



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



## Research Article

# Optimum Design of Corona Ring of Composite Insulators Considering the Effect of Mutual Phases by Monte Carlo and Coordinate Search Intelligente Algorithms

Mostafa Khajavi <sup>a</sup>, Sajad Bagheri <sup>b,\*</sup>, Asaad Shemshadi <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Ph.D. student, Department of Electrical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

<sup>b</sup> Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

<sup>c</sup> Assistant professor, Electrical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 15 October 2023

Revised: 02 November 2023

Accepted: 14 November 2023

### Keywords:

Composite insulator,  
Corona ring,  
Fem,  
Mutual phases,  
Monte carlo,  
Coordinate search.

## ABSTRACT

Today, composite insulators are used in high-voltage power transmission lines, especially in polluted and humid areas. One of the parameters affecting the aging of composite insulators is the control of the electric field intensity (EFI) distribution on the creepage distance of the insulator. Designing corona ring is considered as one of the important factors in reducing EFI. In this paper, the changes in the EFI on the creepage distance of the 230 kV composite insulator have been investigated and calculated with and without considering the effects of the corona ring, tower structure, conductor, hardware, and mutual phases using the Finite Element Method (FEM) and in three dimensions in software COMSOL. Then, the appropriate objective function was defined to minimize the maximum EFI on the creepage distance of the composite insulator. Finally, Monte Carlo and coordinate search algorithms were used for the optimum design of the corona ring parameters of the composite insulator, including the diameter, thickness, and installation position of the corona ring in the high voltage potential part, and compared with other non-gradient-based methods. The simulation results showed that the design and calculation of the optimal parameters of the corona ring using Monte Carlo and coordinate search algorithms reduced the maximum EFI on the creepage distance of the composite insulator by 78% compared to the case without the corona ring, which is the innovation of this paper to other published works.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.32057.2543>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\*Corresponding Author:

E-mail addresses: [sajad.bagheri@iau.ac.ir](mailto:sajad.bagheri@iau.ac.ir)

## How to cite this article:

Khajavi, M., Bagheri, S., & Shemshadi, A. (2024). Optimum Design of Corona Ring of Composite Insulators Considering the Effect of Mutual Phases by Monte Carlo and Coordinate Search Intelligente Algorithms. Journal of Modeling in Engineering, 22(77), 189-206. doi: 10.22075/jme.2023.32057.2543

# طراحی بهینه حلقه کرونا مفره کامپوزیتی با در نظر گرفتن اثر متقابل فازها توسط الگوریتم‌های هوشمند مونت کارلو و جستجوی مختصات

مصطفی خواجوی<sup>۱</sup>، سجاد باقری<sup>۲\*</sup>، اسعد شمشادی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳	امروزه در خطوط انتقال برق فشار قوی به خصوص در مناطق آلوده و مرطوب از مقره‌های کامپوزیتی استفاده می‌گردد. یکی از پارامترهای بسیار تأثیرگذار بر طول عمر مقره‌های کامپوزیتی، کنترل توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره می‌باشد. طراحی مناسب حلقه کرونا یکی از عوامل مهم در کاهش شدت میدان الکتریکی محسوب می‌شود. در این مقاله، ابتدا تغییرات شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت، با و بدون در نظر گرفتن اثرات حلقه کرونا، سازه برج، هادی، براق‌آلات و فازهای متقابل با استفاده از روش المان محدود و به صورت سه بعدی در نرم افزار کامسول بررسی و محاسبه شده است. سپس، تابع هدف مناسب به منظور مینیموم کردن حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی لحاظ می‌گردد. در نهایت، از دو الگوریتم هوشمند مونت کارلو و جستجوی مختصات به منظور طراحی بهینه پارامترهای حلقه کرونا مفره کامپوزیتی شامل قطر، ضخامت و موقعیت نصب حلقه کرونا از قسمت پتانسیل فشار قوی استفاده و با سایر روش‌های غیرمبتنی بر گرادیان مقایسه می‌شود. نتایج بدست آمده نشان داد که طراحی و محاسبه پارامترهای بهینه حلقه کرونا با استفاده از روش‌های مونت کارلو و جستجوی مختصات باعث کاهش حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی تا ۷۸٪ نسبت به حالت بدون حلقه کرونا می‌شود که از نوآوری اصلی این مقاله با سایر تحقیقات منتشر شده می‌باشد.
<b>واژگان کلیدی:</b> مفره کامپوزیتی، حلقه کرونا، روش اجزای محدود، فازهای متقابل، مونت کارلو، جستجوی مختصات.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.32057.2543>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه  
مقره‌ها وظیفه اتصال هادی‌ها به سازه برج<sup>۲</sup> را برعهده داشته و ضمن حفظ فاصله عایقی مناسب باید خواص مکانیکی و الکتریکی قابل قبولی داشته باشند. در سالیان اخیر همواره استفاده از مقره‌های کامپوزیتی به عنوان بهترین گزینه برای خطوط انتقال برق فشار متوسط<sup>۳</sup> و فشار قوی<sup>۴</sup> در مناطق با آلودگی ایزولاسیون سنگین<sup>۵</sup> مطرح بوده است. مقره‌های کامپوزیتی در مقایسه با مقره‌های سرامیکی و شیشه‌ای به دلیل قیمت ارزانتر، سبکی و راحتی نصب [۱ و ۲]، آبگریزی<sup>۶</sup> [۳]، مقاومت مکانیکی بالاتر [۴]، خواص عایقی بهتر [۵]، مقاومت خوب در برابر پدیده شکست سطحی<sup>۷</sup> و نیاز به تعمیر و نگهداری کمتر بطور گسترده در شبکه‌های برق مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶]. یکی از پارامترهای بسیار تأثیرگذار بر عملکرد بلند مدت مقره‌های کامپوزیتی، کنترل

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [sajad.bagheri@iau.ac.ir](mailto:sajad.bagheri@iau.ac.ir)  
۱. دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک  
۲. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک  
۳. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اراک

<sup>2</sup> Tower Structure

<sup>3</sup> Middle Voltage

<sup>4</sup> High Voltage

<sup>5</sup> Heavy Insulation

<sup>6</sup> hydrophobicity

<sup>7</sup> Flashover

استناد به این مقاله:

خواجوی، مصطفی، باقری، سجاد، و شمشادی، اسعد. (۱۴۰۳). طراحی بهینه حلقه کرونا مفره کامپوزیتی با در نظر گرفتن اثر متقابل فازها توسط الگوریتم‌های هوشمند مونت کارلو و جستجوی مختصات. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۷)، ۱۸۹-۲۰۶. doi: 10.22075/jme.2023.32057.2543

ندارند و برای رسیدن به یک نتیجه مطلوب به تکرارهای زیادی نیاز دارند، به ویژه در گام‌های اولیه، که در آن چندین پارامتر در محدوده‌های وسیع تغییر می‌کنند. برخی از رایج-ترین الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌نمودن پارامترهای حلقه‌کرونا شامل: الگوریتم ژنتیک<sup>۱۳</sup> [۱۶]، بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها<sup>۱۴</sup> [۱۷]، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۱۵</sup> [۱۸]، الگوریتم جستجوی فاخته<sup>۱۶</sup> [۱۹]، الگوریتم بهینه‌ساز نهنگ<sup>۱۷</sup> [۲۰]، بهینه‌ساز گرگ خاکستری<sup>۱۸</sup> [۲۱]، بهینه‌سازی شیر مورچه<sup>۱۹</sup> [۲۲]، جستجوی کلونی ویروس<sup>۲۰</sup> [۲۳] و پژواک دلفین<sup>۲۱</sup> [۲۴] است. روش‌های تحلیل عددی نیز در کنار روش‌های فراابتکاری مورد استفاده قرار می‌گیرند که به دو دسته روش‌های مبتنی بر محاسبه گرادیان<sup>۲۲</sup> و روش‌های غیر مبتنی بر محاسبه گرادیان<sup>۲۳</sup> تقسیم می‌شوند [۱۵] و [۲۵]. روش اجزا محدود<sup>۲۴</sup>، روش حل عددی است که با ساده‌سازی معادلات دیفرانسیلی، حل کردن آنها را با روش‌های بسیار ساده‌تر امکان‌پذیر می‌سازد. روش‌های تحلیل عددی مبتنی بر روش اجزا محدود اغلب قابلیت حل مسئله را در فضایی با هندسه متغیر دارند. از این رو، نتایج دقیق بالایی را با زمان شبیه‌سازی سریع و انعطاف‌پذیری بیشتر در مقایسه با روش‌های فراابتکاری ارائه می‌دهند که از دیگر نوآوری این مقاله به‌شمار می‌رود. در [۲۶]، با استفاد از روش تحلیل عددی و دو الگوریتم غیر مبتنی بر گرادیان از قبیل الگوریتم نلد-مید<sup>۲۵</sup> و الگوریتم کران با تقریب درجه دو<sup>۲۶</sup>، پارامترهای بهینه حلقه‌کرونا شامل قطر، ضخامت و ارتفاع محل نصب حلقه‌کرونا از قسمت پتانسیل فشار قوی با در نظر گرفتن اثرات سازه برج، هادی، یراق‌آلات و فازهای متقابل برای مقره کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت محاسبه شده است. تفاوت اصلی تحقیق حاضر با مقاله [۲۶]، استفاده از روش‌های مونت کارلو<sup>۲۷</sup> و جستجوی مختصات<sup>۲۸</sup> و مقایسه نتایج حاصل با سایر روش‌های غیر مبتنی بر گرادیان بوده است که تا کنون بررسی نشده است.

توزیع پتانسیل و شدت میدان الکتریکی در اطراف مقره و متعاقب آن کاهش احتمال وقوع پدیده کرونا می‌باشد [۷]. شدت میدان الکتریکی شدید، علاوه بر ایجاد کرونا روی سطح مقره کامپوزیتی، می‌تواند باعث تخلیه جزئی<sup>۸</sup> در حفره‌های موجود در مقره و خطای ایجاد جرعه داخلی<sup>۹</sup> و در نهایت منجر به شکست ترد هسته<sup>۱۰</sup> شود و مقره را از نظر خواص الکتریکی و مکانیکی کاملاً معیوب سازد [۸-۱۰]. حلقه کرونا<sup>۱۱</sup>، مهمترین ابزار کنترل شدت میدان و پتانسیل الکتریکی در مقره‌های کامپوزیتی است [۱۱]. تحقیقات زیادی برای کاهش شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی<sup>۱۲</sup> مقره کامپوزیتی با استفاده از حلقه‌کرونا و روش‌های بهینه‌سازی ابعاد حلقه‌کرونا انجام شده است. به منظور طراحی بهینه حلقه‌کرونا، سه پارامتر قطر، ضخامت و موقعیت نصب حلقه‌کرونا از قسمت پتانسیل فشار قوی مدنظر قرار می‌گیرد [۱۴-۱۲]. در تحقیقات گذشته به طراحی و بهینه‌سازی ابعاد حلقه‌کرونا با هدف کمینه کردن حداکثر شدت میدان الکتریکی روی سطح مقره کامپوزیتی بدون حضور سازه برج، هادی، یراق‌آلات و فازهای متقابل پرداخته شده است. از آنجاییکه در هیچکدام از تحقیقات بهینه‌سازی ابعاد حلقه‌کرونا همزمان با در نظر گرفتن اثر تمام تجهیزات مذکور برای حلقه‌کرونا پرداخته نشده است. لذا، این موضوع نوآوری اصلی این مقاله محسوب می‌شود. حل مسائل بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های ابتکاری، بخصوص زمانیکه دارای محدودیت‌های مختلف، مسائل پیچیده، چندوجهی، گسسته یا ناپیوسته هستند، بسیار مشکل است. همچنین، دو مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری، گرفتار شدن آنها در نقاط بهینه محلی و همگرایی زودرس است. برای حل این مشکلات از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود [۱۵]. روش‌های فراابتکاری مختلفی توسط محققان برای بهینه‌سازی ابعاد حلقه‌کرونا در ادبیات ارائه شده‌اند. روش‌های فراابتکاری ابزار قدرتمندی در بهینه‌سازی هستند. با این حال، این روش‌ها بازده زمانی

<sup>19</sup> Ant Lion Optimizer (ALO)

<sup>20</sup> Virus Colony Search (VCS)

<sup>21</sup> Dolphin Echolocation (DE)

<sup>22</sup> Gradient Based Solvers (GBS)

<sup>23</sup> Derivative-Free Solvers (DFS)

<sup>24</sup> Finite Element Method (FEM)

<sup>25</sup> Nelder – Mead (NM)

<sup>26</sup> Bound Optimization by Quadratic Approximation (BOBYQA)

<sup>27</sup> Monte Carlo (MC)

<sup>28</sup> Coordinate Search (CS)

<sup>8</sup> Partial discharge

<sup>9</sup> Flash under

<sup>10</sup> Brittle fracture on FRP rod

<sup>11</sup> Corona ring

<sup>12</sup> Creepage distance

<sup>13</sup> Genetic Algorithm (GA)

<sup>14</sup> Ant Colony Optimization (ACO)

<sup>15</sup> Particle Swarm Optimization (PSO)

<sup>16</sup> Cuckoo Search Algorithm (CSA)

<sup>17</sup> Whale Optimization Algorithm (WOA)

<sup>18</sup> Grey Wolf Optimizer (GWO)

در [۳۱]، ابتدا، پنجره فاز وسط سازه برج خط ۵۰۰ کیلوولت تک مداره با هادی باندل سه‌تایی و چوب استک بصورت سه بعدی در نرم‌افزار کامسول مدل‌سازی شده است. سپس، شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی چوب استک با موقعیت قرارگیری تکنیسین فنی در شش حالت مختلف از طول پنجره میانی سازه برج اندازه‌گیری شده است. در [۳۱]، هیچگونه راهکاری برای کاهش شدت میدان الکتریکی ارائه نشده است.

در [۳۲]، شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت در هشت سناریو با استفاده از روش المان محدود و به‌صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار کامسول بررسی شده است. این هشت سناریو شامل شرایط عادی، بارانی، سرما و یخ‌زدگی، آلودگی نمکی، آلودگی صنعتی، در نظر گرفتن یک عدد حلقه کرونا، در نظر گرفتن دو عدد حلقه کرونا و در نهایت در نظر گرفتن دو عدد حلقه کرونا با رطوبت در نظر گرفته شده است.

در [۳۳]، مقادیر بهینه حلقه کرونا مفره سرامیکی ۷۶۵ کیلوولت اتکایی پست با استفاده از روش المان مرزی و بصورت سه‌بعدی در نرم‌افزار کولمب بدست آمده است. در این تحقیق، با تغییر پارامترهای حلقه کرونا از قبیل ضخامت، قطر و موقعیت محل نصب از قسمت پتانسیل فشار قوی، شدت میدان و پتانسیل الکتریکی از طریق شبیه‌سازی در نرم‌افزار کولمب بر روی سطح مفره سرامیکی ۷۶۵ کیلوولت محاسبه شده است. از معایب [۳۳]، عدم استفاده از روش‌های هوشمند جهت بهینه‌سازی پارامترهای حلقه کرونا می‌باشد.

در [۳۴]، رفتار توزیع شدت میدان الکتریکی روی سطح شش نمونه مختلف مفره سرامیکی ۲۳۰ کیلوولت با استفاده از روش‌های تحلیل عددی و المان محدود و به صورت سه بعدی در پنج حالت مختلف از قبیل: حضور سازه برج و هادی، پروفیل‌های مختلف مفره، حضور حلقه کرونا، ابعاد مختلف حلقه کرونا و تعداد چترک‌های مختلف در نرم‌افزار کامسول مطالعه و تحلیل شده است. در [۳۴]، هیچگونه مطالعه‌ای در خصوص اثرات فازهای متقابل و بهینه‌سازی پارامترهای حلقه کرونا از قبیل قطر، ضخامت و ارتفاع محل نصب حلقه کرونا با استفاده از روش‌های هوشمند صورت نگرفته است.

در [۲۷]، از سه الگوریتم فراابتکاری چند هدفه از قبیل بهینه‌ساز شیر مورچه<sup>۲۹</sup>، بهینه‌ساز ازدحام ذرات<sup>۳۰</sup> و الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب شماره<sup>۳۱</sup>، جهت تعیین ابعاد بهینه حلقه کرونا مفره کامپوزیتی ۴۰۰ کیلوولت با استفاده از روش المان محدود و بصورت سه بعدی در نرم‌افزار کامسول استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم چند هدفه بهینه‌ساز شیر مورچه، زمان مناسب و جواب بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر دارد.

در [۲۸]، ابتدا با تغییر پارامترهای حلقه کرونا از قبیل قطر، ضخامت و موقعیت نصب حلقه کرونا از قسمت پتانسیل فشار قوی مفره کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت، توزیع شدت میدان الکتریکی در نقاط اتصال سه‌گانه، فیتینگ انتهایی و سطح حلقه کرونا مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس تابع هدف جهت کمینه کردن حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره مورد مطالعه با در نظر گرفتن قیود طراحی پارامترهای حلقه کرونا تعریف شده است. در نهایت با حل تابع هدف با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، مقادیر بهینه حلقه کرونا به روش المان محدود و بصورت سه بعدی در نرم‌افزار کامسول بدست آمده است.

در [۲۹]، مقادیر بهینه پارامترهای حلقه کرونا مفره کامپوزیتی اتکایی ۲۷۵ کیلوولت قطار پرسرعت مورد مطالعه و محاسبه قرار گرفته است. رفتار شدت میدان الکتریکی در اولین چترک مفره اتکایی با تغییر سه پارامتر: شعاع حلقه کرونا (R)، زاویه حلقه کرونا (میزان خمش حلقه کرونا  $(\theta)$ ) و موقعیت قرارگیری حلقه کرونا از قسمت پتانسیل فشار قوی (H) مورد بررسی قرار گرفته است. از معایب [۲۹]، می‌توان به عدم استفاده از روش‌های هوشمند جهت تعیین پارامترهای بهینه حلقه کرونا اشاره نمود.

در [۳۰]، مقایسه نتایج حداکثر شدت میدان الکتریکی روی سطح مفره‌های کامپوزیتی و شیشه‌ای ۴۰۰ کیلوولت با حلقه کرونا اولیه نشان می‌دهد که حداکثر شدت میدان الکتریکی روی سطح مفره کامپوزیتی کمتر از مفره شیشه‌ای می‌باشد. سپس، با بررسی و مدل‌سازی دو بعدی مفره کامپوزیتی در خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت، نشان می‌دهد که حضور سازه برج و یراق‌آلات باعث افزایش حداکثر شدت میدان الکتریکی روی سطح مفره کامپوزیتی می‌شود.

<sup>31</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)

<sup>29</sup> Multi-Objective Ant Lion Optimizer (MOALO)

<sup>30</sup> Multi-Objective Particle Swarm Optimizer (MOPSO)

در [۳۸]، با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی<sup>۳۴</sup> پارامترهای بهینه حلقه کرونا از قبیل: قطر، ضخامت و موقعیت نصب حلقه کرونا جهت کمینه کردن حداکثر شدت میدان الکتریکی روی سطح هفت نوع مقره کامپوزیتی با ساختار چترک متفاوت (ابعاد و تعداد چترکها) با استفاده از روش المان محدود و بصورت دو بعدی متقارن در نرم افزار کامسول محاسبه شده است.

در [۳۹]، با استفاده از پاسخ‌های روش عددی تاگوچی<sup>۳۵</sup> و تعریف واریانس مجاز برای حل مسئله، ابعاد بهینه حلقه کرونا از قبیل: قطر، ضخامت و موقعیت نصب حلقه کرونا با هدف کمینه کردن حداکثر شدت میدان الکتریکی روی سطح مقره کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار کامسول بدست آمده است.

در این مقاله، طراحی و بهینه‌سازی ابعاد حلقه کرونا با در نظر گرفتن اثرات سازه برج، هادی، یراق‌آلات و فازهای متقابل برای یک خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت تک‌مداره با سازه برج مشبک و هادی در یک تک‌سیمه بصورت سه‌بعدی ارائه شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد که حضور سازه برج و فازهای متقابل باعث افزایش قابل توجه شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت می‌شود. سپس، با در نظر گرفتن تمامی اثرات مذکور و تعریف تابع هدف مناسب جهت کمینه‌کردن حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی فاز میانی، ابعاد بهینه حلقه کرونا از قبیل ضخامت، قطر و موقعیت نصب حلقه کرونا از قسمت پتانسیل فشار قوی توسط روش‌های غیر مبتنی بر گرادیان در بسته بهینه‌سازی نرم‌افزار کامسول توسط الگوریتم مونت کارلو و الگوریتم جستجوی مختصات، محاسبه می‌گردد.

## ۲- تحلیل عددی شدت میدان الکتریکی روی مقره کامپوزیتی

جهت تعیین شدت میدان الکتریکی، ترکیب معادلات الکترومغناطیسی ماکسول منجر به معادله پواسن می‌شود که در رابطه (۱) بیان شده است [۲۸ و ۴۰].

$$-\nabla \cdot [(\sigma + 2\pi\epsilon_0\epsilon_r)\nabla V - J_e] = 2\pi f \rho_e \quad (1)$$

$\rho_e$ : چگالی بار الکتریکی داخل عایق ( $C/m^3$ )

در [۳۵]، تابع هدف به منظور کاهش حداکثر شدت میدان الکتریکی روی سطح مقره ۱۱۵ کیلوولت کامپوزیتی در دو حالت در نرم افزار متلب تعریف شده است. حالت اول، تابع هدف با در نظر گرفتن پارامترهای هندسه مقره از قبیل: ضریب گذردهی نسبی<sup>۳۲</sup> روکش مقره ( $\epsilon_r$ )، زاویه قرارگیری روکش مقره روی هسته ( $\theta$ ) در نقطه اتصال سه گانه بیان شده است. حالت دوم، تابع هدف با در نظر گرفتن پارامترهای هندسه حلقه کرونا از قبیل: قطر، ضخامت و ارتفاع نصب حلقه کرونا بیان شده است. مقایسه و بررسی نتایج نشان می‌دهد که تأثیرگذاری پارامترهای حلقه کرونا از قبیل: قطر، ضخامت و موقعیت نصب حلقه کرونا در کاهش حداکثر شدت میدان الکتریکی روی سطح مقره کامپوزیتی ۱۱۵ کیلوولت در مقایسه با پارامترهای هندسه مقره بیشتر می‌باشد.

در [۳۶]، ابتدا، تغییرات شدت میدان الکتریکی روی سطح وال بوشینگ ۸۰۰ کیلوولت جریان مستقیم با و بدون حضور حلقه کرونا اولیه توسط روش المان محدود و بصورت سه بعدی در نرم‌افزار انسیس<sup>۳۳</sup> بررسی شده است. سپس، پارامترهای بهینه حلقه کرونا از قبیل: قطر، ضخامت و ارتفاع نصب حلقه کرونا با هدف کمینه کردن حداکثر شدت میدان الکتریکی روی سطح وال بوشینگ با تغییر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن دو پارامتر دیگر بدست آمده که نشان می‌دهد حداکثر شدت میدان الکتریکی روی سطح وال بوشینگ با حضور حلقه کرونا بهینه در مقایسه با حلقه کرونا اولیه ۵۰ درصد کاهش یافته است. از معایب [۳۶]، عدم استفاده از روش‌های هوشمند جهت بهینه‌سازی پارامترهای حلقه کرونا می‌باشد.

در [۳۷]، سه مقره کامپوزیتی با پروفیل‌های متفاوت (هندسه متفاوت) و یک مقره شیشه‌ای ۴۰۰ کیلوولت از خط ۴۰۰ کیلوولت الجزایر بصورت دو بعدی در نرم افزار کامسول در شرایط تمیز و آلوده تعریف شده است. بررسی نتایج شدت میدان الکتریکی روی سطح مقره کامپوزیتی و شیشه‌ای در شرایط تمیز و آلوده نشان می‌دهد که حداکثر شدت میدان الکتریکی سمت پتانسیل فشار قوی و سمت زمین (پتانسیل صفر) در مقره کامپوزیتی در مقایسه با مقره شیشه‌ای شرایط بهتری دارد.

<sup>34</sup> Differential Evolution

<sup>35</sup> L27-Taguhi

<sup>32</sup> Relative Permittivity

<sup>33</sup> Ansys

به ترتیب  $0.42 \text{ kv/mm}$  و  $0.35 \text{ kv/mm}$  و  $1/8 \text{ kv/mm}$  بیشتر نباشد [۴۲]. تابع هدف متشکل از مجموعه‌ای از روابط ریاضی بین حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی و پارامترهای حلقه کرونا از قبیل قطر، ضخامت و ارتفاع محل نصب از قسمت پتانسیل فشار قوی است. این تابع هدف به ما اجازه می‌دهد تا الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف را برای یافتن پارامترهای بهینه حلقه کرونا جهت به حداقل رساندن حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره اعمال کنیم. تابع هدف تعیین شده در این مقاله در رابطه (۶) ارائه شده است:

$$F(H, D, T) = \text{Min}(E_{\max}(H, D, T)) \quad (6)$$

رابطه (۷)، حدود تغییرات بالا و پایین پارامترهای حلقه کرونا از قبیل: ارتفاع محل نصب حلقه کرونا از قسمت پتانسیل فشار قوی<sup>۳۸</sup> (H)، قطر حلقه کرونا<sup>۳۹</sup> (D) و ضخامت حلقه کرونا<sup>۴۰</sup> (T) را نشان می‌دهد [۲۶ و ۲۷].

$$25\text{mm} \leq T \leq 55\text{mm}$$

$$250\text{mm} \leq D \leq 650\text{mm} \quad (7)$$

$$0\text{mm} \leq H \leq 200\text{mm}$$

### ۳-۱- الگوریتم مونت کارلو

الگوریتم مونت کارلو ابتدا توسط Metropolis و همکاران Neumann و Ulam برای تشریح پتانسیل بر هم‌کنش مولکول‌های ترکیبات گازی اورانیوم استفاده شده در ساخت بمب اتم در خلال جنگ جهانی دوم (پروژه منهتن) استفاده شد [۴۳ و ۴۴]. الگوریتم مونت کارلو یک روش بهینه‌سازی است که برای محاسبه نتایج به نمونه‌گیری تصادفی مکرر و تجزیه و تحلیل آماری متکی است. این الگوریتم بهینه‌سازی بسیار نزدیک به آزمایش‌های تصادفی است، آزمایش‌هایی که نتیجه خاص آنها از قبل مشخص نیست. ما برای توصیف تعاملات در یک سیستم با استفاده از عبارات ریاضی از مدل‌های ریاضی در علوم طبیعی، علوم اجتماعی و مهندسی استفاده می‌کنیم. این مدل‌ها معمولاً به تعدادی از پارامترهای ورودی بستگی دارند که وقتی از طریق فرمول‌های ریاضی موجود در مدل پردازش شوند منجر به یک یا چند خروجی می‌شوند [۴۵].

$\epsilon_0$ : ضریب گذردهی هوا ( $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ )

$\epsilon_r$ : ضریب گذردهی نسبی ماده

$\sigma$ : ضریب هدایت الکتریکی

$J_e$ : چگالی جریان الکتریکی

بارهای الکتریکی درون عایق مفره ناچیز است، و برای حل میدان الکتریکی بر روی مفره، می‌توان عایق را ایده‌آل فرض کرد. بنابراین  $J_e = \sigma = \rho_e$  و برابر صفر می‌باشد. محاسبه توزیع پتانسیل الکتریکی برای ساده‌سازی محاسبات میدان الکتریکی به کار می‌رود که با توجه به منفی گرادیان پتانسیل الکتریکی، میدان الکتریکی از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$E = -\nabla V \quad (2)$$

$V$  و  $E$  به ترتیب میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی هستند. معادله اول ماکسول که قانون گاوس نیز نامیده می‌شود. طبق رابطه (۳) بیان می‌کند که میدان الکتریکی با مقدار باری که آن میدان را ایجاد می‌کند رابطه مستقیم دارد. در رابطه (۳)،  $\rho$  مقاومت مخصوص می‌باشد.

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon}, \epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (3)$$

از ترکیب روابط (۲) و (۳) خواهیم داشت:

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla V = -\rho \quad (4)$$

با توجه به اینکه بارهای الکتریکی درون مفره ناچیز است ( $\rho = 0$ )، معادله پواسن به معادله لاپلاس تبدیل می‌شود:

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla V = 0 \rightarrow \nabla^2 V = 0 \quad (5)$$

### ۳- تابع هدف

مطابق با پیشنهاد موسسه تحقیقات نیروی برق<sup>۳۶</sup> و دستورالعمل آزمون و مشخصات فنی مفره‌های سیلیکون رابر (دفتر فنی و نظارت شبکه‌های انتقال شرکت توانیر) [۴۱]، طراحی بهینه حلقه کرونا باید به گونه‌ای باشد که حداکثر شدت میدان الکتریکی در نقاط بحرانی مفره کامپوزیتی از قبیل: نقطه اتصال سه‌گانه<sup>۳۷</sup>، سطح حلقه کرونا و اتصالات انتهایی در شرایط خشک و تمیز از مقدار مجاز

<sup>39</sup> corona ring diameter

<sup>40</sup> corona ring thickness

<sup>36</sup> Electric Power Research Institute

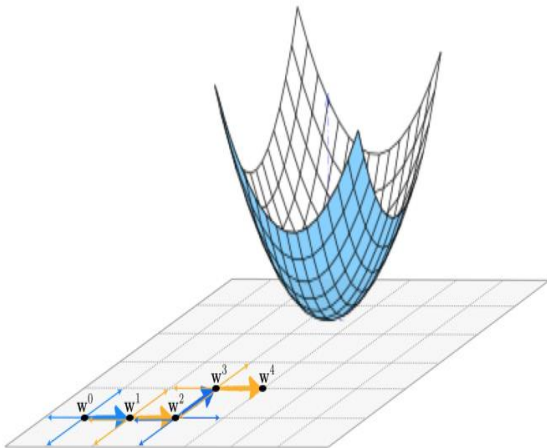
<sup>37</sup> Triple Point

<sup>38</sup> corona ring position

$$y = f(x) \quad \text{or} \quad y = f(x_1, x_2, \dots) \quad (۸)$$

### ۳-۲- الگوریتم جستجوی مختصات

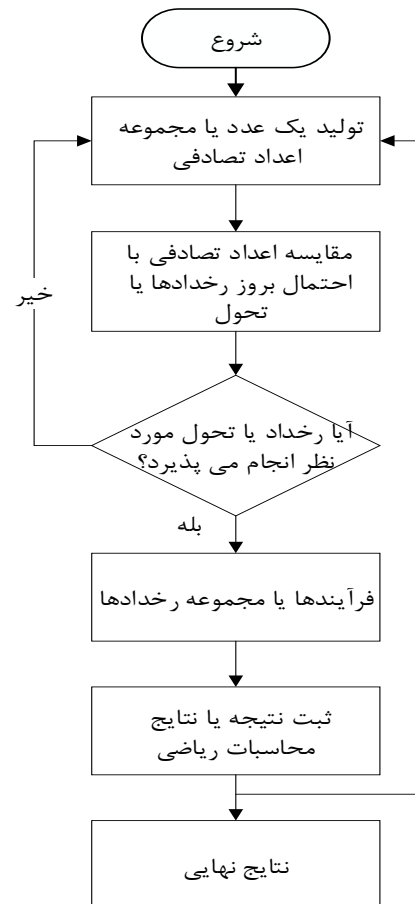
این الگوریتم با یک حدس اولیه در فضای پارامتر شروع می‌شود و مقدار تابع هدف را در جهت‌های مختصات فضای پارامتر برای بدست آوردن نتیجه بهتر از حدس اولیه بررسی می‌کند. طول گام‌ها در مختصات تعیین شده با توجه به مقادیر تابع هدف، کاهش و یا افزایش می‌یابد. الگوریتم جستجوی مختصات مستقیماً شیب تابع هدف را ارزیابی نمی‌کند. با وجود این، هنگامی که الگوریتم، 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 به ویژه برای نقاط نزدیک به مینیمم‌های محلی تسریع می‌کند (شکل ۲).



شکل ۲- جستجو در محورهای مختصات (در هر مرحله، به طور متناوب آبی و زرد برای تجسم بهتر رنگ آمیزی شده است).

همانطور که در شکل (۲) برای مثال به صورت دو بعدی نشان داده شده است، با الگوریتم جستجوی مختصات، ما بهترین جهت را برای بدست آوردن مقدار مینیمم تابع هدف را تنها در میان محورهای مختصات فضای ورودی جستجو می‌نماییم. این به طور کلی به این معنی است که برای تابعی از  $N$  بعد ورودی، ما فقط به  $2N$  جهت‌های مثبت و منفی هر ورودی مختصات نگاه می‌کنیم. همچنین الگوریتم جستجوی محلی تصادفی، از جهت‌های طول واحد استفاده خواهیم کرد، به این معنی که در هر مرحله مجموعه جهت‌هایی که جستجو می‌کنیم همیشه فقط از جهت‌های مثبت و منفی پایه استاندارد تشکیل شده است [۱۵].

مراحل اجرای الگوریتم جستجوی مختصات به شرح زیر



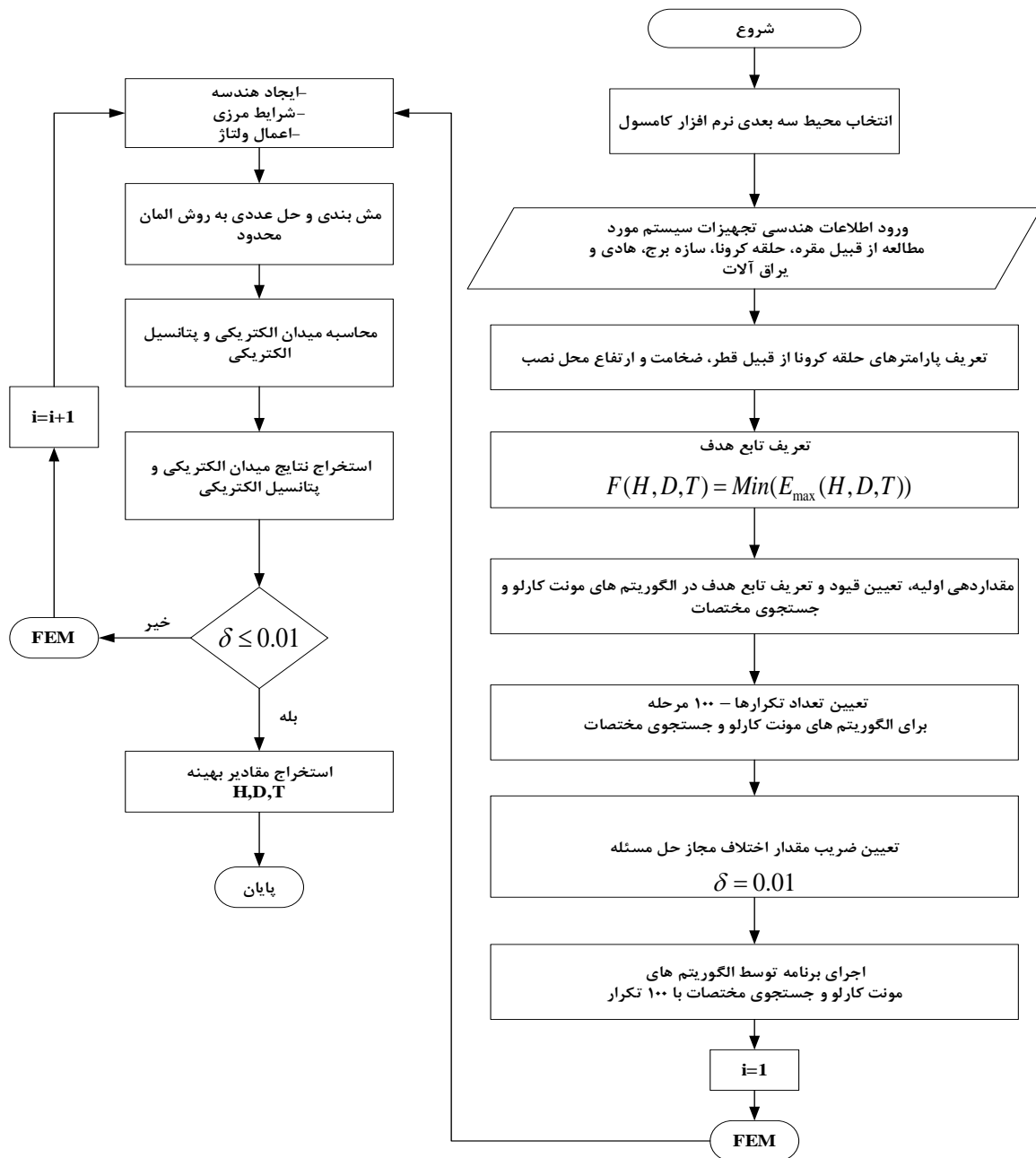
شکل ۱- روند نمای الگوریتم مونت کارلو

شکل (۱) روند نمای الگوریتم مونت کارلو را نشان می‌دهد. ابتدا یک عدد تصادفی معین شده و سپس احتمال انجام یک رخداد با مقدار عدد تصادفی تولید شده مقایسه می‌شود. در حالتی که عدد تولید شده، معیار احتمال را برآورده کند، در بخش بعدی یک فرآیند یا مجموعه‌ای از فرآیندها یا تحولات رخ می‌دهد. این روال می‌تواند چند بار تکرار شود و به ازای هر تکرار یک خروجی قابل اندازه‌گیری تولید شود. در بخش نهایی مجموعه آزمایش‌ها یا نتایج خروجی تحت پردازش آماری قرار گرفته و مقدار کمی قابل فهم و تفسیر از نتایج اعلام می‌شود. بخش فرآیند با رخدادها می‌تواند ساده یا بسیار پیچیده و حاوی حلقه‌ها و الگوریتم‌های متعدد و حتی حاوی تولیدکننده‌های تصادفی متعدد باشد. افزون بر این، می‌توان از هر نقطه الگوریتم یا فرآیند داده‌های کمی استخراج و به عنوان متغیرهای خروجی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. روش مونت کارلو یک روش ساده رایانه‌ای است که مبتنی بر انجام آزمایش‌های ساختگی متعدد با اعداد تصادفی است. استفاده از آن عمومی است و نیازی به دانش خاصی در خصوص نظریه احتمالات ندارد. تنها اطلاعاتی که نیاز است رابطه بین مقدار خروجی و ورودی، یعنی [۴۶]:

- 4: set  $d^k = d^s$
- 5: from new point  $w^k = w^{k-1} + \alpha d^k$
- 6: if  $g(w^k) < g(w^{k-1})$
- 7:  $w^{k-1} \leftarrow w^k$
- 8: output: history of weights  $\{w^k\}_{k=0}^k$  and corresponding function evaluations  $\{g(w^k)\}_{k=0}^k$

روندنمای مراحل شبیه‌سازی و تعیین پارامترهای بهینه حلقه کرونا روی سیستم مورد مطالعه در شکل (۳) ارائه شده است.

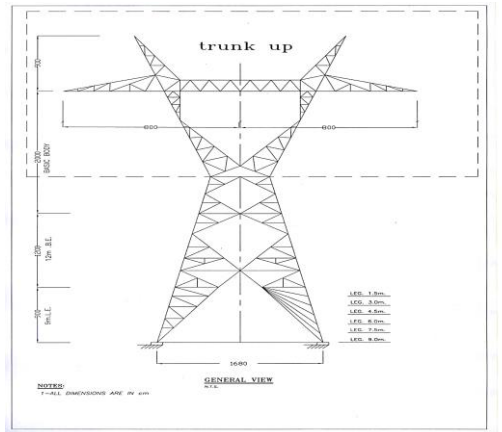
- است [۴۷]:
- 1: input: initial point  $w^0$ , maximum number of steps  $k$ , a steplength  $\alpha$  or diminishing steplength rule, take the set of directions  $d^{2n-1} = e_n$  and  $d^{2n} = -e_n$  for  $n=1, \dots, N$  and set  $P=2N$
  - 2: for  $\kappa=1 \dots k$
  - 3: find  $s = \operatorname{argmin}_{\rho=1 \dots P} g(w^{\kappa-1} + \alpha d^\rho)$



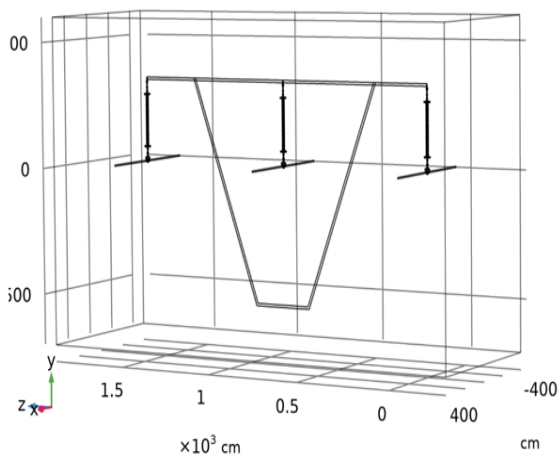
شکل ۳- روند نمای طراحی بهینه حلقه کرونا



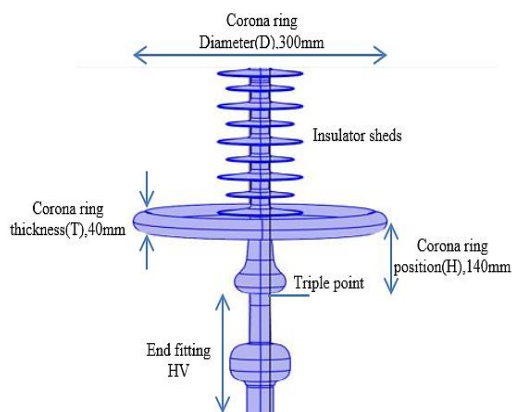
مطالعه، در جدول ۱ ارائه شده است [۳۰]. برای شبیه‌سازی-ها و انجام فرآیند بهینه‌سازی از کامپیوتری شخصی با مشخصات Intel® Core i7 و سیستم پردازنده 3.7 GHz و RAM 16G استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها در شرایط تمیز (بدون آلودگی) و خشک (بدون رطوبت) بررسی و انجام شده است.



شکل ۵- نقشه تک خطی برج ۲۳۰ کیلوولت



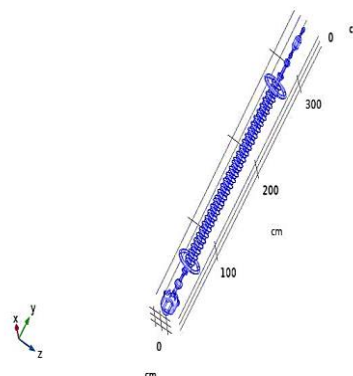
شکل ۶- مدل سه بعدی ترانک بالای برج ۲۳۰ کیلوولت



شکل ۷- مشخصات اولیه حلقه کرونا (original)

#### ۴- سیستم مورد مطالعه

در این مقاله، به منظور تجزیه و تحلیل شدت میدان الکتریکی و طراحی بهینه حلقه کرونا از یک مقره ۲۳۰ کیلوولت کامپوزیتی با مشخصات فنی از قبیل: طول مقره ۲۶۵۰ میلی‌متر، فاصله خزشی ۹۸۰۰ میلی‌متر، تعداد ۲۶ چترک بزرگ و تعداد ۵۰ چترک کوچک، مقاومت مکانیکی ۱۲۰ کیلونیوتن و وزن تقریبی ۱۶ کیلوگرم استفاده شده است. شکل (۴) نمای سه بعدی مقره مدل‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول را نشان می‌دهد. از یک برج ۲۳۰ کیلوولت تک‌مداره مشبک عبوری با فواصل فازی ۸ متر از یکدیگر با نقشه تک خطی شکل (۵) استفاده شده که به منظور ساده‌سازی و کاهش مدت زمان محاسبات، فقط ترانک بالای برج بصورت سه بعدی مطابق شکل (۶) در نرم‌افزار کامسول مدل شده است. همچنین در شکل (۷)، نمای حلقه کرونا اولیه با مشخصات فنی شامل: ضخامت حلقه کرونا ۴۰ میلی‌متر، قطر حلقه کرونا ۳۰۰ میلی‌متر و ارتفاع محل نصب از قسمت پتانسیل فشار قوی ۱۴۰ میلی‌متر نشان داده شده است.



شکل ۸- مدل سه بعدی مقره کامپوزیت ۲۳۰ کیلوولت

جهت مدل‌سازی اثر هادی، از هادی تک سیمه دریک با قطر خارجی ۲۸/۱۱ میلی‌متر و به طول ۱۰ متر استفاده شده است. از مجموعه زنجیره پراک آلات ۱۲۰ کیلونیوتن آویزی برای هادی دریک تک سیمه استفاده شده است. در این مقاله، جهت مدل‌سازی و ترسیم مقره و سایر تجهیزات بصورت سه‌بعدی از نرم‌افزار اتوکد استفاده شده است. سپس، تجهیزات مدل شده، به نرم‌افزار کامسول ورژن شماره ۶ قسمت هندسه<sup>۴۱</sup>، فیزیک الکترواستاتیک<sup>۴۲</sup>، مدل AC/DC انتقال داده شده است. مشخصات فنی و پارامترهای الکتریکی در نظر گرفته شده برای سیستم مورد

<sup>42</sup> Electrostatics(es)

<sup>41</sup> Geometry

جدول ۱- مشخصات الکتریکی مواد مفره کامپوزیتی [۳۰]

ضریب گذردهی نسبی ( $\epsilon_r$ )	بخش	مواد
۷.۲	هسته	فایبرگلاس
۴.۳	چترک	سیلیکون
۱	فیتینگ انتهایی	فولاد
۱	حلقه کرونا	آلومینیوم
۱	فضای محیط سه بعدی	هوا

### ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت، ابتدا مشخصه‌های توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت در شرایط مختلف عملکردی سیستم از جمله حضور حلقه کرونا، سازه برج، هادی، پراق آلات و اثرات فازهای متقابل با استفاده از روش المان محدود بصورت سه بعدی شبیه‌سازی می‌شود. سپس، به جهت کاهش زمان و افزایش دقت محاسبات با فراخوانی دو الگوریتم مونت کارلو و جستجوی مختصات از بسته بهینه‌سازی نرم افزار کامسول و تعریف کران بالا و پایین پارامترهای حلقه کرونا و تعیین تعداد تکرارها و شرط توقف الگوریتم مطابق شکل (۳)، ابعاد بهینه حلقه کرونا محاسبه می‌گردد.

### ۵-۱- تحلیل میدان الکتریکی روی مفره کامپوزیتی با استفاده از روش المان محدود

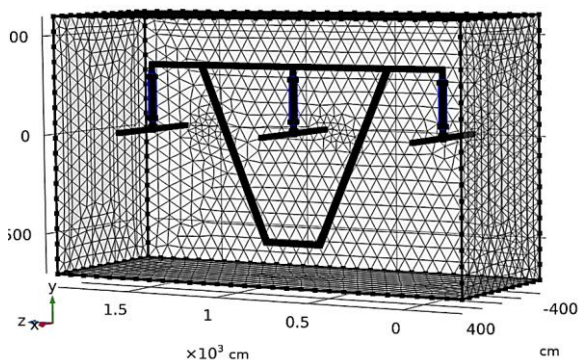
روش المان محدود در بهینه‌سازی و تجزیه و تحلیل عایق‌های تحت میدان الکتریکی به گستردگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایده اصلی روش اجزای محدود جداسازی و ترکیب می‌باشد. جداسازی برای تحلیل المان و ترکیب به منظور تحلیل همزمان کل مدل به کار می‌رود. در این روش فضای مورد نظر را به قسمت‌های کوچکتر مثلث یا چهارضلعی که همان مش‌بندی می‌باشد تقسیم می‌کنیم و با این فرض که روابط داخل هر المان خطی می‌باشد، سعی در حل معادلات دیفرانسیل داریم. از آنجایی که دقت نتایج تا حد زیادی به مش‌بندی درست بستگی دارد و در نتیجه اندازه مش ریزتر مساوی است با دقت بیشتر. شکل (۸) مش بندی سه بعدی قسمت‌های مختلف سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد و برای اندازه‌های کوچک و متوسط و بزرگ مقادیر مختلفی در نظر گرفته شده است. فرآیند مدل‌سازی

و محاسبه توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی بر اساس روش اجزا محدود بصورت زیر می‌باشد [۴۸ و ۴۲].

۱- مدل اعمال شده را به قسمت‌های کوچک جداسازی می‌کنیم و همه المان‌ها را بوسیله گره‌ها به یکدیگر وصل می‌کنیم به شکلی که مدل اصلی به شکل خود بر می‌گردد. ۲- براساس ویژگی‌های مواد مختلف تشکیل دهنده مدل، پارامترهای مربوطه مشخصه‌های الکتریکی هر المان، بدست می‌آیند.

۳- بکارگیری معادلات ماکسول و شرایط مرزی، همه المان‌ها بر طبق ساختمان مدل به یکدیگر متصل می‌گردند و سپس معادلات المان محدود شکل می‌گیرد.

۴- بر طبق مشخصات مدل، روش محاسباتی مناسب جهت حل کمیت‌های فیزیکی گره‌های نامعلوم بکار گرفته می‌شود. ماتریس‌های مختلف حل که با توجه به روش حل شکل می‌گیرند، با روش تکرار حل می‌شوند.

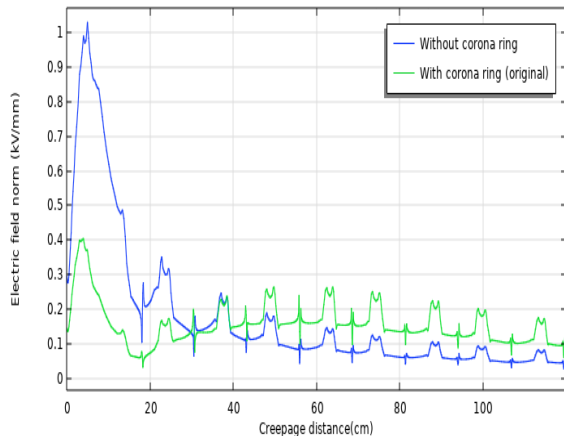


شکل ۸- مش‌بندی سه بعدی سیستم مورد مطالعه

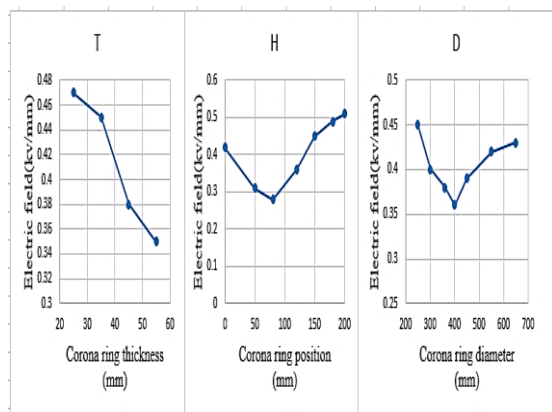
۵-۲- تأثیر پارامترهای حلقه کرونا بر توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی به منظور بررسی اثر حلقه کرونا اولیه، نمودار توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی از قسمت پتانسیل فشار قوی<sup>۴۳</sup> تا پتانسیل صفر (زمین) در شکل (۹) برای دو حالت با و بدون حضور حلقه کرونا اولیه نشان داده شده است. حداکثر شدت میدان الکتریکی در محل اتصال سه‌گانه (فلز- هوا- سیلیکون رابر) رخ می‌دهد. با توجه به شکل (۹)، شدت میدان الکتریکی در سمت پتانسیل فشار قوی مفره در نبود حلقه کرونا اولیه بسیار زیاد است. در همین شرایط، شدت میدان الکتریکی در سمت زمین نزدیک به صفر است. حلقه کرونا با کاهش شدت میدان

<sup>43</sup> High Voltage

میدان الکتریکی روی سطح عایق بهبود می‌یابد. اگرچه با افزایش ضخامت حلقه کرونا نتایج بهتری در شدت میدان الکتریکی بدست خواهد آمد، ولی افزایش بیش از حد آن، حلقه کرونا را حجیم و غیر اقتصادی می‌کند.



شکل ۹- توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی با و بدون حلقه کرونا اولیه [۲۶]



شکل ۱۰- تأثیر پارامترهای حلقه کرونا H, D, T، بر حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی [۲۶]

### ۵-۳- تأثیر سازه برج، هادی و یراق‌آلات بر توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی

از آنجائیکه آزمایش تجربی ولتاژ کرونا در محیط آزمایشگاهی با در نظر گرفتن سازه برج، هادی و یراق‌آلات انجام می‌گیرد. بنابراین در این تحقیق، ابتدا تجهیزات مذکور بصورت سه‌بعدی در نرم افزار کامسول مدل‌سازی شده است. سپس، نتایج توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی در شکل (۱۱) برای ۵۰ سانتی‌متر ابتدای مقره از قسمت پتانسیل فشار قوی برای شرایط مختلف ارائه شده است. همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده

الکتریکی در سمت فشار قوی و افزایش اندک آن در سمت زمین، تعادل بیشتری در توزیع شدت میدان الکتریکی ایجاد می‌کند. به منظور طراحی بهینه حلقه کرونا، سه پارامتر: ۱- موقعیت محل نصب حلقه کرونا از قسمت پتانسیل فشار قوی (H)، ۲- قطر حلقه کرونا (D) و ۳- ضخامت حلقه کرونا (T) مدنظر قرار می‌گیرد. مقادیر اولیه پارامترهای حلقه کرونا در شکل (۷) نشان داده شده است. منحنی شدت میدان الکتریکی با تغییر پارامترهای حلقه کرونا تغییر می‌یابد که در قالب مسئله بهینه‌سازی مطرح می‌شود. همچنین باید به این موضوع نیز توجه داشت، که برای تغییر پارامترهای نظر در مرحله طراحی و ساخت مقره باید محدودیت‌های تغییر این پارامترها مدنظر قرار گیرد. میزان این محدودیت‌ها به تکنولوژی ساخت مقره و حلقه کرونا بستگی دارد. متأسفانه استانداردهای خاصی برای طراحی و قراردادن حلقه‌های کرونا وجود ندارد و به طور کلی هر تولیدکننده توصیه‌های خود را برای استفاده از حلقه‌های کرونا ارائه می‌دهد. در شکل (۱۰)، مشخصه تغییرات بیشه‌ی شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی بر حسب ارتفاع محل نصب، قطر و ضخامت حلقه کرونا نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، هنگامی که حلقه کرونا در ارتفاع پایین نصب می‌شود کمک‌چندانی به تعدیل شدت میدان الکتریکی نمی‌کند. با افزایش ارتفاع محل نصب حلقه کرونا بیشه‌ی شدت میدان الکتریکی کاهش می‌یابد تا اینکه به کمترین مقدار خود در نزدیکی ارتفاع ۸۰ میلی‌متر می‌رسد. با افزایش مجدد ارتفاع حلقه کرونا، شدت میدان الکتریکی دوباره افزایش می‌یابد. باید دقت شود که ارتفاع نصب حلقه کرونا نباید از فاصله بین برقی‌های دو سر مقره بیشتر شود، زیرا باعث کاهش فاصله‌ی جرقه<sup>۴۴</sup> خشک مقره می‌شود که اثرات نامطلوبی در پی خواهد داشت. در شکل (۱۰)، با افزایش قطر حلقه کرونا، بیشه‌ی شدت میدان الکتریکی کاهش می‌یابد و در محدوده‌ی بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر دارای کمترین مقدار خود خواهد شد. با افزایش مجدد قطر حلقه کرونا، بیشه‌ی شدت میدان الکتریکی مجدداً افزایش می‌یابد. البته باید به این نکته توجه داشت که قطر حلقه کرونا نباید از ۲۵۰ میلی‌متر کمتر باشد زیرا باعث برخورد به چترک-های مقره می‌شود. همچنین، مطابق نتایج ارائه شده در شکل (۱۰)، بطور کلی با افزایش ضخامت حلقه کرونا، شدت

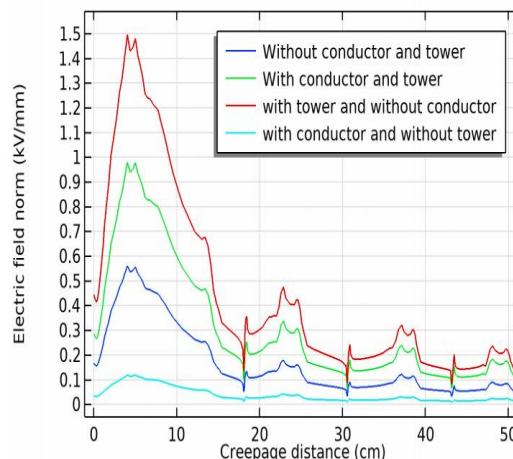
<sup>44</sup> Arcing distance

حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره به مقدار  $1/03 \text{ kv/mm}$  می‌باشد که نشان می‌دهد حضور فازهای متقابل در سیستم سه‌فاز در مقایسه با سیستم تک‌فاز باعث افزایش حداکثر شدت میدان الکتریکی روی سطح مفره به مقدار  $10\%$  شده است.

#### ۵-۵- بهینه‌سازی پارامترهای حلقه کرونا با استفاده از روش‌های هوشمند

در این بخش، ابتدا توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی  $230$  کیلوولت با استفاده از ابعاد حلقه کرونا اولیه و بدون حضور سازه برج، هادی، یراق‌آلات و فازهای متقابل بررسی می‌شود. مطابق نتایج جدول (۲)، حداکثر شدت میدان الکتریکی در نقطه اتصال سه‌گانه مفره کامپوزیتی بدون حضور تجهیزات مذکور  $0/243 \text{ kv/mm}$  است که از مقدار مجاز  $0/350 \text{ kv/mm}$  کمتر است. سپس با توجه به اینکه در یک خط انتقال برق حضور سازه برج و دیگر تجهیزات الزامی است. بنابراین با اعمال اثر تجهیزات مذکور، حداکثر شدت میدان الکتریکی در نقطه اتصال سه‌گانه مفره  $0/423 \text{ kv/m}$  افزایش پیدا کرده و به مقدار  $0/423 \text{ kv/m}$  می‌رسد که از مقدار مجاز فراتر رفته و می‌بایست پارامترهای حلقه کرونا از قبیل: قطر، ضخامت و موقعیت نصب حلقه کرونا با استفاده از روش‌های هوشمند بهینه‌سازی شوند. در واقع می‌توان گفت اکثر سازنده‌های مفره کامپوزیتی از حلقه کرونا اولیه غیر استاندارد استفاده می‌کنند. لذا با استفاده از الگوریتم‌های غیر مبتنی بر گرادیان از قبیل الگوریتم مونت کارلو و الگوریتم جستجوی مختصات و تعریف تابع هدف و اعمال قیود و محدودیت‌های مربوط به هر یک از پارامترهای حلقه کرونا در بسته بهینه‌سازی نرم افزار کامسول، برنامه با  $100$  تکرار اجرا می‌شود. الگوریتم مونت کارلو در محدوده تکرار  $78$  و با حداکثر شدت میدان الکتریکی  $0/266 \text{ kv/mm}$  و الگوریتم جستجوی مختصات در محدوده تکرار  $30$  و با حداکثر شدت میدان الکتریکی  $0/274 \text{ kv/mm}$  به همگرایی می‌رسند. که نشان از طراحی صحیح حلقه کرونا دارد. نمودار توزیع شدت میدان الکتریکی منتهی از نرم افزار کامسول به ازای پارامترهای بدست آمده از الگوریتم مونت کارلو و الگوریتم جستجوی مختصات در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است.

می‌شود، حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره بدون حضور سازه برج و هادی برابر  $0/55 \text{ kv/mm}$  می‌باشد در صورتیکه حضور سازه برج و هادی باعث افزایش حداکثر شدت میدان الکتریکی به میزان  $1 \text{ kv/mm}$  می‌شود.



شکل ۱۱- تأثیر سازه برج، هادی و یراق‌آلات بر توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی

#### ۵-۴- تأثیر فازهای متقابل بر توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی

خطوط انتقال AC بصورت سه‌فاز می‌باشند و در هر لحظه از زمان و با اختلاف فاز  $120$  درجه نسبت به یکدیگر، بیشینه‌ی یک‌فاز دو برابر بیشینه‌ی هر کدام از فازهای دیگر می‌باشد. در این مقاله، توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاز بحرانی یعنی فازی که بیشترین استرس الکتریکی را متحمل شده مورد مطالعه قرار گرفته است. اندازه ولتاژ اعمالی به فاز میانی (B) برابر

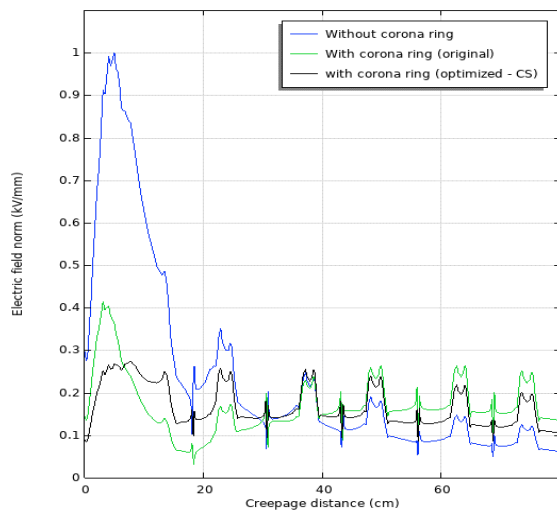
$$1.1 \times \frac{230KV}{\sqrt{3}} = 146.07KV$$

در نظر گرفته می‌شود.

هنگامی که فاز میانی در حداکثر مقدار خود قرار دارد، ولتاژ فازهای کناری (A, C) برابر نصف دامنه‌ی حداکثر با علامت منفی می‌باشند. بنابراین ولتاژ فازهای کناری برابر  $73/03 -$  کیلوولت در نظر گرفته می‌شوند. در [۲۶]، نمودار توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی فاز میانی (B) برای سیستم تک‌فاز و سه‌فاز توسط نویسندگان مقاله مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است. در سیستم تک‌فاز حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره به مقدار  $0/93 \text{ kv/mm}$  می‌باشد و در سیستم سه‌فاز و با حضور فازهای متقابل (فازهای کناری A و C)،

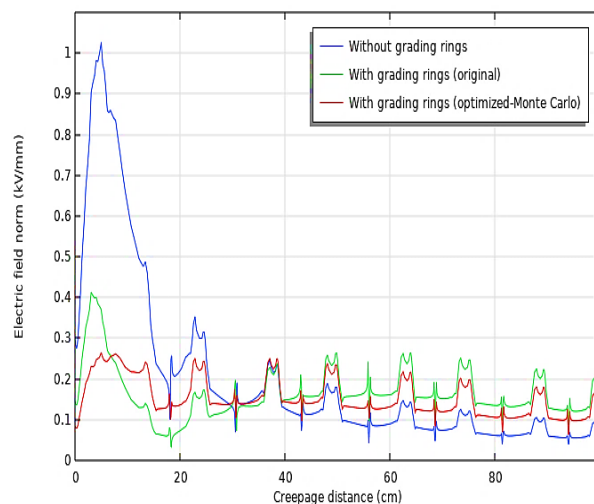
جدول ۲- ابعاد اولیه و بهینه شده پارامترهای حلقه کرونا مورد مطالعه

با سازه برج، هادی، یراق آلات و فازهای متقابل						بدون سازه برج و دیگر تجهیزات			الگوریتم
جستجوی مختصات			مونت کارلو			ارتفاع			
قطر	ضخامت	ارتفاع	قطر	ضخامت	ارتفاع	قطر	ضخامت	ارتفاع	
۳۰۰	۴۰	۱۴۰	۳۰۰	۴۰	۱۴۰	۳۰۰	۴۰	۱۴۰	مقادیر اولیه (میلی‌متر)
۳۷۲	۵۰	۶۸	۳۲۶	۵۰	۹۶				مقادیر بهینه (میلی‌متر)
نقطه سه‌گانه						نقطه سه‌گانه			موقعیت
۰/۴۲۳			۰/۴۲۳			۰/۲۴۳			مقدار اولیه شدت میدان الکتریکی (کیلوولت بر میلی‌متر)
۰/۳۵۰						۰/۳۵۰			مقدار روبریت پذیری کرونا شدت میدان الکتریکی (کیلوولت بر میلی‌متر)
۰/۲۷۴			۰/۲۶۶			۰/۲۴۳			مقدار بهینه شدت میدان الکتریکی (کیلوولت بر میلی‌متر)



شکل ۱۳- توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی به ازای الگوریتم جستجوی مختصات

نلدر-مید در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها دارای جواب بهتری از لحاظ حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی می‌باشد. از طرفی الگوریتم کران با تقریب درجه دو به لحاظ سرعت همگرایی دارای شرایط بهتری نسبت به دیگر روش‌ها می‌باشد.

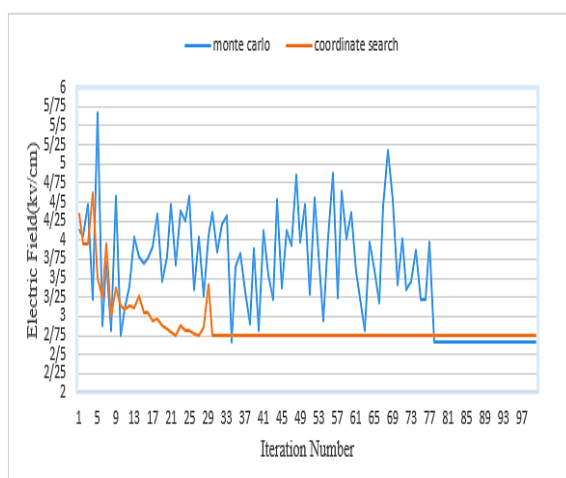


شکل ۱۲- توزیع شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مفره کامپوزیتی به ازای الگوریتم مونت کارلو

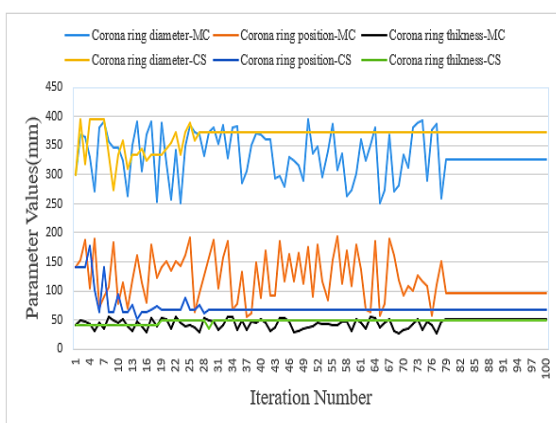
به منظور اعتبارسنجی الگوریتم‌های استفاده شده، نتایج بدست آمده از الگوریتم‌های مونت کارلو و جستجوی مختصات با نتایج ارائه شده از روش‌های نلدر-مید و کران با تقریب درجه دو در مرجع [۲۶] در جدول ۳ مقایسه شده‌اند. مطابق نتایج بدست آمده در جدول ۳، الگوریتم

جدول ۳- مقایسه نتایج روش‌های بهینه‌سازی

زمان (ساعت)	حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره (کیلوولت بر میلی‌متر)	قطر (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)	ارتفاع (میلی‌متر)	
۲۲	۰/۲۵۸	۳۷۰	۵۵	۸۸	الگوریتم نلدر- مید [۲۶]
۵	۰/۲۶۷	۳۴۵	۵۵	۷۳	الگوریتم کران با تقریب درجه دوم [۲۶]
۴۲	۰/۲۶۶	۳۲۶	۵۰	۹۶	الگوریتم مونت کارلو
۱۹	۰/۲۷۴	۳۷۲	۵۰	۶۸	الگوریتم جستجوی مختصات



شکل ۱۴- مشخصه همگرایی تابع هدف به ازای الگوریتم‌های مونت کارلو و جستجوی مختصات



شکل ۱۵- مشخصه همگرایی پارامترهای حلقه کرونا به ازای روش‌های مونت کارلو و جستجوی مختصات

شکل (۱۶)، تغییرات شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی به ازای روش‌های نلدر-مید و کران با تقریب درجه دو در مرجع [۲۶] و الگوریتم‌های مونت کارلو و جستجوی مختصات مقاله حاضر را در حالت بدون حلقه کرونا و حالت‌های بهینه هر یک از روش‌های استفاده

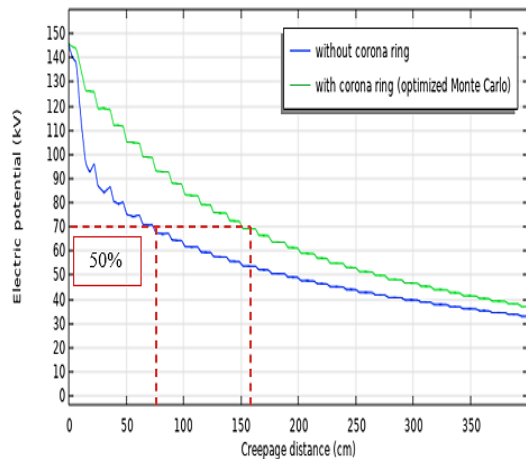
در جدول ۴، نتایج حداکثر شدت میدان الکتریکی روی نقاط مختلف سیستم مورد مطالعه از جمله: فاصله خزشی مقره کامپوزیتی، سطح حلقه کرونا و سطح فیتینگ انتهایی فشار قوی به ازای الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی در این مقاله و مرجع [۲۶]، ارائه شده است.

جدول ۴- شدت میدان الکتریکی

الگوریتم	حلقه کرونا (کیلوولت بر میلی- متر)	فاصله خزشی مقره (کیلوولت بر میلی- متر)	فیتینگ انتهایی (کیلوولت بر میلی- متر)
نلدر-مید [۲۶]	۰/۸۰	۰/۲۵۸	۰/۴۵
کران با تقریب درجه دو [۲۶]	۰/۸۴	۰/۲۶۷	۰/۳۸
مونت کارلو	۰/۶۲	۰/۲۶۶	۰/۷۰
جستجوی مختصات	۰/۸۵	۰/۲۷۴	۰/۸۷

در شکل (۱۴)، مشخصه همگرایی تابع هدف برای دو الگوریتم مورد مطالعه از لحاظ محاسبه شدت میدان الکتریکی نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۴) می‌توان اثبات کرد که الگوریتم جستجوی مختصات در مقایسه با الگوریتم مونت کارلو از لحاظ سرعت همگرایی دارای شرایط بهتری است. اما، شدت میدان الکتریکی محاسبه شده در الگوریتم مونت کارلو نسبت به الگوریتم جستجوی مختصات شرایط بهتری خواهد داشت. شکل (۱۵) نیز، مشخصه همگرایی هر یک از پارامترهای ارتفاع، قطر و ضخامت حلقه کرونا را توسط الگوریتم‌های مونت کارلو و جستجوی مختصات را نشان می‌دهد.

نشان می‌دهد. تغییر انحنای پروفیل ولتاژ در طول مقره به منزله 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.

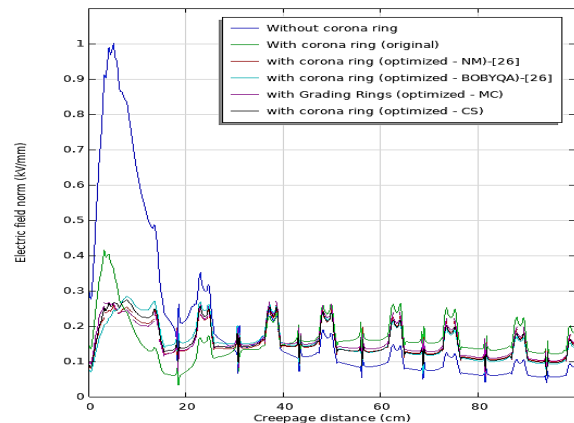


شکل ۱۸- تغییرات پتانسیل الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی به ازای روش مونت کارلو

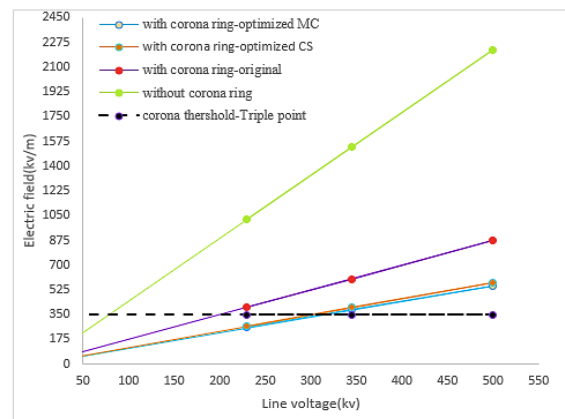
#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از الگوریتم‌های مونت کارلو و جستجوی مختصات به منظور بهینه‌سازی ابعاد حلقه کرونا با لحاظ نمودن قیود مختلف استفاده گردید. شبیه‌سازی‌ها برای تمام حالت‌ها با و بدون در نظر گرفتن اثرات سازه برج، هادی، پیراق‌آلات و فازهای متقابل با هدف کمینه کردن حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت انجام شد. مدل‌سازی‌ها بصورت سه بعدی بر روی یک سیستم نمونه خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت تک‌مداره که دارای سه فاز آویزی با مقره کامپوزیتی می‌باشد، انجام شد. مقایسه نتایج دو الگوریتم مذکور نشان داد که الگوریتم جستجوی مختصات از لحاظ همگرایی و رسیدن به جواب نهایی نسبت به الگوریتم مونت کارلو مناسب‌تر است؛ اما حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی پس از طراحی و بهینه‌سازی توسط الگوریتم مونت کارلو برابر  $0/266 \text{ kv/mm}$  گردید که نسبت به حداکثر شدت میدان الکتریکی محاسبه شده به مقدار  $0/274 \text{ kv/mm}$  توسط الگوریتم جستجوی مختصات دارای شرایط مطلوب‌تری می‌باشد. در نهایت، نتایج حاصل از الگوریتم مونت کارلو با مقادیر ضخامت حلقه کرونا ۵۰ میلی‌متر، قطر حلقه کرونا ۳۲۶ میلی‌متر و موقعیت نصب

شده نشان می‌دهد. شکل (۱۷) نشان می‌دهد که در ولتاژ ثابت ۲۳۰ کیلوولت خط انتقال، با بهینه‌سازی پارامترهای حلقه کرونا با استفاده از الگوریتم مونت کارلو، حداکثر شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره ۳۷٪ کاهش پیدا کرده و به مقدار  $266 \text{ kv/m}$  رسیده است. همچنین با استفاده از الگوریتم جستجوی مختصات، حداکثر شدت میدان الکتریکی ۳۵٪ کاهش پیدا کرده و به مقدار  $274 \text{ kv/m}$  رسیده است. لذا، کاهش شدت میدان الکتریکی باعث افزایش ولتاژ قابل تحمل کرونا مقره ۲۳۰ کیلوولت خواهد شد.



شکل ۱۶- تغییرات شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی به ازای روش‌های مختلف بهینه‌سازی



شکل ۱۷- تغییرات شدت میدان الکتریکی روی فاصله خزشی مقره کامپوزیتی ۲۳۰ کیلوولت به ازای تغییرات ولتاژ

با توجه به موثر بودن بهینه‌سازی ابعاد حلقه کرونا بر منحنی تغییرات پتانسیل الکتریکی، شکل (۱۸) تغییرات پتانسیل الکتریکی روی فاصله خزشی مقره را برای روش بهینه‌سازی مونت کارلو نشان می‌دهد. فاصله‌ای از طول مقره که ۵۰٪ ولتاژ اعمالی را تحمل می‌کند قبل از نصب حلقه کرونا ۸۰ سانتی‌متر بوده است در حالیکه بعد از نصب حلقه کرونا به ۱۶۰ سانتی‌متر افزایش یافته است که افزایش ۲۰۰٪ را

افزایش ۲۰۰ درصدی فاصله‌ای از طول مقره کامپوزیتی که ۵۰٪ ولتاژ اعمالی را تحمل می‌کند شده است؛ که این امر نشان دهنده خطی‌تر شدن توزیع پتانسیل الکتریکی در امتداد طول مقره کامپوزیتی و افزایش سطح ولتاژ قابل تحمل کرونا است.

حلقه کرونا از قسمت پتانسیل فشار قوی ۹۶ میلی‌متر، به عنوان پارامترهای بهینه حلقه کرونا تعیین و با این مقادیر، حداکثر شدت میدان الکتریکی در محل اتصال سه‌گانه مقره کامپوزیتی ۷۸٪ کاهش یافت. همچنین بهینه‌سازی پارامترهای حلقه کرونا توسط الگوریتم مونت کارلو سبب

## مراجع

- [1] H. jin, Z. lv, Z. Yuan, Member, Z. Wei, C. Wang, C. Wang, Y. Tu, F. Li, T. Chen, P. Xiao. "Micro-cracks Identification and Characterization on the Sheds of Composite Insulators by Fractal Dimension". *IEEE Transactions on Smart Grid* 12, no. 2 (2021): 1821-1824.
- [2] A. J. Phillips, A. J. Maxwell, C. S. Engelbrecht, and I. Gutman. "Electric field limits for the design of grading rings for composite line insulators". *IEEE Trans. Power Delivery* 30, no. 3 (2015): 1110-1118.
- [3] M. R. Ahmadi-Veshki, M. Mirzaie, and R. Sobhani. "Reliability assessment of aged SiR insulators under humidity and pollution conditions". *Int. J. Electr. Power Energy Syst* 117 (2020).
- [4] B. Zelalem, M. Mamo. "Assessment of External Insulation Problems Related to Pollution and Climatic Conditions in Ethiopia". *IEEE Electrical. Insulation Magazine* 36, no. 4 (2020): 36-46.
- [5] W.-D. Li, X.-R. Li, B.-H. Guo, C. Wang, Z. Liu, and G.-J. Zhang. "Topology optimization of truncated cone insulator with graded permittivity using variable density method". *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul* 26, no. 1 (2019): 1-9.
- [6] S. Mohammadnabi, Kh. Rahmani. "Influence of humidity and contamination on the leakage current of 230-Kv composite insulator". *Electric Power Systems Research* 194 (2021).
- [7] Y. Zhang, Z. Zhang, X. Jiang, T. Liang, and S. Yang. "Aging process evaluation method of silicone rubber in composite insulators in natural environmental experiment station". *IEEE Access* 7, (2019): 169734-169744.
- [8] Y. Zhang, Z. Zhang, X. Jiang, T. Liang, and S. Yang. "Aging process evaluation method of silicone rubber in composite insulators in natural environmental experiment station". *IEEE Access* 7, (2019): 169734-169744.
- [9] L. S. Maraaba, K. Y. Al Soufi, L. M. Alhems, and M. A. Hassan. "Performance Evaluation of 230 kV Polymer Insulators in the Coastal Area of Saudi Arabia". *IEEE Access* 8, (2020): 164292-164303.
- [10] Y. Gao, X. Liang, Y. Lu, J. Wang, W. Bao, S. Li, C. Wu, and Z. Zuo. "Comparative Investigation on Fracture of Suspension High Voltage Composite Insulators: A Review—Part I: Fracture Morphology Characteristics". *IEEE Electrical Insulation Magazine* 37, no. 3 (2021): 7-17.
- [11] 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 Int. Conf. Solid Dielectr. (ICSD)*, Bologna, Italy, (2013): 198-201.
- [12] B. M'hamdi, M. Tegar, and A. Mekhaldi. "Optimal design of corona ring on HV composite insulator using PSO approach with dynamic population size". *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul* 23, no. 2 (2016): 1048-1057.
- [13] N. Altı, A. Bayadi, and K. Belhouche. "Grading ring parameters optimization for 220 kV meta-oxide arrester using 3D-FEM method and bat algorithm". *IET Sci., Meas. Technol* 15, no. 1 (2021): 14-24.
- [14] K. Aramugam, H. A. Illias, and Y. C. Ching. "Optimization of corona ring design for composite insulator strings". *Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng* 38, no. 1 (2019): 232-246.
- [15] Seyyed Meysam. Seyyed Barzegar, Alireza Sadeghi, Masume Khodsuz. "Optimization of Corona Ring Parameters for Electric Field Adjustment in Composite Insulator Using Derivative Free Solvers". *Computational Intelligence in Electrical Engineering* 12, no. 1 (2021): 78-86. (inPersian)
- [16] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge, U.K.: MIT Press, Jan. 1998.
- [17] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colomi. "Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents". *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., B (Cybernetics)* 26, no. 1 (1996): 29-41.
- [18] J. Kennedy and R. Eberhart. "Particle swarm optimization". in *Proc. Int. Conf. Neural Netw.*, Dec. (1995): 1942-1948.



- [19] X. S. Yang, Cuckoo Search and Firefly Algorithm: Theory and Applications (Studies in Computational Intelligence). Cham, Switzerland: Springer (2014).
- [20] S. Mirjalili and A. Lewis. "The whale optimization algorithm". *Adv. Eng. Software* 95, (2016): 51–67.
- [21] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis. "Grey wolf optimizer". *Adv. Eng. Software* 69, (2014): 46–61.
- [22] S. Mirjalili. "The ant lion optimizer". *Adv. Eng. Software* 83, (2015): 80–98.
- [23] M. D. Li, H. Zhao, X. W. Weng, and T. Han. "A novel nature-inspired algorithm for optimization: Virus colony search". *Adv. Eng. Software* 92, (2016): 65–88.
- [24] A. Kaveh and N. Farhoudi. "A new optimization method: Dolphin echolocation". *Adv. Eng. Software* 59, (2013): 53–70.
- [25] Rios LM, Sahinidis NV. "Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations". *Journal of Global Optimization* 56, no. 3 (2013): 1247-93.
- [26] M. Khajavi, S. Bagheri, A. Shemshadi. "Optimal Design of Corona Ring in Composite Insulator Considering the Effects of Tower Structure, Conductor, Hardware and Mutual Phases". *Electric Power Syst. Res* 223, (2023): 1-12.
- [27] B. M'ham, Y. Benmahamed, M. Tegar, I. B. M. Taha, and S. S. M. Ghoneim. "Multi-Objective Optimization of 400 kV Composite Insulator Corona Ring Design". *IEEE Access* 10, (2022): 27579–27590.
- [28] J. A. Diaz-Acevedo, A. Escobar, and L. F. Grisales-Noreña. "Optimization of corona ring for 230 kV polymeric insulator based on finite element method and PSO algorithm". *Electric Power Syst. Res* 201, (2021).
- [29] J. Ma, L. Ma, X. Wang, Z. Qi, and Z. Sun. "Optimization for Grading Rings of High-Speed Train Roof Post Insulator". *IEEE Access* 9, (2021): 159784–159795.
- [30] M. Bouhaouche, A. Mekhaldi and M. Tegar. "Improvement of Electric Field Distribution by Integrating Composite Insulators in a 400 kV AC Double Circuit Line in Algeria". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 24, no. 6 (2017): 3549-3558.
- [31] M. Ghassemi and M. Farzaneh. "Effects of Tower, Phase Conductors and Shield Wires on the Electrical Field around a Tower Window during Liveline Work". *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul* 22, no. 2 (2015): 3413-3420.
- [32] S. Hajiaghasi, Z. Rafiee, A. Salemnia and T. Soleymani Aghdam. "A Three-Dimensional Analysis of Silicone Rubber Insulators Under Different Environmental Conditions Considering the Corona Rings Effect". *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 15, no. 3 (2019): 375-385.
- [33] M. R. Nayak, G. Radhika, B. Devulal, P. D. Reddy, G. Suresh. "Optimization of high voltage electrodes for 765 kv bus post insulators". *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 47, 101529 (2021).
- [34] E. Akbari, M. Mirzaie, M. B. Asadpoor and A. Rahimnejad. "Effects of Disc Insulator Type and Corona Ring on Electric Field and Voltage Distribution over 230-kV Insulator String by Numerical Method". *Iranian J. Electr. Electron. Eng* 9, (2013): 58–66.
- [35] 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* 20, no. 1 (2013): 63 - 70.
- [36] 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". *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul* 20, no. 4 (2013): 1361 - 1368.
- [37] M. Bouhaouche, A. Mekhaldi and M. Tegar. "Composite Insulators in a 400 kV AC Line in Algeria for Improving Electric Field Distribution". *IEEE 3rd CISTEM'18 - Algiers, Algeria*, October 29-31 (2018).
- [38] D. Azizi, A. Gholami, A. Siadatan. "Corona Ring Optimization for Different Case of Polymer Insulators Based on its Size and Distance". *Journal of Artificial Intelligence in Electrical Engineering* 1, no. 2 (2012): 1-7.
- [39] H. Terrab, A. Kara. "Parameters design optimization of 230 kV corona ring based on electric field analysis and response surface methodology". *Electric Power Systems Research* 163, no. 5187 (2017): 782-788.
- [40] Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E., et al.: 'Concepts and applications of finite element analysis' (John Wiley & Sons, USA (1989).
- [41] General Technical Specification and Execution Procedures for Transmission and Subtransmission Networks Substation Insulators, *Ministry of Niroo, Tawanir Company* 2, no. 429 (2008): 1-98. (inPersian)

- [42] 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 Transactions on Power Delivery* 23, no. 2 (2008): 823 – 830.
- [43] Metropolis N. and Ulam S. "The Monte Carlo Method". *J. Am. Stat. Assoc.*, 44, (1949): 335-341.
- [44] Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., and Teller A.H. "Equation of State Calculation by Fast Computing Machines". *J. Chem. Phys* 21, (1953): 1087-1092.
- [45] Majid. Ghiass. "An Introduction to the Monte Carlo Simulation Methods". *Polymerization* 4, no.1 (2014): 67-77. (inPersian)
- [46] Kroese D.P. and Taimre T., *Handbook of Monte Carlo Methods*, John Wiley & Sons, New Jersey (2011).
- [47] M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, eds. "Discrete Optimization Via Simulation Using Coordinate Search". *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*.
- [48] E. Asenjo S, N. Morales O, A. Valdenegro E. "Solution of low frequency complex fields in polluted insulators by means of the finite element method". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 4, (1997): 10-16.