

## کنترل تنش‌های الکتریکی مقره‌های کامپوزیتی با استفاده از ریزدانه‌های اکسید روی و مقایسه با روش‌های مرسوم

محسن عسگری<sup>۱</sup>، احمد غلامی<sup>۲</sup> و سید محمد شهرتاش<sup>۳</sup>

قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سامانه‌های قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران<sup>۱</sup> mohsen\_asgari@elec.iust.ac.ir

قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سامانه‌های قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران<sup>۲</sup> gholami@iust.ac.ir

قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سامانه‌های قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران<sup>۳</sup> shahrtash@iust.ac.ir

چکیده - یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد مناسب مقره‌های کامپوزیتی، چگونگی توزیع میدان الکتریکی و نحوه کنترل تنش‌های الکتریکی آن‌ها است. یکی از روش‌های کنترل تنش‌های الکتریکی مقره‌ها به‌ویژه در دو بخش انتهایی آن، استفاده از مواد متعادل‌کننده میدان نظیر ریزدانه‌های اکسید روی ( $ZnO$ ) ترکیب شده با سایر مواد پلیمری با مشخصه الکتریکی غیرخطی است. در این مقاله نتایج محاسبات توزیع پتانسیل و توزیع میدان الکتریکی مقره‌های کامپوزیتی مورد استفاده در خطوط انتقال هوایی جریان متناوب ۷۶۵ کیلوولت در شرایط خشک و تمیز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اصول روش کنترل میدان الکتریکی با استفاده از ریزدانه‌های اکسید روی و مقایسه اثربخشی آن با سایر روش‌های متداول نظیر استفاده از حلقه‌های کرونا و هادی‌های باندل ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند استفاده از ریزدانه‌های اکسید روی با مشخصات الکتریکی غیرخطی باعث کاهش چشمگیر بیشینه شدت میدان الکتریکی مقره‌ها شده و با استفاده از این روش توأم با سایر روش‌های معمول می‌توان تنش‌های الکتریکی مقره‌های کامپوزیتی را کاهش و سبب افزایش قابلیت اطمینان سیستم شود. نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی سیستم عایقی خطوط انتقال با ولتاژ بسیار بالا مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه - حلقه کرونا، ریزدانه‌های اکسید روی، کنترل تنش‌های الکتریکی، مقره کامپوزیتی، مواد متعادل‌کننده غیرخطی، هادی باندل.

آلوده و مرطوب در سال‌های اخیر به‌عنوان جایگزین مقره‌های شیشه‌ای و چینی در حال افزایش است. امروزه کاربرد این مقره‌ها فقط محدود به مناطق با آلودگی سنگین نشده و استفاده از آن‌ها در سایر مناطق جغرافیایی نیز در حال گسترش است [۳ و ۲].

برخی از معایب مقره‌های کامپوزیتی عبارت‌اند از [۴-۷]:

(۱) بروز تغییرات شیمیایی در مواد آلی تشکیل‌دهنده این مقره‌ها در انواع تنش‌های الکتریکی نظیر؛ قوس الکتریکی و وقوع کرونا همچنین تنش‌های مکانیکی و محیطی و در نتیجه کاهش عمر آن‌ها

(۲) از دست دادن خاصیت عایقی و خاصیت آب‌گریزی در اثر فرسایش و شیار سطحی

(۳) دشوار بودن تخمین قابلیت اطمینان و عمر باقیمانده آن‌ها

(۴) دشواری یافتن مقره معیوب در طول خطوط انتقال

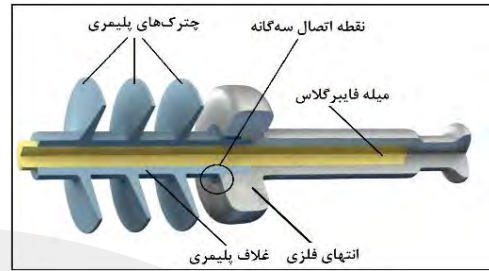
ساختار کلی یک مقره کامپوزیتی در شکل ۱ نشان داده شده است.

### ۱- مقدمه

با توجه به توزیع ناهمگون منابع تولید انرژی الکتریکی و دور بودن آن‌ها از مراکز مصرف، استفاده از خطوط انتقال انرژی الکتریکی با توان بالا و ولتاژ بسیار زیاد و با فواصل طولانی در حال گسترش است [۱].

کشورهای ژاپن، روسیه، ایتالیا، برزیل، کانادا و ایالات متحده آمریکا، از دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ میلادی، از فناوری UHVAC در شبکه برق خود استفاده نموده‌اند. از دهه ۱۹۸۰ میلادی نیز کشور چین استفاده از این سطوح ولتاژ در شبکه انتقال خود را آغاز نموده است. از این‌رو تحقیق و بررسی در خصوص ملزومات و تجهیزات مورد استفاده در این خطوط از جمله مقره‌ها، امری ضروری به نظر می‌رسد. استفاده از مقره‌های کامپوزیتی به دلیل مزایای قابل توجه از جمله داشتن خاصیت آب‌گریزی، سبک‌وزن بودن، هزینه نصب و نگهداری کم، استحکام مکانیکی مناسب، ضد خرابکاری بودن و از همه مهم‌تر عملکرد مناسب در محیط‌های

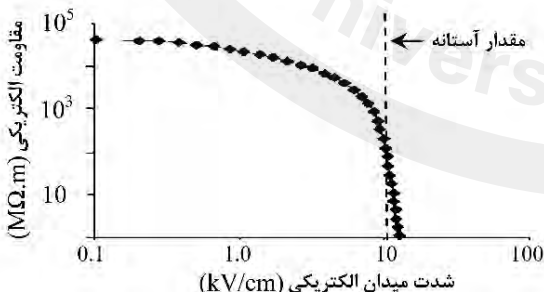
غیرخطی محقق شود. در این مقاله تأثیر استفاده از لایه ریزدانه‌های اکسید روی<sup>۲</sup> به‌عنوان ابزاری جهت کنترل شدت میدان الکتریکی در مقره‌های کامپوزیتی و مقایسه با روش‌های مرسوم کنترل میدان الکتریکی از جمله استفاده از حلقه‌های کرونا و هادی‌های باندل مورد مطالعه قرار گرفته است. در طرح پیشنهادی یک لایه از ریزدانه‌های اکسید روی با مشخصات الکتریکی غیرخطی در ناحیه بین هسته فایبرگلاس و غلاف پلیمری در دو سمت مقره و در نزدیکی انتهای فلزی تعبیه شده است. رسانایی الکتریکی این لایه به‌صورت تابعی از شدت میدان الکتریکی تعریف می‌شود.



شکل ۱: ساختار کلی مقره کامپوزیتی [۸]

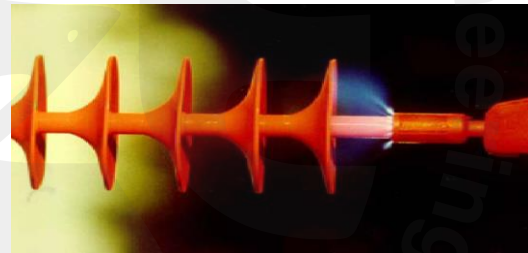
## ۲- ویژگی‌های مواد غیرخطی بر پایه اکسید روی (ZnO)

عملکرد بسیار مناسب برقگیرهای ZnO در مقایسه با سایر تجهیزات حفاظت اضافه ولتاژ عمدتاً به دلیل مشخصه ولتاژ-جریان غیرخطی آن‌ها و قابلیت جذب انرژی آن‌ها است [۱۰]. پیشرفت‌های اخیر در زمینه تولید ریزدانه‌های اکسید روی با ترکیب با مواد سیلیکونی و پلیمری فرصتی را برای کنترل تنش‌های الکتریکی مقره‌های کامپوزیتی فراهم کرده است. همچنین گزارش‌هایی در خصوص استفاده از آن‌ها در سیم‌پیچی‌های ماشین‌های الکتریکی و سرکابل‌ها ارائه شده است [۱۱ و ۱۲]. در مرجع [۱۳] هسته یک مقره کامپوزیتی با پوشش کامل مواد غیرخطی مدل‌سازی شده است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده بهبود عملکرد الکتریکی مقره کامپوزیتی است. در صورت پوشش کامل هسته با مواد متعادل‌کننده غیرخطی، به دلیل بروز جریان نشستی در لایه اکسید روی، تلفات در حالت ماندگار افزایش خواهد یافت و کاربرد این مقره را با چالش مواجه خواهد کرد. ریزدانه‌های الکتروسرامیکی مشابه برقگیرهای اکسید روی دارای مشخصات الکتریکی به شدت غیرخطی هستند. مشخصه الکتریکی ریزدانه‌های اکسید روی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: مقاومت اندازه‌گیری شده کامپوزیت پرشده از ریزدانه‌های اکسید روی برحسب شدت میدان الکتریکی (مقدار آستانه شکست ۱۰ kV/cm) [۱۴]

قسمت‌های مختلف یک مقره کامپوزیتی عبارت‌اند از؛ میله‌ی فایبرگلاس<sup>۱</sup> که از دو طرف به انتهای فلزی متصل شده است. وظیفه اصلی میله فایبرگلاس تقویت استقامت مکانیکی مقره است و به‌عنوان نگهدارنده هادی عمل می‌کند. در مقره‌های ولتاژ بالا حتی در شرایط خشک و تمیز، شدت میدان الکتریکی در سطح مقره به‌ویژه در نقطه اتصال سه‌گانه‌ی هوا، غلاف پلیمری و انتهای فلزی بیشتر از آستانه وقوع کرونا شده و می‌تواند باعث بروز کرونا در سطح مقره شود. در نقاط با شدت میدان بالا به‌خصوص در نزدیکی هادی و سمت برج مقره، وقوع کرونا سبب تنزل وضعیت عایقی مقره و در بدترین حالت سبب وقوع تخلیه الکتریکی خواهد شد. نمونه‌ای از این پدیده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: وقوع کرونا در نقطه اتصال سه‌گانه [۹]

نتایج تحقیقات مؤسسه تحقیقاتی EPRI نشان می‌دهند حداکثر شدت میدان الکتریکی در فاصله ۱۰ میلی‌متری و در امتداد غلاف پلیمری نباید از ۰/۴۲ kV/mm و در نقطه اتصال سه‌گانه نباید از ۰/۳۵ kV/mm تجاوز نماید [۳].

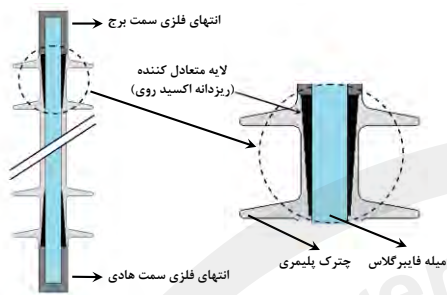
یکی از عوامل اصلی گسترش تخلیه الکتریکی در سطح مقره‌ها، چگونگی توزیع میدان الکتریکی در سطح آن‌ها است که به نوبه خود چگالی جریان را در سطح مقره کنترل می‌کند. از این‌رو مطالعه تنش‌های الکتریکی وارد بر این مقره‌ها و چگونگی توزیع پتانسیل و توزیع میدان الکتریکی در امتداد آن‌ها امری ضروری است [۶].

یکی از راهکارهای مؤثر کاهش احتمال وقوع تخلیه الکتریکی در سطح مقره‌های کامپوزیتی فشارقوی، کاهش شدت میدان الکتریکی در نقاط با شدت میدان بالا است. این امر می‌تواند با کاربرد حلقه‌های کرونا، هادی‌های باندل، متعادل‌کننده‌های خازنی یا مقاومتی و یا مواد

<sup>۲</sup> Zinc oxide microvaristor composites

<sup>۱</sup> Fibre reinforced plastic

متعادل کننده در نزدیکی ترمینال ها ضخیم تر طراحی شده و به شکل مخروطی قرار می گیرد.



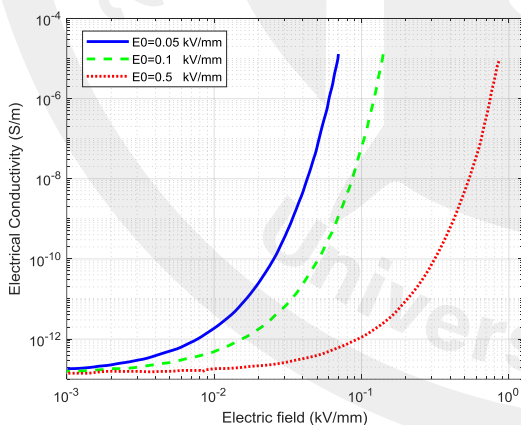
شکل ۴: چگونگی تزریق ریزدانه اکسید روی در مقره کامپوزیتی [۱۴]

رسانایی الکتریکی ریزدانه های اکسید روی با رفتار غیرخطی شدید، می تواند به وسیله یک تابع نمای وابسته به شدت میدان الکتریکی مطابق رابطه (۱) نشان داده شود.

$$\sigma(E) = \sigma_0 \exp(\alpha|E|) \quad (1)$$

که در آن ضریب  $\alpha$  نرخ تغییرات رسانایی الکتریکی طی انتقال از حالت عایق به هادی می باشد. مقدار آستانه شکست باید به اندازه کافی بالا انتخاب شود تا سطح شکست خیلی پایین نباشد. زیرا ممکن است سبب ایجاد یک جریان ثابت در مقره و اعمال تنش بیشتر در داخل مقره شود.

نمونه هایی از مشخصه های میزان رسانایی الکتریکی مواد متعادل کننده بر اساس شدت میدان الکتریکی اعمالی در شکل ۵ نشان داده شده است. هر منحنی با مقدار شدت میدان الکتریکی آستانه ( $E_0$ ) نشان داده شده است.



شکل ۵: منحنی های تغییرات رسانایی مواد متعادل کننده بر حسب میدان الکتریکی

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود بعد از نقطه آستانه، با کمی تغییر در شدت میدان الکتریکی، رسانایی الکتریکی به میزان قابل توجهی افزایش می یابد.

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود ماده ZnO مشخصه الکتریکی غیرخطی شدیدی دارد که با رسیدن میدان الکتریکی به مقدار آستانه<sup>۲</sup>، هدایت الکتریکی به شدت افزایش می یابد.

برای تزریق لایه ریزدانه اکسید روی در مقره های کامپوزیتی روش های مختلفی پیشنهاد شده است [۱۴]:

الف) اضافه کردن یک لایه متعادل کننده بر روی سطح مقره در این روش در شرایط آلوده و مرطوب، هنگامی که شدت میدان الکتریکی در نواحی خشک سطح مقره به آستانه رسانایی ریزدانه های اکسید روی برسد، مواد متعادل کننده شروع به هدایت جریان الکتریکی کرده و پلی بین نواحی خشک ایجاد می کند. این امر می تواند باعث ایجاد تنش حرارتی و تلفات در سطح مقره شده و در نتیجه سبب فرسایش<sup>۴</sup> و ایجاد شیار<sup>۵</sup> در سطح مقره شود که در نهایت منجر به خرابی زودرس مقره خواهد شد. به همین دلیل این روش مناسب مقره های بیرونی<sup>۶</sup> نیست.

ب) افزودن یک لایه نازک استوانه ای از ترکیبات ریزدانه های اکسید روی بین هسته فایبرگلاس و غلاف پلیمری

در این روش هنگامی که شدت میدان الکتریکی به مقدار آستانه رسانایی مواد متعادل کننده می رسد، این مواد سبب توزیع بهتر میدان الکتریکی در امتداد مقره شده و بیشینه شدت میدان را در سطح مقره کاهش می دهند. اما در بهره برداری بلندمدت از این روش نگرانی های وجود دارد زیرا جریان نشستی مداوم سبب ایجاد تلفات غیر قابل قبول در خطوط انتقال و پست ها می شود همچنین این تلفات سبب گرم شدن داخل مقره شده و به آن آسیب وارد می کند و در بدترین شرایط در صورتی که شدت میدان در داخل مقره از حدی بیشتر شود لایه اکسید روی سبب اتصال کوتاه بین ترمینال های مقره شده و جریان شدیدی از ترمینال سمت هادی به ترمینال سمت زمین عبور خواهد کرد که سبب قطعی و خاموشی خط خواهد شد.

ج) تزریق مواد متعادل کننده اکسید روی بین هسته فایبرگلاس و غلاف پلیمری به صورت مخروطی

با توجه به موارد مطرح شده در بند الف و ب، طراحی لایه متعادل کننده با استفاده از ترکیبات ریزدانه اکسید روی باید به گونه ای باشد که ضعف های روش های قبلی را پوشش دهد. مطابق شکل ۴ در این روش مواد متعادل کننده بین هسته فایبرگلاس و غلاف پلیمری فقط در نزدیکی انتهای فلزی طرفین مقره در سمت هادی و زمین به صورت مخروطی به سمت بخش میانی مقره تزریق می شود. به دلیل شدت میدان الکتریکی بالاتر در نقطه اتصال غلاف پلیمری و انتهای فلزی و همچنین به منظور چسبیدن بهتر به مواد پلیمری، لایه

<sup>۵</sup> Tracking

<sup>۶</sup> Outdoor Insulators

<sup>۲</sup> Switching threshold

<sup>۴</sup> Erosion

ریزدانه‌های بر توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی این مقره‌ها ارائه می‌گردد.

#### ۴-۱- ارزیابی تأثیر حلقه کرونا بر توزیع میدان الکتریکی مقره‌های کامپوزیتی

یکی از روش‌های تعدیل بیشینه شدت میدان الکتریکی مقره‌ها استفاده از حلقه کرونا می‌باشد. اما تاکنون استاندارد مشخصی برای طراحی، کاربرد و مکان نصب حلقه‌های کرونا در سطوح ولتاژ مختلف تدوین نشده است و سازندگان مختلف ابعاد مختلف در سطوح ولتاژ مختلف را ارائه می‌کنند [۶].

در شکل ۶ دو انتهای فلزی مقره کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت نشان داده است. در سمت فاز این مقره حلقه کرونا نصب شده و سمت برج آن فاقد حلقه کرونا بوده است.



شکل ۶: خسارت وارد بر انتهای فلزی مقره کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت الف) فاقد حلقه کرونا ب) با حلقه کرونا [۹]

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، انتهای فلزی سمت زمین در اثر وقوع پدیده کرونا و قوس الکتریکی دچار خوردگی و فرسایش شده است.

در صورت عدم نصب حلقه کرونا شدت میدان الکتریکی به حدی بالا خواهد بود که سبب وقوع کرونا خواهد شد. از سطح ولتاژ ۲۲۰ kV و بالاتر استفاده از حلقه کرونا برای محدود کردن شدت میدان الکتریکی ضروری است. هرچند ممکن است با توجه به پیکربندی برج و فاصله بین فازها استفاده از حلقه کرونا برای سطوح ولتاژ پایین‌تر نیز لازم باشد [۳]. برای خطوط ۳۴۵ کیلوولت و بالاتر به دو حلقه کرونا یکی در سمت فاز و دیگری در سمت زمین (برج) نیاز می‌باشد [۶]. به‌منظور بررسی حلقه‌های کرونا پیشنهادی سازندگان مختلف، محاسبات میدان الکتریکی در امتداد مقره کامپوزیتی سطوح ولتاژ مختلف از ۱۱۵ تا ۷۶۵ کیلوولت تولید چند سازنده مختلف از جمله Sediver، NGK Locke، OHIO BRASS، DCI و غیره انجام شده است که نتایج محاسبات در شکل ۷ نشان داده شده است. ابعاد مقره‌ها و حلقه‌های کرونا به منظور انجام شبیه‌سازی از کاتالوگ سازنده‌ها استخراج شده است.

#### ۳- مشخصات هندسی مقره و مدل محاسباتی

در این مقاله یک مقره کامپوزیتی ۷۶۵ kV ساخت شرکت NGK در شرایط خشک و تمیز با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics 5.4 که بر روش المان محدود استوار است، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این مقره در دو سمت فاز و سمت زمین دو حلقه کرونا با ابعاد مختلف پیشنهاد شده است. سازنده برای حلقه کرونای سمت فاز، ارتفاع ۳۰ mm، قطر ۳۸۱ mm و ضخامت ۵۱ mm را پیشنهاد داده است. ابعاد مقره و سایر مشخصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است [۱۵].

جدول ۱: مشخصات مقره و حلقه کرونا

مشخصه فیزیکی	مقدار
طول مقره	۴۹۶۰ میلی‌متر
قطر چترک بزرگ/کوچک	۱۰۲/۱۳۲ میلی‌متر
تعداد چترک‌های بزرگ/کوچک	۷۶/۷۷
قطر حلقه کرونای سمت فاز	۲۸۱ میلی‌متر
قطر حلقه کرونای سمت زمین	۲۸۰ میلی‌متر

مشخصات الکتریکی بخش‌های مختلف مقره کامپوزیتی در

جدول ۲ نشان داده شده است.

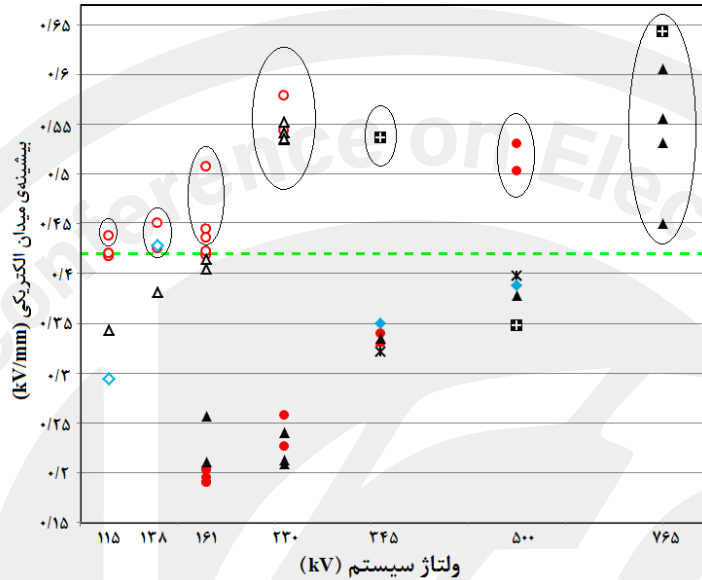
جدول ۲: مشخصات الکتریکی مواد

نوع ماده	ضریب گذردهی الکتریکی نسبی ( $\epsilon_r$ )	رسانایی الکتریکی ( $\sigma$ S/m)
هوا	۱	$10^{-13}$
فولاد	۱	$1/67 \times 10^6$
میله فایبرگلاس	۷/۲	$10^{-13}$
سیلیکون رابر	۴/۵	$10^{-13}$
ریزدانه‌های اکسید روی	۱۲	$\sigma = f(E)$

ولتاژ مؤثر ۷۶۵ kV به ترمینال سمت هادی مقره و سمت دیگر مقره به برج که زمین شده، متصل شده است. هوای اطراف مقره به‌منظور کاهش تأثیر بر توزیع پتانسیل و توزیع میدان الکتریکی مقره به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است. در این مقاله اثر برج نیز در شبیه‌سازی‌ها لحاظ شده است.

#### ۴- روش‌های کنترل تنش‌های الکتریکی مقره‌های کامپوزیتی

در این بخش در ابتدا به روش‌های مرسوم کنترل میدان الکتریکی مقره‌های کامپوزیتی نظیر استفاده از حلقه‌های کرونا و استفاده از هادی‌های باندا پرداخته شده و در ادامه شبیه‌سازی‌های تأثیر



شکل ۷: بیشینه‌ی میدان الکتریکی سطح غلاف پلیمری مقره‌های کامپوزیتی با سطوح ولتاژ مختلف سازندگان مختلف

مقره‌های کامپوزیتی بسیار مهم است که این امر برای مقره ۷۶۵ کیلوولت مورد مطالعه در این مقاله، در مرجع [۱۶] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد پس از بهینه‌سازی ابعاد حلقه کرونا تکی، میزان بیشینه شدت میدان الکتریکی نسبت به مقادیر پیشنهادی سازنده حدود ۳۰٪ کاهش یافته است. همچنین پس از استفاده از حلقه کرونا دوگانه با ابعاد بهینه بیشینه شدت میدان الکتریکی در سطح غلاف پلیمری مقره، بیش از ۵۹٪ کاهش یافته است.

جدول ۳: مقادیر بیشینه میدان الکتریکی پس از بهینه‌سازی حلقه کرونا

مقره ۷۶۵ کیلوولت [۱۶]

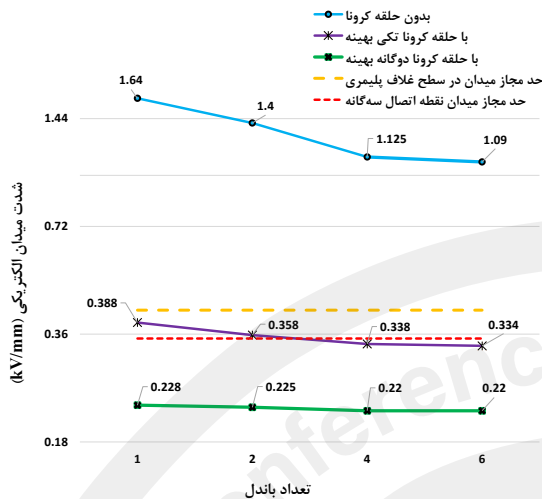
میزان کاهش بیشینه شدت میدان (%)	بیشینه شدت میدان (kV/mm)	حلقه کرونا پیشنهادی سازنده
-	۰/۵۵۸	حلقه کرونا تکی بهینه
۳۰	۰/۳۸۸	حلقه کرونا دوگانه بهینه
۵۹	۰/۲۲۸	

#### ۴-۲- ارزیابی تأثیر هادی‌های باندل بر توزیع میدان الکتریکی مقره‌های کامپوزیتی

معمولاً در خطوط با ولتاژ بالا و بسیار بالا از هادی‌های باندل که در هر فاز بیش از یک هادی دارد استفاده می‌کنند. این کار باعث کاهش میدان الکتریکی سطح هادی‌ها می‌شود. در این مقاله

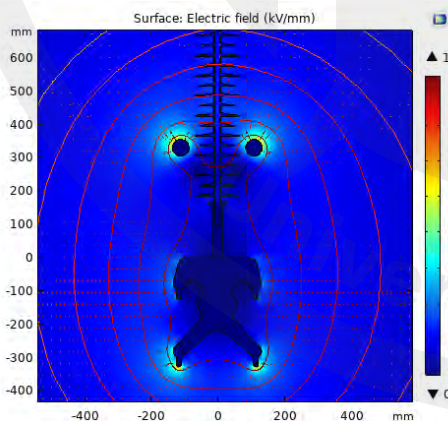
همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود بیشینه‌ی میدان الکتریکی سطح غلاف پلیمری مقره‌ها مقادیر مختلفی بین ۰/۱۹ kV/mm تا ۰/۶۴۳ kV/mm دارند. نتایج محاسبات نشان می‌دهند ممکن است بیشینه میدان الکتریکی یک مقره ۱۳۸ یا ۱۶۱ کیلوولت بدون حلقه کرونا، از میدان الکتریکی یک مقره ۳۴۵ یا ۵۰۰ کیلوولت با حلقه کرونا، بیش‌تر شود. همچنین بیشینه میدان الکتریکی سطح غلاف پلیمری مقره‌های کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت مختلف بدون حلقه کرونا از مقدار مجاز خیلی بیش‌تر شده است. بنابراین برای مقره‌های ۲۳۰ کیلوولت و بالاتر لازم است حلقه کرونا نصب شود. کاهش شدت میدان الکتریکی مقره‌های پلیمری ۲۳۰ کیلوولت بعد از نصب حلقه کرونا به خوبی مشاهده می‌شود. بیشینه میدان الکتریکی برخی از مقره‌های ۵۰۰ و ۷۶۵ کیلوولت سازندگان مختلف حتی در حضور حلقه کرونا نیز فراتر از حد مجاز شده‌اند. بنابراین لازم است میدان الکتریکی این مقره‌ها با استفاده از روش‌های دیگر از جمله هادی‌های باندل یا مواد متعادل‌کننده غیرخطی نظیر ریزدانه‌های اکسید روی، علاوه بر استفاده از حلقه کرونا تعدیل شود.

همچنین اندازه نامناسب حلقه‌های کرونا و یا مکان نصب نامناسب می‌تواند باعث وقوع کرونا و خرابی نابهنگام مقره‌ها شود. بنابراین طراحی بهینه ابعاد و محل نصب حلقه کرونا نیز در کارایی



شکل ۱۰: بیشینه شدت میدان الکتریکی مقره کامپوزیتی ۷۶۵ کیلوولت بر حسب تعداد باندد

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، پس از استفاده از حلقه کرونا با ابعاد بهینه، شدت میدان الکتریکی شدیداً کاهش یافته و می‌توان نتیجه گرفت تأثیر استفاده از حلقه کرونا به مراتب بیشتر از استفاده از هادی‌های باندد است. در افزایش تعداد باندد های یک خط محدودیت‌های فنی و اقتصادی وجود دارد، همچنین با توجه به شکل ۱۰، باندد ۶ تایی در مقایسه با باندد ۴ تایی تأثیر زیادی در کاهش شدت میدان نداشته است. از این رو برای خط ۷۶۵ kV موردنظر، باندد ۴ تایی توصیه می‌گردد. نمودار گرافیکی شدت میدان الکتریکی به همراه خطوط هم‌پتانسیل با حلقه کرونا و باندد ۴ تایی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



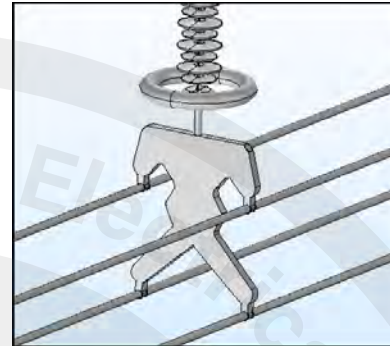
شکل ۱۱: توزیع میدان الکتریکی و خطوط هم‌پتانسیل در اطراف مقره کامپوزیتی ۷۶۵ کیلوولت

### ۴-۳- تأثیر ریزدانه‌های اکسید روی بر کنترل شدت میدان الکتریکی مقره‌های کامپوزیتی

به‌منظور ارزیابی تأثیر ریزدانه‌های اکسید روی بر توزیع میدان

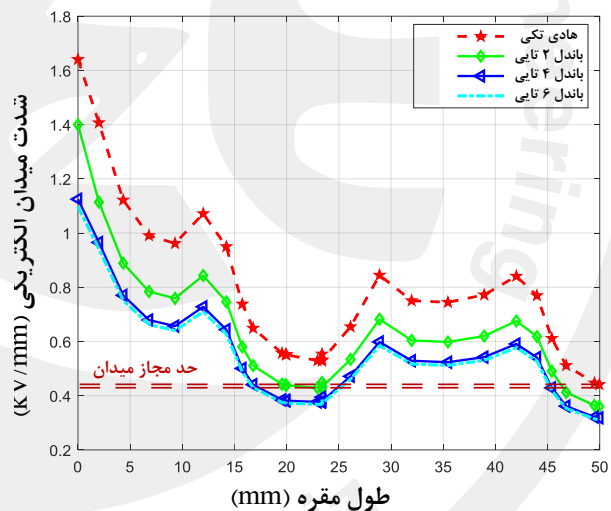
برای مقره کامپوزیتی ۷۶۵ کیلوولت، هادی‌های ۱، ۲، ۴، ۶ تایی مدل‌سازی شده است.

نمونه‌ای از مقره ۷۶۵ کیلوولت با باندد ۴ تایی و حلقه کرونا در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: مدل‌سازی مقره پلیمری ۷۶۵ کیلوولت با هادی باندد ۴ تایی و حلقه کرونا با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks

منحنی توزیع میدان الکتریکی ۵۰ میلی‌متر ابتدایی سطح غلاف پلیمری مقره ۷۶۵ کیلوولت با هادی تکی، ۲ تایی، ۴ تایی و ۶ تایی بدون حضور حلقه کرونا در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: توزیع میدان الکتریکی در راستای مقره ۷۶۵ کیلوولت با هادی با تعداد باندد مختلف

همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد باندد ها بیشینه‌ی میدان الکتریکی سطح مقره کاهش می‌یابد. اما به دلیل این‌که در شبیه‌سازی از حلقه کرونا استفاده نشده است شدت میدان بسیار بیشتر از حد مجاز ۰/۴۲ kV/mm شده است. مقادیر بیشینه شدت میدان الکتریکی مقره کامپوزیتی ۷۶۵ کیلوولت با و بدون حلقه‌های کرونا با ابعاد بهینه مستخرج از مرجع [۱۶] در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۴: میزان بهبود عملکرد مقره بر اساس کاهش شدت میدان الکتریکی

میزان تغییر (%)	بدون ماده متعادل کننده	با ماده متعادل کننده $E_0=0.05kV/mm$
۲۵/۶۷	۱/۶۴	۱/۲۱۹
۲۳	۰/۳۳۰	۰/۲۵۴

با توجه به جدول ۴، علیرغم کاهش چشمگیر شدت میدان الکتریکی در دو سمت مقره و افزایش آن در بخش‌های میانی، شدت میدان از حد مجاز  $0.42 kV/mm$  بالاتر است. این امر نشان می‌دهد که استفاده از این روش به تنهایی در ولتاژهای بسیار بالا به منظور کنترل تنش‌های الکتریکی کافی نبوده و لازم است به منظور کاهش شدت میدان به کمتر از حد مجاز، از سایر روش‌ها نظیر استفاده از حلقه‌های کرونا و هادی‌های باندل نیز به صورت ترکیبی استفاده نمود.

بیشینه شدت میدان الکتریکی سطح غلاف پلیمری مقره ۷۶۵ کیلوولت و میزان کاهش هر روش، در حالت‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است.

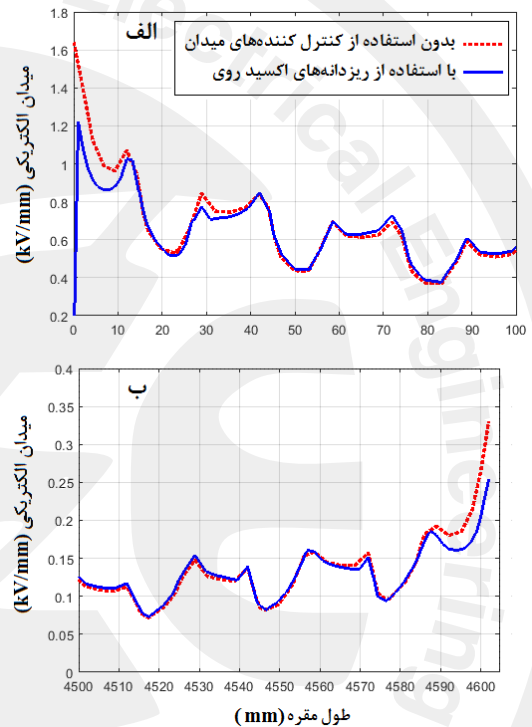
جدول ۵: مقدار بیشینه شدت میدان الکتریکی مقره ۷۶۵ کیلوولت و میزان کاهش شدت میدان هر روش

میزان کاهش بیشینه شدت میدان (%)	بیشینه شدت میدان ( $kV/mm$ )	بدون کنترل کننده میدان
-	۱/۶۴	حلقه کرونا تکي بهینه
۷۶/۳۴	۰/۳۸۸	حلقه کرونا دوگانه بهینه
۸۶/۱	۰/۲۲۸	باندل ۶ تایی
۳۳/۵۳	۱/۰۹	ریزدانه اکسید روی
۲۵/۶۷	۱/۲۱۹	

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، استفاده از حلقه کرونا دوگانه با ابعاد بهینه بیشترین تأثیر را در کاهش شدت میدان الکتریکی دارد. اما توصیه می‌شود از ترکیب روش‌های فوق به منظور کنترل تنش‌های الکتریکی مقره‌های با ولتاژ بسیار بالا استفاده شود. همان‌طور که در بخش ۴-۱ اشاره شد، استفاده از حلقه‌های کرونا برای مقره‌های بالای  $220 kV$  ضروری است. شبیه‌سازی‌ها برای حالت استفاده از هر سه روش نیز انجام شده است. در صورت استفاده از حلقه کرونی دوگانه با ابعاد بهینه، هادی باندل ۶ تایی و استفاده از مواد متعادل کننده ریزدانه‌های اکسید روی در مقره، بیشینه شدت میدان الکتریکی  $0.218 kV/mm$  خواهد شد که با حد مجاز  $0.42 kV/mm$  سطح غلاف پلیمری و مقدار  $0.35 kV/mm$  نقطه اتصال سه‌گانه فاصله قابل قبولی داشته و در این صورت احتمال وقوع کرونا و فرسودگی مقره کاهش یافته و در نهایت احتمال وقوع تخلیه الکتریکی سطحی کم شده و قابلیت اطمینان سیستم افزایش پیدا خواهد کرد.

الکتریکی مقره‌های کامپوزیتی، یک لایه مواد متعادل کننده به شکل مخروطی مشابه شکل ۴، بین هسته فایبرگلاس و غلاف پلیمری تا چترک سوم طرفین مقره و با رسانایی غیرخطی وابسته به شدت میدان الکتریکی با آستانه شکست  $0.05 kV/mm$  مطابق منحنی شکل ۵ در نظر گرفته شده است.

منحنی توزیع شدت میدان الکتریکی در امتداد طول مقره بدون کنترل کننده‌های میدان و با استفاده از ماده متعادل کننده اکسید روی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: منحنی توزیع میدان الکتریکی در امتداد مقره‌های کامپوزیتی ۷۶۵ کیلوولت، (الف) سمت فاز (ب) سمت زمین

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، با به کار بردن ریزدانه‌های اکسید روی در طرفین مقره، میدان الکتریکی ابتدا و انتهای مقره کاهش یافته و توزیع آن خطی‌تر شده است. علت این امر دور شدن خطوط هم‌پتانسیل و کاهش فشردگی آن‌ها از نزدیکی ترمینال‌های مقره به سمت قسمت‌های میانی آن است. پس از این که شدت میدان الکتریکی به مقدار آستانه مواد متعادل کننده می‌رسد ریزدانه‌های اکسید روی شروع به هدایت کرده و توزیع پتانسیل در طول آن‌ها تغییر کرده و یکنواخت‌تر شده و در نتیجه سبب کاهش شدت میدان در ترمینال‌های مقره و افزایش آن در بخش‌های میانی می‌شود.

میزان کاهش شدت میدان الکتریکی مقره که نشان دهنده عملکرد مطلوب ریزدانه‌های اکسید روی است، در جدول ۴ نشان داده شده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

## مراجع

- [1] Zheng Xu, Huanfeng Dong and Hongyang Huang, "Debates on ultra-high-voltage synchronous power grid: the future super grid in China?" IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 9, Issue: 8, pp. 740 - 747, 2015.
- [2] R. Hackam, "Outdoor HV composite polymeric insulators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, pp. 557-585, 1999.
- [3] A. Phillips, A. Maxwell, C. Engelbrecht and I. Gutman, "Electric field limits for the design of grading rings for composite line insulators" *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 30, No. 3, pp. 1110-1118, 2015.
- [4] T. Doshi, R. S. Gorur, "Electric field computation of composite line insulators up to 1200 kV AC," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18, No. 3, pp. 861-867, June 2011.
- [5] B. Marungsri, W. Onchantuek, A. Oonsivilai, and T. Kulworawanichpong, "Analysis of electric field and potential distributions along surface of silicone rubber insulators under various contamination conditions using finite element method" *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 53, pp. 1353-1363, 2009.
- [6] A. J. Phillips, J. Kuffel, A. Baker, J. Burnham, A. Carreira, E. Cherney, W. Chisholm, M. Farzaneh, R. Gemignani, A. Gillespie, T. Grisham, R. Hill, T. Saha, B. Vancia, and J. Yu, "Electric fields on AC composite transmission line insulators" *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 23, No. 2, April 2008.
- [7] C. A. Spellman, H. M. Young, A. Haddad, A. R. Rowlands, and R. T. Waters, "Survey of polymeric insulator ageing factors", 11<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), pp. Vol. 4, pp.160-163, London (UK), 1999.
- [8] OHIO BRASS, HUBBELL power systems, Polymer insulators catalog, No. 24, January 2011.
- [9] A. Phillips, "Application of polymer insulators (NCI): workshop presentations" 1002660, EPRI, Palo Alto, California, January 2003.
- [10] A. Haddad and D. F. Warne, "Advances in High Voltage Engineering", The Institution of Electrical Engineers, Power Series, Vol. 40, London (UK), 2004.
- [11] R. Strobl, W. Haverkamp, G. Malin, and F. Fitzgerald, "Medium voltage terminations using an advanced stress control technology", IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. Exposition, Atlanta (USA), Vol. 2, pp. 771-775, 2001.
- [12] D. Weida, S. Bohmelt, and M. Clemens, "Design of ZnO microvaristor end corona protection for electrical machines", IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), pp. 1-4, San Diego (USA), 2010.
- [13] D. Weida, T. Steinmetz, and M. Clemens, "Electro-Quasistatic High Voltage Field Simulations of Large Scale Insulator Structures Including 2-D Models for Nonlinear Field-Grading Material Layers", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, pp. 980-983, 2009.
- [14] R. Abd-Rahman, A. Haddad, N. Harid, and H. Griffiths, "Stress control on polymeric outdoor insulators using zinc oxide microvaristor composites," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.19, no. 2, pp. 705-713, April 2012.
- [15] NGK Locke polymer insulators 69kV to 765kV catalog, No. 161, Virginia Beach, Virginia, USA, 2016.

[۱۶] محسن عسگری، احمد غلامی و سید محمد شهرتاش "طراحی بهینه حلقه کرونا به صورت تکی و دوگانه برای مقره‌های کامپوزیتی ۷۶۵ کیلوولت مبتنی بر تحلیل میدان الکتریکی"، بیست و هفتمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه یزد، اردیبهشت ۱۳۹۸.

تحلیل میدان الکتریکی و روش‌های کنترل آن یکی از مهم‌ترین اصول در طراحی، انتخاب و کاربرد مقره‌های کامپوزیتی است. یکی از روش‌های کارآمد در طراحی و تحلیل مقره‌ها، استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری است که در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند. در این مقاله مقره کامپوزیتی ۷۶۵ کیلوولت در شرایط خشک و تمیز مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، نتایج زیر به دست می‌آیند:

یکی از روش‌های متداول کنترل شدت میدان الکتریکی مقره‌ها استفاده از حلقه‌های کرونا می‌باشد که تاکنون استاندارد مشخصی نیز برای آن ارائه نشده است. سازندگان مختلف ابعاد مختلفی را در سطوح ولتاژ مختلف پیشنهاد می‌دهند که نتایج شبیه‌سازی‌های این مقاله نشان می‌دهند که تنش الکتریکی برخی از مقره‌ها با وجود نصب حلقه کرونا فراتر از حد مجاز می‌باشند و لازم است در مرحله طراحی این موارد مورد بررسی بیشتر قرار گیرند. همچنین در صورتی که ابعاد حلقه کرونا به درستی انتخاب نشود تأثیر مورد انتظار را نخواهد داشت.

یکی دیگر از روش‌های متداول کنترل شدت میدان الکتریکی مقره‌ها، استفاده از هادی‌های باندل می‌باشد. تعداد هادی‌های باندل به بحث‌های طراحی و مباحث فنی و اقتصادی خط وابسته است و نمی‌توان تعداد آن‌ها را بیش از حد بالا برد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها برای مقره مورد مطالعه در این مقاله، باندل ۴ تایی توصیه می‌گردد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند تأثیر هادی باندل در کنترل تنش‌های الکتریکی مقره، به اندازه حلقه کرونا نیست و ترکیب این روش‌ها می‌تواند در کنترل میدان مؤثر باشد.

در این مقاله علاوه بر روش‌های معمول نظیر استفاده از هادی‌های باندل و حلقه کرونا روش دیگری به منظور کنترل شدت میدان الکتریکی مقره‌های کامپوزیتی، مورد بررسی و مقایسه با سایر روش‌ها قرار گرفت. این روش شامل قرار دادن یک لایه متعادل‌کننده ریزدانه اکسید روی در نزدیکی ترمینال‌های سمت هادی و سمت برج مقره است. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهند که با وارد کردن ماده متعادل‌کننده ZnO توزیع میدان الکتریکی در امتداد مقره کامپوزیتی به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد که در نتیجه نقاط گرم سطح مقره کاهش یافته و از تشکیل باند خشک و تخلیه الکتریکی جلوگیری می‌شود که می‌تواند در کاهش شدت میدان الکتریکی مقره‌ها در محدوده مجاز در کنار سایر روش‌ها به کار رود.