

**The investigation and simulations of the suspension insulator string offset effects on the voltage and electric field distributions using the finite element method**

**M. Khodsuz<sup>1\*</sup>, R. Haghgoo Rostami<sup>2</sup>**

<sup>\*</sup>Mazandaran University of Science and Technology, Behshahr, Iran

(Received: 24/10/2020; Accepted: 15/06/2021)

**Abstract**

*The electric field is one of the main factors which causes the corona discharge and insulation defect of high voltage insulators. Therefore, the voltage distribution and electric field calculations along the insulators is important for the design and development of transmission lines. Depending on the construction position, suspension insulators are connected at a certain angle to the vertical line. This is called insulator string deviation. The insulator string deviation can change the electric field distribution of the insulator string. In this paper, the insulator string offset effect on the electric field distribution of a 230 kV suspension insulator string has been simulated. The insulator string has been simulated in COMSOL software based on the finite element method. The effects of 15 and 30-degree insulator string deviations on the electric field distribution, the insulator string efficiency, and the effective length of the insulator string, have been investigated. Then, the results have been compared with the insulator string without the offset. The simulation results show the significant effect of the insulator string deviation on the electric field and voltage distribution of the insulator string. Also, the effect of insulator string deviation on the effective length of the string and its dielectric strength is significant.*

**Keywords:** Insulator String Offset, Electric Field Intensity, Suspension Insulator String, Finite Element Method.

---

<sup>\*</sup>Corresponding author E-mail: m.khodsouz@mazust.ac.ir

## بررسی و شبیه‌سازی تأثیر انحراف زنجیره مقره بشقابی بر توزیع ولتاژ و میدان الکتریکی آن با استفاده از روش اجزاء محدود

رضا حقگو رستمی<sup>۱</sup>، معصومه خودسوز<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی، ۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶)

### چکیده

شدت میدان الکتریکی از جمله عوامل تأثیرگذار بر تخلیه کرونا و عیب عایقی مقره‌های فشارقوی می‌باشد. لذا محاسبه پتانسیل و میدان الکتریکی مقره‌ها، از اهمیت زیادی در طراحی و توسعه خطوط انتقال برخوردار است. گاهی به دلیل محدودیت‌های اتصال زنجیره مقره، زنجیره مقره‌ها با زاویه خاصی نسبت به خط عمود متصل می‌شوند و وجود این انحراف می‌تواند موجب تغییر در توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی زنجیره مقره شود. در این راستا، در این مقاله، تأثیر انحراف زنجیره مقره بر توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی زنجیره در سطح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت بررسی و شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی این نوع زنجیره مقره در محیط سه بعدی نرم‌افزار COMSOL مبتنی بر روش اجزاء محدود انجام گردیده و تأثیر انحراف‌های ۱۵ و ۳۰ درجه‌ای بر توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی زنجیره مقره بشقابی، بازده زنجیره مقره و طول مؤثر آن بررسی شده است. نتایج حاصله از شبیه‌سازی نشان‌دهنده تأثیر بسزای انحراف زنجیره مقره بر توزیع میدان الکتریکی، توزیع پتانسیل الکتریکی و در نتیجه بازده و استقامت عایقی زنجیره مقره بشقابی می‌باشد.

### کلید واژه‌ها: انحراف زنجیره مقره، شدت میدان الکتریکی، زنجیره مقره بشقابی، روش مبتنی بر اجزاء محدود

#### ۱. مقدمه

یکی از تجهیزات مهم و حیاتی در شبکه قدرت مقره‌های فشار قوی می‌باشند. زنجیره مقره‌ها، به‌طور گسترده در خطوط انتقال فشار قوی مورد استفاده قرار گرفته به‌طوری که در حین بهره‌برداری به‌طور پیوسته در معرض تنش الکتریکی قرار دارند. در زنجیره مقره‌های فشار قوی، به دلیل وجود جریان خازنی بین مقره‌ها و دکل، بین مقره‌ها و هادی‌ها و در نهایت بین خود مقره‌ها با یکدیگر، توزیع ولتاژ و میدان الکتریکی غیریکنواخت می‌باشد. لذا محاسبه توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در طول مقره‌ها، از اهمیت زیادی در طراحی و توسعه خطوط انتقال برخوردار بوده و در تعیین عملکرد الکتریکی زنجیره مقره‌ها نقش به‌سزایی دارد. افزایش محلی میدان الکتریکی، تخلیه الکتریکی در سطح عایق در ولتاژ فشارقوی را ایجاد خواهد کرد. در مورد عایق‌های کامپوزیت، این تخلیه‌ها می‌توانند مواد پلیمری مورد استفاده در مقره‌ها را نیز تخریب کنند [۱-۴]. ولتاژ اعمال شده، طراحی عایق، پیکربندی یراق‌آلات، طراحی سخت افزار و فاصله

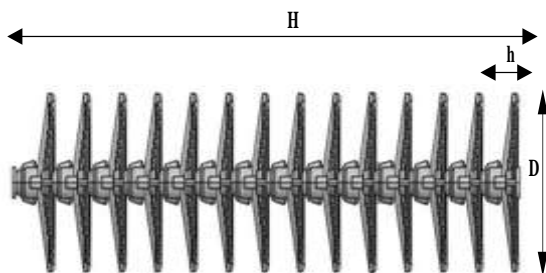
فازها از جمله موارد تأثیرگذار بر توزیع میدان الکتریکی روی سطح و درون عایق‌های الکتریکی به‌شمار می‌رود [۵]. همچنین نشست آلودگی و رطوبت نیز موجب تغییر در توزیع میدان الکتریکی زنجیره مقره و استقامت عایقی آن خواهد شد. وجود آلودگی جدا از آنکه بر استقامت عایقی زنجیره مقره مؤثر بوده به دلیل ایجاد تخلیه الکتریکی موجب عیب داخلی و سطحی عایق مقره نیز می‌شود [۶-۷]. همچنین ولتاژ سطحی مقره برای دستیابی به وضعیت مقره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مرجع [۸] روشی جدید ارائه شده است که می‌تواند ولتاژ سطح هر عایق مانند مقره‌های آویزی را اندازه‌گیری کند. در این مقاله، بر اساس مشتق تحلیلی، یک روش جامع با استفاده از نوارهای دیسک مدور برای اندازه‌گیری ولتاژ هر نقطه روی سطح عایق با هندسه دلخواه ارائه شده است.

در طی چند سال گذشته، تحقیقات بسیاری در راستای کاهش اثر تخریبی میدان الکتریکی بر مقره‌های فشار قوی و توزیع بهینه میدان الکتریکی انجام گرفته است. در مرجع [۹] میدان الکتریکی و توزیع ولتاژ مقره‌های شیشه‌ای خطوط فشار

توزیع میدان الکتریکی در زنجیره مقره بشقابی را فراهم آورد. دلیل این امر تغییر مقادیر خازن‌های پراکندگی بین کلاهک هر واحد مقره و دکل در صورت انحراف زنجیره مقره می‌باشد. با توجه به مطالب فوق، تأثیر انحراف زنجیره مقره بر توزیع میدان الکتریکی زنجیره مقره بشقابی و عملکرد عایقی آن در سطح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت به‌عنوان ایده‌ای نو در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. شبیه‌سازی این نوع زنجیره مقره در محیط سه بعدی نرم‌افزار COMSOL مبتنی بر روش اجزای محدود<sup>۳</sup> [۱۶] انجام شده است. تأثیر انحراف‌های ۱۵ و ۳۰ درجه‌ای زنجیره مقره بر توزیع میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی هر واحد مقره بررسی و شبیه‌سازی شده است. همچنین تأثیر انحراف زنجیره مقره بر بازده و طول مؤثر آن نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصله از شبیه‌سازی بیانگر تأثیر به‌سزای انحراف زنجیره مقره بر توزیع میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل زنجیره مقره بشقابی می‌باشد. لذا در عمل و در مطالعات مربوط به توزیع میدان الکتریکی زنجیره مقره، در صورت وجود انحراف زنجیره مقره، تأثیر این مؤلفه نیز در راستای کاهش اثر تخریبی میدان الکتریکی باید در مطالعات لحاظ گردد. همچنین نتایج حاصله نشان‌دهنده تأثیر به‌سزای انحراف زنجیره بر استقامت عایقی زنجیره مقره و بازده آن در مقایسه با زنجیره مقره بدون انحراف می‌باشد.

## ۲. مشخصات مقره مورد مطالعه

به‌منظور بررسی اثر انحراف زنجیره مقره بر میدان الکتریکی ایجاد شده در طول زنجیره مقره، از مقره سرامیکی در سطح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت استفاده شده است. شکل (۱) نمایی از مقره مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مشخصات فنی و الکتریکی هر بشقاب مقره در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل (۱): ابعاد و اندازه بخش‌های مختلف مقره ۲۳۰ کیلوولت با حلقه کرنا

قوی بررسی شده است. در این مقاله، مقره شیشه‌ای ۱۵۰ کیلوولت شبیه‌سازی شده و میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل در مجاورت عایق مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، به‌منظور تأیید صحت روش، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. محاسبه میدان الکتریکی در مقره‌های کامپوزیتی تا ۱۰۰۰ کیلوولت نیز در مرجع [۱۰] ارائه شده است. هدف از این مطالعه شناسایی مقره‌های معیوب در زنجیره مقره دارای کرنا رینگ و بدون کرنا رینگ بوده است. میدان الکتریکی نیز با استفاده از روش المان مرزی<sup>۱</sup> محاسبه شده است.

نتایج اندازه‌گیری توزیع ولتاژ در امتداد یک زنجیره مقره با آنچه از محاسبات عددی به‌دست آمده در مرجع [۱۱] مقایسه شده است. یک مدل رایانه‌ای با استفاده از روش MOM<sup>۲</sup> طراحی شده است. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان از روش‌های عددی برای محاسبه توزیع ولتاژ در رشته‌های عایق با دقت مورد نیاز برای طراحی مهندسی استفاده نمود.

در سطوح ولتاژ بالا، به‌دلیل ساختار پیچیده دکل، فاصله کمتر فازها و اشکال مختلف قرارگیری مقره‌ها، توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی زنجیره مقره‌ها از اهمیت بالاتری برخوردار است. در مراجع [۱۲-۱۳] با استفاده از روش اجزای محدود، توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی مقره‌های سرامیکی با اتصال V شکل را در پست ۱۰۰۰ کیلوولت بررسی نموده و تأثیر برج، هادی‌ها و برهم کنش فازها را مطالعه نموده است. همچنین تأثیر ابعاد حلقه کرنا، وضعیت نصب و نوع نصب نیز بر روی توزیع پتانسیل زنجیره مقره مورد تحقیق قرار گرفته است. سرانجام، پیکربندی مناسب حلقه برای پست مورد مطالعه پیشنهاد شده است. مطالعات مشابه در راستای بررسی توزیع میدان و همچنین توزیع پتانسیل الکتریکی زنجیره مقره در سطوح مختلف ولتاژ نیز در مراجع مختلف انجام شده است [۱۴-۱۵].

بسیاری از تحقیقات صورت گرفته در راستای تعدیل میدان الکتریکی زنجیره مقره عموماً بر روی زنجیره مقره بدون انحراف زنجیره مقره صورت گرفته است و تنها بررسی‌های انجام شده در راستای تعدیل ولتاژ و به طبع آن تعدیل میدان الکتریکی زنجیره مقره‌های بدون انحراف زنجیره مقره می‌باشد. از آنجایی که زنجیره مقره‌های بشقابی در اثر نیروی مکانیکی قابلیت جابه‌جایی و تغییر مکان را داشته و یا گاهی به‌دلیل محدودیت‌های نصب، زنجیره مقره‌ها با زاویه خاصی نسبت به خط عمود متصل می‌شوند، لذا وجود انحراف زنجیره مقره می‌تواند موجبات تغییر

<sup>1</sup> Boundary Element Method

<sup>2</sup> Method-of-Moment

<sup>3</sup> Finite Element Method (FEM)

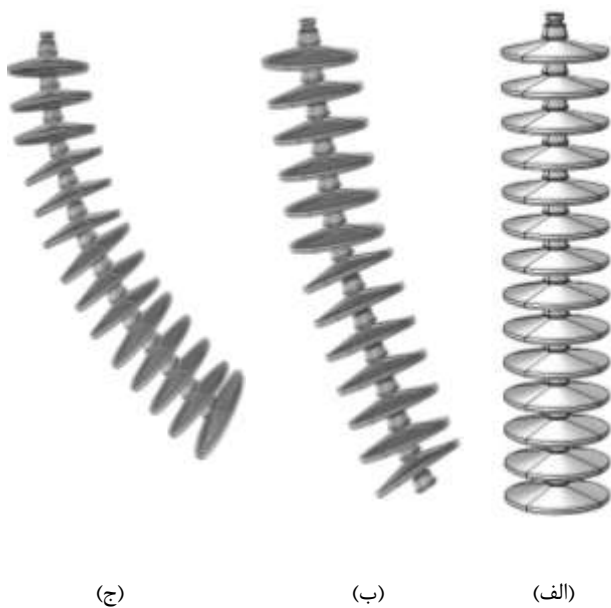
جدول (۱): مشخصات فنی و الکتریکی هر بشقاب مقره

عرض بشقاب مقره (D)	ارتفاع بشقاب مقره (h)	ارتفاع زنجیره مقره (H)	هدایت حرارتی	ضریب دی-الکتریک نسبی
۵۷۰ میلی‌متر	۱۹۰ میلی‌متر	۲۶۶۰ میلی‌متر	۵۰ وات بر متر-درجه کلوین	۴

شبیه‌سازی زنجیره مقره در شرایط بدون آلودگی و رطوبت و تنها به‌منظور بررسی تأثیر انحراف زنجیره مقره بر عملکرد آن مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته شده است.

## ۲. نتایج شبیه‌سازی

این بخش به بررسی تأثیر انحراف زنجیره مقره بر توزیع میدان الکتریکی و ولتاژ زنجیره مقره بشقابی سرامیکی پرداخته است. در شکل (۲) زنجیره مقره شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول نشان داده شده است.



شکل (۲): زنجیره مقره شبیه‌سازی شده الف: بدون انحراف زنجیره مقره ب: انحراف زنجیره مقره ۱۵ درجه ج: انحراف زنجیره مقره ۳۰ درجه

در شکل (۳) تغییرات میدان الکتریکی در طول زنجیره مقره (محور مرزی زنجیره مقره) نشان داده شده است. با توجه به شکل کاملاً مشخص است که وجود انحراف زنجیره مقره بر تغییرات توزیع میدان الکتریکی زنجیره مقره خصوصاً در قسمت‌های نزدیک به فلنچ برقرار تأثیرگذار می‌باشد. با دور شدن از قسمت برقرار زنجیره مقره، به‌دلیل کاهش اثرات انحراف از محور عمودی، تغییرات میدان الکتریکی نسبت به مقره بدون انحراف قابل ملاحظه نبوده و با توجه به شکل مشخص است که با افزایش انحراف زنجیره مقره، میدان الکتریکی مقره‌های نزدیک به فلنچ برقرار افزایش یافته است. در شکل (۴) تغییرات میدان الکتریکی در لبه چترک هر واحد مقره نشان داده شده است. با توجه به شکل کاملاً مشخص است که وجود انحراف زنجیره مقره بر تغییرات میدان الکتریکی زنجیره مقره مؤثر بوده و با افزایش

## ۲. نرم‌افزار مبتنی بر روش اجزاء محدود

روش اجزاء محدود، یک روش حل عددی می‌باشد که با توسعه رایانه، به‌سرعت گسترش یافته است. با استفاده از روش اجزاء محدود، مسائلی که به‌وسیله معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی و شرایط مرزی معین تقریب زده می‌شوند را برای اشکال گوناگون با مرزهای نامنظم و ابعاد مختلف تحلیل کرد. روش اجزاء محدود بر اساس حداقل‌سازی انرژی پتانسیل استوار است نرم‌افزارهایی که از این روش استفاده می‌نمایند، در محاسبه توزیع پتانسیل و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به یک ابزار مهم تبدیل شده‌اند

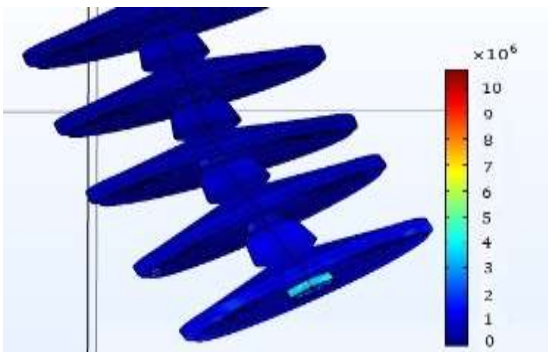
عملکرد این نرم‌افزارها به گونه‌ای است که، با تقسیم فضای مورد نظر به قسمت‌های کوچک و با فرض خطی بودن روابط داخل آنها، سعی شده است تا معادلات دیفرانسیل تحلیل گردد. ایده اصلی این روش، جداسازی و ترکیب می‌باشد. جداسازی برای تحلیل هر بخش و ترکیب به‌منظور تحلیل هم‌زمان کل مدل است. معادلات به‌کار رفته جهت تحلیل الکترومغناطیسی مسئله به‌صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

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

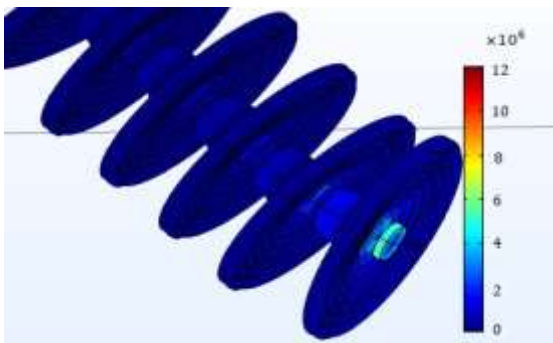
در این معادله E میدان الکتریکی، J چگالی جریان الکتریکی، B چگالی شار مغناطیسی، ρ چگالی بار الکتریکی، H شدت میدان مغناطیسی و D چگالی شار الکتریکی است [۱۶]. در این مقاله تجزیه و تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL در محیط الکترواستاتیک انجام شده است. برای این منظور کل زنجیره مقره به‌صورت سه بعدی در این نرم‌افزار طراحی شده است. اصل این نرم‌افزار به گونه‌ای است که چگالی ناحیه‌بندی‌ها در مناطق بحرانی مقره که اندازه میدان در آن نقاط از اهمیت برخوردار بوده و نیاز به‌دقت افزونتری دارد، بیشتر است.



(الف)



(ب)

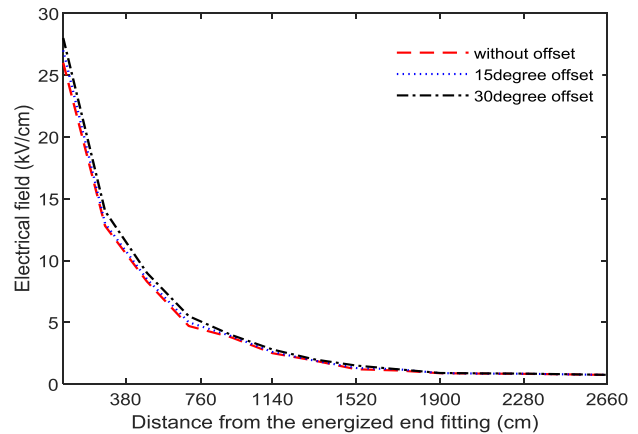


(ج)

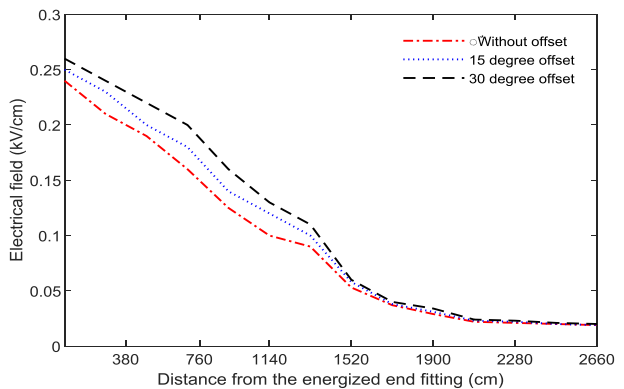
شکل (۵): تغییرات میدان الکتریکی در زنجیره مقره (الف) بدون انحراف زنجیره مقره (ب) انحراف زنجیره مقره ۱۵ درجه (ج) انحراف زنجیره مقره ۳۰ درجه

در جدول (۲) و جدول (۳) اختلاف پتانسیل در دو سر هر واحد مقره و لبه چترک برای زنجیره مقره بدون انحراف و زنجیره مقره با انحراف ۱۵ و ۳۰ درجه نشان داده شده است. مطابق با نتایج جدول (۲) مشخص است که وجود انحراف زنجیره مقره بر تغییرات توزیع پتانسیل زنجیره مقره، خصوصاً بر اختلاف پتانسیل مقره‌های نزدیک به هادی فاز مؤثر می‌باشد. در صورت عدم وجود انحراف زنجیره مقره، ماکزیمم اختلاف پتانسیل الکتریکی برابر ۷۶ کیلوولت و برای انحراف زنجیره مقره ۱۵ و ۳۰ درجه، ماکزیمم اختلاف پتانسیل الکتریکی به ترتیب برابر ۷۸ و ۷۹/۶

انحراف زنجیره مقره به دلیل کاهش طول مؤثر زنجیره مقره میدان الکتریکی افزایش یافته است. با توجه به شکل (۴)، تأثیر انحراف زنجیره مقره بر تغییرات میدان الکتریکی لبه چترک مقره‌های نزدیک به فلنچ بر مقدار مشهودتر بوده که این امر میتواند به دلیل انحراف بیشتر مقره‌های نزدیک به فلنچ بر مقدار نسبت به مقره‌های نزدیک به دکل باشد.



شکل (۳): تغییرات میدان الکتریکی در امتداد خط عبوری از مرکز زنجیره مقره



شکل (۴): تغییرات میدان الکتریکی در لبه چترک زنجیره مقره

به منظور بررسی گرافیکی تغییرات میدان الکتریکی نرم<sup>۱</sup> در مقره، توزیع میدان الکتریکی منتهی از نرم‌افزار COMSOL برای زنجیره مقره بدون انحراف زنجیره مقره و زنجیره مقره دارای انحراف زنجیره مقره ۱۵ و ۳۰ درجه در شکل (۵) نمایش داده شده است. مطابق با این شکل به وضوح می‌توان به تأثیر انحراف زنجیره مقره بر بیشینه میدان الکتریکی در طول زنجیره مقره پی برد. بیشینه دامنه میدان در مقره بدون انحراف زنجیره مقره، انحراف زنجیره مقره ۱۵ درجه و ۳۰ درجه به ترتیب ۸ کیلوولت بر سانتیمتر، ۱۰ کیلوولت بر سانتیمتر و ۱۲ کیلوولت بر سانتیمتر می‌باشد.

<sup>۱</sup> Electric Field Norm

به منظور راستی آزمایی نتایج، نتایج حاصله با نتایج مراجع [۱۷] و [۱۸] مقایسه و نتایج حاصل از این مقایسه در جدول (۴) نشان داده شده است. از آنجایی که بررسی اثر افست بر توزیع پتانسیل و عملکرد عایقی زنجیره مقره بشقابی تاکنون مورد مطالعه و توجه قرار نگرفته است، لذا مقایسه نتایج برای زنجیره مقره بدون افست صورت گرفته است.

همان‌طور که در جدول (۴) نشان داده شده است، تعداد مقره‌ها در زنجیره، تیپ مقره و ابعاد مقره‌ها و در نتیجه طول زنجیره مقره در مقالات مرجع و مقاله ارائه شده متفاوت می‌باشند که این امر موجب اختلاف در نتایج به‌دست آمده شده است. بر این اساس لازم است تا مؤلفه‌های میدان الکتریکی و توزیع پتانسیل با در نظر گرفتن این مؤلفه‌ها مورد مقایسه قرار گیرد. مطابق با جدول (۴) با افزایش طول هر واحد مقره، مقدار ماکزیمم میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی به‌دست آمده به‌ترتیب کاهش و افزایش یافته است.

جدول(۴): مقایسه نتایج به‌دست آمده با مراجع مختلف

مقاله ارائه شده	مرجع [۱۸]	مرجع [۱۷]	
۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	سطح ولتاژ اعمال شده (کیلوولت)
۱۴	۱۵	۱۳	تعداد مقره
۱۹۰	۱۷۰	۱۴۶	طول هر واحد مقره (میلیمتر)
۲۶۶۰	۲۵۵۰	۱۹۰۰	طول زنجیره مقره (میلیمتر)
۲۶	۲۶/۳۲	۲۸/۹	ماکزیمم میدان الکتریکی (کیلوولت بر سانتی‌متر)
۷۶	۷۵	۷۱/۳	ماکزیمم اختلاف پتانسیل در زنجیره مقره (کیلوولت)
۳۳	۳۲/۶	۳۱	ماکزیمم اختلاف پتانسیل نرمالایز شده (%)
۲۱/۶۱	۲۰/۴	۲۵	بازده زنجیره مقره

#### ۴-۱. تغییر انحراف زنجیره مقره بر بازده زنجیره مقره

از آنجایی که وجود انحراف زنجیره مقره بر تغییرات پتانسیل زنجیره مقره مؤثر است لذا در این بخش با توجه به نتایج جدول (۲)، تأثیر وجود انحراف زنجیره مقره بر راندمان زنجیره مقره بررسی شده است. راندمان زنجیره مقره از رابطه (۲) قابل محاسبه می‌باشد. در این رابطه  $\lambda$  بازده،  $n$  تعداد مقره در زنجیره

کیلوولت می‌باشد. با توجه به نتایج جدول (۳) تأثیر انحراف زنجیره مقره بر توزیع پتانسیل چترک زنجیره مقره قابل ملاحظه بوده و ماکزیمم اختلاف پتانسیل در زنجیره مقره بدون انحراف برابر ۰/۴۹ کیلوولت و برای انحراف ۱۵ و ۳۰ درجه، ماکزیمم اختلاف پتانسیل الکتریکی به ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۵۵ کیلوولت می‌باشد.

جدول (۲): اختلاف پتانسیل دو سر هر واحد مقره (کیلوولت)

بدون انحراف زنجیره مقره	انحراف زنجیره مقره ۱۵ درجه	انحراف زنجیره مقره ۳۰ درجه	
۷۶	۷۸	۷۹/۶	مقره اول
۴۴	۴۵	۴۵/۴	مقره دوم
۳۳	۳۴	۳۵/۳	مقره سوم
۲۰/۲	۲۰/۵	۲۱	مقره چهارم
۱۴/۳	۱۳/۵	۱۳	مقره پنجم
۱۰/۷	۹/۷	۷/۵	مقره ششم
۸/۳	۶/۶	۵/۵	مقره هفتم
۴/۸	۴/۳	۴/۵	مقره هشتم
۳/۷	۳/۷	۳/۶	مقره نهم
۳/۴	۳/۵	۳/۵	مقره دهم
۳/۱	۳	۳	مقره یازدهم
۳	۲/۹	۲/۸	مقره دوازدهم
۲/۸	۲/۷	۲/۷	مقره سیزدهم
۲/۷	۲/۶	۲/۶	مقره چهاردهم

جدول (۳): اختلاف پتانسیل در لبه چترک زنجیره مقره (کیلوولت)

بدون انحراف زنجیره مقره	انحراف زنجیره مقره ۱۵ درجه	انحراف زنجیره مقره ۳۰ درجه	
۰/۴۹	۰/۵	۰/۵۵	مقره اول
۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۵	مقره دوم
۰/۴	۰/۴۲	۰/۴۸	مقره سوم
۰/۳۵	۰/۳۹	۰/۴۲	مقره چهارم
۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۳۶	مقره پنجم
۰/۲۸	۰/۳	۰/۲۸	مقره ششم
۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۲	مقره هفتم
۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۷	مقره هشتم
۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۴	مقره نهم
۰/۰۹	۰/۱	۰/۱۱	مقره دهم
۰/۰۸۲	۰/۰۹	۰/۱	مقره یازدهم
۰/۰۸	۰/۰۸۵	۰/۰۸۵	مقره دوازدهم
۰/۰۶۹	۰/۰۷	۰/۰۷۵	مقره سیزدهم
۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴۵	مقره چهاردهم

ولتاژها و افزایش مسیر جرقه، افزایش تعداد مقره‌ها متناسب با کاهش طول مؤثر آن ضروری و الزامی می‌باشد.

جدول (۶): تأثیر انحراف زنجیره مقره بر طول زنجیره مقره

تعداد مقره موثر در خط	طول مقره (میلیمتر)	بدون انحراف زنجیره مقره
۱۴	۲۶۶۰	
۱۳	۲۵۰۹	انحراف زنجیره مقره ۱۵ درجه
۱۲	۲۲۸۰	انحراف زنجیره مقره ۳۰ درجه

## ۲. نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر وجود انحراف زنجیره مقره بر عملکرد زنجیره مقره سرامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر مبنای شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نتایج زیر قابل استنباط می‌باشد:

- وجود انحراف زنجیره مقره موجب تغییر در ماکزیمم مقدار شدت میدان الکتریکی زنجیره مقره می‌گردد. شدت میدان الکتریکی زنجیره مقره بدون انحراف برابر ۲۶، زنجیره مقره دارای انحراف ۱۵ درجه‌ای برابر ۲۷ و در انحراف ۳۰ درجه برابر ۲۹ کیلوولت بر سانتیمتر می‌باشد. لذا با افزایش زاویه انحراف زنجیره مقره شدت میدان افزایش یافته است.
- اختلاف پتانسیل زنجیره مقره دارای انحراف نیز متفاوت بوده و با توجه به نتایج شبیه‌سازی شده کاملاً مشخص است که ماکزیمم اختلاف پتانسیل زنجیره مقره در حالت بدون انحراف، انحراف ۱۵ درجه و انحراف ۳۰ درجه بترتیب برابر ۷۶، ۷۸ و ۷۹/۶ کیلوولت می‌باشد.
- وجود انحراف زنجیره مقره بر بازده زنجیره مقره به دلیل تغییر در ماکزیمم اختلاف پتانسیل بشقاب مقره موثر بوده است و با افزایش انحراف زنجیره مقره، بازده زنجیره مقره کاهش یافته است.
- با وجود انحراف زنجیره مقره طول مؤثر زنجیره مقره کاهش می‌یابد که این امر می‌تواند تضعیف قدرت عایقی زنجیره مقره بشقابی را در پی داشته باشد.

## ۶. مراجع

- [1] J. Wang, Z. Peng, H. Wu, H. Deng, H. Liu, and Ch. Wang, "Electric field calculation and grading ring design for 330kV terminal tower with composite cross-arms," IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), 2016.

مقره،  $V_{PH}$  ولتاژ زنجیره مقره و  $\Delta V_{MAX}$  ماکزیمم اضافه ولتاژ می‌باشد.

$$\lambda = \frac{V_{ph}}{n \cdot \Delta V_{max}} \cdot 100 \quad (2)$$

در جدول (۵) تغییرات بازده زنجیره مقره بدون انحراف و با انحراف ۱۵ و ۳۰ درجه‌ای نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول (۵) کاملاً مشخص است که وجود انحراف زنجیره مقره موجب کاهش بازده زنجیره مقره گردیده است. با افزایش انحراف زنجیره مقره، ماکزیمم اختلاف پتانسیل بشقاب مقره اول افزایش یافته و اثر آن بر کاهش بازده زنجیره مقره شدت می‌یابد. از آنجایی که هدف اصلی در این مقاله بررسی اثر آفست بر توزیع میدان و پتانسیل زنجیره مقره بوده است، لذا اثر حلقه کرونا در نظر گرفته نشده است. در نتیجه، بازده زنجیره مقره مورد مطالعه، به دلیل عدم وجود حلقه کرونا دارای مقادیر اندکی می‌باشد.

جدول (۵): تأثیر انحراف زنجیره مقره بر بازده زنجیره مقره

بدون انحراف زنجیره مقره	انحراف زنجیره مقره ۱۵ درجه	انحراف زنجیره مقره ۳۰ درجه
۲۱/۶۱	۲۱	۲۰/۶

## ۴-۲. تغییر انحراف زنجیره مقره بر طول مؤثر زنجیره مقره

در این بخش تأثیر وجود انحراف زنجیره مقره بر تغییرات طول مؤثر زنجیره مقره و تغییرات مسیر جرقه بررسی شده است. با وجود انحراف زنجیره مقره طول مؤثر زنجیره مقره کاهش می‌یابد و کاهش مؤثر طول زنجیره مقره با افزایش زاویه انحراف زنجیره مقره شدت می‌یابد. کم شدن طول مؤثر زنجیره مقره بر مسیر جرقه مؤثر است که این امر می‌تواند بر عملکرد عایقی زنجیره مقره تأثیرگذار باشد. در زنجیره مقره بدون انحراف، طول مؤثر زنجیره مقره ۲۶۶۰ میلیمتر است.

در جدول (۶) تأثیر انحراف زنجیره مقره بر تغییرات طولی زنجیره مقره و تعداد مقره‌های مؤثر آن نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول (۶) کاملاً مشخص است که با افزایش زاویه انحراف، طول مؤثر فاصله جرقه در زنجیره مقره کاهش یافته است. به‌طور مثال، در زنجیره مقره دارای انحراف ۱۵ درجه، طول مؤثر زنجیره مقره به مقدار ۲۵۰۹ میلیمتر کاهش یافته است که این امر کاهش تعداد مؤثر مقره در زنجیره مقره را از لحاظ استقامت عایقی در پی دارد. لذا در صورت اتصال مقره با زاویه خاص نسبت به خط عمود، در راستای کاهش اثرات مخرب اضافه

- [11] P. Hansen, W. Massey, and J. Chavez, "Numerical Calculation of Voltage Distribution in an Insulator String Comparison with Measurements," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2006.
- [12] S. Ilhan and A. Ozdemi, "Corona ring optimization for V-insulator string on the point of RIV and AC flashover performance," International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2010.
- [13] Q. Wang, J. Liao, H. Li, X. Wei, and Z. Peng, "Voltage sharing characteristics of V-type suspension ceramic insulator strings for UHV AC substation," 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 2015.
- [14] A. Phillips, A. Maxwell, C. Engelbrecht, and I. Gutman, "Electric Field Limits for the Design of Grading Rings for Composite Line Insulators," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 30, pp. 1110-1118, 2015.
- [15] B. Mhamdi, M. Tegar, and A. Mekhaldi, "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, pp.1048-1057, 2016.
- [16] Multiphysics, COMSOL "Introduction to COMSOL multiphysics," COMSOL Multiphysics, 2018.
- [17] 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 Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol. 9, pp. 58-66, 2013.
- [18] M. S. Sanjari Nia, M. Altimania, P. Shamsi, and M. Ferdowsi, "Comprehensive Analysis for Electric Field and Potential for Polymeric and Ceramic Insulators," American Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol. 8, pp. 26-34, 2020.
- [2] T. Doshi, R. S. Gorur, and J. Hunt, "Electric field computation of composite line insulators up to 1200 kV AC," IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 18, pp. 861- 867, 2011.
- [3] A. M. Gataullin, D. F. Gubaev, and R. R. Khusnutdinov, "Automation of high-voltage electrical equipment insulators diagnostics by partial discharges method," International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, 2021.
- [4] H. MeiHuaiyuan Jiang, J. Chen, F. Yin, L. Wang, and M. Farzaneh "Detection of Internal Defects of FullSize Composite Insulators Based on Microwave Technique," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement vol. 1, pp. 1- 8, 2021.
- [5] A. Chakri, R. Khelif, M. Benouaret, and X. S. Yang, "New directional bat algorithm for continuous optimization problems," Expert Systems with Applications (ESWA), vol. 69, pp. 159-175, 2017.
- [6] L. Jin, J. Ai, S. Han, and G. Zhou, "Probability calculation of pollution flashover on insulators and analysis of environmental factors," IEEE Transactions on Power Delivery vol. 1, pp. 1-6, 2021.
- [7] A. Ahmed Salem, and S. Mgamal Al-Ameri, "Pollution flashover under different contamination profiles on high voltage insulator: Numerical and Experiment Investigation," IEEE Access vol. 9, pp. 37800-37812, 2021.
- [8] A. J Thomas, I. C, and C. Chakradharreddy, "on the measurement of surface voltage of insulators and bushings," IEEE Transactions on Power Delivery vol. 1, pp. 1-4, 2021.
- [9] V.T Kontargyri, L. N Platil, F.Gonos, and I. A Stathopoulos, "Measurement and simulation of the voltage distribution and the electric field on a glass insulator string," Measurement vol. 41, pp. 471-480, 2008.
- [10] M. Ramesh , and R. S. Gorur, "Stretched grid finite difference method for computation of electric field in composite insulators with defects," Electric Power Systems Research vol. 19, pp.106-875, 2021.