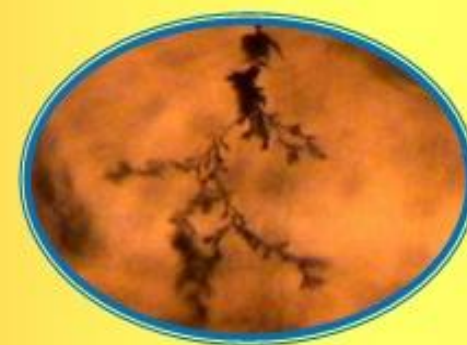
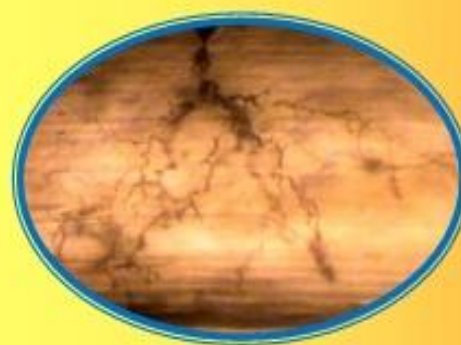


SIMCO



مکانیسم رشد درخت الکتریکی در عایق XLPE



تهیه کننده : واحد تحقیق و توسعه و آموزش

مکانیسم انتشار درخت الکتریکی در کابل های با عایق XLPE

خلاصه:

هدف از این مقاله بررسی ویژگی های رشد درخت الکتریکی¹ است و بدین منظور آزمایشی بر روی چند نمونه کابل انجام گرفته است. برای تعیین رابطه بین انتشار درخت الکتریکی در کابل های با عایق XLPE با مورفولوژی² (شکل شناسی)، از ویژگی های یک درخت الکتریکی دو ساختاره³ (دو شکل مختلف درخت در حین انتشار) استفاده شده است. در این مقاله مشخص خواهد شد که عواملی مانند اثر ناهمواریها، تفاوت های ساختار کریستالی و وجود استرس های پسماند⁴ در پلیمر می توانند باعث ایجاد 5 شکل درخت الکتریکی در کابل های با عایق XLPE گردند که شامل شاخه ای⁵، بوته ای⁶، شاخه ای-نرم⁷، شاخه ای-کاج⁸ و شکل ترکیبی هستند. رشد درخت الکتریکی در عایق های XLPE نیز شامل سه مرحله شروع، ایستایی و انتشار سریع می باشد. اگر مرحله شروع خیلی فعال باشد درخت تک شاخه خواهد شد و در صورتی که این مرحله ضعیف باشد درختی به شکل بوته ای پدید خواهد آمد. در صورتی که درخت الکتریکی در نواحی ناهموار با ابعاد کوچکتر از ماکروسکوپیک رشد کند یک درخت الکتریکی دو ساختاره ایجاد خواهد کرد. جهت تشریح ویژگی های انتشار درخت پارامترهای ضریب انبساط⁹، بعد فرکتال¹⁰ و نرخ رشد¹¹ مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه تشریح خواهند شد.

معرفی:

درخت الکتریکی به معنای شکاف برداشتن الکتریکی است که در مواد پلیمری رخ می دهد. این نامگذاری به دلیل شکل آن است که شبیه به درخت است. درخت الکتریکی دلیل اصلی از بین رفتن تجهیزات الکتریکی با عایق پلیمری مانند کابل های فشار قوی است. پس از اینکه یک درخت الکتریکی ایجاد می گردد، شکاف رشد کرده و باعث تخریب عایق می گردد و به همین دلیل وجود آن در عایق تجهیزات ولتاژ بالا مجاز نیست. از سال 1950 که درخت الکتریکی در مواد عایقی پلیمری برای اولین بار مشاهده شد، تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شد تا بینشی را نسبت به این مشکل ارائه دهد. با این حال بنا بر دلایل زیر تلاش بیشتری در این زمینه مورد نیاز است.

- (1) درخت الکتریکی یک پدیده پیچیده الکترو فرسایشی است و نتیجه بسیاری از فرایندها مانند یونیزاسیون برخورد، تجزیه اکسیداسیون، تخلیه جزئی، دمای بالای جزئی¹²، استرس های الکترومکانیکی، تغییر شکل فیزیکی، تجزیه شیمیایی و غیره است.
- (2) دومین مشخصه شروع اتفاقی درخت الکتریکی و رشد آن است که به دلیل تخریب غیر قابل بازگشت کانال درخت و تغییر در ساختار فیزیکی پلیمر، این پروسه در جامدات بسیار پیچیده تر از مایعات و گازها است. ظاهر این کانال ها برای رشد درخت می تواند برای نمونه های یکسان در شرایط آزمایشگاهی مشابه خیلی متفاوت باشد که این مسئله نشان دهنده پیچیدگی تحقیق در مورد مکانیسم این درخت است و گاهی اوقات داده های تجربی فقط می تواند یک نتیجه آماری باشد.
- (3) اغلب در تحقیقات اولیه در مورد درخت الکتریکی، محیط همگن در نظر گرفته می شود اما در واقع مشخصات الکتریکی ماده عایقی پلیمری که در مصارف فشار قوی مورد استفاده قرار می گیرد، تا حد زیادی تحت تاثیر

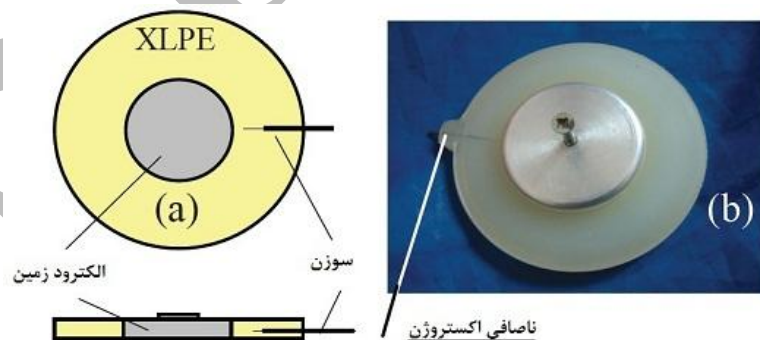
عواملی مانند ، شکل، حالت کریستالی ، استرس های مکانیکی ، ضخامت عایق، محیط و غیره است و در نتیجه به شدت ناهمگن است .

۴) ویژگی های ساختاری و مکانیسم شروع درخت الکتریکی و انتشار آن برای مواد دی الکتریک مختلف ، متفاوت است و فرآیند رشد آن در پلیمرهای نیمه کریستالی (مانند پلی اتیلن و XLPE) از سایر مواد نیز پیچیده تر است . اما این را می دانیم که درخت در امتداد قسمت هایی که از لحاظ الکتریکی ضعیف تر هستند رشد خواهد کرد .

همچنین می دانیم که شکل و ویژگی های انتشار درخت الکتریکی در پلیمر خالص تحت تاثیر عواملی است که مهمترین آنها عبارتند از : استرس های مکانیکی پس ماند و منافذ ریز در ماده دی الکتریک شکننده ، ناخالصی ها و منافذ ریز در ماده دی الکتریک آمورف¹³ ، اثر خاکستر کریستال ، غلظت ناخالصی و استرس مکانیکی پس ماند در ماده دی الکتریک رهمه بلورین . در این مقاله عکس های گرفته شده از درخت های الکتریکی در حین رشد ، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و ویژگی های رشد درخت الکتریکی و ارتباط آن با ساختار مورفولوژی XLPE مورد بررسی قرار گرفته است . این تحقیقات نشان داده است که تبلور ناهمگن ، تراکم بالای منافذ ماکروسکوپی و استرس مکانیکی پس ماند تاثیر بسیار زیادی در ویژگی های درختی ماده دی الکتریک دارد .

نمونه های آزمایش

تمام نمونه ها از کابل 66 کیلوولت با عایق XLPE انتخاب شدند . هادی کابل را جدا کرده و تعدادی نمونه از عایق با ضخامت 5mm بریده شدند . نوع الکتروود مورد استفاده در این مطالعه از نوع ساختار سوزنی-صفحه ای¹⁴ انتخاب گردید . دو نوع الکتروود سوزنی مورد استفاده قرار گرفت که یکی از جنس فولاد با شعاع $5 \pm 1 \mu\text{m}$ و دیگری تنگستن با شعاع $3 \pm 1 \mu\text{m}$ بودند . فاصله بین نوک الکتروود فشار قوی و الکتروود زمین در حدود 3mm کنترل گردید . برای اینکه یک سطح تماس خوب بین الکتروود سوزن و پلیمر ایجاد گردد ، سوزن در اتانول تمیز شده و سپس توسط یک قالب حرارتی مخصوص داخل نمونه قرار داده شد . نمونه در شکل 1 نمایش داده شده است . هدف بررسی رابطه بین ویژگی های درخت الکتریکی و استرس مکانیکی پس ماند است به همین دلیل بوسیله گرم کردن استرس مکانیکی پس ماند به عایق اعمال گردید و سپس نمونه ها بوسیله جریان هوا با نرخ خنک کنندگی حدود $10^\circ\text{C}/\text{min}$ سرد شدند . به صورت غیر مستقیم مشخص شد که استرس مکانیکی ناشی از وجود ناصافی در اکستروژن است . (مانند شکل 1 ، نمونه b)

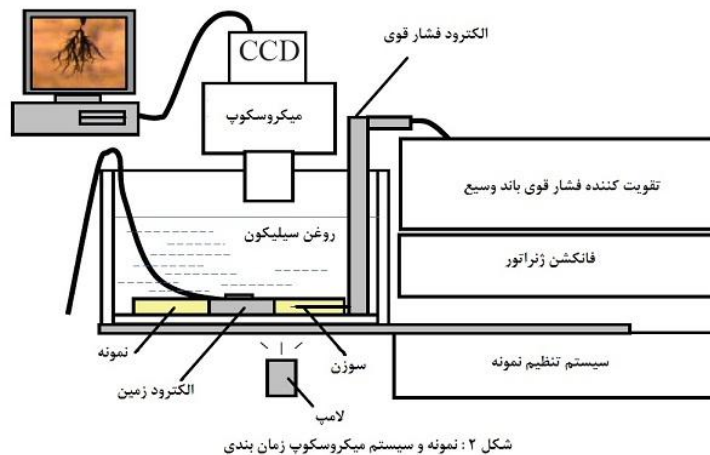


شکل 1: نمونه کابل با عایق XLPE

روش آزمایش

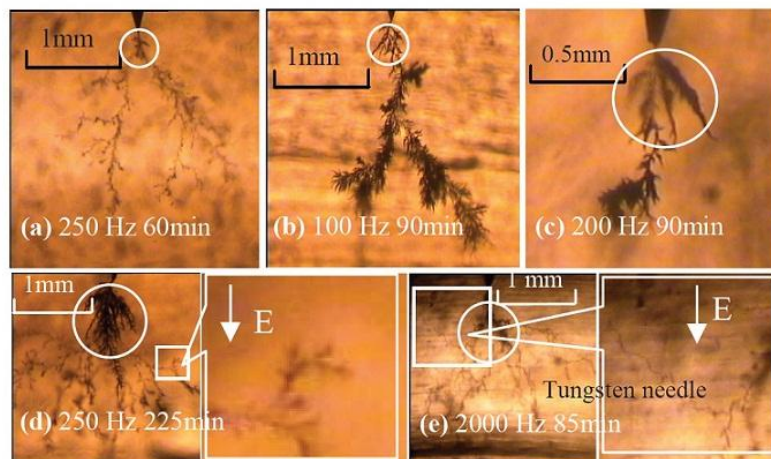
روش آزمایش در شکل 2 نشان داده شده است که اجزای اصلی آن عبارتند از : ژنراتور فشار قوی با فرکانس متغیر که شامل یک فانکشن ژنراتور و یک تقویت کننده فشار قوی با ولتاژ پیک خروجی تا 20 کیلوولت و فرکانس DC تا 3500 هرتز است ، دوربین دیجیتال رنگی ، یک دستگاه کامپیوتر ، میکروسکوپ با درجه کانونی بالا و یک موتور متحرک X-Y جهت تنظیم نمونه در

موقعیت صحیح . مزیت این روش آزمایش این است که می تواند به طور مداوم عکس بگیرد و طول درخت الکتریکی را که در حال انتشار است نمایش دهد .



نتایج آزمایش

این آزمایش در دمای محیط و محدوده 18 تا 25 درجه سانتیگراد و ولتاژ سینوسی با دامنه 20 کیلوولت انجام شد . شکل 3 ، تعداد 5 عکس را در حین آزمایش و همچنین دو عکس را که کمی بزرگتر شده اند ، نشان می دهد . جنس الکتروود فشار قوی در تصویر 3e سوزن تنگستن و در باقی موارد سوزن فولادی است . در محدوده فرکانسی 50 تا 2000 هرتز که از سوزن فولادی استفاده گردید ، فقط تا فرکانس 250 هرتز درخت الکتریکی به صورت دو ساختار مشاهده گردید . در این درخت دو ساختار در بخش اول ، درخت با ساختار شاخه ای ایجاد گردید و در بخش دوم نیز یکی از سه نوع شاخه ای-کاج ، شاخه ای-نرم و شاخه ای-بوته ای . اما زمانی که از سوزن تنگستن استفاده گردید فقط درخت الکتریکی دو ساختار ظاهر گردید که بخش دوم به شکل شاخه ای-نرم بود .



شکل ۳: سه نوع درخت الکتریکی دو ساختار و ویژگی های ساختار دوم

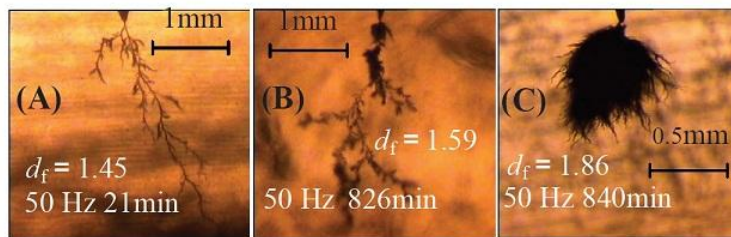
عکس هایی که از درخت الکتریکی در بیش از 40 نمونه گرفته شده نشان می دهد که ساختار اولیه در تمامی درخت ها بدون استثناء شکل شاخه ای است و این واقعیت بدین معناست که در عمل مکانیسم شروع یکسان است . بخش اول درخت الکتریکی دو ساختار همیشه به شکل شاخه ای تیره و یا متراکم است هر چند که بخش دوم سه ساختار اساسی به صورت شاخه ای-کاج ، شاخه ای-نرم و بوته ای خواهد داشت .

نوع شاخه ای-نرم و شاخه ای-کاج نه فقط در همه جهات پهن می شوند بلکه برخی از شاخه های آن از جهت میدان الکتریکی اعمالی نیز منحرف می شوند (مانند شکل 3e و 3d) . حال آنکه شاخه ای-نرم خیلی بیشتر جالب توجه است زیرا که

برخی از شاخه ها برای فاصله زیادی نسبت به شاخه اصلی حتی عمود بر جهت میدان اعمالی نیز هستند (شکل 3e). در مقایسه با درخت الکتریکی شاخه ای-نرم ، شاخه ای-کاج از لحاظ رنگ تیره تر و دارای پهنای کمتر است و در نتیجه مکانیسم انتشار متفاوتی دارد .

تشریح رشد چند گانه درخت الکتریکی

درخت الکتریکی که در عایق XLPE رخ می دهد را می توان به سه دسته شاخه ای ، شکل ترکیبی و بوته ای (به ترتیب شکل های 4a و 4b و 4c) تقسیم بندی کرد . شکل ترکیبی را نیز می توان به سه دسته درخت شاخه ای-کاج متراکم ، درخت شاخه ای-نرم متراکم و درخت شاخه ای-بوته ای متراکم تقسیم بندی کرد . (قسمت متراکم شاخه ای نیز در شکل 3a تا 3c نمایش داده شده)






شکل ۴: سه نوع درخت الکتریکی در XLPE

تشریح ویژگی های مراحل رشد درخت الکتریکی

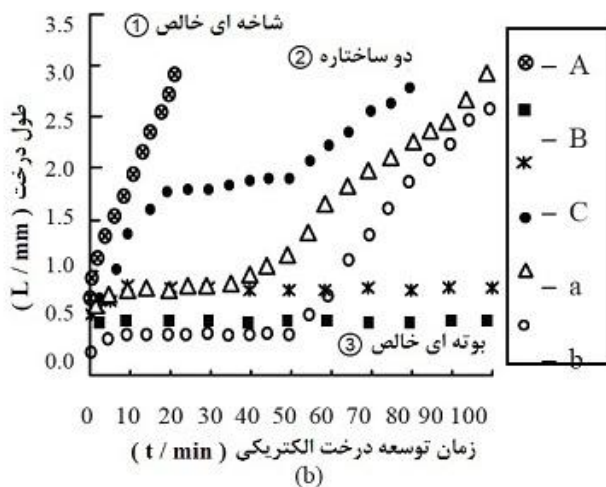
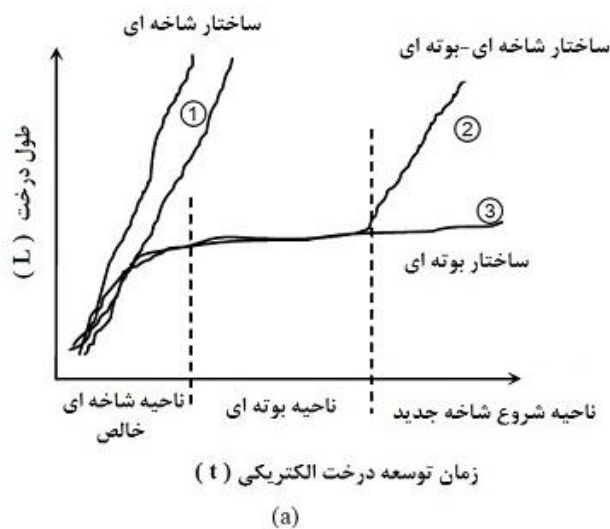
شکل 5 ، نرخ رشد طول درخت الکتریکی را بر حسب زمان نمایش می دهد . ویژگی های مراحل رشد درخت الکتریکی را می توان به کمک نرخ رشد تشریح کرد . شکل 5a به صورت خلاصه نتایج تجربی نرخ رشد درخت الکتریکی را نمایش می دهد . شکل 5b نیز نتایج آزمایشات انجام شده است و به همراه جدول 1 فرآیند رشد درخت را تشریح می کند . در شکل 5b ، ویژگی های منحنی A مربوط به انتشار درخت الکتریکی در شکل 4A است و خصوصیات منحنی B و C در شکل 5b مربوط به انتشار درخت الکتریکی در مرحله آغازین این درخت در شکل 4B و 4C است . در واقع طول این درخت در شکل 4B و 4C از زمان 100 دقیقه تا 840 دقیقه تغییرات کمی دارد . منحنی b حاصل از نتایج تجربی در شکل 5b نیز متعلق به درخت دو ساختاره شاخه ای ، شاخه ای-کاج در شکل 3b است و منحنی های a و c در شکل 5b نیز به ترتیب مربوط به درخت دو ساختاره شاخه ای ، شاخه ای-نرم و شاخه ای ، شاخه ای-کاج هستند . بر اساس شکل به وضوح می توان دید که ویژگی های هر مرحله در نرخ رشد که در شکل 5 نمایش داده شده است ، شبیه به فرآیند رشد درخت الکتریکی در جدول 1 است و درخت الکتریکی دو ساختاره هر سه مرحله رشد را دارد .

جدول 1 : فرآیند انتشار درخت الکتریکی دو ساختاره

توصیف	تغییرات ساختار درخت الکتریکی		مورد
	در انتها	در حین پروسه	مرحله
1. عایق از طرق سوزن شارژ شده ، سپس درخت الکتریکی ظاهر می گردد 2. ساختار تک شاخه آشکار می گردد			1. مرحله شروع شاخه ای

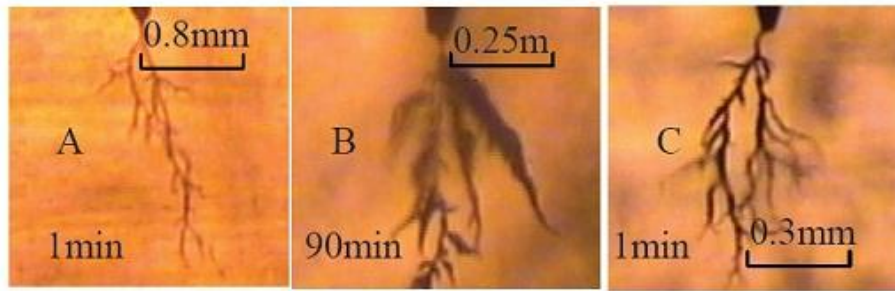
<p>1. از طریق درخت عایق شارژ می گردد 2. درخت تیره و متراکم می گردد و یا درخت شاخه ای-بوته ای ظاهر می گردد</p>			<p>2. مرحله ایستایی درخت الکتریکی</p>
<p>در قسمت بالایی درخت شاخه ای-نرم ، درخت شاخه ای-کاج ظاهر می گردد و به سرعت رشد می کند عایق به زودی شکسته خواهد شد</p>		<p>3. مرحله ایجاد درخت الکتریکی دو ساختاره</p>	

در تمامی نمونه ها ، ساختار مرحله شروع درخت الکتریکی شبیه به شکل شاخه بودند و یا اینکه تقریباً به شکل شاخه و به رنگ طوسی روشن بودند و در مرحله انتشار کند بتدریج به شکل شاخه متراکم و به رنگ طوسی تیره تبدیل شدند . اگر درخت خیلی سریع رشد کند به شکل شاخه باقی می ماند و رنگ آن تغییر نخواهد کرد . شکل 6 عکس بزرگ شده مرحله شروع رشد درخت الکتریکی در شکل 4 است . (برچسب های A , B , C نیز مانند شکل 4 در نظر گرفته شده است)



(a) خلاصه ای از رابطه بین سرعت رشد و ساختار درخت الکتریکی
(b) رابطه بین سرعت رشد و ساختار درخت الکتریکی بر اساس آزمایش

شکل 5 : رابطه بین سرعت رشد و ساختار درخت الکتریکی

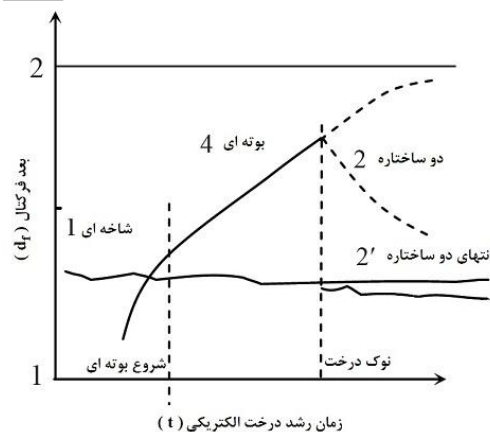


شکل ۶: ساختار ابتدایی درخت الکتریکی شکل ۴

نرخ رشد ابتدایی (در شکل ۵) نشان می دهد که مکانیسم شروع درخت در تمامی انواع آن در عایق XLPE مشابه است. بعد از اینکه درخت ظاهر شد، با سرعت رشد آن به صورت سریع ادامه پیدا می کند و در نتیجه ساختار تک شاخه ای مانند شکل 4a مشاهده می شود و یا اینکه سرعت آن کاهش می یابد و وارد مرحله انتشار کند می گردد. اگر این مورد اتفاق بیفتد تعداد خیلی بیشتری کانال از شاخه اصلی شروع به رشد می کنند و فرم درخت را از شکل شاخه ای به شکل بوته ای یا بوته ای جزئی تبدیل می کنند. (که در شکل 4b و 4c نشان داده شده است) رفتار رشد درخت بعد از شکل گیری شاخه اصلی به شدت وابسته به مورفولوژی ماده و استرس مکانیکی پس ماند و توزیع منافذ ریز است.

تشریح رابطه بین تغییرات بعد فرکتال و رشد درخت

ویژگی های دینامیک درخت الکتریکی بوسیله ویژگی های دینامیک بعد فرکتال و نسبت متریک D/L که در ادامه آمده، تشریح می گردد. جهت تشریح ویژگی های رشد درخت الکتریکی، پارامتری که بعد فرکتال (d_f) نامیده می شود، مورد استفاده قرار می گیرد. در واقع بعد فرکتال ضریب پر کنندگی درخت در ناحیه رشد آن است. برای تشریح بعد فرکتال درخت در این تحقیق، روش شمارش جعبه ای مورد استفاده قرار گرفته است و تغییرات مقدار d_f از 1 تا 2 است که در یک تصویر دو بعدی برای حالت شاخه ای عدد 1 و برای حالت بوته ای عدد 2 در نظر گرفته می شود. به عنوان مثال، برای درخت های الکتریکی شکل 4 مقدار بعد فرکتال برای شکل 4a برابر 1.46 و برای شکل 4b برابر 1.59 و برای شکل 4c برابر 1.86 است.



شکل ۷: رابطه بین بعد فرکتال و ساختار درخت الکتریکی

بر اساس تغییرات بعد فرکتال در فرایند انتشار درخت که در شکل 7 نشان داده شده، این تغییرات را می توان به سه گروه تقسیم بندی کرد. که به ترتیب به آغاز شاخه درخت، شکل گیری درخت به صورت بوته ای و پیشروی نوک درخت وابسته است.

مقدار بعد فرکتال در شروع درخت الکتریکی $d_f=1$ است. اگر مقدار d_f در مراحل اولیه تغییرات کمی داشته باشد در نتیجه شکل آن به صورت تک شاخه (شکل 7، منحنی 1) خواهد بود. زمانی که مقدار d_f شروع به افزایش کرد به معنای شکل بوته ای (شکل 7، منحنی 4) است. سپس زمانی که تعدادی شاخه جدید از نوک درخت بوته ای خارج گردد، مقدار d_f به سرعت کاهش می یابد. این نکته بسیار حائز اهمیت است که اگر این مقدار بسیار قابل ملاحظه کاهش یابد وارد ناحیه دو ساختاره (شکل 7، منحنی 2) خواهد شد.

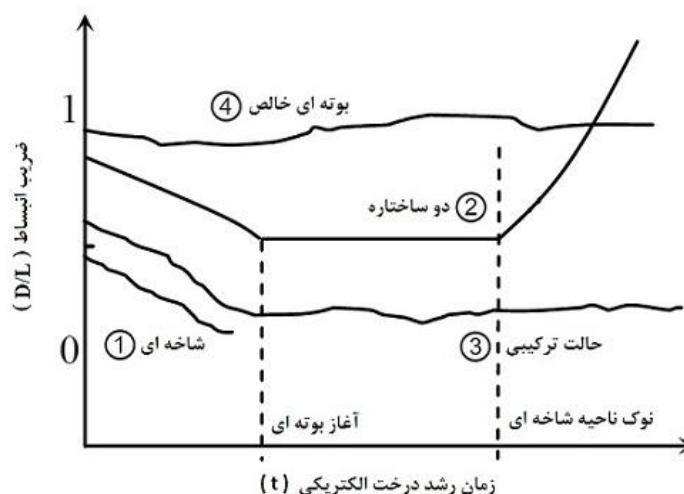
تشریح ضریب انبساط (D/L)

رشد درخت الکتریکی را در جهت میدان الکتریکی اعمال شده می توان توصیف کرد اما رشد قابل ملاحظه این درخت در جهت هندسی غیر از میدان الکتریکی اعمال شده را نمی توان توصیف کرد. بعد فرکتال نمی تواند ویژگی های هندسی ساختار و مقدار گسترش عرضی درخت الکتریکی را توصیف کند. از این رو پارامتر دیگری به نام ضریب انبساط (D/L) را می توان استفاده کرد که در آن L حداکثر طول درخت و D حداکثر پهنای درخت است. استفاده از D/L می تواند مزایای زیادی را جهت نمایش گسترش عرضی یک درخت الکتریکی دو ساختاره نشان دهد.

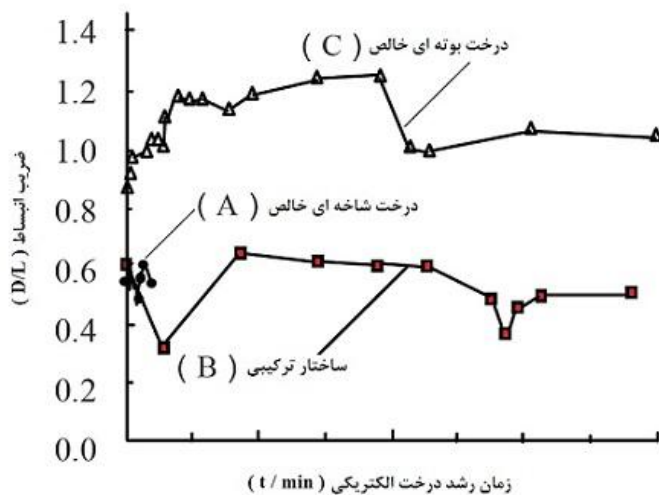
شکل 8 خلاصه تغییرات D/L را در دوره انتشار درخت نشان می دهد. در حالیکه شکل 9 منحنی D/L آزمایش واقعی را نشان می دهد. شکل 9a مربوط به سه نوع درخت الکتریکی در شکل 4 و شکل 9b مربوط به درخت های شکل 3 است. بر اساس منحنی های شکل 9b می توان به وضوح دید که رابطه تنگاتنگی بین درخت الکتریکی دو ساختاره و سه مرحله انتشار درخت وجود دارد. افزایش فرکانس ولتاژ اعمال شده نیز نرخ رشد درخت دو ساختاره را شتاب می دهد. به عنوان مثال، برای درخت های شکل 3، از شکل 9b به سادگی می توان فهمید که رابطه بین شیب رشد درخت در فرکانس های مختلف به صورت $(K_{2000\text{Hz}} > K_{250\text{Hz}} > K_{100\text{Hz}})$ است و نسبت آن به صورت $(0.03 : 0.012 : 0.0067 : K_{2000\text{Hz}} : K_{250\text{Hz}} : K_{100\text{Hz}})$ است.

تشریح مکانیسم سه مرحله درخت در عایق کابل های XLPE

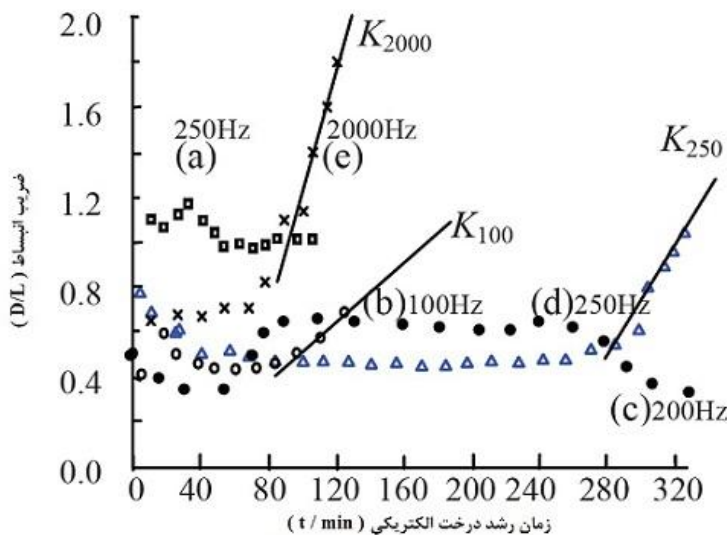
تشریح مکانیسم انتشار درخت الکتریکی دو ساختاره با استفاده از جداول 1 و 2 انجام می گردد. در این دو جدول فرآیند انتشار درخت به سه مرحله تقسیم می شود. برای شفاف سازی، در جدول 2 تغییرات پارامترهای سه مرحله انتشار شامل آغاز درخت، ایستایی و حالت شاخه ای-نرم و شاخه ای-کاج توضیح داده شده و همچنین در این جدول ساختار و ویژگی های هدایتی کانال درخت در هر مرحله انتشار مطرح گردیده است.



شکل 8: رابطه نتیجه گرفته شده بین ضریب انبساط و ساختار درخت الکتریکی



(a) قوانین انبساط سه نوع درخت الکتریکی



(b) رابطه بین ضریب انبساط و فرکانس

شکل ۹: رابطه بین ضریب انبساط و ساختار درخت الکتریکی

لازم به ذکر است که اندازه تزریق شارژ از طریق سوزن به عایق، تاثیر قابل ملاحظه ای در مرحله شروع درخت الکتریکی خواهد داشت. بر اساس آزمایشات سریعترین انتشار درخت الکتریکی در 7 دقیقه در الکتروود زمین اتفاق افتاد. این واقعیت در مورد رشد درخت الکتریکی در این وضعیت نشان می دهد که ادامه درخت می تواند متناسب با غلظت نسبی انرژی باشد. اگر عمق تزریق شارژ از طریق سوزن کمتر شود و ماده دی الکتریک همگن باشد، کانال مربوط به شاخه اصلی درخت الکتریکی از عایق به نیمه هادی تغییر خواهد کرد و ساختار آن به صورت یک شاخه متراکم و یا شکل شاخه ای-بوته ای خواهد بود. در این حالت رنگ درخت نیز از طوسی روشن بتدریج به سمت مشکی تغییر خواهد کرد.

شکست در ساختار تک درخت ناشی از فرکانس نیست. ممکن است این پدیده ناشی از فرایند تصادفی ایجاد درخت و تراکم متفاوت شاخه ها باشد، اما هنوز می توان یک قاعده تقریبی پیدا کرد: فرکانس بالاتر باعث افزایش سرعت رشد درخت می گردد.

جدول 2 : آنالیز ضرایب ، ساختار و مکانیسم در فرایند انتشار درخت الکتریکی

ویژگی های درخت الکتریکی	مکانیسم	پارامترها			مراحل انتشار درخت
		d_f	D/L	L/t	
درخت الکتریکی شاخه ای در عایق منتشر می گردد .	تزریق الکترون از طریق سوزن باعث می شود که تغییراتی در مناطق اطراف سوزن ایجاد گردد و درخت الکتریکی با تراکم کم منتشر گردد .	کوچکتر	↓	بزرگتر	1. مرحله آغاز شاخه
درخت الکتریکی در نیمه هادی به شاخه ای-بوته ای تغییر می کند .	کاهش PD و تجزیه محلی و الکترو فرسایشی باعث می شود تا تراکم درخت الکتریکی افزایش یابد . کانال درخت الکتریکی بتدریج رسانا شده و باعث اعمال شارژ به مناطق بیشتر می شود و باعث ایجاد یک منطقه الکتریکی ضعیف گسترده تر می گردد .	↑	↑	↓	2. مرحله ایستایی درخت الکتریکی
پهن شدن درخت در عایق به شکل شاخه ای-نرم و در نیمه هادی به شکل درخت شاخه ای-کاج منتشر می گردد .	PD تقویت شده و درخت الکتریکی در امتداد منافذ ریز و در مرز کریستال بوسیله دمای بالای جزئی و فشار اتمسفر گسترده می شود . شکل درخت در عایق شاخه ای-نرم و در نیمه هادی به شکل شاخه ای-کاج خواهد بود .	↓	↑	↑	3. مرحله ایجاد درخت الکتریکی دوساختاره

در مرحله سوم انتشار درخت ، نوع انتشار (به شکل شاخه ای-نرم ، شاخه ای یا بوته ای متراکم) ناشی از نیمه هادی است که باعث تزریق شارژ به عایق می گردد . این مسئله باعث می شود تا ماده دی الکتریک در نواحی با ابعاد کوچکتر از ماکروسکوپی ضعیف شده و یک PD جدید ایجاد کند . پس از آن دما و فشار بالای جزئی ایجاد شده توسط PD ، باعث ایجاد نرم شدگی و ترک خوردگی منافذ ریز می شود . این روند موجب می گردد تا منافذ ریز به صورت شکل زنجیره ای مرواریدی شوند و در نتیجه درختی به شکل تک شاخه حاصل خواهد شد . این یک توضیح عملی برای شکل $3e$ است که یک تک شاخه در جهتی متفاوت از جهت میدان الکتریکی اعمالی منتشر شده است . البته به دلیل تغییرات موضعی ساختار کریستال ، تعداد حفره های میکروسکوپی ، استرس مکانیکی و توزیع ناخالصی ، نقص هایی در ابعادی کوچکتر از ماکروسکوپی در XLPE ایجاد می نماید که به صورت یکنواخت نیست و این باعث می شود تا ساختار دوم درخت متفاوت از ساختار اولیه باشد و در نتیجه برخی به شکل شاخه ای-نرم و برخی دیگر نیز به شکل شاخه ای-کاج و یا شکل بوته ای خواهند بود .

محاسبات منافذ ریز در عایق کابل های XLPE

این را می دانیم که ضریب انبساط حرارتی XLPE از تمام پلیمرها بیشتر است . به منظور آنالیز کمی تعداد منافذ ریز در عایق کابل های XLPE یک روش ساده محاسباتی در ادامه آمده است . با فرض قطر خارجی عایق $2R$ و قطر داخلی عایق کابل $2r$ و ضریب انبساط حرارتی خطی XLPE برابر α ، هنگامی که آخرین لایه کابل سفت می گردد ، حجم این منافذ ریز ΔV ایجاد شده توسط لایه داخلی و جمع شوندگی¹⁵ به صورت زیر است :

$$\Delta V = l \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot \pi \{ (R^2 - r^2) - [R^2(1 - \alpha \cdot \Delta t)^2 - r^2] \}$$

$$\Rightarrow \Delta V = l \cdot \pi R^2 \alpha^2 \Delta t^2 (2 - \alpha \cdot \Delta t)$$

که در آن l طول کابل و Δt اختلاف دما است . اگر $\alpha \cdot \Delta t \ll 1$ رابطه بالا را می توان به صورت زیر ساده کرد .

$$\Delta V = 2l \cdot \pi (R\alpha \cdot \Delta t)^2$$

به عنوان مثال برای یک کابل XLPE با ولتاژ 110 کیلوولت و با پارامترهای $r=11.3 \text{ mm}$ و $R=29.8 \text{ mm}$ و با قرار دادن مقدار $\alpha=15 \cdot 10^{-5} / \text{K}$ (جهت عایق XLPE این عدد بین $10 \cdot 10^{-5}$ و $20 \cdot 10^{-5}$ است) ، دما در حین تزریق 160 درجه و پس از خنک کاری 20 درجه سانتیگراد ، درصد حجم این منافذ ریز در XLPE به صورت زیر است :

$$\frac{\Delta V}{V} * 100\% = \frac{2l\pi (R\alpha \Delta t)^2}{l\pi (R^2 - r^2)} * 100\% = 0.103\%$$

با فرض منافذ ریز کروی با شعاع متوسط $b=1\mu\text{mm}$ ، تعداد آنها در واحد حجم (1cm^3) از عایق کابل را می توان به صورت زیر محاسبه کرد .

$$n/V = \frac{\Delta V/\Delta v}{V} = \frac{2\pi(R\alpha\Delta t)^2}{\left(\frac{4}{3}\pi b^3\right).\pi(R^2-r^2)}$$

$$\Rightarrow n/V = 2.46 * 10^8 \text{ (Number/cm}^3\text{)}$$

این نتیجه جالب به نظر می رسد . هر چند که با فرض جمع شوندگی کم در طول کابل محاسبات انجام شد ، مقدار واقعی منافذ ریز در عایق XLPE باید به مراتب کمتر از مقدار محاسبه شده باشد . هرچند که تعداد آنها چند رتبه پایین تر از این مقدار است اما هنوز تعداد آنها زیاد است .

نسبت حجمی این منافذ ریز بر اساس گزارشات در حدود 0.007 تا 0.4 درصد است . علاوه بر این دلایلی نیز مانند تراکم آروماتیک¹⁶ وجود دارد که منجر به تشکیل منافذ درشت در عایق کابل های XLPE می شود . با این حال طبیعی است که یکی از مهمترین عوامل ایجاد منافذ ریز در عایق XLPE در پروسه تولید فرایند جمع شوندگی است .



(a)

(b)

شکل ۱۰: استرس مکانیکی باقیمانده و کریستال ناهموار در نمونه

بدیهی است که منافذ ریز یکی از اصلی ترین فاکتورهای ضعیف شدن عایق کابل است ، زیرا فرایند خنک کاری بعد از اکستروژن XLPE از لایه های بیرونی به لایه های داخلی است . عوامل تضعیف از قبیل منافذ ریز ، کریستال ناهموار و استرس مکانیکی پس ماند همگی در ناحیه داخلی تر عایق متمرکز هستند جایی که میدان الکتریکی اعمالی نیز حداکثر است . به منظور اثبات تاثیر قابل توجهی که استرس مکانیکی پس ماند و حالت گوی سنگی¹⁷ کریستال در انتشار درخت الکتریکی دارند ، عکس هایی از انتشار درخت الکتریکی در امتداد ناحیه استرس مکانیکی (شکل 10a) و مرز گوی سنگی کریستال (شکل 10b) که بوسیله میکروسکوپ قطبی گرفته شده در شکل 10 آمده است .

بدون شک منافذ ریز ، کریستالی شدن ناهمگن و استرس مکانیکی پس ماند که در ناحیه داخلی عایق متمرکز شده اند سه فاکتور اساسی هستند که باعث رشد درخت الکتریکی در امتدادی متفاوت از جهت میدان الکتریکی اعمالی می شوند . تاثیر این قضیه بر روی کابل های فوق العاده ضخیم مانند 220 کیلوولت و بالاتر شدیدتر است .

تشریح فشار گاز بالای جزئی و دمای بالای جزئی در ایجاد درخت

فشار گاز بالای جزئی و دمای بالای جزئی¹⁸ که توسط تخلیه جزئی در کانال درخت ایجاد شده اند ، دلیل اصلی انتشار درخت شاخه ای-نرم در امتداد جهت تمرکز منافذ ریز بین ناحیه کریستال و آمورف است که به صورت مختصر می تواند به روش زیر تحلیل شود .

میزان گاز متمرکز در کانال درخت و انرژی تبخیر توسط تخلیه جزئی تامین می شود. انرژی تخلیه شده توسط یک پالس می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$w = \frac{QU}{2}$$

که در آن Q شارژ ایجاد شده توسط تخلیه یک پالس و U ولتاژ اعمال شده است. از این رابطه حجم گاز تولید شده V_0 را با فرض اینکه پلیمر در کانال درخت بوسیله تخلیه انرژی تک پالس، تجزیه شده است می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$V_0 = \frac{w}{w_p} = \frac{QU}{2w_p}$$

که در آن w_p انرژی تبخیر پلیمر با واحد J/cm^3 است. رابطه بین حداکثر تخلیه پلیمر Q_m و طول L درخت به صورت زیر است:

$$Q_m = \alpha \cdot L^\beta$$

که در آن α و β ضرایب ثابت هستند.

در نهایت رابطه بین حجم گاز ناشی از تخلیه و طول فاصله هوایی گاز L را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$V = \frac{\alpha UL^\beta}{2w_p}$$

انرژی گرمایی تولید شده توسط تخلیه جزئی باعث نرم شدن اطراف کانال درخت می گردد. فشار گاز خیلی بالای جزئی باعث می شود که کانال درخت الکتریکی در امتداد مناطقی که از لحاظ فیزیکی ضعیفتر هستند و یا در جهت تمرکز منافذ ریز منتشر گردد. به دلیل وجود فشار گاز در تمام جهات، جهت انتشار تک شاخه درخت در نوع شاخه ای-نرم به ندرت متأثر از جهت میدان الکتریکی اعمالی خواهد بود. این توضیحی برای این است که چرا درخت شاخه ای-نرم در جهات متفاوتی خواهد بود و نسبت به جهت میدان الکتریکی اعمالی انحراف دارد.

شواهد غیر مستقیم نشان می دهد که فشار گاز و دمای بالای جزئی در فرایند انتشار درخت شاخه ای-نرم موثر هستند. زمان ایستایی کوتاهتر در نرخ رشد درخت نیز فقط ناشی از تمرکز فشار گاز و روند افزایش دما است. پس از شکسته شدن مرز برخی از منافذ ریز فشار گاز کاهش می یابد و دوره زمانی کوتاه ایستایی رشد درخت آغاز می گردد. در آزمایشات انجام شده این زمان از حدود چند دقیقه تا بیش از 10 دقیقه بود. علاوه بر این رشد درخت الکتریکی شاخه ای-نرم غیر رسانا از درخت الکتریکی رسانا بیشتر است.

نتیجه گیری

پس از آنالیز نتایج آزمایشات و بحث های ارائه شده می توان نتایج زیر را ارائه داد:

1. ساختار درخت الکتریکی در عایق کابل های XLPE را می توان به سه گروه شاخه ای، بوته ای و ساختار ترکیبی تقسیم بندی کرد و همچنین ساختار ترکیبی را نیز می توان به سه زیر گروه شاخه ای-بوته ای، شاخه ای-کاج و شاخه ای-نرم تقسیم می شوند که ناشی از تجمع ناهمواریها و عیوبی مانند منافذ ریز است که در ناحیه داخلی عایق متمرکز می گردند.
2. ویژگی های رشد درخت الکتریکی در عایق کابل های XLPE را می توان توسط سه پارامتر بیان کرد که عبارتند از: نرخ رشد (L-t) و بعد فرکتال (d_f-t) و ضریب انبساط (D/L-t).
3. تخریب اولیه عایق توسط شارژ تزریق شده از طریق سوزن انجام می گردد و در نتیجه مکانیسم شروع همه انواع درختان الکتریکی مشابه است و به شکل شاخه می باشد. PD، اکسیداسیون، تجزیه شیمیایی در کانال باعث ایجاد درخت شاخه ای می شود که در عایق به صورت شاخه متراکم و در نیمه هادی به صورت شاخه ای-بوته ای است. تزریق شارژ از طریق نوک درخت الکتریکی در نواحی عایقی اطراف باعث می شود تا مرزهای گوی سنگی بزرگ کریستال ضعیف گردند در حالیکه منافذ ریز و ناخالصی ها نیز در آنجا متمرکز شده اند.

درخت الکتریکی شاخه ای-نرم و شاخه ای-کاج در امتداد نواحی ناهمگن به سرعت منتشر می شوند. انتشار این دو نوع درخت الکتریکی توسط PD شاخه اصلی، فشار و دمای بالای جزئی بوسیله تمام عوامل ذکر شده و تجزیه اکسیداسیون ماده در کانال درخت ایجاد خواهد شد. در نهایت درخت الکتریکی در امتداد منافذ ریز بوسیله فشار و دمای بالای جزئی رشد می کند و منتشر می شود.

۴. این منافذ ریز، کریستال ناهمگن و استرس مکانیکی پس ماند باعث می شوند تا عایق XLPE در اطراف هادی به شدت ضعیف گردد و این مسئله بسیار مهمی است که باید برای تولید کابل های با عایق XLPE فوق فشار قوی و عایق های خیلی ضخیم حل گردد.

اصطلاحات :

- [1] : electrical tree
- [2] : morphology
- [3] : double structure
- [4] : residual stress
- [5] : branch
- [6] : bush
- [7] : bine-branch
- [8] : pine-branch
- [9] : expansion coefficient
- [10] : dynamic fractal dimension
- [11] : growth rate
- [12] : partial high temperature
- [13] : amorphous
- [14] : needle-plate
- [15] : shrinkage
- [16] : aromatic
- [17] : spherulite
- [18] : Partial high gas pressure and high temperature

منبع :

- [1] : X. Zheng and G. Chen , “ Propagation Mechanism of Electrical Tree in XLPE Cable Insulation by investigating a Double Electrical Tree Structure “ , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume 15, Issue 3, Page 800 - 807, June 2008