

## شبیه‌سازی و تحلیل تأثیر آلودگی یکنواخت و غیریکنواخت (طولی و قطاعی) بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی مقره پلیمری با استفاده از روش اجزای محدود

جابر داداشی‌زاده سماکوش<sup>۱</sup>، محمد میرزائی<sup>۲\*</sup>

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>آلودگی به‌عنوان یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر عملکرد مقره‌های پلیمری شناخته شده است. در عمل، آلودگی مستقر بر روی مقره‌ها کاملاً یکنواخت نبوده، به صورت آلودگی غیریکنواخت است. تا کنون تحقیقات جامعی در خصوص تأثیر حالت‌های مختلف آلودگی غیریکنواخت بر عملکرد مقره‌ها انجام نشده است. در این مقاله، تأثیر آلودگی یکنواخت، آلودگی غیریکنواخت طولی و همچنین آلودگی غیریکنواخت قطاعی در سه سطح آلودگی سبک، متوسط و سنگین بر روی توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی یک نمونه مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت با استفاده از نرم‌افزار Comsol Multiphysics، شبیه‌سازی شده و نتایج تحلیل شده است. در آلودگی غیریکنواخت طولی، شدت آلودگی در نواحی نزدیک الکترودهای فشار قوی و زمین نسبت به ناحیه میانی، سنگین‌تر و در آلودگی غیریکنواخت قطاعی، شدت آلودگی در ناحیه پشت به باد نسبت به ناحیه رو به باد، سنگین‌تر در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داده است که در حالت آلودگی یکنواخت سبک، شدت میدان الکتریکی، کاهش و با افزایش شدت آلودگی، دامنه آن افزایش می‌یابد. در آلودگی غیریکنواخت طولی، در نواحی نزدیک الکترودها، پتانسیل الکتریکی تغییرات کمی دارد و شدت میدان الکتریکی کاهش یافته است. همچنین در آلودگی غیریکنواخت قطاعی، شدت میدان الکتریکی در ناحیه پشت به باد افزایش یافته است.</p>	<p>دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۰ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۲۷</p> <p><b>واژگان کلیدی:</b> مقره پلیمری، آلودگی یکنواخت، آلودگی غیریکنواخت، توزیع میدان الکتریکی، روش اجزای محدود.</p>

### ۱- مقدمه

پست‌های فشارقوی، در معرض شرایط محیطی مختلفی قرار دارند. در شرایط آب و هوای بارانی یا مه‌آلود، لایه آلوده با رطوبت هوا ترکیب شده، هدایت الکتریکی سطح مقره افزایش می‌یابد. وجود آلودگی و افزایش هدایت الکتریکی سطح مقره، باعث تغییر در توزیع ولتاژ و میدان الکتریکی اطراف مقره می‌شود [۴].

در شرایط بهره‌برداری از مقره‌های پلیمری، به دلیل عواملی همچون شکل مقره، شرایط محیطی و نیروی الکترواستاتیک وارد بر سطح مقره ناشی از میدان الکتریکی، عموماً توزیع آلودگی روی مقره‌ها یکنواخت نیست. در [۵] پیشنهاد شده است که غیریکنواختی آلودگی نه تنها می‌تواند

امروزه کاربرد مقره‌های پلیمری به دلیل مزیت‌های فراوان آن‌ها در مقایسه با مقره‌های شیشه‌ای و چینی، بسیار رایج شده است. عملکرد خوب در محیط‌های آلوده، طبیعت آب‌گریزی، وزن کم، هزینه نصب و تعمیر و نگهداری پایین و حمل و نقل آسان، از جمله مزیت‌های مقره‌های پلیمری است [۱ و ۲]. یکی از تنش‌های وارد بر مقره‌های پلیمری در طول بهره‌برداری، تنش الکتریکی است؛ به طوری که توزیع میدان الکتریکی در این مقره‌ها، بر روی عملکرد و رفتار کوتاه‌مدت و همچنین بلندمدت آن‌ها مؤثر است [۳]. از طرفی، مقره‌های پلیمری نصب‌شده در خطوط هوایی و

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mirzaie@nit.ac.ir

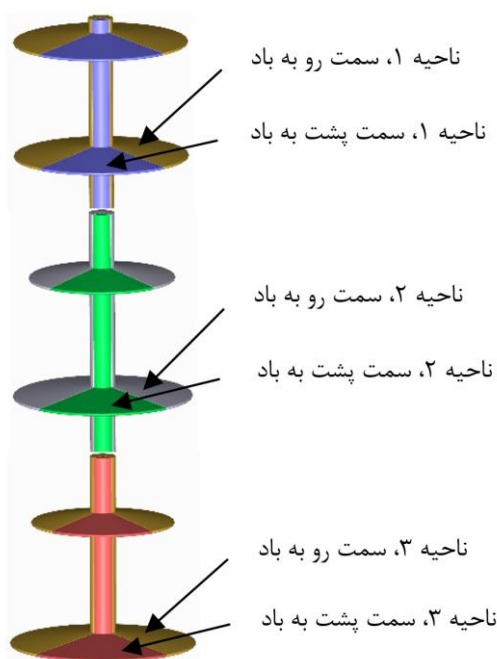
۱. دانشجوی دکتری برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

یکنواخت متوسط و آلودگی یکنواخت سنگین به منظور ارزیابی و تحلیل توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی انجام می‌شود.

برای شبیه‌سازی آلودگی غیریکنواخت نوع طولی، سطح مقره به سه ناحیه نزدیک الکتروود فشار قوی، نزدیک الکتروود زمین و ناحیه میانی با شدت آلودگی‌های متفاوت تقسیم شده است؛ به طوری که شدت آلودگی نواحی نزدیک الکتروودها از نوع سنگین و متوسط و شدت آلودگی در ناحیه میانی مقره از نوع سبک در نظر گرفته می‌شود.

همچنین در شبیه‌سازی آلودگی غیریکنواخت نوع قطاعی، سطح مقره به صورت دو ناحیه رو به باد و پشت به باد با زاویه‌های قطاع ۳۰ درجه، ۶۰ درجه و ۹۰ درجه و شدت آلودگی متفاوت، فرض شده؛ به طوری که شدت آلودگی در ناحیه پشت به باد از نوع سنگین و در ناحیه رو به باد از نوع سبک در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: نمایی از نواحی سه‌گانه فرض شده در آلودگی غیریکنواخت طولی و قطاعی

## ۲- هدایت الکتریکی معادل در آلودگی غیریکنواخت طولی و قطاعی

در این قسمت فرض می‌شود سطح مقره در راستای طولی به سه ناحیه تقسیم شود و هر ناحیه خود شامل دو ناحیه رو به باد و پشت به باد باشد. نمایی از نواحی مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده است. رابطه مقاومت الکتریکی سطحی معادل کل مقره برابر است با:

روی سطوح بالا و پایین (در طول مقره) باشد، بلکه می‌تواند در جهت قطاعی نیز در نظر گرفته شود. مشاهدات و تحقیقات نشان داده است اگر سرعت باد از مقدار مشخصی بیشتر باشد، جریان هوا و فشار استاتیکی در سمت‌های رو به باد و پشت به باد، متفاوت خواهد بود که این امر باعث نابرابری میزان آلودگی در دو طرف می‌شود [۶]. علاوه بر این، معمولاً سمت پشت به باد، مساحت کمتری از سطح مقره را شامل شده، غالباً آلودگی آن سنگین‌تر است [۷]. نیروی جاذبه، باد و نیروی ناشی از میدان الکتریکی، عمده نیروهایی هستند که به ذرات گرد و غبار نزدیک مقره وارد می‌شوند. از میان این موارد، باد نقش بارزتری دارد. معمولاً نزدیک ترمینال‌های فشار قوی و زمین، شدت میدان الکتریکی، بیشترین مقدار را دارد و این نواحی از مقره بیشتر آلوده می‌شود [۸].

توزیع میدان الکتریکی را می‌توان با استفاده از روش‌های محاسبات عددی، همچون روش اجزای مرزی، روش شبیه‌سازی بار، روش تفاضل محدود و همچنین روش اجزای محدود، ارزیابی و تحلیل کرد [۹].

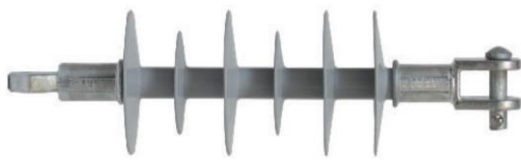
روش اجزای محدود، یکی از روش‌های عددی پرکاربرد در تحلیل مسائل مختلف مهندسی، همچون مکانیک، هوافضا، سازه‌ها، ماشین‌های الکتریکی و تحلیل میدان‌های الکتریکی در عایق‌های فشار قوی است [۱۰-۱۵]. همچنین روش اجزای محدود، یکی از بهترین روش‌ها در تحلیل میدان‌های الکترواستاتیکی است؛ زیرا بر اساس مقادیر توزیع شده میدان، دامنه حل مسئله را به مسائل کوچک‌تری تقسیم می‌کند [۱۶ و ۱۷]. روابط و معادلات مربوط به محاسبه میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل الکتریکی با استفاده از روش المان محدود، در مراجع [۲]، [۹]، [۱۵] و [۱۸] آمده است.

هدف این مقاله، محاسبه و تحلیل توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت در شرایط آلودگی یکنواخت، غیریکنواخت طولی و غیریکنواخت قطاعی با استفاده از نرم‌افزار Comsol Multiphysics 5.2 است که مبتنی بر روش اجزای محدود است؛ چراکه در مراحل طراحی و ارزیابی عملکرد مقره‌های پلیمری، لازم است درکی صحیح از چگونگی توزیع میدان الکتریکی در شرایط تمیز و آلوده وجود داشته باشد. بدین منظور یک نمونه مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت انتخاب و شبیه‌سازی آن در حالت‌های تمیز (بدون آلودگی)، آلودگی یکنواخت سبک، آلودگی

پلیمری ۲۰ کیلوولت آمده است که در شبکه‌های توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمایی از این مقره در شکل (۲) نشان داده شده است.

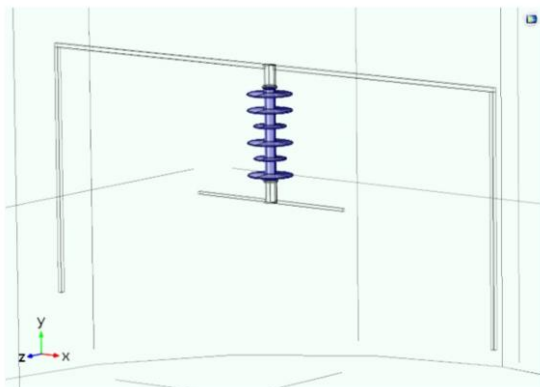
جدول ۱: مشخصات فنی مقره پلیمری مورد مطالعه

ولتاژ نامی	۲۰ کیلوولت
بار مکانیکی قابل تحمل	۷۰ کیلونیوتن
طول مقره	۴۲۲ میلی‌متر
فاصله خزشی	۶۲۰ میلی‌متر
فاصله جرقه خشک	۳۲۸ میلی‌متر
تعداد چترک‌ها	۶ عدد



شکل ۲. نمایی از مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت مورد مطالعه

مقره مورد مطالعه به صورت دویبعی و سه‌بعی و بر اساس پارامترهای هندسی واقعی در نرم‌افزار Comsol ترسیم شده که نمایش سه‌بعی آن در شکل (۳) آمده است.



شکل ۳: نمایش سه‌بعی از مقره پلیمری شبیه‌سازی شده در

نرم‌افزار Comsol Multiphysics 5.2

مقره پلیمری شامل یراق‌آلات فلزی از جنس فولاد گالوانیزه در دو انتهای مقره، هسته مرکزی از جنس فایبرگلاس و پوشش بیرونی از جنس لاستیک سیلیکون است. به منظور محاسبه حداکثر تنش الکتریکی اعمالی به مقره در ولتاژ ac، حداکثر ولتاژ نامی فاز به مقره اعمال شده است. در این مقاله، آلودگی از نوع نمکی (ترکیبی از رطوبت و نمک) فرض شده که به صورت یک لایه نازک با ضخامت ۱ میلی‌متر روی سطح مقره در نظر گرفته شده است. با تغییر میزان شوری محلول، می‌توان میزان هدایت الکتریکی سطح

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^3 \frac{R_{Li} \times R_{Wi}}{R_{Li} + R_{Wi}}$$

که در آن،  $R_{Li}$  مقاومت سطحی قسمت پشت به باد از ناحیه  $i$  ام و  $R_{Wi}$  مقاومت سطحی قسمت رو به باد از ناحیه  $i$  ام است. از طرفی، رابطه مقاومت الکتریکی سطح مقره در نواحی پشت به باد و رو به باد را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$R_{Li} = \frac{F_{Li}}{\sigma_{Li}}$$

$$R_{Wi} = \frac{F_{Wi}}{\sigma_{Wi}}$$

که در آن،  $F_{Li}$  و  $F_{Wi}$  به ترتیب ضریب شکل مقره در قسمت‌های پشت به باد و رو به باد از ناحیه  $i$  ام و  $\sigma_{Li}$  و  $\sigma_{Wi}$  به ترتیب هدایت الکتریکی سطح مقره در قسمت‌های پشت به باد و رو به باد از ناحیه  $i$  ام هستند. روابط  $F_{Li}$  و  $F_{Wi}$  برابر است با:

$$F_{Li} = \int_0^{l_i} \frac{dl}{\alpha_i R(l)} \quad (4)$$

$$F_{Wi} = \int_0^{l_i} \frac{dl}{(2\pi - \alpha_i) R(l)} \quad (5)$$

که در آن،  $l_i$  طول خزشی مقره در ناحیه  $i$  ام،  $\alpha_i$  زاویه قطاع قسمت پشت به باد در ناحیه  $i$  ام،  $R(l)$  شعاع مقره در فاصله خزشی  $l$  و  $dl$  جزء افزایشی طول خزشی است. با جای‌گذاری روابط (۲) الی (۵) در رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^3 \frac{\int_0^{l_i} \frac{dl}{R(l)}}{\alpha_i \sigma_{Li} + (2\pi - \alpha_i) \sigma_{Wi}} \quad (6)$$

در نتیجه، هدایت الکتریکی معادل کل سطح مقره در آلودگی غیریکنواخت برابر است با:

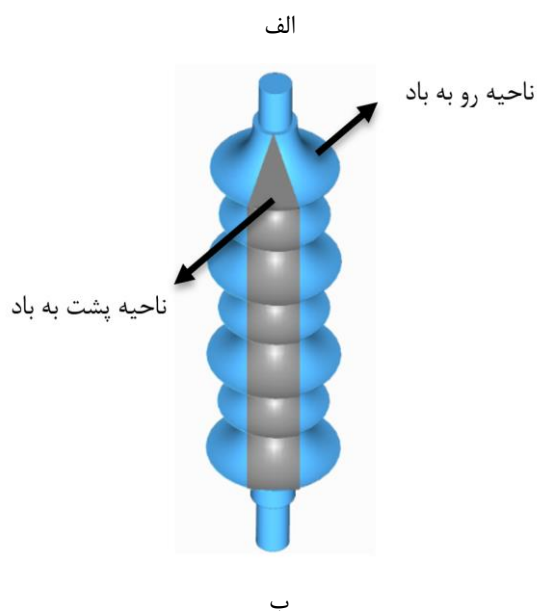
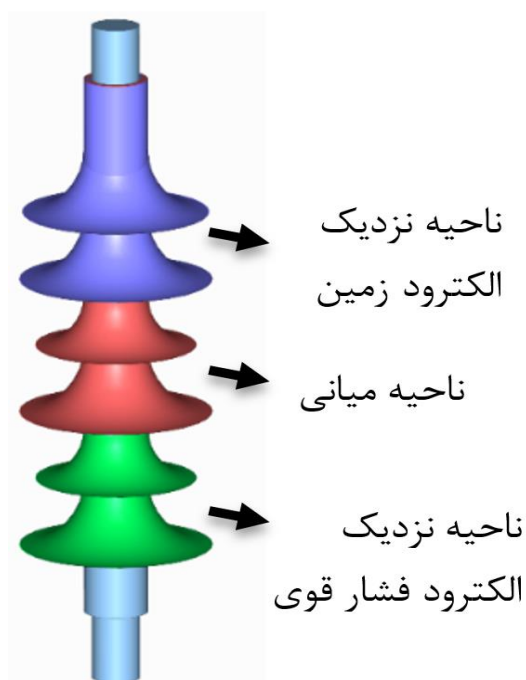
$$\sigma_{eq} = \frac{F}{R_{eq}} = \frac{\int_0^L \frac{dl}{2\pi R(l)}}{\sum_{i=1}^3 \frac{\int_0^{l_i} \frac{dl}{R(l)}}{\alpha_i \sigma_{Li} + (2\pi - \alpha_i) \sigma_{Wi}}} \quad (7)$$

رابطه (۷) برای هر دو نوع آلودگی طولی و قطاعی برقرار است. با قرار دادن  $\alpha_i = 0$ ، رابطه هدایت الکتریکی در آلودگی غیریکنواخت طولی و با قرار دادن  $i = 1$ ، رابطه هدایت الکتریکی در آلودگی غیریکنواخت قطاعی به دست خواهد آمد.

### ۳- شبیه‌سازی مقره پلیمری آلوده

در جدول ۱، مشخصات فنی و هندسی یک نمونه مقره

داده شده است.



شکل ۴: نمایی از نواحی مختلف در آلودگی غیریکنواخت، الف) طولی، ب) قطاعی

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی و بحث

شبیه‌سازی‌ها در حالت‌های بدون آلودگی (تمیز)، آلودگی یکنواخت، حالات مختلف آلودگی غیریکنواخت طولی و غیریکنواخت قطاعی انجام شده است که در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج مش‌بندی حل مسئله از نماهای دور و نزدیک در شکل (۵) نشان داده شده است.

را تغییر داد و آلودگی با سطوح مختلف ایجاد کرد. در مراجع [۱۵]، [۱۹] و [۲۰] نیز از چنین روشی استفاده شده است. همچنین مطابق مرجع [۲۱]، رابطه بین غلظت رسوب نمک (شدت آلودگی) و هدایت الکتریکی سطح مفره را می‌توان خطی فرض کرد؛ بنابراین تغییر شدت آلودگی با تغییر هدایت الکتریکی سطح مفره مدل شده است.

مفره مورد مطالعه در حالات تمیز، آلودگی یکنواخت و غیریکنواخت طولی و قطاعی 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.

جدول ۲: پارامترهای مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی [۱۹] و [۲۰]

نوع ماده	ضریب گذردهی الکتریکی نسبی ( $\epsilon_r$ )	هدایت الکتریکی (زیمنس بر متر)
لاستیک سیلیکون	۴/۳	۱۰-۱۲
فایبرگلاس	۷/۲	۱۰-۱۰
فولاد گالوانیزه	۱۰-۶	۵/۹ × ۱۰ <sup>۷</sup>
هوا	۱/۰۲	۳ × ۱۰-۱۵
آلودگی سبک	۷۵	۱۰-۸
آلودگی متوسط	۶۵	۱۰-۶
آلودگی سنگین	۵۵	۱۰-۵

در حالت آلودگی غیریکنواخت نوع طولی، سطح مفره به سه ناحیه نزدیک الکتروود فشارقوی، نزدیک الکتروود زمین و ناحیه میانی با مساحت‌های تقریباً یکسان، تقسیم شده است. در نواحی نزدیک الکتروودها، شدت آلودگی از نوع سنگین و متوسط و در ناحیه میانی از نوع سبک فرض شده است. همچنین در آلودگی غیریکنواخت نوع قطاعی که اصطلاحاً به آن آلودگی نوع fan-shaped اطلاق می‌شود، سطح مفره به دو ناحیه رو به باد و پشت به باد تقسیم شده است که معمولاً ناحیه پشت به باد، مساحت کمتری از سطح مفره را شامل می‌شود. در این مطالعه، سه زاویه ۳۰ درجه، ۶۰ درجه و ۹۰ درجه برای قطاع ناحیه پشت به باد، لحاظ شده است. همچنین شدت آلودگی ناحیه پشت به باد از نوع سنگین و شدت آلودگی ناحیه رو به باد از نوع سبک فرض شده است. در شکل (۴)، نواحی نزدیک الکتروود فشار قوی، الکتروود زمین و ناحیه میانی مفره در آلودگی غیریکنواخت طولی و همچنین نواحی پشت به باد و رو به باد در آلودگی غیریکنواخت قطاعی در مفره پلیمری مورد مطالعه، نشان

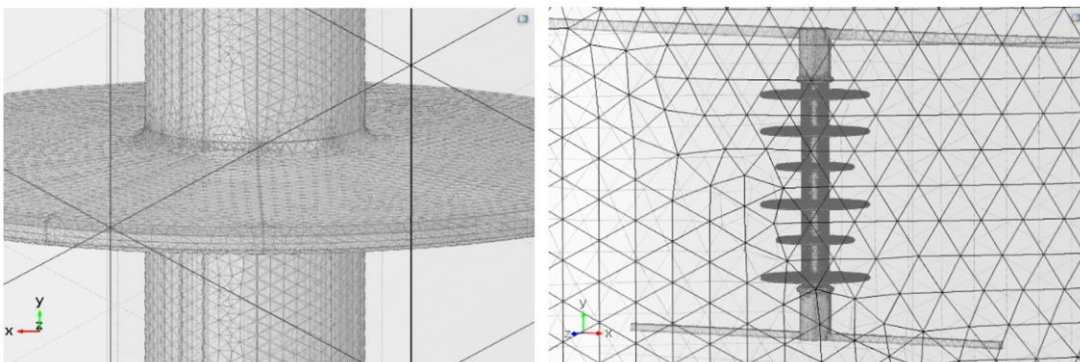
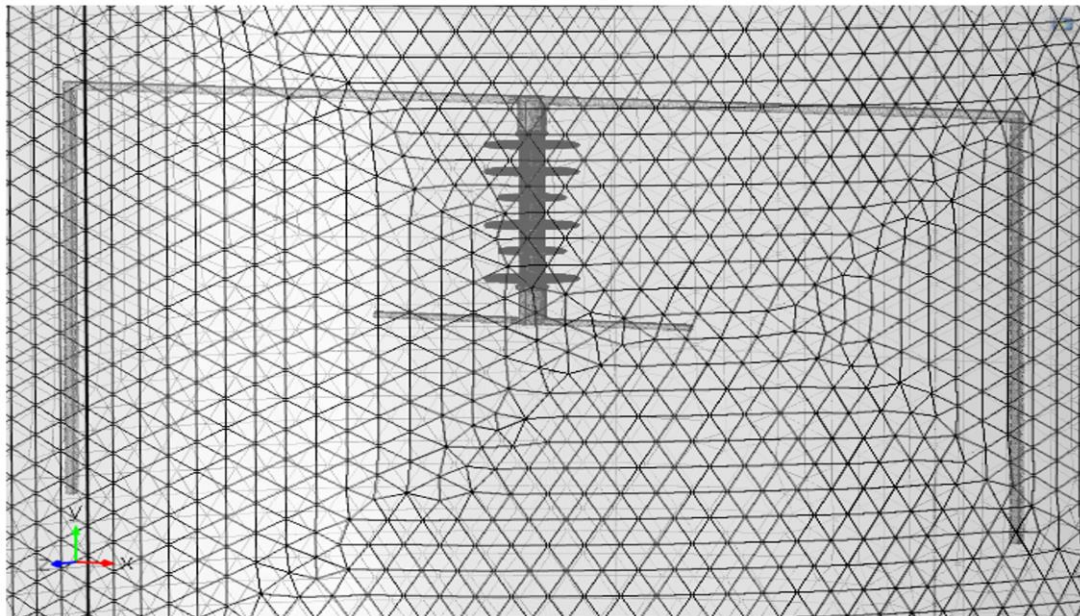
## ۴-۱- آلودگی یکنواخت

در حالت آلودگی یکنواخت، سطح مقره به صورت یکسان و یکنواخت با وجود لایه آلوده با سطوح سبک، متوسط و سنگین فرض شده است. نتایج توزیع میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی برحسب فاصله خزشی مقره در حالت‌های آلودگی یکنواخت سبک، آلودگی یکنواخت متوسط و آلودگی یکنواخت سنگین و برای مقایسه در حالت تمیز (بدون آلودگی)، به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است.

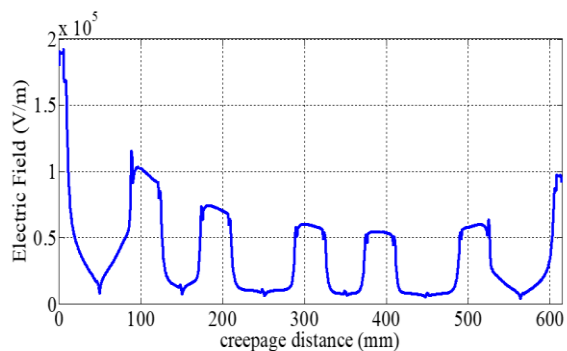
نتایج شبیه‌سازی در شکل (۶) نشان می‌دهد در حالتی که سطح مقره بدون آلودگی باشد، تغییرات میدان الکتریکی روند U شکل نامتقارن را طی می‌کند؛ به طوری که در نزدیکی انتهای فشارقوی مقره، شدت میدان الکتریکی حداکثر است. با دور شدن از انتهای فشارقوی، شدت میدان کاهش می‌یابد. روند کاهشی میدان الکتریکی تا نزدیکی

انتهای زمین ادامه دارد؛ اما در نزدیکی الکتروود زمین اندکی افزایش خواهد یافت.

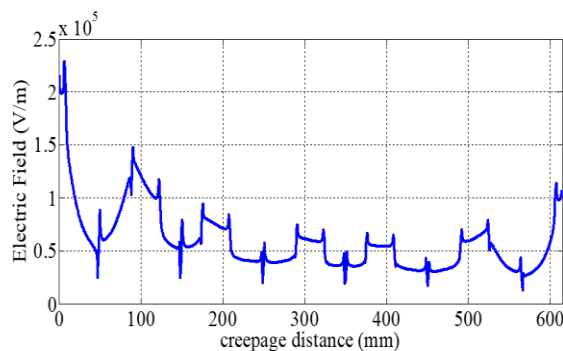
در [۲۲]، مطالعه‌ای بر روی توزیع میدان الکتریکی مقره پلیمری ۴۰۰ کیلوولت در یک خط دو مداره با ملاحظه بر تأثیر هادی، دکل و آلودگی در نرم‌افزار کامسول انجام شده است. نتایج نشان داده که میدان الکتریکی روند U شکل نامتقارنی دارد و مقدار آن در انتهای فشارقوی حداکثر است. مطالعه‌ای دیگر بر روی مقره کامپوزیتی مورد استفاده در خطوط انتقال نشان می‌دهد توزیع میدان الکتریکی سطح مقره با دور شدن از انتهای فشارقوی، روندی نزولی دارد و در قسمت انتهای زمین اندکی افزایش می‌یابد [۳]. همچنین نتایج مطالعه‌ای دیگر بر روی مقره‌های پلیمری مورد استفاده در خطوط انتقال با در نظر گرفتن تأثیر هادی و دکل نشان می‌دهد توزیع میدان الکتریکی به صورت U شکل نامتقارن خواهد بود [۲۳].



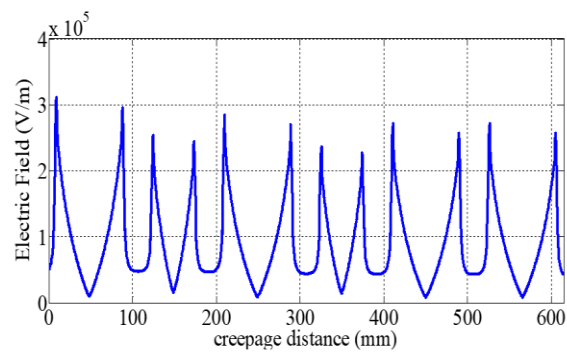
شکل ۵. نمایش مش‌بندی مقره پلیمری مورد مطالعه



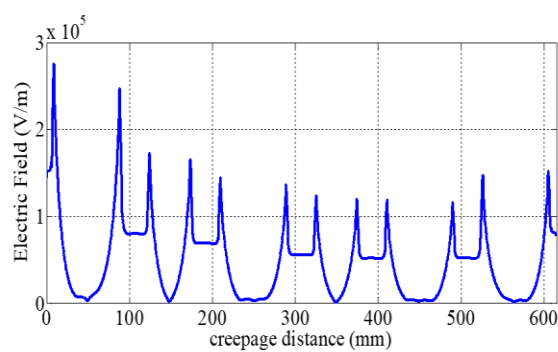
(ب)



(الف)

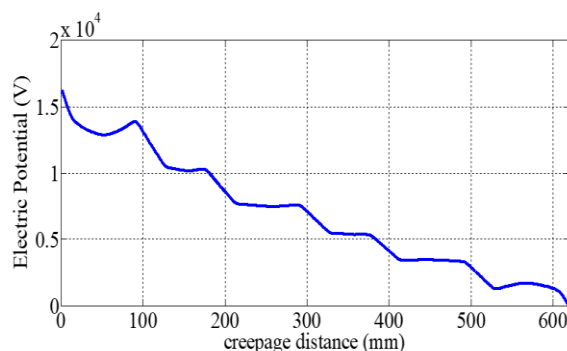


(د)

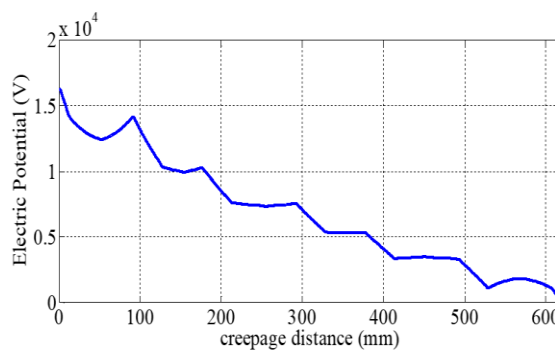


(ج)

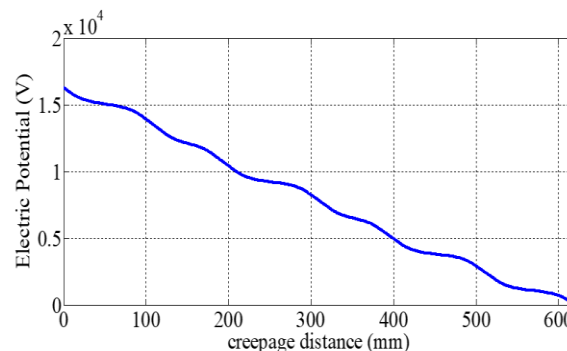
شکل ۶: توزیع میدان الکتریکی مقره پلیمری مورد مطالعه برحسب فاصله خزشی در حالت‌های مختلف: الف- تمیز (بدون آلودگی)، ب- آلودگی یکنواخت سبک، ج- آلودگی یکنواخت متوسط، د- آلودگی یکنواخت سنگین



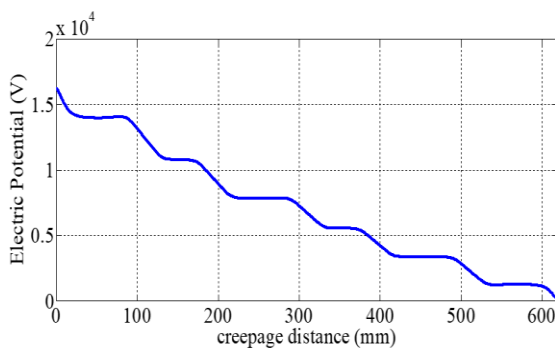
(ب)



(الف)

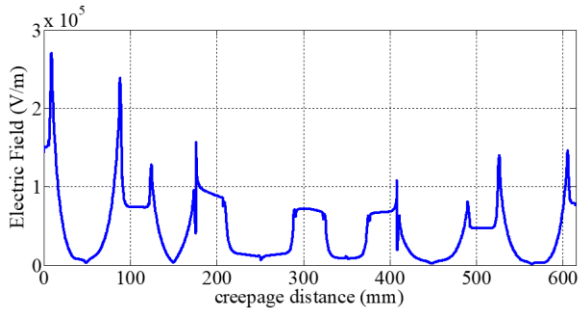


(د)

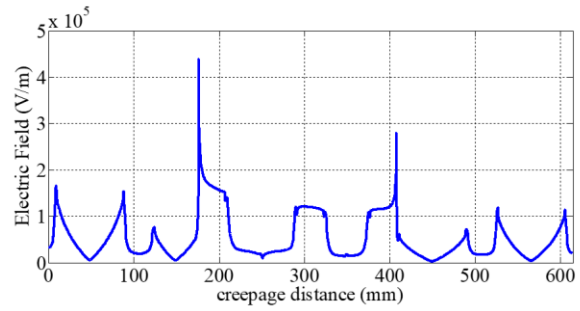


(ج)

شکل ۷: توزیع پتانسیل الکتریکی مقره پلیمری مورد مطالعه برحسب فاصله خزشی در حالت‌های مختلف: الف- تمیز (بدون آلودگی)، ب- آلودگی یکنواخت سبک، ج- آلودگی یکنواخت متوسط، د- آلودگی یکنواخت سنگین

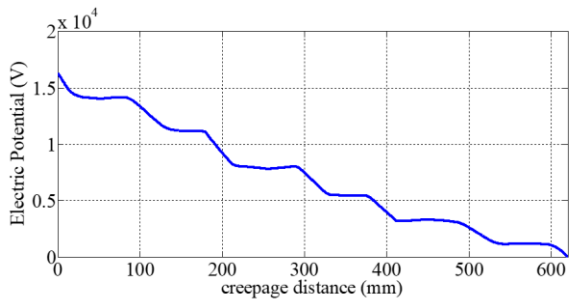


(ب)

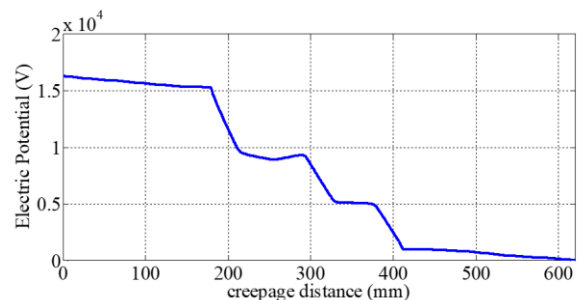


(الف)

شکل ۸: توزیع میدان الکتریکی مقره پلیمری مورد مطالعه برحسب فاصله خزشی در حالت‌های مختلف: الف- آلودگی غیریکنواخت طولی نوع اول، ب- آلودگی غیریکنواخت طولی نوع دوم

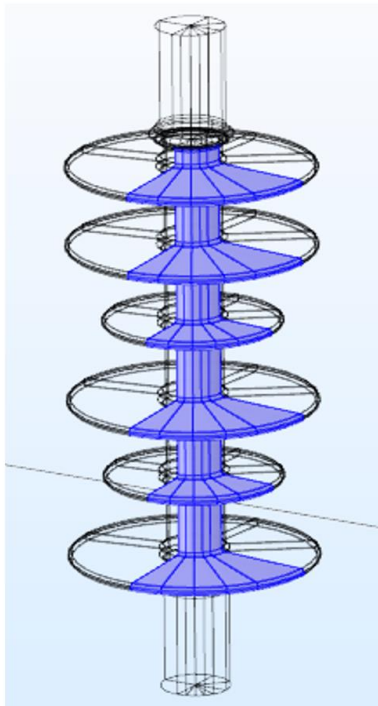


(ب)

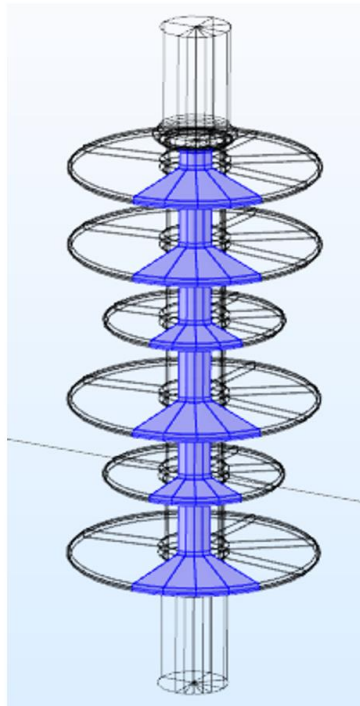


(الف)

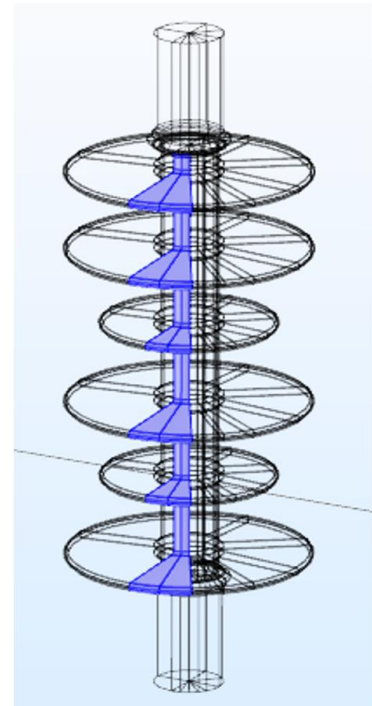
شکل ۹: توزیع پتانسیل الکتریکی مقره پلیمری مورد مطالعه برحسب فاصله خزشی در حالت‌های مختلف: الف- آلودگی غیریکنواخت طولی نوع اول، ب- آلودگی غیریکنواخت طولی نوع دوم



(ج)

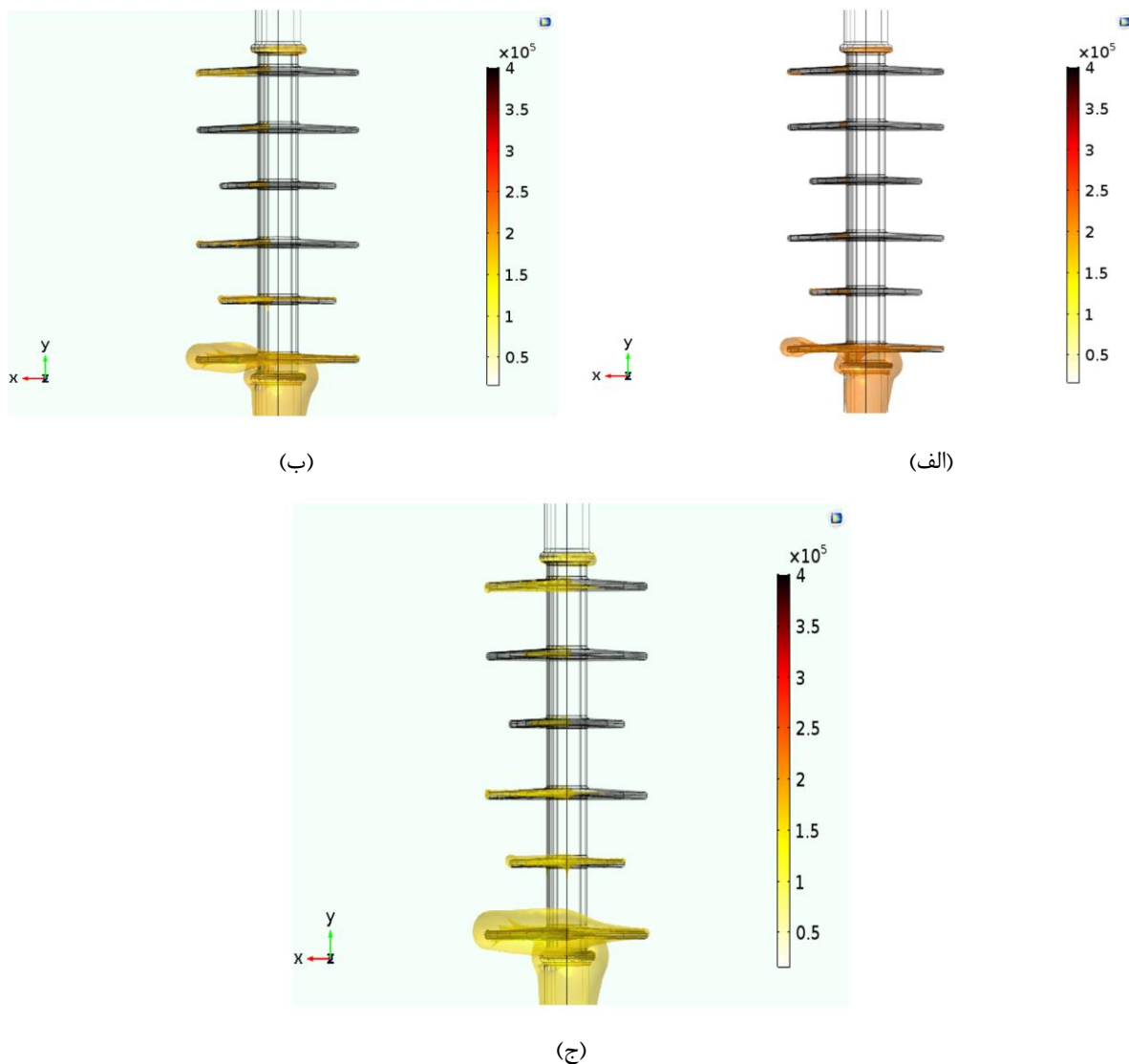


(ب)



(الف)

شکل ۱۰: نمایش قطاع ناحیه پشت به باد مقره مورد مطالعه در شبیه سازی آلودگی غیریکنواخت نوع قطاعی: الف- قطاع ۳۰ درجه، ب- قطاع ۶۰ درجه، ج- قطاع ۹۰ درجه



شکل ۱۱: توزیع سه بعدی میدان الکتریکی مقره پلیمری مورد مطالعه در آلودگی غیریکنواخت نوع قطاعی: الف- قطاع ۳۰ درجه، ب- قطاع ۶۰ درجه، ج- قطاع ۹۰ درجه

تناوبی با شیب تند را طی می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در آلودگی سنگین، علاوه بر دو انتهای مقره، در نواحی میانی مقره نیز شدت میدان الکتریکی حداکثر خواهد شد. در منحنی‌های توزیع میدان، ماکزیمم‌های محلی مربوط به نواحی پای چترک‌ها (محل اتصال چترک به میله مقره) و مینیمم‌های محلی مربوط به نوک (لبه) چترک‌ها هستند.

نتایج توزیع پتانسیل الکتریکی برحسب فاصله خزشی مقره در حالت‌های تمیز (بدون آلودگی)، آلودگی یکنواخت سبک، متوسط و سنگین در شکل (۷) آمده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در حالت تمیز، شیب تغییرات پتانسیل در انتهای فشار قوی مقره بیشتر از نواحی دیگر

در حالت آلودگی یکنواخت سبک نسبت به حالت تمیز، میدان الکتریکی، اندکی تعدیل می‌شود و دامنه آن کاهش می‌یابد؛ به طوری که حداکثر شدت میدان الکتریکی در نزدیکی الکتروود فشارقوی به طور تقریبی از  $2/3$  به  $1/8$  کیلوولت بر سانتی‌متر تقلیل می‌یابد. همچنین در آلودگی یکنواخت سبک نسبت به حالت تمیز، منحنی تغییرات میدان هموارتر، اما روند تغییرات میدان در دو حالت مشابه است.

با افزایش شدت آلودگی و در حالت‌های آلودگی متوسط و سنگین، شیب و دامنه تغییرات میدان الکتریکی افزایش خواهد یافت. ضمناً با افزایش شدت آلودگی، تغییرات میدان از حالت U شکل خارج می‌شود و روند افزایشی-کاهشی



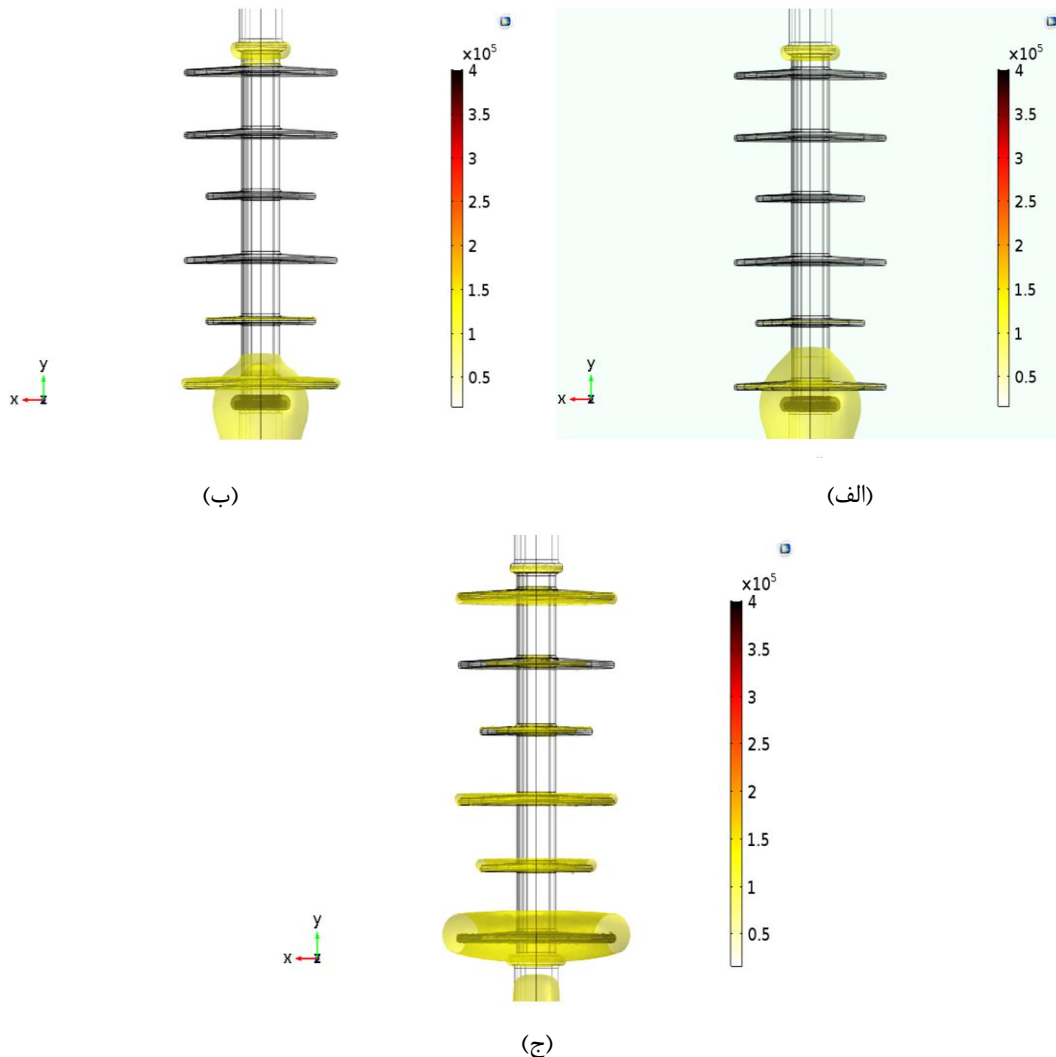
نیروهای الکترواستاتیکی، جذب آلودگی در دو انتهای مقره بیشتر از نواحی میانی مقره است [۸]. در این مقاله به منظور مطالعه تأثیر این شرایط از آلودگی غیریکنواخت، دو نوع مختلف از توزیع آلودگی بر روی مقره پلیمری مورد مطالعه برای شبیه‌سازی اثر آلودگی غیریکنواخت طولی، به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

- در نوع اول (type 1)، آلودگی در نزدیکی الکترودهای فشارقوی و زمین از نوع سنگین و در ناحیه میانی، از نوع سبک فرض شده است.
- در نوع دوم (type 2)، آلودگی در نزدیکی الکترودهای فشارقوی و زمین از نوع متوسط و در ناحیه میانی، از نوع سبک در نظر گرفته شده است.

بوده که بیانگر بیشتر بودن گرادیان ولتاژ (شدت میدان الکتریکی) در انتهای فشارقوی مقره است. در صورت آلوده بودن سطح مقره، تغییرات پتانسیل الکتریکی کمتر شده، با افزایش شدت آلودگی، به تدریج از شیب منحنی‌ها کاسته می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش شدت آلودگی در حالت آلودگی یکنواخت، تغییرات پتانسیل، خطی‌تر و یکنواخت‌تر شده است.

#### ۲-۴- آلودگی غیریکنواخت نوع طولی

در آلودگی غیریکنواخت نوع طولی، سطح مقره به سه ناحیه نزدیک الکترودهای فشارقوی، نزدیک الکترودهای زمین و ناحیه میانی با مساحت‌های تقریباً برابر، تقسیم شده است. مشاهدات و تجربیات بهره‌برداری مقره‌های پلیمری در خطوط انتقال و توزیع نشان می‌دهد معمولاً به دلیل تأثیر



شکل ۱۲: توزیع سه‌بعدی میدان الکتریکی مقره پلیمری مورد مطالعه: الف- بدون آلودگی، ب- آلودگی یکنواخت سبک، ج- آلودگی یکنواخت سنگین

نوع سنگین و ناحیه رو به باد از نوع سبک فرض شده است. مطابق شکل (۱۱)، در آلودگی غیریکنواخت نوع قطاعی، شدت میدان ناحیه پشت به باد، بیشتر از ناحیه رو به باد بوده که این افزایش در نزدیکی الکتروود فشارقوی محسوس‌تر از نواحی دیگر است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش زاویه قطاع از ۳۰ به ۶۰ و ۹۰ درجه، از شدت میدان الکتریکی کل سطح مقره کاسته می‌شود. کاهش شدت میدان در شکل (۱۱) به صورت تغییر از رنگ تیره‌تر به رنگ روشن‌تر قابل مشاهده است.

برای مقایسه نتایج آلودگی غیریکنواخت قطاعی با نتایج حالت‌های تمیز و آلودگی یکنواخت، شبیه‌سازی سه‌بعدی میدان الکتریکی در حالت‌های تمیز و آلودگی یکنواخت در شکل (۱۲) آمده است. مطابق شکل (۱۲) در حالت بدون آلودگی، در نزدیکی انتهای فشارقوی، شدت میدان الکتریکی، بیشترین مقدار را دارد. در حالت آلودگی یکنواخت سبک نسبت به حالت تمیز، کمی از تمرکز شدت میدان در دو انتهای فلزی مقره کاسته می‌شود. با افزایش شدت آلودگی در حالت آلودگی یکنواخت سنگین، میدان الکتریکی (به‌ویژه در نواحی میانی مقره) افزایش یافته است. مقایسه کلی نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان می‌دهد که در حالت آلودگی یکنواخت، توزیع میدان الکتریکی در جهت طولی مقره غیریکنواخت است؛ اما در جهت دورانی نسبت به محور مقره، به صورت نسبتاً یکنواخت توزیع شده است. از سوی دیگر، در آلودگی غیریکنواخت قطاعی، توزیع میدان هم در جهت دورانی و هم در جهت طولی، به صورت غیریکنواخت است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر شدت و نوع آلودگی‌های یکنواخت و غیریکنواخت طولی و قطاعی بر روی توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی مقره پلیمری بررسی و تحلیل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است در حالتی که سطح مقره بدون آلودگی باشد، در نزدیکی انتهای فشارقوی مقره، شدت میدان الکتریکی حداکثر است. در حالت آلودگی یکنواخت سبک نسبت به حالت تمیز، توزیع میدان یکنواخت‌تر می‌شود؛ اما در حالت‌های آلودگی یکنواخت متوسط و سنگین، شیب و دامنه تغییرات میدان الکتریکی افزایش یافته است. از طرفی، با افزایش شدت آلودگی، تغییرات پتانسیل الکتریکی خطی‌تر و یکنواخت‌تر شده

نتایج شبیه‌سازی توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی در دو نوع آلودگی غیریکنواخت طولی به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) آمده است.

نتایج نشان می‌دهد در آلودگی غیریکنواخت طولی نوع اول، در نواحی نزدیک به الکتروودها به دلیل آلودگی سنگین، تغییرات پتانسیل الکتریکی نسبتاً کم است. به عبارت دیگر، اعمال آلودگی سنگین در دو انتهای مقره باعث شده است لایه آلوده همانند یک لایه هادی با مقاومت الکتریکی کم، عمل کند. همچنین در آلودگی غیریکنواخت طولی نوع اول، دامنه میدان الکتریکی در نواحی نزدیک الکتروودها نسبت به ناحیه میانی کمتر است و قسمت عمده تنش ولتاژی به قسمت میانی مقره وارد می‌شود. بیشترین تنش الکتریکی در آلودگی غیریکنواخت طولی، در مرز بین نواحی مختلف اتفاق می‌افتد که در آن، دامنه میدان الکتریکی به صورت محلی افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، احتمال وقوع تخلیه‌های سطحی و کرونا در این نواحی زیاد است.

در آلودگی غیریکنواخت طولی نوع دوم، به علت کم شدن شدت آلودگی نواحی نزدیک الکتروودها نسبت به آلودگی نوع اول، میدان الکتریکی نواحی نزدیک الکتروودها افزایش یافته و از میزان تنش الکتریکی ناحیه میانی مقره کاسته شده است. دلیل این امر، افزایش مقاومت سطحی نواحی نزدیک الکتروودها و توزیع یکنواخت‌تر ولتاژ بین نواحی سه‌گانه است.

#### ۴-۳- آلودگی غیریکنواخت نوع قطاعی

برای مطالعه تأثیر آلودگی غیریکنواخت نوع قطاعی بر روی توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی، شبیه‌سازی سه‌بعدی مقره مورد مطالعه انجام شده است. در این شرایط می‌توان اثر زاویه قطاع مربوط به ناحیه پشت به باد را مشاهده کرد. در ارزیابی تأثیر آلودگی غیریکنواخت نوع قطاعی، فرض شده است که آلودگی ناحیه پشت به باد از نوع سنگین و آلودگی ناحیه رو به باد از نوع سبک باشد. همچنین سه حالت زوایای ۳۰ درجه، ۶۰ درجه و ۹۰ درجه برای قطاع ناحیه پشت به باد در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۰)، سه قطاع ۳۰ درجه، ۶۰ درجه و ۹۰ درجه در شبیه‌سازی مقره پلیمری مورد مطالعه، نشان داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی توزیع میدان الکتریکی مقره پلیمری مورد مطالعه در آلودگی غیریکنواخت نوع قطاعی، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. شدت آلودگی ناحیه پشت به باد از

زاویه قطاع ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه در نظر گرفته شد و شدت آلودگی ناحیه پشت به باد از نوع سنگین و ناحیه رو به باد از نوع سبک فرض گردید. نتایج نشان داده است شدت میدان الکتریکی ناحیه پشت به باد، بیشتر از ناحیه رو به باد است که این افزایش در نزدیکی الکتروود فشارقوی بیشتر از دیگر نواحی بوده است. همچنین با افزایش زاویه قطاع ناحیه پشت به باد، شدت میدان الکتریکی کاهش یافته است.

است. به منظور شبیه‌سازی تأثیر آلودگی غیریکنواخت طولی بر میدان الکتریکی، شدت آلودگی نواحی دو انتهای مقره بیشتر از ناحیه میانی در نظر گرفته شد. در این نوع آلودگی (به‌ویژه آلودگی نوع اول)، میدان الکتریکی در نواحی نزدیک الکتروودها کاهش چشمگیری یافت. همچنین بیشترین تنش الکتریکی در آلودگی غیریکنواخت طولی، در مرز بین نواحی مختلف اتفاق می‌افتد. برای مطالعه تأثیر آلودگی غیریکنواخت نوع قطاعی، سه

## ۶- مراجع

- [1] R. Hackam, "Outdoor HV Composite Polymeric Insulators," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, 1999, pp. 557-585.
- [2] R.A. Rifai, A.H. Mansour and M.A.H. Ahmed, "Estimation of the electric field and potential distribution on three dimension model of polymeric insulator using finite element method", International Journal of Engineering Development and Research, Vol. 3, No. 2, 2015, pp. 694-705.
- [3] A. Phillips, J. Kuffel, A. Baker and et al., "Electric Fields on AC Composite Transmission Line Insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, 2008, pp. 823-830.
- [4] Waluyo, M. Pakpahan, Suwarno and M. Djauhari, "Study on leakage current waveforms of porcelain insulator due to various artificial pollutants", International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 1, No. 8, 2007, pp. 1135-1140.
- [5] R. Sundararajan and 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, 1994, pp. 124-132.
- [6] Z. Zhang, J. You, D. Zhang and 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, 2016, pp. 1760-1768.
- [7] Z. Zhang, J. You, D. Wei and et al., "Investigations on AC pollution flashover performance of insulator string under different non-uniform pollution conditions", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 2, 2016, pp. 437-443.
- [8] R.S. Gorur, E.A. Cherney and J.T. Burnham, Outdoor Insulators, Phoenix, Arizona, 1999.
- [9] R. Arora and W. Mosch, High Voltage and Electrical Insulation Engineering, IEEE Press, Wiley Publishing, 2011.
- [۱۰] م. ذاکری و ا. افضل‌نژاد، «بررسی اثر زاویه کایرال بر کماتش محوری و پیچشی نانولوله‌های کربنی تک‌جداره به کمک روش اجزای محدود»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال پانزدهم، شماره ۴۸، ۱۳۹۶، صفحه ۶۱-۷۱.
- [۱۱] م. فتحی و ر. حسنی اصفهانی، «مدل‌سازی المان محدود یک اتصال صلب پیشنهادی برای ساختمان‌های بتنی پیش‌ساخته با استفاده از المان رابط فولادی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال پانزدهم، شماره ۴۹، ۱۳۹۶، صفحه ۱۸۹-۲۰۰.
- [۱۲] م. قلی‌خانی و ش. حاتمی، «رفتار جانبی دیوارهای برشی فولادی سرد نورد با پوشش ورق فولادی به روش اجزای محدود»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال سیزدهم، شماره ۴۰، ۱۳۹۴، صفحه ۱۲۹-۱۵۰.
- [۱۳] م. عسگری و ا. غلامی، «تحلیل توزیع میدان الکتریکی در مقره‌های پلیمری تحت شرایط یخ‌زدگی با استفاده از روش المان محدود»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۴، شماره ۴، ۱۳۹۳، صفحه ۴۷-۵۴.
- [۱۴] ر. رستمی‌نیا، م. صنیعی و ا. اکبری، «تأثیر پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت بر وقوع تخلیه جزئی در عایق ماشین‌های الکتریکی با استفاده از مدل‌سازی به روش اجزای محدود»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۱، ۱۳۹۴، صفحه ۲۸-۲۱.
- [15] S. Muniraj and 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, 2012, pp.

- 310-320.
- [16] W. Sima, Q. Yang, C. Sun and 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, 2006, pp. 343-349.
- [17] Z. Guan, L. Wang, B. Yang and et al., "Electric field analysis of water drop corona", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, 2005, pp. 964-969.
- [18] B. Marungsri, W. Onchantuek and A. Oonsivilai, "Electric field and potential distributions along surface of silicone rubber polymer insulators using finite element method", International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, Vol. 2, No. 6, 2008, pp. 1055-1060.
- [19] D.S. Lopes and 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] El-Refaie, M. El-Sayed, 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, 2018, pp.1349-1356
- [21] Z. Zhang, X. Liu, X. Jiang and 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, 2013, pp. 1691-1698.
- [22] M. Bouhaouche, A. Mekhaldi and 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, 2017, pp. 3549-3558.
- [23] J.C. Canale, A. Phillips and L.E. Zaffanella, "Calculation of electric field near sheds and fittings of AC transmission-line polymer insulators", IEEE Transactions of Power Delivery, Vol. 27, No. 2, 2012, pp. 793-802.