

نانوپوشش ها در خطوط انتقال هوایی برق: هادی، عایق و دکل ها

مجید میرزایی^{*}، عباس فیضی نیا، یاسر قربانی

گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

چکیده: خطوط انتقال هوایی روش اصلی انتقال برق هستند. هادی ها، عایق ها و دکل ها تجهیزات الکتریکی اصلی این خطوط به شمار می روند. از آنجا که این خطوط در محیط طبیعی فعالیت می کنند، مشکلاتی مانند یخ زدگی، تخلیه کرونا، رسوب آلودگی و خوردگی به وجود می آید. این مشکلات می توانند منجر به حوادثی شوند که خسارات اقتصادی زیادی را به همراه دارند. برای حل این مشکلات، می توان از پوشش های عملکردی با ویژگی های فوق آبریز، نیمه هادی، ضد خوردگی و سایر ویژگی ها بر روی تجهیزات الکتریکی استفاده کرد که دارای مزایای هزینه پایین و کارایی بالا هستند. به همین علت، پوشش های عملکردی در سال های اخیر به یکی از موضوعات پرتعداد تحقیقات در حوزه عایق کاری خارجی تبدیل شده اند. با در نظر گرفتن چالش های متعدد مرتبط با تجهیزات الکتریکی در خطوط انتقال هوایی، ضرورت بهره گیری از رویکردهای متفاوت احساس می شود. این مقاله مروری، پوشش های عملکردی را بر اساس زمینه های کاربرد و عملکرد آن ها دسته بندی می کند. در هر بخش، ابتدا علل مشکلات تجهیزات الکتریکی به طور مختصر بررسی می شود، سپس مکانیزم عملکرد این نوع پوشش ها برای رفع مشکلات توضیح داده می شود. در ادامه، وضعیت توسعه و کاربرد این پوشش ها به صورت خلاصه ارائه شده و محدودیت های آن ها مورد بررسی قرار می گیرد. در پایان، مسائل کلیدی مرتبط با تحقیق در زمینه پوشش های عملکردی مرور خواهند شد و مسیرهای تحقیقاتی آینده مورد بحث قرار می گیرند.

واژگان کلیدی: پوشش عملکردی، فوق آبریز، ضد یخ زدگی، ضد کرونا، ضد تخلیه آلودگی، ضد خوردگی، خطوط انتقال هوایی.

mjmirzaei@nri.ac.ir

۱- مقدمه

بر عهده دارند، عایق ها پشتیبانی مکانیکی و عایق بندی الکتریکی را فراهم می کنند، و دکل ها به حمایت از خطوط، عایق ها و تجهیزات دیگر اختصاص دارند. نظر به این که خطوط انتقال هوایی در معرض شرایط طبیعی قرار دارند، لازم است توانایی مقابله با عوامل همچون باد، نور خورشید، باران، برف، یخ و آلودگی را داشته باشند. مشکلاتی نظیر یخ زدگی و کرونا در هادی ها، خوردگی هادی، آلودگی و یخ زدگی عایق ها و همچنین خوردگی دکل ها می توانند عملکرد خطوط انتقال را به شدت مختل کنند. این نواقص ممکن است منجر به شکست هادی ها، فروپاشی دکل ها، آسیب به پایه های آن ها و قطع گسترده برق

خطوط انتقال هوایی از مزایای منحصر به فرد و غیرقابل جایگزینی برخوردار هستند [۱]. این مزایا شامل دامنه وسیع ولتاژهای قابل استفاده، هزینه ساخت پایین و سهولت در نگهداری می باشند. به همین دلایل، این خطوط به یکی از روش های اصلی در انتقال برق تبدیل شده اند. در خطوط انتقال برق، هادی ها، عایق ها و دکل ها از اجزای اصلی تجهیزات الکتریکی محسوب می شوند. هادی ها وظیفه انتقال جریان برق را

شوند که در نهایت باعث خسارات اقتصادی قابل توجهی خواهد شد [۲]. به عنوان نمونه، در ژانویه سال ۲۰۰۸، یک بحران ناشی از باران، برف و یخبندان در جنوب چین رخ داد که باعث شد خطوط انتقال هوایی به شدت با یخ پوشانده شوند. این اتفاق به سقوط ۱۳۲۵ دکل با ولتاژ ۲۲۰ کیلوولت و بالاتر و همچنین آسیب دیدن ۲۱۲۹ هادی منجر شد [۳] و خسارات اقتصادی مستقیم بیش از ۳/۵ میلیارد دلار بود [۴]. در فوریه ۲۰۲۱، طوفان زمستانی شدیدی ایالات متحده را درنوردید که منجر به یخزدگی گسترده در شبکه برق تگزاس و قطع برق برای بیش از ۴/۵ میلیون نفر شد. این رویداد اهمیت ویژه‌ای به رفع مشکلات در خطوط انتقال هوایی بخشید، چرا که پایداری این خطوط و کاهش زیان‌های اقتصادی وابسته به آن است. استفاده از پوشش‌ها برای بهبود عملکرد و افزایش پایداری تجهیزات الکتریکی در خطوط انتقال هوایی سابقه طولانی دارد. برای مثال، در سال ۱۹۲۷ در ایالات متحده، از وازلین برای اولین بار بر روی اتصالات هادی به منظور جلوگیری از خوردگی استفاده شد [۵]. از دهه ۱۹۷۰، پوشش‌های ضد تخلیه آلودگی RTV به طور گسترده برای بهبود عملکرد تخلیه آلودگی در عایق‌های شیشه‌ای و سرامیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۶]. با پیشرفت‌های حاصل در علم مواد آلی و نانو فناوری، تولید پوشش‌های عملکردی با کارایی بالا به طور چشمگیری افزایش یافته است. این پوشش‌ها شامل ویژگی‌هایی نظیر فوق آبگریزی، خودتمیزشوندگی، نیمه‌هادی و ضد خوردگی هستند. نمونه‌هایی از پوشش‌های عملکردی شناخته شده در جدول ۱ ارائه شده است.

این ویژگی‌ها نشانگر آن است که پوشش‌های عملکردی، قابلیت‌هایی منحصر به فرد مانند صرفه اقتصادی، بازدهی بالا، مصرف انرژی کمتر و وزن پایین را ارائه می‌دهند. از این رو، انتظار می‌رود که این پوشش‌ها به یک گزینه برتر در حل مشکلات خطوط انتقال تبدیل شوند. با این حال، تاکنون تنها تعداد محدودی از این پوشش‌ها به مرحله تجاری‌سازی رسیده‌اند. علت اصلی این محدودیت‌ها به مشکلاتی بازمی‌گردد که هنوز در پوشش‌های عملکردی فعلی وجود دارند؛ مسائلی شامل هزینه بالای تولید، ضعف در مقاومت سایشی و عمر مفید کوتاه که به طور جدی بر قابلیت اطمینان و کاربردی بودن آن‌ها تأثیر می‌گذارد و مانع از گسترش استفاده این فناوری شده است.

تحقیقات اخیر تلاش دارند تا این مشکلات را حل کرده و تمرکز خود را بر بهینه‌سازی روش‌های تولید پوشش و افزایش دوام آن قرار داده‌اند. این بررسی همچنین به طور مختصر عوامل اصلی مشکلات تجهیزات الکتریکی در خطوط انتقال، مکانیزم عملکرد پوشش‌های عملکردی، روش‌های تولید آن‌ها و محدودیت‌های مربوطه را تحلیل کرده و آن‌ها را در جدول ۱ دسته‌بندی می‌کند. علاوه بر این، مسائل کلیدی مرتبط با تحقیقات در حوزه پوشش‌های عملکردی برای خطوط انتقال خلاصه شده و مسیرهای احتمالی پژوهش‌های آینده نیز معرفی شده‌اند.

جدول ۱. پوشش‌های عملکردی برای خطوط انتقال هوایی.

پوشش‌های عملکردی	مشکلات	تجهیزات الکتریکی
پوشش‌های ابرآبگریز	یخ‌زدگی هادی	هادی
پوشش الکترومکانیکی		
پوشش‌های فوتوترمال		
پوشش‌های TiO2	کرونا هادی	خوردگی هادی
پوشش‌های ابرآبگریز		
گریس‌های ضدخوردگی		
پوشش‌های ابرآبگریز	آلودگی عایق	عایق
پوشش‌های غیرخطی		
پوشش‌های TiO2		
پوشش‌های نیمه‌رسانا	یخ‌زدگی عایق	عایق
پوشش‌های ابرآبگریز		
پوشش‌هایی با مواد تغییر فاز		
پوشش‌های ضدخوردگی	خوردگی دکل	دکل

۲- پوشش‌های هادی‌ها

۲-۱- پوشش‌هایی برای جلوگیری از یخ‌زدگی هادی‌ها

در شرایط جوی مناسب، امکان تشکیل یخ بر روی خطوط هوایی، شامل هادی‌ها و خطوط زمین، وجود دارد. وزن یخ تجمع‌یافته بر این خطوط به طور معمول حدود ۳۲۵ کیلوگرم بر متر است و در شرایط دشوارتر حتی بیش از این مقدار می‌شود. این وضعیت می‌تواند به افزایش بارهای مکانیکی وارد بر خطوط انتقال منجر شود. علاوه بر این، یخ‌زدگی با تغییر ویژگی‌های آیرودینامیکی

خطوط، آنها را در برابر نوسانات ناشی از باد آسیب‌پذیرتر می‌کند. این امر ممکن است در دوره یخ‌زدایی سبب حرکات ناگهانی خطوط شده و حتی به وقوع حوادث جدی نظیر قطعی گسترده برق، سقوط دکل‌ها یا تخریب خطوط انتقال منجر شود. از این‌رو، رفع چالش یخ‌زدگی برای عملکرد پایدار و مطمئن خطوط انتقال هوایی و کاهش زیان‌های اقتصادی اهمیتی ویژه دارد. روش‌های موجود برای مقابله با یخ‌زدگی در خطوط هوایی عمدتاً در دو دسته ضد یخ‌زدگی و یخ‌زدایی قرار می‌گیرند. استفاده از پوشش‌های ویژه مانند پوشش‌های فوق آبگریز، الکتروترمال و فوتوترمال برای پیشگیری از یخ‌زدگی هادی‌ها مزایایی نظیر مصرف انرژی پایین، وزن سبک و کارایی بالاتر نسبت به سایر فناوری‌های موجود را ارائه می‌دهد. این فناوری‌ها پتانسیل قابل توجهی برای کاربردهای گسترده‌تر دارند [۷].

۲-۱-۱- پوشش‌های فوق آبگریز

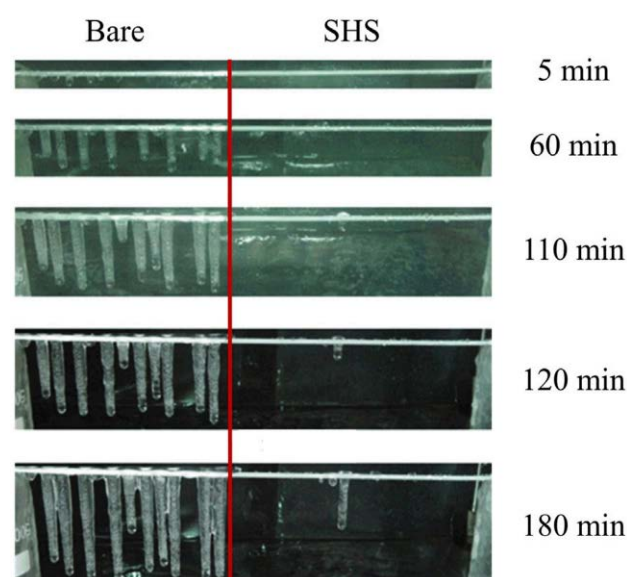
سطوح فوق آبگریز (SHS) با زاویه تماس استاتیک (SCA) بیش از ۱۵۰ درجه و زاویه لغزش کمتر از ۱۰ درجه مشخص می‌شوند. سه عامل اصلی مکانیزم ضد یخ‌زدگی این سطوح را توضیح می‌دهند: نخست، زاویه لغزش پایین این سطوح به قطرات آب امکان می‌دهد پیش از یخ زدن، از روی سطح جدا شوند. دوم، قطرات آب روی این سطوح به صورت مدل کاسی-باکستر قرار می‌گیرند، جایی که ساختار زبر سطح به عنوان محفظه‌ای برای به دام انداختن هوا عمل کرده و لایه‌ای عایق حرارتی ایجاد می‌کند. این لایه عایق باعث کاهش تبادل حرارت بین قطرات و سطح شده و فرآیند هسته‌زایی قطرات آب را به تأخیر می‌اندازد [۸].

سومین نکته این است که به واسطه چسبندگی بسیار پایین یخ به سطوح فوق آبگریز (معمولاً کمتر از ۱۰۰ کیلوپاسکال)، یخ می‌تواند به آسانی توسط نیروهای طبیعی از سطح جدا شود [۹]. از آنجا که خطوط هوایی اغلب از هادی‌های آلومینیومی ساخته شده‌اند، در اینجا تمرکز بر تحقیقات انجام‌شده پیرامون زیرلایه‌های آلومینیومی خواهد بود. فرآیند ساخت پوشش‌های فوق آبگریز روی این زیرلایه‌ها را می‌توان به دو روش کلی تقسیم کرد: یک مرحله‌ای و دومرحله‌ای. در روش یک‌مرحله‌ای،

پوشش فوق آبگریز مستقیماً بر زیرلایه آلومینیومی ایجاد می‌شود و از روش‌هایی نظیر غوطه‌وری، اسپری یا روش قطره‌ای بهره می‌گیرد. برای نمونه، یانگ و همکاران موفق به توسعه یک پوشش فوق آبگریز ZnO/PDMS با زاویه تماس معادل ۱۵۹/۵ درجه و زاویه لغزش ۸/۳ درجه شدند. زمانی که سطح در دماهای بین ۵- تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد با زاویه شیب ۱۰ درجه قرار می‌گیرد، قطرات آب به‌طور کامل از سطح فوق آبگریز (SHS) سر می‌خورند، که بیانگر عملکرد فوق‌العاده در جلوگیری از یخ‌زدگی است. حتی پس از ده چرخه یخ‌زدایی/یخ‌زدگی، زاویه تماس همچنان بیش از ۱۵۰ درجه باقی می‌ماند و زاویه لغزش تغییر محسوسی نمی‌کند؛ بنابراین، دوام پوشش بسیار مطلوب بوده و ویژگی خودترمیمی نیز مشاهده شده است. در پژوهشی دیگر، تان و همکاران با استفاده از پلی‌وینیلیدین فلوراید (PVDF) و SiO₂ موفق به تهیه یک پوشش فوق آبگریز با روش غوطه‌وری یک‌مرحله‌ای شدند. در این پوشش، زاویه تماس برابر با ۱۵۹ درجه و زاویه لغزش تنها ۳ درجه بود. این پوشش توانست زمان یخ‌زدگی را تا چهار برابر افزایش داده و چسبندگی یخ به سطح آلومینیوم را ۴۰ درصد کاهش دهد. افزون بر این، پوشش مزبور مقاومت بالایی را در برابر شرایط جوی شدید، مقاومت در برابر خوردگی اسید و قلیایی و مقاومت در برابر دماهای بالا است. در روش دومرحله‌ای، دو مرحله اصلی پردازش و اصلاح سطوح آلومینیومی برای ایجاد ویژگی‌های فوق آبگریز وجود دارد. در مرحله اول، زیرلایه آلومینیومی با استفاده از روش‌هایی مانند حکاکی شیمیایی [۱۰]، اسپری مغناطیسی [۱۱]، آندایز کردن [۱۲]، یا لیزر فمتوثانیه [۱۳] پیش‌پردازش می‌شود تا ساختارهای میکرو-نانو آماده‌سازی شوند. در مرحله دوم، این زیرلایه‌ها با روش‌هایی نظیر غوطه‌وری، رسوب بخار شیمیایی یا رسوب بخار فیزیکی اصلاح می‌شوند تا سطحی با انرژی پایین و ویژگی‌های آبگریز ایجاد شود. برای نمونه، در یک تحقیق [۱۴]، زیرلایه‌های آلومینیومی با ترکیبی از CuCl₂ و HCl حکاکی شیمیایی شدند و سپس با سیلان اصلاح شدند. نتیجه این فرآیند منجر به تولید سطحی با ساختار میکرو-نانو شد که زاویه تماس آن 161.9 ± 0.5 درجه و زاویه لغزش آن 6.8 ± 1 اندازه‌گیری شده است. چنین سطحی توانست در آزمایش ضد یخ‌زدگی پس از ۵۰ دقیقه حدود ۵۳٪ از عملکرد

¹ Superhydrophobic surfaces

خود را حفظ کند. در تحقیقی دیگر توسط جین و همکاران، یک سطح فوق آبگریز با زاویه تماس ۱۵۹ درجه و زاویه لغزش ۶ درجه تهیه شد. این آزمایش در دمای ۲۵- درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۵٪ انجام شد. نتایج نشان داد که وجود سطح زیر فوق آبگریز همراه با انرژی سطح پایین باعث کاهش قابل توجه تعداد و اندازه ساختارهای یخی روی هادی‌های پردازش‌شده در مقایسه با هادی‌های آلومینیومی معمولی شده است. در تحقیق دیگری که توسط زو و همکاران انجام شد، یک SHS بر سطح ورق‌های آلومینیومی با استفاده از اسپری مغناطیسی و اصلاح با سیلان ایجاد شد. این سطح شامل یک لایه نانو ساختاری از ZnO و یک لایه مولکولی هگزادسیل‌تری متوکسی سیلان (HDTMS) بود که انرژی سطح پایین آن ویژگی ضد یخ‌زدگی استثنایی‌ای نشان داد (شکل ۱).



شکل ۱. فرآیند یخ‌زدگی بر روی هادی در آزمایش شبیه‌سازی یخ‌زدگی (سمت چپ خط قرمز هادی بدون پوشش و سمت راست هادی فوق آبگریز تهیه شده) [۱۵]

در آزمایش یخ‌زدگی شفاف، طی ۶۰ دقیقه، تنها ۲۴/۶۵ درصد از سطح فوق آبگریز (SHS) با یخ پوشیده شد. فنرو و همکاران [۱۶] از طریق حکاکی شیمیایی ورق آلومینیومی با $FeCl_3$ و اتصال مولکول‌های PTFE به سطح، یک سطح اومنیفوبیک تهیه کردند. در آزمایش یخ‌زدگی در دمای ۵°C- و رطوبت نسبی ۵۰±۵ درصد، زمان یخ‌زدگی قطرات آب بر روی سطح اومنیفوبیک ۲۰ برابر بیشتر از ورق آلومینیومی فاقد پوشش بود. لئو و همکاران با استفاده از اسپری مغناطیسی، یک سطح

فوق آبگریز مبتنی بر ZnO بر روی یک ورق آلومینیومی ایجاد کردند. این روش طی ۱۵ دقیقه قادر به تولید ساختاری زبر با ابعاد میکرو-نانو شامل نانوکلاسترهای متراکم بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که تأخیر در یخ‌زدگی قطرات آب بر روی سطح فوق آبگریز حدود ۲ ساعت است؛ همچنین در دمای ۱۰°C- این تأخیر به تقریباً ۵ ساعت می‌رسد و چسبندگی یخ روی این سطح تنها $4/7 \pm 12$ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد. سطح SHS مبتنی بر ZnO دارای ویژگی‌های برتری در مقاومت در برابر یخ‌زدگی و ضد یخ‌زدگی است. کولینیچ و همکاران [۱۷] بیان کردند که پایداری مکانیکی ساختارهای میکرو-نانو بر روی سطوح فوق آبگریز بسیار پایین است. با افزایش تعداد چرخه‌های یخ‌زدایی و یخ‌زدگی، این ساختارها به شدت آسیب دیده و منجر به کاهش قابل توجه خواص ضد یخ‌زدگی سطح SHS می‌شوند. بنابراین انجام تحقیقات گسترده‌تر بر استحکام پوشش‌های فوق آبگریز ضروری است. لو و همکاران [۱۰] با استفاده از حکاکی شیمیایی و عملیات آب داغ، یک ساختار سلسله‌مراتبی زیر میکرو-نانو را بر روی سطح آلومینیوم ایجاد کرده و آن را با پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) و 1H, 1H, 2H, 2H-هپتادکافلوروکسیل پوشش دادند. خواص SHS تحقق‌یافته شامل زاویه تماس ۱۷۵°، زاویه لغزش ۱/۵° و چسبندگی یخ برابر با ۲۵/۳ کیلوپاسکال بود. افزون بر این، میزان چسبندگی یخ پس از گذراندن ۱۰۰ چرخه یخ‌زدایی و یخ‌زدگی به ۴۷/۲ کیلوپاسکال افزایش یافت.

سطح ضد یخ‌زدگی بررسی‌شده نشان‌دهنده دوام بسیار خوبی است که احتمالاً به انعطاف‌پذیری PDMS مربوط می‌شود. در یکی از تحقیقات، سطحی فوق آبگریز با خاصیت ضد یخ‌زدگی و دوام بالا، از طریق فرایند آندایز کردن و اصلاح سیلان روی ورق آلومینیومی ایجاد شد. نتایج نشان داد که پس از ۳۰ چرخه یخ‌زدگی و یخ‌زدایی، چسبندگی یخ کمتر از ۷۰ کیلوپاسکال و زاویه تماس آب بالای ۱۵۰ درجه باقی ماند. کائو و همکاران [۷] نیز پوشش‌های فوق آبگریز ضد یخ‌زدگی (پوشش‌های $F-SiO_2$) را بر روی ورق‌های آلومینیومی و هادی‌ها با روش الگوی دوده و رسوب بخار شیمیایی توسعه دادند. تصاویر SEM مربوطه در شکل‌های ۲الف و ۲ب ارائه شده است. در آزمایش یخ‌زدگی قطرات در دمای ۱۰°C- و رطوبت نسبی حدود ۸۵٪، زمان تأخیر یخ‌زدگی بر روی پوشش فوق آبگریز ۹/۷۵ برابر بیشتر از

سطح آلومینیوم بدون پوشش بود. همچنین چسبندگی یخ بر روی این سطح به میزان $14/8$ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، این پوشش پس از 150 چرخه یخ‌زدگی و یخ‌زدایی همچنان عملکرد ضد یخ‌زدگی خود را حفظ کرد. در آزمایش یخ‌زدگی شبیه‌سازی شده برای هادی‌ها، هادی‌های پوشش‌دار و بدون پوشش ابتدا به مدت 30 دقیقه در دمای 10°C - نگهداری شدند. سپس با ریختن قطرات آب در دمای 0°C ، زمان شروع یخ‌زدگی بررسی شد. نتایج نشان داد که هادی پوشش‌دار تا 270 ثانیه شروع به یخ‌زدن نکرد. این دستاوردها در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر دوام پایین، پیچیدگی روش‌های ساخت و هزینه‌های بالا مانع از استفاده گسترده از این پوشش‌ها برای ضد یخ‌زدگی خطوط هوایی بوده است. به‌ویژه، لیو و همکاران [۱۲] دریافتند که یخ می‌تواند تحت تأثیر گشتاور ناشی از افزایش تنش رشته یا نصب دستگاه‌های ضد یخ‌زدگی و همچنین استفاده از یک پوشش هیدروفوبیک ساده (نه لزوماً فوق آبگریز) آزاد شود. این یافته می‌تواند راهنمایی مؤثر برای کاربرد پوشش‌های ضد یخ‌زدگی بر روی هادی‌ها ارائه کند.

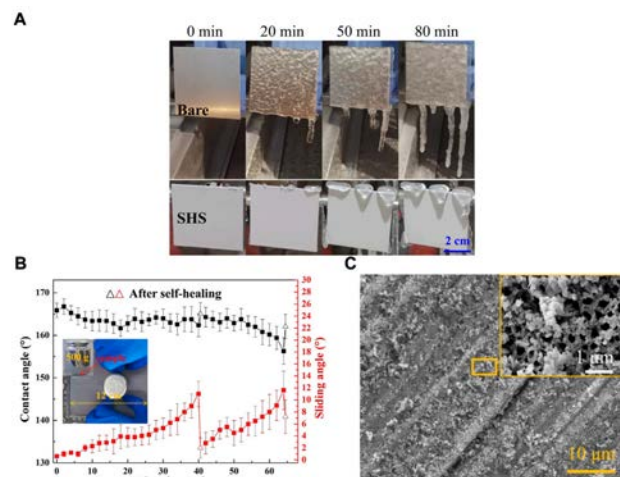
شکل ۲. تصاویر SEM از (الف و ب) نمای کلی و نمای بزرگ شده جزئی پوشش- SiO_2 ، (ج و د) آزمایش عملکرد ضد یخزدگی، هادی شیشه‌سازی شده [۷].

علاوه بر پوشش‌های فوق آبگریز ضد یخ‌زدگی، راهکارهای مبتنی بر سطوح متخلخل با مایع لغزنده (SLIPS) [۱۸، ۱۹]، پوشش‌های فوتوترمال [۱۹] و پوشش‌های الکتروترمال [۲۰] نیز مزایای ویژه و منحصر به فردی را ارائه کرده‌اند.

در جدول ۳ اطلاعات مربوط به طول عمر و مقاومت به ضربه پوشش‌های ضد یخ‌زدگی از نوع فوق آبگریز، سطوح متخلخل با مایع لغزنده، فوتوترمال و الکتروترمال در هادی‌های انتقال برق مقایسه شده است.

۲-۲- پوشش‌هایی برای جلوگیری از کرونا هادی‌ها

برای خطوط انتقال که باید نیازهای توان مراکز بار را تأمین کنند، سطح ولتاژ به تدریج در حال افزایش است. هنگامی که شدت میدان الکتریکی در سطح هادی به حد معینی می‌رسد، محیط هوای اطراف هادی یونیزه شده و پدیده‌ای به نام تخلیه کرونا رخ می‌دهد. این پدیده اثرات منفی مختلفی به همراه دارد، از جمله اتلاف انرژی مرتبط با کرونا، ایجاد تداخل رادیویی، افزایش نویز صوتی، تولید اوزون و موارد دیگر. محاسبه و مدیریت این اتلاف‌ها بخش مهمی از طراحی بهینه خطوط انتقال هوایی محسوب می‌شود و در خطوط انتقال ولتاژ بالا و مسافت طولانی، به‌ویژه در مناطق مرتفع، نقش حیاتی ایفا می‌کند [۳۱]. در شرایط جوی خاص نظیر باران، برف یا مه، قطرات آب بر روی سطح هادی ظاهر می‌شوند. این قطرات تحت تأثیر میدان الکتریکی و نیروی گرانش، تغییر شکل داده و میدان الکتریکی روی سطح هادی را تحریف می‌کنند. این امر موجب کاهش ولتاژ شروع کرونا و افزایش اتلاف‌های مربوط به کرونا می‌شود [۳۲]. همچنین تفاوت‌هایی میان کرونا در مدارهای جریان متناوب (AC) و جریان مستقیم (DC) وجود دارد که ناشی از رفتار حرکتی بارهای فضایی است. حداکثر میزان تداخل رادیویی و نویز صوتی در خطوط AC معمولاً در شرایط جوی نامطلوب مشاهده می‌شود، درحالی‌که این مسائل در خطوط DC اغلب در شرایط جوی مطلوب رخ می‌دهند [۳۳]. علاوه بر این، در خطوط DC، ذرات معلق که بار مخالف دارند به سطح هادی می‌چسبند؛ این مسئله زبری سطح را افزایش داده و ولتاژ شروع کرونا را کاهش می‌دهد. برای مقابله با این مشکلات، همگن کردن یا کاهش شدت میدان الکتریکی روی سطح هادی امری ضروری است. روش‌هایی همچون افزایش قطر هادی، استفاده از هادی‌های دسته‌ای، افزایش فاصله فازها یا ارتفاع دکل می‌تواند به کاهش اتلاف‌های کرونا کمک کند؛ اما این راهکارها هزینه ساخت را به شدت افزایش می‌دهند. اخیراً



شکل ۳. (الف) تصاویر تشکیل یخ بر روی ورق آلومینیوم بدون پوشش و SHS تهیه شده، (ب) زاویه تماس و زاویه لغزش برای آب بر روی SHS پس از چرخه‌های سایش و درمان خودترمیمی، (ج) تصاویر SEM از SHS پس از سایش به مدت ۷/۶۸ متر. تصویر کوچک‌تر بزرگ‌نمایی بیشتری را نشان می‌دهد [۲۲].

که پس از ۳۰ دقیقه خودترمیمی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، این مقدار به $2/1 \pm 156/1^\circ$ بازگشت. داده‌های مرتبط با فرآیند خودترمیمی در تصاویر SEM ثبت شده و نشان دادند که ساختار منافذ ایجاد شده توسط آندایز کردن همچنان حفظ شده است [۲۲].

۲-۲-۱-۲ پوشش‌های فوتوترمال و الکتروترمال

جیانگ و همکاران [۱۹] با استفاده از روش اسپری، یک پوشش فوتوترمال و فوق آبگریز SiC/CNTs با زاویه تماس ۱۶۱ درجه و زاویه لغزش ۲ درجه تهیه کردند. این پوشش تحت تابش نور نزدیک به مادون قرمز (808 nm) توانست دمای سطح را در عرض ۱۰ ثانیه از 30°C به 120°C افزایش دهد، که امکان یخ‌زدایی سریع را فراهم می‌سازد. وانگ و همکاران [۲۰] روشی ترکیبی ضد یخ‌زدگی بر پایه اثر الکتروترمال و خواص فوق آبگریز کامپوزیت‌های گرافن ارائه دادند. در این روش، پس از قطع منبع تغذیه DC، تنها مقدار کمی یخ روی سطح تشکیل می‌شود. اما با اعمال ولتاژ ۵۰ ولت، یخ در عرض ۷۰ ثانیه به سرعت از بین می‌رود. لیو و همکاران [۱۲] نیز با استفاده از روش ساده اسپری، پوشش‌های فوتوترمال، الکتروترمال و فوق آبگریز ساخته شده از نانولوله‌های کربنی رسانا (ECNTs) و پلی‌اکریلات‌های اصلاح‌شده با فلور را برای یخ‌زدایی در طول روز معرفی کردند. در انتها، جدول ۲ عملکرد تعدادی از پوشش‌های کاربردی که با یخ‌زدایی هادی‌ها مرتبط هستند را مقایسه می‌کند.

جدول ۲. مقایسه عملکرد تحقیقات معمولی درباره پوشش‌های عملکردی یخ‌زدگی هادی‌ها

نوع پوشش	قابلیت رطوبت‌پذیری (زاویه تماس ایستا (SCA) و زاویه لغزش (SA))	عملکرد ضد یخ‌زدگی (زمان تأخیر یخ‌زدگی، مساحت یخ‌زدگی، چسبندگی یخ و غیره)	دوام (نتیجه تست‌های یخ‌زدگی/ذوب‌کردن، تست سایش با کاغذ سنباده و غیره)	مرجع
پوشش‌های فوق‌هیدروفوبیک یک مرحله‌ای	SCA 159.5° SA 8.3°	زمان تأخیر یخ‌زدگی در دمای -۱۰°C، زمان تأخیر یخ‌زدگی تقریباً ۱۳۸۰ ثانیه	پس از ۱۰ آزمایش یخ‌زدگی/ذوب‌کردن، SCA >150°	[۲۳]
پوشش‌های فوق‌هیدروفوبیک یک مرحله‌ای	SCA 159° SA 3°	آزمایش یخ‌زدگی ۶ ساعته، کاهش جرم یخ ۷۱.۴٪	پس از ۱۸ آزمایش یخ‌زدگی/ذوب‌کردن، SCA 13.5°، 148°	[۲۴]
پوشش‌های فوق‌هیدروفوبیک دو مرحله‌ای	SA ~6.8°، SCA ~161.9°	۵۰ دقیقه آزمایش یخ‌زدگی، ۵۳٪ سطح یخ‌زدگی غیرمنجمد	پس از ۵۰۰۰ قطره، ۵۰ میکرولیتر آب، آزمایش قطره آب، SCA 155.7 ± 2.3°	[۱۴]
پوشش‌های فوق‌هیدروفوبیک دو مرحله‌ای	SA <1.5°، SCA ~171.8°	آزمایش یخ‌زدگی در دمای -۱۰°C، زمان تأخیر یخ‌زدگی بیشتر از ۲۰۰۰ دقیقه	پس از ۱۰۰ آزمایش یخ‌زدگی/ذوب‌کردن، SCA SA <15°، >162°	[۲۵]
اسلیپ‌ها	SCA ~162.6°	آزمایش چسبندگی یخ در دمای ۲۰°C، چسبندگی یخ ~۶۰ kPa	پس از ۱۰۰ آزمایش یخ‌زدگی/ذوب‌کردن، نرخ حفظ روان‌کننده ~۳۷٪	[۲۱]
اسلیپ‌ها	SA ~0.6°، SCA ~165.9°	۸۰ دقیقه آزمایش یخ‌زدگی، اکثر سطح غیرمنجمد است	پس از 12kPa، 7.68 m 1,000 cW سایش با کاغذ سنباده، SCA >156°، SA ~11.6°، اما SLIPS‌های آماده می‌توانند خودترمیم شوند	[۲۲]
پوشش فوتوترمال	SA <2°، SCA 161°	آزمایش چسبندگی یخ در رطوبت ۳۰٪ و دمای ۳۰°C چسبندگی یخ ۲/۶۵ kPa	تحت تابش NIR دما از ۳۰°C به ۱۲۰°C در عرض ۱۰ ثانیه افزایش یافت	[۱۹]
پوشش الکتروترمال	SA 2°، SCA 167°	آزمایش یخ‌زدگی در دمای -۵°C، زمان تأخیر یخ‌زدگی ۳۳۵ ثانیه	پس از ۵۰۰g سایش با کاغذ سنباده، SCA SA <10°، >150°	[۲۰]

جدول ۳. مقایسه طول عمر و مقاومت به ضربه نانوپوشش‌های ضد یخ‌زدگی در هادی‌های انتقال برق

نوع نانوپوشش	طول عمر	مقاومت در برابر ضربه	مراجع
پوشش‌های فوق‌آبگریز	عمر مفید متغیر است؛ دوام به قرارگیری در معرض محیط و سایش مکانیکی بستگی دارد	معمولاً خوب است؛ با این حال، دوام مکانیکی می‌تواند در شرایط ساینده نگران‌کننده باشد	[۲۶]
سطوح متخلخل مملو از مایع لنزنده (SLIPS)	عمر مفید متغیر است؛ کاهش روان‌کننده در طول زمان می‌تواند اثربخشی را کاهش دهد	مقاومت در برابر ضربه اولیه بالا؛ عملکرد ممکن است با کاهش روان‌کننده کاهش یابد	[۲۷]
پوشش‌های فوتوترمال	عمر مفید متغیر است؛ اثربخشی به شرایط محیطی و قرارگیری در معرض نور خورشید بستگی دارد	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ طراحی شده برای جذب نور خورشید و تبدیل آن به گرما، جلوگیری از تشکیل یخ	[۲۸]
پوشش‌های الکتروترمال	عمر مفید متغیر است؛ به دوام اجزای الکتریکی و عوامل محیطی بستگی دارد	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ از گرمایش الکتریکی برای جلوگیری از تجمع یخ استفاده می‌کند	[۲۷]
پوشش‌های فوتوترمال فوق‌آبگریز	عمر مفید متغیر است؛ ترکیب فوق‌هیدروفوبیک با اثرات فوتوترمال برای بهبود ضد یخ‌زدگی	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ عملکرد دوگانه ممکن است دوام را بهبود بخشد	[۲۸]
پوشش‌های فوتوترمال خود-روان‌کننده	عمر مفید متغیر است؛ طراحی شده برای عملکرد ضد یخ‌زدگی بلندمدت با ویژگی‌های خود-روان‌کننده	مقاومت در برابر ضربه بهبود یافته به دلیل ویژگی خود-روان‌کنندگی	[۲۹]
پوشش‌های فوق‌آبگریز مقاوم	عمر مفید متغیر است؛ برای افزایش دوام در جلوگیری از عوامل محیطی مانند کاهش باران طراحی شده است	مقاومت در برابر ضربه بهبود یافته؛ طراحی شده برای تحمل تنش‌های محیطی	[۳۰]

محققان پوشش‌های ضد کرونا را به‌عنوان راه‌حلی مؤثر ارائه داده‌اند که می‌تواند این مشکل را تا حد زیادی برطرف کند. پوشش‌های موردبررسی [۳۴] شامل پوشش‌های مبتنی بر TiO_2 [۳۵] و پوشش‌های دی‌الکتریک با ویژگی بالا [۳۶] می‌باشند. استفاده از پوشش‌های آبریز و فوق آبریز بر روی هادی‌ها به جلوگیری از چسبیدن قطرات آب کمک می‌کند و تحریف میدان الکتریکی ناشی از این قطرات را کاهش می‌دهد. برای مثال، تحقیق ژو و لی نشان داده است که پوشش یک میله فولادی با ماده RTV باعث کاهش حدود ۶۰ درصدی اتلاف کرونا نسبت به میله معمولی شده است [۳۷]. همچنین، مطالعات دیگری نشان داده‌اند که افزایش ضخامت پوشش RTV روی کابل‌های آلومینیومی تقویت‌شده با فولاد (ACSR)، ولتاژ شروع کرونا در جریان مستقیم را نیز افزایش داده است [۳۸]. در پژوهش دیگری، تیم تحقیقاتی ژانگ با استفاده از یک پوشش فوق آبریز، تعداد قطرات آب روی سطح ACSR را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده‌اند، که منجر به کاهش نویز صوتی و افزایش ولتاژ شروع کرونا شده است. پوشش‌های مبتنی بر TiO_2 نیز عملکرد منحصر به فردی از خود نشان داده‌اند. این پوشش‌ها علاوه بر دارا بودن خواص فوق‌آبدوست القایی برای توزیع یکنواخت قطرات آب، دارای ویژگی‌های فوتوکاتالیستی برای تجزیه آلودگی هستند که زبری سطح را کاهش داده و میدان الکتریکی را یکنواخت‌تر می‌کند. تحقیقی نشان داده است که افزودن نانوذرات TiO_2 به پوشش رزین سیلیکونی-اکریلیک می‌تواند شدت میدان الکتریکی روی سطح هادی را کاهش داده و ولتاژ شروع کرونا را بالا ببرد. همچنین پوشش‌های صاف و متراکم ساخته‌شده از TiO_2 با روش اسپری پلاسما توانسته‌اند تحت تأثیر نور UV چگالی رسوبات نمکی روی سطح را کاهش دهند. نتایج بیانگر آن بود که تابش UV ظرفیت TiO_2 برای افزایش ولتاژ شروع کرونا و کاهش تخلیه کرونا را تقویت کرده است [۳۹].

ژو و همکاران [۳] با استفاده از روش اسپری پلاسما، پوشش‌های صاف و متراکم TiO_2 را بر روی هادی‌ها ایجاد کردند. آزمایش کرونا مثبت DC نشان داده است که تحت تأثیر کاتالیز نور فرابنفش یا حضور میدان الکتریکی DC (معمولاً حدود ۲۰ کیلوولت بر سانتی‌متر)، پوشش TiO_2 مقدار زیادی جفت الکترون-حفره تولید می‌کند، که می‌تواند به تجزیه آلاینده‌ها از

سطح خطوط انتقال DC کمک کند. در شکل ۴ مشخص شده که تابش UV موجب کاهش چگالی رسوب نمکی سطح (Sa) هادی‌های پوشیده‌شده با TiO_2 می‌شود. همچنین، جعبه مستطیلی در شکل ۴ بیانگر آن است که استفاده از این پوشش می‌تواند ولتاژ شروع کرونا را افزایش دهد. پوشش‌هایی با ویژگی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی بالا قادرند میدان الکتریکی روی سطح هادی را کاهش داده و مشکل تخلیه کرونا را بهبود بخشند. پوشش‌های با دی‌الکتریک بالا و هدایت بالا می‌توانند میدان الکتریکی را بر روی سطح هادی کاهش دهند و مشکل تخلیه کرونا را بهبود بخشند (شکل ۵). مگالا [۳۶] پوشش‌های ترکیبی پلی‌ایمید/نانولوله‌های کربنی چند جداره (PI/MWCNT) به ضخامت ۲ میلی‌متر را بر روی ACSR اعمال کرده است. نتایج آزمایش کرونا AC نشان داده که شدت میدان الکتریکی در سطح ACSR پوشیده شده با ۱۰ درصد وزنی MWCNT، نسبت به نمونه‌های بدون پوشش ۲۳٪ کاهش یافته است. همچنین، ولتاژ شروع کرونا AC به میزان ۲۵/۸۷٪ افزایش پیدا کرده، از دست دادن کرونا AC در شدت میدان ۲۵ کیلوولت بر سانتی‌متر، ۲۳/۵۳ درصد کاهش یافته و ولتاژ تداخل رادیویی (RIV) نیز به میزان ۱۸ دسی‌بل کاهش مشاهده شده است. در مجموع، روش‌های متنوعی برای استفاده از پوشش‌های عملکردی جهت حل مشکل کرونا در هادی‌ها پیشنهاد شده است. اما اینکه کدام راهکار بهینه‌ترین نتیجه را ارائه می‌دهد، نیازمند تحقیق بیشتری است. با این حال، تاکنون گزارشی مبنی بر استفاده گسترده از پوشش‌های ضد کرونا منتشر نشده است، زیرا این پوشش‌ها همچنان دارای برخی محدودیت‌هایی هستند که نمی‌توان آنها را نادیده گرفت. برای مثال، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که دوام پوشش‌های فوق آبریز تحت شرایط تخلیه کرونا با مشکلاتی روبه‌رو است. در میان آن‌ها، لیان و همکاران [۴۰] صفحات آلومینیومی را با پوششی فوق آبریز از ترکیب SiO_2 /اسید استتاریک پوشاندند؛ این پوشش زاویه تماس ۱۶۹ درجه و زاویه لغزش تنها ۳ درجه داشت. نمونه‌ها تحت بررسی‌های مختلف شامل پیری حرارتی، پیری ناشی از کرونا، تابش UV و مواجهه با شرایط محیطی قرار گرفتند.

نتایج نشان دادند که دماهای بالا و تخلیه کرونا آسیب جدی به خاصیت فوق آبریز وارد می‌کنند؛ همچنین تابش UV و

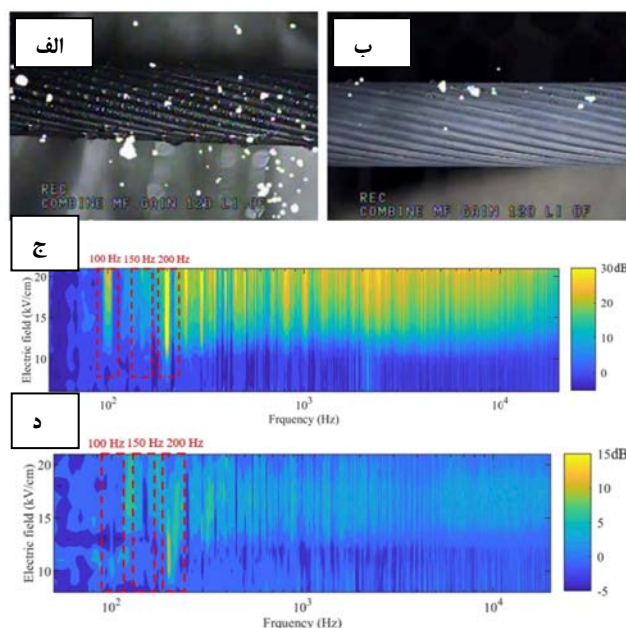
مختلف پوشش‌های نانو تخلیه‌کرونا، عمر مفید معمول آن‌ها، ویژگی‌های مقاومت در برابر ضربه و مراجع مرتبط را خلاصه می‌کند.

جدول ۴. مقایسه طول عمر و مقاومت به ضربه نانوپوشش‌های تخلیه‌کرونا در هادی‌های انتقال برق

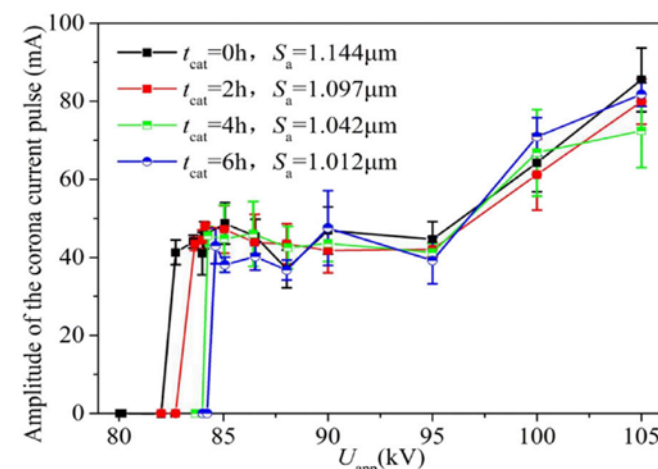
نوع نانوپوشش	عمر مفید	مقاومت در برابر ضربه	مرجع
نانوکامپوزیت‌های اپوکسی Si/Ti/B	عمر مفید متغیر است؛ ترکیبات بهینه شده نشان‌دهنده بهبود در قدرت میدان شکست و مقاومت در برابر کرونا هستند	خواص مکانیکی بهبود یافته به دلیل تقویت با نانوذرات	[۴۲]
پوشش‌های ضد کرونا سیلیکون آلکاید	طراحی شده برای حفاظت بلندمدت؛ عمر مفید خاص به شرایط کاربرد بستگی دارد	محافظت قوی در برابر تخلیه الکتریکی و افزایش دوام مکانیکی	[۴۳]
نانوپوشش‌های مونت موریلینیت بر روی پلی ایمید	به طور قابل توجهی مقاومت در برابر کرونا را افزایش می‌دهد؛ بهبود عمر مفید به عوامل محیطی بستگی دارد	بهبود استحکام مکانیکی و مقاومت در برابر شرایط سخت	[۴۴]
فیلم‌های پلی ایمید اصلاح شده با نانو-SiO ₂	عمر مفید با افزایش دوز نانو-SiO ₂ -افزایش می‌یابد؛ مدت زمان خاص متغیر است	خواص مکانیکی بهبود یافته و مقاومت در برابر تنش الکتریکی	[۴۵]

۲-۳- پوشش‌هایی برای جلوگیری از خوردگی هادی‌ها

هادی‌های آلومینیومی تقویت‌شده با فولاد (ACSR) از جمله رایج‌ترین انواع هادی‌های هوایی محسوب می‌شوند. با این وجود، در شرایط طبیعی سخت، خوردگی قابل توجهی ممکن است رخ دهد که منجر به کاهش چشمگیر عمر مفید این هادی‌ها می‌شود؛ به طوری که در برخی موارد عمر آنها به کمتر از پنج سال می‌رسد [۴۶]. ساختار ACSR، تماس مستقیم بین لایه آلومینیومی و هسته فولادی گالوانیزه رخ داده که این وضعیت باعث می‌شود این هادی‌ها به شدت در معرض خوردگی گالوانیکی قرار گیرند [۴۷]. این نوع خوردگی به عنوان شکل اصلی



شکل ۴. تصاویری که توسط دوربین UV از (الف) هادی‌های بدون پوشش، (ب) هادی‌های پوشش‌دار گرفته شده است. سطوح نویز اندازه‌گیری شده (dB بالاتر از پس‌زمینه) به عنوان تابعی از میدان الکتریکی و فرکانس با اسپری مداوم آب بر روی (ج) هادی‌های بدون پوشش، (د) هادی‌های پوشش‌دار [۴۱].



شکل ۵. دامنه پالس جریان کرونا از نتایج اندازه‌گیری جریان کرونا [۳۵].

قرارگیری در معرض محیط زیست موجب پیر شدن پوشش شده و زاویه لغزش را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در نتیجه، دوام پوشش فوق آبریز SiO₂/اسید استتاریک نیاز به تقویت دارد، و اعمال عملی آن در مقیاس وسیع برای خطوط انتقال هوایی با محدودیت‌هایی همراه است.

پوشش‌های نانو ضد کرونا بر روی هادی‌های انتقال برق اعمال می‌شوند تا اثرات تخلیه کرونا را کاهش دهند و در نتیجه عمر مفید و استحکام مکانیکی آن‌ها را افزایش دهند. در جدول ۴ انواع

تخریب در ACSR شناخته شده است. افزون بر این، عوامل مکانیکی نظیر سایش نیز می‌توانند روند خوردگی در ACSR را سرعت بخشند. سایش‌های جزئی ناشی از لرزش‌های ناشی از وزش باد و نوسانات هادی، منجر به تغییر شکل پلاستیک، خوردگی سطحی، ترک‌خوردگی و در نهایت شکست خستگی می‌شود [۴۸].

برای خطوط انتقالی که در مناطق ساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اثرات ترکیبی ناشی از خوردگی به دلیل پاشش نمک و سایش جزئی، می‌تواند به طور قابل توجهی شدت خوردگی کابل‌های ACSR را افزایش دهد. برای مقابله با این موضوع، استراتژی‌های ضدخوردگی مختلفی برای خطوط هوایی مطرح است که شامل ایزولاسیون فیزیکی و جایگزینی مواد هادی می‌شود. ایزولاسیون فیزیکی به کارگیری روش‌هایی مانند استفاده از چربی ضدخوردگی، پوشش‌های RTV بر سطح خارجی خطوط و موارد مشابه را شامل می‌شود. کابل‌های ACSR که با گریس‌های ضدخوردگی پوشش داده شده‌اند، به شکل گسترده‌ای متداول هستند. استاندارد IEC 61394:2011 نیز ضوابط روشنی برای استفاده از گریس‌های ضد خوردگی در خطوط هوایی تعریف کرده است. براساس استاندارد IEC 61089:1991، بسته به میزان پوشش‌دهی گریس در کابل، خطوط به سه دسته تقسیم می‌شوند: خطوط رشته‌ای با ضد خوردگی سبک (گریس فقط بر هسته فولادی اعمال شده)، خطوط رشته‌ای با ضد خوردگی متوسط (گریس بر تمامی قسمت‌ها به جز لایه خارجی اعمال شده) و خطوط رشته‌ای با ضد خوردگی سنگین (گریس بر تمام قسمت‌ها از جمله لایه خارجی اعمال شده است). در خصوص جایگزینی مواد، این راهکار به تغییر جنس مواد هسته یا پوشش هسته سیم اشاره دارد. نمونه‌هایی از این جایگزینی شامل استفاده از کامپوزیت‌های هادی آلومینیوم با هسته کامپوزیتی (ACCC)، کابل‌های ACSR با هسته فولادی پوشش‌دار آلومینیوم (ACSR/AW) و سایر انواع خطوط مقاوم در برابر خوردگی است. در کابل ACCC، از هسته‌ای کامپوزیتی با ترکیب فیبر کربن/اپوکسی یک‌جهته استفاده شده که جایگزین سیم فولادی گالوانیزه در ACSR شده است. به همین دلیل، خوردگی گالوانیکی در کابل ACCC رخ نمی‌دهد، مگر آن که مانع کامپوزیتی الیاف شیشه‌ای آن آسیب جدی ببیند. حتی در صورتی

که چنین آسیبی وارد شود و خوردگی گالوانیکی ایجاد گردد، سرعت این نوع خوردگی در ACCC بسیار کمتر از کابل‌های ACSR خواهد بود [۴۹]. ACCC علاوه بر ویژگی‌های دمای بالای آن و افت کم (HTLS)، دارای هدایت الکتریکی بالا، ظرفیت باربری زیاد و وزن سبک است. با این وجود، این نوع هادی در تحمل بار یخ ضعف دارد و استفاده از آن در مناطقی با احتمال بالای آسیب یخی توصیه نمی‌شود [۵۰]. در مطالعه‌ای توسط لی و همکاران، مقاومت به خوردگی خط فولادی گالوانیزه معمولی با خطوط فولادی پوشش‌دار دارای آلیاژ Zn-5% Al-Re مقایسه شد. نتایج نشان داد که پس از ۱۰۰۰ ساعت قرار گرفتن در معرض شرایط خوردگی پاشش نمک خنثی، لایه گالوانیزه روی خط فولادی تقریباً کاملاً از بین رفت، در حالی که در نمونه‌های پوشش‌دار با آلیاژ Zn-5% Al-Re تنها لایه سطحی دچار خوردگی شد و لایه‌های داخلی نسبتاً دست نخورده باقی ماندند. اگرچه چربی ضد خوردگی در برخی موارد عملکرد مناسبی را از خود نشان داده است، اما مطالعات نیز بیانگر این موضوع هستند که در محیط‌های خاص، مانند خطوط انتقال نزدیک به کارخانه‌هایی که بخارهای اسیدی منتشر می‌کنند، این روش به تنهایی برای جلوگیری از خوردگی کافی نیست. علی‌رغم استفاده از گریس‌های ضدخوردگی، گزارش‌ها درباره توسعه و به‌کارگیری پوشش‌های ضد خوردگی دیگر بسیار محدود است. بنابراین، تمرکز بر توسعه خطوط مقاوم در برابر خوردگی همچنان یکی از اولویت‌های پژوهشی در زمینه هادی‌ها به شمار می‌رود [۵۱].

نانوپوشش‌های ضدخوردگی برای افزایش دوام و تاب‌آوری مکانیکی هادی‌های انتقال برق به کار می‌روند. جدول ۵ انواع مختلف نانوپوشش‌ها، عمر مفید معمول آن‌ها، ویژگی‌های مقاومت در برابر ضربه و مراجع مربوطه را خلاصه می‌کند.

۳- پوشش عایق‌ها

۳-۱- پوشش‌هایی برای جلوگیری از آلودگی عایق‌ها

به دلیل فعالیت‌های انسانی نظیر صنعت، کشاورزی، حمل‌ونقل و تأثیرات محیطی، مقادیر قابل توجهی از آلودگی‌های گازی، مایع و جامد در محیط کریدور خطوط انتقال پراکنده می‌شوند. این آلودگی‌ها می‌توانند روی خطوط انتقال هوایی رسوب کرده و با

جدول ۵. مقایسه طول عمر و مقاومت به ضربه نانوپوشش‌های ضدخوردگی در هادی‌های انتقال برق

نوع نانوپوشش	عمر مفید	مقاومت در برابر ضربه	مرجع
پوشش‌های مبتنی بر گرافن	مشخص نشده است؛ به دلیل خواص قوی گرافن، دوام استثنایی دارد	مقاومت بالا در برابر ضربه به دلیل استحکام مکانیکی برتر گرافن	[۵۲]
پوشش‌های اپوکسی با نانوذرات ZnO	مشخص نشده است؛ حفاظت از خوردگی بهبود یافته مشاهده شده است	خواص مکانیکی بهبود یافته، از جمله افزایش سختی و مقاومت در برابر خراش	[۵۳]
نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر پلیمر رسانا	مشخص نشده است؛ به دلیل خواص بهبود یافته مانع، حفاظت طولانی مدت ارائه می‌دهند	استحکام مکانیکی و انعطاف‌پذیری بهبود یافته، که به مقاومت بهتر در برابر ضربه کمک می‌کند	[۵۴]
نانوپوشش‌های دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2)	مشخص نشده است؛ ثبات و حفاظت بلندمدت را فراهم می‌کند	سختی و مقاومت در برابر سایش بالا، که منجر به مقاومت برتر در برابر ضربه می‌شود	[۵۵]
نانوپوشش‌های دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)	مشخص نشده است؛ به دلیل دوام و خواص خود-تمیزکنندگی شناخته شده است	استحکام مکانیکی بهبود یافته و مقاومت در برابر عوامل محیطی	[۵۶]

چسبیدن به سطح عایق‌ها، احتمال وقوع تخلیه الکتریکی را افزایش دهند. چنین تخلیه‌هایی تأثیر منفی بر عملکرد پایدار خطوط انتقال داشته و افت راندمان این خطوط را به دنبال دارد [۵۷]. وقوع مکرر تخلیه آلودگی حتی ممکن است باعث شود خطوط انتقال تحت ولتاژ پایین‌تر از حد استاندارد کار کنند، که به کاهش ظرفیت انتقال می‌انجامد. برای مقابله با این چالش‌ها، استفاده از عایق‌های سرامیکی و شیشه‌ای مجهز به پوشش‌های ضد تخلیه آلودگی مانند سیلیکون ولکانیزه در دمای اتاق (RTV) یا عایق‌های کامپوزیتی مبتنی بر سیلیکون ولکانیزه در دماهای بالا (HTV)، به عنوان رویکردهای مؤثر در بهبود عملکرد این عایق‌ها مطرح شده است. از زمان معرفی تجاری پوشش‌های RTV ضد تخلیه آلودگی از سال ۱۹۷۸، این نوع عایق‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که عمر مفید این پوشش‌ها قابل قبول نیست و مشکلاتی مانند چسبندگی ضعیف، کاهش خاصیت آبگریزی و مقاومت کم در برابر شرایط جوی، ممکن است

عملکرد ضد تخلیه را به طور قابل توجهی کاهش دهد. از این رو، تمرکز تحقیقات فعلی بر افزایش عمر مفید پوشش‌های موجود و توسعه نسل جدیدی از پوشش‌های ضد تخلیه آلودگی است [۵۸]. فرآیند تخلیه آلودگی در عایق‌های سرامیکی و شیشه‌ای با سطوح آبدوست به این صورت است: لایه آلودگی مرطوب بر سطح عایق قرار می‌گیرد و با عبور جریان ناشی از آن، مناطق خشک کوچک در اثر گرما تشکیل می‌شوند. از آنجاکه رسانایی الکتریکی این مناطق خشک بسیار کمتر از نواحی آلودگی مرطوب است، زمانی که شدت میدان الکتریکی به آستانه مشخصی برسد، قوس الکتریکی محلی ایجاد می‌شود که به تدریج سطح عایق را پوشش داده و تخلیه کامل رخ می‌دهد. در سطوح آبگریز عایق‌های پوشش‌دار با RTV یا کامپوزیتی، فرآیند تخلیه متفاوت است. سطح آبگریز موجب تشکیل قطرات ریز آب می‌شود که تحت میدان الکتریکی تجمع یافته و به قطرات بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند. با این روند و وقوع تخلیه‌های جزئی در انتهای قطرات آب، خاصیت آبگریزی بصورت موقتی کاهش یافته و نواحی مرطوب پدیدار می‌شوند؛ در نهایت، این نواحی رشد پیدا کرده و موجب وقوع تخلیه کامل می‌شوند [۵۹]. اگرچه تفاوت‌هایی در فرآیندهای تخلیه بر سطوح آبدوست و آبگریز وجود دارد، نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که با کاهش میزان آلودگی سطح، جلوگیری از مرطوب شدن غیرضروری و همگن‌سازی میدان الکتریکی سطح، می‌توان عملکرد عایق‌های سرامیکی، شیشه‌ای و کامپوزیتی را در برابر تخلیه آلودگی ارتقا داد. همچنین برای مقایسه عملکرد انواع رایج پوشش‌های کاربردی مرتبط با یخ‌زدگی هادی‌ها، اطلاعات مربوط در جدول ۶ ارائه شده است.

۳-۱-۱- پوشش‌های فوق آبگریز

پوشش عایق‌ها با مواد فوق آبگریز می‌تواند از رطوبت‌گرفتگی سطح جلوگیری کرده و به کاهش تجمع آلودگی کمک کند، در نتیجه عملکرد پاکسازی آلودگی را بهبود می‌بخشد. این ویژگی به پوشش عایق‌ها با مواد فوق آبگریز می‌تواند از رطوبت‌گرفتگی سطح جلوگیری کرده و به کاهش تجمع آلودگی کمک کند، در نتیجه عملکرد پاکسازی آلودگی را بهبود می‌بخشد. این ویژگی به دلیل زاویه تماس استاتیک بالاتر از ۱۵۰ درجه و زاویه لغزش کمتر از ۱۰ درجه در سطوح فوق آبگریز است که چسبندگی

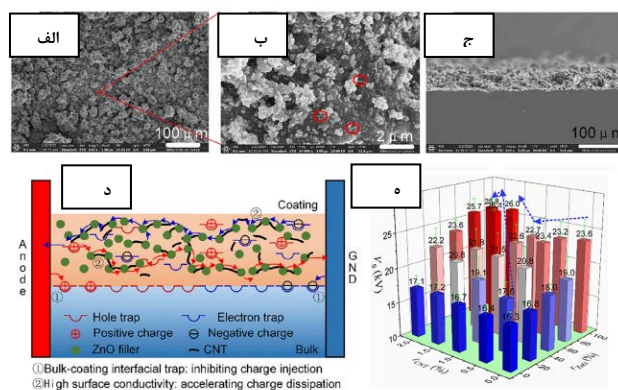
جدول ۶ مقایسه عملکرد تحقیقات معمولی درباره پوشش‌های عملکردی آلودگی عایق‌ها

نوع	آبگریزی (زاویه تماس استاتیک (SCA) و زاویه لغزش (SA))	عملکرد ضد آلودگی در جرقه‌زنی (عملکرد خودتمیزشوندگی، ولتاژ جرقه‌زنی، جریان نشی و غیره)	دوام (نتیجه تست سایش کاغذ سنباده، تست صفحه شیب‌دار و غیره)	مرجع
پوشش‌های ابرآبگریز	$SCA > 155^\circ$, $SA < 5^\circ$	شن و گرد و غبار به راحتی شسته می‌شوند	پس از سایش ۲۰۰ گرم، ۵ متر کاغذ سنباده، $SCA \sim 150^\circ$	[۶۰]
پوشش‌های ابرآبگریز	SCA 152	ولتاژ جرقه‌زنی DC تا ۵۴٪ افزایش یافت	پس از سایش ۲۰۰ گرم ۸ متر کاغذ سنباده با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه، $SCA < 145^\circ$	[۶۱]
پوشش‌های غیرخطی	$SCA \sim 101^\circ$	جریان سطحی عایق پوشش داده شده بسیار کمتر از نمونه بدون پوشش است	-	[۶۲]
پوشش‌های لغزنده	$SA < 7^\circ$, $SCA \sim 112^\circ$ ($SA < 5^\circ$, $SCA \sim 71^\circ$) برای قطرات روغن)	ذرات $NaCl$ ، $CuCl_2$ ، SiO_2 و گرافیت با قطره ۵۰ میکرولیتری آب قابل حذف هستند	در تست صفحه شیب‌دار ۴٫۵ کیلوولت، پس از ۶ ساعت شکست رخ داد	[۶۳]
پوشش‌های TiO_2	آب‌دوستی فوق‌العاده القاشده با نور، تحت تابش UV، $SCA < 10^\circ$	ولتاژ جرقه‌زنی AC تا ۱۲/۸٪ افزایش یافته و جریان نشی ۲۳/۸٪ کاهش یافته است	-	[۶۴]

کردند که قابلیت خودتمیزکنندگی نیز داشت [۶۷]. وانگ و همکاران نیز لاستیک سیلیکونی با SCA حدود $158/5 \pm 0/5$ درجه و زاویه لغزش $9/8 \pm 0/1$ تولید کردند که عملکرد برتری در خودتمیزکنندگی نسبت به نمونه‌های صاف نشان داد [۶۹]. روش اچ شامل روش‌هایی از جمله درمان پلاسما، درمان لیزری و اچ شیمیایی برای ایجاد ساختارهای میکرو-نانو بر روی زیرلایه‌هاست که باعث ایجاد ویژگی فوق آبگریز می‌شود. وازیریناساب با روش درمان پلاسما در فشار اتمسفری، ساختار میکرو-نانو سلسله‌مراتبی بر روی لاستیک سیلیکونی ولکانیزه ایجاد کردند که SCA آن بیش از ۱۶۰ درجه بود و قابلیت خودتمیزکنندگی هم در شرایط مرطوب و هم خشک تأیید شد [۷۰]. پاتیل و همکاران نیز با استفاده از لیزر نانوسکوپی توانستند ساختاری با بیشترین SCA معادل 159 ± 1 درجه ایجاد کنند که ویژگی خودتمیزکنندگی قوی‌ای داشت. استفاده از پوشش‌های فوق آبگریز نسبت به دو روش قبلی ساده‌تر

قطرات آب را کاهش داده و مانع از خیس شدن سطح می‌شود. در حالت زاویه‌دار بودن عایق، قطرات آب به‌طور طبیعی بر روی سطح فوق آبگریز می‌غلطند و در این فرآیند، ذرات آلودگی یا همراه قطرات آب حرکت می‌کنند یا به آن‌ها می‌چسبند و سپس با قطرات از سطح جدا می‌شوند [۶۵]. این فرایند به عنوان "خودتمیزکنندگی" شناخته می‌شود. بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط قانم و همکاران [۶۶]، سه روش اصلی برای تولید عایق‌های فوق آبگریز عبارتند از: روش قالب‌گیری تکراری [۶۷]، روش اچ [۶۸] و استفاده از پوشش‌های فوق آبگریز [۶۱]. در روش قالب‌گیری تکراری، از پلاستیسیته لاستیک سیلیکونی (سیلیکون رابر) ولکانیزه در دمای بالا و قالب‌هایی با ساختار میکرو-نانو برای ایجاد ولکانیزاسیون تحت فشار و سپس جدا کردن قالب استفاده می‌شود تا ماده‌ای با ویژگی‌های فوق آبگریز شکل بگیرد. برای مثال، مگسودی و همکاران لاستیک سیلیکونی با SCA بیش از ۱۶۰ درجه و هیستریزس زاویه تماس زیر ۳ درجه تولید

پوشش ZnO/MWCNT/PDMS نه تنها خواص فوق آبریزی و قابلیت خودتمیزکنندگی دارد، بلکه همچنین از استحکام تخلیه سطحی بالا تحت شرایط DC، مقاومت در برابر سایش، پایداری در برابر UV و خواص ضدیخ نیز برخوردار است و به عنوان یک پوشش چندمنظوره واقعی محسوب می‌شود. با این وجود، علی‌رغم عملکرد فوق‌العاده پوشش‌های فوق آبریز در شرایط آزمایشگاهی، ضعف در دوام آن‌ها همچنان چالشی جدی برای استفاده عملی و گسترده به شمار می‌رود. نتایج تحقیقات دسانتوس با نظارت دو ساله بر روی رشته‌های عایق شیشه‌ای نانوپوشش‌دار فوق آبریز و رشته‌های عایق شیشه‌ای دارای پوشش RTV در منطقه‌ای به شدت آلوده (مارسی، فرانسه) نشان داد که خاصیت فوق آبریزی نانوپوشش‌ها پس از مدت کوتاهی روند کاهش یافته و به تدریج کاملاً تخریب می‌شود. برعکس، رشته‌های عایق شیشه‌ای دارای پوشش RTV در طول دوره نظارتی با جریان نشتی کمتر و عملکرد ضد آلودگی بهتر نسبت به نانوپوشش‌ها عمل کردند. بنابراین، پوشش RTV در شرایط فعلی گزینه‌ای پایدارتر با قابلیت عملکرد بهتر برای استفاده عملی به نظر می‌رسد. برای تقویت دوام پوشش‌های فوق آبریز، تحقیقات بیشتری نیاز خواهد بود [۷۲].



شکل ۶ تصاویر SEM از پوشش ZnO/MWCNT/PDMS تهیه شده با بزرگ‌نمایی (الف) $\times 650$ و (ب) $\times 35000$ ، دایره قرمز MWCNT است، (ج) تصویر SEM مقطع عرضی از نمونه پوشش‌دار (د) نمودار شماتیک توصیف‌کننده تأثیر تله‌های بین‌سطحی عمیق و هدایت سطحی بهبود یافته بر تجمع بار سطحی (ه) ولتاژهای تخلیه پوشش فیلم با غلظت‌های سیستماتیک متغیر از پرکننده‌های ZnO و MWCNT [۶۱].

۳-۱-۲- سایر پوشش‌ها

علاوه بر پوشش‌های فوق آبریز، انواع دیگری از پوشش‌ها نظیر

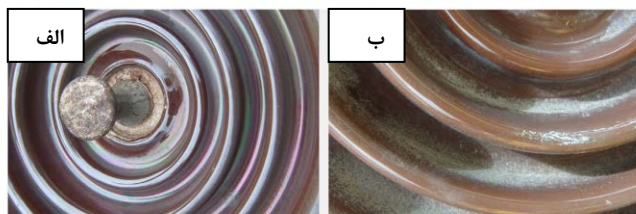
است [۶۸]. برای مثال، پنگ و همکاران یک نوع پوشش $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ اپوکسی با SCA بیش از ۱۵۵ درجه و زاویه لغزش زیر ۵ درجه برای عایق‌های کامپوزیتی تولید کردند که حتی پس از ۵۰ چرخه‌ی سایشی، خاصیت فوق آبریز خود را حفظ کرد. این پوشش همچنین توانایی چشمگیری در کاهش چسبندگی گرد و غبار نشان داده است. در نهایت، برای عایق‌های DC که در سیستم‌های برق با ولتاژ بالای مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرند، مشکل تجمع بار سطحی اهمیت پیدا می‌کند؛ زیرا وجود تنش DC شدید می‌تواند باعث تحریف میدان الکتریکی سطح شده و احتمال تخلیه الکتریکی را افزایش دهد. بنابراین، طراحی پوشش‌های عایقی ضدآلودگی برای این سیستم‌ها باید این چالش را نیز در نظر بگیرد [۷۱]. ژو و همکاران پوشش‌های چندمنظوره ZnO/MWCNT/PDMS را به صورت مستقیم روی عایق‌های کامپوزیتی DC اسپری کردند. تصاویر SEM در شکل‌های الف-ج نشان می‌دهند که این پوشش دارای یک سطح یکنواخت، زیر و متراکم با ساختار میکرو-نانو است و زاویه تماس آب آن ۱۵۲ درجه بوده، که خاصیت فوق آبریزی را به همراه دارد [۶۱]. به‌علاوه، همانطور که در شکل ۶ مشخص است، ژو و همکاران یک مدل فیزیکی برای پوشش چندمنظوره ZnO/MWCNT/PDMS طراحی کردند. با دسترس‌پذیری هدایت غیرخطی ZnO و MWCNT به‌عنوان یک هادی الکتریکی موثر، قادرند کانال‌های رسانا در پوشش ایجاد کنند. تحت میدان الکتریکی DC، این کانال‌ها به تسریع دفع بار سطحی کمک کرده و به افزایش ولتاژ تخلیه منجر می‌شوند. علاوه بر این، حضور نانوپرکننده‌ها تله‌های عمیقی را بین مواد پرکننده و ماتریس شکل می‌دهد که قادر به، به دام انداختن بارهای فضایی هستند و میدان الکتریکی بین‌سطوح را یکنواخت‌تر می‌کنند. نتایج آزمایش تخلیه DC، نمایش داده شده در شکل ۶ه، نشان دادند که ولتاژ تخلیه آلودگی DC با افزودن ZnO و MWCNT به تدریج افزایش پیدا کرده است. در بهترین حالت، ولتاژ تخلیه آلودگی DC عایق پوشش‌دار ۵۴ درصد افزایش یافت. همچنین، آزمون‌های خودتمیزکنندگی ثابت کردند که قطرات آب به سادگی روی سطح فوق آبریز این پوشش با زاویه لغزش حدوداً ۵ درجه غلتیده و آلودگی و ذرات خاک را از بین می‌برند. نتیجه‌گیری کلی نشان داد که

خود را متوقف کرد، اما همچنان مقاومت بالایی در برابر خوردگی الکتریکی نشان داد.

۳-۱-۲-۳ پوشش‌های TiO_2

در بخش دیگری از پژوهش‌ها، ژوانگ و همکاران [۷۳] با استفاده از فناوری سل-ژل، پوشش‌های TiO_2 را بر روی عایق‌های سرامیکی اعمال کردند. آزمایش‌ها در شرایط رسوب آلودگی طبیعی نشان داد که این پوشش‌ها قابلیت خودتمیزکنندگی بهتری در محیط‌های آلوده دارند، چراکه رادیکال‌های آزاد ایجاد شده طی فرآیند فوتوکاتالیستی TiO_2 توانایی تجزیه آلودگی‌های سطحی را دارند. کستانو و همکاران [۶۴] نیز ویژگی‌های الکتریکی و خودتمیزکنندگی این پوشش‌ها را به‌طور دقیق ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که ولتاژ تخلیه AC عایق‌های پوشش‌دار با TiO_2 به میزان ۱۲/۸٪ افزایش یافته و جریان نشتی آن‌ها ۲۳/۸٪ کاهش یافته است. همچنین، این عایق‌ها پس از پنج ماه قرارگیری در محیط بالسیلاس^۲ تمیز باقی ماندند، در حالی که در همان شرایط، جلبک‌ها در قسمت پایین عایق‌های فاقد پوشش رشد کرده بودند (شکل ۷). با این حال، باید توجه داشت اگر آلودگی‌ها عمدتاً شامل ذرات غیرآلی ناشی از فعالیت کارخانه‌های سیمان باشند، اثر خودتمیزکنندگی پوشش TiO_2 چندان بارز نخواهد بود.

قابل ذکر است که مکانیزم خودتمیزشوندگی پوشش TiO_2 با پوشش فوق آبگریز در بخش ۱-۱-۳ تفاوت دارد. ابتدا اینکه پوشش TiO_2 از خاصیت فوتوکاتالیستی برخوردار است که توان تجزیه آلودگی‌های آلی چسبیده به سطح عایق را دارد. دوم، پوشش TiO_2 دارای خاصیت فوق آبدوستی القایی است و زاویه



شکل ۷. تصاویر (الف) عایق‌های پوشش‌دار با پوشش TiO_2 و (ب) عایق‌های بدون پوشش TiO_2 که در سرویس در بالسیلاس به مدت ۵ ماه آزمایش شده‌اند [۶۴].

پوشش‌های غیرخطی، سطوح متخلخل تزریق شده با مایع لغزنده (SLIPS) و پوشش‌های TiO_2 نیز به منظور بهبود فرآیند تخلیه آلودگی در عایق‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳-۱-۲-۱ پوشش‌های غیرخطی

در پژوهشی توسط ابراهیم و همکاران [۶۲] از نانوذرات کربن سیاه برای اصلاح خواص I-V پوشش‌های RTV بهره برده شد و در نتیجه، پوشش‌های RTV غیرخطی تولید گردید. نتایج آزمایش‌های تخلیه AC نشان داد که این نوع پوشش‌ها قادرند میدان الکتریکی سطح را به‌طور مؤثری همگن‌سازی کرده و تعداد قوس‌های ناشی از نوار خشک را کاهش دهند. علاوه بر این، استفاده از نانوکربن سیاه باعث ایجاد مسیرهای رسانا در پوشش شده و جریان سطحی را افزایش می‌دهد که این ویژگی به تسریع فرآیند خشک شدن لایه آلودگی مرطوب کمک می‌کند. مقایسه انجام‌شده با عایق‌های شیشه‌ای و سرامیکی فاقد پوشش نشان می‌دهد که عایق‌های دارای پوشش‌های غیرخطی در شرایط مرطوب و آلوده عملکرد تخلیه AC بهتری از خود نشان می‌دهند.

۳-۲-۱-۲ سطوح متخلخل تزریق شده با مایع لغزنده

در پژوهشی که توسط اولاد و همکاران انجام شد [۶۳] سطوحی متخلخل با پوشش مملو از مایعات لغزنده (SLIPS) بر روی زیرلایه‌های سرامیکی تولید گردید. این کار با تزریق یک روان‌کننده پرفلورینه به نام Krytox 103 درون نوار تفلون کشیده‌شده با ۲۰۰٪ کشش محقق شد. نتایج نشان داد که SLIPS ایجاد شده دارای خصوصیات ضدچسبندگی کامل است؛ به طوری که زاویه‌های لغزش برای آب و روغن هر دو کمتر از ۷ درجه و هیستریزس زاویه تماس کمتر از ۵ درجه بود. در بررسی خودتمیزکنندگی، میزان چسبندگی ذرات آلودگی به این سطوح بسیار کم بود. هر دو نوع ذرات آلودگی محلول در آب مانند CuCl_2 و NaCl و نامحلول (مانند SiO_2 و گرافیت) به راحتی با غلتیدن قطرات آب از سطح SLIPS جدا شدند. همچنین، در آزمون صفحه مایل تحت تنش الکتریکی ۴/۵ کیلوولت، مشاهده شد که SLIPS پس از شش ساعت عملکرد

^۲ Balsillas

^۱ Slippery Liquid-Infused Porous Surface

جدول ۷. مقایسه طول عمر و مقاومت به ضربه نانوپوشش های ضد آلودگی در عایق های شبکه انتقال برق

نوع نانوپوشش	عمر مفید	مقاومت در برابر ضربه	مرجع
پوشش های فوق آبریز	عمر مفید متغیر است؛ دوام به قرارگیری در معرض محیط و سایش مکانیکی بستگی دارد	معمولاً خوب است؛ با این حال، دوام مکانیکی می تواند در شرایط ساینده نگران کننده باشد	[۷۵]
سطوح متخلخل مملو از مایع لغزنده (SLIPS)	عمر مفید متغیر است؛ کاهش روان کننده در طول زمان می تواند اثربخشی را کاهش دهد	مقاومت در برابر ضربه اولیه بالا؛ عملکرد ممکن است با کاهش روان کننده کاهش یابد	[۶۳]
پوشش های فوق آبریز بازسازی شونده	طراحی شده برای حفاظت بلندمدت؛ عمر مفید خاص به شرایط کاربرد بستگی دارد	محافظت قوی در برابر عوامل محیطی، که دوام مکانیکی را افزایش می دهد	[۷۶]
پوشش های فوق آبریز مقاوم	عمر مفید متغیر است؛ برای افزایش دوام در جلوگیری از عوامل محیطی مانند کاهش باران طراحی شده است؛ عمر مفید متغیر است؛	مقاومت در برابر ضربه بهبود یافته؛ طراحی شده برای تحمل تنش های محیطی	[۷۷]
سطوح لغزنده الهام گرفته از طبیعت	طراحی شده برای عملکرد ضد آلودگی بلندمدت با ویژگی های خود-روان کننده	مقاومت در برابر ضربه بهبود یافته به دلیل ویژگی خود-روان کنندگی	[۷۸]
پوشش های فوق آبریز برای عایق های چینی	عمر مفید متغیر است؛ برای عایق های چینی به منظور ضد آلودگی اعمال می شود	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ طراحی شده برای تحمل تنش های محیطی	[۷۹]
سطوح مملو از مایع لغزنده	عمر مفید متغیر است؛ اثربخشی به شرایط محیطی و نگهداری بستگی دارد	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ از روان کننده های پیش-مملو برای جلوگیری از آلودگی استفاده می کند	[۸۰]

طراحی خاص عایق ها و فشار الکتریکی بالای آن ها، اغلب روش های مرسوم ضد یخ زدگی و یخ زدایی که برای هادی ها مناسب هستند، در اینجا قابل استفاده نیستند. تغییراتی مانند آرایش ۷ شکل عایق ها یا استفاده از ترکیب زیرپوش های بزرگ و کوچک، می توانند تا حدی عملکرد عایق در برابر یخ زدگی را بهبود بخشند. با این حال، این روش ها فقط نقش کاهشی داشته و راه حلی اساسی برای مشکل یخ زدگی محسوب نمی شوند. استفاده

تماس سطح تحت تابش UV به سرعت به کمتر از ۱۰ درجه کاهش می یابد. این ویژگی موجب تشکیل یک لایه آب پیوسته روی سطح عایق پوشش دار می شود، به طوری که قطرات آب به سختی بر روی سطح تجمع می کنند و به سادگی از روی پوشش جاری می شوند. نتیجه این فرآیند کاهش میزان آب جمع شده بر سطح عایق است. علاوه بر این، به دلیل کاهش مقدار آب و افزایش سطح موثر فیلم آبی، در شرایط مشابه، ناحیه خشک به سرعت تشکیل شده و اندازه آن بزرگ تر خواهد بود. این ویژگی به سرکوب وقوع و پیشرفت تخلیه جزئی کمک کرده و به کاهش احتمال تخلیه آلودگی منجر می شود [۷۴]. عملکرد عایق در برابر تخلیه آلودگی با ترکیب اثرات خودتمیزشوندگی فوتوکاتالیستی و خاصیت فوق آبدوستی القایی پوشش های TiO_2 بهبود یافته است. در نهایت، مقایسه عملکرد پوشش های کاربردی مرتبط با آلودگی عایق ها در جدول ۷ ارائه شده است. نانوپوشش های ضد آلودگی برای بهبود عملکرد و طول عمر عایق های انتقال برق ضروری هستند. جدول ۷ انواع مختلف نانوپوشش ها، عمر مفید معمول آن ها، ویژگی های مقاومت در برابر ضربه و مراجع مربوطه را خلاصه می کند.

۳-۲- پوشش هایی برای جلوگیری از یخ زدگی عایق ها

یخ زدگی دو عامل اصلی دارد که عملکرد الکتریکی عایق را تحت تأثیر قرار می دهد. نخست، گرمای حاصل از جریان نشتی (گرمای ژول) که با ذوب یخ و برف در برخی نواحی، سطح عایق را مرطوب و آلوده کرده و منجر به کاهش مقاومت سطحی می شود. دوم، تغییر شکل عایق به دلیل یخ زدگی، به ویژه زمانی که یخ های آویزان روی زیرپوش ها تشکیل می شوند و فاصله خزشی سریع کاهش می یابد. در شرایط ترکیبی آلودگی و یخ زدگی، خطر تخلیه الکتریکی عایق ها به طور قابل توجهی افزایش پیدا می کند. فرزانه و همکاران [۸۱] با کمی سازی شدت یخ زدگی (خفیف، متوسط و شدید)، فرآیند تخلیه الکتریکی ناشی از یخ زدگی را در هر سطح یخ زدگی بررسی کرده اند و این پدیده را با حوادث مشابه در مناطق گوناگون مقایسه نموده اند. این تخلیه بسیار پیچیده بوده و عواملی مانند هدایت الکتریکی آب، شکل عایق، میزان و نحوه توزیع یخ بر روی عایق ها، بیشترین اثر را در این فرایند دارند. به دلیل

از پوشش‌های عملکردی، مانند پوشش‌های نیمه‌هادی و فوق آبریز (فوق آبریز) روی عایق‌ها، مزایایی منحصر به فرد ارائه می‌دهند و به عنوان راهکاری مؤثر برای مقابله با چالش یخ‌زدگی مطرح شده‌اند.

۳-۲-۱- پوشش‌های نیمه‌هادی

استفاده از پوشش‌های نیمه‌هادی به منظور جلوگیری از یخ‌زدگی، بر کاهش مقاومت سطحی عایق‌ها تمرکز دارد. این روش با اضافه کردن پرکننده‌های رسانا نظیر کربن سیاه، ZnO و الیاف کربن به پوشش‌ها و بهره‌گیری از گرمای ژول ناشی از جریان ناشی برای ذوب یا پیشگیری از تجمع یخ انجام می‌شود. ضخامت پوشش‌های نیمه‌هادی که برای جلوگیری از یخ‌زدگی و کاهش مقاومت سطحی عایق‌ها استفاده می‌شوند، به چندین عامل بستگی دارد. این عوامل شامل نوع پرکننده‌های رسانا، خواص مکانیکی و الکتریکی پوشش، شرایط محیطی (مانند دما و رطوبت) و میزان جریان ناشی مورد انتظار است. اما به طور کلی:

- برای پوشش‌های حاوی پرکننده‌های رسانا مانند کربن سیاه یا ZnO، ضخامت معمولاً در حدود ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرون (۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر) است. این ضخامت برای اطمینان از انتقال مؤثر گرمای ژول کافی است، بدون اینکه منجر به افزایش بیش از حد وزن یا کاهش انعطاف‌پذیری شود.
- در صورتی که از الیاف کربن یا مواد مشابه استفاده شود که به رسانایی بیشتر و توزیع یکنواخت گرما کمک می‌کنند، ضخامت ممکن است کمی بیشتر باشد، مثلاً در حدود ۳۰۰ تا ۸۰۰ میکرون.

ضخامت باید به گونه‌ای باشد که ضمن حفظ خواص رسانایی، به ساختار عایق آسیب نرساند و پوشش دچار ترک‌خوردگی یا جدایش نشود.

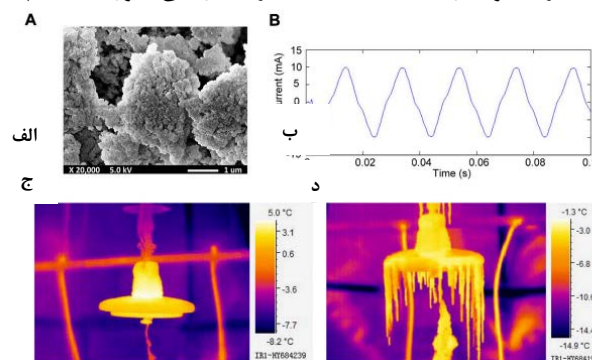
در این راستا، لیا و همکاران پوشش‌های RTV نیمه‌هادی را با استفاده از کربن سیاه بر روی عایق‌های سرامیکی اعمال کرده و تأثیر آن را در کاهش یخ‌زدگی بررسی کردند. نتایج نشان دادند که در مقایسه با عایق‌های معمولی، عایق‌های دارای این پوشش نه تنها از تشکیل یخ معلق جلوگیری می‌کنند، بلکه تجمع یخ را تا

۵۰٪ کاهش داده و ولتاژ تخلیه یخ‌زده را به شکل چشمگیری بهبود می‌بخشند [۸۲]. در مطالعه‌ای دیگر، تأثیر پوشش‌های RTV با هدایت الکتریکی مختلف بر عملکرد ضد یخ‌زدگی تحلیل شد. نتایج حاکی از آن بود که گرمای ناشی از جریان ناشی در مناطق خشک به شکل‌گیری ناپایداری در ریشه یخ کمک کرده و آن را در مقابل اثرات نیروهای طبیعی آسیب‌پذیرتر می‌کند. بر اساس این تحقیق، جریان ناشی عایق XP-70 با پوشش RTV نیمه‌هادی بین ۵ تا ۲۰ میلی‌آمپر بوده و اثر ضد یخ‌زدگی با تغییر هدایت الکتریکی پوشش قابل تنظیم است. افزایش هدایت پوشش، تولید گرمای بیشتر و در نتیجه عملکرد بهتر ضد یخ‌زدگی را سبب می‌شود [۸۳]. وی و همکاران رویکردی متفاوت را اتخاذ کردند و پوشش نیمه‌هادی را تنها در بخش پایینی عایق به کار بردند تا از اتلاف انرژی ناشی از جریان ناشی مداوم جلوگیری شود. این راهکار تنها زمانی مؤثر است که فیلم آب یا لایه یخی اتصال رسانایی روی عایق ایجاد کنند؛ در غیر این صورت اتلاف انرژی اندک است. اما این روش تنها برای لعاب مؤثر بوده و بر یخ نرم تأثیر چندانی ندارد. همچنین، نسبت به هدایت الکتریکی فیلم آب و لایه یخ حساس است [۸۴]. برای بهبود این محدودیت‌ها، وی و همکاران روش پوششی جدیدی ارائه دادند. آزمایش‌ها نشان دادند که مقاومت سطحی پوشش باید کمتر از ۰/۳ مگا اهم باشد و بهترین نواحی برای اعمال پوشش، سطح پایینی عایق و لبه خارجی سطح بالایی با ابعادی در حدود ۵ تا ۸ سانتی‌متر است [۸۴]. یان و همکاران نیز تلاش‌هایی در جهت توسعه خواص ضد یخ‌زدگی داشتند. آن‌ها با استفاده از کربن، نانو سیلیکا و PDMS پوشش‌هایی نیمه‌هادی و فوق آبریز ایجاد کردند. آزمایش‌های انجام‌شده در دمای ۶- درجه سانتی‌گراد و ولتاژ ۱۲ کیلوولت AC نشان دادند که این نوع پوشش جریان ناشی متوسطی معادل ۹/۸ میلی‌آمپر فراهم می‌کند. همچنین، دمای سطح متوسط عایق پوشش‌دار تا ۳ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و میزان یخ به طور قابل توجهی کمتر از عایق‌های بدون پوشش بود (شکل ۸ الف-د) [۸۵].

اگرچه استفاده از پوشش‌های نیمه‌هادی توانسته است بهبود قابل ملاحظه‌ای در افزایش ولتاژ تخلیه یخ‌زده (تا ۵۰٪) به همراه داشته باشد، اما دو چالش اصلی همچنان وجود دارد: یکی میزان بالای اتلاف انرژی ناشی از جریان ناشی و دیگری پیری زودرس

پوشش نانوسیلیکون/SiO₂-فلوروسیلیکون/اپوکسی را با روش اسپری مستقیم بر روی عایق‌های شیشه‌ای ارائه کردند. این پوشش دارای SCA معادل ۱۶۱/۱° و زاویه لغزش کمتر از ۱° بود و توانست در آزمایش شبیه‌سازی یخ‌زدگی لعابی، ولتاژ تخلیه یخ‌زده AC را نسبت به عایق اصلی تا ۲۷ درصد افزایش دهد. از سوی دیگر امیلیانکو و همکاران [۸۹] با استفاده از درمان لیزری نانوسکوپی برای ایجاد زبری در سطح سیلیکون رابر و سپس استفاده از لایه مولکول‌های فلوروسیلان، یک سطح فوق آبگریز با SCA برابر با ۱۷۰° ایجاد کردند. این سطح در آزمایش انباشت یخ در محیط باز به طور موثر از تجمع یخ جلوگیری کرد، به خصوص در دمای ۱۷- درجه سانتی‌گراد که کاهش چشمگیری در انباشت برف نسبت به سیلیکون رابر بدون پوشش مشاهده شد (شکل ۹ الف-د). سان و همکاران [۹۰] از روش سل-ژل همراه با تیمار پلاسما برای ایجاد سطح فوق آبگریز روی سیلیکون رابر استفاده کردند. این سطح که دارای SCA برابر با ۱۶۰/۱۵° و زاویه لغزش ۱/۸° بود، زمان یخ‌زدگی قطرات آب را در دمای ۳۰- درجه سانتی‌گراد تا شش برابر بیشتر از نمونه‌های بدون پوشش به تأخیر انداخت. هونگ و همکاران [۹۱] نیز با بهره‌گیری از درمان لیزری فمتوثانیه و اصلاح PDMS، سرامیک‌های آلومینا فوق آبگریزی ایجاد کردند که دارای SCA برابر با ۱۷۶/۳۹° و زاویه لغزش ۱° بودند. این پوشش توانست زمان جامد شدن را نسبت به سرامیک‌های بدون پوشش تا ۱۸۹ ثانیه به تأخیر بیندازد. با این وجود، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که فوق‌آبگریزی نقش اساسی داشته اما استفاده از سطوح آبگریز می‌تواند چالش‌هایی نیز ایجاد کند. جیانگ و همکاران [۹۲] بیان کرده‌اند که پوشش‌های RTV تنها در شرایط یخ‌زدگی کوتاه‌مدت عملکرد موثری دارند. در این شرایط، به دلیل ویژگی آبگریزی پوشش RTV، فرآیند تشکیل یخ به تأخیر می‌افتد، اما یخ‌زدگی همچنان رخ می‌دهد و به شکل دانه‌ای با ایجاد حفره‌های ریز در لایه یخی ظاهر می‌شود. در مقابل، در یخ‌زدگی شدید، به علت وجود تعداد زیادی حفره میان سطح پوشش RTV و یخ، احتمال وقوع تخلیه جزئی و ذوب لایه یخ افزایش می‌یابد که این موضوع باعث ایجاد جریان نشتی بالا می‌شود. علاوه بر آن، تخلیه جزئی می‌تواند به ساختار پوشش RTV نیز آسیب وارد کند. به همین دلایل، عایق‌های دارای پوشش RTV در شرایط یخ‌زدگی شدید

پوشش تحت شرایط عملیاتی طولانی‌مدت. اگرچه رویکردهای جزئی برای کاهش اتلاف انرژی مؤثر بوده‌اند، اما مطالعات محدودی درباره دوام و عملکرد طولانی‌مدت این پوشش‌ها صورت گرفته و نیازمند تحقیقات بیشتری در این حوزه هستیم.

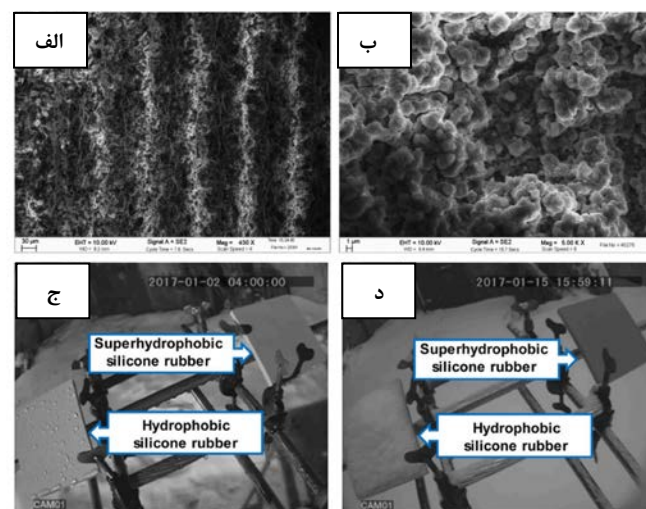


شکل ۸. (الف) تصویر SEM از پوشش کربن/نانو سیلیکا/PDMS (ب) شکل موج‌های جریان نشتی معمولی عایق‌ها با پوشش کربن/نانو سیلیکا/PDMS. تصاویر حرارتی مادون قرمز از عایق‌های آزمایش شده پس از ۱/۵ ساعت یخ‌زدگی برای (ج) عایق با پوشش کربن/نانو سیلیکا/PDMS؛ (د) عایق شیشه‌ای بدون پوشش [۸۵].

۳-۲-۲- پوشش‌های فوق آبگریز

مکانیزم ضد یخ‌زدگی سطوح فوق آبگریز به طور مختصر در بخش ۱-۲-۱ ارائه شده است. در همین راستا، استفاده از پوشش‌های فوق آبگریز برای جلوگیری از یخ‌زدگی روی عایق‌ها نیز مناسب ارزیابی شده است. لی و همکاران [۸۶] از ساختار زیر میکرو-نانو SiO₂ که با روش سل-ژل تهیه شده و توسط فلوروسیلان برای کاهش انرژی سطح اصلاح شده بود، استفاده کردند تا پوشش‌های فوق آبگریزی با SCA معادل ۱۶۳/۶° و زاویه لغزش ۱/۴° را بر روی عایق‌های شیشه‌ای اعمال کنند. عملکرد برتر ضد یخ‌زدگی و ضد مه این پوشش‌ها در آزمایشات انباشت برف در فضای باز و بررسی‌های انجام‌شده روی دکل‌ها به وضوح اثبات شد. گو و همکاران [۸۷] نوع دیگری از پوشش فوق آبگریز شامل SiO₂/CaCO₃/فلوروسیلیکون/اپوکسی را با بهره‌گیری از پرکننده نانوذره و روش اچ آب داغ ساختند. این پوشش که دارای SCA برابر با ۱۶۶/۴° و زاویه لغزش کمتر از ۱° بود، در آزمایش یخ‌زدگی لعابی عملکرد موفقی ارائه داد؛ چراکه قطرات آب روی آن سر خورده و مانع تجمع یخ شدند، به طوری که تجمع یخ نسبت به عایق‌های فاقد پوشش به طور قابل توجهی کاهش یافت. در مطالعه دیگری، زو و همکاران [۸۸]

عملکرد ولتاژی پایین‌تری در برابر تخلیه یخ‌زده از خود نشان می‌دهند.



شکل ۹. تصاویر SEM از سطح بافت‌دار لیزری سیلیکون رابر در (الف) ۳۰ میکرومتر و (ب) ۱ میکرومتر. رفتار سیلیکون رابر آبگریز و سیلیکون رابر فوق آبگریز در (ج) حین باران و (د) در حین برف [۸۹].

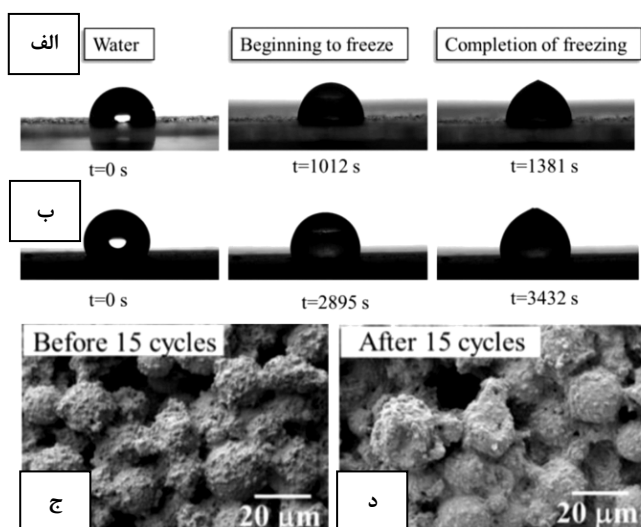
۳-۲-۳- سایر پوشش‌ها

علاوه بر پوشش‌های نیمه‌هادی و فوق آبگریز، پوشش‌های ضد یخ‌زدگی عایق‌ها با استفاده از مواد تغییر فاز و سطوح متخلخل پر شده با مایعات لغزنده [۹۳] نیز توسعه یافته‌اند.

۳-۲-۳-۱- پوشش‌های با مواد تغییر فاز

هو و همکاران [۹۴] پوشش‌های ضد یخ‌زدگی MPCM/RTV را با ترکیب سیلیکون رابر ولکانیزه در دمای محیط (RTV) و میکروکپسول‌های تغییر فاز (MPCM) تولید کردند. در این فرآیند، میکروکپسول‌ها با پوسته‌ای از جنس SiO_2 و هسته‌ای شامل n -تترادکان به‌روش پلیمریزاسیون درجا ساخته شدند، که دمای انجماد $2/3^\circ\text{C}$ و گرمای نهان $130/8 \text{ J/g}$ داشتند. این پوشش در دمای 10°C - قادر بود سطح خود را به مدت تقریباً ۶ دقیقه بالای 0°C حفظ کند. یوان و همکاران [۹۵] پوشش‌های ضد یخ‌زدگی دیگری تحت عنوان MPCM/PRTV را ارائه دادند که با اصلاح سیلیکون رابر دائمی (PRTV) و استفاده از میکروکپسول‌های تغییر فاز (MPCM) ساخته شده بود. این میکروکپسول‌ها از رزین MUF به‌عنوان پوسته و n -تترادکان به‌عنوان هسته استفاده کردند. حضور MPCM باعث زبری سطح

پوشش شد و ویژگی فوق آبگریزی با زاویه تماس 164° و زاویه لغزش 6° ایجاد کرد. در آزمایش یخ‌زدگی در دمای 5°C - زمان یخ‌زدگی قطرات آب بر روی این پوشش $1/48$ برابر بیشتر از پوشش PRTV بود. تصاویر مقایسه‌ای فرآیند یخ‌زدگی در شکل‌های ۱۰الف و ۱۰ب ارائه شده‌اند. علاوه بر این، چسبندگی یخ بر این پوشش تا حدود ۱۵٪ کاهش یافت و حتی پس از ۱۵ چرخه متوالی یخ‌زدگی/یخ‌زدایی، زاویه تماس سطح آن همچنان بالاتر از 160° باقی ماند. تصاویر SEM نیز (شکل‌های ۱۰ج و ۱۰د) نشان می‌دهند که پوشش بدون ترک‌خوردگی باقی مانده و ساختار MPCM حفظ شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این پوشش از دوام بالایی برخوردار است.



شکل ۱۰. زمان یخ‌زدگی قطره آب بر روی (الف) پوشش‌های PRTV و (ب) پوشش‌های MPCM/PRTV. تصاویر SEM از پوشش MPCM/PRTV (ج) قبل از ۱۵ چرخه یخ‌زدگی/ذوب و (د) بعد از آن [۹۵].

۳-۲-۳-۲- سطوح متخلخل ترزریق شده با مایع لغزنده

ژو و همکاران [۹۳] پوششی از نوع SLIPS را با ترکیبی از سیلیکون روغنی و پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) بر روی یک عایق شیشه‌ای با زاویه تماس سکون برابر با 115° ایجاد کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که چسبندگی یخ به این پوشش تنها حدود ۵۰ کیلوپاسکال است. همچنین، یخ بر روی این عایق فقط می‌تواند لایه‌ای ناپایدار تشکیل دهد که به راحتی تحت تأثیر نیروهای طبیعی جدا می‌شود.

نانوپوشش‌های ضد یخ‌زدگی برای حفظ قابلیت اطمینان عایق‌های انتقال برق در اقلیم‌های سرد ضروری هستند. جدول ۸

انواع مختلف نانوپوشش‌های ضد یخ‌زدگی، عمر مفید معمول آن‌ها، ویژگی‌های مقاومت در برابر ضربه و مراجع مربوطه را خلاصه می‌کند.

جدول ۸. مقایسه طول عمر و مقاومت به ضربه نانوپوشش‌های ضد یخ‌زدگی در عایق‌های شبکه انتقال برق

نوع نانوپوشش	عمر مفید	مقاومت در برابر ضربه	مراجع
پوشش‌های فوق آبریز	عمر مفید متغیر است؛ دوام به قرارگیری در معرض محیط و سایش مکانیکی بستگی دارد	معمولاً خوب است؛ با این حال، دوام مکانیکی می‌تواند در شرایط ساینده نگران‌کننده باشد	[۲۶]
پوشش‌های نیمه‌رسانا	عمر مفید متغیر است؛ اثربخشی به شرایط محیطی و خواص مواد بستگی دارد	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ طراحی شده برای تحمل تنش‌های محیطی	[۹۱]
پوشش‌های با مواد تغییر فاز	عمر مفید متغیر است؛ طراحی شده برای عملکرد ضد یخ‌زدگی بلندمدت با مواد تغییر فاز	مقاومت در برابر ضربه بهبود یافته به دلیل خواص تغییر فاز	[۹۶]
سطوح متخلخل با مایع لغزنده	عمر مفید متغیر است؛ کاهش روان‌کننده در طول زمان می‌تواند اثربخشی را کاهش دهد	مقاومت در برابر ضربه اولیه بالا؛ عملکرد ممکن است با کاهش روان‌کننده کاهش یابد	[۹۷]
پوشش‌های فوق آبریز PDMS/نانو سیلیکای اصلاح شده	عمر مفید متغیر است؛ حفاظت قابل توجهی در برابر آلودگی فراهم می‌کند.	دوام بالا و مقاومت در برابر ضربات مکانیکی	[۹۸]
پوشش‌های فوق آبریز پلیمری	عمر مفید متغیر است؛ اثربخشی به شرایط محیطی و نگهداری بستگی دارد	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ از مواد پلیمری برای جلوگیری از آلودگی استفاده می‌کند	[۹۹]

۴- پوشش دکل‌ها

دکل‌های خطوط انتقال اغلب از فولاد گالوانیزه ساخته می‌شوند. شرایط محیطی نظیر رطوبت، نمک و گازهای اسیدی می‌توانند به سرعت لایه گالوانیزه را تخریب کرده و موجب زنگ‌زدگی و خوردگی شوند. به همین دلیل، استفاده از پوشش‌های ضد خوردگی برای حفاظت این دکل‌ها ضروری است. استاندارد ISO

9223:2012 خوردگی جوی را به شش دسته تقسیم‌بندی کرده است: C1 تا C5 و CX. از این دسته‌ها، محیط‌های C3 شامل جوی‌های شهری و صنعتی با آلودگی متوسط دی‌اکسید گوگرد و مناطق ساحلی با شوری کم است. دسته C4 محیط‌هایی با آلودگی بیشتر مانند مناطق صنعتی و ساحلی با شوری متوسط را در بر می‌گیرد، در حالی که C5 مناطق صنعتی با جوی‌های پرتنش و مناطق ساحلی و فراساحلی با شوری و رطوبت بالا را توصیف می‌کند. برای دکل‌هایی که در محیط‌های C3 تا C5 قرار دارند، سیستم پوشش سه‌لایه‌ای شامل پرایمر، میان‌لایه و پوشش نهایی پیشنهاد می‌شود. با وجود لایه فلزی روی سطح دکل، استاندارد ISO 12944-5:2018 توصیه می‌کند از پرایمرهای اپوکسی به جای پرایمرهای الیکیدی استفاده شود.

معمولاً پرایمرهای غنی از روی [۱۰۰] و فسفات روی [۱۰۱] کاربرد بیشتری دارند. لایه میانی اپوکسی حاوی اکسید آهن میکا رایج‌ترین انتخاب برای این منظور است [۱۰۲]، در حالی که پوشش‌های نهایی اکریلیک پرکاربردترین گزینه هستند [۱۰۳]. پوشش‌های اپوکسی برای این مرحله مناسب نمی‌باشند. نکته قابل توجه این است که هنگام اجرای پوشش ضد خوردگی، نباید رنگ روی عایق ریخته شود.

تحقیقات وانگ و همکاران نشان داده است که چنانچه پوشش ضد خوردگی حاوی پرایمر اپوکسی غنی از روی، میان‌لایه اکسید آهن میکا اپوکسی و پوشش نهایی اکریلات روی عایق کامپوزیتی ریخته شود، عملکرد الکتریکی آن کاهش می‌یابد. آزمایش‌ها بیانگر کاهش آبریزی و توانایی بازایی آن در عایق‌های کامپوزیتی هستند. هر چه سطح پوشش گسترده‌تر باشد، ولتاژ تخلیه آلودگی کاهش بیشتری می‌یابد. در سال‌های اخیر، پژوهشگران انواع جدیدی از پوشش‌ها و روش‌های آبکاری ضد خوردگی را توسعه داده‌اند [۱۰۴]. به عنوان نمونه، پاپولا و همکاران حمام آبکاری روی-ایتريا را ایجاد کرده‌اند که افزودن اکسید ایتريوم به فرآیند آبکاری موجب بهبود مقاومت در برابر خوردگی و سایش فولاد گالوانیزه در محلول NaCl می‌شود [۱۰۵]. همچنین، فان و همکاران کپسول‌های رسانای CeO_2 -پلی‌انیلین را تولید کرده‌اند که با پخش در رزین اپوکسی، پوششی ضد خوردگی با مقاومت بالا ارائه می‌دهد. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که این پوشش‌ها دارای مدول امپدانس بیش از ده برابر

جدول ۹. مقایسه طول عمر و مقاومت به ضربه نانوپوشش های ضد خوردگی در دکل های انتقال برق

نوع نانوپوشش	عمر مفید	مقاومت در برابر ضربه	مراجع
نانوپوشش های ضد خوردگی	عمر مواد را به طور قابل توجهی با جلوگیری از آسیب های محیطی، خراش ها و خوردگی افزایش می دهند.	مقاومت بالا در برابر ضربه به دلیل پیوندهای شیمیایی قوی در مقیاس نانو	[۱۰۸]
نانوپوشش های مقاوم در برابر خراش و سایش	دوام و ارزش اقتصادی محصولات را با جلوگیری از آسیب های محیطی و خراش ها افزایش می دهند.	مقاومت بالا در برابر ضربه به دلیل پیوندهای شیمیایی قوی در مقیاس نانو	[۱۰۹]
نانوپوشش های محافظ UV	عمر مواد را با جلوگیری از آسیب های محیطی و کم رنگ شدن رنگ افزایش می دهند.	مقاومت بالا در برابر ضربه به دلیل پیوندهای شیمیایی قوی در مقیاس نانو	[۱۱۰]
نانوپوشش های ضد خوردگی	عمر مواد را به طور قابل توجهی با جلوگیری از آسیب های محیطی، خراش ها و خوردگی افزایش می دهند.	مقاومت بالا در برابر ضربه به دلیل پیوندهای شیمیایی قوی در مقیاس نانو	[۱۱۱]

اغلب از موادی مانند ورق های آلومینیومی، شیشه ای یا سرامیکی برای شبیه سازی تجهیزات الکتریکی استفاده می شود. اما به دلیل پیچیدگی هندسی، مساحت سطح بزرگ و شرایط محیطی خاص تجهیزات واقعی، ضروری است که آزمایش ها به طور مستقیم بر روی هادی ها، عایق ها و دکل های عملیاتی انجام شوند. برای مثال، فرایند اصلاح سطح با استفاده از سیلان برای افزایش خاصیت آبگریزی با چالش هایی همچون پیچیدگی روش، زمان بر بودن و هزینه بالا مواجه است. این پرسش وجود دارد که آیا این روش ها برای هزاران کیلومتر کابل ACSR قابل اجرا هستند یا خیر. همین طور، در مورد عایق های شیشه ای واقعی که ساختار سطحی متفاوتی نسبت به ورق های شیشه ای صاف دارند، نیاز به آزمون هایی برای اطمینان از یکنواختی پوشش وجود دارد.

(۲) تقویت پژوهش در زمینه دوام پوشش ها: دوام یک عنصر کلیدی برای تعیین قابلیت استفاده گسترده از یک پوشش است.

بالا تر از نمونه های معمولی مشابه هستند [۱۰۶]. علاوه بر این، لو و همکاران پوشش های فوق آبگریز Zn/PMHS را با استفاده از روش های اصلاح سطح تهیه کرده اند که توانایی حفظ خواص خود در محلول NaCl ۳/۵٪ را دارند و زمان حفاظت کاتدی را افزایش می دهند [۱۰]. همچنین، نایاک و همکاران از نانوکامپوزیت های Pin/f-MWCNT برای تولید پوشش های اپوکسی مقاوم به خوردگی بهره برده اند که قابلیت محافظت عالی در برابر خوردگی را نشان داده اند [۱۰۷]. وانگ و همکاران [۶۹] نیز یک پوشش ضد خوردگی خودترمیمی مبتنی بر CeO_2 -پلی اورتان با استفاده از نور نزدیک مادون قرمز طراحی کرده اند که عملکرد ضد خوردگی خود را بدون افت ویژگی های مکانیکی حفظ می کند. علاوه بر مشکلات خوردگی، دکل ها با مسئله یخ زدگی نیز مواجه هستند. با این وجود، سازوکار پوشش های ضد یخ زدگی برای هادی ها پیشتر بررسی شده و شباهت زیادی به توسعه چنین پوشش هایی بر فولاد گالوانیزه دارد؛ بنابراین توضیح مکرر آن ضرورتی ندارد. در جدول ۹ برخی از این پوشش ها و عملکرد دوام و عمر آن ها مورد مقایسه قرار گرفته است.

۵- نتیجه گیری و چشم انداز

این مقاله به بررسی وضعیت کنونی و مکانیسم عملکرد پوشش های کاربردی در خطوط انتقال هوایی می پردازد. پوشش هایی با ویژگی هایی چون فوق آبگریزی، خودتمیز شوندگی، خواص فوتوکاتالیستی، نیمه رسانایی و مقاومت در برابر خوردگی، به عنوان راه حل هایی کارآمد برای مشکلاتی مانند یخ زدگی هادی ها، بروز کرونا، خوردگی، آلودگی و یخ زدگی عایق ها و همچنین خوردگی دکل ها شناخته شده اند. این نوع پوشش ها هزینه کم، عملکرد بالا، صرفه جویی در مصرف انرژی و وزن سبک را همزمان ارائه داده و قابلیت استفاده در مقیاس وسیع را دارند. با این حال، چالش های اساسی همچنان پابرجا هستند که نیازمند پژوهش و توسعه بیشترند. سه مسئله اصلی در بررسی پوشش های کاربردی برای خطوط انتقال هوایی به شرح زیر مطرح است:

(۱) ارزیابی قابلیت روش های اعمال پوشش های کاربردی بر تجهیزات الکتریکی: در مراحل اولیه آزمایش پوشش های کاربردی

محیط عملیاتی خطوط انتقال هوایی ترکیبی از چالش‌های متعددی مانند یخ‌زدگی، یخ‌زدایی، تابش UV، خوردگی ناشی از اسپری نمک، تخلیه کرونا و اصطکاک مکانیکی است. خواص فوق‌ابگریزی پوشش‌ها به شدت به ساختار میکرو-نانو و ویژگی‌های شیمیایی سطح وابسته است. با این وجود، این ویژگی‌ها بر اثر عواملی مانند سایش مکانیکی و تخلیه کرونا ممکن است کاهش یابد یا حتی به طور غیرقابل بازگشتی آسیب ببیند. بنابراین، طراحی پوشش‌ها باید بر افزایش دوام آنها متمرکز باشد و لازم است نظارت بلندمدت بر عملکرد آنها در شرایط عملیاتی واقعی صورت گیرد.

۳) تأکید بر توسعه پوشش‌های ترکیبی: خطوط انتقال هوایی با مجموعه‌ای از مشکلات پیچیده مواجه‌اند؛ نظیر یخ‌زدگی و تخلیه کرونا که ممکن است همزمان رخ دهند. یک پوشش عملکردی واحد اغلب نمی‌تواند پاسخگوی تمام نیازها باشد. با پیشرفت دانش در حوزه مکانیزم‌های مشکلات خطوط انتقال، امکان شناسایی ارتباطات میان این مشکلات فراهم می‌شود و می‌توان پوشش‌هایی ترکیبی برای رفع همزمان چندین مسئله توسعه داد. در مجموع، با پیشرفت روش‌های تولید، افزایش دوام پوشش‌ها و تحقیقات عمقی در خصوص مکانیزم مشکلات مرتبط با خطوط انتقال، انتظار می‌رود پوشش‌های عملکردی به عنوان گزینه‌ای ایده‌آل برای حل این مشکلات مطرح شوند.

۴) نتایج آزمایشگاهی به عنوان یک معیار اولیه قابل اعتماد هستند، اما برای پیش‌بینی دقیق عملکرد در محیط واقعی، بهتر است از مدل‌سازی‌های مبتنی بر داده‌های محیطی واقعی و تست‌های میدانی استفاده شود. ترکیب داده‌های آزمایشگاهی با نتایج میدانی و استفاده از شبیه‌سازی‌های طولانی‌مدت (مانند تست‌های شتاب‌داده‌شده) می‌تواند اعتماد به پیش‌بینی‌ها را افزایش دهد. اختلاف بین پارامترهای آزمایشگاهی و محیطی در شرایط زیرخلاصه می‌شود:

• شرایط محیطی متفاوت: در محیط آزمایشگاهی، شرایط محیطی مانند دما، رطوبت، آلودگی، و ضربه به‌طور مصنوعی و کنترل‌شده اعمال می‌شود. در محیط واقعی، این شرایط می‌توانند ناپایدار و پیچیده‌تر باشند (مانند تغییرات آب‌وهوایی ناگهانی یا آلودگی صنعتی شدید).

- روش اعمال پوشش: کیفیت و یکنواختی پوشش اعمال‌شده در محیط آزمایشگاهی ممکن است بالاتر از محیط صنعتی باشد، زیرا در آزمایشگاه کنترل دقیق‌تری وجود دارد.
- نوع آزمایش‌ها: تست‌های تسریع‌شده (مانند آزمایش مقاومت به خوردگی با اسپری نمک یا تست UV) نمی‌توانند به‌طور کامل شرایط واقعی و طولانی‌مدت را شبیه‌سازی کنند.
- اثرات ناشی از زمان: در آزمایش‌ها، نتایج در بازه زمانی کوتاه‌تر پیش‌بینی می‌شود، اما در عمل، فرآیندهایی مانند خستگی مکانیکی یا تخریب شیمیایی ممکن است طولانی‌مدت اثرگذار باشند.

۵) محدوده قابل انتظار اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عملی نیز در پارامترهای زیرخلاصه می‌شود:

- طول عمر: اختلاف بین پیش‌بینی طول عمر آزمایشگاهی و عملی معمولاً بین ۱۰ تا ۳۰ درصد است. در موارد خاص، این اختلاف می‌تواند به دلیل شرایط پیش‌بینی‌نشده محیطی تا ۵۰ درصد نیز برسد.
- مقاومت مکانیکی و ضربه: مقاومت در برابر ضربه در محیط واقعی ممکن است تا ۱۵ تا ۲۵ درصد کمتر از نتایج آزمایشگاهی باشد، به‌ویژه اگر شرایط واقعی شامل ضربه‌های مکرر یا شدیدتر باشد.
- مقاومت شیمیایی و خوردگی: عملکرد پوشش‌ها در برابر خوردگی می‌تواند بین ۱۰ تا ۲۰ درصد در محیط واقعی کمتر باشد، به‌ویژه در مناطق با آلودگی بالا یا تماس مداوم با مواد خورنده.

مراجع

1. B. Li, Y. Li, J. He, Y. Zheng, *Protection technologies of Ultra-High-Voltage AC transmission systems*. Academic Press, 2020.
2. M. Farzaneh, F. Jakl, *Coatings for Protecting Overhead Power Network Equipment in Winter Conditions: Working Group B.44, 2*. Cigré, 2015.

17. S. Kulinich, S. Farhadi, K. Nose, X. Du, *Langmuir*, 27, 25-29, (2011).
18. P. Kim, T.-S. Wong, J. Alvarenga, M. J. Kreder, W. E. Adorno-Martinez, J. Aizenberg, *ACS nano*, 6, 6569-6577, (2012).
19. G. Jiang, L. Chen, S. Zhang, and H. Huang, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 10, 36505-36511, (2018).
20. P. Wang *et al.*, *Compos. Sci. Technol.*, 198, 108307, (2020).
21. Q. Liu, Y. Yang, M. Huang, Y. Zhou, Y. Liu, X. Liang, *Appl. Surf. Sci.*, 346, 68-76, (2015).
22. G. Liu *et al.*, *Surf. Interfaces.*, 28, 101588, (2022).
23. C. Yang, F. Wang, W. Li, J. Ou, C. Li, A. Amirfazli, *Appl. Phys. A*, 122, 1-10, (2016).
24. X. Tan *et al.*, *J. Mater. Res.*, 36, 637-645, (2021).
25. L. B. Boinovich, A. M. Emelyanenko, K. A. Emelyanenko, E. B. Modin, *ACS nano*, 13, 4335-4346, (2019).
26. B. Li *et al.*, *Coatings*, 13, 301, (2023).
27. X. Liu, H. Chen, Z. Zhao, Y. Yan, D. Zhang, *Surf. Coat. Technol.*, 374, 889-896, (2019).
28. M. Mao, J. Wei, B. Li, L. Li, X. Huang, J. Zhang, *Nat. Commun.*, 15, 9610, (2024).
29. L. Zhou *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 14, 8537-8548, (2022).
30. J. Wei, J. Zhang, X. Cao, J. Huo, X. Huang, J. Zhang, *Nat. Commun.*, 14, 2862, (2023).
31. P. S. Maruvada, *Corona performance of high-voltage transmission lines*. Research Studies Press Baldock, UK, 2000.
32. M. Pfeiffer and C. M. Franck, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 30, 2284-2292, (2015).
3. Q. Zhao, Z. Liu, P. Yu, L. Chen, F. Guan, "Review of transmission line icing and anti-icing technologies," in *The proceedings of the 16th Annual Conference of China Electrotechnical Society: Volume II*, 2022: Springer, pp. 1224-1232 .
4. M. Farzaneh, C. Volat, A. Leblond, "Anti-icing and de-icing techniques for overhead lines," in *Atmospheric icing of power networks*: Springer, 2008, pp. 229-268.
5. X. Xu, "The development and analysis of shot peening process to improve the aluminum conductor steel reinforced corrosion resistance," Jinan: University of ShanDong, 2015 .
6. G. G. Karady, M. Shah, R. Brown, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 10, 1965-1971, (1995).
7. Y. Cao *et al.*, *Surf. Interfaces.*, 32, 102100, (2022).
8. P. Tourkine, M. Le Merrer, D. Quéré, *Langmuir*, 25, 7214-7216, (2009).
9. L. B. Boinovich, A. M. Emelyanenko, *Mendeleev Commun*, 1, 3-10, (2013).
10. T. N. Lo, J. Lee, H. S. Hwang, I. Park, *ACS Appl. Nano Mater.*, 4, 7493-7501, (2021).
11. G. Liu, Y. Yuan, Z. Jiang, J. Youdong, W. Liang, *Mater. Res. Express*, 7, 026401, (2020.)
12. G. Liu, Y. Yuan, R. Liao, Q. Yu, L. Wang, in *2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*, 2021: IEEE, pp. 1-4 .
13. A. Volpe, C. Gaudioso, L. Di Venere, F. Licciulli, F. Giordano, A. Ancona, *Coatings*, 10, 587, (2020).
14. R. Liao, Z. Zuo, C. Guo, Y. Yuan, A. Zhuang, *Appl. Surf. Sci.*, 317, 701-709, (2014).
15. H.-y. Jin, S.-c. Nie, Z.-w. Li, C. Tong, K.-j. Wang, *Chin. J. Chem. Phys.*, 31, 216-222, (2018).
16. M. Fenero, M. Knez, I. Saric, M. Petravic, H. Grande, J. Palenzuela, *Langmuir*, 36, 10916-10922, (2020).

47. E. Håkansson, P. Predecki, M. S. Kumosa, *IEEE Trans. Reliab.*, 64, 928-934, (2015).
48. X. Ma, L. Gao, J. Zhang, and L.-C. Zhang, *Metals*, 7, 373, (2017).
49. B. Zhang, X. Yang, W. Yang, B. Liu, W. Ai, J. Ma, "The study on the applicability of aluminum conductor carbon core in the high incidence area of galloping for transmission lines," in *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2016: IEEE, pp. 1-4 .
50. C. Ujah, A. Popoola, and O. Popoola, *J. Mater. Sci.*, 1-18, (2022).
51. Q. Li et al., *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 27, 257-269, (2020).
52. S. B. Ulaeto, J. K. Pancrecius, K. K. Ajekwene, G. M. Mathew, T. Rajan, "Advanced nanocoatings for anticorrosion," in *Corrosion Protection at the Nanoscale*: Elsevier, 2020, pp. 499-510.
53. R. Şomoghi et al., *Polymers*, 16, 2054, (2024).
54. S. P. Biswal and S. Acharya, "Conducting polymer-based nano composites for anti corrosion coatings—a mini-review," 2024.
55. A. Thakur, S. Kaya, and A. Kumar, *Curr. Nanosci.*, 18, 203-216, (2022).
56. A. A. Farag, *Corrosion Reviews*, 38, 67-86, (2020).
57. Z. Yuan, Y. Tu, R. Li, F. Zhang, B. Gong, C. Wang, *CSEE J. Power Energy Syst.*, 8, 910-921, (2020).
58. J.-M. George et al., *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 21, 2594-2601, (2014).
59. D. Pylarinos, K. Siderakis, E. Thalassinakis, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 31, 23-29, (2015).
60. W. Peng, X. Gou, H. Qin, M. Zhao, X. Zhao, Z. Guo, *Appl. Surf. Sci.*, 466, 126-132, (2019).
61. M.-X. Zhu et al., *J. Chem. Eng.*, 404, 126476, (2021).
33. N. Hylten-Cavallius, S. Annestrand, H. Witt, and V. Madzarevic, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, 83, 500-508, (1964).
34. X. Zhang, C. Lian, C. Emersic , I. Cotton, in *2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2019: IEEE, pp. 87-90 .
35. P. Xu, Y. Ma, J. Zhu, L. Zhao, B. Shen, and X. Bian, *High Vol.*, 7, 147-157, (2022).
36. V. Megala, C. P. Sugumaran, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 48, 1122-1129, (2020).
37. Z. Lin, X. Jian, W. Yuanyi, C. Qingmin, D. Jianfu, W. Qingjun, 2013.
38. Y. Yong, Z. Chuyan, W. Liming, *The Institution of Engineering and Technology*, vol. 10, p. 7, 2016.
39. X. Bian et al., *J. Eng.*, 2019, 3046-3050, (2019).
40. C. Lian, X. Zhang, C. Emersic, R. Lowndes, and I. Cotton, in *2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2019: IEEE, pp. 238-241 .
41. X. Zhang et al., *High Volt.*, 692-704, (2022).
42. B. Wang et al., *Polymer Composites*.
43. A. S. Reznik, I. O. Ivanov, T. M. Shikova, A .M. Andreev, E. R. Mananov, "The effect of discharge activity on the performance of corona-protective semiconducting coatings of the stator bar insulation," in *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 2021: IEEE, pp. 1228-1231 .
44. M. Ren et al., *Mater. Adv.*, 3, 3853-3861, (2022).
45. H. Chen, L. Li, W. Zhao, X.-R .Zhang, L. Weng, *Polymers*, 14, 5469, (2022).
46. B. Li, L. Liu, P. Dang, G. Wang, L. Tang, T. Li, "Study on corrosion test of corrosion-proof steel core of high-anticorrosive conductor," in *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2020: IEEE, pp. 1-4 .

78. G. Wang *et al.*, *Adv. Mater.*, 2311489, (2024).
79. I. Ramalla, R. K. Gupta, K. Bansal, *Int. J. Eng. Technol*, 4, 509, (2015).
80. A. Lafuma, D. Quéré, *Europhysics Letters*, 96, 56001, (2011).
81. M. Farzaneh *et al.*, "Systems for prediction and monitoring of ice shedding, anti-icing and de-icing for power line conductors and ground wires," 2010.
82. W. Liao *et al.*, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 14, 1446-1454, (2007).
83. Y. Qin, Z. Xu, Z. Jia, Z. Guan, L. Wang, R. Zhang, "An application of RTV with different conductivities in anti-icing," in *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2009: IEEE, pp. 41-44.
84. X. Wei, Z. Jia, Z. Sun, M. Farzaneh, Z. Guan, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 31, 1413-1421, (2016).
85. X. Yan, J. Li, L. Li, Z. Huang, J. Hu, M. Lu, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 23, 2165-2173, (2016).
86. X. Li, B. Yang, Y. Zhang, G. Gu, M. Li, L. Mao, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 69, 441-447, (2014).
87. C. Guo, R. Liao, Y. Yuan, Z. Zuo, A. Zhuang, *J. Nanomater.*, 2015, 404071, (2015).
88. Z. Zuo, R. Liao, C. Guo, X. Zhao, "Fabrication and anti-icing property of superhydrophobic coatings on insulator," in *2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2015: IEEE, pp. 161-164.
89. A. M. Emelyanenko, L. B. Boinovich, A. A. Bezdomnikov, E. V. Chulkova, K. A. Emelyanenko, *ACS Appl. Mater. interfaces*, 9, 24210-24219, (2017).
90. J. Sun, D. He, Q. Li, H. Zhang, H. Liu, *AIP Adv.*, 10, (2020).
91. Z. Hong *et al.*, *Ceram. Int.*, 48, 10236-10243, (2022).
62. M. E. Ibrahim, N. A. Sabiha, M. A. Izzularab, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 21, 2156-2163, (2014).
63. A. Olad, F. Maryami, A. Mirmohseni, A. A. Shayegani-Akmal, *Prog. Org. Coat.*, 151, 106082, (2021).
64. J. G. Castaño, E. Velilla, L. Correa, M. Gómez, F. Echeverría, *Electr. Power Syst. Res.*, 116, 182-186, (2014).
65. B. Bhushan, Y. C. Jung, K. Koch, *Langmuir*, 25, 3240-3248, (2009).
66. R. A. Ghunem *et al.*, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 29, 1392-1399, (2022).
67. K. Maghsoudi, G. Momen, R. Jafari, M. Farzaneh, *Appl. Surf. Sci.*, 458, 619-628, (2018).
68. D. Patil, S. Aravindan, R. Sarathi, P. V. Rao, *Surf. Eng.*, 37, 308-317, (2021).
69. H. Wang, J. Xu, X. Du, Z. Du, X. Cheng, H. Wang, *Compos. B Eng.*, 225, 109273, (2021).
70. E. Vazirinasab, R. Jafari, G. Momen, *Surf. Coat. Technol.*, 375, 100-111, (2019).
71. W. Peng, X. Gou, H. Qin, M. Zhao, X. Zhao, Z. Guo, *Chem. Eng. J.*, 352, 774-781, (2018).
72. H. de Santos, M. Á. Sanz-Bobi, *Electr. Power Syst. Res.*, 191, 06863, (2021).
73. J. Zhuang, *Fuzhou: University of Fuzhou*, 2010.
74. J. Zhuang *et al.*, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 7, E46-E53, (2010).
75. G. Momen, M. Farzaneh, A. Nekahi, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 24, 3630-3646, (2017).
76. H. Khademsameni, R. Jafari, A. Allahdini, G. Momen, *Materials*, 17, 1622, (2024).
77. D. Tripathi, P. Ray, A. V. Singh, V. Kishore, S. L. Singh, *Coatings*, 13, 1095, (2023).

106. W. Fan, H. Wang, C. Wang, Z. Liu, Y. Zhu, K. Li, *Appl. Surf. Sci.*, 521, 146417, (2020).
107. S. R. Nayak, K. N. S. Mohana, M. B. Hegde, K. Rajitha, A. M. Madhusudhana, S. R. Naik, *J. Alloys Compd.*, 856, 158057, (2021).
108. L. Ning, Y. Chen, K. Yang, X.-m. Wang, S. Zhang, *Corros. Sci. Prot. Technol.*, 31, 149-154, (2018).
109. X. Li, Z. Zhang, B. Du, W. Li, S. Suo, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 546, 2020.
110. S. Yan, X. Chen, A. Zhang, J. Tang, *Coatings*, (2024).
111. Y. Li, "Screening of Anticorrosion Primer and Coating System for Corroded Transmission Towers," (2013) .
92. X. Jiang, J. Ma, Z. Zhang, J. Hu, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 17, 351-359, (2010).
93. L. Zhu, J. Xue, Y. Wang, Q. Chen, J. Ding, Q. Wang, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 5, 4053-4062, (2013).
94. Q. Hu *et al.*, *J. Energy Storage*, 41, 102842, (2021).
95. Y. Yuan, H. Xiang, G. Liu, R. Liao, *Surf. Interfaces.*, 27, 101516, (2021).
96. R. Chatterjee, D. Beysens, S. Anand, *Adv. Mater.* 31, 807812, (2019).
97. M. Zhang, Q. Liu, J. Liu, J. Yu, J. Wang, *MRS Commun.*, 9, 92-98, (2019).
98. J. Li, Y. Zhao, J. Hu, L. Shu, X. Shi, *J. Adhe. Sci. Technol.*, 26, 665-679, (2012).
99. K. Maghsoudi, E. Vazirinasab, G. Momen, R. Jafari, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 59, 9343-93, (2023).
100. S. Shreepathi, P. Bajaj, B. Mallik, *Electroch. Acta*, 55, 5129-5134, (2010).
101. E. Alibakhshi, E. Ghasemi, M. Mahdavian, *Prog. Org. Coat.*, 77, 7, 1155-1162, (2014).
102. S. Arman, B. Ramezanzadeh, S. Farghadani, M. Mehdipour, A. Rajabi, *Corros. Sci.*, 77, 118-127, (2013).
103. L. G. Ecco, M. Fedel, F. Deflorian, J. Becker, B. B. Iversen, A. Mamakhel, *Prog. Org. Coat.*, 96, 19-25, (2016).
104. L. Wang, L. Liu, X. Fu, H. Mei, Z. Guan, "Influences of transmission tower anticorrosive coatings on electrical performance of composite insulator," in *2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2016: IEEE, pp. 834-836 .
105. A. Popoola, V. S. Aigbodion, O. Fayomi, *Surf. Coat. Technol.*, 306, 448-454, (2016).



Nanocoatings in overhead power transmission lines: conductors, insulators, and towers

Majid Mirzaee*, Abbass Feizinia, Yaser Ghorbani Amir

Non metallic group, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

Abstract: Overhead transmission lines are the primary method of electricity transmission. Conductors, insulators, and towers are the main electrical equipment of these lines. Since these lines operate in a natural environment, issues such as icing, corona discharge, pollution deposition, and corrosion arise. These problems can lead to incidents that result in significant economic losses. To solve these problems, functional coatings with superhydrophobic, semiconducting, anti-corrosion, and other properties can be applied to electrical equipment, which offer low cost and high efficiency advantages. For this reason, functional coatings have become a hot research topic in the field of external insulation in recent years. Given the various problems faced by electrical equipment in overhead transmission lines, there is a need for distinct solutions. Therefore, this review classifies the coatings based on usage scenarios and functions. In each section, it first briefly states the causes of the problems with electrical equipment, then introduces the mechanism of using this type of functional coating to solve the problem, summarizes the development and application status of this type of coating, compiles the limitations of these coatings, and finally presents a summary of key issues in the research of functional coatings while looking at future research directions.

Keywords: Functional coating, Superhydrophobic, Anti-icing, Anti-corona, Anti-pollution, Anti-corrosion, Overhead transmission lines.