

بررسی تزریق لایه ریزدانه‌های اکسیدروی در پوشش عایقی برق‌گیر و طراحی بهینه ابعاد آن با هدف توزیع یکنواخت میدان

رضا شریعتی‌نسب^۱، استادیار، علی‌اکبر سالاری^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - shariatinasab@birjand.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - aliakbarsalari65@gmail.com

چکیده: ابعاد و شکل پوشش عایقی برق‌گیر تأثیر بسزایی در توزیع میدان الکتریکی آن دارد. لذا باهدف یکنواخت کردن توزیع میدان، می‌توان طول بهینه سپرهای پوشش عایقی برق‌گیر را به دست آورده و شدت تنش‌های الکتریکی بالا در مجاورت ترمینال‌های برق‌گیر را کاهش داد. روش دیگر برای کاهش شدت میدان استفاده از یک لایه‌ی ریزدانه‌ی اکسیدروی است که به دلیل غیرخطی بودن رسانایی آن باعث کاهش شدت میدان الکتریکی روی سطح پوشش عایقی می‌گردد. چراکه با عبور شدت میدان از یک مقدار مشخص، ریزدانه‌ها رسانا شده و باعث یکنواخت‌تر شدن میدان می‌گردند. به این منظور می‌توان از یک لایه‌ی نازک از ریزدانه‌های اکسیدروی در پوشش عایقی برق‌گیر استفاده کرد. در این مقاله تأثیر استفاده از ریزدانه‌های اکسیدروی در پوشش عایقی برق‌گیر بر توزیع میدان بررسی شده و با تغییر محل ریزدانه‌ها، محل مناسب برای تزریق آن‌ها در پوشش عایقی برق‌گیر به دست آمده است. همچنین تأثیر ابعاد بهینه پوشش عایقی و لایه ریزدانه در توزیع میدان الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. به این ترتیب، با کمینه شدن میدان الکتریکی در نواحی‌ای که شدت میدان در آن نقاط زیاد است، طول عمر برق‌گیر افزایش پیدا خواهد کرد. در این مقاله توزیع میدان به روش اجزاء محدود به دست آمده و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات انجام گرفته است.

واژه‌های کلیدی: اجزاء محدود، توزیع میدان الکتریکی، برق‌گیر، ریزدانه اکسیدروی، بهینه‌سازی اجتماع ذرات.

Optimization of ZnO Microvaristor Layers in Arrester's Housing in order to Uniform Electric Field Distribution

R. Shariatinasab, Assistant Professor¹, A. A. Salari, M.Sc. Student²

1-2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
shariatinasab@birjand.ac.ir¹, aliakbarsalari65@gmail.com²

Abstract: The size and shape of the arrester housing have a significant influence on the electric field distribution. Therefore, it is possible to uniform the field distribution and improve the stresses across the regions of high field density, i.e. the vicinity of the arrester's terminals, if the shape of the insulating sheds were optimized. As an alternative to reduce the intensity of the electric field, it is possible to use a thin layer of ZnO microvaristor that is mixed with the polymer housing of the arrester. In this paper the effect of ZnO microvaristor in electric field distribution has been investigated and its proper location along the axis of arrester's housing is determined. Thereafter, by means of swarm optimization algorithm (PSO), the effect of the optimal layer of such ZnO microvaristor on the electric field has been studied.

Keywords: Finite element, electric field distribution, surge arrester, microvaristors, particle swarm optimization.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۳/۰۱/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۳/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۰۶/۲۶

نام نویسنده مسئول: رضا شریعتی‌نسب

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - بلوار شهید آوینی - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

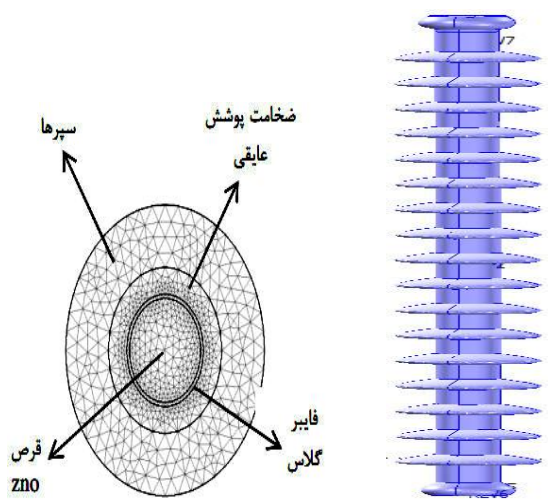
۱- مقدمه

میدان الکتریکی در شرایط بارانی بررسی شده است؛ با این حال پس از انجام تست خوردگی مشخص شده که این حالت برای برق‌گیرهایی که در محیط‌های آزاد استفاده می‌شوند مناسب نیست.

در این مقاله، نخست تأثیر تزریق لایه ریزدانه اکسیدروی در پوشش عایقی برق‌گیر بر روی توزیع میدان مورد مطالعه قرار گرفته و سپس تأثیر کمی محل تزریق لایه ریزدانه بر توزیع میدان بررسی شده است. در نهایت پس از تعیین محل مناسب برای تزریق لایه ریزدانه، ابعاد بهینه آن به منظور یکنواخت کردن توزیع میدان تعیین شده است.

۲- مدل‌سازی برق‌گیر

برق‌گیر مدل‌شده، یک برق‌گیر ABB EXLIM با ولتاژ نامی ۲۲۰ kV است که در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱): برق‌گیر مورد مطالعه (الف) نمای طولی برق‌گیر (ب) نمای برش عرضی

شکل (۱): برق‌گیر مورد مطالعه

اطلاعات مربوط به ابعاد و ساختمان برق‌گیر مورد بررسی، طبق

کاتالوگ کارخانه سازنده، به صورت زیر است:

- ارتفاع برق‌گیر: ۱۸۷ سانتی‌متر
 - قطر قرص‌های ZnO: ۶ سانتی‌متر
 - قطر سپرها: ۳۶ سانتی‌متر
 - ضخامت لایه‌ی فایبرگلاس: ۲ سانتی‌متر
- ضریب دی‌الکتریک مواد به کاررفته در ساختمان برق‌گیر در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): ضرایب دی‌الکتریک مواد مورد استفاده

ماده	ضریب دی‌الکتریک
قرص ZnO	۱۰۰
لایه فایبرگلاس	۳/۹
پوشش عایقی خارجی	۴/۶
قطعات فلزی	۱۰۰۰
حلقه حفاظتی Grading Ring	۱۲

در سیستم‌های قدرت و شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی، تک‌تک تجهیزات نقش اساسی دارند و بروز هرگونه عیبی در آن‌ها، ایجاد اختلال در شبکه، اتصال کوتاه و قطع برق را به همراه دارد. خاموشی و جایگزینی تجهیزات معیوب هزینه‌های هنگفتی را به شبکه تحمیل می‌کند. صرفه‌جویی ناشی از کاهش بروز عیب در شبکه بدون محافظت و مراقبت از تجهیزات امکان‌پذیر نیست. اضافه ولتاژهایی نظیر اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه، کلیدزنی و اضافه ولتاژهای موقت که از به وجود آمدن آن‌ها در سیستم به‌طور کامل نمی‌توان جلوگیری نمود موجب بروز مشکلاتی می‌شوند.

با پیشرفت در ساخت مقاومت‌های غیرخطی وابسته به جریان که منجر به تولید برق‌گیرهای اکسید فلزی گردید، گام بزرگی در کنترل اضافه ولتاژها برداشته شد. هرچند وظیفه برق‌گیر حفاظت شبکه در برابر اضافه ولتاژها است، اما بروز اشکال در خود برق‌گیر علاوه بر تحمیل هزینه بالای تهیه و نصب آن، شبکه‌های قدرت را نیز به خاموشی می‌برد؛ به‌طوری‌که در پاره‌ای از موارد خسارت وارده از این نظر بیشتر از هزینه نصب و نگهداری برق‌گیرها است. مزیت عمده برق‌گیرهای اکسیدروی، در مقایسه با سایر ادوات حفاظتی، مشخصه غیرخطی ولتاژ-جریان و قابلیت جذب انرژی بالای آن است [۱].

از طرفی در سال‌های اخیر عایق‌های پلیمری مقبولیت وسیعی نسبت به عایق‌های شیشه‌ای و چینی پیدا کرده‌اند. مزیت عمده آن‌ها سبک بودن، استقامت مکانیکی بالا، هزینه نصب کمتر و عملکرد الکتریکی خوب آن‌ها در محیط‌های به‌شدت آلوده است [۲].

توزیع غیریکنواخت میدان الکتریکی در برق‌گیر امکان آسیب‌های جدی در اثر شکست الکتریکی در داخل و خارج برق‌گیر را افزایش می‌دهد. بررسی‌های مختلفی در مورد توزیع میدان در برق‌گیرها انجام شده که نشان می‌دهند یکنواخت کردن شدت میدان در مجاورت ترمینال فشارقوی و زمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا شدت میدان در مجاورت این ترمینال‌ها از سایر نقاط بیشتر است. این عامل باعث فرسودگی زودرس قرص‌هایی می‌شود که در مجاورت این ترمینال‌ها قرار گرفته‌اند.

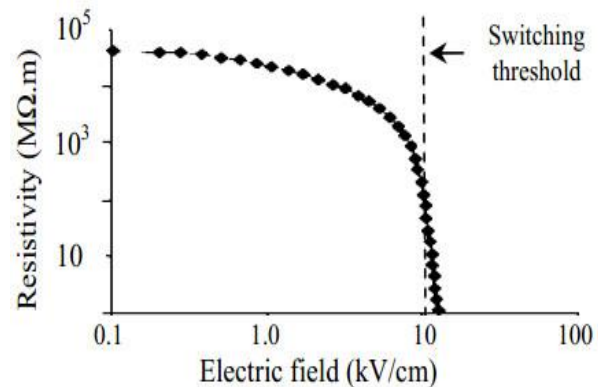
یک راه برای کاهش شدت میدان در برق‌گیرها، بهینه کردن شعاع و فاصله حلقه‌های محافظ از ترمینال‌های فشارقوی و زمین است [۳]. مقایسه توزیع ولتاژ و میدان در شرایط عادی و زمانی که در سپرهای برق‌گیر شکستگی ایجاد شود نشان می‌دهد که موقعیت سپر شکسته شده در توزیع ولتاژ و میدان تأثیر بسزایی دارد [۴].

در طراحی‌های جدید از یک لایه‌ی نازک میکروورستور (ریزدانه اکسیدروی) استفاده می‌شود که باعث بهبود توزیع میدان و حرارت در سطح عایق شده است [۵]. در [۶] و [۷]، کل ستون اطراف قرص‌های اکسید فلز در هسته برق‌گیر با لایه ریزدانه پوشش داده شده و تأثیر کمی آن بر توزیع میدان به روش اجزاء محدود به دست آمده است. در [۸] سطح خارجی عایق برق‌گیر با لایه ریزدانه پوشش داده شده و

۳- ریزدانه‌های اکسیدروی

تولید ریزدانه اکسیدروی عملی نسبتاً پیچیده است که نیاز به تکنیک‌ها و تجهیزات پیشرفته‌ای دارد [۹]. عموماً برای ساخت ریزدانه از دوغابی از اکسیدروی و موادی مانند بیسموت، آنتیموان، منگنز و کبالت که باعث تغلیظ این ترکیب می‌شوند استفاده می‌شود. سپس این ترکیب مایع به روی ذرات ریز نیمه‌هادی ورستور به صورت اسپری پاشیده می‌شود. بعد از آن این ترکیب در دمای ۹۰۰-۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده و به ذراتی با قطر ۳۰۰-۳ میکرومتر دسته‌بندی می‌شود. این ذرات حاصله را ریزدانه‌ی اکسیدروی می‌نامند. خواص این ریزدانه‌ها به درجه حرارت و مواد ترکیب‌شده در دوغاب وابسته است [۱۰].

این ریزدانه‌ها با الاستومرها ترکیب و ماده‌ای ارتجاعی ساخته می‌شود که با توجه به کاربرد موردنظر می‌توان آن را به شکل‌های مختلف در آورد. ریزدانه‌های اکسیدروی مانند قرص‌های اکسیدروی، مشخصه غیرخطی شدیدی از خود نشان می‌دهند. ریزدانه‌ها زمانی عملکرد مؤثری خواهند داشت که میدان اعمال‌شده‌ی محلی بر روی آن‌ها، از ولتاژ شکست آن‌ها بیشتر شود. در این حالت ریزدانه وارد ناحیه هدایت می‌شود. شکل (۲) مشخصه عملکرد ریزدانه اکسیدروی را نمایش می‌دهد.



شکل (۲): مشخصه عملکرد ریزدانه‌ی اکسیدروی برحسب میدان (ولتاژ شکست برابر ۱۰ kV/cm است) [۵].

شکل (۲) نشان می‌دهد که با افزایش میدان، مقاومت ریزدانه‌ی اکسیدروی کاهش می‌یابد تا اینکه در نهایت، در صورت عبور از یک مقدار آستانه، شکست الکتریکی کامل اتفاق افتاده و ریزدانه‌های اکسیدروی رسانا می‌شوند.

۳-۱- روش اجزاء محدود و معادلات حاکم

روش اجزاء محدود یک روش حل عددی است که با پیشرفت سیستم‌های کامپیوتری به سرعت گسترش یافته و در تحلیل مسائل توزیع ولتاژ و میدان بسیار مؤثر است. در این روش، سیستم موردبررسی به قسمت‌های مثلثی یا مربعی کوچک تقسیم می‌شود (مش‌بندی می‌شود). سپس با فرض خطی بودن روابط در هر قسمت،

معادلات دیفرانسیل مربوطه به دست آمده و با استفاده از شرایط مرزی حل می‌شود.

از دیدگاه عایقی ماکزیم تنش ولتاژ اهمیت دارد و عایق باید بتواند ماکزیم تنش ولتاژ در هر سیستم را تحمل کند بدون اینکه دچار فروپاشی شود. بنابراین بررسی تنش‌های عایقی ناشی از اضافه ولتاژها در حالت الکترواستاتیکی انجام می‌گیرد. به این ترتیب که ماکزیم تنش ولتاژی که ممکن است به عایق تجهیز در شبکه وارد شود به عایق اعمال شده و رفتار آن بررسی می‌گردد. باین حال در صورتی که تنش انرژی برق‌گیر و یا شوک حرارتی ناشی از اضافه ولتاژها موردنظر باشد، مطالعه باید در حالت گذرا انجام گیرد.

در حالت تقارن، نتایج آنالیز دوبعدی و سه‌بعدی با یکدیگر تفاوتی ندارند. بنابراین برای اجرای مقرون‌بصرفه مطالعات از نظر مدت‌زمان اجرای برنامه و حافظه موردنیاز رایانه از آنالیز دوبعدی استفاده شده است. باین حال برای بررسی در شرایط آسیب‌دیدگی و یا وجود هر نوع عدم تقارن در مسئله حتماً می‌بایست از آنالیز سه‌بعدی استفاده شود. از آنجاکه در این مقاله شدت میدان در حالت الکترواستاتیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. لذا تابع انرژی دوبعدی برحسب ولتاژ در مختصات کارتزین به صورت زیر خواهد بود [۱۱]:

$$F(U) = \frac{1}{2} \int \left[\epsilon_x \left(\frac{du}{dx} \right)^2 + \epsilon_y \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \right] dx dy \quad (1)$$

که در آن ϵ_x و ϵ_y ثابت دی‌الکتریک در امتداد x و y بوده u پتانسیل الکتریکی است. با فرض همگن بودن مواد، $(\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon)$ ، رابطه (۱) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$F(U) = \frac{1}{2} \int \left[\epsilon \left(\left(\frac{du}{dx} \right)^2 + \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \right) \right] dx dy \quad (2)$$

در داخل هر مش مثلثی شکل، پتانسیل الکتریکی $u(x,y)$ مطابق رابطه (۳) به صورت یک تابع خطی از مختصات در نظر گرفته می‌شود که در آن a_1 ، a_2 و a_3 ضریب خطی برای هر جزء مثلثی شکل است:

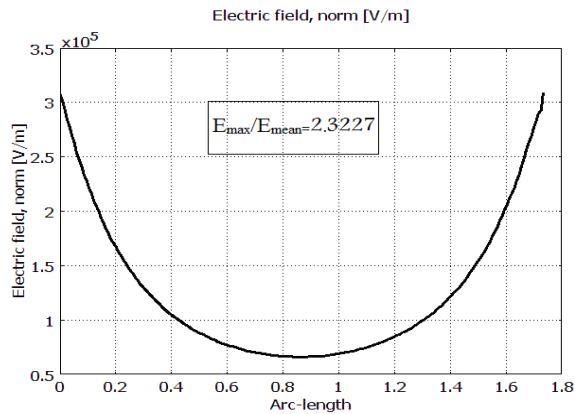
$$u(x,y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (3)$$

محدوده مسئله از بسیاری مش تشکیل شده که برای هر کدام تابع توزیع پتانسیل به فرم رابطه (۳) است. از آنجاکه در صورت وجود میدان الکتریکی، هر مش مثلثی دارای یک حداقل انرژی خواهد بود؛ برای به دست آوردن جواب مسئله، بایستی تابع انرژی $F(u)$ مینیمم گردد:

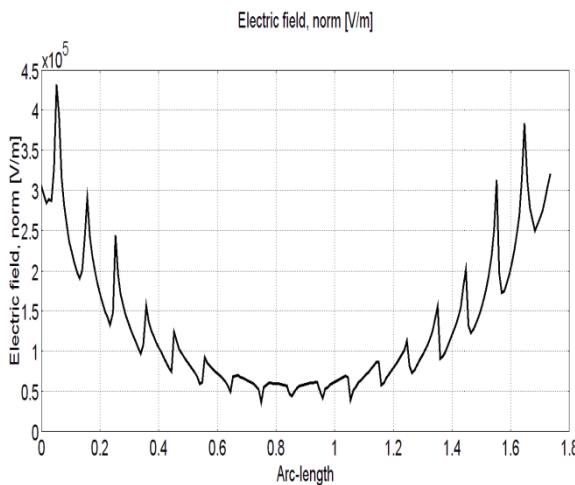
$$\frac{dF(u_i)}{du_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, np \quad (4)$$

که np مجموع مش‌های مسئله است.

به دلیل تقارن محوری در برق‌گیر، مختصات استوانه‌ای جهت تحلیل مورد استفاده قرار گرفته و برق‌گیر به صورت دوبعدی شبیه‌سازی شده است. شکل (۳) مش‌بندی برق‌گیر موردنظر را نشان می‌دهد. شرایط مرزی مسئله نیز به صورت پتانسیل معلوم الکتروود فشارقوی و پتانسیل صفر الکتروود زمین تعریف شده‌اند.

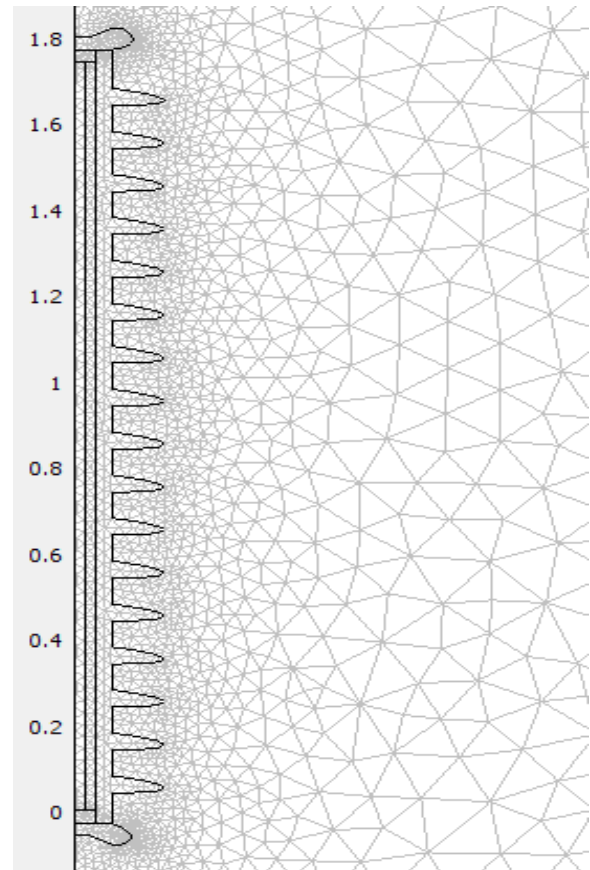


(الف): توزیع میدان در راستای محور برق گیر



(ب): توزیع میدان در راستای پوشش عایقی

شکل (۴): توزیع میدان در داخل و خارج برق گیر



شکل (۳): مش بندی برق گیر مورد مطالعه

۴- تعیین مکان مناسب تزریق لایه‌ی ریزدانه

طبق شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، شکل (۴)، میدان الکتریکی در مجاورت ترمینال‌ها از شدت بیشتری نسبت به قسمت‌های میانی برق گیر برخوردار است. لذا قرص‌های قرار گرفته در مجاورت ترمینال‌ها تحت تنش و فرسودگی بیشتری قرار دارند. از این رو برای کاهش شدت میدان، تأثیر تزریق لایه‌ی ریزدانه‌ی اکسیدروی در پوشش عایقی برق گیر در مجاورت این نواحی مورد بررسی قرار گرفت.

به دلیل این‌که هدف اصلی کاهش میدان در قرص‌ها است، یکنواخت‌سازی میدان در راستای محور برق گیر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شکل (۵) توزیع میدان در راستای محور برق گیر را در صورت تزریق لایه‌ی ریزدانه در قسمت‌های مختلف پوشش عایقی نشان می‌دهد (در شکل (۵)، E_{max} ماکزیمم شدت میدان و E_{mean} مقدار متوسط میدان در امتداد محور برق گیر است).

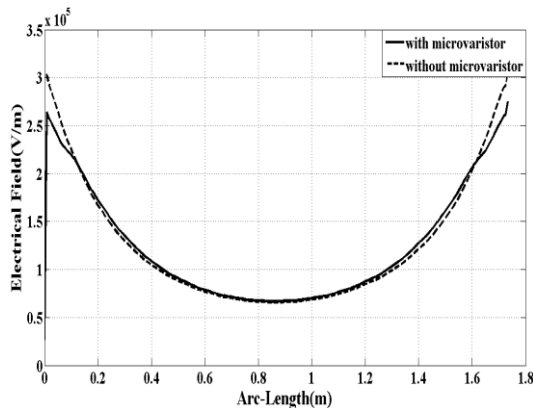
همان‌طور که در شکل (۵) (الف) مشاهده می‌شود، زمانی که ریزدانه تنها در مجاورت ترمینال فشارقوی تزریق شده، شدت میدان در نواحی مجاور ترمینال فشارقوی به $2/7 \text{ kV/cm}$ و در مجاورت ترمینال زمین که ریزدانه‌ای تزریق نشده به بالاتر از 3 kV/cm رسیده است. در شکل (ب) نیز که ریزدانه فقط در مجاورت ترمینال زمین تزریق شده، شدت میدان در مجاورت این ترمینال به کمتر از $2/6 \text{ kV/cm}$ و

در مجاورت ترمینال فشارقوی که ریزدانه‌ای تزریق نشده به بالاتر از 3 kV/cm رسیده است. با این حال در هر دو حالت، نسبت E_{max}/E_{mean} در مقایسه با برق گیر اولیه، شکل (۴)، افزایش یافته است.

با تزریق لایه‌ی ریزدانه در مرکز برق گیر نیز مشاهده می‌شود که با وجود کاهش شدت میدان در قرص‌های میانی، ماکزیمم شدت میدان که در مجاورت ترمینال‌ها اتفاق می‌افتد کاهش نداشته است، شکل (۵ ج). نهایتاً در شکل (۵ د) که ریزدانه در مجاورت هر دو ترمینال تزریق شده، شدت میدان در هر دو انتهای برق گیر کاهش یافته و به حدود $2/7 \text{ kV/cm}$ رسیده است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۵) می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که اولاً تزریق لایه‌ی ریزدانه در محل ترمینال‌های برق گیر می‌تواند به کنترل شدت میدان الکتریکی در امتداد محور برق گیر کمک کند؛ ثانیاً بهترین حالت برای کنترل شدت میدان الکتریکی، تزریق لایه‌ی ریزدانه در مجاورت هر دو ترمینال برق گیر است. چراکه ماکزیمم شدت میدان در راستای محور برق گیر در این حالت مینیمم است.

مقایسه نتایج شکل (۴) و شکل ۵ (د) نشان می‌دهد که با تزریق لایه‌ی ریزدانه در مجاورت هر دو ترمینال برق‌گیر، ماکزیمم شدت میدان از $3/6 \text{ kV/cm}$ به $2/7 \text{ kV/cm}$ کاهش یافته است. این مقایسه در شکل (۶) نشان داده شده است.



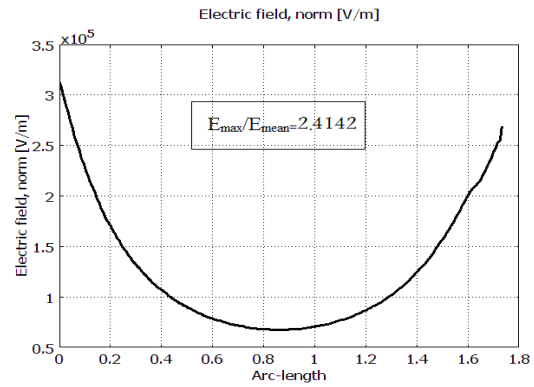
شکل (۶): مقایسه توزیع میدان در راستای محور برق‌گیر در صورت تزریق لایه‌ی ریزدانه در مجاورت هر دو ترمینال با حالت اولیه که ریزدانه تزریق نشده است.

۵- بهینه‌سازی

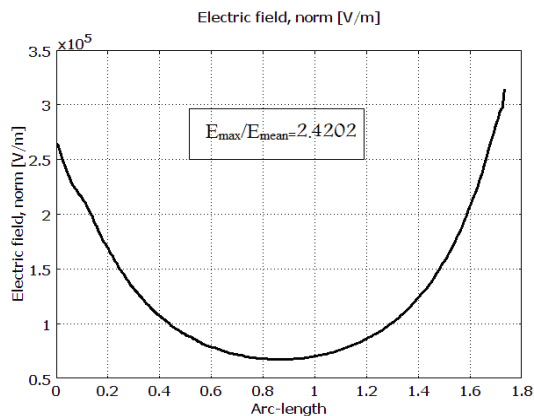
با توجه به اینکه ارتفاع ستون قرص‌های ZnO در داخل برق‌گیر متناسب با سطح حفاظتی موردنیاز عایق تجهیزات شبکه و سطح مقطع آن‌ها متناسب با حداکثر جریان صاعقه در شبکه تعیین می‌شود، ابعاد و ارتفاع ستون قرص‌ها در داخل برق‌گیر ثابت فرض شده و بهینه‌سازی تنها بروی پوشش عایقی برق‌گیر انجام شده است.

طبق نتایج به‌دست‌آمده، محل قرارگیری لایه‌ی ریزدانه بر شدت میدان اثر می‌گذارد. بنابراین محاسبه حجم لایه‌ی تزریق شده و تعیین محل مناسب تزریق این لایه در امتداد محور برق‌گیر حائز اهمیت است. در این بخش، ابعاد بهینه‌ی لایه‌ی ریزدانه تزریق شده، یا به عبارتی حجم بهینه‌ی لایه، به دست آمده و محل بهینه قرارگیری آن نیز تعیین می‌گردد. به طوری که در نهایت شدت میدان در امتداد محور برق‌گیر مینیمم گردد. این امر به نوبه خود می‌تواند باعث کاهش تنش‌های وارده بر قرص‌های ZnO در نواحی بحرانی شده و طول عمر برق‌گیر را افزایش دهد.

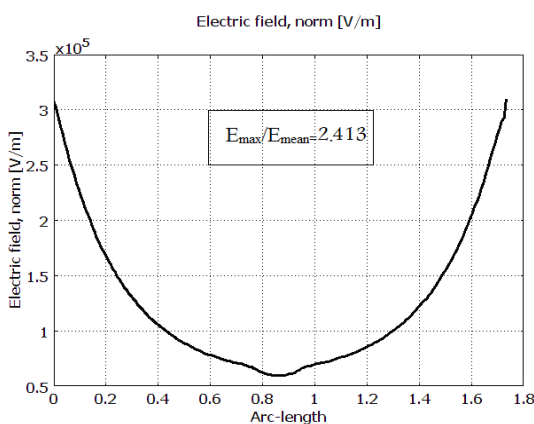
در این بخش از نرم‌افزار اجزاء محدود COMSOL که قابلیت لینک شدن با نرم‌افزار MATLAB را دارا است، استفاده شده است. ابتدا برق‌گیر در نرم‌افزار COMSOL شبیه‌سازی شده و توزیع میدان برق‌گیر در این نرم‌افزار محاسبه می‌گردد. سپس نتایج به‌دست‌آمده از COMSOL به منظور بازایی تابع هدف در محیط MATLAB فراخوانی می‌گردد. مقادیر جدید متغیرها که در هر مرحله از بهینه‌سازی به دست می‌آید از محیط MATLAB به نرم‌افزار COMSOL منتقل شده و توزیع میدان برق‌گیر به ازای مقادیر جدید هر متغیر محاسبه می‌گردد. این روند تا رسیدن به جواب بهینه و یا شرط توقف ادامه پیدا می‌کند. به منظور بهینه کردن طول سپرها و ابعاد ریزدانه‌های



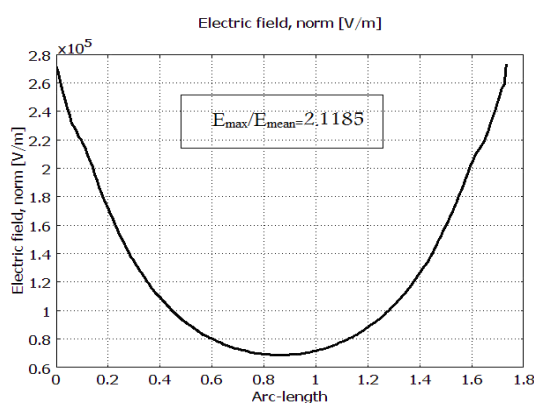
(الف): تزریق لایه‌ی ریزدانه در مجاورت ترمینال فشارقوی



(ب): تزریق لایه‌ی ریزدانه در مجاورت ترمینال زمین



(ج): تزریق لایه‌ی ریزدانه در قسمت میانی از محور برق‌گیر



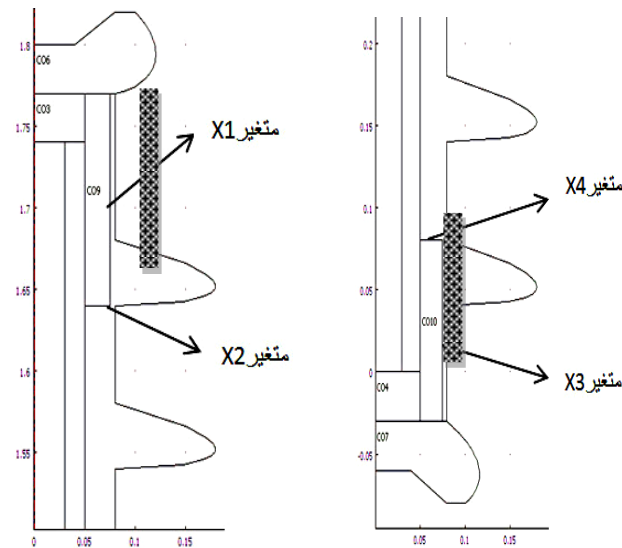
(د): تزریق لایه‌ی ریزدانه در مجاورت هر دو ترمینال برق‌گیر

شکل (۵): توزیع میدان در راستای محور برق‌گیر

۲-۵- بهینه‌سازی لایه ریزدانه

طبق نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که بهترین حالت برای کنترل ماکزیمم شدت میدان در راستای محور برق‌گیر، قرارگیری لایه ریزدانه در مجاورت هر دو ترمینال برق‌گیر است. پس از آن با بهینه‌سازی ابعاد لایه‌های ریزدانه‌ی تزریقی که بایستی در مجاورت ترمینال فشارقوی و زمین قرار گیرند، می‌توان به توزیع یکنواخت‌تر شدت میدان دست یافت.

متغیرهای بهینه‌سازی لایه ریزدانه در شکل (۸) مشخص شده است. در این شکل، x_1 طول لایه ریزدانه‌ی تزریقی در مجاورت ترمینال فشارقوی و x_3 طول لایه ریزدانه‌ی تزریقی در مجاورت ترمینال زمین است. x_2 و x_4 نیز به ترتیب عرض لایه ریزدانه‌ی تزریقی در مجاورت ترمینال فشارقوی و زمین می‌باشند.



شکل (۸): متغیرهای بهینه‌سازی لایه ریزدانه تزریقی (الف) مجاورت ترمینال زمین (ب) مجاورت ترمینال فشارقوی

قیود مسئله که حدود تغییرات هر کدام از متغیرها است با توجه به محدودیت ابعاد برق‌گیر از روی کاتالوگ کارخانه سازنده تعیین می‌گردند. حدود تغییرات متغیرهای تصمیم در برق‌گیر مورد مطالعه در این مقاله به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$1200 \text{ mm} < x_1 < 1750 \text{ mm} \quad (6)$$

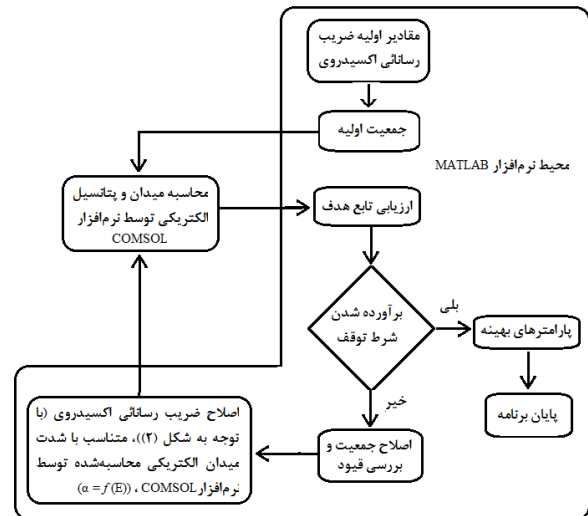
$$50 \text{ mm} < x_2 < 80 \text{ mm} \quad (7)$$

$$0 \text{ mm} < x_3 < 500 \text{ mm} \quad (8)$$

$$50 \text{ mm} < x_4 < 80 \text{ mm} \quad (9)$$

جدول (۲) توزیع میدان در صورت تزریق لایه ریزدانه در مجاورت هر دو ترمینال برق‌گیر، قبل و بعد از بهینه‌سازی حجم لایه تزریقی، نشان می‌دهد.

تزریق شده در پوشش عایقی برق‌گیر، از الگوریتم اجتماع ذرات استفاده شده است. فلوجارت روش طراحی پیشنهادی در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷): فلوجارت طراحی

۵-۱- تعریف تابع هدف

هدف از بهینه‌سازی، یکنواخت کردن توزیع میدان الکتریکی در راستای محور برق‌گیر است. لذا لازم است تابع هدف مناسب و قیود موردنظر تعریف شوند. تابع هدف موردنظر برای یکنواخت کردن توزیع میدان به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$\text{Objective Function} = \text{Min} (E_{\max}/E_{\text{mean}}) \quad (5)$$

که در آن E_{\max} ماکزیمم شدت میدان و E_{mean} میانگین شدت میدان در امتداد محور برق‌گیر است.

جهت انجام بهینه‌سازی از الگوریتم اجتماع ذرات، PSO^۲ استفاده شده که می‌تواند به‌عنوان یک ابزار بهینه‌سازی با تعریف توابع هدف متفاوت در مسائل مختلف مورد استفاده قرار گیرد. نحوه کدبندی، شرط توقف و روش کلی حل مسئله بهینه‌سازی مشابه روش ارائه‌شده در مرجع [۳] است که کلیت مراحل آن به‌صورت زیر است:

۱- ایجاد جمعیت اولیه

۲- ارزیابی جمعیت اولیه با استفاده از نرم‌افزار امان محدود

۳- ایجاد جمعیت جدید

۴- بررسی قیود مسئله (قیود بهینه‌سازی در این مسئله به‌صورت

مقدار تغییرات مجاز در ابعاد متغیرهای تصمیم تعریف شده‌اند

که در ادامه توضیح داده می‌شوند)

۵- انتخاب

۶- در صورت برآورده شدن شرط توقف، برنامه به اتمام رسیده و

در غیر این صورت به گام (۳) باز می‌گردد.

جدول (۲): ابعاد لایه‌ی ریزدانه تزریقی در پوشش عایقی برق‌گیر و نسبت

E_{max}/E_{mean} قبل و بعد از انجام بهینه‌سازی		قبل از تزریق لایه‌ی ریزدانه	پس از تزریق لایه‌ی ریزدانه
		قبل از بهینه‌سازی	بعد از بهینه‌سازی
E_{max}/E_{mean}	۲/۳۲۲۷	۲/۱۱۸۵	۲/۱۰۷۴
متغیر x_1	-	۱۱۰ (mm)	۹۶/۶ (mm)
متغیر x_2	-	۲۵ (mm)	۲۸ (mm)
متغیر x_3	-	۱۱۰ (mm)	۱۴۲/۵ (mm)
متغیر x_4	-	۲۵ (mm)	۲۶/۳ (mm)

جدول (۳): نتایج حاصل از بهینه‌سازی پوشش عایقی

قبل از بهینه‌سازی	بعد از بهینه‌سازی	E_{max}/E_{mean}
۲/۳۲۲۷	۲/۳۲۲۷	متغیر x_5
۱۰۰ (mm)	۳۰ (mm)	متغیر x_6
۱۰۰ (mm)	۳۵ (mm)	متغیر x_7

به‌عنوان مثال، مقدار ۳۰ mm برای متغیر x_5 بدین معناست که شعاع بهینه‌ی سپرهای مجاور ترمینال فشارقوی برابر ۱۱۰ mm است (۱۱۰=۳۰+۸۰). به‌طور کلی طبق نتایج، برای توزیع یکنواخت‌تر میدان، بایستی شعاع سپرها در مجاورت ترمینال‌های برق‌گیر کوچک‌تر از سایر قسمت‌های پوشش عایق خارجی در نظر گرفته شوند.

مقایسه نتایج جداول (۲) و (۳) نشان می‌دهد که تزریق لایه‌ی بهینه‌ی ریزدانه برای یکنواخت‌تر توزیع میدان نسبت به بهینه‌کردن پوشش عایقی مؤثرتر خواهد بود. باین حال امکان دارد که با تزریق لایه‌ی ریزدانه و بهینه‌سازی توأمان حجم لایه‌ی ریزدانه تزریقی و پوشش عایقی خارجی برق‌گیر، مطابق نتایج نشان داده‌شده در جدول (۴)، به بیشترین توزیع یکنواخت میدان دست یافت.

جدول (۴): بهینه‌سازی توأمان لایه‌ی ریزدانه تزریقی و پوشش عایقی به‌منظور

یکنواخت‌تر کردن توزیع میدان

نسبت E_{max}/E_{mean}	برق‌گیر موجود
۲/۳۲۲۷	با تزریق لایه‌ی بهینه‌ی ریزدانه
۲/۱۰۷۴	با بهینه‌سازی پوشش عایقی
۲/۲۵۴۶	بهینه‌سازی توأمان پوشش عایقی و لایه‌ی ریزدانه تزریقی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش‌های یکنواخت‌کردن توزیع میدان در امتداد محور برق‌گیر شامل بهینه‌سازی شعاع سپرهای پوشش عایق خارجی و یا تزریق یک لایه‌ی نازک ریزدانه‌های اکسیدروی در پوشش عایق خارجی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج بررسی نشان داد که بهترین توزیع میدان در صورت تزریق توأمان لایه‌ی ریزدانه در مجاورت هر دو ترمینال برق‌گیر به وجود می‌آید. همچنین برای یکنواخت‌تر کردن توزیع میدان، بایستی شعاع سپرهای عایقی خارجی در مجاورت ترمینال‌ها را کوچک‌تر از سایر قسمت‌ها در نظر گرفت.

در این مقاله حجم بهینه‌ی لایه‌ی ریزدانه به‌کاررفته در پوشش عایقی و شعاع بهینه‌ی سپرهای خارجی برق‌گیر با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات به دست آمد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، در صورت تزریق یک لایه‌ی بهینه‌شده ریزدانه در مجاورت ترمینال‌ها، نسبت E_{max}/E_{mean} به میزان ۹/۲۶٪ و در صورت بهینه‌کردن شعاع سپرها به میزان ۲/۹۳٪ کاهش پیدا می‌کند. بنابراین تزریق یک لایه‌ی بهینه‌ی ریزدانه‌ی اکسیدروی بسیار مؤثرتر از بهینه‌سازی شعاع سپرهای عایق خارجی

مقدار به‌دست‌آمده برای متغیر x_1 بدین معناست که طول بهینه‌ی لایه‌ی ریزدانه قرارگرفته شده در مجاورت ترمینال فشارقوی برابر ۹۶/۶ mm است که در ارتفاع ۱۶۷۳/۴ تا ۱۷۷۰ میلی‌متر قرار گرفته است (۹۶/۶=۱۶۷۳/۴-۱۷۷۰). همچنین مقدار متغیر x_2 نشان می‌دهد که عرض بهینه‌ی لایه ریزدانه تزریق‌شده در مجاورت ترمینال فشارقوی برابر ۲۸ mm خواهد بود که با توجه به رابطه (۷) در فاصله‌ی ۵۰ تا ۷۸ میلی‌متر از محور برق‌گیر قرار گرفته است (۵۰+۲۸=۷۸). برای سایر متغیرها نیز به همین صورت است.

۵-۳- بهینه‌سازی پوشش عایقی

از آنجاکه شکل پوشش عایقی نیز تأثیر زیادی در توزیع میدان الکتریکی دارد، در این بخش بهینه‌سازی سپرهای پوشش عایقی برق‌گیر به‌منظور توزیع یکنواخت‌تر میدان بررسی شده است. مشابه قبل، به دلیل اینکه در مجاورت ترمینال‌های برق‌گیر شدت میدان نسبت به دیگر نقاط بیشتر است؛ برای بهینه‌کردن پوشش عایقی، طول سپرهای مجاور هر ترمینال به‌عنوان یک متغیر و طول سپرهای قسمت‌های میانی نیز به‌عنوان یک متغیر مستقل دیگر در نظر گرفته شده است. در نتیجه سه متغیر برای بهینه‌کردن سپرها وجود خواهد داشت که به‌صورت زیر تعریف شده‌اند:

x_5 : شعاع سه سپر نزدیک ترمینال فشارقوی

x_6 : شعاع سپر نزدیک ترمینال زمین

x_7 : شعاع سپرهای قسمت میانی

حدود تغییرات هر متغیر به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$110 \text{ mm} < x_5 < 210 \text{ mm} \quad (10)$$

$$110 \text{ mm} < x_6 < 210 \text{ mm} \quad (11)$$

$$110 \text{ mm} < x_7 < 210 \text{ mm} \quad (1)$$

شعاع سپرهای پوشش عایقی باید از مجموع شعاع قرص ZnO لایه‌ی فایبرگلاس و ضخامت دیواره عایقی پیرامون آن‌ها که مجموعاً برابر ۸۰ mm است بیشتر باشد (شکل ۱ ب)). بنابراین حد پایین متغیرهای x_5 تا x_7 برابر ۱۱۰ mm در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی پوشش عایقی در جدول (۳) آمده است.

برق گیر خواهد بود. با این حال، با بهینه سازی توأمان لایه‌ی ریزدانه و پوشش عایقی E_{max}/E_{mean} را تا ۱۱/۵۲٪ نیز کاهش می‌دهد.

لذا مهندسان طراح به منظور یکنواخت‌تر توزیع میدان، افزایش طول عمر برق‌گیر و بهبود عملکرد آن در شرایط گذرا، بایستی کاهش شعاع سیرهای مجاور در ترمینال‌های فشارقوی و زمین برق‌گیر و نیز استفاده از ترکیب بهینه مواد ریزدانه در مجاورت این ترمینال‌ها را مورد توجه قرار دهند.

مراجع

- [1] A. Haddad and D. F. Warne, "Advances in high voltage engineering," The Institution of Electrical Engineers, Power Series, vol. 40, London (UK), 2004.
- [2] R. Hackam, "Outdoor HV composite polymeric insulators," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 6, pp. 557-585, 1999.
- [3] M. R. Aghaebrahimi, R. Shariatinasab and M. Ghaedi, "Optimal design of grading ring of surge arrester due to electric field distribution," 16th IEEE Mediterranean Electrical Conference, 25-18 March, Tunisia, 2012.
- [4] B. Vahidi, R. Shariatinasab, J. S. Moghani and S. H. Hosseinian, "Electric field and voltage distribution on ZnO surge arrester," IEEE TENCON 2004, Nov. 21-24, Chiang Mai, Thailand. 2004.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] D. Weida, T. Steinmetz, and M. Clemens, "Electro-quasistatic high voltage field simulations of insulator structures covered with thin resistive pollution or nonlinear grading material," IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference, pp. 580-583, Las Vegas (USA), 2008.
- [8] J. Debus, V. Hinrichsen, J.M. Seifert and M. Hagemeister, "Investigation of composite insulators with microvaristor filled silicone rubber components," 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Germany, 2010.
- [9] R. Strumpler and P. Kluge-Weiss, "Smart varistor composites," in Proceeding of Eighth CIMTEC-World Ceramic Congress & Forum on New Materials, 1995, pp. 15-22.
- [10] L. W. Donzel, F. Greuter and T. Christen, "Nonlinear resistive electric fieldgrading Part 2: Materials and applications," IEEE Magazine on Electrical Insulation, vol. 27, pp. 18-29, 2011.
- [11] B. Marungsri, W. Onchantuek and A. Oonsivilai, "Electric field and potential distribution along surface of silicone rubber polymer insulators using finite element method," World Academy of Science, Engineering and Technology 42, 2008.

زیر نویس‌ها

¹ Microvaristor

² Particle swarm optimization