تاثیر اصلاح سطحی نانوذرات ZnO و SiO_2 و اعمال نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی RTV بر بهبود خواص مقره‌های سرامیکی

نسیم نایب پاشایی[1*]، منیره تقوایی[2]، مصطفی صدیقی‌زاده[2]

[1]پژوهشکده فناوری و مهندسی، پژوهشگاه استاندارد

[2]دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی



دکتر نسیم نایب پاشایی، نویسنده اول، پژوهشگاه استاندارد

n.nayebpashaee@standard.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی RTV که نسل جدیدی از پوشش‌های خود پالاینده و ابر آبگریز هستند برای استفاده بر روی مقره‌ها معرفی شده‌اند. در این مطالعه، دو نوع نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی (Nano -RTV) شامل نانوذرات ZnO و SiO_2 مورد مطالعه قرار گرفتند. با هدف بهبود توزیع نانوذرات و جلوگیری از آگلومراسیون، ابتدا اصلاح سطحی نانوذرات ZnO و SiO_2 به ترتیب با استفاده از APTES و HDMS انجام شد. با استفاده از روش های آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، آنالیز BET و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) اصلاح سطح نانوذرات بررسی شد. در مرحله بعد نانوذرات اصلاح سطحی شده به پایه RTV اضافه شدند و تاثیر استفاده از پوشش پلیمری و دو نوع نانوپوشش بهبود یافته، برروی تست چسبندگی و تست آبگریزی پوشش‌های مورد نظر به عنوان معیارهای بهبود عملکردی عایق بررسی شد. همچنین با استفاده از نتایج آزمایش‌های عملی، تاثیر استفاده از پوشش پلیمری و دو نوع نانوپوشش بهبود یافته، برروی ولتاژ تخلیه الکتریکی به عنوان شاخص بهبود استقامت الکتریکی و در نتیجه قابلیت اطمینان مقره‌های پوشش داده شده و بدون پوشش موردنظر درحضور درجات مختلف آلودگی مصنوعی مورد بررسی قرار داده شد. نتایج نشان داد که مقره دارای نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی RTV بیشترین و مقره بدون پوشش کمترین ولتاژ تخلیه الکتریکی رانشان می‌دهد. بر مبنای نتایج، احتمال رخداد تخلیه الکتریکی در مقره حاوی نانوپوشش لاستیک سیلیکونی به ویژه در محیطهای با آلودگی زیاد کاهش یافته و این امر قابلیت اطمینان بالاتری را در سطح شبکه قدرت ایجاد می‌کند. نتایج نشان داد که چسبندگی پوشش در مقره دارای نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی (Nano – RTV) نسبت به نمونه حاوی پوشش لاستیک سیلیکونی (RTV) افزایش یافته است. نتایج تست آبگریزی نشان داد که زاویه تماس استاتیک $^{\circ}$۱/۵ ± ۱۰۳/۸ بر روی سطح لاستیک سیلیکون RTV بدست آمد که برای پوشش ZnO / RTV به $^{\circ}$۱/۶ ± ۱۱۴/۱ و برای پوشش ZnO-SiO_2 / RTV به $^{\circ}$۳/۴ ± ۱۲۸/۴ افزایش یافت و مقره دارای نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی (Nano – RTV) حاوی SiO_2 بیشترین میزان آبگریزی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: مقره پرسلانی، نانوذرات ZnO و SiO_2 ، پوشش لاستیک سیلیکونی Nano-RTV، آبگریزی.

۱- مقدمه

برق تولیدی در نیروگاه‌ها توسط خطوط انتقال هوایی به مراکز پخش و مصرف‌کننده‌ها انتقال می یابد. برای این منظور خطوط انتقال باید از پایه‌ها و سایر خطوط جهت جلوگیری از اتصال کوتاه جدا گردند که اینکار با تعبیه مقره‌ها (عایق‌های الکتریکی) صورت می‌گیرد. به منظور ممانعت از هدایت جریان الکتریکی در مسیرهای ناخواسته در سیستم‌های قدرت از مقره‌های فشارقوی استفاده می‌شود. از آنجائیکه این مقره‌ها برای جداسازی سطوح ولتاژ فشار قوی بکار برده می‌شوند، باید دارای مقاومت سطحی بسیار بالایی باشند [۱-۳].

یکی از انواع مقره‌هایی که در صنعت برق استفاده زیادی می‌شوند، از جنس پرسلانی هستند که از نظر خواص مکانیکی و الکتریکی خواص قابل قبولی دارند. با وجود مناسب بودن مقاومت سطحی مقره‌ها در حین طراحی و ساخت، پس از نصب در مناطق آلوده و با گذشت زمان، لایه آلودگی نشسته بر سطح آن‌ها با رطوبت هوا یا نزولات جوی تلفیق گشته و با حل شدن مواد محلول

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

آلودگی و پیدایش یک لایه سطحی الکترولیتی، مسیری مناسب جهت هدایت جریان بر سطح مقره‌ها ایجاد می‌شود. مقره‌های فشارقوی در معرض شرایط آب و هوایی سخت از قبیل درجه حرارت و رطوبت بالا و همچنین آلودگی‌های شدید ناشی از مناطق ساحلی، صنایع، کشاورزی و کویری قرار دارند. عوامل مذکور منجر به عبور جریان نشتی بالا بر روی سطح مقره‌ها و در نهایت وقوع قوس الکتریکی می‌شود. در حقیقت، مشکل این مقره‌ها آبدوست بودن سطح آنها است که در حضور آلاینده‌های محیطی مانند نمک‌های محلول در مناطق دریایی، ریزگردها و آلاینده‌های صنعتی، تجمع این آلاینده‌ها بر سطح مقره‌ها رخ داده و در مناطق مرطوب لایه ایجاد شده سبب ایجاد قوس و اتصال کوتاه و در نتیجه کاهش طول عمر مقره‌ها می‌شود [۱–۴].

یکی از مهمترین مشکلات و خطاهای ایجاد شده در پست‌های فشار قوی برق مستقر در مجاورت کارخانجات صنعتی و مناطق با شرایط آب و هوائی ساحلی که دارای آلودگی‌های سنگین صنعتی، گردوخاک و نمک‌های رسوبی می‌باشند، بوجود آمدن تخلیه الکتریکی جزئی[1] بر روی مقره‌ها در زمان بارندگی و افزایش رطوبت (شرجی) می‌باشد. پدیده ریزگردها و گردوخاک شدید در استان خوزستان یک نمونه از این شرایط آب و هوائی می‌باشد. تخریب لعاب سطح ایزولاتورها در اثر آلودگی‌های ناشی از کارخانجات فولاد، آلومینیم، پتروشیمی و صنایع مشابه که بر روی سطح مقره‌ها رسوب می‌کنند، همچنین آلودگی‌های ناشی از مناطق ساحلی بصورت نمک و یک لایه گل (ناشی از گردوخاک محیط) بر روی سطح مقره‌ها تشکیل می‌گردند. این امر، در هنگام بارندگی یا افزایش رطوبت محیطی عامل کاهش سطح عایقی و ایجاد یک مسیر هادی برای تخلیه الکتریکی بروی مقره ها می‌گردد که این مسئله خسارات هنگفتی را بعلت تخریب تجهیزات سوئیچ‌گیر و اعمال خاموشی‌های ناخواسته به شبکه برق فشارقوی وارد می‌آورد [۲, ۵–۷].

به منظور مقابله با اثرات نامطلوب آلودگی در پست‌های فشار قوی مناطق آلوده، روش‌های مختلفی نظیر شستشوی دوره‌ای مقره ها و استفاده از گریس‌های سیلیکونی جهت نگهداری و ایزولاسیون بکار گرفته می‌شود. راه کار شستشوی دوره‌ای مقره‌ها به دلیل تعداد زیاد مقره‌ها و گرد و خاک ناشی از ریزگردها معمولاً در مناطق با آلودگی زیاد (که سطح آلودگی بیش از ۷۰ برابر حد مجاز است) بسیار زمانبر و پر هزینه است و با توجه به تعداد دفعات بالای تکرار سالیانه از لحاظ فنی و اقتصادی با محدودیت هایی روبرو است [۸]. راهکار دیگر استفاده از گریس ها روی مقره‌ها است که این گریس ها نیز عمری در حدود شش ماه دارند و پاکسازی دوره‌ای آنها و پوشش‌دهی مجدد مقره‌ها بسیار دشوار و از نظر اقتصادی نامناسب است. استفاده از گریس‌های سیلیکونی نیز هزینه اجرایی بالایی داشته و در مناطق دارای میزان آلودگی نامحلول بالا، کارایی ندارد [۳, ۸].

یک روش کارا برای بهبود عملکرد این مقره‌ها، اعمال پوشش لاستیک سیلیکونی ولکانیزه شده در دمای اتاق (RTV[2]) بر روی سطح مقره می‌باشد. این پوشش‌ها به عنوان روشی جایگزین برای شستشوی مقره‌ها با آب و یا گریس کاری بر روی سطح مقره، که در عملیات نگهداری دوره‌ای انجام می‌گردند، طراحی شده‌اند. همچنین، استفاده از پوشش‌های لاستیک سیلیکونی RTV، بعنوان روشی جایگزین جهت تعمیر و نگهداری ایزولاسیون پست‌ها در مناطق آلوده معرفی شده است. این روش برای مقابله با آلودگی‌های آنی نیز مؤثر بوده و محدودیتی از نظر میزان آلودگی نامحلول محیط ندارد. علاوه بردلایل فنی موجود، محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از این روش از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشد [۱, ۹–۱۲]. با توجه به گسترده شدن پراکندگی ذرات گرد و خاک در سراسر کشور و همچنین ازدیاد نواحی صنعتی با هوای آلوده، پوشش‌های عایق سیلیکونی بر روی مقره‌های چینی و شیشه‌ای و سایر قطعات عایقی خطوط انتقال برق و ایستگاه‌های مربوطه اعمال می‌شوند تا با جلوگیری از ایجاد لایه‌ی رسانا بر روی سطح عایق‌ها باعث کاهش احتمال قطعی برق ناشی از جرقه و آسیب دیدن عایق‌ها شوند. جلوگیری از قطعی برق نه تنها باعث افزایش رضایتمندی مشتریان می‌شود بلکه در فصول گرم سال از رخ دادن عوارض جدی حاصل از افزایش دما بر سلامتی افراد به ویژه سالمندان و نوزادان در مناطق گرمسیری جلوگیری می‌کند [۱۳, ۱۴].

پوشش لاستیک سیلیکونی بدلیل تخریب بواسطه نور خورشید، گران بودن، مشکلات چسبندگی پوشش به زیرلایه و مقاومت به سایش ضعیف محدودیت‌هایی دارد. استفاده از نانوذرات برای ایجاد پوشش آبگریز بر روی مقره‌های سرامیکی باعث پس‌زدن آب و روغن از روی آن، جلوگیری از جذب عمقی آلودگی‌ها روی سطح، خاصیت آسان تمیز شوندگی و مقاومت در برابر باران‌های

[1] Flash over
[2] Room Temperature Vulcanized

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

اسیدی، افزایش مقاومت به اشعه ماوراء بنفش، ممانعت از خوردگی و یخ زدگی، افزایش استحکام و خاصیت عایق سازی و هیدروفوبیک کردن سطح مقره و تمیز باقی ماندن تا مدت زمان طولانی می‌گردد. هزینه اعمال این پوشش‌ها نسبت به هزینه های شستشوی دوره‌ای بسیار کمتر بوده و صرفه اقتصادی بسیار بالائی دارند [۱۲, ۱۵, ۱۶]

در سال‌های اخیر نانوپوشش‌ها که نسل جدیدی از پوشش‌های آبگریز و خود تمیزشونده هستند برای استفاده بر روی مقره‌ها مطرح شده‌اند. افزودن نانوذرات به رزین RTV برای ایجاد پوشش آبگریز بر روی مقره‌های سرامیکی باعث پس‌زدن آب و روغن از روی آن، جلوگیری از جذب عمقی آلودگی‌ها روی سطح، خاصیت آسان تمیز شوندگی و مقاومت در برابر باران‌های اسیدی، افزایش مقاومت به اشعه ماوراء بنفش، ممانعت از خوردگی و یخزدگی، افزایش استحکام و خاصیت عایق‌سازی و هیدروفوبیک کردن سطح مقره و تمیز باقی‌ماندن تا مدت زمان طولانی می‌گردد. روش‌های اعمال این پوشش ها لایه‌نشانی غوطه‌وری، اعمال با برس و اسپری بدون هوا می‌باشند. هزینه اعمال این نانوپوشش‌ها نسبت به هزینه‌های شستشوی دوره‌ای بسیار کمتر بوده و صرفه اقتصادی بسیار بالائی دارند [۵, ۹, ۱۵]. مطالعات زیادی در مورد مشخصات نانوذرات از جمله ثبات شیمیایی و الکتریکی و کاربرد آنها بعنوان تقویت کننده پوشش لاستیک سیلیکونی RTV وجود دارد. در میان انواع نانوذرات، نانوذرات ZnO و SiO_2 دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی برجسته‌ای هستند. نانو ذرات SiO_2 به طور گسترده‌ای برای تقویت پوشش RTV استفاده می‌شوند، زیرا توانائی بهبود هدایت حرارتی، توانایی تحمل تنش ، تحمل گرما و قابلیت انتقال نوری پوشش را دارا می باشند [۱۷–۱۹]. نانوذرات ZnO به دلیل دارا بودن خواص فیزیکی و شیمیایی برجسته از جمله پایداری شیمیایی بالا، ثابت دی الکتریک کم، فعالیت کاتالیزوری بالا، تواخاصیت ضد باکتریایی، جذب بالای اشعه ماورابنفش و مادون قرمز یکی از گزینه‌های مناسب برای استفاده به عنوان نانوذرات افزودنی برای تقویت RTV هستند [۲۰, ۲۱] با این حال ، مطالعات کمی در مورد سیستم های نانو ZnO / RTV انجام شده است. علاوه‌براین، استفاده همزمان از ZnO و SiO_2 ممکن است باعث بهبود خواص RTV در مقایسه با استفاده جداگانه از آنها شود.

نانوذرات به دلیل دارا بودن انرژی سطحی بالا، تمایل به آگلومراسیون دارند. آگلومراسیون، نسبت سطح به حجم نانوذرات را تا حد زیادی کاهش می‌دهد در نتیجه پراکندگی نانوذرات در زمینه را دشوار می‌کند. میزان آگلومراسیون، کیفیت پراکندگی نانوذرات را نشان می‌دهد. افزایش تعداد و اندازه آگلومراسیون‌ها، خواص ماده را تخریب می‌کند. همچنین، ناپایداری نانوذرات در زمینه به علت آگلومراسیون، کنترل اندازه نانوذرات را دشوار می‌سازد. روش‌های متعددی برای جلوگیری از آگلومراسیون پیشنهاد شده است که یکی از متداول ترین این روش‌ها، اصلاح سطحی نانوذرات با استفاده از اصلاح سازها است [۵, ۹, ۲۲]. کاربرد مواد اصلاح کننده سطحی (اصلاح سازها) موجب تغییر سطح آبدوست نانوذره به آبگریز می‌شود. با تغییر شیمیایی در سطح نانوذرات میتوان از آگلومره شدن آنها جلوگیری کرده و وخواص شیمیایی و فیزیکی متفاوتی را در سطح آنها ایجاد کرد ویژگی های آنها را بهبود بخشید. در جدول ۱، مروری بر مطالعات انجام شده پیرامون اصلاح سطحی نانوذرات ZnO و SiO_2 انجام شده است.

جدول ۱– مروری بر مطالعات انجام شده پیرامون اصلاح سطح نانوذرات ZnO و SiO_2

محققین	نانوذره	اصلاح کننده
ونگ و همکاران [23]	ZnO	titanate coupling agent (TCA)
گراست و همکاران [24]	ZnO	aminopropyltriethoxysilane (APTES)
وو و همکاران [25]	ZnO	3-aminopropyl trimethoxysilane(APTES), tetraethyl orthosilicate (TEOS), mercaptosuccinic acid (Ms), 3-mercaptopropyl trimethoxysilane (Mp) polyvinylpyrrolidone (Pv)
هونگ و همکاران [26]	ZnO	Polystyrene
آرچه [27]	SiO_2	aminopropyl triethoxysilane (APS) hexamethyldisilazane (HMDS)
ایشاک [28]	SiO_2	hexamethyldisilazane (HMDS)

در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه بهبود خواص مقره‌ها انجام شده است. مقالات متعددی در رابطه با عایق‌های بکار رفته در

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

صنعت برق و استفاده از علم و فناوری نانو به منظور بهبود خواص مورد انتظار از عایق‌ها به خصوص مقره‌ها وجود دارد [۵, ۹, ۲۲] با این وجود تعداد اندکی از مقالات به بررسی تاثیر این نانو ذرات بر روی آبگریزی و ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی پرداخته‌اند. هدف از این تحقیق مقایسه مقره سرامیکی با مقره سرامیکی پوشش داده شده و مقره سرامیکی نانو پوشش داده شده از نظر استقامت الکتریکی آنها در شرایط مختلف آلودگی مصنوعی می‌باشد. در این راستا از یک نوع نانو پوشش بر مبنای ماده لاستیک سیلیکونی و نانو ذره اکسیدروی اصلاح شده استفاده شده‌است. به منظور جلوگیری از آگلومراسیون نانوذرات در ماده سیلیکونی (RTV) از اصلاح کننده استفاده شده‌است. در مرحله بعد نانوذرات اصلاح سطحی شده به پایه RTV اضافه شدند و تاثیر استفاده از پوشش پلیمری و دو نوع نانوپوشش بهبود یافته، برروی تست چسبندگی و تست آبگریزی پوشش‌های مورد نظر به عنوان معیارهای بهبود عملکردی عایق بررسی شد. مقره‌های پوشش داده شده و بدون پوشش در سطوح مختلف آلوده شده و مورد آزمایش در اتاقک مه تمیز به منظور بررسی ولتاژ تخلیه الکتریکی جزئی قرارگرفته‌اند و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با استفاده از برازش منحنی رابطه‌ای به منظور توصیف نحوه تغییر مقادیر تنش الکتریکی به ازای سطوح مختلف آلودگی پیشنهاد شده‌است. درادامه اطلاعات مربوط به نمونه‌ها نتایج ازمایشگاهی و تحلیل آنها در قسمت نتایج و نتیجه‌گیری آورده شده‌است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

مواد به کار رفته در بخش تجربی این مطالعه، به منظور بدست آوردن نتایج عملیاتی و آزمایشگاهی عبارتند از: پوشش لاستیک سیلیکونی (RTV) ساخت شرکت واکر آلمان، نانوذرات ZnO با میانگین اندازه قطر ۵۰ نانومتر و نانوذرات SiO_2 با میانگین اندازه قطر ۳۰ نانومتر محصول شرکت تماد کالا و دو اصلاح‌کننده APTES[1] و HMDES[2] به ترتیب به منظور متعادل‌سازی سطح نانوذرات ZnO و SiO_2 تهیه شده از کمپانی مرک. به منظور ساخت نانوپوشش، از نانو ذرات ZnO و SiO_2 به منظور ارتقا ویژگی‌های پوشش RTV استفاده شده‌است. به منظور انتخاب نانو پوشش مناسب دو نوع نانوپوشش به شرح زیر سنتز شده و در پوشش‌دهی مقره‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است:

- نانوپوشش۱: نانوذرات ZnO در در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان ۲ ساعت حرارت داده شده و با استفاد از اصلاح‌کننده APTES به نسبت ۱۰۰ به ۲ در محلول استون، اصلاح و متعادل می‌شود. ترکیب حاصل به وسیله همزن مغناطیسی به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط شده و در نهایت فیلتر شده و نانو ذرات در کوره به مدت ۲۴ ساعت برای مدت زمان ۲۴ ساعت حرارت داده می‌شوند و خشک می‌شوند. نانو ذرات اصلاح شده در RTV با نسبت ۱/۵ درصد وزنی ترکیب شده و با استفاده از همزن مغناطیسی مخلوط می‌شود و هموژن‌سازی می‌شود.
- نانوپوشش۲: نانوذرات SiO_2 در در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان ۲ ساعت حرارت داده شده و با استفاد از اصلاح‌کننده HMDS به نسبت ۱۰۰ به ۱ در محلول استون، اصلاح و متعادل می‌شود. ترکیب حاصل به وسیله همزن مغناطیسی به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط شده و در نهایت فیلتر شده و نانو ذرات در کوره به مدت ۲۴ ساعت برای مدت زمان ۲۴ ساعت حرارت داده می‌شوند و خشک می‌شوند. نانو ذرات اصلاح شده SiO_2 و ZnO اصلاح شده به روش قبل در RTV به ترتیب با نسبت ۱و ۲ درصد وزنی ترکیب شده و با استفاده از همزن مغناطیسی مخلوط می‌شود و هموزن‌سازی می‌شود.

مشخصات مقره سرامیکی مورد استفاده بعنوان زیرلایه در جدول ۲ آمده است. به منظور مقایسه مقره‌های سرامیکی بدون پوشش و پوشش/نانوپوشش‌دار از منظر کارایی عایق، چهار نمونه به شرحی که در ادامه آورده شده‌است آماده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

- نمونه اول: مقره سرامیکی بدون پوشش است.

[1] (3-Aminopropyl) triethoxysilane (APTES)
[2] Hexamethyldisilazane (HMDS)

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

- نمونه دوم: مقره سرامیکی پوشش داده شده با پوشش لاستیک سیلیکونی (RTV)،
- نمونه سوم: مقره سرامیکی است که با نانوپوشش (۱) پوشش داده شده‌است. نانو پوشش (۱) شامل نانو ذرات اکسید روی(ZnO) بوده که دارای خواص ویژه‌ای از نظر عایقی و آبگریزی است.
- نمونه چهارم: مقره سرامیکی است که با نانوپوشش (۲) پوشش داده شده‌است. نانو پوشش (۲) شامل نانو ذرات هیبریدی اکسیدروی و اکسیدسیلیسیوم می‌باشد. شکل ۱ مقره‌های به کار رفته در مطالعات تجربی را نشان می‌دهد.

جدول ۲-مشخصات مقره سرامیکی

فاصله خزشی اسمی	بار مکانیکی ویژه	قطر مقره	وزن مقره
۱۹۰ mm	۴۰ KN	۱۷۵ mm	۲۴۰۰ gr



شکل ۱- مقره‌های به کار رفته در مطالعات تجربی

۲-۲-مطالعات ریزساختاری

به منظور بررسی پراکنده شدن کامل نانوذرات در بستر RTV و تایید درستی مراحل سنتز نانوپوشش، با استفاده از روش‌های آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، آنالیز BET و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی FESEM، نانوذرات قبل و بعد از متعادل‌سازی بوسیله اصلاح کننده‌ها و همچنین بعد از اضافه کردن ذرات به RTV مورد مطالعه قرار گرفتند.

آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD): مطالعات پراش اشعه ایکس بمنظور مشاهده ساختار کریستالی ذرات قبل و بعد از اصلاح ذرات انجام شد. مطالعات XRD با استفاده از دستگاه مدل Philips PW1730 با اشعه مشخصه Cu Kα (۰/۱۵۴۰۵۶ نانومتر) در فواصل ۰/۰۵ درجه و فواصل زمانی یک ثانیه به ازای زوایای ۲θ در محدوده ۱۰ تا ۸۰ درجه انجام شد.

آنالیز BET: این آنالیز برای ارزیابی مساحت سطح نانوذرات با استفاده از تکنیک همدمای Brunauer–Emmett–Teller با جذب نیتروژن با استفاده از دستگاه BET,BELSORB MINI II, BEL, JAPAN انجام شد. مقایسه مساحت سطح نانوذرات قبل و بعد از اصلاح سطح نانوذرات، کیفیت اصلاح سطح ذرات را نشان می‌دهد.

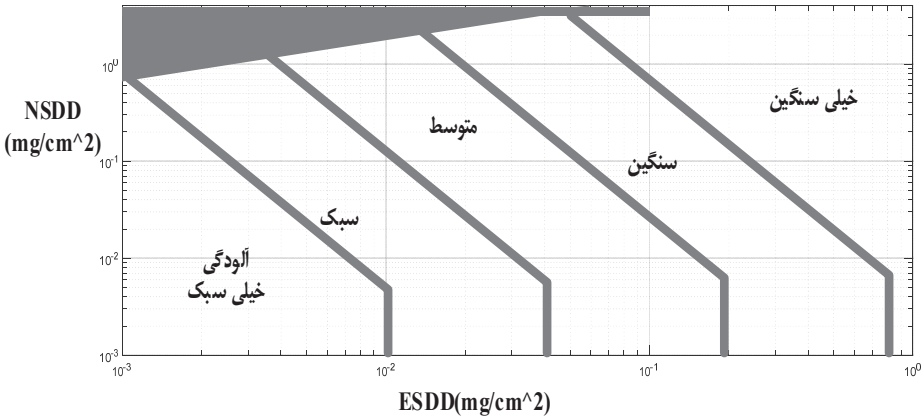
مطالعات FESEM: مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی FESEM با استفاده از ابزار TESCANMIRA3 انجام شد. نمونه‌ها با استفاده از پوشش‌دهنده اسپاترینگ یونی IB-3، پوشش طلا داده شدند. تصاویر حاصل به درک بهتر توپوگرافی سطحی نمونه‌ها کمک می‌کند.

۲-۳- اندازه‌گیری ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی

آلودگی‌های حل‌شونده و غیرحل‌شونده درآب که در سطح مقره‌ها جمع می‌شوند علت اصلی ایجاد تخلیه الکتریکی در این تجهیزات می‌باشند. میزان شدت آلودگی بر اساس دو فاکتور ESDD و NSDD مطابق شکل ۲ دسته بندی می‌شود. در این مطالعه تست عملکردی مقره‌ها در آلودگی‌های مختلف در اتاقک مه تمیز مصنوعی آزمایشگاه مه‌نمکی انجام شده‌است. شکل ۳ تصاویر

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

مربوط به انجام این آزمایش را نشان می‌دهد. به منظور ایجاد آلودگی مصنوعی بر روی سطح مقره‌ها روش توضیح داده شده در استاندارد ISO 8894-2 [۲۹] به کار گرفته شده‌است. ترکیب استفاده شده برای ایجاد آلودگی مصنوعی شامل ۴۰ گرم کائولین، ۱۰۰۰ گرم آب مقطر و مقداری نمک تجاری است. سطح مقره‌ها با استفاده از آب مقطر تمیز شده و بعد از آن مخلوط توصیف شده با روش اسپری‌کردن بر روی مقره‌ها نشانده می‌شود. با طولانی‌کردن مدت زمان اسپری مخلوط آلودگی بر روی مقره‌ها شدت‌های مختلفی از میزان آلودگی بر روی آنها قرار می‌گیرد. شاخص‌هایی که به منظور سنجش میزان آلودگی مجتمع شده بر روی نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند در اکثر مراجع شامل ESDD[1] و NSDD[2] می‌باشند و بر اساس این شاخص‌ها میزان آلودگی در زیرگروه‌های خیلی سبک، سبک، متوسط، سنگین و خیلی سنگین دسته‌بندی می‌شوند. مقره‌های آلوده شده بعد از خشک‌شدن آلودگی بر روی سطوح آنها به طور همزمان در محفظه مه تمیز که دارای سنسوری به منظور تنظیم میزان رطوبت است، قرار داده می‌شوند. بعد از گذشت مدت زمان ۱۵ تا ۲۰ دقیقه به منظور مرطوب شدن سطح مقره‌ها دراثر مه موجود در محیط میزان ولتاژ اعمالی با نرخ ۲/۵ کیلوولت بر ثانیه افزایش داده شده تا زمانیکه تخلیه الکتریکی برای هر نمونه در سطح آلودگی مشخص رخ دهد. مقادیر ولتاژ مربوط به هر نمونه ثبت شده و آزمایش در سه مرحله با فواصل ۵ دقیقه به منظور جلوگیری از اثرگذاری احتمالی، برای هر سطح از آلودگی تکرار می‌شود و مقدار میانگین ولتاژهای ثبت‌شده به عنوان مقدار میانگین ولتاژ تخلیه الکتریکی گزارش می‌شود. در این مطالعه از شاخص ESDD به عنوان معیاری از شدت آلودگی استفاده شده است. رویه محاسبه میزان شدت آلودگی براساس آنچه در استاندارد توضیح داده‌شده انجام شده است.



شکل ۲- میزان ESDD و NSDD در شدت مختلف آلودگی [۳۰].



شکل ۳- مراحل مختلف آزمایش

[1] equivalent salt deposit density
[2] none soluble deposit density

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

۲-۴-اندازه‌گیری چسبندگی

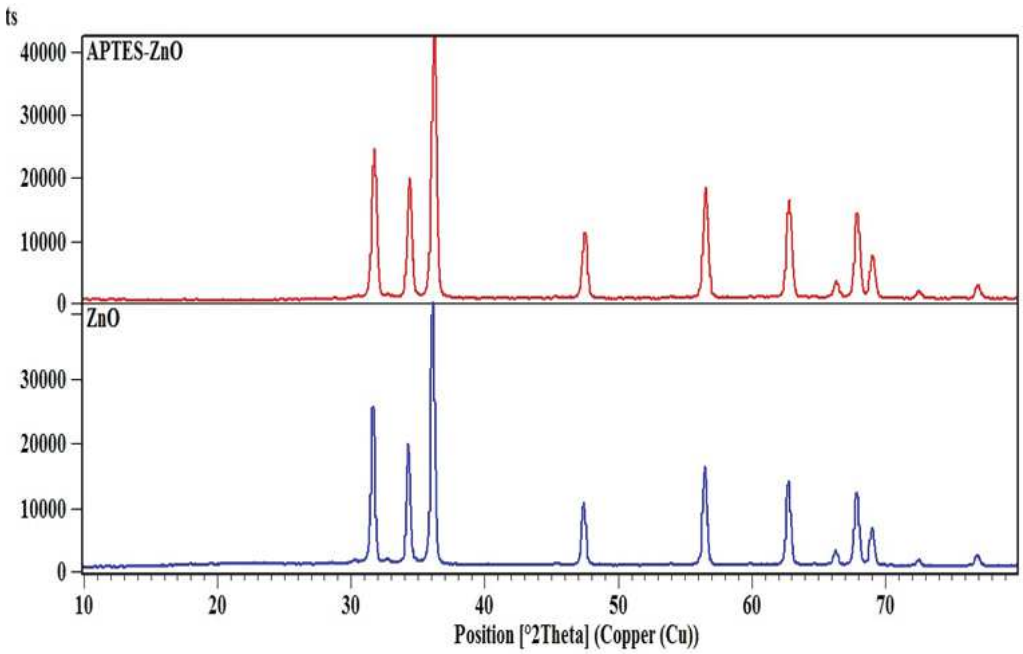
تست چسبندگی مطابق با استاندارد IEEE1523 (2018) [۳۱] انجام شد. در این آزمون مقره‌ها به مدت ۱۰۰ ساعت داخل یک ظرف فلزی محتوی آب جوشان غوطه‌ور است. هدایت آب داخل محفظه ۱۶۵۰µs/cm ±50 µs/cm در دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد است.

۲-۵-اندازه‌گیری آبگریزی

توانایی یک سطح در دفع آب، آبگریزی نامیده می‌شود. این ویژگی به صورت شکل‌گیری قطرات قابل تشخیص و مجزای آب بر روی سطح مورد نظر نمود پیدا می‌کند. آبگریزی یکی از ویژگی‌های مهم سطوح عایقی است و به عنوان یک مشخصه در ارزیابی عملکرد عایق استفاده می‌شود. آلودگی‌های مختلف از جمله آلودگی نمکی هدایت الکتریکی کافی به منظور برقراری جریان نشتی در سطح عایق را دارا نمی‌باشند. مشکل زمانی شروع می‌شود که این آلودگی سطحی مجتمع شده بر روی عایق بوسیلهٔ بارندگی و در حضور قطرات آب مرطوب شده و باعث بروز تخلیه الکتریکی شود. به منظور مقابله با این مشکل استفاده از پوشش‌های لاستیک سیلیکونی RTV که سطوح عایقی را آبگریزی می‌کنند، به عنوان یکی از روش‌های رایج مورد کاربرد است. باتوجه به اهمیت ارزیابی آبگریزی سطح یک عایق، تست زاویه تماس یک روش رایج و قابل اعتماد برای این منظور می‌باشد. روش انجام تست شامل قراردادن قطرات آب بر روی سطح مورد نظر و اندازگیری زاویه تماس در نقطه تماس سه‌گانه هوا و قطره آب و سطح عایق است. اگر میزان زاویه تماس اندازه‌گیری شده کمتر از ۹۰ درجه باشد، سطح مورد نظر آبدوست و اگر بیش از این مقدار باشد آبگریز در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق اندازه‌گیری زاویه تماس برای نمونه‌های ذکر شده به منظور مقایسه آبگریزی نانوپوشش و پوشش سیلیکونی پیشنهادی انجام شده است ونتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نخست نتایج مربوط به ارزیابی تاثیر اصلاح سطح نانو ذرات بوسیله مواد اصلاح‌کننده آورده می‌شود. مطالعات XRD اطلاعات ارزشمندی در رابطه با فاز و ساختار کریستالی مواد ارائه می‌دهند. به همین منظور آنالیز XRD در مورد نانوذرات ZnO قبل و بعد از متعادل‌سازی با APTES انجام شده‌است و نتایج در شکل ۴ آورده شده‌است.



شکل ۴- نتایج آنالیز XRD مربوط به APTES_ZnO و ZnO

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

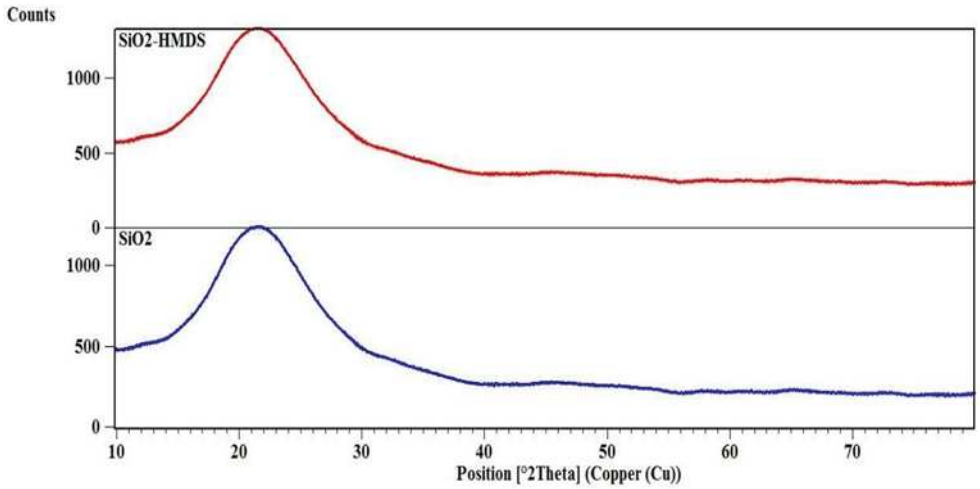
در نانوذرات ZnO اصلاح سطحی نشده، یازده پیک مربوط به 2θ در زوایای ۳۱/۷، ۳۴/۵، ۳۶/۳، ۴۷/۶، ۵۶/۵، ۶۲/۷، ۶۶/۳، ۶۹/۱، ۷۵/۵ و ۷۶/۸ درجه مشاهده شد که به ترتیب مربوط به صفحات (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱)، (۱۰۲)، (۱۱۰)، (۱۰۳)، (۲۰۰)، (۱۱۲)، (۲۰۱) و (۲۰۲) از ساختار زیرکونیای هگزاگونال است. با توجه به پیک‌های مشاهده شده در این الگو و مطابقت با نمونه استاندارد ZnO (ICSD, 01-089-7102) قابل نتیجه‌گیری است که ساختار نانوذرات قبل و بعد از اصلاح سطح تغییر نکرده‌است.

اندازه نانوذرات ZnO با استفاده از رابطه دبای شرر قابل محاسبه است:

$$D = K\lambda/(\beta \cos\theta) \quad (۱)$$

که در آن K ثابت شرر (برابر با ۰/۹)، λ طول موج اشعه ایکس، β پهنای پیک در نصف ارتفاع بیشینه (FWHM) و θ زاویه پراش براگ است. با استفاده از این رابطه اندازه ذرات در نانوذرات ZnO و نانوذرات ZnO اصلاح سطحی شده به ترتیب برابر با ۵۲ و ۴۹/۲ نانومتر بدست آمد که باز هم موید این نکته است که ذرات ابعاد خود در محدوده نانو را حفظ کرده‌اند [۹].

شکل ۵ الگوی XRD مربوط به نانوذرات SiO_2 قبل و بعد از اصلاح توسط HMDS نشان می‌دهد و تاییدکننده حفظ ساختار آمورف این نوع نانو ذرات می‌باشد. الگوی XRD نانوذرات SiO_2 قبل از اصلاح سطحی یک قله پهن در محدوده ۱۵ تا ۳۰ درجه را نشان می‌دهد. عدم وجود پیک‌های تیز نشان‌دهنده ساختار آمورف است. پس از اصلاح سطحی، الگوی XRD نانوذرات SiO_2 تغییری نکرده است.



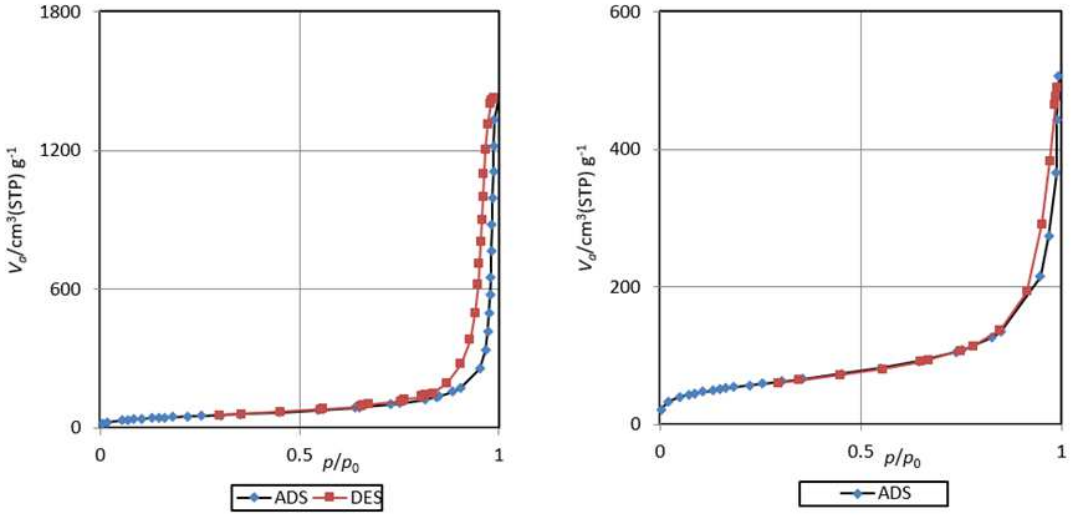
شکل ۵- نتایج آنالیز XRD مربوط به SiO_2-HMDS و SiO_2

با استفاده از نتایج آنالیز BET، سطح ویژه[۱] نانوذرات قابل محاسبه است. این پارامتر از این جهت حائز اهمیت است که معیاری برای برآورد انرژی سطحی و اندازه ذرات و قابلیت پخش شدن نانوذرات در بستر مورد نظر به دست می‌دهد. شکل‌های ۶ و ۷ نمودارهای جذب و واجذب نانوذرات ZnO و SiO_2 را قبل و بعد از اصلاح سطحی نشان می‌دهد. نمودار ایزوترم جذب و واجذب نانوذرات ZnO و نانوذرات SiO_2 از نوع پنجم هستند. همانگونه که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود پس از اصلاح سطحی نانوذرات، هیستزیس مشاهده شده محدود و نسبتاً مسطح شده است که نشان‌دهنده کاهش آگلومراسیون ذرات و کاهش حجم حفرات ایجاد شده مابین ذرات تجمع یافته است. نتایج محاسبات سطح ویژه نانوذرات ZnO و SiO_2 به ترتیب در جدول ۳ آورده شده‌است. با مقایسه مقادیر موجود در این جداول به می‌توان نتیجه گرفت که سطح ویژه هر دو نوع نانوذرات بعد از عملیات اصلاح سطح افزایش پیدا می‌کند که نشان‌دهندهٔ کاهش میزان آگلومراسیون ذرات پس از اصلاح سطحی است. این امر حاکی از آن است که تمایل به به هم چسبیدگی نانوذرات کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه از ویژگی نانو ذرات در جهت بهبود خاصیت مورد نظر می‌توان بهره برد. در مطالعه انجام شده توسط ونگ و همکاران [۲۳] مشخصه‌های حرارتی و فیزیکی نانوکامپوزیت RTV/ZnO بررسی شد. در این مطالعه نانو ذرات ZnO توسط TCA اصلاح سطحی شدند. بر مبنای نتایج گزارش شده سطح ویژه Nano ZnO و Nano ZnO-TCA به ترتیب54/19 ($m^2\ g^{-1}$) و ۲۸/۷۳ گزارش شده است و موید آن است که اصلاح سطح نانوذرات

[۱] specific surface area

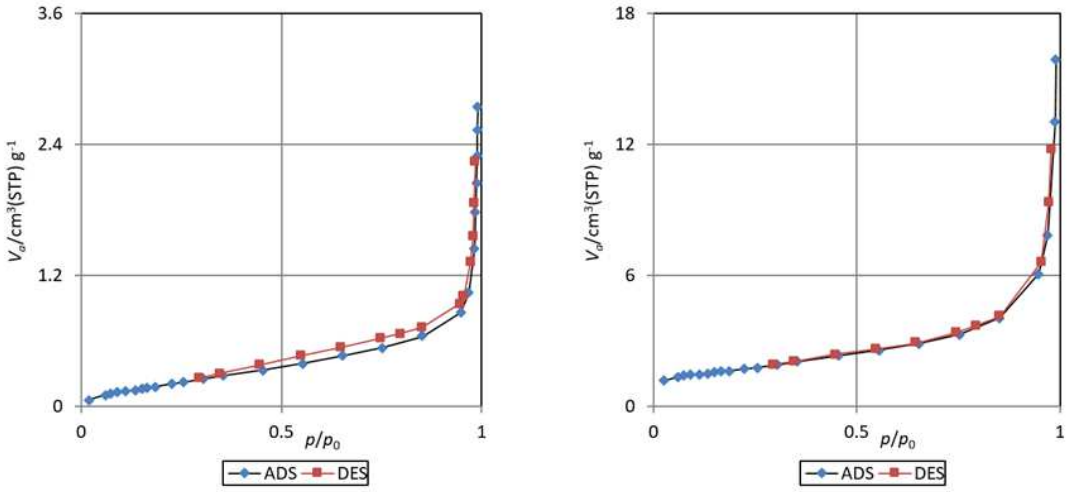
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

موجب بهبود پراکندگی نانوذرات در زمینه خواهد شد.



(ب) (الف)

شکل ۶- نمودارهای جذب و واجذب مربوط به الف) SiO_2 و ب) SiO_2-HMDS.



(ب) (الف)

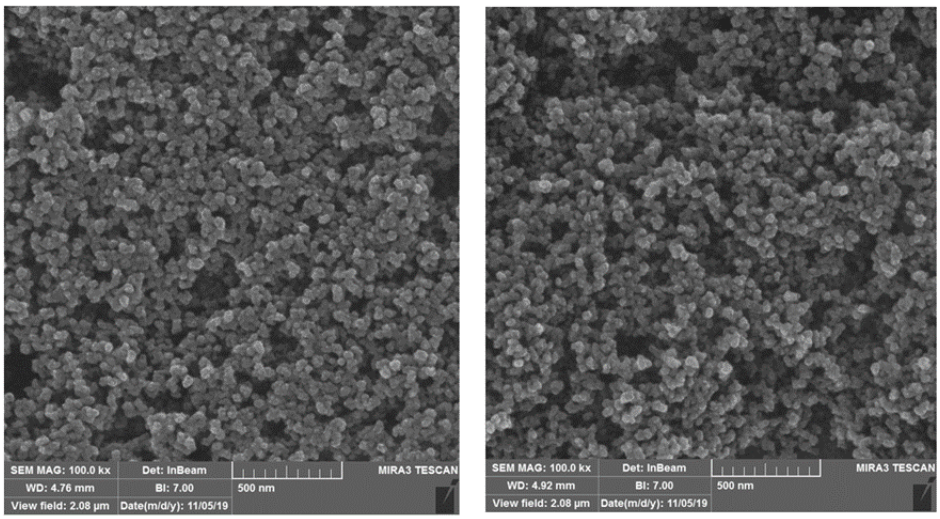
شکل ۷- نمودارهای جذب و واجذب مربوط به الف) ZnO و ب) APTES_ZnO

جدول ۳- نتایج محاسبات سطح ویژه نانوذرات ZnO و نانوذرات SiO_2

نمونه	میانگین قطر حفرات(nm)	سطح ویژه ($m^2\ g^{-1}$)
ZnO	۱۵/۴۸۸	۵/۸۶
APTES-ZnO	۱۱/۶۵	۱۳/۰۸۶
SO_2	۴۶/۹۵۸	۱۷۷/۶۸
HMDS-SO_2	۱۴/۶۵۷	۱۹۶/۴۳

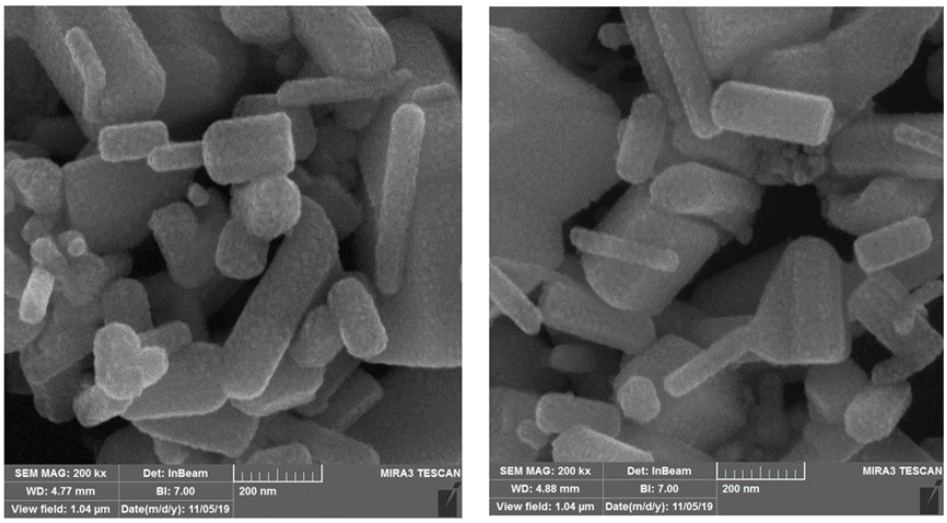
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

برای اطمینان حاصل کردن از این امر که اصلاح سطح نانوذرات بر شکل و ساختار نانوذرات تاثیر نگذاشته‌است، تصاویر FESEM مطابق شکل‌های ۸ و ۹ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به این تصاویر به روشنی قابل درک است ساختار نـانوذرات در طـول پروسه متعادل‌سازی دستخوش تغییر نشده و همچنین مشخصات مورفولوژی نانوذرات از قبیل شکل و اندازه از طریق این تصاویر قابل مقایسه و اندازه‌گیری است. به عبارت دیگر براساس این تصاویر سایز نانوذرات ZnO قبل و بعد از اصلاح، ۴۸ و ۵۴ نانومتر و دارای شکل شش‌گوش است. اندازه ذرات حاصل از تصاویر FESEM با اندازه ذرات محاسبه شده با استفاده از نتایج آنـالیز پـراش اشعه ایکس همخوانی دارد. پس از سنتز نانوپوشش و به منظور اطمینان از پخش‌شدن نانو ذرات در RTV مـورد اسـتفاده تصـاویر FESEM مربوط به RTV و Nano–RTV در شکل ۱۰ آورده شده‌است که تایید کننده حضور پراکنده نانو ذرات در پوشـش مـورد استفاده است. این امر تایید می کند که اصلاح سطحی نانوذرات با موفقیت انجام شده است.



(ب) (الف)

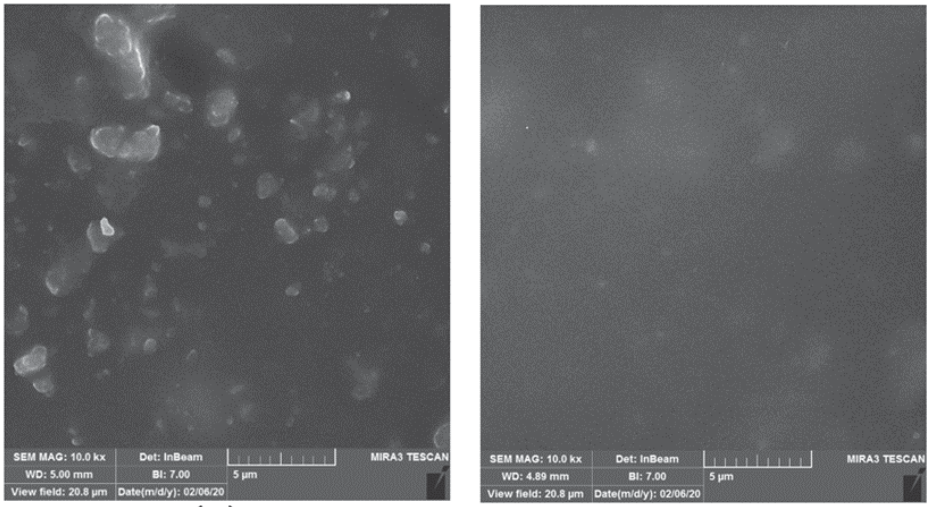
شکل ۸– تصاویر FESEM الف) nano SiO_2 و د) SiO_2-HMDS



(ب) (الف)

شکل ۹– تصاویر FESEM الف) nano ZnO ب) ZnO-APTES

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]



(ب) (الف)

شکل ۱۰- تصاویر FESEM مربوط به الف) نانو RTV و ب) RTV

رابط بین مقادیر ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی و مقادیر ESDD را با معادله (۲) می‌توان بیان کرد که مقادیر a و bدر این رابطه براساس برازش منحنی و اطلاعات آزمایش‌های عملی بدست‌آمده محاسبه شده است. به منظور مقایسه عملکرد مقره‌های مورد آزمایش در این مقاله، از طریق این معادله نیاز به محاسبه مقدار ESDD در پایان هر ۵ مرحله تکرار آزمایش می‌باشد. برای این منظور بعد از جمع‌آوری میزان آلودگی موجود بر روی سطح هر نمونه با استفاده از یک دستمال نخی تمیز و مقدار ۳۰۰ سی‌سی آب مقطر، مقدار هدایت الکتریکی محلول محاسبه شده است. شکل ۱ مقادیر مختلف ESDD و NSDD برای سطوح مختلف آلودگی را نشان می‌دهد. مقادیر هدایت الکتریکی به‌دست‌آمده در رابطه (۳) که مربوط به محاسبه ESDD است قرار داده شده و مقادیر شدت آلودگی متناظر با ولتاژهای آستانه تخلیه الکتریکی بدست می‌آیند.

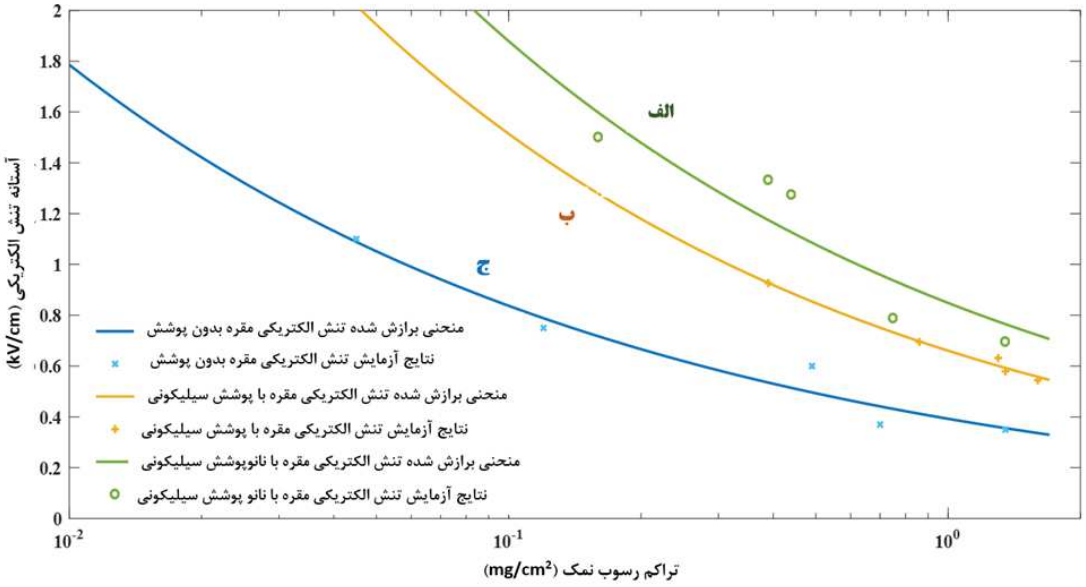
$$E = a\,(ESDD)^{-b} \quad (۲)$$

$$ESDD = (5.7\times\delta_0)^{1.03}\times V_{water}/S \quad (۳)$$

که در (۲)، δ_0 مقدار هدایت الکتریکی محاسبه شده محلول آلودگی شسته شده، V_{water}حجم آب مقطر مصرفی و S سطح مقره مورد آزمایش می‌باشد. و با توجه به نتایج بدست آمده و روابط (۲) و (۳) برای سه مقره سرامیکی بدون پوشش و پوشش داده شده باRTV و نانوRTV، نتایج تست تخلیه الکتریکی جزئی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، منحنی (الف) مربوط به نانوپوشش، منحنی (ب) مربوط به پوشش و منحنی (ج) مربوط به مقره سرامیکی بدون پوشش است. هر نقطه از این منحنی نماینده‌ی میانگین اندازه‌گیری‌های مربوط به هر آزمایش در یک سطح آلودگی مشخص است. مقادیر مربوط به محور عمودی بر اساس مقادیر ولتاژ تخلیه الکتریکی در واحد فاصله نشتی مقره بیان شده است و مقادیر محور افقی میزان شدت آلودگی مصنوعی ایجاد شده (ESDD) را نشان می‌دهد. بر اساس این منحنی، می‌توان کاهش قابل توجه درمقادیر ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی با افزایش میزان آلودگی را مشاهده کرد. علت این امر ایجاد رسانایی بیشتر سطح مقره مورد آزمایش در آلودگی‌های بیشتر و در نتیجه وقوع پدیده تخلیه الکتریکی جزئی در مقادیر ولتاژ پایین‌تر می‌باشد. مقره سرامیکی بدون پوشش در محیط‌هایی با آلودگی متوسط و زیاد و خیلی زیاد عملکرد مناسبی از نظر تخلیه الکتریکی نشان نداده است. منحنی (ب) در شکل ۱۱ مربوط به مقره پوشش داده شده با پوشش پلیمری RTV است. از نحوه تغییرات مقادیر ولتاژ در واحد فاصله خزشی در مقابل شدت آلودگی به راحتی قابل استنباط است که در این مورد هم با افزایش شدت آلودگی مقادیر آستانه ولتاژ برای بروز پدیده تخلیه الکتریکی کاهش پیدا می‌کند. اما در مقایسه با منحنی (الف) نرخ این تغییرات با شیب کمتری صورت گرفته و به طور کلی مقادیر بدست آمده ولتاژ مربوط به نمونه پوشش داده شده در هر سطح آلودگی در مقایسه با مقره بدون پوشش بالاتر است که این نشان‌دهنده‌ی بهبود عملکردی حاصل از استفاده از پوشش‌های پلیمری RTV است. پوشش به کار رفته با بهبود خواصی از جمله آبگریزی و خواص عایقی، باعث می‌شود که تخلیه الکتریکی در ولتاژ بالاتری رخ دهد. در این مقره

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

شاهد افزایش کارایی به ویژه در محیط‌هایی با آلودگی متوسط و سنگین هستیم. منحنی (الف) در شکل ۱۱ مربوط به مقره نانو پوشش داده شده است. در این نمونه افزایش ولتاژ تخلیه الکتریکی در مقایسه با دو مقره دیگر دیده می‌شود. بهبود خاصیت الکتریکی عایق در این مقره به دلیل استفاده از نانو ذرات به کار رفته و درنتیجه عملکرد مناسب نمونه در محیط‌هایی حتی با آلودگی خیلی زیاد است. نتایج بدست آمده می‌توانند به عنوان معیاری از استقامت الکتریکی مقره‌ها در حضور و عدم حضور پوشش و نانوپوشش‌ها در مدل‌های عایقی استفاده شوند. آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات مناسب می‌تواند باعث بهبود عملکرد الکتریکی مقره شده و در مواردی که نانو ذرات به درستی انتخاب و مورد استفاده قرار گیرند بهبود چشمگیری در خواص عایقی مقره رخ خواهد داد. از آنجا که تخمین طول عمر و نرخ خرابی تجهیزات الکتریکی بر اساس استقامت الکتریکی و مکانیکی و حرارتی و اطلاعات آماری بدست آمده از بهره‌برداری و رخدادهای خرابی آنها قابل استحصال است، انتظار می‌رود با استفاده از این نتایج که نشان دهنده‌ی ارتقا خاصیت عایقی تجهیز مورد نظر می‌باشند، قابلیت اطمینان بالاتری در شبکه قدرت در صورت استفاده از مواد با خاصیت بهتر حاصل شود. شکل ۵ نتایج تست اندازه‌گیری زاویه تماس را نشان می‌دهد. با مقایسه مقادیر مربوطه مشاهده می‌شود که عملکرد آبگریزی نانوپوشش در مقایسه با پوشش سیلیکونی RTV خالص بهبود پیدا کرده است. افزایش زاویه تماس تاییدکننده بهبود عملکردی مقره نانوپوشش داده شده در شرایط محیطی مرطوب و آلوده است.



شکل ۱۱–میزان تنش الکتریکی در آلودگی‌های مختلف برای مقره با الف) نانو پوشش. ب) پوشش. ج) بدون پوشش

یکی از ویژگی‌های اصلی پوشش در نواحی اقلیمی خاص، اهمیت چسبندگی پوشش به سطح سرامیک است. روشن است که وزش باد همراه با مقادیر زیاد نمک، سبب فرسایش و پریدگی پوشش می‌شود. پس از بلند شدن پوشش از روی سطح، نفوذ آلودگی اشباع از نمک به فصل مشترک پوشش وسطح سرامیک، سبب ایجاد شرایط ناخواسته برای کارایی پوشش می‌گردد. به همین دلایل، کاربرد موفق پوشش در محیط‌های بیابانی نیازمند چسبندگی خوب به سطح سرامیک می‌باشد [۱۰]. شکل ۱۲ تصویر نمونه‌ها قبل و بعد از ظاهر نمونه‌ها قبل و پس از انجام آزمون سنجش چسبندگی با آب جوش نشان می‌دهد. را نشان می دهد. در تست چسبندگی ملاک قبولی آزمون، عدم نفوذ آب بین لایه RTV و سرامیک مقره و عدم ایجاد حباب زیر لایه RTV ملاک قبولی آزمون است. نتیجه آزمون با استاندارد مطابقت دارد. تخریب نمونه‌ها در نمونه مقره حاوی نانوپوشش ۲ کمتر از سایر نمونه‌ها بود.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]



نمونه قبل از قرار گرفتن در آب جوش



نمونه پس از قرار گرفتن در آب جوش

شکل ۱۲- ظاهر نمونه‌ها قبل و پس از انجام آزمون سنجش چسبندگی با آب جوش

پوشش‌های لاستیک سیلیکونی بر روی سطح مقره‌های سرامیکی از قبل نصب شده اعمال می‌شوند و باعث ایجاد خاصیت آبگریزی در سطح می‌شوند [۳۲]. تشکیل قطرات آب بر روی سطح سیلگارد شده ناشی از این خاصیت پوشش‌های عایقی سیلیکونی می‌باشد که مانع از تشکیل یک مسیر خطی از آب گردیده و بدینوسیله از کاهش سطح عایقی مقره و بروز تخلیه الکتریکی جلوگیری خواهد نمود [۲]. آب گریزی از خواص استثنائی این محصول می‌باشد که بعد از سال‌ها از بین نمی رود. RTV قادر است خاصیت آب گریزی خود را بعد از آلوده شدن احیاء نماید. خاصیت Hydrophobic از تشکیل یک نوار آب بر روی سطح سیلیکون جلوگیری می‌کند و آب بر روی آن به صورت قطره قطره باقی می‌ماند. به همین دلیل مقاومت سطحی آن کاهش پیدا نمی‌کند و احتمال ایجاد آرک در این نوع مقره‌ها به حداقل می‌رسد. [۳۳, ۳۴] پیوند قوی مولکولی سیلیکون باعث می‌شود که اگر لایه‌ای از آلودگی یا غبار بر روی سطح آن بنشیند مولکول‌های سیلیکون به سمت بالا حرکت کرده و لایه زاید را در بربگیرند به خاطر همین طرح خارجی پوشش همواره سیلیکونی است به این عمل خاصیت بازیافت (RECOVERY) می گویند [۲]. شکل ۱۳ افزایش آبگریزی سطح مقره حاوی نانوپوشش ۱ را نشان می‌دهد. جهت اندازه‌گیری کاهش خاصیت آبگریزی معمولاً از اندازه گیری زاویه تماس (ترکنندگی) استفاده می‌شود.

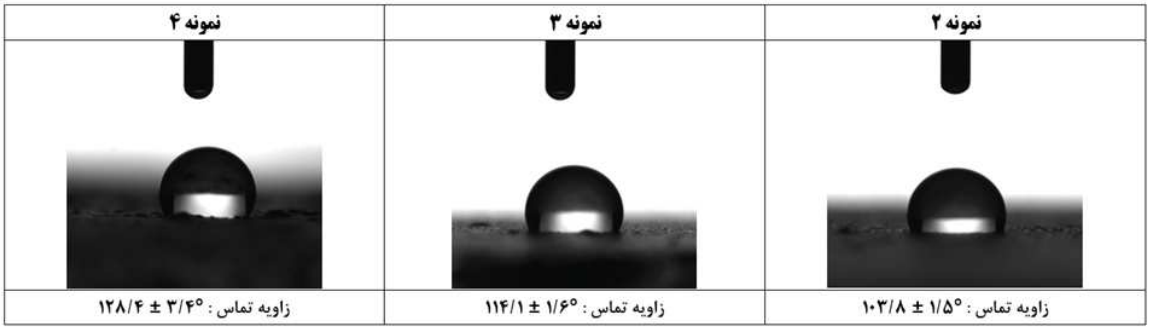


شکل ۱۳- خاصیت آبگریزی سطح مقره بعد از اعمال پوشش RTV

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

شکل۱۴ نتایج حاصل از اندازه‌گیری زاویه تماس برای مقره‌های پوشش داده شده با RTV، نانوپوشش ۱ ونانوپوشش ۲ را نشان می‌دهد. مقادیر گزارش شده، متوسط مقدار چهار اندازه‌گیری انجام شده برای هر نمونه در نقاط مختلف سطح مورد بررسی با مقادیر به ترتیب ۱۰۳،۱۲۸ و ۱۱۴ درجه می‌باشند. با توجه به این مقادیر، این نتیجه حاصل می‌شود که تمامی پوشش‌های استفاده شده خاصیت آبگریزی را دارند و در دسته‌بندی سطوح آبگریز قرار دارند. همچنین نمونه پوشش داده شده با نانوپوشش ۱ در مقایسه نانوپوشش ۲، میزان آبگریزی بیشتری از خود نشان داده است. این در حالی است که نانوپوشش ۲ در مقایسه با پوشش RTV خالص عملکرد آبگریزی بهتری دارد. این نتایج با نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی در تطابق است. به عبارت دیگر اگرچه افزایش آبگریزی یکی از موارد تاثیرگذار در عملکرد بهتر الکتریکی مقره در شرایط مرطوب و آلوده است اما رابطه مستقیمی بین بهبود سطح آبگریزی و عملکرد الکتریکی مقره‌های پوشش داده شده وجود ندارد و نوع نانو ذرات و درصد انتخابی و ویژگی‌های نانوذرات، همگی در عملکرد نهایی آنها موثر است.



شکل ۱۴- نتایج حاصل از اندازه‌گیری زاویه تماس

در پژوهش انجام شده توسط مومن و فرزانه [۲۲]، یک پوشش پایدار نانوکامپوزیتی با خاصیت ابرآبگریزی بر پایه لاستیک سیلیکونی و حاوی نانوذرات ZnO و SiO_2 مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه حاکی از دستیابی به زاویه تماس ۱۶۲° بود که در تطابق با نتایج پژوهش حاضر است.

در صورت رسوب ذرات آلودگی روی لایه پوشش‌دهنده، سیلیکون‌های با وزن مولکولی کم (LMW[1]) از مواد بالک سیلیکون به لایه آلودگی گسترش یافته و در مدت زمان کوتاهی این ذرات را احاطه می‌کنند و در نتیجه سطح عایق دوباره آبگریز می‌شود (شکل ۱۴) [۳۵،۳۶]. همچنین بعد از انجام عملیات پوشش‌دهی مقره‌ها، به علت چسبندگی بسیار قوی پوشش با سطح مقره، بخشی از مقره که دچار ترک مویی ترمیم می‌شود و از بروز مشکلات بعدی بطور کامل جلوگیری می‌نماید [۳۷] .

۴- نتیجه‌گیری

امروزه خطوط انتقال با توجه به افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و تولید انرژی الکتریکی در شبکه قدرت از اهمیت بالایی برخوردار هستند. و در نتیجه مسائل مربوط به آن‌ها از جمله برنامه‌ریزی توسعه خطوط و همچنین ارزیابی قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری اجزای آن می‌تواند کمک شایانی در راستای بهبود عملکرد سیستم قدرت باشد. در این مقاله ابتدا اصلاح سطحی نانوذرات ZnO و SiO_2 به ترتیب با استفاده از APTES و HDMS با هدف بهبود توزیع نانوذرات و جلوگیری از آگلومراسیون انجام شد. با استفاده از روش‌های آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، آنالیز BET و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) اصلاح سطح نانوذرات بررسی شد. در مرحله بعد نانوذرات اصلاح سطحی شده به پایه RTV اضافه شدند و تاثیر استفاده از پوشش‌های پلیمری RTV و نانو پوشش بهبودیافته بر ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی مقره‌های سرامیکی درحضورآلودگی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج عملی بدست آمده از آزمایش‌های مربوطه با استفاده از تطابق دادن با منحنی مناسب مقایسه شد. برای این منظور آزمون تحقیقاتی مه تمیز در سطوح مختلف آلودگی بر روی سه مقره آماده شده

[1] low molecular weight

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

انجام شد و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته شد. نتایج نشان داد که مقره دارای نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی RTV بیشترین و مقره بدون پوشش کمترین ولتاژ تخلیه الکتریکی رانشان می‌دهد. نتایج نشان داد که خاصیت چسبندگی پوشش لاستیک سیلیکونی با افزودن نانوذرات بهبود یافته است. همچنین نتایج تست اندازه‌گیری زاویه تماس نشان داد کـه مقـره دارای نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی RTV حاوی نانوذرات SiO_2 بیشترین آبگریزی رانشان مـی‌دهـد. بـر مبنـای نتـایج، بـا افزایش میزان آبگریزی جریان نشتی کاهش می‌یابد. بر مبنای نتایج، احتمال رخداد تخلیه الکتریکی در مقـره حـاوی نانوپوشـش لاستیک سیلیکونی به ویژه در محیط‌های با آلودگی زیاد کاهش یافته و این امر قابلیت اطمینان بالاتری را در سطح شبکه قدرت ایجاد می‌کند.

منابع

[1] P. Bala, R. Bose, and S. Chatterjee, “Electric stress analysis of a 11 kV RTV silicone rubber coated porcelain insulator,” 2016 - Bienn. Int. Conf. Power Energy Syst. Towar. Sustain. Energy, PESTSE 2016, 2016, doi: 10.1109/PESTSE.2016.7516482.

[2] Suwarno and A. B. Wibowo, “Increasing the performances of various types’ outdoor insulators by using RTV silicone rubber coating,” Int. J. Electr. Eng. Informatics, vol. 4, no. 4, pp. 608–619, 2012, doi: 10.15676/ijeei.2012.4.4.7.

[3] S. Braini, “Coatings for Outdoor High Voltage Insulators,” Thesis Submitt. to Cardiff Univ. candidature degree PhD, pp. 1–182, 2013.

[4] A. Ibrahim, L. Nasrat, and H. Elassal, “Improvement of Electrical Performance for Porcelain Insulators Using Silicone Rubber Coating,” Int. J. Innov. Res. Electr., vol. 2, no. 8, pp. 2321–5526, 2014, [Online]. Available: www.ijireeice.com.

[5] M. Taghvaei, M. Sedighizadeh, N. NayebPashaee, and A. S. Fini, “Reliability assessment of RTV and nano-RTV-coated insulators concerning contamination severity,” Electr. Power Syst. Res., vol. 191, no. June 2020, p. 106892, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106892.

[6] S. Ansorge, “Improvement of Silicone Rubber for High Voltage Applications by Addition of Fillers,” no. 22763, p. 157, 2015, [Online]. Available: http://hdl.handle.net/20.500.11850/155372.

[7] Rachmawati, D. Fauziah, H. Alfiadi, and Suwarno, “Leakage current characteristics study on electrical equivalent circuit of field-Aged rtv silicone rubber coated and noncoated insulators in a coastal area,” Int. Conf. High Volt. Eng. Power Syst. ICHVEPS 2017 - Proceeding, vol. 2017-Janua, pp. 455–459, 2017, doi: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225889.

[8] E.A. Cherney; R. Hackam; S.H. Kim, “Porcelain insulator maintenance with RTV silicone rubber coatings”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 3, pp. 1177–1181, 1991.

[9] M. Taghvaei, M. Sedighizadeh, N. NayebPashaee, and A. Sheikhi Fini, “Thermal stability of nano RTV vs. RTV coatings in porcelain insulators,” Therm. Sci. Eng. Prog., vol. 20, no. May, p. 100696, 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2020.100696.

[10] C. Zhang, S. Wan, L. Wang, and Z. Guan, “Pollution flashover performance of 220 kV glass insulator strings covered with incomplete spraying PRTV coatings,” Proc. 2012 IEEE Int. Power Modul. High Volt. Conf. IPMHVC 2012, pp. 443–445, 2012, doi: 10.1109/IPMHVC.2012.6518775.

[11] S. Ilhan and E. A. Cherney, “Comparative tests on RTV silicone rubber coated porcelain suspension insulators in a salt-fog chamber,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 25, no. 3, pp. 947–953, 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.006968.

[12] Wacker Chemie AG, “Room temperature vulcanizing (rtv) silicones,” 2018.

[۱۳] غریبی، ع. وزیری، ه. و قاسمی، و.، "بررسی تاثیر شرایط جوی بر روی عملکرد مقره‌های فشارقوی در مناطق جنـوبی اسـتان بوشهر و ارایه راهکار مناسب جهت مقابله با آن"، دومین کنفرانس بین المللی مهندسی برق، ۱۳۹۶.

[۱۴] جزایری، ح. احسانی،م. و فرهنگ، ف. "بررسی نقش پوشش‌های سیلیکونیRTV در بهبـود رفتـار مقـره‌هـای سـرامیکی در

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

محیط‌های آلوده"، مجله علوم و فناوری رنگ، ۲(۱)، ۹-۲۲، ۱۳۸۷.

[15] E. A. Cherney et al., “RTV silicone rubber pre-coated ceramic insulators for transmission lines,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 20, no. 1, pp. 237–244, 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6451363.

[16] M. M. Hussain, S. Farokhi, S. G. McMeekin, and M. Farzaneh, “Effect of cold fog on leakage current characteristics of polluted insulators,” 2015 Int. Conf. Cond. Assess. Tech. Electr. Syst. CATCON 2015 - Proc., pp. 163–167, 2016, doi: 10.1109/CATCON.2015.7449527.

[17] Du, B. X., Tao Han, and J. G. Su. "Tree characteristics in silicone rubber/SiO_2 nanocomposites under low temperature." IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 21, no. 2, pp. 503-510, 2014.

[18] Yang, Huan, Qun Gao, Yunting Xie, Qian Chen, Chunfa Ouyang, Yaomin Xu, and Xiaoting Ji. "Effect of SiO2 and TiO2 nanoparticle on the properties of phenyl silicone rubber." Journal of Applied Polymer Science 132, no. 46, 2015.

[19] Wu, Lianfeng, Xianming Wang, Liang Ning, Jianjun Han, Zhong Wan, and Min Lu. "Improvement of silicone rubber properties by addition of nano-SiO_2 particles." Journal of applied biomaterials & functional materials 14, no. 1_suppl, pp. 11-14, 2016.

[20] El-Naggar, Mehrez E., Ahmed G. Hassabo, Amina L. Mohamed, and Tharwat I. Shaheen. "Surface modification of SiO_2 coated ZnO nanoparticles for multifunctional cotton fabrics." Journal of colloid and interface science 498, pp. 413-422, 2017.

[21] Li, Rui, Jianzhong Pei, and Changle Sun. "Effect of nano-ZnO with modified surface on properties of bitumen." Construction and Building Materials, no. 98, pp. 656-661, 2015.

[22] G. Momen and M. Farzaneh, “A ZnO-based nanocomposite coating with ultra-water repellent properties,” Appl. Surf. Sci., vol. 258, no. 15, pp. 5723–5728, 2012, doi: 10.1016/j.apsusc.2012.02.074.

[23] Wang, Rui, Congzhen Xie, Leilei Zeng, and Huasong Xu. "Thermal decomposition behavior and kinetics of nanocomposites at low-modified ZnO content." RSC advances 9, no. 2, pp. 790-800, 2019.

[24] Grasset, F., Saito, N., Li, D., Park, D., Sakaguchi, I., Ohashi, N., Haneda, H., Roisnel, T., Mornet, S. and Duguet, E., Surface modification of zinc oxide nanoparticles by aminopropyltriethoxysilane. Journal of Alloys and Compounds, no. 360, vol. 1-2, pp.298-311, 2003.

[25] Wu, Yongling Linda, A. I. Y. Tok, Freddy Yin Chiang Boey, Xian Ting Zeng, and Xin Hai Zhang. "Surface modification of ZnO nanocrystals." Applied Surface Science 253, no. 12, pp. 5473-5479, 2007.

[26] Wu, Yongling Linda, A. I. Y. Tok, Freddy Yin Chiang Boey, Xian Ting Zeng, and Xin Hai Zhang. "Surface modification of ZnO nanocrystals." Applied Surface Science, no. 253, vol. 12, pp. 5473-5479, 2007.

[27] Arreche, R.A., Blanco, M.N., Martínez, J.M. and Vázquez, P.G., Structural synthesis of hydrophilic and hydrophobic silica for its use in food packaging films. Procedia Materials Science, 1, pp.572-579, 2012.

[28] Nurulizzah Ishak, N. "Synthesis and Characterization of Nano Silica from Local Siliceous Sand", (2010).

[29] ISO 8894-2, International Standard International Standard, vol. 2006.

[30] IEC TS 60815-4:2016, Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 4: Insulators for d.c. systems, pp. 1–8, 2016.

[31] IEEE, “Guide for the Application, Maintenance, and Evaluation of Room Temperature Vulcanizing (RTV) Silicone Rubber Coatings for Outdoor Ceramic Insulators,” no. April. p. 18, 2002.

[32] K. Siderakis and D. Agoris, “Performance of RTV silicone rubber coatings installed in coastal systems,” Electr. Power Syst. Res., vol. 78, no. 2, pp. 248–254, 2008, doi: 10.1016/j.epsr.2007.02.013.

[33] S. H. Kim, R. Hackam, and E. A. Cherney, “Suppression mechanism of leakage current on RTV coated porcelain and silicone rubber insulators,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 6, no. 4, pp. 1549–1556, 1991, doi: 10.1109/61.97691.

[34] S. Huzaimah Kamal Hamadi, M. Isa, S. Nizam Md Arshad Hashim, and M. Othman, “Review on RTV Silicone Rubber Coatings Insulator for Transmission Lines,” IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 864,

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]

no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/864/1/012188.

[35] A. Theodoridis, * -Michael G Danikas, and * -Johannes Soulis, “Room Temperature Vulcanized (Rtv) Silicone Rubber Coatings on Glass and Porcelain Insulators: an Effort To Model Their Behaviour Under Contaminated Conditions,” J. Electr. Eng., vol. 52, no. 4, pp. 63–67, 2001.

[36] Z. Jia, H. Gao, Z. Guan, L. Wang, and J. Yang, “Study on hydrophobicity transfer of RTV coatings based on a modification of absorption and cohesion theory,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 13, no. 6, pp. 1317–1324, 2006, doi: 10.1109/TDEI.2006.258203.

[37] H. Deng and R. Hackam, “Electrical performance of RTV silicone rubber coating of different thicknesses on porcelain,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 12, no. 2, pp. 857–866, 1997, doi: 10.1109/61.584405.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.4.64.4.8]