



## بهینه‌سازی پارامترهای حلقه کرونا به منظور تعدیل میدان الکتریکی در مقره پلیمری با استفاده از

### روش‌های غیر مبتنی بر گرادیان

سیدمیثم سیدبرزگر<sup>۱</sup>، علیرضا صادقی<sup>۲</sup>، معصومه خودسوز<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

seyyedbarzegar@shahroodut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

alisadeghi380@shahroodut.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران

m.khodsouz@mazust.ac.ir

**چکیده:** شدت میدان الکتریکی از جمله عوامل تأثیرگذار بر تخلیه کرونا و عایق مقره‌های کامپوزیتی فشارقوی است. بر اساس این، لازم است به نوعی توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در طول مقره تعدیل شود. استفاده از حلقه کرونا در سمت ولتاژ فشارقوی قابلیت بسیار زیادی در کمینه‌سازی شدت میدان الکتریکی دارد. در این مقاله، با توجه به مؤثر بودن طراحی و شرایط نصب حلقه کرونا بر میزان تغییرات میدان الکتریکی، از روش‌های حل عددی غیر مبتنی بر گرادیان برای دستیابی به پارامترهای بهینه استفاده شد. شبیه‌سازی در نرم‌افزار مبتنی بر اجزای محدود COMSOL انجام شده است. مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد روش‌های غیر مبتنی بر گرادیان دارای سرعت و همگرایی مناسب‌اند. پارامترهای به دست آمده از روش‌های بهینه‌سازی، قابلیت کاهش میدان الکتریکی را تا ۶۶ درصد نسبت به حالتی که از حلقه کرونا استفاده نمی‌شود، دارند. به طور کلی، مطابق با نتایج به دست آمده، روش ترکیبی به کاررفته در بهینه‌سازی پارامترهای حلقه کرونا بسیار مفید است.

**واژه‌های کلیدی:** حلقه کرونا، روش حل عددی، روش مبتنی بر اجزای محدود، شدت میدان الکتریکی، مقره کامپوزیتی.

### ۱- مقدمه

میدان‌های الکتریکی فشارقوی قادر باشند. با توجه به اینکه سطح بالای میدان الکتریکی به ایجاد نویزهای شنیداری، آلودگی الکترومغناطیسی، تخلیه جزئی و پیری زودرس عایق منجر می‌شود، چنین طرح‌هایی باید با دقت مطالعه شوند [۱]. افزایش محلی میدان الکتریکی، تخلیه الکتریکی در سطح عایق را در ولتاژ فشارقوی ایجاد خواهد کرد. درباره عایق‌های کامپوزیت، این تخلیه‌ها می‌توانند مواد پلیمری به کاررفته در مقره‌ها را تخریب کنند [۲]. بر اساس این، محدودیت میدان الکتریکی برای جلوگیری از تخلیه کرونا در سطوح عایق پلیمری [۳] توصیه شده است. توزیع میدان الکتریکی روی سطح و درون عایق‌های

به دلایل فنی و اقتصادی، انتقال انرژی الکتریکی به استفاده از خطوط ولتاژ بالا نیاز دارد. این شرایط نیازمند طراحی دستگاهها و سیستم‌هایی است که به پشتیبانی از

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۲

نام نویسنده مسئول: سیدمیثم سیدبرزگر

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شاهرود - دانشگاه صنعتی شاهرود - دانشکده مهندسی برق و رباتیک

استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری را در تعداد زیادی از مسائل فراهم می‌کنند. در کنار مزایای بسیار زیاد این روش‌ها، عواملی همچون انتخاب جمعیت اولیه، نحوه تولید جمعیت جدید و فضای جستجو در دستیابی به نقطه بهینه تأثیر بسیار زیادی دارد.

در کنار این روش‌ها، تحلیل عددی در بهینه‌سازی بیشتر به دنبال حل دقیق مسائل‌اند. فایده اصلی این نوع از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تضمین جواب بهینه است. روش‌های تحلیل عددی به دو دسته روش‌های مبتنی بر محاسبه گرادیان<sup>۲</sup> و روش‌های غیر مبتنی بر محاسبه گرادیان<sup>۳</sup> [۱۹] تقسیم می‌شوند. روش‌های غیر مبتنی بر گرادیان قابلیت حل مسئله را در فضایی با هندسه متغیر دارند؛ از این رو، در این مقاله با توجه به تغییراتی که لازم است در ساختار مقره ایجاد شود، روش بهینه‌سازی غیر مبتنی بر گرادیان به کار گرفته شده است.

در این مقاله، مقره کامپوزیت در سطح ولتاژ ۱۳۲ کیلوولت برای تعیین توزیع میدان الکتریکی در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی این مقره در محیط دو بعدی متقارن نرم‌افزار COMSOL مبتنی بر روش اجزای محدود<sup>۴</sup> [۲۰] انجام شده است. تأثیر پارامترهای حلقه کرونا شامل قطر، شعاع لوله و موقعیت حلقه نسبت به محل اتصال خط فشارقوی به‌طور جداگانه تجزیه و تحلیل شده است. بر اساس این، مسئله بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن تابع هدف (کمینه‌سازی میدان الکتریکی) در طول زنجیره مقره با استفاده از روش‌های غیر مبتنی بر محاسبه گرادیان، مطرح و تحلیل شده است.

## ۲- مشخصات حلقه کرونا و مقره مطالعه شده

به منظور بررسی اثر حلقه کرونا بر میدان الکتریکی ایجاد شده در طول زنجیره مقره، از مقره کامپوزیتی در سطح ولتاژ ۱۳۲ کیلوولت استفاده شده است. مقره مطالعه شده ۱۲۰ کیلو نیوتن و دارای وزن تقریبی ۱۰ کیلوگرم است. استقامت الکتریکی این مقره در شرایط تست ضربه ۱۰۵۰

الکتریکی به پارامترهای بی‌شماری از جمله ولتاژ اعمال شده، طراحی عایق، پیکربندی پراک‌آلات، طراحی سخت‌افزار و فاصله فازها [۴] بستگی دارد. در طی چند سال گذشته، محققان زیادی به منظور کاهش اثر تخریبی میدان الکتریکی بر بخش عایق متصل به هادی فاز، بر توزیع بهینه میدان الکتریکی در طول عایق‌های سرامیکی و غیر سرامیکی متمرکز شده‌اند. در میان تحقیقات به عمل آمده، استفاده از عایق‌های پلیمری کامپوزیت با نفوذپذیری بالا [۵-۶] و نصب حلقه‌های کرونا [۷-۸] بسیار مؤثر بوده و شایان توجه قرار گرفته است.

امروزه استفاده از حلقه‌های کرونا در هر دو انتهای زنجیره مقره برای ولتاژهایی بالاتر از ۳۴۵ کیلوولت و در دامنه ولتاژ بین ۲۳۰ تا ۳۴۵ کیلوولت فقط در سمت HV توصیه می‌شود [۹]. متأسفانه استانداردهای خاصی برای طراحی و قراردادن حلقه‌های کرونا وجود ندارد و به‌طور کلی هر تولیدکننده توصیه‌های خود را برای استفاده از حلقه‌های کرونا ارائه می‌دهد [۱۰].

با توجه به مؤثر بودن شرایط ساخت و نصب حلقه‌های کرونا بر عملکرد میدان الکتریکی در مقره، توجه زیادی به این امر در میان محققان صورت گرفته است. در واقع، بیشتر مطالعات تحقیقاتی انجام شده بر حلقه‌های کرونا بر اساس قطر حلقه کرونا، شعاع لوله و موقعیت ارتفاع نصب آن تمرکز دارد [۱۱-۱۵]. با در نظر گرفتن اینکه هر سه پارامتر با توجه به محدوده تغییرات تعیین شده برای آنها به صورت مستقل در اثربخشی حلقه کرونا نقش دارند، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، نقش مؤثری در دستیابی به بهترین مقادیر دارد.

بسیاری از مشکلات بهینه‌سازی مربوط به طراحی سیستم عایقی ولتاژ بالا، با استفاده از روش‌های ابتکاری رفع شده است. با وجود این، دو مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری، گرفتار شدن آنها در نقاط بهینه محلی و همگرایی زودرس به این نقاط است. برای حل این مشکلات از روش‌های فراابتکاری استفاده شده است [۱۶-۱۸]. الگوریتم‌های فراابتکاری مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها هستند که روی الگوریتم‌های ابتکاری، اعمال و به رهایی آنها از نقاط بهینه محلی منجر می‌شوند و در عین حال، امکان

<sup>2</sup> Gradient Based Solvers (GBS)

<sup>3</sup> Derivative-Free Solvers (DFS)

<sup>4</sup> Finite Element Method (FEM)

معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی و شرایط مرزی معین برای اشکال گوناگون با مرزهای نامنظم و ابعاد مختلف، تحلیل می‌شوند. روش اجزای محدود براساس مینیمم‌سازی انرژی پتانسیل استوار است. نرم‌افزارهای به‌کاررفته در این روش، در محاسبه توزیع پتانسیل و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به یک ابزار مهم تبدیل شده‌اند. عملکرد این نرم‌افزارها به گونه‌ای است که با تقسیم فضای مدنظر به قسمت‌های کوچک و با فرض خطی بودن روابط داخل آنها سعی شده است معادلات دیفرانسیل تحلیل شوند. ایده اصلی این روش، جداسازی و ترکیب است. جداسازی برای تحلیل هر بخش و ترکیب به‌منظور تحلیل هم‌زمان کل مدل است. معادلات به‌کاررفته برای تحلیل الکترومغناطیسی مسئله به‌صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

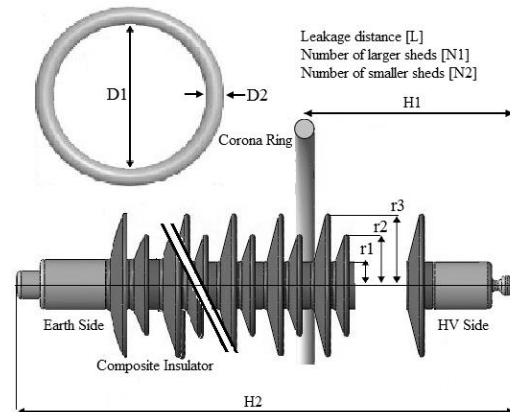
$$\begin{aligned} \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \cdot D &= \rho \end{aligned} \quad (1)$$

در این معادله  $E$  میدان الکتریکی،  $J$  چگالی جریان الکتریکی،  $B$  چگالی شار مغناطیسی،  $\rho$  چگالی بار الکتریکی،  $H$  شدت میدان مغناطیسی و  $D$  چگالی شار الکتریکی است [۲۱]. در این مقاله، تجزیه و تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL در محیط الکترواستاتیک انجام شده است. برای این منظور، کل مقره پلیمری به همراه حلقه کرونا به‌صورت دوبعدی در محیط متقارن استوانه‌ای طراحی شده است. چگالی ناحیه‌بندها در مناطق بحرانی مقره بیشتر است؛ مناطقی که اندازه میدان در آن نقاط بااهمیت است و به دقت افزون‌تری نیاز دارد. شبیه‌سازی مقره در شرایط بدون آلودگی و رطوبت، انجام و از ترسیم یراق‌آلات و تجهیزات جانبی در آن صرف‌نظر شده است.

#### ۴- روش بهینه‌سازی

ویژگی تعیین‌کننده یک حل‌کننده مبتنی بر گرادینان این است که از مسیری در فضای متغیر کنترل استفاده می‌کند که در آن، هر تکرار جدید براساس اطلاعات مشتق در نقاط

کیلوولت و در شرایط تست فرکانس قدرت نیز ۴۴۰ کیلوولت است. شکل (۱) نمایی از مقره مطالعه‌شده و همچنین حلقه کرونی استفاده‌شده را نشان می‌دهد. مشخصات فنی و پارامترهای الکتریکی این مجموعه نیز در جدول (۱) ارائه شده‌اند [۱۱].



شکل (۱): ابعاد و اندازه بخش‌های مختلف مقره ۲۳۰

کیلوولت با حلقه کرونا [۱۱]

جدول (۱): اطلاعات مقره مطالعه‌شده

(الف): اطلاعات فنی مقره مطالعه‌شده [۱۱]

پارامترهای طراحی	مقادیر	پارامترهای طراحی	مقادیر
r1[mm]	۲۲	H1[mm]	۲۰۰
r2[mm]	۵۲	H2[mm]	۱۶۹۶
r3[mm]	۷۳	L[mm]	۵۵۱۰
D1[mm]	۳۳۰	N1	۳۳
D2[mm]	۳۵	N2	۳۲

(ب): اطلاعات الکتریکی بخش‌های مختلف مقره

ماده	$\epsilon_r$
الیاف شیشه	۱۰
سیلیکون رابر	۴
آلومینیوم	۱
هوا	۱

#### ۳- نرم‌افزار مبتنی بر روش اجزای محدود

روش اجزای محدود، روش حل عددی است که با توسعه رایانه، به سرعت گسترش یافته است. با استفاده از روش اجزای محدود، مسائل تقریب زده شده به‌وسیله

#### ۴-۱-۱- حل‌کننده جستجوی مختصات

روش CSS تابع هدف را در جهت‌های مختصات فضای پارامتر کنترل بررسی می‌کند. طول گام‌ها در مختصات تعیین شده با توجه به مقادیر تابع هدف، کاهش و یا افزایش می‌یابد. CSS مستقیماً شیب تابع هدف را ارزیابی نمی‌کند. با وجود این، هنگامی که حل‌کننده، اطلاعات کافی را درباره نقطه جستجوی فعلی جمع‌آوری کرده باشد تخمینی از مقدار شیب را ایجاد می‌کند و جستجوی خطی را در این مسیر قبل از ارزیابی جدید در امتداد مسیرهای مختصات دیگر انجام می‌دهد. این روند، جستجو را به‌ویژه برای نقاط نزدیک به مینیمم‌های محلی تسریع می‌کند [۱۹].

#### ۴-۱-۲- حل‌کننده نلدر - مید

روش NMS یا روش سیمپلکس سراسشی، روش عددی رایج در پیدا کردن کمینه یا بیشینه یک تابع هدف در فضای بهینه‌سازی چندبعدی است. این روش از مرتبه صفر است و بنابراین، در مسائل بهینه‌سازی غیرخطی پیاده‌سازی می‌شود که در آنها به دست آوردن مشتق تابع ناممکن یا مشکل باشد. بهینه‌سازی براساس روش NMS به  $N+1$  نقطه متکی است که  $N$  تعداد متغیرهای کنترل است. در یک تکرار این روش، حل‌کننده از بازتاب<sup>۹</sup>، بسط<sup>۱۰</sup> و انقباض<sup>۱۱</sup> به منظور بهبود حالت‌های نامناسب در فضای جستجو استفاده می‌کند [۱۹].

#### ۴-۱-۳- حل‌کننده بهینه‌سازی کران با تقریب

##### درجه دو

ایده اصلی روش BOBYQA این است که به‌طور تکراری تابع هدف را با استفاده از یک مدل درجه دوم در ناحیه‌ای معتبر تقریب می‌زند که به اصطلاح منطقه اعتماد نامیده می‌شود. با توجه به اینکه در به‌روزرسانی تقریب درجه دوم،  $2N$  عملیات مورد نیاز است، تعداد درون‌یابی

قبل از ارزیابی می‌شود. در مقابل روش مبتنی بر گرادیان، روش‌هایی مطرح‌اند که حل‌کننده‌های آنها بدون نیاز به مشتق، شرایط بهینه‌سازی را در فضای کنترل متغیرها جستجو می‌کنند. به‌طور کلی گاهی اطلاعات درباره مشتق تابع هدف دسترسی‌ناپذیر، اطمینان‌ناپذیر یا غیر عملی است. در چنین مواردی، روش‌هایی که به مشتقات متکی‌اند یا آنها را با مشتقات محدود، تقریب و تحلیل می‌کنند، کاربرد چندانی ندارند. در ادامه، روش‌هایی بررسی شده‌اند که حل‌کننده‌های غیر مبتنی بر گرادیان نامیده می‌شوند [۱۹].

#### ۴-۱-۴- حل‌کننده‌های غیر مبتنی بر گرادیان

مشخصه روش‌های مبتنی بر DFS این است که آنها نیازی به محاسبه مشتقات تابع هدف با توجه به متغیرهای کنترل ندارند. چنین شرایطی موجب می‌شود DFS برای مسائلی با تابع هدف غیر هموار یا دارای نویز مناسب شود. یک نمونه بارز از یک تابع هدف دارای نویز در شرایطی به وجود می‌آید که متغیرهای کنترل، ابعاد هندسه را تعیین می‌کنند. تغییرات هندسه ناشی از تغییر متغیرهای کنترل به اشکال مختلف با المان‌های محدود منجر می‌شود.

با توجه به اینکه حل‌کننده‌های بدون نیاز به مشتق به رفتارهای نقطه‌ای تابع هدف در رسیدن به بهترین جواب اعتماد نمی‌کنند، برای رسیدن به یک شاخص مناسب، موقعیت‌های مختلف در فضای تعریف شده برای متغیرها بررسی شده‌اند. اگرچه جستجو در چنین فضای متغیری ممکن است زمان‌بر باشد، این روش‌ها دارای ضریب اطمینان بالایی در رسیدن به پاسخ بهینه‌اند [۱۹ و ۲۰]. از روش‌های مبتنی بر DFS عبارت‌اند از:

حل‌کننده جستجوی مختصات<sup>۵</sup>

حل‌کننده نلدر - مید<sup>۶</sup>

حل‌کننده بهینه‌سازی کران با تقریب درجه دو<sup>۷</sup>

حل‌کننده بهینه‌سازی مقید با تقریب خطی<sup>۸</sup>

<sup>8</sup> Constrained Optimization by Linear Approximation (COBYLA)

<sup>9</sup> reflection

<sup>10</sup> expansion

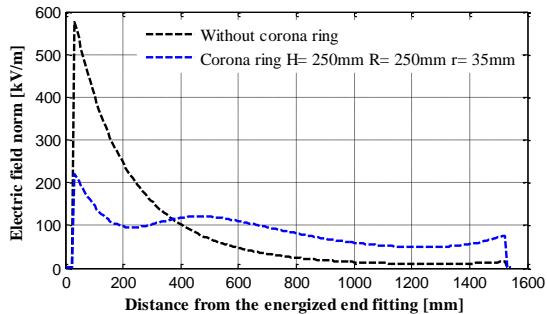
<sup>11</sup> contraction

<sup>5</sup> Coordinate Search Solver (CSS)

<sup>6</sup> Nelder - Mead Solver (NMS)

<sup>7</sup> Bound Optimization by Quadratic Approximation (BOBYQA)

الکتریکی، در این بخش، هر یک از این متغیرها براساس شکل‌های (۳) تا (۵) بررسی شده است.



شکل (۲): تغییرات میدان الکتریکی در امتداد خط عبوری از مرکز مقره در شرایط مختلف

شکل (۳) تغییرات میدان الکتریکی را بر حسب ارتفاع نصب به‌ازای تغییرات شعاع لوله حلقه نشان می‌دهد. با ثابت در نظر گرفتن شعاع لوله حلقه کرونا ( $r = 40$ ) و شعاع حلقه کرونا ( $R = 200$ ) و تغییر ارتفاع نصب آن، شدت میدان الکتریکی در بیشترین مقدار خود ۴۳٪ کاهش خواهد یافت. در این شرایط، اگر شعاع لوله از ۵ تا ۴۰ میلیمتر تغییر کند، شدت میدان الکتریکی همواره روند کاهشی را از خود نشان می‌دهد.

برخلاف نتایج فوق، در شرایطی که ارتفاع نصب و شعاع لوله حلقه کرونا به‌ترتیب در مقادیر  $H = 200$  میلی‌متر و  $r = 40$  میلی‌متر ثابت باشند، افزایش شعاع حلقه کرونا به افزایش میدان الکتریکی منجر می‌شود. در این شرایط با افزایش شعاع حلقه از ۱۵۰ به ۵۰۰ میلی‌متر، شدت میدان الکتریکی از ۱۸۹/۷ کیلوولت بر متر به ۲۳۰ کیلوولت بر متر افزایش یافته است.

شکل (۴) تغییرات میدان الکتریکی را بر حسب شعاع حلقه کرونا به‌ازای تغییرات شعاع لوله حلقه نشان می‌دهد. شعاع لوله حلقه کرونا نیز به‌عنوان پارامتر مهم طراحی در کنترل حداکثر شدت میدان الکتریکی به‌ویژه در نزدیکی اتصالات فشارقوی مطرح است. مطابق با شکل (۵)، به‌طورکلی با افزایش قطر لوله حلقه کرونا، شدت میدان الکتریکی روی سطح عایق بهبود می‌یابد. در این راستا برای ارتفاع  $H=250$  میلی‌متر و  $R=300$  میلی‌متر با تغییر شعاع

انجام‌شده در روش BOBYQA برابر تعداد ثابت  $(2N+1)$  بوده که  $N$  تعداد متغیرهای کنترل است [۲۰].

#### ۴-۱-۱-۴- حل‌کننده بهینه‌سازی مقید با تقریب خطی

روش COBYLA برای بهینه‌سازی بدون نیاز به محاسبات مشتق است. COBYLA از تقریب خطی برای حفظ و به‌روزرسانی تابع هدف و قیود استفاده می‌کند. تقریب‌ها براساس مقادیر هدف و قیود محاسبه می‌شوند. در هر تکرار، یک مسئله برنامه‌نویسی خطی در منطقه اعتماد مانند آنچه در روش BOBYQA ایجاد شده بود، در جهت رسیدن به قیودی بهینه تحلیل می‌شود [۲۰].

#### ۵- بررسی اثر حلقه کرونا

به‌منظور بررسی اثر حلقه کرونا بر توزیع میدان الکتریکی، این پارامتر در امتداد محور مرکزی مقره کامپوزیت مطالعه شده از سمت فشارقوی<sup>۱۲</sup> تا زمین در شکل (۲) برای دو حالت بدون حلقه کرونا و با آن نشان داده شده است. با توجه به این شکل، شدت میدان الکتریکی در سمت HV مقره در صورت نبود حلقه کرونا بسیار زیاد است. در همین شرایط، شدت میدان الکتریکی در سمت زمین نزدیک به صفر است. مطابق شکل، حلقه کرونا با کاهش شدت میدان الکتریکی در سمت HV و افزایش اندک آن در سمت زمین، تعادل بیشتری در توزیع میدان الکتریکی ایجاد می‌کند.

حلقه کرونا دارای سه متغیر اصلی است که عبارت‌اند از شعاع حلقه کرونا ( $R$ )، شعاع لوله حلقه کرونا ( $r$ ) و ارتفاع نصب حلقه کرونا ( $H$ ). یکنواختی میدان الکتریکی با تغییر پارامترهای حلقه کرونا تغییر می‌یابد که در قالب مسئله بهینه‌سازی مطرح می‌شود؛ بنابراین، مسئله بهینه‌سازی در این مقاله با به حداقل رساندن میدان الکتریکی در طول مقره کامپوزیتی تعریف می‌شود.

با توجه به اثر هر یک از این متغیرها بر شدت میدان

<sup>12</sup> High Voltage (HV)

## ۶- تابع هدف

هدف از طراحی بهینه ساختار حلقه کرونا، کاهش مقدار میدان الکتریکی و تخلیه کرونا در سطح عایق کامپوزیت مقره‌ها به‌ویژه در نزدیکی اتصالات فشارقوی است. برای جلوگیری یا کاهش تخلیه‌های الکتریکی، لازم است شدت میدان الکتریکی در سطح پایین‌تری از تخلیه الکتریکی هوا حفظ شود. در عمل شدت میدان الکتریکی در طول مقره باید کمی پایین‌تر از این مقدار آستانه تنظیم شود تا نه تنها از ایجاد کرونا و تخریب مواد عایقی جلوگیری شود، به طراحی حلقه‌های کرونا با ابعادی کوچک‌تر و فشرده‌تر منجر شود. طراحی بهینه برای به حداقل رساندن میدان الکتریکی با تابع هدف حاصل می‌شود. تابع هدف متشکل از یک رابطه ریاضی بین شدت میدان الکتریکی و هر یک از متغیرهای حلقه کرونا است. این تابع به کاربر اجازه می‌دهد شدت میدان الکتریکی را با توجه به حدود تعریف‌شده برای هر یک از متغیرهای در نظر گرفته شده ارزش‌یابی کند. رابطه (۲) تابع هدف مدنظر را در این مقاله نشان می‌دهد.

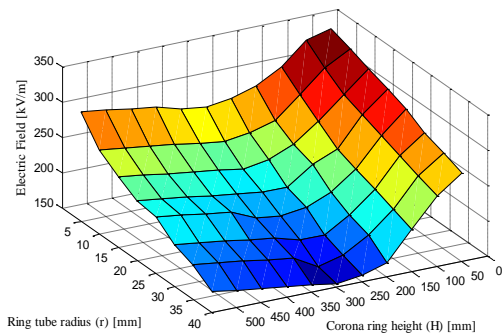
$$f(x_1, x_2, x_3) = \min(E_{\max}(H, R, r)) \quad (2)$$

$$x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max}$$

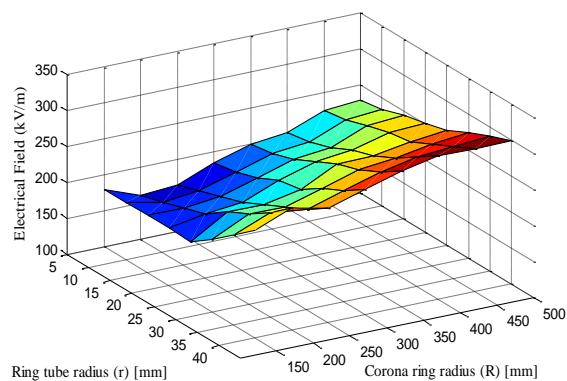
در این رابطه  $E_{\max}$  بیشینه شدت میدان الکتریکی به صورت تابعی وابسته به هر یک از متغیرهای حلقه کرونا،  $H$  ارتفاع از محل نصب،  $R$  شعاع حلقه کرونا،  $r$  شعاع لوله حلقه کرونا،  $x$  هر یک از متغیرهای حلقه کرونا،  $x_{\min}$  کران پایین و  $x_{\max}$  کران بالای مرتبط با متغیر مربوطه است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های (۳) تا (۵)، محدوده تغییرات هر یک از متغیرهای حلقه کرونا تعیین می‌شود. آنچه در این میان اهمیت زیادی دارد، فاصله تخلیه الکتریکی (Arcing Distance) مقره است که به‌ازای فاصله حلقه کرونا از ترمینال فشارقوی، موجب کوتاه‌شدن آن می‌شود؛ از این رو با توجه به حد استاندارد تعیین‌شده برای مقره در سطح ولتاژ ۱۳۲ کیلوولت، حدود پارامتر  $H$  با در نظر گرفتن فاصله تخلیه الکتریکی در بهینه‌سازی تعیین شده است. رابطه (۲) حدود تغییرات بالا و پایین را برای پارامترهای حلقه کرونا نشان می‌دهد.

لوله از ۵ تا ۴۰ میلی‌متر، حداکثر شدت میدان الکتریکی از ۲۷۲ کیلوولت بر متر به ۱۶۱ کیلوولت بر متر تغییر می‌یابد که به معنی کاهش ۶۰ درصدی در میدان الکتریکی است. اگرچه با افزایش شعاع لوله نتایج بهتری در میدان الکتریکی به دست خواهد آمد، افزایش بیش از حد شعاع لوله، حلقه کرونا را حجیم و غیر اقتصادی می‌کند. شکل (۵) تغییرات میدان الکتریکی را بر حسب شعاع لوله حلقه کرونا به‌ازای تغییرات ارتفاع حلقه کرونا نشان می‌دهد.

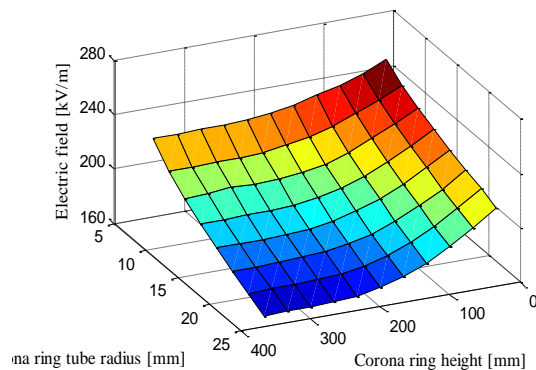


شکل (۳): تغییرات میدان الکتریکی بر حسب ارتفاع نصب



شکل (۴): تغییرات میدان الکتریکی را بر حسب شعاع حلقه

کرونا به‌ازای تغییرات شعاع لوله حلقه

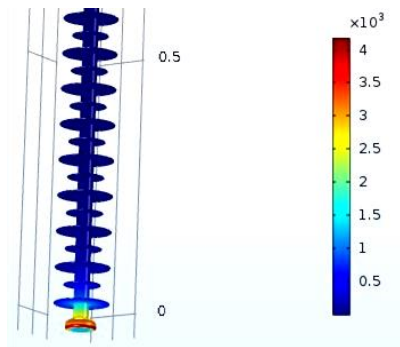


شکل (۵): تغییرات میدان الکتریکی را بر حسب شعاع لوله

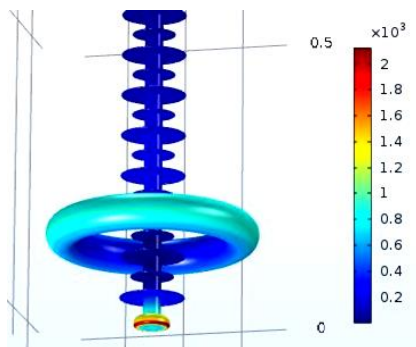
حلقه کرونا به‌ازای تغییرات ارتفاع حلقه کرونا

بسیار زیادی بر کمینه‌سازی میدان الکتریکی و بهبود پروفیل ولتاژ در طول مقره پلیمری دارد. با توجه به روش بهینه‌سازی انتخاب‌شده در این مقاله - که براساس روش‌های غیر مبتنی بر گرادیان است - نتایج توزیع میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی به دست آمده و مقایسه شده‌اند. شایان ذکر است مقادیر اولیه پارامترهای حلقه کرونا در تمامی روش‌های بهینه‌سازی، یکسان و برابر با  $r=5\text{mm}$  و  $R=150\text{mm}$ ،  $H=200\text{mm}$  در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور بررسی گرافیکی تغییرات میدان الکتریکی در مقره، توزیع میدان الکتریکی منتجه از نرم‌افزار COMSOL به‌زای پارامترهای به‌دست‌آمده از روش BOBYQA در شکل (۷) نمایش داده شده است. مطابق با این شکل به‌وضوح تأثیر افزودن حلقه کرونا بر تعدیل بیشینه میدان الکتریکی در طول مقره دیده می‌شود. بیشینه دامنه میدان در صورت استفاده از حلقه کرونا از ۴۰۰ کیلوولت بر متر به ۲۰۰ کیلوولت بر متر در طول مقره کاهش یافته است.



(الف)



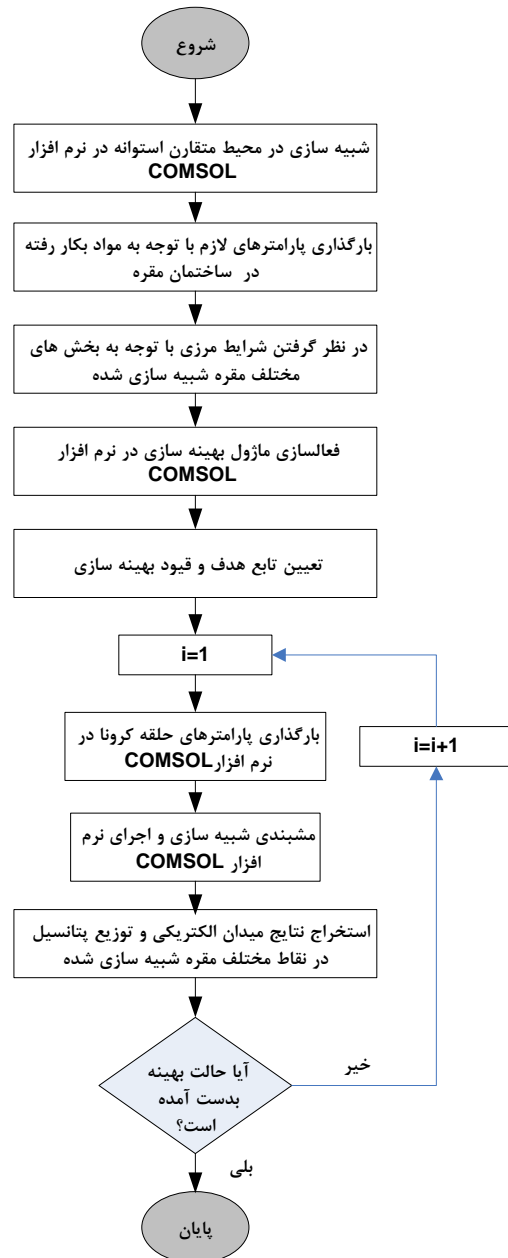
(ب)

شکل (۷): تغییرات میدان الکتریکی در مقره مطالعه‌شده (الف) بدون

حلقه کرونا (ب) با حلقه کرونا

$$\begin{aligned} 0 \leq H \leq 150 & \quad [mm] \\ 100 \leq R \leq 500 & \quad [mm] \\ 5 \leq r \leq 40 & \quad [mm] \end{aligned} \quad (۳)$$

با توجه به شبیه‌سازی انجام‌شده، تابع هدف و قیود در نظر گرفته شده، روندنمای طراحی حلقه کرونا در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): روندنمای طراحی حلقه کرونا

## ۷- نتایج

با توجه به بخش قبل، بهینه‌سازی ابعاد حلقه کرونا تأثیر

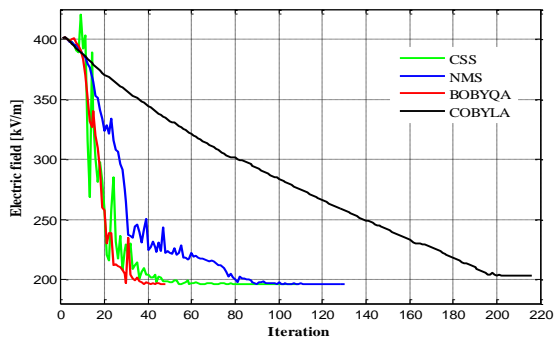


جدول (۲): نتایج حاصل از روش‌های مختلف بهینه‌سازی غیر مبتنی بر گرادیان

پارامترها روش بهینه‌سازی	r [mm]	R [mm]	H [mm]	$E_{max}$ [kV/m]	Computational time [s]
CSS	۳۹/۹۹۳	۱۴۹/۹۱۱	۱۰۱/۹۲۵	۱۹۶/۲۷۵	۵۳
NMS	۳۹/۹۹۲	۱۴۵/۴۷۴	۱۱۴/۳۴۹	۱۹۶/۱۱۲	۶۳
BOBYQA	۴۰	۱۴۶/۸۲۷	۱۱۲/۰۰۴	۱۹۶/۰۵۹	۳۲
COBYLA	۳۶/۲۹۵	۱۳۶/۰۰۶	۱۰۴/۳۷۵	۲۰۶/۱۴۵	۱۱۵

جدول (۳): نتایج حاصل از روش‌های مختلف بهینه‌سازی غیر مبتنی بر گرادیان در نقاط مختلف مقره و حلقه کرونا

روش‌ها	بیشینه میدان در محور اصلی مقره kV/m	بیشینه میدان در لبه چترک‌ها kV/m	بیشینه میدان در بخش بیرونی حلقه kV/m	بیشینه میدان در بخش درونی حلقه kV/m
CSS	۱۹۶/۲۷۵	۶۲۷/۲۰۵	۶۵۶/۳۲۴	۴۱۲/۰۴۳
NMS	۱۹۶/۱۱۲	۶۳۳/۶۳۰	۶۱۶/۵۵۹	۴۴۷/۲۶۱
BOBYQA	۱۹۶/۰۵۹	۶۲۳/۰۷۷	۶۲۸/۸۴۳	۴۳۶/۱۸۱
COBYLA	۲۰۶/۱۴۵	۶۴۹/۰۰۴	۵۲۷/۵۳۵	۵۲۷/۴۳۵



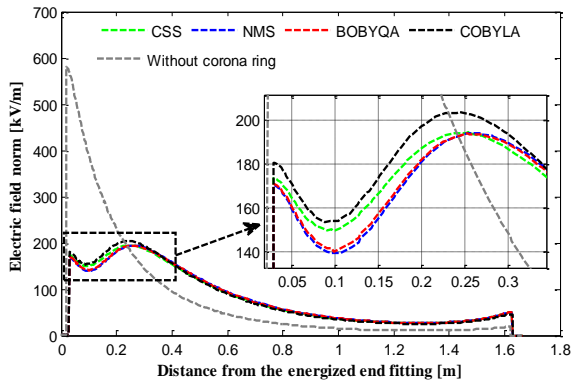
شکل (۸): مشخصه همگرایی در طول پروسه بهینه‌سازی

همان‌طور که گفته شد با توجه به مشخصه‌های همگرایی، روش بهینه‌سازی BOBYQA از نظر مقدار نهایی تابع هدف و سرعت همگرایی، بهترین نتیجه را به دست آورده است. شکل (۹) نمودارهای همگرایی هر یک از پارامترهای  $r$  و  $R$  و  $H$  در حالت بهینه BOBYQA نشان می‌دهد. بر اساس این، دیده می‌شود پارامترهای بهینه‌سازی همواره از تکرار ۴۰ به بعد مقداری ثابت را به دست آورده‌اند که نشان‌دهنده سرعت همگرایی بالای این روش در دستیابی به جواب بهینه است.

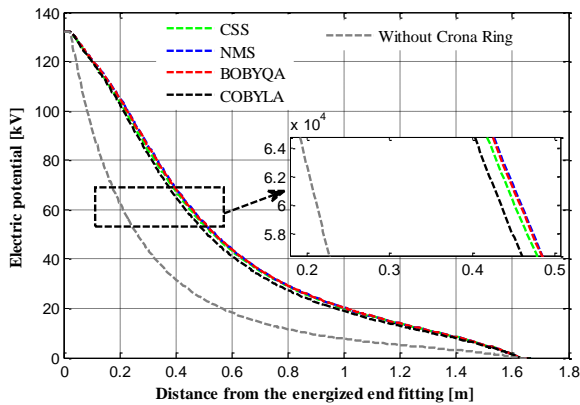
شکل (۱۰) میدان الکتریکی روی محور مرکزی مقره را در حالت بدون حلقه کرونا و حالت‌های بهینه هر یک از روش‌های استفاده‌شده نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تمامی روش‌های به کاررفته نسبت به حالتی که حلقه کرونا استفاده نشده است، توزیع میدان الکتریکی را از نظر بیشینه میدان در ترمینال

جدول (۲) نتایج به دست آمده برای پارامترهای حلقه کرونا را به ازای روش‌های بهینه‌سازی مختلف نشان می‌دهد. مطابق با نتایج جدول، روش BOBYQA نسبت به سایر روش‌ها کمترین مقدار میدان الکتریکی را ایجاد کرده و با زمان بهینه‌سازی ۳۲ ثانیه سریع‌ترین روش در دستیابی به پاسخ بهینه بوده است. همچنین در جدول (۳)، مقادیر بیشینه میدان الکتریکی در نقاط مختلف مقره و حلقه کرونا نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر به دست آمده در نقاط مختلف از شکست الکتریکی هوا (3 kV/mm) کمتر است و میدان الکتریکی به دست آمده به ازای نصب حلقه کرونای بهینه اثر مخربی بر بخش عایقی مقره ندارد.

برای مقایسه روش‌های استفاده‌شده از نظر شاخص همگرایی تابع هدف در طول فرآیند بهینه‌سازی، نمودار همگرایی این روش‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. در میان این روش‌ها، COBYLA به سبب اینکه از تقریب خطی برای حفظ و به‌روزرسانی تابع هدف و قیود استفاده می‌کند، دارای تکرارهای بیشتر و زمان اجرای طولانی‌تری نسبت به سایر روش‌ها است. درخور ذکر است مطابق با شکل (۸)، تغییرات تابع هدف در این شکل اهمیت بهینه‌سازی پارامترهای حلقه کرونا را بیش از پیش نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): تغییرات میدان الکتریکی روی محور مرکزی مقره به‌ازای روش‌های مختلف بهینه‌سازی



شکل (۱۱): تغییرات پتانسیل الکتریکی روی محور مرکزی مقره به‌ازای روش‌های مختلف بهینه‌سازی

جدول (۴): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از روش پیشنهادشده و

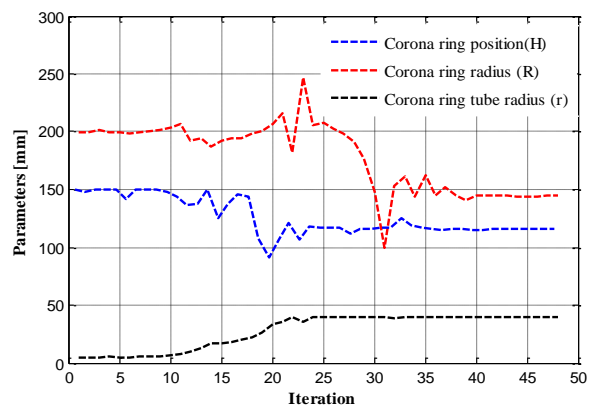
مرجع [۱۱]

	روش پیشنهادشده <b>BOBYQA</b>	مرجع [۱۱]
بیشینه میدان در محور اصلی مقره kV/m	۱۹۶/۰۵۹	۲۵۹/۷۲۴
بیشینه میدان در لبه چترک‌ها kV/m	۶۲۳/۰۷۷	۷۶۵/۳۱۳
بیشینه میدان در بخش درونی حلقه kV/m	۴۳۶/۱۸۱	۲۰۲/۳۹۹
بیشینه میدان در بخش بیرونی حلقه kV/m	۶۲۸/۸۴۳	۷۹۲/۹۵۳
H (mm)	۱۱۲/۰۰۴	۲۵۸/۴
R (mm)	۱۴۶/۸۲۷	۲۲۴/۵۳
r (mm)	۴۰	۴۰

فشارقوی و زمین بهبود داده‌اند.

با توجه به مؤثر بودن بهینه‌سازی ابعاد حلقه کرونا بر پروفیل پتانسیل الکتریکی، شکل (۱۱) تغییرات پتانسیل الکتریکی را در طول مقره برای حالت بهینه روش‌های مختلف نشان می‌دهد. تغییر انحنای پروفیل ولتاژ در طول مقره به‌منزله تغییر توزیع پتانسیل در آن است. با استفاده از حلقه کرونا شیب خط مماس بر منحنی کاهش یافته که موجب کاهش تنش الکتریکی وارده بر بخش‌های مختلف مقره و به عبارتی، یکنواخت‌تر شدن توزیع پتانسیل در طول مقره شده است.

به‌منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادشده، نتایج به‌دست‌آمده از این مقاله با نتایج ارائه‌شده در مرجع [۱۱] (در جدول (۴)) مقایسه شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود بیشینه میدان الکتریکی در نقاط مختلف از فضای شبیه‌سازی در شرایط استفاده از روش غیر مبتنی بر گرادیان، از مقادیر ارائه‌شده در مرجع [۱۱] به‌ازای استفاده از روش PSO کمتر است. همچنین پارامتر طراحی H در حلقه کرونا در روش پیشنهادشده با در نظر گرفتن قید فاصله تخلیه الکتریکی در یک زنجیره مقره ۱۳۲ کیلوولت، به‌خوبی شرایط بهینه را به دست آورده است. این در حالی است که در مرجع [۱۱] این پارامتر به علت ارتفاع نصب حلقه کرونا، از مقدار حداقل طول لازم برای جلوگیری از تخلیه الکتریکی تجاوز کرده که نشان‌دهنده در نظر نگرفتن این قید در فرآیند طراحی حلقه کرونا در این مرجع است.



شکل (۹): مشخصه همگرایی پارامترهای حلقه کرونا در طول پروسه بهینه‌سازی به‌ازای روش BOBYQA

توزیع میدان بسیار مهم‌اند. در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی غیر مبتنی بر گرادیان در راستای دستیابی به ابعاد بهینه پارامترهای حلقه کرونا استفاده شده است. NMS، CSS، BOBYQA و COBYLA روش‌های غیر مبتنی بر گرادیان‌اند که در این مقاله به کار رفته‌اند.

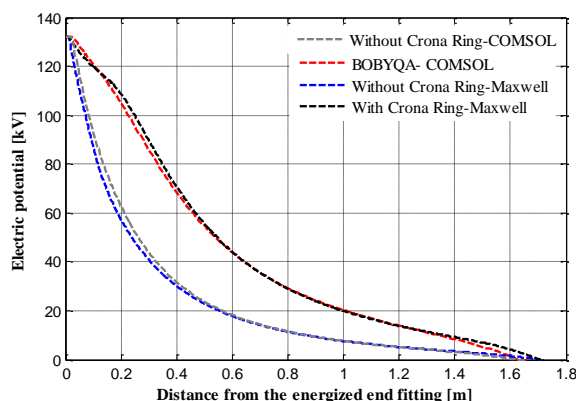
بررسی تأثیرات شعاع حلقه، شعاع لوله و ارتفاع نصب حلقه به صورت مجزا نشان‌دهنده رفتارهایی غیر همسان در تعدیل میدان الکتریکی است. ارتفاع حلقه تأثیر چشمگیری در میدان الکتریکی دارد. با افزایش ارتفاع نصب حلقه، میدان الکتریکی در امتداد عایق کاهش می‌یابد تا به حداقل مقدار برسد و سپس دوباره افزایش یابد. با افزایش قطر لوله حلقه کرونا شدت میدان الکتریکی کاهش می‌یابد و با افزایش قطر حلقه کرونا، شدت میدان الکتریکی تقریباً روند افزایشی را در پیش می‌گیرد؛ از این رو نیازمندی به بهینه‌سازی این پارامترهای بیش از پیش الزام می‌یابد.

مطابق با نتایج به دست آمده در این مقاله، روش BYBOQA در میان روش‌های غیر مبتنی بر گرادیان، بهترین پاسخ بهینه را در کوتاه‌ترین زمان کسب کرده است. این روش بیشینه میدان الکتریکی را در زمان ۳۲ ثانیه ۶۶/۲۸ در صد کاهش داده است. همچنین پارامترهای به دست آمده از روش بهینه‌سازی BYBOQA موجب شده است توزیع پتانسیل در طول مقره یکنواخت‌تر شود و شیب تغییرات پروفیل ولتاژ کاهش یابد.

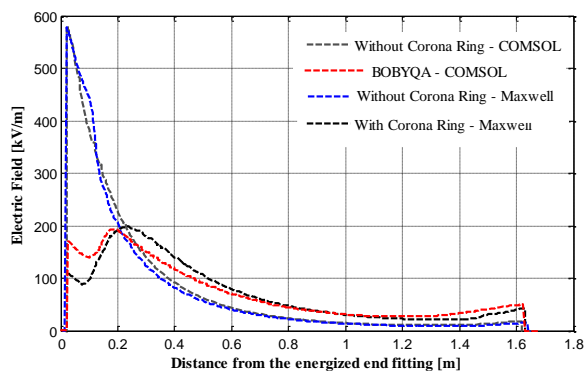
## مراجع

- [1] T. Zhao and M.G. Comber, "Calculation of electric field and potential distribution along non ceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 313-318, 2000.
- [2] T. Doshi, R. S. Gorur and J. Hunt, "Electric Field Computation of Composite Line Insulators up to 1200 kV AC", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, No. 3, pp. 861- 867, 2011.
- [3] 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 line insulators", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 23, pp. 823-830, 2008.
- [4] 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.
- [5] R. Abd-Rahman, A. Haddad, N. Harid and H.

در راستای اعتبارسنجی عملکرد نرم‌افزار COMSOL، شبیه‌سازی مقره پلیمری در نرم‌افزار MAXWELL به صورت دوبعدی در محیط متقارن استوانه‌ای انجام شد و نتایج حاصل از توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی در نقاط مختلف از فضای شبیه‌سازی استخراج شدند. اطلاعات مربوط به مقره مطابق با جدول (۱) در نرم‌افزار MAXWELL بارگذاری شده است. شکل‌های (۱۲) و (۱۳)، تغییرات توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی استخراج شده از دو نرم‌افزار را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج به دست آمده بازگوکننده صحت شبیه‌سازی مقره پلیمری با استفاده از نرم‌افزار COMSOL است.



شکل (۱۲): مقایسه تغییرات پتانسیل الکتریکی روی محور مرکزی مقره در دو نرم‌افزار COMSOL و MAXWELL



شکل (۱۳): مقایسه تغییرات میدان الکتریکی روی محور مرکزی مقره در دو نرم‌افزار COMSOL و MAXWELL

## ۸- نتیجه‌گیری

با توجه به توزیع غیریکنواخت میدان و پتانسیل الکتریکی در مقره‌های کامپوزیت فشارقوی، استفاده از حلقه‌های کرونا امری ضروری است. پارامترهای طراحی مانند قطر لوله حلقه کرونا، قطر حلقه کرونا و موقعیت عمودی آن در میزان بهبود

- IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 20, No. 4, pp. 1361- 1368, 2013.
- [14] Han Jiang, Youping Tu, Zhikang Yuan, Cheng Wang, "Calculation and Optimization of Electric Field of Insulators with Internal Grading Ring", IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2018.
- [15] ialong Wang, Zongren Peng, Hao Wu, Hongwei Deng, Hao Liu, Chuang Wang, "Electric field calculation and grading ring design for 330kV terminal tower with composite cross-arms", IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), 2016.
- [16] B. Farahani, M. Abedi, "An Optimal Load-Shedding Scheme During Contingency Situations Using Meta-Heuristics Algorithms with Application of AHP Method", 11th International on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, pp. 167-173, 22-24 May 2008.
- [17] A. Chakri, R. Khelif, M. Benouaret, M. X. S. Yang, 'New directional bat algorithm for continuous optimization problems', Expert Systems with Applications (ESWA). Vol. 69, No.1, pp. 159-175. March 2017
- [18] S. Zhang, Z. Peng, L. Peng, H. Wang "Optimization of corona ring structure for UHV composite insulator using finite element method and PSO algorithm", IEEE International Conference on Solid Dielectrics., Bologna, pp. 210-213. June 30 - 4 July, 2013.
- [19] Rios LM, Sahinidis NV, "Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations. Journal of Global Optimization" Vol. 56, No.3, pp. 1247-93. Jul 2013.
- [20] Optimization module user's guide, www.comsol.com/patents, 2018.
- [21] Multiphysics, COMSOL "Introduction to COMSOL multiphysics," COMSOL Multiphysics, Burlington, MA, accessed Feb 9 (1998): 2018.
- Griffiths "Stress Control on Polymeric Outdoor Insulators Using Zinc Oxide Microvaristor Composites", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 19, No. 2, pp. 705-713, 2012.
- [6] D. Cruz Domínguez, F. P. Espino-Cortés and P. Gómez. "Optimized Design of Electric Field Grading Systems in 115 kV Non-Ceramic Insulators", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 20, No. 1, pp. 63-70, 2013.
- [7] M. Khodsuz and M. Mirzaie, "Analysis of Grading Ring Design Parameters and Heat Sink Numbers Effect on Voltage Distribution and Leakage Current in Metal Oxide Surge Arrester", Iranian J. Electr. Electronic Eng., Vol. 10, pp. 152-158, 2014.
- [8] L. Shu, S. Wang, X. Jiang, Q. Hu, Y. He and Z. Wu "Influences of grading ring arrangement on AC flashover performance of 220 kV icecovered composite insulators", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 21, No. 6, pp. 2652-2661, 2014.
- [9] J. Du, Z. Peng, J. Li, S. Zhang, N. Li and C. Fan "Electric Field Calculation and Grading Ring Optimization for 1000 kV AC Post Porcelain Insulator", IEEE Conf. Solid Dielectr., Bologna, Italy, pp. 198-201, 2013.
- [10] M.H. Abderrazzaq, A.M. Abu Jalagif, "Characterizing of corona rings applied to composite insulators", Electric Power Systems Research, Vol. 95, pp. 121-127, 2013.
- [11] M'hamdi, B., Tegar, M., Mekhaldi, A.: 'Optimal design of corona ring on HV composite insulator using PSO approach with dynamic population size', IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol. 23, No. 2, pp.1048-1057, April 2016.
- [12] S. Ilhan and A. Ozdemir "380 kV Corona Ring Optimization for ac Voltages", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, No. 2, pp. 408- 417, 2011
- [13] D. Nie, H. Zhang, Z. Chen, X. Shen and Z. Du, "Optimization design of grading ring and electrical field analysis of 800 kV UHVDC Wall bushing",

