



## بررسی تغییرات مقاومت سطحی مقره‌های کامپوزیتی آلوده با افزایش رطوبت و مقایسه آن‌ها با نمونه‌های سرامیکی

دکتر حسن آبروش  
سعيد احمدی  
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
ایران

واژه‌های کلیدی: مقره کامپوزیت، مقاومت سطحی، رطوبت، آلودگی، ESDD، مقاومت سطحی بحرانی جریان نشتی

### چکیده

استفاده از مقره‌های کامپوزیتی در سالهای اخیر خصوصا در مناطق آلوده گسترش بسیاری یافته است. انباشت آلودگی بر روی سطح مقره خصوصا در مناطق ساحلی که دارای آلودگی دریایی و رطوبت بالاست می‌تواند به کاهش عملکرد مقره منجر گردد. نمکهای معدنی موجود در سطوح آلوده در شرایط مرطوب با تشکیل لایه‌های هادی منجر به عبور جریان نشتی شده که این امر می‌تواند با ایجاد تخلیه‌های سطحی نهایتا منجر به تخلیه الکتریکی بر روی سطح مقره گردد. با توجه به اینکه جریان‌های نشتی گذرنده از سطح مقره ارتباط مستقیمی با مقدار مقاومت سطحی مقره دارند در این مقاله با انجام تستهای آزمایشگاهی به بررسی ارتباط مقاومت سطحی چند نمونه مقره کامپوزیتی ۲۴kV مورد استفاده در شبکه توزیع برق ایران با پارامتر رطوبت و تعیین مقاومت سطحی بحرانی در شرایط آلودگی و رطوبت مختلف پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش رطوبت نقش بسیار موثری در کاهش میزان مقاومت سطحی دارد. و مقدار کمترین مقاومت

سطحی که سبب تخلیه الکتریکی شده و بعنوان مقاومت سطحی بحرانی نامیده می‌گردد با افزایش آلودگی تا اندازه‌ای کاهش یافته است. و همچنین رنج مقاومت سطحی بحرانی که می‌تواند سبب جرقه‌گردد در بازه (۰.۵۵ - ۱.۴ MQ/cm) قرار دارد.

### ۱- مقدمه

مقره‌های فشار قوی یک قسمت مهمی از شبکه انتقال و توزیع برق را تشکیل می‌دهند که نقش بسیار مهمی در پایداری شبکه ایفا می‌نمایند و هرگونه نقص در عملکرد درست این مقره‌ها می‌تواند باعث وقوع اتصالی و قطع کل خط گردد.

تحقیقات انجام شده بر روی مقره‌های انتقال نشان می‌دهد که بیشتر قطعیهای ناشی از آلودگی در شرایط آب و هوایی مرطوب خصوصا در اواخر شب و اوایل صبح رخ می‌دهد.

## ۲- آزمایش

### ۲-۱- مشخصات مقره‌های آزمون

در این آزمایش تعداد ۴ عدد مقره کامپوزیت و همچنین ۲ مقره سرامیکی که در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است، از سه شرکت مقره‌سازی مختلف انتخاب گردید. مشخصات این مقره‌ها در جدول (۱) درج گردیده است.



شکل (۱): مقره‌های پلیمری مورد آزمایش



شکل (۲): مقره‌های سرامیکی مورد آزمایش

جدول (۱): مشخصات مقره‌های مورد آزمایش

شماره مقره	تعداد چترکها	ارتفاع (mm)	فاصله خزشی (mm)	قطر چترکها (mm)
۱	۶	۴۴۶	۶۶۵	۱۰۰
۲	۱۰	۵۲۰	۵۹۰	۷۰/۵۳
۳	۹	۵۲۰	۷۷۰	۹۸/۷۳
۴	۶	۴۵۰	۶۸۰	۱۰۵/۸۰
چینی	-	۱۴۶	۲۹۵	۲۵۵
شیشه ای	-	۱۴۶	۳۰۵	۲۵۵

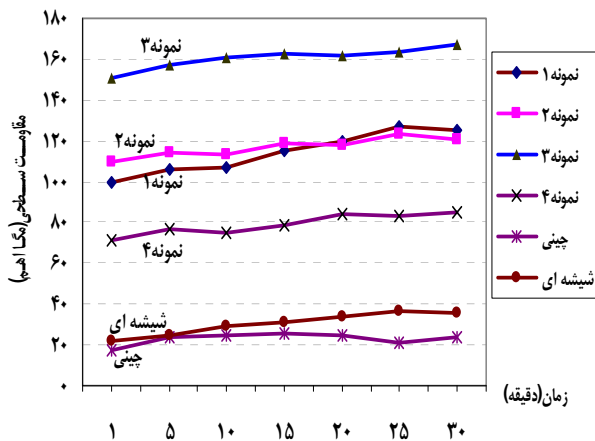
دهد. [1] در مورد مقره‌های توزیع و فوق توزیع هم در شرایط محیطی مشابه می‌توان انتظار بروز چنین خطاهایی را داشت. از آنجا که بارندگی و مه غلیظ می‌تواند سبب شستشوی طبیعی آلودگی از سطح مقره‌ها گردد ولی با توجه به آزمایشات و تحقیقات انجام شده مشخص گردیده است که آب و هوای مرطوب قابلیت این شستشوی طبیعی را نداشته و سبب افزایش احتمال تخلیه الکتریکی می‌گردد. زمانیکه آلودگی مرطوب می‌شود و لایه آلودگی یک مسیر مناسب برای عبور جریان نشتی ایجاد می‌کند که این جریان در بعضی از موارد بصورت طبیعی روی سطح قطع شده و گاهی می‌تواند منجر به یک تخریب مخرب گردد.

مقاومت سطحی به عنوان یک شاخص اساسی بیان‌کننده وضعیت عایقی مقره‌ها می‌باشد. اندازه‌گیری مقاومت سطحی مقره‌های غیر سرامیکی در طول شرایط مرطوب یک روش مناسب جهت توصیف عملکرد آلودگی مقره‌ها می‌باشد [2] از آنجاکه مقره‌های غیر سرامیکی بدلیل خاصیت آبریزی و انتقال این خاصیت به لایه‌های آلوده دارای عملکرد بهتری نسبت به مقره‌های سرامیکی می‌باشند [4] لذا تعیین شدت آلودگی که بر اساس پارامتر ESDD<sup>۱</sup> معرفی می‌گردد به‌نهایی نمی‌تواند معرف عملکرد یک مقره کامپوزیتی باشد از این رو تعیین مقاومت سطحی می‌تواند بعنوان یک شاخص جهت بررسی عملکرد مقره‌ها در شرایط مرطوب و دارای آلودگیهای محیطی و یک پارامتر کلیدی برای مدل تخلیه الکتریکی معرفی گردد.

در این مقاله، چند نمونه مقره کامپوزیتی ۲۴kV با پروفیل مختلف و همچنین ۲ مقره سرامیکی و شیشه‌ای که در شبکه برق ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد مورد ارزیابی واقع شده اند. مقره‌های مورد تست بعد از آلوده‌سازی و بدست آوردن خاصیت آبریزی جهت تست در اتاقک مخصوص قرار داده شده اند.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

۲-۲- روش آزمایش



شکل (۳): نمودار تغییرات مقاومت سطحی بر حسب زمان در رطوبت ۹۰٪

همانطور که از شکل مشخص است مقاومت سطحی بر حسب مگا اهم در طول مدت آزمایش افزایش یافته و در یک مقدار حداکثر تقریباً ثابت می ماند.

افزایش مقاومت که در تمام نمونه‌ها مشاهده شده است بدلیل تبخیر بعضی از مسیرهای عبور جریان ناشی و سطوح مقره می باشد. از دقیقه ۲۰ مقادیر مقاومت تقریباً ثابت مانده و این مقاومت بعنوان مقاومت سطحی مقره در رطوبت مورد نظر در نظر گرفته شده است.

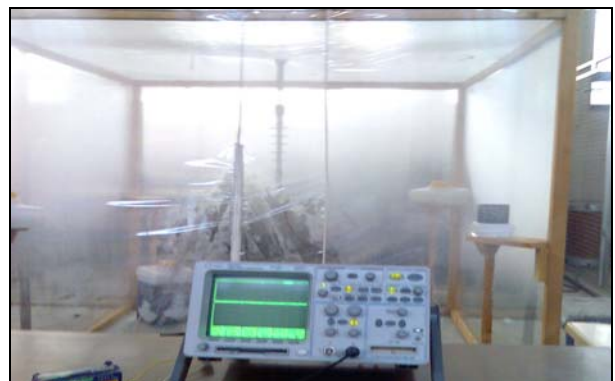
در شکل (۴) تغییرات مقاومت سطحی بر حسب تغییرات رطوبت در سه سطح آلودگی مختلف با مقادیر ESDD  $0.057$ ،  $0.074$  و  $0.174$  mg/cm<sup>2</sup> نشان داده شده است.

با توجه به منحنی شکل (۴) مقادیر مقاومت سطحی در تمامی نمونه‌ها در سطح آلودگی با افزایش رطوبت کاهش یافته است. نرخ کاهش مقاومت در نمونه‌های غیر سرامیکی با افزایش رطوبت خصوصاً در رطوبتهای ۸۵٪ و ۹۰٪ دارای مقادیر بالاتری می باشد. با توجه به خاصیت آبریزی و انتقال این خاصیت به لایه‌های آلوده در مقره‌های کامپوزیتی، خصوصاً در رطوبتهای بالا ۹۵٪ مقاومت سطحی تحت تاثیر این خاصیت تا اندازه‌ای در این نمونه‌ها متفاوت می باشد که در نمونه‌های ۱ و ۲ این امر مشخص است.

نتایج نشان می دهد که مقادیر مقاومت سطحی مقره‌های آلوده با افزایش رطوبت کاهش یافته است و این کاهش مقاومت یک رابطه خطی با افزایش رطوبت ندارد. همچنین

در این آزمایش ابتدا مقره‌ها توسط پودر کائولین، پیش آلوده شده سپس برای آلودگی کامل مقره‌ها را در دوغابی که از کائولین و نمک و آب مقطر تشکیل شده است غوطه ور می سازیم. مقادیر کائولین موجود در محلول (۴۰ gr/lit) و نمک بترتیب (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ gr/lit) می باشد. مقره‌ها بعد از بازیابی خاصیت آبریزی در داخل اتاقک مه به ابعاد  $1.8m^3 \times 2 \times 2$  قرار می گیرند. رطوبت مورد نظر توسط ۴ دستگاه مه ساز تولید شده و در طول مدت آزمایش این رطوبت ثابت نگاه داشته شده است. رطوبت نسبی مورد نظر در این آزمایش در چهار سطح ۸۰٪، ۸۵٪، ۹۰٪ و ۹۵٪ می باشد.

بعد از تثبیت رطوبت اتاقک در مقدار مشخص شده نمونه‌ها بمدت ۳۰ دقیقه تحت ولتاژ مستقیم  $107$  v/mm قرار داده شده و جریان ناشی مقره‌ها پس از محافظت لازم توسط یک دستگاه اسیلوسکوپ ثبت گردیده است. شکل (۳) نمایی از دستگاه setup را نشان می دهد.



شکل (۳): اتاق مه

۳- تحلیل نتایج

بعد از انجام آزمایشات و محاسبه نتایج، نمودار مربوط به تغییرات مقاومت سطحی در مدت زمان ۳۰ دقیقه برای ۴ نمونه مقره مورد آزمایش در شدت آلودگی با مقدار ESDD حدوداً،  $0.074$  mg/cm<sup>2</sup> و رطوبت نسبی ۹۰٪ برای نمونه‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.

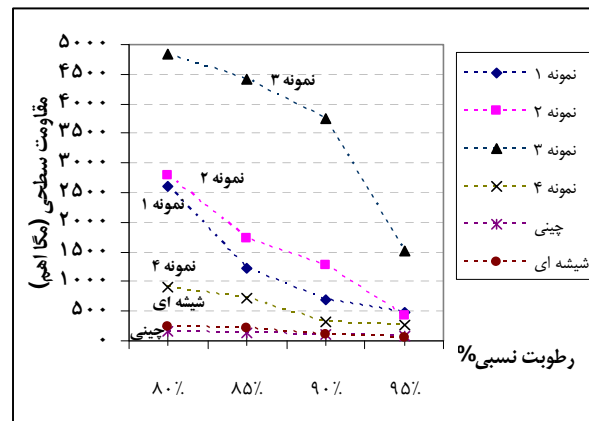
**بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق**

با توجه به شکل (۴) مقره‌های سرامیکی با افزایش رطوبت با شیب کمتری نسبت به نمونه‌های غیر سرامیکی، کاهش یافته است. همچنین در رطوبت ۹۵٪ مقادیر مقاومت تا اندازه‌ای افزایش می‌یابد که این امر بدلیل شستشوی طبیعی مقره‌ها و فروچکیدن آلودگی‌های نمکی بر روی سطح مقره می‌باشد. از آنجا که مقاومت سطحی یکی از فاکتورهای موثر در احتمال وقوع جرقه الکتریکی می‌باشد لذا در این قسمت با تعیین مقدار مقاومت سطحی بحرانی ۴ نمونه مقره کامپوزیتی به بررسی تغییرات آن با مقادیر رطوبت و آلودگی پرداخته شده است. جدول (۲) مقادیر مقاومت سطحی بحرانی بر طول فاصله خزشی ( $M\Omega/cm$ ) برای سطوح مختلف آلودگی و در چهار مقدار رطوبت را نشان می‌دهد. مقاومت بحرانی مقدار کمترین مقاومت اندازه‌گیری شده می‌باشد که سبب جرقه می‌گردد.

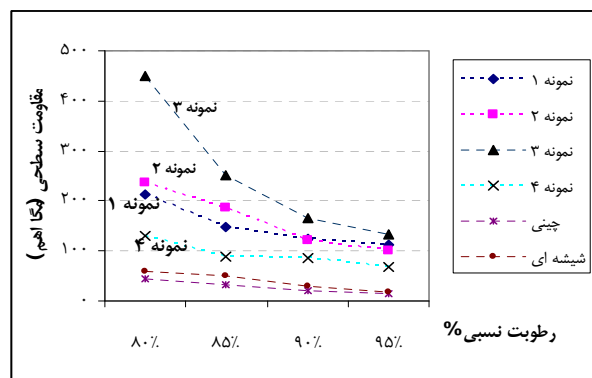
جدول (۲): مقاومت سطحی بحرانی بر طول فاصله خزشی در شرایط آلودگی و رطوبت مختلف ( $M\Omega/cm$ )

مقدار متوسط مقاومت	رطوبت نسبی				سطح آلودگی
	٪۸۰	٪۸۵	٪۹۰	٪۹۵	
نمونه ۱	سبک	-	-	-	-
	متوسط	-	-	۰.۸۹	۰.۸۲
	سنگین	-	۰.۸۴	۰.۷۴	۰.۷۰
نمونه ۲	سبک	-	-	-	-
	متوسط	-	-	۰.۸	۰.۷۵
	سنگین	-	۰.۸۴	۰.۶۹	۰.۶۶
نمونه ۳	سبک	-	-	-	-
	متوسط	-	-	-	-
	سنگین	-	۱.۴۰	۱.۰۹	۰.۹۲
نمونه ۴	سبک	-	-	-	-
	متوسط	۰.۸۵	۰.۸۰	۰.۷۷	۰.۷۴
	سنگین	۰.۷۴	۰.۶۶	۰.۷۱	۰.۵۵

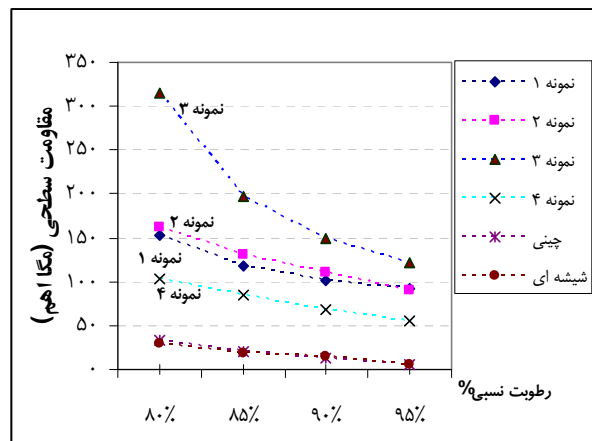
مقاومت سطحی در نمونه‌ها با افزایش میزان آلودگی (ESDD) کاهش می‌یابد. نکته قابل ذکر اینکه نرخ کاهش مقاومت با افزایش رطوبت کمتر از حالتی می‌باشد که سطح آلودگی از آلودگی سبک به آلودگی متوسط می‌رود.



الف:  $ESDD = 0.057 \text{ mg/cm}^2$



ب:  $ESDD = 0.074 \text{ mg/cm}^2$



ج:  $ESDD = 0.174 \text{ mg/cm}^2$

شکل (۴): نمودار تغییرات مقاومت سطحی بر حسب تغییرات رطوبت در آلودگی‌های مختلف

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

و در آلودگی‌های متوسط و سنگین با افزایش سطح آلودگی متوسط مقاومت سطحی بحرانی تا اندازه ای کاهش یافته است. در مجموع با توجه به خطای احتمالی می‌توان گفت که رنج مقاومت سطحی بحرانی که می‌تواند سبب جرقه گردد در بازه  $(0.55 - 1.4 \text{ M}\Omega/\text{cm})$  قرار دارد

▪ اختلاف در مقادیر مقاومت سطحی نمونه‌ها بدلیل پروفیل مقره‌ها، مقادیر مختلف آلودگی‌های غیرقابل حل که قابلیت بالای جذب رطوبت را دارا هستند، می‌باشد.

همچنین در مقره‌های سرامیکی با توجه به پایین بودن مقادیر مقاومت، روند کاهش مقاومت سطحی با افزایش رطوبت با شیب کمتری نسبت به مقره‌های غیر سرامیکی مشاهده شده است. که این امر بدلیل شستشوی طبیعی مقره‌ها و فروچکیدن آلودگی‌های نمکی از روی سطح مقره می‌باشد.

### مراجع

- [1] Joe, Renowden, Clyde Richards "Monitor of Contaminated Insulator " IEE Proc. Gener. Transm. Distrib Electrical World , October ۱۹۹6 .pp.39
- [2] R. S. Gorur and K. Suhrmanian "Use of Surface Resistance for Assessing Vulnerability of HV Outdoor Insulators to Contamination Flashover" IEEE, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, (2003)
- [3] R. S. Gorur, H. M. Schneider "Surface Resistance Measurements on Nonceramic Insulators" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, no. 4, (2001)
- [4] Seifert, J.M.; Hubl, W.; 2001; "Hydrophobicity Effect of Silicon housed Composite Insulators and its Transfer to Pollution Layers – Design and Environmental Parameters Influencing the Hydrophobic Surface Behavior"; Iraklion Symposium, Kreta, Greece, 26 & 27<sup>th</sup> April.
- [5] Liang Xidone. Wang Shaowu. et.al. "The Development and Study of Composite Insulators in China", Accepted by IEEE Trans. on DEI Digest Issue with ID 1008, 1999.

با توجه به جدول (۲) تفاوت در مقادیر مقاومت بحرانی ناشی از اختلاف در دینامیک فرایند جرقه می‌باشد که علاوه بر مقاومت سطحی به عواملی مانند شرایط آزمایشگاهی و توزیع شدت میدان الکتریکی وابسته است. همانطور که از این جدول مشخص است در آلودگی سبک هیچ جرقه ای اتفاق نمی‌افتد و در آلودگی‌های متوسط و سنگین با افزایش سطح آلودگی متوسط مقاومت سطحی بحرانی تا اندازه ای کاهش یافته است. در مجموع با توجه به خطای احتمالی می‌توان گفت که رنج مقاومت سطحی بحرانی که می‌تواند سبب جرقه گردد در بازه  $(0.55 - 1.4 \text{ M}\Omega/\text{cm})$  قرار دارد.

### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصله می‌توان گفت:

- مقادیر مقاومت سطحی در کلیه نمونه‌ها با افزایش رطوبت کاهش یافته است.
- نرخ کاهش مقاومت در نمونه‌های غیر سرامیکی با افزایش رطوبت خصوصا در رطوبتهای ۸۵٪ و ۹۰٪ دارای مقادیر بالاتری می‌باشد
- نرخ کاهش مقاومت با افزایش رطوبت کمتر از حالتی می‌باشد که سطح آلودگی از آلودگی سبک به آلودگی متوسط می‌رود.
- با توجه به خاصیت آبگریزی و انتقال این خاصیت به لایه‌های آلوده در مقره‌های کامپوزیتی، خصوصا در رطوبتهای بالا ۹۵٪، مقاومت سطحی تحت تاثیر این خاصیت تا اندازه ای در مقره‌های غیر سرامیکی متفاوت می‌باشد که در نمونه‌های ۱ و ۲ این امر مشخص است.
- با توجه به جدول (۲) تفاوت در مقادیر مقاومت بحرانی ناشی از اختلاف در دینامیک فرایند جرقه می‌باشد که علاوه بر مقاومت سطحی به عواملی مانند شرایط آزمایشگاهی و توزیع شدت میدان الکتریکی وابسته است. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده آلودگی سبک هیچ جرقه اتفاق نیافتاده