



فصلنامه علمی
سال دهم، شماره ۲، شماره پیاپی ۳۸، تابستان ۱۴۰۴
Vol. 10, No. 2 Issue No. 38
Summer 2025, Quarterly
صفحه ۵۷-۷۸

Iran Polymer Technology;
Research and Development

واژه‌های کلیدی:

سیلیکون-لاستیک،
پوشش‌های آب‌گریز و
خودتمیزشونده،
میکرو و نانوذرات،
اصلاحات سطحی،
مقره‌های الکتریکی

ارتقای عملکرد پوشش‌های سیلیکونی برای مقابله با اثرات آلودگی هوا در کارایی مقره‌های الکتریکی

سحر عبدالهی باغبان^{۱*}، نرگس ربانی خواه^۲

۱. تهران، پژوهشگاه رنگ، گروه محیط زیست و رنگ

۲. تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ

چکیده ...

این مقاله مروری به بررسی روش‌های بهبود عملکرد پوشش‌های سیلیکونی برای مقره‌های الکتریکی در شرایط محیطی سخت و آلوده می‌پردازد. در راستای بهبود خواص پوشش‌های سیلیکونی، پرکننده‌های میکرومتری، نانومتری و مخلوط میکرو/نانوذرات (اکسیدهای معدنی: سیلیکا، نانورس، CaCO_3 ، ZnO ، TiO_2 ، Ta_2O_5 ، Co_3O_4 ، SnO_2 آلومینیوم نیتريد (AIN)، نیتريد بور، باریم تیتانات، آلومینیوم تری‌هیدروکسید (ATH) و پرکننده‌های آلی: نانولوله‌های کربنی (CNT) چندجداره، مونت‌موریلونیت، اکسیدگرافن) استفاده شده‌اند. نتایج نمایانگر افزایش دوام و کارایی پوشش‌ها از طریق تقویت مکانیکی و شیمیایی بوده‌است به‌طوری‌که اعمال پرکننده‌ها با نسبت‌های بهینه مانند میکرو و نانوذرات سیلیکا و AIN در پوشش، موجب افزایش استحکام مکانیکی و کششی پوشش‌ها، افزایش خاصیت فوق‌آب‌گریزی، کاهش اثرات پیری و تخریب ناشی از تابش UV، فرسایش حرارتی و آلودگی، ارتقای مقاومت دی‌الکتریک و پایداری سطحی در برابر تخلیه الکتریکی، کاهش جریان نشتی و همچنین افزایش مقاومت ردیابی (Tracking) شد. در نتیجه گزارش شد که پوشش‌های سیلیکون-لاستیک-اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر لاستیک حاوی نانوذرات سیلیس اصلاح‌شده، ATH، پایدارکننده‌های UV، روغن سیلیکون، بالاترین آب‌گریزی با زبری سطح بهبودیافته و خواص خودتمیزشوندگی (زاویه‌ی تماس قطره‌ی آب 161° ، زاویه‌ی تماس پیش‌رونده 172° و زاویه‌ی تماس پس‌رونده 169°) را از خود ارائه کرد. در نتیجه این پوشش‌ها قابلیت اعمال روی مقره‌های ولتاژ بالا با کارایی بالا (مقاومت حجمی $10^{17} \times 1/5$ (Ω.cm)، مقاومت سطحی $10^{12} \times 1/5$ (Ω.cm)، مقاومت ردیابی ۵۰۰ دقیقه در ۵ kV، ولتاژ شکست بالا ۱۴۵ kV، ثابت دی‌الکتریک ۴/۴، مقاومت در برابر آتش بالا تا 340°C و خدمات طولانی در دمای بالا) بدون نیاز به شستشوی مداوم را دارند.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

abdollahi-s@icrc.ac.ir

۱ مقدمه

مقره‌های الکتریکی فشار قوی در خطوط انتقال نیرو نقش حیاتی در حفظ پایداری و کارایی سامانه‌های برق‌رسانی دارند. با این حال، این مقره‌ها در محیط‌هایی با آلودگی هوا و رطوبت بالا، دچار کاهش عملکرد و بروز مشکلاتی مانند تخلیه الکتریکی، تخریب سطحی و فرسایش می‌شوند. این مشکلات می‌توانند منجر به قطعی برق و خسارات مالی و فنی قابل توجهی شوند [۱-۴]. از جمله راهکارهای مؤثر برای مقابله با این چالش‌ها، استفاده از پوشش‌های پلیمری است که با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص خود، به بهبود عایق‌کاری و دوام مقره‌ها کمک می‌کنند [۵-۸].

این پوشش‌ها باید مقاومت مکانیکی [۹-۱۱]، مقاومت جوی [۱۲-۱۴] و مقاومت الکتریکی [۱۵-۱۷] مناسبی داشته باشند تا بتوانند در مقابل عوامل جوی و خورنده و جریانات الکتریکی مقابله کنند. علاوه بر این، سطح این پوشش‌ها باید فوق آب‌گریز باشد تا بتواند رفتار خودتمیزشوندگی از خود نشان دهد [۱۹-۱۸]. پوشش‌های پلیمری مانند سیلیکون-لاستیک [۱۰، ۱۱، ۲۱-۲۰]، اتیلن-پروپیلن-دی‌ان مونومر لاستیک (Ethylene) (EPDM) [۲۲-۲۴]، پلی‌یورتان [۲۵-۲۸]، پوشش‌های فومی پلی‌یورتانی [۲۹-۳۲]، رزین‌های اپوکسی [۳۳-۳۵] و سایر پلیمرها به منظور ایجاد خاصیت آب‌گریزی و خودتمیزشوندگی روی مقره‌ها اعمال می‌شوند. بررسی‌ها نشان داده‌اند که سیلیکون-لاستیک، به دلیل خواصی همچون نارسانایی [۳۶]، آب‌گریزی ذاتی [۳۷]، مقاومت جوی و شیمیایی بالا [۳۸]، یکی از بهترین گزینه‌ها برای این منظور است. این ماده همچنین در برابر نور فرابنفش، شعله و شرایط خوردگی پایدار است [۳۹-۴۰]. با این حال، مقاومت مکانیکی پایین سیلیکون-لاستیک نیازمند اصلاح و تقویت است [۴۱-۴۰]. برای بهبود ویژگی‌های این پوشش‌ها، روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله این روش‌ها می‌توان به اختلاط با دیگر پلیمرها [۴۲-۴۵]، اصلاح سطحی [۴۶-۴۹] و افزودن پرکننده‌ها [۵۰-۵۳] اشاره کرد. اصلاحات سطحی برای ایجاد ساختارهای میکرومتری و نانومتری مشابه برگ نیلوفر آبی به کار گرفته می‌شود تا خواص فوق‌آب‌گریزی پوشش‌ها بهبود یابد [۵۴-۵۷]. یکی دیگر از روش‌های ایجاد سطوح آب‌گریز، استفاده از فرایند خودلایه‌ای‌شونده است [۵۸-۶۰]. در این فرایند، اجزای سازنده پوشش طی تشکیل فیلم، خود به لایه‌های مجزا تقسیم می‌شوند. به عنوان نمونه، پوشش‌های تابش‌پز آب‌گریز مختلفی با درجات گوناگون از مخلوط ژلاتین متاکریله شده و روغن سویای اپوکسیده‌ای اکریله شده طی واکنش پلیمری شدن رادیکال

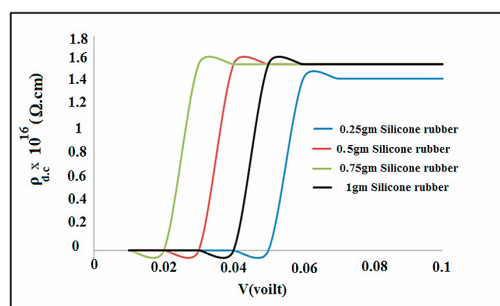
آزاد در حین تابش نور مرئی به دست آمده‌اند. این روش به دلیل کارایی بالا در بهبود خاصیت آب‌گریزی و ایجاد ساختارهای مطلوب مورد توجه قرار گرفته است [۶۱-۶۳].

مطالعات نشان داده‌اند که روش پلاسما تنها در حضور گازهای واکنش‌دهنده حاوی ترکیبات خاص قادر به ایجاد خاصیت فوق‌آب‌گریزی است. شواهد پژوهشی بیانگر آن است که این روش با استفاده از گازهای مناسب می‌تواند ویژگی‌های سطحی را بهبود بخشد و خاصیت آب‌گریزی مطلوبی ایجاد کند. همچنین، استفاده از ترکیبات خاص در این فرایند تأثیر چشمگیری در تقویت کیفیت سطوح و افزایش دوام آب‌گریزی نشان داده است [۲۵، ۴۸، ۶۴].

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، علاوه بر اصلاحات سطحی، ترکیب سیلیکون با دیگر پلیمرها و افزودنی‌ها رویکرد مؤثری برای بهبود خواص فوق‌آب‌گریزی و افزایش دوام پوشش‌ها به شمار می‌رود. برای مثال، سامانه‌های پوشش هیبریدی سیلیکون-EPDM در صورت اعمال مناسب می‌توانند عملکرد مطلوبی ارائه دهند. همچنین، کوپلیمرهای سیلیکون-EPR و سیلیکون-EPDM به دلیل کارایی بالا، به‌طور گسترده برای پوشش‌دهی سطح مقره‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۲، ۲۳]. همچنین به منظور بهبود خاصیت آب‌گریزی از پرکننده‌های غیرآلی و یا هیبریدهای آلی-معدنی NiO [۶۵]، نانوذرات سیلیکا فیوم (Fumed Silica)، سیلیکا ائروژل (Aerogel Silica) [۶۶-۶۸] و SnO_2 [۶۹]، زینک اکسید (Zinc Oxid) [۷۰]، کربن سیاه کوارتز (Quartz)، اکسیدگرافن [۷۱]، تیتانیوم‌دی‌اکسید (Titanium Dioxide)، رس (Clay)، آلومینا تری‌هیدرات (Alumina Trihydrate (ATH))، بهترین نوع پرکننده‌ی معدنی [۷۲-۷۴] و غیره) استفاده می‌شود. بهترین نوع پرکننده‌ی معدنی برای این نوع از پوشش‌ها، SiO_2 است؛ چراکه ساختار شیمیایی آن مشابه ساختار زنجیره‌ی اصلی Si-O-Si در PDMS است [۷۴-۷۵]. راهکارهای اصلاح پوشش‌های سیلیکون-لاستیک به منظور افزایش ویژگی‌هایی نظیر آب‌گریزی، خودتمیزشوندگی، مقاومت الکتریکی و مکانیکی می‌تواند گامی مؤثر در بهبود عملکرد مقره‌های الکتریکی در شرایط سخت محیطی باشند. در این مقاله، به بررسی تغییراتی که بر روی سیلیکون-لاستیک اعمال شده است، پرداخته می‌شود. این اصلاحات در چند محور اصلی بیان خواهند شد. بررسی این مسیرها، دیدگاهی جامع از تأثیر این اصلاحات در مقابله با چالش‌های ناشی از آلودگی و رطوبت ارائه می‌دهد.

۲ بهبود عملکرد از طریق اختلاط با رزین‌های دیگر

با هدف کاهش قیمت نهایی و ارتقای مقاومت مکانیکی پوشش



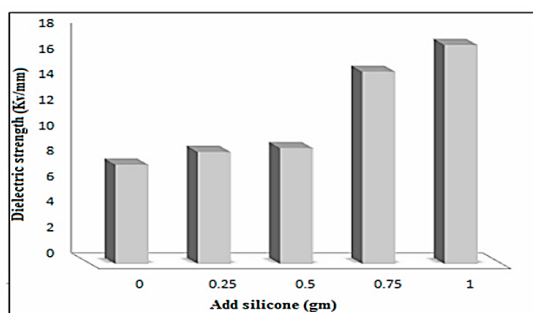
شکل ۱ منحنی‌های مقاومت الکتریکی ترکیب‌های سیلیکون-لاستیک / اپوکسی [۷۸].

با افزایش میزان سیلیکون-لاستیک از ۰٪ تا ۱٪، هدایت حرارتی از ۰/۱۸ تا ۰/۰۴ (W/m.K) کاهش پیدا کرد و ترکیبات به عایق‌های حرارتی بهتری تبدیل شدند.

از نظر خواص الکتریکی، افزودن سیلیکون-لاستیک تا ۰/۷۵ گرم مطابق شکل ۱ باعث افزایش مقاومت الکتریکی شد، اما مقادیر بیشتر باعث کاهش مقاومت به دلیل کاهش تعامل بین فازهای مختلف شد. به علاوه ثابت دی‌الکتریک نیز برای همه ترکیبات بهبود یافت و نمونه حاوی ۰/۷۵ گرم سیلیکون-لاستیک کمترین مقدار ثابت دی‌الکتریک را نشان داد. این ترکیب همچنین مقاومت شکست دی‌الکتریک بالاتری داشت که توانایی آن را در تحمل ولتاژهای بالا افزایش داد.

در شکل ۲، تغییرات مقاومت شکست دی‌الکتریک با توجه به درصد وزنی سیلیکون-لاستیک نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش نسبت سیلیکون-لاستیک باعث افزایش مقاومت شکست دی‌الکتریک شده، زیرا حضور پیوندهای Si-O-Si مانع تشکیل مسیرهای کربنی پیوسته و کاهش نشت جریان می‌شود.

چاکرابورتی (Chakraborty) و همکارانش [۷۹] در سال ۲۰۱۷ به بررسی عملکرد پوشش‌های اعمال‌شده روی سطح مفره‌های سیلیکون-لاستیک تحت تنش‌های حرارتی و الکتریکی



شکل ۲ نمودار مقاومت دی‌الکتریک با افزایش درصد سیلیکون [۷۸].

سیلیکونی (PDMS)، گوش (Ghosh) و همکارانش [۷۶] در سال ۲۰۱۵ روی نسبت بهینه‌ی وزنی سیلیکون-لاستیک به کوپلیمر اتیلن‌وینیل استات (EVA) (Ethylene Vinyl Acetate Copolymer) مطالعاتی انجام دادند و بر اساس نتایج آزمون‌های شتاب‌یافته‌ی ماندگاری (در معرض‌گیری آب جوش، تحمل دمای بالاتر از دمای ۱۵۰ °C و آزمون تابش نور فرابنفش)، نسبت وزنی بهینه‌ی رزین سیلیکون به EVA را معادل ۶۰ به ۴۰ به‌دست آوردند. برای تولید این نمونه‌ها EVA ذوب شد و سپس رزین سیلیکونی به آن افزوده و در دمای ۶۰ °C مخلوط شد. پرابو (Prabu) و همکارانش [۲۳] در سال ۲۰۰۷ برای ارتقای خواص مکانیکی پوشش سیلیکون-لاستیک از EPDM استفاده کردند و نسبت بهینه‌ی سیلیکون-لاستیک و EPDM را از نظر خواص الکتریکی و مکانیکی مناسب، معادل ۵۰-۵۰ درصد وزنی به‌دست آوردند. در ادامه برای بهبود خواص دیگر از نانو و میکرو ذرات بهره گرفتند.

سیاکور (Syakur) و همکارانش [۷۷] در سال ۲۰۱۷ از رزین اپوکسی (دی‌گلیسیدیل اتر بیسفنول آ (Diglycidyl Ether Bisphenol A) (DGEBA) و متافنیل دی‌آمین (MPDA) (Metaphenylene Diamine) به‌عنوان عامل پخت و نانوسیلیکا برای ارتقا خواص پوشش سیلیکون-لاستیک به‌منظور پوشش سطح مفره‌ها استفاده کردند. آن‌ها مشاهده کردند که زاویه‌ی تماس پوشش حاصل از اختلاط رزین سیلیکون-لاستیک با اپوکسی کمتر از ۹۰ ° بوده و سطح آب‌دوستی را ایجاد کرده است (زاویه تماس آب با پوشش اپوکسی: ۷۴ ° و با پوشش سیلیکون-لاستیک خالص: ۱۱۰ °). آن‌ها نتیجه گرفتند که با اعمال نانوسیلیکا به این پوشش مخلوط، زاویه‌ی تماس به بیش از ۹۴ ° رسید.

مهدی و همکارانش [۷۸] در سال ۲۰۱۷ تأثیر افزودن رزین اپوکسی به پوشش سیلیکون-لاستیک را برای بهبود مقاومت الکتریکی و حرارتی پوشش سطح مفره‌ها و خازن‌های ولتاژ بالا، بررسی کردند. نمونه‌ها با مقادیر ثابت ۴ گرم اپوکسی و مقادیر مختلف سیلیکون-لاستیک (۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ گرم) تهیه و دمای انتقال شیشه‌ای (T_g)، هدایت حرارتی، مقاومت الکتریکی و ثابت دی‌الکتریک آن‌ها بررسی شدند. مطالعات نشان دادند با افزایش میزان سیلیکون-لاستیک تا ۰/۷۵ گرم، T_g به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت و به ۶۸ °C رسید. این افزایش به‌دلیل تعامل مناسب بین زنجیره‌های پلیمری اپوکسی و سیلیکون-لاستیک بوده است. اما افزودن ۱ گرم سیلیکون-لاستیک به‌دلیل تعامل ناقص اجزا منجر به کاهش T_g شد. از سوی دیگر، هدایت حرارتی نمونه‌ها نیز بهبود یافت، به‌طوری‌که

منجر به کاهش قابل توجه ولتاژ شکست شد. این اثر به ویژه در شرایط غوطه‌وری طولانی مدت آشکارتر بود و ولتاژ شکست به مرور زمان ۲۴ ساعت غوطه‌وری از ۱۰۰ تا ۷۸ (kV_{rms}) کاهش یافت. این یافته‌ها به‌طور کلی نشان‌دهنده تأثیر مخرب آلودگی و تنش حرارتی بر عملکرد الکتریکی و دوام مقره‌ها است.

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که سطح مقره‌ها پس از غوطه‌وری در آب، خاصیت آب‌گریزی خود را به‌طور کامل از دست داده و به حالت کاملاً آب‌دوست تبدیل شد. در این مرحله، سطح مقره با لایه‌ی پیوسته‌ای از آب پوشیده شده بود که نشان‌دهنده کاهش کامل زاویه تماس و جذب آب در تمام نقاط سطح است. با اعمال دمای ۶۰ °C، روند بازسازی خاصیت آب‌گریزی آغاز شد و سطح مقره‌ها به تدریج خاصیت آب‌گریزی نسبی خود را بازیافتند. این بازسازی به دلیل آن است که دمای بالا با تسریع مهاجرت مولکول‌های کم وزن (LMW) از ساختار داخلی به سطح، نقش کلیدی در بازسازی آب‌گریزی ایفا می‌کند و باعث احیای سریع‌تر خواص سطحی مقره‌ها می‌شود. یافته‌ها نشان داد که دمای بالا عاملی تعیین‌کننده در تسریع این فرایند است و نقش کلیدی در بازگرداندن خواص مطلوب سطحی ایفا می‌کند.

۳ بهبود عملکرد با اعمال میکرو و نانوذرات سیلیکا

لی (Li) و همکارانش [۸۰] در سال ۲۰۱۲ تأثیر اعمال نانوسیلیکای اصلاح‌یافته (Modified Mano-silica) در پوشش سیلیکون-لاستیک بر پایه‌ی PDMS پلی‌دی‌متیل سیلوکسان (Polydimethylsiloxane) اختتام‌یافته به گروه‌های هیدروکسیلی (OH-PDMS) را بررسی کردند. ابتدا سیلیکا ژل (Gelled Silica) حاصل از انحلال پودر تتوس (TEOS) در محلول آبی آمونیوم هیدروکسید (Ammonium Hydroxide Aqueous Solution) را خشک و از فراصوت (Ultrasonic Homogenizer) برای پراکنش نانوذرات در رزین OH-PDMS برای تولید پوشش هیبریدی نانوسیلیکا استفاده شد. در ادامه پوشش هیبریدی روی سطح مقره‌ها اعمال و پخت شد (۵ دقیقه در ۶۰ °C و یک ساعت در ۱۰۰ °C). نتایج نشان داد پوشش حاصل، چسبندگی بسیار مناسبی به سطح مقره و زاویه‌ی تماس آب ۱۶۱° داشت (پوشش فوق آب‌گریز)، درحالی‌که پوشش سیلیکون-لاستیک خالص زاویه‌ی تماسی در حدود ۱۱۰° دارد (پوشش آب‌گریز). رفتار فوق آب‌گریزی پوشش هیبریدی به شکلی بود که جریان آب جاری روی سطح خود را جمع می‌کرد؛ درحالی‌که جریان آب روی سطح پوشش سیلیکون-لاستیک خالص کاملاً پخش می‌شد.

تصاویر SEM پوشش هیبریدی حاصله حاکی از آن هستند

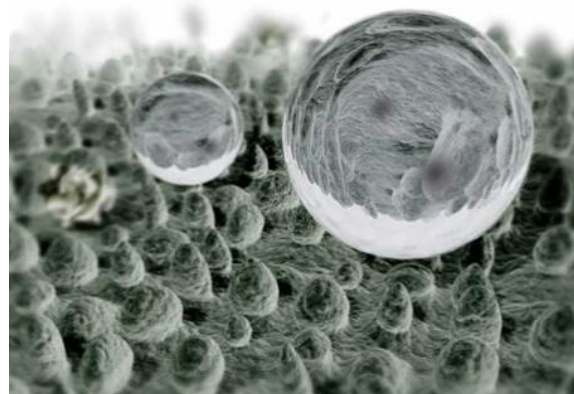
پرداختند و با توسعه روشی نوین برای ایجاد لایه‌ی آلودگی یکنواخت، سعی داشتند تأثیر این عوامل بر تخریب سطح و بازیابی خاصیت آب‌گریزی مقره‌ها را ارزیابی کنند. هدف اصلی آن‌ها بهبود دقت و تکرارپذیری آزمایش‌ها و ارائه‌ی راهکارهایی برای افزایش پایداری بلندمدت این مقره‌ها بود. در این مطالعه، پوشش‌های سیلیکون-لاستیک با استفاده از سیلیکون-لاستیک HTV روی سطح مقره‌ها اعمال شدند و عملکرد آن‌ها تحت شرایط آلودگی و تنش‌های محیطی مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور بررسی عملکرد مقره‌های پوشش‌داده‌شده تحت شرایط آلودگی ابتدا سطح مقره‌ها با استفاده از پروپانول، چربی‌زدایی و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب شیر معمولی (با رسانایی ۲۸۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) غوطه‌ور شدند. این مرحله برای کاهش موقت خاصیت آب‌گریزی سطح طراحی شد، به‌گونه‌ای که سطح مقره‌ها برای دریافت آلودگی یکنواخت آماده شود. در مرحله بعد، لایه‌ای از آلودگی شامل مخلوطی از کلرید سدیم (۱۰ گرم در لیتر برای آلودگی متوسط و ۱۵ گرم در لیتر برای آلودگی شدید) و خاک رس به نسبت‌های وزنی مشخص، به‌دقت روی سطح مقره‌ها اعمال شد. این فرایند با استفاده از روشی نوین انجام شد که امکان ایجاد لایه یکنواخت و بدون نواحی ناهمگون را فراهم می‌کرد. نرخ کاربرد لایه‌ی آلودگی به‌گونه‌ای کنترل شد که آلودگی به‌خوبی به سطح چسبیده و دوام داشته باشد. نمونه‌های آماده‌شده تحت شرایط آزمایشگاهی استاندارد شامل دمای ثابت ۶۰±۲ °C و ولتاژ اعمالی ۲۱ کیلوولت با نرخ ۵۰ هرتز قرار گرفتند. مدت زمان آزمایش ۵۰۰ ساعت تعیین شد و دما با استفاده از تصویرگر حرارتی در طول آزمایش رصد شد. این طراحی دقیق شرایط، امکان بررسی جامع تخریب سطحی، روند بازیابی خاصیت آب‌گریزی، و تأثیر تنش‌های الکتریکی و حرارتی بر عملکرد مقره‌ها را فراهم کرد و شرایطی مشابه محیط‌های واقعی را شبیه‌سازی کرد. نتایج نشان دادند که مقره‌هایی با لایه آلودگی یکنواخت، جریان نشتی و ولتاژ شکست پایداری نسبت به مقره‌های با آلودگی ناهمگون داشتند. همچنین، آزمون ولتاژ تخلیه الکتریکی مرطوب (Flash-over Voltage) نشان داد که مقره‌های با آلودگی یکنواخت در شرایط مرطوب، رفتار پیش‌بینی‌پذیرتری ارائه کردند، درحالی‌که آلودگی ناهمگون باعث نوسانات غیرقابل‌پیش‌بینی در عملکرد الکتریکی شد. این نتایج تأیید کردند که ایجاد لایه آلودگی یکنواخت گامی اساسی برای بهبود دقت و تکرارپذیری آزمایش‌های استاندارد است.

نتایج آزمون ولتاژ تخلیه الکتریکی مرطوب نشان داد که کاهش خاصیت آب‌گریزی و تشکیل فیلم آب پیوسته روی سطح مقره‌ها،

بیشتر از $8\text{A}200$ است. به‌طور کلی در مطالعات مختلف نشان داده شده است که با اعمال نانو SiO_2 زاویه‌ی تماس آب سطح سیلیکون-لاستیک از 117° تا 162° افزایش داشته است. خان (Khan) و همکارانش [۲۲] در سال ۲۰۱۷، تأثیر میکروذرات سیلیکا (۲۰ درصد) و نانوذرات نانوسیلیکا (۵ درصد) روی مقاومت الکتریکی پوشش سیلیکون-لاستیک را بررسی کردند. مشاهده کردند که استحکام الکتریکی تمامی پوشش با افزودن میکرو و نانو ذرات از $19/7$ به‌ترتیب تا $21/1$ و $22/2$ افزایش پیدا کرد و اثر افزایشی نانوذرات بیشتر از میکروذرات بود.

وو (Wu) و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۱۶ از نانوذرات سیلیکا برای بهبود خواص مکانیکی پوشش سیلیکونی استفاده کردند. برای تولید این پوشش‌ها از رزین سیلیکون PDMS (RTV-1)، آنیلینو-متیل‌تری اتوکسی سیلان (Ailino-methyl- (ND42) triethoxysilane) به‌عنوان عامل شبکه‌ای‌کننده، کمپلکس تیتانیوم (D-60) به‌عنوان کاتالیزور و نانوذرات سیلیکای اصلاح‌شده با هگزامتیل-دی سیلازان ((Hexamethyldisilazane (HMDS) و رطوبت هوا برای پخت استفاده شد. برای پراکنش مناسب نانوذرات سیلیکای اصلاح‌شده درون ماتریس پلیمری از مخلوط‌کن دوسیاره‌ای (Double Planetary Mixer) در دمای 80°C و سپس اکسترودر بهره گرفته شد. نتایج حاصل حاکی از بهبود مقاومت مکانیکی (مقاومت کششی، ازدیاد طول در نقطه‌ی شکست، مقاومت برشی (Shear strength) و سختی) با اعمال نانوذرات تا ۳۰ درصد وزنی بود. آن‌ها اظهار کردند مقاومت الکتریکی پوشش با افزایش محتوای نانوذرات از ۰ تا ۳۵ phr افزایش چشمگیری داشت. عامل اصلی بهبود مقاومت مکانیکی و الکتریکی، اصلاح نانوذرات سیلیکا با HMDS که سبب بهبود اتصال میان نانوذرات و پلیمر بوده است، گزارش شد.

همچنین تأثیر اعمال نانو/میکروذرات سیلیکا روی خواص پوشش سیلیکون-لاستیک RTV توسط طریق نظیر (Tariq Na-zir) و فانگ (Phung) [۸۲] در سال ۲۰۱۶ با استفاده از آزمون تخلیه‌ی بار کرونا متناوب (AC Corona Discharge) بررسی شد. چهار نمونه‌ی (۱) پوشش سیلیکون-لاستیک خالص (PR)، (۲) سیلیکون-لاستیک محتوی ۳۰ درصد وزنی میکروسیلیکا (MC)، (۳) سیلیکون-لاستیک محتوی ۲/۵ درصد وزنی نانوسیلیکا و ۲۷/۵ درصد وزنی میکروسیلیکا (NMC) و (۴) سیلیکون-لاستیک حاوی ۵٪ وزنی نانوسیلیکا (NC) برای ارزیابی ساخته شدند. بازگشت‌پذیری آب‌گریزی و زبری نمونه‌ها پس از آزمون تخلیه‌ی بار کرونا بررسی شد. نتایج نشان داد که نمونه‌ی NC که فقط حاوی نانوذرات سیلیکا بود، مقاومت بسیار بالایی در مقابل تخلیه‌ی جزئی بار و کاهش آب‌گریزی از خود نشان داد



شکل ۳ اثر خودتمیزشوندگی برگ نیلوفر آبی و ساختارهای سلسله‌مراتبی برگ نیلوفر آبی [۸۱].

که ریزساختار این پوشش، ریزساختار شبه-تپه‌ی (Hill-like Morphology) پراکنده با فاصله‌ی بین برآمدگی‌های ۳۰-۱۰ میکرومتر است و به عبارتی آن‌ها زبری در مقیاس میکرومتر-نانومتر دارند که مشابه برگ گل نیلوفر آبی، به علت حبس بسته‌های هوایی بین برآمدگی‌های میکرونی و نانومتری، خاصیت آب‌گریزی و دفع آب بسیار بالایی دارند. تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپ الکترونی سطح برگ نیلوفر آبی برآمدگی‌های میکرومتری و نانومتری در سطح را نشان می‌دهند (شکل ۳). ناکامورا (Nakamura) و همکارانش [۶۶] در سال ۲۰۱۳ پس از آزمون‌های بسیار مشخص کردند که ساختار شیمیایی، غلظت، اندازه، توزیع اندازه‌ی ذرات، نحوه‌ی پراکنش و جهت‌گیری ذرات میکروسیلیکا در سامانه‌ی پلی‌سیلوکسان تأثیر مستقیمی روی ارتقای خواص پوشش نهایی دارد.

وانگ و همکارانش [۳۸] در سال ۲۰۱۵ تأثیر اعمال نانوذرات سیلیکای $R10$ و $8\text{A}200$ و میکروسیلیکا روی خواص مکانیکی پوشش سیلیکونی RTV (استحکام کششی (Tensile Strength)، درصد ازدیاد طول در نقطه‌ی شکست (Elongation at Break) و استحکام کششی در ۱۰۰ درصد ازدیاد طول (Tensile Strength at 100% Elongation) و همچنین مقاومت به پارگی) را مطالعه کردند. نتایج نشان دادند که اعمال ذرات سیلیکای میکرونی در پوشش‌های RTV نسبت به نانوذرات سیلیکا تأثیر کمتری در بهبود خواص مکانیکی پوشش داشت؛ اما اعمال نانوسیلیکا $R106$ تا مقدار بهینه (۳۰-۴۰ درصد وزنی) به‌دلیل سطح ویژه‌ی بالای نانوذرات اصلاح‌شده، سبب ارتقای خواص شد و اعمال نانوذرات بیش از مقدار بهینه سبب افت مقاومت کششی شد. اندازه‌ی ذرات $8\text{A}200$ از $R106$ بزرگ‌تر و سطح ویژه‌ی آن کمتر است، ازاین‌رو ارتقای خواص مکانیکی نمونه‌های حاوی $R106$

جدول ۱ نتایج آزمون مقاومت ردیابی نمونه‌های S1، S2 و S3 [۳۷].

نوع مخلوط	زمان مقاومت ردیابی (دقیقه)	بیشینه دمای مقاومت ردیابی (F°)
S1	۱۸۰	۱۳۳
S2	۲۴۰	۱۲۱
S3	۵۰	۱۰۲

مطابق نتایج، پوشش حاوی ۳۰ درصد نانوسیلیکا، زبری سطحی بالاتری داشت. همچنین نتایج آزمون نیم‌رخ‌سنج نوری (Opti-cal Profile Meter) و اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس آب سطح، حاکی از فوق-آب‌گریز شدن سطح پوشش سیلیکونی در حضور ۳۰ درصد نانوسیلیکا و دستیابی به زاویه‌ی تماس ۱۴۷° بود.

لیو (Liu) و همکارانش [۸۳] در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی نوآورانه به معرفی نانوپوششی چندمنظوره برای بهبود عملکرد سطحی سیلیکون-لاستیک روی مفره‌های الکتریکی پرداختند. هدف اصلی این پژوهش، مقابله با مشکلات رایج مانند کاهش آب‌گریزی، تجمع بار سطحی و یخ‌زدگی بود که عملکرد پایدار مفره‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این روش، نانوذرات سیلیکا (SiO₂)، با FAS و KH550 اصلاح شدند تا انرژی سطحی کاهش یافته و پیوند بین نانوذرات و ماتریس سیلیکون-لاستیک تقویت شود. همچنین از KH560 برای اصلاح مولکولی زنجیره‌ی PDMS برای بهبود سازگاری آن با رزین اپوکسی (EP) استفاده شد، به‌طوری‌که KH560 به زنجیره‌ی PDMS متصل شد تا سازگاری آن با رزین اپوکسی افزایش یابد. پس از تهیه EP و PDMS اصلاح‌شده، نانوذرات اصلاح‌شده (F-SiO₂) به این مخلوط اضافه شدند. این محلول با استفاده از دستگاه فراصوت و هم‌زن مغناطیسی به‌صورت یکنواخت آماده شد. نهایتاً پوشش روی سطح افشاند و در دمای ۱۲۰ °C به مدت ۳۰ دقیقه پخت شد.

این پوشش توانست زاویه تماس سطح را به بیش از ۱۶۲° و تغییر غیر قابل بازگشت (Hysteresis) را به نزدیک صفر برساند، که نشان‌دهنده خاصیت ابرآب‌گریزی بسیار عالی آن است. تصاویر SEM این سطوح نشان دادند که ساختار میکرو-نانو سطحی ایجادشده روی سیلیکون-لاستیک سبب کاهش نیروی چسبندگی بین قطرات آب و سطح شده و خاصیت خودتمیزشوندگی را فراهم می‌کند.

لی (Li) و همکارانش [۸۴] در سال ۲۰۱۷، روشی ساده برای ایجاد سطحی فوق‌آب‌گریز بر پایه نانوذرات سیلیکا و کوپلیمر

و پراکنش مناسب این نانوذرات در محیط پلیمری تأیید شد. بر اساس نتایج کم‌ترین میزان کاهش زاویه‌ی تماس آب و کاهش آب‌گریزی پس از آزمون تخلیه‌ی بار کرونا با دوره‌های متفاوت، متعلق به نمونه‌ی NC و بیشترین تأثیرپذیری متعلق به نمونه‌ی PR است. تصاویر نمونه‌های PR، MC، NMC و NC بعد از ۹۶ ساعت در معرض-گذاری در مقابل تخلیه‌ی بار کرونا نشان دادند که هیچ اثری از شکست، حفره، سوراخ و نواحی جدا شده روی سطح NC وجود ندارد؛ به این ترتیب NC و در مراتب بعد MC و NMC بالاترین میزان مقاومت در مقابل با اعمال کرونا از خودش ارائه کردند. این امر نمایانگر عملکرد مناسب نانو و میکروذرات سیلیس روی رفتار پوشش سیلیکون-لاستیک است. به‌طور کلی، غلظت گروه‌های اکسیژن در اثر تخلیه‌ی کرونا روی سطح سیلیکون-لاستیک افزایش پیدا می‌کند و گروه‌های آب‌دوست و قطبی سیلانول روی سطح PDMS ظاهر می‌شوند. گروه‌های آب‌گریز CH₃- متعلق به PDMS در شرایط اکسایش به CH₂- و Si-CH₂OOH و سپس Si-CH₂OH تبدیل می‌شوند. به‌عنوان نتیجه‌گیری می‌توان گفت که نانوذرات سیلیکا سبب ارتقای مقاومت سیلیکون-لاستیک به اعمال کرونا می‌شوند.

خان (Khan) و همکارانش [۳۷] در سال ۲۰۱۷ تأثیر اعمال میکرو و نانوذرات سیلیکا در پوشش سیلیکون-لاستیک دوجزئی RTV (شامل ۷۰ درصد PDMS و ۳۰ درصد EPDM) را بررسی کردند. به این ترتیب سه نوع پوشش S1 (سیلیکون-لاستیک خالص)، S2 (سیلیکون-لاستیک حاوی ۱۵ درصد وزنی میکرو سیلیکا) و S3 (سیلیکون-لاستیک حاوی ۲/۵ درصد وزنی نانوسیلیکا) با استفاده از فرایند فراصوت و آسیاب دوغلتکی (Two Roll Mill) برای ارزیابی ساخته شدند. نتایج آزمون مقاومت ردیابی این پوشش‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

نتایج حاکی از آن است که مقاومت ردیابی نمونه‌ی S2 حدود ۲۴۰ دقیقه بود؛ درحالی‌که نمونه‌ی S1 و S2 به ترتیب تنها ۱۸۰ و ۵۰ دقیقه در مقابل مقاومت ردیابی (۲/۷۵ kV) و مقاومت به فرسایش ولتاژ اولیه‌ی مقاومت ردیابی (۲/۷۵ kV) و مقاومت به فرسایش نمونه‌ی S2 که حاوی مخلوط رزین سیلیکون و میکروذرات سیلیکا بود، نسبت به نمونه‌ی خالص و حتی نسبت به نمونه‌ی حاوی ذرات نانوسیلیکا بیشتر است. از این رو نتیجه گرفته شد که اعمال میکروذرات سیلیکا اثر بیشتری در ارتقای خواص پوشش سطح مفره داشته است.

گو (Guo) و همکارانش در سال ۲۰۱۷ تأثیر اعمال نانوسیلیکا (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی) در رزین سیلیکونی تک‌جزئی را روی زبری سطح پوشش‌ها با استفاده از AFM بررسی کردند.

دی‌یدید (Methylene (Diiodide) اندازه‌گیری شد و این مقدار برای سطح فوق‌آب‌گریز معادل $5/99 \text{ mJ/m}^2$ و برای سطح RTV سیلیکون-لاستیک $25/48 \text{ mJ/m}^2$ به دست آمد. به این ترتیب زبری سطحی در ریزساختار و انرژی سطحی پایین ترکیب شیمیایی فلئورینه منجر به خاصیت فوق‌آب‌گریزی پوشش نهایی شد. روی سطح فوق‌آب‌گریز و سطح RTV سیلیکون-لاستیک، رفتار الکتروهیدرودینامیکی با گذاشتن قطرات آب با حجم کنترل شده روی مرکز سطح و با استفاده از اعمال میدان الکتریکی با فرکانس 50 Hz در امتداد سطح آزمایش شد و رفتار قطره با استفاده از دوربین با افزایش میدان الکتریکی ثبت شد. از ذرات KMnO_4 رس و شن و ماسه به عنوان مواد محلول در آب و غیرمحلول در آب برای انجام آزمایش خود تمیزشوندگی برای ارزیابی امکان خود تمیزشوندگی سطح فوق‌آب‌گریز تهیه شده تحت میدان الکتریکی استفاده شد. قبل و پس از گذاشتن قطره‌ی آب روی سطح فوق‌آب‌گریز، مقدار آلودگی سطحی اندازه‌گیری شد و اثر خود تمیزشوندگی سطح بررسی شد.

برای انجام این آزمون، دو الکتروود مسی استوانه‌ای درون مفره‌ی پوشش داده شده قرار گرفتند که یکی از آن‌ها به منبع ولتاژ متناوب (ولتاژ: 50 kV) و دیگری به زمین متصل شد. قطره‌ی آب یون زدوده به حجم $40 \mu\text{L}$ با رسانایی $\text{S/M}\mu$ روی مرکز سطح نمونه‌های پوشش داده شده ریخته شد. ولتاژ اعمالی به‌طور یکنواخت با نرخ 1 kV/s افزایش یافت تا قطره آب شروع به ناپایداری ایستا و حرکت کرد. مطابق نتایج مشخص شد که ابتدا، قطره آب روی پوشش سیلیکون-لاستیک RTV به شکل نیم‌کره همانند ایستاده بود؛ اما حین اعمال میدان الکتریکی خارجی و با افزایش آن، قطره شروع به ارتعاش کرده و قطره در جهت میدان الکتریکی کشیده شده و در دو سر آن برآمدگی ایجاد شد. در میدان الکتریکی $3/2 \text{ kV/cm}$ ، قطره‌ی آب ناپایدار شده و در نهایت، قطره آب تحت میدان الکتریکی به چند قسمت تقسیم شد. این نتایج نشان داد که خاصیت آب‌گریزی سطح با افزایش میدان الکتریکی به آرامی تغییر کرده، کاهش یافت. این درحالیست که قطره آب روی سطح فوق‌آب‌گریز شکل کروی خود را حفظ کرده و با اعمال میدان الکتریکی، دچار لرزش و تغییر شکل و در نهایت در میدان الکتریکی حدود kV/cm $2/7$ ، شروع به لغزش کرد. به این ترتیب رفتار قطره آب تحت میدان الکتریکی، روی سطح فوق‌آب‌گریز دارای حرکت کاملاً خودبه‌خودی و جلورونده بود؛ درحالی‌که روی سطح RTV سیلیکون-لاستیک تمایل به کشیده شدن و تقسیم شدن داشت. رفتار الکتروهیدرودینامیکی قطره‌ی آب روی سطوح به پدیدگی قطبش و بخش الکتریکی (Polarization and Electrification)

پرفلئوروآلکیل متاکریلیک (Perfluoroalkyl Methac-) (PMC) (rylic Copolymer) را طراحی کردند. برای تهیه‌ی این پوشش، ابتدا محلول آب‌گریز با انحلال 5 میلی‌لیتر از PMC در 50 میلی‌لیتر استیک اسید در دمای اتاق به مدت 10 min به دست آمد. سپس نانوذرات سیلیکای آب‌گریز درون اتیل الکل به مدت 10 دقیقه با استفاده از حمام فراصوت پراکنده شدند. سپس نانوذرات سیلیکای پراکنده شده و محلول PMC با هم مخلوط و به مدت 1 ساعت فراصوت شدند. در ادامه پس از آماده‌سازی، محلول نهایی روی سطح با ضخامت حدود $0/05 \pm 0/01$ میلی‌متر اعمال شدند و به مدت 2 ساعت در دمای 120 و 24 ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند. همچنین از پوشش RTV سیلیکون-لاستیک صنعتی با رنگ قرمز نیز استفاده شد. تصاویر FE-SEM سطح فوق‌آب‌گریز و سطح RTV سیلیکون-لاستیک نشان دادند که سطح فوق‌آب‌گریز تهیه شده، میکروساختار مرجانی با زبری در حدود $1-0/5$ میکرومتر را ارائه می‌کند. به علاوه در بزرگ‌نمایی بالاتر در میکروساختار مرجانی، نانوذرات دیده می‌شود. همچنین بین مرجان‌گون‌ها، بسته‌های هوا محبوس می‌شوند که به بهبود خاصیت آب‌گریزی کمک بسیاری می‌کنند. این درحالی است که پوشش RTV سیلیکون-لاستیک سطح صافی را از خود نشان داد. طیف‌سنجی اشعه‌ی ایکس (EDS) سطح فوق‌آب‌گریز نشان داد که عناصر C ، O ، Si و F با نسبت وزنی $1/54:24/6:11/1:9/0$ روی سطح موجود بوده‌اند. حضور عنصر F نمایانگر اصلاح نانوذرات سیلیس با پلیمر فلورینه است که به کمک آن انرژی سطحی پایین آمده است. عناصر C ، O ، Si و F با نسبت وزنی $23/2:28/1:26/7$ روی سطح پوشش RTV سیلیکون-لاستیک بر اساس طیف EDS گزارش شدند. ریزساختار سه‌بعدی و زبری سطح فوق‌آب‌گریز و سطح RTV سیلیکون-لاستیک با استفاده از آزمون AFM بررسی شد. مطابق نتایج، ارتفاعات قله‌ها در سطح فوق‌آب‌گریز بین $1/6$ تا $1/7$ میلی‌متر و میزان زبری سطحی آن بر حسب محاسبات 373 نانومتر به دست آمد؛ درحالی‌که ارتفاعات قله‌ها برای پوشش RTV سیلیکون-لاستیک بین 40 تا 90 نانومتر با زبری سطحی $8/1$ نانومتر بود. نتایج اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس آب با سطح نشان داد که سطح فوق‌آب‌گریز زاویه‌ی تماس آب $160/40^\circ$ و زاویه‌ی لغزش کمتر از 10° داشت؛ درحالی‌که زاویه‌ی تماس قطره آب برای سطح RTV سیلیکون-لاستیک $105/8^\circ$ و زاویه‌ی لغزش آن حدود 21° بود. اگر زاویه‌ی لغزش (Inclination) کمتر از 10° باشد، قطره‌ی آب می‌تواند به راحتی روی سطح بلغزد. به علاوه، انرژی آزاد سطحی ($\text{Surface Free Energy}$) (SFE) دو سطح با استفاده از آب دی‌ونیزه و متیلن

جریان نشتی کم، حفظ آب‌گریزی بالا و مقاومت فرسایشی بالایی داشت. جریان نشتی کم نمونه Si-R-2 با افزایش مقاومت سطحی ناشی از حضور نانوذرات سیلیکا تفسیر شد؛ چراکه این ذرات با کاهش جذب رطوبت در سطح، از ایجاد جریان نشتی روی سطح ممانعت کردند. به‌علاوه نانوذرات سیلیکا در Si-R-2 سبب ایجاد پیوندهای هیدروژنی میان گروه‌های سیلانول و زنجیره‌های سیلیکونی و در نتیجه پایداری ساختار شیمیایی و کاهش اکسایش شدند که این نتایج با آزمون FTIR نیز تأیید شد. همچنین آن‌ها بیان کردند که نانوذرات سیلیکا با ایجاد تعاملات قوی‌تر میان پرکننده‌ها و سیلیکون-لاستیک، منجر به پایداری شیمیایی و بهبود خواص سطحی پوشش شد.

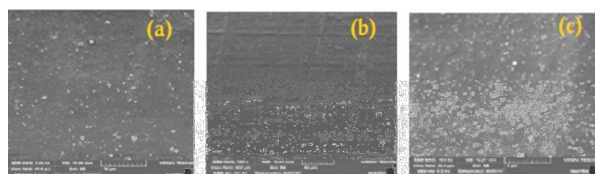
۴ بهبود عملکرد با اعمال مخلوط ذرات سیلیکا و دیگر ترکیبات اکسید معدنی

جهرمی (Jahromi) و همکارانش [۱۷] در سال ۲۰۰۸ تأیید کردند که ضخامت پوشش‌های سیلیکون-لاستیک RTV تأثیر مستقیمی روی عملکرد الکتریکی مقرر دارد. همچنین اعمال نانوسیلیکا مقاومت به سایش و دوده خاصیت آب‌گریزی پوشش سیلیکونی را ارتقا می‌دهد.

فرهنگ (Farhang) و همکارانش [۸۶] در سال ۲۰۰۹ اثبات کردند که نانوذرات سیلیکا عملکرد پوشش را ارتقا می‌دهد به‌طوری‌که، مقدار ATH مورد نیاز از ۷۰ pph به ۳۵ pph برای دستیابی به عملکرد ثابت، کاهش پیدا می‌کند.

سید مهدی (Seyedmehdi) [۲۷] در سال ۲۰۱۱، تأثیر محتوای افزودنی‌های آب‌گریز نانوسیلیکا و ذرات فلوئورینه‌شده روی آب‌گریزی پوشش سیلیکون-لاستیک RTV را بررسی کرد. وی مشاهده کرد که با افزایش ۴۰ درصد وزنی افزودنی‌ها به رزین سیلیکونی زاویه‌ی تماس از ۱۰۵° تا ۱۵۲° افزایش و زاویه‌ی لغزش از ۲۲ به ۳ کاهش داشت. افزودن بیش از ۴۰ درصد وزنی نانوذره در پوشش سیلیکونی به‌دلیل عدم پراکنش مناسب ناممکن بود. به‌علاوه مشاهده کرد که با افزودن ۴۰ درصد وزنی نانوکلسیم کربنات (NC) و دانه‌های شیشه‌ای اصلاح شده (G) زاویه‌ی تماس از ۱۰۵ تا ۱۲۵ و زاویه‌ی لغزش از ۲۲ تا ۱۰ کاهش داشت. همچنین در این مطالعه نشان داده شد که با اعمال ۲۰ درصد وزنی مخلوط نانوکلسیم کربنات و نانوسیلیکا، بالاترین زاویه‌ی تماس و کم‌ترین زاویه‌ی لغزش به‌دست آمد. به‌علاوه در آزمایش‌هایی دیگر، بیشترین زاویه‌ی تماس (۱۵۰°) از اعمال ۳۰ درصد وزنی ذرات فلوئورینه‌شده و ۲۰ درصد وزنی نانوکلسیم کربنات در پوشش سیلیکون-لاستیک به‌دست آمد. در مطالعه‌ی دیگری که توسط سیدمهدی [۲۷] در سال ۲۰۱۱

(Phenomenon) قطرات آب ارتباط دارد. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی، تفاوت رفتار الکتروهایدرودینامیکی سطح فوق‌آب‌گریز و سیلیکون-لاستیک RTV، از ریزساختار و انرژی آزاد سطحی دو سطح ناشی می‌شود. سطح فوق‌آب‌گریز از ترکیبات با انرژی آزاد سطحی پایین ساخته شده که نیروی جاذب بین آن‌ها و قطره‌ی آب بسیار کم است. همچنین اثر کاهش کشیده‌شدن قطره در سطوح فوق‌آب‌گریز با قانون گرانیوی نیوتن توضیح داده شد. برای آزمایش، مقداری از ذرات KMnO_4 برای شبیه‌سازی آلودگی‌های محلول، روی سطوح مورد نظر پاشیده شدند و رفتار آن‌ها در حین اعمال میدان الکتریکی بررسی شد. مشخص است که ذرات در قطره حل شده و ارغوانی رنگ شدند. سپس قطره به موازات میدان الکتریکی اعمالی حرکت کرده و تیره‌تر می‌شود. مشخص است که قطره ذرات را در طول مسیر خود به درون خود می‌کشد و مسیر را تمیز می‌کند و پس از پاک‌سازی از لبه‌ی سطح خارج می‌شود. این اثر به‌طور مشابه با ذرات شن و رس با رنگ‌های سیاه و زرد تکرار شد. با اعمال میدان الکتریکی، قطره‌ی آب روی سطح فوق‌آب‌گریز ذرات را به درون خود جمع کرده و آن‌ها را با خود می‌برد. به این ترتیب قطره آب در تحت میدان الکتریکی توانست ذرات محلول در آب و هم ذرات غیر محلول در آب را جمع‌آوری کند که این امر بیانگر رفتار خودتمیزشوندگی پوشش فوق‌آب‌گریز است. آمین (Amin) و همکارانش [۸۵] در سال ۲۰۱۸، تأثیر اعمال ترکیبی از نانوسیلیکا و میکروسیلیکا به پوشش سیلیکون-لاستیک را بررسی کردند و متوجه شدند که می‌توان خواص مقاومتی و عملکردی مقررهای ولتاژ بالا را با این روش ارتقا و طول عمر مقرر را افزایش داد. در این مطالعه، نمونه‌های Si-R-0 (سیلیکون لاستیک خالص)، Si-R-1 (سیلیکون لاستیک حاوی ۱۵ درصد وزنی میکروسیلیکا) و Si-R-2 (سیلیکون لاستیک حاوی ۱۰ درصد وزنی میکروسیلیکا و ۵ درصد وزنی نانوسیلیکا) بر پایه‌ی سیلیکون-لاستیک RTV-615 تهیه شدند. در این راستا، پرکننده‌ها به سیلیکون-لاستیک اضافه و مخلوط شدند. بعد از افزودن عامل پخت (RTV-615-B)، پراکنش با دستگاه فراصوت انجام شد. پس از قالب‌گیری، ۲۴ ساعت در دمای اتاق و سپس ۴ ساعت در دمای ۹۰ °C پخت شدند. در نهایت نمونه‌ها تحت شرایط تسریع شده شامل تابش نور فرابنفش، باران اسیدی، حرارت و مه نمکی به مدت ۹۰۰۰ ساعت قرار گرفتند. تصاویر SEM سطح Si-R-2 کم‌ترین فرسایش و تخریب را نشان دادند، در حالی که Si-R-0 بالاترین میزان تخریب را داشت. همچنین نتایج نشان داد که افزودن مخلوط نانوسیلیکا و میکروسیلیکا به سیلیکون-لاستیک عملکرد پوشش را ارتقا داد. نمونه Si-R-2 زاویه تماس آب بالا،



شکل ۴ تصویر SEM سیلیکون-لاستیک‌های حاوی (a): ۵ درصد پرکننده SiO_2 ; (b): ۵ درصد پرکننده ZnO و (c): ۵ درصد مخلوط پرکننده‌های $\text{SiO}_2 + \text{ZnO}$ [۸۷].

پیدا کرد. بر حسب نتایج، تأثیر تخریبی تابش نور فرابنفش روی پوشش‌ها بیشتر بوده است، چرا که بیشترین میزان کاهش زاویه‌ی تماس در اثر پیرشدگی حاصل از تابش رخ داده است (ترتیب اثر تخریبی: تابش نور فرابنفش < حرارت < آب جوش). تصاویر SEM سطح پوشش پس از تخریب توسط تابش نور فرابنفش، آب جوشان و اعمال حرارت موبد این هستند که در طی این روش‌های تخریبی، زبری سطح به‌خصوص سطح در معرض تابش نور فرابنفش، افزایش پیدا کرده است. ایجاد زبری و افزایش ناهمواری روی سطح این پوشش‌ها با همان ترتیب (تابش نور فرابنفش < حرارت < آب جوش) پس از انجام آزمون‌های مذکور نیز توسط آزمون AFM تأیید شد.

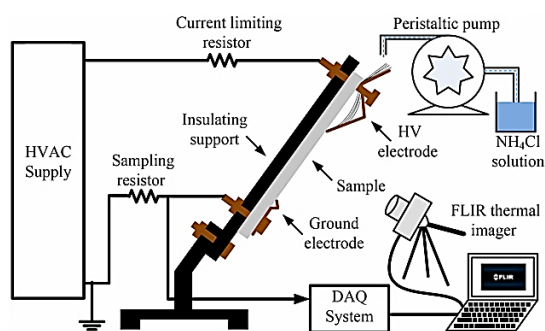
قوس (Ghouse) و همکارانش [۸۷] در سال ۲۰۱۷ اثر اعمال نانوذرات سیلیکا (SiO_2)، ZnO و مخلوط آن‌ها با درصد وزنی ۵٪ را روی خواص پوشش سیلیکون-لاستیک دو جزیی پخت‌شونده در کوره (عامل پخت: دی‌کیومیل پروکسید) بررسی کردند. مقاومت حجمی سیلیکون خالص $2 \times 10^{-14} \text{ mho.cm}$ ، درصد ازدیاد طول در نقطه‌ی شکست آن ۲۸۰٪، مقاومت کششی آن ۷۴۷ psi و ثابت دی‌الکتریک نسبی آن ۳/۶۷ بود. نانوذرات برای افزایش مقاومت ردیابی به پلیمر افزوده می‌شود. پس از اعمال، پوشش رزین سیلیکونی در دمای 180°C به‌مدت ۲۰-۱۰ دقیقه و سپس در 200°C به‌مدت ۴ ساعت پخت شد. تصویر SEM پوشش سیلیکون-لاستیک حاوی نانوذرات SiO_2 و ZnO در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.

در آزمون مقاومت ردیابی (IPT) طرح و میزان جریان نشتی قبل و بعد از تشکیل قوس خشک (Dry band) در ولتاژ ثابت kV ۵ تعیین شد. نتایج نشان داد که جریان نشتی نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا نسبت به نمونه‌ی بدون خالص شدیداً کاهش پیدا کرد؛ ولی عمق فرسایش و طول مقاومت ردیابی نمونه‌های حاوی ۵ درصد SiO_2 و ZnO کمترین مقدار را به‌ترتیب معادل ۰/۴ و ۳۴ میلی‌متر داشت (شکل ۵). قبل و پس از آزمون مقاومت ردیابی، زاویه‌ی تماس آب برای بررسی رفتار آب‌گریزی سطح گرفته شد و نتایج نشان دادند که میزان کاهش زاویه‌ی تماس برای سیلیکون-لاستیک خالص، نمونه‌ی حاوی ۵٪ SiO_2 ،

انجام شد، تأثیر اعمال افزودنی‌های آب‌گریز (نانوسیلیکا و ذرات فوق‌فلوئورینه‌شده) به پوشش‌های فلوئورو پلی‌یورتان-سیلیکون لاستیک بررسی شد. نتایج نشان داد که در این پوشش دوجزیی، تنها نانوذرات سیلیکا (۴۰ درصد وزنی) توانستند سطح فوق‌آب‌گریز با زاویه‌ی تماس 148° را ایجاد کند، درحالی‌که زاویه‌ی تماس پوشش حاوی ۴۰ درصد وزنی ذرات فلوئورینه شده حداکثر به 125° رسید. مشاهده شد که با افزودن ۴۰ درصد وزنی کلسیم کربنات و دانه‌های شیشه‌ای اصلاح‌شده به این نوع پوشش، زاویه‌ی تماس به 125° رسید. ازاین‌رو اثبات شد که اعمال نانوسیلیکای آب‌گریز در فوق‌آب‌گریز کردن سطح، بسیار بالاتر از افزودن ذرات فلوئورینه‌شده است.

گوش و همکارانش [۷۶] در سال ۲۰۱۵ به نسبت بهینه‌ی وزنی سیلیکون-لاستیک به EVA معادل ۶۰ به ۴۰، نانوسیلیکا را در درصدهای مختلف حداکثر تا ۱۲ phr افزودند. نتایج نشان دادند که اعمال نانوسیلیکا تا ۶ phr به مخلوط PDMS/EVA حاوی ATH (۱۰۰ phr)، منجر به افزایش مدول، درصد ازدیاد طول در نقطه‌ی شکست و استحکام کششی در آزمون تنش-کرنش (Stress-strain) شد. همچنین با افزایش غلظت نانوذرات تا ۶ phr، ثوابت دی‌الکتریک در بسامدهای پایین به‌علت کاهش تحرک‌پذیری و قطبیت زنجیره‌های پلیمر، کاهش پیدا کرد. به‌علاوه، با افزودن نانوذره به مقدار ۶ phr، بالاترین مقاومت سطحی تا $2/5 \times 10^{15} \text{ ohm.cm}$ و بالاترین زاویه‌ی تماس در حدود 116° حاصل شد. همچنین نتایج آزمون مقاومت ردیابی نشان داد که با افزایش مقدار نانوسیلیکا از صفر تا ۶ phr، ولتاژ مقاومت ردیابی از ۲۸ kV تا ۳۳ kV افزایش پیدا کرد، ولی با افزایش بیشتر تا ۱۲ phr به ۳۱ kV رسید.

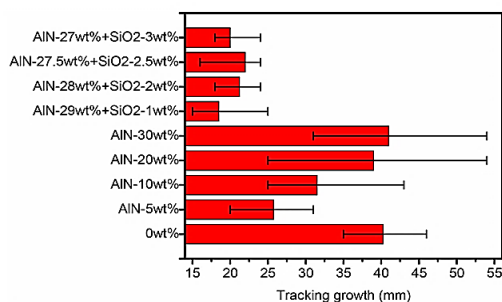
مشاهده شد با اعمال نانوذرات سیلیکا بیش از ۶ phr تا ۱۲ phr، خواص نهایی به‌علت ایجاد کلوخه‌ها و عدم پخش مناسب نانوذرات، افت کردند. ازاین‌رو عملکرد مفره‌های پوشش داده‌شده با مخلوط PDMS-EVA (۴۰-۶۰) حاوی ATH ۶ phr و نانوسیلیکا مناسب گزارش شد. در ادامه، تأثیر عوامل مخرب روی عملکرد پوشش بهینه بررسی شد. مشاهده شد که در اثر تابش نور فرابنفش و اعمال عوامل مخرب، نقص‌ها و حفرات میکرونی در سطح و داخل حجم عایق به وجود می‌آید که ولتاژ شکست را به مقدار چشمگیری کاهش می‌دهد. این نتیجه توسط اندازه‌گیری مقاومت سطحی نمونه‌ها در طول آزمون‌های تسریع‌یافته‌ی غوطه‌وری در آب جوش، حرارت‌دهی و تابش نور فرابنفش گرفته شد؛ به‌طوری‌که مقاومت سطحی از مقدار اولیه‌ی $2/5 \times 10^{15} \text{ ohm.cm}$ تا $2/3 \times 10^{15} \text{ ohm.cm}$ ، $1/3 \times 10^{15} \text{ ohm.cm}$ و $1/1 \times 10^{15} \text{ ohm.cm}$ به‌ترتیب کاهش



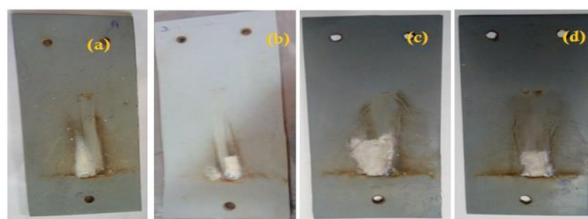
شکل ۶ تنظیمات آزمایش برای آزمون IPT [۸۸].

مکانیکی و حرارتی نمونه‌ها فراهم می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که طول مسیر مقاومت ردیابی و عمق فرسایش در نمونه‌های حاوی پرکننده‌های میکرونی AIN و نانویی SiO_2 به‌طور قابل توجهی کمتر از نمونه‌های بدون پرکننده یا تنها حاوی AIN بود. کاهش در طول مسیر مقاومت ردیابی و جرم فرسایش‌یافته، که در شکل‌های ۷ و ۸ به‌ترتیب نمایش داده شده است، بهبود قابل توجهی را در مقاومت الکتریکی، مکانیکی و حرارتی این ترکیبات نشان می‌دهد. این عملکرد به‌دلیل خواص بهبودیافته‌ی حرارتی این مواد است که فرایند تخریب سطح را کاهش داده و از پیشرفت فرسایش جلوگیری می‌کند.

در بررسی جریان نشتی، نتایج نشان داد که در نمونه‌های حاوی پرکننده‌های ترکیب میکرون و نانو، جریان نشتی به‌طور معناداری کمتر بود. این در حالی است که نمونه‌های بدون پرکننده یا حاوی ۳۰ درصد وزنی AIN جریان‌های نشتی بالاتری داشتند. این یافته که به وضوح در شکل ۹ ارائه شده است، نشان‌دهنده کاهش فعالیت‌های تخریبی مانند قوس الکتریکی نواری در این نمونه‌ها است. جریان نشتی پایین‌تر در نمونه‌های ترکیبی نشان می‌دهد که ساختار این کامپوزیت‌ها توانسته است اثرات تخریبی قوس‌های الکتریکی و افزایش دما را به‌طور موثری

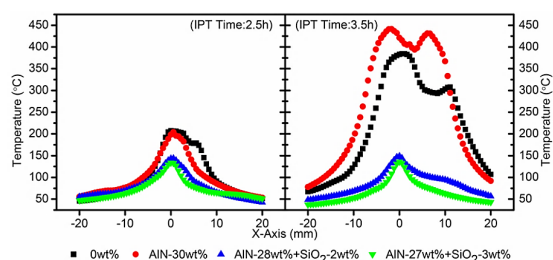


شکل ۷ رشد فیزیکی مسیر مقاومت ردیابی در پایان آزمون مقاومت ردیابی صفحه مایل [۸۸].

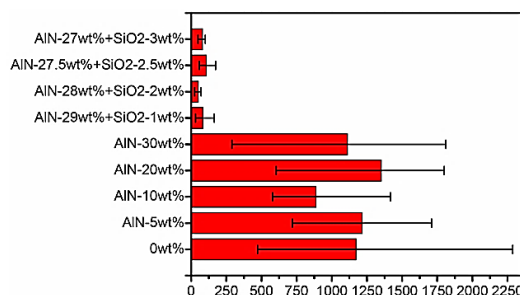


شکل ۵ تصویر نمونه‌های سیلیکون-لاستیک‌های حاوی (a): بدون پرکننده، (b): ۵ درصد پرکننده SiO_2 ، (c): ۵ درصد پرکننده ZnO و (d): ۵ درصد مخلوط پرکننده‌های $\text{SiO}_2 + \text{ZnO}$ [۸۷].

نمونه‌ی حاوی ۵٪ وزنی ZnO و نمونه‌ی حاوی ۵٪ وزنی SiO_2 و به‌ترتیب $59/7^\circ$ ، $34/2^\circ$ و 33° و $14/1^\circ$ بود. به این ترتیب حفظ خاصیت آب‌گریزی پوشش حاوی نانوذرات ZnO و SiO_2 حداکثر و جریان نشتی آن حداقل بود. مقایسه‌ی خواص مکانیکی پوشش‌ها حاکی از این هستند که پوشش حاوی نانوذرات ZnO، بیشترین مقاومت کششی و سختی را داشته است؛ اما درصد ازدیاد طول در نقطه شکست در حضور پرکننده ZnO و SiO_2 معادل ۱۴۳٪ بالاترین مقدار بوده است. طریق نظیر و همکاران [۸۸] در سال ۲۰۱۸ مطالعاتی انجام دادند که در آن‌ها به بررسی مقاومت ردیابی، فرسایش و توزیع گرمایی در کامپوزیت‌های سیلیکون-لاستیک پر شده با ترکیب ذرات میکرونی آلومینیوم‌نیتريد (AIN) و نانوذرات سیلیکا (SiO_2) پرداخته شد. این پژوهش به دنبال بهبود عملکرد پوشش‌های سیلیکون-لاستیک در برابر تخریب‌های حرارتی و مکانیکی در محیط‌های ولتاژ بالا بود. برای تهیه نمونه‌ها، AIN با ابعاد ۵ تا ۱۰ میکرومتر و نانوذرات سیلیکا (SiO_2) با ابعاد ۲۰ نانومتر به RTV-۶۱۵ به‌عنوان ماتریس اصلی اضافه و با هم‌زن مکانیکی و دستگاه فراصوت در آن پراکنده شدند. در نهایت پس از قالب‌گیری، به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق و سپس ۳۰ دقیقه در دمای 150°C پخت شدند. برای انجام آزمون مقاومت ردیابی و فرسایش، ولتاژ اولیه ۳ کیلوولت به نمونه‌ها اعمال شد و با نرخ افزایش ۰/۲۵ کیلوولت در ساعت برای مدت ۲۴۰ دقیقه ادامه یافت. محلول آلاینده کلرید آمونیوم با رسانایی mS/cm ۲/۵۰ به‌وسیله پمپی با نرخ جریان ۰/۳۰ میلی‌لیتر در دقیقه به‌طور یکنواخت روی نمونه‌ها پاشیده شد. جریان نشتی نیز با استفاده از مقاومت ۱۰۰ اهمی ثبت و داده‌های مربوط به ولتاژ و جریان هر نیم‌ساعت پردازش شد. برای بررسی توزیع حرارت در طول آزمون، از تصاویر فروسرخ نمایش‌داده‌شده در شکل ۶ استفاده شد. هدف این آزمایش، شبیه‌سازی شرایط تخریب تسریع‌شده و ارزیابی عملکرد نمونه‌ها در برابر مقاومت ردیابی، فرسایش و تجمع حرارت بود که داده‌های به‌دست‌آمده مبنایی برای تحلیل



شکل ۱۰ توزیع حرارتی در امتداد منطقه مستطیلی نمونه‌ها با توجه به زمان IPT [۸۸].



شکل ۸ جرم فرسایش یافته فیزیکی در پایان آزمون tracking صفحه مایل [۸۸].

۱۲۰۰ گزارش شد.

وانگ (Wang) و همکارانش [۶۵] در سال ۲۰۰۶، با اعمال 10° نانوذرات TiO_2 در سیلیکون-لاستیک، پوشش فوق‌آب‌گریزی که خواص آب‌گریزی خود را پس از پنج روز غوطه‌وری در اتانول و استون حفظ می‌کند، ساختند. تغییرات زاویه‌ی تماس و هیستریسیس زاویه‌ی تماس در مقادیر مختلف pH و در زمان‌های مختلف بررسی شد. نتایج نشان دادند که زاویه‌ی تماس نمونه‌ها بین 150° تا 170° متغیر بوده است و زاویه‌ی تماس برای نمونه‌ی غوطه‌ور شده در محلول با ضریب هدایت 30 پس از 800 ساعت غوطه‌وری به‌علت رسوب NaCl کاهش زیادی داشته است. همچنین مشاهده شد که تمام نمونه‌های غوطه‌ور در محلول‌های فوق، خاصیت فوق‌آب‌گریزی خود را پس از 922 ساعت حفظ کردند؛ اما تغییر غیر قابل بازگشت زاویه‌ی تماس پس از 922 ساعت غوطه‌وری مداوم از 1 به 2 (pH: ۷)، از $3/7$ به $2/7$ (pH: ۲)، از 11 به $12/7$ (pH: ۴) و از 2 به $9/3$ (pH: ۱۲) افزایش داشت.

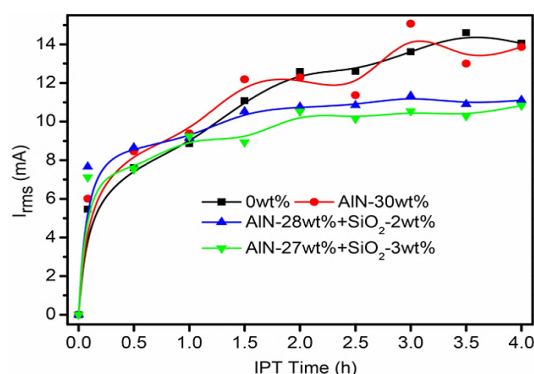
چرنی (Cherney) و همکارانش [۴۱] در سال ۲۰۱۳ اثبات کردند که با کاهش اندازه‌ی ذرات پرکننده‌های معدنی، مقاومت به فرسایش پوشش‌های سیلیکون-لاستیک RTV افزایش می‌یابد. تأثیر اعمال نانوذرات MgO و ZnO روی خواص الکتریکی و مکانیکی پوشش‌های سیلیکونی توسط سوناندا (Sunanda) و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۱۶ بررسی شد. این دو نوع نانوذره در درصدهای وزنی ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد به رزین سیلیکون حاوی ATH افزوده و پراکنده شدند. مقاومت این نمونه‌ها توسط آزمون مقاومت ردیابی صفحه مورب (Inclined Plane Tracking) و فرسایش (Erosion Test) در حضور محلول آب‌نمکی با رسانایی 33 mS جهت شبیه‌سازی آلودگی محیطی بررسی شد. همچنین آزمون پیری (Aging Test) شتاب‌یافته با در معرض‌گیری مقابل تابش نور فرابنفش به‌مدت 100 ساعت (شدت لامپ 300 Watt بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان دادند که با اعمال و افزایش درصد هر دو نانوذره مقاومت

کنترل کند. در تحلیل توزیع حرارتی، تصاویر فروسرخ نشان دادند که در نمونه‌های حاوی ترکیب میکرون و نانو، گرما به‌طور یکنواخت‌تری توزیع شده و تجمع گرمایی در آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است.

دماهای ثبت‌شده در نمونه‌ها به‌ترتیب برای نمونه‌های بدون پرکننده، حاوی 30 درصد وزنی AlN، ترکیب $\text{AlN-}28\% + \text{SiO}_2-2\%$ و $\text{AlN-}27\% + \text{SiO}_2-3\%$ برابر با 384°C ، 440°C ، 448°C و 132 بود. این کاهش دما که در شکل ۱۰ نیز به تفصیل نشان داده شده است، به‌دلیل انتقال حرارت بهبودیافته در نمونه‌های ترکیبی است که تجمع حرارت را در نقاط تخریب‌پذیر محدود کرده است.

۵ بهبود عملکرد با اعمال نانو و میکروذرات اکسید معدنی

میر (Meyer) و همکارانش [۳۹] در سال ۲۰۰۴ بیان کردند که اعمال مقدار بهینه‌ی ATH در پوشش سیلیکون-لاستیک RTV مقاومت ردیابی، مقاومت الکتریکی و سایش را بالا می‌برد؛ ولی در ATH در پوشش به‌تنهایی نمی‌تواند سطح فوق‌آب‌گریز ایجاد کند، به‌طوری‌که زاویه‌ی تماس آب بر روی این پوشش کمتر از



شکل ۹ جریان نشتی نمونه‌ها پس از یک دوره‌ی کامل IPT [۸۸].

ردیابی و مقاومت فرسایشی بهبود پیدا کرد. همچنین، نمونه‌ی حاوی ۱۰ درصد وزنی MgO کم‌ترین میزان حساسیت را نسبت به آزمون‌های پیرشدگی نشان داد و بالاترین مقاومت به مقاومت ردیابی را ارائه کرد؛ به‌طوری‌که توانست به‌مدت ۶ ساعت در مقابل ولتاژ ۴/۵ kV مقابله کند. همچنین مطالعات نشان دادند که تمامی نمونه‌های حاوی ذرات MgO و ZnO خاصیت آب‌گریزی خود را حتی پس از ۲۴ ساعت در معرض نور فرابنفش، حفظ کردند. به‌علاوه مشاهده شد که استحکام کششی و درصد ازدیاد طول در نقطه‌ی شکست با اعمال نانوذرات MgO و ZnO به پلیمر، کاهش ولی سختی آن افزایش پیدا کرد.

کومار (Kumar) و همکارانش [۳۶] در سال ۲۰۱۵ تأثیر افزودن نانوذرات باریوم تیتانات (BaTiO₃) (Nano-sized Barium Titanate) در درصد‌های حجمی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد روی رفتار مقاومت ردیابی و تخریب پوشش سیلیکون-لاستیک RTV دوجزئی (رزین: RTV8112 و جز شبکه‌ای‌کننده: RTV9858) را بررسی کردند. نانوذرات باریوم تیتانات پس از فراصوت در اتانول، به مخلوط رزین افزوده و با اختلاط مکانیکی هم زده شد و در نهایت RTV9858 به مخلوط افزوده شد. مخلوط روی سطح اعمال و پس از ۲۴ ساعت قرارگیری در دمای محیط، پخت شد. آزمون مقاومت ردیابی صفحه مورب (IPT) با شیب ۴۵° در ولتاژهای ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ و آزمون فرسایش در آب جوشیده محتوی آمونیوم کلرید ((Ammonium Chloride) و ایزواکتیل فنوکسی پلی‌اتوکسی اتانول ((Isooc-NH₄Cl)) و ایزواکتیل فنوکسی پلی‌اتوکسی اتانول ((tylphenoxypolyethoxyethanol)) (به‌عنوان عامل ترکننده‌ی غیریونی) به‌عنوان آلودگی طی ۴ هفته روی نمونه‌ها انجام شدند. همچنین آزمون تخلیه‌ی بار سطحی با استفاده از سامانه‌ی الکترودی IEC (ولتاژ: ۱۲ kV، فرکانس: ۵۰ هرتز، مدت: ۱۸ ساعت) صورت گرفت. نتایج نشان داد که تخریب مقاومت ردیابی پوشش سیلیکون خالص از ۲/۵ kV آغاز شد؛ اما پوشش حاوی نانوذرات تا ۳/۵ kV مقاومت کرد که این امر به ممانعت نانوذرات از تشکیل مسیر مقاومت ردیابی ارتباط داده شد. مطابق با نتایج حاصله، سطح سیلیکون-لاستیک خالص بعد از آزمون IPT کاملاً تخریب شد، چراکه عمق حفرات سطحی آن بسیار زیاد شده است؛ درحالی‌که حفرات و عمق آن‌ها در نمونه‌ی حاوی نانوذره کم‌تر است و فرسایش کمتری در آن رخ داده است (میانگین زبری بعد از ۱۸ ساعت تخریب در نمونه‌ی خالص: ۴/۵۳ μm و در نمونه‌ی حاوی نانوذرات ۳/۹۴ μm). همچنین وزن ازدست‌رفته‌ی نمونه‌ی خالص در اثر فرسایش بسیار بیشتر از نمونه‌ی حاوی نانوذره بود (حدود ۲۰ برابر). مطابق مشاهدات، ترک‌های زیادی روی سطح نمونه‌های سیلیکون-لاستیک خالص

مشهود هستند که این امر موید تخریب بیشتر آن‌ها نسبت به نمونه‌ی حاوی نانوذرات باریوم تیتانات هستند. از این‌رو حاوی حضور نانوذرات باریوم تیتانات در پوشش سیلیکون-لاستیک از تخریب سطح ممانعت کرده است و این اثر ممانعتی با افزایش مقدار نانوذره تا ۲ درصد، اثر مثبت داشته است.

مدیدی (Madidi) و همکارانش [۸۹] در سال ۲۰۱۶، تأثیر افزودن تیتان دی‌اکسید (TiO₂) به میزان ۲/۰، ۱۰/۵ و ۲۰ درصد وزنی و افزایش لایه‌های پوشش تا سه لایه را مطالعه کردند. از این‌رو نانوذرات در رزین سیلیکونی RTV با استفاده از اولتراسونیک و همزن مکانیکی پراکنده شدند و در نهایت روی سطح مقرر پاشیده شدند. به‌منظور پراکنش مناسب نانوذرات، از مواد سطح فعال (Surfactant) تجاری Triton X-۱۰۰ استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد لایه‌ها تا ۳ لایه، خاصیت آب‌گریزی افزایش پیدا کرد؛ ولی پس از آن کاهش یافت. به‌عبارت دیگر تجزیه و تحلیل‌های کیفی بر اساس آزمون‌های زبری‌سنجی نشان داد که متوسط زبری (Rq) نمونه‌ی تک‌لایه (a) ۱/۸۸ میکرومتر بود، درحالی‌که این مقدار برای نمونه (b) متشکل از سه لایه، به ۱۱/۶ میکرومتر رسید. همچنین اثر تعداد لایه‌ها بر پایداری آب‌گریزی پوشش‌ها در محیط اسیدی نیز بررسی شد و نتایج نشان داد که پوشش سه‌لایه‌ای با ضخامت ۲۵ میکرومتر پس از ۴۰ روز غوطه‌وری در محلول اسیدی بهتر از پوشش تک‌لایه مقاومت داشته و خواص آب‌گریزی خودش را حفظ کرده است. علاوه بر این نشان داده شد که نانوذرات TiO₂ تأثیر مثبتی روی خواص الکتریکی و مکانیکی پوشش سیلیکون لاستیک نداشته است.

چن (Chen) و همکاران [۹۰] در سال ۲۰۲۰ به بررسی تأثیر اعمال نتریدبور (Boron Nitride (NB)) در پوشش سیلیکون-لاستیک به‌جای تری‌هیدرات آلومینا (ATH) (Alumina Tri-hydrate) پرداختند. در این مطالعه پوشش‌های مختلفی از سیلیکون-لاستیک و نسبت‌های مختلف NB و ATH تهیه شدند و جهت تقویت تعاملات سطحی بین پرکننده و زنجیره‌ی سیلیکونی، وینیل‌تری‌متوکسی‌سیلان ((Vinyl tri-methoxy Silane (VTMS)) به این ترکیبات افزوده شد. برای این منظور، ۱۰۰ گرم سیلیکون-لاستیک، ۱۰۰ گرم پرکننده (با نسبت‌های متفاوت از NB و ATH)، ۱ گرم VTMS و ۰/۵ گرم عامل ولکانش استفاده شد. از نسبت NB به ATH ۱۰۰ به ۰، ۸۰ به ۲۰، ۶۰ به ۴۰، ۴۰ به ۶۰ و ۲۰ به ۸۰ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. مواد با آسیاب دوغلتکی مخلوط و در قالب‌های استاندارد ریخته شدند و سپس در دمای ۱۷۰ °C و فشار ۱۵ مگاپاسکال فرایند پخت گوگردی را طی کردند. نتایج آزمون‌های الکتریکی نشان داد

استحکام کششی پوشش حاوی نانوذره اصلاح‌شده، پایین‌تر از نمونه‌های حاوی نانوذرات اصلاح‌نشده بود؛ این درحالیست که مقادیر ازدیاد طول در نقطه‌ی شکست روند مشخصی نداشت. پراکنش این نانوذرات در داخل رزین به‌خوبی در تصاویر SEM موجود در شکل ۱۲ (a و b) قابل رویت است.

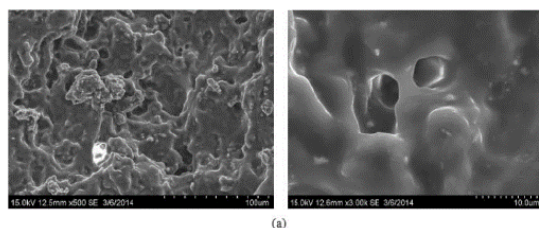
بازلی (Bazli) و همکارانش [۲۴] در سال ۲۰۲۱، با بررسی خواص الکتریکی پوشش‌های پلیمری ترکیبی از سیلیکون-لاستیک و EPDM به نتایج قابل‌توجهی دست یافتند. آن‌ها نشان دادند که در محیط‌های خشک، پوشش‌های حاوی الیاف شیشه عملکرد مکانیکی و الکتریکی بالایی دارند؛ اما در شرایط مرطوب، جذب رطوبت باعث تضعیف خاصیت عایقی آن‌ها می‌شود. با این حال، نانومواد پلیمری به‌دلیل ویژگی‌های دی‌الکتریک قوی، وزن کم، کارایی بهتر در شرایط آلودگی، قیمت پایین و تولید آسان، گزینه‌ای جذاب برای سامانه‌های عایق بیرونی به‌شمار می‌آیند. به‌ویژه ترکیب سیلیکون-لاستیک و EPDM به‌دلیل انعطاف‌پذیری، مقاومت حرارتی و مکانیکی، در کاربردهای مختلف از جمله کابل‌ها و عایق‌های بیرونی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه، ترکیبات نانوپوشش با استفاده از سیلیکون-لاستیک، EPDM و نانورس Cloisite 15A تولید شدند و خواص دی‌الکتریک، مقاومت در برابر شکست دی‌الکتریک، و مقاومت سطحی و حجمی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. از نتایج قابل‌توجه این پژوهش می‌توان به افزایش استحکام شکست دی‌الکتریک با افزودن نانوذرات اشاره کرد. همچنین گزارش شد که پوشش‌های سیلیکون-لاستیک-EPDM حاوی نانورس، استحکام دی‌الکتریک بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون نانوذرات نشان دادند. این بهبود به‌دلیل

که استفاده از NB به‌جای ATH موجب افزایش ۴۷ درصدی استحکام شکست دی‌الکتریک و کاهش ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک در پوشش‌ها شد. افزودن عامل تقویت‌کننده به‌دلیل ارتقای تعاملات بین سطح پرکننده و ماتریس سیلیکونی باعث بهبود مضاعف خواص الکتریکی پوشش شد (شکل ۱۱). همچنین تصویربرداری‌های SEM نیز کاهش تعداد حفره‌ها، تجمع ذرات پرکننده شده و تعاملات سطحی این ماده را تأیید کرد.

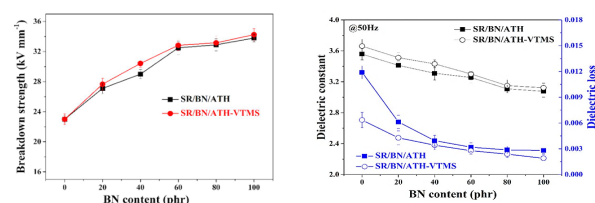
همچنین تحلیل‌های گرمایی نشان داد که جایگزینی NB با ATH موجب بهبود پایداری حرارتی پوشش‌ها می‌شود، اما افزودن VTMS باعث کاهش جزئی پایداری حرارتی شد. در نهایت، رسانایی حرارتی کامپوزیت‌ها با افزایش محتوای NB به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافت. ترکیب حاوی بیشترین مقدار NB و VTMS، بالاترین رسانایی حرارتی را نشان داد که ۱۵۶ درصد بیشتر از کامپوزیت حاوی ATH بود و این امر نشان‌دهنده اثر مثبت VTMS در کاهش مقاومت حرارتی سطحی است. این پژوهش تأیید کرد که استفاده از NB به‌جای ATH می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در خواص عایقی و حرارتی برای کاربردهای عایقی در ولتاژهای بالا را فراهم کند.

۶ بهبود عملکرد با اعمال نانوذرات رس

کیاوفنگ (Xiaofeng) و همکارانش [۹۱] در سال ۲۰۱۶ تأثیر اعمال نانورس‌های مونت‌موریلونیت (Montmorillonite) نانورس در درصد‌های مختلف و اصلاح آن‌ها را روی خواص تأخیراندازنده‌ی آتش (FR-DOMt) (Flame-retardant Den-) (drimer Modified Organic Montmorillonite) و خواص فیزیکی-مکانیکی پوشش سیلیکون-لاستیک RTV بررسی کردند. مشاهده شد که اعمال نانوذرات پایداری حرارتی پوشش‌ها را ارتقا داد، به‌طوری‌که نقطه‌ی شروع شعله‌وری پوشش حاوی ۱۵ phr نانوذره، در حدود ۳۱۰ °C بود که نسبت به پوشش RTV خالص ۱۰۰ °C افزایش داشت. همچنین تأیید شد که



شکل ۱۲ تصویر SEM پوشش (a): سیلیکون-لاستیک خالص و (b): سیلیکون-لاستیک حاوی مونت‌موریلونیت اصلاح‌شده [۹۲].



شکل ۱۱ استحکام شکست (چپ) و ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک (راست) پوشش‌های سیلیکون-لاستیک [۹۰].

SRA فاقد GN و ATH کاهش پیدا کرد. همچنین، تصاویر SEM نشان دادند که ساختار داخلی زغال در نمونه‌های حاوی پرکننده، به‌ویژه SRE، بسیار متراکم و مقاوم بود که می‌تواند به کاهش انتقال حرارت و گازهای قابل اشتعال کمک کند. با این حال، افزودن GNs منجر به کاهش ۴/۵ درصدی مقاومت الکتریکی حجمی نمونه‌ی SRE نسبت به نمونه‌ی پایه شد، اما همچنان در محدوده‌ی قابل قبول برای کاربردهای عایقی ولتاژ بالا باقی ماند. این درحالیست که بالاترین مقاومت الکتریکی حجمی متعلق به نمونه‌های حاوی ATH تنها بود. نتایج نشان داد که افزودن ATH مقاومت الکتریکی پوشش را بهبود بخشید، در حالی که GNs نقش مهمی در کاهش پارامترهای آتش و تولید دود و مقاومت حرارتی داشت.

محمدمدنی (Mohammadnabi) و همکارانش [۹۳] در سال ۲۰۲۳ تأثیر روش ساخت نانوپوشش‌های سیلیکون-لاستیک و نانولوله‌های کربنی چنددیواره (SRCNT) (Silicone Rubber-multiwalled Carbon Nanotubes Nanocomposites) را بر خواص فیزیکی این پوشش‌ها برای استفاده در مفره‌های ولتاژ بالا بررسی کردند. این مطالعه با هدف کاهش مشکلات ناشی از تراکم مه و گرد و غبار روی سطح مفره‌ها انجام شد که این مشکلات می‌توانند منجر به ایجاد جریان‌های نشتی و نهایتاً شکست و خرابی مفره‌ها شوند. برای مقابله با این مشکلات، دو روش متداول، یعنی مخلوط‌سازی محلول (SB) (Solution-blending) و مخلوط‌سازی مذاب (Melt-blending) (MB) برای ساخت نمونه‌های SRCNT با غلظت‌های مختلف نانولوله‌های کربنی (۰/۵، ۱/۵، ۳ و ۳/۵ درصد وزنی) به کار گرفته شدند. در روش آماده‌سازی محلولی (SB)، نانولوله‌های کربنی خام با ۱ درصد وزنی آمینوپروپیل‌تری‌اتوکسی‌سیلان (KH550) در اتانول بی‌آب به‌وسیله‌ی فراصوت (۴۲ کیلوهرتز و ۷۰ وات) به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق پراکنده شدند.

ایجاد موانع بیشتر در مسیر حرکت بارهای الکتریکی و کاهش تجمع بار رخ داده است که در نهایت سبب بهبود عملکرد عایقی پوشش شد. همچنین ثابت دی‌الکتریک نمونه‌های حاوی نانوذرات به‌صورت قابل‌توجهی افزایش پیدا کرد. حضور نانوذرات باعث تقویت تعاملات الکتریکی درون ساختار ماده و بهبود پاسخ آن به میدان‌های الکتریکی شد. این بهبود به دلیل ایجاد ساختاری منسجم‌تر و افزایش ظرفیت مواد برای ذخیره بارهای الکتریکی بوده که تأثیر مستقیمی بر عملکرد عایقی آن‌ها دارد.

۷ بهبود عملکرد با اعمال میکرو/نانوذرات کربنی

در مقاله‌ای که توسط نازیر (Nazir) و همکاران [۹۲] در سال ۲۰۲۲ منتشر شد، تأثیر اعمال ترکیبات تقویت‌کننده شامل تری‌هیدرات آلومینا (ATH)، لیاف شیشه (GFRs) و نانوصفحات گرافن اکسید (GNs) بر ویژگی‌های الکتریکی و مقاومت در برابر آتش پوشش سیلیکون-لاستیک برای مفره‌های ولتاژ بالا بررسی شد. سیلیکون-لاستیک بر پایه‌ی پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) به دلیل آب‌گریزی بالا و مقاومت در برابر آلودگی، گزینه‌ای مناسب در ساخت مفره‌ها است. با این حال، ضعف‌هایی همچون مقاومت ردیابی الکتریکی، فرسایش و اشتعال‌پذیری ضعیف آن باعث محدودیت عملکرد این پوشش‌ها می‌شود. فرایند تهیه این ترکیبات شامل مخلوط‌کردن عوامل تقویت‌کننده با PDMS، ریختن در قالب و پخت در دمای ۱۵۰ °C به مدت ۳۰ دقیقه بود. جدول ۲ ترکیب درصد فرمول‌بندی‌های مختلف ساخته‌شده را نشان می‌دهد.

مطابق با نتایج ارائه‌شده، نمونه‌ی SRE در مرتبه‌ی بعدی SRF بهترین عملکرد را نشان دادند. همچنین حرارت کل آزادشده (THR) و دود کل آزادشده (TSR) آن به ترتیب به mJ/m^2 و m^2/m^2 ۳۸/۳۶ و ۳۳۲/۷۴ محاسبه شد که نسبت به نمونه‌ی

جدول ۲ فرمول‌بندی کامپوزیت‌های PDMS [۹۲]

کد نمونه	PDMS (درصد وزنی)	ATH (درصد وزنی)	GFRs (درصد وزنی)	GN (درصد وزنی)
SRA	٪۱۰۰	-	-	-
SRB	٪۷۰	٪۳۰	-	-
SRC	٪۶۵	٪۳۰	٪۵	-
SRD	٪۶۹	٪۳۰	-	٪۱
SRE	٪۶۴	٪۳۰	٪۵	٪۱
SRF	٪۶۳	٪۳۰	٪۵	٪۱

تراکم رطوبت روی سطح مقره‌ها که به افزایش جریان نشتی و خرابی منجر می‌شود، انجام شد. نویسندگان با بهره‌گیری از نانولوله‌های کربنی و ماتریس سیلیکون-لاستیک، تلاش کردند تا با افزایش هدایت الکتریکی سطح عایق‌ها، پدیده‌ی گرمای ژول (Joule Heating Phenomenon) را برای خشک‌کردن سطح به کار گیرند.

برای ساخت کامپوزیت‌های مورد مطالعه، از سیلیکون-لاستیک HTV به همراه نانولوله‌های چنددیواره‌ی کربنی با قطر ۲۰ تا ۴۰ نانومتر و طول ۵ تا ۱۵ میکرومتر در درصد وزنی مختلف (۰/۵، ۱/۵، ۳ و ۳/۵) نانولوله کربنی استفاده شد. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نمونه‌ها با استفاده از روش چهار نقطه که دقت بالاتری در حذف اثرات مقاومت تماس را ارائه می‌دهد و با استفاده از دستگاه KEIYHLEY 610-C، انجام شد. نتایج نشان داد که تغییر ویژگی‌های نانولوله‌ها، مانند طول، قطر، درصد شبکه‌شدگی و ضخامت ناحیه‌ی بین‌سطحی، تأثیر چشمگیری در بهبود هدایت الکتریکی دارد، بدون آنکه نیازی به افزایش قابل‌توجه درصد وزنی نانولوله‌های کربنی باشد. این مدل می‌تواند به شکل چشمگیری هزینه و زمان تولید و آزمایش عایق‌ها را کاهش داده و برای طراحی مقره‌های جدید در شرایط محیطی مختلف قابل استفاده باشد. این پژوهش، گامی مهم در بهبود عملکرد عایق‌های الکتریکی در شرایط دشوار محیطی به شمار می‌رود.

۸ بهبود عملکرد با انجام اصلاحات سطحی

رامایرز (Ramirez) و همکارانش در سال ۲۰۰۸ نشان دادند که استفاده از عوامل فعال سطحی در غلظت بهینه روی بهبود پراکنش نانوذرات و خواص الکتریکی و مکانیکی پوشش‌های سیلیکون-لاستیک دو جزئی تأثیر بسزایی دارد (Gao) و همکارانش [۶۷] در سال ۲۰۰۸ سطح سیلیکون-لاستیک را به وسیله‌ی پلاسمای CF₄ اصلاح کردند و با نشان دادن اتم‌های فلئور روی سطح، آب‌گریزی سطح را افزایش دادند (زاویه‌ی تماس آب: ۱۵۰°)

وانگ و همکارانش [۲۶] در سال ۲۰۱۶، ساختار شیمیایی سطح مقره‌های پوشش داده‌شده با سیلیکون-لاستیک را با استفاده از جریان حاوی مخلوط گازی ۲۰ درصد حجمی فلئور و ۸۰ درصد حجمی نیتروژن (فشار: ۰/۱ مگاپاسکال، مدت: ۳۰ دقیقه، دماهای ۲۵ °C، ۴۰ و ۵۵) تغییر دادند. تصاویر SEM سطوح حاصل حاکی از ایجاد ساختارهای سلسله‌مراتبی (Hierarchi-cal) میکرو-نانو روی سطح پوشش فلئورینه‌شده بودند. از طرفی مشاهده شد که زاویه‌ی تماس آب روی این سطوح از

سپس این مخلوط به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ °C خشک شد. نانولوله‌های اصلاح‌شده در THF پراکنده و با فراصوت به مدت یک ساعت همگن شدند. هم‌زمان سیلیکون-لاستیک نیز در THF حل و با مخلوط نانولوله‌ها ترکیب شد. فرایند تبخیر حلال با استفاده از فرایند تقطیر انجام شد تا نمونه‌های یکنواخت تولید شود. در روش مخلوط‌سازی ذوبی (MB)، نانولوله‌ها مستقیماً و بدون حلال به ماتریس سیلیکون اضافه و با استفاده از مخلوط‌کن مخلوط شدند. هر دو مجموعه نمونه‌ها پس از قالب‌گیری در دمای ۱۶۰ °C تحت فشار پخت شدند. تصاویر FESEM، پراکندگی یکنواخت‌تر نانولوله‌های کربنی را در ماتریس سیلیکون-لاستیک در نمونه‌های ساخته‌شده با روش SB را نشان دادند. این پراکندگی بهتر به تشکیل شبکه‌های رسانای گسترده‌تر منجر شده که امکان انتقال الکترون‌ها را افزایش داده و در نتیجه هدایت الکتریکی را بهبود بخشیده است. مشاهده شد که در تمامی غلظت‌ها، هدایت الکتریکی نمونه‌های روش SB حدود دو برابر نمونه‌های روش MB بود که این افزایش هدایت، به دلیل پراکندگی یکنواخت‌تر و تشکیل شبکه‌های رسانای پیوسته‌تر در روش SB ارتباط داده شد. همچنین در زمینه آب‌گریزی، نتایج نشان دادند که با افزایش غلظت نانولوله‌ها، زاویه‌ی تماس آب کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده کاهش خاصیت آب‌گریزی است. با این حال، در غلظت ثابت، نمونه‌های ساخته‌شده با روش SB زاویه تماس بیشتری نسبت به نمونه‌های روش MB داشتند، که به پراکندگی بهتر نانولوله‌ها در روش SB نسبت داده شد.

به‌طور کلی، نتایج نشان داد که روش SB به دلیل ایجاد پراکندگی بهتر و شبکه رسانای یکنواخت‌تر، خواص بهتری برای کاربردهای عایقی ارائه می‌دهد. با این حال، این روش به دلیل هزینه بالا، زمان‌بر بودن و چالش‌های ناشی از استفاده از حلال، برای تولید انبوه مناسب نیست. از سوی دیگر، روش MB به دلیل کارایی بالا و امکان تولید در مقیاس بزرگ به عنوان روش پیشنهادی برای ساخت مقره‌های ولتاژ بالا انتخاب شد. این مطالعه نتیجه‌گیری کرد که برای کاربردهای عایقی، غلظت بهینه نانولوله‌های کربنی در ماتریس سیلیکون-لاستیک ۳ درصد وزنی است، زیرا این غلظت تعادل مناسبی بین هدایت الکتریکی و حفظ خاصیت آب‌گریزی ایجاد می‌کند.

در پژوهش دیگری که توسط همین گروه در همان سال انجام شده است، مدل‌سازی هدایت الکتریکی و ساخت کامپوزیت‌های نانولوله‌ی کربنی/سیلیکون-لاستیک برای استفاده در عایق‌های ولتاژ بالا در شرایط آلودگی و رطوبت بالا انجام شد. این مطالعه با هدف ارائه‌ی راهکاری نوین برای کاهش مشکلات ناشی از

جدول ۳ مقادیر انرژی آزاد محاسبه شده از طریق زاویه‌ی تماس آب بر روی سطح مقره‌های پوشش داده شده با سیلیکون-لاستیک فلوئورینه شده (NF: نمونه‌ی بدون اصلاح، F25: اصلاح شده در دمای ۲۵ °C، F40: اصلاح شده در دمای ۴۰ °C و F55: اصلاح شده در دمای ۵۵ °C [۲۶].

نمونه	زاویه‌ی تماس (°)		انرژی سطحی (mJ/m ²)		
	آب	دی‌وومتان	قطبی	پراکنشی	کل
NF	۱۰۵	۸۰	۱/۳۰	۱۶/۲۶	۱۷/۵۶
F25	۱۵۰	۹۵	۳/۰۳	۱۳/۷۵	۱۶/۷۹
F40	۱۵۴	۱۰۰	۲/۸۸	۱۱/۴۵	۱۴/۳۲
F55	۱۶۲	۱۱۴	۶/۰۵	۱/۸۵	۷/۹۰

قابل توجهی محسوب می‌شود. از نظر خواص الکتریکی، این تحقیق تأیید کرد که افزودن نانوذرات سیلیکا می‌تواند مقاومت حجمی و سطحی پوشش‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. در یک نمونه، مقاومت سطحی پوشش به $1.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ رسید. این مقاومت و مقاومت حجمی به $1.5 \times 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ رسید. بالا مانع از نشت جریان شده و پایداری عملکرد پوشش‌ها در سامانه‌های انتقال ولتاژ بالا را تضمین می‌کند. بهبود مقاومت الکتریکی در کنار کاهش قابل ملاحظه جریان نشتی، از مهم‌ترین مزایای این پوشش‌ها به‌شمار می‌رود.

افزودن نانوذرات همچنین منجر به بهبود خواص مکانیکی پوشش‌ها شده است. نتایج نشان داد که استفاده از ۳۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا، استحکام کششی پوشش‌ها را تا ۲۰ درصد افزایش داده است. این نانوذرات با تعامل قوی‌تر با ماتریس پلیمری، مقاومت در برابر پارگی و استحکام ساختاری پوشش‌ها را نیز بهبود داده‌اند. هرچند میکروذرات سیلیکا نیز بهبودهایی در این خواص ایجاد کرده‌اند، اما اثرگذاری آن‌ها در مقایسه با نانوذرات محدودتر بوده است. تصاویر SEM از پوشش‌های حاوی نانوذرات نشان دادند که پراکندگی بهینه ذرات در مقیاس نانو نقش کلیدی در دستیابی به این نتایج داشته است. در شرایط محیطی واقعی، این پوشش‌ها عملکرد پایدار و چشمگیری از خود نشان داده‌اند. نمونه‌های حاوی ترکیب نانو و میکروذرات سیلیکا پس از ۹۰۰۰ ساعت مواجهه با شرایط تسریع شده (شامل تابش UV، باران اسیدی و آلودگی‌های نمکی)، تغییرات حداقلی در خواص خود تمیزشوندگی و آب‌گریزی نشان دادند. زاویه تماس آب روی این پوشش‌ها پس از این مدت، تنها ۵° کاهش یافت که نشان‌دهنده مقاومت بالای این پوشش‌ها در برابر تخریب و فرسایش است. علاوه بر این، افزایش زبری میکروسکوپی سطح، که در اثر توزیع یکنواخت

۱۰۵° به ۱۶۲° افزایش پیدا کرد. همچنین انرژی آزاد سطوح حاصل در جدول ۳ گزارش شدند که نتایج نشان می‌دهند که انرژی سطحی سطوح فلوئورینه شده با افزایش دمای فرایند اصلاح، به مقدار زیادی از $17.56 \text{ (mJ/m}^2\text{)}$ به 7.90 کاهش داشته است.

۹ نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پوشش‌های سیلیکون-لاستیک اصلاح شده با استفاده از نانو و میکروذرات، به‌طور مؤثری عملکرد مقره‌های الکتریکی را در محیط‌های آلوده و شرایط سخت محیطی بهبود می‌بخشند. افزودن نانوذرات سیلیکا (SiO_2) به این پوشش‌ها در غلظت‌های بهینه (بین ۵ تا ۳۰ درصد وزنی) توانسته است زاویه تماس آب را تا ۱۶۲° افزایش دهد و تغییر غیر قابل بازگشت زاویه تماس را به کمتر از ۱° کاهش دهد. این تغییرات منجر به ایجاد خواص فوق‌آب‌گریزی و خودتمیزشوندگی برتر در این پوشش‌ها شده است. به همین دلیل، این مواد به‌طور ویژه برای مقره‌های خطوط انتقال ولتاژ بالا در محیط‌های مرطوب یا آلوده توصیه می‌شوند. همچنین، استفاده از نانوذرات ترکیبی مانند آلومینا تری‌هیدرات (ATH)، باریوم‌تیتانات و تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) نشان داده که مقاومت به مقاومت ردیابی این پوشش‌ها به‌طرز چشمگیری افزایش یافته است. برای نمونه، زمان تحمل پوشش در برابر مقاومت ردیابی در ولتاژ ۵ کیلوولت به بیش از ۵۰۰ دقیقه رسیده است. علاوه بر این، افزودن این نانوذرات موجب شده تا پایداری حرارتی پوشش‌ها تا دمای ۳۴۰ °C افزایش یابد، که این ویژگی اهمیت بالایی در جلوگیری از تخریب حرارتی دارد. بررسی ولتاژ شکست نشان داد که این پوشش‌ها قادرند ولتاژهایی تا ۱۴۵ کیلوولت را تحمل کنند که نسبت به پوشش‌های معمولی بهبود

نانوذرات ایجاد شده، ویژگی‌های خودتمیزشوندگی را تقویت کرده است. از سوی دیگر، بهبود روش‌های اصلاح سطحی نظیر استفاده از ترکیبات سیلان یا فرایندهای خودآرایی سطحی نقش قابل توجهی در افزایش عملکرد پوشش‌ها داشته است. این اصلاحات سطحی منجر به پراکندگی یکنواخت‌تر ذرات، کاهش جذب رطوبت و بهبود دوام طولانی‌مدت پوشش‌ها شده‌اند. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که با این اصلاحات، مقاومت پوشش‌ها در برابر تخریب ناشی از تابش UV و تغییرات دمایی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در نهایت، این مطالعه تأیید

کرد که استفاده از پوشش‌های نانو/میکرو هیبریدی می‌تواند به‌طور چشمگیری نیاز به شستشوی دوره‌ای مکرر را کاهش دهد و هزینه‌های نگهداری را پایین آورد. این پوشش‌ها به‌دلیل ترکیب خواص برتر مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی، به‌عنوان راهکاری پایدار و کارآمد برای افزایش عمر مفید تجهیزات برق در محیط‌های دشوار شناخته می‌شوند. ادامه تحقیقات بر روی ترکیبات جدید نانومواد و روش‌های نوآورانه تولید می‌تواند مسیرهای تازه‌ای برای بهینه‌سازی بیشتر این فناوری باز کند و نیازهای عملیاتی صنایع برق را برآورده سازد.

مراجع

1. Zeng Z., Guo P., Zhang R., Zhao Z., Bao J., Wang Q., Xu Z., Review of Aging Evaluation Methods for Silicone Rubber Composite Insulators, *Polymers* (Basel), 15, 1141, **2023**.
2. Faiza F., Khattak A., Rehman A.U., Ali A., Mahmood A., Imran K., Multi-Stressed Nano and Micro-Silica/Silicone Rubber Composites with Improved Dielectric and High-Voltage Insulation Properties, *Polymers* (Basel), 13, 1400, **2021**.
3. Saleem M.Z., Akbar M., Review of the Performance of High-Voltage Composite Insulators, *Polymers* (Basel), 14, 431, **2022**.
4. Wang Q., Liu S., Liu S., Zuo Z., Gao Y., Wu C., Super-Hydrophobic Silicone Rubber for Outdoor Electrical Insulation, *Nano Today*, 58, 102406, **2024**.
5. Gunasekaran M., Basic Forensic Analysis of Polymer Concrete High Voltage Insulation in Various Applications, *IEEE Electrical Insulation Conference*, 90–93, **2020**.
6. Schmidt L.E., Krivda A., Ho C.H., Portaluppi M., Polymer Concrete Outdoor Insulation – Experience from Laboratory and Demonstrator Testing, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1–3, **2010**.
7. Tang X., Wang T., Yu F., Zhang X., Zhu Q., Pang L., Simple, Robust and Large-Scale Fabrication of Superhydrophobic Surfaces Based on Silica/Polymer Composites, *RSC Advances*, 3, 25670, **2013**.
8. Xuedong Z., Ling L., Hongwei W., Liang'an Y., Qiang X., Kai Sun, Jingzhao L., Zhidong J., Can C., Method for Recoating RTV Anti-pollution Flashover Coating on Insulator Coated with RTV Anti-pollution Flashover Coating, US9875829B2, **2016**.
9. Qian D., Zhou J., Zheng J., Cao J., Wan J., Fan H., Synthesis, Curing Behaviors and Properties of a Bio-Based Trifunctional Epoxy Silicone Modified Epoxy Thermosets, *Polymers* (Basel), 14, 4391, **2022**.
10. Ye H., Zhu L., Li W., Liu H., Chen H., Simple Spray Deposition of a Water-Based Superhydrophobic Coating with High Stability for Flexible Applications, *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 9882–9890, **2017**.
11. Sunanda C., Dinesh M.N., Vasudev N., Performance Evaluation of Silicon Rubber Insulating Material with MgO and ZnO Nanofillers, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 1–5, **2016**.
12. Kuo C.-F.J., Ahmad N., Lin S.-Y., Dewangga G.R.S., Dong M.-Y., Synthesis and Characteristic Applications of Silicon Resins for the Modifying Agent in Heat Conduction, *Textile Research Journal*, 92, 871–885, **2022**.
13. Joseph V.S., Calais T., Stalin T., Jain S., Thanigaivel N.K., Sanandiya N.D., Silicone/Epoxy Hybrid Resins with Tunable Mechanical and Interfacial Properties for Additive Manufacture of Soft Robots, *Applied Materials Today*, 22, 100979, **2021**.
14. Wu X., Li X., Zhong J., Xu X., Xu B., Ai B., Preparation and Characterization of UV-Curable Silicone Resin Containing Perfluorocyclobutyl Aryl Ether Groups, *Silicon*, 15, 5691–5701, **2023**.
15. Wu L., Wang X., Ning L., Han J., Wan Z., Lu M., Improvement of Silicone Rubber Properties by Addition of Nano-SiO₂ Particles, *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 14, 11–14, **2016**.
16. Robeyns C., Picard L., Ganachaud F., Synthesis, Characterization and Modification of Silicone Resins: An Augmented Review, *Progress in Organic Coatings*, 125, 287–315, **2018**.
17. Jahromi A., Cherney E., Jayaram S., Aging Characteristics of RTV Silicone Rubber Insulator Coatings, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15, 444–452, **2008**.
18. Seyedmehdi S.A., Zhang H., Zhu J., Superhydrophobic RTV Silicone Rubber Insulator Coatings, *Applied Surface Science*, 258, 2972–2976, **2012**.
19. Momen G., Farzaneh M., Survey of Micro/Nanofiller Use to Improve Silicone Rubber for Outdoor Insulators, *Reviews on Advanced Materials Science*, 27, 1–13, **2011**.
20. Piah M.A.M., Effect of ATH Filler on the Electrical Tracking and Erosion Properties of Natural Rubber-LLDPE Blends under Wet Contaminated Conditions, *Journal of Industrial Technology*, 13, 27–40, **2004**.
21. Sandler S.R., Karo W., Silicone Resins (Polyorganosiloxanes or Silicones), (Chapter 4), *Organic Chemistry*, 29, 114–139, **1977**.
22. Khan H., Amin M., Ali M., Iqbal M., Yasin M., Effect of Micro/Nano-SiO₂ on Mechanical, Thermal, and Electrical Properties of Silicone Rubber, Epoxy, and EPDM Composites for Outdoor Electrical Insulations, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 25, 1426–1435, **2017**.
23. Prabu R., Usa S., Udayakumar K., Khan M., Majeed S.S.M., Electrical Insulation Characteristics of Silicone and EPDM Polymeric Blends, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 14, 1207–1214, **2007**.
24. Bazli L., Eskandarinezhad S., Kakur N., Ramachandran

- V., Bacigalupe A., Mansilla M., et al., Electrical Properties of Polymer Blend Composites Based on Silicone Rubber/EPDM/Clay for High Voltage Insulators, *Journal of Composites and Compounds*, 2, 18–24, **2021**.
25. Youngblood J.P., McCarthy T.J., Ultrahydrophobic Polymer Surfaces Prepared by Simultaneous Ablation of Polypropylene and Sputtering of Poly(Tetrafluoroethylene) Using Radio Frequency Plasma, *Macromolecules*, 32, 6800–6806, **1999**.
26. Wang F., Wen G., Fan F., Zhang T., Li J., Turn Hydrophobic to Superhydrophobic of Composite Insulators by Surface Fluorination, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 1–4, **2016**.
27. Seyedmehdi S.A., Functional Coatings: Superhydrophobic And Conductive Coatings,. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 178, **2011**.
28. Abdollahi Baghban S., Khorasani M., Sadeghi G.M.M., Acoustic Damping Flexible Polyurethane Foams: Effect of Isocyanate Index and Water Content on the Soundproofing, *Journal of Applied Polymer Science*, 136, 47363, **2019**.
29. Abdollahi Baghban S., Khorasani M., Mir Mohamad Sadeghi G., Soundproofing Flexible Polyurethane Foams: Effect of Chemical Structure of Chain Extenders on Micro-Phase Separation and Acoustic Damping, *Journal of Cellular Plastics*, 56, 167–185, **2020**.
30. Abdollahi Baghban S., Khorasani M., Sadeghi G.M.M., Soundproofing Performance of Flexible Polyurethane Foams as a Fractal Object, *Journal of Polymer Research*, 27, 62, **2020**.
31. Abdollahi Baghban S., Khorasani M., Polyurethane Foam Coating Degradation: Mechanisms and Methods of Assessment and Prevention of Degradation, *Basparesh*, 6, 95–106, **2016**.
32. Abdollahi Baghban S., Khorasani M., Flexible Acoustic Polyurethane Foam: An Overview of Physical Structure and Chemical Properties, *Basparesh*, 8, 90–100, **2017**.
33. Park H.K., Yoon S.W., Chung W.W., Min B.K., Do Y.R., Fabrication and Characterization of Large-Scale Multifunctional Transparent ITO Nanorod Films, *Journal of Materials Chemistry A*, 1, 5860, **2013**.
34. Nodehi M., Epoxy, Polyester and Vinyl Ester Based Polymer Concrete: A Review, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7, 64, **2022**.
35. Harvanek L., Tomaskova T., Mentlik V., Trnka P., Modification of Epoxy Resin Used in High-Voltage Technology, *16th International Scientific Conference on Electrical Power Engineering*, 346–349, **2015**.
36. Kumar R., Gupta N., Tracking and Surface Degradation of Barium Titanate Filled Silicone Rubber Nanocomposites, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 495–498, **2015**.
37. Khan H., Amin M., Ahmad A., Yasin M., Erosion/Tracking Resistance Investigation of Micro/Nano-SiO₂ Filled RTV-SiR Composites for Outdoor High Voltage Insulations, *14th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology*, 15–19, **2017**.
38. Wang G., Lu M., Yang H., Zhao Y., Wu L., A Novel Pollution Flashover-Resistance RTV Rubber Coating, *11th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 328–331, **2015**.
39. Meyer L.H., Cherney E.A., Jayaram S.H., The Role of Inorganic Fillers in Silicone Rubber for Outdoor Insulation: Alumina Tri-Hydrate or Silica, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 20, 13–21, **2004**.
40. Ramirez I., Cherney E., Jayaram S., Gauthier M., Nano-filled Silicone Dielectrics Prepared with Surfactant for Outdoor Insulation Applications, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15, 228–235, **2008**.
41. Cherney E.A., Gorur R., Marzinotto M., El-Hag A., Meyer L., George J.M., et al., RTV Silicone Rubber Pre-Coated Ceramic Insulators for Transmission Lines, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20, 237–244, **2013**.
42. Huo Y., Xiu S., Meng L.-Y., Quan B., Solvothermal Synthesis and Applications of Micro/Nano Carbons: A Review, *Chemical Engineering Journal*, 451, 138572, **2023**.
43. Liu X., Wen Y., Chen X., Tang T., Mijowska E., Co-Etching Effect to Convert Waste Polyethylene Terephthalate into Hierarchical Porous Carbon toward Excellent Capacitive Energy Storage, *Science of the Total Environment*, 723, 138055, **2020**.
44. Khorasani M.T., Mirzadeh H., Sammes P.G., Laser Induced Surface Modification of Polydimethylsiloxane as a Super-Hydrophobic Material, *Radiation Physics and Chemistry*, 47, 881–888, **1996**.
45. Cheng J., Cao G.-P., Yang Y.-S., Characterization of Sol-Gel-Derived NiOx Xerogels as Supercapacitors, *Journal of Power Sources*, 159, 734–741, **2006**.
46. Ming W., van Ravenstein L., van de Grampel R., van Genip W., Krupers M., Niemantsverdriet H., et al., Low Surface Energy Polymeric Films from Partially Fluorinated Photocurable Solventless Liquid Oligoesters, *Polymer Bulletin*, 47, 321–328, **2001**.
47. Ming W., Melis F., van de Grampel R., van Ravenstein L., Tian M., van der Linde R., Low Surface Energy Films Based on Partially Fluorinated Isocyanates: The Effects of Curing Temperature, *Progress in Organic Coatings*, 48, 316–321, **2003**.

48. Gao S.-H., Zhou K.-S., Lei M.-K., Wen L.-S., Surface Modification of Silicone Rubber by CF₄ Radio Frequency Plasma Immersion, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 28, 715–728, **2008**.
49. Zhang F., Zhou Y., Li H., Nanocrystalline NiO as an Electrode Material for Electrochemical Capacitor, *Materials Chemistry and Physics*, 83, 260–264, **2004**.
50. Rahul R., Prasad N., Ajith R.R., Sajeesh P., Mini R.S., Kumar R.S., A Mould-Free Soft-Lithography Approach for Rapid, Low-Cost and Bulk Fabrication of Microfluidic Chips Using Photopolymer Sheets, *Microfluidics and Nanofluidics*, 27, 78, **2023**.
51. Tang Z., Liu W., Wang Y., Saleheen K.M., Liu Z., Peng S., et al., A Review on In Situ Monitoring Technology for Directed Energy Deposition of Metals, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 3437–3463, **2020**.
52. Sharma P., Ponte F., Lima M.J., Figueiredo N.M., Ferreira J., Carvalho S., Plasma Etching of Polycarbonate Surfaces for Improved Adhesion of Cr Coatings, *Applied Surface Science*, 637, 157903, **2023**.
53. Chen B., Wu Z., Tian M., Feng T., Yuanwei C., Luo X., Effect of Surface Morphology Change of Polystyrene Microspheres through Etching on Protein Corona and Phagocytic Uptake, *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 31, 2381–2395, **2020**.
54. Gül C., Albayrak S., Elastomeric Nanocoatings, *Polymer Nanoscale Materials Surface Coatings*, Elsevier, Netherlands, 75–90, **2023**.
55. Wang L., A Critical Review on Robust Self-Cleaning Properties of Lotus Leaf, *Soft Matter*, 19, 1058–1075, **2023**.
56. Vourdas N., Tserepi A., Gogolides E., Nanotextured Super-Hydrophobic Transparent Poly(Methyl Methacrylate) Surfaces Using High-Density Plasma Processing, *Nanotechnology*, 18, 125304, **2007**.
57. Ensikat H.J., Ditsche-Kuru P., Neinhuis C., Barthlott W., Superhydrophobicity in Perfection: The Outstanding Properties of the Lotus Leaf, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2, 152–161, **2011**.
58. Abdollahi Baghban S., Ebrahimi M., Khorasani M., Bagheri-Khoulenjani S., Design of Different Self-Stratifying Patterns in a VOC-Free Light-Curable Coating Containing Bio-Renewable Materials: Study on Formulation and Processing Conditions, *Progress in Organic Coatings*, 161, 106519, **2021**.
59. Abdollahi Baghban S., Ebrahimi M., Khorasani M., Bagheri-Khoulenjani S., Tailoring a Variety of Self-Stratifying Patterns in a Light-Curable Coating on the Substrates with Different Surface Free Energies, *Progress in Organic Coatings*, 171, 107023, **2022**.
60. Abdollahi Baghban S., Ebrahimi M., Khorasani M., Bagheri-Khoulenjani S., Self-Stratifying Behavior of a Novel Light-Curable Coating with Gradient Hydrophobic Properties: Computational and Experimental Study, *Progress in Organic Coatings*, 159, 106435, **2021**.
61. Abdollahi Baghban S., A Theoretical and Practical Study of the Influence of (Met)Acrylation on the Solubility Behavior of Radiation Curing Oligomers for Environmentally Friendly Coatings, *Advanced Materials in New Coatings*, 12, 224–237, **2024**.
62. Abdollahi Baghban S., Ebrahimi M., Bagheri-Khoulenjani S., Khorasani M., A Highly Efficient Microwave-Assisted Synthesis of an LED-Curable Methacrylated Gelatin for Bio Applications, *RSC Advances*, 11, 14996–15009, **2021**.
63. Abdollahi Baghban S., Ebrahimi M., Khorasani M., A Facile Method to Synthesis of a Highly Acrylated Epoxidized Soybean Oil with Low Viscosity: Combined Experimental and Computational Approach, *Polymer Testing*, 115, 107727, **2022**.
64. Chen W., Fadeev A.Y., Hsieh M.C., Öner D., Youngblood J., McCarthy T.J., Ultrahydrophobic and Ultralyophobic Surfaces: Some Comments and Examples, *Langmuir*, 15, 3395–3399, **1999**.
65. Wang Y., Xia Y., Electrochemical Capacitance Characterization of NiO with Ordered Mesoporous Structure Synthesized by Template SBA-15, *Electrochimica Acta*, 51, 3223–3227, **2006**.
66. Nakamura T., Kozako M., Hikita M., Inoue R., Kondo T., Experimental Investigation on Erosion Resistance and Hydrophobicity of Silicone Rubber Nanocomposite, *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, 230–233, **2013**.
67. Gao H., Jia Z., Guan Z., Wang L., Zhu K., Investigation on Field-Aged RTV-Coated Insulators Used in Heavily Contaminated Areas, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22, 1117–1124, **2007**.
68. Guo K., Du Y., Wu Y., Mi X., Li X., Chen S., Morphology and FT-IR Analysis of Anti-Pollution Flashover Coatings with Adding Nano SiO₂ Particles, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 274, 012031, **2017**.
69. Tan Y., Du B., Liang C., Guo X., Zheng H., Liu P., et al., Improving Anti-Humidity Property of a SnO₂-Based Chemiresistive Hydrogen Sensor by a Breathable and Hydrophobic Fluoropolymer Coating, *Langmuir*, 38, 13833–13840, **2022**.
70. Belamri Z., Hydrophobic Coatings on Aluminum Substrate Based on Different Metal Oxides: Co₃O₄, ZnO, and MgO, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 60, 390–393, **2024**.

71. Li S., Xu R., Song G., Li B., Fang P., Fu Q., et al., Bio-Inspired (GO + CNTs)-PU Hydrophobic Coating via Replication of Lotus Leaf and Its Enhanced Mechanical and Anti-Corrosion Properties, *Progress in Organic Coatings*, 159, 106414, **2021**.
72. Saji V.S., 2D Hexagonal Boron Nitride (h-BN) Nanosheets in Protective Coatings: A Literature Review, *Heliyon*, 9, e19362, **2023**.
73. Gu H., Guo J., Zhang X., He Q., Huang Y., Colorado H.A., et al., Giant Magnetoresistive Phosphoric Acid Doped Polyaniline-Silica Nanocomposites, *Journal of Physical Chemistry C*, 117, 6426–6436, **2013**.
74. Okonkwo P.C., Ben Belgacem I., Emori W., Uzoma P.C., Nafion Degradation Mechanisms in Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) System: A Review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 27956–27973, **2021**.
75. Shang H.M., Wang Y., Limmer S.J., Chou T.P., Takahashi K., Cao G.Z., Optically Transparent Superhydrophobic Silica-Based Films, *Thin Solid Films*, 472, 37–43, **2005**.
76. Ghosh D., Bhandari S., Chaki T.K., Khastgir D., Development of a High Performance High Voltage Insulator for Power Transmission Lines from Blends of Polydimethylsiloxane/Ethylene Vinyl Acetate Containing Nanosilica, *RSC Advances*, 5, 57608–57618, **2015**.
77. Syakur A., Hermawan, Sutanto H., Determination of Hydrophobic Contact Angle of Epoxy Resin Compound Silicon Rubber and Silica, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 190, 012025, **2017**.
78. Mahdi S.H., Jassim W.H., Hamad I.A., Jasima K.A., Epoxy/Silicone Rubber Blends for Voltage Insulators and Capacitors Applications, *Energy Procedia*, 119, 501–506, **2017**.
79. Chakraborty R., Reddy B.S., Performance of Silicone Rubber Insulators under Thermal and Electrical Stress, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53, 2446–2454, **2017**.
80. Li J., Zhao Y., Hu J., Shu L., Shi X., Anti-Icing Performance of a Superhydrophobic PDMS/Modified Nano-Silica Hybrid Coating for Insulators, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 26, 665–679, **2012**.
81. Nazir M.T., Phung B.T., Hoffman M., Performance of Silicone Rubber Composites with SiO₂ Micro/Nano-Filler under AC Corona Discharge, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23, 2804–2815, **2016**.
82. Liu S., Liu S., Wang Q., Zuo Z., Wei L., Chen Z., et al., Improving Surface Performance of Silicone Rubber for Composite Insulators by Multifunctional Nano-Coating, *Chemical Engineering Journal*, 451, 138679, **2023**.
83. Li J., Wei Y., Huang Z., Wang F., Yan X., Wu Z., Electrohydrodynamic Behavior of Water Droplets on a Horizontal Superhydrophobic Surface and Its Self-Cleaning Application, *Applied Surface Science*, 403, 133–140, **2017**.
84. Amin M., Khattak A., Ali M., Accelerated Aging Investigation of Silicone Rubber/Silica Composites for Coating of High-Voltage Insulators, *Electrical Engineering*, 100, 217–230, **2018**.
85. Farhang F., Ehsani M., Jazayeri S.H., Effects of the Filler Type and Quantity on the Flashover Voltage and Hydrophobicity of RTV Silicone Rubber Coatings, *Iranian Polymer Journal*, 18, 149–157, **2009**.
86. Ghouse S.M., Vijayarekha K., Influence of Nanofillers in Mechanical and Electrical Properties of Polymeric Insulation, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8, 466–473, **2017**.
87. Nazir M.T., Phung B.T., Yu S., Zhang Y., Li S., Tracking, Erosion and Thermal Distribution of Micro-AlN + Nano-SiO₂ Co-Filled Silicone Rubber for High-Voltage Outdoor Insulation, *High Voltage*, 3, 289–294, **2018**.
88. Madidi F., Momen G., Farzaneh M., Development of a Stable TiO₂ Nanocomposite Self-Cleaning Coating for Outdoor Applications, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, **2016**.
89. Chen X., Wang J., Zhang C., Yang W., Lin J., Bian X., et al., Performance of Silicone Rubber Composites Using Boron Nitride to Replace Alumina Tri-Hydrate, *High Voltage*, 6, 480–486, **2021**.
90. Xiaofeng W., Jincheng W., Yi Z., Study on the Structure and Properties of RTV/FR-DOMt Nanocomposites, *Journal of Experimental Nanoscience*, 11, 1058–1073, **2016**.
91. Nazir M.T., Khalid A., Wang C., Baena J.-C., Kabir I., Akram S., et al., Synergistic Effect of Additives on Electrical Resistivity, Fire and Smoke Suppression of Silicone Rubber for High Voltage Insulation, *Composites Communications*, 29, 101045, **2022**.
92. Mohammadnabi S., Rahmani K., Effect of Fabrication Method on the Physical Properties of Carbon-Nanotube/Silicone-Rubber Nanocomposite in High-Voltage Insulators, *Journal of Composite Materials*, 57, 1959–1968, **2023**.

