

فصلنامه علمی پژوهشی مواد پیشرفته در مهندسی، دوره ۳۹، شماره ۳، صفحات ۱۱۷-۱۲۸

## بررسی اثر افزودن ذرات آلومینیوم تری هیدرات (ATH) بر خواص الکتریکی و آب‌گریزی سیلیکون رابر دو جزئی

اشکان ذوالریاستین\*، شیوا نوازی، مجید رضایی آبادچی و نسترن ریاحی نوری

گروه پژوهشی مواد غیر فلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۳/۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۹/۱۶)

چکیده- در این مقاله، خواص الکتریکی و آب‌گریزی پوشش‌های سیلیکون رابری پخت شونده در دمای محیط (RTV) دوجزئی، بررسی شده و تأثیر افزودن آلومینیوم تری هیدرات (ATH) روی این خواص بررسی شده است. به همین منظور، نانو کامپوزیت RTV-ATH به وسیله اختلاط فیزیکی ساخته شده و خواص الکتریکی (شامل ضریب تلفات عایقی، اتلاف دی الکتریک، استحکام دی الکتریک، مقاومت سطحی و حجمی) و آب‌گریزی آن با RTV خالص مقایسه شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ثابت دی الکتریک RTV خالص از ۳/۱۱ به ۴/۱۳ در نمونه کامپوزیتی افزایش یافت. اتلاف دی الکتریک نمونه کامپوزیتی نسبت به نمونه خالص در حدود ۰/۰۶٪ افزایش ولی در مقابل استحکام دی الکتریک کامپوزیت RTV-ATH نسبت به RTV خالص در حدود چهار کیلوولت بر میلی‌متر بهبود را نشان داد. همچنین حضور آلومینیوم تری هیدرات سبب افزایش مقاومت حجمی و کاهش مقاومت سطحی پوشش‌های کامپوزیتی شده است. از سوی دیگر با بررسی آب‌گریزی پوشش‌های خالص و کامپوزیتی به روش پاشش، تغییری در کلاس آب‌گریزی برای پوشش کامپوزیتی نسبت به RTV خالص مشاهده نشد و هر دو نمونه در کلاس آب‌گریزی HC<sub>2</sub> مورد پذیرش استاندارد قرار داشتند. نمونه‌ها توسط آزمون‌های پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی ساختاری شدند و وجود فازهای اصلی در آنها تأیید شد.

واژه‌های کلیدی: سیلیکون رابر، آلومینیوم تری هیدرات، خواص الکتریکی، آب‌گریزی.

## Investigation of the Effect of Adding Aluminum Trihydrate (ATH) Particles on Electrical and Hydrophobic Properties of Two-Part RTV Silicon Rubber

A. Zolriasatein\*, S. Navazani, M. Rezaei Abdadchi and N. Riahi Noori

Non-Metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran.

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: azolriasatein@nri.ac.ir

**Abstract:** *In this paper, the effect of adding aluminum trihydrate (ATH) on electrical (including dielectric constant, dielectric loss and strength, volume and surface resistivity) and hydrophobic properties of two-part room temperature vulcanized (RTV) silicone rubber resin coatings were investigated. For this purpose, the RTV-ATH nanocomposite was made by physical mixing and its electrical and hydrophobic properties were compared with those of pure RTV. The results showed an increase in the dielectric constant (from 3.11 to 4.13), the dielectric loss (by ~ 0.06) and the dielectric strength (by ~ 4 KV/mm) of the RTV-ATH composite compared to the pure RTV. Moreover, ATH increased volume resistivity and reduced the surface resistivity of composite coatings. On the other hand, by spraying of coatings, no improvement in the hydrophobicity class of composite coating compared to pure RTV was observed and both samples were standardized in the HC2 standard class. Structural analysis of samples was performed by X-ray diffraction, optical microscopy and scanning electron microscopy and the presence of the main phases in them was confirmed.*

**Keywords:** *Silicon rubber (RTV), Aluminum trihydrate (ATH), Electrical properties, Hydrophobicity.*

## ۱- مقدمه

خورشید، تغییرات دمایی و بارش باران می‌شود.

پوشش‌های فوق آب‌گریز بیشتر مقرون به صرفه، دوستاندار محیط زیست، دارای خاصیت خود تمیزشوندگی، مقاوم به نور فرابنفش، ضد شوره، ضد لکه و گردوغبار هستند. به همین دلیل، استفاده از این پوشش‌ها برای رفع یکی از عمده‌ترین نقاط ضعف مقره‌های سرامیکی که تجمع آلودگی و حضور رطوبت است، می‌تواند بسیار مفید و حائز اهمیت باشد و از وقوع جرقه‌های خشک در اثر آلودگی جلوگیری خواهد شد [۵]. علاوه بر این مقره‌های پوشش داده شده نیاز کمتری به شستشو داشته، که از نظر اقتصادی و بهره‌وری نیز بسیار مهم است. پایداری این پوشش‌ها یکی از چالش برانگیزترین حیطه‌های مورد بررسی است.

مطابق با گزارش‌ها، از مواد پلیمری مختلفی همچون سیلیکون رابر، لاستیک طبیعی [۶]، اتیلن پروپیلن دی‌ان منومر<sup>۱</sup> [۷]، اتیلن پروپیلن رابر<sup>۲</sup> [۸] و اتیلن وینیل استات<sup>۳</sup> [۹] برای پوشش‌دهی سطح مقره‌ها استفاده شده است؛ اما سیلیکون رابر بهترین خواص را در میان آنها داشته است [۱۰ و ۱۱].

هانگبو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۳ پوشش پلی‌آیلینی<sup>۴</sup> فوق آب‌گریز را با پلیمریزاسیون آنیلین تولید کرده‌اند. این پوشش‌ها زاویه تماس بالا و هیسترسیس زاویه تماس کم دارند. پس از چند ساعت غوطه‌وری در آب و در محلول‌های اسیدی، این پوشش‌ها خاصیت فوق آب‌گریزی خود را حفظ کردند. مشکل این نوع پلیمر هادی الکتریسیته بودن آن است که کاربرد آن را برای پوشش‌دهی سطح مقره‌ها محدود می‌کند.

مقره یکی از مهم‌ترین اجزای سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی است. مقره‌ها باید دارای ویژگی‌های الکتریکی نظیر ولتاژ شکست بالا، تلفات عایقی کم و همچنین مقاومت بالا در مقابل نفوذ آب باشند [۱]؛ از این رو شناخت و بررسی عوامل مخرب مقره و روش‌های مقابله با آنها، کمک زیادی به حوزه توزیع و انتقال برق می‌کند. مقره‌های سرامیکی و شیشه‌ای اقتصادی‌ترین نوع مقره‌ها هستند که در تمام دنیا به شکل گسترده برای انتقال و توزیع برق استفاده می‌شوند. موارد زیادی از عدم کارایی این نوع مقره‌ها مانند بروز مشکلات ناشی از تخلیه الکتریکی در مقره‌های سرامیکی و شیشه‌ای در مناطق مرطوب و آلوده گزارش شده است [۲ و ۳]. در اثر تخلیه الکتریکی، برق خطوط ممکن است تا مدتی قطع شود و خسارات جبران‌ناپذیری در بیمارستان‌ها، کارخانه‌های مکانیزه، مراکز مختلف صنعتی و ... رخ دهد. در خصوص علت این پدیده می‌توان گفت که در اثر حضور گرد و خاک و رطوبت روی سطح مقره، لایه‌ای رسانا روی آن ایجاد می‌شود و به این ترتیب جریان برق دچار نشتی شده و ولتاژ شکست کاهش می‌یابد. برای حل این مشکلات، روش‌هایی از جمله تمیز کردن و شستشو با آب، تغییر ماهیت ماده مورد استفاده در مقره مثل استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری-بتنی و اعمال پوشش خود تمیزشونده روی سطح مقره پیشنهاد شده است [۴]. ایجاد تغییرات در شیمی سطح و زاویه تماس باعث ایجاد حفاظت سطح زیرین در برابر آلودگی‌های محیطی، تخریب ناشی از پرتو

سایشی، مقاومت پارگی و مدول را بهبود می‌بخشند. مهم‌ترین نوع پرکننده‌های تقویت کننده نانوذرات سیلیکا فیوم (پلی مورف آمورف از دی‌اکسید سیلیکون)، سیلیکا ائروژل و دوده هستند. پرکننده‌های بسط دهنده شامل پرکننده‌های نیمه‌تقویتی و یا خنثی هستند که به‌عنوان مثال می‌توان کوارتز، تیتانیوم دی‌اکسید، رس، آلومینا تری‌هیدرات و اکسید روی را نام برد [۱۶ و ۱۷]. یکی از بهترین پرکننده‌های معدنی مورد استفاده برای پوشش‌های پخت شونده در دمای محیط، آلومینیوم تری‌هیدرات<sup>۷</sup> (ATH) است [۱۸].

نتایج کار چیراگ و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۹، نشان داد که آلومینیوم تری‌هیدرات سبب بهبود خواص الکتریکی و سایشی پوشش‌های پخت شونده در دمای محیط می‌شود. همچنین برای استفاده از پرکننده در جهت ارتقای خاصیت عایق بودن پوشش، یک نقطه بهینه‌ای وجود دارد. ماوریکاک و همکاران [۲۰] نیز در سال ۲۰۱۴ تأثیر اعمال آلومینیوم تری‌هیدرات در پوشش سیلیکون رابر پخت شونده در دمای محیط را بررسی کردند و مشاهده کردند که آلومینیوم تری‌هیدرات سبب کاهش خاصیت آب‌گریزی پوشش و افت بیشتر خاصیت آب‌گریزی پوشش‌های کار کرده شده است. همچنین پرادایپ و همکاران [۲۱]، تأثیر درصدهای مختلف آلومینیوم تری‌هیدرات روی خواص الکتریکی و پیرسازی EVA و سیلیکون رابر را بررسی کردند. نتایج کار آنها نشان از کاهش آب‌گریزی پوشش در اثر افزودن آلومینیوم تری‌هیدرات داشت. دلیل آن طبیعت آب‌دوست آلومینیوم تری‌هیدرات گزارش شده است.

با توجه به مطالب گفته شده، بررسی نقش پرکننده آلومینیوم تری‌هیدرات بر خواص الکتریکی و آب‌گریزی رزین پخت شونده در دمای محیط به‌عنوان پوشش مفره‌های الکتریکی، همچنان محل بحث و بررسی است و مطالعه جامعی در این زمینه گزارش نشده است. بنابراین هدف از این پژوهش، ارزیابی خواص الکتریکی در اثر اضافه کردن ۳۰ درصد وزنی آلومینیوم تری‌هیدرات به رزین سیلیکون رابر دوجزئی است.

فلوئورو پلی‌یورتان‌ها نیز به‌عنوان ماتریسی برای پوشش‌دهی سطوح مفره استفاده شدند اما نتایج آزمون‌های عملیاتی خوبی از خود نشان نداده‌اند که یکی از دلایل اصلی آن، پایین بودن چسبندگی این پلیمرها روی سطح مفره است [۱۳].

رزین‌های سیلیکونی به دو شکل، پخت شونده در دمای محیط<sup>۵</sup> (RTV) و پخت شونده تحت حرارت<sup>۶</sup> (HTV) وجود دارند. هر کدام از این دسته‌ها می‌توانند به‌شکل تک‌جزئی و یا دو جزئی باشند. کارآمدترین نوع پوشش‌های سیلیکونی برای بهبود عملکرد مفره‌ها، پوشش‌های سیلیکونی پخت شونده در دمای محیط هستند. در واقع این پوشش‌ها به‌عنوان روش جایگزینی برای شستشوی مداوم مفره‌ها با آب و یا اعمال گریس روی سطح، مطرح شده‌اند [۱۴].

پوشش‌های حاصل از رزین‌های سیلیکونی می‌توانند خواص الکتریکی خود را حتی زمانی که در معرض رطوبت و دمای بالا هستند، حفظ کنند. این خاصیت این امکان را به رزین‌های سیلیکونی می‌دهد که به‌عنوان پوشش مفره‌ها حتی در ولتاژهای بالا قرار بگیرند. به‌طوری که در اکثر محیط‌های آلوده، این پوشش‌ها بدون استفاده از عملیات نگهداری متناوب، ده سال و یا بیشتر دوام آورده‌اند. حتی در صورت نیاز به شستشوی دوره‌ای این پوشش‌ها، این عملیات به‌صورت قابل ملاحظه‌ای در دوره‌های طولانی‌تر و با هزینه کمتری صورت می‌پذیرد. مطابق با نتایج حاصل از آزمایش‌ها، پوشش‌های سیلیکون رابری پخت شونده در دمای محیط خاصیت آب‌گریزی بالایی دارند، همچنین عایق خوبی در برابر جریان الکتریکی محسوب می‌شوند و ولتاژ شکست را بالا می‌برند. از این‌رو اعمال این پوشش‌ها روی مفره‌های شیشه‌ای و سرامیکی، یکی از بهترین راه‌حل‌ها برای حل مشکلات عملکردی مفره‌ها در نواحی آلوده است [۱۵]. برای بهبود خواص پوشش‌های سیلیکون رابری پخت شونده در دمای محیط معمولاً از پرکننده‌های معدنی و یا هیبریدهای آلی-معدنی استفاده می‌شود [۱۱]. پرکننده‌های مورد استفاده در نانوکامپوزیت‌ها بیشتر دو نوع تقویت کننده و بسط دهنده هستند. پرکننده‌های نوع تقویت کننده مقاومت کششی،

جدول ۱. ترکیب شیمیایی نمونه‌های ساخته شده

شماره نمونه	کسر حجمی پخت شونده در دمای محیط	کسر حجمی آلومینیوم تری هیدرات	کسر حجمی تولوئن	گرانروی (گرم بر سانتی متر مکعب)
۰	۱	۰	۰/۴	۱/۰۸۷
۱	۰/۷	۰/۳	۰/۴	۱/۳۰۳

کردن آلومینیوم تری هیدرات، به همین روش ساخته شد. ترکیب شیمیایی نمونه‌های ساخته شده در جدول (۱)، ارائه شده است.

## ۲-۲- مشخصه‌یابی ساختار و خواص

به منظور بررسی ساختار کریستالی آلومینیوم تری هیدرات از دستگاه پراش پرتو ایکس<sup>۸</sup>، Inel EQUINOX 3000 استفاده شد. الگوهای پراش در زوایای ۱۰ تا ۸۰ درجه با نرخ اسکن ۰/۰۲ درجه بر ثانیه ثبت شدند. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی<sup>۹</sup> توسط دستگاه میراتسکان ثبت شد.

اندازه‌گیری مقاومت حجمی و سطحی روی نمونه‌های با ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر به ترتیب طبق استانداردهای IEC62631-3-1 و IEC62631-3-2 انجام شدند.

اندازه‌گیری ثابت و اتلاف دی‌الکتریک نمونه‌ها مطابق با استاندارد IEC 60250 روی نمونه‌های با ابعاد ۷۰ در ۷۰ میلی‌متر صورت گرفت. استحکام دی‌الکتریک نمونه‌ها طبق استاندارد IEC60243 روی نمونه‌های با ضخامت یک میلی‌متر انجام شد.

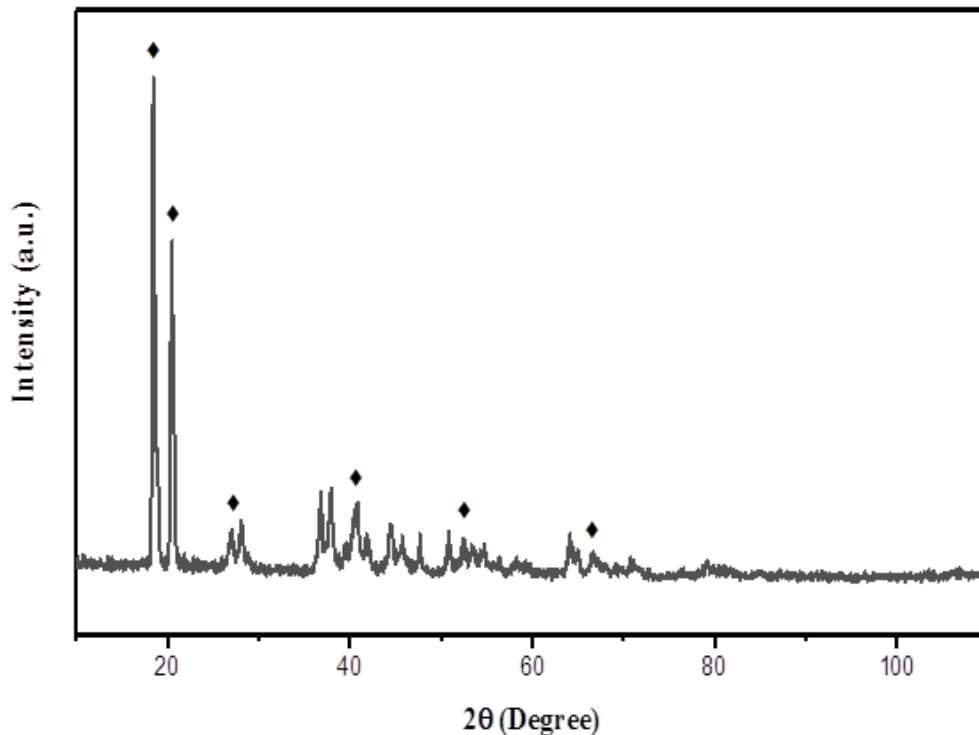
برای تعیین کلاس آب‌گریزی پوشش با روش پاشش، ابتدا سطح مورد نظر (ترجیحاً به مساحت ۱۰۰-۵۰ سانتی‌متر مربع و با نسبت طول به عرض حداکثر سه به یک) با آب مقطر یا دیونیزه، از فاصله ۱۰±۲۰ سانتی‌متری پاشش می‌شود. سطح باید به مدت ۱۰ تا ۲۰ ثانیه به‌طور مداوم تحت پاشش باشد که این زمان برای چکه کردن آب از روی سطح کافی است. سپس الگو و شکل قطرات روی سطح با کلاس‌های هفت‌گانه تعریف شده برای آب‌گریزی در مراجع صنعت برق، به‌طور چشمی مقایسه و بر این اساس، کلاس آب‌گریزی آزمون تعیین می‌شود.

برای این منظور، پس از تهیه رزین‌های پخت شونده در دمای محیط خالص و ترکیبی پخت شونده در دمای محیط و آلومینیوم تری هیدرات، خواص الکتریکی (مقاومت سطحی و حجمی ثابت دی‌الکتریک، اتلاف و استحکام دی‌الکتریک) و آب‌گریزی پوشش‌های پخت شونده در دمای محیط خالص و پخت شونده در دمای محیط پر شده با آلومینیوم تری هیدرات بررسی شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- تهیه RTV خالص و کامپوزیت RTV/ATH

RTV2 تحت عنوان HY-215 از شرکت ShenZhen Hong Ye و Jie Technology و پودر آلومینیوم تری هیدرات (ATH) استفاده شده، گرید Martinal ON-4608 محصول شرکت Martinswerk استفاده شده. به منظور تهیه کامپوزیت RTV2 (پخت شونده در دمای محیط دوجزئی) و آلومینیوم تری هیدرات، در محیط آزمایشگاه و تحت نور معمولی، ابتدا نیمی از RTV2 فرمولاسیون داخل بشر حاوی ۲۰۰ میلی‌لیتر تولوئن ریخته شد و مخلوط حاصل روی همزن مغناطیسی مدل LABINCO (۴۰۰ دور بر دقیقه) قرار گرفته و به‌صورت تدریجی آلومینیوم تری هیدرات (۳۰ درصد وزنی) به آن اضافه شد. سپس حین اختلاط مابقی رزین RTV2 به مخلوط اضافه شد، و ترکیب حاصل به مدت سه دقیقه تحت اولتراسونیک حمامی (دستگاه Dentine شرکت اصفهان فرازمهر) قرار گرفت و پس از آن هاردنر، به میزان ۱۰ درصد وزن کل RTV2 اضافه شده و مخلوط نهایی به مدت دو تا سه دقیقه هم زده شد. در نهایت، به منظور ایجاد آزمون‌ها، رزین در قالب‌های شیشه‌ای با ابعاد مختلف ریخته‌گری شد. نمونه RTV2 خالص، بدون اضافه



شکل ۱- طیف پراش پرتو ایکس پرکننده آلومینیوم تری هیدرات

می دهد و با افزوده شدن آلومینیوم تری هیدرات در نمونه یک، یکنواختی توزیع بیشتر شده و آگلومراسیون کاهش یافته است که سبب بهبود خواص رزین پخت شونده در دمای محیط خواهد شد.

بررسی سطح باید حداکثر تا ۱۰ ثانیه پس از خاتمه پاشش انجام گیرد. سطح کاملاً آب گریز، معادل کلاس HCl و سطح کاملاً آب دوست، معادل کلاس HC7 خواهد بود.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مشخصه یابی ساختاری آلومینیوم تری هیدرات

به منظور بررسی ساختار کریستالی، پودر آلومینیوم تری هیدرات استفاده شده در این پژوهش، آزمون طیف سنجی پراش پرتو ایکس روی پودر آلومینیوم تری هیدرات انجام شد (شکل ۱). پیک های مشخصه در  $2\theta$  برابر با ۱۸/۵، ۲۰/۵، ۴۰/۷، ۵۰/۵ و ۶۶/۶ درجه مربوط به آلومینیوم تری هیدرات، در شکل علامت گذاری شده اند.

تصاویر میکروسکوپی روبشی گسیل میدانی مربوط به نمونه (۰) و نمونه (۱) در بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر با قدرت ۱۵ کیلوولت تهیه شده اند (شکل ۲). نمونه صفر، نسبت به نمونه پر شده با آلومینیوم تری هیدرات، آگلومره شدن بیشتری نشان

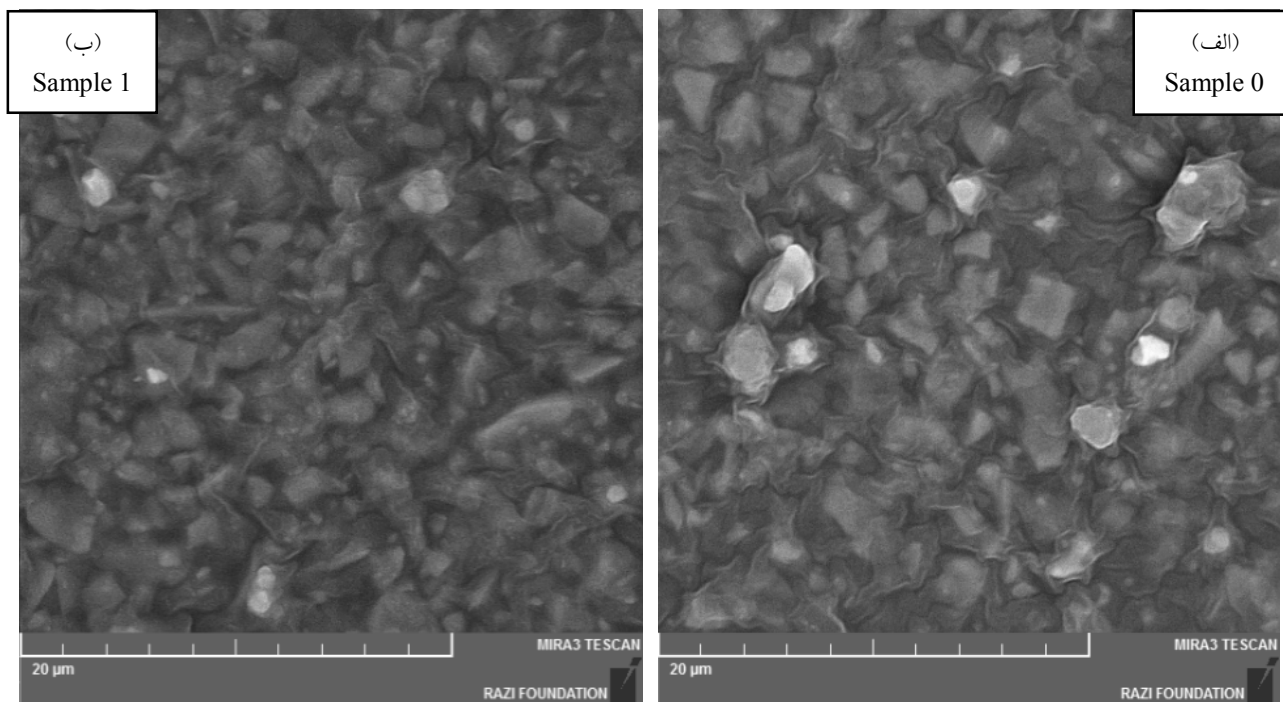
#### ۳-۲- نتایج آزمون های الکتریکی

##### ۳-۲-۱- نتایج آزمون اندازه گیری ضریب تلفات عایقی و

##### عدد دی الکتریک

نتایج آزمون اندازه گیری ضریب تلفات دی الکتریک و عدد دی الکتریک برای نمونه های (۰) (RTV2 خالص) و (۱) (ATH+30%RTV2)، در جدول (۲) و شکل (۳) ارائه شده است. نمونه مورد پذیرش طبق استاندارد استفاده شده باید دارای ثابت دی الکتریک کمتر از ۴/۵ و اتلاف دی الکتریک کمتر از ۰/۰۶ باشد.

ثابت دی الکتریک مواد کامپوزیتی با افزایش مقدار پرکننده، افزایش می یابد [۱۱]. فراتر از یک حد بهینه ثابت دی الکتریک به طور چشمگیری افزایش می یابد. این پدیده توسط نظریه نفوذ، توضیح داده می شود [۲۲ و ۲۳]. زمانی که سیلیکون رابر خالص



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی: الف) نمونه خالص و ب) کامپوزیتی

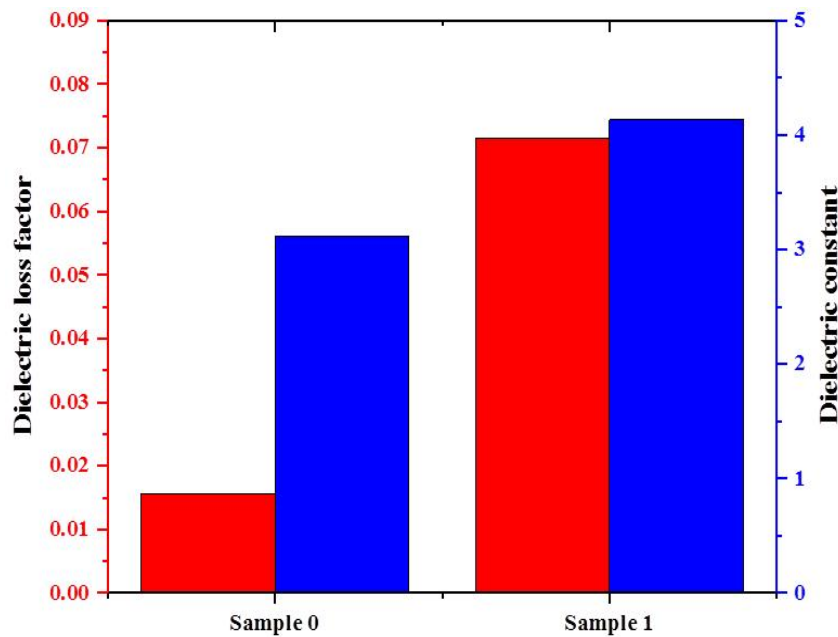
جدول ۲- مقادیر ضریب تلفات عایقی، ظرفیت خازنی و عدد دی الکتریک

کد نمونه	ضخامت (میلی متر)	ولتاژ اعمالی (ولت)	فرکانس (هرتز)	ضریب تلفات عایقی	ظرفیت خازنی (پیکوفاراد)	عدد دی الکتریک
۰	۱/۶۱	۱۰۰	۵۰	$1/565 \times 10^{-2}$	۳۴/۳۳	۳/۱۱۷۳
۱	۱/۴۸	۱۰۰	۵۰	$7/158 \times 10^{-2}$	۴۹/۵۳	۴/۱۳۴۳

### ۳-۲-۲- استحكام دی الکتریک

استحكام دی الکتریک یک پوشش عایق، یکی از مهم ترین خواص الکتریکی آنها محسوب می شود. تعریف عمومی آن عبارت است از، حداکثر ولتاژی که یک قطعه عایق به ازای یک میلی متر ضخامت، می تواند بدون شکست تحمل کند. با اعمال تنش الکتریکی بالاتر از استحكام دی الکتریکی، خاصیت عایقی قطعه به شدت افت می کند. شکست الکتریکی عایق، موجب ایجاد جریان الکتریکی در عایق و خطرات ناشی از آن می شود. در این پژوهش از استاندارد IEC60243 برای اندازه گیری استحكام دی الکتریک استفاده شد. برای جلوگیری از ورم کردن قطعه و ایجاد جرقه روی سطح، نمونه ها حین انجام آزمون، درون روغن سیلیکون قرار می گیرند.

با کامپوزیت آن مقایسه می شود، مقدار بار انباشته شده به علت پلاریزاسیون فصل مشترکی، در فصل مشترک زمینه- پرکننده، افزایش می یابد [۲۴]، بنابراین، ثابت دی الکتریک پوشش کامپوزیتی از زمینه خالص بیشتر خواهد شد. تغییرات ضریب دی الکتریک و ثابت دی الکتریک در یک راستا هستند [۲۱]، بنابراین با افزایش ثابت دی الکتریک، ضریب دی الکتریک ماده کامپوزیتی نیز افزایش یافته است. در نمونه های این گزارش، برای نمونه صفر و یک به ترتیب مقدار ثابت دی الکتریک ۳/۱۱ و ۴/۱۳ است که در محدوده استاندارد است. مقادیر اتلاف دی الکتریک نیز به ترتیب ۰/۱۵۶ و ۰/۷۵ است که نشان می دهد مقدار اتلاف دی الکتریک نمونه یک از حد استاندارد فراتر رفته است.



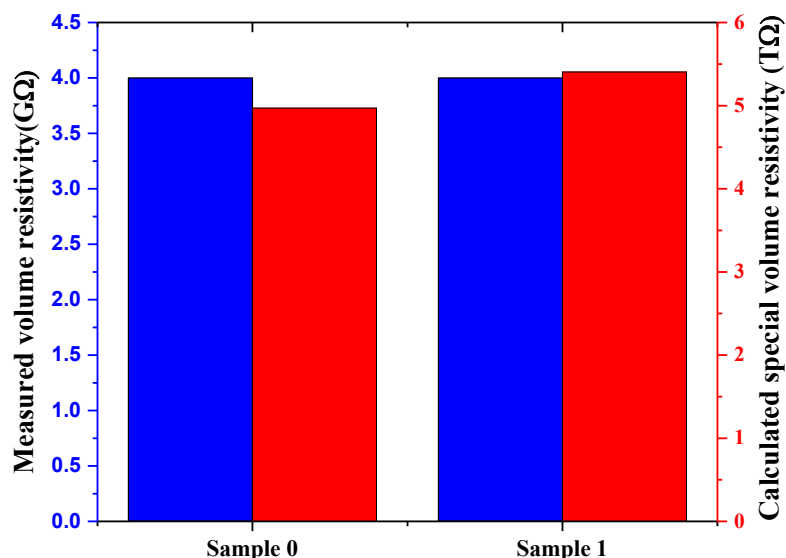
شکل ۳- مقایسه ثابت و اتلاف دی الکتریک در نمونه پخت شونده در دمای محیط خالص و نمونه RTV+ATH (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۳- نتایج آزمون مقاومت حجمی

کد نمونه	ضخامت (میلی متر)	ولتاژ اعمالی (ولت)	مقاومت حجمی اندازه گیری شده (گیگا اهم)	مقاومت ویژه حجمی محاسبه شده (ترا اهم بر متر)
۰	۱/۶۱	۱۰۰۰	>۴	>۴/۹۷
۱	۱/۴۸	۱۰۰۰	>۴	>۵/۴۰۵

از هر یک از نمونه‌های (۰) و (۱)، پنج قطعه آزمون شد و متوسط استحکام الکتریکی هر قطعه برحسب کیلوولت بر میلی متر گزارش شده است. برای نمونه (۰) با ضخامت یک میلی متر، ولتاژهای شکست ۲۰/۱، ۲۰/۵، ۲۰/۲ و ۲۰/۴ حاصل شد و برای نمونه (۱) با ضخامت یک میلی متر، این ولتاژها برابر با ۲۳/۹، ۲۴، ۲۴/۱، ۲۴/۲ و ۲۴/۱۴ کیلوولت به دست آمدند. با توجه به نتایج حاصل، استحکام دی الکتریک نمونه (۰)، ۲۰/۳ کیلوولت بر میلی متر و برای نمونه (۱)، ۲۴/۱ کیلوولت بر میلی متر به دست آمد، که نشان دهنده افزایش استحکام دی الکتریک در اثر افزودن آلومینیوم تری هیدرات ۳۰ درصد است. مقدار مورد پذیرش استحکام دی الکتریک برای نمونه استاندارد بالاتر از ۲۰ کیلوولت بر میلی متر است، پس نمونه‌ها در محدوده مورد پذیرش استاندارد قرار دارند.

۳-۲-۳- نتایج آزمون اندازه گیری مقاومت ویژه حجمی  
مقاومت حجمی، یکی از مشخصه‌های مهم در کنترل کیفیت پوشش‌های پخت شونده در دمای محیط است. افزودن مقدار بهینه از نانوذرات آلومینیوم تری هیدرات باید سبب افزایش مقاومت حجمی نمونه‌ها شود. نتایج مقاومت حجمی در جدول (۳) و شکل (۴)، ارائه شده‌اند. در مورد نمونه‌های تهیه شده در این تحقیق، مقاومت حجمی نمونه (۱) از نمونه (۰) بیشتر است. دلیل این موضوع که نمونه حاوی آلومینیوم تری هیدرات نسبت به نمونه بدون آن مقاومت حجمی بیشتری دارند به تعداد بیشتر گروه‌های سیلانول، انرژ پیوند، الکترونگاتیویته اتم‌های منفرد در پیوند Si-O-Si و اندرکنش مولکولی بهبود یافته بین ذرات آلومینیوم تری هیدرات و زمینه پخت شونده در دمای محیط برمی گردد.



شکل ۴- مقایسه مقاومت حجمی نمونه‌ها (Measured: اندازه‌گیری شده توسط دستگاه و Calculated: محاسبه شده) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۴- نتایج آزمون اندازه‌گیری مقاومت سطحی

کد نمونه	ضخامت (میلی متر)	ولتاژ اعمالی (ولت)	مقاومت سطحی اندازه‌گیری شده (گیگا اهم)	مقاومت ویژه سطحی محاسبه شده (ترا اهم)
۰	۱/۶۱	۵۰۰	۱۰۵/۱	۱۶/۷۱
۱	۱/۴۸	۵۰۰	۹۸/۵	۱۵/۶۶

به‌علاوه با کاهش اندازه ذرات، نسبت سطح به حجم و اندرکنش مولکولی بین ماتریس پلیمری و ذرات پرکننده، افزایش می‌یابد. در نهایت این موارد، تحرک زنجیره‌ها را کاهش می‌دهد و پیوند عرضی مولکول‌ها را محدود می‌کند و بنابراین مقاومت حجمی کامپوزیت را افزایش می‌دهد [۲۵].

سیستم‌های پلیمری، تمایلی در جهت مهاجرت ماده با وزن مولکولی کم، به سطح وجود دارد. وجود مواد با وزن مولکولی کم در سطح، باعث گیر کردن ذرات پرکننده و آلودگی‌ها در سطح خواهد شد. ذرات پرکننده و آلودگی‌ها توانایی بالایی در جذب آب دارند و بنابراین یک لایه ضخیم آب روی سطح تشکیل می‌دهند. تشکیل این لایه سبب کاهش مقدار مقاومت سطحی در حضور آلومینیوم تری هیدرات می‌شود [۲۱].

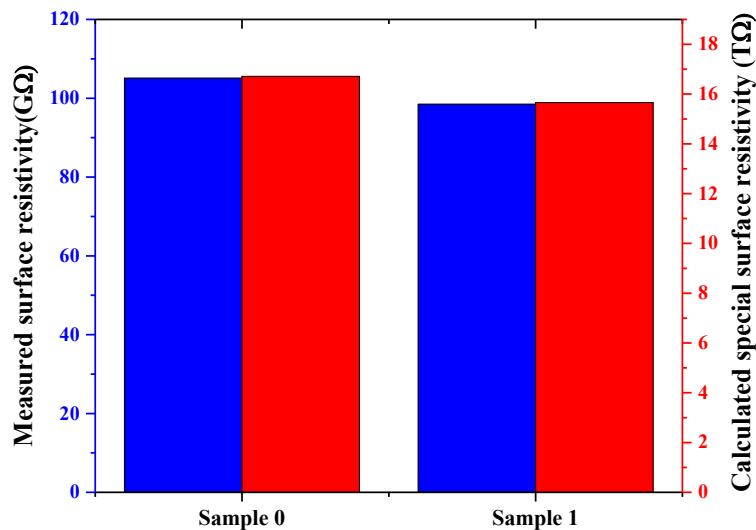
نتایج حاصل از این آزمون در جدول (۴) و شکل (۵) ارائه شده‌اند. درباره نمونه‌های این تحقیق، مقاومت سطحی نمونه (۰) از (۱) بیشتر است. ترکیبات آلومینیوم تری هیدرات و پخت شونده در دمای محیط دارای زنجیره‌های پلیمری با وزن کم و همچنین مقداری پلاستیسایزر (نرم کننده) هستند. در این

### ۳-۲-۴- نتایج آزمون اندازه‌گیری مقاومت ویژه سطحی

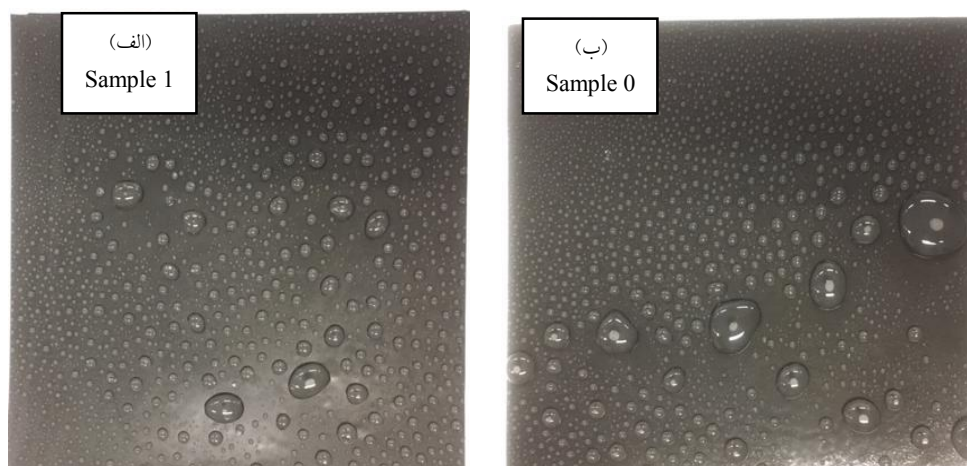
۳-۳- تعیین کلاس آب‌گریزی پوشش با روش پاشش آب‌گریزی، از مهم‌ترین ویژگی‌های بیان کننده عملکرد مناسب پوشش‌های پخت شونده در دمای محیط، است. کلاس آب‌گریزی مورد پذیرش استاندارد باید حداقل HC2 باشد.

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۹، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹





شکل ۵- مقایسه مقاومت سطحی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای نمونه‌های کامپوزیتی و پخت شونده در دمای محیط خالص (Measured: اندازه‌گیری شده توسط دستگاه و Calculated: محاسبه شده) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

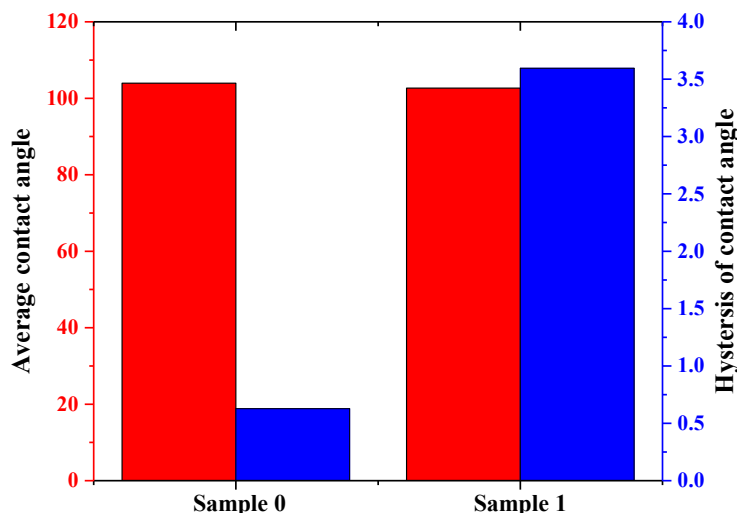


شکل ۶- نتایج آزمون آب‌گریزی برای نمونه‌های خالص و کامپوزیتی

#### ۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از روش اختلاط فیزیکی، کامپوزیت RTV-ATH ساخته شده و خواص الکتریکی و آب‌گریزی آن با پخت شونده در دمای محیط خالص مقایسه شد. نتایج نشان داد که وقتی زمینه خالص سیلیکون رابر با آلومینیوم تری هیدرات ترکیب می‌شود، مقدار بار انباشته شده به‌علت پلاریزاسیون فصل مشترکی در فصل مشترک RTV-ATH، افزایش می‌یابد بنابراین، ثابت و اتلاف دی‌الکتریک کامپوزیت از پخت شونده در دمای محیط خالص به ترتیب به میزان ۱ و ۰/۰۶ واحد بیشتر شد.

بر اساس شکل (۶) مقایسه نتایج آن با معیارهای موجود، کلاس آب‌گریزی نمونه‌های (۰) و (۱)، معادل HC2 تعیین شد (آب‌گریزی بالا و مطلوب از نظر استاندارد). البته با اندازه‌گیری زاویه تماس و هیستریزس زاویه تماس، مشخص شد که تغییر چندانی در زاویه تماس نمونه (۰) نسبت به نمونه (۱) به‌وجود نیامده است و طبیعت آب‌دوست آلومینیوم تری هیدرات، سبب افزایش هیستریزس زاویه تماس (اختلاف بین زاویه تماس پیش‌رونده و پس‌رونده) شده است [۲۶]. نتایج حاصل از آزمون اندازه‌گیری زاویه تماس در شکل (۷) گزارش شده است.



شکل ۷- نتایج آزمون اندازه گیری زاویه تماس برای نمونه های خالص و کامپوزیتی

ایجاد می کنند که شکل گیری این لایه سبب کاهش مقدار مقاومت سطحی می شود. در نهایت، کلاس آب گریزی و میانگین زاویه تماس در اثر کامپوزیت کردن با آلومینیوم تری هیدرات تغییر محسوسی نشان نداد و هر دو نمونه در کلاس آب گریزی HC2 قرار گرفتند.

### تشکر و سپاسگزاری

از همکاری آزمایشگاه های فشار قوی، سیم و کابل و سرامیک و پلیمر پژوهشگاه نیرو که در انجام آزمایشات این پروژه تحقیقاتی همکاری کردند تشکر و قدردانی به عمل می آید. همچنین از همکاری آقای دکتر علی مهدی خانی، آقای مهندس سیامک ابیضی، آقای مهندس عباس فیضی نیا، آقای مهندس یاسر قربانی و آقای مهندس مجتبی ملکی الموتی تشکر و قدردانی می شود.

از طرف دیگر، وجود آلومینیوم تری هیدرات مقاومت به شکست الکتریکی در پخت شونده در دمای محیط را زیاد می کند، بنابراین، استحکام دی الکتریک کامپوزیت از پخت شونده در دمای محیط خالص چهار کیلوولت بر میلی متر بیشتر شد. کامپوزیت شدن همچنین سبب افزایش مقاومت ویژه حجمی شد که علت آن تعداد بیشتر گروه های سیلانول، انرژ پیوند، الکترون گاتیویته اتم های منفرد در پیوند Si-O-Si و اندرکنش مولکولی بهبود یافته بین ذرات آلومینیوم تری هیدرات و زمینه پخت شونده در دمای محیط بود. بنابراین مقاومت ویژه حجمی کامپوزیت و نمونه خالص به ترتیب ۵/۴۱۵ ترا اهم و ۴/۹۷ ترا اهم به دست آمد. اما مقاومت ویژه سطحی نمونه کامپوزیتی (۱۵/۶۶ ترا اهم) نسبت به نمونه خالص (۱۶/۷۱ ترا اهم) کمتر بود که دلیل آن وجود مواد با وزن مولکولی کم در سطح کامپوزیت است که سبب گیر کردن ذرات پرکننده و آلودگی ها در سطح می شود. ذرات پرکننده و آلودگی ها با توانایی بالایی که در جذب آب دارند، یک لایه ضخیم آب روی سطح

### واژه نامه

1. ethylene propylene diene monomer (EPDM)
2. ethylene propylene rubber (EPR)
3. ethylene-vinyl acetate (EVA)
4. poly aniline (PANI)
5. room temperature vulcanized silicone rubber (RTV)
6. high temperature vulcanized silicone rubber (HTV)
7. aluminum three hydrate (ATH)
8. X-ray diffraction (XRD)
9. Scanning electron microscope (SEM)

## مراجع

- Looms, J., *Insulators for High Voltages*: IET, 1988.
- Ribeiro, A. C., José, G. M. F., Luiz, A. F. S., and Bluma, G. S., "Superhydrophobic Nanostructured Coatings for Electrical Insulators", *Polymer Composites*, Vol. 41, No. 7, pp. 2557-2567, 2020.
- Isa, M., Othman, M., Abdullah A. Z., Piah, M. A. M., Abd Rahman, N., and Mazlee, M. N., "Characteristics of RTV Coating on Ceramic Insulator", In *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS) IEEE*, pp. 114-117, 2019.
- Schrittesser, B., Pinter, G., and Major, Z., "Temperature Dependence of Fracture Behavior of Rubbers for Rapid Gas Decompression", *European Conference on Fracture*, 2019.
- Kikuchi, T., Nishimura, S., Nagao, M., Izumi, K., Kubota, Y., and Sakata, M., "Survey on the Use of Non-Ceramic Composite Insulators", *IEEE Transactions on Dielectrics Electrical Insulation*, Vol. 6, No. 5, pp. 556-548, 1999.
- Gubanski, S., and Wankowicz, J., "Distribution of Natural Pollution Surface Layers on Silicone Rubber Insulators and Their UV Absorption", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 24, No. 4, pp. 689-697, 1989.
- Gubanski, S. M., and Vlastós, A. E., "Wettability of Naturally Aged Silicon and EPDM Composite Insulators", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, pp. 1527-1535, 1990.
- Moreno, M., "Microscopic Characterization of Impurities in Insulators Through EPR", *Journal of Physics Chemistry of Solids*, Vol. 51, No. 7, pp. 835-859, 1990.
- Yamamoto, H., Fujimoto, M., Zhu, Y., Kenichi, H., Takuma, M., Masahisa, O., Chikahisa, H., Osamu, T., and Akinori, O., "Lifetime Evaluation of EVA Insulator for Distribution System by Accelerated Salt-Fog Test", *CEIDP'05. 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2005.
- Gao, H., Jia, Z., Guan, Z., Wang, L., and Zhu, K., "Investigation on Field-Aged RTV-Coated Insulators Used in Heavily Contaminated Areas", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 2, pp. 1117-1124, 2007.
- Momen, G., and Farzaneh, M., "Survey of Micro/Nano Filler Use to Improve Silicone Rubber for Outdoor Insulators", *Reviews on Advanced Materials Science*, Vol. 27, No. 1, pp. 1-13, 2011.
- Gu, H., Guo, J., Zhang, X., Qingliang, H., Yudong, H., Colorado, A., and Haldolaarachchige, N., "Giant Magnetoresistive Phosphoric Acid Doped Polyaniline-Silica Nanocomposites", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 117, No. 12, pp. 6426-6436, 2013.
- Larsson, L. -E., "Sandwich Panels with Foamed Polyurethane Insulation, Thermal Performance Exterior Envelopes of Buildings", ASHRAE SP 28, 638-650, 1979.
- Leow, M., and Pho, R., "RTV Silicone Elastomers in Hand Prosthetics: Properties, Applications and Techniques", *Prosthetics Orthotics International*, Vol. 23, No. 2, pp. 169-173, 1999.
- Papailiou, K. O., and Schmuck, F., *Silicone Composite Insulators: Materials, Design, Applications*, Springer Science & Business Media, 2012.
- Arora, N., "Performance of RTV Insulator Coatings Based on Filler Type", In *2019 International Conference on High Voltage Engineering and Technology (ICHVET) IEEE*, pp. 1-3, 2019.
- Fuad, K., Barua, B., Saha, M. C., Robison, T., and Wells, S., "Investigation of Mechanical Properties of Nanoclay Incorporated Room Temperature Vulcanized (RTV) Silicone Foams", *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2013.
- Kandola, B., and Horrocks, A., "Flame Retardant Composites, a Review: the Potential Use of Intumescent", *Special Publication-Royal Society Of Chemistry*, Vol. 224, pp. 395-420, 1998.
- Vibhakar, Ch. K., Rafiq, M., Binita D., Mihir, V., and Vasudev, N., "Investigation on Room Temperature Vulcanized Silicon Insulation With and Without ATH Filler Loading by Incline Plane Tracking & Erosion Test Method", In *2019 International Conference on High Voltage Engineering and Technology (ICHVET) IEEE*, pp. 1-5, 2019.
- Mavrikakis, N., Siderakis, K., Mikropoulos, P., "Laboratory Investigation on Hydrophobicity and Tracking Performance of Field Aged Composite Insulators", *2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2014.
- Pradeep, M., Vasudev, N., Reddy, P., and Khastgir, D., "Effect of ATH Content on Electrical and Aging Properties of EVA and Silicone Rubber Blends for High Voltage Insulator Compound", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 104, No. 6, pp. 3505-3516, 2007.
- Tchoudakov, R., Breuer, O., Narkis, M., and Siegmann, A., "Science. Conductive Polymer Blends with Low Carbon Black Loading: Polypropylene/Polyamide", *Polymer Engineering*, Vol. 36, No. 10, pp. 1336-1346, 1996.
- Taipalus, R., Harmia, T., Zhang, M., and Friedrich, K., "The Electrical Conductivity of Carbon-Fibre-Reinforced Polypropylene/Polyaniline Complex-Blends: Experimental Characterisation and Modelling", *Composites Science Technology*, Vol. 61, No. 1, pp. 801-814, 2001.
- Dang, Z. -M., Zhang, Y. -H., and Tjong, S. -C., "Dependence of Dielectric Behavior on the Physical

- Property of Fillers in the Polymer-Matrix Composites”, *Synthetic Metals*, Vol. 146, No. 1, pp. 79-84, 2004.
25. Khan, H., Amin, M., Ahmad, A., and Yasin, M., “Plastics. Investigation of Electrical, Tracking/Erosion, and Water Absorption Resistance Properties of ATH-SiO<sub>2</sub>-Reinforced RTV-SiR Composites for High-Voltage Insulations”, *Journal of Elastomers*, Vol. 50, No. 6, pp. 501-519, 2018.
26. Zhu, Y., Otsubo, M., Honda, C., and Ohno, A., Suppression Effect of ATH Filler on the Erosion of Filled Silicone Rubber Exposed to Dry Band Arc Discharge, *Polymer Testing*, Vol. 24, No. 7, pp. 893-899, 2005.