

بررسی مشخصات خرابی عایق XLPE کابل‌های DC در محیط آتش



تحقیق و ترجمه: آرمان قاسمی نیا
(کارشناس ارشد مهندسی برق)

چکیده

به منظور بررسی عملکرد عایق XLPE کابل‌های DC در محیط آتش، رسانایی XLPE مورد استفاده در کابل DC در دماهای مختلف آزمایش و شدت میدان شکست XLPE در دماهای بالا (مختلف) اندازه‌گیری شد. این آزمون‌ها در یک کوره با دمای بالا انجام گرفت. در خلال انجام این آزمون‌ها توزیع شدت میدان داخل کابل DC نیز در دماهای بالا شبیه‌سازی شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اضافه بار بلندمدت کابل XLPE یا دمای بالای محیط، می‌تواند موجب افزایش شدت میدان الکتریکی عایق کابل گردد و این پدیده باعث ایجاد انواع عیوب شده و در نهایت شکست عایقی کابل را به همراه خواهد داشت. واژگان کلیدی: XLPE، کابل DC، رسانایی، شدت شکست، مشخصات عایقی.

۱- مقدمه

هرچه بیشتر آتش خواهد شد. وقتی یک خطای اتصال کوتاه رخ می‌دهد، مقدار قابل توجهی انرژی در نقطه اتصال کوتاه برای مدتی کوتاه رها می‌شود. دمای جرقه می‌تواند بین ۶۵۰۰ تا ۱۲۰۰۰ کلوین متغیر باشد که خیلی بیشتر از دمای شعله‌ور شدن مواد پلیمری XLPE است، بنابراین خطاهای اتصال کوتاه و جرقه‌ها می‌توانند باعث افزایش ناگهانی دما در موقعیت موضعی کابل شوند.

بررسی‌های اولیه نشان داد که افزایش دما بر روی مشخصه رشد درخت الکتریکی در عایق XLPE تأثیر زیادی دارد. در بررسی‌های بعدی مشخص شد که نرخ رشد درخت آبی ابتدا کاهش و سپس با افزایش دما افزایش می‌یابد. چون رشد درخت آبی در دمای بالا عمدتاً توسط حرکت حرارتی مولکولی و در دمای پایین، اغلب توسط رفتار جهت‌گیری زنجیره پلیمری تعیین می‌شود. سایر نتایج به دست آمده از این آزمون‌ها، عبارتند از:

- انبساط جانبی و افزایش طول XLPE به طور خطی با دما تغییر می‌کند.

با توسعه فناوری نوظهور انتقال DC، مزایای انتقال ولتاژهای بسیار بالا (UHV) به صورت DC، به تدریج گسترش یافت. از مزایای کابل فشار قوی DC (HVDC) می‌توان به دارا بودن ظرفیت انتقال بارهای بزرگ، مقاومت بالا در برابر شدت میدان الکتریکی و تلفات دی‌الکتریک پایین اشاره کرد، ضمن اینکه مشکلات میدان مغناطیسی AC را هم ندارد. علیرغم دمای کار بالای DC فشار قوی، وجود منابع حرارتی مانند؛ خطوط لوله‌های حرارتی، احتراق و آتش‌سوزی در کانال‌ها و منهول‌های کابل باعث افزایش دمای کابل XLPE و در نهایت شعله‌ور شدن کابل خواهد شد. اگر کابل XLPE برای مدت طولانی دارای بارگذاری سنگین یا اضافه بار باشد، حرارت بیش از حد ایجاد شده در اثر مواردی مانند؛ تراکم کابل‌های نصب شده و یا تهویه ضعیف کانال باعث افزایش حرارت کابل‌ها خواهد شد. علاوه بر این‌ها، وقتی کابل DC عملکرد نادرستی داشته باشد، چون جرقه DC تمایلی به خاموش شدن و فروکش کردن ندارد، بنابراین باعث سوختن کابل و در نهایت گسترش

- اگر دمای کابل کمتر از ۹۰ درجه سلسیوس باشد و به تدریج بالا رود، شدت میدان شکست کابل ۱۱۰ کیلوولتی AC عایق شده با XLPE، با افزایش دما کاهش می یابد.
- با افزایش دما، زمان شکست عایقی در همان شدت میدان کاهش می یابد.
- در ولتاژهای AC، رسانایی XLPE با افزایش دما یا شدت میدان، افزایش می یابد.
- کهنگی حرارتی نیز باعث افزایش پارامترهای رسانایی، شدت میدان شکست و توزیع شارژ (باردار شدن) در کابل DC XLPE می گردد.
- بیشتر محققان رابطه بین دما و عایق XLPE را در ولتاژهای AC، در محدوده دمایی ۱۵۰ درجه سلسیوس، بررسی کرده اند. پژوهش فوق نیز نشان دهنده تأثیر دما روی مشخصه عایق XLPE از جنبه های مختلف است.
- به طور معمول، دلایل اصلی آتش سوزی از دو جنبه قابل بررسی است؛ یکی به دلیل جرقه های ناشی از شکست عایقی کابل و دیگری آتش سوزی خارجی که ناشی از سوختن مواد آتش گیر در محیط نصب و ریزش آن ها بر روی کابل. نکته مهم اینکه مواد شعله ور یا دمای بالا می توانند باعث آتش سوزی غلاف بیرونی کابل شوند.

۲- فرآیند آزمایش

- مراحل مختلف فرآیند آزمایش عبارت است از:
- آماده سازی نمونه
 - تست شکست DC
 - اندازه گیری رسانایی (هدایت)

۲-۱- آماده سازی نمونه

قطعات مربعی شکل به ابعاد ۱۰۰ میلیمتر، از عایق XLPE آماده شد.

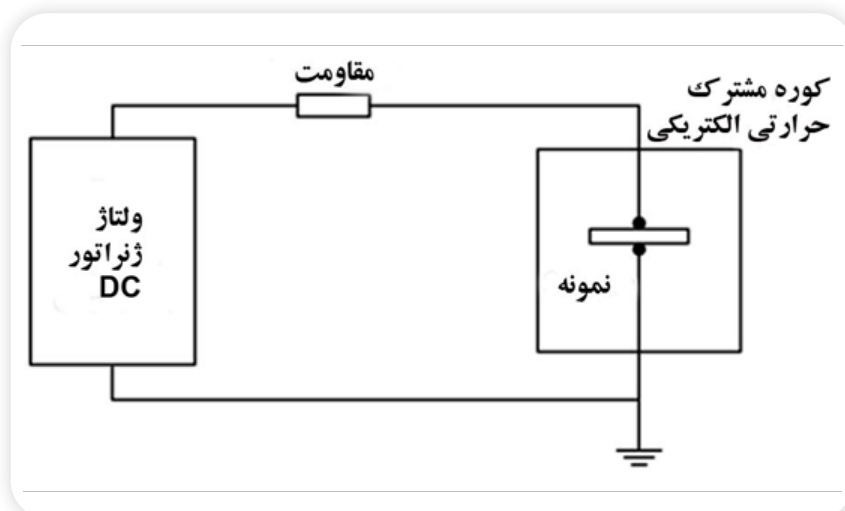
۲-۲- تست شکست DC

تجهیزات تست، شامل یک رگولاتور ولتاژ، یک ژنراتور DC فشار قوی، یک کوره (آون) حرارتی الکتریکی، و یک الکترودمقاوم در برابر دمای بالا، می باشد. تغییرات دمای کوره بین ۳۰ تا ۲۵۰ درجه سلسیوس بوده با نوسان دمایی ۱ درجه و تا ۰/۱ درجه قابلیت اندازه گیری دارد.

پشت کوره دو سوراخ گرد ایجاد شد. دو میله مسی پیچیده شده در تفلون، از طریق این دو سوراخ وارد کوره گردید و سپس دو سر این میله به یک گلوله مسی به عنوان پایانه متصل شد. نکته حائز اهمیت اینکه الکترودهای مقاوم در برابر دما باید از جنس برنج باشند.

الکترودمقاوم بالایی به سمت پائین تنظیم و ثابت شد. همانطور که در شکل ۱ و ۲ دیده می شود، صفحات بالا و پایین و چهار ستون نگهدارنده از جنس پلی اترکتون ۱ و مقاوم در برابر دمای بالا هستند.

سیستم تست از یک منبع تغذیه DC با ولتاژ ۱۵۰ کیلوولت که با نرخ افزایش ۱ تا ۲ کیلوولت بر ثانیه تنظیم شده، تشکیل شده است، ولتاژ خروجی نیز از پلاریته منفی گرفته شده است. این ولتاژ به صورت پله ای افزایش می یابد تا اینکه نمونه دچار شکست شود، مقدار ولتاژ شکست ثبت می شود. اگر شکست در لبه افزایش ولتاژ اتفاق افتد ولتاژ پله قبلی به عنوان ولتاژ شکست انتخاب می شود. ضخامت هر نمونه باید با یک



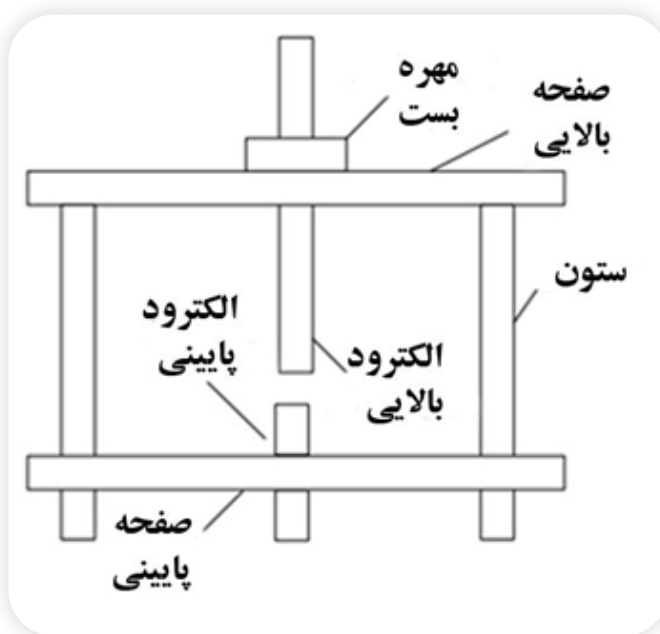
شکل ۱. سیستم مورد استفاده در آزمایش

مختلف اندازه‌گیری شود. ۴ نقطه دمایی ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه سلسیوس برای انجام تست انتخاب شده‌اند. قبل از تست، دمای داخل کوره می‌بایست برای ۱ ساعت ثابت نگه داشته شود تا دمای نمونه‌های داخل کوره، پایدار شوند. (دقت شود دما ۰/۱٪ درجه سلسیوس است.) در کل سیستم تست، الکترودها دارای غلاف هستند تا از تداخل دمای خارجی به طور مؤثر، جلوگیری شده و از دقت داده‌ها اطمینان حاصل شود. نمودار سیستم تست رسانایی جریان مستقیم در شکل ۳ نشان داده شده است. به منظور حذف تأثیر بار (شارژ) باقی‌مانده

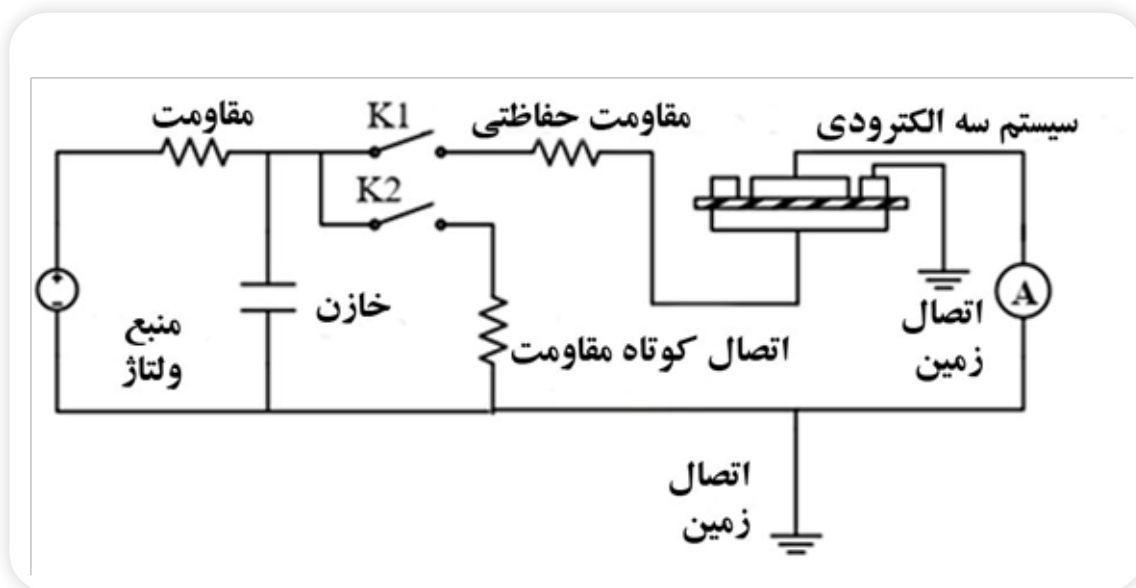
ضخامت سنج با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شود تا از مقادیر اندازه‌گیری شده، اطمینان حاصل گردد. حداقل ۱۰ سری از تست‌ها باید در هر دما، اجرا شود. اگر نتایج دارای پراکندگی بزرگی باشند، باید ۵ سری دیگر از تست‌ها دوباره انجام شوند.

۳-۲- اندازه‌گیری رسانایی (هدایت)

یک سیستم سه الکترودی در یک کوره خشک‌کن با دمای ثابت قرار داده می‌شود تا رسانایی DC نمونه در دماهای



شکل ۲. الکتروود مقاوم در برابر دمای بالا

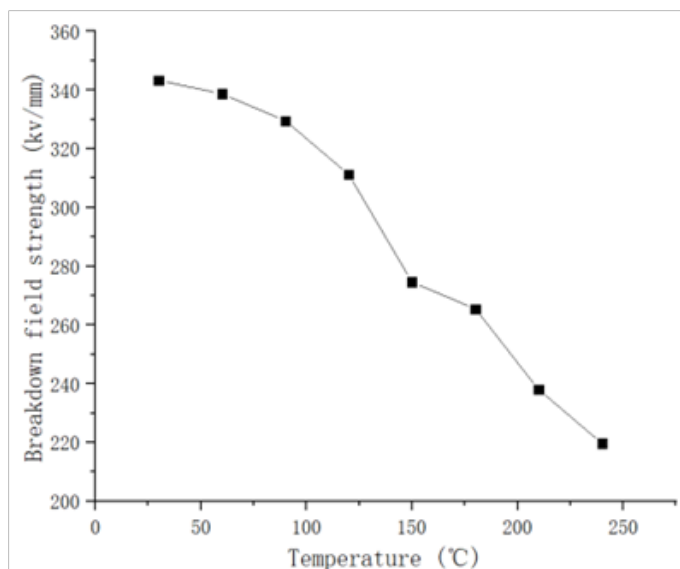


شکل ۳. سیستم اندازه‌گیری رسانایی DC

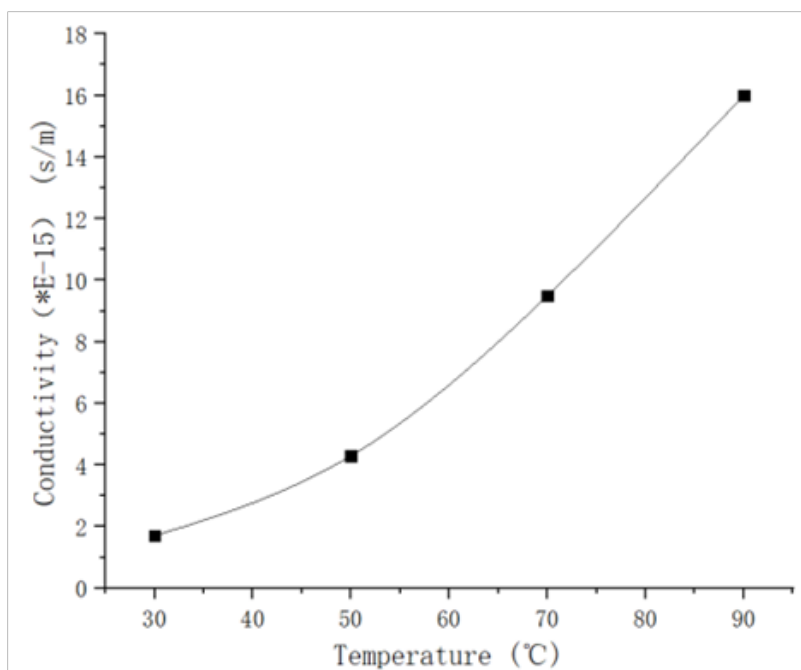
۳- نتایج و بحث

همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ دیده می‌شود، با افزایش دما، شدت میدان شکست کاهش یافته و رسانایی افزایش می‌یابد.

در نمونه، لازم است قبل از انجام تست رسانایی DC، عملیات پیش‌گرم انجام شود، برای این منظور نمونه در یک کوره با دمای ۶۰ درجه اتصال کوتاه می‌شود تا بار باقیمانده در آن، از بین برود، و تخلیه الکتریکی صورت گیرد.



شکل ۴. شدت میدان الکتریکی با دما تغییر می‌کند



شکل ۵. رسانایی با دما تغییر می‌کند

$$\gamma = Ae^{\left(-\frac{B}{kT}\right)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که γ هدایت، A عدد ثابت، B سد هدایتی، T دمای مطلق و k «ثابت بولتزمن» است.

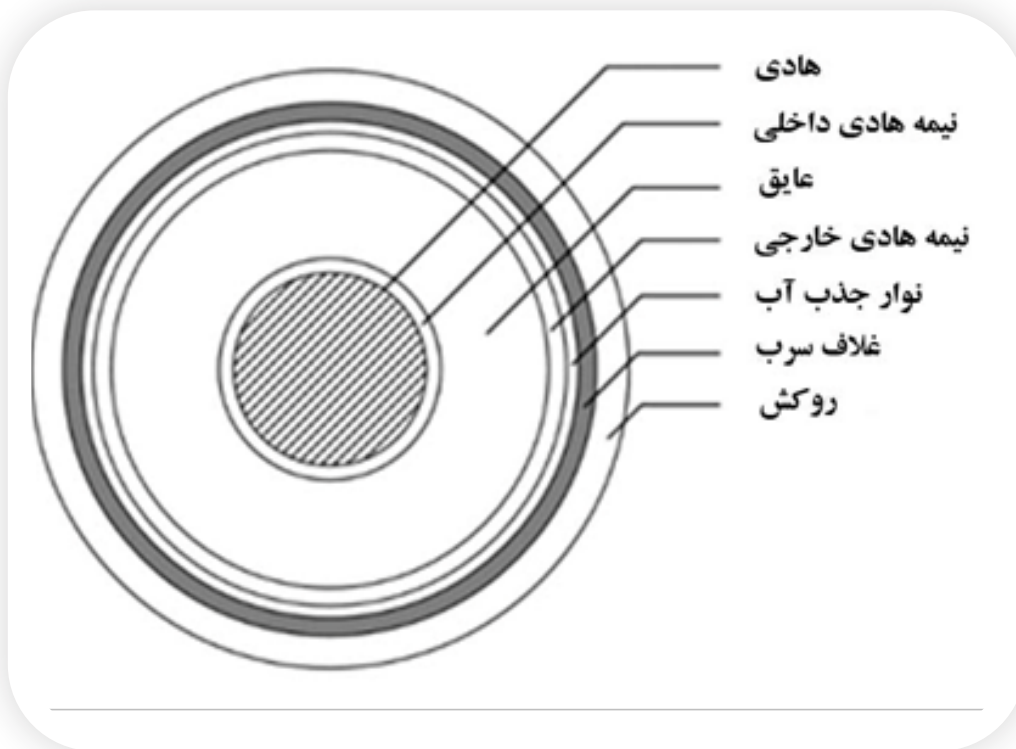
همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، وقتی میدان الکتریکی ثابت باشد، رسانایی DC عایق XLPE با افزایش دما به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. چون رسانایی XLPE دارای ضریب دمایی مثبت می‌باشد، تلفات دی‌الکتریک و دما با افزایش دما، افزایش بیشتری خواهند داشت. در نهایت، فرآیند فوق یک چرخه خطرناکی شکل می‌دهد که باعث تجزیه عایق XLPE و یا حتی شکست آن می‌شود.

۴- شبیه‌سازی

وقتی دمای داخلی و خارجی عایق کابل بیش از ۲۰۰ درجه باشد، عایق دچار شکست می‌شود. علاوه بر این دمای شکست عایق تقریباً ثابت است و ارتباطی به دمای محیط و نرخ گرمایش ندارد. به همین دلیل، توزیع میدان دمای داخلی و توزیع میدان الکتریکی کابل DC با عایق XLPE در ۱۸۰۰ ثانیه (زمانی که دمای محیط خارجی تا ۵۰۰ درجه سلسیوس می‌رسد)، شبیه سازی می‌شود. شکل ۶ ساختار مقطعی کابل DC را نشان می‌دهد.

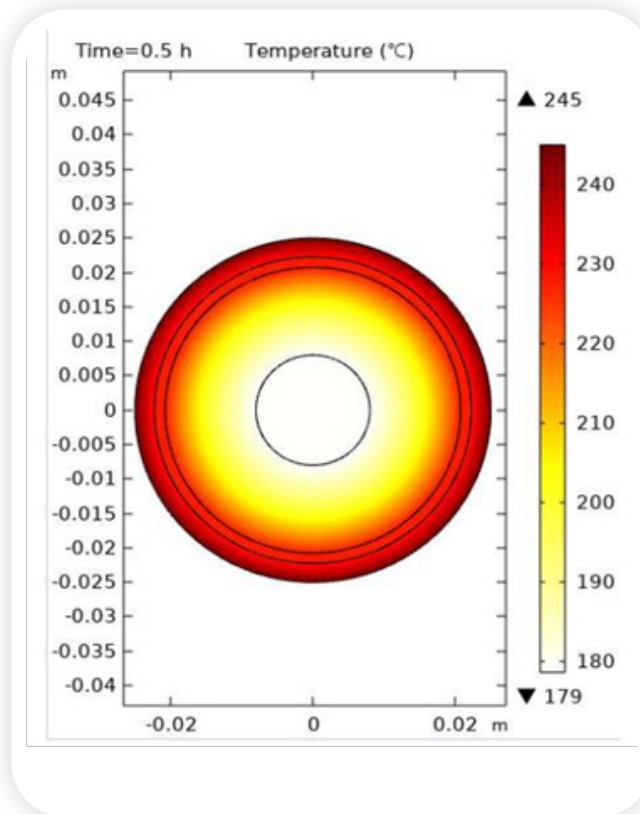
وجود ضریب دمایی و ضریب شدت میدان الکتریکی باعث می‌شود مقاومت لایه عایقی کابل DC، مشخصه توزیع بار فضایی از خود نشان دهد. توزیع میدان الکتریکی در لایه عایقی کابل DC، توسط توزیع مقاومت تعیین می‌شود. بنابراین، ضریب دمایی لایه عایقی باعث تغییر توزیع میدان الکتریکی در لایه عایقی می‌شود. به طور ذاتی، هیچ یونی در XLPE وجود ندارد. حامل‌های رسانایی (هدایتی) از ناخالصی‌هایی چون نرم‌سازهای قطبی، پرکننده‌ها (فیلرها)، آنتی‌اکسیدان‌ها و پایدارسازها استخراج می‌شوند و رسانایی دی‌الکتریک را افزایش خواهند داد. وقتی دما پایین باشد، عمدتاً ناخالصی‌ها هستند که الکترون‌های باند هدایت را ایجاد می‌کنند. وقتی دما افزایش می‌یابد، الکترون‌های رسانای تزریق شده به داخل دی‌الکتریک توسط الکتروود، افزایش می‌یابند. در همین حال، تحریک حرارتی از باند ظرفیت به باند هدایت باعث می‌شود، وقتی دما افزایش می‌یابد، جریان هدایت الکتریکی الکترون ذاتی افزایش یافته و در نتیجه مقاومت ویژه به صورت نمایی کاهش یابد.

فرآیند رسانایی در XLPE به نقش غالب هدایت یون ناخالصی تبدیل می‌شود و رسانایی الکتریکی ماده با دما رابطه نمایی دارد رابطه (۱)

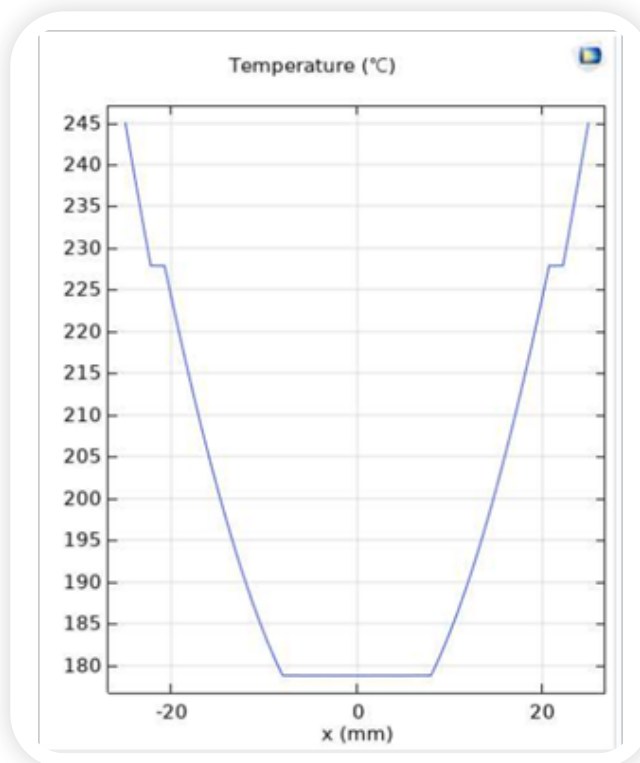


شکل ۶. ساختار سطح مقطعی کابل DC

همانطور که در شکل‌های ۷ و ۸ دیده می‌شود، دمای عایق در ۱۸۰۰ ثانیه بین ۱۷۵ تا ۲۲۷ درجه تغییر می‌کند. در نتیجه، عایق کابل به دمای شکست می‌رسد.



شکل ۷. توزیع دمای مقطعی



شکل ۸. توزیع دمای شعاعی

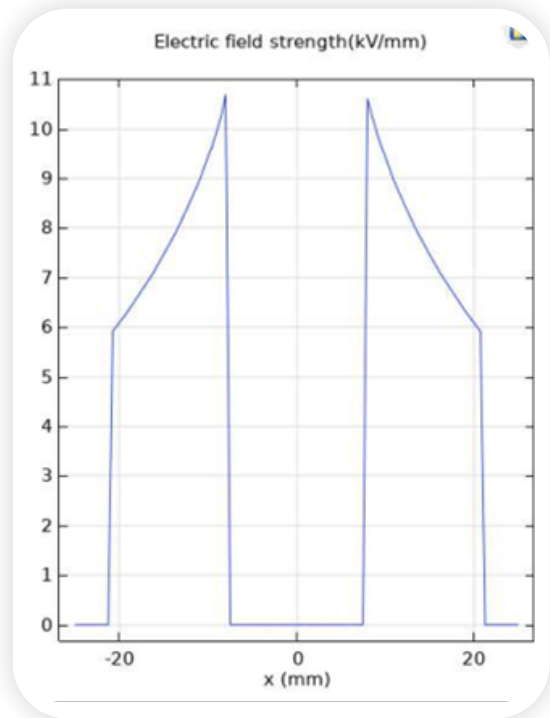
۵- نتیجه گیری

در این مقاله، عملکرد عایقی و توزیع میدان الکتریکی کابل های DC در آتش مطالعه گردید. همچنین گرادیان دمای لایه عایقی ناشی از افزایش دمای هسته کابل به همراه دمای بالای محیط خارجی و تغییرات مقاومت ویژه ماده عایقی که در اثر این افزایش دما در عایق کابل های DC ایجاد می شود، مورد بررسی قرار گرفت. وقتی دمای محیط ۵۰۰ درجه است شدت میدان الکتریکی در سطح هادی مسی به ۲۶ کیلوولت بر میلی متر می رسد و دمای عایق در ۱۸۰۰ ثانیه بین ۱۷۵ تا ۲۲۷ درجه متغیر است که در نهایت موجب تخریب و شکست عایقی می گردد.

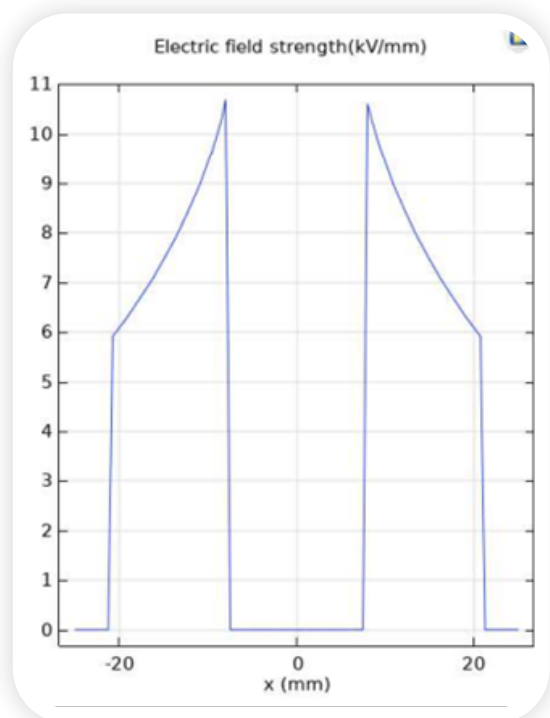
پی نوشت:

1. PEEK - (Polyether ether ketone)

شکل های ۹ و ۱۰ نمودارهای توزیع میدان الکتریکی شعاعی را به ترتیب در دو حالت شرایط عادی و وقتی دمای خارجی ۵۰۰ درجه است نشان می دهند. بیشترین شدت میدان الکتریکی در سطح هادی مسی می باشد که تا ۱۳۶٪ افزایش می یابد. اما شدت میدان شکست برای ماده XLPE به اندازه ۳۶٪ نسبت به شکل ۴ کاهش می یابد.



شکل ۹. توزیع میدان الکتریکی شعاعی تحت شرایط عادی



شکل ۱۰. توزیع میدان الکتریکی شعاعی در ۱۸۰۰ ثانیه، وقتی دمای خارجی ۵۰۰ درجه است