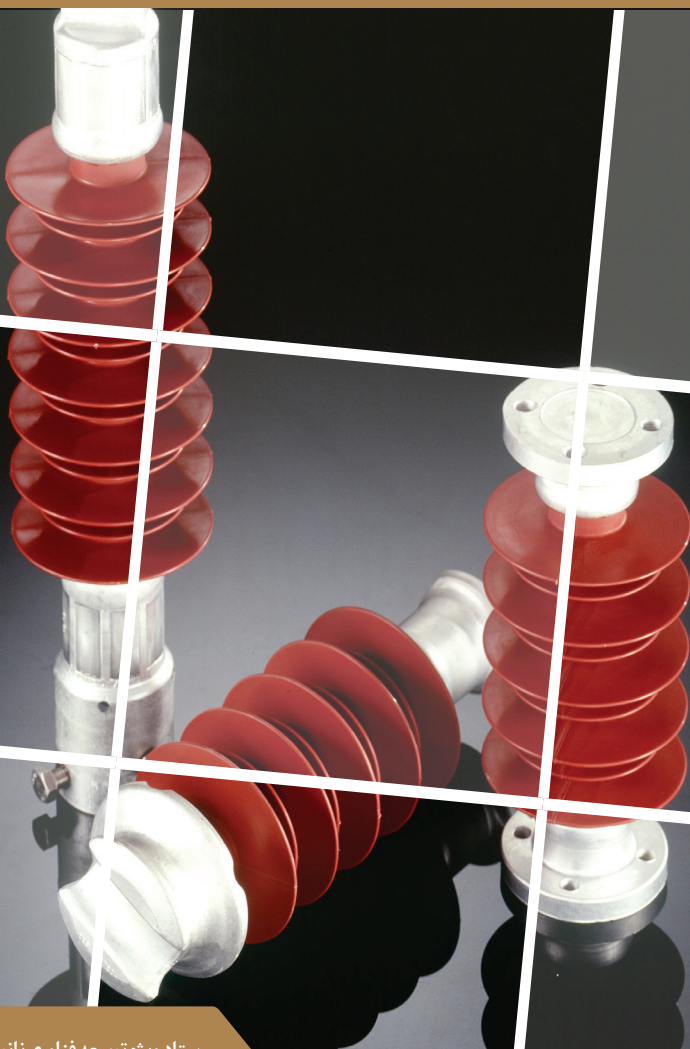


کاربردهای فناوری نانو در مقره‌های برق

سال انتشار: ۱۴۰۰

ویرایش دوم



شناسنامه

ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

طراحی و اجرا:	توسعه فناوری مهریژن	تلفن:	۰۲۱-۶۳۱۰۰
نظارت:	داود قزابلو	نمابر:	۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
	report@nano.ir	صندوق پستی:	۱۴۵۶۵-۳۴۴
اینستاگرام نانو و صنعت:	@INDnano.ir	پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir www.INDnano.ir
پست الکترونیک:	IND@nano.ir		
تهیه‌کننده:	ستاره امیریور و رجب علی سراج		

فهرست مطالب

۳	تعریف مقره	۳
۳	جنس مقره‌ها	۳
۳	مقره‌های پرسیلان	۳
۴	مقره‌های شیشه‌ای	۴
۴	مقره‌های پلاستیکی (Composite Insulators)	۴
۵	انواع مختلف مقره‌ها	۵
۵	مقره چرخشی (Spool Insulator)	۵
۵	مقره سوزنی (Pin Type Insulator)	۵
۶	مقره بشقابی (Disk Insulator)	۶
۷	مقره‌های آئرو دینامیک (Open Profile)	۷
۸	مقره زنگوله‌ای شکل (Bell Type Insulator)	۸
۸	مقره‌های یکپارچه (Long Rod Insulator)	۸
۸	مقره‌های پوشش‌نگ (Bushing Insulator)	۸
۹	مقره اتکایی (Post Insulator)	۹
۹	مقره‌های سرکابل (Sealing end Insulator)	۹
۱۰	مقره‌های پلاستیکی (Composite Insulator)	۱۰
۱۰	چالش‌های موجود در مقره	۱۰
۱۲	بازار جهانی مقره	۱۲
۱۲	فناوری نانو در مقره	۱۲
۱۶	نانوپوشش‌های سطحی برای افزایش آب‌گریزی و ظرفیت خودتمیزشوندگی مقره‌ها	۱۶
۳۳	نتیجه‌گیری	۳۳

تعریف مقره

از آغاز پیدایش صنعت برق، نیاز به تجهیزاتی که بتوانند نقش عایق و جداسازی قسمت‌های تحت ولتاژ از سایر قسمت‌ها را داشته باشند، وجود داشته و تحقیقات در این زمینه نیز همچنان ادامه دارد. در خطوط انتقال نیرو لازم است، هادی‌های تحت ولتاژ به نحوی از برج‌ها ایزوله شوند و برای این کار از مقره‌ها استفاده می‌شود. این مقره‌ها دو وظیفه عمده دارند:

ایزوله کردن هادی از بدنه برج: مقره‌ها باید بتوانند بدون داشتن جریان ناشی، ولتاژهای بالای خطوط انتقال را از بدنه برج ایزوله کنند.

استحکام مکانیکی بالا: مقره‌ها باید تحمل نیروهای مکانیکی حاصل از وزن هادی‌ها و نیروهای اعمالی ناشی از باد و یخ را داشته باشند. اولین عنصری که به عنوان مقره مطرح شد چوب خشک بود؛ ولی به علت اینکه پس از خیس شدن تا اندازه‌ای خاصیت عایقی خود را از دست می‌داد، کنار گذاشته شد. امروزه به طور گسترده از شیشه، پیرسلان و پلاستیک در ساخت مقره‌ها استفاده می‌شود [۱].



شکل ۱- نمایی از مقره در خطوط انتقال برق

جنس مقره‌ها

جنس مواد مورد استفاده در ساخت مقره‌ها بستگی به شرایط استفاده و کاربرد آن‌ها دارد. به طور کلی متداول‌ترین مقره‌های مورد استفاده در صنعت برق عبارت‌اند از:

مقره‌های پیرسلان

این مقره‌ها از ترکیبات آلکالین و سیلیکات آلومینیم ساخته می‌شوند. جهت بالابردن استقامت مکانیکی پیرسلان به آن اکسید آلومینیم اضافه می‌کنند. مقره‌های پیرسلان هم به صورت بشقابی و هم به صورت یکپارچه ساخته می‌شوند. مقره‌های پیرسلان جزء نسل اول مقره‌ها محسوب شده و دارای استقامت مکانیکی نسبتاً خوبی هستند.



➤ شکل ۲- انواع مقره پرسیلان

مقره‌های شیشه‌ای

از شیشه نیز در ساخت مقره‌ها استفاده می‌شود؛ ولی به دلیل پایین بودن استقامت مکانیکی شیشه لازم است به طریقی آن را تقویت کرد. یک روش، سردکردن سریع شیشه پس از شکل دادن آن است (Toughened Glass). به این ترتیب که شیشه را پس از شکل دادن به سرعت سرد کرده و با این روش سطح خارجی مقره سخت شده و موجب افزایش استقامت مکانیکی می‌شود. مقره‌های شیشه‌ای در مقابل لب‌پریدگی مقاوم‌تر از مقره‌های پرسیلان هستند و در مقابل تغییر درجه حرارت، تغییر شکل کمتری دارند. همچنین مقره‌های شیشه‌ای قبل از بروز خرابی خرد می‌شوند و در مکان‌هایی که دسترسی برای تست مقره مناسب نیست، به علت قابل مشاهده بودن اشکال و خرابی با چشم، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.



➤ شکل ۳- مقره شیشه‌ای

مقره‌های پلاستیکی (Composite Insulators)

این مقره‌ها از جنس پلاستیک و از ترکیبات شیمیایی اتیلن، پروپیلن و رزین هستند. مزیت این مقره‌ها در دفع خوب آب است. زیرا پلاستیک این مزیت را دارد که قطرات آب باران روی سطح آن جاری نمی‌شود تا با قطرات دیگر ترکیب شده و مسیری برای هدایت قوس فراهم کند. در صورتی که در مقره‌های شیشه‌ای و پرسیلان قطرات آب به راحتی روی سطح مقره جاری می‌شوند. این مزیت باعث شده که مقره‌های پلاستیکی در محیط‌های

مرطوب بیشتر مورد استفاده قرار گیرد. هم اکنون کشور ایالات متحده بیشترین مصرف مقره از نوع پلاستیکی را دارد؛ ولی این مقره‌ها در آسیا هنوز به کاربرد انبوه نرسیده‌اند [۲].



➤ شکل ۴- مقره‌های پلاستیکی

انواع مختلف مقره‌ها

مقره‌ها برحسب کاربرد و سطح ولتاژ به کار رفته انواع مختلفی دارند:

■ مقره چرخشی (Spool Insulator)

جنس این نوع مقره‌ها از پرسلان، شیشه و یا پلاستیک است. این مقره‌ها به صورت یک شیاره و یا دوشیاره هستند و بیشتر در ولتاژهای توزیع کاربرد دارند. تعداد شیاره‌ها بستگی به سطح ولتاژ دارد.



➤ شکل ۵- مقره‌های چرخشی

■ مقره سوزنی (Pin Type Insulator)

جنس این مقره‌ها از پرسلان، شیشه و یا پلاستیک است. از این نوع مقره‌ها در برج‌های میانی و تا ولتاژ حدود ۳۳ کیلوولت استفاده می‌شود.



➤ شکل ۶- مقره سوزنی

■ مقره بشقابی (Disk Insulator)

این نوع مقره‌ها از جنس شیشه و یا پرسیلان و به شکل دیسک بوده و از نظر کاربرد نیز رایج‌ترین مقره‌های مورد استفاده در خطوط هوایی انتقال انرژی هستند. این مقره‌ها می‌توانند به صورت زنجیره مقره مورد استفاده قرار گیرند. تعداد دیسک‌ها در زنجیره مقره بستگی به سطح ولتاژ خط، محل استفاده و اضافه ولتاژها دارد. ارتباط هر کدام از این دیسک‌ها با دیسک‌های دیگر توسط دو قطعه فلزی بالا و پایین که توسط پودر سیمان و شیشه و چسب مخصوص به مقره محکم می‌شود، انجام می‌گیرد. این مقره‌ها بسته به نحوه اتصال به یکدیگر و با توجه به شکل آن‌ها در انواع زیر وجود دارند.

■ مقره بشقابی استاندارد

این مقره دارای انواع مختلف زیر است:

■ مقره‌های نوع کلاهکی (Ball & Socket Type Insulator)

■ مقره‌های نوع شیار و زبان (Tongue & Clevis Type Insulator)



➤ شکل ۸- مقره بشقابی استاندارد نوع شیار و زبان



➤ شکل ۷- مقره بشقابی استاندارد نوع کلاهکی

مقره بشقابی ضدمه (Anti Fog Insulator)

در مناطق آلوده یا مه آلود، فاصله خزشی بیشتری بر روی سطح مقره لازم است که در این حالت از مقره مهی استفاده می شود. در این مقره ها شیارهای پایین بزرگ تر از شیارهای مقره های معمولی هستند. به این ترتیب وزن مقره ها زیاده تر بوده و موجب افزایش نیروی مکانیکی وارده به برج می شود. از طرفی به دلیل زیاد بودن فاصله خزشی از این مقره ها به تعداد کمتری در زنجیره مقره استفاده می شود.



➤ شکل ۹- مقره بشقابی ضدمه

■ مقره های آنرودینامیک (Open Profile)

از این مقره ها در مناطق بادگیر استفاده می شود؛ زیرا سطح بادگیر این نوع مقره ها کم است و در زنجیره مقره انحراف زاویه کمتری داشته و از طرفی نیروهای وارده به برج کمتر خواهد شد. به علت کوچک بودن فاصله خزشی این نوع مقره ها، لازم است تعداد بیشتری از این نوع مقره جهت حفظ ایزولاسیون در زنجیره استفاده شود که این کار موجب افزایش هزینه ها خواهد شد.



➤ شکل ۱۰- مقره آنرودینامیک

■ مقره زنگوله‌ای شکل (Bell Type Insulator)

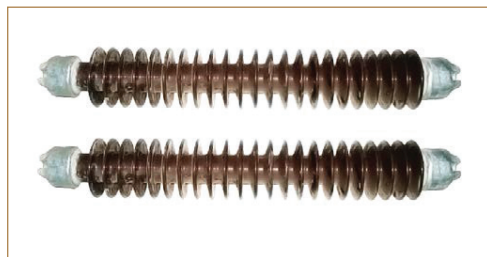
این مقره به شکلی ساخته می‌شود که امکان نشستن گرد و خاک و آلودگی روی آن حداقل باشد. از این مقره‌ها در مناطقی استفاده می‌شود که آلودگی زیاد است و باران کم می‌بارد. ساخت این مقره‌ها به شکلی است که حداقل ریزش باران قادر به تمیز کردن مقره است.



➤ شکل ۱۱- مقره زنگوله‌ای شکل

■ مقره‌های یکپارچه (Long Rod Insulator)

این مقره‌ها به شکل استوانه‌ای بلند بوده که دارای شیارها و برآمدگی‌هایی است. جنس این مقره‌ها معمولاً از پرسیلان و سرامیک است و به دو صورت توپر و توخالی ساخته می‌شوند. نوع توپر آن دارای استقامت مکانیکی بیشتری بوده و نوع توخالی استقامت مکانیکی کمتری دارد.



➤ شکل ۱۲- مقره یکپارچه

■ مقره‌های بوشینگ (Bushing Insulator)

این نوع مقره‌ها مشابه مقره‌های یکپارچه هستند، با این تفاوت که قطر این نوع مقره‌ها در ابتدا و انتها متفاوت است و تقریباً به شکل یک نیم مخروط است. از این نوع مقره‌ها در ترانس‌ها استفاده می‌شود. محل اتصال مقره به ترانس دارای قطر بیشتری است.



➤ شکل ۱۳- مقره پوشینگ

■ مقره انکایی (Post Insulator)

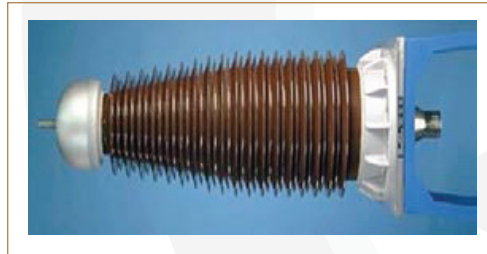
این نوع مقره‌ها مشابه مقره‌های یکپارچه هستند که معمولاً در پست‌ها کاربرد دارند. از این نوع مقره معمولاً جهت ایزوله کردن باس بار (Rigid Conductor) استفاده می‌شود. این مقره‌ها در مقابل نیروهای عمودی مقاومت خوبی دارند، ولی در مقابل نیروهای جانبی ضعیف هستند.



➤ شکل ۱۴- مقره انکایی

■ مقره‌های سرکابل (Sealing end Insulator)

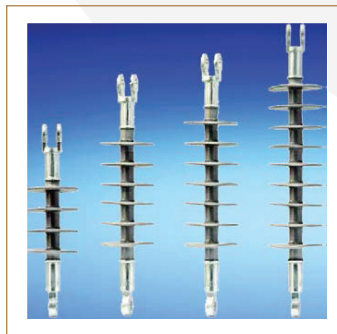
در مواقعی که از کابل برای انتقال توان استفاده شود، جهت اتصال کابل به هادی‌ها از سرکابل استفاده می‌شود. این سرکابل‌ها به دو صورت خشک و روغنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرکابل‌های خشک به صورت پلاستیکی بوده و سرکابل‌های روغنی دارای محفظه‌ای برای روغن هستند. در این نوع مقره‌ها مسئله مهم، ایزولاسیون خوب آنهاست و تنش‌های مکانیکی وارده به این نوع مقره‌ها بسیار ناچیز است.



➤ شکل ۱۵- مقره سرکابل

■ مقره‌های پلیاستیکی (Composite Insulator)

این مقره‌ها از تعدادی دیسک پلیاستیکی تشکیل شده و بر روی محوری از جنس فایبرگلاس سوار می‌شوند. دیسک‌ها از جنس پلیاستیک فشرده هستند [۳].



➤ شکل ۱۶- مقره پلیاستیکی

چالش‌های موجود در مقره

مقره‌ها در معرض منابع آلودگی مختلف و رطوبت قرار دارند که باعث تأثیر منفی بر عملکرد مقره می‌شود. مهم‌ترین تأثیر آلودگی‌ها، هادی شدن سطح مقره است. به جریان ایجاد شده اصطلاحاً جریان خزشی گفته می‌شود. دو منبع اصلی آلودگی مقره‌ها، آلودگی ساحلی و آلودگی صنعتی هستند.

آلودگی ساحلی در اثر پاشیدن نمک از دریا یا ماسه‌ای که همراه باد آورده می‌شود، بر روی سطح مقره ایجاد می‌شود. این لایه‌ها در اثر مجاورت با رطوبت یا مه هادی می‌شوند. کلرید سدیم اصلی‌ترین نوع این آلودگی‌هاست. آلودگی‌های صنعتی معمولاً به صورت خشک روی سطح مقره رسوب می‌کند و سپس در اثر ترشیدن، هادی می‌شوند. ممکن است به جز نمک‌ها و اسیدها، مواد جاذب رطوبت نیز بر روی مقره رسوب کنند. از لحاظ منطقه آب و هوایی، باد می‌تواند ابزار فرایند آلودگی باشد. رطوبت بالا، مه و باران نیز عوامل نامساعد محیطی برای عملکرد مقره‌ها هستند. علاوه بر جریان‌های خزشی، عواملی مانند فشار محیط، نور خورشید، درجه حرارت و... نیز روی ماده عایق مقره تأثیر منفی دارند و باعث فرسایش مکانیکی و الکتریکی مقره می‌شوند که به بررسی این عوامل می‌پردازیم:

اثر رطوبت: وقتی رطوبت روی سطح آلوده مقرر می‌نشیند؛ مانند یک هادی جریان عمل می‌کند. در نتیجه باعث افزایش جریان‌های خزشی و حرارت ناشی از تلفات می‌شود. این حرارت باعث می‌شود که لایه نازک رطوبت خشک شده و جرقه الکتریکی رخ دهد. در حالی که جرقه‌ها نورانی باشند، باعث یونیزه شدن هوای اطراف شده و حتی باعث تولید حرارت تا چندین هزار درجه سانتی‌گراد می‌شوند. سطح عایق ممکن است با این هوای یونیزه شده واکنش شیمیایی دهد. وجود گرما نیز فرسودگی حاصله را تسریع می‌کند.

آلودگی محیطی: آلودگی محیط شامل آلودگی‌های صنعتی، دود حاصل از ماشین‌ها و... است که روی سطح مقرر می‌نشیند و آن‌ها را تیره رنگ می‌کند. مشکلاتی که آلودگی ایجاد می‌کند به سه گروه تقسیم می‌شوند:

- به علت وجود کربن و نمک‌ها و آلودگی محیطی، تراکینگ ایجاد می‌شود و کیفیت عایق کم می‌شود؛
- به علت فرسایش زیاد، دیواره سوراخ می‌شود؛
- شکست الکتریکی بر روی عایق رخ می‌دهد.

آب و هوا: آب و هوا بر طول عمر مقررهای تأثیر دارند. تغییرات آب و هوایی باعث از دست رفتن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مقرر و ترک خوردگی و شکستن مقرر می‌شوند.

حرارت: حرارت که به صورت فرسودگی حرارتی خودش را نشان می‌دهد، هم روی عایق بندی خارجی و هم روی عایق بندی داخلی تأثیر دارد و با افزایش درجه حرارت، کیفیت و طول عمر عایق کاهش می‌یابد.

باران: باران باعث فرسودگی تدریجی مقرر می‌شود. باران عموماً مقداری نمک و گوگرد حاصل از دود را به صورت اسیدسولفوریک دارد. این مواد روی مقرر نشست کرده و باعث کاهش مقاومت عایقی مقرر می‌شوند.

افت خواص، شکست و از کار افتادگی این نوع مقررهای معمولاً ناشی از آلودگی است، مشکلات زیادی را در بسیاری از کشورهای جهان خصوصاً در نواحی با آلودگی زیاد به همراه دارد. در مناطق آلوده و مرطوب، ایجاد جریان ناشی و تشکیل قوس معمولاً منجر به از کار افتادگی مقررهای می‌شود.

توقف جریان، خارج شدن خطوط از مدار و از کار افتادن خط در این وضعیت بروز کرده که سبب ایجاد خسارات جدی و صدمات اقتصادی زیادی می‌شود [۳، ۴ و ۵].



شکل ۱۷- مقررهای آسیب دیده

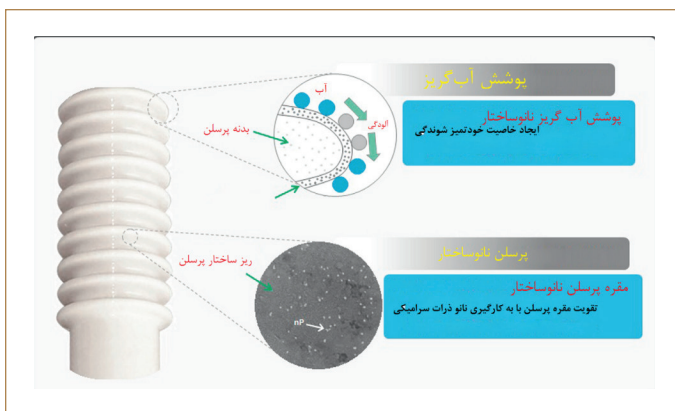
بازار جهانی مقره

MarketsandMarkets پیش‌بینی می‌کند بازار عایق‌های الکتریکی^۱ تا سال ۲۰۲۳ به ۱۳/۳ میلیارد دلار برسد، که این عدد برای سال ۲۰۱۸ میلادی حدود ۱۰/۲ میلیارد دلار تخمین زده شده بود. این رشد را می‌توان به استقبال روزافزون از منابع انرژی تجدیدپذیر، افزایش سرمایه‌گذاری در شبکه‌های T&D و بازسازی شبکه‌های شبکه موجود در سراسر جهان نسبت داد. با این حال، افزایش محصولات با کیفیت پایین می‌تواند مانع از رشد بازار شود. همچنین افزایش جمعیت، شهرنشینی و رشد بخش صنعتی باعث افزایش تقاضا در کشورهایی مانند چین و هند شده است. دولت‌های کشورهای آسیا و اقیانوسیه در حال برنامه‌ریزی برای توسعه شبکه برق و ظرفیت تولید برق بیشتر هستند که این امر تقاضای عایق را در منطقه بیشتر خواهد کرد. در نتیجه تخمین زده می‌شود که آسیا اقیانوسیه سریع‌ترین بازار برای بازار عایق‌های الکتریکی در سال ۲۰۲۳ باشد. با توجه به مزایای مقره‌های کامپوزیتی از جمله وزن کمتر، زیبایی ظاهری، استحکام بیشتر، مقاومت بالا در برابر ضربه و سهولت نصب، این مقره‌ها نسبت به مقره‌های پیرلان مرسوم مناسب‌تر هستند. در نتیجه انتظار می‌رود بخش کامپوزیت سریع‌ترین رشد را در بازار عایق‌های الکتریکی از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ داشته باشد [۶].

فناوری نانو در مقره

در رابطه با فناوری نانو در مقره‌ها تحقیقات و پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است که در ادامه به برخی از مقالات و اختراعات ثبت شده در این زمینه پرداخته شده است. به صورت کلی به‌کارگیری فناوری نانو به دو صورت می‌تواند سبب بهبود خواص و کارایی مقره‌های به کار رفته در صنعت برق شود:

- تقویت بدنه مقره‌ها از طریق افزودن نانوذرات به منظور بهبود ویژگی‌های مکانیکی و الکتریکی؛
- نانوپوشش‌های سطحی با هدف افزایش آب‌گریزی و ظرفیت خودتمیزشوندگی مقره‌ها [۷].



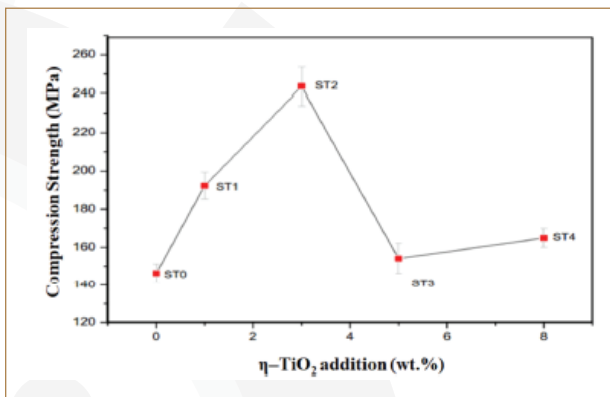
شکل ۱۸- فناوری نانو در مقره‌های سرامیکی

■ تقویت بدنه مفره‌ها از طریق افزودن نانوذرات به منظور بهبود ویژگی‌های مکانیکی و الکتریکی

تحقیقات نشان داده است که افزودن نانوذراتی همچون آلومینا به مفره پرسیلان نه تنها باعث تقویت مکانیکی بدنه‌های پرسیلان به میزان ده درصد می‌شود، بلکه استحکام خمشی مفره پرسیلان زی‌تر شده را نیز حدود ۱۵ درصد بهبود می‌بخشد.

همچنین ثابت شده است که مدول پارگی یک پرسیلان سیلیکونی را می‌توان با استفاده از نانوذرات Al_2O_3 و ZrO_2 تا ۳۸ درصد افزایش داد. آزمایشات متعدد، بهبود عملکرد مکانیکی و دی‌الکتریک را تأیید کرده است که عمدتاً به دلیل حضور نانوذرات و تشکیل فاز مولایت بوده است. مولایت ترکیب بلوری پایدار در سیستم $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ تحت شرایط محیطی است.

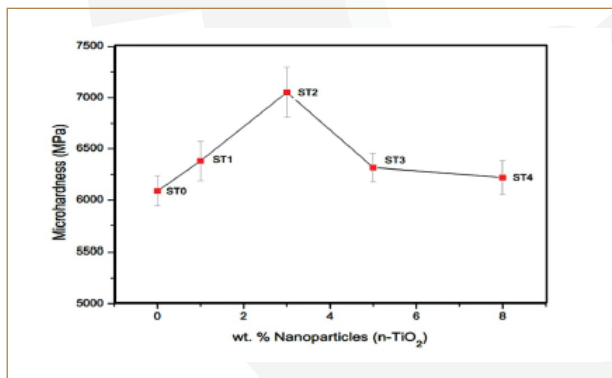
در پژوهشی دیگر، تأثیر نانوذرات TiO_2 بر خواص مکانیکی و فیزیکی مفره پرسیلان مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا چهار ترکیب نانوساختاری آزمایشی با نانوذرات TiO_2 افزودنی‌های ۱، ۳، ۵ و ۸ درصد وزنی به ترتیب ST_0 ، ST_1 ، ST_2 ، ST_3 و ST_4 نام‌گذاری شدند. ترکیب مرجع (ST_0) بدون افزودن نانوذرات TiO_2 تهیه شد. ترکیب مرجع مربوط به یک مفره از نوع C110 است. جهت بررسی خواص مکانیکی، آزمون‌های مکانیکی انجام شد که با توجه به شکل ۱۹ می‌توان دریافت که بالاترین استحکام مکانیکی حاصل از پرسیلان نانوساختار، تقریباً ۶۵ برابر بیشتر از نمونه فاقد نانوذرات است. علاوه بر این، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم پراکنده در ساختار پرسیلان به عنوان یک مانع قوی عمل می‌کنند و در نتیجه باعث انحراف ترک هنگام بارگیری می‌شوند.



➤ شکل ۱۹- تأثیر مقدار نانوذرات TiO_2 بر استحکام مکانیکی مفره پرسیلان

همچنین با توجه به شکل ۱۹ می‌توان دریافت که رابطه بین افزودن نانوذرات TiO_2 و مقاومت مکانیکی خطی نیست و مقاومت فشاری در اثر افزودن مقدار کمی از نانوذرات TiO_2 (۱ تا ۳ درصد وزنی) افزایش می‌یابد و در اثر افزودن مقادیر بیشتر (۵-۸ درصد وزنی) کاهش می‌یابد.

افزودن نانوذرات TiO_2 تأثیر مثبتی بر روی میکروسختی مقره‌های پرسیلان نیز دارد به گونه‌ای که در اثر افزودن ۳ درصد وزنی نانوذره بهبود ۱۵ درصدی میکروسختی نسبت به نمونه مرجع دارد که در شکل ۲۰ تأثیر مقدار نانوذرات TiO_2 بر میکروسختی ویکرز (HV) برای مقره پرسیلان نشان داده شده است.



شکل ۲۰- تأثیر مقدار نانوذرات TiO_2 بر میکروسختی ویکرز (HV) برای مقره پرسیلان

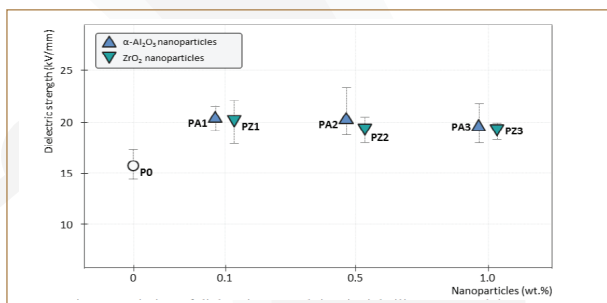
به صورت کلی پرسیلان سیلیکونی بدون حضور نانوذره دارای چگالی تقریبی ۲/۲-۲/۴ گرم بر سانتی مترمکعب و درصد تخلخل زیر ۱ درصد است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان نانوذرات TiO_2 ، چگالی نمونه‌ها افزایش و میزان تخلخل کاهش می‌یابند. برای مثال افزودن ۸ درصد نانوذره موجب می‌شود که چگالی تا ۱۵ درصد افزایش پیدا کند که این ویژگی برای مقره‌های پرسیلان بسیار حائز اهمیت است و برای اینکه بتوان یک مقره پرسیلان را در کاربردهای الکتریکی به کار برد، لازم است تخلخل باز آن کمتر از ۵/۵ درصد و تخلخل بسته نیز کمتر از ۱۰ درصد باشد [۸].

جدول ۱. بررسی خواص فیزیکی مقره‌های پرسیلان در حضور مقادیر مختلف از نانو ذره TiO_2

خواص فیزیکی		شماره نمونه
تخلخل (%)	چگالی (gr/cm^3)	
۵۶/۰	۳۵/۲	ST0
۳۹/۰	۴۵/۲	ST1
۲۴/۰	۵۸/۲	ST2
۳۰/۰	۶۲/۲	ST3
۱۲/۰	۷/۲	ST4

نانوذراتی نظیر Al_2O_3 و ZrO_2 در بهبود خواص مکانیکی و افزایش چگالی در مقره‌های پرسلان موثر هستند و افزودن آن‌ها تراکم در مقره پرسلان را کمی افزایش می‌دهند. این رفتار را می‌توان به مقادیر بیشتر چگالی Al_2O_3 و ZrO_2 نسبت داد، علاوه بر این به دلیل اندازه بسیار کوچک نانوذرات، فرایند تراکم با تشکیل فاز مایع و کاهش تخلخل ترویج می‌یابد. در رابطه با بهبود خواص مکانیکی در اثر افزودن نانوذرات آلومینا و زیرکونیا می‌توان گفت مقاومت خمشی نمونه حاوی ۱ درصد وزنی آلومینا نسبت به نمونه پرسلان بدون افزودنی ۹ درصد افزایش و برای نمونه‌های ۵/۵ و ۱ درصد وزنی نانوذره آلومینا ۱۴/۶ و ۲۰ درصد افزایش یافته است. همچنین در رابطه با نانوذرات زیرکونیا نیز افزودن ۱ درصد وزنی منجر به افزایش ۱۲/۲ درصدی مقاومت خمشی نسبت به نمونه مرجع می‌شود، در حالی که نمونه‌های حاوی ۵/۵ درصد وزنی و ۱ درصد وزنی به ترتیب ۱۲/۵ و ۱۳ درصد بهبود را نشان می‌دهند. افزایش محتوای فاز مولایت و هم افزایش تراکم ناشی از افزودن نانوذرات سرامیکی به این رفتار کمک می‌کند. مولایت یک فاز بسیار مهم است زیرا به یکی از مکانیسم‌های اصلی تقویت‌کننده (استحکام) در سیستم‌های پرسلان مربوط می‌شود. غلظت مولایت با افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل واکنش پذیری بالاتر نانوذرات آلومینا، مقره‌های تولید شده با آن دارای غلظت مولایت ثانویه بیشتری نسبت به نمونه تولید شده با نانوذرات زیرکونیا هستند.

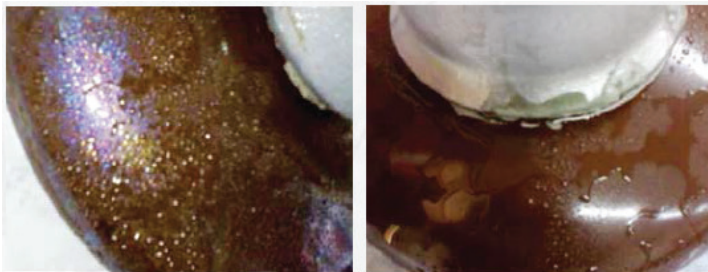
همچنین تحقیقات نشان داده است که استحکام شکست دی الکتریک نیز با افزودن نانوذرات سرامیکی، عمدتاً به دلیل افزایش فازهای کریستالی در ریزساختار نمونه پرسلان زینتر شده، بهبود می‌یابد. به عنوان نمونه شکل ۲۱ تأثیر نانوذرات سرامیکی را بر ظرفیت دی الکتریک پرسلان سیلیس نشان می‌دهد. مشاهده شده است که نانوذرات آلومینا و نانو زیرکونیا تأثیر مثبتی در استحکام دی الکتریک پرسلان دارند. افزودن نانوذرات آلومینا به مقدارهای ۰/۱، ۵/۵ و ۱ درصد وزنی و لثاژ تجزیه را به ترتیب ۳۲، ۳۱/۵ و ۲۷/۷ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، نانوذرات زیرکونیا رفتار مشابهی را نشان می‌دهند و برای مقادیر ۰/۱، ۵/۵ و ۱ درصد وزنی از نانوذره به ترتیب ظرفیت دی الکتریک را ۲۲/۹ ۳۰/۵ و ۲۴/۸ درصد نسبت به نمونه مرجع بهبود می‌بخشند. از نتایج ارائه شده می‌توان دریافت که ویژگی‌های دی الکتریک نمونه‌های پرسلان با غلظت فازهای کریستالی در ریز ساختار آن ارتباط دارد و فاز شیشه‌ای بر ظرفیت دی الکتریک آن تأثیر می‌گذارد. همچنین می‌توان دریافت که نمونه‌های نانو ساختار دارای درصد بالاتری از فازهای کریستالی نسبت به پرسلان معمولی بدون نانوذرات هستند که می‌تواند علتی برای بهبود استحکام دی الکتریک باشد [۹].



شکل ۲۱- تأثیر افزودن مقادیر مختلف از نانوذرات آلومینا و زیرکونیا بر خواص دی الکتریک مقره پرسلان

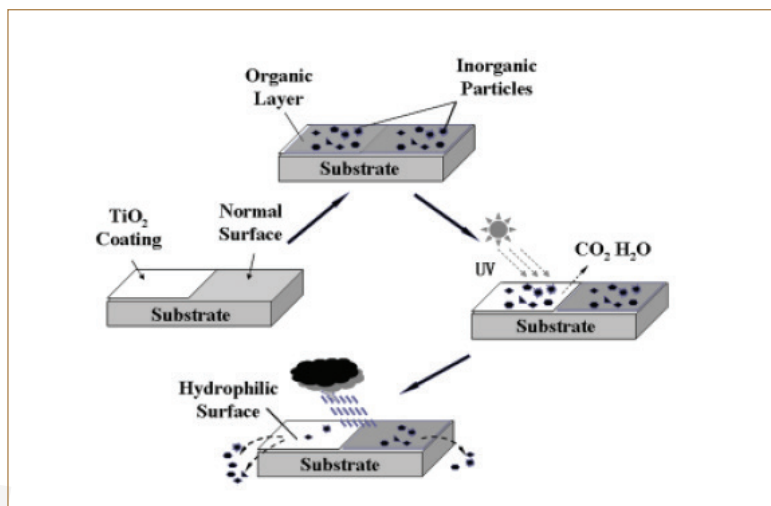
نانوپوشش‌های سطحی برای افزایش آب‌گریزی و ظرفیت خودتمیزشوندگی مقره‌ها

امروزه یکی از پیشرفت‌هایی که با استفاده از فناوری نانو صورت گرفته است، ساخت پوشش‌هایی است که علاوه بر ایجاد خاصیت آب‌گریزی، خاصیت خود پالایشی را نیز ایفا کند و از طرفی چسبندگی مناسبی با سطح نیز به وجود آورند. استفاده از این نوع پوشش بر روی مقره در نواحی مختلف آب و هوایی به خصوص در محیط‌هایی با آلودگی بالا، می‌تواند کمک شایانی به از بین رفتن پدیده تخلیه جزئی که یکی از مهم‌ترین مشکلات مقره‌ها در نواحی آلوده و مرطوب است، کند. در صورت حضور چنین پوششی بر روی سطح، سطوح در مقابل آب ایمن شده و در نتیجه آلودگی‌های دیگر که در اثر حضور آب تمایل به حضور بر روی سطح خواهند داشت، از بین می‌روند. ضخامت این پوشش‌ها می‌تواند چندین نانومتر تا چندین میکرون باشد. همچنین این پوشش‌ها می‌توانند شفاف، کدر، رنگی و یا غیررنگی باشند. لازم به ذکر است که در صورت استفاده از این پوشش‌ها دیگر نیاز به شستشوی مقره‌ها در فصول مختلف سال نیست. به مرور زمان جنس و ترکیب این مواد بهبود پیدا کرده‌اند. عواملی مانند چسبندگی به سطح، کیفیت، طول عمر، مقرون به صرفه بودن و... در این روند بهبود تاثیرگذار بوده‌اند. به عنوان مثال نحوه قرارگیری قطره آب بر روی سطح قبل و بعد از اعمال پوشش در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود. همانطور که در این شکل مشخص است، قبل از اعمال پوشش قطره آب کاملاً بر روی سطح پخش شده و سطح آن را خیس می‌کند اما پس از اعمال پوشش، قطره آب جمع شده و سطح را تر نمی‌کند. از دیگر مزایای پوشش اعمال شده شفافیت آن است که امکان کاربرد آن را در اجسام مختلف و صنایع گوناگون فراهم می‌سازد. روش اعمال این پوشش‌ها نیز می‌تواند به صورت پاشش و یا غوطه‌وری باشد [۱۰ و ۱۱].



شکل ۲۲- سمت راست، مقره قبل از پوشش دهی و خیس شدن سطح آن با آب و در قسمت سمت چپ، نحوه قرارگیری قطره آب بر روی مقره بعد از اعمال پوشش.

استفاده از نانوپوشش‌ها برای بهبود خواص نهایی مقره‌های سرامیکی در این سال‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. برای مثال ثابت شده است که اسپری کردن پوشش حاوی نانوذرات سرامیکی TiO_2 عملکرد خود تمیزشوندگی مقره‌های پرتان را بهبود می‌بخشد که در شکل ۲۳ رفتار خودتمیز شوندگی در حضور نانوذرات اکسید تیتانیوم به خوبی نشان داده شده است.



شکل ۲۳- فرایند خودتمیزشوندگی در حضور اکسیدتیتانیوم پوشش داده شده بر روی بستر قرار داده شده در هوای آزاد

مطابق با شکل ۲۳، لایه‌های آلی چسبناک انباشته شده بر روی فیلم نازک TiO_2 در نهایت به CO_2 و H_2O اکسیده می‌شوند و سپس رسوب باقی مانده روی سطح به راحتی با باران شستش می‌شود. این عملکرد خودتمیزکنندگی فیلم TiO_2 به طور گسترده‌ای در مصالح ساختمانی مانند کاشی، سرامیک و شیشه نیز استفاده شده است. بنابراین به راحتی می‌توان تصور کرد که یک مقره پرتاب نیز می‌تواند با اعمال یک فیلم TiO_2 روی سطح خود، عملکرد خودتمیزشوندگی را نشان دهد. نتایج مقایسه خاصیت خودتمیزشوندگی در حضور نانوذرات TiO_2 و بدون این ذرات بر اساس آزمایش آلودگی و رسوبگذاری طبیعی در جدول ۲ نشان داده شده است. اطلاعات نشان می‌دهند که مقره پوشش داده شده با نانوذرات TiO_2 پس از ۷ ماه مواجهه با آلودگی بسیار پاک‌تر از مقره بدون پوشش است. همچنین نتایج اندازه‌گیری ESDD^* و NSDD^* نشان می‌دهند که بر روی مقره‌های حاوی پوشش در مقایسه با مقره‌های بدون پوشش، مقدار کمتری آلودگی جمع شده و توزیع آن‌ها در طول مقره یکنواخت‌تر است. علاوه بر این، مقدار متوسط NSDD برای نمونه بدون پوشش، ۳۵ برابر نمونه حاوی پوشش است که این نتیجه تأکید می‌کند که فیلم‌های TiO_2 در معرض شرایط طبیعی می‌توانند عملکرد خودتمیزشوندگی مقره‌های پرتاب را بهبود بخشند.

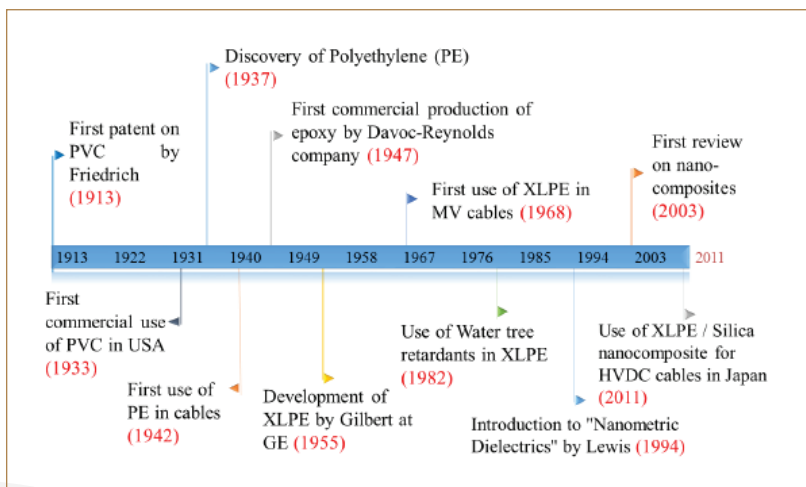
جدول ۲- مقادیر اندازه‌گیری شده (NSDD و ESDD) برای مقره‌های حاوی پوشش و بدون پوشش

شماره مقره	ESDD (mg/cm ²) (نمونه حاوی پوشش)	ESDD (mg/cm ²) (نمونه بدون پوشش)	NSDD (mg/cm ²) (نمونه حاوی پوشش)	NSDD (mg/cm ²) (نمونه بدون پوشش)
۱	۰/۰۰۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۲۲	۰/۰۵۷۹
۲	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۵۹		
۳	۰/۰۰۲۲	۰/۰۱۲۲		
۴	۰/۰۰۱۸	۰/۰۱۱۸	۰/۰۰۱۸	۰/۰۵۹۳
۵	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۸۹		
۶	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۵۹		
۷	۰/۰۰۲۸	۰/۰۱۹۲	۰/۰۰۲۰	۰/۰۹۵۴
مقدار متوسط	۰/۰۰۲۴	۰/۰۱۱۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۷۰۸
$ESDD_{(bare)} / ESDD_{(coated)} = 4 / 58$		$NSDD_{(bare)} / NSDD_{(coated)} = 35 / 4$		

در پوشش‌های حاوی ذرات TiO_2 به دلیل آب‌دوستی زیاد فیلم، قطرات آب تمایل به جاری شدن بر روی مقره دارند و در نتیجه آب کمتری روی سطح مقره حاوی پوشش باقی می‌ماند. علاوه بر این، فیلم TiO_2 ، به عنوان یک نیمه‌هادی، می‌تواند توزیع میدان الکتریکی را در امتداد مقره بهبود بخشد. این نیز می‌تواند عامل مهمی در افزایش ولتاژ فلاش‌آور در محیط مرطوب برای مقره دارای پوشش باشد. به عبارت دیگر، لایه‌های TiO_2 که روی سطح مقره پرتاب شده‌اند نه تنها عملکرد خودتمیزشوندگی مقره را ارتقا می‌دهند، بلکه مقاومت الکتریکی در برابر ولتاژ بالا را حفظ کرده و حتی افزایش می‌دهند [۱۲].

نانوکامپوزیت‌ها به دلیل افزایش فعل و انفعالات در رابط‌ها، ویژگی‌های کلی نظیر مکانیکی، الکتریکی، حرارتی و... را بهبود می‌بخشد. بر این اساس، منابع مختلف از مفهوم نانوکامپوزیت‌ها برای کاربردهای عایق الکتریکی داخلی و خارجی استفاده کرده‌اند. تحولات عمده در زمینه عایق الکتریکی در طول سال‌ها در شکل ۲۴ نشان داده شده است [۱۳].

علاوه بر پوشش‌های خودتمیزشونده، پوشش‌های فوق‌آب‌گریز اخیراً توجه زیادی را در تحقیقات و برنامه‌های کاربردی به منظور کاهش تجمع یخ روی مقره‌ها جلب کرده‌اند. در بخش تولید پوشش‌های آب‌گریز فناوری نانو کاربرد بسیار زیادی دارد. بری مثال در پوشش‌های آب‌گریز معمولاً از نانوسیلیس به عنوان عاملی برای بهبود پایداری آب‌گریزی پوشش استفاده می‌شود.



شکل ۲۴- تحولات عمده در زمینه عایق الکتریکی

اضافه کردن نانوسیلیس به پوشش مقره‌های سیلیکون رابر موجب می‌شود که حتی بعد از قرار گرفتن پوشش در معرض اشعه UV بازم خاصیت آب‌گریزی خود را حفظ کند.

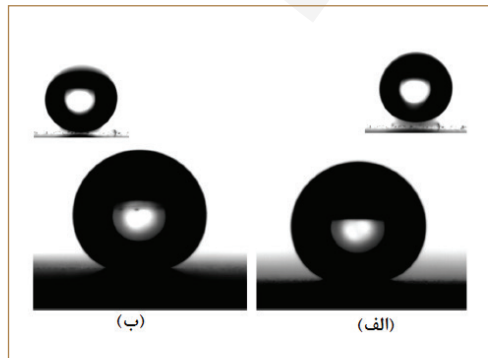
در مناطق آب و هوایی سرد، یخ روی سطح عایق جمع می‌شود و هنگامی که یخ و برف با ذوب شدن همراه شود، احتمال برق‌گرفتگی و قطع برق زیاد است. مشکلات یخ و تجمع آلودگی بر روی سطوح عایق و در نتیجه فلاش‌اورهای عایق چیز جدیدی نیست و حوادث قطع برق به دلیل آلودگی، یخ و برف در گذشته از کشورهای مختلف گزارش شده و منجر به از دست دادن میلیاردها دلار شده است.

اخیراً نوع جدیدی از پوشش ترکیبی ارائه شده است که در آن از طریق مونتاژ یک لایه فوق‌آب‌گریز و استفاده از PDMS-OH^۲ و نانوذرات سیلیکا بر روی یک لایه نیمه‌رسانا (استفاده از کربن) می‌توان قدرت چسبندگی یخ را کاهش داده و انجماد آب را روی سطوح به تأخیر انداخت. در واقع پوشش پلیمری با خواص فوق‌آب‌گریز و نیمه‌رسانا پتانسیل بالایی در کاهش تجمع یخ و افزایش ولتاژ فلاش‌اور برای مقره‌ها نشان می‌دهد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که پوشش ترکیبی دارای ساختار سلسله مراتبی دوگانه در مقیاس میکرو و نانو و زاویه تماس آب بیشتر از ۱۵۵ درجه است که سطوح دارای زاویه تماس ثابت آب بیش از ۱۵۰ درجه و زاویه لغزش کوچک‌تر از ۱۰ درجه، می‌توانند به‌طور موثر آب را دفع کنند، زیرا قطرات آب روی سطوح تقریباً کروی باقی می‌مانند و به راحتی می‌لغزند. با افزایش دمای سطح عایق‌ها از نقطه انجماد، تهدید یخ‌زدگی روی عایق‌ها را می‌توان به‌طور چشمگیری کاهش داد. شکل ۲۵ الف و ب به ترتیب مقره‌های شیشه‌ای در حضور پوشش هیبریدی و پوشش نیمه‌رسانا را نشان می‌دهد.



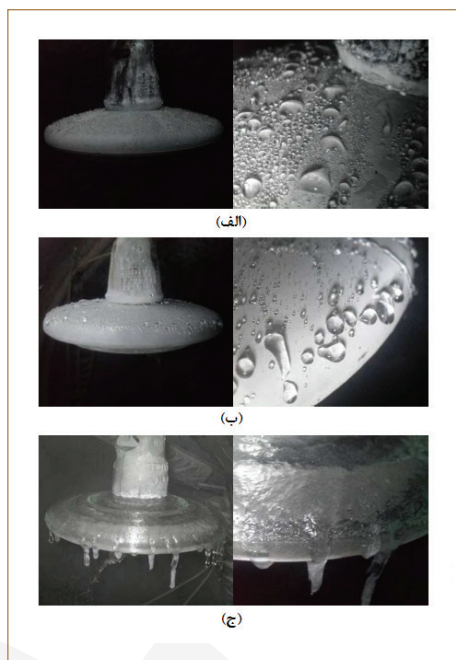
شکل ۲۵- مقره شیشه‌ای با الف- لایه ابرآب‌گریز بر روی لایه نیمه رسانا (پوشش ترکیبی) ب- لایه نیمه رسانا به تنهایی

در شکل ۲۶ نیز می‌توان زاویه تماس برای نمونه حاوی نانوذرات سیلیکا به تنهایی و نمونه حاوی پوشش هیبریدی را مشاهده کرد. میانگین زاویه تماس و زاویه لغزش برای پوشش حاوی نانوذرات سیلیکا به ترتیب حدود ۱۵۸ و ۱۵ تا ۳ درجه و برای پوشش هیبریدی ۱۵۵ و بین ۵ تا ۸ درجه است.



شکل ۲۶- زاویه تماس قطره آب بر روی الف- پوشش هیبریدی، ب- پوشش حاوی نانوذرات سیلیکا

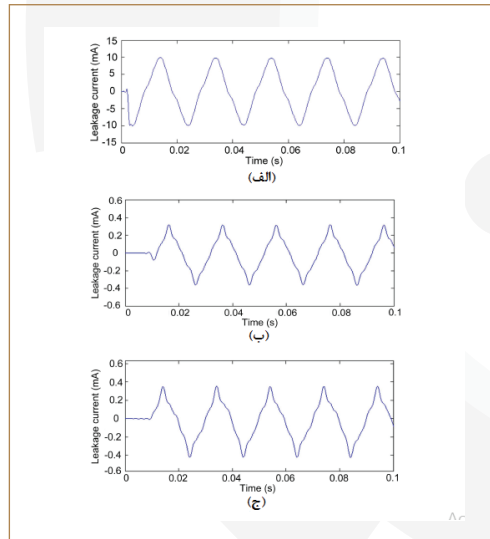
همچنین شکل ۲۷ مورفولوژی یخ را بعد از ۳۰ دقیقه برای سه نمونه مورد آزمایش نشان می‌دهد. شکل‌های سمت چپ مربوط به مورفولوژی یخ بر روی سطح مقره، در حالی که تصاویر سمت راست نمایی از نمای نزدیک را ارائه می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۹ الف نشان داده شده است، قطرات قبل از بزرگ شدن لغزش می‌کنند و تنها تعداد بسیار کمی از قطرات کوچک تبدیل به یخ مجزا می‌شوند. در شکل ۲۷ ب نیز چند قطره آب روی مقره با پوشش نانوسیلیس، یخ مجزا را تشکیل می‌دهند. در شکل ۹ ج، مقره شیشه‌ای بدون پوشش، سطح مقره کاملاً با یخ پیوسته پوشانده شده است.



شکل ۲۷- تصاویری از مقره‌های شیشه‌ای بعد از ۳۰ دقیقه از گذشت آزمایش با الف- پوشش هیبریدی ب- پوشش نانوسیلیکا ج- بدون پوشش.

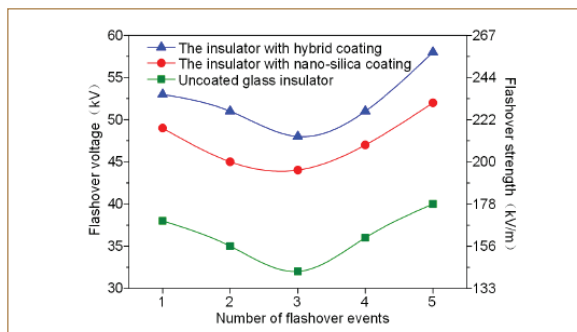
علاوه بر این جهت بررسی نشت جریان، در شکل ۲۸، موج جریان نشت معمولی از سه مورد آزمایش شده تحت شرایط یخ‌زدایی نشان داده شده است. شکل ۲۸ الف، مربوط به مقره با پوشش هیبریدی است که حداکثر مقدار جریان نشتی ۹/۸ میلی‌آمپر است. بر مبنای داده‌های به دست آمده از کل فرایند یخ‌زدگی، مقدار بیشینه از ۳/۶ تا ۱۵/۷ میلی‌آمپر متغیر است.

شکل‌های ۲۸ ب و ج به ترتیب شکل موج جریان نشتی مقره را با پوشش نانوسیلیس و مقره شیشه‌ای بدون پوشش نشان می‌دهند. مقادیر اوج جریان نشت از طریق مقره با پوشش نانوسیلیس و مقره شیشه‌ای بدون پوشش به ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۳۵ میلی‌آمپر بوده است. در واقع برای مقره با پوشش هیبرید، جریان نشت به اندازه‌ای عالی است که مقدار قابل توجهی از حرارت ژول را برای افزایش دمای سطح مقره تولید می‌کند. در مورد دو مقره دیگر، جریان نشت بسیار کم بود و هیچ اثر گرمایشی قابل توجهی روی این مقره‌ها وجود ندارد.



شکل ۲۸- نمودار نشت جریان بر حسب زمان برای مقره شیشه‌ای با پوشش هیبریدی ب- پوشش نانو سیلیکا ج- بدون پوشش

شکل ۲۹ ولتاژهای فلاش اور سه مقره را پس از یک دوره یخ‌زدایی ۲ ساعته نشان می‌دهد. ولتاژهای فلاش اور سه مقره از منحنی Utype پیروی کرده‌اند. حداقل ولتاژ فلاش اور مقره با پوشش هیبریدی، مقره با پوشش نانوسیلیس و مقره شیشه‌ای بدون پوشش به ترتیب ۴۸، ۴۴ و ۳۲ کیلوولت بوده است. با توجه به خواص فوق‌آب‌گریز و الکتروترمال پوشش هیبریدی، یخ ایجاد شده بر روی مقره با پوشش هیبریدی بسیار کمتر و نازک‌تر از دو مقره دیگر بود. بنابراین در دوره ذوب، مقره با پوشش ترکیبی بیشترین فاصله نشت را در بین سه مقره داشت [۱۴ و ۱۵].



شکل ۲۹- رابطه بین ولتاژ فلاش اور و تعداد رخدادهای فلاش اور برای هر سه مقره با پوشش هیبریدی، با پوشش سیلیکا و بدون پوشش

علاوه بر پوشش هیبریدی شرح داده شده، از پوشش لاستیکی سیلیکونی (RTV)^۷ بر روی مفره‌های پرس‌لان و شیشه‌ای جهت بهبود کارایی در شرایط یخ‌بندان استفاده شده است. در این پژوهش کارایی سیلیکون رابر خاص (آب‌گریز)، سیلیکون رابر با پوشش TiO_2 (ابر آب‌گریز) و آلومینیوم پولیش شده (آب‌دوست) مورد بررسی قرار گرفت و ثابت شد پوشش فوق‌آب‌گریز سبب افزایش زمان تأخیر در انجماد می‌شود، این افزایش در پوشش فوق‌آب‌گریز را می‌توان با کاهش سطح تماس مایع و جامد و به دام انداختن مقدار زیادی هوا در سطح مشترک مایع و جامد و کند شدن تبادل حرارت بین قطرات آب و سطح جامد مرتبط دانست. علاوه بر این، آب می‌تواند قبل از یخ‌زدن از سطح مفره خارج شود. استحکام چسبندگی یخ بر روی نمونه‌های سیلیکون رابر خاص (آب‌گریز)، سیلیکون رابر با پوشش TiO_2 (ابر آب‌گریز) و آلومینیوم پولیش شده (آب‌دوست) محاسبه و مشخص شد که قدرت چسبندگی یخ در نمونه فوق‌آب‌گریز ۷ برابر کمتر از نمونه آلومینیوم صیقلی بدون پوشش است [۱۶].

یک قطره آب تحت تأثیر میدان الکتریکی اعمال شده بر روی یک سطح فوق‌آب‌گریز حرکت می‌کند در حالی که در حضور یک سطح آب‌گریز یا آب‌دوست دچار کشش یا تغییر شکل می‌شود. در صورت وجود یک میدان الکتریکی خارجی، بار در داخل بدنه یک قطره آب تجمع می‌یابد و منجر به نیروی الکترواستاتیک می‌شود. با افزایش بزرگی میدان الکتریکی خارجی، یک قطره آب نمی‌تواند نیروی الکترواستاتیک فزاینده را حفظ کند که منجر به تغییر شکل یا حرکت می‌شود. با توجه به سطح تماس کم بین قطرات آب و سطح فوق‌آب‌گریز، قطره آب به دلیل عدم تعادل تنش ماکسول در جهت موازی با میدان الکتریکی اعمال شده حرکت می‌کند. یک قطره آب روی یک سطح فوق‌آب‌گریز آلودگی‌ها را جذب کرده و در حضور میدان الکتریکی حرکت می‌کند. این حرکت قطرات آب مسئول خودتمیزشوندگی و افزایش ولتاژ فلاش‌آور پوشش‌های فوق‌آب‌گریز است. علاوه بر این سطوح فوق‌آب‌گریز نسبت به سطوح لاستیکی سیلیکونی معمولی دارای محافظ میدان الکتریکی بهتری هستند. همچنین تأثیر زاویه تماس بر توزیع میدان الکتریکی نشان داده است که با افزایش زاویه تماس از ۹۰ درجه به ۱۵۰ درجه، چگالی میدان الکتریکی در محل اتصال سه‌گانه کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه تماس از ۹۰ به ۱۵۰ درجه، ضریب افزایش میدان الکتریکی ($E_{\text{max}}/E_{\text{avg}}$) از ۵ به ۲/۶ کاهش می‌یابد.

پوشش لاستیکی سیلیکونی در دمای اتاق (RTV)، یک روش نگهداری قابل اعتماد برای بهبود عملکرد و طول عمر مفره‌های پرس‌لان است. اما از طرفی رفتار تجزیه حرارتی مواد پلیمری به‌طور قابل توجهی بر طول عمر آن‌ها تأثیر می‌گذارد و مطالعات زیادی در مورد بهبود خواص نانوکامپوزیت‌ها با افزودن انواع مختلف نانوذرات وجود دارد. در بین انواع مختلف نانوذرات معدنی، نانو ذرات SiO_2 و ZnO دارای خواص فیزیکی و شیمیایی برجسته‌ای هستند به گونه‌ای که نانوذرات SiO_2 به‌طور گسترده برای تقویت RTV استفاده می‌شود، چرا که سبب بهبود هدایت حرارتی، استحکام تنش و قابلیت انتقال نوری می‌شود.

در این راستا دو نوع مختلف نانوکامپوزیت سیلیکون رابر با مقدار کمی از نانوذرات اصلاح شده SiO_2 و ZnO تهیه شد و رفتار حرارتی آن‌ها با نمونه بدون افزودنی مقایسه شد. در این پژوهش انرژی فعال‌سازی از طریق تجزیه و تحلیل گرماسنجی (TGA) به عنوان یک عامل مهم در پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌ها محاسبه شد. نتایج مطالعه نشان داد که انرژی فعال‌سازی در کامپوزیت‌های نانویی ZnO و SiO_2/ZnO در مقایسه با RTV خالص افزایش یافته است. این قضیه افزایش پایداری حرارتی نانو RTV را در مقایسه با RTV خالص تأیید می‌کند و می‌تواند در برآورد طول عمر مورد انتظار پوشش‌ها که در برآورد قابلیت اطمینان مفره‌های پرس‌لان ارزشمند است، مفید باشد.

جدول ۳- خواص حرارتی نمونه‌های RTV

نمونه	$T_{initial}$ (°C)	T_{1max} (°C)	T_{2max} (°C)
RTV	۱۷۱/۶	۲۵۲/۹۱	۴۱۳/۳۶
ZnO	۲۱۷/۷۷	۲۷۶/۱۹	۴۱۷/۷۲
ZnO-SiO ₂ /RTV	۲۱۳/۹۵	۲۱۳/۵۹	۴۲۲/۱۲

$T_{initial}$: دمایی که در آن ۱۰ درصد وزن کاهش می‌یابد.
 T_{1max} و T_{2max} : بالاترین دماهای تجزیه در مرحله اول و دوم

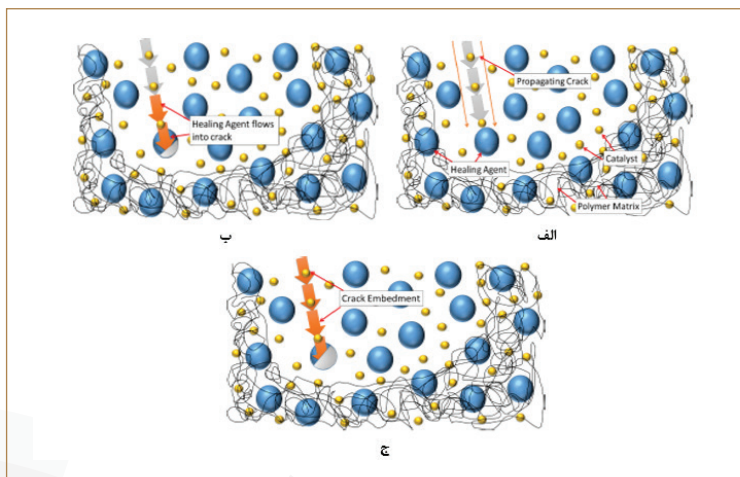
مقادیر متوسط انرژی فعال‌سازی به دست آمده برای RTV خالص، ZnO/RTV و ZnO-SiO₂/RTV به ترتیب ۵۰/۵، ۶۹/۴۸ و ۱۴۲/۸۱ بوده است. مقدار کمتر انرژی فعال‌سازی در RTV در مقایسه با نانو RTV، نشان دهنده آن است که فرایند تجزیه حرارتی برای RTV خالص با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد. این بهبود پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌های RTV تأثیر قابل توجهی بر طول عمر مورد انتظار آن‌ها دارد. همچنین پوشش نانو RTV حاوی نانوذرات ZnO در مقایسه با پوشش RTV خالص، مقاومت به ولتاژ بالاتری را نشان می‌دهد و عملکرد آب‌گریزی آن نیز به مراتب بهتر است. استفاده از پوشش‌های نانو RTV بر روی مقره‌ها نیز می‌تواند شاخص‌های اطمینان را در مناطق با سطح بالای آلودگی و کاهش احتمال شکست را افزایش دهند [۱۷].

رزین‌های اپوکسی نوع دیگری از رزین‌های مطرح هستند که به‌طور مداوم در حال پیشرفت هستند. رزین‌های اپوکسی از زمان معرفی تجاری خود در دهه ۱۹۵۰، به دلیل خواص عالی مانند مقاومت شیمیایی و حرارتی بالا، مقاومت و سختی ضربه بالا، مقاومت شکست بالا و... به‌طور گسترده‌ای برای محیط‌های کاری مختلف و در محدوده ولتاژ متوسط و کم قابل استفاده است. ویژگی‌های بسیار بهبود یافته عایق از طریق استفاده از نانوپرکننده‌ها، چشم‌انداز جدیدی را برای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی ارائه کرده است.

تأثیر پراکندگی نانوذرات در نانوکامپوزیت‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند. به دلیل انرژی سطحی بالای نانوذرات، احتمال آگلومره شدن وجود دارد. پراکندگی کم ذرات و آگلومره شدن ذرات سبب می‌شود تا خواص مدنظر حاصل نشود. علاوه بر این، ناپایداری نانوذرات به دلیل آگلومره شدن یک مانع واقعی در کنترل اندازه آن‌هاست. مطالعات زیادی برای جلوگیری از تجمع نانوذرات وجود دارد. به عنوان مثال جهت پراکندگی بهتر نانوذرات ZnO و SiO₂ به ترتیب می‌توان از اصلاح‌کننده‌های سطح (APTES)^۱ و (HMDS)^۲ استفاده کرد.

افزایش مقاومت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در برابر تخریب سطح، به دلیل پیوند قوی بین زمینه اپوکسی و نانوذرات است. از این رو، نانوکامپوزیت‌های اپوکسی به عنوان جایگزین میکروکامپوزیت‌های آن در نظر گرفته می‌شوند. تخریب سطح به دلیل پدیده تخلیه جزئی نگرانی اصلی در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی است. بنابراین استفاده از عوامل خودترمیم‌شونده با نانوکامپوزیت‌های اپوکسی سبب رفع این مشکل خواهد شد. مواد خود

ترمیم‌کننده استحکام مکانیکی کامپوزیت را بهبود می‌بخشند. عملکرد عوامل خودترمیم‌کننده در شکل ۳۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، عامل ترمیم‌کننده به درون شکاف‌های موجود در ساختار نمونه نفوذ می‌کند و منجر به بسته شدن آن می‌شود [۱۳].



شکل ۳۰- تاثیر خاصیت خودترمیم شوندگی در جلوگیری در انتشار ترک

علاوه بر مقالات چاپ شده در رابطه با فناوری نانو در مقره، اختراعات ارزشمندی نیز در این راستا به ثبت رسیده است که در جدول ۴ به برخی از آن‌ها اشاره شده است.

جدول ۴- اختراعات ثبت شده در رابطه با صنعت مقره

Porcelain insulator with super-hydrophilic antifouling self-cleaning function

- اعمال پوشش با خواص فوق آب دوستی، آنتی فولینگ و خودپالایندگی بر روی مقره پرسیلانی
- استفاده از نانوفیلرهای غیرآلی اکسیدتیتانیوم با خواص فوتوکاتالیستی و فوق آب دوستی و کیورینگ با نسبت وزنی ۱۱~۸:۱
- اعمال پوشش به روش اسپری و با ضخامت بین ۳ تا ۱۰ میکرومتر
- دمای خشک کردن پوشش بین ۲۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی گراد و مدت زمان ۱۰ دقیقه تا ۲۴ ساعت
- عمر پیش بینی شده بیش از ۵۰ سال برای پوشش
- رسیدن به سختی بالای 5H برای فیلم اکسیدی غیرآلی کاملاً خشک شده

Insulator having a porcelain body and a hydrophobic coating

- ایجاد پوشش با خواص آب‌گریزی، خودتمیزشوندگی و ضدگردوغبار و لک که شامل پلیمری است که به روش پلیمریزاسیون پلاسمایی^{۱۱} مستقیماً روی سرامیک اعمال شده است.
- استفاده از هگزامتیل دیسیلوکسان^{۱۲} به عنوان مونومر در پلیمریزاسیون پلاسمایی
- ضخامت پوشش ایجاد شده توسط این روش بین ۵۰ تا ۱۰۰ میکرومتر است که در واقع یک پوشش سخت و بادوام است.
- با چنین ضخامت و درجه بالای اتصال گروه‌های مولکولی جداگانه پلیمر ایجاد شده به روش پلیمریزاسیون پلاسمایی با یکدیگر این اطمینان را می‌دهد که رطوبت نمی‌تواند از طریق پلیمر نفوذ کند. حتی مولکول‌های کوچک مانند اکسیژن، هیدروژن یا دی‌اکسیدکربن نیز نمی‌توانند از طریق خوشه مولکول‌های پلیمر نفوذ کنند.
- پایداری بلندمدت پوشش بر روی سطح مقره سرامیکی
- به کارگیری و برتری این پوشش به جای استفاده از پوشش سطحی لعاب در فرایند ساخت مقره سرامیکی مانند پرس‌لان و در واقع کاهش هزینه ساخت به دلیل حذف فرایند تولید لعاب.
- کم‌هزینه‌تر بودن فرایند پوشش‌دهی پلیمر به روش پلیمریزاسیون پلاسمایی نسبت به استفاده از لعاب.
- ایجاد پوشش با خاصیت آب‌گریزی با زاویه تماس حدود ۱۳۱ درجه
- ثبات خواص اولیه مقره پس از ۱۰۰۰ ساعت قرارگیری نمونه در آزمایش پاشش نمک^{۱۳}
- در مناطق دارای آلودگی سطحی، یک مقره با پوشش آب‌گریزی دارای عملکرد بهتری نسبت به یک مقره آب‌دوست لعاب‌دار و بدون پوشش است.

PRTV (permanent room temperature vulcanized) long-lasting anti-pollution flashover coating with high hydrophobicity and corrosion resistance

- اعمال پوشش PRTV با خواصی همچون پایداری، ضدآلودگی، ولتاژ فل‌شاور بالا، ضد خوردگی در مقابل محیط‌های مختلف همچون اسیدی، بازی و خنثی و قابلیت استفاده در محیط‌های کاری مختلف و همچنین خاصیت آب‌گریزی با زاویه تماس بیش از ۱۰۰ درجه.
- پوشش PRTV شامل اجزای زیر به صورت وزنی است: ۵۵-۴۰ قسمت دی‌هیدروکسیل پلی‌دیمتیل سیلوکسان^{۱۴}، ۳۰-۲۰ قسمت فلوروورزین اصلاح شده حاوی سیلیکون^{۱۵}، ۶-۴ قسمت نانو سیلیسیم دی‌اکسید^{۱۶}، ۷-۴ قسمت عامل اتصال^{۱۷}، ۹-۰/۶ قسمت کاتالیزور^{۱۸}، ۳۰-۲۵ قسمت هیدروکسید آلومینیوم^{۱۹}، ۶۰-۴۰ قسمت رقیق‌کننده^{۲۰} و ۲-۴ قسمت کربن سیاه^{۲۱} (عامل پکننده با هدف افزایش مقاومت به خوردگی پوشش).
- ضخامت پوشش ایجاد شده بر روی سطح مقره حدود ۰/۳ میلی‌متر است.

Method for preparing porcelain insulator surface super-hydrophobic coating

- اعمال پوشش با خاصیت ابرآب‌گریزی بر روی مقره پرس‌لان
- تهیه پوشش به گونه‌ای است که ابتدا دی‌اکسید سیلیسیم از طریق کاتالیز قلیایی و افزودن یک عامل اتصال سیلان سنتز می‌شود. پس از آن سطح مقره پرس‌لان را تمیز کرده و در محلول دی‌اکسیدسیلیسیم اصلاح‌شده برای ایجاد پوشش از طریق روش czochralski و با هدف به‌دست‌آوردن یک ساختار درشت میکرو نانو متری غوطه‌ور می‌شود و پس از خشک شدن، به روش czochralski برای افزودن پوشش فیلم ثانویه در سیلیکون رابر با هدف کاهش انرژی سطح غوطه‌ور می‌شود و سپس در آون برای عملیات حرارتی در دمای ۱۲۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و در نهایت یک پوشش فوق آب‌گریز حاصل می‌شود.

Insulator coating and method for forming same

- اعمال پوشش با خواص مقاومت در برابر تخریب جوی و شیمیایی بر روی مقره
- تفلون (PTFE) دارای ضریب اصطکاک پایین (عموماً در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۲۰)، مقاومت حرارتی و شیمیایی خوب و پایداری خوب در دماهای پایین تا ۲۷۰- درجه سانتی گراد است.
- اعمال پوشش تفلون بر روی مقره به گونه‌ای که با استفاده از اچ اکسیژن پلاسما انجام شده است. جریان گاز اکسیژن در این فرایند ۸ سانتی متر در ثانیه و مدت زمان اصلاح یا پلاسما ۱۵ دقیقه است و در نهایت پوشش های تفلون فوق آب‌گریز با زاویه تماس آب بالای ۱۵۰ درجه ایجاد شد.
- پوشش دیگر با استفاده از فلوراسیون پلاسمایی فیلم‌های پلی‌بوتادین^{۱۱} ایجاد شد. پیوندهای C=C روی سطح را می‌توان به راحتی فعال و فلورین کرد. پلی‌بوتادین در مقایسه با سایر مواد یک ماده نسبتاً ارزان است و می‌توان آن را به راحتی روی فلز، شیشه، سرامیک، نیمه هادی، کاغذ، نساجی و سایر سطوح پلیمری استفاده کرد. پلی‌بوتادین در حلال حل شده و روی مقره به روش غوطه‌وری پوشش داده می‌شود و در نهایت پوشش در هوا خشک شده و پلاسما می‌چ می‌شوند تا سطوح فوق آب‌گریز ایجاد شود. فیلم‌های پلی‌بوتادین پس از فلوراسیون، سختی سطح و دوام و قابلیت اطمینان آن‌ها افزایش می‌یابد.
- ضخامت مطلوب پوشش از ۲۰۰ نانومتر تا ۵۰ میکرومتر است و گاز اچ ترجیحی SF₆ است. پوشش فوق آب‌گریز با زاویه تماس آب بین ۱۵۵ درجه تا ۱۷۰ درجه می‌تواند با این روش تهیه شود.

High-strength RTV hydrophobic, long-acting and anti-fouling flashing coating and preparation method thereof

- این پوشش با خواصی همچون ولتاژ فلاش بالا، ابرآب‌گریز، طول عمر طولانی و ضد رسوب شامل اجزای زیر است (به صورت وزنی): ۵۰-۳۰ قسمت هیدروکسیل پلی‌سیلوکسان، ۲۰-۱۵ قسمت کربن بلک سفید^{۱۲}، ۲۰-۱۰ قسمت هیدروکسید آلومینیوم، ۸-۴ قسمت متیل فیل سیلیکون رزین، ۱/۶-۰/۱ قسمت نانو دی‌اکسید تیتانیوم، ۴-۱/۵ قسمت عامل کوپلینگ ایجنت سیلوکسان، ۱-۰/۱ قسمت رنگدانه و ۳۸-۱۵ قسمت اتر نفتی^{۱۳}.
- استفاده از این پوشش برای مقره‌های سرامیکی و یا شیشه‌ای
- روش آماده‌سازی برای این پوشش شامل مراحل (۱) همزدن، (۲) آسیاب، (۳) خشک کردن، (۴) خنک کردن، (۵) هم‌زدن و در نتیجه به دست آوردن محصول نهایی است.

Coated composite high voltage electrical insulator

- این اختراع مربوط به ایجاد پوشش پلیمری برای مقره‌های با کاربرد ولتاژ بالا که دارای ترکیب RTV^{۱۴} که در صورت وجود رطوبت پیوند می‌خورد. این ترکیب محصولی است که با مخلوط کردن حدود ۲۰ تا ۶۰ درصد وزنی یک یا چند مایعات پلی‌دیورگانوسیلوکسان^{۱۵}، از ۰ تا حدود ۴۰ درصد وزنی سیکلوارگانوسیلوکسان^{۱۶} با فرمول $[(R)_2SiO]_n$ ، از ۰ تا حدود ۴۰ درصد وزن یک پرکننده گسترش دهنده یا تقویت‌کننده غیر آلی، از ۵/۰ تا ۱۵ درصد وزنی یک پرکننده تقویت کننده SiO₂ آمورف با مساحت بین ۱۰۰ تا ۲۵۰ مترمربع در گرم و محدوده اندازه ذرات بین ۰/۱ تا ۰/۳ میکرون از حدود ۱۰ تا حدود ۱۰ درصد وزنی یک اکسیموسیلان عامل کراس لینک
- اعمال پوشش به روش اسپری یا غوطه‌وری
- این پوشش دارای خواص حفاظتی در برابر اثرات محیطی به همراه استحکام فیزیکی بالا و چسبندگی با ترکیب مناسب از پرکننده‌های تقویت‌کننده است.

Anti-icing nano composite paint and application

- ایجاد پوشش نانوکامپوزیتی با خاصیت ضد یخ
- نانوپوشش کامپوزیتی ضد یخ از مواد پلیمری آلی فلورین-سیلیکون، نانومواد، عامل پخت، حلال و پرکننده تشکیل شده است که درصد وزن آن‌ها به شرح زیر است: ۱ تا ۹۸ درصد پلیمر آلی فلورین-سیلیکون، ۱ تا ۹۲ درصد نانومواد، ۱ تا ۵۰ درصد عامل پخت، ۰ تا ۹۰ درصد حلال و ۰ تا ۵۰ درصد فیلر (پرکننده). مواد به طور یکنواخت مخلوط و آسیاب می‌شوند تا نانوپوشش کامپوزیت ضد یخ آماده شود.
- نوعی از رنگ نانوکامپوزیت ضد یخ: مواد کامپوزیتی سیلیکونی فلوریندار آلی با وزن مولکولی ۵۰۰۰۰ گرم بر مول به میزان ۱۰۰ کیلوگرم، ۲۰ کیلوگرم نانوسیلیکون، ۱۰۰ کیلوگرم تریکلرومتان، ۱۵ کیلوگرم دی‌اکسید تیتانیوم سه آهنه، ۵ کیلوگرم اتیل سلولز، ۵ کیلوگرم نانولوله کربنی، ۱۰ کیلوگرم سیانامیدهای سه گانه، ۱۰ کیلوگرم تری متوکسی متیلسیلان، ۵ کیلوگرم نفتنات روی بوده است که پس از اختلاط و همزدن با روش‌هایی همچون اسپری و غوطه‌وری بر روی سطح مقره پوشش داده می‌شود.

High voltage ceramic and glass insulator with function film of resisting pollution flashover and its preparation method

- مقره سرامیکی و یا شیشه‌ای با ولتاژ بالا با لایه معدنی نانومتری با خواص ویژه ضد خوردگی، آنتی استاتیک و ضد آلودگی که این پوشش شامل دی‌اکسید تیتانیوم خالص یا محلول اکسید ترکیبی دوتایی است.
- در این پوشش با ساختار نانوکریستال ثابت دی‌الکتریک سطح مقره تغییر می‌یابد و الکتریسیته ساکن جمع شده در سطح مقره و گرد و غبار چسبیده به سطح عایق را کاهش می‌دهد.
- در فرایند سنتز این پوشش مواد فعال سطحی به محلول دی‌اکسید تیتانیوم یا محلول اکسید دوتایی حاوی دی‌اکسید تیتانیوم اضافه می‌شود. عوامل فعال سطحی از یک یا چند نوع پلی‌وینیل الکل، پلی‌اتیلن گلیکول‌ها، پرفلورو آلکیل کربوکسیلیک اسید و کربوکسیلات آن، پرفلورو آلکیل سولفونات‌ها و سورفکتانت‌های غیر یونی حاوی فلورین انتخاب می‌شوند.
- در محلول اکسید دوتایی از محلول دی‌اکسید سیلیکون (۱۰ میلی لیتر) و محلول دی‌اکسید تیتانیوم (۱۰۰ میلی لیتر) استفاده شده که مقدار pH محلول ۲/۳ است.

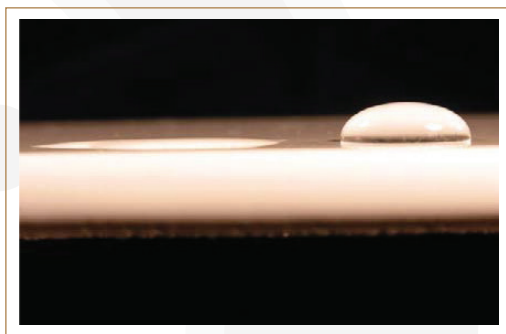
Electrical insulator offering reduced sensitivity to pollution

- یک مقره با پوششی با خاصیت ضد آلودگی که شامل بدنه‌ای از یک ماده دی‌الکتریک شیشه یا پرسلان با پوشش نیمه هادی بیرونی
- این پوشش عمدتاً از اکسید روی تشکیل شده است که حداقل یک اکسید فلزی دیگر به آن اضافه شده است تا مشخصه ولتاژ-جریان آن غیر خطی شود، به طوری که $I = kV \cdot \sup.a$ جایی که I جریان، V ولتاژ، k و a ضریب و مقدار a بین ۲۰ تا ۵۰ است.
- ضخامت پوشش بین ۰/۰۵ تا ۰/۵ میلی متر است.
- این پوشش دارای بیش از ۹۰ درصد اکسید روی است. اکسید فلز اضافی از بیسموت، منگنز، کبالت، کروم و اکسیدهای آنتیموان انتخاب می‌شود. ویژگی ویژه پوشش مبتنی بر اکسید روی که در اختراع حاضر استفاده می‌شود این است که از تشکیل قوس‌های موضعی در مناطق خشک جلوگیری می‌کند.
- توزیع میدان الکتریکی در سطح مقره بهبود یافته و در نتیجه سبب افزایش ولتاژ فلاش اور می‌شود.

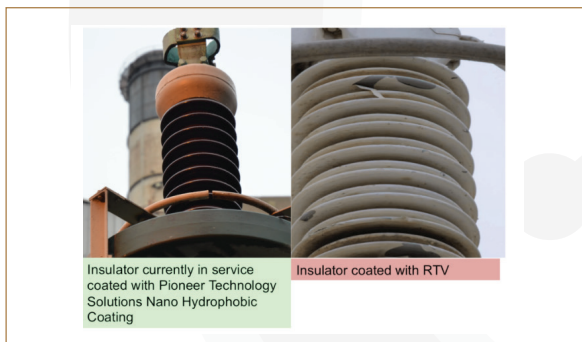
Polymeric High Voltage Insulator with a Hard, Hydrophobic Surface

- استفاده از مقره پلیمری و پوشش ابر آبگریز
- این پوشش دارای خواصی همچون مقاومت مکانیکی بالا، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت خوب در برابر اشعه ماوراء بنفش، آبگریزی و سطح سخت خود تمیز شونده با جریان های ناشی کم است.
- ایجاد سطوح کوپلیمری سیلوکسان-هیدروکربنی که سخت و آبگریز هستند و با افزودن نانوذرات پرکننده (آناناز یا دیاکسید تیتانیوم روتیل، اکسید سیلیکون، نانوذرات اکسید آلومینیم یا اکسید روی یا مخلوطی از نانوذرات مختلف اکسید فلز، در اندازه ذرات حدود ۲ تا ۱۰۰ نانومتر و ترجیحاً ۴ تا ۱۰ نانومتر) می توانند خواص فوق آبگریز و فوتوکاتالیستی داشته باشند.
- استفاده از مقره پلیمری با بدنه تقویت شده با الیاف و بدون حفره با ۶۰ تا ۸۸ درصد پلیمر و به کارگیری پرکننده های معدنی.
- یک هسته مقره با بتن پلیمری می تواند شامل تقویت کننده فیبری با الیاف با طول ۱/۵ تا ۱۲ میلی متر و ترجیحاً ۳ تا ۷ میلی متر باشد.

پس از اشاره به برخی از اختراعات ثبت شده در رابطه با فناوری نانو در مقره می توان به این قضیه اشاره کرد که در دنیا و در داخل کشور نیز، شرکت های مختلفی در زمینه تولید پوشش های آبگریز و خود تمیز شونده فعالیت دارند. برای مثال، شرکت آمریکایی Aculon پوشش های نازکی تولید می کند که دارای ویژگی آبگریز و یا چربی گریز هستند. این پوشش ها با استفاده از یک فناوری اختصاصی از «تک لایه خود آرای فسفاتی» (SAMP) ساخته می شوند و علاوه بر خاصیت آبگریزی و چربی گریزی، مقاومت به خوردگی مناسبی نیز بر روی سطوح مختلف مانند فلزات، اکسیدهای فلزی، شیشه، سرامیک ها، ذرات، نیمه رساناها و حتی برخی سطوح پلیمری ایجاد می کنند. این روش به صورت کووالانسی به سطح ماده مورد نظر پیوند می یابد و در شرایط عادی بسیار پایدار است [۱۸]. از دیگر شرکت های خارجی معتبر فعال در این زمینه می توان به BASF، Alexim و یا شرکت Diamon-Fusion International یا DFI اشاره کرد. شکل ۳۱ نمایی از پوشش های آبگریز شرکت DFI را نشان می دهد [۱۹، ۲۰ و ۲۱].



شکل ۳۱- نانوپوشش های آبگریز Diamon-Fusion



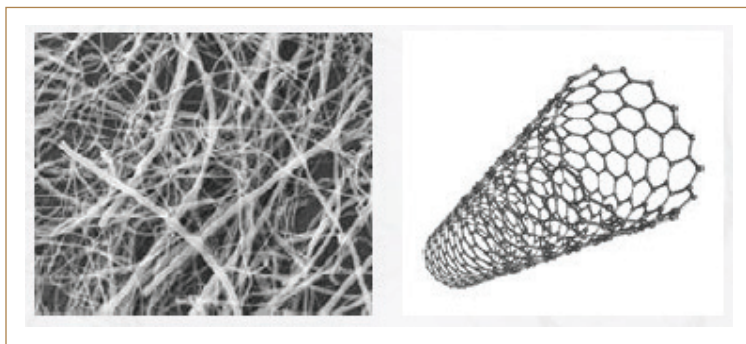
➤ شکل ۳۲- پوشش RTV (سمت راست) و پوشش نانواب‌گریز ساخت شرکت **pioneer tech solutions** (سمت چپ) بر روی مقره.

شرکت **pioneer tech solutions** نیز تولیدکننده پوشش نانواب‌گریزی است که عملکرد مقره‌ها را بهبود می‌بخشد به گونه‌ای که سبب افزایش ولتاژ فلاش اور و جلوگیری از قطع برق می‌شود. این محصول برخلاف روش‌های پوشش‌دهی موجود که گران، وقت‌گیر و موقت هستند، عمر بالا و روش اعمال ساده‌تری دارد. این نوع پوشش آب‌گریز حفاظت بهتری در برابر آلاینده‌ها ارائه می‌دهد [۲۲].

از جمله شرکت‌های فعال در این زمینه در ایران می‌توان به شرکت تعاونی رنگ و رزین الوان اشاره کرد [۲۳]. شرکت دانش‌بنیان نانوآش شرکت دیگری است که قابلیت تولید پوشش آب‌گریز با زاویه تماس حدودی ۱۰۰ درجه و ضد گردوغبار برای مقره‌ها و تجهیزات الکتریکی را دارد [۲۴].

همانطور که در بالا هم اشاره شد، یکی دیگر از چالش‌های مقره‌ها، استحکام مکانیکی آن‌هاست. به دلیل وزن بالای هادی‌ها و اتصالات، ممکن است مقره‌ها بشکنند. یکی از موادی که با شکل‌گیری فناوری نانو توسعه یافته‌اند، نانوکامپوزیت‌های مستحکم هستند. معمولاً داخل این ساختارها از نانوساختارهای کربنی به خصوص نانولوله‌های کربنی که جزء مستحکم‌ترین مواد موجود در طبیعت به حساب می‌آیند، استفاده می‌شود. این مواد به دلیل ساختمان و نحوه کنار هم قرار گرفتن اتم‌های کربن در آن‌ها، از استحکام بسیار بالایی برخوردار هستند و در صورتی که مقدار کمی از آن‌ها، به یک زمینه پلیمری، فلزی و یا سرامیکی اضافه شود، استحکام کامپوزیت حاصله، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. نانولوله‌های کربنی علاوه بر افزایش مقاومت کششی، سبب بهبود خواص هدایت الکتریکی و هدایت گرمایی نیز می‌شوند. تصویر میکروسکوپی نانولوله‌های کربنی در شکل ۳۳ نشان داده شده است.

نانوکامپوزیت‌های حاصله علاوه بر افزایش قابل توجه استحکام در داخل آن‌ها، وزن سبک‌تری نیز نسبت به سازه‌های مشابه دارند. این مواد بر مبنای مواد تشکیل‌دهنده، درصد مواد و روش تولید می‌توانند دارای خواص مکانیکی، رسانایی الکتریکی و انعطاف‌پذیری متفاوتی باشند.



شکل ۳۳- تصویر میکروسکوپی نانولوله‌های کربنی (سمت راست) و نحوه چیدمان اتم‌های کربن (سمت چپ)

همچنین در این راستا در شهر اهواز «مقره‌های نانویی» به صورت پایلوت نصب شد که هدف از این کار کاهش هزینه‌های میلیاردی است که سالانه جهت شستشوی مقره‌ها پرداخت می‌شود، به گونه‌ای که گزارش شده است هزینه پوشش نانو یک‌دهم هزینه‌های میلیاردی شستشوی مقره‌هاست. علاوه بر این در پژوهشی دیگر پایلوت نانوپوشش سیلیکونی بر روی تجهیزات عایقی پست‌های منتخب تهران و مشهد اجرا و بررسی شد. نتایج عملکرد میدانی با هدف بهبود عملکرد تجهیزات عایقی صنعت برق، نانوپوشش‌های سیلیکونی بهینه شده بر روی تجهیزات عایقی پست‌های انتقال برق مشیریه تهران و رضوان مشهد که به دلیل مجاورت با کارخانه‌های سیمان دارای مشکل نشست ذرات گردوغبار بوده‌اند، ارائه شد.



شکل ۳۴- عملیات پوشش‌دهی مقره‌ها (سمت راست) و مقره‌های پوشش داده شده و بکناختی پوشش‌دهی سطحی آن‌ها



در این پژوهش نانوپوشش آب‌گریز سیلیکون رابر تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا، در تجهیزات عایقی پست‌های انتقال برق مشیریه تهران و رضوان مشهد اعمال شد. عملکرد این نانوپوشش بعد از گذشت ۹ ماه در پست مشیریه مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت مقره‌های دارای نانوپوشش از آب‌گریزی مطلوبی برخوردار بوده و در مقایسه با مقره‌های بدون پوشش و با پوشش معمولی، بسیار راحت‌تر از آلودگی‌ها پاک شدند. در مقره‌های بدون پوشش در برخی مناطق فیلم سخت و پایدار سیمانی تشکیل شده و همچنین در اثر ریخته شدن آب، لایه‌ای پیوسته از رطوبت تشکیل شد که حالت گل شدن روی سطح ایجاد کرده و پس از خشک شدن نیز آلودگی‌ها از روی سطح برطرف نشد. در صورتی که در نانوپوشش به هیچ عنوان فیلم‌های سخت و پایدار سیمانی تشکیل نشده و از سوی دیگر پس از ریختن آب فیلم پیوسته از آب روی سطح ایجاد نشد و بدون تشکیل حالت گلی شکل آلودگی‌ها از روی سطح برطرف شدند. همچنین قطرات آب دارای زاویه تماس بالاتر از ۱۳۰ درجه بوده‌اند [۲۵].

همچنین تلاش‌های دیگری در این زمینه صورت گرفته است به گونه‌ای که شرکت مقره‌سازی ایران تلاش کرده با نهادهای مختلف در خصوص پوشش نانو وارد مذاکره شده و اقدام به پوشش نانو بر روی مقره سرامیکی نماید که با این پوشش با توجه به خاصیت آب‌گریزی که در مقره‌ها ایجاد خواهد شد سبب خودشویندگی مقره‌ها و در نهایت کاهش جذب آلودگی و جریان خزش بر روی مقره‌ها فراهم خواهد شد. علاوه بر این گزارش شده است که تولید مقره در بزرگترین کارخانه مقره‌سازی غرب آسیا در ساوه کشور را از واردت مقره بی‌نیاز کرد. به گونه‌ای که این کارخانه با تولید بیش از ۱۱ هزار تن انواع مقره‌های سرامیکی، انتقال، توزیع و فشار قوی نیاز کشور به این عایق الکتریسیته را برطرف می‌کند. همچنین این واحد تولیدی توانسته مقره‌هایی با پوشش نانو را برای اولین بار در جهان تولید و روانه بازار کند.

نتیجه‌گیری

مقره یکی از مهم‌ترین بخش‌های مورد استفاده در بخش انتقال و توزیع انرژی الکتریکی است. از این رو بررسی و رفع چالش‌های موجود در این تجهیز می‌تواند باعث صرفه اقتصادی و بهبود عملکرد سایر تجهیزات مرتبط با مقره شود. با توجه به چالش‌های موجود در مقره‌ها، فناوری نانو می‌تواند بخش اعظمی از این موارد را رفع کند و بر طول عمر این تجهیز بیفزاید، همچنین فناوری نانو بر بهبود عملکرد این تجهیز تأثیر قابل توجهی می‌گذارد. از این رو تحقیق و سرمایه‌گذاری در بهبود عملکرد این تجهیز و افزایش طول عمر آن به وسیله فناوری نانو می‌تواند صرفه اقتصادی زیادی داشته باشد. هم‌اکنون کشورهای خارجی در این بخش به نتایج قابل قبولی رسیده‌اند و در کشور جمهوری اسلامی ایران این بخش هنوز در مرحله تحقیقاتی است. با توجه به این نکته، سرمایه‌گذاری در فناوری نانو می‌تواند در بهبود عملکرد این تجهیز و افزایش طول عمر آن در داخل کشور، موجب تحولی در تولید این تجهیز شده که به بومی‌سازی این فناوری منجر شود.



پی‌نوشت‌ها

- ۱ Electrical Insulators
- ۲ Hardness Vickers (HV)
- ۳ Equivalent Salt Deposit Density
- ۴ Nonsoluble Deposit Density
- ۵ Flashover
- ۶ Poly(dimethylsiloxane), hydroxy terminated
- ۷ RTV silicone (room-temperature-vulcanizing silicone)
- ۸ (3-Aminopropyl) triethoxysilane
- ۹ Hexamethyldisilazane
- ۱۰ Plasma Polymerization
- ۱۱ Hexamethyldisiloxane

- ۱۲ Salt Spray
- ۱۳ dihydroxyl polydimethylsiloxane
- ۱۴ silicon-containing modified fluoro resin
- ۱۵ nano-silicon dioxide
- ۱۶ cross-linking agent
- ۱۷ catalyst
- ۱۸ aluminum hydroxide
- ۱۹ diluent
- ۲۰ carbon black
- ۲۱ Polybutadiene
- ۲۲ White carbon black
- ۲۳ petroleum ether
- ۲۴ vulcanizable organopolysiloxane rubber room temperature
- ۲۵ polydiorganosiloxane
- ۲۶ cyclic dimethyl siloxane

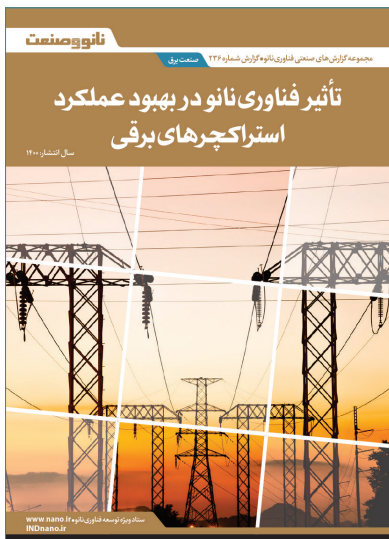
مراجع

- ۱ اصول کار بر روی خطوط برقدار (دستورالعمل‌ها)، نویسنده: اندی اندرسون، مترجم: شفیق احسانی، تاریخ انتشار: ۱۳۸۹.
- ۲ بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع، نویسندگان: سید علی بربند، بهنام بیات، ابوالقاسم کریمی، تاریخ انتشار: ۱۳۸۷.
- ۳ توزیع نیروی برق، اتوماسیون حفاظت و کنترل، نویسنده: پروفسور جیمز مومو، سال انتشار: چاپ ۲۰۰۷، انتشارات: تایلور و فرانسیس
- ۴ اصول تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی، نویسنده: حمیدرضا تیموریا، سال انتشار: ۱۳۸۸.
- ۵ درسنامه سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی، نویسنده: علی جاجرمی، سال انتشار: ۱۳۸۴.
- ۶ www.marketsandmarkets.com
- ۷ Contreras, José E., and Eden A. Rodriguez. "Nanostructured insulators—A review of nanotechnology concepts for outdoor ceramic insulators." *Ceramics International* 43.12 (2017): 8545-8550.
- ۸ Alonso-De la Garza, D. A., et al. "Effect of nano-TiO₂ content on the mechano-physical properties of electro-technical porcelain." *Materials Chemistry and Physics* 254 (2020): 123469.
- ۹ Contreras, J. E., M. Gallaga, and E. A. Rodriguez. "Effect of nanoparticles on mechanical and electrical performance of porcelain insulator." 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). IEEE, 2016.
- ۱۰ Gu, Irene YH, et al. "Automatic surveillance and analysis of snow and ice coverage on electrical insulators of power transmission lines." *International Conference on Computer Vision and Graphics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.

- ۱۱ Hileman, Andrew R. Insulation coordination for power systems. CRC Press, 2018.
- ۱۲ Zhuang, Jiandong, et al. "A Novel Application of Nano Anticontamination Technology for Outdoor High-Voltage Ceramic Insulators." International journal of applied ceramic technology 7 (2010): E46-E53.
- ۱۳ Paramane, Ashish S., and K. Sathish Kumar. "A review on nanocomposite based electrical insulations." Transactions on electrical and electronic materials 17.5 (2016): 239-251.
- ۱۴ Li, Jian, et al. "An OH-PDMS-modified nano-silica/carbon hybrid coating for anti-icing of insulators part I: fabrication and small-scale testing." IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 23.2 (2016): 935-942.
- ۱۵ Yan, Xinzhu, et al. "An OH-PDMS-modified nano-silica/carbon hybrid coating for anti-icing of insulators part ii: anti-icing performance." IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 23.4 (2016): 2165-2173.
- ۱۶ Momen, G., M. Farzaneh, and A. Nekahi. "Properties and applications of superhydrophobic coatings in high voltage outdoor insulation: a review." IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 24.6 (2017): 3630-3646.
- ۱۷ Taghvaei, Monire, et al. "Thermal stability of nano RTV vs. RTV coatings in porcelain insulators." Thermal Science and Engineering Progress 20 (2020): 100696.
- ۱۸ www.aculon.com
- ۱۹ www.aleximgroup.com
- ۲۰ www.basf.com/group/corporate/en/innovations/events/presentations/nanotechnology/index.
- ۲۱ www.diamonfusion.com
- ۲۲ www.pioneertechnologies.com
- ۲۳ www.alvanpaint.com
- ۲۴ www.NANOVAPRO.com

۲۵ اشکان ذوالریاستین، نسترن ریاحی نوری، علی مهدی خانی، حسام فلاح آرائی، سعید سالارخیلی، «اجرای پایلوت نانو پوشش سیلیکونی بر روی تجهیزات عایقی پست های منتخب تهران و مشهد و بررسی نتایج عملکرد میدانی»، هفتمین کنفرانس فناوری نانو صنعت برق - تهران، ایران، ۱۳۹۸.

از مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو در صنعت برق منتشر شده است



- کاربرد فناوری نانو در صنعت برق و انرژی
- کاربرد فناوری نانو در در جوهرهای رسانا مورد استفاده در مدارهای الکترونیکی
- کاربرد نانو سیالات در صنعت برق و انرژی
- کاربرد فناوری نانو در قطعات پلیمری با هدایت الکتریکی بالا
- تأثیر فناوری نانو در بهبود عملکرد استراکچرهای برقی