

# امکان سنجی حذف برق گیر از نقاط غیر ضروری شبکه توزیع از طریق مطالعه حداکثر شعاع حفاظتی

خلیل گرگانی فیروزجاه، استادیار

دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه مازندران - بابلسر - ایران - k.gorgani@umz.ac.ir

**چکیده:** گسترده‌گی و توسعه شبکه‌های توزیع شهری و نزدیکی ترانسفورماتورهای توزیع به یکدیگر، موجب تخصیص بیش از اندازه برق گیرها شده است. در حالی که خرابی و از کار افتادگی برق گیرها و تعدد آن‌ها در روال سنتی بر خاموشی ناخواسته مؤثر می‌باشد. بنابراین روال پیشنهادی در این مقاله، در پی تعدیل برق گیرها توأم با حفظ حفاظت اضافه ولتاژ شبکه خواهد بود. این هدف با جستجوی حداکثر شعاع حفاظتی حداقل برق گیرها صورت پذیرفته است. با توجه به تعداد بی‌شمار حالت‌های قابل رخداد اصابت صاعقه، از روش جستجوی فراابتکاری بهره‌گیری شده است. جستجو در پی یافتن حداکثر شعاعی است که یک برق گیر در صورت برخورد مستقیم صاعقه به خط توزیع توانایی محدودسازی اضافه ولتاژ را دارا باشد. شبیه سازی روش بر پایه ایجاد ارتباط هم‌زمان بین دو نرم‌افزار MATLAB و DIGSILENT می‌باشد. به کارگیری هم‌زمان دو نرم‌افزار، امکان تحلیل هدفمند حالت گذرای سیستم قدرت را در فضای جستجوی گسترده فراهم آورده است.

**واژه‌های کلیدی:** برق گیر، حفاظت صاعقه، شعاع حفاظتی، الگوریتم بهینه‌سازی.

## Feasibility Studies for Removing Surge Arresters from Inessential Nodes of Distribution System Through Protective Radius

Khalil Gorgani Firouzjah, Assistant Professor

Faculty of Engineering & Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran, k.gorgani@umz.ac.ir

**Abstract:** The expansion and development of urban distribution networks and application of distribution transformers close to each other lead to the excessive allocation of surge arresters. Failures rate and breakdowns of surge arresters in the traditional routine are highly effective on unwanted outages. Therefore, this paper proposes a method to reduce the number of surge arresters as well as maintaining network's overvoltage protection. This is achieved with the search maximum value of protection radius for least in-service arresters. Due to numerous states of lightning strikes occurrence, a meta-heuristic search method is applied. Search seek maximum radius in which arrester have the ability to limit overvoltage at the event of a direct stroke at the distribution line. Furthermore, an automatic data exchange between MATLAB and DIGSILENT is used. Simultaneous use of two software enables proper transients analysis of the power system in an extensive search space.

**Keywords:** Surge Arrester, Lightning Protection, Protective Radius, Optimization Algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۹ و ۱۳۹۵/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۹

نام نویسنده مسئول: خلیل گرگانی فیروزجاه

نشانی نویسنده مسئول: ایران - مازندران - بابلسر - خیابان شهید بهشتی - پردیس دانشگاه مازندران - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق.

## ۱- مقدمه

همین ارتباط با توجه به این که تشخیص عیب، پس از وقوع خرابی در برق‌گیرها از کارهای دشوار در بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع به شمار می‌رود لذا این موضوع افزایش زمان بازیابی بار در شبکه را به همراه خواهد داشت.

با نظر بر این حقیقت که برق‌گیرهای تخصیص یافته در روال سنتی به دلیل عدم پاسخ‌گویی مناسب در هنگام اضافه ولتاژ یا به‌خودی‌خود از مدار خارج می‌گردند و یا در طی فرآیند بهره‌برداری توسط بهره‌برداران شبکه به صورت موقت منفصل از شبکه می‌شوند، لذا امکان خروج طرح حفاظت اضافه ولتاژی از درجه کفایت وجود خواهد داشت. همچنین با توجه به این که، برق‌گیرها در نقاط بهینه‌ای نصب نشده‌اند، تخصیص برق‌گیرهای جدید در نقاط قبلی توجیه پذیر نخواهند بود. لذا فرآیند جایابی بهینه برق‌گیر در نقاط باقی‌مانده (بدون حضور برق‌گیر؛ نقاطی که برق‌گیر تخصیص یافته منفصل از شبکه شده است) ضرورت می‌یابد. به عبارتی، با خروج هر برق‌گیر در روال حفاظت سنتی، برق‌گیرهای جدیدی با در نظر گرفتن برق‌گیرهای پیشین در حال کار و امکان برخورد صاعقه به تمامی نقاط با اولویت یکسان در بهینه‌ترین نقطه نصب می‌گردند. معیار بهینه‌یابی برای تخصیص برق‌گیرهای جدید بر اساس پاسخ‌گویی طرح حفاظت در مقابل اضافه ولتاژهای صاعقه با حداقل تعداد برق‌گیر می‌باشد.

## ۲- سابقه موضوعی

تاکنون مطالعات مختلفی در جهت بررسی احتمال خرابی برق‌گیر، ریسک عایقی تجهیزات و عملکرد خطوط در برابر صاعقه انجام شده است. در مواردی نیز تأثیر برق‌گیر و محل استقرار آن بر عوامل فوق از نظر کمی بررسی شده است. اما مسئله جایابی بهینه برق‌گیر مورد توجه نبوده است. قطعی ناشی از صاعقه در خطوط توزیع می‌تواند به دلیل برخورد مستقیم به هادی یا برخورد به مجاورت خط باشد. اضافه ولتاژهای القایی به‌طور مفصل توسط McDermot بررسی شده‌اند [۱]. مطابق انتظار برای حذف کامل قطعی‌های ناشی از صاعقه باید در هر کدام از محل‌ها از برق‌گیر استفاده شود. ضمناً فاصله بین اسپین‌ها نیز نباید بیش‌تر از ۶۰ متر باشد. در محاسبه انرژی تخلیه شده در برق‌گیر Sakshaug از جمله اولین نفراتی است که مطالعاتی را انجام داده و انرژی ناشی از تخلیه صاعقه را بروش تحلیلی به‌دست آورده است [۲]. Ringler در مرجع [۳] با آزمایش‌های خود موج‌های مختلف جریان را به اجزاء مختلف اعمال نموده تا تخریب گردند. سپس به کمک مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ تخلیه، جریان تخلیه و زمان شکست ظرفیت جذب انرژی را برای سطوح مختلف جریان محاسبه نموده است. انرژی جذب شده برق‌گیرهای توزیع در اثر ضربات مستقیم صاعقه و تأثیر محل نصب برق‌گیر بر احتمال خرابی آن توسط Nakada نیز بررسی شده است [۴]. وی تأثیر سیم زمین بر ریسک خرابی برق‌گیر را مطالعه نموده اما جایابی برق‌گیر و اهمیت توپولوژی شبکه در اثرات صاعقه را مدنظر قرار نداده است. Montanes در مرجع [۵] جهت بهبود روش‌های

مهم‌ترین مسئله در نگهداری و توسعه شبکه‌های توزیع نیروی برق، جلوگیری از هزینه‌های بی‌بازگشت و پیش‌بینی نشده است که می‌تواند متأثر از طراحی نامناسب شبکه باشد. همچنین، بهره‌برداری بدون وقفه و تأمین انرژی شبکه با تکیه بر مفهوم قابلیت اطمینان سیستم، از اهمیت ویژه‌ای در حوزه بهره‌برداری برخوردار است. لذا مدیریت شبکه توزیع برق با توجه به دو مبحث فوق در بهره‌مندی هوشمندانه از امکانات موجود و طراحی بهینه سیستم صورت می‌پذیرد. از جمله این موارد می‌توان به تدابیر شبکه در قبال کاهش تعداد و زمان قطعی‌ها اشاره نمود. به عبارتی، قابلیت اطمینان سیستم توسط محکی همچون خاموشی متأثر از خروج تجهیزات سنجیده می‌شود. حقیقت نهفته در این قطعی‌ها، تأثیر قابل توجه پدیده شکست عایقی در تجهیزات شبکه بوده و لذا ریشه‌یابی آن نیازمند بررسی دقیق می‌باشد. این مفهوم با حفظ استقامت عایقی تجهیزات شبکه در مقابل تنش ولتاژ و توأم با حداقل احتمال شکست عایقی عملی گشته و ملاحظه نوع اضافه ولتاژ احتمالی در سیستم اهمیت می‌یابد. در دسته‌بندی پدیده اضافه ولتاژ، برخورد صاعقه به تجهیزات شبکه مهم‌ترین تهدید شبکه‌های توزیع به شمار می‌آید. در این شرایط، هماهنگی عایقی سیستم توسط عناصر محدودکننده اضافه ولتاژ با عنوان برق‌گیر تضمین خواهد شد. اگرچه این تضمین، وابسته به پارامترهایی است که مورد توجه طراحان شبکه برای اتخاذ تدابیر خاص در انتخاب برق‌گیری با قابلیت حفظ شرایط کاری شبکه در محدوده مناسب و قابل توجه از دیدگاه فنی و اقتصادی می‌گردد. موفقیت برق‌گیر در فراهم‌سازی سطح حفاظتی مناسب برای تجهیزات تحت حفاظت، به سطح انرژی قابل تحمل برق‌گیر در شرایط تخلیه انرژی صاعقه و استقامت الکتریکی آن بستگی دارد.

در این رابطه، استاندارد موجود در مبحث حفاظت شبکه‌های توزیع در برابر اضافه ولتاژها، تأکید بر نصب ۳ عدد برق‌گیر موازی در نزدیک‌ترین محل به ترانسفورماتورهای توزیع در سمت شبکه دارد. خط‌مشی فنی مبتنی بر این استاندارد اگرچه سطح بالاتری از حفاظت را مدنظر قرار داده است، اما روال سنتی شرکت‌های توزیع بدون ملاحظه شرایط محیطی و اقتصادی اقدام به نصب برق‌گیرها در شبکه می‌نمایند. در صورتی که ملاحظه تأثیر شرایط محیطی، منحنی ایزوکرونیک منطقه و تجربه‌های عملی بهره‌بردار از حوادث متأثر از عملکرد ناقص برق‌گیرها نکاتی حائز اهمیت در طراحی با سطح حفاظت و هزینه توجیه‌پذیر خواهند بود.

در کنار توجیه اقتصادی طرح حفاظت توسط برق‌گیر، مسئله قابلیت اطمینان شبکه نیز در گرو تعداد برق‌گیرهای نصب شده می‌باشد. این مسئله با تکیه بر تعدد پست‌های هوایی در شبکه‌های توزیع و افزایش برق‌گیرها مورد استفاده و ملاحظه از کارافتادگی آن‌ها مقوله‌ای مهم در ارتقاء شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع بوده و موجب متأثر نمودن شاخص‌های عملکردی شبکه‌های توزیع (مدت‌زمان خاموشی به‌ازای هر مشترک، نرخ انرژی توزیع‌نشده و ...) می‌شود. در

شامل ۱۰۵۹ تیر برق بتونی مقاوم با طول اسپن ۷۵ متر می باشد. روش ارائه شده در این مرجع، روشی جامع بوده و برای سیستم‌های با بارهای متغیر کاربردی است. باین وجود به دلیل تغییرات کم بارها در این مطالعه، بار سیستم به صورت یک مقدار متوسط مدل سازی شده است. در مرجع [۱۶] تحلیل قابلیت اطمینان اثر مکان برق گیر در پست‌های فشارقوی ارائه شده است. هدف این مقاله، نمایش ضرورت حضور برق گیرها و ارزیابی اثر خرابی‌شان در طول شرایط کار عادی و اضافه ولتاژها در حالات مختلف مکان برق گیر و موقعیت موج صاعقه از نظر شبیه‌سازی EMTD و تکنیک قابلیت اطمینان می باشد. شبکه مورد مطالعه، پست ۲۳۰/۶۳ kV دهک در نکا (ایران) می باشد.

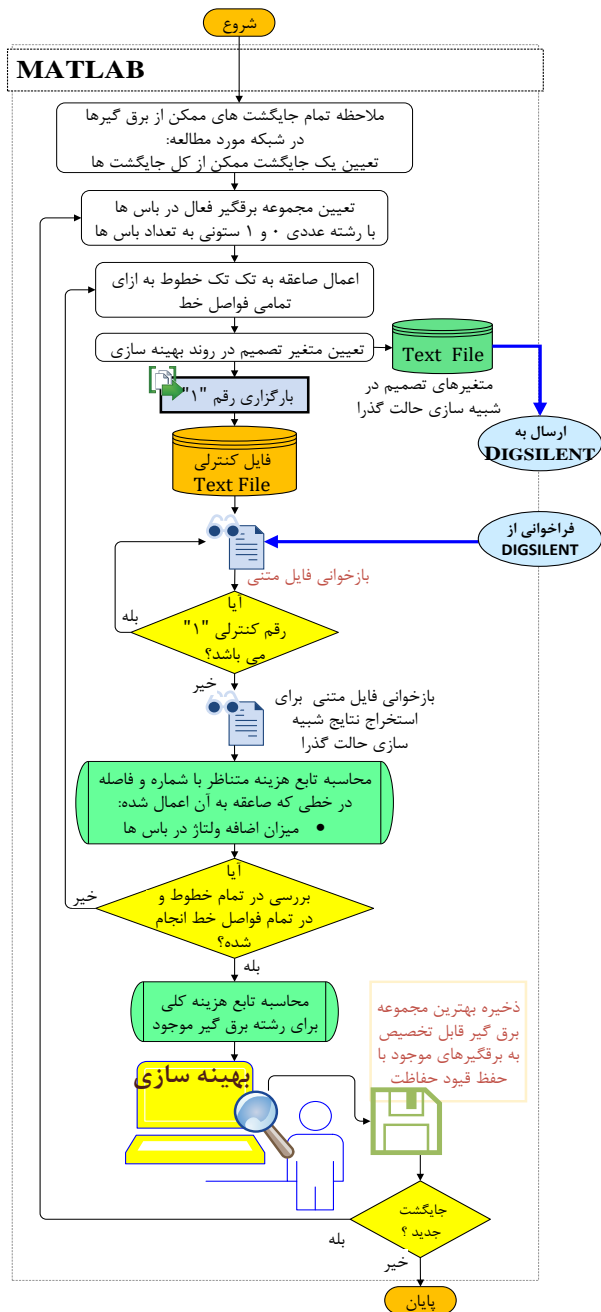
نهایتاً آنچه به عنوان حاصل مطالعات و بررسی منابع قابل ذکر است، عدم بررسی شعاع حفاظتی برق گیر در توپولوژی‌های مختلف شبکه توزیع می باشد. نکته حائز اهمیت، حالت‌های بی شمار قابل ملاحظه در یک شبکه توزیع شعاعی با شاخه‌های متعدد و در نتیجه و سعت دامنه مطالعات در برخورد صاعقه خواهد بود. این که در تنوع شبکه توزیع از دیدگاه فواصل نصب ترانسفورماتورها، بتوان حالت‌های بحرانی را برای ارزیابی شعاع حفاظتی برق گیرها انتخاب نموده و تحلیل مناسب را به انجام رساند در ادامه مقاله بحث می گردد.

### ۳- تئوری حل مسئله

تکنیک پیشنهادی بر پایه تخصیص برق گیرهای جدید به محل‌های معیوب با نگاه بهینه می باشد. این روال بدون تحمیل روندهای تجدید ساختار گرایانه و تنها با نظر به موجودیت‌های شبکه و منابع مالی در دسترس جستجوی بهینه تخصیص حداقل برق گیرهای لازم را پیشنهاد می دهد. در این راستا، بررسی وضعیت شبکه فعلی توزیع نیروی برق در حضور برق گیرهای موجود ضروری خواهد بود. نخستین گام با جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز شروع می گردد. این اطلاعات شامل دیاگرام شبکه مورد مطالعه، مشخصات مقاومتی و اندوکتانسی خطوط، مقاومت زمین اتصالات زمین، بار پایه شبکه و برق گیرهای موجود در شبکه می باشد. بر اساس اطلاعات به دست آمده، شبکه مورد مطالعه در نرم افزار DIGSILENT پیاده سازی خواهد شد. در جهت مدل سازی صاعقه در شبکه، تحلیل‌ها با حضور منابع جریان با امکان برخورد به تمامی نقاط و ملاحظه شدیدترین نوع صاعقه قابل برخورد در شبکه توزیع صورت می پذیرد. بر اساس سناریوهای ممکن از برق گیرها در شبکه و با حضور منبع جریان که بیانگر مدل صاعقه خواهد بود، برنامه حالت گذر در شبکه اجرا شده و نتایج آن مشتمل بر اضافه ولتاژ نقاط مختلف شبکه و جریان تخلیه برق گیرهای موجود در اختیار قرار خواهد گرفت. بر اساس نتایج برنامه حالت گذر، موفقیت طرح حفاظت اضافه ولتاژی با برق گیرهای موجود ارزیابی می گردد. آنچه وجه تمایز این تحقیق را با موارد مشابه در تحقیقات علمی و نمونه‌های صنعتی بیان می دارد، قابلیت ارزیابی شبکه موجود با ساختار حفاظتی و توپولوژی از برق گیرهای قابل بهره برداری در شبکه خواهد بود. مزیت این تکنیک در

انتخاب متداول برق گیرهای فشارقوی روشی را بر پایه محاسبه ریسک خرابی برق گیر ارائه و بیان داشته که لزوماً انتخاب ظرفیت نامی بالاتر منجر به نتایج بهتری نخواهد بود. یکی از آخرین مطالعات برای محاسبه نرخ خرابی برق گیر توسط Savic انجام شده که احتمال خرابی را بررسی کرده است [۶]. Zanetta نیز روشی را برای محاسبه احتمال خرابی برق گیرها ارائه نموده که در آن ضربات متعدد فلش صاعقه در نظر گرفته می شود [۷]. نتایج وی نشان می دهد که می توان برای حفاظت فازهای مختلف در یک خط انتقال، از برق گیر با کلاس‌های مختلف استفاده کرد. در بررسی‌های Montanes, Savic و Zanetta اساساً مسئله جایابی برق گیرها مورد توجه نبوده و تنها بهبود روش‌های انتخاب برق گیر مورد توجه می باشد. اما Loudon برای بررسی عملکرد خط انتقال در برابر صاعقه و تأثیر محل نصب برق گیر بر آن یک خط ۴۰۰ kV را مورد مطالعه قرار داد [۸]. نتایج بررسی نشان می دهد که تغییر محل برق گیر می تواند تأثیر متفاوتی در تعداد قطعی خط داشته باشد و این نکته اهمیت جایابی برق گیر را بیش تر نمایان می کند. Tarasiewicz عملکرد خط انتقال را مطالعه کرده و با استفاده از یک روش بهینه سازی بهترین استراتژی حفاظت برای کاهش تعداد قطعی‌های خط را به دست آورده است [۹]. وی همچنین روش جدیدی را جهت محاسبه احتمال خرابی برق گیر معرفی نموده است. در کاهش تعداد قطعی به احتمال خرابی خود برق گیر توجه نشده است؛ در حالی که استقرار برق گیر در یک نقطه می تواند از نظر ریسک عایقی و کاهش قطعی مناسب باشد، اما با توجه به ظرفیت جذب نامی و تنش انرژی وارده ممکن است احتمال خرابی برق گیر افزایش یابد که خود می تواند منجر به قطعی خط و تحمیل هزینه‌های ناشی از آن گردد.

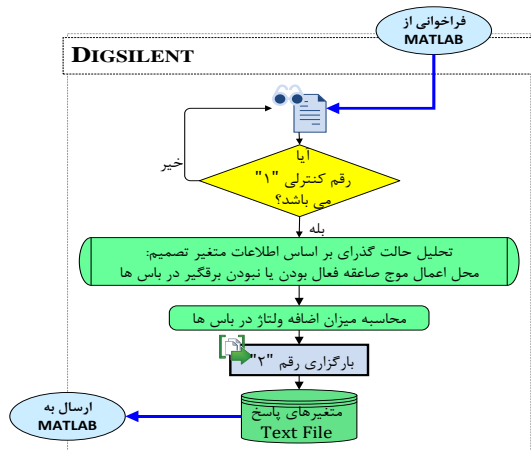
جدیدترین بررسی صورت گرفته برای جایابی برق گیرهای توزیع توسط Bogarra انجام شده است [۱۰-۱۲]. وی نتایج خود را در قالب روشی برای جایابی بهینه برق گیرها با توجه به مقدار ریسک مشخص ارائه داده است که هدف از آن پیدا کردن محل بهینه برق گیرهای توزیع در برابر اضافه ولتاژهای صاعقه با کمک تکنیک‌های ریاضی است. با مرور مطالعاتی که تاکنون برای محاسبه ریسک عایقی شبکه، ریسک خرابی برق گیر و در زمینه جایابی برق گیر انجام گرفته می توان تحقیقات انجام شده توسط Shariatinasab را با قابلیت حذف نقاط ضعف مقالات فوق معرفی نمود [۱۳ و ۱۴]. در مرجع [۱۵] یک راه حل مقرون به صرفه برای حفاظت شبکه توزیع در برابر امواج صاعقه با نصب انتخابی برق گیر ارائه شده است. این روش از الگوریتم رقابت امپریالیستی گسسته استفاده نموده و هر دو معیار اقتصادی و فنی را در نظر می گیرد. از این رو کل هزینه سالانه شامل هزینه سرمایه گذاری خط، تعمیر و نگهداری و قطع با در نظر گرفتن هزینه دستگاه‌های محافظ کاهش می یابند. هدف روش ارائه شده جستجوی مکان بهینه از هر تعداد مشخصی از برق گیرهاست به طوری که نرخ تخلیه صاعقه و ریسک سراسری شبکه به حداقل برسد. روش ارائه شده برای شبکه محلی ۲۰ kV شیروان در شمال شرق ایران اعمال می شود. این شبکه



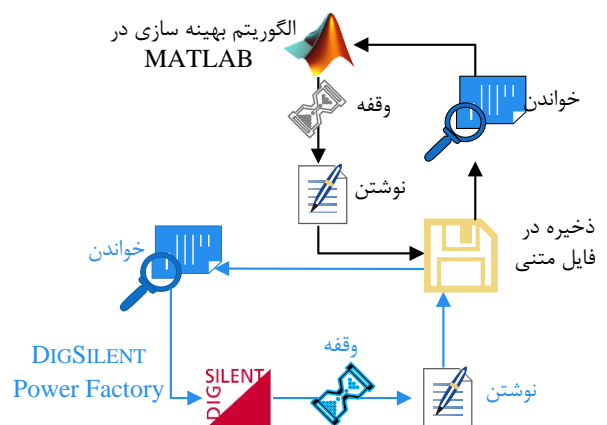
پیشنهاد طرحی با قابلیت بهره‌مندی از امکانات موجود و جانمایی حداقل تجهیزات جدید به گونه‌ای کارآمد در شبکه فعلی خواهد بود. این در حالی است که تابع هدف مورداستفاده در فرآیند بهینه‌سازی در میان طرح‌های قابل اجرا، حداقل‌سازی برق‌گیرهای مورد استفاده با ملاحظه قید موفقیت حفاظت اضافه ولتاژی شبکه در معرض برخورد صاعقه با امکان برخورد یکسان به همه نقاط می‌باشد.

بنابراین، پس از پیاده‌سازی شبکه، تمامی حالات از هر تعداد از برق‌گیرهای سالم در شبکه با تمامی جایگشت‌های ممکن در فرآیند شبیه‌سازی با ملاحظه موج صاعقه در تمامی نقاط شبکه با هدف جستجوی بدترین مورد بررسی می‌گردند. تصمیم‌گیری بهینه در پیشنهاد طرح مناسب، توسط الگوریتم بهینه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB صورت می‌پذیرد.

شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر پایه ایجاد ارتباط هم‌زمان بین دو نرم‌افزار MATLAB و DIGSILENT استوار شده است. دلیل به‌کارگیری هم‌زمان دو نرم‌افزار فوق در پیاده‌سازی روش پیشنهادی، توانایی نرم‌افزار DIGSILENT در تحلیل حالت گذرای سیستم قدرت و توانایی نرم‌افزار MATLAB در محیط مناسب کدنویسی برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌باشد. تبادل اطلاعات بین دو نرم‌افزار مطابق روند ارائه شده در شکل ۱ می‌باشد. بنای این ارتباط بر فرآیند خواندن و نوشتن یک فایل متنی استوار شده است. در این ارتباط دوطرفه وظیفه هر یک از نرم‌افزارها به شرح شکل ۱۲ است. در شروع فرآیند، نرم‌افزار MATLAB مجموعه برق‌گیرهای موجود را با صفر و یک نمودن هر یک از مؤلفه‌های متناظر در یک فایل متنی ستونی تعیین می‌نماید. سپس در ادامه محل وقوع صاعقه را نیز در فایل متنی ذخیره می‌نماید. این امر با فعال‌سازی صاعقه در تک تک خطوط و در فاصله قابل تغییر در طول هر خط صورت می‌پذیرد. البته لازم به‌ذکر است که به‌ازای یک مجموعه برق‌گیر، تمامی حالت‌های ممکن از برخورد صاعقه مدل مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. در نهایت به‌ازای یک مجموعه برق‌گیر که می‌تواند یکی از حالت‌های قابل رخداد برای شبکه واقعی باشد، بهینه‌ترین پیشنهاد برای تخصیص برق‌گیرهای جدید برای حفظ شرایط حفاظت اضافه ولتاژی در دسترس خواهد بود.



شکل ۲: الگوریتم ارتباط نرم‌افزاری



شکل ۱: ارتباط هم‌زمان بین دو نرم‌افزار MATLAB و DIGSILENT

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

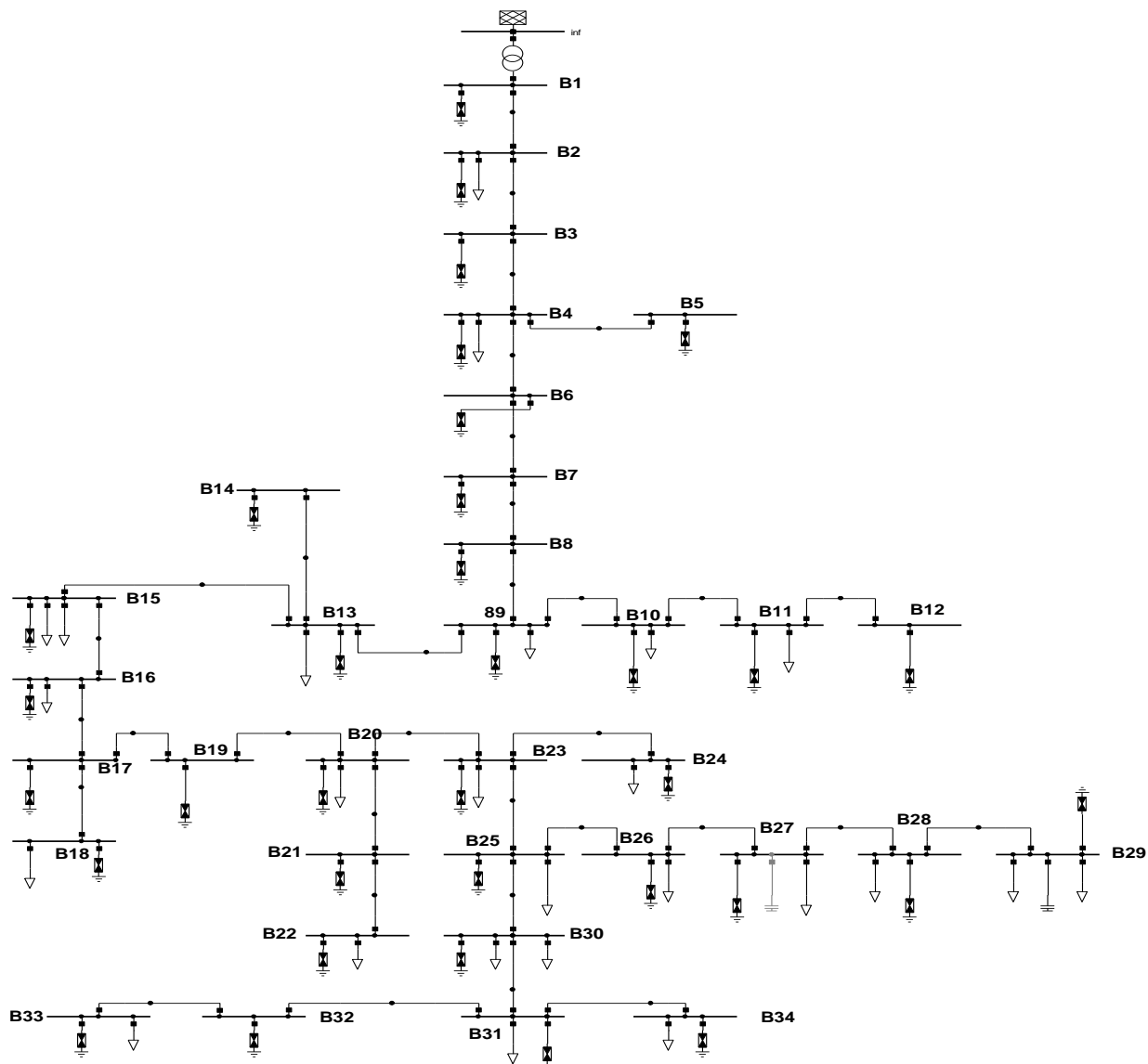
این قسمت به ارائه نتایج شبیه‌سازی الگوریتم‌های پیشنهادی، در شبکه توزیع ۳۴ باسه IEEE شکل ۳ اختصاص دارد. ترتیب ارائه مطالب به صورت ذیل خواهد بود. در بخش اول، مدل سازی اجزاء مورد نیاز در شبیه‌سازی تشریح می‌گردند. در بخش دوم شبیه‌سازی و برآورد حداکثر شعاع حفاظتی برق‌گیر بر اساس سه نوع باس انتهایی، میانی و از شعاعی صورت پذیرفته است. در این راستا، شعاع حفاظتی برق‌گیر، مطابق حداکثر فاصله‌ای که ضربه صاعقه مجال جاری شدن در خط را تا رسیدن به دورترین برق‌گیر مجاور می‌یابد تعریف می‌گردد. این فاصله در باس انتهایی برابر  $X_1$  می‌باشد. با حذف برق‌گیر باس میانی و این که ضربه مستقیم صاعقه در محلی نزدیک به یکی از برق‌گیرهای مجاور اصابت و ضربه سیر دوسویه بگیرد، این فاصله  $X_1+X_2$  خواهد بود. به عبارتی، شعاع حفاظت برق‌گیر برابر مجموع طول خطوط متصل به باس میانی خواهد بود. این درحالی‌است که با حذف برق‌گیر در باس با اتصال سه خط، جریان صاعقه در سه مسیر جاری می‌گردد. در

نامساعدترین شرایط، بیش‌ترین طول طی‌شده جریان صاعقه برابر با:  $\max(\{X_1+X_2\}, \{X_2+X_3\}, \{X_3+X_1\})$  می‌باشد. درنهایت، جستجو در پی یافتن حداقل فاصله‌ای است که ضربه مستقیم صاعقه در مسیر خطوط تا رسیدن به دورترین برق‌گیرها طی می‌نماید. این بخش با مطالعات و شبیه‌سازی‌های اولیه در بررسی تأثیر وقوع صاعقه در فواصل مختلف خطوط با حضور و بدون حضور برق‌گیر آغاز شده و درنهایت با بهینه‌یابی شعاع حفاظتی برق‌گیر خاتمه می‌یابد.

#### ۴-۱- مدل‌سازی شبکه توزیع در محیط DIGSILENT

##### ۴-۱-۱- پیاده‌سازی شبکه ۳۴ باس

نمودار تک‌خطی شبکه ۳۴ باسه شعاعی در نرم‌افزار DIGSILENT در شکل ۳ ارائه شده است. در هر خط یک منبع جریان به‌صورت آماده‌بکار لحاظ شده تا در صورت لزوم کلیدزنی شده و بدین‌صورت مدل ساز برخورد صاعقه باشد. همچنین در هر باس یک عدد برق‌گیر با کلیدی تخصیص یافته تا در صورت تعیین رشته تصمیم وارد مدار گردد.



شکل ۳: شبکه ۳۴ باس مدل‌سازی شده در نرم‌افزار DIGSILENT

#### ۴-۱-۲- مدل‌سازی خط توزیع هوایی

بخش اعظمی از طول شبکه‌های توزیع فشار متوسط و فشار ضعیف را راه‌های نوع ASCR به خود اختصاص می‌دهند. از این‌رو در این مقاله نیز هادی خطوط هوایی بر اساس نوع ASCR بوده و در مدل خط، نوع هادی توپر انتخاب و اثر پوستی نیز لحاظ شده است.

#### ۴-۱-۳- مدل‌سازی برق‌گیر

مدل‌سازی برق‌گیر در محیط DIGSILENT از طریق تعریف جزعی با مشخصه ولتاژ-جریان شدیداً غیرخطی صورت می‌پذیرد. این مشخصه بیان می‌دارد که جزء برق‌گیر در شرایط عادی دارای مقاومت بالا بوده و جریان عبوری از آن ناچیز خواهد بود. در حالی که این مشخصه، رفتاری با مقاومت بسیار کوچکی را برای برق‌گیر در شرایط غیر عادی سیستم؛ زمانی که سیستم نیازمند عملکرد برق‌گیر است؛ مقادیر مشخصه ولتاژ-جریان برق‌گیر کلاس توزیع مطابق جدول ۱ مدل‌سازی شده است.

#### ۴-۱-۴- مدل ضربه صاعقه

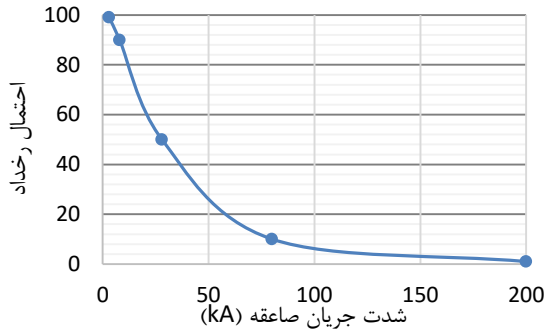
جریان صاعقه ترکیبی از ضربات کوتاه مدت با زمان کم‌تر از ۲ ms و بلندمدت با زمان بیش از ۲ ms است. مطابق استاندارد BS 6651، پیک جریان بازگشتی صاعقه در محدوده ۲ تا ۲۰۰ کیلو آمپر قرار دارد که در این میان مقادیر کم‌تر، احتمال وقوع بالایی را به خود اختصاص می‌دهند. به طوری که در شکل ۴ احتمال وقوع جریان‌های صاعقه با اندازه‌های مختلف ارائه شده است. هر چه مقدار جریان بالاتر می‌رود، احتمال رخداد کاهش می‌یابد. در شبیه‌سازی صاعقه به صورت یک منبع جریان موازی با خط در محل اتصال مدل‌سازی می‌گردد. در شکل موج ضربه صاعقه استاندارد، زمان رسیدن به اوج برابر با ۸ μs و زمان رسیدن به نصف مقدار برابر با ۲۰ μs است. شکل موج جریان صاعقه با دامنه جریان ۱۰ kA به صورت شکل ۵ مدل‌سازی شده است.

#### ۴-۲- شبیه‌سازی و برآورد حداکثر شعاع حفاظتی برق‌گیر

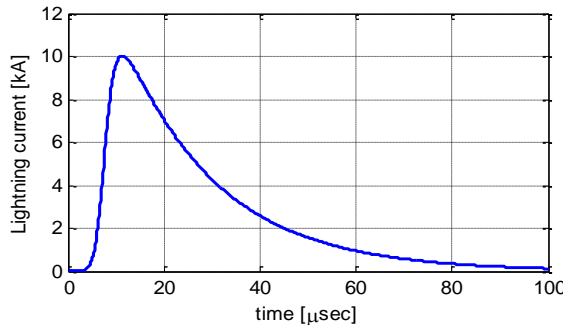
به منظور بررسی شعاع قابل امن برق‌گیرها، نیاز به مدل‌سازی حالت‌های متنوعی خواهد بود. در این راستا، در جدول ۲ حالت‌های مختلف و تصادفی (۱۰ حالت) به منظور ارزیابی اولیه تأثیر طول خطوط بر اضافه ولتاژ ناشی از برخورد صاعقه به شبکه ارائه شده است. به ازای هر حالت، شبیه‌سازی مستقلی اجرا می‌گردد. در هر مرتبه از اجرا، یک موج صاعقه نقاط مختلف شبکه یعنی تمام خطوط و در تمام فواصل اعمال می‌گردد. این موج جریانی مطابق با شکل موج ۸/۲۰ استاندارد با بیشینه ۱۰ kA است.

جدول ۱: مقادیر مشخصه ولتاژ-جریان برق‌گیر کلاس توزیع

ولتاژ (kV) جریان (A)	ولتاژ (kV) جریان (A)	ولتاژ (kV) جریان (A)	ولتاژ (kV) جریان (A)
۶۹	۳۳۰۰	۵۰	۱۱
۷۲	۵۵۰۰	۵۶	۱۳۸
۷۷	۱۱۰۰۰	۵۸	۲۷۵
۸۵	۲۲۰۰۰	۶۰	۵۵۰
۹۵	۴۴۰۰۰	۶۳	۱۱۰۰
۱۱۹	۱۱۰۰۰۰	۶۵	۱۶۵۰



شکل ۴: احتمال رخداد صاعقه نسبت به شدت جریان موج صاعقه



شکل ۵: موج جریان صاعقه [استاندارد IEC 61000-4-5]

جدول ۲: حالت‌های تصادفی از طول خطوط بر حسب متر

میدان	حالت										
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	
۱	۲	۴۲۶	۴۷۴	۴۱۷	۱۹۳	۴۳۰	۶۷۹	۳۶۵	۶۲	۱۵۱	۱۰۵
۲	۳	۳۱۳	۱۵۳	۸۴۲	۱۳۹	۸۸۸	۴۹۶	۴۴۶	۲۴۶	۱۴۸	۴۵۲
۳	۴	۱۶۲	۳۴۲	۸۳۳	۶۹۷	۳۹۲	۱۹۰	۴۹۲	۴۲۷	۱۶۷	۳۳۸
۴	۵	۱۷۹	۶۰۸	۲۵۷	۹۴	۷۷۰	۴۹۶	۳۸۵	۴۳۷	۲۳۴	۲۳۵
۴	۶	۴۲۳	۱۹۲	۶۱۴	۵۲۶	۳۹۷	۱۴۸	۲۹۱	۱۳۶	۳۲۵	۴۵۷
۶	۷	۹۵	۷۳۹	۵۸۳	۵۳۱	۸۰۹	۵۵	۴۶۵	۱۰۵	۱۳	۵۳
۷	۸	۵۹۹	۲۴۳	۵۴۱	۸۶۲	۷۵۶	۸۵۱	۲۹۱	۲۸۳	۴۲۲	۳۷۳
۸	۹	۴۷۱	۹۱۸	۸۷۰	۴۸۵	۳۷۸	۵۶۱	۹	۳۲۱	۲۸۰	۳۶۹
۹	۱۰	۶۹۶	۲۷۰	۲۶۵	۳۹۴	۲۱۷	۹۳۰	۶۱	۲۰۹	۴۲۸	۲۸۱
۱۰	۱۱	۷۰۰	۷۶۶	۳۱۹	۶۷۲	۷۹۱	۶۹۷	۴۳۲	۱۰۳	۱۷۴	۹۳
۱۱	۱۲	۳۲۹	۱۸۹	۱۲۰	۷۴۲	۹۵۰	۵۸۳	۲۴۳	۴۷۴	۲۲۴	۲۹۹
۹	۱۳	۳۴	۲۸۸	۹۴	۵۲۱	۳۲۸	۸۱۶	۴۳۲	۴۲	۲۸	۱۵۰
۱۳	۱۴	۶۹	۹۲	۶۴۶	۳۴۸	۶۷۲	۸۸۰	۱۰۵	۵۳	۸۹	۶۸
۱۳	۱۵	۳۲۰	۵۷۷	۴۸۰	۱۵۰	۴۲۹	۹۸۹	۲۷۷	۷۲	۳۳۲	۱۰۷
۱۵	۱۶	۵۳۱	۶۸۴	۶۴۰	۵۸۷	۸۳۴	۱	۳۱۵	۸۴	۱۶۶	۴۴۸
۱۶	۱۷	۶۵۵	۵۴۷	۶۴۰	۲۶۳	۷۶۹	۸۶۶	۱۶	۳۱۱	۴۵۰	۳۶
۱۷	۱۸	۴۰۸	۴۲۶	۶۴۸	۴۵	۱۶۸	۶۱۳	۳۰۸	۲۸۷	۶۰	۱۲۲
۱۷	۱۹	۸۲۰	۶۴۵	۵۴۴	۷۵۵	۸۶۲	۹۹۰	۱۸۲	۲۷	۴۹۵	۲۷
۱۹	۲۰	۷۱۹	۶۴۸	۷۲۲	۲۴۳	۹۹۰	۵۲۸	۲۵	۴۶۶	۲۷۰	۲۲۱
۲۰	۲۱	۵۱۸	۳۵۱	۹۳۳	۱۹۸	۱۱۲	۶۲۶	۲۶۸	۱۶	۱۶۸	۲۴
۲۱	۲۲	۴۵۸	۶۶۳	۹۷۳	۸۲۲	۱۳۷	۶۶۱	۲۲۳	۴۷۰	۸۸	۲۵۳
۲۰	۲۳	۹۶۹	۶۸۰	۵۲۳	۴۴۳	۵۱۵	۴۸۰	۲۴۵	۳۶۵	۳۵۴	۷
۲۳	۲۴	۵۲۲	۶۳۶	۹۹۴	۶۸۸	۸۸۵	۸۰۲	۹۷	۳۶۹	۵۰۰	۴۴۹
۲۳	۲۵	۳۲۶	۹۴۶	۲۱۹	۳۶۰	۵۸۹	۲۲۸	۶۲	۳۲	۱۴۴	۹۹
۲۵	۲۶	۱۰۶	۲۰۹	۱۰۶	۷۳۷	۱۵۵	۴۹۹	۱۰۳	۴۳۱	۲۰۸	۴۷
۲۶	۲۷	۶۱۱	۷۱۰	۱۱۰	۳۹۵	۲۰۰	۹۰۱	۷۴	۴۶۸	۲۳۳	۱۵۴
۲۷	۲۸	۷۷۹	۲۳۷	۶۴	۶۸۴	۴۰۷	۵۷۵	۹۵	۴۹۳	۳۸۲	۲۲۹
۲۸	۲۹	۴۲۴	۱۲۰	۴۰۵	۷۰۵	۷۴۹	۸۴۶	۲۲	۴۳۰	۴۱۰	۵۱
۲۵	۳۰	۹۱	۶۰۸	۴۴۹	۴۴۳	۸۲۶	۷۳۹	۳۱۸	۳۹۳	۵۱	۴۹۸
۳۰	۳۱	۲۶۷	۴۵۱	۳۶۶	۲۰	۷۹۰	۵۸۶	۱۴۱	۲۵۷	۹۰	۱۶۷
۳۱	۳۲	۲۸۲	۶۶۲	۶۲۸	۴۲۵	۵۳۵	۶۶۷	۳۴۸	۲۰۰	۲۹	۳۲
۳۲	۳۳	۴۴۱	۷۷۱	۷۷۲	۲۷۱	۹۰	۸۴	۲۵۰	۶۷	۲۶۱	۱۵۰
۳۱	۳۴	۱۵۴	۴۵۹	۷۶۴	۳۳۱	۳۱۹	۲۴۷	۲۷۰	۸۹	۱۸۰	۱۴۹

در هر اجرا، به ازای حذف تک‌تک برق‌گیرها این تحلیل صورت پذیرفته (اعمال موج صاعقه در تمام خطوط و فواصل) و به ازای بدترین شرایط به وجود آمده، بیش‌ترین مقدار اضافه ولتاژ، متناسب با برق‌گیر حذف‌شده و حالت مربوطه ثبت می‌گردد. جدول ۳ نتایج را به ازای حالت دهم و حذف برق‌گیرها و بررسی وقوع صاعقه را نشان می‌دهد.

۲۸	۲۷	۲۲۹	۲۸	۵۱	۲۹	۷۲.۶۷	۲۸۰
۲۹	۲۸	۵۱	۲۹			۹۱.۰۳	۵۱
۳۰	۲۵	۴۹۸	۳۰	۱۶۷	۳۱	۲۲۶.۰۷	۶۶۵
۳۱	۳۰	۱۶۷	۳۱	۱۴۹	۳۴	۸۷.۸۹	۳۱۶
				۳۲	۳۲		
۳۲	۳۱	۳۲	۳۲	۱۵۰	۳۳	۹۱.۴۹	۱۸۲
۳۳	۳۲	۱۵۰	۳۳			۲۱۰.۵۹	۱۵۰
۳۴	۳۱	۱۴۹	۳۴			۲۰۶.۹۱	۱۴۹

فرض وقوع اضافه ولتاژ، مقادیر بزرگ‌تر از ۹۵ kV است. علت انتخاب این مقدار، ملاحظه BIL شبکه توزیع (۱۲۵ kV) و رعایت سطح اطمینان ۸۰٪ (۱۰۰ kV) ملاحظه حاشیه ۵٪ فرسودگی عایقی می‌باشد. در جدول ۳، سطرهای سبز شرایطی را نشان می‌دهد که با حذف برق‌گیر در باس متناظر با سطر بیش‌ترین مقدار اضافه ولتاژ در بدترین شرایط از اعمال موج جریان ۱۰ kA صاعقه به تمام خطوط و تمامی فواصل کم‌تر از مقدار ۹۵ kV باشد. مابقی سطرها نیز شرایطی را نشان می‌دهد که با حذف برق‌گیر در باس متناظر با سطر بیش‌ترین مقدار اضافه ولتاژ در بدترین شرایط از اعمال موج جریان ۱۰ kA صاعقه به تمام خطوط و تمامی فواصل بیش‌تر از مقدار ۹۵ kV باشد. در آخرین ستون از جدول ۳، حداکثر فاصله دو برق‌گیر موجود ارائه شده است. به‌منظور برآورد این فاصله لزوم تعریف دو پارامتر ضروری خواهد بود. اولین پارامتر، حداکثر فاصله در باس‌های بدون اضافه ولتاژ و دومین پارامتر، حداقل فاصله در باس‌های با اضافه ولتاژ است. حداکثر فاصله در باس‌های بدون اضافه ولتاژ به معنی حداکثر فاصله باس با برق‌گیر با دیگر باس‌ها در حالتی است که در تمام شرایط ممکن از وقوع صاعقه در تمام خطوط اضافه ولتاژی رخ ندهد. حداقل فاصله در باس‌های با اضافه ولتاژ به معنی حداقل فاصله باس با برق‌گیر حذف‌شده (نوع انتهایی، میانی و انشعایی) با دیگر باس‌ها در حالتی است که در (حداقل) یکی از شرایط ممکن از وقوع صاعقه در تمام خطوط اضافه ولتاژی رخ دهد. مفهوم حداقلی در بین باس‌های با نوع مشابه صورت می‌پذیرد. محاسبه این نتایج به‌عنوان نمونه در جدول ۴ ارائه شده است. به‌عنوان مثال در حذف برق‌گیر باس انتهایی حداکثر فاصله ۹۸ و حداقل فاصله ۷ متر است. برای استخراج مقدار ۹۸ متر، اضافه ولتاژ باس‌های انتهایی بررسی می‌گردد.

جدول ۴: حداقل و حداکثر فاصله با حذف برق‌گیر در باس‌ها (حالت ۱۰)

	حداکثر طول خط (متر)			حداقل طول خط (متر)		
	نتایج مقایسه →	۷۹۱	۴۴۹	۷۹۵	۱۸۲	۵۱
	نوع باس:					
	انشعایی	انتهایی	میانی	انشعایی	انتهایی	میانی
۱		۱۰۵			۱۰۵	
۲	۵۵۸				۵۵۸	
۳	۷۹۱				۷۹۱	
۴			۷۹۵			۷۹۵
۵		۲۳۵			۲۳۵	
۶		۵۱۰			۵۱۰	

جدول ۳: اضافه ولتاژ باس‌ها با حذف برق‌گیرها در شبکه (حالت ۱۰)

برق‌گیر حذف‌شده	شماتیک اتصالات باس	بیش‌ترین ولتاژ در تمام باس‌ها (kV)	حداکثر فاصله دو برق‌گیر (m)
۱	۱ ۱۰۵ ۲	۱۶۷.۰۲	۱۰۵
۲	۱ ۱۰۵ ۲ ۴۵۳ ۳	۱۵۷.۲۳	۵۵۸
۳	۲ ۴۵۳ ۳ ۳۳۸ ۴	۲۴۴.۸۱	۷۹۱
۴	۳ ۳۳۸ ۴ ۴۵۷ ۶ ۲۳۵ ۵	۲۱۸.۹۸	۷۹۵
۵	۴ ۲۳۵ ۵	۳۲۲.۴۲	۲۳۵
۶	۴ ۴۵۷ ۶ ۵۳ ۷	۱۱۴.۹۷	۵۱۰
۷	۶ ۵۳ ۷ ۳۷۳ ۸	۱۱۱.۱۷	۴۲۶
۸	۷ ۳۷۳ ۸ ۳۶۹ ۹	۳۱۸.۶۹	۷۴۲
۹	۸ ۳۶۹ ۹ ۲۸۱ ۱۰ ۱۵۰ ۱۳	۱۵۸.۸۶	۶۵۰
۱۰	۹ ۲۸۱ ۱۰ ۹۳ ۱۱	۱۲۷.۷۵	۳۷۴
۱۱	۱۰ ۹۳ ۱۱ ۲۹۹ ۱۲	۱۳۱.۲۲	۳۹۲
۱۲	۱۱ ۲۹۹ ۱۲	۴۲۰.۵۱	۲۹۹
۱۳	۹ ۱۵۰ ۱۳ ۶۸ ۱۴ ۱۰۷ ۱۵	۹۲.۵۳	۲۵۷
۱۴	۱۳ ۶۸ ۱۴	۱۲۵.۶۲	۶۸
۱۵	۱۳ ۱۰۷ ۱۵ ۴۴۸ ۱۶	۱۷۰.۱۶	۵۵۵
۱۶	۱۵ ۴۴۸ ۱۶ ۳۶ ۱۷	۹۷.۵۳	۴۸۴
۱۷	۱۶ ۳۶ ۱۷ ۲۷ ۱۹ ۱۲۲ ۱۸	۷۴.۷۳	۱۵۸
۱۸	۱۷ ۱۲۲ ۱۸	۱۷۸.۵۳	۱۲۲
۱۹	۱۷ ۲۷ ۱۹ ۲۲۱ ۲۰	۸۵.۸۶	۲۴۸
۲۰	۱۹ ۲۲۱ ۲۰ ۷ ۲۳ ۲۴ ۲۱	۶۷.۵۱	۲۴۵
۲۱	۲۰ ۲۴ ۲۱ ۲۵۳ ۲۲	۸۱.۸۷	۲۷۷
۲۲	۲۱ ۲۵۳ ۲۲	۳۵۵.۳	۲۵۳
۲۳	۲۰ ۷ ۲۳ ۴۴۹ ۲۴ ۹۹ ۲۵	۶۹.۳۳	۵۴۸
۲۴	۲۳ ۴۴۹ ۲۴	۶۸۲.۱	۴۴۹
۲۵	۲۳ ۹۹ ۲۵ ۴۷ ۲۶ ۴۹۸ ۳۰	۹۴.۷۹	۵۹۷
۲۶	۲۵ ۴۷ ۲۶ ۱۵۴ ۲۷	۸۶.۱۵	۲۰۱
۲۷	۲۶ ۱۵۴ ۲۷ ۲۲۹ ۲۸	۹۳.۷۸	۳۸۳

۶۸۶	۶۸۶	۱۸۶۹	۶۸۶	*	انشعابی
۸۴	۸۴	۸۸۰	۸۴	*	انتهایی
۴۵۹	۱۱۷	۹۳۸	۴۵۹	۳۳۱	میانی
۶۱۸	۳۴۲	۸۷۷	۶۱۸	۵۱۳	انشعابی
۹۷	۲۲	۳۸۵	۹۷	۲۲	انتهایی
۱۵۶	۱۵۶	۹۶۱	۱۵۶	۴۹۳	میانی
۴۵۷	۱۲۵	۸۶۴	۴۵۷	۸۳۱	انشعابی
۵۳	۵۳	۴۷۴	۵۳	*	انتهایی
۲۵۶	۱۴۱	۷۹۲	۲۵۶	۴۳۵	میانی
۵۵۹	۲۷۰	۹۴۵	۵۵۹	۴۲۱	انشعابی
۶۰	۶۰	۵۰۰	۶۰	*	انتهایی
۳۷۴	۱۸۲	۷۹۱	۳۷۴	۳۸۳	میانی
۶۵۰	۱۵۸	۷۹۵	۶۵۰	۵۹۷	انشعابی
۶۸	۵۱	۴۴۹	۶۸	۵۱	انتهایی
نوع باس:		حداکثر فاصله قابل اعتماد			
میانی		۱۵۶			
انشعابی		۵۹			
انتهایی		۴۵			

x به معنی عدم وجود باس نوعی بدون اضافه ولتاژ است

نتیجه ۱۰ حالت برای باس انتهایی، میانی و انشعابی به ترتیب ۴۵، ۱۵۶ و ۵۹ متر است. به عبارت دیگر:

- برق‌گیر در باس انتهایی، اگر فاصله آن تا برق‌گیر مجاور بیش‌تر از ۴۵ متر باشد، قابل حذف نیست.
- برق‌گیر در باس میانی، اگر فاصله دو برق‌گیر مجاور آن بیش‌تر از ۱۵۶ متر باشد، قابل حذف نیست.

برق‌گیر در باس انشعابی، اگر حداکثر فاصله دو برق‌گیر از بین ترکیب سه برق‌گیر مجاور آن بیش‌تر از ۵۹ متر باشد، قابل حذف نیست. این نتایج اگرچه نکات قابل توجهی دارند، لیکن به دلیل عدم کلیت جامعه آماری برای استخراج یک نتیجه کلی قابل استناد نمی‌باشند. از سویی، تحلیل حالت‌های ممکن از طول ۳۴ خط با ملاحظه برخورد صاعقه به تمامی خطوط و تمامی فواصل غیرممکن خواهد بود. زیرا تعداد حالات بسیار زیاد می‌باشند. چنانچه هر خط ۱۰۰ مقدار مختلف برای طول خود اختیار نماید، تعداد ترکیبات ممکن  $100^{34}$  می‌گردد. و این مقدار به معنی غیرممکن بودن روش جستجوی قطعی است. بنابراین، به منظور جستجوی بدترین شرایط، از جستجوی بهینه مبتنی بر روش‌های فراابتکاری بهره گرفته می‌شود.

#### ۴-۲-۱- جستجوی بهینه شعاع حفاظتی

به منظور جستجوی شعاع حفاظتی، فرآیند بهینه‌سازی انجام شده است. بر این اساس، جمعیتی از حالات تصادفی طول خطوط برای جستجوی نامساعدترین شرایط انتخاب و تابع برازندگی هریک بر اساس شعاع حفاظت تعیین می‌گردد. بهینه‌سازی تابع هدف برای یافتن حداکثر شعاع قابل اعتماد با وجود اضافه ولتاژی بیش‌تر از حد مجاز در هر یک از سه نوع باس انتهایی، میانی و انشعابی به صورت مستقل صورت می‌پذیرد. تابع هدف هر بخش، بهینه‌سازی شعاع حفاظتی است. بر اساس نتایج به دست آمده، حداکثر فاصله قابل اعتماد برق‌گیر با افزایش

۷	۴۲۶		۴۲۶		
۸	۷۴۲		۷۴۲		
۹		۶۵۰			۶۵۰
۱۰	۳۷۴		۳۷۴		
۱۱	۳۹۲		۳۹۲		
۱۲		۲۹۹		۲۹۹	
۱۳			۲۵۷		۲۵۷
۱۴		۶۸		۶۸	
۱۵	۵۵۵		۵۵۵		
۱۶	۴۸۴		۴۸۴		
۱۷			۱۵۸		۱۵۸
۱۸		۱۲۲			۱۲۲
۱۹	۲۴۸			۲۴۸	
۲۰			۲۴۵		۲۴۵
۲۱	۲۷۷			۲۷۷	
۲۲		۲۵۳			۲۵۳
۲۳			۵۴۸		۵۴۸
۲۴		۴۴۹			۴۴۹
۲۵			۵۹۷		۵۹۷
۲۶	۲۰۱			۲۰۱	
۲۷	۳۸۳			۳۸۳	
۲۸	۲۸۰			۲۸۰	
۲۹		۵۱			۵۱
۳۰	۶۶۵			۶۶۵	
۳۱			۳۱۶		۳۱۶
۳۲	۱۸۲			۱۸۲	
۳۳		۱۵۰			۱۵۰
۳۴		۱۴۹			۱۴۹

چنانچه با سی بدون اضافه ولتاژ باشد، بیش‌ترین فاصله به عنوان حداکثر فاصله قابل اعتماد معرفی می‌گردد. برای استخراج مقدار ۷ متر، باس‌های انتهایی و اضافه ولتاژشان بررسی می‌گردد. همچنین اگر باسی با اضافه ولتاژ باشد، کم‌ترین فاصله به عنوان حداقل فاصله معرفی می‌گردد. یعنی موردی وجود دارد که اگر فاصله برق‌گیر در باس انتهایی تا باس مجاورش این مقدار باشد، حداقل یک مورد اضافه ولتاژ رخ می‌دهد. در جدول ۴، سطرهای سبز شرایط متناظر با جدول ۳ را در خصوص بیش‌ترین مقدار اضافه ولتاژ دارند. به طریقی مشابه، دیگر حالت‌های تصادفی اجرا و خلاصه نتایج در جدول ۵ درج شده‌اند.

#### جدول ۵: حداقل و حداکثر فاصله با حذف برق‌گیر باس‌ها در ۱۰ حالت

حداکثر فاصله قابل اعتماد	حداکثر طول در نوع	حداقل طول در نوع	حداقل فاصله در باس‌های با اضافه ولتاژ	حداکثر فاصله در باس‌های بدون اضافه ولتاژ	نوع باس:	حالت
۳۵۸	۱۵۳۹	۳۵۸	۳۵۸	*	میانی	۱
۴۳۲	۱۶۸۸	۳۸۹	۴۳۲	۳۸۹	انشعابی	
۶۹	۶۳۹	۶۹	۶۹	*	انتهایی	
۳۵۷	۱۴۳۳	۳۵۷	۳۵۷	*	میانی	۲
۸۶۵	۱۶۲۶	۸۶۵	۸۶۵	*	انشعابی	
۹۲	۷۷۱	۹۲	۹۲	*	انتهایی	۳
۴۳۹	۱۹۰۶	۱۷۴	۴۳۹	۴۶۹	میانی	
۶۶۸	۱۸۱۰	۶۶۸	۶۶۸	*	انشعابی	
۱۲۰	۹۹۴	۱۲۰	۱۲۰	*	انتهایی	۴
۳۳۲	۱۴۱۴	۳۳۲	۳۳۲	۴۶۳	میانی	
۶۸۶	۱۲۲۳	۶۸۶	۶۸۶	۷۵۶	انشعابی	
۴۵	۸۲۲	۴۵	۴۵	*	انتهایی	۵
۲۴۹	۱۸۵۲	۲۴۹	۲۴۹	*	میانی	
۷۰۶	۱۶۳۱	۷۰۶	۷۰۶	*	انشعابی	
۹۰	۹۵۰	۹۰	۹۰	*	انتهایی	۶
۲۰۳	۱۶۲۷	۲۰۳	۲۰۳	۹۹۰	میانی	



۲۳	۲۶۹	۲۴		
۲۳	۴۰۶	۲۵	۱۶	۲۶
			۷۳	۳۰
۲۵	۱۶	۲۶	۳۳۸	۲۷
۲۶	۳۳۸	۲۷	۳۹۴	۲۸
۲۷	۳۹۴	۲۸	۱۸۰	۲۹
۲۸	۱۸۰	۲۹		
۲۵	۷۳	۳۰	۱۸۹	۳۱
۳۰	۱۸۹	۳۱	۴۷۷	۳۴
			۳۰۹	۳۲
۳۱	۳۰۹	۳۲	۴۲۴	۳۳
۳۲	۴۲۴	۳۳		
۳۱	۴۷۷	۳۴		

۲۳	۶۲۳	۲۴		
۲۳	۱۰۰۰	۲۵	۱۰۰۰	۲۶
			۱۰۰۰	۳۰
۲۵	۱۰۰۰	۲۶	۱۰۰۰	۲۷
۲۶	۱۰۰۰	۲۷	۱۰۰۰	۲۸
۲۷	۱۰۰۰	۲۸	۸۹۹	۲۹
۲۸	۸۹۹	۲۹		
۲۵	۱۰۰۰	۳۰	۱۰۰۰	۳۱
۳۰	۱۰۰۰	۳۱	۳۲۵	۳۴
			۱۰۰۰	۳۲
۳۱	۱۰۰۰	۳۲	۲۲۱	۳۳
۳۲	۲۲۱	۳۳		
۳۱	۳۲۵	۳۴		

حداکثر فاصله قابل اعتماد برحسب متر	
با جریان صاعقه ۵ kA	با جریان صاعقه ۱۰ kA
۴۶	۱۳

جدول ۷: ترکیب فواصل خطوط در حالت بهینه باس میانی

جریان صاعقه ۵ kA				
شماتیک اتصالات باس				
۱	۵۲۴	۲		
۱	۵۲۴	۲	۴۱۰	۳
۲	۴۱۰	۳	۳۲۴	۴
۳	۳۲۴	۴	۶۵۸	۶
			۱۰۰۰	۵
۴	۱۰۰۰	۵		
۴	۶۵۸	۶	۵۹۳	۷
۶	۵۹۳	۷	۴۶۰	۸
۷	۴۶۰	۸	۶۲۵	۹
۸	۶۲۵	۹	۳۳۸	۱۰
			۱۰۰۰	۱۳
۹	۳۳۸	۱۰	۲۸۶	۱۱
۱۰	۲۸۶	۱۱	۶۹۱	۱۲
۱۱	۶۹۱	۱۲		
۹	۱۰۰۰	۱۳	۱۰۰۰	۱۴
			۴۵۸	۱۵
۱۳	۱۰۰۰	۱۴		
۱۳	۴۵۸	۱۵	۶۷۴	۱۶
۱۵	۶۷۴	۱۶	۵۴۷	۱۷
۱۶	۵۴۷	۱۷	۴۵۶	۱۹
			۱۰۰۰	۱۸
۱۷	۱۰۰۰	۱۸		
۱۷	۴۵۶	۱۹	۵۴۵	۲۰
۱۹	۵۴۵	۲۰	۱۰۰۰	۲۳
			۷۱۸	۲۱
۲۰	۷۱۸	۲۱	۷۲۲	۲۲
۲۱	۷۲۲	۲۲		
۲۰	۱۰۰۰	۲۳	۱۰۰۰	۲۴
			۱۰۰۰	۲۵
۲۳	۱۰۰۰	۲۴		

جریان صاعقه ۱۰ kA				
شماتیک اتصالات باس				
۱	۶۶۶	۲		
۱	۶۶۶	۲	۱۷۷	۳
۲	۱۷۷	۳	۳۶۳	۴
۳	۳۶۳	۴	۵۷	۶
			۱۰۰۰	۵
۴	۱۰۰۰	۵		
۴	۵۷	۶	۶۷۴	۷
۶	۶۷۴	۷	۷۷۶	۸
۷	۷۷۶	۸	۳۶۱	۹
۸	۳۶۱	۹	۶۵	۱۰
			۱۰۰۰	۱۳
۹	۶۵	۱۰	۷۱۷	۱۱
۱۰	۷۱۷	۱۱	۸۵۳	۱۲
۱۱	۸۵۳	۱۲		
۹	۱۰۰۰	۱۳	۱۰۰۰	۱۴
			۳۶۲	۱۵
۱۳	۱۰۰۰	۱۴		
۱۳	۳۶۲	۱۵	۶۵۶	۱۶
۱۵	۶۵۶	۱۶	۲۸۰	۱۷
۱۶	۲۸۰	۱۷	۷۶۰	۱۹
			۱۰۰۰	۱۸
۱۷	۱۰۰۰	۱۸		
۱۷	۷۶۰	۱۹	۹۲۰	۲۰
۱۹	۹۲۰	۲۰	۱۰۰۰	۲۳
			۲۹	۲۱
۲۰	۲۹	۲۱	۲۸	۲۲
۲۱	۲۸	۲۲		
۲۰	۱۰۰۰	۲۳	۱۰۰۰	۲۴
			۱۰۰۰	۲۵
۲۳	۱۰۰۰	۲۴		

شدت جریان صاعقه کاهش می‌یابد. این امر را می‌توان در خصوص مناطق شهری و غیرشهری مدنظر قرار داد. در نتایج به‌دست‌آمده، معیار مربوط به فاصله قابل اعتماد برای حذف برق‌گیر در باس مورد نظر، دستورالعمل نصب برق‌گیر را بیان می‌دارد. پاسخ بهینه ترکیب فواصل خطوط برای باس‌های انتهایی، میانی و انشعابی به‌ترتیب در جداول ۶، ۷ و ۸ ارائه شده‌اند.

#### ۴-۳- مقایسه نتایج با استاندارد IEEE C62.22

در این بخش، نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها با مقادیر موجود در استاندارد IEEE C62.22 [۱۷] در خصوص فاصله مجاز برق‌گیر از تجهیزات تحت حفاظت اضافه و لتاز مقایسه می‌گردد. در پیوست C استاندارد فوق، این مؤلفه با عنوان فاصله جدایی معرفی شده است. روند محاسبه این فاصله بر اساس دیاگرام تک‌خطی شکل ۶ صورت پذیرفته است. مطابق شکل، فرض بر ورود موجی با نرخ تغییرات S در محل نصب برق‌گیر (J) می‌باشد.

جدول ۶: ترکیب فواصل خطوط در حالت بهینه باس انتهایی

جریان صاعقه ۵ kA				
شماتیک اتصالات باس				
۱	۱۳۷	۲		
۱	۱۳۷	۲	۲۲۲	۳
۲	۲۲۲	۳	۳۲۴	۴
۳	۳۲۴	۴	۱۴۴	۶
			۴۲۷	۵
۴	۴۲۷	۵		
۴	۱۴۴	۶	۴۵۱	۷
۶	۴۵۱	۷	۳۸۹	۸
۷	۳۸۹	۸	۳۴۵	۹
۸	۳۴۵	۹	۲۷	۱۰
			۱۵	۱۳
۹	۲۷	۱۰	۲۹	۱۱
۱۰	۲۹	۱۱	۴۰۹	۱۲
			۱۱	۱۳
۹	۱۵	۱۳	۴۶	۱۴
			۳۹۸	۱۵
۱۳	۴۶	۱۴		
۱۳	۳۹۸	۱۵	۲۹۹	۱۶
۱۵	۲۹۹	۱۶	۳۰۲	۱۷
۱۶	۳۰۲	۱۷	۲۰۵	۱۹
			۱۱۲	۱۸
۱۷	۱۱۲	۱۸		
۱۷	۲۰۵	۱۹	۴۰۳	۲۰
۱۹	۴۰۳	۲۰	۶۸	۲۳
			۳۲۴	۲۱
۲۰	۳۲۴	۲۱	۱۰۴	۲۲
			۲۱	۱۰۴
۲۰	۶۸	۲۳	۲۶۹	۲۴
			۴۰۶	۲۵

جریان صاعقه ۱۰ kA				
شماتیک اتصالات باس				
۱	۴۳۲	۲		
۱	۴۳۲	۲	۱۰۰۰	۳
۲	۱۰۰۰	۳	۱۰۰۰	۴
۳	۱۰۰۰	۴	۱۰۰۰	۶
			۶۰۴	۵
۴	۶۰۴	۵		
۴	۱۰۰۰	۶	۱۰۰۰	۷
۶	۱۰۰۰	۷	۱۰۰۰	۸
۷	۱۰۰۰	۸	۱۰۰۰	۹
۸	۱۰۰۰	۹	۱۰۰۰	۱۰
			۱۰۰۰	۱۳
۹	۱۰۰۰	۱۰	۱۰۰۰	۱۱
۱۰	۱۰۰۰	۱۱	۴۶۷	۱۲
			۱۱	۱۳
۹	۱۰۰۰	۱۳	۱۳	۱۴
			۱۰۰۰	۱۵
۱۳	۱۳	۱۴		
۱۳	۱۰۰۰	۱۵	۱۰۰۰	۱۶
۱۵	۱۰۰۰	۱۶	۱۰۰۰	۱۷
۱۶	۱۰۰۰	۱۷	۱۰۰۰	۱۹
			۵۱۵	۱۸
۱۷	۵۱۵	۱۸		
۱۷	۱۰۰۰	۱۹	۱۰۰۰	۲۰
۱۹	۱۰۰۰	۲۰	۱۰۰۰	۲۳
			۱۰۰۰	۲۱
۲۰	۱۰۰۰	۲۱	۷۲۰	۲۲
			۲۱	۷۲۰
۲۰	۱۰۰۰	۲۳	۶۲۳	۲۴
			۱۰۰۰	۲۵

۲۵	۵۰۳	۲۶	۱۰۰۰	۲۷
۲۶	۱۰۰۰	۲۷	۱۰۰۰	۲۸
۲۷	۱۰۰۰	۲۸	۱۰۰۰	۲۹
۲۸	۱۰۰۰	۲۹		
۲۵	۷۲۲	۳۰	۸۷	۳۱
۳۰	۸۷	۳۱	۸۷	۳۴
		۸۷	۳۲	
۳۱	۸۷	۳۲	۱۰۰۰	۳۳
۳۲	۱۰۰۰	۳۳		
۳۱	۸۷	۳۴		

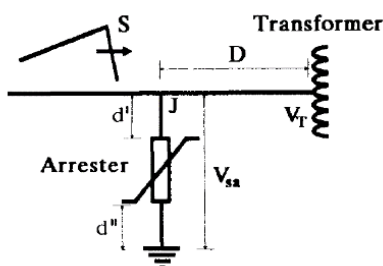
۲۵	۵۷۸	۲۶	۱۰۰۰	۲۷
۲۶	۱۰۰۰	۲۷	۱۰۰۰	۲۸
۲۷	۱۰۰۰	۲۸	۱۰۰۰	۲۹
۲۸	۱۰۰۰	۲۹		
۲۵	۶۴۹	۳۰	۴۱	۳۱
۳۰	۴۱	۳۱	۴۱	۳۴
		۴۱	۳۲	
۳۱	۴۱	۳۲	۱۰۰۰	۳۳
۳۲	۱۰۰۰	۳۳		
۳۱	۴۱	۳۴		

حداکثر فاصله قابل اعتماد بر حسب متر	
با جریان صاعقه ۵ kA	با جریان صاعقه ۱۰ kA
۱۷۴	۸۲

در این رابطه، فرض شده است که دامنه موج واصله به نقطه J میزان لازم برای شروع عملکرد برق گیر را نداشته و از آستانه مذکور پایین تر است. بنابراین شرایط، موج در طول خط از محل J تا محل نصب ترانسفورماتور جاری خواهد شد. مطابق با تئوری امواج سیار این موج در مسیر D حرکت کرده و با برخورد با نقطه انتهایی به نقطه J بازگشت می نماید. این مدت زمان که بر اساس سیر موج با سرعتی برابر با سرعت نور قابل بیان است مطابق با زمان رفت و برگشت موج در فاصله 2D تا نقطه J خواهد بود. فاصله مجاز برق گیر تا ترانسفور به منظور تضمین محدود سازی ولتاژ نقطه J در ولتاژ باقی مانده برق گیر تعیین می گردد. مطالعاتی که در استاندارد IEEE C62.22 صورت پذیرفته است، بر پایه تحلیل های برنامه تحلیل حالت گذرا (EMTP) می باشد. مطابق تحلیل ها، فاصله جدایی مجاز (D) به ازای نسبت حداکثر تنش ولتاژ مجاز روی ترانسفورماتور و ولتاژ باقی مانده در محل اتصال برق گیر (J) به زمین از طریق نمودار شکل ۷ قابل ارتباط خواهد بود. ارتباط بین مؤلفه های محورهای این نمودار با معادله (۱) سازگار می گردد.

$$D \leq \left[ \frac{0.385 (C V_{sa})}{S} \right] \times \left[ \frac{0.957 BIL - V_{sa}}{2.92 V_{sa} - 0.957 BIL} \right] \quad (1)$$

که BIL، سطح عایقی تجهیزات، C، سرعت نور،  $V_{sa}$ ، ولتاژ باقی مانده در محل اتصال برق گیر (J) و S، نرخ افزایش موج واصله در نقطه J می باشد.



شکل ۶: دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه [۱۷]

۲۳	۱۰۰۰	۲۵	۵۴۹	۲۶
		۳۳۰	۳۰	
۲۵	۵۴۹	۲۶	۸۳۸	۲۷
۲۶	۸۳۸	۲۷	۴۳۳	۲۸
۲۷	۴۳۳	۲۸	۵۱۹	۲۹
۲۸	۵۱۹	۲۹		
۲۵	۳۳۰	۳۰	۴۹۳	۳۱
۳۰	۴۹۳	۳۱	۱۰۰۰	۳۴
		۶۰	۳۲	
۳۱	۶۰	۳۲	۷۰	۳۳
۳۲	۷۰	۳۳		
۳۱	۱۰۰۰	۳۴		

۲۳	۱۰۰۰	۲۵	۵۵۶	۲۶
		۴۲۰	۳۰	
۲۵	۵۵۶	۲۶	۳۸۱	۲۷
۲۶	۳۸۱	۲۷	۸۴۸	۲۸
۲۷	۸۴۸	۲۸	۱	۲۹
۲۸	۱	۲۹		
۲۵	۴۲۰	۳۰	۷۱۱	۳۱
۳۰	۷۱۱	۳۱	۱۰۰۰	۳۴
		۶۶۷	۳۲	
۳۱	۶۶۷	۳۲	۳۷۸	۳۳
۳۲	۳۷۸	۳۳		
۳۱	۱۰۰۰	۳۴		

حداکثر فاصله قابل اعتماد بر حسب متر	
با جریان صاعقه ۵ kA	با جریان صاعقه ۱۰ kA
۱۳۰	۵۷

جدول ۸: ترکیب فواصل خطوط در حالت بهینه باس انشعابی

جریان صاعقه ۵ kA				
شماتیک اتصالات باس				
۱	۱۰۰۰	۲		
۱	۱۰۰۰	۲	۱۰۰۰	۳
۲	۱۰۰۰	۳	۵۹۵	۴
۳	۵۹۵	۴	۳۹۰	۶
			۴۴۵	۵
۴	۴۴۵	۵		
۴	۳۹۰	۶	۱۰۰۰	۷
۶	۱۰۰۰	۷	۱۰۰۰	۸
۷	۱۰۰۰	۸	۵۴۸	۹
۸	۵۴۸	۹	۵۲۸	۱۰
			۶۱۱	۱۳
۹	۵۲۸	۱۰	۱۰۰۰	۱۱
۱۰	۱۰۰۰	۱۱	۱۰۰۰	۱۲
۱۱	۱۰۰۰	۱۲		
۹	۶۱۱	۱۳	۴۷۵	۱۴
			۵۱۸	۱۵
۱۳	۴۷۵	۱۴		
۱۳	۵۱۸	۱۵	۱۰۰۰	۱۶
۱۵	۱۰۰۰	۱۶	۳۰۹	۱۷
۱۶	۳۰۹	۱۷	۱۸۹	۱۹
			۷۴۲	۱۸
۱۷	۷۴۲	۱۸		
۱۷	۱۸۹	۱۹	۸۵۲	۲۰
۱۹	۸۵۲	۲۰	۵۳۳	۲۳
			۶۲۵	۲۱
۲۰	۶۲۵	۲۱	۱۰۰۰	۲۲
۲۱	۱۰۰۰	۲۲		
۲۰	۵۳۳	۲۳	۶۶۰	۲۴
			۳۴۶	۲۵
۲۳	۶۶۰	۲۴		
۲۳	۳۴۶	۲۵	۵۰۳	۲۶

جریان صاعقه ۱۰ kA				
شماتیک اتصالات باس				
۱	۱۰۰۰	۲		
۱	۱۰۰۰	۲	۱۰۰۰	۳
۲	۱۰۰۰	۳	۶۷۰	۴
۳	۶۷۰	۴	۴۶۵	۶
			۳۸۲	۵
۴	۳۸۲	۵		
۴	۴۶۵	۶	۱۰۰۰	۷
۶	۱۰۰۰	۷	۱۰۰۰	۸
۷	۱۰۰۰	۸	۶۲۰	۹
۸	۶۲۰	۹	۴۳۶	۱۰
			۵۴۸	۱۳
۹	۴۳۶	۱۰	۱۰۰۰	۱۱
۱۰	۱۰۰۰	۱۱	۱۰۰۰	۱۲
۱۱	۱۰۰۰	۱۲		
۹	۵۴۸	۱۳	۴۰۲	۱۴
			۶۶۴	۱۵
۱۳	۴۰۲	۱۴		
۱۳	۶۶۴	۱۵	۱۰۰۰	۱۶
۱۵	۱۰۰۰	۱۶	۲۲۵	۱۷
۱۶	۲۲۵	۱۷	۲۹۷	۱۹
			۶۶۴	۱۸
۱۷	۶۶۴	۱۸		
۱۷	۲۹۷	۱۹	۶۹۹	۲۰
۱۹	۶۹۹	۲۰	۶۱۵	۲۳
			۵۲۸	۲۱
۲۰	۵۲۸	۲۱	۱۰۰۰	۲۲
۲۱	۱۰۰۰	۲۲		
۲۰	۶۱۵	۲۳	۵۸۴	۲۴
			۲۷۴	۲۵
۲۳	۵۸۴	۲۴		
۲۳	۲۷۴	۲۵	۵۷۸	۲۶

به دست آمده برای باس های میانی نیز که با جریان های ۵ و ۱۰ کیلوآمپر صاعقه، به ترتیب برابر ۵۷ و ۱۳۰ متر بوده اند، در مقایسه با مقدار دو برابری مقادیر جدول ۹ در بهترین شرایط تا  $132 = 2 \times 66$  متر می باشند. محاسبات صورت گرفته در تعیین مقادیر جدول ۹ از طریق کد اجرا شده در MATLAB (شکل ۸) می باشد. متغیر conductor به منظور مدل سازی مقاومت هادی زمین برق گیر و سطح مقطع آن انتخاب و مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۹: فاصله جدایی برق گیر از ترانسفورماتور به ازای نوع هادی اتصال زمین برق گیر و شدت جریان صاعقه

فاصله D (متر)	۳۵	۵۰	۷۰	۱۲۰	مقطع هادی اتصال برق گیر به زمین (میلی متر مربع)
۲۲	۲۵	۳۸	۵۰	۶۶	جریان صاعقه ۵ کیلوآمپر
۲۸	۳۸	۵۰	۶۶	۱۲۰	جریان صاعقه ۱۰ کیلوآمپر

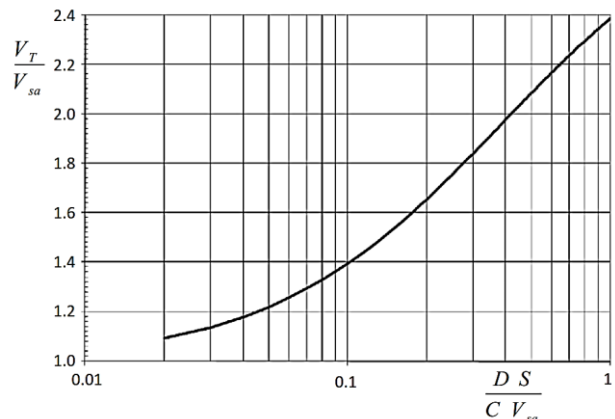
```

clc
clear
Table1StdC6222=[20 15.3 18 27 2.33 2.48 125];
BIL=Table1StdC6222(7);
V=Table1StdC6222(1);
C=300;
d=7.6;
MCOV=Table1StdC6222(2);
Sp=11*MCOV;
S=Sp;
Va=Table1StdC6222(2)*((Table1StdC6222(1)-
Table1StdC6222(3)) ...
/(Table1StdC6222(4)-
Table1StdC6222(3)))*(Table1StdC6222(6)...
-Table1StdC6222(5))+Table1StdC6222(5))*sqrt(2)*0.965;
Z=450;
CWW=1.1*BIL;
k=0;
for Isurge=5:5:10
    k=k+1;
    didt=Isurge/8;
    conductor= [120 0.273;70 0.454;50 0.782;35 0.907];
    conductor(:,2)=conductor(:,2)/(2*pi*50)/1000*1e6;
    for i=1:4
        L=d*conductor(i,2);
        Vsa=Va+L*didt;
        VT=CWW/1.15;
        D=(0.385*C*Vsa/S)*(0.957*BIL-Vsa)/(2.92*Vsa-
0.957*BIL);
        Output(k,i)=D;
    end
end
Result=[conductor(:,1)';round(Output)];
disp(Result)
    
```

شکل ۸: کد اجرا شده در MATLAB برای محاسبه فاصله جدایی

### ۵- نتیجه

تکنیک پیشنهادی در این مقاله، در پی جستجوی حداکثر شعاعی است که یک برق گیر در صورت برخورد مستقیم صاعقه به خط توزیع توانایی محدود سازی اضافه ولتاژ را دارا باشد. محاسبه شعاع حفاظتی برق گیر،



شکل ۷: فاصله جدایی به ازای نسبت حداکثر تنش ولتاژ مجاز روی ترانسفورماتور و ولتاژ باقی مانده در محل نصب برق گیر [۱۷]

محاسبه مقدار  $V_{sa}$  در روندی که در استاندارد IEEE C62.22 ذکر شده است، بر اساس فاصله هادی اتصال دهنده برق گیر از محل J به زمین و راکتانس هادی مذکور به شرح ذیل خواهد بود:

در روند مذکور، سطح حفاظت پیشانی موج برق گیر در ۰/۵ میکروثانیه ( $V_a$ ) که بر اساس Table 1 استاندارد فوق، ارائه شده است برای شبکه های با ولتاژ ۱۸ kV تا ۲۷ kV انتخاب می گردد. بر اساس مقدار ولتاژ شبکه ۲۰ kV، ضریب متناسب از ستون  $0.5 \mu s$  FOW protective level جدول مذکور در بازه ۲/۴۸-۲/۳۳ اتخاذ می گردد. این مقدار برای شبکه ۱۱۵ kV برابر ۲۲۶ kV و برای شبکه ۲۰ kV، برابر ۵۰ kV مطابق جدول تعیین می گردد.

در Table 11 استاندارد IEEE Std C62.11-2005، مقدار امپدانس موجی خطوط با ولتاژ ۳ kV تا ۷۲ kV برابر ۴۵۰ اهم منظور می گردد. نرخ تغییرات جریان عبوری با فرض اعمال جریانی با دامنه  $I_{surge}$  و پیشانی  $\tau_{fow}$  قابل محاسبه خواهد بود. همچنین بر اساس هادی مورد استفاده در مسیر اتصال برق گیر از محل J به زمین، راکتانس واحد طول متناسب با مقطع هادی انتخاب شده و با ضرب در طول های، راکتانس آن تعیین می شود. در نهایت، ولتاژ باقی مانده در محل اتصال برق گیر به شبکه ( $V_{sa}$ ) با جمع ولتاژ  $V_a$  و افت ولتاژ در طول هادی اتصال برق گیر به زمین به دست می آید. نتایج محاسبه با فرض اعمال جریان صاعقه با زمان پیشانی موج ۸ میکروثانیه و دامنه ۵ و ۱۰ کیلوآمپر به صورت جدول ۹ می باشد. فاصله جدایی برق گیر از ترانسفورماتور برای باس های انتهایی برابر با مقادیر جدول ۹ و برای باس های میانی دو برابر مقادیر ارائه شده خواهند بود. زیرا ترانسفورماتور باس های میانی از طریق دو برق گیر مجاور قابل حفاظت خواهد بود. با توجه به نتایج ارائه شده در نتایج جدول ۶، مقدار فاصله مورد بحث در باس های انتهایی با جریان های ۵ kA و ۱۰ kA، صاعقه، به ترتیب برابر ۴۶ و ۱۳ متر به دست آمده است. تفاوت مقادیر فوق با نتایج جدول ۹ بیانگر کاهش فاصله مجاز محاسبه شده در شبیه سازی های صورت گرفته در محیط DIGSILENT می باشد. از جمله دلایل این کاهش شناور بودن نقطه برخورد صاعقه در خط و نه در محل J می باشد. مقادیر

- evaluation of the failure probability," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 17, no. 1, pp. 123-128, 2002.
- [6] M. S. Savic, "Estimation of the surge arrester outage rate caused by lightning overvoltages," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 116-122, 2005.
- [7] L. C. Zanetta, "Evaluation of line surge arrester failure rate for multipulse lightning stresses," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 796-801, 2003.
- [8] D. Loudon, K. Halsan, U. Jonsson and S. Kraftnet, "A compact 420 kV line utilizing line surge arresters for areas with low isokeraunic levels," CIGR, no. 22/33/36-08, Session 1998.
- [9] E. J. Tarasiewicz, F. Rimmer and A. S. Morched, "Transmission line arrester energy, cost, and risk of failure analysis for partially shielded transmission lines," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, no. 3, pp. 919-924, 2000.
- [10] A. L. Orilk, S. Bogarra, M. A. Grau and J. Iglesias, "Optimization of Surge Arrester's Location," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19, no. 1, 2004.
- [11] A. L. Orille, S. Bogarra, M. A. Grau and J. Iglesias, "Lightning Protection of Power Systems Using Fuzzy Logic Techniques," *The 12<sup>th</sup> international conference on fuzzy systems*, 2003, FUZZ '03.
- [12] A. L. Orille, S. Bogarra, M. A. Grau and J. Iglesias, "Fuzzy Logic Techniques to Limit Lightning Surges in a Power Transformer," *In proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference*.
- [13] R. Shariatinasab, B. Vahidi and S. H. Hosseinian, "Statistical evaluation of lightning-related failures for the optimal location of surge arresters on the power networks," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 3, no. 2, pp. 129-144, 2009.
- [14] R. Shariatinasab, B. Vahidi, S. H. Hosseinian and A. Ametani, "Probabilistic Evaluation of Optimal Location of Surge Arresters on EHV and UHV Networks Due to Switching and Lightning Surges," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1903-1911, 2009.
- [15] R. Shariatinasab, J. G. Safar and H. Falaghi, "Optimisation of arrester location in risk assessment in distribution network," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 1, pp. 151-159, 2014.
- [16] S. A. Hosseini, M. Mirzaie and T. Barforoshi, "Reliability Analysis of Surge Arrester Location Effect in High voltage substations," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 12, no. 8, pp. 5814-5826, 2014.
- [17] IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, IEEE Std C62.22-2009, pp. 1-131, Mar. 2009.
- متأثر از نوع مدل سازی سیستم و مؤلفه های مورد استفاده در آن خواهد بود. لذا توپولوژی های مختلف مداری در شبکه توزیع بر اساس نوع باسی که برق گیر از آن حذف می گردد اهمیت داشته و بر این اساس در ساختار شبکه مورد مطالعه، سه نوع باس تحت عناوین انتهایی، میانی و انشعابی مورد بررسی قرار گرفته اند.
- بر اساس این سه نوع باس و اتصالات مربوطه، برق گیر باس مورد نظر در هر تحلیل حذف و از قابلیت برق گیرهای مجاور در مپار اضافه ولتاژ ناشی از برخورد مستقیم ضربه صاعقه به تمام نقاط شبکه بهره گرفته شد. نهایتاً، جستجو در پی یافتن حداقل فاصله ای است که ضربه مستقیم صاعقه در مسیر خطوط تا رسیدن به دورترین برق گیرها طی می نماید. بر اساس نتایج به دست آمده، حداکثر فاصله قابل اعتماد برق گیر با افزایش شدت جریان صاعقه کاهش می یابد. این امر را می توان در خصوص مناطق شهری و غیرشهری مدنظر قرار داد.

## مراجع

- [1] T. E. McDermot, T. A. Short and J. G. Anderson, "Lightning protection of distribution lines," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 9, no.1, pp. 138 – 152, 1994.
- [2] E. C. Sakshaug, J. J. Burke and J. S. Kresge, "Metal Oxide Arresters on Distribution Systems: Fundamental Considerations," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 4, no. 4, pp. 2076-2089, 1989.
- [3] K. G. Ringler, P. Kirkby, C. C. Erven, M. V. Lat and T. A. Malkiewicz, "The energy absorption capability and time-to-failure of varistors used in station-class metal-oxide surge arresters," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, no.1, pp. 203-212, 1997.
- [4] K. Nakada, T. Yokota, S. Yokoyama and A. Asakawa, "Energy absorption of surge arresters on distribution lines due to direct lightning strokes – effect of an overhead ground wire and installation position of surge arrester," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, no. 4, pp. 1779-1785, 1997.
- [5] L. Montanes, M. Garcia-Garcia, M. Sanz and M. A. Garcia, "An improvement for the selection of surge arresters based on the