

توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی بر روی مقره پلیمری 20 کیلوولت در شرایط آلودگی یکنواخت و غیریکنواخت سطوح بالا به پایین

جابر داداشی زاده سماکوش

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، j.dadashizadeh@nit.ac.ir

چکیده

مقره‌های پلیمری از مهمترین تجهیزات خطوط هوایی انتقال قدرت الکتریکی به شمار می‌روند. عملکرد عایقی این مقره‌ها به دلیل قرار گرفتن در فضای باز، به شدت از شرایط آلودگی محیطی تأثیر می‌پذیرد. عوامل محیطی نظیر باد، باران، مه، شبنم و نیروهای الکترواستاتیکی وارد بر ذرات آلودگی اطراف مقره، می‌توانند باعث غیریکنواختی توزیع آلودگی بر روی سطح مقره‌ها شوند. باران می‌تواند بسته به شدت و زاویه بارش آن، توزیع آلودگی بر روی سطوح بالا و پایین چترک‌های مقره پلیمری را تحت تأثیر قرار دهد. در این مقاله، تأثیر آلودگی یکنواخت و غیریکنواخت سطوح بالا به پایین در سه سطح آلودگی سبک، متوسط و سنگین بر روی توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی یک نمونه مقره پلیمری بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین نسبت به آلودگی یکنواخت، باعث افزایش تنش الکتریکی سطح مقره پلیمری می‌شود. لذا، احتمال وقوع تخلیه‌های باند خشک، تخلیه‌های جزئی کرونا و به دنبال آن شکست الکتریکی سطحی را افزایش داده و فرایند پیری مقره پلیمری را تسریع می‌بخشد. ماکزیمم شدت میدان الکتریکی سطح مقره در آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین نسبت به آلودگی یکنواخت ممکن است تا چهار برابر افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین، پتانسیل الکتریکی، مقره پلیمری، میدان الکتریکی.

1. مقدمه

یکی از تنش‌های وارده بر مقره‌های خطوط هوایی در طول بهره‌برداری، تنش الکتریکی است. با اعمال ولتاژ به مقره‌ها، شدت میدان الکتریکی در طول آن‌ها متفاوت می‌باشد. مقره‌های منصوبه در خطوط هوایی و پست‌های فشارقوی به علت مواجه بودن با شرایط محیطی مختلف، آلودگی بر روی آن‌ها استقرار یافته و هدایت الکتریکی سطح افزایش می‌یابد که این امر موجب تغییر در توزیع ولتاژ و میدان الکتریکی اطراف مقره می‌شود. به منظور مطالعه توزیع میدان الکتریکی بر روی مقره‌ها، می‌توان از روش‌های عددی همچون روش اجزاء مرزی، روش شبیه‌سازی بار، روش تفاضل محدود و روش اجزاء محدود، استفاده نمود. روش اجزاء محدود یکی از بهترین روش‌ها در تحلیل میدان‌های الکترواستاتیک است، زیرا بر اساس مقادیر توزیع شده میدان، دامنه حل مسئله را به مسائل کوچکتری تقسیم می‌کند.

تحت شرایط عملکرد واقعی، به دلیل عواملی همچون باد، باران، ارتفاع نصب مقره، وضعیت نصب مقره و تأثیر میدان‌های الکترواستاتیکی، عموماً توزیع آلودگی بر روی سطح مقره‌ها غیریکنواخت است. مطالعات محققین مختلف نشان می‌دهد که سه نوع آلودگی غیریکنواخت شامل آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین^۱، آلودگی غیریکنواخت طولی^۲ و آلودگی غیریکنواخت قطاعی^۳ را می‌توان بر روی سطح مقره در نظر گرفت [1-3]. در آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین، تجمع آلودگی روی سطح زیرین چترک‌ها (یا بشقاب‌ها) سنگین‌تر از سطح بالایی چترک‌ها (یا بشقاب‌ها) در نظر گرفته می‌شود [4-5]. تجربیات بهره‌برداری از زنجیره مقره‌های چینی و شیشه‌ای در شبکه‌های قدرت کشور چین نشان می‌دهد که نسبت غلظت رسوب نمک (SDD^۴) سطح پایینی مقره می‌تواند از 5 تا 20 برابر SDD سطح بالایی باشد [1]. در [6] پیشنهاد شده است که غیریکنواختی آلودگی نه تنها می‌تواند روی سطوح بالا و پایین مقره باشد، بلکه می‌تواند در جهت عرضی نیز در نظر گرفته شود. تحقیقات نشان می‌دهند که اگر سرعت باد از یک مقدار مشخصی بیشتر باشد، جریان هوا و فشار استاتیکی در سمت‌های رو به باد^۵ و پشت به باد^۶ متفاوت خواهد بود که این باعث نابرابری میزان آلودگی در دو سمت می‌شود [7]. به این نوع توزیع آلودگی، آلودگی غیریکنواخت قطاعی اطلاق می‌شود. در نوع دیگری از توزیع آلودگی که به آن آلودگی غیریکنواخت طولی گویند، تأثیرات میدان‌های الکترواستاتیکی اطراف مقره باعث می‌شود که شدت آلودگی در نواحی نزدیک الکترودها بیشتر از ناحیه میانی باشد [8].

تحلیل و بررسی توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی بر روی مقره‌های فشارقوی در شرایط آلوده می‌تواند در مطالعات طراحی مقره‌ها و کاهش تنش الکتریکی وارده بر آن‌ها در شرایط بهره‌برداری واقعی بسیار مؤثر باشد. تاکنون مطالعات زیادی در مورد توزیع میدان الکتریکی مقره‌های فشارقوی انجام شده است که عمده این بررسی‌ها در شرایط آلودگی یکنواخت بوده است. در مرجع [9]، مطالعه‌ای بر روی توزیع میدان الکتریکی مقره پلیمری 400 کیلوولت در یک خط دو مداره با ملاحظه بر تأثیر هادی، دکل و آلودگی در نرم افزار کامسول انجام شده است. نتایج نشان داده است که میدان الکتریکی روند U شکل نامتقارنی دارد و مقدار آن در انتهای فشارقوی حداکثر می‌باشد. مطالعه دیگری بر روی مقره کامپوزیتی مورد استفاده در خطوط انتقال نشان می‌دهد که توزیع میدان الکتریکی سطح مقره با دور شدن از انتهای فشارقوی، روندی نزولی دارد و در قسمت انتهایی الکتروود زمین اندکی افزایش می‌یابد [10].

نتایج مطالعه دیگری بر روی مقره‌های پلیمری مورد استفاده در خطوط انتقال با در نظر گرفتن تأثیر هادی و دکل نشان می‌دهد که توزیع میدان الکتریکی به صورت U شکل نامتقارن می‌باشد، بطوریکه شدت میدان در انتهای فشارقوی بیشترین مقدار را دارد [11]. در مرجع [12]، توزیع میدان الکتریکی بر روی مقره‌های کامپوزیتی 11 کیلوولت با پروفیل متفاوت در شرایط تمیز و آلودگی یکنواخت با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شده است. نتایج نشان داده است که شدت میدان

¹ Top to bottom surface non-uniform pollution

² Longitudinal non-uniform pollution

³ Fan-shaped non-uniform pollution

⁴ Salt Deposit Density

⁵ Windward side

⁶ Leeward side

الکتریکی در مقره‌های با پروفیل بهینه کمتر از مقره‌های با پروفیل معمولی بوده است. همچنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه آلوده و هدایت الکتریکی سطح، شدت میدان الکتریکی افزایش می‌یابد.

در مرجع [13]، مطالعات توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی مقره‌های پلیمری با ملاحظه تأثیر شکل چترک‌ها با استفاده از روش اجزاء محدود انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در مقره‌های با چترک‌های تناوبی کوچک و بزرگ نسبت به مقره‌های با چترک‌های مشابه، شدت میدان الکتریکی کمتر و توزیع پتانسیل خطی‌تر می‌باشد. مطالعه میدانی دیگری بر روی مقره کامپوزیتی پوشیده از یخ با استفاده از روش اجزاء محدود در مرجع [14] انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش ضخامت لایه یخ در شرایط خشک باعث افزایش شدت میدان الکتریکی و در شرایط خیس باعث کاهش شدت میدان الکتریکی در طول مقره می‌شود. همچنین با افزایش طول قندیل شکل گرفته بر روی لبه چترک‌ها، شدت میدان الکتریکی افزایش خواهد یافت. در مرجع [15]، مطالعه توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی بر روی یک نمونه مقره پلیمری 20 کیلوولت در شرایط آلودگی غیریکنواخت طولی و قطاعی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در آلودگی غیریکنواخت طولی، شدت میدان در دو انتهای مقره کاهش می‌یابد و در آلودگی غیریکنواخت قطاعی، شدت میدان در ناحیه پشت به باد افزایش یافته است. نتایج مطالعه دیگری بر روی مقره‌های پلیمری 230 کیلوولت تحت شرایط یخ‌زدگی و با حضور حلقه کرونا با استفاده از روش اجزاء محدود نشان می‌دهد که وجود فاصله‌های هوایی در لایه یخ باعث افزایش شدت میدان الکتریکی سطح مقره‌های پلیمری می‌شود. همچنین، شدت میدان الکتریکی اطراف مقره با وجود حلقه کرونا کاهش می‌یابد [16].

تاکنون مطالعه کمی بر روی توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی مقره‌های فشارقوی در شرایط آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین انجام نشده است. هدف از این مطالعه، تحلیل توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی یک نمونه مقره پلیمری 20 کیلوولت در شرایط آلودگی یکنواخت و غیریکنواخت سطوح بالا به پایین با استفاده از نرم افزار کامسول که مبتنی بر روش اجزاء محدود است، می‌باشد. شبیه‌سازی در حالت‌های تمیز (بدون آلودگی) و سه سطح آلودگی سبک، متوسط و سنگین انجام می‌شود. در شبیه‌سازی آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین، شدت آلودگی سطح زیرین چترک بیشتر از سطح بالایی فرض شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند اطلاعات خوبی در مورد تنش الکتریکی اعمالی به مقره پلیمری در شرایط توزیع آلودگی واقعی بدست دهد که در طراحی مقره‌ها عاملی مؤثر می‌باشد.

2. محاسبه میدان الکتریکی با روش اجزاء محدود

روش اجزاء محدود، روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز معادلات انتگرالی می‌باشد. اساس کار این روش، حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی با روش‌های عددی مانند روش اویلر می‌باشد. میدان الکتریکی را می‌توان با توجه به توزیع پتانسیل الکتریکی از رابطه زیر تعیین نمود [17]:

$$E = -\nabla V \quad (1)$$

از معادله ماکسول داریم:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2)$$

که در آن ρ چگالی بار حجمی و ϵ ضریب گذردهی الکتریکی ماده عایقی می‌باشند. با جایگذاری رابطه (1) در رابطه (2)، معادله پواسون برابر است با:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (3)$$

اگر در رابطه (3) بار فضایی برابر صفر فرض شود، رابطه زیر موسوم به معادله لاپلاس برابر است با:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (4)$$

از حل معادله لاپلاس، تابع انرژی پتانسیل الکتریکی دو بعدی $F(v)$ در مختصات دکارتی به صورت زیر بدست می‌آید [18]:

$$F(v) = \frac{1}{2} \iint \left[\varepsilon_x \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 + \varepsilon_y \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \right] . dx . dy \quad (5)$$

که در آن ε_x و ε_y به ترتیب مؤلفه‌های ضریب گذردهی الکتریکی در راستای محوره‌های x و y و همچنین v تابع پتانسیل الکتریکی می‌باشند. اگر ماده عایقی دارای خواصی مشابه در تمامی جهت‌ها (اصطلاحاً ایزوتروپیک) باشد، آنگاه $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon$ می‌باشد. لذا رابطه (5) به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$F(v) = \frac{1}{2} \iint \varepsilon . |\nabla v|^2 . ds \quad (6)$$

که در آن $ds = dx . dy$ و $|\nabla v|$ قدر مطلق گرادیان تابع پتانسیل الکتریکی می‌باشند. اگر اثر هدایت الکتریکی لایه آلوده بر روی توزیع میدان الکتریکی در نظر گرفته شود، تابع مختلط انرژی پتانسیل الکتریکی به صورت زیر خواهد بود [18]:

$$F^*(v) = \frac{1}{2} \iint (\sigma + j . \omega . \varepsilon) . |\nabla^* v|^2 . ds \quad (7)$$

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای، σ هدایت الکتریکی لایه آلوده سطح عایق، $\nabla^* v$ گرادیان مختلط تابع پتانسیل الکتریکی و $F^*(v)$ تابع مختلط انرژی پتانسیل الکتریکی می‌باشند. روش اجزاء محدود مبتنی بر این واقعیت است که سیستم‌های فیزیکی در مینیمم سطح از انرژی پایدار می‌شوند. بنابراین با کمینه کردن رابطه (7)، توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی سطح عایق محاسبه می‌شود.

3. شبیه سازی مقره پلیمری و توزیع آلودگی

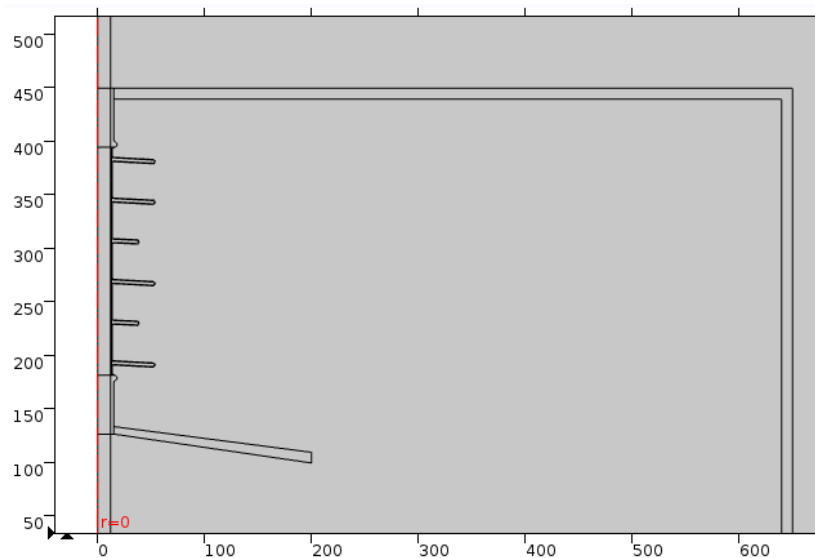
مشخصات فنی و هندسی مقره پلیمری 20 کیلوولت مورد مطالعه که در شبکه‌های توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد، در جدول 1 آمده است. نمایی از مقره شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول در شکل 1 نشان داده شده است. مقره پلیمری شامل پیراق‌آلات فلزی از جنس فولاد گالوانیزه در دو انتهای مقره، هسته مرکزی از جنس فایبرگلاس و پوشش بیرونی از جنس لاستیک سیلیکون می‌باشد. همچنین، مدل هادی و دکل زمین به ترتیب متصل به انتهای فشارقوی و انتهای زمین مقره فرض شده است. به منظور محاسبه حداکثر تنش الکتریکی اعمالی به مقره در ولتاژ ac، حداکثر ولتاژ فاز به زمین (16/3 kV) به مقره اعمال شده است.

جدول 1: مشخصات فنی و هندسی مقره پلیمری مورد مطالعه

ولتاژ نامی	20 کیلوولت
بار مکانیکی قابل تحمل	70 کیلونیوتن
ارتفاع مقره	422 میلی‌متر
فاصله خزشی	620 میلی‌متر
فاصله جرقه خشک	328 میلی‌متر
تعداد چترک‌ها	6

در این مطالعه، آلودگی به صورت ترکیبی از رطوبت و نمک فرض شده که به صورت یک لایه نازک با ضخامت یک میلی‌متر روی سطح مقره در نظر گرفته شده است. در آلودگی از نوع نمکی می‌توان با تغییر میزان شوری محلول، میزان هدایت الکتریکی سطح را تغییر داد و آلودگی با سطوح مختلف ایجاد نمود [12، 15، 18-19]. مطابق مرجع [20]، رابطه بین غلظت رسوب نمک (شدت آلودگی) و هدایت الکتریکی سطح مقره را می‌توان خطی فرض نمود. لذا، عموماً تغییر شدت آلودگی با تغییر هدایت الکتریکی سطح مقره مدل می‌شود. مقره مورد مطالعه در حالات تمیز، آلودگی یکنواخت و آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین و در سه سطح آلودگی سبک، متوسط و سنگین شبیه‌سازی شده است. مشخصات مواد و انواع آلودگی‌های

مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۲ آمده است.



شکل ۱: نمایی از مقره شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول

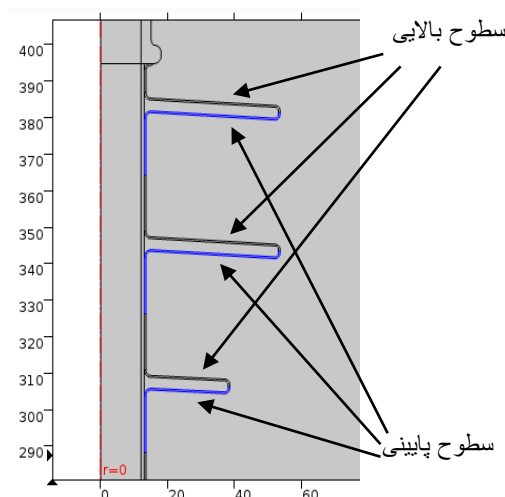
جدول ۲: پارامترهای مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی [12،15،19]

نوع ماده	ضریب گذردهی الکتریکی نسبی (ϵ_r)	هدایت الکتریکی (زیمنس بر متر)
لاستیک سیلیکون	4/3	10^{-12}
فایبرگلاس	7/2	10^{-10}
فولاد گالوانیزه	10^{-6}	$5/9 \times 10^7$
هوا	1/02	3×10^{-15}
آلودگی سبک	75	10^{-8}
آلودگی متوسط	65	10^{-6}
آلودگی سنگین	55	10^{-5}

توزیع آلودگی فرض شده در آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین برای قسمتی از سطح مقره مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شدت آلودگی در سطح زیرین مقره سنگین‌تر از سطح بالایی در نظر گرفته شده است. شش حالت مختلف توزیع آلودگی برای شبیه‌سازی آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین فرض شده است. شدت آلودگی هر یک از سطوح بالا و پایین برای هر یک از شش نوع آلودگی غیریکنواخت مورد نظر در جدول ۳ آمده است. شبیه‌سازی‌ها در حالت تمیز، آلودگی یکنواخت سبک، آلودگی یکنواخت متوسط، آلودگی یکنواخت سنگین و شش حالت آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین انجام شده است که در ادامه نتایج بدست آمده تحلیل می‌شود.

۴. تحلیل نتایج شبیه‌سازی

نتایج توزیع میدان الکتریکی مقره پلیمری مورد مطالعه بر حسب فاصله خزشی در حالت‌های تمیز (بدون آلودگی)، آلودگی یکنواخت سبک، آلودگی یکنواخت متوسط و آلودگی یکنواخت سنگین در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت تمیز، تغییرات میدان الکتریکی روند U شکل نامتقارن دارد، بطوریکه شدت میدان در نزدیکی الکتروود فشارقوی حداکثر می‌باشد. با دور شدن از الکتروود فشارقوی، شدت میدان الکتریکی کاهش می‌یابد، بطوریکه روند کاهشی میدان تا نزدیکی الکتروود زمین ادامه دارد. اما در نزدیکی الکتروود زمین اندکی افزایش می‌یابد. در حالت آلودگی یکنواخت سبک نسبت



شکل 2: سطوح بالا و پایین تعریف شده بر روی مقره پلیمری مورد مطالعه در آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین

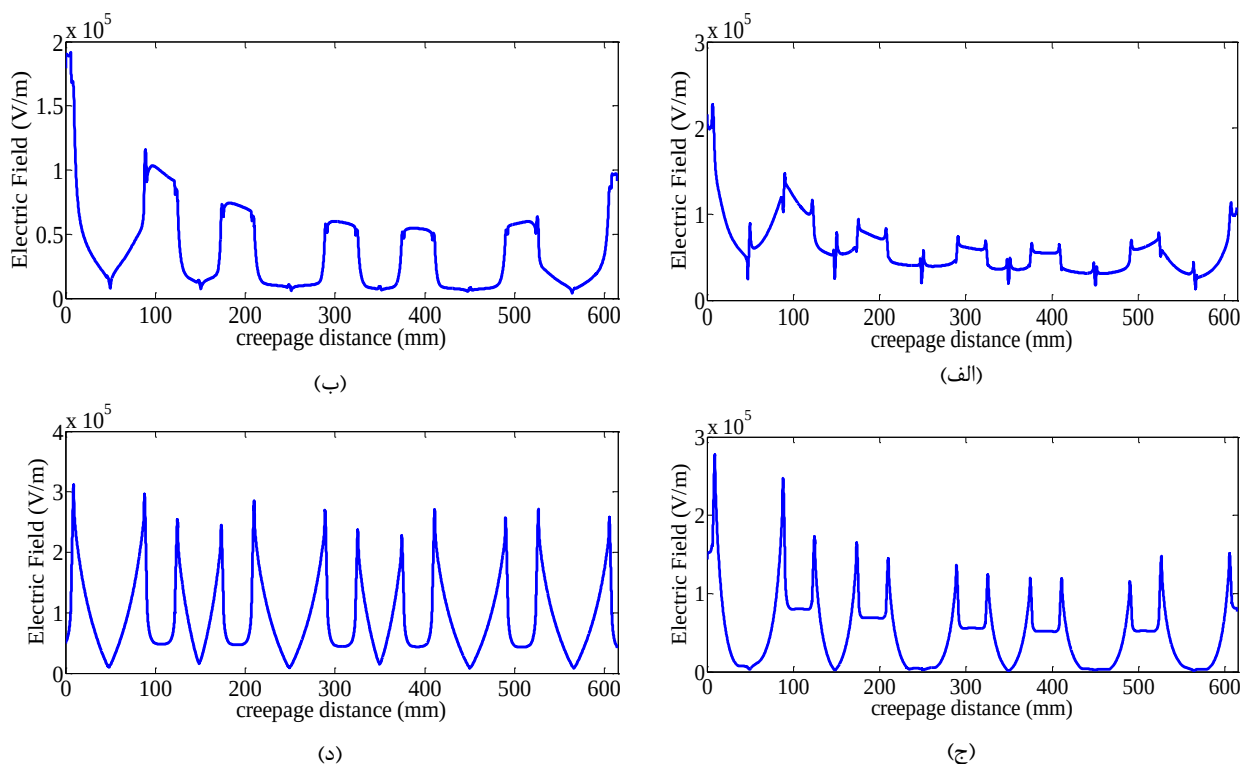
جدول 3: شدت آلودگی سطوح پایینی و بالایی مقره مورد مطالعه در انواع آلودگی‌های غیریکنواخت تعریف شده

نوع آلودگی غیریکنواخت	شدت آلودگی سطح پایینی	شدت آلودگی سطح بالایی
A	آلودگی سنگین	آلودگی متوسط
B	آلودگی سنگین	آلودگی سبک
C	آلودگی سنگین	تمیز (بدون آلودگی)
D	آلودگی متوسط	آلودگی سبک
E	آلودگی متوسط	تمیز (بدون آلودگی)
F	آلودگی سبک	تمیز (بدون آلودگی)

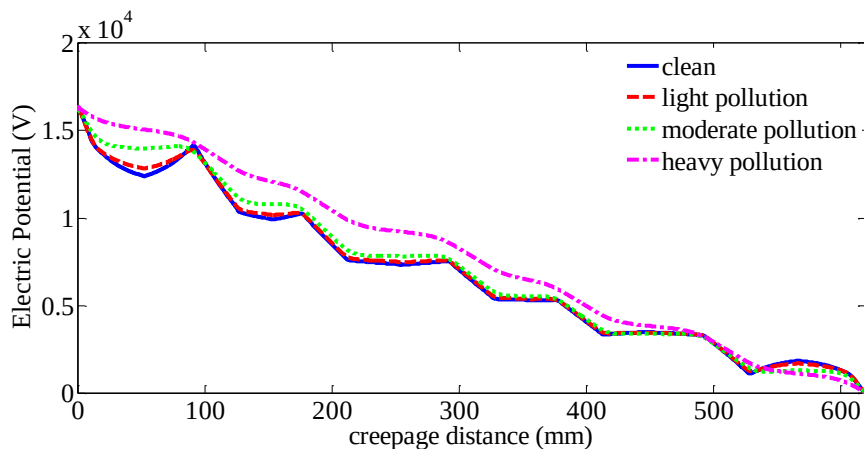
به حالت تمیز، شدت میدان الکتریکی اندکی کاهش می‌یابد. با این حال، روند تغییرات میدان در دو حالت تقریباً مشابه است. در حالت‌های آلودگی یکنواخت متوسط و سنگین نسبت به آلودگی سبک، شیب و دامنه تغییرات میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. ضمن اینکه با افزایش شدت آلودگی، تغییرات میدان از حالت $\cup$ شکل خارج می‌شود و افزایش تنش الکتریکی در کل سطح مقره قابل مشاهده است. در منحنی‌های توزیع میدان الکتریکی، ماکزیمم‌های محلی مربوط به نواحی پای چترک‌ها (محل اتصال چترک به میله مقره) و مینیمم‌های محلی مربوط به نوک (لبه) چترک‌ها می‌باشند.

نتایج توزیع پتانسیل الکتریکی بر حسب فاصله خزشی مقره در حالت‌های تمیز (بدون آلودگی)، آلودگی یکنواخت سبک، متوسط و سنگین در شکل 4 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت تمیز، تغییرات پتانسیل در انتهای فشار قوی مقره بیشتر از نواحی دیگر است. با افزایش شدت آلودگی، تغییرات پتانسیل الکتریکی در طول مسیر خزشی خطی‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود. این بدان معنی است که با افزایش شدت آلودگی از آلودگی سبک به متوسط و سنگین، تمرکز تنش الکتریکی از دو انتهای مقره برداشته شده و در کل سطح مقره پخش می‌شود.

معمولاً در طراحی عایقی مقره‌های پلیمری برای مناطق با آلودگی شدید، توزیع آلودگی به صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. در حالیکه توزیع آلودگی غیریکنواخت در افزایش تنش الکتریکی سطح مقره بسیار مؤثر است و به عنوان یک عامل تضعیف کننده خاصیت عایقی و تسریع کننده فرایند پیری مقره پلیمری، لازم است که در طراحی این مقره‌ها در نظر گرفته شود. در این مطالعه، شش حالت مختلف آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین بر روی مقره پلیمری مورد مطالعه شبیه-

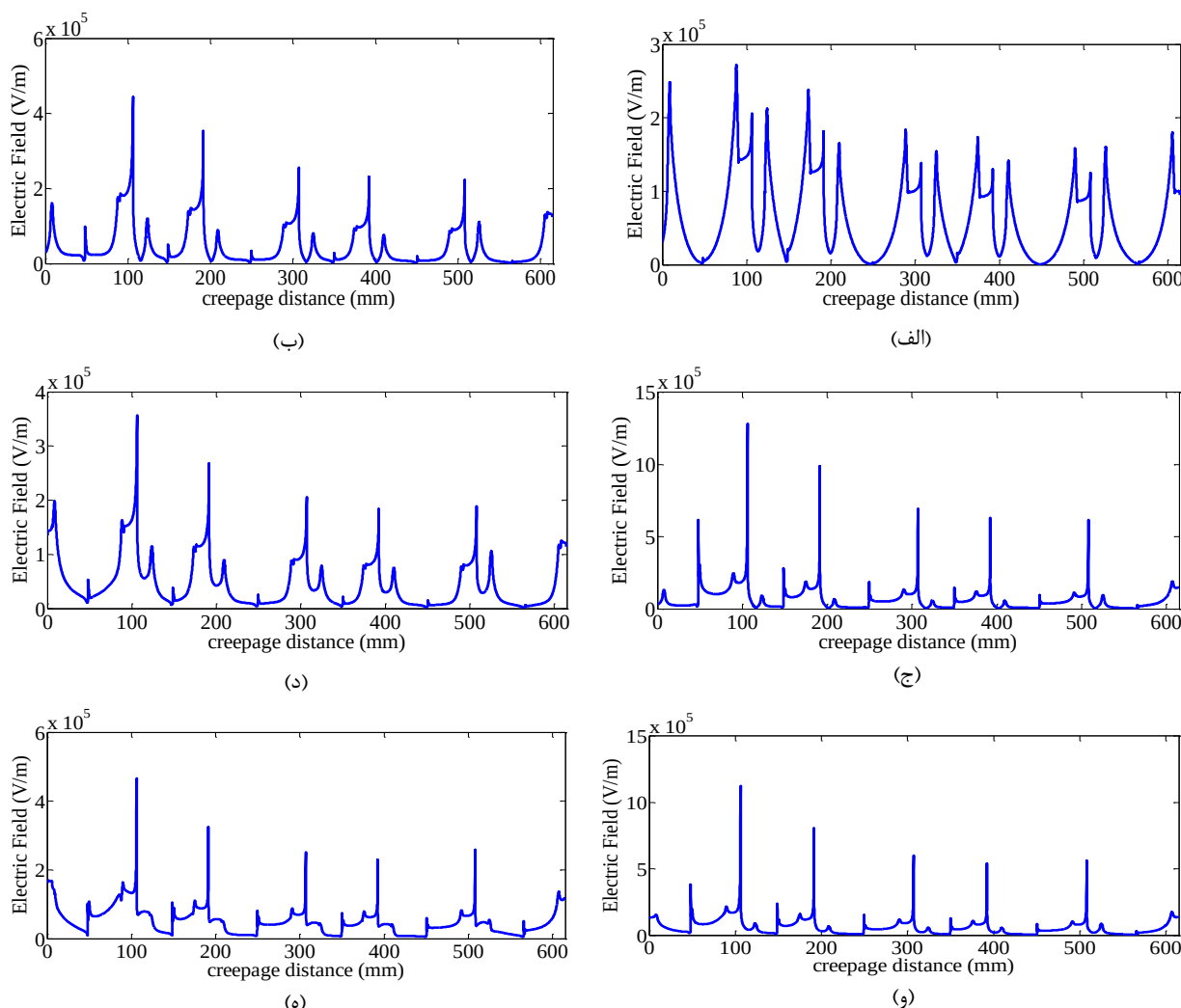


شکل 3: توزیع میدان الکتریکی بر روی مقره پلیمری مورد مطالعه در حالت‌های مختلف،
(الف) تمیز (بدون آلودگی)، (ب) آلودگی یکنواخت سبک، (ج) آلودگی یکنواخت متوسط، (د) آلودگی یکنواخت سنگین



شکل 4: توزیع پتانسیل الکتریکی بر روی مقره پلیمری مورد مطالعه در حالت تمیز و آلودگی یکنواخت

سازی شده است که چگونگی توزیع آلودگی در جدول 3 داده شده است. نتایج توزیع میدان الکتریکی بر روی مسیر خزشی مقره پلیمری مورد مطالعه در آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین در شکل 5 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر چه اختلاف شدت آلودگی سطوح بالا و پایین بیشتر باشد، ماکزیمم شدت میدان الکتریکی سطح مقره بیشتر می‌باشد. به عبارت دیگر، افزایش میزان غیریکنواختی آلودگی بر روی سطوح بالا و پایین مقره، باعث افزایش دامنه میدان الکتریکی می‌شود. هر چه شدت آلودگی سطح بالایی کمتر باشد، شدت میدان الکتریکی بزرگتر است. اما بیشتر بودن شدت آلودگی سطح پایینی مقره، لزوماً دلیلی بر افزایش شدت میدان الکتریکی نیست. به عبارت دیگر، تحلیل دقیق نتایج نشان می‌دهد که شرایط آلودگی سطح بالایی مقره تأثیر بیشتری بر روی شدت میدان الکتریکی نسبت به سطح پایینی دارد. به علاوه، آلودگی‌های نوع

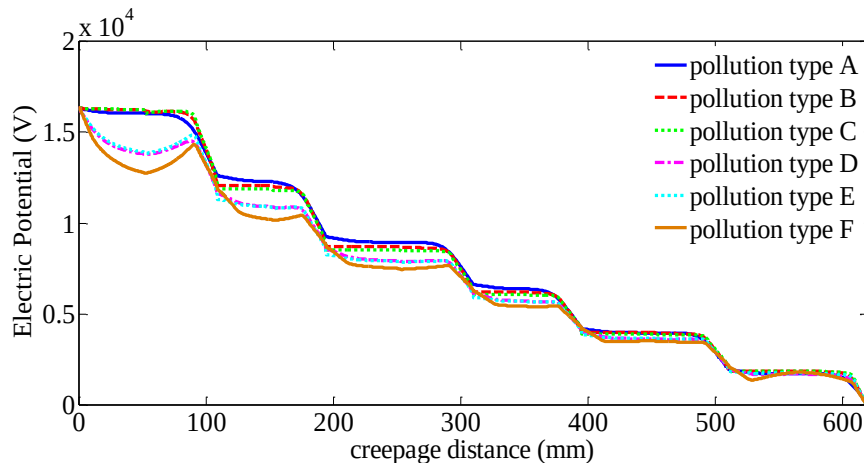


شکل ۵: توزیع میدان الکتریکی بر روی مقره پلیمری مورد مطالعه در آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین،

(الف) نوع A، (ب) نوع B، (ج) نوع C، (د) نوع D، (و) نوع E، (ه) نوع F

C، E و F که در آن‌ها سطح بالایی مقره تمیز می‌باشد، شدت میدان الکتریکی بزرگتری نسبت به دیگر انواع توزیع آلودگی بر روی سطح مقره ایجاد می‌کنند. مطابق شکل ۵، ماکزیمم شدت میدان سطح مقره در آلودگی غیریکنواخت نوع C بیشترین مقدار و در آلودگی نوع A کمترین مقدار را دارد. مقایسه نتایج شکل‌های ۳ و ۵ نشان می‌دهد که ماکزیمم شدت میدان الکتریکی سطحی در آلودگی غیریکنواخت نوع C نسبت به آلودگی یکنواخت سنگین، حدوداً چهار برابر می‌شود که این باعث تشدید فعالیت تخلیه‌های جزئی و سطحی، تسریع فرایند پیری و کاهش عمر مفید مقره خواهد شد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که هر چه غیریکنواختی آلودگی بیشتر شود، شدت میدان الکتریکی بر روی لبه‌ی چترک‌ها افزایش می‌یابد که این خود عامل افزایش تخلیه‌های الکتریکی سطحی می‌باشد.

توزیع پتانسیل الکتریکی بر روی مسیر خزشی مقره پلیمری مورد مطالعه در شش حالت آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در آلودگی‌های غیریکنواخت نوع A، B و C که در آن‌ها سطح زیرین دارای آلودگی سنگین می‌باشد، پتانسیل الکتریکی در نزدیکی الکتروود فشارقوی تغییرات بسیار کمی دارد. از طرفی، منحنی توزیع پتانسیل در قسمت‌های بالایی پای چترک‌ها که شدت آلودگی آن‌ها نسبت به قسمت پایینی کمتر است، به صورت پله‌ای و با شیب زیاد تغییر می‌کند که این نشان‌دهنده شدت میدان الکتریکی ماکزیمم در این نواحی می‌باشد. به علاوه،



شکل ۶: توزیع پتانسیل الکتریکی بر روی مقره پلیمری مورد مطالعه در آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین

با دور شدن از انتهای فشارقوی و نزدیک شدن به انتهای زمین، ارتفاع پله‌های تغییرات پتانسیل الکتریکی کاهش می‌یابد که این متناظر با کاهش شدت میدان الکتریکی می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی در آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین که تاکنون مطالعه کمی روی آن انجام شده بود، در این مقاله مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که هر چه درجه غیریکنواختی آلودگی سطوح بالا به پایین بیشتر باشد، ماکزیمم شدت میدان سطح مقره بیشتر خواهد بود. ماکزیمم شدت میدان الکتریکی سطح مقره در آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین نسبت به آلودگی یکنواخت ممکن است تا چهار برابر نیز افزایش یابد. نتایج نشان می‌دهد که در آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین، در قسمت بالایی پای چترک‌ها شدت میدان بیشترین مقدار را دارد و در این ناحیه، پتانسیل الکتریکی با شیب زیادی تغییر می‌کند. با افزایش درجه غیریکنواختی آلودگی، شدت میدان بر روی لبه‌ی چترک‌ها نیز به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که آلودگی غیریکنواخت سطوح بالا به پایین نسبت به آلودگی یکنواخت، باعث افزایش تنش الکتریکی سطح مقره پلیمری می‌شود و طول عمر مقره را کاهش می‌دهد. لذا، لازم است که اثر منفی این نوع توزیع غیریکنواخت آلودگی که وجود آن غیر قابل انکار است، در محاسبات مربوط به طراحی عایقی مقره‌های پلیمری برای مناطق آلوده لحاظ شود.

۶. مراجع

- [1] X. Jiang, S. Wang, Z. Zhang, et al., "Investigation of flashover voltage and non-uniform pollution correction coefficient of short samples of composite insulator intended for $\pm 800\text{kV}$ UHVDC", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 1, pp. 71-80, 2010.
- [2] J. Dadashizadeh Samakosh, M. Mirzaie, "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, vol. 108, pp. 382-391, 2019.
- [3] R. Boudissa, A. Bayadi, R. Baersch, "Effect of pollution distribution class on insulators flashover under AC voltage", Electric Power Systems Research, vol. 104, pp. 176-182, 2013.
- [4] K. Naito, Y. Hasegawa, T. Imakoma, "Improvement of the DC voltage insulation efficiency of suspension insulators under contaminated conditions", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 6, pp. 1025-1032, 1988.

- [5] M. A. Douar, A. Mekhaldi, M. C. Bouzidi, "Flashover process and frequency analysis of the leakage current on insulator model under nonuniform pollution conditions", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 4, pp. 1284-1297, 2010.
- [6] R. Sundararajan, R. S. Gorur, "Effect of insulator profiles on dc flashover voltage under polluted conditions", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 1, no. 1, pp. 124-132, 1994.
- [7] Z. Zhang, J. You, D. Zhang, et al., "AC flashover performance of various types of insulators under fan-shaped non-uniform pollution", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 3, pp. 1760-1768, 2016.
- [8] R. S. Gorur, E. A. Cherney, J. T. Burnham, "Outdoor insulators", Phoenix, Arizona, 1999.
- [9] M. Bouhaouche, A. Mekhaldi, M. Tegar, "Improvement of electric field distribution by integrating composite insulators in a 400 kV AC double circuit line in algeria", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 6, pp. 3549-3558, 2017.
- [10] A. J. Phillips, J. Kuffel, A. Baker, et al., "Electric fields on AC composite transmission line insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 2, pp. 823-830, 2008.
- [11] J. C. Canale, A. Phillips, L. E. Zaffanella, "Calculation of electric field near sheds and fittings of AC transmission-line polymer insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 2, pp. 793-802, 2012.
- [12] E. M. El-Refaie, M. K. Abd Elrahman, M. Kh. Mohamed, "Electric field distribution of optimized composite insulator profiles under different pollution conditions", Ain Shams Engineering Journal, vol. 9, no. 4, pp. 1349-1356, 2018.
- [13] B. Marungsri, W. Onchantuek, A. Oonsivilai, "Electric field and potential distributions along surface of silicone rubber polymer insulators using finite element method", International Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 2, no. 6, pp. 1055-1060, 2008.
- [14] W. Sima, Q. Yang, C. Sun, F. Guo, "Potential and electric-field calculation along an ice-covered composite insulator with finite-element method", IEE Proceedings-generation Transmission and Distribution, vol. 153, no. 3, pp. 343-349, 2006.
- [15] جابر داداشی زاده سماکوش، محمد میرزائی، "شبیه سازی و تحلیل تأثیر آلودگی یکنواخت و غیریکنواخت (طولی و قطاعی) بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی مقره پلیمری با استفاده از روش اجزاء محدود"، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره 17، شماره 56، صفحات 1-12، 1398.
- [16] محسن عسگری، احمد غلامی، "تحلیل توزیع میدان الکتریکی در مقره های پلیمری تحت شرایط یخ زدگی با استفاده از روش المان محدود"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره 44، شماره 4، صفحات 47-54، 1393.
- [17] R. Arora, W. Mosch, "High voltage and electrical insulation engineering", IEEE Press, Wiley Publishing, 2011.
- [18] S. Muniraj, R. Chandrasekar, "Finite element modeling for electric field and voltage distribution along the polluted polymeric insulator", World Journal of Modelling and Simulation, vol. 8, no. 4, pp. 310-320, 2012.
- [19] D. S. Lopes, J. M. B. Bezerra, "Potential distribution along a 500kV polymer insulator in presence of a pollution layer", Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference in Brazil, Curitiba, 2015.
- [20] Z. Zhang, X. Liu, X. Jiang, et al., "Study on AC flashover performance for different types of porcelain and glass insulators with non uniform pollution", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 3, pp. 1691-1698, 2013.

Electric field and potential distribution on a 20 kV polymer insulator under uniform and top to bottom surface non-uniform pollution conditions

Jaber Dadashizadeh Samakosh

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani university of Technology, j.dadashizadeh@nit.ac.ir

Abstract— Polymer insulators are among the most critical components in overhead power transmission lines. Their insulating performance is significantly influenced by environmental pollution, as they are continuously exposed to outdoor conditions. Factors such as wind, rain, fog, dew, and electrostatic forces acting on pollution particles contribute to a non-uniform distribution of contaminants on insulator surfaces. In particular, rain alters the deposition of pollutants on the upper and lower surfaces of polymer insulator sheds, depending on its intensity and angle of incidence. This paper investigates the impact of both uniform and non-uniform pollution on the upper and lower surfaces of a polymer insulator under three levels of contamination: light, medium, and heavy. The analysis focuses on the resulting electric field distribution and potential profile. The findings indicate that non-uniform pollution significantly increases the electrical stress on the insulator surface compared to uniform pollution. Consequently, the likelihood of dry-band discharges, partial corona discharges, and eventual surface breakdown rises, accelerating the insulator's aging process. Notably, the maximum surface electric field intensity under non-uniform contamination can be up to four times higher than that observed under uniform contamination.

Keywords: top to bottom surface non-uniform pollution, electric potential, polymer insulator, electric field