

# روشی نوین برای تجزیه و تحلیل و طراحی الکترودهای محافظ زنجیره مفره های فشار قوی

عباس محمد زاده فخر داود  
کارشناسی ارشد

بهروز وحیدی  
استادیار

دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## چکیده

هدف اصلی این مقاله تجزیه و تحلیل و طراحی الکترودهای محافظ زنجیره های مفره (بعلت کاربرد وسیع آنها در سیستم انتقال نیرو) می باشد. کاربرد عمده این الکترودها در یکنواخت کردن توزیع پتانسیل در طول زنجیره های مفره، کاهش جریان های خزشی و جلوگیری از پیری زودرس مفره می باشد. در صورت عدم نصب این الکترودها یا طراحی نامناسب آنها، توزیع پتانسیل در طول زنجیره کاملاً غیر یکنواخت بوده و مفره هایی که سمت هادی هستند، شاهد افت ولتاژ بیشتری نسبت به مقدار حداکثر قابل تحمل خود می باشند این مسئله ضمن پیر کردن مفره، منجر به افزایش جریان های خزشی می گردد. در این مقاله با استفاده از روش بارهای فرضی (CSM) روشی نوین برای تجزیه و تحلیل و طراحی بکار گرفته شده است.

## کلمات کلیدی

زنجیره مفره - الکتروود محافظ - روش بارهای فرضی

## A New Method For Analyzing and Design Of Guard Electrodes of High Voltage Insulators Chain

B. Vahidi  
Assistant Professor

A. Mohammad Zadeh  
M. Sc Student

Department of Electrical Engineering,  
Amirkabir University of Technology

## Abstract

The main aim of this paper is analyzing design of guard electrodes of high voltage insulators chain. These electrodes are used for making the distribution of uniform potential across the insulators chain, reducing leakage current and preventing the degradation of insulators. If the design is not correct or in the case of insulators chain without guard electrodes, the potential distribution will not uniform. Thus the voltage drops on the insulators adjacent to conductors will be more than maximum voltage that can be tolerated by the insulators. Therefore these voltage drops can damage the insulators. In this paper A new method is introduced for analyzing and design of gurad electrodes of high voltage insulators chain.

## Keywords

Insulator chain - Guard electrode - chargesimulation method (CSM)

گسسته فرضی مدلسازی می شوند که شکل، تعداد و محل آنها مشخص بوده و از شکل و ابعاد و میزان پیچیدگی سیستم عایقی مورد نظر تبعیت می کنند. ولی مقادیر بارهای فوق الذکر، در آغاز مشخص نیست و باید بوسیله اعمال شرایط مرزی به تعدادی از نقاط کانتور تعیین شود. و با تعیین مقادیر بارها می توان پتانسیل و میدان را در هر نقطه از سیستم بدست آورد [2].

### اعمال روش بارهای فرضی به یک سیستم تک عایقی

اگر یک سیستم تک عایقی متشکل از  $N$  الکتروود با پتانسیل های مشخص در نظر گرفته شود، برای محاسبات پتانسیل و میدان، بارهای واقعی قرار گرفته در داخل و روی سطح الکتروودها با  $n_p$  بار فرضی در داخل هادی ها مدل سازی می شوند. شکل و محل قرار گرفتن این بارها اختیاری بوده و جهت تعیین مقادیر این بارها،  $n_p$  نقطه کانتور روی سطح هادی ها در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه پتانسیل در هر یک از این  $n_p$  نقطه با پتانسیل الکتروود مربوطه مساوی است و همانطوریکه بعداً تشریح می شود، می توان ماتریس ضرایب پتانسیل را تعیین کرده و از آنجا با حل دستگاه معادلات بدست آمده، مقادیر بارها را مشخص کرد.

معمولاً تعداد بارها و نقاط کانتور را مساوی در نظر می گیرد ( $n_p = n_c = n$ ) در اینصورت یک دستگاه  $n$  معادله و  $n$  مجهول بدست خواهد آمد که به صورت ماتریسی در رابطه (۱) دیده می شود.

$$[P]_{n \times n} [Q]_{n \times 1} = [\Phi]_{n \times 1} \quad (1)$$

در این رابطه  $[Q]$  بردار بارها،  $[\Phi]$  بردار پتانسیل ها و  $[P]$  ماتریس ضرایب می باشند. بعد از حل معادلات فوق، و تعیین مقادیر بارها، لازم است برای بررسی دقت محاسبات، پتانسیل روی سطح الکتروودها با کمک بارهای محاسبه شده و اختلاف این مقدار با مقدار واقعی، نمایانگر میزان دقت کار شبیه سازی است. به این منظور، تعداد دلخواهی نقطه (تعداد این نقاط می تواند با تعداد بارها متفاوت باشد). روی سطح الکتروودها در نظر گرفته شده و بعد از محاسبه ماتریس ضرایب، با کمک رابطه (۲) پتانسیل این نقاط تست محاسبه می شود.

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j \quad (2)$$

اگر دیده شد که نتایج با مقادیر واقعی تفاوت فاحشی

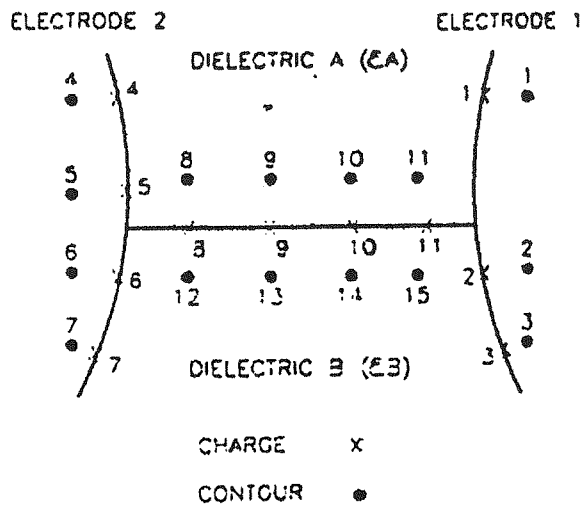
امروزه اهداف عمده ساخت و بهره برداری از تجهیزات فشار قوی بعنوان تجهیزاتی که بیشتر تحت تنش های الکتریکی قرار دارند اقتصادی تر، کارا تر و کوچکتر کردن آنها می باشد. به این منظور باید دید هر تجهیز از چه جهانی آسیب پذیر تر و حساس تر است. و سپس به تقویت بخش های حساس آن پرداخت. یکی از نقاط حساس در تجهیزات فشارقوی مسئله ایزولاسیون تجهیزات در مقابل ولتاژهای عادی سیستم و همینطور اضافه ولتاژهای احتمالی است. اهمیت این موضوع آنجا مشخص می شود که بدانیم عملکرد درست سیستم عایقی در گرو ایزولاسیون درست آن است. از علل و عوامل کاهش کیفیت عایقی، ایجاد توزیع پتانسیل ها و میدان های الکتریکی بیش از حد مجاز و خارج از محدوده قابل تحمل عایق است. لازم به ذکر است که منظور از کاهش کیفیت عایقی، پیری عایق و کاهش قابلیت اعتماد عملکرد تجهیز می باشد. بعبارت دیگر هر گونه دور شدن عایق از اهداف ایزولاسیون مورد نظر در طراحی به کاهش کیفیت عایقی تعبیر می شود. بنابراین باید به نحوی از ایجاد توزیع پتانسیل های غیر مجاز و میدان الکتریکی ناخواسته جلوگیری کرد.

### روش بارهای فرضی (CSM)

در سال های اخیر روش های گوناگونی به منظور محاسبه میدان ابداع شده اند که از آن میان می توان روش بارهای فرضی را نامبرد.

روش بارهای فرضی مبتنی بر محاسبه میدان الکتریکی واقعی در هر ناحیه از سیستم با کمک بارهای فرضی گسسته قرار گرفته در خارج آن ناحیه است. ویژگی بارز این روش نسبت به روش های اجزاء محدود (FEM) و تفاضل محدود (FDM)، این است که چون در این روش، گسسته سازی فضائی فقط به الکتروودها و یا فصل مشترک عایق ها محدود می شود، برای حل عددی معادلات به تعداد کمتری از نقاط سیستم احتیاج بوده و لذا سرعت محاسبه بالاتر و حجم حافظه مورد نیاز کامپیوتر را نیز کاهش می یابد. [4 و 3 و 2 و 1] البته این مسئله یک محدودیت بزرگ ایجاد می کند، که با محدود کردن عمل گسسته سازی به حوزه الکتروودها، دیگر نمی توان خواص غیر خطی را در فضا منظور کرد. ولی با وجود این محدودیت، می توان روش بارهای فرضی را بعنوان یک روش موفق و کارا در تعیین توزیع پتانسیل و میدان معرفی کرد [5 و 6].

همانطوریکه گفته شد، در این روش شرایط الکترواستاتیکی حاکم بر سیستم واقعی با کمک بارهای



شکل (۱) يك سیستم دو عایقی نمونه [۴].

شرایط مرزی که در این نوع سیستم ها استفاده می شوند، به شرح ذیل می باشند:

۱- پتانسیل نقاط روی هر الکتروود باید با پتانسیل آن الکتروود مساوی باشد.

۲- روی سطح مشترک عایق ها باید پتانسیل و مؤلفه عمودی چگالی شار الکتریکی ناشی از بارهای داخلی هر عایق مساوی باشند.

بعبارت دیگر پتانسیل روی سطح عایق ها باید از دید بارهای داخل هر عایق، مساوی باشد و نیز میدان الکتریکی روی سطح مشترک عایق ها فقط مؤلفه عمودی داشته باشد. (البته این شرایط فقط برای حالتی که بارهای سطحی روی سطح مشترک عایق ها وجود نداشته باشد، برقرار است). در هنگام نوشتن روابط برای نقاط روی سطح الکتروودها، بارهای قرار گرفته در عایقی که در مجاورت این نقطه قرار دارند، در نظر گرفته نمی شوند. مثلاً در شکل (۱) برای در نظر گرفتن پتانسیل در نقطه ۱، فقط بارهای ۱ تا ۷ و ۱۲ تا ۱۵ مورد استفاده قرار می گیرند.

برای نقاط در نظر گرفته شده روی سطح الکتروودها در شکل (۱)، می توان گفت:

$$\sum_{j=1}^7 P_{ij} Q_j + \sum_{j=12}^{15} P_{ij} Q_j = \Phi_1 \quad (i = 1,4,5) \quad (5)$$

$$\sum_{j=12}^{11} P_{ij} Q_j = \Phi_2 \quad (i = 2,3,6,7) \quad (6)$$

و برای نقاط روی سطح مشترک عایق ها نیز داریم:

$$\sum_{j=1}^7 P_{ij} Q_j + \sum_{j=12}^{15} P_{ij} Q_j = V_i \quad (i = 8, \text{ to } 11) \quad (7)$$

درد، باید با تغییر یکی از پارامترهای مؤثر از قبیل تعداد بارها، محل قرار گرفتن آنها، نوع بارها، محل کانتورها و ... دوباره محاسبات را انجام داد. برای محاسبه میدان در هر نقطه از ناحیه مورد بحث نیز می توان از رابطه (۲) کمک گرفت:

$$E_i = -(\nabla \Phi_i) \quad (2)$$

که بطور مثال برای مختصات کارتزین، این رابطه بصورت زیر در می آید:

$$E_i = \left[ \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial x} Q_j \right] \hat{a}_x + \left[ \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial y} Q_j \right] \hat{a}_y + \left[ \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial z} Q_j \right] \hat{a}_z =$$

$$\left[ \sum_{j=1}^n (f_{ij})_x Q_j \right] \hat{a}_x + \left[ \sum_{j=1}^n (f_{ij})_y Q_j \right] \hat{a}_y + \left[ \sum_{j=1}^n (f_{ij})_z Q_j \right] \hat{a}_z \quad (4)$$

در این رابطه  $(f_{ij})_x$ ،  $(f_{ij})_y$  و  $(f_{ij})_z$  بعنوان ضرایب میدان در راستای محورهای مربوطه شناخته می شوند. (روابط مربوط به بارهای حلقوی در ضمیمه ۱ آورده شده اند)

### اعمال روش بارهای فرضی به سیستم چند عایقی

محاسبه میدان و پتانسیل در یک سیستم که تعداد عایق های بکار رفته در آن بیش از یکی باشد، بسیار پیچیده تر از حالت تک عایقی است و به اعمال شرایط مرزی بیشتری نیازمند است. این پیچیدگی به خاطر این است که وقتی عایق ها تحت تنش الکتریکی قرار می گیرند، در آنها دو قطبی هایی بوجود می آید که مشابه با وجود بارهای درونی در داخل عایق است. بنابراین دو قطبی ها نیز باید بوسیله بارهایی در هر یک از عایق ها مدل شوند. بعنوان مثال یک سیستم متشکل از دو عایق و دو الکتروود مطابق شکل (۱) در نظر گرفته می شود.

در این شکل، بارهای ۱ تا ۳ و ۴ تا ۷ به ترتیب برای مدل سازی بارهای سطحی الکتروودهای ۱ و ۲ استفاده شده اند و بارهای ۸ تا ۱۵ برای مدل سازی دو قطبی های ایجاد شده بکار رفته اند. نقاط کانتور ۱ تا ۳ و ۴ تا ۷ به ترتیب دارای پتانسیل های  $\Phi_1$  و  $\Phi_2$  می باشند. نقاط کانتور ۸ تا ۱۱ برای بررسی شرایط مرزی میدان روی سطح مشترک عایق ها در نظر گرفته شده اند.

معادله ۱۲ را از بقیه تفریق کرد، تا عبارت  $V_k$  آنها حذف شود، در نتیجه معادلات مطلوب برای بدست آوردن بارها بدست می آید.

### نرم افزار تهیه شده

به منظور طراحی الکترودهای محافظ زنجیره های مقره که در دو سر زنجیره های مقره نصب می گردند، نرم افزار (Voltage Distibution Uniformizer) VDU به زبان برنامه نویسی MATLAB توسط نویسندگان مقاله تهیه شده است. برای محاسبه توزیع پتانسیل محققین مختلف در این زمینه روش های گوناگون بکار برده اند. [9 و 8 و 7] در این مقاله ما از روش CSM برای محاسبه توزیع پتانسیل و بررسی اثرات حلقه های محافظ استفاده کرده ایم.

در این نرم افزار در شبیه سازی توزیع پتانسیل بر روی زنجیره مقره از بارهای حلقوی استفاده شده است.

### مشخصات نرم افزار

اطلاعات ورودی برنامه شامل مقره ها و الکترودها می باشد که هر کدام در یک پنجره مجزا به برنامه وارد می شوند.

۱- اطلاعات مربوط به مقره: در این برنامه با توجه به کاربرد بیشتر مقره های استاندارد، ضد مه، و بدون چترک (Open profile insulator)، این سه نوع مقره در برنامه گنجانده شده است و در پنجره مربوطه با انتخاب هر کدام از این مقره ها می توان اطلاعات مربوط به ابعاد آن را از طریق پنجره به برنامه وارد کرد.

۲- اطلاعات مربوط به الکترودها: پنجره ای جهت انتخاب نوع الکترودها در نظر گرفته شده است در این برنامه کاربر قادر خواهد بود تا توزیع پتانسیل را در حالت نصب الکترودها بررسی کند و در صورت نیاز به بررسی توزیع پتانسیل در حالت نصب الکترودها، کاربر می تواند از بین ۴ نوع الکترودها پیشنهادی که از رایجترین الکترودها می باشند (ضمیمه ۲) الکترودها مورد نظر خود را انتخاب نموده و اطلاعات مربوطه را از طریق پنجره به برنامه وارد نماید.

### توزیع پتانسیل در طول زنجیره مقره

با استفاده از نرم افزار نوشته شده به بررسی توزیع پتانسیل در طول زنجیره مقره پرداخته شد. در این بررسی یک زنجیره ده مقره ای با مقره های از نوع استاندارد برای شبیه سازی در نظر گرفته شد. (بنابراین تعداد نقاط اتصال یازده خواهد بود) برج در نظر گرفته شده در شبیه سازی از نوع H با ارتفاع ۲۰ متر و طول بازوهای (cross arm) ۳ متر می باشد.

$$\sum_{j=1}^{11} P_{ij} Q_j = V_i \quad (i = 8 \text{ to } 11) \quad (8)$$

روابط (۷) و (۸) را می توان از هم کم کرد و به رابطه ۹ رسید:

$$\sum_{j=8}^7 P_{ij} Q_j - \sum_{j=12}^{15} P_{ij} Q_j = 0 \quad (i = 8 \text{ to } 11) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{r1} \left( \sum_{j=1}^7 f_{ij} Q_j + \sum_{j=12}^{15} f_{ij} Q_j \right) = \varepsilon_{r2} \left( \sum_{j=1}^{11} f_{ij} Q_j \right) \quad (i = 8 \text{ to } 11) \quad (10)$$

در این رابطه  $f_{ij}$ ، ضریب میدان در راستای عمود بر سطح است. معادلات ۵ تا ۱۰ باید برای تعیین مقادیر بارها حل شوند.

### شبیه سازی الکترودهای شناور با کمک روش بارهای فرضی

یکی از مزایای روش بارهای فرضی، امکان مدل سازی الکترودهای شناور تجهیزات فشار قوی می باشد. بعلاوه مشخص نبودن ولتاژ و یا مقدار بار الکتریکی در الکترودهای شناور، امکان مدل سازی دقیق آنها با روش های دیگر وجود ندارد یا دشوار است. با توجه به اینکه الکترودهای شناور به هیچ منبع ولتاژی متصل نیستند لذا مقدار مجموع بارهای الکتریکی در نظر گرفته شده در آنها مساوی صفر می باشد. اگر  $n$  تعداد بارهای داخل الکترودها شناور باشد.

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0 \quad (11)$$

برای هر یک از نقاط کانتور روی الکترودها شناور می توان گفت:

$$\sum_{i=1}^n P_{ij} Q_i = V_k \quad (12)$$

برای هر نقطه  $J$  (کانتور) روی الکترودها شناور  $V_k$  ولتاژ الکترودها شناور می باشد. اگر  $n$  کانتور حول هر الکترودها شناور داشته باشیم، طبیعتاً  $n$  بار هم داخل الکترودها شناور جهت مدل سازی در نظر گرفته می شود. بنابراین برای بدست آوردن بارها نیاز به  $n$  معادله داریم، که یک معادله همان رابطه ۱۱ می باشد. با توجه به مجهول بودن مقدار ولتاژ  $V_k$ ، کافی است بازای آنها مختلف یکی از روابط بدست آمده از

## توزیع پتانسیل در طول زنجیره مقره بدون الکتروود محافظ

برای بهبود دادن وضعیت توزیع پتانسیل در طول زنجیره های مقره، اطلاع از وضعیت توزیع پتانسیل در طول زنجیره ها در حالت بدون استفاده از الکتروود محافظ ضروری است. شکل ۲ توزیع پتانسیل را در طول زنجیره ۱۰ مقره ای بدون الکتروود محافظ و در حالت با و بدون اثر برج نشان می دهد.

### اثر شاخک برقگیر بر نحوه توزیع پتانسیل

شکل ۳ توزیع پتانسیل را در طول یک زنجیره ۱۰ مقره ای نشان می دهد که برای طول های مختلف یک شاخک برقگیر تکی می باشد. شاخک برقگیر در فاصله ۲۵ سانتیمتری از محور زنجیره واقع شده و بصورت یک میله به قطر ۲ سانتیمتر است. دیده می شود که این شاخک بیشترین تأثیر را بر مقره های طرف برج داشته ولی نمی تواند توزیع ولتاژ را بطور کامل یکنواخت کند.

یکی از پارامترهایی که می تواند تا حد زیادی توزیع پتانسیل را تحت تأثیر خود قرار دهد، فاصله الکتروود از زنجیره است، این مسئله در شکل ۴ قابل ملاحظه است. الکتروود با طول ۷۵ سانتیمتر در فواصل ۱۵، ۲۵ و ۴۵ سانتیمتری از محور زنجیره قرار داده شده است.

شکل ۵ مقایسه ای میان توزیع پتانسیل ناشی از شاخک برقگیر تکی و دوپل را با طول های ۷۵ سانتیمتر نشان می دهد در این شکل دیده می شود که بطور تقریبی در طول ۷ مقره نزدیک به برج توزیع پتانسیل یکنواخت تر و تقریباً نزدیک به حالت ایده آل است.

### اثر حلقه های محافظ بر توزیع پتانسیل در طول زنجیره مقره

در سطوح ولتاژی بالاتر، بعلت افزایش شدت غیر یکنواختی توزیع پتانسیل، از الکتروودهای مؤثرتری استفاده می شود که بصورت الکتروودهای حلقوی می باشند. (Corona Ring) این الکتروودها از نظر ابعادی دارای دو بعد طول و عرض هستند که هر یک از آنها، می توانند به نوبه خود، بر توزیع پتانسیل تأثیر گذار باشند.

شکل ۶ چگونگی توزیع پتانسیل را روی یک زنجیره ۱۰ مقره ای بازای طول های مختلف حلقه محافظ نشان می دهد. شکل ۷ توزیع پتانسیل را روی زنجیره ۱۰ مقره ای بازای عرض های مختلف حلقه محافظ نشان می دهد. در این شکل، طول الکتروود ۶۰ سانتیمتر است. دیده می شود که هر چه عرض حلقه بیشتر باشد وضعیت توزیع پتانسیل یکنواخت تر

شده ولی از نظر هماهنگی عایقی در افزایش عرض حلقه محدودیت وجود دارد و نمی توان به هر میزان آن را افزایش داد. شکل ۸ مقایسه ای میان حلقه های محافظ تکی و دوپل را با طول های ۶۰ و عرض های ۱۵ سانتیمتر نشان می دهد.

### بحث و نتیجه گیری

از بررسی های انجام شده در این مقاله می توان نتیجه گرفت که:

- ۱- برج بعنوان بزرگترین هادی قرار گرفته در مجاورت زنجیره، اثر چندانی بر توزیع پتانسیل در طول زنجیره نداشته و بدون از دست دادن دقت مورد نظر، می توان از اثر آن صرفنظر کرد.
- ۲- وقتی طول شاخک برقگیر از حدی بیشتر می شود، اعوجاج توزیع پتانسیل از وضعیت یکنواخت ایده آل بیشتر شده و بنابراین باید طول شاخک برقگیر بطور مناسب و بهینه انتخاب شود.
- ۳- با مقایسه اثرات برقگیرهای تکی و دوپل نتیجه می شود که برقگیرهای دوپل از قابلیت بیشتری جهت یکنواخت کردن توزیع پتانسیل برخوردارند.
- ۴- تأثیر فاصله الکتروودها از زنجیره، بعنوان یکی از پارامترهای مؤثر بر توزیع پتانسیل مورد بررسی قرار گرفت و دیده شد که هر چه الکتروودها به زنجیره نزدیکتر باشند، توزیع پتانسیل نیز یکنواخت تر می شود.
- ۵- هر چه عرض حلقه های محافظ بیشتر باشد، توزیع پتانسیل وضعیت بهتر پیدا می کند.
- ۶- در صورتیکه طول حلقه های محافظ از حدی بیشتر بشود باعث افزایش اعوجاج از حالت ایده آل می شود.
- ۷- حلقه های محافظ دوپل بیشتر از حالت تکی می توانند توزیع پتانسیل را یکنواخت کنند.
- ۸- با استفاده از روش این مقاله می توان برای زنجیر مقره های مختلف طراحی مناسب شاخک های برقگیر و حلقه های محافظ را انجام داد.

### ضمیمه ۱

روابط مربوط به بارهای حلقوی بصورت زیر می باشند [۱۰]:

$$q_j$$
$$z_j$$
$$z$$
$$r$$
$$P(r, z)$$

بطوریکه:

$$k_1 = \frac{2\sqrt{r_j r}}{\alpha_1} \quad k_2 = \frac{2\sqrt{r_j r}}{\alpha_2}$$

$$\alpha_1 = \sqrt{(r+r_j)^2 + (z-z_j)^2} \quad \alpha_2 = \sqrt{(r+r_j)^2 + (z+z_j)^2}$$

$$\beta_1 = \sqrt{(r-r_j)^2 + (z-z_j)^2} \quad \beta_2 = \sqrt{(r-r_j)^2 + (z+z_j)^2}$$

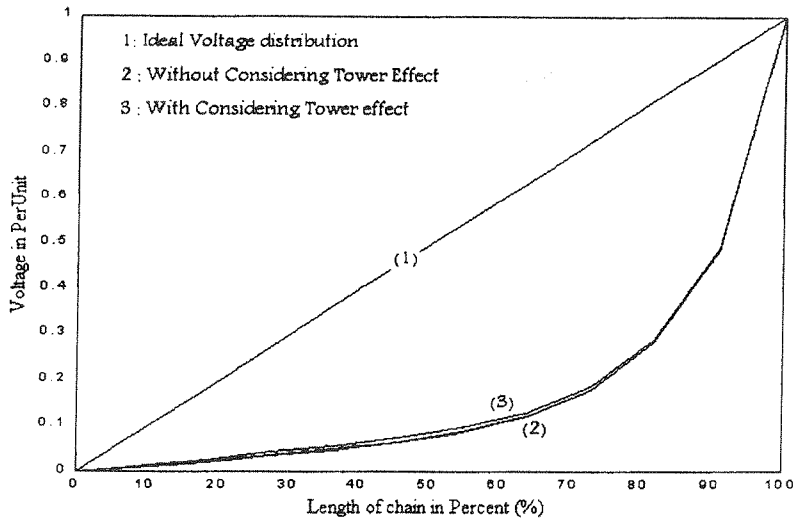
در این روابط  $K(k)$  و  $E(k)$  انتگرال های بیضوی کامل نوع اول و دوم هستند. و آنها را می توان با تقریب چند جمله ای حساب کرد [۱۱].

$$P_j = \frac{2}{4\pi^2 \epsilon} \left[ \frac{K(k_1)}{\alpha_1} - \frac{K(k_2)}{\alpha_2} \right]$$

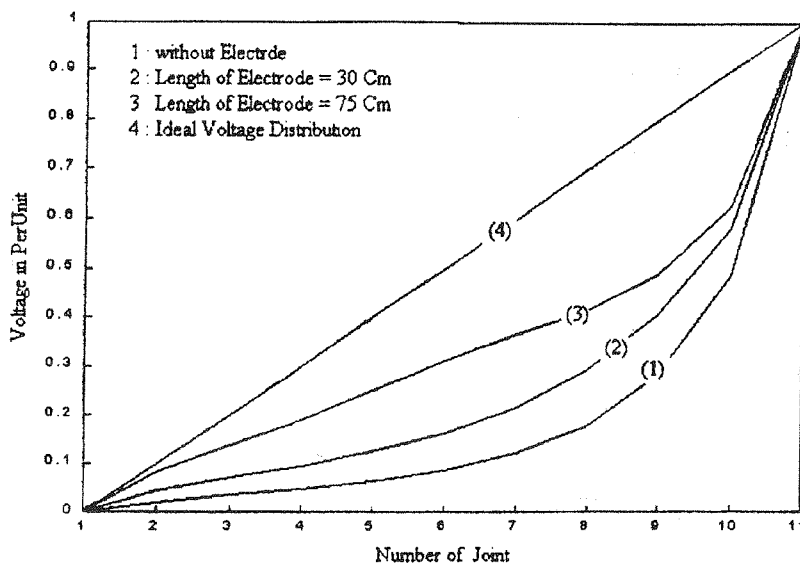
$$E_r = - \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{4\pi^2 \epsilon r}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{[r_j^2 - r^2 + (z-z_j)^2] E(k_1) - \beta_1^2 K(k_1)}{\alpha_1 \beta_1^2} \\ - \frac{[r_j^2 - r^2 + (z+z_j)^2] E(k_2) - \beta_2^2 K(k_2)}{\alpha_2 \beta_2^2} \end{array} \right\}$$

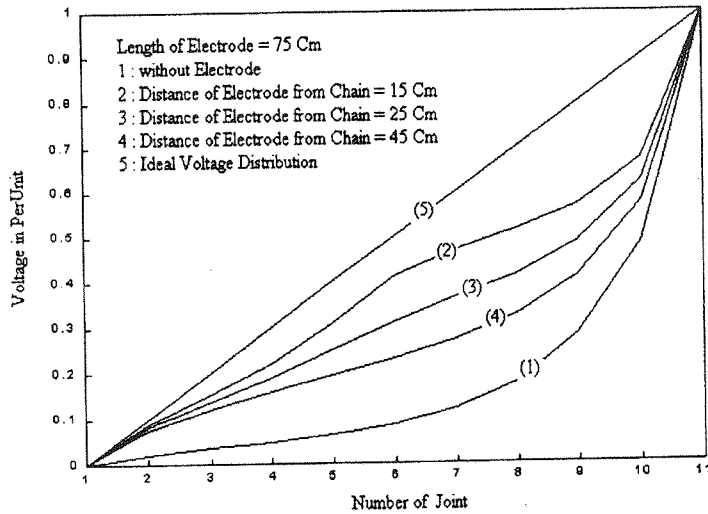
$$E_z = - \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{2\pi^2 \epsilon} \left\{ \frac{(z-z_j) E(k_1)}{\alpha_1 \beta_1^2} + \frac{(z+z_j) E(k_2)}{\alpha_2 \beta_2^2} \right\}$$



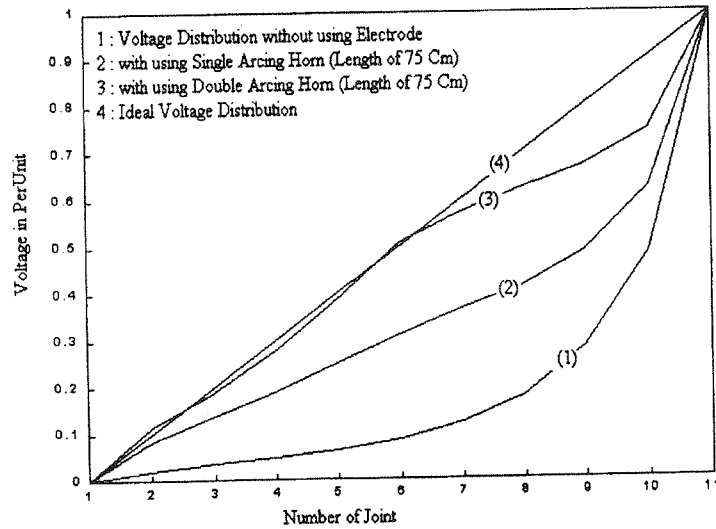
شکل (۲) مقایسه اثر برج بر توزیع پتانسیل در طول زنجیره ۱۰ مفره ای بدون الکتروود محافظ.



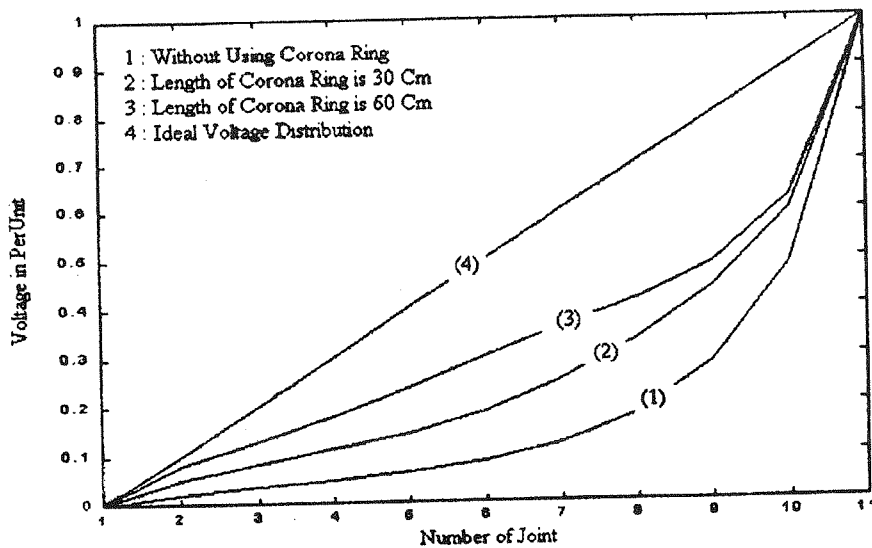
شکل (۳) اثرات نصب شاخک برقگیر تکی بر توزیع پتانسیل روی يك زنجیره ۱۰ مفره ای بازای طول های مختلف برقگیر.



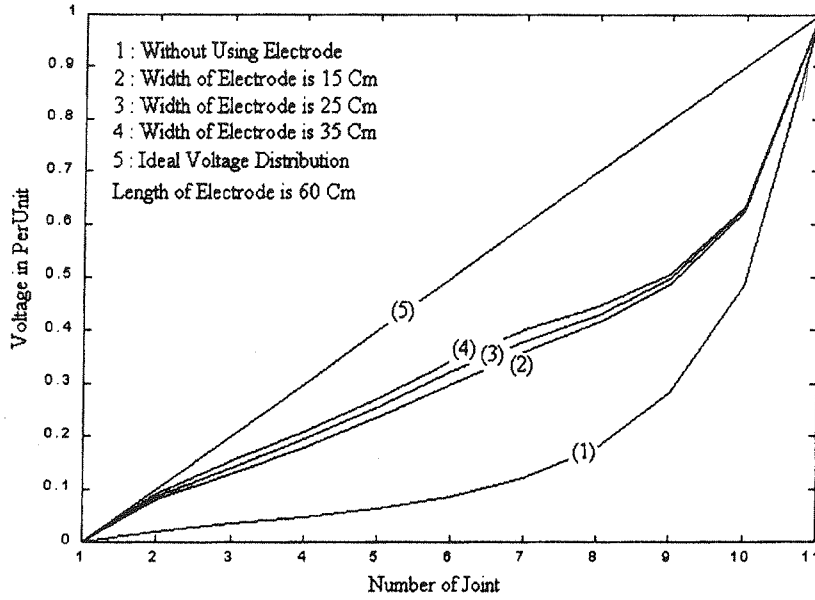
شکل (۴) اثرات فاصله الکترود بر تغییر تکی از محور زنجیره بر توزیع پتانسیل در طول زنجیره ۱۰ مقرر ای.



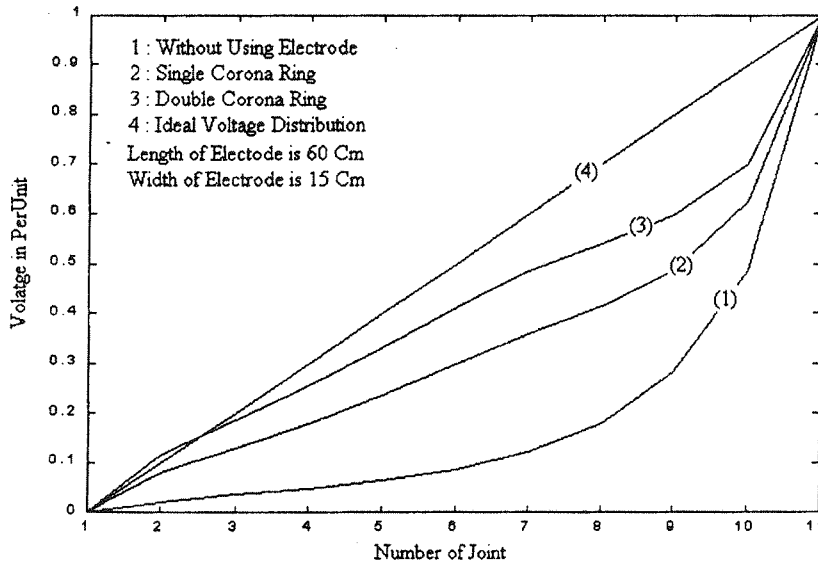
شکل (۵) مقایسه اثرات بر تغییر تکی و دوبل بر توزیع پتانسیل در طول زنجیره ۱۰ مقرر ای.



شکل (۶) تأثیر طول حلقه محافظ تکی بر توزیع پتانسیل در طول یک زنجیره ۱۰ مقرر ای.



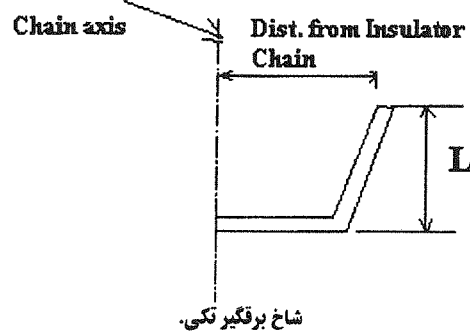
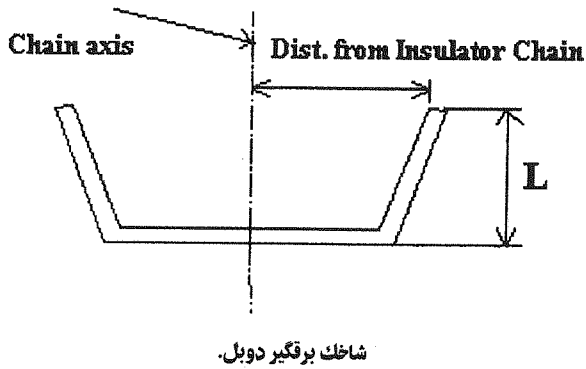
شکل (۷) تأثیر حلقه محافظ تکی بر توزیع پتانسیل در طول يك زنجيره ۱۰ مقررہ ای.



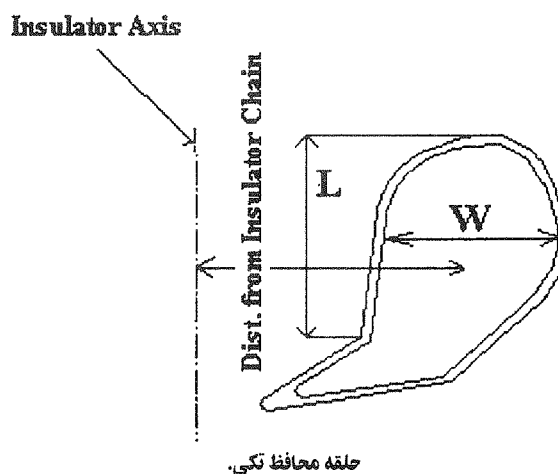
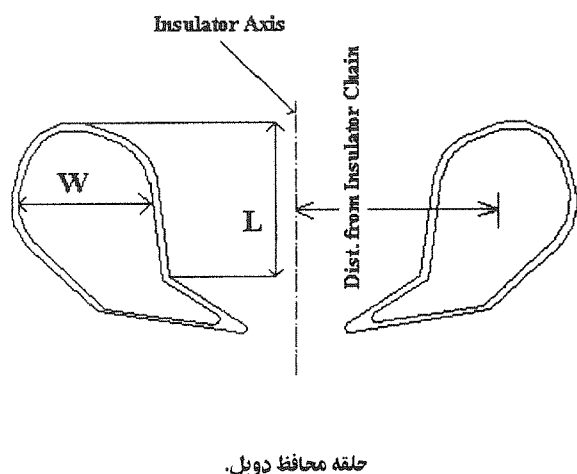
شکل (۸) مقایسه میان توزیع پتانسیل ناشی از نصب حلقه های محافظ تکی و دوپل با طول ۶۰ سانتیمتر.

## ضمیمه ۲

شکل الکترودهای مختلف:







## مراجع

- [1] N.H.Malik, A review of the charge simulation method and its applications, IEEE trans. On Electrical Insulation, Vol. 24, NO.1, 1989, pp 3-20.
- [2] H.Singer, H.Steinbigler and P. Weiss, A charge simulation method for calculation of high voltage field, IEEE trans. on PAS, vol 93, 1974, pp 1660-1668.
- [3] H. Steinbigler, Combined application of finite element method and charge simulation method for the computation of electric fields, 3<sup>rd</sup> ISH (International Symposium on High Voltage Engineering), Milan, 1979, Paper NO. 11.11.
- [4] H. Steinbigler, D. Haller and A. Wolf, Comparative analysis of methods for computing 2D and 3D electric fields, IEEE trans. on Electrical Insulation, Vol. 26, NO. 3, June 1991, pp 529-536.
- [5] F.Heidler and H. Steinbigler, Approximate electric field calculation for ring electrodes, 4<sup>th</sup> ISH, Athen. 1983, Paper NO.11.03.
- [6] B.Bachmann, Models for charge simulation method, 3<sup>rd</sup> ISH, Milan, 1979, Paper NO. 12.05.
- [7] M. Abdel-Salam and E.K.Stanek, Field optimization of high voltage insulators, IEEE trans. on Industry Application, Vol. 22, NO.4, 1986, pp 594-601.
- [8] M. Abdel-Salam and E.K.Stanek, Optimizing field stress of high voltage insulators, IEEE trans. on Electrical Insulation, Vol. 22, NO. 1, 1987, pp 47-56.
- [9] Z.Haznadar and S.Milojkovic, Numerical field calculation of insulator chains for high voltage transmission lines, 3<sup>rd</sup> ISH, Milan, 1979, Paper NO. 12.08.
- [10] Z.Andjelic, B.Kretajic, S.Milojkovic, A.Blaszczyk, H.Steinbigler and M. Wohlmut, Integral methods for the calculation of electric fields, (book) German-Yugoslav-Cooperation in Scientific Research and Technological Development. Julich-Germany, 1992.
- [11] M.Abramowitz, I.A.Stegun. Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, New York. 1972.