

تحلیل توزیع میدان الکتریکی در مقره‌های پلیمری تحت شرایط یخ‌زدگی با استفاده از روش المان محدود

محسن عسگری^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، احمد غلامی^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران - mohsen_asgari@elec.iust.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران - gholami@iust.ac.ir

چکیده: استفاده از مقره‌های پلیمری در خطوط جدید و همچنین در به‌روزرسانی خطوط قدیمی در حال افزایش است. مقره‌های پلیمری در معرض تنش‌های مختلف الکتریکی، مکانیکی و محیطی قرار دارند. در بسیاری از نواحی با آب‌وهوای سرد، خطوط انتقال و پست‌های فشارقوی در معرض یخ‌زدگی قرار دارند. بسیاری از مشکلات مقره‌های پلیمری از جمله؛ فرسایش و پیری مواد پلیمری، وقوع کرونا در سطح مقره و شکست الکتریکی، ناشی از توزیع غیریکنواخت پتانسیل در طول مقره است. در این مقاله تاثیر حضور لایه یخ بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت با و بدون حلقه کرونا مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics که با استفاده از روش المان محدود مسائل را تحلیل می‌کند استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که نصب حلقه کرونا باعث کاهش چشم‌گیر شدت میدان الکتریکی در سطح مقره‌های پلیمری می‌شود. همچنین وجود فاصله‌های هوایی در لایه یخ تاثیر به سزایی بر توزیع پتانسیل، در امتداد مقره‌های پلیمری داشته و باعث افزایش شدت میدان الکتریکی سطح مقره‌های پلیمری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: توزیع پتانسیل، توزیع میدان الکتریکی، حلقه کرونا، روش المان محدود، شرایط یخ‌زدگی، مقره پلیمری.

Analysis of Electric Field Distribution for Polymeric Insulators under Ice Conditions using Finite Element Method

Mohsen Asgari, Ahmad Gholami

Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract: The use of polymeric insulators in new lines and also updated power transmission lines is still growing. Polymeric insulators are exposed to various electrical, mechanical and environmental stresses. In many areas with cold weather, high voltage transmission lines and substations are vulnerable to freeze. The most important problems of these polymeric insulators, such as erosion and aging of polymeric materials, corona phenomena on insulator surface and flashover are related to the nonuniform potential distribution along the insulators. In this paper, electric field and voltage distribution of 230 kV polymeric insulator has been evaluated with and without corona ring in the presence of an ice layer on it. Electric field analysis software package, COMSOL Multiphysics4.2, based on the finite element method, has been employed for the calculations. Simulation results have shown a dramatic decrease in the intensity of the electric field in polymeric insulators in the presence of corona ring. Also the presence of air gap in the ice layer has a great influence on the potential distribution along the polymeric insulators and causes to increase intensity of the electric field on polymeric insulators surface.

Keywords: Potential Distribution, Electric Field Distribution, Corona Ring, Finite Element Method, Ice Conditions, Polymeric Insulators.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۲۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۳/۱۰

نام نویسنده مسئول: احمد غلامی

نشانی نویسنده مسئول: تهران- میدان رسالت- خیابان هنگام- دانشگاه علم و صنعت ایران- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، کاربرد مقره‌های پلیمری در خطوط انتقال با توجه به مزایای این مقره‌ها نسبت به انواع سرامیکی و شیشه‌ای از جمله خاصیت آب‌گریزی، عملکرد مناسب در شرایط محیطی آلوده، وزن سبک، حمل‌ونقل و نصب آسان، پیوسته در حال گسترش است [۱]. خطوط انتقال در طول مسیر خود، ممکن است از مناطق با شرایط آب و هوایی مختلف از جمله؛ مرطوب، آلوده، یخ‌زده و غیره عبور کنند.

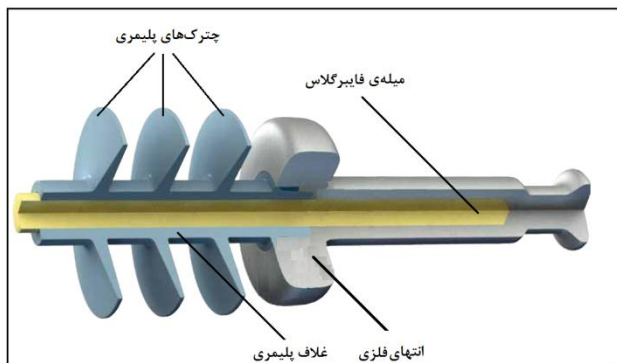
پارامترهای مختلفی در تشکیل لایه یخ بر روی مقره‌ها مؤثر هستند. برخی از پارامترهای مهم عبارت‌اند از؛ دمای سطح مقره، دمای هوای محیط، میزان رطوبت محیط، اندازه و دمای قطرات آب و سرعت باد [۲]. در شرایط یخ‌زده، ممکن است تخلیه الکتریکی بر روی مقره پوشیده شده از یخ، اتفاق بیفتد. در برخی از کشورها از جمله کانادا، چین، ژاپن، نروژ، آمریکا، خروج خطوط انتقال در اثر وقوع تخلیه الکتریکی مقره‌ها، گزارش شده است [۳]. نوع لایه یخ یکی از عوامل مؤثر در وقوع تخلیه الکتریکی مقره‌ها است. وقوع کرونا و در نتیجه آن وقوع قوس الکتریکی محلی در فاصله هوایی بدون یخ، ممکن است باعث وقوع شکست الکتریکی شوند. علت به وجود آمدن فاصله‌ی هوایی در سطح یخ‌زده مقره‌ها، ذوب شدن و فروریختن قطعه‌ای یخ است [۴]. یکی از عوامل مهم در کارایی مقره‌های پلیمری، توزیع میدان الکتریکی در امتداد مقره است. از این‌رو، به‌منظور درک و بهبود کارایی مقره‌های پلیمری، تحلیل میدان الکتریکی مقره‌ها ضروری است [۵]. میدان الکتریکی شدید، علاوه بر ایجاد کرونا روی سطح مقره، می‌تواند باعث تخلیه جزئی در حفره‌های موجود در آن شود و مقره را از نظر الکتریکی و مکانیکی کاملاً معیوب سازد. یکی از روش‌های تعدیل میدان الکتریکی در مقره‌ها نصب حلقه کرونا است. وجود حلقه کرونا در شرایط یخ‌زده تأثیر به‌سزایی در کاهش شدت میدان الکتریکی دارد [۶ و ۷].

بررسی میدان الکتریکی می‌تواند با کمک روش‌های آزمایشگاهی یا تحلیل‌های عددی انجام شود. روش‌های آزمایشگاهی بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند. همچنین برای این‌که نتایج دقت خوبی داشته باشند، تعداد آزمایش‌های زیادی باید انجام شود. امروزه برای مطالعه‌ی پدیده‌های فیزیکی به‌منظور کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در زمان، از روش‌های تحلیل عددی به‌جای روش‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها، روش المان محدود است [۸].

مقره‌های پلیمری، که مقره‌های کامپوزیتی یا غیر سرامیکی هم نامیده می‌شوند، نسل نسبتاً جدید مقره‌ها به‌شمار می‌روند. استفاده از مقره‌های پلیمری از دهه ۱۹۷۰ رایج شده است [۹ و ۱۰]. این مقره‌ها از چهار قسمت به شرح زیر تشکیل شده‌اند:

- میله‌ی فایبرگلاس^۱
- غلاف پلیمری^۲
- چترک‌های پلیمری^۳
- انتهای فلزی^۴

در شکل (۱) شمای ساده‌ای از یک مقره‌ی پلیمری نشان داده شده است.



شکل (۱): اجزای یک مقره پلیمری

۲- تحلیل میدان الکتریکی مقره‌های پلیمری

جهت تعیین شدت میدان الکتریکی ترکیب معادلات الکترومغناطیسی ماکسول^۵ منجر به معادله پواسون^۶ می‌شود که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$-\nabla[(\sigma + 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r) \nabla V - J_e] = 2\pi f \rho_0 \quad (1)$$

که

σ : ضریب هدایت الکتریکی (S/m)

f : فرکانس (Hz)

ϵ_r : ضریب گذردهی نسبی

V : پتانسیل الکتریکی (V)

J_e : چگالی جریان (A/m^2)

ρ_0 : چگالی بار الکتریکی داخل عایق (C/m^3)

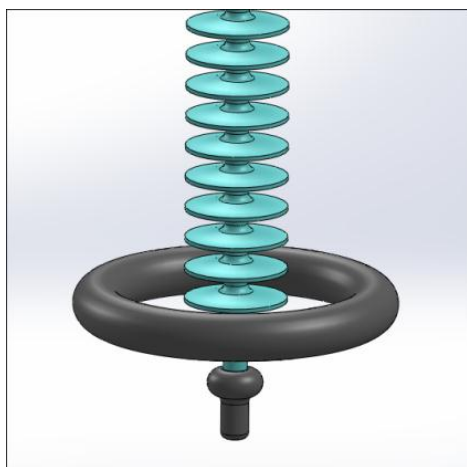
به دلیل تقارن محوری مقره، مختصات استوانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این صورت رابطه‌ی (۱) به رابطه (۲) تبدیل خواهد شد.

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{-\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2)$$

بارهای الکتریکی درون مقره ناچیز هستند. در این صورت $\sigma = J_e = \rho_0 = 0$ است و رابطه (۱) به معادله ساده لاپلاس^۷ تبدیل می‌شود. رابطه (۲) نیز ساده خواهد شد. با حل معادله لاپلاس و تعیین شدن ولتاژ و خطوط هم‌پتانسیل، میدان الکتریکی به دست می‌آید.

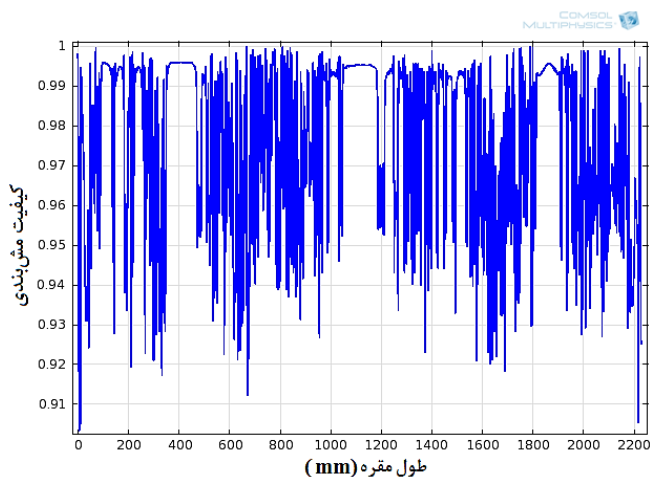
$$E = -\nabla V \quad (3)$$

دارد، ولتاژ فازهای کناری برابر نصف دامنه‌ی بیشینه با علامت منفی یعنی $-۶۶/۳۹$ ، است.



شکل (۲): مدل‌سازی مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت و حلقه کرونا با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks

مش‌بندی^۸ مدل مقره مورد مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics 4.2 انجام شده است. کیفیت مش‌بندی یکی از عوامل مهم در دقت حل مسئله است. کیفیت مش‌بندی عددی بین صفر و یک است. به‌منظور بالا بردن دقت محاسبات، علیرغم افزایش زمان اجرای برنامه، اندازه‌ی مش‌ها در حالت بسیار عالی^۹ قرار داده شده‌اند. کیفیت مش‌بندی در راستای محور مرکزی مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): کیفیت مش‌بندی در امتداد محور مرکزی مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت

همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود کیفیت مش‌بندی بسیار مناسب و نزدیک به یک می‌باشد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله به‌منظور تحلیل میدان الکتریکی مقره‌های پلیمری، از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics 4.2 که بر روش المان

به‌طور کلی توزیع میدان الکتریکی در مقره‌های پلیمری غیرخطی‌تر از مقره‌های پرسیلانی است. علت این امر عدم وجود قسمت‌های فلزی در میان مقره‌های پلیمری است. دامنه میدان الکتریکی در نزدیکی ترمینال‌های سمت هادی و زمین بیشتر از سایر نقاط است. معمولاً سمت هادی دارای بیشترین دامنه میدان الکتریکی است [۱۰]. معمولاً سه بخش اصلی سطح غلاف پلیمری، درون میله‌ی فایبرگلاس و چترک‌های پلیمری و سطح انتهای فلزی در هنگام تعیین میدان الکتریکی مقره‌های پلیمری مدنظر هستند. در طراحی مقره‌های پلیمری دامنه میدان الکتریکی مجاز این بخش‌ها به ترتیب برابر $۰/۴۵ \text{ kV/mm}$ ، ۳ kV/mm و $۲/۱ \text{ kV/mm}$ در نظر گرفته می‌شود [۵، ۱۱ و ۱۲].

۳- مدل‌سازی

جزئیات و ابعاد مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت و حلقه کرونای مورد مطالعه در جدول‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت

۶۹	تعداد چترک
۲۳۵۵	طول مقره (mm)
۲۱۱۵	فاصله جرقه خشک (mm)
۴۸۹۹	فاصله خزشی (mm)
۷۶	قطر چترک‌ها (mm)
۱۶	قطر میله فایبرگلاس (mm)
۳	ضخامت غلاف پلیمری (mm)
۳۰	فاصله‌ی بین چترک‌ها (mm)

جدول (۲): مشخصات حلقه کرونای مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت

۳۰	ارتفاع از انتهای فلزی مقره (mm)
۴۰	ضخامت حلقه کرونا (mm)
۲۸۰	قطر حلقه کرونا (mm)

مدل‌سازی مقره‌ها، برج و سایر تجهیزات با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks 2012 انجام شده است. شمای مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت و حلقه کرونای مدل‌سازی شده در نرم‌افزار Solidworks در شکل (۲) نشان داده شده است.

ضریب گذردهی نسبی یخ، میله‌ی فایبرگلاس، سیلیکون رابر، فولاد و هوا به ترتیب برابر ۷۰ ، $۷/۲$ ، $۴/۵$ ، ۱ و ۱ و رسانایی الکتریکی یخ $۱۰۰ \mu\text{S/m}$ در نظر گرفته شده است. در این مقاله، توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی فاز میانی مورد مطالعه قرار گرفته است. دامنه‌ی ولتاژ اعمالی فاز میانی برابر $۱۳۲/۷۹ = ۲۳۰/\sqrt{۳}$ کیلوولت در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که ولتاژ فاز میانی در بیشینه‌ی خود قرار

از نصب حلقه کرونا ۵۶۵/۳ میلی‌متر بوده است درحالی‌که بعد از نصب حلقه کرونا این فاصله به ۷۰۸ میلی‌متر افزایش یافته است که افزایش ۲۵/۳ درصدی را نشان می‌دهد. این پدیده نشان دهنده‌ی این است که در حضور حلقه کرونا توزیع پتانسیل در طول مقره خطی‌تر شده است. منحنی تغییرات میدان الکتریکی مرکز میله‌ی فایبرگلاس مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود بیشینه‌ی شدت میدان الکتریکی مرکز میله‌ی فایبرگلاس مقره ۲۳۰ کیلوولت از kV/mm ۰/۲۷۸ به kV/mm ۰/۱۱۳ رسیده است.

منحنی توزیع میدان الکتریکی سطح غلاف پلیمری در امتداد مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، در حالت بدون حلقه کرونا بیشینه‌ی شدت میدان الکتریکی از مقدار مجاز kV/mm ۰/۴۵ فراتر رفته است. بنابراین نصب حلقه کرونا به منظور تعدیل شدت میدان الکتریکی برای مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت ضروری می‌باشد. پس از نصب حلقه کرونا، بیشینه‌ی شدت میدان الکتریکی روی سطح غلاف پلیمری از kV/mm ۰/۵۳۵ به kV/mm ۰/۲۴ کاهش یافته است. همچنین حلقه کرونا علاوه بر کاهش بیشینه‌ی میدان الکتریکی، بیشینه‌ی میدان الکتریکی را از ناحیه بین انتهای فلزی و چترک اول دور می‌کند. میدان الکتریکی انتهای مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت در سمت برج، در حضور حلقه کرونا در مقایسه با مقره بدون حلقه کرونا افزایش را نشان می‌دهد. این پدیده نشان دهنده‌ی تعدیل توزیع میدان الکتریکی در طول مقره می‌باشد.

۴-۲- شرایط یخ‌زده

در این بخش، تاثیر حضور لایه یخ بر توزیع میدان الکتریکی مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تشکیل لایه‌ی یخ روی مقره ممکن است حالت‌های مختلفی داشته باشد. حالت‌های مورد مطالعه در این مقاله در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

جدول (۳): حالت‌های مختلف یخ‌زدگی سطح مقره پلیمری

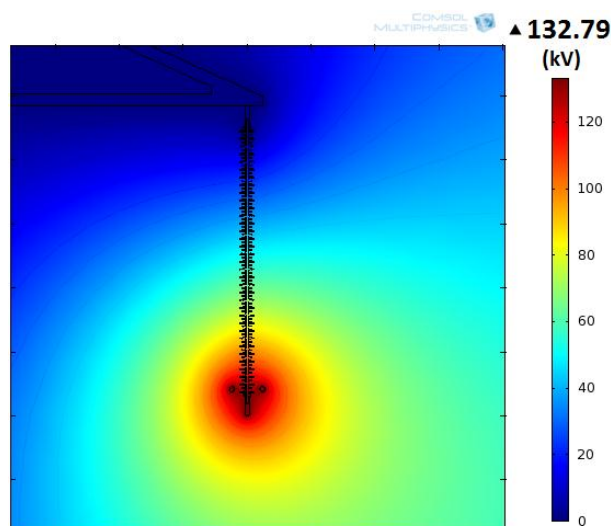
حالت	توضیحات
۱	یخ‌زدگی کامل سطح چترک‌ها
۲	یخ‌زدگی کامل سطح چترک‌ها و قندیل آویزان از نوک چترک‌ها
۳	یخ‌زدگی کامل سطح چترک‌ها و قندیل یکپارچه در طول مقره
۴	یخ‌زدگی جزئی سطح چترک‌ها و قندیل یکپارچه در طول مقره
۵	یخ‌زدگی جزئی سطح چترک‌ها و قندیل یکپارچه با فاصله هوایی در ابتدا، وسط و انتهای مقره

ابعاد قندیل مورد استفاده در شبیه‌سازی شرایط یخ‌زدگی سطح مقره پلیمری در شکل (۸) نشان داده شده است.

محدود استوار است استفاده شده است. در این بخش شبیه‌سازی میدان الکتریکی مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت با و بدون حلقه کرونا در شرایط تمیز و یخ‌زده ارائه شده و مقایسه بین این حالت‌ها ارائه می‌شود.

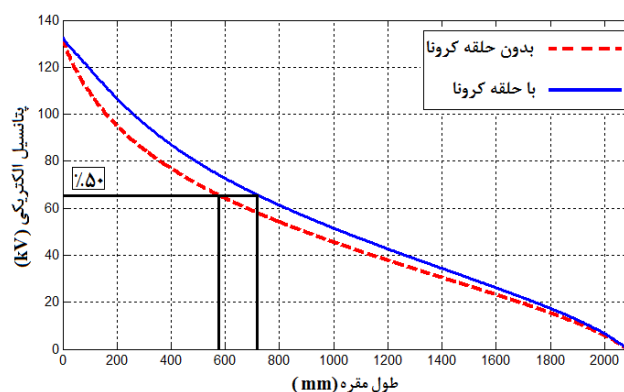
۴-۱- شرایط خشک و تمیز

شمای گرافیکی توزیع پتانسیل در اطراف مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل (۴) برمی‌آید، بیش‌تر پتانسیل به چند چترک ابتدای سمت هادی اعمال می‌شود. این پدیده نشان‌دهنده‌ی غیرخطی بودن توزیع پتانسیل در طول مقره می‌باشد.



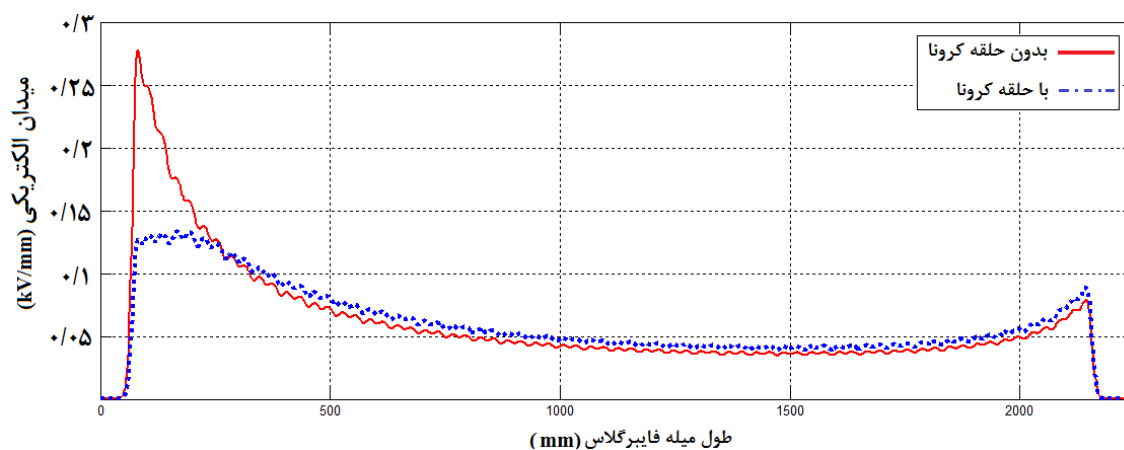
شکل (۴): توزیع پتانسیل در اطراف مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت

منحنی توزیع پتانسیل در امتداد مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت با و بدون حلقه کرونا در شکل (۵) نشان داده شده است.

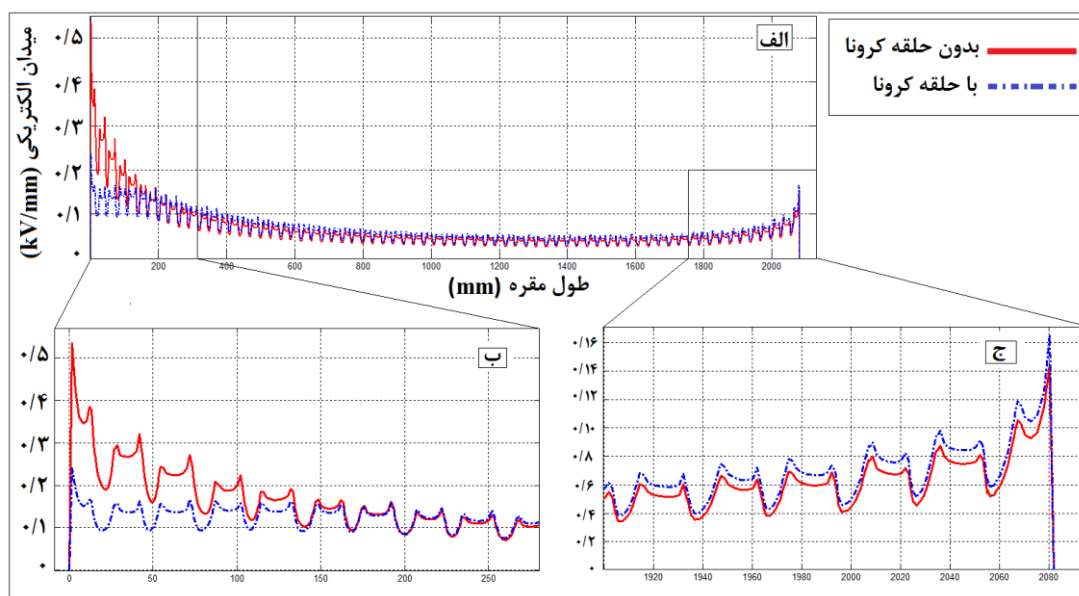


شکل (۵): توزیع پتانسیل در امتداد مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت

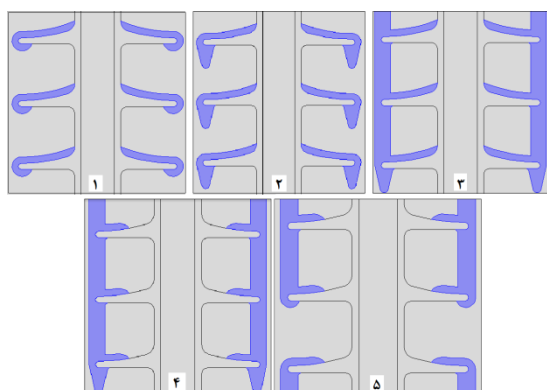
با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که فاصله‌ای از طول مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت که ۵۰٪ ولتاژ اعمالی را متحمل می‌شود قبل



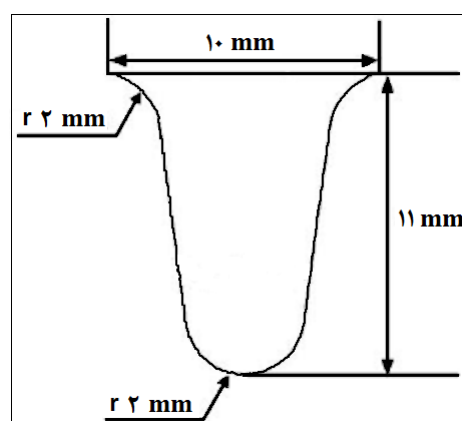
شکل (۶): توزیع میدان الکتریکی در امتداد مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت



شکل (۷): توزیع میدان الکتریکی در امتداد مقره پلیمری؛ ۲۳۰ کیلوولت (الف) تمام طول مقره، (ب) سمت هادی، (ج) سمت برج



شکل (۹): مشخصات یخ و قندیل در حالت‌های مختلف یخ‌زدگی

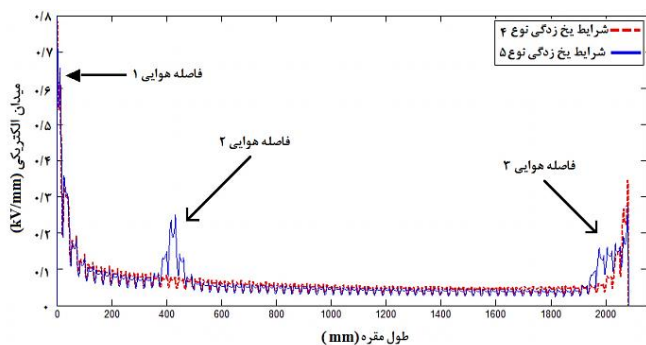


شکل (۸): مشخصات قندیل مورد استفاده در شبیه‌سازی

منحنی توزیع میدان الکتریکی مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت در شرایط خشک و شرایط با لایه یخ نوع ۱ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شبیه‌سازی بدون حضور حلقه کرونا انجام شده است.

شماتیک یخ و قندیل حالت‌های مختلف یخ‌زدگی در شکل (۹) نشان داده شده است.

وجود فاصله‌ی هوایی در لایه یخ باعث افزایش شدت میدان الکتریکی در سطح مقره پلیمری در این ناحیه می‌شود. این پدیده در شکل (۱۲) با مقایسه‌ی توزیع میدان الکتریکی روی سطح غلاف پلیمری مقره ۲۳۰ کیلوولت با یخ‌زدگی نوع ۴ و ۵ نشان داده شده است. فاصله‌ی هوایی روی چترک اول، پانزدهم و سه چترک انتهایی سمت برج ایجاد شده است.



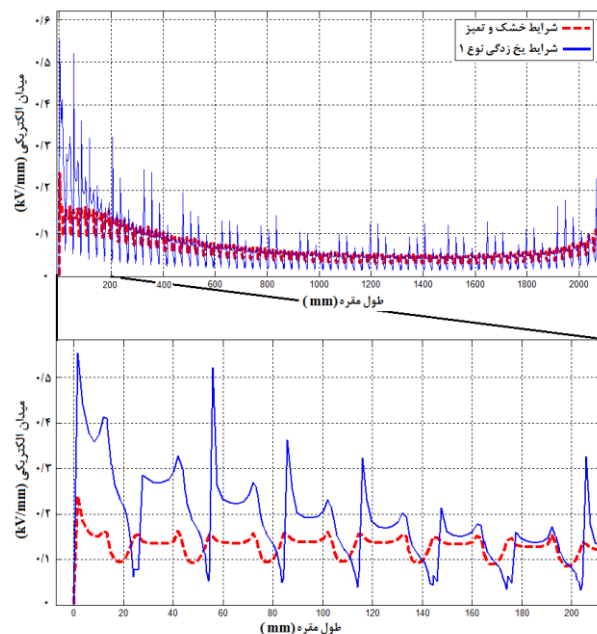
شکل (۱۲): توزیع میدان الکتریکی در امتداد مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت با یخ‌زدگی نوع ۴ و ۵

همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود در بخش‌هایی که یخ فرو ریخته است شدت میدان الکتریکی افزایش قابل توجهی داشته است. بیشینه‌ی میدان الکتریکی، قبل و بعد فرو ریختن یخ در فاصله‌ی هوایی در جدول (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۲) و جدول (۴) مشاهده می‌شود، در فاصله‌ی هوایی، میدان الکتریکی افزایش یافته است. در فاصله‌ی هوایی وسط مقره، افزایش شدت میدان الکتریکی بیش‌تر است.

جدول (۴): بیشینه‌ی میدان الکتریکی فاصله‌ی هوایی قبل و بعد از فرو ریختن یخ در فاصله‌ی هوایی

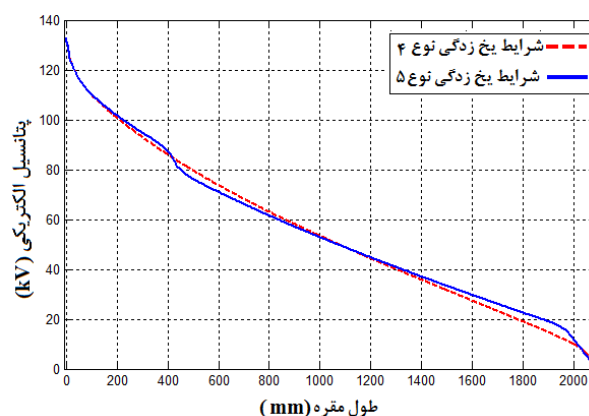
بیشینه‌ی میدان الکتریکی (kV/mm)			
فاصله	فاصله	فاصله	
هوايي ۳	هوايي ۲	هوايي ۱	
۰/۰۶۲	۰/۰۷۷	۰/۶۴۴	قبل از فرو ریختن یخ
۰/۱۵۸	۰/۲۴۹	۰/۶۵۶	بعد از فرو ریختن یخ

توزیع میدان الکتریکی در هوای اطراف مقره پلیمری، در فاصله‌ی ۱۵ میلی‌متری لبه‌ی چترک‌های پلیمری در دو حالت وجود و عدم وجود فاصله‌ی هوایی در لایه‌ی یخ در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): توزیع میدان الکتریکی در امتداد مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت در شرایط خشک و شرایط یخ‌زدگی نوع ۱

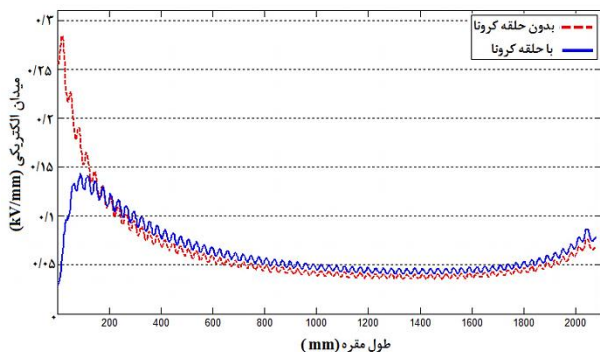
همان‌گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود بیشینه‌ی میدان الکتریکی روی سطح غلاف پلیمری در حضور لایه‌ی یخ برابر 0.553 kV/mm می‌باشد. در صورتی که در حالت خشک این مقدار برابر 0.24 kV/mm می‌باشد. بنابراین بیشینه‌ی میدان در حضور لایه‌ی یخ بیش از $2/3$ برابر شده است که این مقدار بیش از حد مجاز 0.45 kV/mm شده است. این شدت میدان الکتریکی ممکن است باعث وقوع کرونا شود. توزیع پتانسیل در امتداد مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت با حضور لایه‌ی یخ نوع ۴ و ۵ در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): توزیع پتانسیل در امتداد مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت در شرایط یخ‌زدگی نوع ۴ و ۵

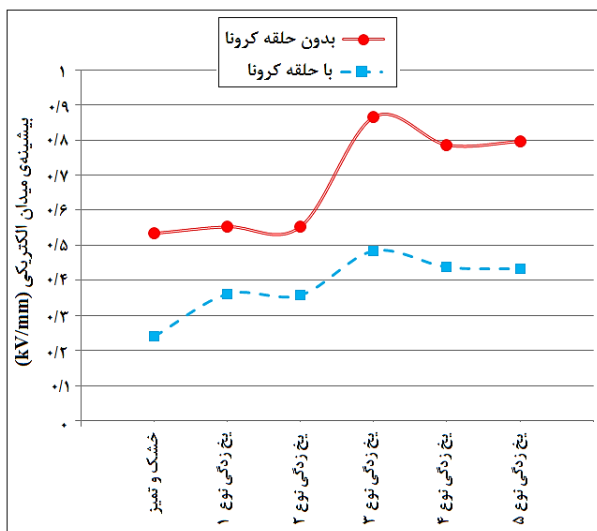
همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود وجود فاصله‌ی هوایی در لایه‌ی یخ باعث غیرخطی‌تر شدن توزیع پتانسیل می‌شود. در فاصله‌های هوایی موجود در لایه‌ی یخ نوع ۵ افت ولتاژ قابل توجهی مشاهده می‌شود.

فاصله‌ی ۱۵ میلی‌متری لبه‌ی چترک‌های پلیمری با و بدون حلقه کرونا در شرایط یخ‌زدگی نوع ۲ در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



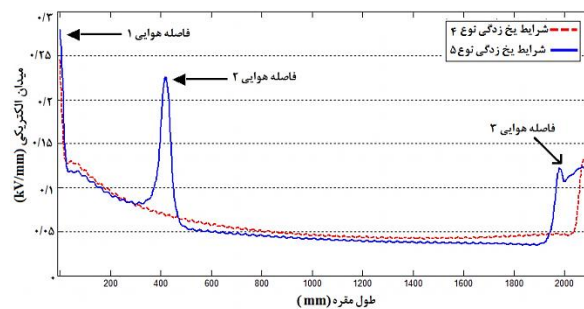
شکل (۱۵): توزیع میدان الکتریکی در هوای اطراف مقره پلیمری در فاصله‌ی ۱۵ میلی‌متری لبه‌ی چترک‌ها با و بدون حلقه کرونا در شرایط یخ‌زدگی نوع ۲

با توجه به شکل (۱۵)، بیشینه‌ی میدان الکتریکی با نصب حلقه کرونا از 0.284 kV/mm به 0.143 kV/mm رسیده است. همچنین بیشینه‌ی میدان الکتریکی از نقاط اب بندی شده‌ی ابتدای مقره دور شده است. در حالت نصب حلقه کرونا میدان در بقیه قسمت‌های مقره بالاتر رفته است و این نشان دهنده‌ی بهبود توزیع میدان الکتریکی در طول مقره می‌باشد. بیشینه‌ی میدان روی سطح غلاف پلیمری در شرایط خشک و حالت‌های پنج‌گانه یخ‌زدگی با حضور و عدم حضور حلقه کرونا در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



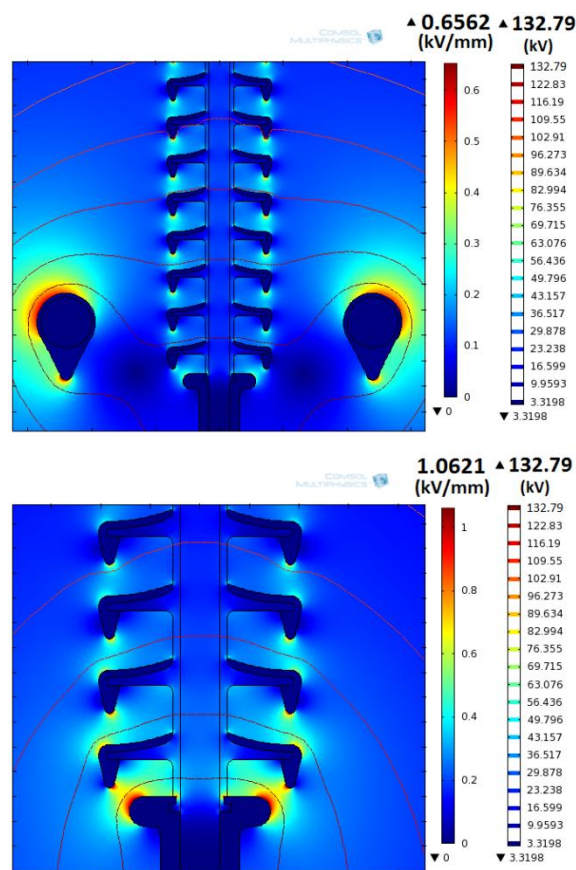
شکل (۱۶): بیشینه‌ی شدت میدان الکتریکی روی سطح غلاف پلیمری در شرایط خشک و حالت‌های پنج‌گانه یخ‌زدگی، با و بدون حلقه کرونا

همان‌گونه که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود نصب حلقه کرونا باعث کاهش حدوداً ۵۰ درصدی شدت میدان الکتریکی سطح غلاف پلیمری مقره شده است. یخ‌زدگی نوع ۳ بیش‌ترین تنش الکتریکی را به غلاف پلیمری مقره وارد می‌کند. شدت میدان الکتریکی سطح چترک پلیمری در فاصله‌ی هوایی در یخ‌زدگی نوع ۵ برابر با



شکل (۱۳): توزیع میدان الکتریکی در هوای اطراف مقره پلیمری در فاصله‌ی ۱۵ میلی‌متری لبه‌ی چترک‌ها در شرایط یخ‌زدگی نوع ۴ و ۵

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، حلقه کرونا باعث کاهش میدان الکتریکی در مقره‌ها می‌شود. در این بخش تاثیر نصب حلقه کرونا در شرایط یخ زده روی مقره پلیمری در حالت‌های مختلف بررسی شده است. شمای گرافیکی توزیع میدان الکتریکی و خطوط پتانسیل مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت با و بدون حلقه کرونا و در شرایط یخ زده نوع ۲ در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۱۴): توزیع میدان الکتریکی و خطوط پتانسیل مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت با و بدون حلقه کرونا در شرایط یخ‌زدگی نوع ۲

با توجه به شکل (۱۴)، بیشینه‌ی میدان الکتریکی در سطح انتهایی فلزی از 0.62 kV/mm به 0.656 kV/mm کاهش یافته است. همچنین بیشینه‌ی میدان از سطح تماس بحرانی سه‌گانه‌ی هوا، غلاف پلیمری و انتهای فلزی دور شده و روی سطح حلقه کرونا قرار گرفته است. توزیع میدان الکتریکی در هوای اطراف مقره پلیمری در

- of a melting period,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, pp. 2006-2013, 2005.
- [4] W. Sima, Q. Yang, C. Sun and F. Guo, “potential and electric field calculation along an ice covered composite insulator with finite element method,” IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 153, No. 3, pp. 343-349, 2006.
- [5] 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, v. 23, No. 2, pp. 823-830, 2008.
- [6] T. Doshi, and R. S. Gorur, “electric field computation of composite line insulators up to 1200 kV AC,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 3, pp. 861-867, 2011.
- [7] C. Volat, F. Farzaneh and H. Akkal, “Influence of a grading ring on AC flashover voltage of an EHV post insulator covered with ice,” IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 250-253, Virginia, January 2010.
- [8] E. Kuffel and W. S. Zaengl, *High Voltage Engineering*, Second Edition, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [9] J. S. T. Looms, *Insulators for High Voltage*, Peter Peregrinus Ltd, London, UK, 1988.
- [10] A. J. Phillips, D. J. Childs and H. M. Schneider, “Water drop corona effects on full scale 500 kV non-ceramic insulators,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp. 258 263, 1999.
- [11] A. Phillips, “Application of polymer insulators (NCI): workshop presentations,” 1002660, EPRI. Palo Alto, California, January 2003.
- [12] A. Phillips, “230 kV accelerated aging chamber: condition of composite components after one year of operation,” 1012326, EPRI. Palo Alto, California, December 2006.

زیر نویس‌ها

- ¹ Fiberglass rod
- ² Polymer sheath
- ³ Polymer weather sheds
- ⁴ Metal end fitting
- ⁵ Maxwell's equations
- ⁶ Poisson's equation
- ⁷ Laplace's equation
- ⁸ Meshing
- ⁹ Extremely fine

۰/۶۲ kV/mm می‌باشد. این شدت میدان الکتریکی در سطح چترک پلیمری، باعث وقوع کرونا می‌شود. بنابراین یخ‌زدگی سطح مقره پلیمری با وجود فاصله‌ی هوایی بدترین نوع یخ‌زدگی از لحاظ میزان تنش الکتریکی وارد بر مقره پلیمری می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری مبتنی بر روش‌های حل عددی یک روش کارآمد برای تحلیل میدان الکتریکی در مقره‌ها فراهم می‌آورد. در این مقاله، نرم‌افزار COMSOL Multiphysics که با استفاده از روش امان محدود مسائل را تحلیل می‌کند، برای تحلیل میدان الکتریکی مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت تحت شرایط تمیز و شرایط مختلف یخ‌زدگی، همچنین ارزیابی تاثیر نصب حلقه کرونا در این شرایط مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، نتایج زیر به دست می‌آید:

نصب حلقه کرونا در مقره‌های پلیمری کاهش محسوسی در شدت میدان الکتریکی ایجاد می‌کند. شدت میدان الکتریکی مقره پلیمری ۲۳۰ کیلوولت پس از نصب حلقه کرونا ۵۵٪ کاهش یافته است.

در شرایط یخ‌زدگی، شدت میدان الکتریکی سطح تماس غلاف پلیمری، لایه‌ی یخ و هوا افزایش قابل توجهی دارد. به عنوان نمونه بیشینه‌ی میدان الکتریکی سطح غلاف پلیمری در شرایط یخ‌زدگی نوع اول، در مقایسه با شرایط تمیز، ۲/۳ برابر شده است. این شدت میدان الکتریکی می‌تواند باعث وقوع کرونا شود.

وجود فاصله‌ی هوایی ناشی از فروریختن یخ باعث افزایش شدید میدان الکتریکی در فاصله‌ی هوایی می‌شود. در صورتی که فاصله‌ی هوایی ایجاد شده در لایه‌ی یخ، در چترک‌های نزدیک هادی ایجاد شود، شدت میدان الکتریکی در سطح غلاف و چترک‌های پلیمری بیش از مقدار مجاز ۰/۴۵ kV/mm می‌شود. این شدت میدان الکتریکی باعث وقوع کرونا در سطح مقره پلیمری می‌شود.

سپاس‌گزاری

در این بخش لازم است از شرکت برق منطقه‌ای تهران به سبب حمایت بی‌دریغ از این پژوهش، تشکر و قدردانی به عمل آید.

مراجع

- [1] J. F. Hall, “History & bibliography of polymer insulators for outdoor application,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp. 376-386, 1993.
- [2] V. Jaiswal, and M. Farzaneh, “Flashover Performance of a semi-conducting glazed post station insulator under icing conditions based on electric field distributions,” IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 10-13, 2005.
- [3] 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