

ارزیابی پیرشدگی مقره‌های پلیمری تحت شرایط آلودگی و رطوبت محیطی با استفاده از تحلیل سیگنال‌های جریان نشتی، ولتاژ قوس الکتریکی و اسکن میکروسکوپی الکترون سطح مقره

سید محمود عربی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ محمد میرزایی^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - s.m.arabi@stu.nit.ac.ir

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

چکیده: مقره‌های پلیمری خطوط هوایی در مدت بهره‌برداری تحت تنش‌های الکتریکی، محیطی و مکانیکی بوده به طوری که این عوامل، مقره را دچار پیری نموده و باعث افزایش جریان نشتی و کاهش ولتاژ قوس الکتریکی می‌شوند. ترکیب آلودگی و رطوبت هوا مسیری با امپدانس پایین روی سطح مقره ایجاد نموده و در نتیجه جریان نشتی بیش‌تر و ولتاژ قوس الکتریکی کاهش می‌یابد و این موضوع باعث وقوع خطا در مقره شده به طوری که این امر در مقره‌های فرسوده بسیار جدی‌تر است. در این مقاله به جهت ارزیابی تأثیر پدیده پیری بر جریان نشتی و ولتاژ قوس الکتریکی مقره‌های پلیمری در شرایط آلودگی و رطوبت محیط، چهار نوع مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت متفاوت به مدت ۱۰۰۰ ساعت درون محفظه پیرسازی مصنوعی قرار داده می‌شود. سپس هر دو هفته یک نمونه از هر نوع مقره از محفظه خارج شده و سیگنال جریان نشتی و ولتاژ قوس الکتریکی آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ضمناً تست اسکن میکروسکوپی الکترون (SEM) به منظور پایش وضعیت سطحی مقره‌ها در مراحل مختلف پیرسازی مصنوعی انجام گردید و نتایج نشان داده است که سطح مقره‌های فرسوده‌تر دارای حفره‌های بیش‌تری بوده که توأم با تضعیف خاصیت آب‌گریزی، موجب عملکرد نامناسب مقره و افزایش جریان نشتی و کاهش ولتاژ قوس الکتریکی شده است.

واژه‌های کلیدی: مقره پلیمری، پیرشدگی، جریان نشتی، ولتاژ قوس الکتریکی، آلودگی، اشعه ماورای بنفش، خاصیت آب‌گریزی.

Analyzing of Polymeric Insulators Aging under Humidity and Pollution Condition using Leakage Current, Flashover Voltage and SEM Analysis

S. M. Arabi¹, MSc Student; M. Mirzaie², Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: s.m.arabi@stu.nit.ac.ir

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

Abstract: Polymeric insulators in overhead transmission lines are under different stresses such as: electrical, environmental and mechanical stresses. These factors cause the insulator aging and the increase of leakage current and also the decrease of flashover voltage. When layer of environmental pollutants is formed on the insulator surface and combined with atmospheric moisture, low impedance path created on the surface that prone to more leakage current and also less flashover voltage. This event makes the fault in the insulators especially in aged insulators. In this paper to investigate the effects of aging on the leakage current and flashover voltage of polymer insulators under contamination and humidity, four different types of 20 kV polymer insulators put inside the artificial aging chamber for 1,000 hours. Then every two weeks one of each type of insulators was removed from aging chamber and flashover voltages and leakage current signals were measured and the obtained results were evaluated. In addition for monitoring the insulator surface state at different stages of aging, scan electron microscopy (SEM) was conducted and the results show that aged insulators have more pores and with weaken hydrophobic properties, leading to poor performance of insulator and increase the leakage current and decrease the flashover voltage.

Keywords: Polymeric insulator, aging, leakage current, flashover voltage, contamination, ultraviolet (UV), hydrophobicity.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۵

نام نویسنده مسئول: محمد میرزایی

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

۱- مقدمه

بهره‌برداری و با وجود استرس‌های الکتریکی، مکانیکی و محیطی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

با توجه به موارد پیش گفته و به دلیل اهمیت مانیتورینگ وضعیت مقره‌های پلیمری موجود در شرایط بهره‌برداری، روش‌های متفاوتی برای ارزیابی پیری این مقره‌ها ارائه شده است. از آن جمله می‌توان تکنیک‌هایی را که بر مشاهده جریان نشتی و تخلیه‌های جزئی استوار است مانند دوربین مادون‌قرمز^۱ و تشدیدکننده تصویر^۲ اشاره نمود. همچنین روش‌های دیگری همچون اندازه‌گیری زاویه تماس قطرات آب^۳ و ارزیابی خاصیت آب‌گریزی به منظور پایش کیفیت سطح مقره و تعیین میزان پیرشدگی مواد پلیمری استفاده می‌گردد [۱۰]. به منظور بررسی شدت زوال و نابودی پیوندهای بین مولکول‌های سیلیکون در مقره‌های لاستیک سیلیکونی و ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی مقره‌های پلیمری، از تکنیک‌های مختلفی همچون تعیین سختی سطح^۴، طیف‌سنجی مادون‌قرمز با تبدیل فوریه^۵، اسکن میکروسکوپی الکترون^۶، کاهش وزن با افزایش گرما توسط تحلیل حرارتی جاذبه‌ای^۷، جریان تحریک گرمایی^۸ و تعیین میزان سیلیکا موجود در سطح مقره در قسمت‌های تخریب‌شده با استفاده از طیف‌شناسی فوتوالکترون اشعه X^۹، استفاده می‌شود [۹].

۱۱، ۱۲]. همچنین برخی از محققین تأثیر عواملی همچون ولتاژهای AC و DC و اشعه ماورای بنفش بر تغییر خصوصیات شیمیایی سطح مقره‌های پلیمری را مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۱۳]. در مرجع [۱۴] نویسندگان با در نظر گرفتن رطوبت و آلودگی سطح مقره، مدل ریاضی برای پارامترهای بحرانی مقره‌های سرامیکی ارائه نموده‌اند. در این مقاله ولتاژ قوس الکتریکی محاسبه‌شده توسط رابطه ارائه‌شده با مقادیر به‌دست‌آمده از تست‌های تجربی مقایسه گردیده و تطابق قابل‌ملاحظه بین پاسخ‌ها، مشاهده شده است. همچنین با استفاده از تحلیل هارمونیک‌های جریان نشتی، شاخصی به منظور پیش‌بینی ولتاژ قوس در مقره‌های سرامیکی ارائه شده است [۱۵]. نویسندگان در این تحقیق با انجام تست‌های آزمایشگاهی و بررسی زاویه فاز بین جریان نشتی و ولتاژ اعمالی به مقره سرامیکی شاخص P.D% را به‌عنوان معیاری جهت تشخیص وضعیت مقره‌ها تعیین نموده‌اند. مرجع [۱۶] به بررسی اثر آلودگی و رطوبت بر روی جریان نشتی زنجیره مقره‌ها پرداخته است. در این مقاله تأثیر مکان مقره آلوده شده در زنجیره، بر روی جریان نشتی زنجیره مقره در شرایط مختلف در حوزه زمان و فرکانس، اندازه‌گیری و تحلیل شده است.

در این مقاله، چهار نمونه مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت با مشخصات و پروفیل‌های مختلف، به مدت ۱۰۰۰ ساعت و طبق برنامه زمانی مشخص، تحت استرس‌های الکتریکی و محیطی مختلف به‌صورت مصنوعی و در محیط آزمایشگاه پیر می‌شوند. سپس با اندازه‌گیری جریان نشتی مقره‌ها در زمان‌های مختلف فرآیند پیرسازی، طیف هارمونیک آن‌ها توسط نرم‌افزار Matlab استخراج شده و مؤلفه‌های هارمونیک آن‌ها تحت تأثیر رطوبت و آلودگی، مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرند. همچنین در مدت پیرسازی و در زمان‌های معین و تحت رطوبت و آلودگی‌های

در سال‌های اخیر مقره‌های پلیمری به دلیل ویژگی‌های برتری که نسبت به مقره‌های سرامیکی دارند، کاربرد گسترده‌ای در شبکه قدرت پیدا کرده‌اند. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به وزن کم، مقاومت در برابر تخریب‌های انسانی، آلودگی و مقاومت مکانیکی نسبتاً بالا و تعویض و نصب آسان اشاره نمود [۴-۱]. یکی از شایع‌ترین مشکلات مقره‌های پلیمری، کاهش خاصیت آب‌گریزی آن‌ها می‌باشد که موجب افزایش جریان نشتی و تخلیه‌های الکتریکی سطحی مقره و ایجاد فرآیندهای شیمیایی شده، به طوری که این موضوع نیز در کاهش مجدد خاصیت آب‌گریزی مؤثر می‌باشد. به این فرآیند، پیری مقره‌های پلیمری اطلاق می‌گردد. البته در مراحل ابتدایی پیری که هنوز مقره خاصیت آب‌گریزی مناسبی دارد، مقدار جریان نشتی نسبتاً کم بوده و پس از گذشت زمان، وقتی پیری مقره به حد بحرانی رسید، قطرات آب به دلیل اعمال نیروی میدان الکتریکی، به یکدیگر متصل شده و مسیری رسانا برای عبور جریان نشتی ایجاد و مقاومت سطحی مقره کاهش می‌یابد. این شرایط تحت شدت میدان الکتریکی قوی‌تر، زمانی که احتمال وقوع تخلیه باند خشک بیش‌تر می‌شود، ممکن است تشدید شود [۵، ۶].

به‌طور کلی از عوامل تسریع‌کننده پدیده پیری مقره‌های پلیمری می‌توان به تنش‌های الکتریکی، مکانیکی و محیطی اشاره نمود. شایان ذکر است عوامل الکتریکی مانند تخلیه‌های کرونا و باند خشک باعث ایجاد پدیده‌های تراکینگ و فرسایش شده و در نتیجه باعث فرسودگی و پیری مقره‌ها می‌شوند. علاوه بر موارد مذکور، در نزدیکی مناطق ساحلی، صنعتی و صحرائی، آلودگی‌هایی با خاصیت رسانایی بالا همچون سولفات سدیم و سدیم کلراید نیز بر روی سطح مقره‌ها رسوب می‌کنند که استقرار این نوع نمک‌ها، باعث تسریع فرآیند پیری و از دست رفتن خاصیت آب‌گریزی خواهد شد. تجمع این عوامل، خصوصیات سطح مقره را تغییر داده و با کاهش انعطاف‌پذیری زنجیره مولکول‌های تشکیل‌دهنده مقره‌های پلیمری، باعث گسترش ترک خوردگی سطح آن‌ها خواهند شد [۷].

در بین مقره‌های پلیمری با جنس‌های مختلف، مقره‌های لاستیک سیلیکونی به دلیل پخش شدن مولکول‌های سیلیکون با وزن مولکولی کم بر روی سطح مقره، این خاصیت را برای مدت بیش‌تری حفظ می‌نمایند و به همین دلیل کاربرد بیش‌تری خصوصاً در محیط‌های آلوده دارند [۸]. پس از بهره‌برداری طولانی مدت مقره‌های پلیمری در شبکه و پیری آن‌ها، احتمال انباشته شدن آلودگی بر روی چترک‌ها افزایش یافته و پس از ترکیب این آلودگی با مه یا شبنم، ممکن است در سطوح مقره پدیده قوس الکتریکی رخ دهد که به‌نوبه خود موجب تسریع روند پیرسازی مقره خواهد شد. قابل توجه است که احتمال وقوع قوس الکتریکی زمانی بیشتر می‌شود که مقره خاصیت آب‌گریزی خود را از دست داده باشد و یک لایه آب پیوسته نیز در سطح مقره ایجاد شده باشد [۹]. بنابراین ارزیابی وضعیت مقره‌های پلیمری تحت شرایط

به مقره‌ها در مقدار ۱۱ کیلوولت فاز به زمین، از یک دستگاه پروب ولتاژ فشار قوی با ولتاژ نامی ۲۰ کیلوولت، استفاده می‌گردد.

۲-۳- مشخصات مقره‌های مورد مطالعه

در این مقاله از چهار نوع مقره پلیمری لاستیک سیلیکونی با پروفایل و مشخصات مختلف مطابق شکل ۲ استفاده شده است. مشخصات فنی این مقره‌ها در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱: سیکل اعمال تنش‌های مختلف جهت پیرسازی مصنوعی

مقره‌های پلیمری

تنش‌های اعمالی به مقره	زمان (ساعت)	۰-۱	۱-۵	۵-۶	۶-۷
لامپ اشعه ماورای بنفش					
گرمای (۵۰ درجه سانتی‌گراد)					
استراحت (عدم اعمال تنش)					
ولتاژ نامی شبکه					



شکل ۱: ترانسفورماتور و مقاومت محدودکننده به منظور تأمین ولتاژ فشارقوی



شکل ۲: نمایی از مقره‌های پلیمری مورد مطالعه

مختلف، ولتاژ شکست مقره‌ها اندازه‌گیری می‌شود. همچنین با نمونه‌گیری از سطح مقره‌های پلیمری مورد مطالعه، اسکن میکروسکوپی الکترون (SEM) انجام و نتایج تحلیل شده است.

۲- روند انجام آزمایش پیرسازی مصنوعی مقره‌های

پلیمری

۱-۲- روند انجام آزمایش پیرسازی مصنوعی

به منظور انجام آزمایش پیرسازی مصنوعی مقره‌های مورد مطالعه، روندی برای اعمال تنش‌ها مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است. به همین منظور برای شبیه‌سازی شرایط محیطی که مقره‌ها حین بهره‌برداری در آن قرار دارند به ترتیب از لامپ اشعه ماورای بنفش (UV) به عنوان شبیه‌ساز نور خورشید و هیتر به منظور ایجاد دمای بالا در داخل محفظه استفاده می‌گردد. علاوه بر تنش‌های محیطی مذکور، ولتاژ فشار قوی از طریق ترانسفورماتور قدرت در طول مدت پیرسازی به مقره‌های درون محفظه اعمال گردیده است. به منظور ایجاد نظم در روند و مدت زمان اعمال تنش‌های محیطی به مقره‌ها و جابه‌جایی اتوماتیک بین حالت‌های مختلف مندرج در جدول ۱، از یک دستگاه میکروکنترلر با قابلیت برنامه‌ریزی استفاده شده است. هر سیکل اعمال تنش‌ها، هفت ساعت طول می‌کشد و این روند توسط میکروکنترلر به صورت منظم به مدت ۱۰۰۰ ساعت که تقریباً معادل شش هفته است به مقره‌های مورد مطالعه موجود در محفظه پیرسازی اعمال می‌شود.

شایان ذکر است از هر نوع مقره، سه نمونه درون محفظه پیرسازی قرار داده می‌شود تا حین انجام آزمایش پیرسازی و در زمان‌هایی مشخص از داخل محفظه خارج شده و تحت آزمایش‌های سنجش جریان نشتی و ولتاژ قوس الکتریکی قرار گیرند. آزمایش‌های مذکور بر روی هر چهار نوع مقره پیش از قرار گرفتن داخل محفظه پیرسازی (حالت نو) و در بازه‌های دو هفته‌ای پس از قرار گرفتن داخل محفظه، صورت گرفته است. بنابراین نتایج تست‌های مذکور در هفته‌های صفر (مقره نو)، دوم، چهارم و ششم به ترتیب با اندیس ۰، ۲، ۴ و ۶ نام‌گذاری شده است. در ضمن، در مدت انجام آزمایش‌ها، فشار هوای محیط آزمایشگاه که توسط دستگاه فشارسنج اندازه‌گیری شده است به طور متوسط ۷۵۷ میلی‌متر جیوه بوده است.

۲-۲- تجهیزات فشارقوی و محفظه آزمایش

جهت انجام آزمایش پیرسازی مصنوعی، مقره‌های پلیمری مورد مطالعه درون یک محفظه مکعبی با طول، عرض و ارتفاع ۲ متر قرار می‌گیرند. مطابق شکل ۱، ولتاژ اعمالی به مقره‌ها توسط یک ترانسفورماتور قدرت تک‌فاز با توان ۵ کیلوولت آمپر و با نسبت تبدیل ۲۲۰ ولت به ۱۰۰ کیلوولت، تأمین شده است. همچنین برای جلوگیری از ایجاد جریان اتصال کوتاه بالا، از یک مقاومت ۱۰ مگا اهم به صورت سری با ترانسفورماتور استفاده می‌گردد. به منظور اطمینان از تنظیم ولتاژ اعمالی

۳- تجهیزات انجام آزمایش جریان نشتی و ولتاژ قوس الکتریکی

به منظور انجام آزمون‌های مربوط به اندازه‌گیری سیگنال‌های جریان نشتی و ولتاژ قوس الکتریکی مقره‌های پلیمری و ثبت داده‌های حاصل از آن، از مجموعه تجهیزات آزمایشگاه فشارقوی استفاده شده و در شکل ۳، نمای کلی این تجهیزات نشان داده شده است که شامل ترانسفورماتور قدرت، مقسم خازنی و مقاومت محدود کننده جریان اتصال کوتاه می‌باشد. در شکل ۴، نمای شماتیک سیستم اندازه‌گیری جریان نشتی مقره‌های پلیمری و شکل ۵ نمای محفظه تست جریان نشتی و ولتاژ قوس الکتریکی نشان داده شده‌اند.

در این مجموعه، به منظور تأمین ولتاژ مورد نیاز، از دو ترانسفورماتور قدرت هر یک با توان ۵ کیلو ولت آمپر و نسبت تبدیل ۲۲۰ ولت به ۱۰۰ کیلوولت به صورت اتصال آبشاری، استفاده شده که قابلیت افزایش ولتاژ ورودی تا ۲۰۰ کیلوولت وجود دارد. همچنین از یک سیستم مقسم خازنی با نسبت تبدیل ۱ به ۹۵۰ به همراه یک مولتی‌متر دیجیتال برای اندازه‌گیری مقدار ولتاژ اعمالی به مقره‌های مختلف، استفاده می‌گردد. مولتی‌متر دیجیتال به دو نقطه مشخص شده در مقسم خازنی، طبق شکل ۳ متصل شده است. ولتاژ خروجی ترانسفورماتور، توسط کابل فشارقوی به محفظه مربوط به انجام آزمون ولتاژ قوس الکتریکی و جریان نشتی منتقل می‌شود.

از طرفی جریان نشتی مقره‌ها، از طریق دستگاه سنجش جریان نشتی و اسیلوسکوپ اندازه‌گیری می‌گردد. بدین صورت که ولتاژ دو سر مقاومت شنت توسط پروب اسیلوسکوپ خوانده شده و با تقسیم بر مقدار مقاومت شنت (مقاومت از نوع آجری می‌باشد)، سیگنال جریان نشتی اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. برای محافظت اسیلوسکوپ در مقابل جریان‌های زیاد و ولتاژهای فشار قوی، از دو دیود زبر به صورت پشت به پشت استفاده شده است. ضمناً برای قرائت مقدار ولتاژ قوس الکتریکی طبق شکل ۳ و از دو نقطه مشخص شده با فلش، پروبی به مولتی‌متر متصل شده است که با نسبت تبدیل ۱۰۰۰ به ۱، مقادیر ولتاژ قوس الکتریکی در هر سطح رطوبت و آلودگی خاص، قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

۴- آلوده‌سازی مصنوعی مقره‌های پلیمری

برای بررسی سیگنال جریان نشتی و ولتاژ قوس الکتریکی مقره‌های مورد مطالعه، مقره‌ها در دو حالت تمیز و آلوده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. بدین جهت برای آلوده‌سازی مصنوعی مقره‌ها در محیط آزمایشگاه از روش‌های مندرج در استاندارد IEC 605۰۷ استفاده شده است. طبق این استاندارد و روش لایه جامد، از ترکیب کائولین به منظور آلوده‌سازی مصنوعی مقره‌ها استفاده شده که میزان کائولین و نمک مورد نیاز برای سطوح مختلف آلودگی در جدول ۳ آورده شده است [۱۷].

پس از تهیه محلول آلودگی، محلول آلودگی به صورت لایه‌به‌لایه بر روی مقره با استفاده از اسپری نشانده می‌شود. بدین صورت که پس از

هر مرحله اسپری و خشک‌شدن، مجدداً اسپری آلودگی انجام می‌گردد. برای سریع‌تر خشک شدن هر لایه آلودگی، از سیستم‌های گرمایشی نظیر هیتر و سشوار به صورتی که به مقره آسیبی نرسد استفاده شده است. پس از خشک‌شدن نهایی، مقره‌ها برای انجام آزمون قوس الکتریکی و جریان نشتی آماده می‌گردد. بعد از انجام آزمون‌های لازمه، آلودگی موجود بر روی مقره جهت سنجش میزان چگالی نمک معادل ۰، جمع‌آوری می‌گردد.



شکل ۳: نمای کلی تجهیزات ترانسفورماتور ولتاژ و مقسم خازنی و سیستم‌های اندازه‌گیری ولتاژ و جریان

جدول ۲: مشخصات مقره‌های پلیمری مورد مطالعه

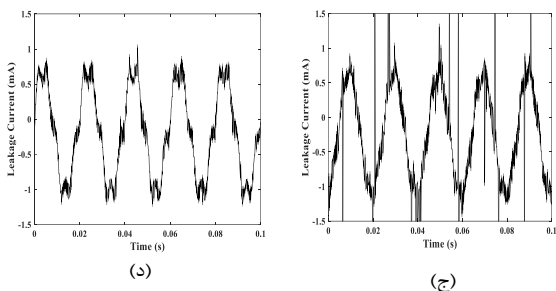
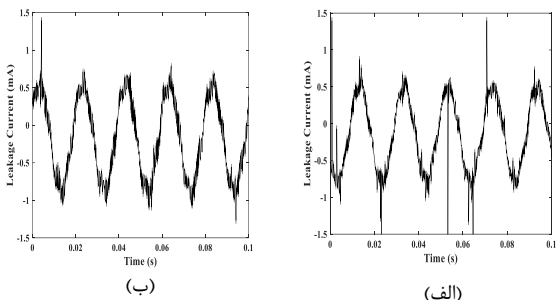
نوع مقره / مشخصات مقره	A	B	C	D
فاصله خزشی	۶۶۰	۶۶۰	۶۳۴	۷۱۰
فاصله جرقه	۲۸۵	۲۴۵	۳۲۸	۳۲۵
ارتفاع	۴۴۰	۳۸۵	۴۲۲	۴۶۵
قطر چترک	۱۰۰/۷۰	۱۱۰/۹۰	۱۰۵/۷۵	۱۰۵/۸۰
فاصله چترک	۴۵	۲۵	۴۵	۴۵
تعداد چترک	۷	۷	۶	۶

جدول ۳: میزان نمک و کائولین موجود در محلول‌های آلودگی [۱۷]

سطح آلودگی	نمک (گرم)	کائولین (گرم)
سبک	۲۰	۴۰
متوسط	۳۰	۴۰
سنگین	۴۰	۴۰

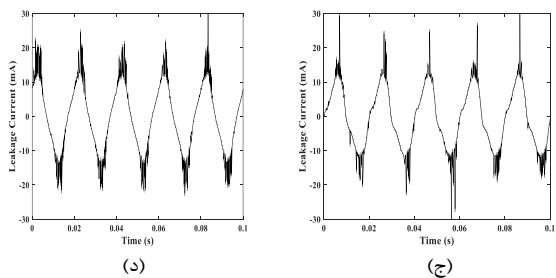
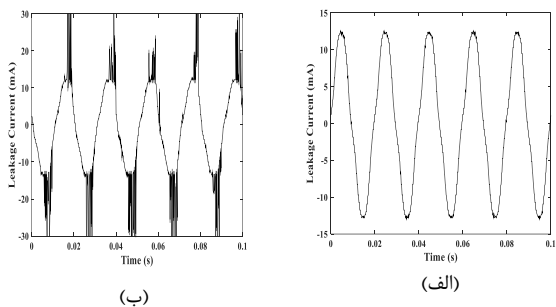
۵- اندازه‌گیری و تحلیل سیگنال‌های جریان نشتی

با توجه به تعداد مقره‌های مورد مطالعه و حالات مختلف سطوح رطوبت، آلودگی و میزان پیرشدگی متفاوت، صرفاً جهت نمایش در شکل‌های ۶ تا ۹ سیگنال جریان نشتی مقره نوع A در زمان‌های مختلف پیرشدگی و در دو آلودگی مختلف نشان داده شده است. همچنین با استفاده از نرم‌افزار Matlab و روش FFT، در شکل‌های ۱۰ تا ۱۷ طیف هارمونیک سیگنال جریان نشتی مقره‌های A تا D آمده است.

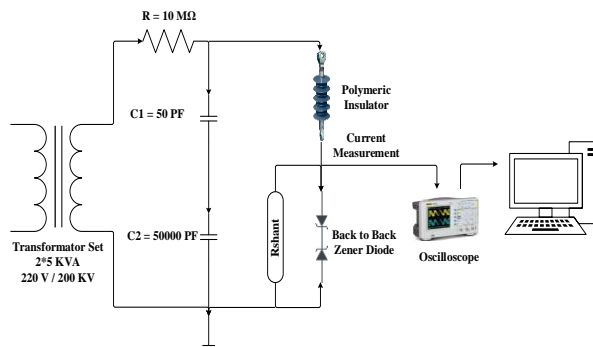


شکل ۷: سیگنال جریان نشتی مقره A۶ در حالت تمیز و رطوبت‌های مختلف، الف) ۶۵٪؛ ب) ۷۵٪؛ ج) ۸۵٪؛ د) ۹۵٪

بر اساس نتایج حاصله، در حالت تمیز و در اکثر موارد، هارمونیک اصلی سیگنال جریان نشتی مقره‌های مورد مطالعه با افزایش سطح آلودگی، میزان رطوبت و پیرشدگی مقره، افزایش داشته است. در هر سطح رطوبت و میزان پیرشدگی خاص، همواره مقدار هارمونیک پنجم از سوم بیش‌تر بوده است. افزایش پیرشدگی مقره‌ها نیز تأثیر مستقیمی بر مقادیر هارمونیک‌های سوم و پنجم داشته است طوری که در اکثر سطوح رطوبت، مقادیر هارمونیک‌های مذکور برای مقره‌های شش هفته پیرشده، نسبت به نو بیش‌تر بوده است.



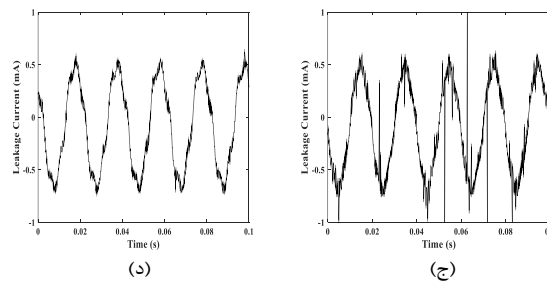
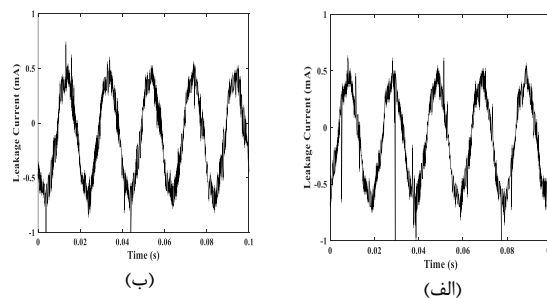
شکل ۸: سیگنال جریان نشتی مقره A۰ در آلودگی سنگین و رطوبت‌های مختلف، الف) ۶۵٪؛ ب) ۷۵٪؛ ج) ۸۵٪؛ د) ۹۵٪



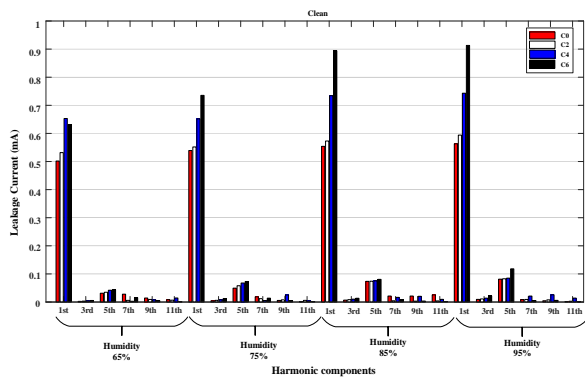
شکل ۴: شماتیک سیستم اندازه‌گیری جریان نشتی مقره‌های پلیمری مورد مطالعه



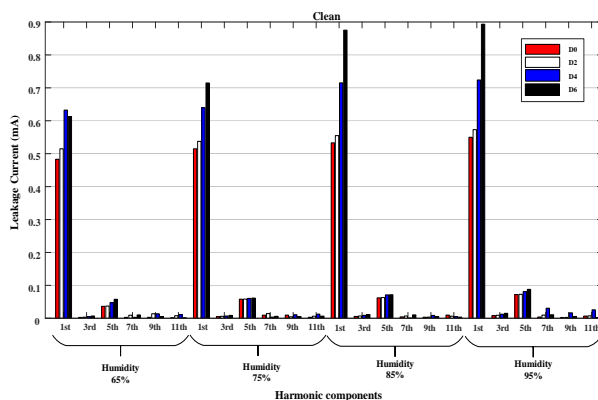
شکل ۵: نمایی از محفظه تست جریان نشتی و ولتاژ قوس الکتریکی مقره‌های پلیمری مورد مطالعه



شکل ۶: سیگنال‌های جریان نشتی مقره A۰ در حالت تمیز و رطوبت‌های مختلف، الف) ۶۵٪؛ ب) ۷۵٪؛ ج) ۸۵٪؛ د) ۹۵٪

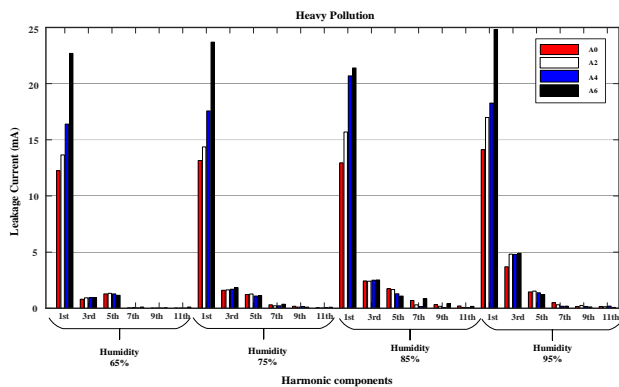


شکل ۱۲: طیف هارمونیک جریانی نشتی مفره‌های C۰-C۶ در حالت تمیز

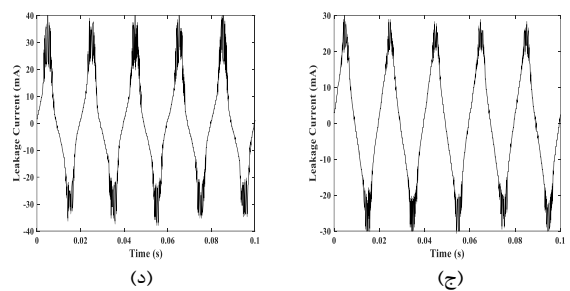
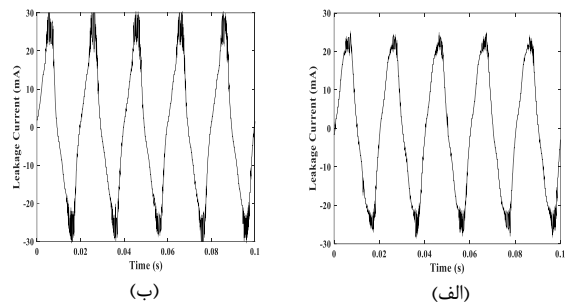


شکل ۱۳: طیف هارمونیک جریانی نشتی مفره‌های D۰-D۶ در حالت تمیز

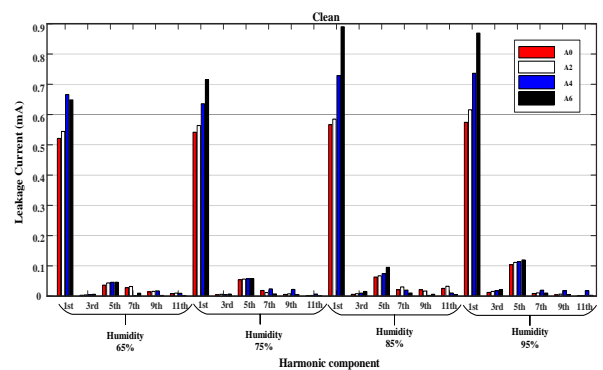
موضوع مهمی که در نگاه اول به طیف هارمونیک مفره‌ها در سطوح مختلف آلودگی جلب نظر نموده است، افزایش چشم‌گیر مقادیر هارمونیک‌های فرد اول تا پنجم نسبت به حالت تمیز است. شایان ذکر است در سطوح مختلف آلودگی نیز همچون حالت تمیز و در اکثر موارد، مقدار هارمونیک اصلی جریانی نشتی مفره‌های فرسوده‌تر بیشتر از مفره‌های نو است.



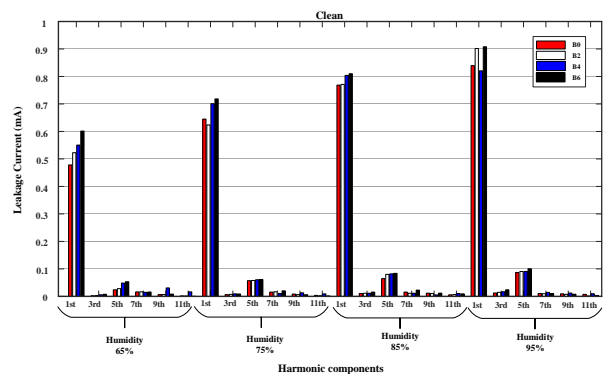
شکل ۱۴: طیف هارمونیک جریانی نشتی مفره‌های A۰-A۶ آلودگی سنگین



شکل ۹: سیگنال جریانی نشتی مفره A۶ در آلودگی سنگین و رطوبت‌های مختلف، الف) ۶۵٪؛ ب) ۷۵٪؛ ج) ۸۵٪؛ د) ۹۵٪



شکل ۱۰: طیف هارمونیک جریانی نشتی مفره‌های A۰-A۶ در حالت تمیز



شکل ۱۱: طیف هارمونیک جریانی نشتی مفره‌های B۰-B۶ در حالت تمیز

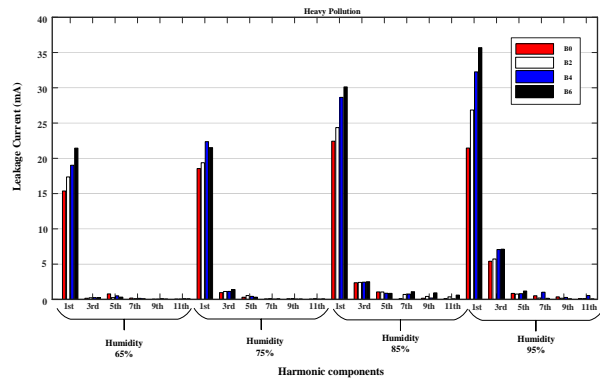
نکته قابل توجه آن است که هر قدر مقره‌ها فرسوده‌تر می‌شوند و بدون توجه به سطح آلودگی، با افزایش رطوبت، میزان افزایش مؤلفه اصلی طیف هارمونیک آن‌ها نیز بیش‌تر می‌شود به‌نحوی که در رطوبت‌های بالاتر و در مقره‌های A تا D، اختلاف مقادیر هارمونیک اول مقره‌های شش‌هفته پیرشده نسبت به نو، قابل ملاحظه‌تر می‌شود و این موضوع در نمودارهای میله‌ای ارائه‌شده کاملاً مشخص است.

با توجه به تحلیل هارمونیک سیگنال جریان نشتی مقره‌های مورد مطالعه در سطوح آلودگی و رطوبت مختلف مشخص گردید که در بین مؤلفه‌های هارمونیک، هارمونیک‌های سوم و پنجم تغییرات منظم‌تری نسبت به یکدیگر نشان می‌دهند. مطالعات هارمونیک جریان نشتی مقره‌های پلیمری نو نشان داده است که نسبت مؤلفه‌های پنجم به سوم جریان نشتی (شاخص $K_{\Delta 3}$)، معیاری برای ارزیابی شرایط کاری مقره است [۱۸]. اساساً افزایش هارمونیک سوم جریان نشتی به دلیل وجود آلودگی و رطوبت سطحی می‌باشد چراکه آلودگی سطح، امپدانس غیرخطی داشته و با افزایش هدایت الکتریکی، جریان نشتی از حالت سینوسی خارج و به دلیل ایجاد مناطق خشک و وقوع تخلیه جزئی، باعث ایجاد اعوجاج در سیگنال جریان نشتی می‌شود.

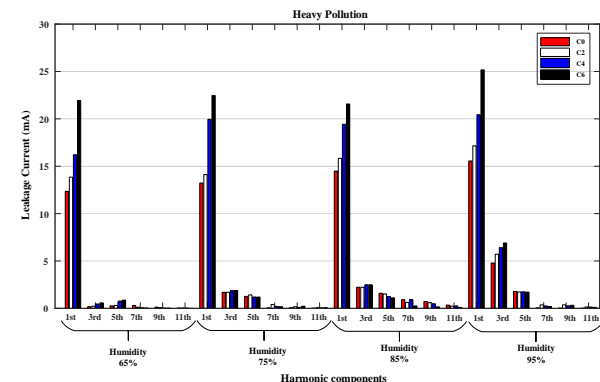
مشاهدات و نتایج آزمایشگاهی این تحقیق نشان می‌دهد که میزان پیرشدگی مقره‌ها نیز در شاخص $K_{\Delta 3}$ مؤثر است. مقادیر شاخص $K_{\Delta 3}$ جریان نشتی مقره‌های A تا D در قالب جداول ۴ تا ۷ در تمامی شرایط آلودگی و رطوبت و سطوح مختلف پیری آمده است.

بر اساس جداول ۴ تا ۷، پس از اتمام مراحل پیرسازی مقره‌های پلیمری و در حالت تمیز، نسبت مؤلفه پنجم به سوم جریان نشتی مقره‌ها کاهش قابل‌ملاحظه‌ای داشته و همچنین در تمامی سطوح آلودگی نیز نسبت هارمونیک پنجم به سوم جریان نشتی کاهش داشته است. ذکر این نکته ضروری است اگرچه شاخص $K_{\Delta 3}$ در حالت‌های آلوده، کاهش داشته است لیکن در هر سطح آلودگی و رطوبت مشخص، پیری مقره‌ها نیز در این نسبت مؤثر بوده به‌طوری که در اکثر شرایط، باعث کاهش آن شده است. البته تأثیر مدت زمان پیری بر شاخص $K_{\Delta 3}$ همواره به صورت کاهشی نبوده و در برخی شرایط با افزایش پیری مقره، این نسبت حتی اندکی افزایش نیز داشته است.

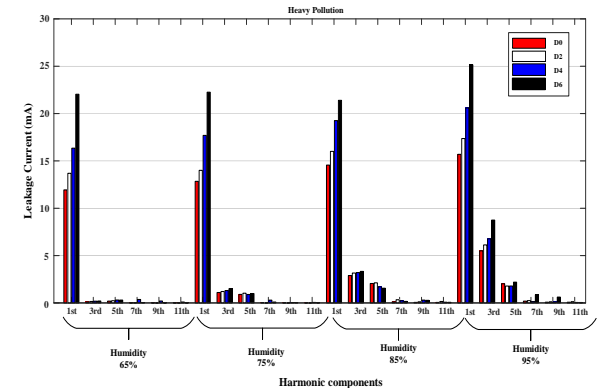
در بین سطوح مختلف رطوبت و تمامی سطوح آلودگی، همواره در رطوبت محیط آزمایشگاه (۶۵ درصد) در مقایسه با سایر رطوبت‌ها، شاخص $K_{\Delta 3}$ مقادیر قابل‌ملاحظه‌تری داشته است. این موضوع نیز به خوبی تأثیر افزایش رطوبت بر طیف هارمونیک سیگنال جریان نشتی مقره و خصوصاً شاخص $K_{\Delta 3}$ را نشان می‌دهد. البته در همین شرایط نیز می‌توان مشاهده نمود که همواره مقره‌های نو نسبت به سایر مقره‌های پیرشده، مقادیر شاخص $K_{\Delta 3}$ بیش‌تری داشته‌اند که این تفاوت به خوبی تأثیر پیرشدگی را بر میزان شاخص $K_{\Delta 3}$ نشان می‌دهد. در رطوبت‌های بالاتر، همواره شاخص $K_{\Delta 3}$ مقادیر کوچک‌تر از یک داشته و با افزایش رطوبت و مدت زمان پیری مقره‌ها، این نسبت کاهش بیش‌تری نیز یافته است.



شکل ۱۵: طیف هارمونیک جریان نشتی مقره‌های B۶-B۰ در آلودگی سنگین



شکل ۱۶: طیف هارمونیک جریان نشتی مقره‌های C۶-C۰ در آلودگی سنگین



شکل ۱۷: طیف هارمونیک جریان نشتی مقره‌های D۶-D۰ در آلودگی سنگین

در ضمن در تمام مقره‌ها با افزایش رطوبت، در تمام سطوح آلودگی و در بیش‌تر حالات، مقدار هارمونیک اصلی بیش‌تر شده است. البته میزان این افزایش در همه مقره‌ها یکسان نبوده، به‌نحوی که در بین چهار مقره مورد مطالعه و در سطوح رطوبت و آلودگی و میزان پیری یکسان، معمولاً مقادیر هارمونیک‌های فرد اول تا پنجم مقره نوع B نسبت به سایر مقره‌ها بیش‌تر است. از طرفی علاوه بر رطوبت و آلودگی، پیری مقره‌ها نیز تأثیر قابل‌توجهی بر میزان هارمونیک‌های سوم و پنجم داشته است، طوری که مقره‌های فرسوده‌تر در آلودگی و رطوبت مشخص، هارمونیک‌های سوم و پنجم بیش‌تری دارند که در اکثر موارد این تأثیر بیش‌تر متوجه هارمونیک سوم شده است.

جدول ۵: شاخص $K_{5/3}$ مقره نوع B در سطوح مختلف پیری و تحت شرایط آلودگی و رطوبت گوناگون

نوع مقره	بدون آلودگی				آلودگی سبک			
	سطوح رطوبت				سطوح رطوبت			
	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵
B۰	۱۰/۰۴	۸/۶۹	۶/۱۷	۶/۹۲	۴/۷۶	۱/۷۲	۰/۳۷	۰/۳۳
B۲	۹/۴۶	۷/۷۳	۶/۹۶	۶/۰۸	۴/۴۰	۰/۶۵	۰/۳۱	۰/۲۵
B۴	۷/۹۵	۶/۴۰	۷/۰۷	۵/۳۴	۵/۲۲	۰/۷۲	۰/۲۶	۰/۱۷
B۶	۶/۸۵	۶/۹۶	۵/۳۴	۴/۱۸	۳/۵۴	۰/۴۵	۰/۱۸	۰/۲۲
نوع مقره	آلودگی متوسط				آلودگی سنگین			
	سطوح رطوبت				سطوح رطوبت			
	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵
B۰	۵/۳۶	۰/۴۴	۰/۲۴	۰/۲۴	۴/۷۴	۰/۳۱	۰/۴۵	۰/۱۵
B۲	۲/۳۹	۰/۵۸	۰/۲۴	۰/۳۲	۱/۱۰	۰/۴۹	۰/۴۳	۰/۱۳
B۴	۲/۳۷	۰/۵۵	۰/۱۸	۰/۳۳	۱/۹۸	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۱۱
B۶	۲/۴۹	۰/۴۷	۰/۱۸	۰/۱۶	۱/۲۲	۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۱۶

جدول ۴: شاخص $K_{5/3}$ مقره نوع A در سطوح مختلف پیری و تحت شرایط آلودگی و رطوبت گوناگون

نوع مقره	بدون آلودگی				آلودگی سبک			
	سطوح رطوبت				سطوح رطوبت			
	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵
A۰	۱۲/۵۶	۱۱/۳۷	۱۰/۴۱	۸/۳۵	۳/۱۵	۰/۹۲	۰/۷۱	۰/۵۳
A۲	۱۰/۴۹	۹/۱۷	۸/۲۱	۷/۱۵	۳/۲۴	۰/۸۹	۰/۶۴	۰/۴۸
A۴	۹/۳۴	۱۰/۶۴	۷/۴۹	۶/۳۱	۲/۹۴	۰/۹۰	۰/۶۲	۰/۴۷
A۶	۷/۵۱	۸/۳۹	۶/۱۵	۵/۴۹	۲/۳۵	۰/۸۸	۰/۶۳	۰/۴۸
نوع مقره	آلودگی متوسط				آلودگی سنگین			
	سطوح رطوبت				سطوح رطوبت			
	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵
A۰	۲/۸۶	۰/۸۴	۰/۶۹	۰/۴۸	۱/۵۹	۰/۷۵	۰/۷۱	۰/۳۹
A۲	۲/۹۶	۰/۸۱	۰/۵۸	۰/۴۳	۱/۴۳	۰/۷۷	۰/۶۹	۰/۳۱
A۴	۲/۶۹	۰/۷۴	۰/۶۱	۰/۴۱	۱/۳۵	۰/۶۴	۰/۵۱	۰/۲۸
A۶	۲/۱۲	۰/۷۸	۰/۶۳	۰/۳۸	۱/۲۱	۰/۶۲	۰/۴۳	۰/۲۵

جدول ۷: شاخص $K_{5/3}$ مقره نوع D در سطوح مختلف پیری و تحت شرایط آلودگی و رطوبت گوناگون

نوع مقره	بدون آلودگی				آلودگی سبک			
	سطوح رطوبت				سطوح رطوبت			
	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵
D۰	۱۳/۴۸	۱۱/۶۰	۱۰/۸۹	۸/۸۸	۴/۷۸	۰/۹۵	۰/۷۱	۰/۴۹
D۲	۱۰/۹۴	۹/۷۱	۹/۰۰	۷/۹۰	۳/۳۱	۰/۹۰	۰/۶۲	۰/۴۶
D۴	۹/۸۹	۸/۷۵	۷/۹۱	۶/۵۲	۳/۹۰	۰/۹۱	۰/۶۲	۰/۴۲
D۶	۸/۲۴	۶/۸۹	۶/۴۵	۵/۸۲	۲/۴۲	۰/۹۰	۰/۶۰	۰/۴۴
نوع مقره	آلودگی متوسط				آلودگی سنگین			
	سطوح رطوبت				سطوح رطوبت			
	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵
D۰	۳/۵۱	۰/۹۳	۰/۸۳	۰/۵۳	۱/۷۹	۰/۸۱	۰/۷۰	۰/۳۶
D۲	۲/۹۳	۰/۸۳	۰/۷۲	۰/۵۰	۱/۵۱	۰/۸۵	۰/۶۷	۰/۲۹
D۴	۳/۱۴	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۳۸	۱/۶۸	۰/۶۸	۰/۵۳	۰/۲۶
D۶	۲/۹۹	۰/۸۴	۰/۶۸	۰/۴۰	۱/۴۷	۰/۶۵	۰/۴۶	۰/۲۵

جدول ۶: شاخص $K_{5/3}$ مقره نوع C در سطوح مختلف پیری و تحت شرایط آلودگی و رطوبت گوناگون

نوع مقره	بدون آلودگی				آلودگی سبک			
	سطوح رطوبت				سطوح رطوبت			
	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵
C۰	۱۳/۰۸	۱۱/۵۱	۱۰/۶۶	۸/۵۶	۴/۵۶	۰/۹۱	۰/۷۲	۰/۵۰
C۲	۱۰/۵۷	۹/۵۲	۸/۷۱	۷/۴۵	۳/۱۴	۰/۸۸	۰/۶۳	۰/۴۷
C۴	۹/۵۴	۸/۳۷	۷/۳۳	۶/۱۶	۳/۷۸	۰/۸۹	۰/۶۱	۰/۴۳
C۶	۷/۷۵	۶/۴۱	۵/۹۷	۵/۳۹	۲/۱۷	۰/۸۹	۰/۶۵	۰/۴۹
نوع مقره	آلودگی متوسط				آلودگی سنگین			
	سطوح رطوبت				سطوح رطوبت			
	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵	%۹۵	%۸۵	%۷۵	%۶۵
C۰	۳/۳۱	۰/۹۲	۰/۸۵	۰/۵۵	۱/۵۲	۰/۷۴	۰/۷۱	۰/۳۷
C۲	۲/۷۴	۰/۷۹	۰/۷۱	۰/۵۳	۱/۳۹	۰/۸۴	۰/۶۸	۰/۳۰
C۴	۳/۰۶	۰/۷۳	۰/۶۰	۰/۴۰	۱/۶۷	۰/۶۴	۰/۵۰	۰/۲۷
C۶	۲/۸۶	۰/۷۸	۰/۶۵	۰/۳۹	۱/۴۸	۰/۶۳	۰/۴۲	۰/۲۴

۳ کیلوولت بر ثانیه انجام می‌گردد. برای ثبت ولتاژ قوس الکتریکی هر مقره در هر سطح رطوبت، آلودگی و همچنین میزان پیری خاص، این تست پنج مرتبه انجام شده است. سپس طبق رابطه (۱) مقدار ولتاژ قوس الکتریکی متوسط در هر سطح آلودگی ثبت می‌گردد. البته شایان ذکر است طبق رابطه (۲) صرفاً مقادیری که انحراف معیاری کم‌تر از ۱۰ درصد در مقایسه با مقدار ولتاژ قوس الکتریکی متوسط داشته‌اند، در محاسبات منظور شده‌اند [۱۹].

$$U_f = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{N} \quad (1)$$

$$\sigma\% = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (U_i - U_f)^2 / N - 1}}{U_f} \times 100\% \quad (2)$$

با توجه به مطالب پیش گفته، مقره نوع B همواره مقادیر هارمونیک بالاتری نسبت به سایر مقره‌ها داشته به‌طوری‌که هم در حالت تمیز و هم سطوح مختلف آلودگی و در غالب حالات، شاخص $K_{5/3}$ کوچک‌تری دارد و این موضوع نشان‌دهنده عملکرد نامناسب این مقره نسبت به سایر مقره‌ها می‌باشد. چرا که هر قدر این شاخص کوچک‌تر شود احتمال پدیده قوس الکتریکی در مقره افزایش یافته و ممکن است در ولتاژهای پایین‌تر و نزدیک به ولتاژ شبکه، این پدیده رخ دهد.

۶- اندازه‌گیری و تحلیل ولتاژ قوس الکتریکی

یکی از پارامترهایی که در طول مدت پیرسازی مقره‌ها دست‌خوش تغییر می‌شود، ولتاژ قوس الکتریکی است. در این مقاله ولتاژ قوس الکتریکی متوسط (U_i) مقره‌ها در آزمایش‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. بدین‌منظور افزایش ولتاژ تا رسیدن به ولتاژ شکست^{۱۱} با نرخ افزایش ولتاژ

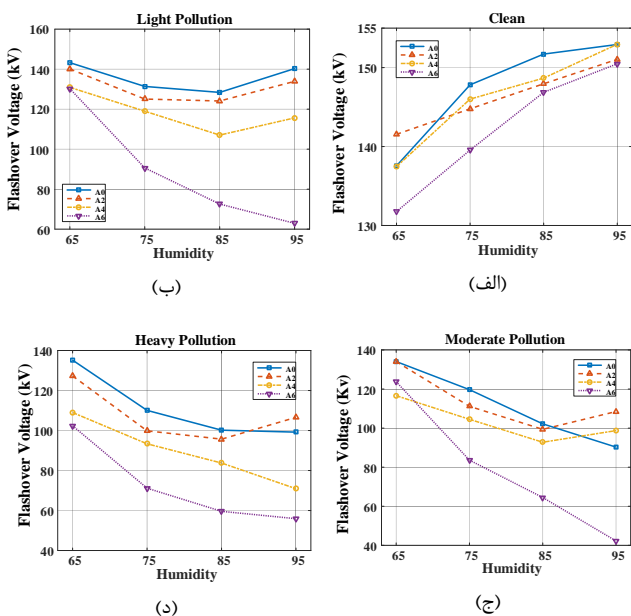
مناسب مقره در حال بهره‌برداری به لحاظ افت ولتاژ قوس الکتریکی می‌باشد.

۷- اندازه‌گیری و تحلیل اسکن میکروسکوپی الکترونی سطح مقره (SEM)

برای مطالعه تغییرات سطح مقره پلیمری مورد آزمایش پس از مدت پیرسازی، نمونه‌هایی با ابعاد ۵×۵ میلی‌متر از روی سطح مقره بریده شده و با استفاده از روش اسکن میکروسکوپی الکترون مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مراحل تهیه تصاویر SEM به‌صورت ذیل می‌باشد:

- قرار دادن نمونه‌ها برپایه نگه‌دارنده آلومینیومی
- انتقال نمونه‌ها به دستگاه اسپاترینگ به‌منظور قرار دادن لایه‌ای بسیار نازک از طلا بر روی آن‌ها
- قرار دادن نمونه‌ها درون محفظه میکروسکوپ
- رسیدن پمپ خلأ سیستم به حد مطلوب و اعمال ولتاژ فشار قوی و شروع تصویربرداری

مطابق شکل‌های ۲۲ تا ۲۵ که در مقیاس ۲۰ میکرومتر و ولتاژ ۲۰ کیلوولت به دست آمده است، در مدت پیرسازی مصنوعی متناسب با گذشت زمان، سطح مقره‌های مورد مطالعه از حالت صاف و یکپارچه خارج شده و پیوندهای مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها از هم گسسته و به نواحی جدا از هم تقسیم شده‌اند و با افزایش مدت پیرسازی مصنوعی، حفره‌هایی نیز در سطح به وجود می‌آید و بیش‌تر قسمت‌های مقره را مناطق خلل و فرج‌دار تشکیل داده‌اند و این موضوع، باعث تضعیف سطحی مقره و پیرشدگی سطحی آن می‌شود.



شکل ۱۸: ولتاژ قوس الکتریکی متوسط مقره نوع A در سطوح مختلف آلودگی و رطوبت (کیلوولت)، (الف) ۶۵٪؛ (ب) ۷۵٪؛ (ج) ۸۵٪؛ (د) ۹۵٪

در روابط (۱) و (۲)، U_f ولتاژ قوس الکتریکی متوسط، U_i ولتاژ قوس الکتریکی در تکرار i ام، N تعداد تکرار آزمایش ولتاژ قوس الکتریکی و σ انحراف معیار ولتاژ قوس الکتریکی i ام می‌باشند.

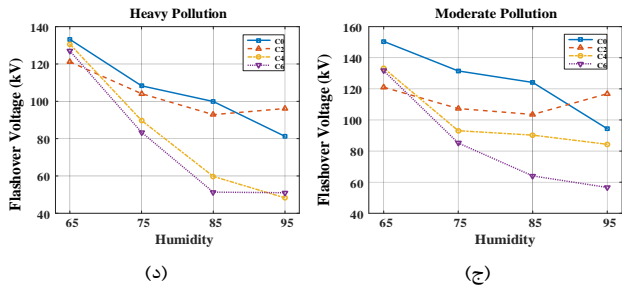
علاوه بر آلودگی که عامل بسیار مهمی در تغییر مقادیر ولتاژ قوس الکتریکی مقره‌ها می‌باشد، عوامل دیگری نیز در این مقدار تأثیرگذار هستند که از آن جمله می‌توان به رطوبت محیط و میزان پیرشدگی مقره‌ها اشاره نمود. طبق شکل‌های ۱۸ تا ۲۱، در نمودار ولتاژ قوس الکتریکی متوسط مقره‌های A تا D، رطوبت به‌عنوان محور افقی منظور شده و با ثابت نگه داشتن سطح آلودگی در هر یک از چهار حالت، تأثیر پدیده پیرشدگی بر ولتاژ قوس الکتریکی مشاهده می‌گردد.

نکته قابل توجه در مورد مقره نوع B و در حالت تمیز، کاهش ولتاژ قوس الکتریکی در افزایش رطوبت ۸۵ به ۹۵ درصد است که این امر می‌تواند به علت پروفیل مقره و فاصله جرقه کمتر آن باشد به‌طوری‌که فشرده بودن ساختار مقره و داشتن چترک‌های بزرگ‌تر و نزدیک به هم نسبت به سایر مقره باعث جذب رطوبت بیش‌تر از محیط می‌گردد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داده است که در برخی حالات و در شرایط تمیز، مسیر قوس الکتریکی از روی سطح بسته شده و این برعکس حالت‌های قبل است که قوس الکتریکی در حالت بدون آلودگی مسیر خود را از روی هوا و نقاط نزدیک به سطح مقره می‌یست.

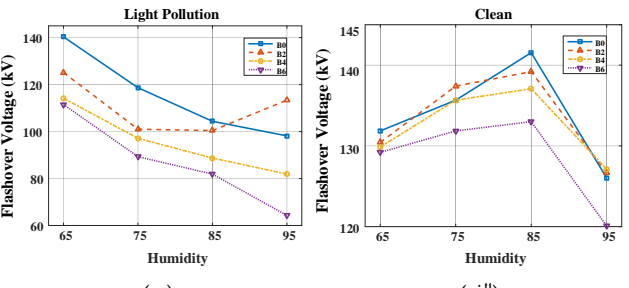
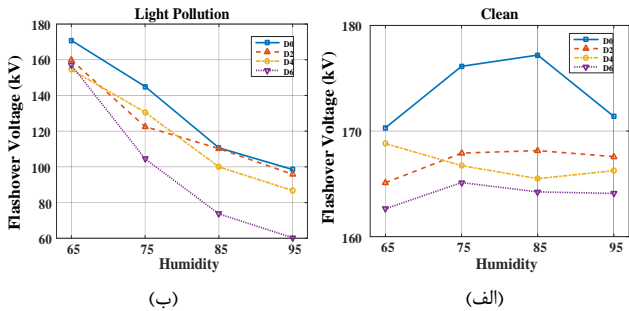
مطابق نتایج حاصله، در هر سطح آلودگی و رطوبت، نمودارهای ولتاژ قوس الکتریکی مقره‌های فرسوده‌تر، پایین‌تر از مقره‌های نو قرار می‌گیرد و این موضوع بیان‌کننده این مطلب مهم است که با افزایش مدت‌زمان بهره‌برداری مقره‌ها در خطوط شبکه قدرت، احتمال عملکرد نامناسب آن‌ها افزایش یافته و ممکن است وقوع پدیده قوس الکتریکی در ولتاژهای پایین‌تر اتفاق بیفتد.

با توجه به نتایج حاصله، در هر سطح آلودگی مشخص، اختلاف مقادیر ولتاژ قوس الکتریکی متوسط مقره نو و پیرشده، با افزایش رطوبت، افزایش قابل‌ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال برای مقره نوع A و در آلودگی سبک و رطوبت ۶۵ درصد، مقادیر ولتاژ قوس الکتریکی متوسط حالات A۰ و A۶، A۱۳ و ۱۴۰ کیلوولت و در رطوبت ۹۵ درصد، ۶۲ و ۶۲ کیلوولت می‌باشد که این مقایسه به‌وضوح تأثیر توأمان پیری و افزایش رطوبت را بر مقادیر ولتاژ قوس الکتریکی نشان می‌دهد. البته طبق نتایج آزمایشگاهی کاملاً مشخص است پدیده پیری در رطوبت‌های بالاتر، تغییرات بیش‌تری را در مقادیر ولتاژ قوس الکتریکی متوسط ایجاد می‌کند.

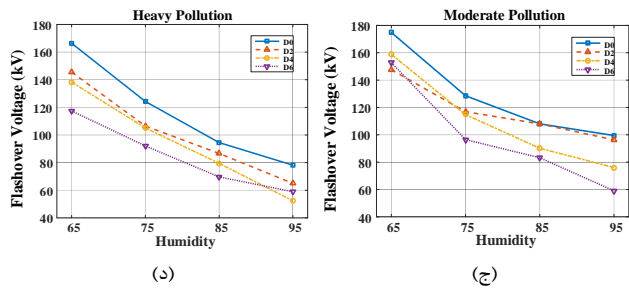
نکته بسیار مهمی که در ارتباط بین مقادیر شاخص $K_{5/3}$ و ولتاژ قوس الکتریکی متوسط مقره‌های مورد مطالعه حاصل شده است آن است که مقره B که در اکثر شرایط مشابه به لحاظ سطح رطوبت و آلودگی و میزان پیرشدگی، شاخص $K_{5/3}$ کم‌تری داشت، در مقایسه با سایر مقره‌ها، ولتاژ قوس الکتریکی متوسط کم‌تری نیز داشت. بنابراین این شاخص، علاوه بر تعیین میزان آلودگی سطحی مقره، متناسب با مقادیر ولتاژ قوس الکتریکی نیز بوده و در صورت کاهش قابل توجه، هشدار برای عملکرد



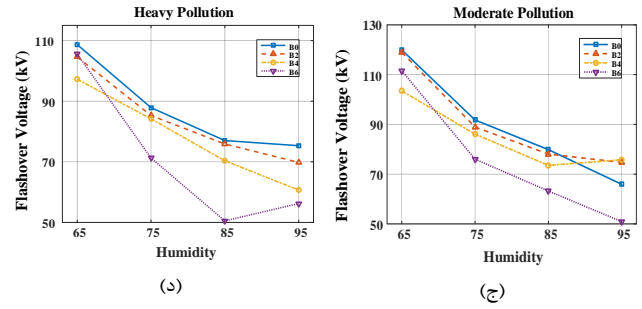
شکل ۲۰: ولتاژ قوس الکتریکی متوسط مفره نوع C در سطوح مختلف آلودگی و رطوبت (کیلوولت)، (الف) ۶۵٪؛ (ب) ۷۵٪؛ (ج) ۸۵٪؛ (د) ۹۵٪.



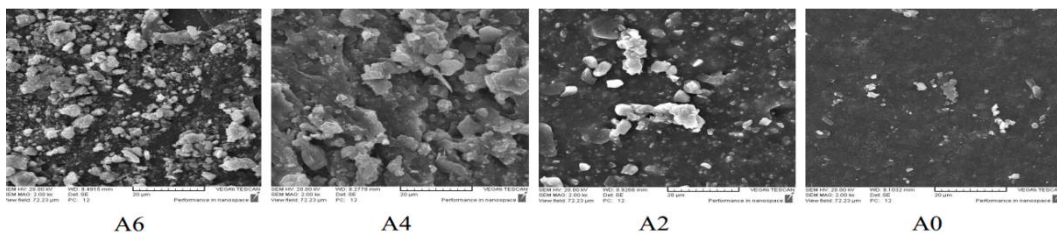
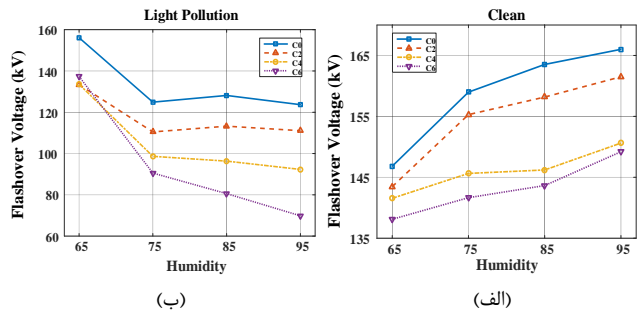
شکل ۱۹: ولتاژ قوس الکتریکی متوسط مفره نوع B در سطوح مختلف آلودگی و رطوبت (کیلوولت)، (الف) ۶۵٪؛ (ب) ۷۵٪؛ (ج) ۸۵٪؛ (د) ۹۵٪.



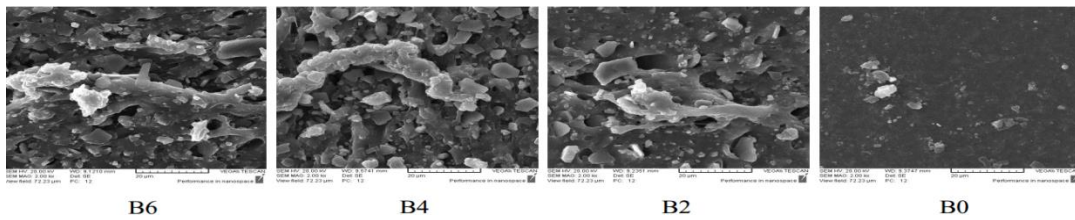
شکل ۲۱: ولتاژ قوس الکتریکی متوسط مفره نوع D در سطوح مختلف آلودگی و رطوبت (کیلوولت)، (الف) ۶۵٪؛ (ب) ۷۵٪؛ (ج) ۸۵٪؛ (د) ۹۵٪.



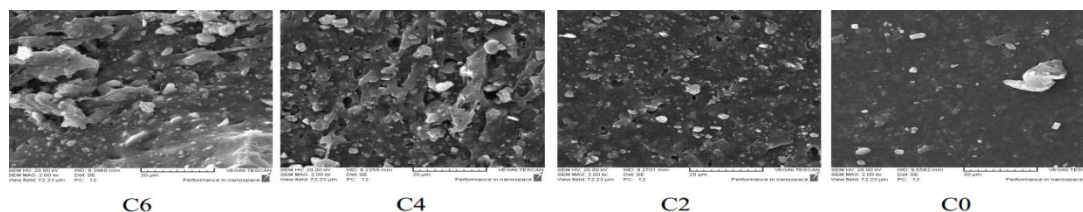
شکل ۲۰: ولتاژ قوس الکتریکی متوسط مفره نوع C در سطوح مختلف آلودگی و رطوبت (کیلوولت)، (الف) ۶۵٪؛ (ب) ۷۵٪؛ (ج) ۸۵٪؛ (د) ۹۵٪.



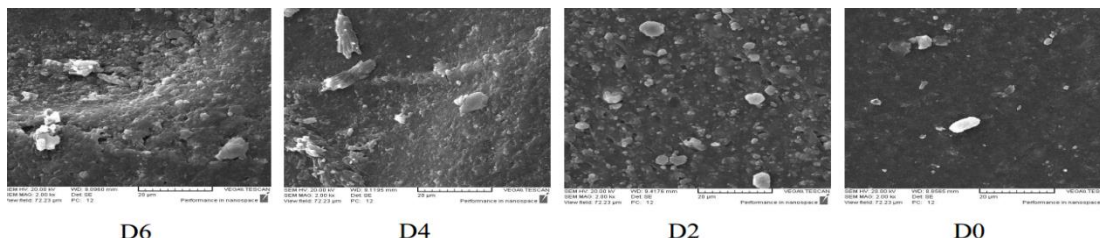
شکل ۲۲: تغییرات ساختار درونی مفره نوع A طی مدت پیرسازی مصنوعی



شکل ۲۳: تغییرات ساختار درونی مفره نوع B طی مدت پیرسازی مصنوعی



شکل ۲۴: تغییرات ساختار درونی مقره نوع C طی مدت پیرسازی مصنوعی



شکل ۲۵: تغییرات ساختار درونی مقره نوع D طی مدت پیرسازی مصنوعی

در مقره افزایش یافته و ممکن است در ولتاژهای پایین‌تر این پدیده رخ دهد.

همچنین نتایج آزمایش SEM نشان داد که هر قدر مقره‌های مورد مطالعه، مدت‌زمان بیش‌تری را تحت تأثیر تنش‌های الکتریکی و محیطی قرار بگیرند مناطق خلل و فرج‌دار بیش‌تری روی سطح آن‌ها تشکیل شده و با تضعیف خاصیت آب‌گریزی، عملکرد نامناسب آن‌ها منجر می‌گردد.

تشکر و قدردانی

در اینجا مولف مسئول بر خود لازم می‌داند که از شرکت توزیع نیروی برق استان گلستان به جهت حمایت در بخش‌هایی از این پژوهش، تشکر و قدردانی نماید.

مراجع

- [1] S. M. Gubanski, "Modern outdoor insulation-concerns and challenges," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 21, no. 6, pp. 5-11, 2005.
- [2] T. Kikuchi, S. Nishimura, M. Nagao and M. Sakata, "Survey on the use of non-ceramic composite insulators," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 5, pp. 548-556, 1999.
- [3] J. F. Hall, "History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, pp. 376 – 385, 1993.
- [4] S. Simmons, M. Shah, J. Mackevich and R. J. Chang. "Polymer outdoor insulating materials. Part III-Silicone elastomer considerations", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 5, no. 13, pp. 25-32, 1997.
- [5] H. Cao, D. Yan, J. Han, H. Ren, M. Lu, Z. Lv and H. Guo, "Investigation and corroboration of a novel method to estimate the hydrophobicity of composite insulators," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 6, pp. 2029-2036, 2012.
- [6] I. Ahmadi-Joneidi, J. Jadidian, R. Karimpour, A. A. Shayeganiand and H. Mohseni. "Effects of ultraviolet radiation and artificial pollution on the leakage current of Silicon Rubber insulators," in *Proceedings of Electrical*

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله چهار نوع مقره پلیمری با پروفیل‌های مختلف در مدت ۱۰۰۰ ساعت در محیط آزمایشگاه به صورت مصنوعی پیر شده‌اند. سپس طیف هارمونیک‌های جریان ناشی آن و همچنین ولتاژ قوس الکتریکی آن‌ها در سطوح مختلف رطوبت، آلودگی و همچنین میزان پیرشدگی مصنوعی متفاوت، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند.

در همه مقره‌های مورد مطالعه و در هر سطح آلودگی و رطوبت خاص، هارمونیک‌های فرد اول تا پنجم جریان ناشی مقره‌های فرسوده‌تر بیش‌تر از مقره‌های نو بوده طوری که متناسب با میزان پیرشدگی مقره‌ها و با افزایش رطوبت، میزان افزایش این مؤلفه‌ها بیش‌تر شده و اختلاف مقادیر مقره‌های نو و پیرشده قابل‌ملاحظه‌تر می‌شود و در اکثر موارد، هارمونیک سوم تغییرات بیش‌تری نسبت به هارمونیک پنجم داشته است. از طرفی نمودار ولتاژ قوس الکتریکی مقره‌های فرسوده‌تر پایین‌تر از مقره‌های نو می‌باشد طوری که اختلاف بیشینه و کمینه ولتاژ قوس الکتریکی متوسط مقره‌های نو و پیرشده در تمام سطوح آلودگی و رطوبت بالا، عددی قابل توجه می‌باشد.

اگرچه در سطوح مختلف آلودگی نسبت به حالت تمیز، شاخص $K_{\Delta 3}$ کاهش قابل‌ملاحظه‌ای داشته ولی شایان توجه است در هر سطح آلودگی و رطوبت مشخص، پیری مقره‌ها نیز در این نسبت مؤثر بوده و در اکثر موارد باعث کاهش آن شده است.

مقره نوع B در سطوح مختلف آلودگی، مؤلفه‌های هارمونیک بالاتر و شاخص $K_{\Delta 3}$ و ولتاژ قوس الکتریکی متوسط کوچک‌تری نسبت به سایر مقره‌ها داشته و نشان‌دهنده عملکرد نامناسب آن نسبت به سایر مقره‌ها بوده است. این امر می‌تواند به علت پروفیل مقره و فاصله جرقه کم‌تر آن باشد به طوری که فشرده بودن ساختار مقره و داشتن چترک‌های بزرگ‌تر و نزدیک به هم، باعث جذب رطوبت بیش‌تر از محیط می‌گردد. شایان ذکر است متناسب با کاهش شاخص $K_{\Delta 3}$ ، احتمال پدیده قوس الکتریکی

- [13] V.Rajini and K. Udayakumar, "Degradation of silicone rubber under AC or DC voltages in radiation environment," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, no. 3, pp. 834-841, 2009.
- [14] M. Faramarzi Palangar and M. Mirzaie, "Mathematical Modeling of Critical Parameters on the Polluted Ceramic Insulators Under AC Voltage; Based on Experimental Tests," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 41, no. 9, pp. 3501-3510, 2016.
- [15] M. Faramarzi Palangar and M. Mirzaie, "Diagnosis of Porcelain and Glass Insulators Conditions Using Phase Angle Index Based on Experimental Tests," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 3, pp. 1460-1466, 2016.
- [16] A. Azizi Tousi and M. Mirzaie, "Impact of Pollution Location on Time and Frequency Characteristics of Leakage Current of Porcelain Insulator String under Different Humidity and Contamination Severity," *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 74-83, 2013.
- [17] IEC 60507, *Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be used on A.C. Systems*, 3rd Edition, 2013.
- [18] H. H. Kordkheili, H. Abravesh, M. Tabasi, M. Dakhemad and M. M. Abravesh, "Determining the probability of flashover occurrence in composite insulators by using leakage current harmonic components," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 2, pp. 502-512, 2010.
- [19] Z. Zhang, X. Jiang, C. Sun, J. Hu and H. Huang, "Study of the Influence of Test Methods on DC Pollution Flashover Voltage of Insulator Strings and its Flashover Process," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, no. 6, pp. 1787-1795, 2010.
- [7] Z. Farhadinejad, M. Ehsani, I. Ahmadi-Joneidi, A. A. Shayegani and H. Mohseni, "Effects of UVC radiation on thermal, electrical and morphological behavior of silicone rubber insulators," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 5, pp. 1740-1749, 2012.
- [8] S. H. Kim, E. A. Cherney, R. Hackam and K. G. Rutherford, "Chemical changes at the surface of RTV silicone rubber coatings on insulators during dry-band arcing," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 1, no. 1, pp. 106-123, 1994.
- [9] Y. Zhou, Y. Tu, D. Liu, J. Chen, C. Wang, R. Li, F. Zhang, L. Zou and Q. Peng, "Aging characteristic at different depths in a single composite insulators shed," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 3, pp. 1630-1635, 2015.
- [10] I. Jarrar, K. Assaleh and A.H. El-Hag, "Using a pattern recognition-based technique to assess the hydrophobicity class of silicone rubber materials," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 6, pp. 2611-2618, 2014.
- [11] H. Liu, G. Cash, D. Birtwhistle and G. George, "Characterization of a severely degraded silicone elastomer HV insulator-an aid to development of lifetime assessment techniques," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 3, pp. 478-486, 2005.
- [12] Z. Xu, F. Zhang, H. Zhang, G. Zhang, J. Chen and Y. Tu. "Investigation of the aging of line composite insulator sheds," in *Proceedings of IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Shanghai, China, pp. 489-491, 2012.

زیرنویس‌ها

⁷ Thermogravimetric analysis (TGA)

⁸ Thermally stimulated current (TSC) test

⁹ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

¹⁰ Equivalent Salt Deposit Density (ESDD)

¹¹ Even-rising voltage method

¹ Infrared camera

² Image intensifier

³ Contact angle measurements

⁴ Surface roughness tests

⁵ Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy

⁶ Scanning electron microscopy (SEM)