدود ۲۵ درصد) می‌شوند، اما در مقره‌های پلیمری، پراکندگی میدان گسترده‌تر و تغییرات شدت آن ملایم‌تر است. نتایج عددی این پژوهش نیز این موضوع را تأیید کرده و نشان می‌دهد که در حضور آسیب‌هایی نظیر ترک چترک یا جداسدگی موضعی، احتمال تخلیه‌های موضعی کاهش یافته و این امر مزیت نسبی عملکرد مقره‌های پلیمری در برابر عیوب مکانیکی را تثبیت می‌کند.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، توزیع میدان الکتریکی در مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت تحت تأثیر الگوهای مختلف آلودگی و وجود عیوب مکانیکی با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار مکانیکی با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نحوه استقرار آلودگی تأثیر قابل‌توجهی بر توزیع میدان الکتریکی دارد. بطوریکه آلودگی یکنواخت به واسطه تغییر در ویژگی‌های دی‌الکتریک سطح، موجب افزایش چشمگیر شدت میدان الکتریکی نسبت به آلودگی‌های غیریکنواخت از نوع رینگ‌ی و رینگ-طولی می‌شود. در حالی که آلودگی‌های غیریکنواخت شدت میدان را در نواحی بحرانی کاهش داده و توزیع یکنواخت‌تری نسبت به آلودگی یکنواخت ایجاد می‌کنند.

افزایش ضخامت لایه آلودگی در تمامی الگوها باعث افزایش تمرکز میدان در سطح مقره می‌شود. از سوی دیگر، وجود

۸- مراجع

[1] W. Li and Y. Zhang. 'Comparison of dielectric properties of polymeric materials in high-voltage applications.' J. Electr. Eng. 76, no. 3 (2024): 211-220.

[2] R. Murugan and C. Abinaya. 'Performance analysis of polymer insulators under polluted conditions.' IEEE Trans. Power Del. 32, no. 2 (2023): 577-585.

- [3] S. Chandrasekar and R. Gorur. 'Performance of silicone rubber and EPDM in high-voltage insulators.' *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 23, no. 6 (2023): 3441–3449.
- [4] S. R. Shah and K. Mehta. 'Effects of UV exposure on polymer insulators: A review.' *Polym. Test.* 42 (2022): 206–215.
- [5] X. Zhu and W. He. 'Analysis of corona aging in silicone rubber insulators.' *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 19, no. 6 (2020): 2178–2185.
- [6] J. H. Kim and H. K. Park. 'Thermal aging effects on silicone rubber for outdoor insulators.' *J. Therm. Anal. Calorim.* 116, no. 3 (2021): 1537–1545.
- [7] [35] Z. Zhang, J. You, D. Zhang, X. Jiang, J. Hu, and W. Zhang. 'AC flashover performance of various types of insulators under fan-shaped non-uniform pollution.' *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 23, no. 3 (2016): 1760–1768.
- [8] Z. Zhang, D. Wei, D. Zhang, X. Jiang, and Y. Li. 'Effects of ring-shaped non-uniform pollution on outdoor insulation electrical property.' *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 24, no. 6 (2017): 3603–3611.
- [9] T. Tanaka and G. C. Montanari. 'Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation.' *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 18, no. 5 (2020): 1482–1517.
- [10] Y. Abbasi Chahardah Cheriki, H. Farzin, and E. Mashhour. 'Investigating the flashover probability of transmission network insulators during dust storms.' *J. Appl. Res. Electr. Eng.* (2025).
- [11] G. George and M. J. Thomas. 'Studies on tracking resistance of polymeric outdoor insulators.' *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 17, no. 3 (2020): 899–906.
- [12] X. Cui and X. Liang. 'UV resistance of silicone rubber and EPDM in high-voltage insulators.' *J. Appl. Polym. Sci.* 112, no. 6 (2020): 3245–3252.
- [13] M. Roy and J. K. Nelson. 'Nanodielectrics: A review of materials and applications in HV insulation.' *IEEE Electr. Insul. Mag.* 24, no. 4 (2021): 20–30.
- [14] G. Ma and W. Li. 'Influence of filler type on thermal properties of silicone rubber insulators.' *Polym. Eng. Sci.* 47, no. 12 (2022): 2119–2125.
- [15] E. Kuffel, J. Kuffel, and W. S. Zaengl. *High Voltage Engineering: Fundamentals*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2020.
- [16] A. Krivda, P. Freimann, M. Götz, S. Moser, and H. Singer. 'Aging of polymeric insulators under natural environmental conditions.' *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 12, no. 2 (2005): 327–342.
- [17] R. S. Gorur, E. A. Cherney, and R. Hackam. 'The effects of ultraviolet radiation on polymeric outdoor insulators.' *IEEE Trans. Power Deliv.* 5, no. 4 (2021): 1883–1890.
- [18] R. Hackam. 'Outdoor HV composite polymeric insulators.' *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 6, no. 5 (2020): 557–585.
- [19] A. V. Vaswani and R. S. Gorur. 'Effect of water droplets on the flashover voltage of polymeric insulators.' *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2, no. 6 (2021): 1032–1041.
- [20] Z. Ghiasi, et al. 'FEM analysis of electric field distribution for polymeric insulator under different configuration of non-uniform pollution.' *Electrical Engineering* (2021): 1–10.
- [21] M. Asgari and A. Gholami. 'Analysis of electric field distribution in polymeric insulators under icing conditions using the finite element method.' *Journal of Electrical Engineering, Tabriz University*, Vol. 44, No. 4, (2014), pp. 54–47. (in Persian)
- [22] J. A. De La O and E. I. Ortiz-Rivera. 'Impact of non-uniform pollution on insulator performance under DC voltage.' *IEEE Power Eng. Rev.* 25, no. 6 (2021): 67–69.
- [23] M. Farzaneh and W. A. Chisholm. *Insulators for Icing and Polluted Environments*. Wiley-IEEE Press, (2021).

- [24] L. Ouchen, A. Haddad, S. Mekhilef, and A. Boudghene Stambouli. 'A finite element with statistical analysis study to investigate the electrical performance of composite insulators under water droplet impact.' *Sci. Rep.* 15, no. 1 (2025): 7364.
- [25] M. A. Ghosh. 'Effects of water droplets on the electrical properties of polymer insulators under high voltage.' *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 27, no. 1 (2022): 56–65.
- [26] P. Kumar, R. K. Ghosh, and S. K. Gupta. 'Impact of pollution severity on the electric field distribution in high-voltage insulators.' *IEEE Trans. Power Deliv.* 35, no. 3 (2023): 1704–1712.
- [27] S. Patel, H. S. Prakash, and A. Jain. 'Modeling the effect of artificial pollution on polymeric insulators: A finite element approach.' *IEEE Trans. Power Deliv.* 36, no. 4 (2023): 2243–2251.
- [28] R. Salhi, A. Mekhaldi, M. Teguvar, and O. Kherif. 'Simulation and experimental analysis of electrical characterization of cap-pin glass insulator under uniform and non-uniform pollution layers.' *Period. Polytech. Electr. Eng. Comput. Sci.* 68, no. 4 (2024): 381–391.
- [29] J. Dadashzadeh Samakoush and M. Mirzaei, 'Simulation and analysis of the effect of uniform and non-uniform (longitudinal and sectional) pollution on the potential and electric field distribution of polymer insulators using the finite element method.' *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 17, No. 56, (2020), pp. 12–1. (in Persian)
- [30] G. Kone, C. Volat, and H. Ezzaidi. 'Numerical investigation of electric field distortion induced by internal defects in composite insulators.' *High Voltage* 2, no. 4 (2017): 253–260.
- [31] D. Fasani, R. Tallarida, C. Medrano, and M. Rossi. 'Diagnostics of internal defects in composite overhead insulators using an optic E-field sensor.' *Sensors* 24, no. 5 (2024): 1359.
- [32] C. Volat, et al. 'New method for in live-line detection of small defects in composite insulator based on electro-optic E-field sensor.' *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 20, no. 1 (2013): 94–201.
- [33] L. Cheng, et al. 'An optimized infrared detection strategy for defective composite insulators according to the law of heat flux propagation considering the environmental factors.' *IEEE Access* 6 (2018): 38137–38146.
- [34] S. Chandrasekar, P. Kalaivanan, A. Cavallini, and G. C. Montanari. 'Understanding the impact of surface degradation and mechanical damage on ceramic insulators under electrical stress.' *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 22, no. 1 (2015): 456–464.