مروری برتحلیل توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی مقره‌های فشارقوی تحت شرایط آلودگی

حسین فدائی اسرمی[۱] ، فرامرز فقیهی*[۲]، جواد علمائی[۳]، حسین محمد نژاد شورکائی[۴]

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی برق قدرت و کنترل، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران، hossein.fadaee@srbiau.ac.ir

*۲- استادیار، گروه مهندسی برق قدرت و کنترل ، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران، faramarz.faghihi@srbiau.ac.ir (نویسنده مسئول)

۳- دانشیار، گروه مهندسی برق- قدرت، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران، j_olamaei@azad.ac.ir

۴ - استادیار، گروه مهندسی برق قدرت و کنترل، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، h-mohamadnejad@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۷ تاریخ پذیرش:۱۴۰۰/۸/۱۵

چکیده: مقره‌های فشارقوی در معرض شرایط محیطی و اقلیمی مختلف قرار می‌گیرند. تاثیرات متقابل شرایط محیطی و آلودگی ایزولاسیون باعث می‌گردد عایق مقره‌ها خود بستر مناسبی جهت هدایت جریان گردیده و اثرات خود را بر سیستم‌های قدرت بجا بگذارد. دانش توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی تجهیزات ولتاژ بالا از جنبه‌های مهم طراحی، بهره‌برداری و عملکرد عایق‌های فشارقوی است. این می‌تواند برای تشخیص نقص در عایق‌ها مفید باشد. هدف از این مطالعه نشان دادن رفتار عایق‌های آلوده تحت ولتاژ می‌باشد. بنابراین ، شبیه‌سازی میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل در مجاورت سطوح مختلف عایق مورد بحث و بررسی قرار گرفت. مقره‌ها به دو صورت مدل‌سازی می‌شوند: 2D,3D و از تحلیل نرم‌افزار Comsol Multiphysics که یکی از بهترین نرم‌افزارهای مورد استفاده در مدل‌سازی می‌باشد برای عناصر محدود استفاده می‌شود. سرانجام، نتایج توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در طول عایق در شرایط مختلف آلوده و تمیز که با استفاده از مقادیر رسانایی‌های مختلف شبیه‌سازی شده‌اند، نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: توزیع میدان الکتریکی، توزیع پتانسیل، آلودگی، شبیه‌سازی ، Comsol Multiphysics ، مقره‌های فشارقوی، روش اجزاء محدود.

۱- مقدمه

اهمیت تحقیق در مورد آلودگی مقره با افزایش ولتاژ خط انتقال به میزان قابل توجهی افزایش یافته است [۱-۲]. در واقع، عملکرد عایق ها در یک محیط آلوده یکی از عوامل هدایت کننده در هماهنگی عایق‌بندی خطوط انتقال ولتاژ بالا است [۳]. خطوط انتقال و ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا همواره در معرض محدودیت‌های مختلفی مانند آلودگی‌های عایقی قرار دارند، که از نظر مسائل کیفیت توان و قابلیت اطمینان بیشتر مورد توجه است [۴].

آلودگی فلاش‌اور ناشی از مقره‌های مورد استفاده در خطوط انتقال ولتاژ بالا یکی از مهمترین مشکلات انتقال نیرو است. این به دلایل مختلف مانند مشکلات در مدل‌سازی شکل (فرم) پیچیده عایق ، تراکم آلودگی در مناطق مختلف و توزیع غیریکنواخت آلودگی بر روی مقره و اثر ناشناخته رطوبت است [۵-۷]. تجمع (رسوب) مداوم یا متناوب ناخالصی‌های حاصل از منابع مختلف به‌عنوان یک پدیده آلودگی عایق در نظر گرفته می‌شود، این می‌تواند در اثر ابر دود (آلودگی صنعتی و

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

شهری) [۸]، یا ذرات ریز نمک در مناطق ساحلی (آلودگی دریایی) و یا حتی ذرات ریز از طوفان شن در مناطق کویری باشد.

اخیراً، مدل‌های عددی مبتنی بر روش المان محدود نتایج بهتری در مدل‌سازی پدیده فلاش اور عایق‌های آلوده در مقایسه با استاتیک و مدل‌های پویا ارائه‌دادند[۹-۱۰]. درنتیجه، برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌ها و رفتار عایق‌های آلوده، الگوی الکتریکی و پتانسیل‌ها ضروری است. میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل را می‌توان بااستفاده از تکنیک‌های مختلف عددی، مانند روش شبیه‌سازی بار (CSM)، روش تفاوت محدود (FDM)، روش عنصر مرزی (BEM) و روش اجزای محدود (FEM) تخمین زد. در زمینه برنامه‌های خطوط انتقال ، نتایج منتشر شده از شبیه‌سازی عددی توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی همه برای هندسه-های ساده است [۱۱-۱۳]. به‌همین دلیل، COMSOL Multiphysics می‌تواند به عنوان یک روش قدرتمند و تعاملی برای حل مسائل پیچیده با استفاده از روش اجزای محدود باشد. COMSOL Multiphysics ابزاری است که به‌طور گسترده در زمینه‌های مختلف تحقیقات علمی مورد استفاده قرار می‌گیرد و کاملاً مراحل مدل‌سازی را تسهیل می‌کند. روش المان محدود (FEM) برای محاسبه میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل در مقره‌های ولتاژ بالا بسیار مناسب است زیرا یکی از روش‌های عددی موفق برای حل مشکلات الکترواستاتیک (با استفاده از گسسته‌سازی دامنه) است[۱۴].

هدف اصلی این مطالعه مروری بر تحلیل میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل عایق‌های تمیز و آلوده تحت آلودگی یکنواخت و غیریکنواخت است. نتایج توزیع میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل در امتداد یک عایق درپوش و پین در COMSOL Multiphysics نشان داده شد. مشاهده می‌شود برای بررسی تأثیر رسانایی آلودگی بر توزیع میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل از فرمولاسیون جریان‌های الکتریکی با استفاده از مقادیر رسانایی‌های مختلف استفاده می‌شود.

مقاله حاضر بخشی از یک مطالعه طولانی‌مدت برای تحلیل توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی تحت شرایط آلودگی است.

اهداف اصلی این مقاله را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- مطالعه انواع مقره و طبقه‌بندی آنها.
- مطالعه آلودگی.
- مفاهیم توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی.
- شبیه‌سازی در محیط Comsol.
- مدل ریاضی.
- نتایج و بحث توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در مقره‌ها.

ساختار کلی مقاله به این شرح است: در قسمت دوم و سوم معرفی انواع مقره‌ها همراه با آلودگی آمده و در قسمت چهارم به مفاهیم توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی پرداخته شده است. در قسمت پنجم و ششم شبیه‌سازی و مدل ریاضی بیان شده است. درقسمت هفتم به نتایج و بحث مطالعات پرداخته و در آخر نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- انواع مقره از نظر ساخت و دسته‌بندی آنها

مقره‌ها یا ایزولاتورها به عنوان یکی از تجهیزات مهم در شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی به جهت نگه داشتن هادی‌های الکتریکی دارای ولتاژ و جداسازی آنها از بازوهای نگه دارنده بکار گرفته می‌شوند. افزایش قابلیت اطمینان ، ایمنی سیستم و تداوم برق رسانی به عملکرد صحیح مقره‌ها بستگی مستقیم دارد. در شبکه‌های توزیع و انتقال، طراحی مطلوب و مناسب ایزولاسیون ضرورت دارد، بگونه‌ای که هرگونه سهل‌انگاری در طراحی ایزولاسیون، ممکن است منجر به بهره‌برداری نامطلوب از شبکه و بروز خسارات پرهزینه گردد.

مقره‌ها از نظر مواد تشکیل دهنده به سه دسته تقسیم می‌شوند[۱۵]:

۱- مقره‌های سرامیکی
۲- مقره‌های شیشه‌ای
۳- مقره‌های پلیمری

۲-۱- مقره‌های سرامیکی

این مقره‌ها از خاک سفید که به آنها فلدسپار، کوارتز و سیلیکای پودر شده اضافه می‌شود ساخته می‌شوند. این ماده دارای قدرت مقاومت بیشتری نسبت به شیشه در مقابل تغییرات ناگهانی دما بوده و لعاب خارجی، آن را در مقابل ضربه محافظت می‌نماید. خاک رس سفید (کائولین) و فلدسپار و کوارتز به‌ترتیب برای بالا بردن استقامت حرارتی، الکتریکی و مکانیکی بکار می‌روند و با توجه به درصد مخلوط شدن آنها مقره می‌تواند دارای خواص متنوعی باشد. از آنجا که بسیار ضروری است یک مقره بدون هرگونه حفره هوا و یا ناخالصی باشد روش و مراحل ساخت آن از حساسیت خاصی برخوردار است.

مقره‌های چینی معمولا به دو روش تولید می‌شوند. روش مرطوب که طی آن مقره چینی قالب‌گیری می‌شود و روش خشک که در آن، مواد تشکیل‌دهنده با فشار درون قالب فولادی قرار می‌گیرند تا به شکل مطلوب درآیند. مقره‌هایی که با استفاده از روش خشک ساخته می‌شوند، دارای قدرت مکانیکی و دی‌الکتریک کمتری بوده ولی هزینه تولید کمتری دارند.این نوع از مقره‌ها تحت فشار الکتریکی بیش از ولتاژ شکست سطحی مستعد سوراخ شدن هستند. به هر حال مقره‌های تولید شده از طریق روش خشک ، مقرون بصرفه‌تر بوده و استفاده از آنها عموما به ولتاژهای پایین محدود می‌شود[۱۶].



شکل(۱): مقره سرامیکی(چینی)[۱۶]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

۲-۲- مقره‌های شیشه‌ای

مقره‌های شیشه‌ای در اندازه‌های گوناگون ساخته شده و از نظر مکانیکی و الکتریکی مطلوب می‌باشد. شیشه از ذوب مواد متشکله شامل سیلیس یا شن، سود، سنگ آهک و منیزیم در درجه حرارت حدود ۱۴۰۰درجه به‌دست می‌آید که پس از قالب‌ریزی دوباره پخته و گرم می‌شود و سپس آن را سرد می‌کنند.

در گذشته به‌علت استقامت کمتر آنها در برابر ضربه نسبت به مقره‌های چینی و ضریب انبساط طولی بالا، در ولتاژهای کمتر از ۷۵کیلوولت استفاده می‌شد، ولی نوع جدید آن از شیشه سخت شده در ولتاژ تا ۷۶۵کیلوولت نیز بکار می‌رود. این مقره‌ها در برابر لب پریدگی و قوس الکتریکی نسبت به چینی مقاوم تر است. شیشه نسبت به چینی جاذب آلودگی بیشتری بوده ولی از نظر قیمت ارزان تر می‌باشد و اگر بدون از هم پاشیدگی بشکند از روی زمین قابل مشاهده است و چنانچه در هنگام بازدید مقره سالم به‌نظر برسد می‌توان مطمئن بود که مقره هم از نظر الکتریکی و هم از نظر مکانیکی سالم است و کارائی لازم را دارد[۱۷].



شکل(۲): مقره شیشه‌ای[۱۷]

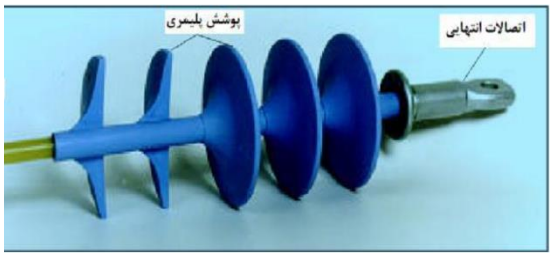
۳-۲- مقره‌های پلیمری

مقره‌های پلمیری که به نام غیرسرامیکی یا کامپوزیت هم خوانده می‌شوند نسل نسبتاً جدید مقره‌ها می‌باشند که با پیدایش کامپوزیت‌های پیشرفته آغاز گردیده‌اند. مقره‌های پلیمری یا غیرسرامیکی اولین بار در سال ۱۹۵۹ معرفی گردیدند. آنها از اپوکسی ساخته شده بودند و وقتی در محیط های بیرونی یا آلوده مورد استفاده قرار می‌گرفتند، نسبت به مشکلات مربوط به تخریب اشعه ماورای بنفش و فرسایش حساس بودند. مقره‌های غیرسرامیکی توسط سازندگان مختلفی در دهه های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ تولید شدند. طراحی‌های اولیه عمدتاً شامل انواع آویزان یا انتهایی و نوع نگهدارنده بود. جنبه‌های اساسی معینی از طرح‌های اولیه، تشکیل-دهنده اساس ساخت مقره‌های امروزی می‌باشند. آنها از یک هسته فایبرگلاس به‌عنوان عضو استقامتی مکانیکی استفاده می‌کردند. هسته فایبرگلاس را می‌توان به کمک یک محفظه لاستیکی در برابر محیط محافظت نمود[۱۸].

اتصالات مکانیکی در دو انتهای مقره با وسایل متنوعی ساخته می‌شدند. در همه موارد یراق آلات فلزی به میله فایبرگلاس متصل می‌شوند تا استقامت مکانیکی لازم را برای کاربردهای مختلف به مقره بدهند.

برخلاف مقره‌های سرامیکی رایج که تنها از یک ماده عایقی تشکیل می‌شوند و این ماده هم مسئول عملکرد الکتریکی مقره و هم مسئول عملکرد مکانیکی آن است، مقره های کامپوزیتی حداقل از دو ماده عایقی تشکیل می‌شوند، یکی برای تامین خواص الکتریکی (روکش مقره) و دیگری برای تامین خواص مکانیکی آن (هسته کامپوزیتی). با توجه به موارد بیان شده، می توان سه جزء اصلی برای یک مقره کامپوزیتی در شکل ۳ نشان داد[۱۸]:

۱- هسته
۲- پوشش یا بدنه رویی
۳- اتصالات انتهایی



شکل(۳): مقره کامپوزیتی و اجزای تشکیل دهنده آن[۱۸]

۳- آلودگی

یکی از مهم‌ترین عوامل بسیار مهم در شکست مقره‌ها آلودگی می‌باشد. لذا محیط نصب مقره‌ها می‌تواند تاثیر بسیار مهمی بر روی عملکردشان داشته‌باشد.وقتی مقره‌ها درمناطق آلوده مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، عملکرد مطلوب آنها می‌تواند به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. این موضوع از مهم‌ترین چالش‌ها در طراحی و بهره‌برداری عایقی تجهیزات پست‌های فشارقوی و خطوط انتقال و توزیع می‌باشد. آلودگی‌های موجود در محیط که معمولا به صورت ذرات گرد و غبار، گازهای صنعتی، آلاینده‌های شیمیایی و یا دیگر ترکیبات معلق در هوا می‌باشند، در سطح خارجی مقره استقرار یافته و می‌تواند لایه‌ای از ذرات را بر روی آن ایجادنماید. به‌مرور زمان، با جذب رطوبت در مقره‌های تحت ولتاژ، جریان سطحی در سطح خارجی مقره برقرار می‌شود. با افزایش آلودگی و رطوبت و در نتیجه افزایش جریان سطحی از مقادیر مشخص و ایجاد باند خشک، شرایط بروز قوس در فاصله عایقی مهیا شده و قوس خارجی در ولتاژی کمتری از ولتاژ نامی سیستم برقرار می‌گردد[۱۹].

۱-۳- انواع آلودگی

دو نوع آلودگی وجوددارد، آلودگی طبیعی و آلودگی مصنوعی. عایق-هایی که درمحیط قرار می‌گیرند آلودگی منابع مختلف را جمع می‌کنند.

- آلودگی ساحلی: می‌توان لایه‌ای از نمک را توسط باد از دریا به سطح زمین پاشید. درصورت وجود رطوبت یا مه، این لایه رسانا می شود. کلرید سدیم سازنده اصلی این آلودگی است.
- آلودگی صنعتی: خطوط برق نزدیک منطقه شهری یا صنعتی در اثر انتشار نیروگاه ها انباشته می‌شوند. این مواد هنگام

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

نشستن به صورت خشک استفاده می‌شوند اما با مه خیس می‌شوند و احتمالاً رسانا هستند. این ماده رطوبت را در درجات مختلف جذب خواهد کرد و جدا از نمک ، اسیدها نیز در مقره رسوب می‌کنند.

به‌طور خلاصه انواع اصلی آلودگی را می‌توان یافت:

- مه نمک در مناطق ساحلی،
- گرد و غبار حاوی نمک (منطقه کویری یا خشک)،
- ذخایر کشاورزی (کودها ، بقایای احتراق)،
- آلودگی صنعتی (استخراج زغال سنگ، استخراج نمک، کارخانه‌های سیمان، صنایع شیمیایی) ؛
- آلودگی وسایل نقلیه (بزرگراه‌ها ، راه‌آهن غیربرق دار).

باد ابزاری است که باعث رسوب مواد در سطح عایق می‌شود اما رطوبت، مه یا باران سبک است که باعث خیس شدن لایه آلودگی می‌شود. می‌توان مشاهده کرد که باران شدید مستعد تمیز کردن سطح است بنابراین مشکلی ایجاد نمی‌کند[۲۰-۲۱].

۴- مفاهیم توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی

برای تعریف میدان الکتریکی در یک نقطه معین از فضا، یک بار الکتریکی مثبت به اندازه واحد در آن نقطه قراردادهشده، سپس مقدار نیروی الکتریکی وارد بر این بار واحد را به‌عنوان شدت میدان الکتریکی تعریف‌می‌کنند. دراین تعریف بار مثبت را نیز به عنوان بار آزمون تعریف می‌کنند. به بیان دقیق‌تر، می‌توان میدان الکتریکی را به صورت حد نسبت نیروی الکتریکی وارد بر یک بار آزمون بر اندازه بارآزمون، زمانی که مقدار بار آزمون به سمت صفر میل می‌کند، تعریف کرد[۲۲].

$$E = lim_{q\to 0}\frac{F}{q}\ \left(V/m\right) \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی فوق اگر نیرو بر حسب نیوتن (N) و بار بر حسب کولمب(C) باشد، آنگاه میدان‌الکتریکی (E) بر حسب نیوتن بر کولمب (N/C) که معادل ولت بر متر است خواهد بود.

در مباحث میدان‌های الکترواستاتیک، مقدار انتگرال خطی $\int_1^2 \vec{Edl}$ بستگی به مسیر نداشته و تنها به ابتدا و انتهای مسیر(نقاط ۱و۲) وابسته است. لذا برای نمایش میدان‌های الکترواستاتیک، علاوه بر میدان برداری $\vec{E}$ می‌توان از یک میدان اسکالر استفاده نمود. این میدان غیربرداری را پتانسیل می‌نامند. به هر نقطه از میدان الکترواستاتیک، منحصراً یک پتانسیل نسبت داده می‌شود که مقدار آن برابر کار انجام شده توسط بار الکتریکی واحد مثبت است که از این نقطه حرکت کرده و به نقطه مبنای P_O با پتانسیل صفر برسد[۲۲].

در ولتاژ فشارقوی، پتانسیل زمین غالباً صفر فرض شده و پتانسیل نقاط دیگر نسبت به آن سنجیده می‌شود. البته پتانسیل زمین نسبت به نقاط خیلی دور صفر نیست و مبنا قراردادن آن بدان دلیل است که معمولاً اختلاف پتانسیل نسبت به زمین و یا دو نقطه نسبت به هم اهمیت دارد و مبنا قراردادن هر نقطه ای برای به دست آوردن اختلاف پتانسیل مجاز است. اختلاف پتانسیل بین دو نقطه‌ی P_1 و P_2 با پتانسیل‌های V_1 و V_2 یعنی:

$$V_1 - V_2 = \int_1^\infty \vec{Edl} + \int_\infty^2 \vec{Edl} = \int_1^2 \vec{Edl} \qquad (۲)$$

را ولتاژ یا اختلاف پتانسیل دو نقطه ی P_1 و P_2 می‌نامند. با توجه به رابطه‌ی(۲) واحد شدت میدان الکتریکی، ولت بر متر می‌باشد.

اگر کلیه نقاط را که دارای پتانسیل برابر می‌باشند به یکدیگر وصل کنیم، سطوحی به دست می‌آید که به آنها سطوح هم پتانسیل[۱] اطلاق می‌شود. اگر ولتاژ به مقدار بسیار کمی تغییر کند، یک سطح هم پتانسیل دیگر نزدیک به سطح اول به دست می‌آید[۲۲].

فرم دیفرانسیلی رابطه (۲) را به‌صورت زیر می‌توان نوشت:

$$E + \nabla V = 0 \qquad (۳)$$

چگالی شار الکتریکی D را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$D - \epsilon E = 0 \qquad (۴)$$

در رابطه بالا $\mathcal{E}$ ضریب نفوذپذیری الکتریکی ماده می‌باشد. همچنین با استفاده از قضیه دیورژانس می‌توان فرم دیفرانسیلی قانون گوس را به‌صورت زیر نوشت:

$$\nabla D = \rho_v \qquad (۵)$$

از ترکیب معادلات (۳)، (۴)، (۵) و همچنین اگر $\mathcal{E}$ثابت فرض شود ، معادله پواسن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\nabla^2 V + \frac{\rho_v}{\epsilon} = 0 \qquad (۶)$$

همچنین در مسائلی که هدایت الکتریکی نیز مطرح باشد، طبق رابطه $\nabla . J = -\partial\rho_V/\partial t$ و همچنین $J = \sigma E$ معادله پتانسیل پواسن به صورت زیر در می‌آید:

$$\nabla^2 V + \frac{1}{\sigma}\frac{\partial \rho_V}{\partial t} = 0 \qquad (۷)$$

به‌طوریکه ρ_v , J و σبه ترتیب چگالی حجمی بار، چگالی جریان و هدایت الکتریکی ویژه می‌باشند.

۴-۱ – روش‌های تحلیل محاسبه پتانسیل و میدان الکتریکی

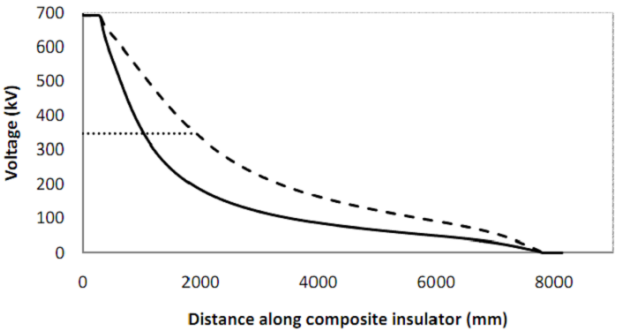
به‌طور کلی محاسبه میدان‌های ساکن با استفاده از روش‌های نظری تنها برای میدان‌های همگن میسر است و به کمک روابط دقیق ریاضی نمی‌توان محاسبه میدان‌های الکتریکی ناهمگن را که دارای اشکال هندسی غیرمتقارن و پیچیده هستند، انجام داد. با اختراع رایانه و پیشرفت روزافزون آن، استفاده از روش‌های عددی برای محاسبه چنین میدان‌هایی به روش‌های پیشین برتری یافت. روش‌های عددی معمول به دو دسته، روش‌های دامنه‌ای[۲] و روش‌های مرزی[۳] تقسیم می‌شوند. در روش‌های دامنه‌ای از معادلات دیفرانسیلی و در روش‌های مرزی از معادلات انتگرالی برای حل معادلات مشتقات جزئی حاکم بر سیستم استفاده می‌شود. روش بارهای فرضی (CSM)[۴] و روش المان مرزی (BEM)[۵]جزء روش‌های مرزی محسوب می‌شوند، درحالی‌که روش‌های دامنه‌ای به دو دسته، روش تفاضل محدود(FDM)[۶] و روش المان محدود

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

(FEM)[۷] تقسیم می‌شوند. در این مقاله از نرم‌افزاری که مبتنی بر روش المان محدود می‌باشد برای حل معادلات میدان و پتانسیل حاکم بر سیستم استفاده شده است. حال در زیر به صورت اختصار برخی از این روش‌ها بررسی شده است. برای مطالعه مفصل این روش ها می‌توان به مرجع [۲۳] مراجعه نمود.

۱-۱-۴- روش بارهای فرضی(CSM)

این روش ، بر این اساس استوار است که بارهای الکتریکی سطحی روی الکترودها با فصل مشترک دو عایق، توسط یک مجموعه از بارهای الکتریکی فرضی که خارج از حوزه میدان یا روی مرز قرار دارند، جانشین می‌شود. به‌همین علت به این روش "روش مولدهای جانشین" نیز می‌گویند. مقادیر این بارهای فرضی باید به گونه‌ای باشد که شرایط مرزی را برقرارنماید. با داشتن موقعیت و مقادیر این بارها می‌توان مقدار تقریبی پتانسیل و اندازه میدان را برای هر نقطه از مختصات به‌دست آورد. در مراجع [۲۲ و ۲۵-۲۴] از روش CSM برای شبیه‌سازی میدان الکتریکی و ولتاژ روی زنجیره و اطراف آن استفاده شده است. شکل(۴) توزیع ولتاژ برای مقره کامپوزیت در خط1200kV با و بدون حضور حلقه کرونا با استفاده از نرم افزار COULOMB را نشان می‌دهد [۲۲].

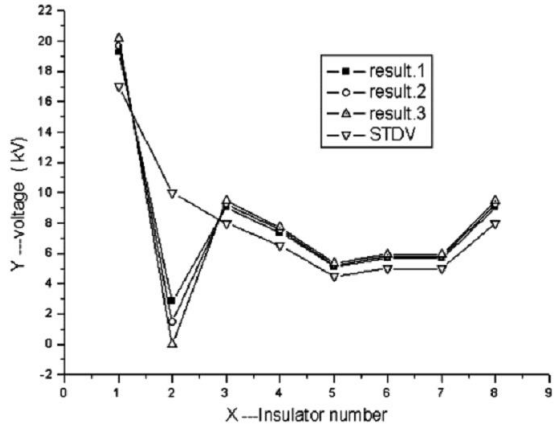


شکل(۴): توزیع ولتاژ در طول مقره کامپوزیت برای خط1200kV با و بدون حضور حلقه کرونا[۲۲]

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با حضور حلقه کرونا توزیع ولتاژ متعادل‌تر شده است. این امر نشان می‌دهد می‌توان برای کاهش تنش الکتریکی بر مقره کامپوزیت از حلقه کرونا استفاده نمود.

در مرجع [۲۴] ابتدا به صورت عملی در چند نقطه اندازه میدان الکتریکی در اطراف زنجیره مقره بدست می‌آید، سپس با استفاده از این میدان‌های حاصله، در نرم‌افزاری مبتنی بر روش CSM توزیع ولتاژ واقعی در طول زنجیره مقره محاسبه می‌شود. درنهایت با مقایسه نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار و توزیع ولتاژ استاندارد زنجیره مقره در آن سطح ولتاژ، مکان مقره معیوب مشخص می‌شود.

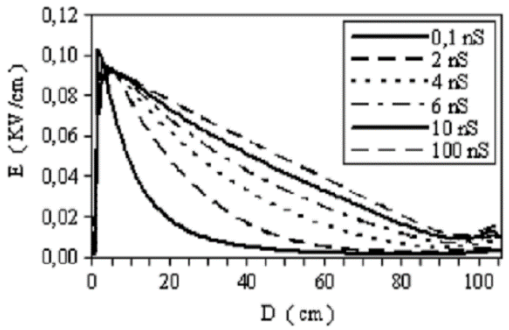
شکل(۵) مقایسه توزیع ولتاژ به‌دست‌آمده و استاندارد را برای زنجیره مقره110kVنشان می‌دهد. باتوجه به شکل مقره شماره ۲ معیوب می-باشد، که بایستی تعویض گردد[۲۴].



شکل(۵): توزیع ولتاژ واقعی و استاندارد برای زنجیره مقره مورد تست[۲۴]

۱-۴- ۲- روش المان مرزی(BEM)

در روش المان مرزی پتانسیل سطحی الکترودها و بار سطحی بین عایق‌ها با یک منبع بار سطحی که مقدار و مکان این منبع بتواند شرایط مرزی را ارضا کند مدل می‌شوند. در این روش نیازی به مش بندی سه بعدی نیست و فقط سطوح عایقی یا الکترودها مش‌بندی می‌شوند. در [۲۶] ولتاژ و میدان الکتریکی در طول خطی نزدیک به مقره ایستائی با استفاده از نرم‌افزاری براساس روش المان مرزی محاسبه شده است. همچنین آلودگی با قرار دادن لایه نازک روی سطح مقره با هدایت سطحی مختلف مدل شده‌است. در این مقاله نشان داده شده است که هر چه میزان هدایت آلودگی افزایش یابد میدان الکتریکی ماکزیموم کاهش و توزیع پتانسیل یکنواخت‌تر می‌گردد. شکل(۶) توزیع میدان الکتریکی را در خطی موازی با مقره چینی ایستایی برای آلودگی سطحی مختلف نشان می‌دهد[۲۶].



شکل(۶): توزیع میدان الکتریکی در اطراف مقره چینی ایستایی با میزان مختلف آلودگی سطحی[۲۶]

۱-۴-۳- روش تفاضل محدود(FDM)

این روش، آسان‌ترین و سریع‌ترین روش برای محاسبه عددی میدان الکتریکی می‌باشد. در این روش، معادلات دیفرانسیل لاپلاس یا پواسن با استفاده از بسط تیلور به معادلات خطی ساده‌ای تبدیل می‌شود. حل این معادلات ، به منزله تعیین پتانسیل الکتریکی می‌باشد و چون در ناحیه مورد نظر،پتانسیل، کمیتی پیوسته است، بنابراین ابتدا با استفاده از گسسته‌سازی و تقسیم ناحیه مورد نظر به شبکه‌های منظمی(همچون

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

مربع یا مثلث) سعی می‌شود تا گره‌های حاصله (نقاط ناشی از تلاقی خطوط عمودی و افقی شبکه) بر روی کمیات معین میدان قرار گیرد. یکی از فنون حل میدان در مواقعی که تعداد نقاط(مجهول) زیاد باشد، استفاده از روش تکرار می‌باشد. در این روش، ابتدا پتانسیل تمام نقاط مجهول شبکه به طور معقول تخمین زده می‌شود. سپس یکی از این نقاط را انتخاب نموده و با استفاده از یکی از دو رابطه ذیل، پتانسیل آن مجدداً محاسبه می‌شود.

$$V_0 = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4} V_i \qquad V_0 = \frac{1}{4}\sum_{i=5}^{8} V_i \qquad (۸)$$

همین کار را برای پتانسیل دیگر نقاط مجهول که مقدار اولیه آنها تخمین زده داده شده انجام میشود.این روش تا چند مرتبه تکرار می‌شود تا جواب های صحیح حاصل شود. در این روش، معمولا پس از چند مرحله تکرار، جواب ها به همگرایی می‌رسند[۲۷].

۴-۱-۴- روش المان محدود(FEM)

در این روش که درسال‌های اخیر، گسترش چشمگیری داشته است همانند روش تفاضل محدود، الکترود موردنظر به شبکه‌ای از اشکال منظم تقسیم می‌شود. برای میدان‌های دوبعدی، شبکه‌ای از مثلث‌ها و برای میدان‌های سه‌بعدی، شبکه‌ای از هرم‌ها درنظرگرفته می‌شود، اما برخلاف روش تفاضل محدود (که این تقسیم‌بندی یکنواخت بود) در روش اجزای محدود، این شبکه برحسب اینکه در کدام قسمت، تغییرات پتانسیل بیشتر باشد، تغییرمی‌کند. در هرقسمت که تغییرات پتانسیل زیاد باشد شبکه به مثلث‌های کوچکتری تقسیم می‌شود و در هرمکانی که تغییرات پتانسیل کم باشد، اندازه مثلث‌ها بزرگ‌تر انتخاب می‌شود[۲۷].

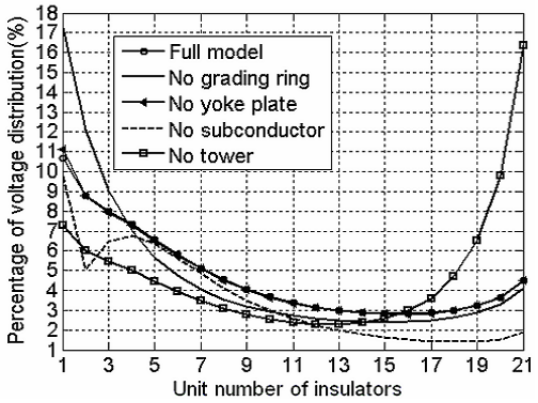
اساس این روش بر این اصل استوار است که استقرار بارهای روی الکترودها، به ترتیبی هستند که انرژی ذخیره شده در میدان بکنواخت بین الکترودها به حداقل برسد. اگر Vمقدار پتانسیل را بیان کند، آنگاه انرژی ذخیره شده در میدان(W_E) طبق رابطه زیر خواهد بود.

$$W_E = \frac{1}{2}\int_v^1 \varepsilon_0\varepsilon_r|\nabla V|^2 dv \qquad (۹)$$

$$W_E = \frac{1}{2}\int_v^1 \varepsilon_0\varepsilon_r E^2 dv \qquad (۱۰)$$

در این رابطه، ε_0 ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی هوا(خلاء)، ε_r ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی جسم عابق، E شدت میدان الکتریکی، dv المان حجم در میدان(هرم های موجود در شبکه) است. از نظر ریاضی رابطه لاپلاس، با اصل حداقل شدن انرژی هم ارز است. یعنی اگر توزیع پتانسیل به طریقی باشد که انرژی به حداقل برسد، آنگاه در رابطه لاپلاس نیز صادق است. به عبارت دیگر، اگر توزیع پتانسیل به طریقی باشد که در رابطه لاپلاس صدق کند، آنگاه انرژی آن به حداقل رسیده است. حال با فرض این که Vتابعی ساده و با ضرایب نامعین باشد، می توان Wرا بطور تقریبی بدست آورد و شرط حداقل شدن را بر حسب پتانسیل برقرار ساخت.

در مراجع [۲۸-۲۹] از نرم‌افزاری بر اساس روش المان محدود برای محاسبه ولتاژ و میدان الکتریکی در زنجیره مقره شیشه‌ای برای خط ۱۵۰کیلوولت استفاده شده است. نتایج نشان داده شده‌است که شدت میدان الکتریکی در اطراف مقره نزدیک به هادی و همچنین ولتاژ دو سر این مقره بیشترین مقدار را در زنجیره دارد. در [۳۰] توزیع ولتاژ و میدان الکتریکی روی زنجیره مقره شیشه‌ای با در نظر گرفتن ساختار دکل،یراق آلات زنجیره، هادی و حلقه کرونا مدل شده است، بطوریکه تاثیر هر کدام از این عوامل بر توزیع ولتاژ و میدان الکتریکی بررسی شده است. شکل(۷) تاثیر عوامل فوق رابر توزیع ولتاژ زنجیره مقره 330kVرا نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، حلقه کرونا و دکل تاثیر زیادی بر توزیع ولتاژ زنجیره دارند بطوریکه ولتاژ دو سر مقره نزدیک به هادی با حضور حلقه کرونا از ۱۷درصد به ۱۱درصد می‌رسد[۳۱].



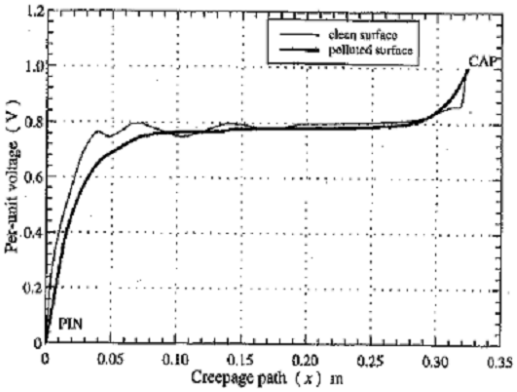
شکل(۷): توزیع ولتاژ زنجیره مقره با در نظر گرفتن اثر هادی ،یراق آلات ، دکل و حلقه کرونا[۲۷]

از آن‌جا که حلقه کرونا تاثیر بسزائی در بهبود توزیع ولتاژ و میدان الکتریکی زنجیره مقره دارد، در مرجع [۳۲] ابعاد حلقه کرونا با استفاده از نرم‌افزاری بر اساس روش المان محدود بهینه‌سازی شده است. مقادیر بهینه قطر میله، قطر حلقه و ارتفاع به‌عنوان پارامترهای مهم در عملکرد حلقه کرونا محاسبه‌شده‌اند. براساس شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در مرجع[۳۳]، پارامترهای فوق جهت یک زنجیره مقره دوبل شیشه‌ای خط 1000kV شامل ۵۲ واحد مقره، به‌ترتیب ۶۰، ۵۵۰ و ۳۵۰ میلی‌متر می‌باشد.

جهت بررسی آلودگی بر عملکرد مقره در [۳۴-۳۵] آلودگی محیطی روی سطح مقره به وسیله لایه نازکی لحاظ شده و توزیع ولتاژ و میدان الکتریکی روی سطح مقره محاسبه شده‌است. شکل(۸) توزیع ولتاژ روی سطح مقره آلوده را نشان می‌دهد[۳۶]. با توجه به شکل، توزیع ولتاژ با حضور آلودگی بر روی سطح مقره متعادل‌تر شده است.

همچنین در مرجع[۳۷] این نتیجه حاصل شده، که وجود باند خشک در لایه آلودگی سبب می‌شود که میدان الکتریکی ولتاژ دو سر باند خشک بیشتر از سایر نقاط گردد که این امر موجب شروع تخلیه جزئی روی سطح مقره می‌گردد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



شکل(۸): توزیع ولتاژ بر روی مقره تمیز و آلوده[۳۳]

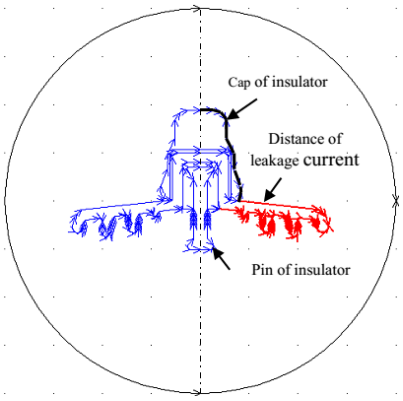
۵- شبیه‌سازی در محیط COMSOL

Comsol Multiphysics یک محیط تعاملی قدرتمند برای مدل‌سازی و حل انواع مشکلات علمی و مهندسی است. با استفاده از این نرم‌افزار بر اساس معادلات دیفرانسیل جزئی(PDEs)، می توان به راحتی مدل‌های معمولی را برای یک نوع مدل فیزیک به مدل‌های فیزیکی که پدیده‌های فیزیک را حل می‌کند، گسترش داد. ساختن این مدل‌ها با تعیین مقادیر فیزیکی مانند خصوصیات مواد، بارها، محدودیت‌ها و غیره با تعریف معادلات اساسی امکان پذیر است. همیشه می‌توان این متغیرها، عبارات یا اعداد را به طور مستقیم در دامنه‌های جامدات، مرزها، لبه ها و نقاط مستقل از شبکه محاسباتی به کار گرفت[۳۸]. در این کار هر ماده(شیشه، پرتلند، هوا و سیمان)(شکل ۱۰(الف)) با میزان مجاز بودن و هدایت آن تعریف می‌شود(جدول ۲). سپس COMSOL مجموعه از PDEs را ارائه می‌دهد که کل مدل را نمایندگی می‌کند و از طریق یک رابط کاربر گرافیکی انعطاف‌پذیر یا با برنامه نویسی به زبان Comsol Script می‌توان به قدرت COMSOL دسترسی پیدا کرد.

عایق‌های پین و درپوش چهار جزء اصلی دارند. آنها از یک بلوک عایق که یک درپوش بسته شده از قسمت فوقانی که درون یک ساقه استیل آن را حمل می کند تشکیل شده است. همچنین دارای شیارهایی است که سر مخروطی آن در انتهای پایینی شیشه بسته شده و دارای ابعادی است که درپوش آن توسط یک پین در آنجا نگهداری می‌شود.

در این قسمت عایق ساخته شده از مواد شیشه‌ای برای ابعاد شبیه‌سازی عایق ۲۲۰ کیلوولت در نظر گرفته شده است. شکل و جدول ۱ پارامترهای واقعی عایق مورد استفاده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مدل FEM عایق واقعی در شکل۹ نشان داده شده است.

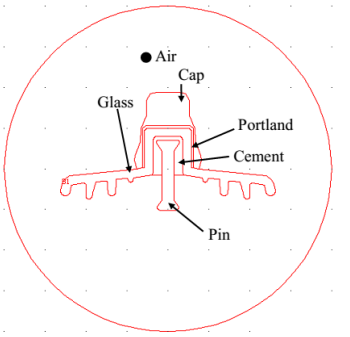
در اینجا میدان الکتریکی و توزیع پتانسیلی از عایق شیشه‌ای در دو حالت مختلف بررسی می شود اول در مدل تمیز و دوم تحت آلودگی ناپیوسته برای رسانه‌های مختلف، خصوصیات مواد حوزه‌های مختلف عایق(درپوش، پین، شیشه و...) در جدول ۲ نشان داده شده است[۴۰-۳۹].



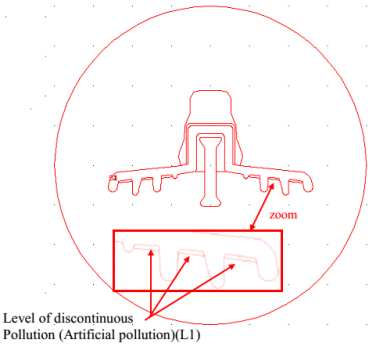
شکل (۹) : پارامترهای عایق درپوش و پین[۳۸]

جدول (۱) : پارامتر هندسی عایق درپوش و پین[۳۸]

مولفه ها	اندازه (mm)
فاصله جریان نشت	۲۹۲
درپوش عایق	۲۴۴
پین عایق	۱۲۵



(الف)



(ب)

شکل (۱۰) : مدل FEM در نرم‌افزار مقره ۲۲۰ کیلوولت (الف) مدل تمیز ، (ب) مدل آلوده یکنواخت ناپیوسته[۳۹-۴۰]

جدول (۲) : خواص مواد عایق درپوش و پین[۳۸]

خصوصیات	درپوش و پین	شیشه	سیمان و پورتلند	هوا	آلودگی مصنوعی
گذردهی نسبی(ε_r)	10^6	۶	۵	۱.۰۰۰۵	۸۰
رسانایی($\mu s/cm$)	10^6	1×10^{-12}	1×10^{-12}	1×10^{-14}	۰.۷۰،۷۰۰،۱۲۰۰ ۳۰۰۰

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

۶- مدل ریاضی

یکی از مشکلاتی که الکتروستاتیک در نظر می‌گیرد رفتار شدت میدان الکتریکیE و چگالی شار الکتریکیD می‌باشد. دو شرط وجود دارد که مقادیر فوق باید از آن پیروی کنند:

شرط اول معادله دیفرانسیل قانون گاوس است که بیان می‌کند شار در هر حجم بسته برابر است با شارژ موجود در حجم[۴۱-۴۲]. معادلات اساسی مورد استفاده برای محاسبه پتانسیل(میدان الکتریکی) معادلات ماکسول است:

برای مدل الکتروستاتیک موارد زیر از معادلات استفاده می‌شود:

$$div\,\vec{D} = \rho \quad (۱۱)$$

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} \quad (۱۲)$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V \quad (۱۳)$$

ترکیبی از این سه معادله:

$$div\,\varepsilon(-grad\,V) = \rho \quad (۱۴)$$

$$div\,\varepsilon\overrightarrow{grad}V = \rho \quad (۱۵)$$

عبارات (۱۴ و ۱۵) معادلات پواسن نامیده می‌شود. همچنین می‌توان معادله لاپلاس را با انجام فضای شارژ به دست آورد $\rho = 0$.

شرط دوم بیان می‌کند در تجهیزات با ولتاژ بالا، فضای شارژ موجود نیست یا ناچیز است$(\rho = 0)$ بنابراین معادله‌ای که برای رسانه‌های دی‌الکتریک می‌توان نوشت[۴۳]:

$$div\,\varepsilon(-\overrightarrow{grad}V) = 0 \quad (۱۶)$$

این معادله(۱۶)، توزیع ولتاژ(پتانسیل) V بر روی یک دامنه تعریف شده توسط کاربر و شرایط مرزی را حل می‌کند.

برای هدایت رسانا در حالت ثابت

$$div\,\vec{j} = 0 et\,\vec{j} = \sigma\vec{E} \quad (۱۷)$$

از آنجا که:

$$div\,(\sigma(-\overrightarrow{grad}V) = 0 \quad (۱۸)$$

معادله مکان در مختصات دکارتی است.

$$div\,\overrightarrow{grad} = \frac{\partial^2 V}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 V}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 V}{\partial^2 z} \quad (۱۹)$$

نرم افزار، محاسبه پتانسیل الکتریکی را برای به دست آوردن توزیع میدان با حل معادله دیفرانسیل جزئی در دو بعد تعیین می‌کند[۴۴]:

$$-div\,\varepsilon\,\overrightarrow{grad}\,V - div\,\sigma\,\overrightarrow{grad}\,V = 0 \quad (۲۰)$$

مراحل شبیه‌سازی در Comsol Multiphysics را می توان در چهار مرحله خلاصه کرد:

- اولین مرحله معرفی هندسه دوبعدی(2D) یا سه‌بعدی (3D) عایق به نرم‌افزار Comsol است.
- مرحله دوم مربوط به تعریف خصوصیات الکتریکی مواد مورد استفاده است. این شامل تعریفی از گذردهی نسبیε و رسانایی‌σ برای هر قسمت از عایق است. همچنین لازم است که شرایط مرزی به پتانسیل تحمیل شده بر روی هر الکترود تعریف شود.
- مرحله سوم با استفاده از روش عددی و ساخت سیستم معادلات، به حل مسئله اختصاص یافته است.

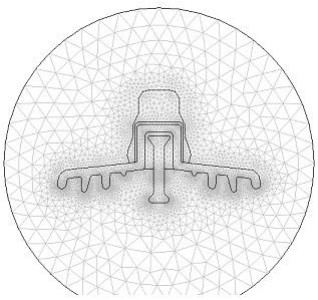
$$-div\,\varepsilon\,\overrightarrow{grad}\,V - div\,\sigma\,\overrightarrow{grad}\,V = 0$$

- مرحله آخر حل مسئله و نمایش نتایج شبیه‌سازی به عنوان توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی است.

۷- نتایج و بحث

توزیع میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل عمدتاً به ولتاژ کاربردی، خصوصیات مواد مورد استفاده در عایق و شرایط محیطی بستگی دارد. اثر آلایندگی نقش مهمی در تعیین توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در طول عایق ایفا می‌کند. برای تخریب این اثر از چندین مقدار رسانایی لایه آلودگی استفاده می‌شود. در حالت مرجع عایق تمیز معرفی شده و فرض می‌شود که روش المان های محدود به بهترین‌وجه با محدودیت‌های تحمیل شده مناسب هستند. این روش با موفقیت در محاسبه میدان الکتریکی و توزیع پتانسیلی در اطراف عایق ها به کار گرفته شده است. مدل مذکور با مشخصات کلی در جدول۲ ارائه شده است. با توجه به پیچیدگی مدل واقعی، ابتدا در نرم‌افزارFEMM ترسیم شده، سپس آن را در نرم‌افزار Comsol فراخوانی می‌کنند[۴۵].

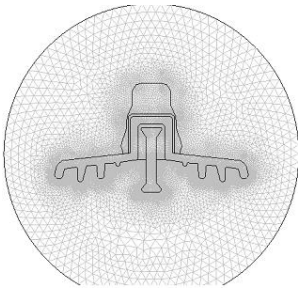
تراکم مش در مناطق بحرانی عایق بالاتر و همچنین به دقت بیشتری نیاز می‌باشد. نتایج عددی برای مش‌بندی های مختلف در شکل۱۱ ارائه شده است. در واقع نوع مش‌بندی بر اساس تعداد عناصر تغییر یافته است. بنابراین دو مش آزمایش شده است. مورد اول مربوط به شبکه درشت است که از ۱۵۶۶۸عنصر تشکیل شده است(شکل۱۱ (الف)). مورد دوم با ۶۲۶۷۲ عنصر(شکل۱۱ (ب)). محاسبه زمان مربوطه و تعداد گره‌ها و مشخصات کلیه مشبک‌ها (مش‌بندی) در جدول ۳ ارائه شده است[۴۵-۴۷].



(الف): 15668 elements

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021



(ب) : 62672 elements

شکل (۱۱) : گسسته‌سازی عناصر محدود و تعیی‌ن مش‌بندی علی‌ق[۴۵]

جدول(۳) : مشخصه مش‌بندی[۴۵]

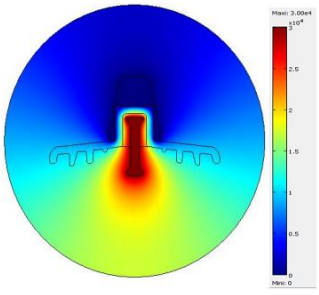
محاسبه زمان(s)	نسبت سطح عنصر	حداقل کیفیت عنصر	عناصر راس	تعداد عناصر مرزی	تعداد گره ها	تعداد درجات آزاد شده		
۳,۰۲۵	3.41×10^{-6}	۰,۷۱۴۳	۲۰۸	۹۱۲	۷۸۶۰	۶۲۷۷۴	۱۵۶۶۸	تعداد عناصر
۷,۲۸۵	3.41×10^{-6}	۰,۷۱۴۳	۲۰۸	۱۸۲۴	۳۱۳۸۷	۲۵۰۸۹۰	۶۲۶۷۲	تعداد عناصر پس از تصحیح اول

۱-۷- توزیع پتانسیل الکتریکی

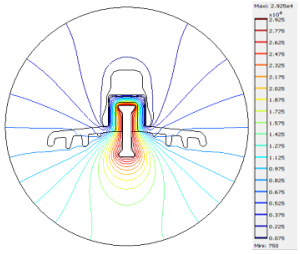
امروزه در سیستم‌های قدرت، برای افزایش انتقال توان و از طرفی کاهش تلفات در شبکه، به ناچار ولتاژ باید افزایش پیدا کند . این مسئله سبب پیچیده‌تر شدن استاندارد مربوط به ایمنی و دیگر شاخص های فنی و اقتصادی تجهیزات مورد استفاده در شبکه می‌گردد. از آن جایی که مقره‌ها تحت تنش های الکتریکی مختلفی قرار دارند، لذا جهت بررسی تاثیر ولتاژ فشارقوی بر عملکرد مقره های خطوط انتقال، محاسبه توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در شرایط کاری مختلف ضروری می‌باشد. محاسبه توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی ملزم به حل معادلات ماکسول می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌های شکل تجهیزات، استفاده از روش‌های تحلیلی برای حل این معادلات غیرممکن می‌باشد. لذا استفاده از روش‌های حل عددی ناگزیر به نظر می‌رسد. حجم بسیار بالای محاسبات در روش های حل عددی دوبعدی و سه‌بعدی، استفاده از برنامه‌های کامپیوتری و نرم‌افزارهای تجاری را ضروری می‌کند[۴۸].

۱-۱-۷- تأثیر رسانایی‌ها

مقادیر رسانایی σ = 0,70,700,1200,3000µs/cm در نظر گرفته می‌شود. ولتاژ اعمال شده خط نیز تا 30kV ثابت فرض شده که به شبیه‌سازی رفتار عایق های ولتاژ بالا(220kV) کمک می‌کند. شکل‌های۱۲ ، ۱۳ و ۱۴ پتانسیل و توزیع پتانسیل الکتریکی و همچنین تغییر پتانسیل در طول جریان نشت را به ترتیب برای رسانایی‌های مختلف نشان می‌دهد[۴۹-۵۱].

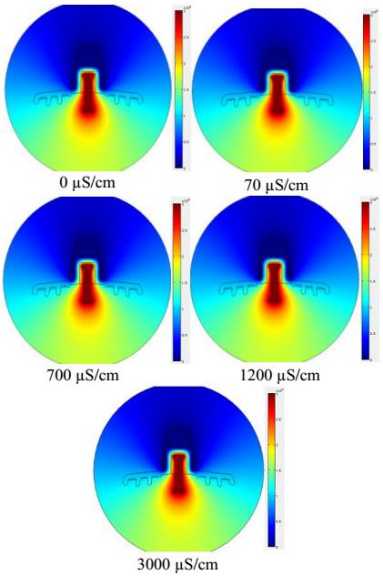


(الف)



(ب)

شکل (۱۲) : توزیع پتانسیل و خطوط تعادلی (در مدل تمیز)[۴۹-۵۰]



شکل (۱۳) : توزیع پتانسیل الکتریکی برای رسانایی‌های مختلف[۴۹]

این پتانسیل برای الکترود ولتاژ بالا قابل توجه بوده و با دورشدن از الکترود زمین کاهش می‌یابد. در مورد مدل تمیز و آلوده، حداکثر مقدار ولتاژ ۳۰ کیلوولت است که در اطراف الکترود فعال نشان داده شده است، و پس از دور شدن این الکترود به الکترود زمینی که حذف پتانسیل را به‌دنبال‌دارد، به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. برای :

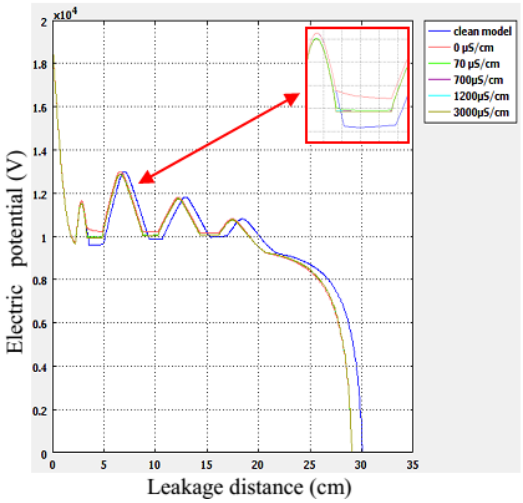
σ= 0,70,700,1200,3000µs/cm

منحنی‌های پتانسیل در حالت تمیز اشتباه گرفته می‌شوند. این نشان می‌دهد که تغییر رسانایی لایه آلوده هیچ تأثیری روی پتانسیل در طول

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

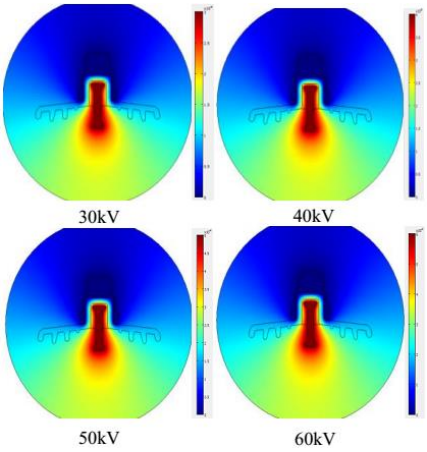
نشت روی عایق ندارد. همچنین در مقایسه پتانسیل‌های به دست آمده برای دو عایق تمیز و آلوده، هیچ تفاوتی مشاهده نشده است[۵۰].



شکل (۱۴) : فاصله نشت پتانسیل الکتریکی برای رسانایی‌های مختلف[۴۹-۵۰]

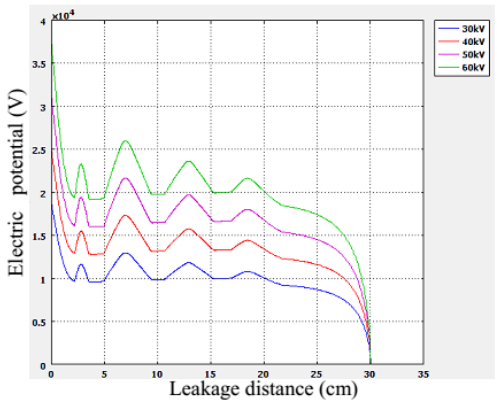
۲-۱-۷- تأثیر ولتاژ اعمال شده

در شکل۱۵ توزیع پتانسیل برای ولتاژهای کاربردی مختلف ارائه شده است. این نشان می‌دهد که فقط مقادیر تغییر ولتاژ کاربردی تغییر می‌کنند اما همان شکل همچنان باقی می‌ماند. با توجه به اینکه درپوش و پین قطعات فلزی هستند، ولتاژ اعمال شده به سطح آنها نیز ثابت (الکترود فعال(HV) و الکترود زمین) می‌باشد. تغییرات پتانسیل به فاصله نشت برای ولتاژ کاربردی مختلف بستگی دارد.



شکل (۱۵) : توزیع پتانسیل الکتریکی برای ولتاژهای اعمال شده مختلف[۵۱]

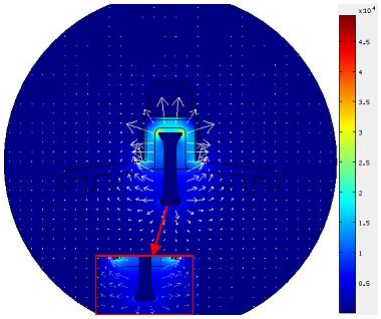
در شکل ۱۶ چهار سطح ولتاژ کاربردی در نظر گرفته می‌شود. نشان می‌دهد که عملکرد ولتاژهای اعمال شده، در طول فاصله نشت توزیع می‌شود. سه منحنی به‌طور مساوی از سه ناحیه عبور می‌کنند که پتانسیل ثابت بماند. این مربوط به قسمت‌های فلزی عایق است[۵۲-۵۱].



شکل (۱۶) : فاصله نشت پتانسیل الکتریکی برای ولتاژهای اعمال شده مختلف[۵۱]

۲-۷- توزیع میدان الکتریکی

توزیع میدان الکتریکی توسط بسیاری از محققان بررسی شده است[۲، ۴، ۱۰-۴۰، ۳۷-۴۱، ۴۶-۴۸ و ۵۲]. در شکل۱۷ عایق مدل تمیز نشان داده‌شده‌است. در دوالکترود(الکترود های فعال و زمین) میدان الکتریکی عملاً صفر است، زیرا دو الکترود رسانا هستند، بردارهای میدان‌های الکتریکی از الکترود فعال به الکترود زمین ظهور می‌کنند. بردارهایی که در شکل۱۷ نشان داده شده مماس هستند. این بیان می‌کند که میدان-های الکتریکی با ابعاد داخلی الکترودها قابل تشخیص‌ترند[۵۳].



شکل (۱۷) : توزیع میدان الکتریکی برای یک مدل تمیز[۵۳]

۱-۲-۷- تأثیر رسانایی‌ها

برای ولتاژ ثابت۳۰ کیلوولت، شکل ۱۸ تغییرات شدت میدان الکتریکی در طول فاصله نشت عایق را برای رسانایی های مختلف نشان می‌دهد. شدت میدان الکتریکی به ویژه هنگام آلوده بودن مدل درپوش عایق بسیار زیاد است. بنابراین، میدان الکتریکی تحت تاثیر شرایط سطح عایق(آلوده و تمیز) قرار نمی‌گیرد.

این نشان می‌دهد که ظاهرا قوس الکتریکی قبل از فلاش‌اور شدن عایق در سطوح لایه‌های تمیز است. بنابراین، در لایه های تمیز روی سطح عایق میدان الکتریکی شدیدتر است. وقتی که خطوط میدان الکتریکی از الکترود فعال منحرف می‌شوند(از الکترودHV به انتهای عایق متمرکز می‌شوند و به سمت الکترود زمین همگرا می‌شوند) سیستم کمتر سخت

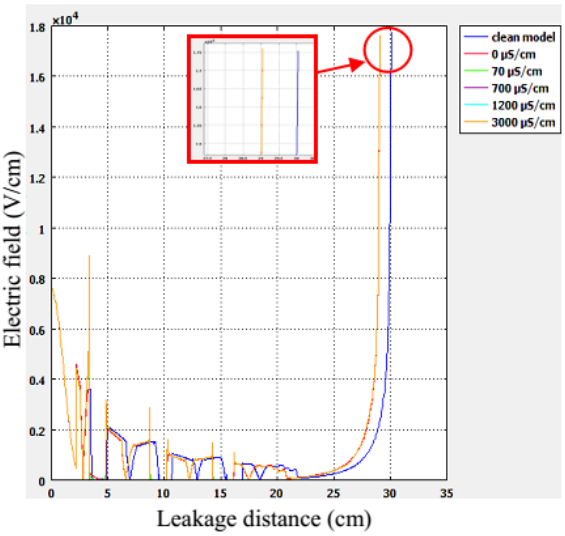
[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

و سفت می‌شود و هدایت سطح عایق افزایش می‌یابد. در نزدیکی الکترود فعال، میدان الکتریکی شدید است و با حرکت و دور شدن از الکترود فعال و نزدیکتر به الکترود زمین کاهش می‌یابد. همچنین خطوط میدان الکتریکی منحرف می‌شوند(از الکترودHV (فعال) به الکترود زمین). در مناطق تمیز در ناحیه نزدیک الکترود فعال، میدان الکتریکی مهم و تقریباً صفر است که در شکل۱۸(الف) نشان داده شده است . شکل۱۸(ب) مقیاس لگاریتمی که در ماده دی الکتریک ارائه شده را نشان می‌دهد، میدان‌های الکتریکی هرگز لغو نمی‌شوند، بلکه مقادیر نزدیک به صفر را می‌گیرند(میدان در عایق ناپدید نمی‌شود بلکه مقدار بسیار کمی می‌گیرد[۵۳-۵۴].

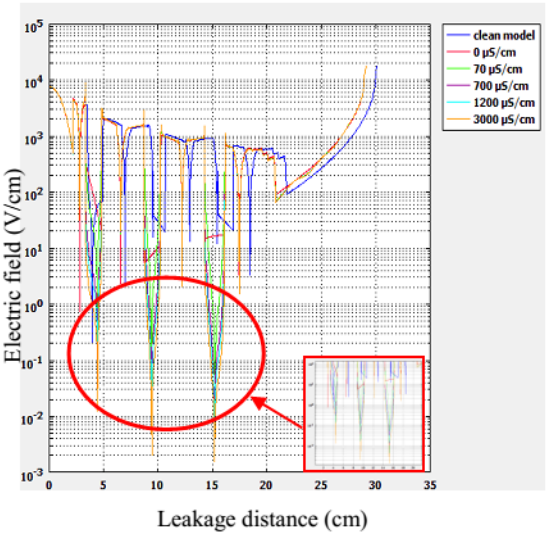
شکل۱۸(الف) توزیع میدان الکتریکی در فاصله نشت برای رسانایی‌های مختلف را بیان کرده و نشان‌می‌دهد میدان الکتریکی در نزدیکی الکترود فعال برجسته است و مقدار آن در مناطق تمیز تقریباً صفر می‌گیرد.

همچنین در مورد آلودگی نسبت به مدل تمیز به دلیل ایجاد لایه آلاینده در سطح عایق، کاهش ناچیزی در خط فاصله نشت مشاهده می‌شود. (شکل۱۸(ب)) همچنین نشان می‌دهد توزیع میدان الکتریکی در مقیاس لگاریتمی برای مناطق تمیز، هرگز از بین نمی‌رود بلکه نزدیک صفر است. در این حالت مقدار(مقیاس) لگاریتمی به خوبی نشان می‌دهد که در مواد دی الکتریک میدان الکتریکی هرگز آنالوگ نمی‌شود، اما مقادیر نزدیک به صفر را می‌گیرد[۵۴].

در غیر این صورت، شکل۱۹ نشان می‌دهد که رسانایی‌ها عملا هیچگونه دخالتی در توزیع میدان الکتریکی ندارند .

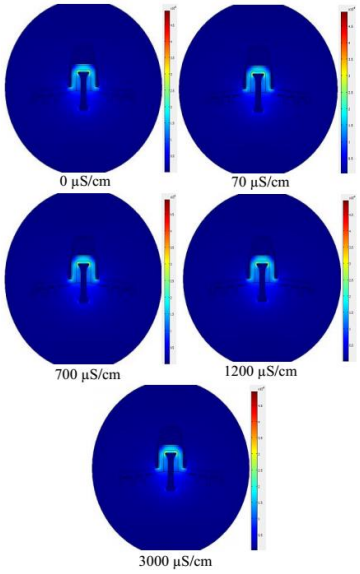


(الف) : مقیاس ساده



(ب) : مقیاس لگاریتمی

شکل (۱۸) : فاصله نشتی میدان الکتریکی برای رسانایی مختلف (الف) مقیاس ساده (ب) مقیاس لگاریتمی[۵۴]



شکل (۱۹) : توزیع میدان الکتریکی برای رسانایی‌های مختلف[۵۴]

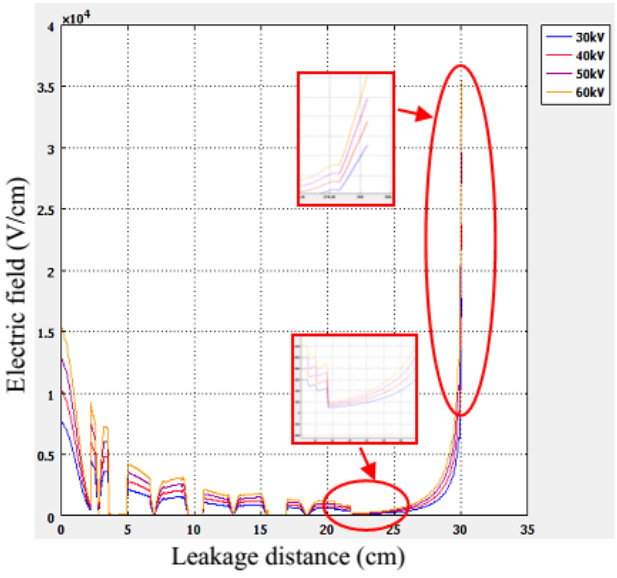
۲-۲-۷- تأثیر ولتاژ اعمال شده

برای یک مدل تمیز، در شکل۲۰ میدان الکتریکی در طول فاصله جریان نشتی برای ولتاژهای کاربردی مختلف(مقیاس لگاریتمی و ساده) ارائه شد. شکل۲۰ نشان می‌دهد که بسته به ولتاژ اعمال شده فقط مقادیر میدان الکتریکی تغییر می‌کند و همان شکل باقی می‌ماند. افزایش ولتاژ اعمال شده باعث افزایش شدت میدان الکتریکی می‌شود (شکل۱۲ (الف)). همچنین، عایق کمتر سفت و سخت می‌شود، همچنین در آزمایش ها نشان داده شد که افزایش ولتاژ اعمال شده باعث بوجود آمدن فلش‌اور عایق می‌شود[۵۵].

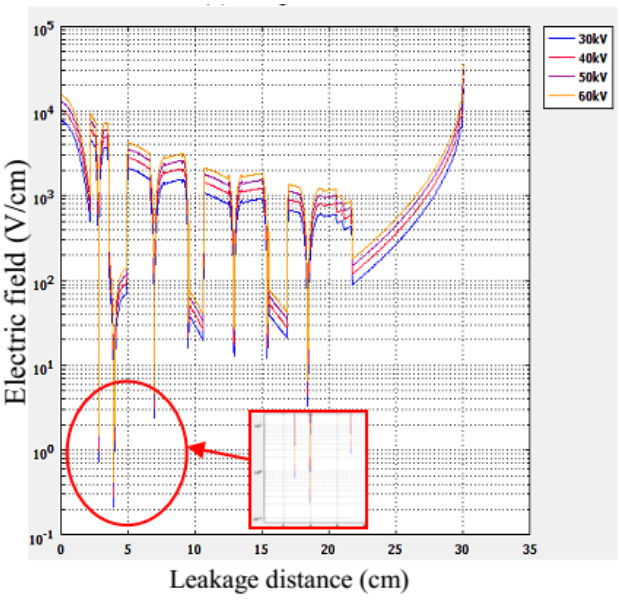
این نشان می دهد که میدان الکتریکی در قسمت انتهایی عایق(درپوش و پین) حداکثر مقدار را به دست خواهد آورد[۵۶].

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

اما در شکل۱۸ (ب) نشان داده شده که میدان الکتریکی هرگز در مواد دی‌الکتریک که ماده شیشه است از بین نمی‌رود. با این وجود هرچه ولتاژ اعمال شود، میدان الکتریکی مقدار بسیار کمی را نشان می‌دهد(شکل ۲۰ (ب)).



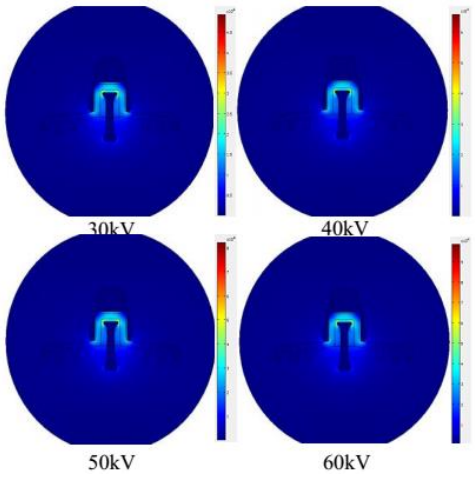
(الف) : مقیاس ساده



(ب) : مقیاس لگاریتمی

شکل (۲۰) : فاصله نشتی می‌دان الکتری‌کی برای ولتاژ اعمال شده مختلف[۵۶]

در شکل۲۱ توزیع میدان الکتریکی برای ولتاژهای کاربردی مختلف نشان داده شده است. یعنی افزایش ولتاژ اعمال شده منجر به افزایش شدت میدان الکتریکی می‌شود[۵۶-۵۷].



شکل (۲۱) : توزیع میدان الکتریکی برای ولتاژ های اعمال شده مختلف[۵۶]

۳-۲-۷- تأثیر عرض دنده عایق

در اینجا مدل را با همان شعاع و عملا به همان شکل و مدل واقعی، اما با توزیع بهتر میدان در نظر می‌گیرند. این باعث می‌شود که فرض شود مدل واقعی قابل بهبود است. سیستم پیشنهادی قبلاً توسط شکل و جدول ۱ ذکر شده است که در آن به ویژگی‌های آن اشاره شده است[۵۸].

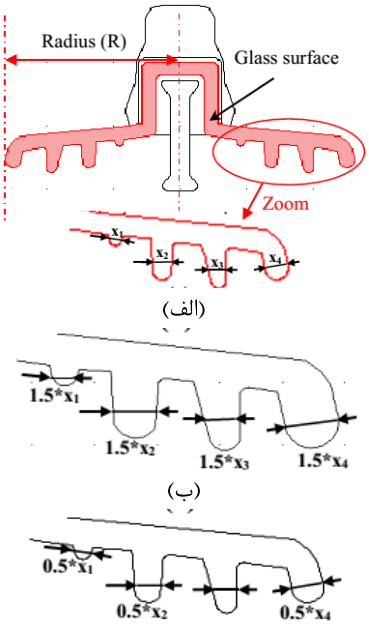
با تغییر هندسه عایق واقعی و تغییر طول فاصله نشت و حفظ همان شعاع(R) نتایج حاصل از میدان با نتایج حاصل از مدل واقعی مقایسه می‌شود. تاثیر عرض دنده($X_{1,2,3,4}$) از درپوش و پین عایق در توزیع میدان الکتریکی را در این مدل عایق در شکل۲۲ نشان می‌دهد[۵۹].

- **مدل واقعی** (الف): ابعاد(مدل) واقعی از درپوش و پین عایق با سطح $47.949cm^2$ را نشان می‌دهد.
- **مدل-۰۱** (ب) : افزایش عرض دنده‌ها به۱,۵ ازعرض واقعی آن، اما نگه داشتن همان شعاع(R) به عنوان مدل واقعی با سطح $53.873cm^2$.
- **مدل-۰۲** (ج) : کاهش عرض دنده‌ها به۰,۵ ازعرض واقعی آن، اما نگه داشتن همان شعاع (R) به عنوان مدل واقعی با سطح $42.7028cm^2$.
- تغییرات در مدل واقعی(شکل۲۲ الف، ب ، ج) و جدول۴ ایجاد شده است.

جدول (۴) : اندازه عرض دنده‌ها در مقره‌های HV پی‌شنهادی[۵۹].

مطالعه مدل	ابعاد	شعاع, R(cm)	سطح شیشه ای(cm^2)
مدل واقعی	x’’’=x =[x1, x2, x3 , x4] (fig. 15. -a-)	۱۳,۱	۴۷,۹۴۹
مدل-۰۱	x’=1.5*x=1.5* [x1, x2, x3 , x4] (fig. 15. -c-)	۱۳,۱	۵۳,۸۷۳
مدل-۰۲	x’’=0.5*x=0.5* [x1, x2, x3 , x4] (fig. 15. -b-)	۱۳,۱	۴۲,۷۰۲۸

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

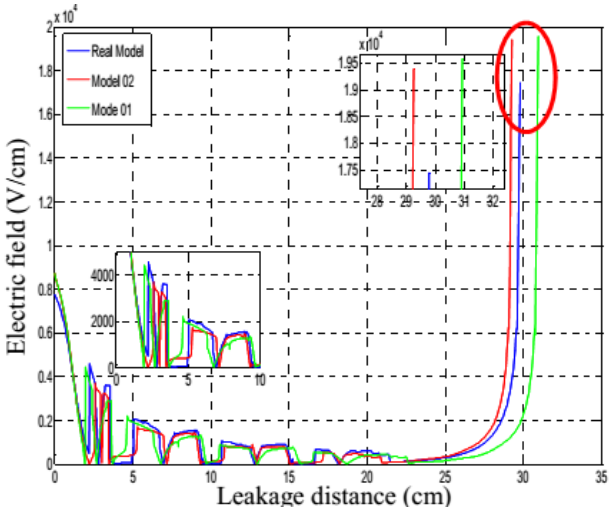


شکل (۲۲) : ابعاد دنده‌های عایق[۵۹].

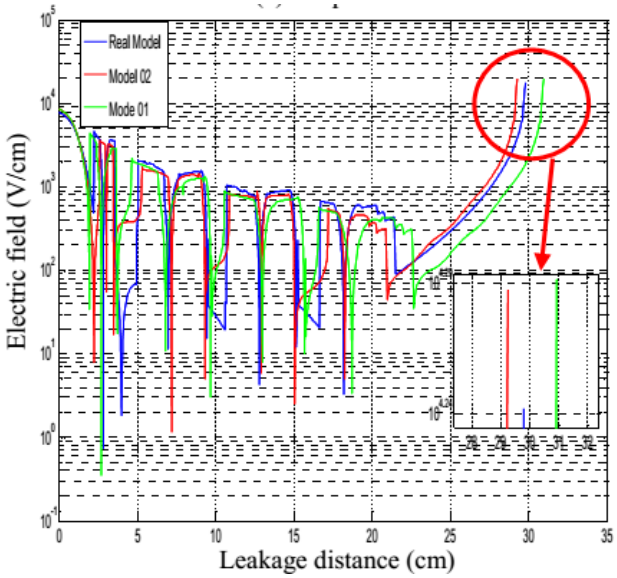
(الف) مدل واقعی ، (ب) مدل _۰۱ ، (ج) مدل_۰۲

شکل۲۳ ((الف) مقیاس ساده و (ب) مقیاس لگاریتمی) به ترتیب جزئی از میدان الکتریکی روی عایق در فاصله نشتی را برای سه مورد مطالعه (مدل واقعی، مدل-۰۱و مدل-۰۲) نشان می‌دهد (مدل‌های مندرج در جدول۴). نتایج ذکر شده در بالا نشان دهنده اهمیت و تاثیر شکل هندسی از عایق بر رفتار دی‌الکتریک است.مشاهده می‌شود که میدان الکتریکی بین درپوش و پین عایق در نوسان است. این نوسانات حداکثر های ظاهر قوس های موضعی روی سطح عایق را بیان می‌کند. همچنین می توان گفت که توزیع میدان در فاصله نشتی، همان تغییرات مدل واقعی با یک تغییر مکانی طول فاصله نشت را دنبال می‌کند[۵۹-۶۲].

به طور کلی شکل(فرم) توزیع برای همه مدلهای مورد مطالعه مشابه است. از نتایج انجام شده مشاهده می‌شود که مدل واقعی مدلی است که مقدار میدان الکتریکی به درپوش عایق واقعی را بهینه‌سازی می‌کند و در مقایسه با دو مدل دیگر بهینه است.



(الف) : مقیاس ساده



(ب) : مقیاس لگاریتمی

شکل (۲۳) : فاصله نشتی میدان الکتریکی برای سه مورد مطالعه شده[۵۹]

(مدل واقعی ، مدل_۰۱ ، مدل_۰۲). (الف) مقیاس ساده، (ب) مقیاس لگاریتمی

۸- نتیجه‌گیری

تحلیل توزیع میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل همراه با آلودگی درپوش و پین عایق با استفاده از روش Comsol Multiphysics بر اساس روش المان محدود (FEM)، برای پارامترهای مختلف الکترو هندسی مانند تاثیر رسانایی و ولتاژهای اعمال شده مورد مطالعه قرار گرفت.

همچنین نشان داده شد که حالت سطحی عایق در توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی تاثیر دارد و نه هدایت الکتریکی. در واقع توزیع پتانسیل تقریباً یکسان است زیرا همه عناصر عایق اختلاف پتانسیل بسیار نزدیک را دریافت می‌کنند. علاوه بر این، قطعات نزدیک الکترود فعال بیشتر در معرض محدودیت‌های الکتریکی، یعنی اختلاف پتانسیل و میدان الکتریکی قرار دارند. قطعات فلزی عایق (درپوش و پین)، همیشه دارای پتانسیل ثابت هستند.

مشاهده شد که پتانسیل و میدان الکتریکی با ولتاژ های اعمال شده(کاربردی) افزایش می‌یابد. با این حال، شکل میدان الکتریکی و پتانسیل یکسان هستند. به عبارت دیگر تفاوت در شدت توزیع میدان و توزیع پتانسیل است و در شکل نیست . همچنین نشان داده شد که افزایش پتانسیل و میدان الکتریکی، دامنه ولتاژ کاربردی را افزایش می‌دهد.

در شبیه‌سازی دو بعدی نشان داده شد که با افزایش میزان آلودگی سطحی مقره، توزیع ولتاژ و میدان الکتریکی متعادل تر شده است و حداکثر مقدار میدان الکتریکی هنگام آلوده کردن عایق به دست می‌آید(3000µs/cm).

از طرف دیگر، تاثیر وضعیت سطح و هدایت آلودگی در توزیع پتانسیل بسیار ناچیز است. مطالعه عملکرد یک عایق واقعی از این مزیت برخوردار

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

است که برای تجزیه و تحلیل خوب پدیده‌های فیزیکی، تمام پیچیدگی‌های مدل واقعی را در نظر می‌گیرد. اصلاح شکل هندسی عایق باعث افزایش میدان الکتریکی و سپس کاهش ولتاژ فلش‌اور می‌شود. سرانجام ، تأثیر Comsol Multiphysics برای محاسبه میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل نشان داده شده است.

مراجع

[1] SA. Bessedik and H. Hadi, *"Dynamic arc model of the flashover of the polluted insulators*", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. CEIDP. Cancun, pp. 550-554, Mexico 2011.

[2] H. Benguesmia,N. M'ziou and A. Boubakeur, *" Study of the pollution effect on the high voltage of the cap and pin(1512L) insulator using Comsol multiphysics*", The International Conference on Mechanics and Energy, (ICME2016-114), Hammamet, Tunisia,pp. 22-24, December 2016.

[3] SA Suflis, IF. Gonos, FV. Topalis and IA. Stathopulos, *"Study of the dielectric behaviour of non-uniformly polluted insulators*", XIII International symposium on high voltage engineering, Netherlands, pp.1-4, 2003.

[4] H. Terrab and A. Bayadi, *"Experimental study using design of experiment of pollution layer effect on insulator performance taking into account the presence of dry bands*", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21,No. 6,pp. 2486 – 2495,2014.

[5] H. Benguesmia,N. M'ziou and A. Boubakeur, *"AC Flashover: An Analysis with Influence of the Pollution, Potential and Electric Field Distribution on High Voltage Insulator*", International Conference Multiphysics Simulation for Systems Design, Sousse Tunisia,pp. 269-279, 17-19 December 2014.

[6] MT. Gencoglu and M. Cebeci, *"Computation of AC flashover voltage of polluted HV insulators using a dynamic arc model*", European Transactions On Electrical Power, Vol. 19,No. 5,pp. 689–701,2009.

[7] NS. Sunitha, KN. Ravi,R. Prakash and A. Pushpanjali, *" study on leakage current characteristics of polymeric insulator for diffrent pollution layers*", International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE), pp. 383–387, 2015.

[8] H. Mei, L. WangL and Z. Guan, *"Influence of sugar as a contaminant on outdoor insulation characteristics of insulators in a substation*", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 4, pp. 1318-1324,2012.

[9] Z. Aydogmus and M. Cebeci, *" A new flashover dynamic model of polluted HV insulators*", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation; Vol. 11, No. 4,pp. 577-584,2004.

[10] S.A. Bessedik, *"Contournement des isolateurs pollués*", Ph.D. thesis in Sciences, Department of Electrical Engineering, University of oran, Oran, Algeria, 28 juin 2015.

[11] C.Volat and M. Farzaneh, *"Three-dimensional modeling of potential and electric-field distributions along an EHV ceramic post insulator covered with ice-part i:simulations of a melting period*", IEEE Transactions on Power ; Vol. 20, No. 3, pp. 2006-2013,2013.

[12] J.Andrew, *"Electric fields on AC composite transmission line insulators*", IEEE Transactions on Power Delivery 2008; Vol. 23, No. 2, pp. 823–830, 2008.

[13] B. M'hamdi, M. Teguar and A. Mekhaldi, *"Potential and Electric Field Distributions on HV Insulators String Used in the 400 kV Novel Transmission Line in Algeria*", IEEE International Conference on Solid Dielectrics, (ICSD), Bologna, Italy, pp. 190-193, 2013.

[14] W. Sima, Q. Yang, C. Sun and F.Guo F, *"Potential and electric-field calculation along an ice-covered composite insulator with finite-element method*", IEE Proceedings-generation Transmission a Distribution 2006; Vol. 153, No. 3, pp. 343–349, 2006.

[15] Y.Z. Khan, A. A. Al-Arainy, N. H. Malik, and M. I. Qureshi, *" Effect of ThermoElectrical Stresses and Ultra-Violet Radiation on Polymeric Insulators.Final Research Report*", 2006.

[16] A. Philips, *"Ceramic vs. Polymer (Non-ceramic) Insulators*", EPRI, 2002.

[17] M.A. Janick, *"Insulators: composite vs. Porcelain*", Electrical word, Vol. 215, No. 3, pp.17-19, 2001.

[18] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, *"High Voltage Engineering Fundamentals*", Newnes publication. Second edition, 2000.

[19] E.İzgi, A. İnan and S.Ay, "*The Analysis and Simulation of Voltage Distribution over String Insulators Using Matlab/Simulink*", *Electric Power Components and Systems*, 2008.

[20] J.Gao and J.Geng, "*Research on Flashover Voltage of Composite Insulator with Wind Tunnel Test*", *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 2010.

[21] *Transmission and Distribution Committee"*, IEEE Guide for Cleaning Insulators, IEEE Std 957™-2005.

[22] T.Doshi,"*Performance Analysis of Composite Insulators up to 1200 kVac using Electric Field Calculations*", A Thesis of M.Sc. Arizona State University, December 2010.

[23] Matthew N. O. Sadiku, Ph.D, *"Numerical Techniques in Electromagnetics*", CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C. 2001.

[24] H.Wei1, Y.Fan1, W.Jingang1, Y.Hao1, C.Minyou1, and Y.Degui, *"Inverse Application of Charge Simulation Method in Detecting Faulty Ceramic Insulators and Processing Influence From Tower*", IEEE Transaction on Magnetics,Vol. 42, No. 4, pp. 723-726, April 2006.

[25] B.Zhang, J.He, R.Zeng, S.Chen, L.Cao, S.Gu, *"Potential Distribution along Long Ceramic Insulator Strings on the Head of High Voltage Transmission Towe*r", IEEE conference, pp 369, 2004.

[26] K.Chrzan and F.Moro, *"Concentrated Discharges and DryBands on Polluted Outdoor Insulators*", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp. 466-471, January 2007.

[27] ر. هوشمند و م. ثقفی" عایق ها و فشارقوی" اداره انتشارات و چاپ دانشگاه شهید چمران اهواز،۱۳۸۲.

[28] V.T. Kontargyri *, L.N. Plati, I.F. Gonos and I.A. Stathopulos, *"Measurement and simulation of the voltage distribution and the electric field on a glass insulator string*", Science Direct Measurement 41, pp. 471-480, 2008.

[29] Vassiliki T. Kontargyri, Ioannis F. Gonosy and Ioannis A. Stathopulos, *"Measurement and simulation of the electric field of high voltage suspensioninsulators*", Euro. Trans. Electr. Power; Vol 19, pp. 509–517, 2009.

[30] D. Huang, J. Ruan, W.Cai and T Li, *"Flashover Prevention on High-altitudeHVAC Transmission Line Insulator Strings*", IEEE Transactions on Dielectricsand Electrical Insulation,Vol. 16, No. 1;pp.88-98, February 2009.

[31] Y.Zhao, H.Li, X, Ma, *"Calculation of Electric Field and Voltage Distribution along Glass Insulator String and*

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Voltage Distribution on High Voltage Insulators"12th Biennial IEEE conference on Electromagnetic Field Computation, pp. 326-326, April 2006.

[48] 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 Proc.Gener. Transm, Distrib, Vol. 153, No. 3, pp. 343–349, May 2006.

[49] T. Zhao, M. G. Comber, "*Calculation of Electric and Potential Distribution along Non-ceramic Insulators Considering the Effects of Conductors and Transmission Towers*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No., pp. 313-318, January 2000.

[50] B. M'hamdi, *"Amélioration des performances des chaînes d'isolateurs de haute tension*", Ph.D. thesis in Sciences, Department of Electrical Engineering, Ecole Nationale Polytechnique, Algiers, 14 December 2016.

[51] X. Wu, Z. Peng, P. Liu and Z. Yu, "*Calculation of Electric-field Distribution and Research on Characteristics of Shielding Ring along the Long- rod Post Porcelain Insulators Used in 1000 kV System*", 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, pp. 603-606, June 2006.

[52] M. Vitelli, V. lucci and C. Petrarca, "*Temperature Distribution along an Outdoor Insulator Subjected to Different Pollution Levels*", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No.3, pp. 416 -423, June 2000.

[53] N. M'ziou, H. Bengasmia and T. Guia, *"Influence of the Pollution on the Flashover of High Voltagre Insulator*", Word Academy of Science Engineering and Technology, Dubai, No. 61, pp. 1595-1597 January 2012.

[54] H. Benguesmia, N. M'ziou and A. Boubakeur, *"Influence de la Pollution Discontinue sur la Tension de Contournement d'un Isolateur de Haute Tension*", 7th International Conference on Electrical Engineering, Batna, Alegria, pp. 556-558, 8- 10 October 2012.

[55] B. Hammoum and A. Kerbouche "*Etude du de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien*" Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger. Juin 2007.

[56] H. Benguesmia, N. M'ziou and A. Boubakeur,*" Influence de la Pollution sur le Contournement d'un Isolateur de Haute Tension*", The International Conference on Electronics & Oil: from Theory to Applications, Ouargla, Algeria, proceeding, No. 51, March 2013.

[57] R. Bouzeroura, *"Etude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue*", Mémoire de magister, promotion 2009, Université de Bejaia.

[58] S. DIAMPENI KIMBAKALA, *"modélisation dynamique des décharges se propageant sur des surfaces isolantes polluées avec des pots discontinus sous différentes formes de tension*", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, France, 2007.

[59] Bourim Hammoum and Ahmed Kerbouche, *"Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien*", Mémoire d'Ingénieur d'Etat ENP, Alger, 2007.

Optimum Design of itsGrading Rings for 1000kV a.c. UHV Transmission Lines", IEEE Conference,2008.

[32] S.İlhan and A.Özdemir, *"Effects of Corona Ring Design on ElectricField Intensity and Potential Distribution along an Insulator String*", IEEEConference, 2007.

[33] ZHOU Jian-bo, GAO Bo, ZHANG Qiao-gen, *"Dry Band Formation and ItsInfluence on Electric Field Distribution along Polluted Insulator*", IEEE Conference, 2010.

[34] IEC 60052, "*Voltage Measurement By Means of Standard Sphere Gap*", Third Edition, 2002.

[35] N. Pattanadech, "*The Measurement Technique for Distributed Voltage of a String Insulator Using a Standard Sphere Gap*", Intematlodal Conference on Power System Technology, pp. 1043-1048, 2004.

[36] J. YoungPark, J. KyungLee, B. HakCho and K. Yong, *"Development of Advanced Insulator Inspection Robot for 345 kV Suspension Insulator Strings*", International MultiConference of Engineers and Computer Science, 2010.

[37] I.A.D. Giriantari, *"Monitoring the Insulator Condition By On-Line Voltage Distribution Measurement*", International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, pp. 21-24, April 2008.

[38] D. Meeker, *"Finite Element Method Magnetics*", User's Manual, Version 4.2; 2006.

[39] S.M. Al Dhalaan and M.A. Elhirbawy , "*Simulation of Voltage Distribution Calculation Methods over a String of Suspension Insulators*", Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES, pp. 909-914, September 2003.

[40] E. Izgi, A. Inan, S. Ay, "*The Analy sis and Simulation of Voltage Distribution over String Insulators Using Matlab/Simulink*", Electric Power Components and Systems, Vol. 36, No. 2, pp. 109-123, January 2008.

[41] A.J. Phillips, J. Kuffel, A. Baker, J.Burnham, A.Carreira, E. Cherney, W.Chisholm, M. Farzaneh, R. Gemignani, A. Gillespie, T. Grisham, R. Hill, T. Saha, B. Vancia and J. Yu, "*Electric Fields on AC Composite Transmission Line Insulators*", IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 23, No.2, pp.823-830, 2008.

[42] C. Muniraj and S. 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.

[43] W. Sima, F.P. Espino-Cortes, E.A. Chemey, S.H. Jay aram, "*Optimization of Corona Ring Design for Long-Rod Insulators Using FEM Based Computational Analysis*", IEEE International Symposium [sic] on Electrical Insulation, pp. 480–483, September 2004.

[44] F. Yadong, W. Xishan, D. Wei, L. Xiaoping, "*Research on Electric Potential Distributions of Composite Insulators and Glass Insulators by Numerical Simulation*", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 201-204, June 2006.

[45] W. Que and S. A. Sebo, "*Electric Field and Potential Distribution along NonCeramic Insulators with Water Droplets*", Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp. 441-444, October 2001.

[46] EP. Nicolopoulou, EN. Gralista, VT .Kontargyri, IF. Gonos and IA. Stathopulos, *"Electric field and voltage distribution around composite insulators*", XVII International Symposium on High Voltage Engineering, August 22-26, Hannover, Germany 2011.

[47] T.V. Kontargy ri, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos and A. M. ichaelides,"*Measurement and Verification of the*

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[60] H. Benguesmia, N. M'ziou, AM. Chouchou and L. Rachdi, *"Experimental Study of the various pollution and simulation of potential and electric field distribution using FEMM at a high voltage insulator under alternative current*", International on Computational and Experimental Investigations of Fluid and Structure Dynamics, (CEFSD2015-94), Hammamet, Tunisia, No.144, 16-18 March 2015.

[61] Hamza Slamet Amina,"*Contribution à l'étude du Modèle développé d'un isolateur pollué* ", Mémoire de Magister en électrotechnique, université d'Oran, 2013.

[62] Meraghni Tahar and Guia Issam," *effet de la pollution désertique sur l'isolateur de haute tension*" mémoire de master, 2015.

رزومه



حسین فدائی اسرمی در ساری متولد شده است (۱۳۵۳). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب (۱۳۷۸)، کارشناسی-ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات (۱۳۹۴) سپری کرده است و در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی برق-قدرت از دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات می باشد.



فرامرز فقیهی در لارستان متولد شده است (۱۳۵۷). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه تهران (۱۳۷۹)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه امام حسین(۱۳۸۱) و دکتری مهندسی برق-قدرت از دانشگاه علم و صنعت ایران(۱۳۸۷) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه ادوات FACTS، کیفیت توان، و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات می‌باشد.



جواد علمائی در تبریز متولد شده است (۱۳۳۰). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه تبریز(۱۳۶۷)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه صنعتی امیرکبیر(۱۳۷۱) و دکتری مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات (۱۳۸۶) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه کنترل توان راکتیو، تجدید ساختار، انرژی های تجدید پذیر، ریز شبکه ها و بررسی سیستم‌های قدرت است و در حال حاضر معاون علوم ، مهندسی و کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی می‌باشد.



حسین محمد نژاد شورکایی در تهران متولد شده است (۱۳۶۰). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه صنعت آب و برق(۱۳۸۳)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه علم و صنعت(۱۳۸۵) و دکتری مهندسی برق-قدرت از دانشگاه صنعتی شریف(۱۳۹۰) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه توزیع انرژی الکتریکی و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات می‌باشد.

زیرنویس‌ها

[1] Equipotential
[2] Domain Method
[3] Boundary Method
[4] Charge Simulation Method
[5] Boundary Element Method
[6] Finite Difference Method
[7] Finite Element Method

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021

A review of potential and electric field distribution analysis of strong pressure insulators under pollution conditions

Hosein Fadaeeasrami[1], Faramarz Faghihi[*2], Javad Olamaei[3], Hosein Mohamadnejad[4]

1- PhD Student, Department of Electrical and Power Engineering, Faculty of Mechanics, Electrical and Computer, Science and Research Branch, Islamic Azad University,Tehran, Iran, hossein.fadaee@srbiau.ac.ir

*2- Assistant Professor, Department of Electrical and Power Engineering, Faculty of Mechanics, Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, faramarz.faghihi@srbiau.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Electrical-Power Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University,Tehran, Iran, j_olamaei@azad.ac.ir

4- Assistant Professor, Department of Electrical and Power Engineering, Faculty of Mechanics, Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, h-mohamadnejad@srbiau.ac.ir

Abstract: High pressure insulators are exposed to different environmental and climatic conditions. The interaction of environmental conditions and insulation pollution makes the insulation of the insulators themselves a suitable substrate for conducting current and leaving its effects on power systems. Knowledge of potential distribution and electric field of high voltage equipment is an important aspect of the design, operation and performance of high pressure insulators. This can be useful for detecting defects in insulation. The purpose of this study is to show the behavior of contaminated insulators under voltage. Therefore, electric field simulation and potential distribution in the vicinity of different insulation levels were discussed. Insulators are modeled in two ways: 2D, 3D and Multiphysics Comsol software analysis, which is one of the best software used in modeling for finite elements. Finally, the results of potential distribution and electric field along the insulation in different contaminated and clean conditions, which are simulated using different conductivity values, are shown.

Keywords: Electric Field Distribution, Potential Distribution, Pollution, Simulation, Multiphysics Comsol, High Pressure Insulators, Finite Element Method.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.2.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- Autumn 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]