Review Article

An Overview of the Addition of Nanomaterials to Solve the Problems of Silicone Rubber Polymer Coatings Applied to the Insulators of High-Voltage Power Lines in the Electrical Industry

Polymerization
Quarterly, 2024
Volume 14, Number 2
Pages 16-26
ISSN: 2252-0449

Hamid Reza Koohdar[1] and Nasim Nayeb Pashaee[2*]

1. School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

2. Department of Metallurgy and Mechanical Engineering, Technology and Engineering Research Center, Standard Research Institute (SRI), Karaj, Iran

Received: 17 June 2023, Accepted: 18 October 2023

Abstract

For high-voltage transmission lines near industrial plants and in areas with coastal weather conditions, insulation contamination strongly affects the reliability of the transmission network. Due to the great importance of insulation in power transmission, it is necessary to increase the reliability of these equipment through various methods. Common methods include regular washing and lubrication and use of room temperature vulcanized (RTV) silicone rubber polymer coatings. In the meantime, application of polymer coatings perform have been proposed as an efficient method worldwide, due to their very good performance in polluted environmental, resistant to weathering and suspended particles, as well as prolonging the life and reducing the cost of repairing and replacing insulators. In recent years, several reports have been published on the use of nanotechnology to improve the properties of insulators. Today, the use of RTV-based nanocoatings is common in many countries and has brought good results. Therefore, it seems necessary to assess the feasibility, optimization and selection of the appropriate coating to be applied on the insulators installed in different regions of the country are appropriate according to the specific weather conditions of that region. In this article, the solution of adding nanomaterials to solve the problems of silicone rubber polymer coatings applied on high-pressure insulators in the electrical industry is reviewed. The most common nanoparticles used to improve the properties of the coatings, the role of this filler in improving the properties of the coating, and the existing challenges in the uniform distribution of nanoparticles in the polymer matrix are also explained.

Key Words

**self-cleaning polymer nano coating,
super-hydrophobic,
insulation,
silicone rubber,
increasing lifespan**

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: n.nayebpashaee@standard.ac.ir

مقاله مروری

مروری بر افزودن نانومواد برای رفع مشکلات پوشش‌های پلیمری لاستیک سیلیکون اعمالی بر مقره‌های خطوط فشار قوی صنعت برق

بسپارش
فصلنامه علمی
سال چهاردهم، شماره ۲،
صفحه ۲۶-۱۶، ۱۴۰۳
ISSN: 2252-0449

حمیدرضا کوه‌دار[۱]، نسیم نایب پاشایی[۲*]
۱- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی
۲- کرج، پژوهشگاه استاندارد، پژوهشکده فناوری و مهندسی

دریافت: ۱۴۰۲/۳/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۲۶

چکیده

در پست‌های فشار قوی برق مستقر در مجاورت کارخانه‌های صنعتی و مناطق با شرایط آب و هوایی ساحلی، آلودگی مقره به‌شدت بر قابلیت اطمینان شبکه انتقال اثر می‌گذارد. به‌دلیل اهمیت بسیار زیاد مقره در زمینه انتقال برق، نیاز به افزایش قابلیت اطمینان این تجهیزات با بهره‌گیری از روش‌های مختلف وجود دارد. روش‌های رایج شامل شست‌وشوی دوره‌ای و روغن‌کاری و استفاده از پوشش‌های پلیمری لاستیک سیلیکون ولکانیده در دمای محیط (RTV) است. در این میان، پوشش‌های پلیمری به‌دلیل عملکرد بسیار خوب در شرایط محیطی آلوده، مقاومت دربرابر عوامل جوی و ذرات معلق و همچنین طولانی‌تر کردن عمر و کاهش هزینه تعمیر و تعویض مقره‌ها به‌عنوان روش کارآمدی در دنیا مطرح شده‌اند. در سال‌های اخیر، گزارش‌های متعددی درباره استفاده از علم و فناوری نانو به‌منظور بهبود خواص مقره‌ها ارائه شده است. امروزه استفاده از نانوپوشش‌های برپایه RTV در بسیاری از کشورها موضوعی متداول بوده و بازدهی مناسبی به همراه داشته است. از این رو، امکان‌سنجی، بهینه‌سازی و انتخاب پوشش مناسب برای اعمال روی مقره‌های نصب‌شده در مناطق مختلف کشور متناسب با وضعیت آب و هوایی مختص آن منطقه ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله، راهکار افزودن نانومواد برای رفع مشکلات پوشش‌های پلیمری لاستیک سیلیکون اعمال‌شده بر مقره‌های خطوط فشار قوی استفاده‌شده در صنعت برق مرور شده است. رایج‌ترین نانوذرات استفاده‌شده برای بهبود خواص پوشش‌ها، نقش این پرکننده‌ها در اصلاح خواص پوشش و چالش‌های موجود در توزیع یکنواخت نانوذرات در ماتریس پلیمری نیز بررسی شده است.

حمیدرضا کوه‌دار

نسیم نایب پاشایی

واژگان کلیدی

نانوپوشش پلیمری
خودتمیزشونده،
ابرآب‌گریز،
مقره،
لاستیک سیلیکون،
افزایش طول عمر

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
n.nayebpashaee@standard.ac.ir

مقدمه

برق تولیدی در نیروگاه‌ها به‌وسیله خطوط انتقال هوایی به مراکز پخش و مصرف‌کننده‌ها منتقل می‌شود. بدین منظور، خطوط انتقال باید از پایه‌ها و سایر خطوط برای جلوگیری از اتصال کوتاه جدا شوند که این کار با تعبیه مقره‌ها (عایق‌های الکتریکی) صورت می‌گیرد. مقره‌های فضای باز یکی از اجزای اصلی در سامانه برق هستند، زیرا ایمنی و بهره‌وری عملیاتی سامانه‌های انتقال نیروی الکتریکی را فراهم می‌کنند. بنابراین، جای تعجب نیست که این قطعات باید از نظر قابلیت اطمینان الزامات ویژه‌ای را از جمله خواص ویژه الکتریکی، مکانیکی و شیمیایی برآورده کنند تا سال‌ها قابل اعتماد باشند [۱].

مقره‌های چینی و پلیمری به دلیل دارابودن خواص مکانیکی و الکتریکی قابل قبول به‌طور گسترده در خطوط انتقال و توزیع برق استفاده می‌شوند. مقره‌های پلیمری، حاصل تغییر عمده در طراحی و نوع مواد عایق بوده و مزایای آن‌ها نسبت به مقره‌های چینی و شیشه‌ای باعث جذابیت آن‌ها برای تولیدکننده‌ها شده است [۲]. مقره‌های غیرسرامیکی یا پلیمری مانند لاستیک سیلیکون، مزایای متعددی از جمله خواص عالی چون مقاومت مکانیکی زیاد نسبت به وزن و مقاومت دربرابر خرابی و کاهش هزینه‌های نگهداری نسبت به نوع چینی دارند [۱،۳]. مشکل این مقره‌ها، آب‌دوستی سطح آن‌هاست که مجاورت با آلاینده‌های محیطی مانند نمک‌های محلول در مناطق دریایی، ریزگردها و نیز آلاینده‌های صنعتی، موجب تجمع آن‌ها بر سطح مقره‌ها می‌شود. در مناطق مرطوب، لایه ایجادشده سبب ایجاد قوس الکتریکی و اتصال کوتاه و درنتیجه کاهش طول عمر مقره‌ها می‌شود. موارد زیادی از عدم کارایی مقره‌ها در مناطق مرطوب و آلوده مشاهده شده است. در شرایط جوی مرطوب، نشست ذرات گرد و غبار بر تجهیزات عایقی و در ادامه آن تخلیه الکتریکی روی مقره‌های آلوده تهدید جدی برای قابلیت اطمینان شبکه است که می‌تواند به بروز اختلال در عملکرد شبکه برق‌رسانی کشور منجر شود. همچنین، مقره‌های پلیمری با مشکلاتی همچون ازدست رفتن آب‌گریزی، کاهش ردیابی و مقاومت دربرابر فرسایش و تخریب سطح در شرایط جوی مرطوب مانند مه شدید، باران و باران اسیدی و تخریب شیمیایی تحت تنش‌های متعدد ناشی از ولتاژهای عملیاتی زیاد، تابش فرابنفش و آلودگی مواجه هستند [۱،۴].

در اثر تخلیه الکتریکی، برق خطوط ممکن است تا مدتی قطع شود و خسارات جبران‌ناپذیری به بیمارستان‌ها، کارخانه‌های ماشینی، مراکز مختلف صنعتی و غیره رخ دهد. درباره علت این پدیده می‌توان گفت که در اثر گرد و خاک و رطوبت روی سطح مقرّه، لایه رسانایی روی آن ایجاد می‌شود. بدین ترتیب، جریان برق دچار نشتی می‌شود. ولتاژ فروشکست کاهش می‌یابد. براساس مطالعات انجام‌شده، ازدست رفتن آب‌گریزی در مقره‌های پلیمری تحت تأثیر سه عامل عمده تخلیه الکتریکی، جذب لایه‌های آلاینده و تابش فرابنفش است [۵].

به‌دلیل اهمیت بسیار زیاد مقره در زمینه انتقال برق، نیاز بسیاری به اصلاح این قطعات احساس می‌شود. اساس فعالیت‌های ممکن در این زمینه شامل ارتقای خاصیت آب‌گریزی، مقاومت دربرابر تابش UV و سایر ویژگی‌های مطلوب پوششی است. این کار موجب افزایش مقاومت این قطعات دربرابر عوامل جوی و ذرات معلق و نیز طولانی‌شدن عمر و کاهش هزینه‌های تعمیر و تعویض می‌شود. ایجاد خاصیت خودتمیزی باعث کاهش نیاز به شست‌وشو و کاهش آلودگی‌های ناشی از پخش ذرات آلاینده در محیط از نظر زیست‌محیطی می‌شود [۶].

راهکارهای مختلفی نظیر شست‌وشوی دوره‌ای و استفاده از گریس‌های سیلیکونی برای حل مشکلات مقره‌های فشار قوی به‌کار گرفته شده است. شست‌وشوی دوره‌ای به‌دلیل تعداد زیاد مقره‌ها و گرد و خاک زیاد ناشی از ریزگردها بسیار زمانبر و هزینه‌بر است و از لحاظ فنی و اقتصادی با محدودیت‌هایی روبه‌روست. گریس‌ها نیز عمری در حدود شش ماه دارند و پاک‌سازی دوره‌ای آن‌ها و پوشش‌دهی مجدد مقره‌ها بسیار دشوار و از نظر اقتصادی نامناسب است. روش کارآمدی برای بهبود عملکرد این مقره‌ها، افزودن پوشش پلیمری لاستیک سیلیکون RTV بر سطح آن‌هاست. اعمال این پوشش‌ها به‌عنوان روش جایگزین شست‌وشوی مقره‌ها با آب یا اعمال گریس روی سطح طراحی شده است که به‌صورت عملیات نگهداری دوره‌ای انجام می‌شود. در اکثر محیط‌های آلوده، این پوشش‌ها بدون استفاده از عملیات نگهداری دوره‌ای، ده سال یا بیشتر دوام آورده‌اند. حتی در صورت نیاز به شست‌وشوی دوره‌ای، این عملیات به‌طور درخور ملاحظه‌ای در بازه‌های زمانی طولانی‌تر و با هزینهٔ کمتر صورت می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد، وجود پوشش پلیمری RTV، سبب بهبود خاصیت آب‌گریزی، بهبود ولتاژ تخلیهٔ الکتریکی و جلوگیری ازجریان نشتی می‌شود. اعمال این پوشش‌ها روی چینی یا شیشه، به‌عنوان یکی از بهترین راه‌حل‌ها برای مشکل عملکرد مقره‌ها در نواحی آلوده، مطرح است. افزون بر دلایل فنی موجود، محاسبات انجام‌شده نشان می‌دهد، این روش از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است [۲،۴،۶].

مهم‌ترین ویژگی لاستیک سیلیکون RTV که آن را برای استفاده

گسترده در کاربردهای مختلف الکتریکی مناسب می‌سازد، پایداری گرمایی، مقاومت زیاد دربرابر آلودگی، آب‌گریزی قابل قبول و قابلیت بازیابی آن است. تجربه اولیه با پوشش‌های RTV روی مقره‌ها به‌دلیل تخریب خواص الکتریکی و مکانیکی آن‌ها با گذشت زمان خوب نبود. پوشش‌های پلیمری لاستیک سیلیکون اعمالی روی مقره‌ها، با وجود برخورداری از ویژگی‌های مثبت یادشده، مستعد ورقه‌ورقه شدن در اثر تماس با ترکیبات اسیدی و بازی هستند. پوشش لاستیک سیلیکون، به‌دلیل تخریب دربرابر نور خورشید، گرانی، مشکلات چسبندگی پوشش به زیرلایه و مقاومت به سایش ضعیف آن محدودیت‌هایی دارد [۷].

ماهیت آلی لاستیک سیلیکون باعث مشکلات الکتریکی مانند کرونا، تخلیه جزئی، قوس باند خشک و همچنین تنش‌هایی از جمله مواد شیمیایی، رطوبت، دما، UV و بار چرخه‌ای می‌شود که درنتیجه باعث ردیابی–فرسایش فیزیکی و شکست عایق می‌شود. بنابراین، عملکرد مکانیکی، الکتریکی و همچنین گرمایی عایق می‌تواند تحت تأثیر گرما، UV، تنش‌های مکانیکی و الکتریکی و باران اسیدی قرار گیرد [۷].

مقره‌های پوشش‌یافته با پوشش پلیمری RTV در معرض پیری قرار می‌گیرند. درجه پیری مقره‌های پوشش‌یافته با RTV به سطح آلودگی محیط و ولتاژ سرویس بستگی دارد. قرارگیری درازمدت سطوح پلیمری تحت تأثیر تنش‌های ناشی از آلودگی محیط، تنش‌های مکانیکی و الکتریکی باعث تغییر در ترکیب شیمیایی آن‌ها می‌شود. بنابراین، سطح ماده به‌دلیل فرسایش سطح، خواص الکتریکی آن مانند مقاومت سطح و آب‌گریزی را از دست می‌دهد [۸].

اثر ترکیبی تنش‌های الکتریکی (میدان الکتریکی و جریان نشتی) و تنش‌های محیطی (تابش فرابنفش)، دما، آلودگی و باران اسیدی روند پیرش را سرعت می‌بخشد. لاستیک سیلیکون خالص، مقاومت کمی در ردیابی و فرسایش نشان می‌دهد. به‌منظور افزایش عمر مفید پوشش، برخی از خواص لاستیک سیلیکون باید بهبود یابد. مطابق با مطالعات انجام‌شده، پرکننده‌ها برای بهبود خواص خاص و همچنین کاهش هزینه‌ها به پلیمر اضافه می‌شوند [۸،۹].

یکی از جدیدترین راه‌حل‌ها برای غلبه بر مشکلات پوشش‌های لاستیک سیلیکون، استفاده از نانوپوشش‌ها روی سطح مقره است. نانوپوشش‌های آب‌گریز با ایجاد تغییرات در شیمی سطح و زاویه تماس باعث ایجاد حفاظت سطحی دربرابر آلودگی‌های محیطی، تخریب ناشی از تابش خورشید، تغییرات دمایی و بارش باران می‌شود. استفاده از این نانوپوشش‌ها می‌تواند برای رفع یکی از عمده‌ترین نقاط ضعف مقره‌های سرامیکی، یعنی کارایی ضعیف دربرابر آلودگی و رطوبت، مفید و مؤثر باشد [۸]. اگر سطح مقره با استفاده از نانوپوشش‌ها، آب‌گریز یا ابرآب‌گریز شود، از وقوع جرقه‌های خشک در سطح مقره در اثر آلودگی جلوگیری می‌شود. نانوپوشش‌های ابرآب‌گریز، اکثراً مقرون به صرفه، دوستدار محیط زیست، دارای خاصیت خودتمیزی، مقاوم به نور فرابنفش، ضدشوره، ضدلک و گرد و غبار هستند. بدین دلیل، استفاده از این نانوپوشش‌ها برای رفع یکی از عمده‌ترین نقاط ضعف مقره‌های سرامیکی که تجمع آلودگی و وجود رطوبت است، می‌تواند بسیار مفید و حائز اهمیت باشد. افزون بر این، مقره‌های پوشش‌یافته نیاز کمتری به شست‌وشو دارند که از نظر اقتصادی و بهره‌وری نیز بسیار مهم است [۱۰،۱۱].

طبقه‌بندی پوشش‌های رایج در مقره‌های سرامیکی در شکل ۱ نشان داده شده است. نانوپوشش‌ها به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:

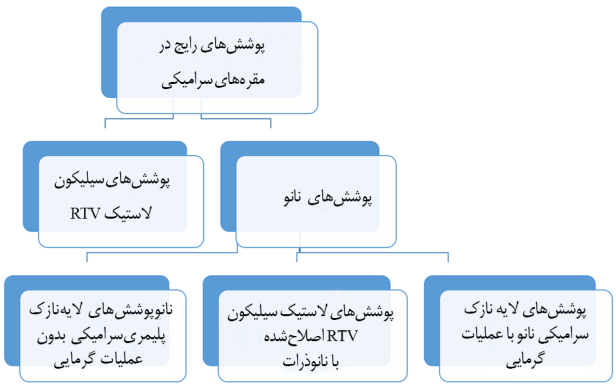
۱- پوشش‌های لاستیک سیلیکون ولکانیده (RTV) در دمای معمولی اصلاح‌شده با نانوذرات با ضخامت چندصد میکرون؛

۲- پوشش‌های لایه‌نازک سرامیکی نانو با عملیات گرمایی (این پوشش‌ها عموماً ضخامت نانومتری دارند)؛

۳-نانوپوشش‌های لایه‌نازک پلیمری–سرامیکی بدون عملیات گرمایی.

بهترین عملکرد را می‌توان از پوشش‌های برپایه سیلیکون ولکانیده در دمای معمولی و اصلاح‌شده با نانوذرات با ضخامت چندصد میکرون (دسته ۱) انتظار داشت [۱۲].

در این مقاله، پژوهش‌های انجام‌شده درباره لاستیک سیلیکون تقویت‌شده با نانوپرکننده‌ها بررسی و رایج‌ترین نانوذرات استفاده‌شده برای بهبود خواص پوشش‌های لاستیک سیلیکون بحث می‌شود. به‌طور خاص، نقش این پرکننده‌ها در اصلاح خواص پوشش پلیمری لاستیک سیلیکون مانند آب‌گریزی سطح،



شکل ۱- طبقه‌بندی پوشش‌های رایج استفاده‌شده در مقره‌های سرامیکی، بازترسیم از مرجع [۱۲].

رسانندگی الکتریکی، رسانندگی گرمایی و گذردهی بررسی شده است. همچنین، چالش‌های موجود در توزیع یکنواخت نانوذرات در ماتریس پلیمری بررسی شده است.

پوشش‌های نانوکامپوزیتی برپایه لاستیک سیلیکون

Feynman مفهوم نانوفناوری را در سال ۱۹۵۹ معرفی کرد [۱]. او ایده دست‌کاری و کنترل ماده را در سطح مولکولی و اتمی (مقیاس نانو) مطرح کرد. هیچ تعریف جهانی پذیرفته‌شده‌ای از نانوفناوری وجود ندارد، اما می‌توان آن را به‌عنوان درک، کنترل و دست‌کاری ماده در مقیاس‌های نانو، به اندازه nm ۱۰۰ برای ایجاد موادی با خواص جدید تعریف کرد. مواد در مقیاس نانومتری، می‌توانند خواص منحصربه‌فرد متفاوتی با حالت ماکرو نشان دهند. بنابراین، نانوفناوری شامل دست‌کاری مواد برای استفاده از این خواص منحصربه‌فرد است. قابلیت بالقوه زیادی برای ایجاد محصولات جدید و بهبودیافته در بخش‌های مختلف صنعتی، از جمله انرژی، مواد شیمیایی و مواد، مراقبت‌های بهداشتی و زیست‌فناوری، الکترونیک و رایانه، ابزار و تجهیزات و همچنین دفاع و امنیت وجود دارد [۱].

پوشش‌های نانوکامپوزیتی برپایه لاستیک سیلیکون، رویکرد نوینی برای بهبود خواص مقره‌های چینی و پلیمری و افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق هستند [۱۰،۱۱،۱۳]. استفاده از نانوذرات برای ایجاد پوشش آب‌گریز روی مقره‌های سرامیکی باعث پس‌زدن آب و روغن از روی آن، جلوگیری از جذب عمقی آلودگی‌ها بر سطح، خاصیت آسان تمیزشوندگی و مقاومت در برابر باران‌های اسیدی، افزایش مقاومت به تابش فرابنفش، ممانعت از خوردگی و یخ‌زدگی، افزایش استحکام و خاصیت عایق‌سازی و آب‌گریز کردن سطح مقره و تمیز باقی‌ماندن تا مدت زمان طولانی می‌شود. هزینه اعمال این پوشش‌ها نسبت به هزینه‌های شست‌وشوی دوره‌ای بسیار کمتر است و صرفه اقتصادی بسیار زیادی دارند [۴،۱۴،۱۵]. گزارش شده است، این روش برای مقابله با آلودگی‌های آنی نیز مؤثر بوده و محدودیتی از نظر میزان آلودگی نامحلول محیط ندارد [۸].

در مطالعات انجام‌شده، دو مفهوم نانو در بهبود عمر مفید مقره‌ها مطالعه شده است:

۱- تقویت خواص بدنه مقره از طریق افزودن نانوذرات برای افزایش عملکرد مکانیکی و الکتریکی؛

۲- کاربرد نانوپوشش‌ها برای افزایش آب‌گریزی و ظرفیت خودتمیزی [۱۶،۱۷].

پرکننده‌ها به‌منظور افزایش عمر مفید و بهبود خواص لاستیک سیلیکون و همچنین کاهش هزینه‌ها به پلیمر اضافه می‌شوند. انواع مختلفی از پرکننده‌ها را می‌توان برای بهبود خواص لاستیک سیلیکون RTV استفاده کرد. این ویژگی‌ها براساس اندازه، نوع و مقدار پرکننده تغییر می‌کند [۱۶،۱۷]. بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد، خواص مواد تابع شکل، اندازه ذرات، غلظت و پیوند عرضی مولکولی و پیوند شیمیایی است [۸].

برای یک ماده معین، هرچه محتوای پرکننده بیشتر باشد، عملکرد بهتری دارد، اما در مقابل ممکن است خواص آب‌گریز آن را مختل کند. دو نوع پرکننده وجود دارد: تقویت‌کننده و بسط‌دهنده. پرکننده‌های نوع تقویت‌کننده مقاومت کششی، سایشی و پارگی و مدول یانگ را بهبود می‌بخشند. مهم‌ترین نوع پرکننده‌های تقویت‌کننده لاستیک سیلیکون عبارت از اسفنج سیلیکا (چندشکلی بی‌شکل از سیلیکون دی‌اکسید)، ایروژل سیلیکا و دوده. پرکننده بسط‌دهنده یک ماده نیمه‌تقویت‌کننده یا خنثی بوده که ممکن است برای ایجاد برخی ویژگی‌های مطلوب و همچنین گسترش فرمول‌بندی استفاده شود. پرکننده‌های بسط‌دهنده متداول عبارت از کوارتز آسیاب‌شده، تیتانیم دی‌اکسید، خاک رس، سفیدکننده، آلومینا تری‌هیدرات (ATH) و روی اکسید است. گزارش شده است، مهم‌ترین نوع پرکننده‌های تقویت‌کننده، سیلیس، ایروژل سیلیکا، نانورس و کربن سیاه هستند [۸].

سازوکار عملکرد آب‌گریزی و خودتمیزی پوشش پلیمری حاوی نانوذرات اعمال‌شده بر مقره در شکل ۲ نشان داده شده است. پوشش نانوکامپوزیتی برپایه لاستیک سیلیکون با ایجاد تغییرات در زاویه تماس باعث ایجاد حفاظت سطح مقره دربرابر آلودگی‌های محیطی، بارش باران اسیدی، تخریب ناشی از تابش خورشید و تغییرات دمایی می‌شود. این پوشش‌ها مقرون به صرفه، دوستدار محیط زیست، دارای خاصیت خودتمیزی، مقاوم به نور فرابنفش، ضدشوره، ضدلکه و گرد و غبار هستند [۱۸].

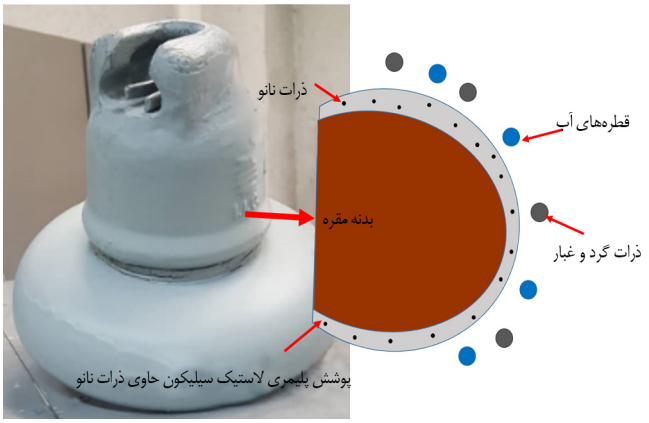
نقش اصلی پرکننده‌ها در کامپوزیت‌های لاستیکی، بهبود خواص مکانیکی و الکتریکی است. چند راه برای بهبود خواص کامپوزیت ابداع شده است:

الف- استفاده از پرکننده‌های اصلاح‌شده (اصلاح‌شده یا عامل‌دار) یا ماتریس‌های پلیمری برای بهبود برهم‌کنش‌های سطح؛

ب- استفاده از پرکننده‌های هیبریدی (هیبرید یا بیش از یک جزء) که آثار هم‌افزایی در کامپوزیت‌ها را نشان می‌دهند؛

پ- استفاده از انواع مختلف پلیمرها (به‌عنوان مثال، الاستومرها، گرمانرم‌ها و گرماسخت‌ها) برای بهبود مدول‌های کامپوزیت؛

ت- استفاده از مخلوط‌های پلیمری.



شکل ۲- عملکرد آب‌گریزی و خودتمیزی پوشش پلیمری حاوی نانوذرات اعمال‌شده بر مقره [؟؟؟].

از میان این موارد، پرکننده‌های هیبریدی که آثار هم‌افزایی را نشان می‌دهند یا برهم‌کنش‌های بین‌سطحی را بهبود می‌بخشند، معمولاً استفاده می‌شوند [۸].

بهبود خواص پوشش‌های نانوکامپوزیتی برپایه لاستیک سیلیکون

در سال‌های اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای برای اعمال نانو و ریزذرات مختلف درون پوشش سیلیکونی انجام گرفته است [۷،۸،۱۹،۲۰]. مطالعات متعددی در رابطه با عایق‌های به‌کاررفته در صنعت برق و استفاده از علم و فناوری نانو به‌منظور بهبود خواص مدانتظار از عایق‌ها، به‌ویژه مقره‌ها، انجام شده است. این مطالعات نشان داده‌اند، پوشش‌های نانوکامپوزیت پلیمری به‌دلیل ثابت دی‌الکتریک زیاد، عایق‌های الکتریکی مناسبی هستند. نانوکامپوزیت‌ها حاوی نانوپرکننده‌هایی هستند که به‌طور یکنواخت در یک ماتریس پلیمری پراکنده شده‌اند. بنابراین، وزن کمتری دارند و خواص فیزیکی-مکانیکی آن‌ها را در مقایسه با عایق‌های سرامیکی بهبود می‌بخشند. بهبود خواص پلیمر با نانوپرکننده‌ها به غلظت، شکل‌شناسی، ساختار، اندازه، درجه پراکنش و جهت نانوذرات در ماتریس پلیمری بستگی دارد. بهبود آب‌گریزی سطحی، رسانندگی الکتریکی، گذردهی نسبی و رسانندگی گرمایی دی‌الکتریک‌های لاستیک سیلیکون از طریق افزودن نانوذرات مناسب، آن‌ها را برای کاربردهای مقره ولتاژ زیاد در فضای باز مفید می‌کند [۲۳-۲۱].

مطالعات متعدد درباره بهبود خواص پوشش‌های لاستیک سیلیکون به‌کاررفته در صنعت برق و استفاده از علم و فناوری نانو به‌منظور بهبود خواص مدانتظار از مقره‌ها وجود دارد [۲۸-۲۴،۲۰،۱۹،۱۰،۷]. در جدول ۱، خلاصه برخی از مطالعات انجام‌شده در زمینه افزودن نانوذرات به لاستیک سیلیکون گزارش شده است. در پژوهش انجام‌شده، اثر افزودن نانوذرات دوده به لاستیک سیلیکون RTV برای تولید پوشش نیمه‌رسانا روی مقره چینی بررسی و اثربخشی این پوشش گزارش شده است [۸]. نانوکامپوزیت حاوی نانوذرات روی اکسید، به‌دلیل خواص نیمه‌رسانا، نوری، الکتریکی و پیزوالکتریک عالی و کاربردهای بالقوه آن در زمینه‌های مختلف می‌تواند نامزد خوبی باشد. مطالعات متعدد درباره بهبود رسانندگی گرمایی و

جدول ۱- مروری بر مطالعات انجام‌شده پیرامون اصلاح سطح نانوذرات [۲۸-۲۴،۲۰،۱۹،۱۰،۷].

پژوهشگران	نانوذره	نتایج	مرجع
Wu و همکاران	SiO_2	بهبود مقاومت‌های برشی و کششی، افزایش سختی شور A و بهبود مقاومت حجمی	۷
مؤمن و همکاران	SiO_2 و ZnO	بهبود آب‌گریزی و مقاومت دربرابر UV	۱۰
ذوالریاستین و همکاران	SiO_2	بهبود خودتمیزی و آب‌گریزی	۲۴
Liao و همکاران	SiO_2	بهبود خودتمیزی و آب‌گریزی	۲۵
Kumar و همکاران	FLG، Fe_3O_4 و TiO_2	بهبود خواص مکانیکی	۲۰
احمدزاده و همکاران	TiO_2	بهبود آب‌گریزی و مقاومت دربرابر UV	۲۶
ذوالریاستین و همکاران	ATH	بهبود آب‌گریزی و مقاومت دی‌الکتریک، افزایش مقاومت حجمی و کاهش مقاومت سطحی	۱۹
Kumar و همکاران	CB و CNT	بهبود خواص مکانیکی	۲۷
سیدمهدی و همکاران		بهبود آب‌گریزی و مقاومت دربرابر UV	۲۸

گذردهی نسبی ماتریس پلیمری با استفاده از نانوذرات روی اکسید گزارش شده است [۸]. در اغلب پژوهش‌های انجام‌شده، ترکیبی از پرکننده‌های نانو، میکرونی و زیرمیکرونی برای افزایش آب‌گریزی سطح مقره‌ها استفاده می‌شود. همچنین بر اهمیت توزیع و پراکنش مناسب نانوذرات در ماتریس پلیمری در بهبود خواص مکانیکی و الکتریکی پلیمرها تأکید شده است [۷،۲۰].

تولیدکنندگان صنعتی از میان پرکننده‌ها بیشتر ATH و سیلیس را برای کاربردهای مقره در فضای باز استفاده می‌کنند. مطالعات متعدد، اثربخشی این پرکننده‌ها را برای بهبود ردیابی و مقاومت دربرابر فرسایش دی‌الکتریک‌های سیلیکونی برای مقره‌های فضای باز بررسی کرده‌اند. تلاش‌های زیادی برای بررسی آثار ویژگی‌های SiO_2 از قبیل درجه، عملیات سطح، نوع، مقدار و سطح پراکنش بر ویژگی‌های RTV انجام شده است. مهم‌ترین عامل، مقدار سیلیس بوده که به‌طور گسترده بررسی شده است [۱۶،۱۷]. به‌دلیل برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی ضعیف زنجیرهای رزین سیلیکونی، خواص مکانیکی این رزین‌ها ضعیف است. برای بهبود آن می‌توان از نانوذراتی مانند سیلیس استفاده کرد. از سوی دیگر، نانوذرات سیلیس برای کنترل دقیق زبری سطح، خواص نوری فوق‌العاده و سهولت حمل و نقل شیمیایی بیش از بقیه نانوذرات استفاده می‌شوند [۱۶]. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از نانوذرات سیلیکا در RTV، مقاومت مقره را دربرابر تخلیه الکتریکی افزایش می‌دهد و باعث بهبود مقاومت ردیابی و فرسایش، به‌ویژه در محیط‌های صنعتی و آلوده، می‌شود. همچنین، نانوذرات سیلیکا خاصیت ابرآب‌گریزی مناسبی دارند که باعث مقاومت مقره دربرابر شکست الکتریکی در شرایط نامساعد جوی مانند بارش باران یا رطوبت نسبی زیاد هوا می‌شود [۱۶،۱۷].

Wu و همکاران [۷]، بهبود کارایی جامع لاستیک سیلیکونی ولکانیده تک‌جزئی (RTV-1 SiR) را با استفاده از ذرات نانو SiO_2 به‌عنوان عامل تقویت‌کننده بررسی کردند. آن‌ها خواص مکانیکی و الکتریکی این نانوکامپوزیت شامل مقاومت‌های برشی و کششی، سختی و مقاومت حجمی را با استفاده از روش تجربی بررسی شد. این پژوهشگران گزارش کردند، افزودن نانوذرات SiO_2 می‌تواند خواص مکانیکی و عایق الکتریکی کامپوزیت SiO_2/RTV-1 SiR را در درجات مختلف بهبود بخشد [۷].

ذوالریاستین و همکاران [۲۴]، در مطالعه‌ای با هدف بهبود عملکرد تجهیزات عایقی صنعت برق، نانوپوشش‌های لاستیک سیلیکون حاوی نانوذرات SiO_2 بهینه‌شده را روی تجهیزات عایقی پست‌های انتقال برق مشیریه تهران و رضوان مشهد اعمال کردند. این تجهیزات به‌دلیل مجاورت با کارخانه‌های سیمان دارای مشکل نشست ذرات گرد و غبار بودند. عملکرد این نانوپوشش پس از گذشت ۹ ماه بررسی شد. گزارش شده است، مقره‌های دارای نانوپوشش از آب‌گریزی مطلوبی برخوردار بودند و در مقایسه با مقره‌های بدون پوشش یا با پوشش معمولی، بسیار راحت‌تر از آلودگی‌ها پاک شدند. در مقره‌های بدون پوشش در برخی مناطق فیلم سخت و پایدار سیمانی تشکیل شد. همچنین در اثر ریزش آب، لایه‌ای پیوسته از رطوبت تشکیل شد که حالت گل‌شدن روی سطح ایجاد کرد و پس از خشک‌شدن نیز آلودگی‌ها از روی سطح برطرف نشدند. در صورتی که در نانوپوشش به‌هیچ عنوان فیلم‌های سخت و پایدار سیمانی تشکیل نشد. از سوی دیگر، پس از ریختن آب فیلم پیوسته‌ای از آب روی سطح ایجاد نشد و بدون تشکیل حالت گلی، آلودگی‌ها از روی سطح برطرف شدند. همچنین، قطره‌های آب دارای زاویه تماس بیش از ۱۳۰° بودند [۲۴].

Liao و همکاران [۲۵]، نوعی پوشش ابرآب‌گریز قوی و انعطاف‌پذیر با استفاده از چسب سیلیکون RTV و ذرات سیلیس با قطرهای مختلف تهیه کردند. پوشش ابرآب‌گریز، زاویه تماس ۱۵۴/۶° را نشان داد. گزارش شده است، این پوشش دارای خواص خودتمیزی عالی و مقاومت دربرابر خوردگی با نرمی و دوام مکانیکی خوب است. ابرآب‌گریزی نمونه حتی پس از یک مجموعه آزمایش با خراشیدن، چکش‌کاری و برش با چاقو حفظ شد. این پژوهشگران گزارش کردند، کاربرد گسترده این نوع پوشش در بسترهای مختلف و استفاده از مواد سازگار با محیط زیست نیز برای تولید در مقیاس بزرگ پوشش مفید است.

Kumar و همکاران [۲۷]، اثر نانوذرات گرافن کم‌لایه (few-layer graphene, FLG) و آهن اکسید (Fe_3O_4) و تیتانیم اکسید (TiO_2) به‌عنوان پرکننده در ماتریس لاستیک سیلیکون RTV (RTV-SR) در دمای معمولی بررسی شد. نتایج نشان داد، افزودن پرکننده‌های هیبریدی FLG، Fe_3O_4 و TiO_2 در RTV-SR خواص مکانیکی و مغناطیسی را بهبود می‌بخشد [۲۷].

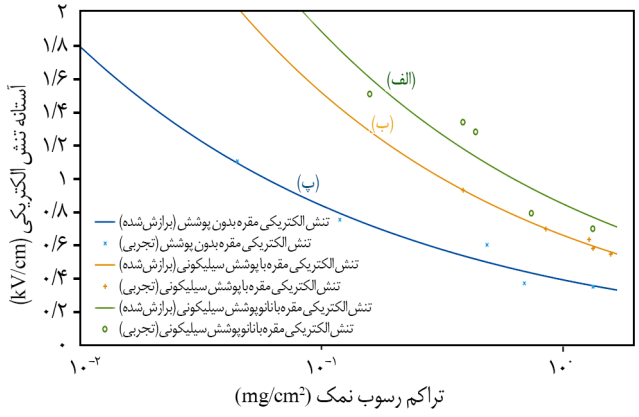
نایب پاشایی و همکاران [۲۹]، دو نوع نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکون (nano-RTV) شامل نانوذرات ZnO و SiO_2 را مطالعه کردند. هدف از این پژوهش، مقایسه مقره سرامیکی بدون پوشش با مقره‌های سرامیکی پوشش‌یافته با RTV متداول و نانوپوشش کامپوزیتی از نظر استقامت الکتریکی آن‌ها در شرایط مختلف آلودگی مصنوعی بود. آن‌ها اثر استفاده از پوشش پلیمری و دو نوع نانوپوشش بهبودیافته را بر آزمون‌های چسبندگی و آب‌گریزی پوشش‌های مدنظر به‌عنوان معیارهای بهبود کارایی مقره

بررسی کردند. مقره‌های پوشش‌یافته و بدون پوشش در سطوح مختلف آلوده شدند و به‌منظور بررسی ولتاژ تخلیه الکتریکی جزئی در اتاقک مه تمیز آزمایش و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج آزمون تخلیه الکتریکی جزئی برای سه مقره سرامیکی بدون پوشش و پوشش‌یافته با RTV و نانوRTV در شکل ۳ نشان داده شده است [۲۹]. در این شکل، محور عمودی مقادیر ولتاژ تخلیه الکتریکی در واحد فاصله نشتی مقره و محور افقی چگالی نشست نمک هم‌ارز (equivalent salt deposit density, ESDD) را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، مقره دارای نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکون RTV بیشترین و مقره بدون پوشش، کمترین ولتاژ تخلیه الکتریکی را نشان می‌دهند. طبق نتایج، احتمال رخداد تخلیه الکتریکی در مقره حاوی نانوپوشش لاستیک سیلیکون، به‌ویژه در محیط‌های بسیار آلوده، کاهش می‌یابد. این مسئله قابلیت اطمینان بیشتری را در سطح شبکه قدرت ایجاد می‌کند.

نتایج آزمون آب‌گریزی در شکل ۴ نشان می‌دهد، زاویه تماس پایا °۱۰۳/۸ برای سطح لاستیک سیلیکون RTV به‌دست آمده که برای پوشش ZnO/RTV به °۱۱۴ و برای پوشش $ZnO\text{-}SiO_2$/RTV به °۱۲۸ افزایش یافته است.

مؤمن و فرزانه [۱۰] در پژوهشی، نوعی پوشش پایدار نانوکامپوزیتی ابرآب‌گریز برپایه لاستیک سیلیکون حاوی نانوذرات ZnO و SiO_2 را مطالعه کردند. زاویه تماس پایا برای سطح ابرآب‌گریز در حدود °۱۶۲ به‌دست آمد. این نوع پوشش دربرابر قرارگیری در معرض تابش فرابنفش، رطوبت و گرما پایداری استثنایی نشان داد. همچنین، پس از غوطه‌وری در محلول‌های آبی پایداری‌های خوب مختلفی مشاهده شد.

Kumar و همکاران [۲۰]، خواص مکانیکی و الکتریکی



شکل ۳- میزان تنش الکتریکی در آلودگی‌های مختلف برای مقره با: (الف) نانوپوشش، (ب) پوشش و (پ) بدون پوشش [۲۹].

نانوکامپوزیت‌های برپایه لاستیک سیلیکون RTV و نانولوله‌های کربن (CNTs) و دوده (CB) رسانا را مطالعه کردند. نتایج حاکی از استحکام مکانیکی بیشتر نمونه‌های حاوی CNT نسبت به نمونه‌های دارای CB بود.

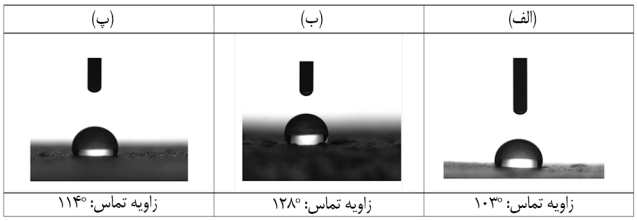
سیدمهدی و همکاران [۲۸]، ساخت نوعی پوشش لاستیک سیلیکون RTV ابرآب‌گریز حاوی ذرات نانوفلوئوریک با زاویه تماس بیش از °۱۴۵ و دوام UV خوب را بررسی کردند. این پژوهشگران گزارش کردند، پوشش لاستیک سیلیکون RTV با غلظت نانوذرات ۱۰ درصد تا ۱۳ درصد وزنی و حداقل ۳۵ درصد وزنی ATH می‌تواند نامزد خوبی برای پوشش‌های عایق RTV ابرآب‌گریز باشد.

معضل تجمع نانوذرات در ماتریس پلیمری لاستیک سیلیکون

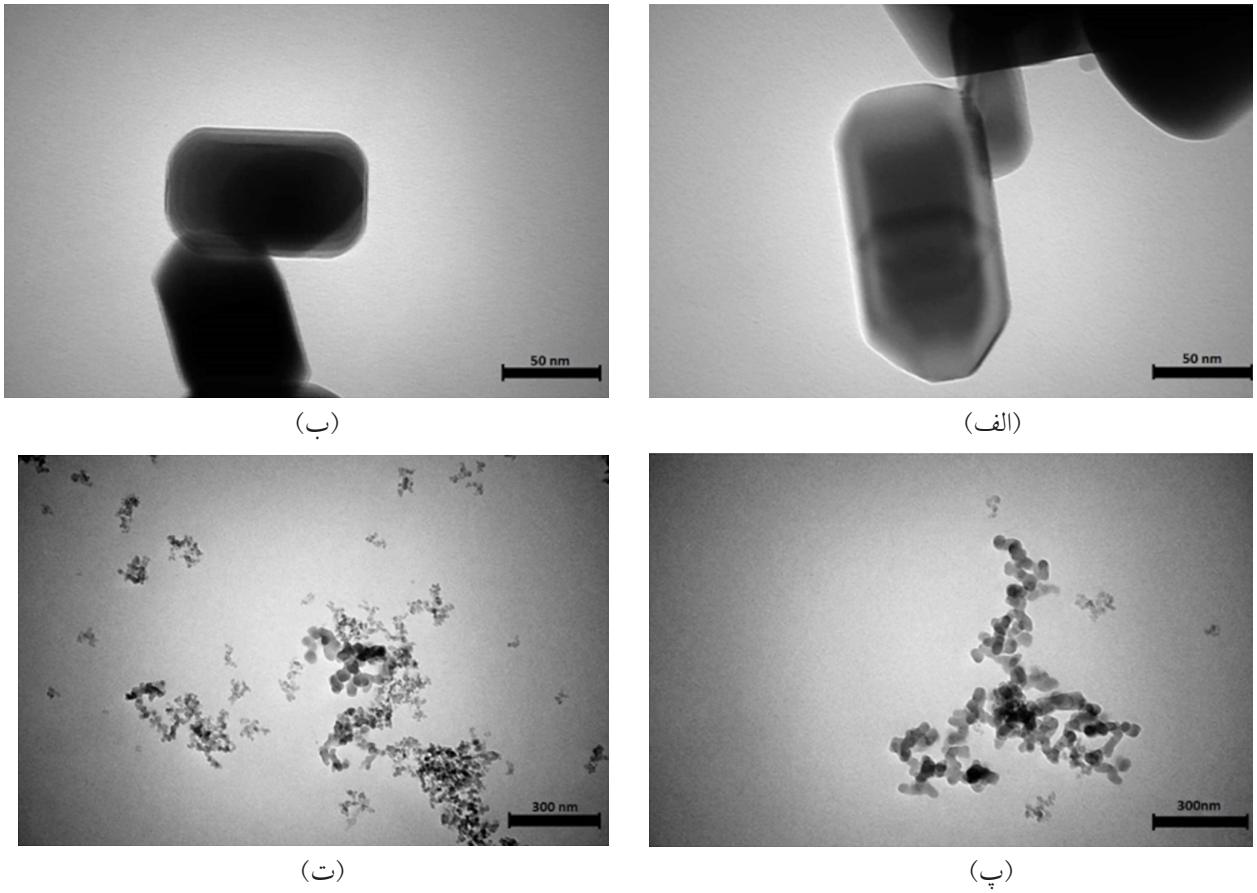
نانوذرات به‌دلیل داشتن انرژی سطح زیاد، تمایل به تجمع و کلوخگی دارند. کلوخگی، نسبت سطح به حجم نانوذرات را تا حد زیادی کاهش می‌دهد و درنتیجه پراکنش نانوذرات در ماتریس را دشوار می‌سازد. میزان کلوخگی، کیفیت پراکنش نانوذرات را نشان می‌دهد. افزایش تعداد و اندازه کلوخه‌ها، خواص ماده را تخریب می‌کند. همچنین، ناپایداری نانوذرات در ماتریس به‌علت کلوخگی، کنترل اندازه نانوذرات را دشوار می‌سازد [۷،۸].

چالش بزرگ در زمینه افزودن نانوذرات به ماتریس پلیمری لاستیک سیلیکون، ایجاد روشی آسان، عملی و صنعتی برای تهیه پوشش‌های ابرآب‌گریز با پایداری خوب دربرابر آثار نامطلوب محیطی است. درباره پایداری این پوشش‌ها برای کاربردهای فضای باز، پژوهش‌های بسیاری انجام نشده است [۱۶،۱۷].

برای بهبود پراکنش نانوذرات در ماتریس پلیمری و جلوگیری از کلوخگی، روش‌های متعددی پیشنهاد شده است. این روش‌ها شامل اصلاح سطح میکرو-نانوذرات (میکرو-نانوپرکننده) با روش‌های فیزیکی و شیمیایی با استفاده از مواد فعال سطحی



شکل ۴- نتایج حاصل از اندازه‌گیری زاویه تماس: (الف) لاستیک سیلیکون RTV، (ب) پوشش nano ZnO/RTV و (پ) nano $ZnO\text{-}SiO_2$/RTV [۲۹].



(ب) (الف)

(ت) (پ)

شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) ذرات: (الف) نانوZnO، (ب) ZnO-APTES، (پ) SiO_2 و (ت) $HMDS\text{-}SiO_2$ [۳۰].

است. گزارش شده است، مواد فعال سطحی به‌شدت بر پراکنش نانوپرکننده اثرگذارند. اما باید میان جذب ماتریس و پراکنش ذرات تعادل وجود داشته باشد. غلظت زیاد ماده فعال سطحی در ماتریس می‌تواند به کاهش خواص جذب منجر شود. بهبود آب‌گریزی سطح، رسانندگی الکتریکی، گذردهی نسبی و رسانندگی گرمایی دی‌الکتریک‌های لاستیک سیلیکون، آن‌ها را برای کاربردهای مقره ولتاژ زیاد در فضای باز مفید می‌سازد [۲۱].

گزارش شده است، برای غلبه بر مشکل پراکنش، نانوذرات را می‌توان بر ساختارهای مختلف نشاند یا در ماتریس‌های مختلف محبوس کرد تا با کاهش کلوخگی، حداکثر سطح تماس ممکن فراهم شده و خاصیت نانوبودن ذرات حفظ شود [۸]. مطالعات نشان می‌دهد، پایدارکننده‌ها را می‌توان در سطح گسترده برای کنترل واکنش‌پذیری و جلوگیری از تجمع نانوذرات استفاده کرد. نایب پاشایی و همکاران [۳۰]، دو نوع نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکون (نانو RTV) شامل نانوذرات ZnO و SiO_2 را مطالعه کردند. آن‌ها با هدف بهبود پراکنش نانوذرات و جلوگیری از کلوخگی، ابتدا نانوذرات ZnO و SiO_2 را به‌ترتیب با استفاده از APTES و HDMS اصلاح سطح کردند. برای اطمینان از عدم اثرگذاری اصلاح سطح بر شکل و ساختار نانوذرات، تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مطابق شکل ۵ بررسی شد. به‌روشنی دیده می‌شود، ساختار نانوذرات در طول فرایند متعادل‌سازی دستخوش تغییر نشده است. همچنین نتایج شناسایی نشان داد، سطح ویژه هر دو نوع نانوذرات پس از عملیات اصلاح سطح افزایش یافته که نشانگر کاهش انرژی سطح و اندازه نانوذرات است. این موضوع حاکی از آن است که تمایل نانوذرات به به‌هم چسبیدگی کاهش می‌یابد و درنتیجه از ویژگی نانوذرات در جهت بهبود خاصیت مدنظر می‌توان بهره برد. نتایج نشان داد، خاصیت چسبندگی پوشش لاستیک سیلیکون با افزودن نانوذرات بهبود یافته است. همچنین، نتایج آزمون اندازه‌گیری زاویه تماس نشان داد، مقره دارای نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکون RTV حاوی نانوذرات SiO_2 بیشترین آب‌گریزی را نشان می‌دهد. برمبنای نتایج، با افزایش میزان آب‌گریزی جریان نشتی کاهش می‌یابد. همچنین، احتمال رخداد تخلیه الکتریکی در مقره حاوی نانوپوشش لاستیک سیلیکون، به‌ویژه در محیط‌های بسیار آلوده کاهش می‌یابد که

قابلیت اطمینان بیشتری را در سطح شبکه قدرت ایجاد می‌کند.

نتیجه‌گیری

معضل آلودگی که به تجمع ذرات گرد و غبار روی تجهیزات عایق و مقره‌های الکتریکی منجر می‌شود، شبکه برق را مختل می‌کند. تخلیه الکتریکی مقره‌های آلوده در شرایط مرطوب، تهدید جدی برای قابلیت اطمینان شبکه است که می‌تواند موجب خرابی و خاموشی شبکه شود. در این راستا، در سال‌های اخیر اهمیت پوشش‌های آب‌گریز و ضدگرد و غبار در صنعت برق افزایش یافته است. مطالعات نشان می‌دهد، با اعمال نانوپوشش بر سطح مقره می‌توان از نشست آلودگی و مشکلات ناشی از تخلیه الکتریکی جلوگیری به‌عمل آورد. همچنین، نانوپوشش افزون بر ایجاد خاصیت آب‌گریزی، خاصیت خودپالایی را نیز ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر، توجه زیادی به تهیه و شناسایی نانوکامپوزیت‌های لاستیک سیلیکون شده است. به‌کارگیری لاستیک سیلیکون مستلزم افزایش عمر مفید و بهبود خواص آن است. اگرچه تلاش زیادی انجام شده است، اما هنوز هم برای دستیابی به مواد کاراتر و با قابلیت بالقوه توسعه بیشتر، نیاز به مطالعات گسترده‌تری وجود دارد. در اغلب پژوهش‌های انجام‌شده، از ترکیبی از پرکننده‌های نانو، میکرونی و زیرمیکرونی برای افزایش آب‌گریزی سطح مقره‌ها استفاده شده است. همچنین بر اهمیت توزیع و پراکنش مناسب نانوذرات در ماتریس پلیمری برای بهبود خواص مکانیکی و الکتریکی پلیمرها تأکید شده است. در این مقاله، راهکار افزودن نانوپرکننده‌ها برای رفع مشکلات پوشش‌های پلیمری لاستیک سیلیکون اعمال‌شده بر مقره‌های فشار قوی استفاده‌شده در صنعت برق بررسی شد. همچنین، نقش این پرکننده‌ها در اصلاح خواص پوشش پلیمری لاستیک سیلیکون مانند آب‌گریزی سطح، رسانندگی الکتریکی، رسانندگی گرمایی و گذردهی بررسی شد. در چند سال آینده، پیشرفت علم و فناوری نانو به ایجاد راه‌حل‌های نوآورانه برای بخش انرژی منجر خواهد شد. مطالعات آتی درباره کاربردهای نانوفناوری در مقره‌های الکتریکی، بر کاهش وزن و اندازه، افزایش ظرفیت عایق، داشتن رفتار سطحی خودترمیمی، کاهش دمای پخت و غیره متمرکز خواهد شد. این مفاهیم، امکان تولید در مقیاس صنعتی پوشش‌های نانو را فراهم می‌سازد. وجود پیوند فنی قوی میان پژوهشگران دانشگاهی و مهندسان با هدف به‌کارگیری یافته‌های پژوهشی در زمینه خواص، عملکرد و سازوکارهای جدید نانومواد در طراحی و ایجاد روش‌های نوآورانه صنعتی برای تولید مقره‌های با ارزش افزوده زیاد در فضای باز، ضروری است.

مراجع

1. Contreras J.E. and Rodríguez E.A., Nanostructured Insulators – A Review of Nanotechnology Concepts for Outdoor Ceramic Insulators, *Ceram. Int*., **43**, 8545–8550, 2017.
2. Wibowo A.B., Increasing the Performances of Various Types' Outdoor Insulators by Using RTV Silicone Rubber Coating, *Int. J. Electr. Eng. Inform*., **4**, 608–619, 2012.
3. Baker A.C., Farzaneh M., Gorur R.S., Gubanski S.M., Hill R.J., Karady G.G., and Schneider H.M., Insulator Selection for AC Overhead Lines with Respect to Contamination, *IEEE Trans. Power Deliv.*, **24**, 1633-1641, 2009.
4. Cherney E.A., El-Hag A., Li S., Gorur R.S., Meyer L., Ramirez I., Marzinotto M., and George J.M., RTV Silicone Rubber Pre-Coated Ceramic Insulators for Transmission Lines, *IEEE Trans. Power Deliv.*, **20**, 237-244, 2013.
5. Yuan X., Lu H., Lan L., Wang H., Wen X., Liao Y., and Zhang F.J., Study on the Effect of Corona on Hydrophobicity Recovery Performance of RTV Silicone Rubber and Its Failure Criterion, *2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Montreal, QC, Canada, 215-218, 2016.
6. Taghvaei M., Sedighizadeh M., NayebPashaee N., and Fini A.S., Reliability Assessment of RTV and Nano-RTV-Coated Insulators Concerning Contamination Severity, *Electer. Pow. Syst. Res.*, **191**, 106892, 2021.
7. Wu L., Wang X., Ning L., Han J., Wan Z., and Lu M., Improvement of Silicone Rubber Properties by Addition of Nano-SiO_2 Particles, *J. Appl. Biomater. Func.*, **14**, 11-14, 2016.
8. Momen G. and Farzaneh M., Survey of Micro/Nano Filler Use to Improve Silicone Rubber for Outdoor Insulators, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **27**, 1-13, 2011.
9. Ansorge S., *Improvement of Silicone Rubber for High Voltage Applications by Addition of Fillers*, PhD Dissertation, ETH Zurich, 2015.
10. Momen G. and Farzaneh M., A ZnO-Based Nanocomposite Coating with Ultra-water Repellent Properties, *Appl. Surf. Sci*., **258**, 5723-5728, 2012.
11. Wang F.F., Yan D.D., Su Y., Lu Y.F., Xia X.F., and Huang

H.M., Research on the Dielectric Properties of Nano-Zno/ Silicone Rubber Composites, *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.*, **231**, 012060, 2017.

12. Zolriasatein A., RajabiMashhadi Z., Rezaei Abadchi M., Riahi Noori N., and Abyazi S., A New Approach Based on RTV/SiO_2 Nano coating to Tackling Environmental Pollution on Electrical Energy Distributions, *J. Renew. Energy Environ*., **9**, 45-51, 2022.
13. Wu L., Wang X., Ning L., Han J., Wan Z., and Lu M., Improvement of Silicone Rubber Properties by Addition of Nano-SiO_2 Particles, *J. Appl. Biomater. Funct. Mater*., **14**, 11-14, 2016.
14. Hussain M.M., Farokhi S., McMeekin S.G., and Farzaneh M., Effect of Cold Fog on Leakage Current Characteristics of Polluted Insulators, *2015 International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, Bangalore, India, 163-167, 2015.
15. Taghvaee M., Nayebpashaee N., and Sedighzadeh M., Proposing Model for Porcelain Insulators Lifespan Estimation Considering Thermal and Electrical Stability in Presence of Contamination, *J. Iran. Ceram. Soc.*, **17**, 61-71, 2021.
16. Zolriasatein A., Rajabi Mashhadi Z., Navazani S., Rezaei Abadchi M., Riahi Noori N., and Abdi N., Investigation of Electrical Properties of Silica-Reinforced RTV Nanocomposite Coatings, *J. Mater. Sci. Mater. Electron*., **32**, 12265-12274, 2021.
17. Zolriasatein A., Navazani S., Abadchi M.R., and Noori N.R., Two-Component Room Temperature Vulcanized Silicone-Rubber (RTV2) Properties Modification: Effect of Aluminum Three Hydrate and Nanosilica Additions on the Microstructure, Electrical, and Mechanical Properties, *J. Mater. Sci. Mater. Electron*., **32**, 8903-8915, 2021.
18. Nobari S., Mokher S.R., Zolriyastin, A., and Alam Dost B., Application of Nano Coatings on Electrical Insulators, *Sixth National Conference on Nano Technology in Electrical Industry*, Tehran, 2017.
19. Zolriasatein A., Navazani S., Rezaei Abdadchi M., and Riahi Noori N., Investigation of the Effect of Adding Aluminum Trihydrate (ATH) Particles on Electrical and Hydrophobic Properties of Two-Part RTV Silicon Rubber, *J. Adv. Mater. Eng*., **39**, 117-128, 2022.
20. Kumar V., Kumar A., Song M., Lee D.J., Han S.S., and Park S.S., Properties of Silicone Rubber-Based Composites Reinforced with Few-Layer Graphene and Iron Oxide or Titanium Dioxide, *Polymers*, **13**, 1-17, 2021.
21. Mirabedini S.M., Mohseni M., Pazoki-Fard S., and Esfandeh M., Effect of TiO_2 on the Mechanical and Adhesion Properties of RTV Silicone Elastomer Coatings, *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.,* **317**, 80-86, 2008.
22. Jia Z., Gao H., Guan Z., Wang L., and Yang J., Study on Hydrophobicity Transfer of RTV Coatings Based on a Modification of Absorption and Cohesion Theory, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **13**, 1317-1324, 2006.
23. Kumar V., Kumar A., Wu R.R., and Lee D.J., Room-Temperature Vulcanized Silicone Rubber/Barium Titanate–Based High-Performance Nanocomposite for Energy Harvesting, *Mater. Today Chem*., **16**, 100232. 2020.
24. Zolriyastin A., Riahi Nouri N., Mahdikhani A., Falah Arani H. and Salarakhili S., Implementation of Silicon Nano Coating Pilot on Insulating Equipment of Selected Substations in Tehran and Mashhad and Evaluation of Field Performance Results, *7th National Nanotechnology Conference in Electricity Industry*, Tehran, 2018.
25. Liao K. and Zhu J., A Facile and Cost-Effective Method to Prepare a Robust Superhydrophobic RTV Silicone Coating, *Coatings*, **11**, 312, 2021.
26. Ahmadzadeh H. and Raisi M., Evaluation of the Use of Nano Ceramic Coating and RTV Silicone Rubber Coating in High Pressure Insulators, *The 10th Joint Conference and the 5th International Conference of the Materials Engineering and Metallurgical Association and the Iranian Casting Scientific Association*, Shiraz, 2015.
27. Kumar V. and Lee D.J., Studies of Nanocomposites Based on Carbon Nanomaterials and RTV Silicone Rubber, *J. Appl. Polym. Sci*., **134**, 2017.
28. Seyedmehdi S.A., Zhang H., and Zhu J., Superhydrophobic RTV Silicone Rubber Insulator Coatings, *Appl. Surf. Sci*., **258**, 2972-2976, 2012.
29. Nayebpashaee N., Taghvaee M., and Sedighzadeh M., The Effect of Surface Modification of ZnO and SiO_2 Nanoparticles and Applying Nano-RTV on Improving the Properties of Porcelain Insulators, *J. Iran. Ceram. Soc.*, **16**, 59-75, 2021.
30. Taghvaei M., Sedighizadeh M., NayebPashaee N., and Fini A.S., Thermal Stability of Nano RTV Vs. RTV Coatings in Porcelain Insulators, *Therm. Sci. Eng. Prog*., **20**, 100696. 2020.