

Polymerization
Quarterly, 2025
Volume 15, Number 2
Pages 53-68
ISSN: 2252-0449

Performance Evaluation of Polymer Coatings for Electrical Insulators in a Highly Air-Polluted Environment

Sahar Abdollahi Baghban

Department of Environmental Research, Dyes and Pigments Faculty, Institute for Color Science and Technology (ICST), Postal Code 1668836471, Tehran, Iran

Received: 15 January 2025, Accepted: 13 April 2025

Abstract

Electrical insulators have the function of supporting the electrical power cables and insulating conductors. The most economical types are ceramic and glass insulators, which have low efficiency due to electrical discharge in humid and polluted areas. Today, lightweight concrete-polymer composite insulators with easy installation have replaced the older generation of insulators, offering high efficiency in areas with polluted and humid air. Polymeric materials including silicone rubber, ethylene propylene diene monomer (EPDM), polyurethane, acrylic, polyester, and epoxy resins have been considered to create self-cleaning and hydrophobic surfaces that can be applied to electrical insulators. In this article, the application of polymer coatings on high-voltage electrical insulators in air-polluted environments to enhance insulation performance and reduce transmission line failures has been reviewed. Reports show that silicone rubber has the highest efficiency for the external insulation of power transmission systems, and its chemical structure, types, and hydrophobicity, as well as its chemical, physical, and mechanical properties have been discussed. Furthermore, the effects of applying micro, nano, and mixture of micro-nano fillers (including inorganic oxides such as silica (SiO_2), zinc oxide (ZnO), and titanium dioxide (TiO_2), and organic fillers) and their concentrations on the electrical properties, weathering resistance, and mechanical strength of polymer coatings applied to insulators were reported. Also, various methods for hydrophobizing surfaces have been described. It was shown that silicone rubber-EPDM coatings containing modified silica nanoparticles, aluminum trihydroxide, silicone oil, UV stabilizers, pigments, and fillers have the highest hydrophobicity (water droplet contact angle of 161°) and self-cleaning properties. These coatings can be effectively applied to high-voltage insulators without the need for continuous washing.

Key Words

electrical insulators,
air pollution,
hydrophobic coating,
self-cleaning coating,
silicone rubber

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: abdollahi-s@icrc.ac.ir

ارزیابی عملکرد پوشش‌های پلیمری برای مقره‌های الکتریکی در محیط‌های با هوای بسیار آلوده

سحر عبدالهی باغبان

تهران، گروه محیط زیست و رنگ، پژوهشکده مواد رنگ‌زا، پژوهشگاه رنگ، کد پستی ۱۶۶۸۸۳۶۴۷۱

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۲۴

مقره‌های الکتریکی به‌عنوان یکی از انواع عایق‌های الکتریکی، وظیفه نگهداری کابل‌های انتقال جریان و عایق‌بندی رساناها را دارند. اقتصادی‌ترین نوع، مقره‌های سرامیکی و شیشه‌ای هستند که به‌دلیل تخلیه الکتریکی در مناطق مرطوب و آلوده کارایی کمی دارند. امروزه مقره‌های کامپوزیتی بتن-پلیمری سبک با نصب آسان، جایگزین نسل قدیم مقره‌ها شدند که در مناطق با هوای آلوده و مرطوب کارایی زیادی دارند. مواد پلیمری شامل لاستیک سیلیکون، مونومر اتیلن پروپیلن دی‌ان (EPDM)، پلی‌پورتان، آکریلیک، پلی‌استر، رزین‌های اپوکسی و غیره برای ایجاد سطوح خودتمیز و آب‌گریز قابل‌اعمال بر مقره‌های الکتریکی در نظر گرفته شده‌اند. در این مقاله، کاربرد پوشش‌های پلیمری بر مقره‌های الکتریکی فشارقوی در محیط‌های با هوای آلوده برای افزایش عملکرد عایق و کاهش خرابی خطوط انتقال، بررسی شده است. گزارش‌ها نشان می‌دهند، لاستیک سیلیکون بیشترین کارایی را برای عایق‌کاری خارجی سامانه‌های انتقال قدرت دارد که ساختار شیمیایی، انواع، خواص آب‌گریزی و شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی آن مرور شده است. همچنین، اثر اعمال پرکننده‌های میکرو، نانو و مخلوط میکرو-نانو (شامل اکسیدهای معدنی مانند سیلیس (SiO_2) ، روی اکسید (ZnO) و تیتانیم دی‌اکسید (TiO_2)) و پرکننده‌های آلی و غلظت آن‌ها بر خواص الکتریکی، هوازدهی و استحکام مکانیکی پوشش‌های پلیمری اعمالی بر مقره‌ها گزارش شدند. همچنین، روش‌های مختلف آب‌گریز کردن سطوح شرح داده شد. نشان داده شد، پوشش‌های لاستیک سیلیکون-EPDM حاوی نانوذرات سیلیس اصلاح‌شده، آلومینیم تری‌هیدروکسید، روغن سیلیکون، پایدارکننده‌های فرابنفش، رنگ‌دانه‌ها و پرکننده‌ها، بیشترین آب‌گریزی (زاویه تماس قطره آب 161°) و خواص خودتمیزی را دارند. این پوشش‌ها قابلیت اعمال بر مقره‌های ولتاژ بالا کارآمد بدون نیاز به شست‌وشوی مداوم را دارند.

چکیده



سحر عبدالهی باغبان

واژگان کلیدی

مقره‌های الکتریکی،
آلودگی هوا،
پوشش آب‌گریز،
پوشش خودتمیز،
لاستیک سیلیکون

مقدمه

مقره‌های الکتریکی به‌عنوان یکی از انواع عایق‌های الکتریکی، از مهم‌ترین اجزای شبکه توزیع جریان برق هستند که مطابق شرایط محیطی (رطوبت و آلودگی موجود در محیط) و ولتاژ اعمالی به آن‌ها انواع گوناگونی دارند. این مقره‌ها وظیفه نگهداری کابل‌های انتقال جریان و عایق‌بندی رساناها را دارند. از این‌رو، مقاومت ویژه مقره‌ها به ولتاژ بالا بین فازها بسیار حائز اهمیت است. همچنین، مقره‌ها باید مقاومت مکانیکی، گرمایی و مقاومت در برابر تغییر شکل زیاد، استقامت در برابر نفوذ آب و هدررفت الکتریکی بسیار کمی داشته باشند [۳-۱]. شکل ۱ تصویری از انواع مقره‌های الکتریکی استفاده‌شده در صنعت انتقال نیرو شامل سوزنی، بشقابی، سنتی، مهار، استوانه‌ای، ویژه و چرخ‌ری را نشان می‌دهد. مقره‌های الکتریکی در سه نوع سرامیکی، شیشه‌ای و کامپوزیتی (پلیمری) در بازار وجود دارند [۲].

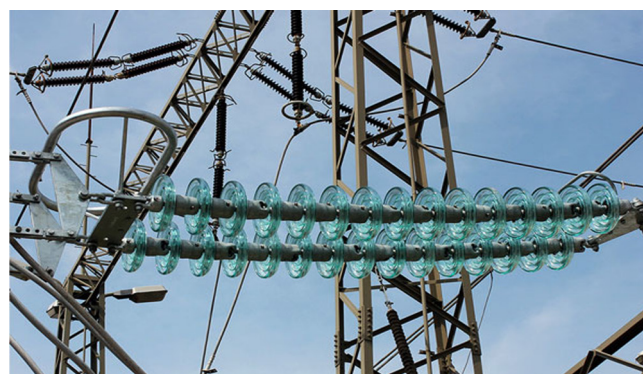
اقتصادی‌ترین نوع مقره‌ها، مقره‌های سرامیکی و شیشه‌ای هستند، چراکه مواد تشکیل‌دهنده مقره‌های سرامیکی شامل کائولن، سیلیکات آلومینیم (فلدسپار) و خاک کوارتز است. همچنین، برای ساخت مقره‌های شیشه‌ای از سیلیس اکسید، اکسیدهای سدیم و پتاسیم و سایر اکسیدها و افزودنی‌ها استفاده می‌شود. اما باید توجه داشت، کارایی این نوع مقره‌ها به دلیل تخلیه الکتریکی در مناطق مرطوب و آلوده، کم گزارش شده است. نشست آلودگی ناشی از ریزگردهای موجود در هوا بر سطح بیرونی مقره و وجود رطوبت در محیط، باعث ایجاد جرقه و شکست الکتریکی می‌شود که به قطع برق شبکه و خسارت‌های اقتصادی منجر می‌شود. منشأ آلودگی هوا می‌تواند عوامل طبیعی مانند گرد و خاک محیط یا منابع آلاینده مصنوعی از جمله فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی یا ساختمان‌سازی باشد [۳]. استقامت الکتریکی مقره‌ها باید به حدی زیاد باشد که در

شرایط محیطی مرطوب (رطوبت زیاد یا بارش باران) و آلودگی هوای زیاد یا اعمال صاعقه با ولتاژ بالا، شکست کامل الکتریکی در آن‌ها رخ ندهد. دو نوع شکست در مقره‌های الکتریکی محتمل است، شکست داخل بدنه (سوراخ شدن) و ایجاد جریان‌های الکتریکی سطحی. در اثر شکست الکتریکی داخل بدنه ممکن است مقره کاملاً سوراخ شود که این شکست تنها در هنگام صاعقه‌های بسیار پر قدرت رخ می‌دهد و رخ دادن آن به جنس مقره، ضخامت بدنه مقره و ناخالصی‌های آن بستگی دارد [۶، ۲]. فرایند اتصال کوتاه و تخلیه الکتریکی حاصل از وجود آلودگی در سه مرحله رخ می‌دهد. این سه مرحله شامل ایجاد لایه‌ای از آلودگی روی سطح و جذب رطوبت، تخلیه الکتریکی اولیه در فصل مشترک مخلوط آلودگی-رطوبت و مقره به دلیل استقامت الکتریکی کم هوا و ایجاد اتصال کوتاه الکتریکی در پی گسترش تخلیه الکتریکی هستند. طی این مرحله، سطح رسانا شده و جریان ناشی بر سطح مقره میان پایه فلزی و رسانا برقرار می‌شود [۳، ۱]. تصویر جرقه‌های سطحی بر سطح مقره در شکل ۲ نشان داده شده است.

جرقه سطحی در مقره و رفتار شکست الکتریکی با پدیده کرونا قابل توضیح است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که چگالی میدان الکتریکی در نزدیکی ماده رسانا به حدی زیاد شود که به ولتاژ بحرانی برسد و هوای مجاور سطح یونیده شود. در ولتاژهای بیش از ولتاژ بحرانی، بهمن الکترونی (electron avalanche) به وجود می‌آید. در شدت‌های زیاد میدان الکتریکی، سرعت الکترون آزاد افزایش و با مولکول‌های هوا یعنی O_2 یا N_2 برخورد غیرکشسان می‌یابد. در این حالت، الکترون به یکی از مدارهای الکترونی اتم موجود در هوا برخورد می‌کند و مولکول‌ها الکترون از دست می‌دهند (پدیده یونش). بدین ترتیب، هریک از این سه مرحله باید برای جلوگیری از اتصال کوتاه الکتریکی کنترل کرد [۳، ۲].



(ب)



(الف)

شکل ۱- تصویری از مقره‌های الکتریکی: (الف) شیشه‌ای [۴] و (ب) سرامیکی [۵] در انواع و ابعاد مختلف.



شکل ۲- جرقه‌های سطحی بر سطح مقره [۷].

رطوبت زیاد، کارایی زیادی دارند. این مقره‌ها سبک هستند و نصب و حمل و نقل آن‌ها بسیار آسان است، ولی قیمت بیشتری دارند. به عبارتی با یافتن اثر مثبت اعمال آلومینیم تری هیدرات (ATH) در مقاومت سایشی و مسیرسازی رسانا (tracking)، تأخیر در آتش‌گیری و مقاومت به اشتعال، امکان تولید مقره‌های پلیمری در سال ۱۹۵۰ میلادی فراهم شد [۲،۳].

نخستین بار در سال ۱۹۴۰ میلادی، رزین اپوکسی مشتق از بیس فنول A برای ساخت مقره الکتریکی ولتاژ بالا استفاده شد. در اوایل دهه ۱۹۷۰، نسل اول مقره‌های پلیمری تجاری از اپوکسی و پلی‌استر ساخته شدند. تا مدت‌ها رزین اپوکسی عموماً برای مقره‌های با کارایی ولتاژ کمتر از ۱۵۰ kV استفاده می‌شد. بعدها رزین اپوکسی برپایه سیکلوآلیفاتیک‌ها با مقاومت تابشی بیشتر به نور فرابنفش استفاده شدند [۱-۳]. به‌طور کلی، مقره‌های کامپوزیتی شامل هسته کامپوزیتی (الیاف شیشه به همراه مواد لاستیکی)، روکش پلیمری و اتصالات هستند. روکش خارجی عموماً مخلوطی از بتن و پلیمرهایی نظیر لاستیک سیلیکون، رزین اپوکسی، EPDM، لاستیک اتیلن پروپیلن (EPR)، پلی‌اتیلن پرچگالی (HDPE)، اتیلن وینیل استات (EVA)، پلی‌یورتان، اسفنج پلی‌یورتان و آمیخته‌های این پلیمرهاست [۱-۳، ۶، ۸]. این روکش‌های پلیمری باید آب‌گریز باشند و میزان جذب آلودگی آن‌ها بسیار ناچیز باشد تا جریان نشی سطحی مقره حاصل از آن‌ها کاهش یابد [۳]. از میان تمام این مواد، لاستیک سیلیکون برای پوشش‌های روی سطح مقره‌های سرامیکی بیشترین کارایی را دارد، چراکه مقاومت مکانیکی و جوی زیادی دارد و نیاز به تعمیر و نگهداری ندارد. با توجه به ملاحظات اقتصادی و فنی، همچنان در سامانه توزیع جریان برق از مقره سرامیکی یا شیشه‌ای به‌وفور استفاده می‌شود. بدین دلیل یافتن راهی برای ارتقای خواص این نوع از مقره‌ها بسیار ضروری است. از میان روش‌های یادشده، اعمال پوشش بر سطح مقره‌های موجود بیشترین کارایی را داشته است [۹-۱۱]. به‌نظر می‌رسد، اعمال پوشش‌های با خاصیت آب‌گریزی و خودتمیزی، مقاومت به خوردگی و مقاومت ویژه زیاد، وزن کم و انعطاف‌پذیری زیاد بر سطح مقره، به‌ویژه پوشش‌های حاوی نانوساختارها، روش مطمئن و طولانی‌مدت برای غلبه بر این مشکل است. در ادامه به انواع پوشش‌های اعمال‌شده روی سطح مقره‌های الکتریکی پرداخته می‌شود.

اعمال پوشش بر سطح مقره‌های الکتریکی

تاکنون بهترین روش برای افزایش عمر کاربری مقره‌ها، اعمال پوشش‌های پلیمری بر سطح مقره‌های شیشه‌ای و سرامیکی

اگرچه با استفاده از روش‌هایی مانند چترک‌افزایی متناسب با هندسه مقره (چترک‌هایی از جنس مواد پلیمری نظیر پلی‌اتیلن، EPDM و لاستیک طبیعی) یا افزایش طول مقره می‌توان فاصله خزشی و ولتاژ جرقه سر به سر (flashover) را افزایش داد، اما نمی‌توان کاملاً بر گسترش جریان‌های نشی، قوس نوار خشک (dry-band arcing) و تخلیه الکتریکی ناشی از آلودگی چیره‌شد [۲، ۳]. از این رو، باید همواره سطح مقره‌ها پاک‌سازی شوند. پاک‌سازی و شست‌وشوی با آب پرفشار، روش بسیار پرهزینه و زمان‌بری است و اقتصادی محسوب نمی‌شود. همچنین، زدودن آلودگی‌ها از روی سطح مقره‌ها می‌تواند با استفاده از تمیزکننده ساینده خشک (dry abrasive cleaner) یا یخ خشک نیز انجام شود. باید گفت، برای ایمنی حین پاک‌سازی باید جریان خط در حال پاک‌سازی کاملاً قطع شود که این کار هزینه‌های سنگینی را تحمیل می‌کند [۲، ۳]. میدان‌های الکتریکی اطراف بدنه مقره دلیل اصلی جذب آلودگی‌ها روی سطح آن است. از این رو به‌عنوان راهکار دیگری برای کاهش میدان‌ها و جذب آلودگی‌ها می‌توان از سیم‌پیچ‌هایی در دو سر مقره استفاده کرد [۲]. راهکار دیگر، استفاده از مقره‌های بتن پلیمری است که هزینه زیادی دارد. امروزه مقره‌های کامپوزیتی بتن-پلیمری جایگزین نسل قدیم مقره‌ها شده‌اند و در مناطقی با آلودگی هوا و

رزین‌های سیلیکونی استفاده‌شده برای پوشش‌دهی سطح مقره الکتریکی

معرفی رزین‌های سیلیکونی

پوشش‌های سیلیکونی، مقاومت‌های گرمایی و جوی و مقاومت به خوردگی زیادی دارند، به طوری که تحت تأثیر دما، شرایط خوردگی و تابش نور فرابنفش قرار نمی‌گیرند. همچنین، همواره سطحی صاف با مقاومت مسیرسازی رسانای نسبتاً زیاد بر سطح مقره پوشش‌یافته فراهم می‌کنند. یادآور می‌شود، گسترش تخریب سطح مقره جامد به دلیل وجود آلودگی‌ها و تخلیه بارهای نقطه‌ای موجب تشکیل مسیر رسانا، ایجاد جریان نشتی و قوس خشک می‌شود که تحت عنوان مسیرسازی رسانا شناخته می‌شود [۲،۳]. از دیگر مزایای رزین‌های سیلیکونی می‌توان به خاصیت ضدچسبش، آب‌گریزی زیاد و خواص ضدکف عالی اشاره کرد. افزون‌براین، لاستیک سیلیکون مقاومت‌های حجمی، سطحی و دی‌الکتریک بسیار زیادی دارند و می‌توانند به عنوان پوشش عایق به کار روند. مطالعات نشان می‌دهد، از این نوع رزین‌ها می‌توان برای احیای مقره‌های ترک‌خورده و خردشده یا حتی سوخته بهره گرفت. تنها استحکام مکانیکی کم و قیمت زیاد آن‌ها سبب محدودشدن کاربری آن‌ها شده است [۲،۳،۹،۱۰].

رزین‌های سیلیکونی ولکانیده در دمای محیط (RTV) از

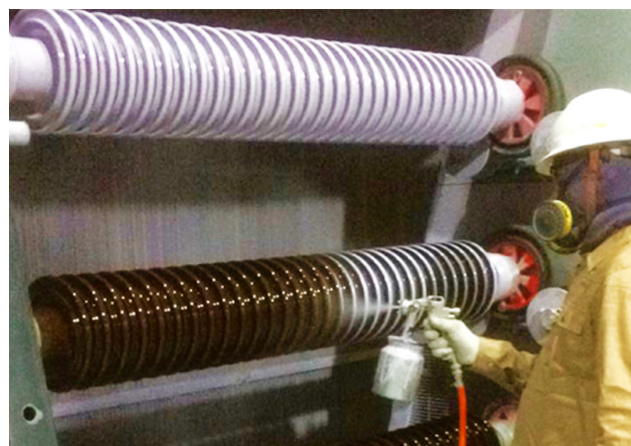


شکل ۴- مقره پوشش‌یافته با رزین سیلیکونی و پاشش قطرات آب روی سطح آن [۲۴].

بوده است. این پوشش‌ها مطابق شکل ۳ یا به طور در محل در حین کاربری یا در محل تولید (پیش از کاربری) می‌توانند بر سطح مقره اعمال شوند [۲،۱۱].

برای انتخاب نوع پلیمر استفاده‌شده در پوشش‌دهی مقره‌های الکتریکی مطالعات زیادی انجام شده است. انواع مختلفی از پلیمرها همچون لاستیک سیلیکون، EPDM، تترافلوئورواتیلن (تفلون)، لاستیک طبیعی، EPR و EVA برای پوشش‌دهی سطح مقره‌ها استفاده شده‌اند [۲،۳،۶]. خلاصه‌ای از مطالعات در حوزه انتخاب بهترین پلیمر برای اعمال و پوشش‌دهی سطح مقره‌های الکتریکی در جدول ۱ گزارش شده است.

معایب و مزایای اغلب ماتریس‌های پلیمری انتخاب‌شده برای اعمال بر سطح مقره‌ها در جدول ۱ درج شده است. مطالعات نشان می‌دهد، EPDM، لاستیک طبیعی و EPR به دلیل پایداری نوری کم در برابر تابش نور فرابنفش گزینه‌های مناسبی برای پوشش‌دهی مقره‌ها نیستند [۱۸]. افزون‌براین، EVA به دلیل داشتن گروه‌های قطبی، خاصیت آب‌گریزی کمتری دارد و در صورت جذب رطوبت، خاصیت آب‌گریزی آن به طور برگشت‌ناپذیر از دست می‌رود [۶]. همچنین مشکل برخی از پلیمرها مانند پلی‌آیلین، رسانندگی الکتریکی زیاد آن‌هاست که کاربرد این پلیمرها را برای پوشش‌دهی سطح مقره‌ها محدود می‌کند [۱۶]. مطالعات درباره فلوئوروپلی‌یورتان‌ها نیز نشان می‌دهد، این نوع پلیمرها چسبندگی مناسبی بر سطح مقره نداشتند و نتوانستند نتایج خوبی در آزمون‌های عملیاتی ارائه کنند [۲۰]. براساس نتایج مطالعات انجام‌شده، رزین‌های سیلیکونی بیشترین کارایی را در میان سامانه‌های استفاده‌شده برای سطح مقره داشته‌اند. از این رو در ادامه تمرکز بیشتری بر معرفی این نوع از سامانه‌های رزینی می‌شود.



شکل ۳- اعمال پوشش پلیمری بر سطح مقره‌های شیشه‌ای یا سرامیکی پیش از کاربری [۱۲].

جدول ۱- انواع پلیمرهای مطالعه‌شده برای پوشش دهی سطح مقده الکتریکی.

نویسنده (سال انتشار)	پلیمر پوششی	روش اعمال	زاویه تماس آب (°)	نتایج آزمون‌های الکتریکی	مزایا	معایب	توضیحات	مراجع
Li (۲۰۰۴)	فلوئوروپلی‌یورتان	افشانش	۱۴۶	-	آب‌گریزی مناسب	مقاومت کم در برابر UV، گرانی و چسبندگی کم به سطح مقده	-	۱۳
	پلی‌بوتادی‌ان	حکاکی، اعمال پلاسمای CF _۴ و غوطه‌وری	۱۵۰	-	قیمت کمتر نسبت به لاستیک سیلیکون	مقاومت کم در برابر UV، چسبندگی کم به سطح مقده، نیاز به استفاده از پایدارکننده‌های نوری و ضداکسنده‌های مختلف	مقایسه پایداری جوی پوشش ابرآب‌گریز پلی‌بوتادی- ان حاوی جاذب‌های نور فرابنفش، زبری مناسب برای دستیابی به آب‌گریزی زیاد ۵۰ μm تا ۲۰۰ μm، درصد وزنی بهینه پایدارسازهای UV و ضداکسنده‌ها ۰/۱ تا ۲۰	
Wang (۲۰۰۶)	رزین آکرلیک	افشانش	۹۰ و ۱۶۰ پس از اصلاح با نانو ذرات	عدم پایداری و قابلیت حفظ خاصیت دی‌الکتریک حتی با وجود نانو ذرات	دسترس‌پذیری آسان به ماتریس پلیمری	امکان حبس آب در پوشش‌های حاوی رزین‌های آکریلاتی پایه‌آبی در صورت پخت نامناسب، آب‌کافت پیوندهای استری و آکریلاتی با وجود رطوبت، جذب آب زیاد گروه‌های قطبی مانند آکرلیک اسید، متاکریلات و غیره	حصول پوشش‌های ابرآب‌گریز با زاویه ۱۶۰° از اختلاط رزین آکرلیکی با نانوکلسم کربنات اصلاح‌شده به‌همراه هپتادکافلوئوروسیل تری-متوکسی سیلان (FAS-17) و پخت در دمای ۱۲۰ °C به مدت ۱۰ min	۱۴
Tang (۲۰۰۸)	پلی‌استر/ملامین	الکتروستاتیک	۸۵	-	قیمت کمتر نسبت به رزین‌های مرسوم بازار، استحکام مکانیکی زیاد و دسترس‌پذیری مناسب	جذب آب زیاد و امکان انجام واکنش آب‌کافت پیوند استری در اثر رطوبت، زاویه تماس کم به دلیل وجود گروه‌های قطبی و پخت در کوره در دمای زیاد (۲۰۰-۲۸۰ °C)	نداشتن قابلیت اعمال در محیط، دستیابی به زاویه تماس ۱۶۰° با اعمال سیلیکا و افزودنی فلوئوری بسیار ریز	۱۵
Guo (۲۰۱۳)	پلی‌آنیلین	غوطه‌وری	۱۵۳	-	قابلیت ایجاد سطح ابرآب‌گریز زیاد، مقاومت به اسید بسیار زیاد حتی در غوطه‌وری طولانی مدت در محلول‌های اسیدی	نداشتن مقاومت ویژه به علت رسانا بودن	زاویه تماس زیاد و پسماند زاویه تماس کم	۱۶
Ghosh (۲۰۱۵)	EVA	ذوب و افشانش با درصد جامد کم	۹۵	مقاومت ویژه سطحی ۱/۳×۱۰ ^{۱۴} Ω.cm	مقاومت مکانیکی زیاد، قیمت مناسب‌تر نسبت به رزین سیلیکونی	داشتن گروه‌های قطبی و آب‌دوست، کاهش آب‌گریزی در صورت اختلاط با رزین سیلیکون	استفاده از مخلوط رزین سیلیکونی و EVA برای افزایش مقاومت مکانیکی پوشش مقده و کاهش قیمت	۶

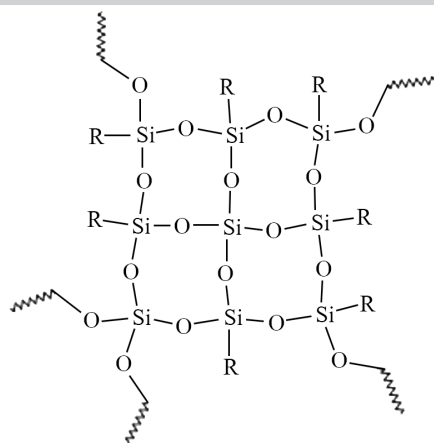
۱۷	ثابت دی الکتریک رزین اپوکسی حاوی میکرو و نانوسیلیکا به ترتیب ۴۲/۲ و ۴۷/۵ kV/mm، مقاومت حجمی رزین اپوکسی حاوی میکروسیلیکا و نانوسیلیکا به ترتیب $10^{16} \times 1/12$ و $10^{16} \times 2/03 \Omega.cm$	دسترس پذیری آسان، قیمت کمتر و استحکام مکانیکی زیاد	عدم پایداری در برابر نور فرابنفش، گچی شدن و پوسته پوسته شدن	ثابت دی الکتریک $38/3 \text{ kV/mm}$ و مقاومت حجمی $5/44 \times 10^{15} \Omega.cm$	-	افشانش دستی	رزین اپوکسی (پخت با پلی آمید یا پلی آمین)	Harvánek (۲۰۱۵)
۱۸	بهبود خواص دی الکتریک پوشش با اعمال میکرو و نانوسیلیکا به ویژه نانوذرات	مقاومت کم در برابر نور فرابنفش، آماده سازی و اعمال سخت	-	استحکام دی الکتریک رزین خالص 32 kV/mm	۱۰۲	دوب پودر و اعمال دستی	EPDM	خان (۲۰۱۷)
	-	استحکام مکانیکی زیاد، قیمت کمتر و دسترسی فراوان	نداشتن پایداری در برابر UV، گچی شدن و پوسته پوسته شدن	استحکام دی الکتریک رزین سیلیکون خالص $22/3 \text{ kV/mm}$	۸۴	افشانش	رزین اپوکسی	
	بهبود خواص دی الکتریک پوشش با اعمال میکرو و نانوسیلیکا به ویژه نانوذرات	خواص مکانیکی و مقاومت سایشی کم، مسیر سازی رسانای کم و قیمت زیاد	خاصیت آب گریزی زیاد، مقاومت جوی مناسب و روش اعمال آسان	استحکام دی الکتریک رزین سیلیکون خالص $19/7 \text{ kV/mm}$ و مقاومت سطحی $10^{16} \Omega.cm$	۱۰۵	افشانش دستی به شکل نیک جزئی	لاستیک سیلیکون	
۱۹	-	جذب آب زیاد و از دست دادن خاصیت ابر آب گریزی، احتمال باقیماندن آب در پوشش به دلیل وجود گروه های قطبی مانند استر، اتر و کربوکسیلات	پایداری بسیار زیاد در برابر نور فرابنفش، مقاومت به سایش بسیار زیاد	-	۱۵۷	افشانش	کوپلیمر سیلیکون آکریلات پایه آبی	Ye (۲۰۱۷)

سیلیکونی است که خاصیت ابر آب گریزی و مقاومت به جریان نشی بسیار زیادی دارد. در این نوع پوشش، آلودگی با بارش باران و پاشش آب به راحتی رفع شده که موجب افزایش طول عمر آن به بیش از ۱۰ سال می شود [۲۳-۲۱، ۲]. در شکل ۴، مقرة پوشش یافته با رزین سیلیکونی با وجود قطرات آب نشان داده شده است.

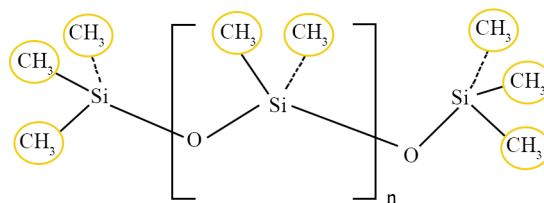
ساختار شیمیایی رزین های سیلیکونی

رزین سیلیکونی یک پلیمر آلی-معدنی با فرمول مولکولی $R_nSiX_mO_y$ است که در آن R گروه های بدون قابلیت واکنش شامل گروه های متیل یا فنیل است. X نیز می تواند هیدروژن (H)، هیدروکسیل (OH)، کلر (Cl) یا آلکوکسی (OR) باشد. استخلاف های زنجیر اصلی سیلیکون، تعیین کننده خواص اصلی رزین هستند. این رزین ها از اولیگوسیلوکسان های شاخه ای یا

سال ۱۹۷۰ میلادی، برای پوشش دهی سطح مقره ها استفاده شدند. در سال ۱۹۷۶ میلادی شرکت آلمانی Rosenthal و در سال ۱۹۸۳ میلادی شرکت آمریکایی Reliable، رزین لاستیک سیلیکون RTV با استحکام الکتریکی در حدود 123 kV را برای پوشش دهی مقره ها معرفی کردند. همچنین در سال ۱۹۸۷ میلادی در حومه شهر کیپ تاون در آفریقای شمالی در خطوط ولتاژ بالا (400 kV) از لاستیک سیلیکون ولکانیده در دمای زیاد (HTV)، استفاده شد. همچنین، در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی، لاستیک سیلیکون مایع برای تولید مقره های کامپوزیت پلیمری مورد توجه قرار گرفت. محصولات مشابه پوشش های مقرة ولتاژ بالا CSL's Si-Coat HVIC، Dow Corning's SYLGARD و Midsun's 570 HVIC توسط شرکت های مطرحی در دنیا طراحی و تولید شدند. در این میان، SYLGARD از جمله پوشش های مطرح



(ب)



(الف)

شکل ۵- ساختار شیمیایی اولیگوسیلوکسان: (الف) شاخه‌ای و (ب) شبکه‌ای [۲۵].

هم حرکت می‌کنند و سیال‌اند. این در حالی است که زاویه پیوند و طول پیوند کربن-کربن به ترتیب 110° و $1.54 \text{ \AA}$ است. بدین دلیل زنجیرهای سیلیکونی مطابق شکل ۷ مارپیچ گونه هستند و گروه‌های متیل این زنجیرها به سمت بیرون جهت‌گیری می‌کنند که سبب کاهش انرژی سطحی رزین حاصل می‌شود. همچنین، پلیمرهای سیلیکونی آب‌گریز هستند، جذب رطوبت ناچیزی دارند و برای ساخت سطوح آب‌گریز استفاده می‌شوند [۶، ۲۲، ۲۳].

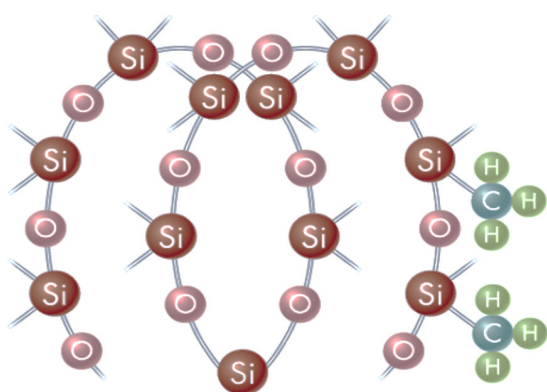
انواع رزین‌های سیلیکونی

رزین‌های سیلیکونی براساس شرایط پخت و تعداد اجزا به انواع مختلف تقسیم می‌شوند که این نحوه تقسیم‌بندی در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل، رزین‌های سیلیکونی به دو صورت ولکانیده در دمای محیط و ولکانیده دمازیاد (HTV) در بازار موجودند و می‌توانند در دمای محیط یا با اعمال گرما ولکانیده و

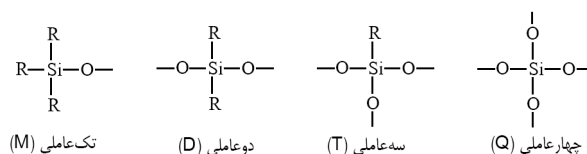
شبکه‌ای، مطابق شکل ۵ تشکیل می‌شوند [۶، ۲۲، ۲۳]. واحدهای سازنده رزین‌های سیلیکونی تجاری عموماً به چهار دسته M، D، T و Q تقسیم می‌شوند که ساختار شیمیایی این مونومرها در شکل ۶ نشان داده شده است.

به‌طورکلی، رزین‌های سیلیکونی صنعتی از مخلوط مونومرهای D و T یا مونومرهای M و Q (M-Q) و مخلوطی از آن‌ها (D-T، M-T-Q، Q-D-T و M-D-T) تهیه می‌شوند. بدین ترتیب، ساختار رزین سیلیکونی حاوی زنجیر اصلی اتصالات معدنی سیلوکسانی (Si-O-Si) و تعدادی شاخه‌های جانبی متشکل از گروه‌های آلی است و به‌عنوان رزین هیبریدی آلی-معدنی تلقی می‌شود. در پلیمرهای آلی، زنجیر اصلی از پیوندهای کربن-کربن با انرژی پیوندی 85 kcal.mol^{-1} تشکیل شده‌اند، درحالی‌که انرژی پیوندها در زنجیر اصلی سیلوکسانی در حدود $106 \text{ kcal.mol}^{-1}$ است. این زنجیر سیلوکسانی مستحکم، علت مقاومت گرمایی و نوری رزین‌های سیلیکونی است [۶، ۲۲، ۲۳]. پیوندهای موجود در رزین سیلیکونی شامل سه نوع پیوند C-H، C-C و Si-O-Si هستند که انرژی پیوندی آن‌ها به ترتیب $337/2$ ، 607 و 798 kJ.mol^{-1} است. به دلیل زاویه پیوند 134° و طول پیوند $1.64 \text{ \AA}$ در زنجیر رزین‌های سیلیکونی، این زنجیرها با نیروهای بین‌مولکولی بسیار کم و سد انرژی چرخشی پائینی کنار یکدیگر قرار دارند. از این رو به راحتی در کنار

فصلنامه علمی، سال پانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴



شکل ۷- ساختار مارپیچ زنجیر سیلوکسانی رزین سیلیکونی [۲۷].



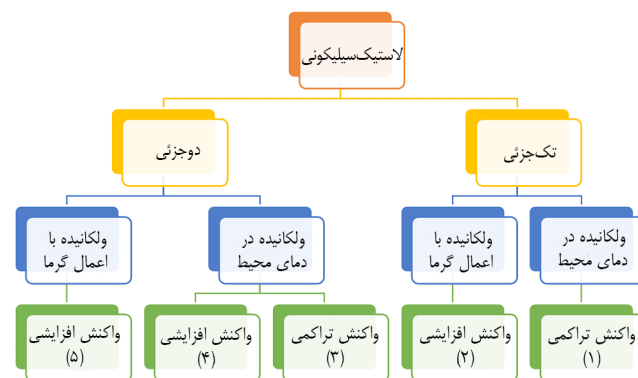
شکل ۶- مونومرهای اصلی سازنده رزین‌های سیلیکونی [۲۵].

گران‌ترند. محدوده کاربری لاستیک‌های سیلیکونی $^{\circ}\text{C}$ ۲۵۰- تا $^{\circ}\text{C}$ ۵۰ است، ولی عمده‌تاً این ساختارهای شبکه‌ای شده در محدوده دمایی بین $^{\circ}\text{C}$ ۴۰- تا $^{\circ}\text{C}$ ۱۸۰ می‌توانند رفتار کشسانی داشته باشند. مقاومت گرمایی ساختارهای سیلیکونی چه به صورت پوشش و چه به صورت قطعه، وابسته به درصد سیلیکون در رزین تشکیل دهنده آن است، به طوری که ترکیبات با فرمول‌بندی خوب می‌توانند دمای $^{\circ}\text{C}$ ۳۵۰ تا $^{\circ}\text{C}$ ۲۵۰ را تا چند هزار ساعت به طور مداوم تحمل کنند. مقاومت زردشدگی (مقاومت به تابش فرابنفش) و گچی شدن پوشش‌های سیلیکونی، حتی با وجود رنگ‌دانه‌های گچی شونده بسیار زیاد است.

پوشش‌های سیلیکونی، با توجه به آب‌گریزی زیاد رزین‌های سیلیکونی، در برابر اکثر ترکیبات شیمیایی آب‌دوست مانند اسیدهای رقیق و نمک‌ها مقاوم‌اند. اما مقاومت حلالی آن‌ها عموماً ضعیف، ولی اصلاح‌پذیر است. گرانروی رزین سیلیکونی به جرم مولکولی و درجه پلیمرشدن آن وابسته است. پلیمرشدن در حین تولید رزین سیلیکونی با سردسازی و رقیق‌سازی مخلوط واکنشگر با حلال متوقف می‌شود. مقاومت ویژه پوشش‌های حاوی رزین‌های سیلیکونی به دلیل نداشتن حامل‌های الکتریکی آزاد، عموماً می‌تواند حتی در معرض رطوبت و دمای زیاد، حفظ شده و از عبور جریان الکتریکی از آن‌ها جلوگیری شود. همین موضوع سبب گسترش کاربرد رزین‌های سیلیکونی در پوشش مقره‌ها حتی در ولتاژهای بالا شده است.

مقاومت دی‌الکتریک شکست، ضریب اتلاف، گذردهی نسبی و مقاومت ویژه حجمی پوشش‌های لاستیک سیلیکون ولکانیده در رطوبت نسبی ۸۵٪ در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۸۵ در مدت تعیین شده در جدول ۲ گزارش شده است. براساس نتایج موجود در این جدول، واضح است که گذردهی نسبی این پوشش‌ها طی زمان تغییر درخور توجهی نداشته است، چراکه رطوبت قابلیت جذب به درون پوشش را ندارد. اما مقاومت دی‌الکتریک شکست، ضریب اتلاف و به ویژه مقاومت ویژه آن طی زمان با جذب رطوبت محیط روی سطح کاهش یافته و مقاومت پوشش نسبت به شکست کاهش یافته است [۶، ۲۲، ۲۳، ۲۸].

به طور کلی، پوشش‌های لاستیک سیلیکون RTV نسبت به HTV‌ها رفتار بهینه‌تری به عنوان پوشش‌های مقره نشان داده‌اند. پلی‌دی‌متیل سیلوکسان از میان انواع پلی‌سیلوکسان‌ها، دسترس‌پذیری بیشتری دارد و ارزان‌تر است. همچنین، خاصیت ابرآب‌گریزی ایجاد می‌کند، از این رو در صنعت بیشترین میزان استفاده را دارد و عموماً مطالعات درباره این نوع از رزین‌های سیلیکونی انجام گرفته است.

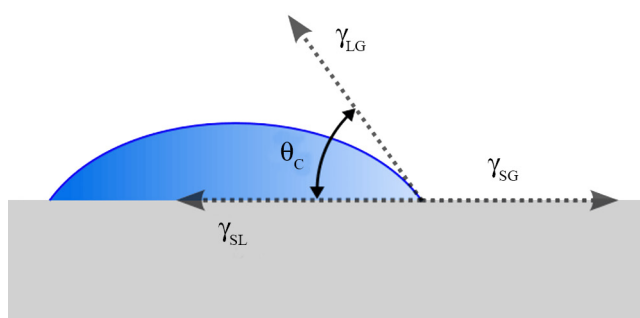


شکل ۸- تقسیم‌بندی رزین‌های سیلیکونی براساس تعداد اجزا و نوع پخت.

شبکه‌ای شوند. همچنین هریک از این دو نوع می‌تواند تک‌جزئی یا دوجزئی باشد که تحت واکنش‌های تراکمی یا اضافی پخت شوند. براساس شکل ۸، مشکل رزین سیلیکونی نوع ۱ و ۳ این است که سرعت پخت در عمق پوشش کم و کنترل سرعت واکنش آن به شدت دشوار است. درحالی‌که سرعت پخت در نوع ۲، ۴ و ۵ بیشتر است و با کنترل بهتری انجام می‌شود. مشکل اصلی نوع ۲ این است که مخلوط باید در دماهای کمتر از $^{\circ}\text{C}$ ۱۰ نگهداری شود. رزین‌های سیلیکونی اعمال‌شده بر زیرآیند با جذب آب موجود در محیط در دمای محیط طی واکنش گروه‌های سیلانول روی زنجیر سیلوکسان پخت می‌شوند. در رزین‌های سیلیکونی HTV، از عوامل شبکه‌ای‌کننده مانند اکسیم‌ها و ترکیبات تیتانیم به عنوان کاتالیزگر پخت استفاده می‌شود. فرایند نفوذ رطوبت و پخت از لایه‌های سطحی شروع می‌شود و با جذب رطوبت بیشتر به عمق لایه‌های زیری پیش می‌رود. حساسیت لاستیک سیلیکون تک‌جزئی به آب‌کافت ناشی از رطوبت در مقایسه با لاستیک سیلیکون دوجزئی بسیار بیشتر است [۶، ۲۲، ۲۳].

خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی رزین‌های سیلیکونی

به طور کلی مواد سیلیکونی، مقاومت شیمیایی زیادی در برابر شرایط محیطی مختلف، به ویژه شرایط اسیدی دارند. همچنین، آن‌ها می‌توانند در برابر گستره وسیع دمایی، مقاومت زیادی نشان دهند. از این رو پوشش‌های سیلیکونی با خاصیت آب‌گریزی و خودتمیزی زیاد می‌توانند به عنوان لایه محافظ در برابر شرایط دمایی، الکتریکی و شیمیایی روی مقره‌های سرامیکی و شیشه‌ای استفاده شوند. رزین‌های سیلیکونی نسبت به سایر رزین‌های آلی، مقاومت به حلال، چقرمگی، چسبندگی و دمای پخت کمتری دارند و نیز



شکل ۹- کشش سطحی جامد-مایع (γ_{SL})، بخار-مایع (γ_{LV}) و بخار-جامد (γ_{SV}) در سامانه قطره-سطح [۳۰].

بررسی خاصیت آب‌گریزی پوشش‌های لاستیک سیلیکون

همان‌طور که گفته شد، سطح مقره‌های الکتریکی همواره در تماس با عوامل آلاینده محیط مانند گرد و خاک و ریزگردها است [۲۹]. اعمال پوشش‌های سیلیکونی بر سطح مقره‌ها، موجب ایجاد خاصیت آب‌گریزی و خودتمیزی می‌شود. در ادامه سازوکار مربوط به این دو خاصیت بررسی می‌شود. مطابق شکل ۹، اگر یک قطره آب روی سطح جامدی گذاشته شود، سه فصل مشترک بخار-جامد (γ_{SV})، جامد-مایع (γ_{SL}) و بخار-مایع (γ_{LV}) به وجود می‌آید. رابطه تعادل سه کشش سطحی حول زاویه تماس تعادلی یانگ (θ_c) قطره با سطح با معادله یانگ به صورت زیر قابل بیان است:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (1)$$

به‌طور کلی، γ_{SL} کمتر از γ_{SV} است، چراکه در γ_{SL} فازها هر دو چگالند، اما در γ_{SV} تنها یک فاز چگال است. زاویه تماس سطوح مختلف بسته به ماهیت سطح می‌تواند از صفر تا 180° باشد. θ برای سطوح ابرآب‌دوست صفر تا 5° ، سطوح آب‌دوست کمتر از 90° ، سطوح آب‌گریز 90° تا 150° و سطوح ابرآب‌گریز 150° تا 180° است. باید به این نکته نیز توجه کرد، در سطوح آب‌گریز و

جدول ۲- خواص الکتریکی پوشش‌های لاستیک سیلیکون [۲۸].

۱۴۴۰ h	۹۶۰ h	۴۸۰ h	۲۴۰ h	اولیه	خاصیت الکتریکی
۳/۶	۲۱	۳۲	۴۰	۵۳	مقاومت حجمی ($\Omega.m$)
۳/۱	۳/۰	۳/۱	۳/۲	۳/۱	گذردهی نسبی در ۵۰ Hz
3×10^{-3}	3×10^{-3}	3×10^{-3}	4×10^{-3}	5×10^{-3}	ضریب اتلاف در ۵۰ Hz
۲۹	۳۰	۳۱	۳۱	۳۲	مقاومت دی‌الکتریک شکست

ابرآب‌گریز، پسماند زاویه تماس (contact angle hysteresis, CAH) و زاویه لغزش بسیار اندک است [۳۱]. برای بررسی رفتار آب‌گریزی-آب‌دوستی سطوح از روش‌های تعیین زاویه تماس پایا (تصویربرداری از قطره آب با حجم مشخص بر سطح)، پویا (اندازه‌گیری زاویه تماس پیشرو و پس‌رو) یا زاویه لغزش و تعیین کشش سطحی با استفاده از مایعات مرجع مختلف استفاده می‌شود [۲۹، ۳۱]. سطوح واقعی عموماً در مقیاس نانومتری یا میکرونی زبر و ناهموارند که به‌عنوان سطوح ونزل (Wenzel) شناخته می‌شوند. از این رو، از معادلات سطوح یانگ با تقریب مناسب برای سطوح ونزل نیز استفاده می‌شود. همچنین مدل Cassie-Baxter نیز برای ارزیابی و بیان دقیق‌تر این سطوح به کار می‌رود. نمونه عینی این سطوح زبر، برگ‌های لوتوس (Lotus) است که زاویه تماس بسیار بزرگ و پسماند زاویه تماس آب بسیار کمی دارند که در واقع اثر آب‌گریزی و حتی اثر خودتمیزی را نیز نشان می‌دهند. به اختلاف زاویه تماس پیش‌رونده و پس‌رونده روی سطح، پسماند زاویه تماس آب گفته می‌شود. سطوح ابرآب‌گریز در گیاهانی همچون کلم، نیلوفر آبی، رازیانه هندی (Indian cress) و بال پروانه‌ها و برخی میوه‌ها موجب ایجاد خاصیتی می‌شود که از تجمع آلودگی روی آن‌ها جلوگیری می‌کند. درحقیقت، سطوح خودتمیزی برای اولین بار با مشاهده دقیق ساختار برگ نیلوفر آبی مورد توجه قرار گرفت. باید بدین نکته توجه کرد، برگ نیلوفر آبی با وجود ظاهر صاف آن، زبری‌های میکرونی و نانویی دارد که به ایجاد خاصیت خودتمیزی در آن منجر شده است [۱۱، ۱۴، ۱۵، ۲۸، ۲۹].

پدیده خودتمیزی با زاویه تماس قابل‌ارائه است. بدین ترتیب، سطوح خودتمیزی به دو دسته ابرآب‌گریز و ابرآب‌دوست تفکیک‌پذیرند. در سطوح ابرآب‌دوست، ساختار شیمیایی آلاینده‌ها در اثر تابش نور خورشید و طی فرایند نورکاتالیزی تجزیه می‌شوند و از بین می‌روند. سپس آب در سطح گسترده می‌شود و بقایای حاصل از فرایند نورکاتالیز را حمل می‌کند. این در حالی است که در سطوح ابرآب‌گریز، سازوکار افزایش سطح ساختار آب‌گریز و

جریان قطرات آب سبب خودتمیزی می‌شود. به عبارتی، قطرات آب بر سطح آب‌گریز سر می‌خورند، آلودگی را می‌برند و سطح را تمیز می‌کنند. از آنجاکه امکانات، فناوری و روش ساخت سطوح ابرآب‌گریز دسترس‌پذیرتر و آسان‌تر است، بیشتر این نوع سطوح برای رفع آلودگی سطح مورد توجه قرار گرفته‌اند.

برای تولید سطوح ابرآب‌گریز می‌توان از دو سازوکار بهره برد:

۱- زبرکردن سطح ماده‌ای با انرژی سطحی کم؛

۲- اعمال ماده‌ای با انرژی سطحی کم روی یک سطح زبر

[۱۱، ۱۴، ۱۵، ۲۸، ۲۹].

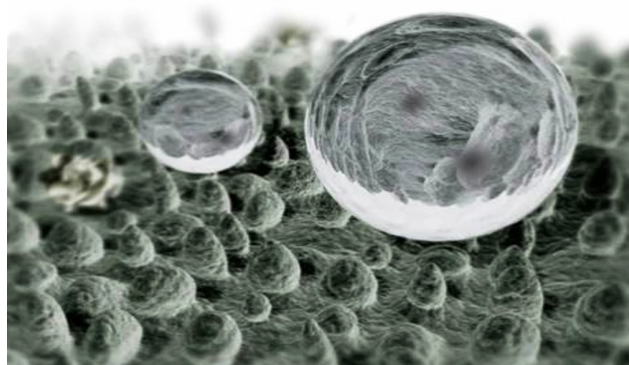
همان‌طور که گفته شد، پوشش‌های خودتمیز نخستین بار با الگوبرداری از سطح برگ نیلوفر آبی مطرح شدند که به‌عنوان اثر لوتوس شناخته می‌شود.

برای تفهیم بیشتر این موضوع، می‌توان به ساختار و الگوهای موجود در سطح برگ این گل توجه کرد. تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپ الکترونی سطح برگ نیلوفر آبی، برآمدگی‌های میکرومتری و نانومتری در سطح را نشان می‌دهند (شکل ۱۰) [۳۲].

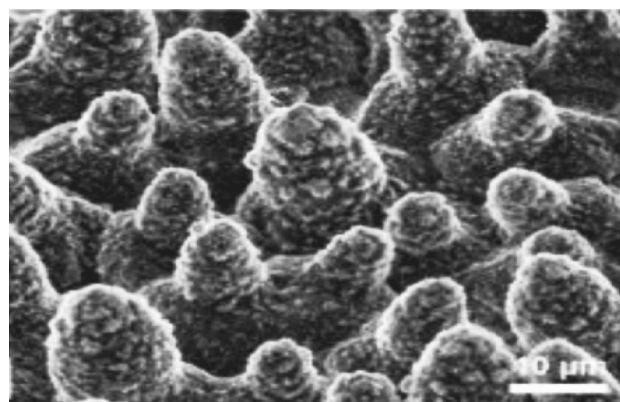
مطابق شکل، زبری‌های میکرومتری و نانومتری در ساختارهای سلسله‌مراتبی و لوله‌های مومی سبب کاهش چسبندگی سطحی میان قطرات آب و سطح برگ نیلوفر آبی می‌شود. از این‌رو زاویه قطره آب با سطح آن بیش از 150° ، زاویه لغزش آن کمتر از 5° و پسماند زاویه تماس با آب آن بسیار کم می‌شود. در این حالت، قطره به شکل توپ روی سطح پدیدار می‌شود و می‌تواند روی سطح به حرکت درآید و بلغزد. در ادامه، قطره لغزنده آلودگی‌های سطح را درون خود فرو می‌برد و سطح را تمیز می‌کند. به عبارتی در این نوع از سطوح، قابلیت خودتمیزی با افزایش خاصیت ابرآب‌گریزی فراهم می‌شود [۳۲]. بدین ترتیب، فناوری خودتمیزی موجب کاهش هزینه‌های مربوط به نگهداری و مدت لازم برای تمیز نگه‌داشتن تجهیزات و نیز سبب افزایش دوام آن‌ها، به‌ویژه مقره‌های الکتریکی می‌شود. به‌عنوان یک نتیجه کلی می‌توان گفت، برای ساخت پوشش‌های ابرآب‌گریز باید از مواد آب‌گریز استفاده کرد، به‌طریقی که ریزساختارها و زبری میکرونی و نانویی روی سطح به‌وجود آید. از این‌رو در ادامه روش‌های مختلف ابرآب‌گریز



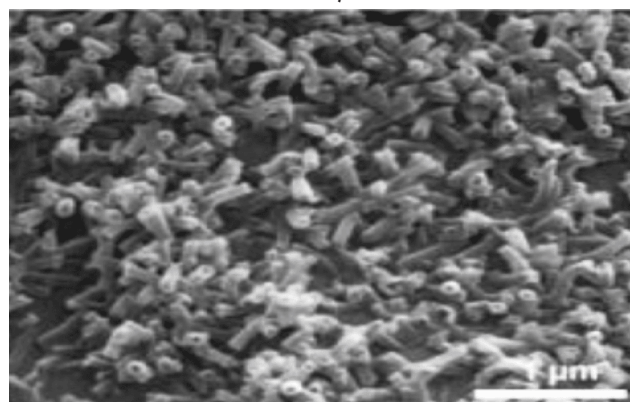
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۱۰- (الف) اثر خودتمیزی و SEM (ب) ساختارهای سلسله‌مراتبی، (پ) سمت بالایی و (ت) لوله‌های مومی برگ نیلوفر آبی [۳۲].

کردن سطوح بررسی می‌شوند.

بازایی خاصیت آب‌گریزی

با توجه به اعمال پوشش‌های لاستیک سیلیکون عموماً در فضا‌های بیرونی، به‌ویژه روی سطح مقره‌های الکتریکی، باید به قابلیت حفظ آب‌گریزی، مقاومت در برابر عوامل جوی و تابش فرابنفش (طول عمر زیاد)، مقاومت فرسایشی، مقاومت در برابر تخریب شیمیایی و فیزیکی آب، کرونا و آزون و نیز چسبندگی آن‌ها به زیرآیند توجه زیادی داشت. همان‌طور که گفته شد، آب‌گریزی پوشش‌های لاستیک سیلیکون از زنجیر مارپیچ سیلیکونی و وجود گروه‌های متیل بر زنجیر ناشی می‌شود. حتی می‌توان با افزودن ترکیبات خاصی، مطابق موارد یادشده به حالت ابرآب‌گریزی نیز دست یافت. حفظ و نگهداری آب‌گریزی سطح، پارامتر مهم دیگری در سطح پوشش است که باید به آن توجه ویژه‌ای داشت. در پوشش‌های سیلیکونی، مهاجرت مولکول‌های با وزن مولکولی کم (LMW) به سطح و مقدار این مولکول‌ها در توده پوشش، موجب حفظ آب‌گریزی سطح می‌شود. همچنین، فاصله LMW از سطح و سهولت حرکت آن‌ها نیز در بازایی خاصیت آب‌گریزی بسیار مهم است. عمدتاً این نوع از پوشش‌ها، مقاومت به ازدست دادن آب‌گریزی بسیار خوبی دارند.

عوامل محرک برای حرکت این LMW‌ها معمولاً تنش‌های الکتریکی و محیطی هستند که به ازدست رفتن این مواد و رفتار آب‌گریزی منجر می‌شود. بدین ترتیب، مقدار مولکول‌های LMW روی سطح، وابسته به برآیند نیروها و تنش‌های اعمال شده است. در نتیجه نوع و مقدار آلودگی روی سطح پوشش بر خاصیت آب‌گریزی سطح به شدت اثرگذار است. سازوکار حفظ خاصیت آب‌گریزی در این نوع از پوشش‌ها بدین شکل است، زمانی که پوشش سیلیکونی روی سطح عایق اعمال می‌شود، لایه‌هایی از آلودگی این سطح را می‌پوشاند و مولکول‌های LMW به درون و سپس به بیرون از لایه آلودگی نفوذ می‌کنند. در این حالت، مولکول‌های LMW به سمت ذرات آلودگی حرکت و در اطراف این ذرات تجمع می‌یابند و به وسیله مولکول‌های LMW کپسولی می‌شوند. از این رو، نوع و مقدار آلودگی و نیز مقدار و رفتار مولکول LMW بر قابلیت نفوذ و سرعت انتقال و در نهایت حفظ خاصیت آب‌گریزی سطح اثر می‌گذارد. در این میان، انتقال این مولکول‌ها از توده به سطح بیش از همه به دلیل ایجاد فشار اسمزی به ساختار شیمیایی ذرات آلودگی وابسته است. نفوذ مولکول‌های LMW از توده به سطح پوشش پس از مدتی خاتمه می‌یابد و پوشش به

نقطه سیرشدگی و عدم بازایی آب‌گریزی می‌رسد. باید گفت، حتی ممکن است LMW‌ها زمانی که به سطح برسند، روی سطح در اثر اکسایش یا تبخیر ازدست بروند. در این حالت، هنگامی که مهاجرت LMW‌ها کاهش می‌یابد و غلظت آن‌ها به حداقل مقدار می‌رسد، احتمال مسیرسازی رسانای سطح زیاد می‌شود [۱۸، ۱۹].

روش‌های مختلف ابرآب‌گریز کردن سطح

روش‌های ابرآب‌گریز کردن سطوح شامل اعمال پوشش‌های پلیمری ابرآب‌گریز، زبرسازی سطح با استفاده از مواد آلی و معدنی (الگوی ساختاریافته میکرو-نانو)، حکاکی و لیتوگرافی، برنشانی پلاسما، پوشش‌دهی چرخشی کنترل شده، خودگردایش، جدایی فازی و روش سل-ژل است [۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳]. یکی دیگر از روش‌های ایجاد سطوح آب‌گریز، استفاده از فرایند خودلایه‌بندی (self-stratification) است. در این نوع فرایند، اجزای سازنده پوشش طی تشکیل فیلم به لایه‌های مجزا تقسیم می‌شوند. به عنوان مثال، پوشش‌های تابش‌پز آب‌گریز مختلف با درجات گوناگون از مخلوط ژلاتین متاکریل دارشده و روغن سویای اپوکسیدی آکریل دارشده طی واکنش پلیمرشدن رادیکال آزاد در حین تابش نور مرئی به دست آمدند [۳۲-۳۴].

تا به امروز پوشش‌های آب‌گریز متنوعی از پلیمرهای پلی‌تترافلوئورواتیلن (PTFE)، سیلیکون، پلی‌بوتادی‌ان، پلی‌ایمید، پلی‌ایزوپرن، آکریلونیتریل-بوتادی‌ان-استیرن (ABS)، پلی‌بوتادی‌ان-b-پلی‌استیرن و سیلیکون-پلی‌ایمیدها تولید شده‌اند. از میان این پلیمرها، سیلیکون‌ها و فلوئوروپلیمرها برای ساخت سطوح ابرآب‌گریز به دلیل داشتن انرژی سطحی کم، بیشترین کارایی را داشته‌اند. از روش‌های لیتوگرافی نرم (soft lithogra-phy) برای آب‌گریز کردن پلی‌دی‌متیل سیلوکسان (PDMS)؛ حلال‌گرمایی (solvothermal) و پلیمرشدن درجا برای PDVB؛ حکاکی برای آب‌گریز کردن پلی‌متیل متاکریلات (PMMA)، پلی‌استیرن، پلی‌اتیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌کربنات؛ برنشانی درجا برای آب‌گریز کردن پلی‌آنیلین (PANI)، تابش یونی برای آب‌گریز کردن نفیون و غیره استفاده شده است.

سیلیکا رایج‌ترین ماده برای زبرسازی و ابرآب‌گریز کردن سطح است. در این میان، نانوذرات سیلیکای آب‌گریز به دلیل داشتن خواص نوری مناسب، کنترل دقیق زبری سطح و سهولت عملیات آماده‌سازی شیمیایی بیش از سایر نانوذرات مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳]. به‌طور مثال، Guo و همکاران با استفاده از رزین آکریلیک، سیلیکون و سیلان‌های آلی اصلاح‌شده با ذرات

سیلیکای در حدود ۲۰ nm موفق به ساخت پوشش ابرآب‌گریزی شدند که پس از ۲ h پخت‌شدن در دمای ۸۰ °C، پسماند زاویه تماس آب کمتر از ۵° داشت [۳۵]. همچنین از ZnO ، TiO_2 ، تانتالیم پنتااکسید (Ta_2O_5)، کبالت اکسید (Co_3O_4)، قلع اکسید (SnO_2)، قلع-ایندیم اکسید (ITO)، بور نیتريد (BN)، نانولوله کربن (CNT) نیز برای آب‌گریز کردن سطوح با روش‌های مختلف استفاده شده است. براساس گزارش‌های منتشرشده، برنشانی پلاسما مؤثرترین روش برای دستیابی به سطوح با ساختار میکرو-نانو است. روش‌های حکاکی سطح برای ایجاد زبری روی آن به سه دسته شیمیایی، پلاسما (امواج پلاسمای ضربانی و پیوسته در فشار اتمسفری یا زیر آن) و لیزری تقسیم می‌شود [۳۲-۳۴، ۱۸، ۲۸]. McCarthy و همکاران سطح ابرآب‌گریزی با زاویه تماس پیش‌رونده ۱۷۴° و زاویه تماس پس‌رونده ۱۷۳° با استفاده از پلیمرشدن پلاسمایی ۴،۴،۳،۳،۲-هپتافلوروپتیل آکریلات روی سطح پلی‌اتیلن ترفتالات به‌دست آوردند. همچنین، آن‌ها سطح پلی‌پروپیلن را بدین روش با PTFE زبر کردند و زوایای تماس پیش‌رونده ۱۷۲° و پس‌رونده ۱۶۹° را به‌دست آوردند. نتیجه‌گیری شد، ابرآب‌گریز کردن سطح با استفاده از روش پلاسما حتماً باید با وجود ترکیبات فلئوروکربن مانند سولفور هگزا فلئورید (SF_6)، تری فلئورو متان (CHF_3) و کربن تترافلئورید (CF_4) در گاز واکنش‌دهنده صورت گیرد.

Guo و همکاران، اتم‌های فلئور را روی سطح لاستیک سیلیکون با استفاده از پلاسمای CF_4 اعمال کردند و توانستند به زاویه تماس آب ۱۵۰° دست یابند [۳۵]. روش دیگر آب‌گریز کردن سطوح میکرو-نانو، لیتوگرافی (نورلیتوگرافی و لیتوگرافی‌های باریکه الکترونی، تابش ایکس، نرم و نانوکره) است [۳۶]. در سال ۲۰۰۵، خراسانی و همکاران از لیزر ضربانی-کربن دی‌اکسید برای آب‌گریز کردن سطح PDMS استفاده کردند و با تغییر آرایش زنجیرها و حفره‌های روی سطح پلیمر به زاویه تماس ۱۷۵° دست یافتند [۳۷]. همچنین، برای تهیه سطوح با زبری‌های متفاوت می‌توان از روش سل-ژل استفاده کرد که روش ساده و تنظیم‌پذیر با مواد شیمیایی مختلف بوده و از روش‌های عمل‌آوری متنوع است. فرایند سل-ژل فن شیمیایی تر برای تولید ژل است که از محلول‌های شیمیایی یا پراکنه‌های کلئیدی (سل) به‌دست می‌آیند. پوشش‌های آب‌گریز تجاری حاصل از فرایند سل-ژل معمولاً با روش اصلاح سل-ژل با فلئوروپلیمرها مانند فلئوروآلکیل سیلان (FAS)، تتراتیل ارتوسیلیکات (TEOS)، ۳-گلیسیدوکسی‌پروپیل تری‌متوکسی سیلان (GPTMS)، ۳-متاکریلوکسی‌پروپیل تری‌متوکسی سیلان

(MPS)، کلئید سیلیکا (هپتادکافلئورو-۲،۲،۱،۱-تتراهیدروسیل) تری‌اتوکسی سیلان و متیل‌تری‌اتوکسی سیلان (MTES) یا PDMS تولید می‌شوند. یکی دیگر از روش‌های آب‌گریز کردن سطح، ایجاد بلورینگی و تغییر محتوای بلور است [۱۹، ۱۸، ۴-۲].

بهبود خاصیت ابرآب‌گریزی در پوشش‌های سیلیکونی

همان‌طور که گفته شد، می‌توان از ترکیب پلیمرهای متفاوت با خواص منحصربه‌فرد، پوششی با خواص آب‌گریزی و مکانیکی و سایر خواص بهینه ایجاد کرد. به‌عنوان مثال، EPDM مقاومت مکانیکی، مسیرسازی رسانا و مقاومت فرسایشی مناسبی دارد. اما مقاومت سطحی و حجمی الکتریکی آن در برابر سامانه سیلیکونی کمتر است و مقاومت جوی مطلوبی ندارد. از سوی دیگر، رزین سیلیکونی مقاومت ویژه مناسب، خاصیت ابرآب‌گریزی، بازایی آب‌گریزی و مقاومت جوی زیادی دارد. از این‌رو، سامانه پوشش هیبریدی سیلیکون-EPDM در صورت اعمال مناسب می‌تواند خواص قابل‌قبولی ارائه کند. افزون‌براین، از کاپلیمر سیلیکون-EPR و سیلیکون-EPDM برای پوشش‌دهی سطح مفره‌ها زیاد استفاده شده است [۱۸، ۲، ۳].

مطالعات نشان می‌دهند، از روش‌های یادشده در بخش پیشین نیز برای ارتقای خاصیت آب‌گریزی پوشش‌های سیلیکونی به‌وفور استفاده می‌شود. Nakamura و همکاران در سال ۲۰۱۳ اعلام کردند، ذرات میکروسیلیکا با وجود ذرات $\text{Al}(\text{OH})_3$ در سامانه پلی‌سیلوکسانی عملکرد آب‌گریز کردن سطح بیشتری نسبت به پوشش سیلیکونی با اعمال نانوسیلیکای تنها داشته است. همچنین آن‌ها اثبات کردند، میزان بهبود خواص ناشی از نانوذرات به نوع، اندازه، غلظت و نحوه جهت‌گیری و توزیع آن‌ها در ماتریس پلیمری وابسته است [۳۸].

Jayaram و Meyer و سایر همکاران در سال ۲۰۰۴، اثر غلظت روغن سیلیکونی بر پوشش‌های لاستیک سیلیکون RTV را بررسی کردند. آن‌ها اظهار داشتند با افزایش مقدار روغن، مقاومت جوی پوشش کاهش می‌یابد. همچنین، اثر وجود آلومینا تری‌هیدرات (ATH) (۷۰-۴۰ درصد وزنی) و نانوذرات TiO_2 در RTV بررسی شد. نتایج نشان داد، پوشش لاستیک سیلیکون RTV حاوی نانوذرات TiO_2 (۱۳-۱۰ درصد وزنی) و ATH (۳۵ درصد وزنی) ابرآب‌گریزی مناسبی برای کاربرد روی سطح مفره‌ها دارد. ATH گرمای زیاد با آزاد کردن آب محبوس در ساختار و ایجاد آلومینیم اکسید (Al_2O_3) از گسترده‌شدن آتش ممانعت می‌کند [۳۹].

نتیجه گیری

ارزیابی عملکرد پوشش های پلیمری برای مقره های الکتریکی ...

تخلیه الکتریکی در مقره های الکتریکی و کارا نبودن آن ها در مناطق با آلودگی هوا و رطوبت زیاد از مشکلاتی است که سبب قطعی برق و خسارت های جبران ناپذیر می شود. برای مقابله با این مشکلات، روش های مختلف مانند شست و شوی سطح مقره ها، استفاده از سیم پیچ الکتریکی، چترک افزایی و تولید مقره های کامپوزیت پلیمری مطرح شدند. از میان تمام این روش ها، پوشش دهی سطوح مقره ها با استفاده از مواد پلیمری مانند لاستیک سیلیکون، لاستیک طبیعی، EPDM، EPR یا EVA، اپوکسی، پلی اتیلن پرچگالی، پلی استر-مالمین، پلی آنیلین، فلئوروپلی یورتان ها، پلی بوتادی ان و آمیخته های این پلیمرها برای پوشش دهی سطح مقره ها بیشترین کارایی را داشته است. این پوشش ها باید آب گریز با میزان جذب آلودگی بسیار ناچیز بوده و مقدار مقاومت ویژه سطحی و جریان نشتی در آن ها حداقل ممکن باشد. از میان تمام این پلیمرها، لاستیک سیلیکون به دلیل آب گریزی، نارسانایی، مقاومت جوی و شیمیایی زیاد مناسب ترین پلیمر برای پوشش دهی مقره های گزارش شده است. پوشش های لاستیک سیلیکون، به ویژه نوع RTV تک جزئی، تحت تأثیر نور فرابنفش، دما و شرایط خوردگی قرار نمی گیرند، مقاومت به شعله و آتش گیری بسیار زیادی دارند و سطح صافی را با مقاومت مسیرسازی رسانای زیاد ایجاد می کنند. تنها مشکل این نوع از پوشش های پلیمری، مقاومت مکانیکی کم آن ها است که باید با آمیخته سازی با سایر پلیمرها (سیلیکون-EPDM و کوپلیمر سیلیکون-EPR)، این نقص را برطرف کرد. مقدار LMW و مهاجرت آن ها از حجم به سطح، مقاومت در برابر ازدست دادن آب گریزی سطح را مشخص می کند. برای ارتقای خاصیت

خودتمیزی و ابرآب گریزی در پوشش های لاستیک سیلیکون مطالعات بسیاری در حوزه ساختار شیمیایی و شکل شناسی سطح (ایجاد زبری های میکرومتری و نانومتری مشابه ساختار سطحی برگ نیلوفر آبی) انجام شده است تا زوایای تماس قطره آب بیش از ۱۵۰° حاصل شوند. این مطالعات عموماً در زمینه افزودن نانو و میکروذرات سیلیکا، ذرات ابرفلئوئوردار شده، پلیمرهای فلئوئورپلی یورتان، ATH، نانوکربنات کلسیم، دانه های شیشه ای اصلاح شده، نانوذرات اصلاح شده با FAS، نانوذرات ZnO و MgO، باریم تیتانات، نانورس های مونت موریلونیت اصلاح شده درختان، تیتانیم دی اکسید، Al_2O_3 و روش های مختلف فلئوئوردار کردن سطح لاستیک سیلیکون و غیره بوده است. در این میان، اعمال نانوذرات سیلیکا بیشترین بازده را برای ارتقای خودتمیزی و کاهش نشت جریان در لاستیک سیلیکون داشته است. بدین ترتیب با استفاده از مخلوط رزین سیلیکونی RTV و EPDM یا EPR به همراه افزودنی نانوسیلیکای اصلاح شده آب گریز، ATH، روغن سیلیکون به عنوان عامل مهاجرت کننده، روغن پارافینی، پایدارکننده ها، جاذب های نوری، رنگ دانه ها و پرکننده ها می توان به پوشش های پایدار پلیمری برای اعمال بر مقره های خطوط انتقال نیرو با زاویه تماس ۱۶۱° و قابلیت حفظ خاصیت آب گریزی، مقاومت شیمیایی عالی در برابر محیط اسیدی، قلیایی و انواع حلال های آلیفاتیک و آروماتیک، مقاومت حجمی و سطحی الکتریکی زیاد، مقاومت به آتش گیری و شعله زیاد و سرویس دهی در دماهای بالا دست یافت. باید توجه داشت، حتی اگر مقره ها پس از پوشش دهی با این سامانه ها نیاز به شست و شوی دوره ای داشته باشند، این کار در دوره های طولانی تر و با هزینه کمتری انجام می شود.

مراجع

1. Thakur A.K., Gupta S.K., and Chaudhari P., Slurry-Phase Ethylene Polymerization Processes: A Review on Multiscale Modeling and Simulations, *Rev. Chem. Eng.*, **38**, 539–568, 2022.
1. Faiza F., Khattak A., Rehman A.U. et al., Multi-Stressed Nano and Micro-Silica/Silicone Rubber Composites with Improved Dielectric and High-Voltage Insulation Properties, *Polymers*, **13**, 1400, 2021.
2. Saleem M.Z. and Akbar M., Review of the Performance of High-Voltage Composite Insulators, *Polymers*, **14**, 431, 2022.
3. Zeng Z., Guo P., Zhang R. et al., Review of Aging Evaluation Methods for Silicone Rubber Composite Insulators, *Polymers*, **15**, 1141, 2023.
4. Causes of Insulator Degradation in Distribution Networks, <https://g-m-u.ir/> available in 15 February 2020.
5. <https://randeno.com/blog/what-is-insulator>, available in 28 April 2022.
6. Ghosh D., Bhandari S., Kumar Chaki T., and Khastgir D., Development of a High Performance High Voltage Insulator for Power Transmission Lines from Blends of

- Polydimethylsiloxane/Ethylene Vinyl Acetate Containing Nanosilica, *RSC Adv.*, **5**, 57608, 2015.
7. <https://forumelectrical.com/electrical-insulator-testing-insulator-failure-causes/>, available in 28 February 2024.
 8. Abdollahi Baghban S., Khorasani M., and Mir Mohammad Sadeghi G., Soundproofing Flexible Polyurethane Foams: The Impact of Polyester Chemical Structure on the Microphase Separation and Acoustic Damping, *J. Appl. Polym. Sci.*, **135**, 46744, 2018.
 9. Seyedmehdi S.A., Zhang H., and Zhu J., Superhydrophobic RTV Silicone Rubber Insulator Coatings, *Appl. Surf. Sci.*, **258**, 2972-2976, 2012.
 10. Seyedmehdi S.A., Zhang H., and Zhu J., Influence of Production Method, Silicone Type and Thickness on Silicon Rubber Superhydrophobic Coatings, *Prog. Organ. Coat.*, **90**, 291-295, 2016.
 11. Madidi F., Momen G., and Farzaneh M., Development of a Stable TiO_2 Nanocomposite Self-Cleaning Coating for Outdoor Applications, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2016**, 8, 2016.
 12. <https://www.inmr.com/coating-porcelain-line-insulators-to-prevent-pollution-flashover/>, available in 18 April 2024.
 13. Li H.L., Zhang F.B., and Zhou Y.K., Nanocrystalline NiO as an Electrode Material for Electrochemical Capacitor, *Mater. Chem. Phys.*, **83**, 260-264, 2004.
 14. Wang Y.G. and Xia Y.Y., Electrochemical Capacitance Characterization of NiO with Ordered Mesoporous Structure Synthesized by Template SBA-15, *Electrochimica Acta*, **51**, 3223-3227, 2006.
 15. Tang X., Wang T., Yu F. et al., Simple, Robust and Large-Scale Fabrication of Superhydrophobic Surfaces Based on Silica/Polymer Composites, *RSC Adv.*, **3**, 25670-25673, 2013.
 16. Guo J., Gu H., Zhang X. et al., Phosphoric Acid Doped Polyaniline-Silica Nanocomposites, *J. Phys. Chem. C*, **117**, 6426-6436, 2013.
 17. Harvánek L., Tomášková T., Mentlík V., and Trnk P., Modification of Epoxy Resin Used in High-Voltage Technology, *16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2015.
 18. Khan H., Amin M., Ali M., IQBAL M., and Yasin M., Effect of Micro/Nano- SiO_2 on Mechanical, Thermal, and Electrical Properties of Silicone Rubber, Epoxy, and EPDM Composites for Outdoor Electrical Insulations, *Turk J. Elec. Eng. Comp. Sci.*, **25**, 1426-1435, 2017.
 19. Ye H., Zhu L., Li W., Liu H., and Chen H., Simple Spray Deposition of a Water-Based Superhydrophobic Coating with High Stability for Flexible Applications, *J. Mater. Chem.*, **5**, 9882, 2017.
 20. Wang F., Wen G., Fan F., Zhang T., and Li J., Turn Hydrophobic to Superhydrophobic of Composite Insulators by Surface Fluorination, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 7800815, 2016.
 21. Ramirez I., Cherney E.A., Jayaram S., and Gauthier M., Nanofilled Silicone Dielectrics Prepared with Surfactant for Outdoor Insulation Applications, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **15**, 228-235, 2008.
 22. Meyer L., Cherney E.A., El-Hag A. et al., RTV Silicone Rubber Pre-Coated Ceramic Insulators for Transmission Lines, *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, **20**, 237-244, 2004.
 23. Sunanda C., Dinesh M.N., and Vasudev N., Performance Evaluation of Silicon Rubber Insulating Material with MgO and ZnO Nanofillers, *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Chengdu, China, 1-5, 2016.
 24. <https://powerquality.blog/2022/09/08/the-system-for-testing-the-resistance-to-the-surface-discharge-and-erosion-of-the-polymeric-insulators/>, available in 08 September 2022.
 25. <https://www.wacker.com/cms/en-us/products/product-groups/silicone-resins/silicone-resins.html>, available in 13 April 2025.
 26. https://en.wikipedia.org/wiki/Silicone_resin, available in 02 February 2025.
 27. <https://coolmag.net/why-use-a-silicone-based-thermal-conductor-silicon-based-resins/>, available in 27 August 2020.
 28. Ghouse S.M. and Vijayarekha K., Influence of Nanofillers in Mechanical and Electrical Properties of Polymeric Insulation, *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, **8**, 466-473, 2017.
 29. https://en.wikipedia.org/wiki/Contact_angle, available in 26 December 2024.
 30. Xiaofeng W., Jincheng W., and Yi Zh., Study on the Structure and Properties of RTV/FR-DOMt Nanocomposites, *J. Exp. Nanosci.*, **11**, 1058-1073, 2016.
 31. Li J., Wei Y., Huang Z., Wang F., Yan X., and Wu Z., Electrohydrodynamic Behavior of Water Droplets on a Horizontal Super Hydrophobic Surface and Its Self-Cleaning Application, *Appl. Surf. Sci.*, **403**, 133-140, 2017.
 32. Wang L., A Critical Review on Robust Self-Cleaning Properties of Lotus Leaf, *Soft Mater.*, **19**, 1058-1075, 2023.
 33. Abdollahi Baghban S., Ebrahimi M., Khorasani M., and 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, *Prog. Organ. Coat.*, **161**, 106519, 2023.

- 2021.
34. Abdollahi Baghban S., Ebrahimi M., Khorasani M., and Bagheri-Khoulenjani S., Tailoring a Variety of Self-stratifying Patterns in a Light-Curable Coating on the Substrates with Different Surface Free Energies, *Prog. Organ. Coat.*, **171**, 107023, 2022.
 35. Gao S.H., Zhou K.S., Lei M.K., and Wen L.S., Surface Modification of Silicone Rubber by CF_4 Radio Frequency Plasma Immersion, *Plasma Chem. Plasma Proc.*, **28**, 715–728, 2008.
 36. Guo Ch., Liu K., Zhang T., Sun P., and Liang L., Development of Flexible Photothermal Superhydrophobic Microarray by Photolithography Technology for Anti-icing and Deicing, *Prog. Organ. Coat.*, **182**, 107675, 2023.
 37. Khorasani M.T., Mirzadeh H., and Sammes P.G., Laser Induced Surface Modification of Polydimethylsiloxane as a Super-Hydrophobic Material, *Rad. Phys. Chem.*, **47**, 881-888, 1996.
 38. Nakamura T., Kozako M., Hikita M., Inoue R., and Kondo T., Experimental Investigation on Erosion Resistance and Hydrophobicity of Silicone Rubber Nanocomposite, *IEEE International conference on Solid Dielectrics*, Bologna, Italy, 230-233, 2013.
 39. Meyer L.H., Cherney E.A., and Jayaram S.H., The Role of Inorganic Fillers in Silicone Rubber for Outdoor Insulation Alumina Tri-hydrate or Silica, *IEEE Electr. Insulation Mag.*, **20**, 13–21, 2004.