

# بررسی جریان ناشی و دمای سطح مقره کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت در شرایط رطوبت و ریزگرد

سامان محمدنابی و خسرو رحمانی

روی سطح مقره‌های آلوده، باعث افزایش هدایت الکتریکی سطح و اختلال در عملکرد عایق می‌شود. در مقالاتی که در مجلات معتبر به چاپ رسیده‌اند، تحلیل الکتریکی مقره‌های سیلیکونی با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزارهای تجاری متداول مانند انسیس، کامسول و غیره افزایش یافته و آزمایش‌های مختلفی نیز به منظور تأیید خروجی‌های نرم‌افزار طراحی و اجرا شده است [۱] تا [۱۵]. در ادامه به توضیح روش و نتایج برخی از این مراجع پرداخته می‌شود.

شحات و انیس [۲] تأثیر آلودگی‌های بیابانی را روی مقره‌های سیلیکونی  $220 \text{ kV}$  مورد ارزیابی قرار داده‌اند. آنها با کمک شبیه‌سازی و تحلیل با روش اجزای محدود سه‌بعدی و استفاده از نرم‌افزار انسیس به بررسی خطرپذیری و از کار افتادگی مقره به دلیل جریان ناشی پرداخته‌اند. در تحقیق آنها ارتباط بین اندازه ذرات خاک، هدایت و جریان ناشی تخمین زده شده و با استفاده از روش مونت کارلو، جریان ناشی وابسته به دو پارامتر هدایت الکتریکی و اندازه ذرات خاک به دست آمده است. همچنین آنها روش جدیدی برای ارزیابی خطر تخلیه الکتریکی تحت آلودگی ارائه داده‌اند. نویسندگان در [۳] توزیع ولتاژ روی مقره کامپوزیتی  $500 \text{ kV}$  را بر پایه شبیه‌سازی‌های کامپیوتری و مبتنی بر نرم‌افزار کامسول مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها از روی توزیع پتانسیل توانستند تخمینی از میزان آلودگی نشست‌کرده روی سطح مقره را به دست آورند و به تبع آن برنامه مناسب شستشوی زمانی را تدوین کنند. میزونو و همکاران [۴] توزیع ولتاژ در طول یک رشته مقره نیمه‌هادی را بر اساس یک مدار معادل به دست آورده‌اند. در این مقاله تأثیر امپدانس مقره روی توزیع دما و ولتاژ از طریق محاسبات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از طریق محاسبات، مطابقت خوبی را با نتایج حاصل از آزمون تجربی نشان می‌دهد. روش مورد استفاده در این مقاله قابلیت تعمیم به انواع مختلف مقره‌ها را بدون توجه به شکل آنها، وجود یا عدم وجود رطوبت و آلودگی دارد. محققان در [۷] تأثیر بلندمدت تنش الکتروترمال را روی مقره آلوده‌شده به روش مصنوعی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. آنها به منظور آلوده‌کردن مقره از روشی شامل چهار مرحله استفاده کردند: (۱) تمیزکردن مقره با پروپانول، (۲) قراردادن مقره حداقل ۳ ساعت در هوای آزاد به منظور خشک‌شدن، (۳) قراردادن مقره به مدت ۲۴ ساعت در آب بدون هر گونه املاح به منظور کاهش موقتی آب‌گریزی و (۴) فروبردن مقره در دوغاب تهیه‌شده از آلودگی. آنها دریافتند که این روش نسبت به روش متداول لایه جامد، یکنواختی آلودگی بهتری ایجاد می‌کند. نویسندگان در [۹]، دو روش تجربی به منظور شبیه‌سازی آلودگی‌های بیابانی ارائه کرده‌اند. روش اول شامل بررسی عملکرد مقره آلوده به همراه شبنم و روش دوم در خصوص مقره آلوده تحت اثر هم‌زمان شبنم و مه بوده است. نتایج این دو روش با نتایج حاصل از آزمون مه استاندارد برای

چکیده: با چگالش رطوبت روی سطح مقره‌های آلوده به ریزگرد، هدایت الکتریکی مقره بالا رفته و به تبع آن جریان ناشی روی سطح ایجاد شده و باعث از کارافتادگی مقره‌ها می‌شود. چگالش رطوبت روی سطح، در اثر مکانیزم سردشدن تشعشعی و عمدتاً اوایل صبح و در فصل زمستان اتفاق می‌افتد. در این حالت دمای سطح مقره از نقطه شبنم کمتر است. در این مقاله ضمن بررسی مکانیزم سردشدن تشعشعی، یک نمونه ریزگرد واقعی جمع‌آوری شده از کانون ریزگرد، آنالیز شیمیایی و هدایت الکتریکی آن در حالت مرطوب اندازه‌گیری شده است. با شبیه‌سازی مقره کامپوزیتی  $230 \text{ kV}$  آلوده به ریزگرد در نرم‌افزار کامسول، جریان ناشی به دست آمده و با آزمون تجربی صحت‌سنجی شده است. همچنین با استفاده از روابط انتقال حرارت، دمای سطح مقره هنگام عبور جریان ناشی تعیین و با مقادیر ثبت‌شده توسط دوربین ترموویژن در هنگام آزمون، مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که جریان ناشی و دمای سطح مقره با افزایش هدایت و ضخامت لایه آلودگی افزایش یافته و به تبع آن احتمال از کار افتادگی مقره نیز بالا می‌رود. آزمون تجربی نشان داد که شبیه‌سازی مقره با نرم‌افزارهای تجاری موجود، می‌تواند روش قابل اعتمادی برای تحلیل پیش‌دستانه جهت ارزیابی مقره‌ها به شمار رود.

کلیدواژه: مقره کامپوزیتی، ریزگرد، سردشدن تشعشعی، کامسول، جریان ناشی.

## ۱- مقدمه

در بیست سال اخیر، مقره‌های کامپوزیتی به دلیل خصوصیات آب‌گریزی خوب، در خطوط انتقال و توزیع در مناطق با آلودگی شدید، جایگزین مقره‌های سرامیکی و شیشه‌ای شده‌اند. با وجود آب‌گریزی مناسب، به دلیل چسبندگی بالای آلودگی در شرایط مه و رطوبت، جریان ناشی در سطح مقره‌ها افزایش یافته و نهایتاً باعث از دست رفتن خواص عایقی آنها می‌شود. بنابراین در طی عملیات تعمیر و نگهداری خطوط، مقره‌ها نیاز به شستشو و زدودن آلودگی دارند که به عنوان فرایندی پرهزینه شناخته می‌شود [۱]. مقدار جریان ناشی روی سطح مقره به شدت آلودگی و میزان شوری و به عبارتی به میزان هدایت لایه آلودگی بستگی دارد. جریان ناشی و توزیع دما روی سطح مقره‌های آلوده، از پارامترهای مهم برای ارزیابی عملکرد مقره‌ها محسوب می‌شوند. مطالعات میدانی نشان می‌دهد چگالش مه و رطوبت (در اثر پدیده سردشدن تشعشعی)

این مقاله در تاریخ ۲۲ شهریور ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۹ مهر ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

سامان محمدنابی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، (email: s\_mohammadnabi@sbu.ac.ir).

خسرو رحمانی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، (email: kh\_rahmani@sbu.ac.ir).

نمک/ کاتولین روی سطح عایق اعمال می‌شود. به منظور کاهش خاصیت آب‌گریزی سطح مقره و افزایش چسبندگی بین لایه آلودگی و سطح مقره، اعمال عامل رطوبتی قبل از آلوده‌کردن، روی سطح مقره انجام می‌شود [۱۷]. اما اعمال این روش روی مقره‌های سیلیکونی با ابعاد بزرگ به سهولت مقره‌های کوچک (تا ۶۶ kV) نیست. در این مقاله، روش اصلاح‌شده لایه جامد ارائه گردیده است. در روش لایه جامد، هدایت مورد نظر به صورت مصنوعی و صرفاً با افزایش یا کاهش میزان نمک ایجاد می‌شود، اما در روش اصلاح‌شده، آلودگی واقعی به صورت ذرات ریزگرد توأم با مرطوب‌کردن به طور کاملاً یکنواخت روی سطح مقره نشانده می‌شود. جریان نشتی و دمای سطح مقره تحت شرایط آلودگی و رطوبت نسبی بالا با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود کامسول و تئوری انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مرحله بعد، نتایج به دست آمده با آزمون تجربی صحت‌سنجی می‌شود. جزئیات روش اصلاح‌شده لایه جامد در بخش آزمون تجربی آورده شده است. از نوآوری‌های مقاله می‌توان به بررسی مکانیزم چگالش مه و رطوبت ناشی از سردشدن تشعشعی و تأثیر این پدیده روی دمای سطح مقره، اعمال آلودگی یکنواخت از نمونه واقعی ریزگرد جمع‌آوری شده از کانون‌های ریزگرد بر روی مقره ۲۳۰ kV در آزمون تجربی و بررسی توأمان دما و جریان نشتی و برهم‌کنش این دو در حین انجام آزمون اشاره نمود.

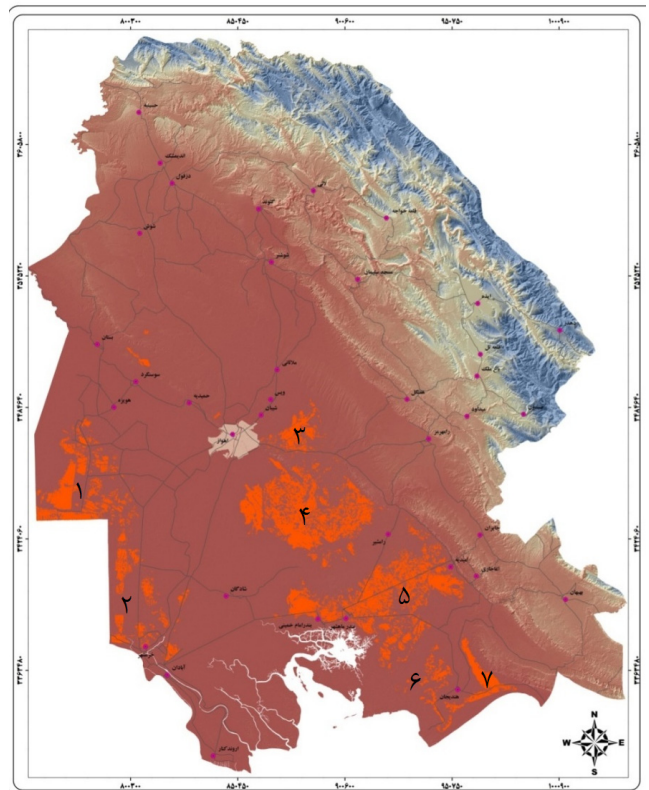
## ۲- بیان مسئله

بر اساس گزارش سازمان زمین‌شناسی استان خوزستان در سال ۱۳۹۴، کانون‌های داخلی که منشأ طوفان‌های ریزگرد در استان هستند، به طور عمده از شرق و جنوب شرق اهواز تا غرب هندیجان در جنوب شرق استان گسترش دارند. علاوه بر شرق و جنوب شرق استان، در غرب استان نیز بخش‌های خشک‌شده تالاب هورالعظیم در غرب هویزه و نواحی اطراف آن و همچنین شمال خرمشهر نیز جزء کانون‌های فعال به حساب می‌آیند. در بیشتر این کانون‌ها به دلیل کاهش رطوبت سطحی و شورشدن زمین، فرسودگی خاک دیده می‌شود. این مناطق شامل خرمشهر، هویزه، تالاب هورالعظیم، منطقه بین ماهشهر تا هندیجان، شرق هندیجان، بندر امام خمینی تا امیدیه، جنوب شرق اهواز، شمال رامشیر، تالاب شادگان و شرق و جنوب اهواز است. شکل ۱، کانون‌های اصلی ریزگرد در استان خوزستان را نشان می‌دهد.

در بهمن ماه سال ۱۳۹۵ از کارافتادگی مداوم مقره‌های خطوط برق در خوزستان باعث اختلال در شبکه برق استان شد و مشکلات زیادی را برای مردم به وجود آورد. بررسی‌های هواشناسی نشان داد که عامل اصلی حوادث شبکه، وجود مه و رطوبت بالای ۷۵٪ در صبحگاه و حضور دائمی ریزگردها بوده است. در این مدت کانون‌های هفت‌گانه ریزگرد نیز فعال بوده‌اند. چگالش مه و رطوبت بر روی مقره‌های آلوده به ریزگرد، باعث افزایش هدایت الکتریکی سطح مقره‌ها و از کار افتادگی آنها شده است. به منظور بررسی میزان تأثیر آلودگی بر روی مقره‌ها، در بازدید میدانی از کانون‌های استان، نمونه خاک از کانون شماره ۲ جمع‌آوری شد. سپس با پودر کردن آن در دستگاه بالمیل، اندازه ذرات خاک به اندازه ریزگرد در شرایط واقعی در حدود  $100 \mu\text{m}$  رسانده شد.

## ۲-۱ آنالیز شیمیایی

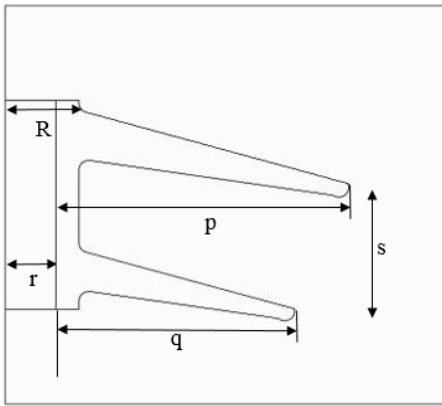
برای بررسی عناصر موجود در خاک منطقه از آنالیز پلاسما جفت‌شده القایی-طیف‌سنجی نوری با دستگاه VARIAN ۷۳۵ و پراش اشعه ایکس با دستگاه ساخت شرکت STOE مدل STADV استفاده شد.



شکل ۱: موقعیت مکانی کانون‌های ریزگرد استان خوزستان.

هدایت‌های مختلف لایه آلودگی مقایسه شده است. نحوه آلوده‌کردن مصنوعی در این مقاله بر اساس استاندارد IEC ۶۰۵۰۷ [۱۶] بوده است. در این مقاله، جریان نشتی و ولتاژ هشدار برای شرایط ثبت شده است. در [۱۰] نیز یک مقره ۱۱ kV طبق روش لایه جامد به طور مصنوعی آلوده شده و جریان نشتی مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۱]، اثر هدایت الکتریکی و توزیع آلودگی روی رفتار مقره فشارقوی سوزنی که به صورت مصنوعی آلوده شده است مورد بررسی قرار گرفته است. نویسندگان یک مدل تجربی به شکل یک دیسک پیشنهاد دادند که این مدل رفتار واقعی مقره را بازتولید می‌کند. همچنین یک مطالعه مقایسه‌ای نیز انجام دادند که در آن، محلول‌های متعدد شامل مقادیر مختلف نمک و آب‌مقطر به منظور شبیه‌سازی هدایت‌های مختلف فراهم شده و تأثیر آن در حضور ولتاژ متناوب بررسی شده است. به علاوه تأثیر آلودگی روی ولتاژ تخلیه الکتریکی و جریان نشتی را نیز مطالعه کردند. آنها نتیجه گرفتند که ولتاژ تخلیه و جریان نشتی بر اساس هدایت و ضخامت آلودگی تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، ولتاژ تخلیه با افزایش هدایت سطحی مقره آلوده کاهش می‌یابد. جریان نشتی نیز با افزایش ولتاژ اعمالی، هدایت و ضخامت لایه آلودگی افزایش می‌یابد. محققان در [۱۲] به منظور بررسی جریان نشتی و ولتاژ قوس الکتریکی، یک مقره سیلیکونی ۶۶ kV را ابتدا با پودر کاتولین، پیش‌فرآوری کرده و سپس در محلول دوغابی آلودگی فروروده تا به صورت مصنوعی آلودگی را روی سطح مقره نشانند. آنها دریافتند این روش آلوده‌کردن سطح مقره نسبت به روش‌های سنتی بازدهی بهتری دارد.

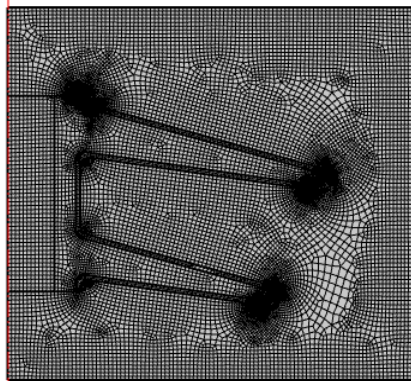
با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، نشست یکنواخت آلودگی روی سطح مقره، یکی از مواردی است که برای محققان همواره چالشی بزرگ بوده است. بر این اساس، علی‌رغم تحقیقات متعدد در خصوص تأثیر آلودگی بر جریان نشتی، مطالعه چندان در مورد چگونگی اعمال لایه آلودگی به روش مصنوعی بر روی سطح مقره‌های بالاتر از ۶۶ kV انجام نشده است. روشی تحت عنوان لایه جامد وجود دارد که محلول آلودگی شامل



شکل ۳: هندسه یک نمونه تکرارشونده مقره ۲۳۰ kV در کامسول.



شکل ۲: مقره ۲۳۰ kV باز شده از خط انتقال در نزدیکی نیروگاه آبادان از کانون شماره ۲.



شکل ۴: مش بندی نمونه تکرارشونده مقره ۲۳۰ kV در کامسول.

جدول ۱: ابعاد مقره کامپوزیتی ۲۳۰ kV.

ابعاد	نماد	مقدار (mm)
شعاع داخلی	$r$	۱۰٫۵
شعاع خارجی	$R$	۱۵
طول چترک کوچک	$q$	۴۵
طول چترک بزرگ	$p$	۵۵
فاصله میان دو چترک	$s$	۲۵
طول کل مقره	-	۲۶۵۲

## ۲-۲ هدایت الکتریکی

یکی از پارامترهای اصلی برای شبیه سازی لایه آلودگی، داشتن هدایت الکتریکی آن است. به منظور اندازه گیری هدایت الکتریکی ریزگردهای مرطوب کانون شماره ۲، مقادیر مختلف خاک با آب مقطر ترکیب گردید و هدایت الکتریکی آن به دست آورده شد.

## ۳- شبیه سازی و آزمون تجربی

### ۱-۳ شبیه سازی

شبیه سازی جریان نشستی مقره کامپوزیتی به کار رفته در خط ۲۳۰ kV (شکل ۲) جهت بررسی و اطمینان از عملکرد آن در شرایط بحرانی، با و بدون لایه آلودگی با استفاده از نرم افزار کامسول نسخه ۵.۴ انجام گرفته است. این نرم افزار بر اساس روش اجزای محدود به حل مسایل می پردازد. سپس با استفاده از تئوری و روابط انتقال حرارت، دمای سطح مقره در اثر عبور جریان نشستی به دست آورده شده است.

### ۱-۱-۳ شبیه سازی مقره ۲۳۰ kV بدون لایه آلودگی

شبیه سازی در مازول جریان الکتریکی نرم افزار کامسول انجام شده است. مرحله اول، ایجاد مدل مقره است که به این منظور ابتدا در نرم افزار سالیپدورکس ۲۰۱۹ مدل سازی انجام گردید و مختصات نقاط کلیدی استخراج و در نرم افزار کامسول با استفاده از این مختصات، مدل مقره ایجاد شد. شکل ۳ و جدول ۱ به ترتیب مدل یک نمونه تکرارشونده از مقره و ابعاد آن را نشان می دهد. بخش نمونه شامل دو چترک است؛ یکی با طول بلند و دیگری با طول کوتاه تر که تعداد چترک های کل مقره ۶۱ عدد می باشد. قدم بعدی، نسبت دادن مواد به قسمت های مختلف مقره است. جنس هسته، روکش و محیط پیرامون به ترتیب کامپوزیت فایبرگلس، سیلیکون رابر و هوا است. اعمال شرایط مرزی الکتریکی

مرحله بعدی است که شامل ولتاژ ۱۵۶ kV برای یک انتها و زمین<sup>۱</sup> برای انتهای دیگر است [۱۸] و [۱۹]. ولتاژ ۱۵۶ kV ولتاژ فازی است که در آن باید ضریب اصلاحات جوی<sup>۲</sup> و منطقه ای بر اساس استاندارد IEC ۶۰۰۶۰-۱ نیز محاسبه و اعمال شود. این ضریب برای مکان آزمایشگاه، عدد ۱٫۱۷ است. قدم بعدی اعمال مش مناسب برای مدل است. در مورد مش بندی نکته قابل توجه آن است که در نقاط تغییر انحنا و نوک تیز باید تقسیمات ریزتر شوند (شکل ۴). نرم افزار به طور خودکار برای بخش های دارای انحنا مش بندی را ریزتر می کند اما در صورتی که این شرایط برای قسمتی اعمال نشد، می توان به صورت دستی حساسیت مش بندی را در هر نقطه دلخواه بالا یا پایین برد. در این تحلیل مش کوآد در نظر گرفته شده و به منظور کاهش زمان تحلیل و پیچیدگی مدل، شبیه سازی در محیط دوبعدی در حالت متقارن محوری<sup>۳</sup> انجام گرفته است.

### ۲-۱-۳ شبیه سازی مقره ۲۳۰ kV با لایه آلودگی

در این بخش برای ضخامت لایه آلودگی ۰٫۲، ۱، ۱٫۵ و ۲ میلی متر، شبیه سازی انجام گرفته است. در ضخامت ۰٫۲ mm ریزگردها می توانند به طور کامل سطح مقره را بپوشانند. روند شبیه سازی مطابق با روند بیان شده برای بخش بدون آلودگی می باشد. همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می شود، آلودگی یکنواخت و دارای ضخامت یکسان در طول چترک های مقره است. با توجه به شکل ۵، سعی شده مدل سازی آلودگی به خصوص در نوک چترک ها به نحوی انجام شود که بیشترین شباهت و تطابق را با واقعیت داشته باشد (شکل ۶).

1. Ground
2. Atmospheric Corrections
3. Axisymmetric



شکل ۷: تصویر ست‌آپ آزمایش جریان نشتی.

و ۴) گذاشتن در یک محیط تمیز و خشک به منظور تبخیر رطوبت سطحی به مدت ۲۴ ساعت. برای رسیدن به ضخامت  $0.7 \text{ mm}$  و اطمینان از یکنواختی لایه آلودگی، مرحله ۳ چند بار تکرار شد. شکل ۵ تصویر نمونه با آلودگی طبیعی و آلودگی مصنوعی را نشان می‌دهد. در این مرحله، مقره تحت ولتاژ  $156 \text{ kV}$  قرار گرفته و با استفاده از یک جریان‌سنج، مقدار جریان نشتی عبوری ثبت شد (شکل ۷). هم‌زمان، با دوربین ترموویژن دمای سطح مقره نیز خوانده شد. فشار هوا، رطوبت نسبی و دمای محیط آزمایشگاه به ترتیب  $84/84 \text{ kPa}$ ،  $31.7\%$  و  $23.1^\circ\text{C}$  بوده است. آزمایش جریان نشتی برای مقره آلوده شده در سه حالت مختلف خشک، اسپری آب و پاشش آب انجام گرفته است. برای حالت اسپری آب، در قسمت رو و زیر هر چترک به مساحت تقریبی  $147 \text{ cm}^2$ ، حدود  $20 \text{ ml}$  آب با هدایت الکتریکی  $150 \pm 10 \text{ } \mu\text{s/cm}$ ، اسپری شده است. در حالت پاشش، نرخ پاشش آب در دو جهت افقی و عمودی  $1-2 \text{ mm/min}$  است.

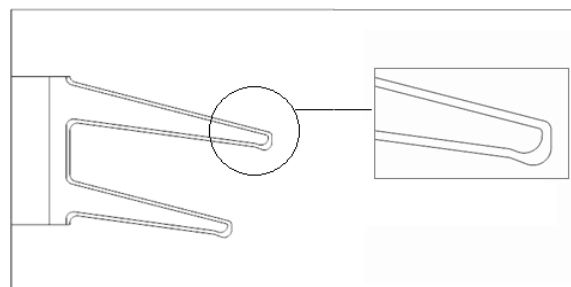
### ۳-۳ تعیین شدت آلودگی مقره

در این مرحله، می‌بایست از مفیدبودن آزمون تجربی اطمینان کسب کرد. با تعیین میزان شدت آلودگی می‌توان به این نتیجه رسید که آیا شرایط آزمون مطابق با واقعیت است یا خیر. شدت آلودگی روی مقره باز شده از خط آبدان که به صورت طبیعی آلوده شده و مقره‌ای که در آزمایشگاه به صورت مصنوعی آلوده گردید، تعیین شدند. با استفاده از استاندارد IEC 60507-04 [۱۶] هدایت الکتریکی و چگالی رسوب نمک معادل لایه آلودگی مقره محاسبه می‌شود. به منظور اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، ابتدا آلودگی روی یکی از چترک‌ها به دقت جمع‌آوری و در آب مقطر حل گردید. سپس با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج SensoDirect مدل SN 052162 (شکل ۸) هدایت الکتریکی محلول، اندازه‌گیری می‌شود. میزان شوری، طبق (۴) به دست می‌آید و سپس با توجه به (۵) چگالی رسوب نمک معادل محاسبه شده است

$$S_a = (\sigma_r \gamma \sigma_r)^{0.2} \quad (4)$$

$$ESDD = \frac{S_a \times V}{A} \quad (5)$$

در این روابط  $S_a$ ،  $\sigma_r$ ،  $V$  و  $A$  به ترتیب شوری، هدایت الکتریکی محلول در دمای  $20^\circ\text{C}$ ، حجم محلول ( $\text{cm}^3$ ) و مساحت چترک ( $\text{cm}^2$ ) است [۲۰].

شکل ۵: مدل نمونه تکرارشونده مقره  $230 \text{ kV}$  با آلودگی سطحی.شکل ۶: مقره  $230 \text{ کیلوولت}$  با (الف) آلودگی طبیعی و (ب) آلودگی مصنوعی.

### ۳-۱-۳ به دست آوردن اختلاف دمای سطح مقره و محیط

زمانی که جریان نشتی روی سطح مقره تحت ولتاژ ایجاد می‌شود، به تبع آن گرما تولید خواهد شد. همچنین از طریق جابه‌جایی و تشعشع نیز انتقال حرارت اتفاق خواهد افتاد و تمام اینها باعث افزایش دمای مقره خواهند شد و در نتیجه، دمای مقره تا رسیدن به تعادل افزایش پیدا خواهد کرد. علاوه بر آن، مقره از طریق هدایت، هسته و یراق‌آلات متصل به خود را نیز گرم می‌کند. تعادل زمانی ایجاد می‌شود که تولید و اتلاف گرما با هم برابر شوند. رابطه انتقال حرارت را می‌توان به صورت (۱) نوشت

$$mC \frac{dT}{dt} + k \frac{dT}{dx} = \frac{V^2}{R} + D_c(T - T_c) + D_r(T^* - T_c^*) \quad (1)$$

که در آن  $m$  جرم مقره،  $C$  گرمای ویژه مقره،  $D_c$  ضریب جابه‌جایی،  $D_r$  ضریب تشعشع،  $t$  زمان سپری شده در ولتاژ اعمالی،  $V$  ولتاژ اعمال شده،  $R$  مقاومت مقره،  $T$  دمای سطح مقره و  $T_c$  دمای محیط است. در شرایط کاری معمول، (۱) را می‌توان به صورت (۲) نوشت

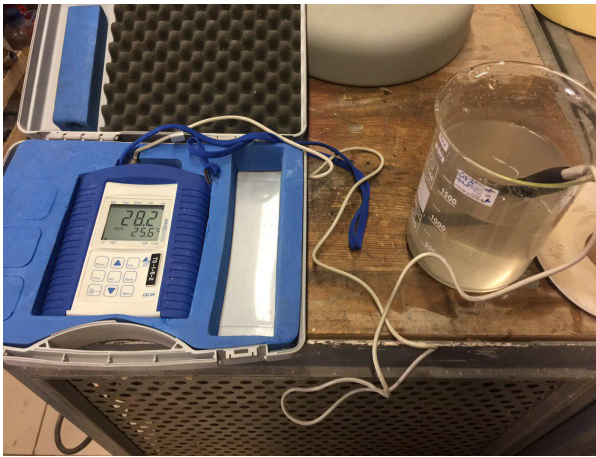
$$mC \frac{dT}{dt} + D(T - T_c) = \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

که در آن

$$D = D_c + 4D_r T_c^* \quad (3)$$

### ۳-۲ آزمون تجربی

به منظور صحت‌سنجی تحلیل تئوری و نرم‌افزاری، آزمون تجربی برای به دست آوردن جریان نشتی و دمای سطح مقره  $230 \text{ kV}$  انجام شد. به این منظور، ریزگرد واقعی که از کانون شماره ۲ جمع‌آوری شده، توأم با اسپری آب روی مقره نشانده شد. این فرایند شامل چهار مرحله است: (۱) شستشوی مقره جهت از بین رفتن آلودگی‌های سطحی، (۲) مرطوب کردن مقره به منظور تسهیل نشان دادن خاک روی آن، (۳) پاشش خاک روی مقره



شکل ۸: اندازه‌گیری هدایت الکتریکی لایه آلودگی به منظور یافتن چگالی رسوب نمک معادل.

صحت‌سنجی تحلیل فوق با [۴] انجام گرفته است. در این مرجع مقربه  $220 \text{ kV}$  مورد بررسی قرار گرفته و چگالی جریان نشستی و جریان نشستی کلی به دست آورده شده است. شکل ۱۲ نمودار چگالی جریان نشستی بر حسب فاصله خزشی مقربه  $220 \text{ kV}$  با لایه آلودگی به ضخامت و هدایت  $1 \text{ mm}$  و  $284.9 \text{ } \mu\text{S/cm}$  به دست آمده از تحلیل پیش رو و [۴] را نشان می‌دهد. در جدول ۳ مقادیر جریان نشستی مرجع و به دست آمده از تحلیل پیش رو برای خاک با هدایت الکتریکی مشخص با ضخامت‌های مختلف آورده شده است.

شکل ۱۳ نمودار همگرایی و خطا را برای مقربه با ضخامت لایه آلودگی  $0.2$  میلی‌متر و هدایت  $4.3 \text{ S/m}$  نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با ریزش‌شدن تقسیمات مش (افزایش تعداد المان‌ها)، جریان نشستی به تدریج افزایش یافته تا به عدد  $39.95 \text{ mA}$  همگرا شود. در جدول ۴ تعداد المان‌های سطح دامنه و المان‌های مرزی برای هر مرحله مشخص شده است.

شکل ۱۴ تغییرات جریان نشستی بر حسب هدایت الکتریکی لایه آلودگی را برای هر چهار ضخامت نمایش می‌دهد. با توجه به رابطه  $V = IR$  انتظار می‌رود که نمودار جریان نشستی بر حسب هدایت الکتریکی نموداری خطی باشد اما شکل ۱۴ نشان می‌دهد که این گونه نیست؛ پارامتر موثر در به وجود آمدن این رفتار، دامست که باعث ایجاد رفتار غیر خطی می‌شود. مقدار ظرفیت گرمایی ویژه سیلیکون و نمونه خاک با آزمون گرماسنجی روشی تفاضلی (DSC) در بازه دمایی  $70^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}$  انجام گرفت. نتایج در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ آورده شده است. با قراردادن مقادیر مربوط در (۱)، با فرض دمای محیط  $23^\circ\text{C}$  و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی [۴]  $1.34$  می‌توان داده‌های جدول ۵ را به دست آورد.

نتایج حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی برای جریان نشستی و دمای سطح مقربه آلوده به ریزگرد با ضخامت  $0.2 \text{ mm}$  در جدول ۶ آمده است. نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول، معادل آزمون تجربی با شرایط پاشش آب است. در جدول ۷ نیز مقایسه‌ای بین جریان نشستی و دمای سطح مقربه در دو حالت بدون آلودگی و با آلودگی  $0.2 \text{ mm}$  برای هر سه حالت خشک، اسپری و پاشش آب انجام شده است. شکل ۱۷ نیز تصویر ثبت‌شده توسط دوربین ترمووژن برای مقربه آلوده‌شده در حالت پاشش آب

جدول ۲: بخشی از داده‌های آنالیز عناصر (ICP-OES) نمونه خاک کانون شماره ۲.

۳۰۱۸۸	Al (ppm)
۱۸۵۷۹	Fe (ppm)
۶۷۵۳۶	Na (ppm)
۱۲۶۹۳	S (ppm)
> ۲	Mg (%)
> ۱۰	Ca (%)

#### ۴- شرایط آب و هوایی و پدیده سردشدن تشعشعی

سردشدن تشعشعی دلیل اصلی کاهش دمای مقربه نسبت به دمای محیط است. سردبودن سطح مقربه نسبت به دمای شبنم باعث چگالش مه بر روی مقربه می‌شود. روابط حاکم بر این پدیده توسط روابط بولتزمن قابل بررسی است و مهم‌ترین روابط به صورت (۶) تا (۸) ارائه شده است. این معادلات به ترتیب مربوط به تشعشع از جسم (رو به بالا)، تشعشع حرارتی جو (رو به پایین) و زمان خنک‌شدن جسم است [۲۱]

$$P = A\varepsilon\sigma T^{\varepsilon} \quad (6)$$

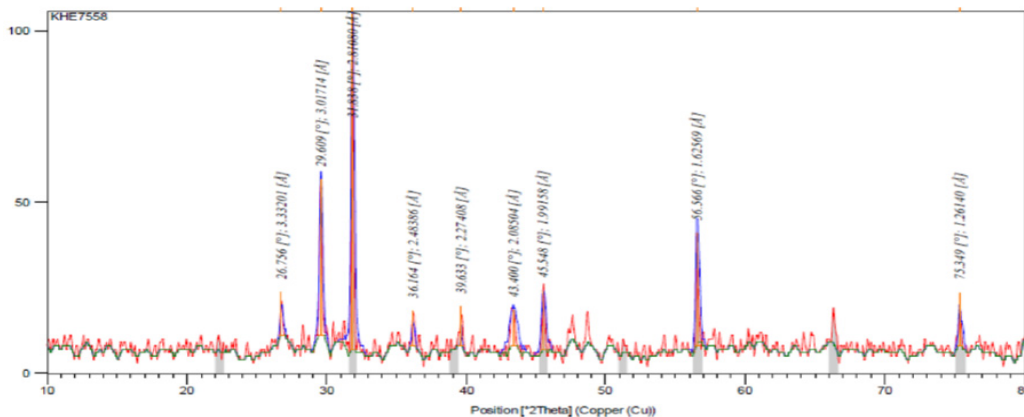
$$P_{thermal} = (1 + KC^{\varepsilon}) \times \lambda_{\gamma} \times 10^{-13} \times T^{0.852} \times RH^{1-0.195} \quad (7)$$

$$t_{cooling} = \frac{mN_A k}{2M\varepsilon\sigma A} \left[ \frac{1}{T_{final}^{\varepsilon}} - \frac{1}{T_{initial}^{\varepsilon}} \right] \quad (8)$$

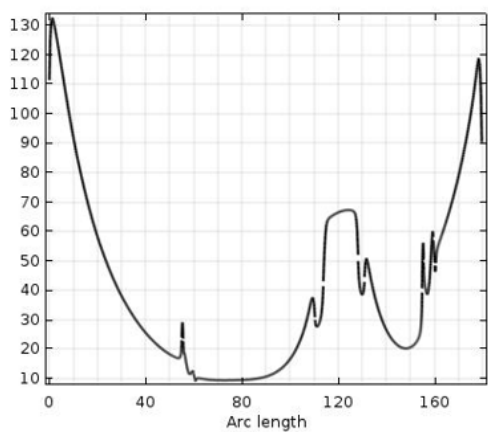
که در (۶)،  $P$  بر حسب وات تابش خروجی ناشی از تشعشع جسمی به مساحت  $A$ ،  $\varepsilon$  قدرت تابندگی (قدرت ارسال انرژی یک سطح در مقایسه با سطحی که به رنگ سیاه است) و  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن برابر با  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{T}^{\varepsilon}$  است. در (۷)،  $P_{thermal}$  تابش گرمای شبانه آسمان وابسته به شرایط جوی که به سمت سطح زمین گسیل می‌شود،  $K$  ثابت مربوط به ارتفاع ابر نسبت به زمین که برای ارتفاع ابر کمتر از ۲ کیلومتری از سطح زمین برابر  $0.34$ ، برای ابر در ارتفاع بین ۲ و ۵ کیلومتر از سطح زمین برابر  $0.18$  و برای ارتفاع بیش از ۵ کیلومتری از سطح زمین برابر  $0.06$  است،  $C$  شدت پوشش ابر در شب یا مقدار ابری بودن آسمان که مقدار آن برای شب کاملاً ابری برابر ۱ و برای شب صاف و عاری از ابر برابر صفر است و  $RH$  درصد رطوبت نسبی می‌باشد. در (۸)،  $t_{cooling}$  زمان خنک‌شدن سطح جسم از دمای اولیه  $(T_{initial})$  به دمای نهایی  $(T_{final})$  بر حسب ثانیه،  $m$  جرم جسم بر حسب کیلوگرم،  $N_A$  عدد آووگادرو برابر با  $6.02 \times 10^{23}$ ،  $k$  ثابت بولتزمن برابر با  $1.38 \times 10^{-23} \text{ m}^2\text{kg/s}^2\text{T}$  و  $M$  جرم مولکولی بر حسب کیلوگرم است. با توجه به موقعیت جغرافیایی استان خوزستان، غلظت مه در این منطقه زیادتر است زیرا هوای سرد سنگین بوده و به مناطق پایین و پست جلگه‌ای حرکت می‌کند.

#### ۵- نتایج

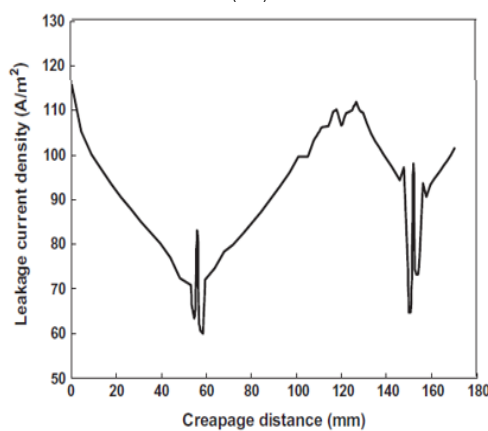
نتایج آنالیز عنصری نمونه کانون شماره ۲ در جدول ۲ آمده است. در شکل ۹ نیز طیف پراش اشعه ایکس مشاهده می‌شود. شکل ۱۰ تغییرات هدایت الکتریکی نمونه خاک کانون شماره ۲ را بر حسب ترکیبات مختلف آب‌مقطر و خاک نشان می‌دهد. نمودار چگالی جریان نشستی بر حسب فاصله خزشی برای حالت بدون آلودگی در شکل ۱۱ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، قسمت‌هایی از نمودار شکل ۱۱ که ماکسیمم‌ها و نوبزه‌ها اتفاق افتاده است، دقیقاً مربوط به نواحی دارای تغییر انحنای است.



شکل ۹: آنالیز تفرق اشعه ایکس کانون ریزگرد شماره ۲.



(الف)

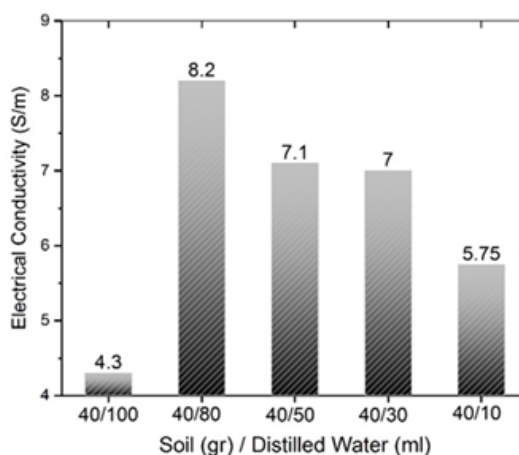


(ب)

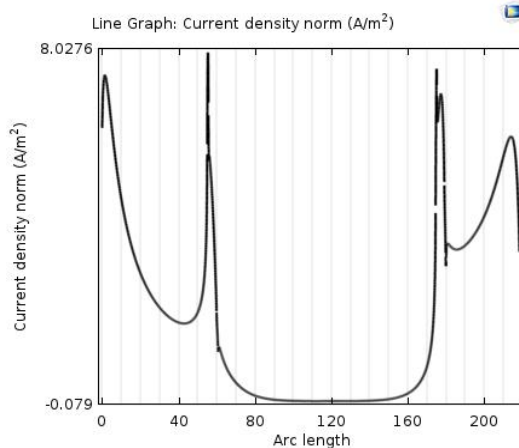
شکل ۱۲: نمودار چگالی جریان نشتی، (الف) تحلیل پیش رو و (ب) مرجع [۲].

جدول ۴: تعداد المان‌ها در هر مرحله از مش‌بندی برای مقره با ضخامت لایه آلودگی ۰٫۲ mm و هدایت الکتریکی ۴٫۳ S/M.

شماره سعی	تعداد المان‌های دامن‌های	تعداد المان‌های مرزی
۱	۵۰۸۱	۱۲۷۵
۲	۶۴۹۹	۱۵۱۷
۳	۸۴۹۲	۱۵۸۵
۴	۹۳۵۱	۱۶۲۳
۵	۱۰۶۲۷	۱۶۷۲
۶	۱۱۲۵۳	۱۶۷۲
۷	۱۲۵۷۲	۱۷۴۱
۸	۱۵۳۶۳	۱۸۵۴
۹	۲۵۰۸۳	۲۱۴۰



شکل ۱۰: هدایت الکتریکی نمونه خاک کانون شماره ۲ بر اساس ترکیبات مختلف آب‌مقطر و خاک.

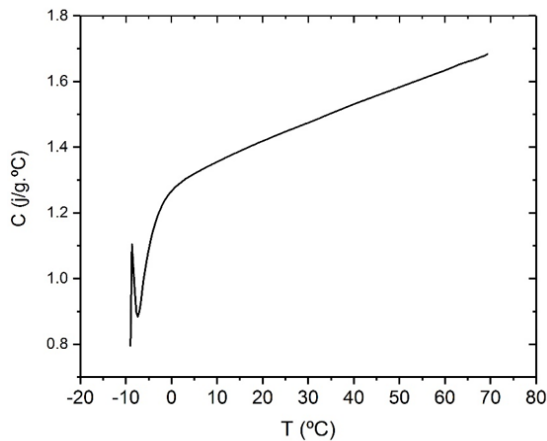


شکل ۱۱: نمودار توزیع چگالی جریان نشتی بر حسب فاصله خزشی برای مقره ۲۳۰ kV بدون آلودگی در کامپوزیت.

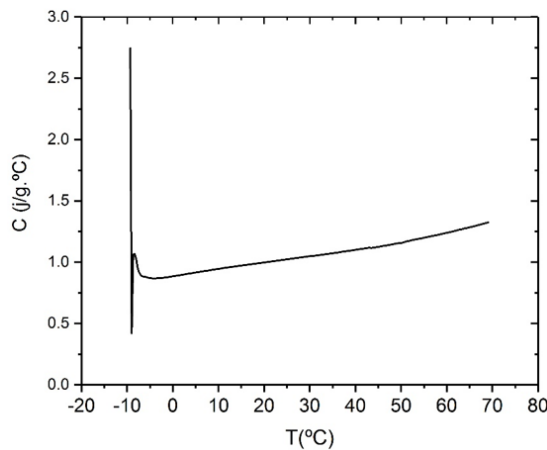
جدول ۳: مقادیر جریان نشتی مرجع و تحلیل حاضر بر حسب MA برای خاک با هدایت ۲۸۴٫۹ μS/CM با سه ضخامت مختلف.

ضخامت لایه آلودگی (mm)	جریان نشتی مرجع (mA)	جریان نشتی تحلیل حاضر (mA)
۱	۵۴٫۶۰	۵۱٫۳۳
۱٫۵	۵۶٫۲۳	۵۴٫۰۴
۲	۵۸٫۹۳	۵۶٫۰۹

را نشان می‌دهد. عددی که روی مقره نشان داده شده است، دمای مربوط به آن ناحیه است.



شکل ۱۵: تغییرات ظرفیت گرمایی لاستیک سیلیکون بر حسب دما (آنالیز گرماسنجی روشی تفاضلی).



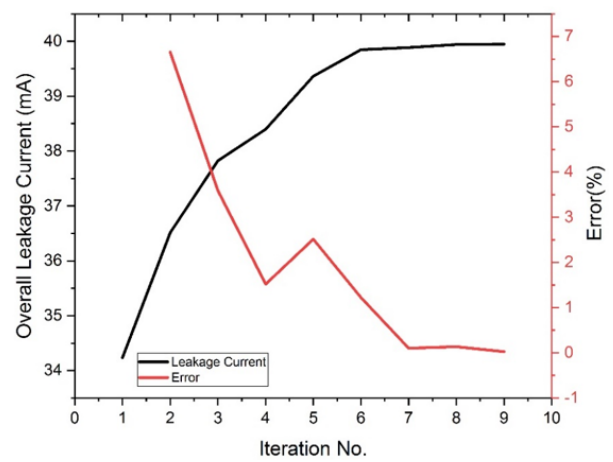
شکل ۱۶: تغییرات ظرفیت گرمایی نمونه خاک کانون شماره ۲ بر حسب دما (آنالیز گرماسنجی روشی تفاضلی).



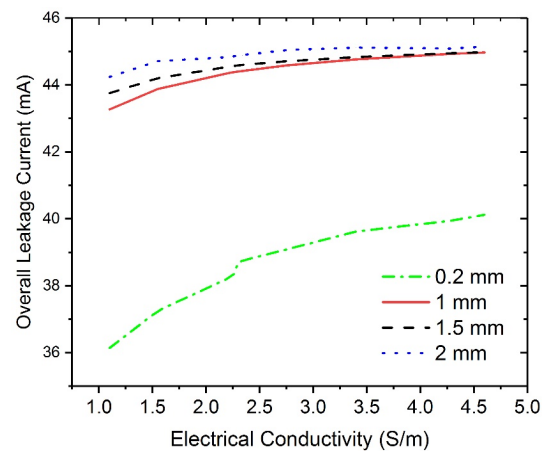
شکل ۱۷: تصویر ثبت شده توسط دوربین ترموویژن - مفره آلوده شده در حالت پاشش آب.

## ۶- بحث

با توجه به آنالیز انجام شده روی آلوده‌ترین کانون ریزگرد، ترکیبات  $\text{NaCl}$ ،  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ،  $\text{CaCO}_3$  و  $\text{MgSO}_4$  به همراه ذرات فلزی آلومینیوم و آهن، ترکیبات اصلی موجود در نمونه خاک می‌باشند. ترکیبات فوق به گونه‌ای هستند که در صورت وجود رطوبت، باعث ایجاد یک مسیر جریان الکتریکی روی سطح مفره شده و خاصیت عایقی مفره را از بین می‌برند. همان گونه که در شکل ۱۰ مشخص است، هدایت الکتریکی نمونه خاک کانون شماره ۲ با افزایش مقدار آب ابتدا افزایش یافته و به مقدار بیشینه خود می‌رسد و نهایتاً کاهش می‌یابد. تأثیر این مسأله مانند زمانی



شکل ۱۳: نمودار همگرایی مش و درصد خطا برای مفره با ضخامت لایه آلودگی ۰/۲ mm و هدایت الکتریکی ۰/۳ S/m.



شکل ۱۴: جریان ناشی بر حسب هدایت الکتریکی لایه آلودگی.

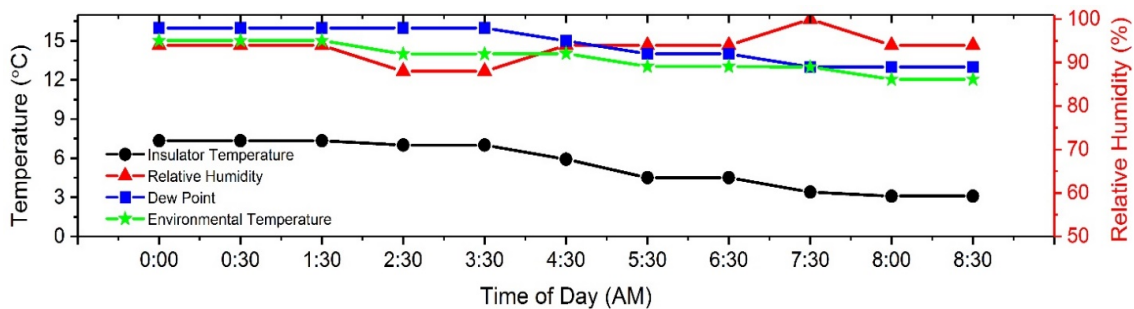
جدول ۵: دمای سطح مفره برای ضخامت‌های ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر خاک خرمشهر بر حسب جریان ناشی عبوری به دست آمده از تحلیل کامسول.

ضخامت لایه مفره (mm)	جریان ناشی (mA)	اختلاف دمای محیط و سطح مفره (°C)	دمای سطح مفره (°C)
۰/۲	۳۹٫۹۵	۱۶٫۰۱	۳۹٫۰۱
۱	۴۴٫۹۳	۱۸٫۹۲	۴۱٫۹۲
۱٫۵	۴۵٫۲۶	۱۹٫۰۵	۴۲٫۰۵
۲	۴۵٫۵۲	۱۹٫۱۶	۴۲٫۱۶

جدول ۶: مقایسه نتایج تجربی (پاشش آب) و شبیه‌سازی جریان ناشی و دمای سطح مفره ۲۳۰ KV با لایه آلودگی ۰/۲ MM.

خطا (%)	شبیه‌سازی	تجربی
۱۲	۳۹٫۹۵ (mA)	۳۵ (جریان ناشی)
۹	۳۹٫۰۱ (°C)	۳۵٫۲ (دمای سطح)

در جدول ۸، پارامترهای به دست آمده برای نمونه مفره با آلودگی مصنوعی (نشانه‌شده در آزمایشگاه) و مفره آلوده شده به صورت طبیعی (بازشده از خط آبادان) آمده است. برای تعیین دمای سطح مفره می‌توان با در نظر گرفتن مقدار متوسط شدت پوشش ابر در شب، مقدار  $C$  را ۰/۵ لحاظ کرد. شکل ۱۸ تغییرات دمای سطح در طی شبانه‌روز را برای روز بحرانی ۲۸ بهمن ماه ۱۳۹۵ نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، حداقل اختلاف نقطه شبنم و سطح مفره حدود  $8^\circ\text{C}$  است. این اختلاف دما دلیلی بر کندانس شدن مه و رطوبت بر روی مفره‌ها می‌باشد.



شکل ۱۸: تغییرات دمای محیط، سطح مقره و شبنم، روز ۲۸ بهمن ماه ۱۳۹۵ در ساعات ۱۲ شب تا ۸:۳۰ صبح.

جدول ۷: نتایج تجربی جریان نشتی و دمای سطح مقره ۲۳۰ kV با لایه آلودگی ۰/۲ mm و بدون لایه آلودگی.

نوع مقره	جریان نشتی (mA)			دمای سطح (°C)		
	خشک	اسپری آب	پاشش آب	خشک	اسپری آب	پاشش آب
با لایه آلودگی	۰/۶۶	۱۳/۱	۳۵	۲۳/۲	۲۴/۸	۳۵/۲
بدون لایه آلودگی	۰/۶۳	۰/۶۷	۰/۶۸	۲۴	۲۳	۲۲/۲

آلودگی و با آلودگی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت آلودگی، جریان نشتی زیاد می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش مطابقت قابل قبولی با هم دارند. با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، مقدار جریان نشتی ۳۵ mA مقدار نسبتاً زیادی است. از مقدار چگالی نمک رسوب معادل نیز می‌توان انتظار داشت که مقدار جریان نشتی بالایی روی سطح مقره در شرایط واقعی ایجاد شود. با توجه به جدول ۷ با زیاد شدن هدایت الکتریکی لایه آلودگی، دمای سطح مقره نیز افزایش خواهد یافت.

جدول ۸: هدایت الکتریکی و شدت آلودگی برای مقره ۲۳۰ kV.

پارامترهای آلودگی	مقره با آلودگی طبیعی	مقره با آلودگی مصنوعی
$\theta$ (°C)	۲۵/۶	۲۴/۶
$\sigma_r$ (S/m)	$2,82 \times 10^{-2}$	$1,97 \times 10^{-2}$
$S_d$ (kg/m <sup>2</sup> )	۰/۱۴۰	۰/۱۰۵
ESDD (mg/cm <sup>2</sup> )	۰/۱۶۴	۰/۸۲۴
طبقه آلودگی [۲۲]	متوسط	بسیار زیاد

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله مکانیزم کنده‌شدن مه و رطوبت بر روی مقره‌های ۲۳۰ kV آلوده به ریزگرد استان خوزستان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی مقره با و بدون آلودگی در نرم‌افزار کامسول انجام شد و جریان نشتی به دست آمد. به کمک روابط حاکم بر انتقال حرارت، دمای سطح مقره در اثر عبور جریان نشتی محاسبه گردید. همچنین برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی مذکور، آزمایشی طراحی و اجرا گردید و در حین آزمایش نیز دمای سطح با دوربین ترموویژن ثبت گردید. نتایج زیر حاصل بررسی‌های انجام‌شده است:

- مکانیزم سرد شدن تشعشی نشان داد که در بدترین حالت، دمای سطح مقره حدود ۸°C از نقطه شبنم پایین‌تر بوده است.
- ترکیب و نوع ریزگرد تأثیر مهمی روی هدایت الکتریکی لایه آلودگی رسوب‌کرده روی مقره و به تبع آن جریان نشتی تولیدی دارد. ترکیبات ریزگرد شامل نمک‌های NaCl، Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>، CaCO<sub>3</sub> و MgSO<sub>4</sub> به همراه ترکیبات فلزی از جمله آلومینیوم و آهن بوده است. با مرطوب شدن این ترکیب از ریزگرد با آب‌مقطر هدایت آن به ۸/۲ S/m رسیده است.
- آزمون تجربی نشان داد که شبیه‌سازی مقره با نرم‌افزارهای موجود، روش قابل اعتمادی برای تحلیل پیش‌دستانه جهت ارزیابی مقره به شمار می‌رود. میزان جریان نشتی مقره با آلودگی شدید در شرایط آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تقریباً مشابه و برابر ۳۵ mA است.
- وجود آلودگی روی مقره برای تشکیل یک مسیر هادی لازم است، اما کافی نیست. به عبارت دیگر آلودگی و رطوبت هر کدام به تنهایی نمی‌توانند باعث از کار افتادگی مقره شوند. در هر دو حالت

است که بارش باران به حدی زیاد باشد که عملاً آلودگی‌های روی مقره را شسته و آن را تمیز کند. نمودار شکل ۱۰ نشان‌دهنده این است که هدایت نمونه خاک کانون شماره ۲ با افزودن آب‌مقطر از ۱۰ ml تا ۸۰ ml به تدریج افزایش یافته تا این که در ۸۰ ml به مقدار بیشینه خود می‌رسد. در شکل ۱۴ نحوه تغییرات جریان نشتی بر حسب هدایت الکتریکی لایه آلودگی برای ضخامت‌های مختلف به دست آمده از نرم‌افزار کامسول نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر چهار ضخامت، نمودار دارای روند صعودی است؛ به عبارت دیگر با افزایش هدایت الکتریکی لایه آلودگی، جریان نشتی ایجادشده روی سطح مقره افزایش می‌یابد. همچنین هرچه ضخامت لایه آلودگی بیشتر شود جریان نشتی نیز افزایش خواهد یافت. در ضخامت‌های ۱ mm به بالا با افزایش هدایت الکتریکی سطح، جریان نشتی به حد ۴۵ mA می‌رسد.

همان‌طور که در شکل ۱۷ برای حالت پاشش آب مشاهده می‌شود، در آزمون انجام‌گرفته در هر دو حالت پاشش و اسپری آب بر روی مقره آلوده، جرقه‌های موضعی و ممتد مشاهده شد. با توجه به جدول ۷، همان‌گونه که انتظار می‌رفت مقره بدون آلودگی در هر سه حالت خشک، اسپری آب و پاشش آب، جریان نشتی تقریباً یکسانی داشتند.

علت نزدیکی داده‌های تجربی و نرم‌افزار برای مقره آلوده، یکنواختی لایه‌نشانی ریزگردها بر روی سطح مقره است. جریان نشتی مقره آلوده نیز در حالت خشک در حدود جریان نشتی مقره تمیز است.

با مقایسه مقره تمیز و مقره آلوده خشک، می‌توان نتیجه گرفت تا زمانی که امکان خیس شدن سطح مقره وجود نداشته باشد، آلودگی به تنهایی نمی‌تواند باعث ایجاد جریان نشتی زیاد شود؛ و بالعکس هنگامی که مقره بدون آلودگی باشد و تنها آب یا رطوبتی روی سطح آن باشد نیز جریان نشتی زیادی به وجود نمی‌آید. همچنین با مقایسه نتایج بدون



- [13] I. A. Joneidi, A. A. Shayegani, and H. Mohseni, "Electric field distribution under water droplet and effect of thickness and conductivity of pollution layer on polymer insulators using finite element method," *Int. J. Comput. Electr. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 266-270, Apr. 2013.
- [14] Y. Bourek, N. M'Ziou, and H. Benguesmia, "Prediction of flashover voltage of high-voltage polluted insulator using artificial intelligence," *Trans. Electr. Electron. Mater.*, vol. 19, pp. 59-68, 2018.
- [15] N. A. Othman, M. A. M. Piah, and Z. Adzis, "Space charge distribution and leakage current pulses for contaminated glass insulator strings in power transmission lines," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 4, pp. 876-882, Mar. 2017.
- [16] IEC 60507 Standard, Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to Be Used on AC Systems, Int. Electrotech. Comm. Geneva, Switzerland, 1991.
- [17] CIGRE C4.303, Artificial Pollution Test for Polymer Insulators Results of Round Robin Test, Technical Brochure, 555#, Oct. 2013.
- [۱۸] ب. شفیع و ا. میرزایی، "طراحی بهینه، ایمن و اقتصادی سیستم زمین پست‌های فشارقوی"، *مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران*، جلد ۱۳، شماره ۱، صص. ۱۲۲-۱۰۹، ۱۳۹۵.
- [۱۹] ع. نادریان چهارمی، م. صنایع‌پسند و ح. محسنی، "طراحی حلقه کرناهای مقروه‌های پلیمری فشارقوی بر اساس شبیه‌سازی شدت میدان الکتریکی"، *مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران*، سال ۲، شماره ۲، صص. ۳۸-۳۰، پاییز و زمستان ۱۳۸۴.
- [20] M. A. Salam, S. M. Al-Alawi, and A. A. Maqrashi, "Prediction of equivalent salt deposit density of contaminated glass plates using artificial neural networks," *J. of Electrostatics*, vol. 66, no. 9-10, pp. 526-530, Sept. 2008.
- [21] T. S. Eriksson and C. G. Granqvist, "Radiative cooling computed for model atmospheres," *Applied Optics*, vol. 21, no. 23, pp. 4381-4388, Dec. 1982.
- [22] Wijayatilake ACS, "Reviewing of insulator selection criteria for overhead power lines in coastal areas of Sri Lanka," *Engineer*, XLVII, 01, pp. 57-73, 2014.

**سامان محمدنوبی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در دانشگاه صنعتی امیرکبیر به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ در رشته مهندسی مکانیک به پایان رسانده است؛ قابل ذکر است نام‌برده مدرک کارشناسی ارشد خود را در گرایش مهندسی مواد مرکب اخذ کرده‌اند و هم‌اکنون در مقطع دکترای مهندسی مکانیک در دانشگاه شهید بهشتی مشغول به تحصیل در سال آخر می‌باشند. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان متنوع و شامل زمینه‌های بین‌رشته‌ای از جمله کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها، عایق‌های الکتریکی و ساخت و ترکیب مواد جدید است.

**خسرو رحمانی** دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی مواد دانشگاه شیراز، کارشناسی ارشد و دکترا دانشگاه صنعتی شریف و در حال حاضر دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی دانشگاه شهید بهشتی هستند. ایشان ۲۳ مورد پروژه‌های پژوهشی در صنعت برق انجام داده و پژوهشگر برتر کشوری در سال ۸۷ بوده و تاکنون ۳ کتاب تألیفی و ۳۷ مقاله مستخرج از پژوهش‌های صنعتی را به چاپ رسانده‌اند.

میزان جریان ناشی جزئی و در حد  $0.7-0.6$  mA به دست آمد.  
 - هرچه جریان ناشی افزایش یابد، دمای سطح مقره در نتیجه عبور این جریان نیز زیادتر می‌شود. دمای مقره با آلودگی شدید در شرایط آزمون و روش محاسباتی به ترتیب برابر  $35.3^{\circ}\text{C}$  و  $39.1^{\circ}\text{C}$  به دست آمد.

## مراجع

- [1] S. M. Kumar and L. Kalaivani, "Electric field distribution analysis of 110 kV composite insulator using finite element modeling," in *Proc. Int. Conf. Circuits, Power Comput. Technol. ICCPCT'14*, pp. 136-141, Nagercoil, India, 20-21 Mar. 2014.
- [2] M. El-Shahat and H. Anis, "Risk assessment of desert pollution on composite high voltage insulators," *J. Adv. Res.*, vol. 5, no. 5, pp. 569-576, Sept. 2014.
- [3] D. S. Lopes, "Potential distribution along a 500 kV polymer insulator in presence of a pollution layer," in *Proc. of the COMSOL Conf.*, pp. 112-117, Grenoble, France, 27-29 Oct. 2015.
- [4] Y. Mizuno, K. Naito, Y. Suzuki, and M. Akizuki, "Voltage and temperature distribution along semiconducting glaze insulator strings," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 1, pp. 100-104, Feb. 1999.
- [5] A. Arshad, S. G. Nekahi, M. Mcmeekin, and M. Farzaneh, "Effect of pollution layer conductivity and thickness on electric field distribution along a polymeric insulator," in *Proc. of the COMSOL Conf.*, pp. 56-59, Grenoble, France, 27-29 Oct. 2015.
- [6] A. Nekahi and S. G. Mcmeekin, "Effect of pollution severity on electric field distribution along a polymeric insulator," in *Proc. IEEE 11th Int. Conf. on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 612-615, Sydney, Australia, 19-22 Jul. 2015.
- [7] R. Chakraborty and S. B. Reddy, "Performance of silicone rubber insulators under thermal and electrical stress," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 3, pp. 2446-2454, May/Jun. 2017.
- [8] J. Dadashzadeh Samakosh and M. Mirzaie, "Flash-over voltage prediction of silicone rubber insulators under longitudinal and fan-shaped non-uniform pollution conditions," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 78, pp. 50-62, 2019.
- [9] A. Z. El Dein, "Experimental techniques to simulate naturally polluted high voltage transmission line insulators," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 5, pp. 2199-2205, Oct. 2014.
- [10] P. Charalampidis, M. Albano, H. Griffiths, A. Haddad, and R. T. Waters, "Silicone rubber insulators for polluted environments part 1: enhanced artificial pollution tests," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 2, pp. 740-748, Apr. 2014.
- [11] H. Benguesmia, N. M. Ziou, and A. Boubakeur, "Experimental study of pollution effect on the behavior of high voltage insulators under alternative current," *Front. Energy*, vol. 11, pp. 1-9, 2017.
- [12] Y. G. Pushpa and N. Vasudev, "Artificial pollution testing of polymeric insulators by CIGRE round robin method-withstand & flashover characteristics," in *Proc. 3rd Int. Conf. Cond. Assess. Tech. Electr. Syst.*, pp. 270-274, Rupnagar, India, 16-18 Nov. 2018.