فصلنامه سرامیک ایران

ارائه مدل به منظور تخمین طول عمر مقره سرامیکی در آلودگی‌های مختلف براساس استقامت الکتریکی و حرارتی

منیره تقوایی[1]، نسیم نایب‌پاشایی[2]، مصطفی صدیقی‌زاده[1]

[1] دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی
[2] پژوهشکده فناوری و مهندسی، پژوهشگاه استاندارد

چکیده: مقره‌های سرامیکی از جمله مقره‌های به کار رفته در صنعت برق می‌باشند که کارایی و ویژگی‌های آنها در مقایسه با سایر مقره‌ها ازجمله مقره‌های پلیمری، محبوبیت این مقره‌ها را افزایش داده است. مهمترین نکته در رابطه با مقره‌های سرامیکی عملکرد آنها در شرایط محیطی آلوده است که به علت آبدوست بودن سطح مقره‌های سرامیکی وقوع تخلیه الکتریکی بیشتری را در مقایسه با سایر مقره‌ها تجربه می‌کنند. همین امر باعث کاهش استقامت الکتریکی مقره‌های یاد شده در شرایط محیطی سخت، می‌شود. امروزه استفاده از پوشش و ناپوشش‌های بر پایه‌ی پلیمر به عنوان راهکاری به منظور بهبود عملکرد و در نتیجه جلوگیری از پیرشدگی و فرسودگی مقره‌های پلیمری مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله سعی شده است تا با بهره‌گیری از مدل تخمین طول عمر چند معیاره پیشنهادی و براساس داده‌های تجربی، طول عمر مقره‌های سرامیکی پوشش داده شده و بدون پوشش را در شرایط محیطی با آلودگی مختلف با یکدیگر مقایسه کرده و تاثیر پوشش و آلودگی بر روی طول عمر تخمینی پیشنهادی بررسی شود. با بهره‌گیری از مدل پیشنهادی و مقایسه طول عمر دو مقره سرامیکی بدون پوشش و پوشش داده شده مشخص شد طول عمر مقره پوشش داده شده با پوشش سیلیکون رابر در شرایط محیطی آلوده بهبود چشمگیری داشته است که در نتیجه بهبود عملکرد تخلیه الکتریکی حاصل شده است. مدل چندپارامتری پیشنهادی و داده‌های تجربی این تحقیق معیارهای عددی را بدست خواهد داد که در تحلیل‌های قابلیت اطمینان محور شبکه قدرت و مدلسازی روش تعمیر و نگهداری خطوط با توجه به شرایط محیطی(شدت آلودگی و میزان درجه حرارت محیط) مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

کلمات کلیدی: مقره پرسلانی، نانوذرات، پوشش سیلیکون رابری، ولتاژ تخلیه الکتریکی، تخمین طول عمر.

نویسنده مسئول:
دکتر نسیم نایب‌پاشایی
n.nayebpashaee@standard.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی
صفحه‌های: ۶۱ تا ۷۱
شاپا چاپی: ۳۳۵۱-۱۷۳۵
شاپا الکترونیکی: ۳۰۹۷-۲۷۸۳
زبان نشریه: فارسی
دسترس‌پذیر در نشانی: www.JICERS.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۵

DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.4.5

۱- مقدمه

مقره‌های فشار قوی به منظور جداسازی سطوح مختلف ولتاژ از یکدیگر استفاده می‌شود. به مرور زمان آلودگی برسطح مقره‌ها نشسته و تحت تاثیر شرایط جوی و محیطی مانند رطوبت یا نزولات جوی، لایه الکترولیت برسطح آن ها تشکیل می‌شود. این لایه الکترولیت باگذشت زمان گسترش یافته ودرصورت نامناسب بودن طراحی ایزولاسیون منجر به شکست الکتریکی و خاموشی درسیستم قدرت می‌گردد. از این رو طراحی صحیح ایزولاسیون در بالا بردن قابلیت اطمینان شبکه نقش موثری دارد. نقش این طراحی به خصوص در مناطقی که دارای آلودگی محیطی بالایی می‌باشند، بسیار چشم‌گیر است، به‌طوری‌که بر اساس آمار موجود حدود ۷۰ درصد خطاهای خطوط فشار قوی بر اثر عملکرد نامناسب ایزولاسیون می باشد [۱، ۲].

از جمله مهمترین ویژگی‌های مقره‌های الکتریکی عبارتند از: ۱- مقاومت الکتریکی که ازجمله مهم‌ترین وظایف مقره‌ها، ایجاد مقاومت الکتریکی در راستای ایزوله کردن هادی از بدنه کنسول و پایه‌ی دکل‌ها می‌باشد. ۲- مقاومت مکانیکی که عبارت است از توانایی تحمل نیروهای حاصل از وزن سیم‌ها و هادی‌ها و نیروی اعمالی ناشی از باد، برف و یخ، خاصیت الاستیک خوب برای

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-11]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.4.5]

تحمل تنش‌های خمشی وکششی و مقاومت در برابر فشار. ۳- مقاومت و خواص فیزیکـــی که به عنوان مقاومت در برابر عوامل جوی و تابش آفتاب، زنگ نزدن و اکسید نشدن، دارا بودن ضریب انبساط کم، حفظ خـواص در برابـر سـرما وگرمـا. ۴- خـواص ساختمانی و شیمیایی که به صورت فشردگی کامل و نداشتن خلل و فرج، عدم ترکیب با اکثر مـواد، اتصـال کامـل الکترون‌هـا و یون‌ها، عدم امکان تعویض یونی در ساختار آن‌ها.

مقره‌های سرامیکی که متداول‌ترین نوع مقره‌های موجود می‌باشند، از ترکیبات آلکالین و سـیلیکات آلومینیـوم سـاخته مـی‌شـود، جهت بالا بردن استقامت مکانیکی چینی به آن اکسیدآلومینیوم اضافه می‌کنند. مقره‌های چینی هم به صورت بشـقابی و هـم بـه صورت یکپارچه ساخته می‌شوند. مقره‌های پرسلانی (سرامیکی) به علت ویژگی‌های خوبی که دارند مانند مقاومت حرارتی مناسب و مقاومت مکانیکی خوب و مقاومت به خوردگی بالا به عنوان پر کاربردترین مواد عایقی در مهندسی بـرق اسـتفاده مـی‌شـوند. و سابقه‌ی استفاده از آن‌ها به ۲۰۰ سال می‌رسد [۳، ۴].

در میان خواص اشاره شده برای مقره‌های سرامیکی، مقاومت الکتریکی ایـن مقره‌هـا در آلـودگی‌هـای مختلـف تـاثیر زیـادی در فرسودگی و کاهش طول عمر آنها دارد [۵، ۶]. دلایل بروز خطا و از بین رفتن ویژگی‌های عایقی در مقره‌های سرامیکی و به طور کلی تمامی مقره‌ها را می‌توان به دو دسته ی کلی تقسیم‌بندی کرد: دلایل محیطی و پیرامونی غیرقابل پـیش‌بینـی و دیگـری از بین رفتن ویژگی‌های مواد عایقی به کار رفته و ساختار مواد مانند استقامت الکتریکی و مکانیکی و حرارتی [۷، ۸].

تخمین طول عمر و در نتیجه آن قابلیت اطمینان ایزولاتورهای شبکه قدرت با در نظر گرفتن آلودگی های مختلـف امـری اسـت که کمتر بدان پرداخته شده است و دستیابی به معیاری عددی به منظور مقایسه عملکردی این مقرها، آن هم در حضـور درجـات مختلف آلودگی گامی مهم در برآوردهای قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی شبکه قدرت است. در واقع مدل پیشنهادی علاوه بر تایید این حقیقت که طول عمر و عملکرد مقره‌های پوشش داده شده در مقایسه با پوشش داده نشده‌ها (به ویژه در محیطی با آلـودگی متوسط و زیاد) ارتقا پیدا می‌کند، معیاری از رابطه میزان شدت آلودگی و میزان بهبود طول عمر را در اختیار می‌گذارد که کـاربران این تجهیزات با توجه به طول عمر و بهبود آن و همچنین هزینه استفاده از ایـن پوشـش‌ها در رابطـه بـا انتخـاب روش تعمیـر و نگهداری مناسب تصمیم‌گیری می‌کنند و همچنین استفاده از داده‌های تجربی در شرایط یکسان آزمایش نتـایج را قابـل قبـول‌تر کرده است. مدل چندپارامتری پیشنهادی و داده‌های تجربی بدست آمده در این تحقیق معیارهای عددی را به‌دست خواهد داد که در تحلیل‌های قابلیت اطمینان محور شبکه قدرت و مدل‌سازی روش تعمیر و نگهداری خطوط با توجه به شرایط محیطی (میـزان و شدت آلودگی و میزان درجه حرارت محیط) مورد استفاده قرار خواهد گرفت. بررسی تاثیر اسـتفاده از پوشـش‌های پلیمـری بـه منظور بهبود عملکرد مقره‌های سرامیکی به ویژه در محیط با آلودگی مختلف موضوعی است که در حـال مطالعـه و بررسـی مـی باشد و با توجه به کم بودن سابقه استفاده، مطالعه و بررسی مدل‌های تخمینی به منظـور پـیش‌بینـی و مقایسـه عملکـرد امـری ضروری و با اهمیت است. [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲].

بنابراین در این مقاله نخست با آنالیز ریزساختاری سرامیک و پوشش RTV[1] سیلیکون رابر مـورد اسـتفاده بـرای پوشـش‌دهی بـه منظور افزایش استقامت الکتریکی سرامیک در شرایط محیطی آلوده، از ساختار ماده و ویژگی‌های مورد نظر اطمینان پیدا کـرده و در ادامه با صرف نظر از استقامت مکانیکی مقره سرامیک پوشش داده شده و بدون پوشش به علت ویژگی سرامیک به کار رفتـه، با استفاده از دو معیار استقامت حرارتی و الکتریکی طول عمر مقره‌های سرامیکی بدون پوشش و با پوشش در شـرایط حرارتـی و آلودگی یکسان با یکدیگر مقایسه شده است. در این راستا مقـره سـرامیکی بـدون پوشـش و پوشـش‌دار تحـت شـرایط آلـودگی مصنوعی قرار داده شده و با اعمال ولتاژ در شرایط یکسان میزان ولـتاژ آستانه تخلیه الکتریکی آن‌ها با یکـدیگر مقایسـه شـده و ازسوی دیگر با توجه به اینکه در رابطه با پوشش پلیمری پایان طول عمر پوشش به نوعی ادامه کار مقره پوشش داده شده را بـه علت تغییر ساختار و ویژگی‌های عایق ماده ناممکن می‌کند و حرارت عامل مهم در تعیین طول عمر پلیمرهـا مـی‌باشـد، از مـدل آرنیوس و محاسبه انرژی اکتیواسیون به منظور تعیین پایان عمر مقره پوشش داده شده استفاده شده است. در ادامه مـواد و روش تحقیق با شرح بیشتر و نتایج حاصل به منظور مقایسه آورده شده است.

[1] Room temperature vulcanized silicon rubber

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.4.5]

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

مواد به کار رفته در بخش تجربی این مطالعه، به منظور به‌دست آوردن نتایج عملیاتی و آزمایشگاهی عبارتند از: پوشش سیلیکون رابر (RTV) ساخت شرکت واکر آلمان، مقره سرامیکی مورد استفاده مقره سرامیکی ۴۰ نیوتن ساخت شرکت مانه است. به منظـور مقایسه مقره‌های سرامیکی بدون پوشش و پوشش‌دار از منظر استقامت الکتریکی و حرارتی، دو نمونه به شرحی که در ادامه آورده شده است آماده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

- نمونه اول: مقره سرامیکی بدون پوشش است با فاصله خزشی ۱۹ سانتی متر مطابق شکل (۱).
- نمونه دوم: مقره سرامیکی پوشش داده شده با پوشش سیلیکون رابر (RTV).

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

شکل ۱- مقره‌های به کار رفته در مطالعات تجربی , و مشخصات فنی

۲-۲-مطالعات ریزساختاری

به منظور بررسی ساختار سرامیک و RTV و تایید آنها، مواد مورد استفاده، با استفاده از روشهای آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) ، و آنالیز فلورسانس اشعه ایکس(XRF) مورد مطالعه قرار گرفتند.

آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD): مطالعات پراش اشعه ایکس به منظور مشاهده ساختار کریستالی مواد 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 2θ در محدوده ۱۰ تا ۸۰ درجه انجام شد.

آنالیز فلورسانس اشعه ایکس(XRF): به منظور تعیین درصد عناصر تشکیل‌دهنده نمونه در بازه سدیم تا اورانیـوم صـورت می‌گیرد. مطالعات XRF با استفاده از دستگاه مدل PW1410 Philips انجام شده است.

آنالیزتوزین حرارتی (TGA): آنالیز توزین حرارتی TGA در این مطالعه به منظور تعیـین میـزان انـرژی اکتیواسـیون در مـدل تخمین عمر پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. دستگاه مورد استفاده، مدلTA Q600 می‌باشد.

۲-۳- اندازه‌گیری ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی

آلودگی وشرایط ترشوندگی، عملکرد تخلیه الکتریکی مقره‌های سرامیکی را تعیین می‌نماید. بخاطرخاصیت آبگریزی، پوشش‌ها تر

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-11]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.4.5]

شدن کامل سطح را اجازه نداده و در نتیجه عملکرد تخلیه الکتریکی مقره‌های پوشش‌دار به میزان زیادی بهبود می‌یابد. در این مطالعه ولتاژ تخلیه الکتریکی مقره پوشش‌دار نسبت به مقره بدون پوشش در شرایطی که دو نمونه به صورت مصنوعی مطابق روش توضیح داده شده در استاندارد IEC60507 [۱۳] آلوده شده‌اند و در ۵ سطح مختلف آلوده شده و مورد آزمایش ومقایسه قرار گرفته‌اند. مطابق آنچه در استاندارد مذکور شرح داده شده است ملاک ESDD[۲] و NSDD[۳] شاخص‌های بررسی میزان آلودگی در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۴- محاسبات انرژی اکتیواسیون

انرژی اکتیواسیون کمینه انرژی مورد نیاز به منظور شروع واکنش است و در تعیین روند تخریب مواد و همچنین تخمین طول عمر مواد کاربرد دارد. یکی از روش‌های مهم به منظور محاسبه میزان انرژی اکتیواسیون، روش OFW[۴] است، که از نتایج آنالیز TGA بدین منظور استفاده می‌کند. در [۱۵، ۱۴] روند بدست آوردن انرژی اکتیواسیون و توضیح کامل این روش آورده شده‌است. در واقع پس از خطی‌سازی رابطه بین ln (β) و 1/T برای هر میزان پیشرفت واکنش، میزان انرژی اکتیواسیون مربوط به هر سطح از پیشرفت واکنش از شیب این خطوط مطابق رابطه (۱) قابل محاسبه است. که در این رابطه β نرخ حرارت‌دهی، T دمای حرارت دهی بر حسب کلوین و E_α و α به ترتیب میزان انرژی اکتیواسیون و درصد پیشرفت واکنش را نشان می‌دهند. R ثابت گاز با مقدار ۸/۳۱۴ J/mol·K می‌باشد. در واقع با استفاده از داده‌های TGA که شامل دما و میزان وزن ماده باقیمانده نسبت به ماده اولیه که معیاری از پیشرفت واکنش (α) است، و همچنین نرخ حرارت‌دهی β نمودارهای خطی برای هر میزان پیشرفت واکنش به‌دست آمده و با استفاده از شیب نمودارهای حاصل و رابطه (۱) میزان E_α محاسبه می شود.

معادله ۱:
$$\ln(\beta) = constant - 1.0516\left(\frac{E_\alpha}{R.T}\right)$$

۲-۵- مدل تخمین طول عمر چندپارامتری

به منظور محاسبه طول عمر تجهیزات مختلف الکتریکی و احتمال خرابی آنها در مقالات مختلف، مدل‌هایی تک معیاره و چند معیاره پیشنهاد شده است. در این مقاله به منظور مقایسه طول عمر مقره‌های پیشنهادی در حضور آلودگی‌های مختلف از مدل پیشنهادی در [۱۶، ۱۷] استفاده شده‌است. در این مدل طول عمر یک تجهیز الکتریکی براساس سه پارامتر مهم تنش الکتریکی و مکانیکی و الکتریکی مدلسازی شده است. روابط (۲) و (۳) میزان طول عمر تخمین زده شده بر حسب سال را تحت تنش‌های الکتریکی و مکانیکی و حرارتی مختلف نشان می‌دهد.

معادله ۲:
$$L = L_0\left({}^{E}/_{E_S}\right)^{-(n-bT)} \times \left({}^{M}/_{M_S}\right)^{-m} \times \exp(-\varphi v)$$

معادله ۳:
$$v = {}^{1}/_{\theta} - {}^{1}/_{\theta_0}$$

که در آن M و E میزان تنش مکانیکی و الکتریکی وارد بر تجهیز و M_S و E_S میزان آستانه تنش مکانیکی والکتریکی را نشان می دهد. پارامتر L0 بیان کننده میزان طول عمر تجهیز بدون در نظر گرفتن تنش‌های ذکر شده‌است. θ_0 و θ در این معادله به ترتیب مربوط به دمای مبنای ۲۵ درجه سانتیگراد و محیط است که در این مطالعه دمای محیط ۳۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. پارامتر φ متناسب با انرژی اکتیواسیون به منظور مدلسازی تنش حرارتی با واحد کلوین می‌باشد ($\varphi = \frac{E_\alpha}{R}$). پارامترهای n و m و b به منظور مدل کردن تاثیر همزمان تنش‌های یاد شده در این رابطه استفاده می‌شوند و دارای مقادیر به ترتیب ۷ و ۲/۳ و ۶۰۰۰ می‌باشند [۱۱]. در این مقاله با استفاده از مدل ذکر شده و با جایگذاری میزان تنش الکتریکی متغیر با آلودگی‌های مختلف که در نتیجه آزمایشات تجربی حاصل شده است در E_S، طول عمر هر نمونه به عنوان یکی از معیارهای قابلیت اطمینان تجهیز تخمین زده شده و در آلودگی‌های مختلف بررسی و مقایسه شده است.

[2] Equivalent salt deposit density
[3] Non soluble deposit density
[4] Ozawa–Flynn–Wall

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-11]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.4.5]

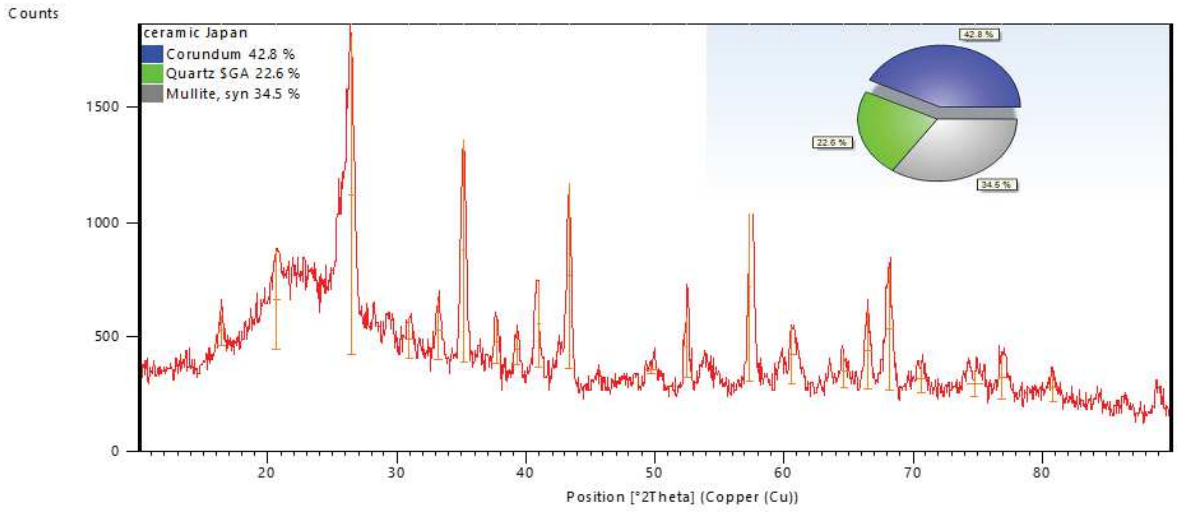
۳-۳-نتایج وبحث

در این بخش، نخست نتایج مربوط مطالعات زیرساختاری مقره سرامیکی و پوشش پلیمری مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات XRD و XRF اطلاعات ارزشمندی در رابطه با فاز و ساختار کریستالی مواد ارائه می‌دهند. به همین منظور آنالیز XRF مربوط به سرامیک و لعاب سرامیک در جدول ۱ و آنالیز XRD مربوطه نیز در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. همچنین آنالیز XRD پوشش RTV به همراه پیک‌های مشاهده شده در شکل ۴ نشان داده شده است. با بررسی پیک‌های حاصل در طیف بدست آمده تایید می‌شود که ماده مورد نظر با طیف مربوط به $Al(OH)_3$ تطابق دارد که از مواد اصلی و سازنده پوشش RTV می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل، تمامی آنالیزهای انجام شده تاییدکننده ساختار مواد مورد استفاده در مطالعه پیش‌رو می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۲ و شکل ۳ مشخص است مقره سرامیکی از کانی‌های مولایت ($3Al_2O_3SiO_2$)، کوارتز (SiO_2) و کروندوم (Al_2O_3) تشکیل شده است و عنصر غالب در لعاب مقره سرامیکی با توجه به پیک مشخص شده سیلیس می‌باشد. از آنجا که ماده اصلی تشکیل دهنده پوشش RTV، ماده سیلیکونی PDMS[5] و فیلر $Al(OH)_3$ می باشد در پاسخ آزمون پراش اشعه ایکس موارد ذکر شده به خوبی قابل تشخیص هستند. موارد ذکر شده تایید کننده مواد مورد استفاده در آزمون‌های عملیاتی می‌باشند. براساس مطالعات انجام شده میزان Al_2O_3 بهینه به منظور افزایش استقامت حرارتی و خواص عایقی سرامیک میزان تقریبی ۳۰ درصد است. [۱۸] میزان این ماده در نمونه استفاده شده نزدیک به مقدار مشخص شده است.

جدول ۱- نتیجه آنالیز XRF مقره سرامیکی و لعاب مقره

عناصر تشکیل دهنده	واحد	سرامیک	لعاب
SiO_2	%	65.919	66.043
Al_2O_3	%	25.301	15.95
Fe_2O_3	%	1.696	4.211
CaO	%	0.496	3.792
Na_2O	%	0.569	1.805
K_2O	%	1.546	2.848
MgO	%	0.135	1.991
MnO	%	0.012	0.042
TiO_2	%	0.549	0.297
P_2O_5	%	0.066	0.195



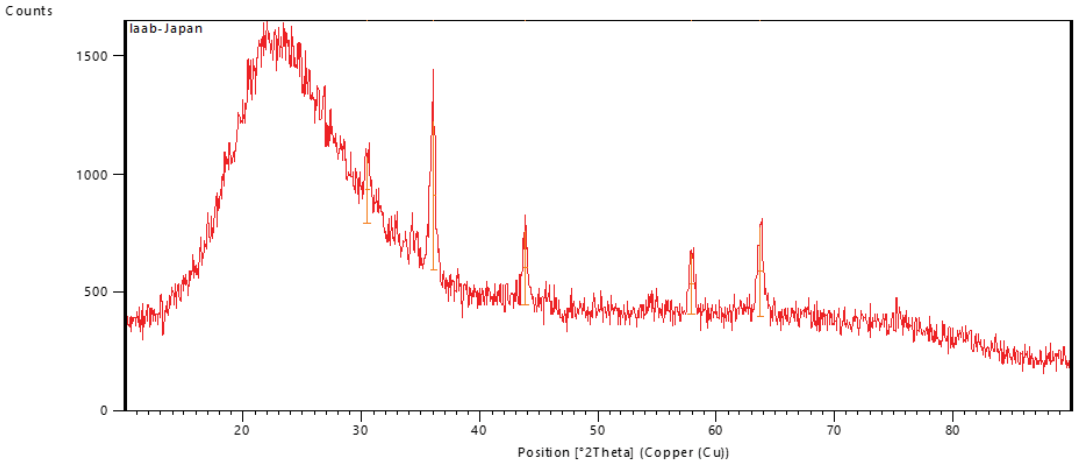
شکل ۲- نتایج آنالیز XRD مربوط به سرامیک مقره استفاده شده

[5] polydimethylsiloxane

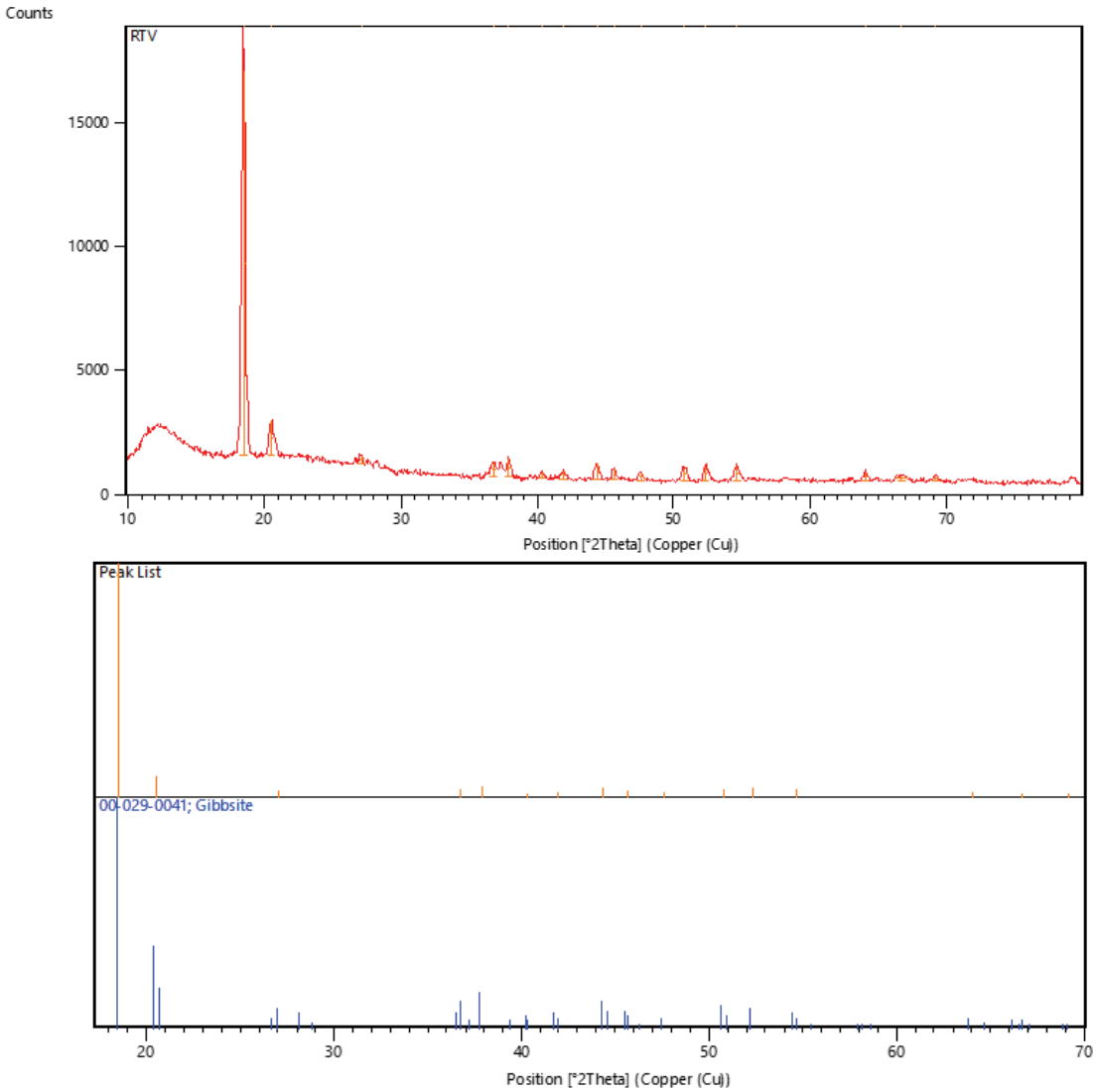
فصلنامه سرامیک ایران دوره ۱۷ شماره ۱ بهار ۱۴۰۰

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.4.5]



شکل ۳- نتایج آنالیز XRD لعاب مقره سرامیکی



شکل ۴- نتیجه آنالیزXRD مربوط به پوشش RTV

میزان آستانه ولتاژ تخلیه الکتریکی را در برابر میزان آلودگی در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس اطلاعات موجود در [۱۷] و [۱۸]، رابطه بین ولتـاژ آستانه تخلیه الکتریکی که در ارزیابی مقادیر استقامت الکتریکی قابل استفاده می‌باشـند و میـزان سـطح آلودگی (ESDD) در محیط مرطوب به صورت رابطه کلی (۴) قابل تعریف است.

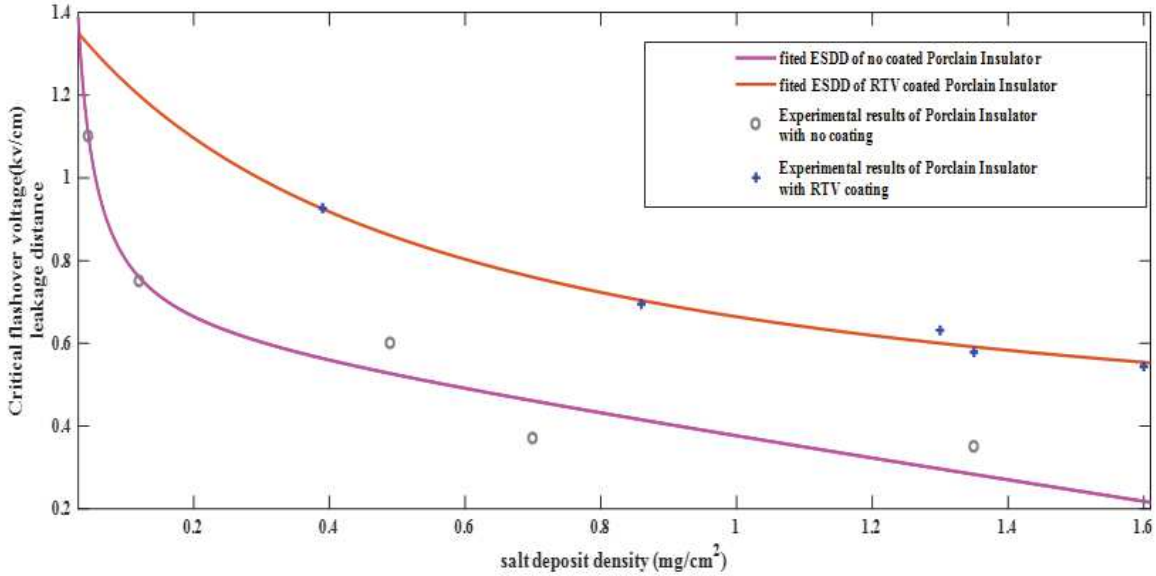
[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.4.5]

معادله ۴:

$$E_s = \lambda(ESDD)^{-\mu}$$

که در این رابطه E_s میزان استقامت الکتریکی بر حسب (Kv/cm)، λ و μ پارامترهایی هستند که به مشخصه‌هایی از مقره مانند جنس ماده به کار گرفته شده و شکل مقره مرتبط هستند [۱۹]. با استفاده از نتایج تجربی بدست آمده از آزمون اندازه‌گیری ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی در سطوح مختلف آلودگی مصنوعی ایجاد شده (طبق آنچه که در [۲۰] به منظور ایجاد آلودگی پیشنهاد شده است.) در اتاقک مه تمیز و استفاده از برازش منحنی برای نتایج حاصل طبق معادله ۴، مقادیر این پارامترها برای هر دو مقره مورد نظر محاسبه شده است. همانطور که از نتایج موجود در شکل ۵ برمی‌آید پارامترهای مرتبط با مقره دارای پوشش در مقایسه با پارامترهای مربوط به مقره پوشش داده نشده مقادیر بالاتری را نشان می‌دهند.



شکل ۵- نتیجه آزمون تخلیه الکتریکی مقره سرامیکی بدون پوشش و با پوشش در آلودگی‌های مختلف

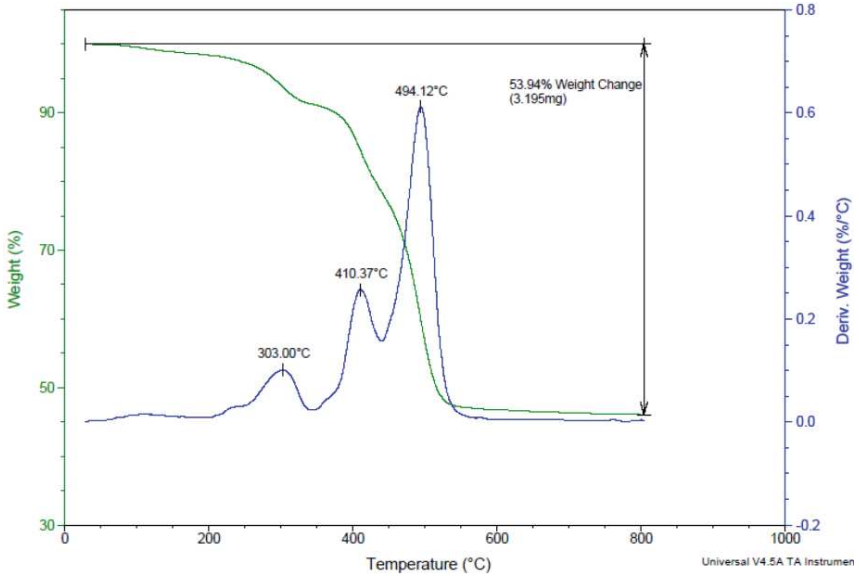
به منظور تکمیل اطلاعات مورد نیاز در مدل تخمین طول عمر، میزان انرژی اکتیواسیون پوشش RTV با بهره‌گیری از روش OFW که در [۲۱]شرح داده شده است، محاسبه شده است. برای این منظور نیاز به نتایج آزمون TGA در چندین نرخ حرارت‌دهی مختلف است که در این مطالعه سه نرخ (°C/MIN) ۵، ۱۰ و ۲۰ در نظر گرفته شده است. نتیجه مربوطه در شکل ۶ نشان داده شده است.

نمودارهای خطی شده بر اساس نتایج آنالیز TGA و توضیحات بخش (۴-۲) در سه نرخ مختلف حرارت‌دهی برای پوشش RTV در شکل ۷ آورده شده است. براساس این نتایج میزان انرژی اکتیواسیون محاسبه شده برای هر سطح از پیشرفت واکنش و تخریب ماده در جدول ۲ آورده شده است. درصد پیشرفت واکنش به عنوان معیاری به منظور تعیین تخریب ماده و از دست دادن خواص اصلی در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله سرعت تخریب (α) بین ۰/۶ و ۰/۷ به عنوان معیاری به منظور تخریب ماده RTV انتخاب شده است و در نتیجه میزان انرژی اکتیواسیون متناظر برای این درجه پیشرفت واکنش در فرمول ($\varphi=E_\alpha/R$) اعمال می‌شود. E_α میزان انرژی اکتیواسیون در سرعت واکنش مشخص α است. R_2 میزان خطای رگرسیون خطی را نشان می‌دهد که با توجه به مقادیر بالای ۰/۹ مشخص است که دقت محاسبات و آزمایش‌ها قابل قبول بوده است.

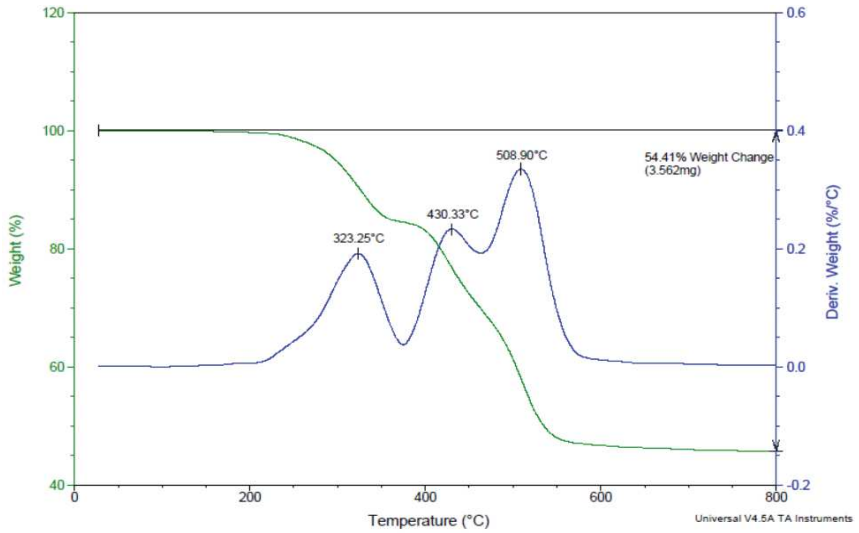
در این بخش با توجه به مدل تخمین طول عمر توصیف شده در بخش (۵-۲) و روابط (۲) و (۳) که سه پارامتر تنش الکتریکی، مکانیکی و حرارتی را به منظور پیش‌بینی طول عمر تجهیز در نظر می‌گیرد [۱۴] به تخمین طول عمر نمونه مقره‌های پیشنهادی پرداخته می‌شود. به منظور مدلسازی اثر استفاده از پوشش و همچنین شرایط محیطی از جمله آلودگی در مدل پیشنهادی از داده‌های به‌دست آمده در بخش تجربی استفاده می‌شود. میزان پارامتر φ در رابطه (۲) که متناسب با میزان انرژی اکتیواسیون [۲۱] است. دمای ۳۰ درجه سانتیگراد با توجه میانگین دمای فصل بهار و تابستان و به منظور در نظر گرفتن شرایط محیطی حرارتی یکسان و متعارف برای نمونه‌ها فرض شده و نسبت به دمای مرجع ۲۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-11]

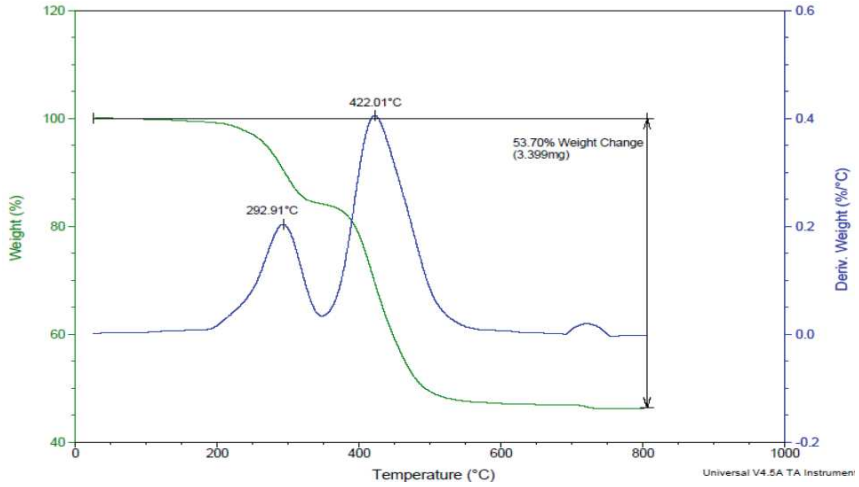
[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.4.5]



الف



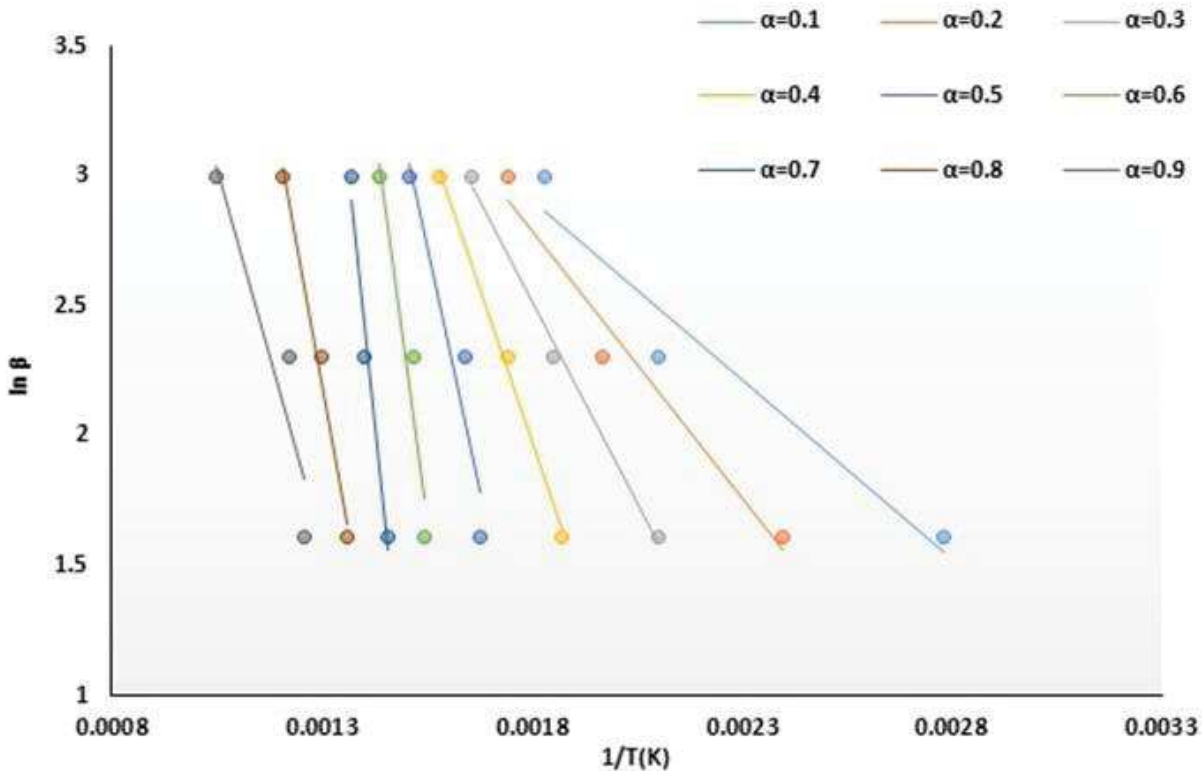
ب



ج

شکل ۶- آزمون TGA و DTG پوشش RTV: الف) نرخ حرارت‌دهی (°C/min)۵، ب) نرخ حرارت دهی (°C/min) ۱۰ و ج) نرخ حرارت‌دهی (°C/min) ۲۰

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.4.5]
[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-11]



شکل ۷- منحنی‌های به کار رفته در محاسبه انرژی اکتیواسیون پوشش RTV

جدول ۲-نتایج انرژی اکتیواسیون

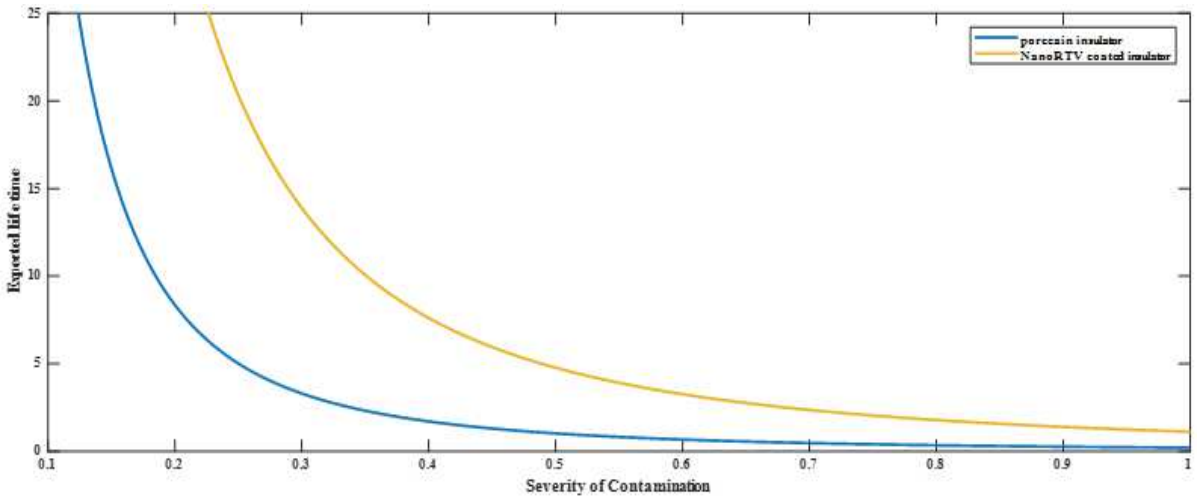
RTV		
α	E_α	R^2
0/1	10/588	0/94022
0/2	15/09	0/9706
0/3	24/106	0/9947
0/4	36/781	0/9947
0/5	56/49	0/9090
0/6	91	0/9297
0/7	115/3	0/9714
0/8	63	0/9867
0/9	43	0/8676
میانگین	50/595	0/9518

بدیهی است افزایش دما در مدل پیشنهادی میزان سرعت تخریب پوشش را بیشتر می‌کند. با توجه به مدل چند پارامتری به کار رفته در [۱۶]، تاثیر تنش حرارتی به صورت جداگانه در پیری پوشش دیده می‌شود و میزان استقامت حرارتی سرامیک بسیار بیشتر از پوشش سیلیکونی به کار رفته است. بنابر موارد بالا، این فرض ساده شونده در نظر گرفته شده است که زوال حرارتی تنها مختص پوشش به کار رفته است و انرژی اکتیواسیون مقره سرامیکی و در نتیجه تخریب حرارتی مقره بدون پوشش بسیار بالا در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-11]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.4.5]

براساس نتایج تجربی بخش تجربی برای پوشش RTV 12000(K) و برای سرامیک مقدار بسیار بالا با توجه به مقاومت حرارتی بالای آن در نظر گرفته می‌شود. همانطور که پیشترتوضیح داده شد، با توجه به استقامت حرارتی بالای سرامیک، می‌توان فرض کرد که پیری حرارتی مقره‌های مورد بحث با در نظر گرفتن پیری حرارتی پوشش‌ها معادل است و میزان انرژی اکتیواسیون مربوط به مقره سرامیکی بسیار بالا فرض شده است. از سوی دیگر رابطه آستانه تنش الکتریکی در برابر میزان شدت آلودگی که از بخش تجربی برای هر نمونه مقره بدست آمده است، در پارامتر E_s در روابط مذکور جایگذاری می‌شوند.

شکل۸ نتایج مقایسه‌ای تخمین طول عمر محاسبه شده بر اساس مدل پیشنهاد برای مقره بدون پوشش و پوشش داده شده را نشان می‌دهد. میزان طول عمر تخمینی محاسبه شده برای تمامی نمونه‌ها با افزایش میزان آلودگی کاهش پیدا می‌کند [۹]. با این حال طول عمر نمونه پوشش‌دار در مقایسه با نمونه بدون پوشش در آلودگی‌های محیطی مختلف بیشتر است.



شکل ۸– نتایج مقایسه‌ای تخمین طول عمر محاسبه شده بر اساس مدل پیشنهاد برای مقره بدون پوشش و نمونه پوشش داده شده

۴– نتیجه‌گیری

از جمله تجهیزات مهم که در سیستم انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرند مقره‌ها هستند. تعداد بسیار زیاد مقره‌های استفاده شده در سراسر شبکه قدرت، با وجود ارزش نسبتاً کم مقره در مقایسه با سایر تجهیزات به کار رفته در خطوط انتقال، لزوم بررسی این تجهیز در محاسبات قابلیت اطمینان و همچنین برآورد اقتصادی شبکه انتقال را نشان می‌دهد. با توجه به موارد ذکر شده، بررسی همه جانبه و جامع در این حوزه، نیازمند بهره‌گیری از مطالعات تجربی و داده‌های آماری و استفاده از روش مدلسازی کارا است. 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 مورد نظر درحضور درجات مختلف آلودگی مصنوعی مورد بررسی قرار داده شد. به منظور بررسی و اعمال زوال حرارتی پوشش پلیمری، براساس آزمون TGA میزان انرژی اکتیواسیون پوشش محاسبه شد و نتایج حاصل در بخش مدل‌سازی با بهره‌گیری از مدل چند معیاره برای تخمین طول عمر که شامل استقامت حرارتی، الکتریکی و مکانیکی است مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل عملکرد و طول عمر مقره پوشش داده شده در مقایسه با مقره بدون پوشش به ویژه در محیط‌هایی با آلودگی زیاد به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. به طور خاص بهبود طول عمر تخمینی در محیط‌هایی با آلودگی متوسط و کم محسوس است به طوریکه در آلودگی متوسط، طول عمر به طوز میانگین به میزان ۵ برابر بهبود پیدا کرده است. این درحالی است که این میزان بهبود در محیط‌های با آلودگی بسیار زیاد به طور متوسط تا ۲ برابر کاهش پیدا کرده است. استفاده از این مدل در ارزیابی طول عمر و مقایسه بین مقره‌های پوشش داده شده توسط انواع پوشش‌های پلیمری و بدون پوشش می‌تواند بسیار کاربردی و موثر باشد.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-11]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.4.5]

مراجع

[1] J. L. Goudie, "Silicones for outdoor insulator maintenance," in Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.02CH37316), 2002, pp. 256-259

[2] Sanyal S, Kim T, Yi J, Koo J-B, Son J-A, Choi I-H. Failure Trends of High-Voltage Porcelain Insulators Depending on the Constituents of the Porcelain. Applied Sciences. 2020; 10(2):694. https://doi.org/10.3390/app10020694

[3] S. M. Gubanski, "Outdoor high voltage insulation [Editorial]," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 2, pp. 325-325, 2010.

[4] Sanyal, S., Aslam, F., Kim, T., Jeon, S., Lee, Y. J., Yi, J., & Koo, J. B. (2020). Deterioration of porcelain insulators utilized in overhead transmission lines: A review. Transactions on Electrical and Electronic Materials, 21(1), 16-21.

[5] Kuffel, J., & Kuffel, P. (2000). High voltage engineering fundamentals. Elsevier.

[6] Salem, A. A., Abd-Rahman, R., Al-Gailani, S. A., Kamarudin, M. S., Ahmad, H., & Salam, Z. (2020). The leakage current components as a diagnostic tool to estimate contamination level on high voltage insulators. IEEE Access, 8, 92514-92528.

[7] Kim, T., Lee, Y. J., Sanyal, S., Woo, J. W., Choi, I. H., & Yi, J. (2020). Mechanism of Corrosion in Porcelain Insulators and Its Effect on the Lifetime. Applied Sciences, 10(1), 423.

[8] A. Froger, M. Gendreau, J. E. Mendoza, É. Pinson, and L.-M. Rousseau, "Maintenance scheduling in the electricity industry: A literature review," European Journal of Operational Research, vol. 251, no. 3, pp. 695-706, 2016/06/16/ 2016.

[9] Taghvaei, M., Sedighizadeh, M., NayebPashaee, N., & Fini, A. S. (2020). Thermal stability of nano RTV vs. RTV coatings in porcelain insulators. Thermal Science and Engineering Progress, 20, 100696.

[10] Choi IH, Koo JB, Son JA, Yi JS, Yoon YG, Oh TK. Development of Equipment and Application of Machine Learning Techniques Using Frequency Response Data for Cap Damage Detection of Porcelain Insulators. Applied Sciences. 2020; 10(8):2820

[11] Taghvaei, M., Sedighizadeh, M., NayebPashaee, N., & Fini, A. S. (2021). Reliability assessment of RTV and nano-RTV-coated insulators concerning contamination severity. Electric Power Systems Research, 191, 106892

[12] Zhang, Z., Qiao, X., Xiang, Y., & Jiang, X. (2019). Comparison of surface pollution flashover characteristics of RTV (room temperature vulcanizing) coated insulators under different coating damage modes. IEEE Access, 7, 40904-40912.

[13] IEC 60507, 3rd Edition, December 2013 - ARTIFICIAL POLLUTION TESTS ON HIGH-VOLTAGE CERAMIC AND GLASS INSULATORS TO BE USED ON A.C. SYSTEMS

[14] A. Khawam and D. R. Flanagan, "Role of isoconversional methods in varying activation energies of solid-state kinetics: II. Nonisothermal kinetic studies," Thermochimica Acta, vol. 436, no. 1, pp. 101-112, 2005/10/01/ 2005.

[15] Bhatti, Muhammad Mubashir, et al. "Study of activation energy on the movement of gyrotactic microorganism in a magnetized nanofluids past a porous plate." Processes 8.3 (2020): 328.

[16] M. M. A. El Aziz, D. K. Ibrahim, and H. A. Kamel, "Estimation of the lifetime of electrical components in distribution networks," The Online Journal on Electronics and Electrical Engineering (OJEEE), 2010

[17] A. Venkatesh, R. K N, and V. N, Experimental Study on Aging of Polymeric Insulators by Dip Method. 2019 ,

[18] Sanyal, S., Kim, T., Koo, J. B., Son, J. A., Choi, I. H., & Yi, J. (2021). Probabilistic analysis of the failure of high-voltage insulators based on compositional analysis. Electric Power Systems Research, 195, 107184.

[19] M. reza Ahmadi-veshki, M. Mirzaie, and R. Sobhani, "Reliability assessment of aged SiR insulators under humidity and pollution conditions," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 117,. 105679, 2020/05/01/ 2020.

[20] R. Hackam, "Outdoor high voltage polymeric insulators," in Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials. 1998 Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation. 30th Symposium on Electrical Insulating Ma, 1998, pp. 1-16: IEEE.

[21] Ijaz, M., Yousaf, M., & El Shafey, A. M. (2021). Arrhenius activation energy and Joule heating for Walter-B fluid with Cattaneo–Christov double-diffusion model. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 143(5), 3687-3698.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.4.5]