

توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در طول مقره‌های پلیمری خطوط انتقال HVDC با هندسه متفاوت و در حضور بارهای الکتریکی سطحی

جمشید محمودی^۱، دانشجوی دکتری؛ محمد میرزائی^۲، دانشیار؛ امیر عباس شایگانی اکمل^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - jamshidmahmoodi68@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - mirzaie@nit.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تهران - تهران - ایران - shayegani@ut.ac.ir

چکیده: یکی از عوامل مهم و مؤثر بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی و همچنین وقوع تخلیه الکتریکی در مقره‌ها، انباشته شدن بارهای سطحی بر روی آن‌ها می‌باشد. بارهای الکتریکی به علل مختلف همچون وقوع پدیده کرونا، یونیزاسیون و غیره ایجاد و بر روی مقره‌ها جمع می‌شوند. لذا باید درک کاملی از بارهای سطحی و رفتار دینامیکی آن وجود داشته باشد. در این مقاله، اثر حضور بارهای سطحی بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در طول مقره‌های پلیمری تحت ولتاژ DC مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. بدین منظور مقره‌های پلیمری با فاصله خزشی متفاوت انتخاب و سپس این مقره‌ها شبیه‌سازی و تحلیل می‌گردند. کلیه شبیه‌سازی‌ها به روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics® انجام و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته‌است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده‌است که حضور بارهای سطحی به شدت بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در طول مقره‌های پلیمری مؤثر و می‌تواند بستر لازم را برای وقوع تخلیه الکتریکی در آن فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: مقره‌های پلیمری، بارهای سطحی، ولتاژ DC، توزیع میدان الکتریکی، توزیع ولتاژ، روش المان محدود.

Potential and Electric Field Distribution Along Polymeric Insulators in HVDC Transmissions Line with Different Geometry in Presence of Surface Charges

Jamshid Mahmoodi¹, PhD Student; Mohammad Mirzaie², Associate Professor; Amir Abbas Shayegani Akmal³, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, jamshidmahmoodi68@gmail.com

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, mirzaie@nit.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, shayegani@ut.ac.ir

Abstract: One of the main factors that lead to the reduction of the potential, electric field distribution and the insulating level is surface charge accumulation on insulators. In this paper, the effect of surface charges on potential and electric field distribution along an outdoor polymeric insulator under DC voltage is studied by computer simulations. Research has shown that the accumulation of electrical charges on the surface of insulators can affect the performance of the flashover. So to avoid the occurrence of unexpected flashover must have a thorough understanding of surface charge to be examined its impact on insulation performance under various stresses. In this current paper, electric field and potential distribution along standard polymeric insulator with different geometry were investigated in the presence of surface charges. Calculations of the potential and electric field are performed based on Finite Element Method (FEM). Numerical simulations were carried out in COMSOL Multiphysics® to study the effect of the positive and negative surface charges on potential distribution under DC positive and negative applied voltage. Simulation results show the importance of surface charges effect in potential and electric field variations and the performance of the flashover.

Keywords: Polymeric insulator, surface charge, DC voltage, electric field distribution, potential distribution, finite element method.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۷، ۱۳۹۶/۰۶/۱۲ و ۱۳۹۶/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۷

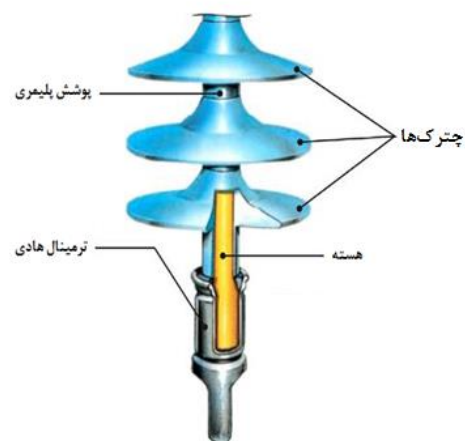
نام نویسنده مسئول: محمد میرزائی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بابل - خیابان شریعتی - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

امروزه استفاده از سیستم‌های HVDC برای انتقال توان‌های بالا در مسافت‌های طولانی در کشورهای مختلف جهان رو به افزایش است. از جمله مزایای مهم آن، عدم وجود پارامترهای خازنی و سلفی در خط انتقال DC و انتقال توان بیشتر، ارتباط شبکه‌های با فرکانس مختلف توسط ارتباط DC و اثرات زیست‌محیطی کمتر نسبت به حالت AC است [۱]. علی‌رغم اینکه استفاده از سیستم انتقال جریان متناوب متداول می‌باشد اما در برخی از کاربردها همچون انتقال انرژی به‌وسیله کابل‌های زیر دریا، انتقال توان زیاد در مسافت‌های بلند، افزایش ظرفیت یک شبکه برق در شرایطی که نصب سیم‌های اضافی مشکل‌زا یا هزینه بردار باشد، استفاده از سیستم‌های HVDC ترجیح داده می‌شود [۲].

یکی از مهمترین تجهیزات در خطوط انتقال مقرردها هستند که عمدتاً به‌عنوان نگهدارنده یا جداکننده هادی‌ها استفاده می‌شود. مقرردهای شیشه‌ای و سرامیکی سابقه بیشتری نسبت به انواع غیرسرامیکی آن در خطوط HVDC دارند، به همین علت تحقیقات کمتری نیز بر روی مقرردهای کامپوزیتی در ولتاژ DC انجام شده است [۳]. در شکل (۱) نمای ساده‌ای از یک مقرردهی پلیمری نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار کلی مقرردهی پلیمری

یکی از مسائل موجود در طراحی مقرردهای خطوط DC، تجمع بارهای الکتریکی سطحی که با افزایش ولتاژ، اثر آن نیز بیشتر می‌شود. بارهای الکتریکی سطحی می‌توانند در اثر یونیزاسیون طبیعی و یا وجود تخلیه الکتریکی پدید آیند [۴]. از طرفی یکی از عوامل مهم در بهره‌برداری مقرردهای پلیمری، توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در امتداد مقررده می‌باشد [۵]. از این رو، به‌منظور درک و بهبود کارایی مقرردهای پلیمری، تحلیل پتانسیل و میدان الکتریکی مقررده ضروری است. وجود بارهای سطحی منجر به تغییرات میدان الکتریکی و در نتیجه استقامت الکتریکی عایق می‌شود. پدیده‌ای که در مقایسه با کاربردهای دیگر عایق‌های DC، در مقرردهای خطوط هوایی HVDC کمتر به آن توجه شده است. بارهای سطحی با توجه به مکانیزم عملکردی و اثرات آنها، می‌توانند غیرخطی شدن توزیع ولتاژ در طول مقررده را تشدید

کنند [۶]. اگرچه پدیده بارهای سطحی به‌عنوان عامل تأثیرگذار بر توزیع ولتاژ و میدان الکتریکی اطراف مقرردها شناخته شده است ولی هنوز تحقیقات جامعی در مورد آن صورت نگرفته است. از طرفی نیز تحقیقات نشان داده است که انباشته شدن بارهای الکتریکی بر روی سطح مقرردها می‌تواند بر عملکرد تخلیه الکتریکی مؤثر باشد [۷].

در [۸] اثر بارهای سطحی بر روی ولتاژ تخلیه الکتریکی DC در یک عایق استوانه‌ای پلیمری بررسی شده است. سطح عایق به‌وسیله دشارژ سوزن‌های متقارن اطراف عایق، باردار شد. براساس نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی کامپیوتری نشان داده شد که ولتاژ تخلیه الکتریکی DC با توجه به حضور بارهای منفی افزایش می‌یابد درحالی که وجود بارهای مثبت بر روی سطح عایق، سبب کاهش ولتاژ تخلیه الکتریکی خواهد شد. مرجع [۹] شش نمونه ماده عایق پلیمری شامل SIR^۱، EPDM^۲ را جهت انجام تست‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار داده است. بارهای الکتریکی انباشته شده بر روی سطح نمونه‌های مورد آزمایش، توسط ولتاژهای ضربه با دامنه کم ایجاد شد و نتایج نشان داد که ولتاژ تخلیه الکتریکی ضربه، به قطبیت بارهای انباشته شده بر روی سطح نمونه عایقی وابسته می‌باشد که نوع بار (مثبت یا منفی) آن نیز بستگی به قطبیت ولتاژ ضربه و نوع ماده عایقی دارد. در [۱۰] پارامترها و مکانیسم تجمع بارهای سطحی در یک عایق مخروطی شکل تحت ولتاژ DC بررسی شده است. در این مقاله پتانسیل سطحی به کمک پراب الکترواستاتیکی محاسبه و سپس با استفاده از روابط ریاضی، مقدار بار روی سطح عایق مخروطی محاسبه گردید. اینکه بارهای سطحی عامل اصلی ایجاد تخلیه جزئی در عایق هستند از دیگر نتایج بیان شده در این مقاله می‌باشد.

در مرجع [۱۱] تأثیر بارهای سطحی انباشته شده بر روی عایق PTFE^۳ استوانه‌ای بر ولتاژ تخلیه الکتریکی DC در هوا مورد مطالعه قرار گرفت. تحقیقات برای هر دو نوع میدان الکتریکی یکنواخت و غیریکنواخت با استفاده از الکترودهای مختلف انجام شد. نتایج ارائه شده نشان داد که کاهش ولتاژ تخلیه الکتریکی منفی در حضور بارهای سطحی، تأثیر زیادی بر نتایج در حالت میدان یکنواخت دارد درحالی که در میدان غیریکنواخت اثر قابل توجهی بر روی ولتاژ تخلیه الکتریکی گزارش نشد. بنابراین برای جلوگیری از وقوع تخلیه الکتریکی غیرمنتظره، باید درک کاملی از بارهای سطحی و رفتار دینامیکی آن وجود داشته باشد تا بتوان تأثیر آن را بر روی رفتار عایق تحت تنش‌های الکتریکی مختلف بررسی نمود.

در این مقاله، برای شبیه‌سازی اثر بارهای سطحی بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در طول مقرردهای پلیمری با پروفیل‌های مختلف از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics® استفاده شده است که اساس آن روش اجزاء محدود است. در این راستا هدف مقاله شبیه‌سازی و تحلیل تأثیر بارهای سطحی مثبت و منفی بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی مقرردهای پلیمری با فاصله خزشی متفاوت، تحت ولتاژهای DC مثبت و منفی می‌باشد. بدین منظور در قسمت دوم مقاله، عوامل ایجاد بارهای سطحی، در قسمت سوم پتانسیل سطحی ناشی از حضور بارهای سطحی

حتی در یک میدان الکتریکی یکنواخت بین دو الکترود مسطح موازی با عایق هوا، عوامل گوناگونی بر میزان تحمل عایقی هوا مؤثر می‌باشند. از جمله این عوامل می‌توان به فشار هوا، جنس الکترود، رطوبت، پدیده فوتو یونیزاسیون، شکل و نوع ولتاژ اشاره کرد. تخلیه‌های الکتریکی معمولاً به واسطه شدت میدان الکتریکی که به الکترودهای آزاد درون عایق گازی شتاب می‌دهند، آغاز می‌شود. هنگامی که این الکترودها انرژی کافی به دست می‌آورند، می‌توانند از طریق برخورد با سایر اتم‌ها، یون‌ها و الکترودهای جدید را تولید نمایند [۱۷]. شایان ذکر است الکترودهای اولیه که سبب فرآیند یونیزاسیون بوده و موجب آغاز آن می‌شوند، غالباً به واسطه فوتو یونیزاسیون تولید می‌گردند.

۲-۳- کرونا

یکی دیگر از عوامل مهم ایجاد بارهای سطحی بر روی مقره‌ها، کرونا می‌باشد. تخلیه الکتریکی ایجاد شده به علت افزایش چگالی میدان الکتریکی، کرونا نام دارد. در واقع هنگامی که میدان الکتریکی سطح هادی، از ولتاژ بحرانی بیشتر شود، بهمن الکترونی به وجود خواهد آمد که تخلیه کرونا در سطح هادی و اطراف عایق رخ می‌دهد. گرادیان ولتاژی که سبب شکست الکتریکی در عایق شده و به‌زای آن، عایق خاصیت دی‌الکتریک خود را از دست می‌دهد، گرادیان ولتاژ بحرانی نامیده می‌شود. همچنین ولتاژی را که سبب ایجاد این گرادیان بحرانی می‌شود ولتاژ بحرانی می‌نامند. افزایش ولتاژ و توام با میدان الکتریکی شدید، علاوه بر ایجاد کرونا روی سطح مقره‌ها، باعث تخلیه جزئی در حفره‌های موجود در مقره می‌شود که در واقع یکی از عوامل اصلی ایجاد بارهای سطحی نیز هستند [۱۸]. در این میان میزان کرونا ایجاد شده بر روی سطح این تجهیزات، به شرایط محیطی مانند رطوبت، آلودگی و همچنین شکل هندسی آنها بستگی دارد.

۳- پتانسیل ناشی از حضور بارهای سطحی

تحقیقات تجربی و پژوهش‌ها نشان داده‌است که تجمع بارهای الکتریکی بر روی سطح مقره‌ها، می‌تواند باعث تقویت وقوع تخلیه الکتریکی شود. به‌طور کلی پتانسیل اندازه‌گیری شده بر روی سطح یک عایق، تنها به دلیل وجود بار سطحی بر روی آن نیست، بلکه منابع دیگری از جمله پلاریزاسیون دوقطبی نیز در ایجاد پتانسیل سطحی نقش دارند. یکی از راه‌های تجزیه و تحلیل فرآیندهای ایجاد بار سطحی، توسعه مدلسازی‌های ریاضی یا تحلیلی است. این مدل‌ها به‌عنوان ابزار قدرتمند برای درک مکانیسم فیزیکی پتانسیل و بار سطحی بر روی عایق‌ها می‌باشند [۱۹]. در ذیل، پتانسیل سطحی ناشی از حضور بارهای سطحی به‌صورت مدلسازی ریاضی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بسیاری از مراجع برای مدلسازی پتانسیل سطحی فرض می‌شود که عایق موردنظر در لحظه $t=0$ باردار شده و پس از آن به‌صورت یک سیستم مدار باز نگه داشته می‌شود. برای چنین حالتی، می‌توان معادلات پیوستگی جریان را در هر نقطه در داخل عایق به‌صورت رابطه (۱) نوشت [۲۰]:

و در قسمت چهارم شبیه‌سازی توزیع ولتاژ در طول مقره پلیمری با پروفیل‌های مختلف با حضور بارهای سطحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در قسمت پایانی نتایج توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در حضور بارهای سطحی مثبت و منفی بر روی مقره‌های پلیمری نمونه مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲- عوامل ایجاد بارهای سطحی

هرگاه به یک جسم هادی بار الکتریکی داده شود، بارها حرکت خواهند کرد و بر روی سطح فلز پخش خواهند شد. اما اگر شکل جسم هادی نامتقارن باشد چگالی سطحی بار در نقاط نوک تیز بیشتر خواهد بود. حال اگر به یک جسم عایق بار الکتریکی داده شود بارها در همان نقطه بر روی سطح باقی خواهند ماند.

از جمله عوامل مؤثر بر ایجاد بارهای سطحی می‌توان به کرونا، بارهای فضایی، پرتوهای الکترونی و یونیزاسیون اشاره کرد. در میان این عوامل، کرونا به خاطر نوع مکانیسم ایجاد بار سطحی بر روی عایق، از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۲]. از سوی دیگر، امروزه نیز به پدیده‌های مرتبط با کرونا در ارتباط با توسعه سیستم‌های عایق پلیمری در فضای باز که در معرض اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی و صاعقه هستند، توجه ویژه‌ای می‌شود [۱۳]. در ذیل عوامل ایجاد بارهای سطحی تشریح می‌شوند:

۱-۲- بارهای فضایی

به‌طور کلی بارهای فضایی عبارت است از مجموعه‌ای از الکترودها که از سطح الکترودها ساطع و یا یونیزاسیون ایجاد شده و در فضای سه‌بعدی ماده عایقی توزیع شده‌باشند. چهار نوع حامل بار پایه در پلیمرها وجود دارند که عبارت‌اند از: الکترودها، حفره‌ها، یون‌های مثبت و یون‌های منفی. پلیمرها با توجه به ساختار چندلایه‌ای که دارند، بارهای فضایی را به راحتی در درون خود جای می‌دهند [۱۴]. در پلیمرها، حرکت حامل‌های بار تأثیر بسیار زیادی بر روی هدایت، آغاز پروسه پدیده درختی شدن و خرابی ماده عایقی دارد [۱۵]. در مقادیر بالای شدت میدان الکتریکی (بیشتر از یک مگا ولت بر سانتی‌متر)، جایی که در آن الکترودها انرژی کافی برای حضور در باند هدایت در زنجیره پلیمر را داشته باشند، ممکن است تحرک زیاد بارها اتفاق بیافتد. پس از آنکه هدایت بتواند اتفاق افتاد، باید منبعی از حامل‌های بار فراهم باشد. بعضی از این حامل‌ها می‌توانند در حجم پلیمر توسط تابش یا میدان‌های الکتریکی بسیار بالا آزاد شوند. به‌طور کلی یکی از عوامل ایجاد تخلیه جزئی در درون عایق وجود بارهای الکتریکی و الکترودهای آزاد درون عایق می‌باشد [۱۶].

۲-۲- یونیزاسیون

زمانی که شدت میدان الکتریکی بر روی سطح هادی از استقامت عایقی هوا تجاوز کند، تخلیه‌های الکتریکی جزئی در سطح هادی رخ می‌دهد.

$$\beta_{PF} = \frac{q}{K_B T} \sqrt{\frac{q}{\pi \epsilon d}} \quad (7)$$

که در آن K_B ثابت بولتزمن، T دما، ϵ ضریب دی الکتریک و d هم ضخامت نمونه عایق می باشد. در مرجع [۲۲] β_{PF} برای نمونه های مختلف اندازه گیری و محاسبه شده است. در ادامه نحوه محاسبه توزیع ولتاژ در حضور بارهای سطحی در طول مقرر بیان خواهد شد. با ترکیب معادلات الکترومغناطیسی ماکسول و با استفاده از گرادیان توزیع پتانسیل مطابق رابطه (۸) می توان شدت میدان الکتریکی را محاسبه کرد [۲۳].

$$E = -\nabla V \quad (8)$$

با استفاده از معادله ماکسول:

$$\nabla E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، ρ چگالی بار سطحی، ϵ ضریب گذردهی و E میدان الکتریکی می باشد. به طور کلی برای محاسبه توزیع پتانسیل الکتریکی در یک سیستم شامل ماده عایقی، می توان از رابطه (۱۰) استفاده نمود.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = 0 \quad (10)$$

قسمت اول مربوط به رسانایی ماده و قسمت دوم مربوط به خاصیت خازنی آن می باشد. مطابق رابطه (۱۱) می توان نشان داد که توزیع پتانسیل با استفاده از معادله پواسن که مستقیماً از قانون گوس محاسبه می شود، به دست می آید [۱۹].

$$-\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = \rho \quad (11)$$

به طور کلی توزیع میدان الکتریکی در مقره های پلیمری غیر خطی تر از مقره های چینی است. علت این امر عدم وجود قسمت های فلزی در میان مقره های پلیمری است. دامنه میدان الکتریکی در نزدیکی ترمینال های سمت هادی و زمین بیشتر از سایر نقاط است. همچنین معمولاً سمت هادی دارای بیشترین دامنه میدان الکتریکی است.

۴- مدل سازی مقره پلیمری مبتنی بر روش اجزا محدود

برای مدل سازی و شبیه سازی مقره های پلیمری از نرم افزار COMSOL و با کمک ماژول فیزیک الکترواستاتیک، استفاده می گردد که اساس آن روش اجزا محدود است. در روش اجزا محدود، محدوده ی میدان دوبعدی به مثلث ها و محدوده میدان سه بعدی به چهاروجهی ها تقسیم می شود. در قسمت های تیز که تغییرات میدان زیاد است، تقسیم بندی ها ظریف تر انجام می شود. کیفیت مش بندی یکی از عوامل مهم در دقت حل مسئله است. اساساً همه سیستم ها برای رسیدن به پایداری تمایل به کمینه کردن انرژی دارند. اساس روش المان محدود نیز بر این است که شکل میدان طوری است که انرژی آن حداقل شود. بنابراین پتانسیل گر ها را باید به نحوی انتخاب کرد که انرژی کمینه شود. در داخل هر

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \sigma E + \sum_i \mu_i \rho_i E = 0 \quad (1)$$

در این رابطه، جمله اول مربوط به بردار جابجایی دی الکتریک (D) می باشد که نشان دهنده چگالی جریان، ناشی از پلاریزاسیون داخل ماده عایق است به طوری که مطابق رابطه (۲):

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2)$$

که در آن E شدت میدان الکتریکی، P پلاریزاسیون و ϵ_0 ضریب گذردهی خلاء می باشد. جمله دوم رابطه (۱)، نشان دهنده چگالی جریان ناشی از هدایت ذاتی ماده است. جمله سوم نیز توصیف کننده چگالی جریان ناشی از تزریق حامل های بار درون عایق می باشد که در آن μ تحرک بار و ρ هم چگالی حامل بار خاص است. مطابق رابطه (۱) مجموع این چگالی جریان ها برابر صفر است و با توجه به مدار بار بودن سیستم، هر سه جمله به افت پتانسیل کمک می کنند. هنگامی که در رابطه (۱) از اثر بارهای فضایی صرف نظر شود، رابطه کاهش یافته (۳) به دست خواهد آمد که به طور کلی به هدایت ذاتی عایق وابسته می باشد.

$$\epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4)$$

در روابط (۳) و (۴)، E شدت میدان الکتریکی، ϵ ضریب گذردهی، σ هدایت ذاتی ماده و V پتانسیل الکتریکی می باشد. مطابق رابطه (۴)، ضریب هدایت ذاتی به صورت یک رابطه نمایی با ثابت زمانی وابسته به ضریب گذردهی خلاء برای محاسبه پتانسیل سطحی ظاهر می شود. در مرجع [۲۱] تفسیری از عامل افت ولتاژ سطحی براساس این فرض که بارهای سطحی با توجه به هدایت عایق به مرور زمان، حذف و زمینه افت ولتاژ سطحی را آماده می کند، براساس مدل معروف Poole-Frenkel بیان شده است. مطابق این رابطه:

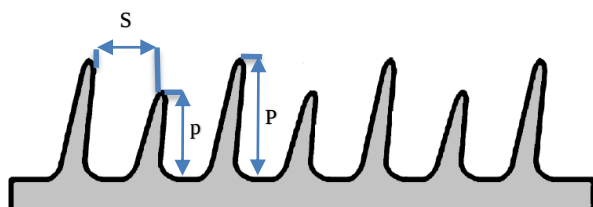
$$J \propto E \exp \left(\frac{-q \left(\phi_B - \sqrt{\frac{qE}{\pi \epsilon}} \right)}{K_B T} \right) \quad (5)$$

در رابطه فوق، J چگالی جریان، E میدان الکتریکی، q مقدار بار اولیه، ϵ ضریب دی الکتریک، K_B ثابت بولتزمن، ϕ_B ولتاژ مانع و T دما می باشد. با توجه به مدل نمایی هدایت برای اندازه گیری پتانسیل سطحی و با این فرض که به میدان الکتریکی هدایت عایق بستگی دارد (براساس تعریف مدل Poole-Frenkel) و اینکه هدایت الکتریکی خود از رابطه نمایی (۴) به دست می آید:

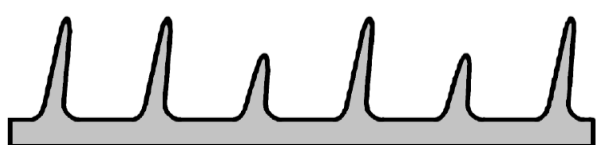
$$\sigma(V) = \sigma_0 \exp(\beta_{PF} \sqrt{V}) \quad (6)$$

در روابط $\sigma(V)$ هدایت الکتریکی وابسته به ولتاژ و β_{PF} ضریب Poole-Frenkel می باشد. مقدار β_{PF} را می توان از رابطه (۷) به دست آورد:

در این مقاله سه نوع مقره A، B و C که دارای فاصله خزشی متفاوت و فاصله جرعه خشک یکسان است در نظر گرفته می‌شود و اثر بارهای سطحی بر روی آن‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت. این مقره‌های پلیمری در خطوط ۲۴ کیلوولت استفاده می‌شوند. شکل‌های (۴) تا (۶) مقره‌های مورد مطالعه و پارامترهای آنها نشان داده شده است.



شکل ۴: مشخصات هندسی مقره نوع A



شکل ۵: مشخصات هندسی مقره نوع B



شکل ۶: مشخصات هندسی مقره نوع C

مشخصات کامل مقره‌های مورد مطالعه در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی مقره‌های پلیمری ۲۴ کیلوولت مورد مطالعه

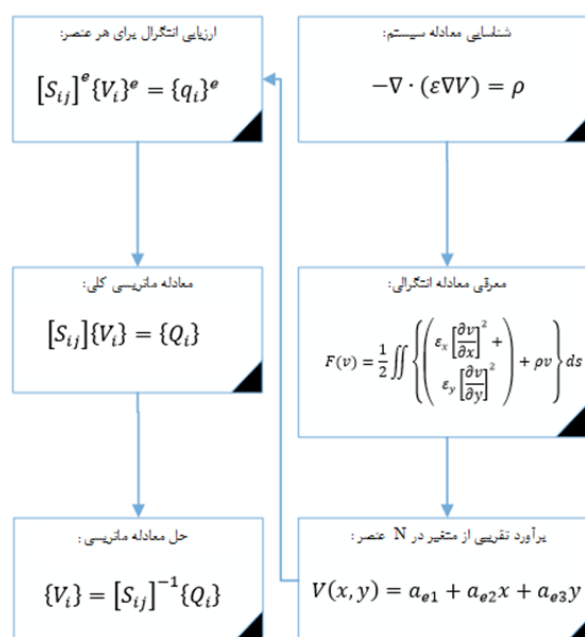
مشخصات	A	B	C
تعداد چترک	۷	۶	۱۰
فاصله خزشی (mm)	۹۴۰	۸۵۰	۱۲۱۰
فاصله جرعه خشک (mm)	۳۱۴	۳۱۴	۳۱۴
شعاع چترک بزرگ (P) (mm)	۵۵	۵۵	۵۵
شعاع چترک کوچک (p) (mm)	۴۵	۴۵	۴۵
فاصله بین دو چترک (S) (mm)	۳۹	۴۴	۲۸

پارامترهای رسانایی و ضریب گذردهی در نظر گرفته شده برای مواد مقره‌ی پلیمری مورد مطالعه در این شبیه‌سازی طبق جدول (۲) می‌باشد.

جدول ۲: پارامترهای مواد در ساختار مقره‌های پلیمری مورد مطالعه در شبیه‌سازی اجزا محدود

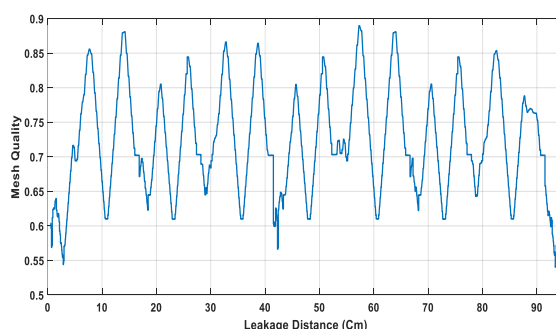
مواد مورد استفاده	ضریب گذردهی [F/m]	رسانایی [S/m]
هوا	۱,۰۲	3×10^{-15}
لاستیک سیلیکون	۳	10^{-8}
فایبرگلاس	۶,۵	4×10^{-4}
ترمینال هادی	10^{-6}	$10,2 \times 10^6$

جزء کوچک، مثلی فرض می‌شود که پتانسیل به صورت خطی تقسیم شده است. با این فرض و با داشتن پتانسیل سه نقطه می‌توان نقاط داخل مثلث را به دست آورد. با به دست آوردن پتانسیل می‌توان انرژی کل را محاسبه کرد. برای کمینه‌شدن انرژی از آن نسبت به متغیرها که همان پتانسیل‌ها هستند، مشتق گرفته و به تعداد پتانسیل‌های مجهول معادله به دست می‌آید. سپس با حل سیستم چند معادله چند مجهولی، پتانسیل گوشه‌های مثلث که مجهول هستند به دست می‌آید. شکل (۲) فلوچارت کلی روش اجزاء محدود برای محاسبه پتانسیل در حضور بارهای سطحی را نشان می‌دهد. در این فلوچارت، ولتاژ، V و ولتاژ، S_{ij} ماتریس سختی و Q_i بردار ماتریسی است.

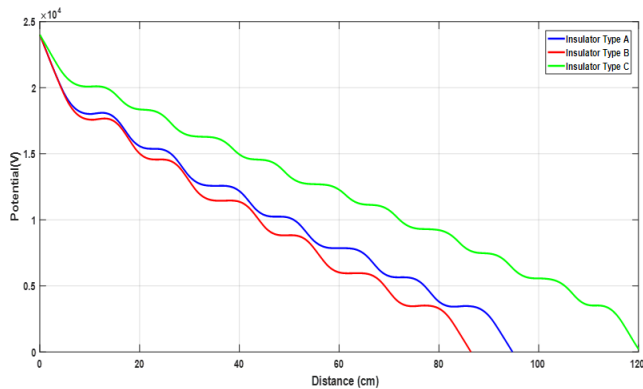


شکل ۲: فلوچارت روش اجزاء محدود (FEM) برای محاسبه پتانسیل در حضور بارهای سطحی

به منظور افزایش دقت محاسبات در نرم افزار COMSOL، علیرغم افزایش زمان اجرای برنامه، اندازه‌ی مش‌ها در حالت بسیار عالی^۵ قرار داده شده است. کیفیت مش‌بندی در راستای محور مرکزی مقره پلیمری در شکل (۳) نشان داده شده است. کیفیت مش‌بندی عددی بین صفر و یک می‌باشد.

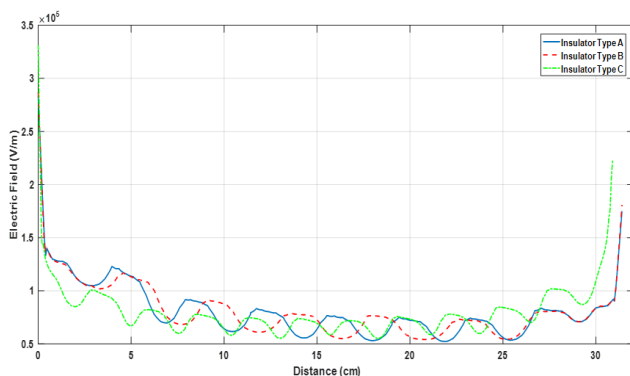


شکل ۳: کیفیت مش‌بندی در امتداد محور مرکزی مقره پلیمری



شکل ۹: توزیع پتانسیل در طول مقره‌های پلیمری نوع A و B و C بدون حضور بارهای سطحی تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC مثبت

مطابق شکل (۹)، توزیع پتانسیل در امتداد سطح مقره نوع C نسبت به مقره‌های نوع A و B خطی‌تر می‌باشد. درواقع چون تعداد چترک‌های مقره نوع C بیشتر از دو نوع دیگر می‌باشد در نتیجه فاصله خزشی آن بیشتر خواهد بود که این امر باعث خطی‌تر شدن توزیع پتانسیل خواهد شد. شکل (۱۰) نیز توزیع میدان الکتریکی در طول فاصله جرعه هر سه مقره نوع A، B و C بدون حضور بارهای سطحی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: توزیع میدان الکتریکی در طول مقره‌های پلیمری نوع A و B و C بدون حضور بارهای سطحی

۵-۲- توزیع میدان و پتانسیل مقره‌های مورد مطالعه در حضور بارهای سطحی تحت ولتاژ DC مثبت

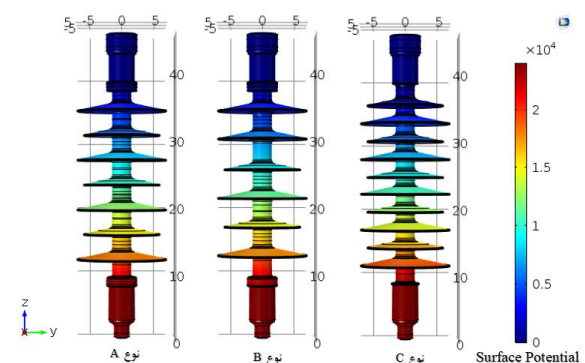
در این بخش، اثر حضور بارهای سطحی بر توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی مقره‌های پلیمری ۲۴ کیلوولتی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در شکل (۱۱) اثر حضور چگالی بار سطحی $1 \frac{\mu C}{m^2} +$ روی چترک‌های مختلف مقره نوع B بر توزیع پتانسیل آن درحالی‌که ولتاژی به مقره اعمال نشده و هر دو سمت مقره زمین شده‌است، نشان داده شده‌است. در مراجع [۸] و [۲۱] مقدار چگالی بار بر روی سطح مقره $1 \frac{\mu C}{m^2} +$ اندازه‌گیری شده‌است که در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این مقاله نیز همین مقدار چگالی بار در نظر گرفته شده‌است ولی به‌طور کلی با افزایش چگالی بارهای سطحی بر روی سطح مقره، تغییرات پتانسیل الکتریکی نیز افزایش می‌یابد.

۵- نتایج شبیه‌سازی و بحث

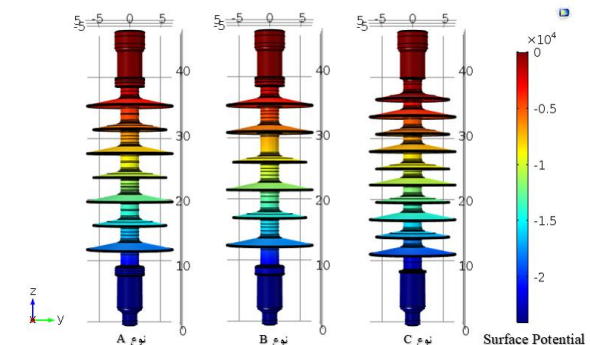
در این قسمت توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی سه نوع مقره پلیمری مورد استفاده با فاصله جرعه یکسان و فاصله خزشی متفاوت در حالت‌های با و بدون حضور بارهای سطحی شبیه سازی و تحلیل می‌گردد. بارهای سطحی بر روی مقره ممکن است دارای پلاریته مثبت یا منفی باشند. به‌طور کلی، در این مقاله اثر بارهای سطحی مثبت و منفی بر تغییرات پتانسیل و میدان الکتریکی تحت ولتاژهای مثبت و منفی بررسی خواهد شد. لازم به ذکر است که اثر دکل و کراس آرام نیز شرایط مرزی شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده‌است.

۵-۱- توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی مقره‌های مورد مطالعه بدون حضور بارهای سطحی

شمای گرافیکی توزیع پتانسیل در طول مقره‌های پلیمری ۲۴ کیلوولت نوع A، B و C تحت ولتاژهای DC مثبت و منفی بدون حضور بارهای سطحی در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده‌است. با توجه به شکل‌های (۷) و (۸)، بیشتر پتانسیل به چند چترک منتهی به سمت هادی برقرار اعمال می‌شود. این پدیده نشان‌دهنده‌ی غیرخطی بودن توزیع پتانسیل در طول مقره می‌باشد. منحنی توزیع پتانسیل الکتریکی در طول فاصله خزشی سطح هر سه نوع مقره A، B و C تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC مثبت در شکل (۹) نشان داده شده‌است.



شکل ۷: توزیع پتانسیل در طول مقره‌های پلیمری نوع A، B و C بدون حضور بارهای سطحی تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC مثبت



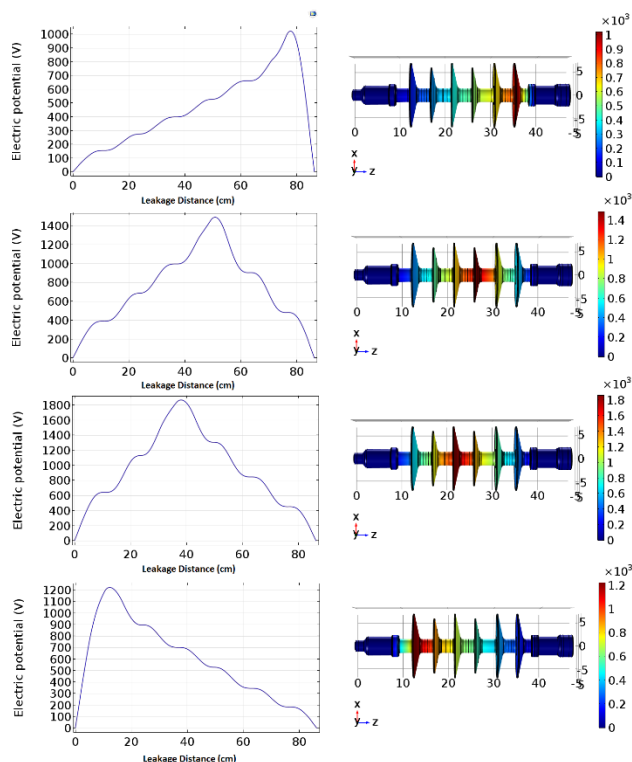
شکل ۸: توزیع پتانسیل در طول مقره‌های پلیمری نوع A، B و C بدون حضور بارهای سطحی تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC منفی

مثبت باعث افزایش ولتاژ شده و بار سطحی منفی، باعث کاهش ولتاژ در طول مقره شده است.

جدول ۳: حداکثر توزیع پتانسیل سطحی بر روی چترک‌های مختلف مقره‌های نوع A، B و C در حضور چگالی بار الکتریکی

$$+ 1 \frac{\mu C}{m^2} \text{ سطحی}$$

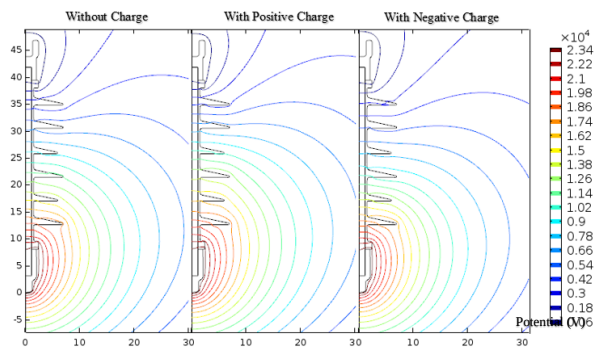
حداکثر پتانسیل سطحی (V)			شماره چترک
C	B	A	
۷۲۷	۱۰۷۹	۱۰۲۸	۱
۱۳۷۵	۱۴۵۷	۱۲۳۱	۲
۱۳۸۶	۱۵۸۰	۱۸۰۶	۳
۱۹۰۶	۱۹۲۱	۱۵۵۰	۴
۱۶۳۸	۱۳۴۸	۱۸۴۸	۵
۲۰۲۶	۱۲۸۵	۱۲۹۶	۶
۱۵۸۲	-	۱۱۷۰	۷
۱۷۷۲	-	-	۸
۱۱۹۸	-	-	۹
۱۰۷۵	-	-	۱۰



شکل ۱۱: توزیع پتانسیل در طول مقره‌های پلیمری نوع B در حضور

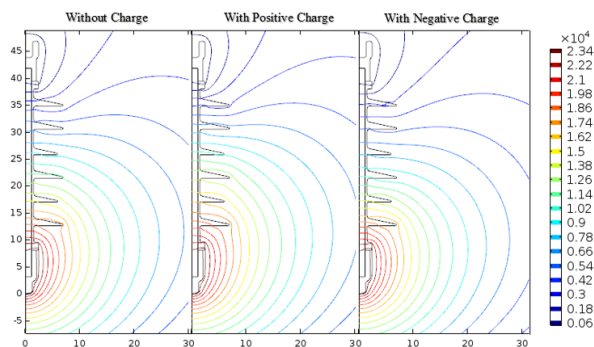
$$+ 1 \frac{\mu C}{m^2} \text{ چگالی بار سطحی بر روی چترک‌های مختلف}$$

شکل (۱۵) مقایسه توزیع پتانسیل در طول فاصله خزشی مقره‌های پلیمری نوع B و C در حضور $\pm 1 \frac{\mu C}{m^2}$ چگالی بار سطحی بر روی چترک میانی تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC مثبت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: توزیع پتانسیل در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی مثبت

و منفی $1 \frac{\mu C}{m^2}$ تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC مثبت اطراف مقره نوع A



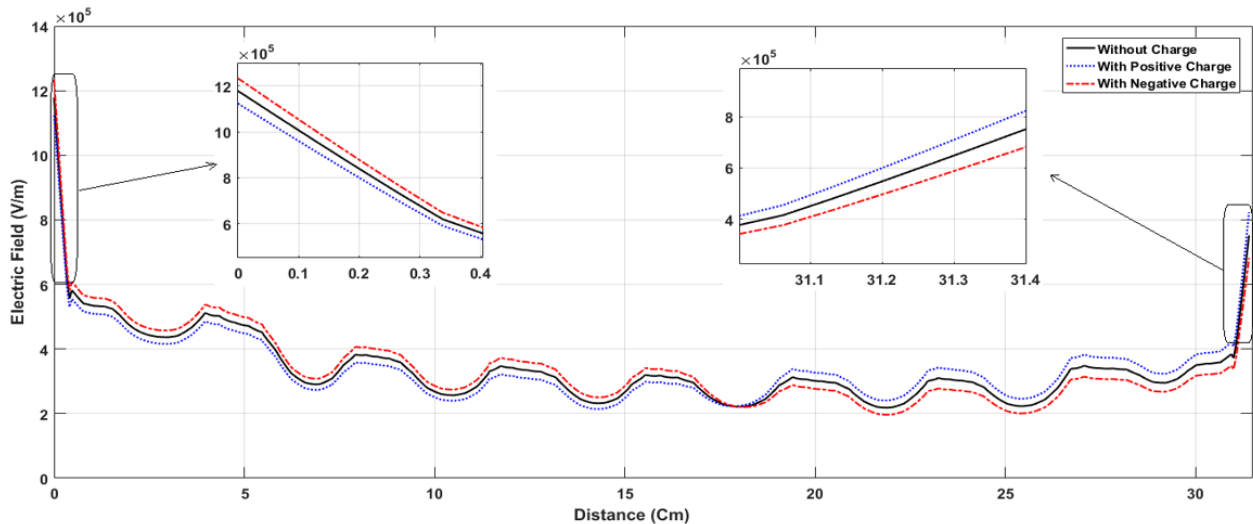
مطابق جدول (۳)، کمترین مقدار ولتاژ سطحی بر روی چترک‌های ابتدایی و انتهایی هر کدام از مقره‌ها می‌باشد. با فرض چگالی بار $1 \frac{\mu C}{m^2} +$ بر روی چترک‌های مختلف هر سه نوع مقره، حداکثر ولتاژ سطحی بر روی مقره A در چترک ۵ ام، مقره B در چترک ۴ ام و مقره C در چترک ۶ ام به ترتیب برابر ۱۸۴۸، ۱۹۲۱ و ۲۰۲۶ ولت خواهد بود.

شکل (۱۲) تا (۱۴) توزیع پتانسیل در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی مثبت و منفی $1 \frac{\mu C}{m^2}$ تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC مثبت اطراف مقره‌های پلیمری نوع A، B و C را نشان می‌دهد. بار سطحی بر روی چترک‌های میانی مقره‌های ۲۴ کیلوولت در فاصله حدوداً ۱۵ سانتیمتری از قسمت هادی در نظر گرفته شده است. در این ناحیه از مقره بار سطحی

شکل

۱۳:

توزیع



شکل ۱۶: توزیع میدان الکتریکی در طول مقره نوع A در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی مثبت و منفی $1 \frac{\mu C}{m^2}$ بر روی چترک میانی تحت ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت DC مثبت

بر روی چترک میانی را نشان می‌دهد. از آنجایی که مهمترین اثر بارهای سطحی بر شکست الکتریکی می‌باشد و عملاً افزایش میدان الکتریکی است که می‌تواند منجر به تخلیه جزئی و یا شکست الکتریکی شود، در تحلیل اثر حضور بارهای سطحی بر تغییرات میدان الکتریکی ولتاژ اعمالی به مقره نزدیک به ولتاژ شکست (۱۰۰ کیلوولت) در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل (۱۶)، بارهای منفی باعث کاهش میدان الکتریکی در سمت کاتد (زمین) و افزایش میدان در سمت آند (هادی) می‌شوند. از طرفی نیز بارهای مثبت باعث افزایش میدان الکتریکی در سمت کاتد و کاهش آن در سمت آند می‌شوند. در این حالت بارهای مثبت باعث افزایش میدان الکتریکی از $752 \frac{kV}{m}$ به $823 \frac{kV}{m}$ در سمت کاتد و کاهش میدان از $1178 \frac{kV}{m}$ به $1123 \frac{kV}{m}$ در سمت آند شده است. به همین ترتیب، بارهای منفی باعث کاهش میدان الکتریکی از $752 \frac{kV}{m}$ به $682 \frac{kV}{m}$ در سمت کاتد و افزایش میدان از $1178 \frac{kV}{m}$ به $1233 \frac{kV}{m}$ در سمت آند شده است.

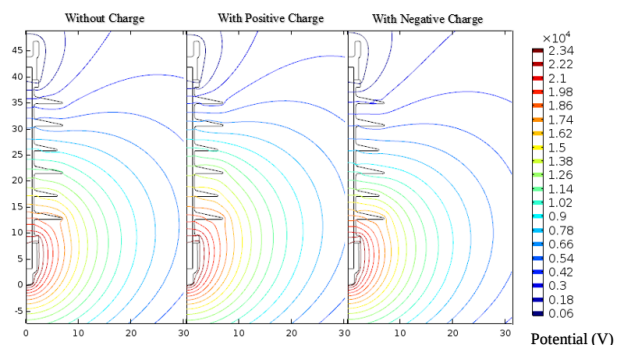
۳-۵- توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی مقره‌های مورد مطالعه در حضور بارهای سطحی تحت ولتاژ DC منفی

شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) توزیع پتانسیل در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی $\pm 1 \frac{\mu C}{m^2}$ تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC منفی اطراف مقره پلیمری نوع A، B و C را نشان می‌دهد.

بار سطحی بر روی چترک‌های میانی مقره‌های ۲۴ کیلوولت در فاصله حدوداً ۱۵ سانتیمتری از قسمت هادی در نظر گرفته شده است. در این ناحیه از مقره، بار سطحی مثبت باعث کاهش ولتاژ و بارهای منفی، باعث افزایش ولتاژ در طول مقره شده است.

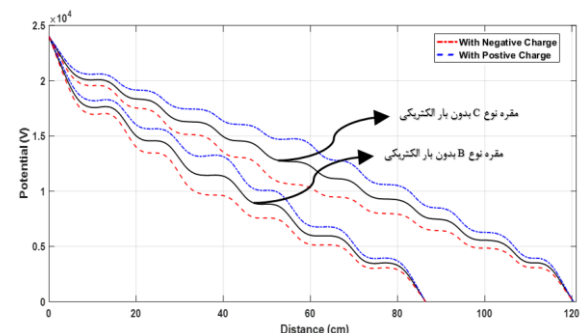
شکل (۲۰) مقایسه توزیع پتانسیل در طول فاصله خزشی مقره‌های پلیمری نوع B و C در حضور $\pm 1 \frac{\mu C}{m^2}$ چگالی بار سطحی بر روی چترک میانی تحت ولتاژ DC منفی را نشان می‌دهد. همانند حالت قبل، حداکثر

پتانسیل در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی مثبت و منفی $1 \frac{\mu C}{m^2}$ تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC مثبت اطراف مقره نوع B



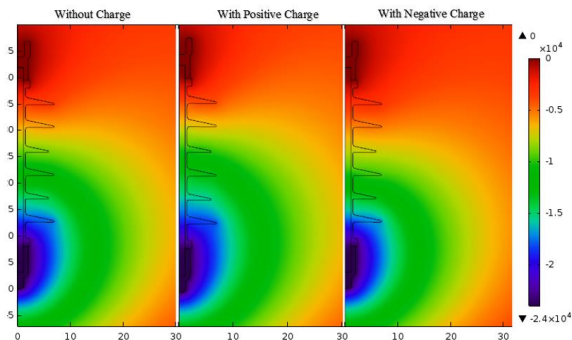
شکل ۱۴: توزیع پتانسیل در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی مثبت و منفی $1 \frac{\mu C}{m^2}$ تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC مثبت اطراف مقره نوع C

مطابق شکل (۱۵)، حداکثر تغییرات پتانسیل در حضور بارهای الکتریکی برای مقره B و C به ترتیب حدود ۱۹٫۵٪ و ۱۸٫۷٪ می‌باشد.

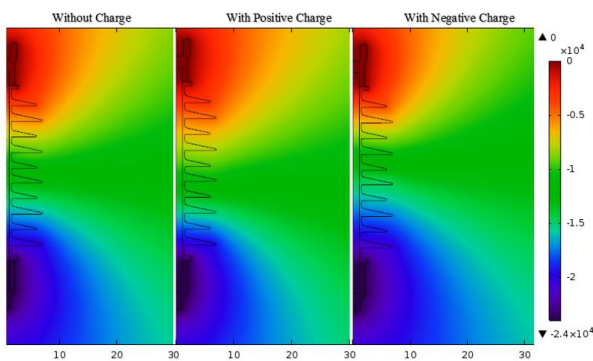


شکل ۱۵: مقایسه توزیع پتانسیل در طول مقره‌های پلیمری نوع B و C در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی مثبت و منفی $1 \frac{\mu C}{m^2}$

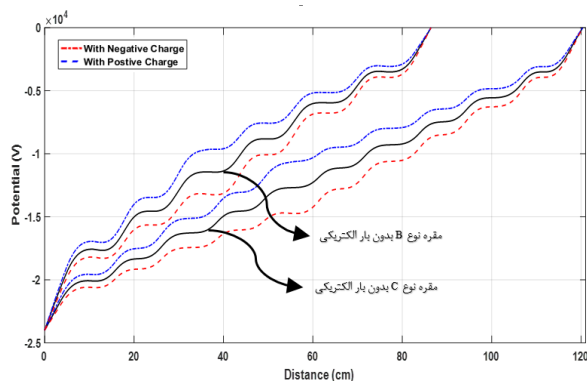
شکل (۱۶) توزیع میدان الکتریکی در طول فاصله جرقه مقره نوع A تحت ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی $\pm 1 \frac{\mu C}{m^2}$



شکل ۱۸: توزیع پتانسیل در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی مثبت و منفی $1 \frac{\mu C}{m^2}$ تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC منفی اطراف مقره نوع B



شکل ۱۹: توزیع پتانسیل در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی مثبت و منفی $1 \frac{\mu C}{m^2}$ تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC منفی اطراف مقره نوع C

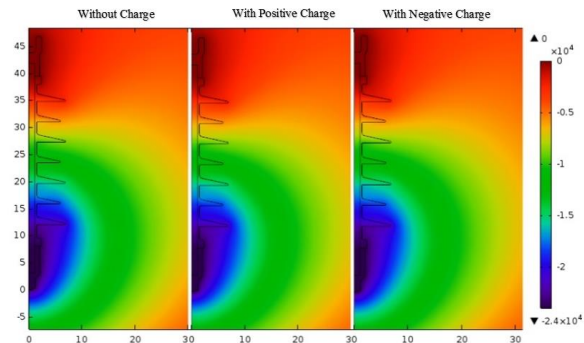


شکل ۲۰: مقایسه توزیع پتانسیل در طول مقره‌های پلیمری نوع B و C در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی مثبت و منفی $1 \frac{\mu C}{m^2}$

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر بارهای سطحی بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در طول مقره‌های پلیمری ۲۴ کیلوولتی با استفاده از روش اجزا محدود و به کمک نرم افزار COMSOL، بررسی شده است. عوامل زیادی در ایجاد بارهای سطحی بر روی مقره‌های الکتریکی مؤثر هستند که مهم‌ترین آن‌ها کرنا می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، چگالی بار سطحی بر روی مقره‌های پلیمری با پروفیل مختلف، با حضور بارهای مثبت و منفی در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج به دست آمده، توزیع پتانسیل در حالتی که مقره تحت ولتاژ DC مثبت باشد، در حالتی که بار سطحی

تغییرات پتانسیل در حضور بارهای سطحی برای مقره B و C به ترتیب حدود ۱۹٫۵٪ و ۱۸٫۷٪ می‌باشد با این تفاوت که بارهای مثبت، باعث کاهش ولتاژ و بارهای منفی باعث افزایش آن می‌شوند.

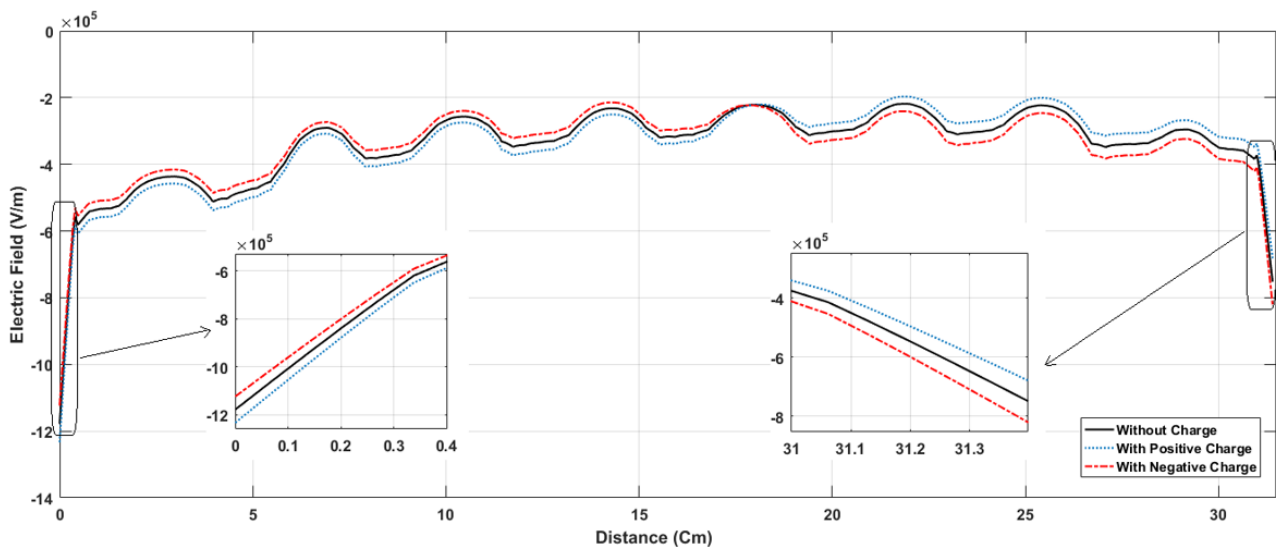


شکل ۱۷: توزیع پتانسیل در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی مثبت و منفی $1 \frac{\mu C}{m^2}$ تحت ولتاژ ۲۴ کیلوولت DC منفی اطراف مقره نوع A

شکل (۲۱) توزیع میدان الکتریکی در طول فاصله جرقه مقره نوع A تحت ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی $\pm 1 \frac{\mu C}{m^2}$ بر روی چترک میانی تحت ولتاژ DC منفی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، همانند حالتی که سیستم تحت ولتاژ DC مثبت می‌باشد بارهای منفی باعث کاهش میدان الکتریکی در سمت کاتد (هادی) و افزایش میدان در سمت آند (زمین) می‌شوند. از طرفی نیز بارهای مثبت باعث افزایش میدان الکتریکی در سمت کاتد و کاهش آن در سمت آند می‌شوند. البته این نکته را باید در نظر داشت که کاتد و آند به دلیل تغییر پلاریته در حالتی که سیستم تحت ولتاژ DC منفی می‌باشد، برعکس حالتی است که سیستم تحت ولتاژ DC مثبت است.

در این حالت بارهای مثبت باعث افزایش اندازه میدان الکتریکی از $1178 \frac{kV}{m}$ به $1233 \frac{kV}{m}$ در سمت کاتد و کاهش میدان از $752 \frac{kV}{m}$ به $682 \frac{kV}{m}$ در سمت آند شده است. به همین ترتیب، بارهای منفی باعث کاهش میدان الکتریکی از $1178 \frac{kV}{m}$ به $1123 \frac{kV}{m}$ در سمت کاتد و افزایش میدان از $752 \frac{kV}{m}$ به $823 \frac{kV}{m}$ در سمت آند شده است.

تحقیقات نشان داده است که حضور بارهای سطحی مثبت باعث کاهش ولتاژ تخلیه الکتریکی و بارهای منفی باعث افزایش ولتاژ تخلیه الکتریکی در ولتاژهای DC مثبت می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده در این مقاله، می‌توان اثر بارهای مثبت بر افزایش توزیع ولتاژ و میدان الکتریکی، و همچنین بارهای منفی بر کاهش توزیع ولتاژ در طول مقره‌های الکتریکی را مشاهده کرد و نتیجه‌گیری بیان شده در تحقیقات گذشته مبنی بر تأثیر این بارها بر تخلیه الکتریکی را توجیه نمود.



شکل ۲: توزیع میدان الکتریکی در طول مقره نوع A در حضور چگالی بار الکتریکی سطحی مثبت و منفی $1 \mu\text{C}/\text{m}^2$ بر روی چترک میانی تحت ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت DC منفی

شکل یا پروفیل هندسی مقره تنها بر خطی یا غیرخطی بودن این تغییرات در طول مقره مؤثر است.

لذا برای جلوگیری از وقوع تخلیه الکتریکی غیرمنتظره باید درک کاملی از بارهای الکتریکی سطحی وجود داشته باشد. با مطالعه بیشتر و انجام تست‌های آزمایشگاهی می‌توان درک بهتری از فرآیند ایجاد بارهای سطحی، توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی و همچنین اثر این بارها بر تخلیه الکتریکی بر روی مقره‌های خطوط انتقال، به‌دست آورد.

مراجع

- [1] A. S. K. N. A. Abbasi, "Contribution of Design Parameters of SiR Insulators to Their DC Pollution Flashover Performance," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 29, no. 4, pp. 1814 - 1821, 2014.
- [2] امید، احمد و عباس رئیس، "خطوط انتقال HVDC مزایا - کاربرد و مشکلات"، هشتمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق، کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، سال ۱۳۸۴.
- [3] M. C. M.T. Gençog̃lu, "Investigation of pollution flashover on high voltage insulators," *Expert Systems with Applications*, p. 7338-7345, 2009.
- [4] J. X. C. Y. S. C. H. J. Z. Zhijin, "Influence of low atmospheric pressure on ac pollution flashover performance of various types of insulators," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, pp. 425-433, 2010.
- [5] N. Z. G. H. T. M.M. Se-Ondoua, "Study of space charge effect on dielectric dc breakdown of synthetic insulators with the pressure wave propagation method," *Journal of Electrostatics*, vol. 40, pp. 355-361, 1997.
- [6] M. M. K.D. Srivastava, "A review of some critical aspects of insulation design of GIS/GIL systems," *Transmission and Distribution Conf. Expo*, pp. 787-792, 2001.
- [7] M. S. L. Y. N. B. H. Ahmad, "Harmonic components of leakage current as a diagnostic tool to study the aging of insulators," *Journal of Electrostatics*, vol. 66, pp. 156-164, 2008.
- [8] S. A. I. R. H. Y. V. S. a. S. M. G. Sarath Kumara, "DC Flashover Characteristics of a Polymeric Insulator in Presence of Surface Charges," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19 No.3, 2012.

مثبت حضور داشت، افزایش ولتاژ و در حضور بارهای سطحی منفی، کاهش ولتاژ مشاهده گردید. به‌همین ترتیب، توزیع پتانسیل درحالتی که مقره تحت ولتاژ DC منفی باشد، درحالتی که بار سطحی مثبت حضور داشت، کاهش ولتاژ و در حضور بارهای سطحی منفی، افزایش ولتاژ مشاهده گردید. به‌طور خلاصه، نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی نمود.

در ولتاژ DC مثبت اعمالی به مقره‌های پلیمری مورد مطالعه:

- بارهای مثبت باعث افزایش میدان الکتریکی در سمت کاند و کاهش آن در سمت آند می‌شوند. همچنین بارهای مثبت باعث افزایش پتانسیل الکتریکی در طول مقره می‌شود.
- بارهای منفی باعث کاهش میدان الکتریکی در سمت کاند و افزایش میدان در سمت آند می‌شوند. همچنین بارهای منفی باعث کاهش پتانسیل الکتریکی در طول مقره می‌شود.

در ولتاژ DC منفی اعمالی به مقره‌های پلیمری مورد مطالعه:

- بارهای مثبت باعث افزایش میدان الکتریکی در سمت کاند و کاهش آن در سمت آند می‌شوند. همچنین بارهای مثبت باعث کاهش پتانسیل الکتریکی در طول مقره می‌شود.
- بارهای منفی باعث کاهش میدان الکتریکی در سمت کاند و افزایش میدان در سمت آند می‌شوند. همچنین بارهای منفی باعث افزایش پتانسیل الکتریکی در طول مقره می‌شود.

همچنین تأثیر بارهای سطحی بر تغییرات میدان و پتانسیل الکتریکی به مقدار و مکان حضور آن بر روی مقره بستگی داشته است.

- [18] S. C. C. Muniraj, "Investigation of the arc activity on high-voltage polymeric insulators," *International*, vol. 2, no. 20, pp. 01-08, 2011.
- [19] B. M. Y. V. S. a. S. M. G. Sarath Kumara, "Surface Charge Decay on HTV Silicone Rubber: Effect of Material Treatment by Corona Discharges," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 6, pp. 2189-2195, 2012.
- [20] Y. V. S. a. S. M. G. Sarath Kumara, "Simulation of surface charge effect on impulse flashover characteristics of outdoor polymeric insulators," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vols. 1754-1763, p. 17, 2010.
- [21] . B. L. a. J. Kindersberger, "Surface Charge Accumulation on Cylindrical Polymeric Model Insulators in Air: Simulation and Measurement," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, 2011.
- [22] H. Sjöstedt, S. M. Gubanski, and Y. V. Serdyuk, "Charging characteristics of EPDM and silicone rubbers deduced from surface potential measurements", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 16, No. 3, pp. 696-703, 2009.
- [23] محسن عسگری، احمد غلامی، «تحلیل توزیع میدان الکتریکی در مقره های پلیمری تحت شرایط یخ زدگی با استفاده از روش المان محدود» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۴-۴۷، ۵۴، سال ۱۳۹۳.
- [24] Xie Jun, I. D. Chalmers, "The influence of surface charge upon flash-over of particle-contaminated insulators in SF6 under impulse-voltage conditions", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 30, pp. 1055-1063, 1997.
- [9] J. Blennow and T. Sörqvist, "Effect of surface flashover voltage of polymer materials," *9th Nordic Insul. Symp. (NORD-IS)*, pp. 262-265, 2005.
- [10] G. Asplund, "HVDC towards more power and higher voltage- a challenge for the insulation", *closing lecture, Proc. 21st Nordic Insul. Symp. (NORD-IS 09)*, Gothenburg, Sweden, 2009.
- [11] P. J. Y. Q. a. Y. F. Z. Liu, "Pre-charging effects on low probability DC flashover along insulating spacer surface," *Proc. 6th Int. Conf. Properties and Appl. Dielectr. Material*, pp. 603-606, 2000.
- [12] S. O. a. C. B. M. S. A. A. Hammam, "Effect of 50% flashover voltage due to accumulated charge on the surface of polymeric insulators," *IEEE 3rd Int'l. Conf. Prop Appl. Diel. Materials*, pp. 981-984, 1991.
- [13] S. Tenbohlen and G. Schröder, "The influence of surface charge on lightning impulse breakdown of spacers in SF6," *EEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, pp. 241-246, 2000.
- [14] F. Wang, Y. Qiu, W. Pfeiffer and E. Kuffel, "Insulator surface charge accumulation under impulse voltage," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, vol. 11, pp. 847-854, 2004.
- [15] M. Darveniza, T. K. Saha, M. A. Leijon and S. Wright, "Effects of deposited charge on impulse test techniques for polymeric insulators," *CIGRE 200-11*, 2001.
- [16] رضا رستمی نیا، محسن صنیعی، اصغر اکبری، "تأثیر پالس های ادوات الکترونیک قدرت بر وقوع تخلیه جرئی در عایق ماشین های الکتریکی با استفاده از مدل سازی به روش اجزا محدود" مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۱-۲۸، ۲۸-۲۹، سال ۱۳۹۴.
- [17] S. G. J. Ehnberg and H. J. M. Blennow, "Effects of surface charge accumulation on impulse flashover voltage on silicone rubber surface," *13th Int'l. Sympos. High Volt. Eng. (ISH)*, p. 242, 2003.

زیر نویس ها

¹Silicone Rubber

²Ethylene propylene diene monomer

³Poly tetra fluor ethylene

⁴Barrier voltage

⁵Extremely fine