

## ارزیابی و پیش‌بینی اثرات اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه بر روی شبکه‌های توزیع پیچیده با مدل‌سازی فرکانس بالا اجزای آن

فریدالدین صفایی<sup>۱</sup>، نبی اله رمضانی<sup>۲\*</sup> و میلاد نیازآذری<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۵	
<b>واژگان کلیدی:</b> شبکه توزیع، برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه، مدل‌سازی فرکانس بالا، اضافه ولتاژ گذرا.	در این مقاله با مدل‌سازی رفتار گذرای تمامی اجزای شبکه توزیع، اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه پیش‌بینی شده است. تأثیر پارامترهایی چون مقدار پیک جریانی صاعقه، سیستم زمین با در نظر گرفتن مدل‌های فرکانس بالای آن و پدیده غیرخطی یونیزاسیون خاک، مدل بارهای مختلف، مقاومت ویژه خاک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر ساختمان‌های بلند مجاور خطوط توزیع شهری و نقش آن در حذف برخی از برق‌گیرها، تأثیر استفاده از سیم‌گارد در مناطق صاعقه خیز و استفاده از کابل در محل اتصال خط هوایی به ترانسفورماتور به موجب کاهش اضافه ولتاژها مورد ارزیابی قرار گرفته است. یک الگوریتم پیشنهادی مناسب با لحاظ کردن پارامترهای مؤثر بر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه برای ارزیابی اثرات این اضافه ولتاژها در شبکه توزیع ارائه شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند در انتخاب سطح عایقی مناسب تجهیزات شبکه توزیع، ارزیابی اقتصادی طراحی شبکه و بررسی حذف و اضافه نمودن برق‌گیرها مورد استفاده قرار گیرد.

### ۱- مقدمه

ملاحظات مربوط به طراحی عایقی ایفا می‌کنند. این در حالی است که در خطوط ۱۳۲ کیلوولت و پایین‌تر، عامل مهم‌تر مورد توجه، اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه است. صاعقه یکی از مهم‌ترین عامل وقوع قطعی برق در خطوط هوایی شبکه‌ی توزیع است [۱۱-۳]. اگر صاعقه مستقیماً به خط هوایی شبکه توزیع برخورد کند، به علت سطح استقامت عایقی نسبتاً پایین خطوط هوایی، همواره فرض می‌شود که شکست سطحی رخ خواهد داد [۶-۴ و ۱۳]. اما تجربیات و مشاهدات میدانی نشان می‌دهد به علت محدودیت ارتفاع خطوط هوایی شبکه توزیع و وجود

یکی از پدیده‌های سوء برای شبکه‌های قدرت، اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه و کلیدزنی بر روی سیستم قدرت است [۱۲-۱]. مهم‌ترین مشکل ناشی از وقوع این اضافه ولتاژها، عملکرد نادرست و در نهایت خرابی دستگاه‌ها و در نتیجه ایجاد بی‌برقی در سیستم است. چنین اضافه ولتاژهایی معمولاً امواج گذرا هستند و مدت‌زمان کوتاهی شبکه را تحت تأثیر قرار داده و عموماً دامنه بزرگی دارند [۲۰-۱۲]. در خطوط انتقال با ولتاژ ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت، اضافه ولتاژهای حاصل از کلیدزنی، نقش اصلی را در

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ramezani@mazust.ac.ir

۱. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و فناوری مازندران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و فناوری مازندران

۳. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و فناوری مازندران

خط هوایی به ترانسفورماتور، ساختمان‌های بلند مجاور خط توزیع و استفاده از سیم گارد در شبکه توزیع به صورت آنالیز حساسیت مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. نصب بی‌مورد و یا حذف بی‌مورد برق‌گیر، می‌تواند هزینه‌های زیادی به شبکه‌ی توزیع تحمیل کند. از طرف دیگر نصب تعداد کم آن‌ها باعث عدم پوشش حفاظتی شبکه در برابر اضافه ولتاژهای خطرناک می‌گردد. با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان در مورد حذف یا اضافه نمودن برق‌گیر شبکه اظهار نظر قطعی کرد. شبیه‌سازی شبکه نمونه و تجهیزات آن توسط نرم‌افزار EMTP\_RV انجام می‌شود؛ و از نرم‌افزارهای CST MICROWAVE STUDIO، Mathematica و LIOV\_Code در فضای برنامه‌نویسی و از JAVA برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر استفاده خواهد شد.

## ۲- تشریح مسئله

برای طراحی عایقی سیستم‌های MV و LV و همچنین انتخاب برق‌گیرها، بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از حالات گذرا ضروری است. بنابراین برای هماهنگی عایقی و جایابی برق‌گیرها باید اضافه ولتاژهای گذرا در شبکه، به‌ویژه اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه و کلیدزنی مورد بررسی قرار گیرند. در این مقاله با توجه به اینکه تأثیر اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه نسبت به کلیدزنی در شبکه توزیع محسوس‌تر است، بر روی اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه متمرکز شده‌ایم. ولی برای بررسی دقیق‌تر هماهنگی عایقی و جایابی برق‌گیرها در شبکه‌ی توزیع، ارزیابی اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی هم ضروری بنظر می‌رسد.

### ۲-۱- برخورد مستقیم صاعقه

اثر صاعقه بر خطوط سیستم قدرت را به سه دسته می‌توان تقسیم کرد. برخورد صاعقه به سیم فاز، برخورد صاعقه به سیم زمین و تیر برق، برخورد صاعقه به مجاورت خط و القاء ولتاژ بر روی خط می‌باشد. منظور از برخورد مستقیم صاعقه، برخوردهای صاعقه به هادی فاز خطوط توزیع هست. بدین ترتیب موج ولتاژ سیار روی شبکه تولید می‌گردد. این اضافه ولتاژها می‌تواند به دستگاه‌های شبکه توزیع آسیب برساند. اگر ولتاژ به حد کافی زیاد باشد، شکست الکتریکی عایقی سبب اتصال کوتاه سیستم می‌شود [۵ و ۱۱]. تحقیقات نشان می‌دهد در شبکه‌های

ساختمان‌ها و درختان در اطراف خطوط، احتمال برخورد مستقیم صاعقه به خط بسیار کم است و اکثر ضربات صاعقه به زمین اطراف خطوط برخورد می‌کنند [۸-۴ و ۱۱ و ۱۶]. از طرفی با توجه به طول بسیار زیاد شبکه توزیع و ارتفاع کم فازها در این خطوط نسبت به عوارض موجود، احتمال القای ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه افزایش می‌یابد [۵ و ۶]. با حضور ساختمان‌های بلند در اطراف فیدر توزیع، انتظار می‌رود اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه بر روی شبکه کاهش یابد. اما تاکنون مطالعات کمی در مورد بررسی دقیق حضور ساختمان‌های بلند در اطراف شبکه توزیع و تأثیر آن بر اضافه ولتاژهای القایی ایجاد شده ناشی از صاعقه انجام شده است [۷ و ۸]. با توجه به گسترش فزاینده بارهای حساس، صاعقه ممکن است کیفیت توان را کاهش دهد، حتی اگر اضافه ولتاژ نسبتاً کم باشد [۴-۱ و ۲۱]. لذا باید تأثیر مدل‌های مختلف بار مصرف‌کنندگان مورد بررسی قرار گیرد و راهکارهای حفاظتی مناسب پیشنهاد شود [۴ و ۲۱]. از این رو تعداد زیادی از پژوهش‌های تجربی و نظری انجام شده توسط محققین در چند دهه اخیر بر روی ارزیابی اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه در شبکه‌ی توزیع متمرکز شده است [۱۵-۱۷]. در اکثر تحقیقات به بررسی هم‌زمان تأثیر برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه و در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار بر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه پرداخته نشده است [۱۲-۱]. به‌منظور طراحی اجزای یک سیستم توزیع، شناسایی و محاسبه‌ی دقیق قابلیت تحمل عایقی تجهیزات از اهمیت بالایی برخوردار است [۲ و ۳]. لذا به‌منظور محاسبه‌ی دقیق BIL تجهیزات، پیش‌بینی اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه و کلیدزنی امری ضروری است [۴ و ۲۰]. که این امر مستلزم مدل‌سازی دقیق رفتار گذرای کلیه اجزا و تجهیزات شبکه‌ی توزیع است [۱۲-۱۷]. این مقاله با مدل‌سازی فرکانس بالای پارامترها و کلیه اجزای شبکه توزیع به بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد مستقیم صاعقه، اضافه ولتاژهای القایی ضربات غیرمستقیم صاعقه و ضربه‌های انتقالی از طریق ترانسفورماتور توزیع بر روی شبکه توزیع نمونه شهرستان نکا می‌پردازد. همچنین تأثیر عواملی چون مقدار پیک جریانی صاعقه، مدل‌سازی رفتار گذرای سیستم زمین با لحاظ کردن یونیزاسیون خاک، تأثیر مقاومت ویژه خاک، مدل بارهای مختلف، استفاده از کابل در محل اتصال

ولتاژهای القایی روی فازهای خط ظاهر می‌شوند [۸-۵]. اگر صاعقه به زمین مجاور خط برخورد کند، جریان یا انرژی رانده شده به زمین باعث تغییرات خیلی سریع میدان مغناطیسی خواهد شد. در برخورد غیرمستقیم صاعقه، ماکزیمم دامنه و شیب تغییرات اضافه ولتاژ القاشده در هادی فاز، به طرز قابل توجهی توسط پارامترهای صاعقه، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. موج برگشتی ناشی از تخلیه صاعقه، عامل اصلی ایجاد ولتاژ القایی روی فاز هست. فاصله تخلیه یک صاعقه ابر به زمین، بستگی به شدت صاعقه، پیک جریان و ماکزیمم زمان مربوط به آن، سرعت موج برگشتی صاعقه، ساختار خط (طول و ارتفاع)، محل برخورد صاعقه، مقاومت الکتریکی زمین و سطح عایقی سیستم دارد [۵].

#### ۲-۲-۱- مدل سازی کانال صاعقه

تاکنون مدل‌های ریاضی متعددی با دیدگاه‌های گوناگونی برای کانال صاعقه ارائه شده است. به طور کلی مدل‌های کانال صاعقه به چهار گروه مدل‌های فیزیکی، مدل‌های مدار گسترده، مدل‌های مهندسی و مدل‌های الکترومغناطیسی تقسیم‌بندی می‌شود. مدل خط انتقال خطی (MTLL) دامنه‌ی جریان با ارتفاع به صورت خطی و در مدل خط انتقال نمایی (MTLE) به صورت نمایی کاهش می‌یابد. برای مدل MTLL مطابق رابطه (۳) دامنه‌ی جریان با ارتفاع به صورت خطی کاهش می‌یابد و در این رابطه H ثابت میرایی است. در مدل MTLE دامنه‌ی جریان در این مدل مطابق رابطه (۴) به صورت نمایی کاهش می‌یابد. در این رابطه  $\lambda$  ثابت میرایی است.  $v$  سرعت موج صاعقه برگشتی است [۵ و ۹].

$$i(z', t) = i(0, t - z'/v) (1 - z'/H) \quad z' \leq v \cdot t \quad (3)$$

$$i(z', t) = 0 \quad z' \geq v \cdot t$$

$$i(z', t) = i(0, t - z'/v) e^{-z'/\lambda} \quad z' \leq v \cdot t \quad (4)$$

$$i(z', t) = 0 \quad z' \geq v \cdot t$$

#### ۲-۲-۲- میدان‌های الکترومغناطیسی

اصولاً در تمام مدل‌های مهندسی برای محاسبه‌ی اثرات تزویج ارتباط بین میدان‌های الکترومغناطیسی تولیدشده و ولتاژها و جریان‌های القایی در خطوط برق را برقرار می‌کنند

توزیع شهری با توجه به عوامل محیطی مانند حضور درختان و ساختمان‌های بلند در نزدیکی خطوط توزیع، تعداد کمی از ضربات صاعقه حدود ۲ الی ۱۶ درصد مستقیماً به شبکه توزیع برخورد می‌کنند، که دامنه متوسط جریان تخلیه این ضربات بین ۱۲kA تا ۲۳kA است [۱۶].

#### ۲-۱-۱- ارزیابی اثر ضربه مستقیم صاعقه

با توجه به گزارش کارگروه CIGRE کلیه پارامترهای صاعقه (پارامترهایی همچون شکل موج، حداکثر دامنه، زمان پیشانی موج ضربه صاعقه) را می‌توان با استفاده از یک توزیع لگاریتم طبیعی با تابع چگالی احتمالی به فرم رابطه (۱) تقریب زد [۱۳]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta x}} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

$$Z = \frac{\ln(x/m)}{\beta}$$

که  $\beta$  برابر با انحراف معیار لگاریتمی و  $m$  برابر با مقدار میانه هست. تقریباً به طور هم‌زمان در سال ۱۹۴۱ استکولنیکف، بروس و گولد رابطه (۲) را که شامل دو تابع نمایی است، برای محاسبات در مورد جریان ناشی از صاعقه پیشنهاد کردند [۱۷].

$$i(t) = I_0 [e^{-at} - e^{-bt}] \quad (2)$$

مقادیر  $a$ ،  $b$  و  $I_0$  با توجه به مقادیر زمان خیز مناسب، زمان رسیدن به ۵۰ درصد و ماکزیمم جریان محاسبه می‌شود. در بسیاری از مراجع برای توصیف تقریبی و مطلوب شکل موج جریان صاعقه از مجموع دو تابع هایدلر [۱۵] با پارامترهای متفاوت استفاده می‌شود که برای توصیف تقریبی و مطلوب شکل موج جریان صاعقه مناسب می‌باشد.

برای ارزیابی اثر برخورد مستقیم صاعقه از یک منبع جریان CIGRE موازی با یک مقاومت به عنوان مقاومت پایه کانال صاعقه استفاده می‌شود.

#### ۲-۲- برخورد غیرمستقیم صاعقه

هرگاه صاعقه به ساختمان‌ها، زمین و درختان مجاور خطوط توزیع برخورد کند، اضافه ولتاژهای معروف به اضافه القایی کانال صاعقه لازم است که میدان‌های الکترومغناطیسی در تمام فضا شناخته شده باشند. مدل‌های

<sup>2</sup> Modified Transmission Line Exponential

<sup>1</sup> Modified Transmission Line Linear

پراکندگی مطابق رابطه (۶) بیان می‌شود [۶]:

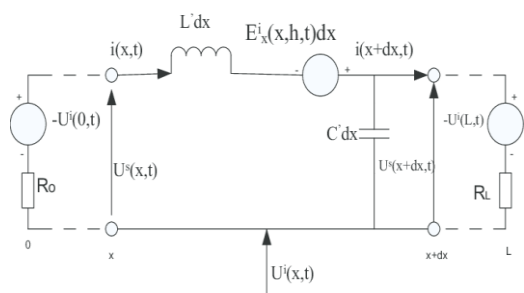
$$\frac{\partial u^s(x,t)}{\partial x} + L' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = E_x^i(x,h,t) \quad (۶)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + C' \frac{\partial u^s(x,t)}{\partial t} = 0$$

که در این روابط  $E_x^i(x,h,t)$  مؤلفه افقی میدان الکتریکی تابشی در طول محور Xها و در ارتفاع خط است  $u^s(x,t)$ . ولتاژ پراکندگی بوده و به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$u^s(x,t) = -\int_0^h E_z^s(x,z,t) dz \quad (۷)$$

که  $E_z^s(x,z,t)$  مؤلفه عمودی میدان پراکنده شده است.



شکل ۲- مدار معادل دیفرانسیلی خط مطابق مدل آگراوال [۶].

### ۲-۲-۴- ارزیابی اثر ضربه غیرمستقیم صاعقه

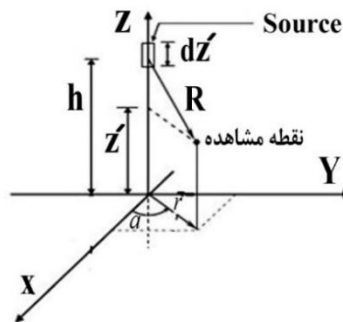
برای مدل‌سازی برخورد مستقیم صاعقه در مطالعات، از یک منبع جریان ضربه و برای نمایش برخورد غیرمستقیم، از منبع ولتاژ استفاده می‌گردد. برای مدل‌سازی اضافه ولتاژ ناشی از ضربه غیرمستقیم از کد LIOV<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. LIOV شامل محاسبات ضربه الکترومغناطیسی صاعقه بر مبنای مدل کوپلاژ میدان مغناطیسی با خط توزیع ارائه شده توسط Agrawal و همکاران استوار است [۶]. این کد تابعی از پارامترهای مختلفی چون جریان پایه کانال صاعقه برگشتی، سرعت موج برگشتی، ارتفاع و طول خط، محل برخورد صاعقه، امپدانس مشخصه خط و مشخصات الکتریکی زمین است. کد LIOV حاصل تلاش بین‌المللی دانشگاه بولونیا ایتالیا، موسسه فناوری فدرال سوئیس و دانشگاه رم است [۵ و ۶].

### ۳- مدل‌سازی اجزای شبکه

طراحی شبکه توزیع با سطح عایقی مناسب و با رعایت حداکثر صرفه‌جویی اقتصادی مستلزم پیش‌بینی دقیقی از وقوع اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه در شبکه‌های توزیع

[۹]. شکل (۱) چگونگی محاسبات میدان الکترومغناطیسی

در نقطه‌ی مشخصی در اطراف کانال صاعقه را نشان می‌دهد. با شناختن توزیع زمانی و مکانی در طول کانال صاعقه میدان‌های الکترومغناطیسی از رابطه (۵) قابل محاسبه هستند [۹]:



شکل ۱- کانال صاعقه و محاسبات میدان الکترومغناطیسی اطراف آن.

$$E_z(r,t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^H \int_0^{\tau - R/c} \frac{2z'^2 - r^2}{R^5} i(z', \tau - R/c) d\tau dz'$$

$$+ \int_0^H \frac{2z'^2 - r^2}{cR^4} i(z', \tau - R/c) dz' \quad (۵)$$

$$- \int_0^H \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', \tau - R/c)}{\partial t} dz'$$

در این رابطه جملات اول، دوم و سوم به ترتیب میدان‌های الکترواستاتیک، القایی و تشعشی را بیان می‌کنند. همچنین  $r$  فاصله‌ی پای کانال صاعقه تا نقطه‌ی مشاهده و  $R$  فاصله هر جزء دیفرانسیلی کانال صاعقه از نقطه مشاهده است.

### ۲-۲-۳- مدل توزیع

بین میدان‌های الکترومغناطیسی، ولتاژ و جریان القایی در خطوط انتقال رابطه‌ای برقرار می‌شود و این مسئله توزیع است. به‌طور کلی از دو تئوری برای محاسبه‌ی توزیع بین میدان‌های الکترومغناطیسی و خطوط انتقال استفاده شده است. این دو تئوری عبارت‌اند از تئوری خط انتقال و تئوری آنتن. ما در این مقاله از نظریه خط انتقال به روش آگراوال در کد LIOV استفاده کرده‌ایم.

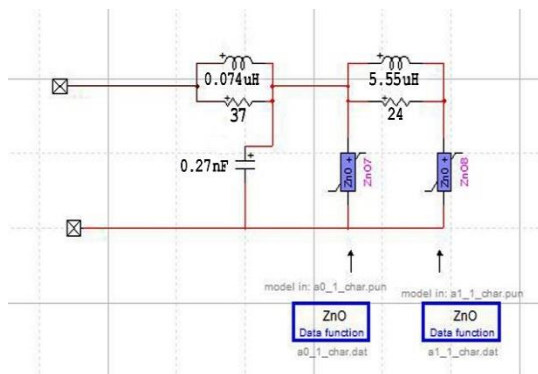
معادله خط انتقال در این مدل با انتگرال‌گیری در مسیر نشان داده شده در شکل (۲) به دست آمده و بر حسب ولتاژ

<sup>۱</sup> Lightning Induce Over-voltage

که  $l$  طول الکتروود،  $a$  شعاع هادی و  $\Delta x$  در این روابط طول هر قسمت در مدل TLM برحسب متر می‌باشند. مقدار  $E_{cr}$  شدت میدان الکتریکی بحرانی است که اغلب بین  $kV/m$   $300-400$  در نظر گرفته می‌شود [۱۸].  $\epsilon_r$  ثابت دی الکتریک نسبی خاک،  $\epsilon_0$  ثابت دی الکتریک خلأ،  $\mu_0$  ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ،  $\rho_s$  مقاومت مخصوص خاک و  $\rho_c$  مقاومت مخصوص هادی برحسب اهم متر می‌باشند. برای ارزیابی اثرات صاعقه بر روی شبکه توزیع بررسی نوع خاک و مقاومت ویژه خاک، ضروری است.

### ۳-۲- مدل سازی برق گیر

برای حفاظت از ترانسفورماتور در برابر اضافه ولتاژهای گذرا از برق گیر اکسید روی در اولیه و حتی در ثانویه ترانسفورماتور استفاده می‌شود. مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی برق‌گیرها ارائه شده است. مهم‌ترین مدل‌های وابسته به فرکانس برق‌گیر عبارتند از: مدل IEEE، مدل Pinceti و مدل Fernandez [۱۹] و [۲۰]. مدل IEEE به نسبت سایر مدل‌ها از اعتبار بیشتری برخوردار است و در این مدل پارامترهای ساختاری و الکتریکی لازم برای مدل‌سازی مدار فرکانس بالای برق‌گیر به راحتی در دسترس است. لذا در این مقاله از مدل IEEE استفاده شده است [۲۱].



شکل ۳- مدل برق‌گیر پیشنهادی IEEE [۲۱].

در مدل IEEE همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، مشخصه غیرخطی ولتاژ جریان با دو مقاومت غیرخطی  $A_0$  و  $A_1$  مدل شده است. پارامترهای مدل فرکانسی برق‌گیر از روابط (۱۴) الی (۱۸) به دست می‌آیند:

$$L_0 = \frac{0.2 d}{n} \mu H \quad (14)$$

پیچیده است، که این پیش‌بینی دقیق خود مستلزم مدل‌سازی دقیقی از رفتار اجزای شبکه توزیع در حالت گذرا و فرکانس بالا هست.

### ۳-۱- مدل سازی سیستم زمین

روش خط انتقال (TLM) روشی است که برای مدل‌سازی دقیق الکتروودهای زمین تحت فرکانس‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش برای حل معادلات ماکسول در انتشار امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. و در واقع یک روش عددی دیفرانسیلی است، که می‌تواند هم در حوزه‌ی زمان و هم در حوزه‌ی فرکانس، مورد استفاده قرار گیرد. روش خط انتقال به‌طور قابل قبول و با دقت مناسبی می‌تواند پدیده یونیزاسیون خاک را لحاظ کند [۱۴] که این امر برای نیل به پاسخ‌های دقیق‌تر ضروری است. برای محاسبه مقاومت متغیر با زمان سیستم زمین از روابط (۸)، (۹) و (۱۰) استفاده می‌شود.

$$R(t) = R_T \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{I(t)}{I_g}}} \quad (8)$$

$$I_g = \frac{E_{cr} \cdot \rho_s}{2 \cdot \pi \cdot R_T^2} \quad (9)$$

$$R_T = \frac{\rho_c \cdot \Delta x}{\pi \cdot a^2} \quad (10)$$

$I(t)$  جریان الکتروود است که از صاعقه ناشی می‌شود و  $I_g$  مقدار حد جریانی است که یونیزاسیون خاک از آن آغاز می‌گردد (هر دو برحسب آمپر). مقدار رسانایی برای الکتروود عمودی مطابق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

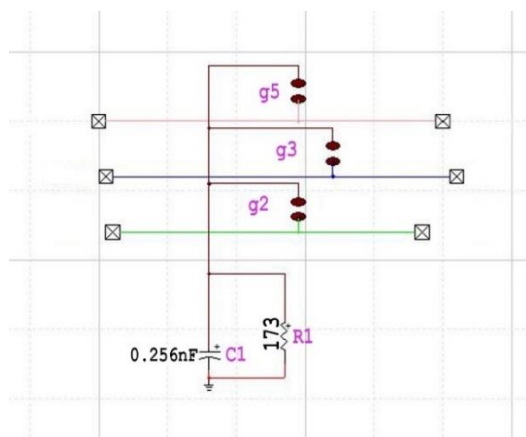
$$G(t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta x}{\rho_s \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot l}{a}\right)} \sqrt{1 + \frac{I(t)}{I_g}} \quad (11)$$

همچنین خازن و اندوکتانس معادل برای الکتروود عمودی از روابط (۱۲) و (۱۳) استفاده می‌شود.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \Delta x}{2 \cdot \pi} \ln\left(\frac{2 \cdot l}{a}\right) \quad (12)$$

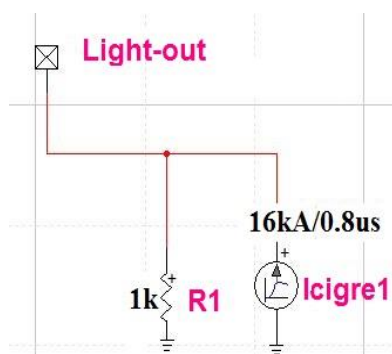
$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \Delta x}{\ln\left(\frac{2 \cdot l}{a}\right)} \quad (13)$$

<sup>1</sup> Transmission Line Model

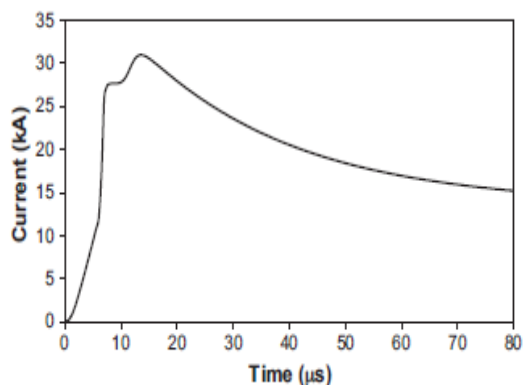


شکل ۵- مدل مداری پایه و مقره [۴] و [۲۳].

جدول ۱ مقادیر مربوط به موج‌های صاعقه استاندارد اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مورو دو کاشیمبو<sup>۱</sup> و کوه سن سالواتوره<sup>۲</sup> را نشان می‌دهد [۲۵]. همچنین شکل (۷) نمودار جریانی صاعقه مدل شده برای صاعقه با پیک جریانی ۳۱ کیلوآمپر را نشان می‌دهد. سرعت انتشار موج صاعقه برگشتی برابر با  $1/8 \times 10^8$  m/s و ارتفاع کانال صاعقه برابر با ۲۰۰۰ m می‌باشد [۴].



شکل ۶- مدل مداری موج صاعقه [۲۳] و [۲۴].



شکل ۷- مدل جریانی صاعقه [۴].

$$R_0 = \frac{100 d}{n} \Omega \quad (15)$$

$$L_1 = \frac{15 d}{n} \mu H \quad (16)$$

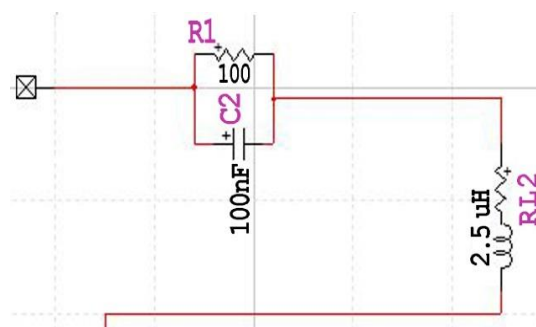
$$R_1 = \frac{65 d}{n} \Omega \quad (17)$$

$$C = \frac{100 n}{d} PF \quad (18)$$

که  $d$  و  $n$  به ترتیب برابر با طول برق‌گیر بر حسب متر و تعداد ستون‌های موازی برق‌گیر متشکل از قرص‌های اکسید فلزی (ZnO) می‌باشند.

### ۳-۳- مدل بار

در این تحقیق از مدل بار عمومی ارائه‌شده در [۲۲] استفاده شده است. این مدل به خوبی رفتار گذرای فرکانس بالای مصرف‌کننده را مدل می‌کند. شکل (۴) مدل بار عمومی (RLC) را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مدل بار RLC [۲۲].

### ۳-۴- مدل پایه (تیر) و مقره

برای مدل‌سازی پایه (تیر) از مدل ارائه شده در [۲۳] و برای شبیه‌سازی مقره از مدل فلش آور سوئیچ استفاده شده است. برای سادگی، فرض شده است ولتاژ تحمل مقره در برابر موج ضربه صاعقه (CFO) به اندازه کافی بالا باشد که شکست عایقی رخ ندهد [۴]. شکل (۵) مدل مداری پایه و مقره برای هر یک از پایه‌های بتنی را نشان می‌دهد.

### ۳-۵- مدل صاعقه

برای مدل‌سازی اثر برخورد مستقیم صاعقه از یک منبع جریان CIGRE موازی با یک مقاومت به‌عنوان مقاومت پایه کانال صاعقه، مانند آنچه در شکل (۶) نشان داده شده است، استفاده می‌شود [۹]. همچنین مقاومت کانال صاعقه معمولاً  $1 k\Omega$  در نظر گرفته می‌شود [۲۳] و [۲۴].

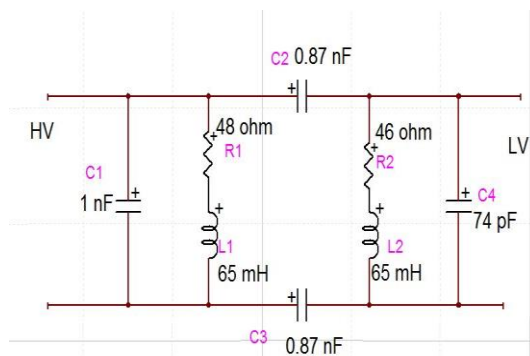
<sup>2</sup> Mount San Salvatore

<sup>1</sup> Morro Do Cachimbo

تبدیل  $Z$ ، تخمین پارامتر، روش تحلیل مدال)، که مستلزم آزمایش‌ها متعدد بر روی ترانسفورماتورها و اندازه‌گیری‌های دقیق است. لذا با توجه به مباحث فوق استفاده از مدل‌های ترانسفورماتور استاندارد موجود در EMTP، برای بررسی حالت‌های گذرای فرکانس بالا مناسب نیست، لذا در این مقاله با توجه به شکل (۸) از مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور استفاده شده است. این مدل برای طیف فرکانسی مختلف مناسب است. این مدل از اعتبار خوبی برخوردار است و در بسیاری از مطالعات مربوط به صاعقه از این مدل استفاده شده است [۱۲].

#### ۴- الگوریتم پیشنهادی روش کار

شکل (۹) پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی روش کار در این مقاله را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید یک روش جدید و ابتکاری برای ارزیابی اثرات دقیق ولتاژ ناشی از صاعقه، اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه ارائه شده است و سپس با مدل‌سازی دقیق تمامی اجزای شبکه و با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه، ارزیابی دقیقی از اثرات اضافه ولتاژهای صاعقه به دست می‌آید که مطابق آن می‌توان در مورد هماهنگی عایقی، انتخاب سطح ولتاژی پایه (BIL) و حذف و اضافه نمودن برق‌گیرها در شبکه‌ی توزیع اظهارنظر نمود. این الگوریتم صرفاً بر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه استوار می‌باشد.



شکل ۸- مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور [۱۲].

#### ۵- اعتبارسنجی

به منظور بررسی صحت مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌های مربوط به اضافه ولتاژهای به وجود آمده ناشی از صاعقه در شبکه توزیع، شبکه‌ی نمونه توزیع در کشور برزیل که در

جدول ۱- مشخصات موج صاعقه استاندارد

$I_p$ (kA)	$T_{10}$ ( $\mu$ s)	$T_{50}$ ( $\mu$ s)	$d/d_{t,max}$ (kA/ $\mu$ s)
۴/۸	۲	۱۰۰	۴۰
۱۲	۰/۵	۴۸/۴	۴۰
۱۶	۰/۶	۱۶/۶	۳۰
۳۱	۴/۶	۷۵	۲۴/۴
۴۵/۳	۵/۲	۵۸/۳	۲۰/۲

#### ۳-۶- مدل خط و کابل

از آنجایی که یکی از روش‌های پیشنهادی برای مقابله با اضافه ولتاژهای گذرا، اتصال کابل به خط هوایی به خصوص نقاط اتصال به ترانسفورماتور است [۱۲ و ۲۰]. لذا در این مقاله به بررسی و تحلیل اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد موج صاعقه به خطوط هوایی متصل به کابل پرداخته است. برای کابل XLPE نوع Pipe از مدل جی-مارتی<sup>۱</sup> که مشخصه‌ی ادمیتانس و ثابت انتشار را با توابع مستدل و مناسب تقریب می‌زند، استفاده شده است. مشخصات فنی کابل XLPE در جدول ۲ آورده شده است. برای مدل‌سازی خط نیز از مدل FD در نرم‌افزار EMTP\_RV استفاده شده است. این مدل بر مبنای روش‌های تجزیه‌ی مُدال هست و نسبت به دیگر مدل‌های موجود، اگرچه در محاسبات کندتر عمل می‌کند، اما دقیق‌تر است. این مدل، امپدانس وابسته به فرکانس را در نظر می‌گیرد و وابستگی فرکانسی را با تقریب زدن توسط توابع معقول، در هر حالت معرفی می‌کند [۲۶].

جدول ۲- مشخصات فنی کابل XLPE.

راکتانس سلفی	ضریب ضربه دی‌الکتریک	شعاع عایق‌بندی (mm)	سطح مقطع (mm*mm)
۵۰ در هرترز (ohm/km)	۲/۶	۲۸	۳*۱۲۰
۰/۱۰۸			

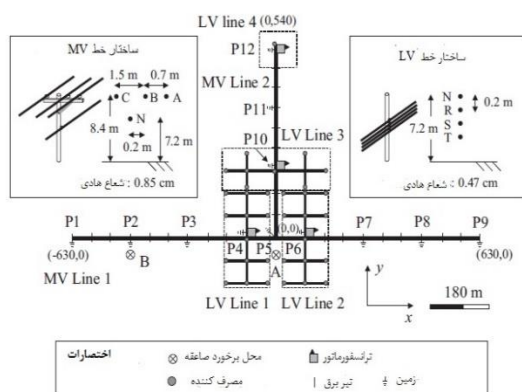
#### ۳-۷- مدل ترانسفورماتور

توزیع ولتاژ گذرا و نوسان در نقاط مختلف ترانسفورماتور حائز اهمیت است. روش‌های مدل‌سازی به دو بخش عمده تقسیم‌بندی می‌شوند:

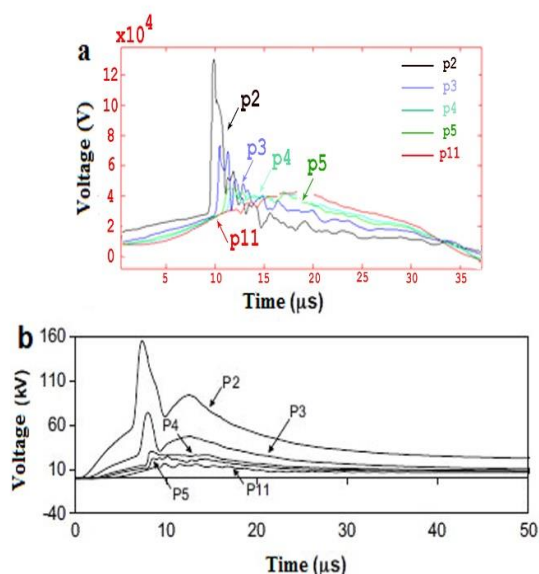
- روش مدل‌سازی پارامتری با جعبه خاکستری (مدل‌های مشروح و خط انتقال چند سیمه) که مستلزم محاسبات دشوار و پیچیده و حجم محاسبات بالا است.
- روش مدل‌سازی غیرپارامتری با جعبه سیاه

<sup>۱</sup> J. Marti

فرض می‌شود که از سیستم زمین TN-C استفاده شده است. بار مصرفی از یک سمت به فاز و از سمت دیگر به نول متصل است. هر خط LV متشکل از چهار سیم عمودی بافاصله ۰/۲ متری است. خط LV1 و LV2 یکسان هستند. خط LV1 شامل دوازده مصرف‌کننده سه فاز به‌عنوان C1-1 تا C1-12 هست. خط LV3 شامل نه مصرف‌کننده و خط LV4 شامل یک مصرف‌کننده هست.



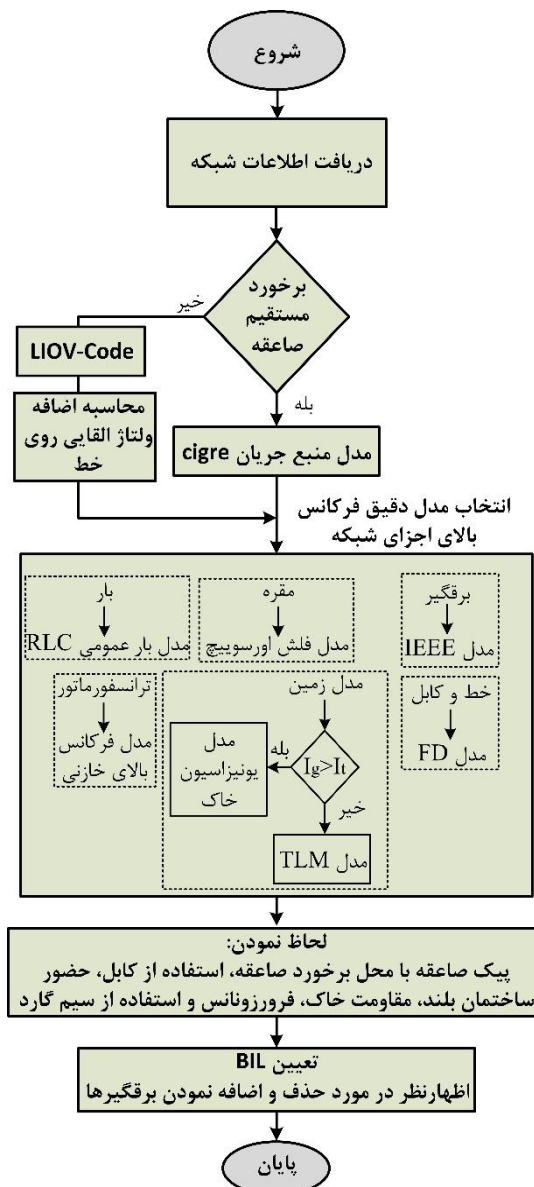
شکل ۱۰- شبکه‌ی نمونه‌ی توزیع در [۴].



شکل ۱۱- اضافه ولتاژ فاز به زمین پایه‌های (MV) محل برخورد صاعقه در نقطه‌ی B) الف) نتایج شبیه‌سازی در [۴] ب) نتایج شبیه‌سازی در EMTP-RV.

شکل (۱۰) شبکه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. محل برخورد صاعقه در نقطه‌ی B همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، در فاصله‌ی ۵۰ متری از خط MV1 و در نزدیکی تیر P2 می‌باشد. موج صاعقه ارائه شده دارای مقدار پیک ۳۱kA و بیشترین شیب موج ۲۴/۴kA/μs است. لازم به ذکر است تمامی شبیه‌سازی‌ها در [۴] توسط

[۴] مورد مطالعه قرار گرفته و با نرم‌افزار EMTP-RV پیاده‌سازی شده است. این شبکه متشکل از دو خط MV است که از طریق ترانسفورماتور توزیع به چهار خط LV متصل می‌باشند. ترانسفورماتور توسط برق‌گیر اکسید روی (ZnO) در دو طرف اولیه و ثانویه خود محافظت می‌شود.



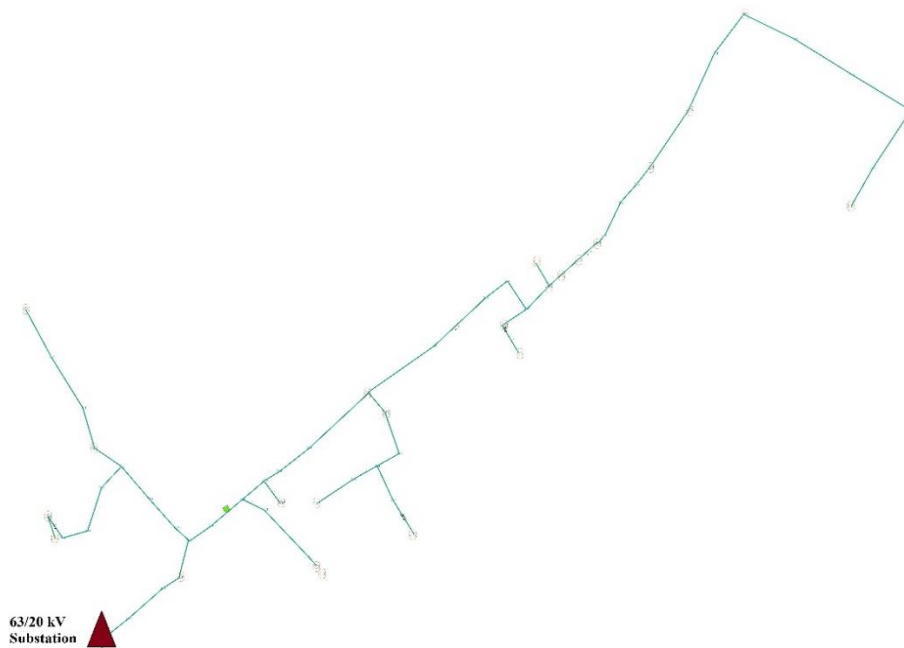
شکل ۹- پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی.

خطوط MV دارای یک هادی نول می‌باشد که در فاصله-های ۱۸۰ متری در پایه‌های P1, P2, P3, P5, P7, P8, P9, P10, P11 توسط یک میله‌ی زمین به طول ۲/۴ متر زمین شده‌اند. نقطه اتصال خط MV1 با خط MV2 در تیر P5 هست. تیرهای P4 و P6 توسط سه میله‌ی زمین ۲/۴ متری با فاصله‌ی ۳ متری از هم زمین شده‌اند و فاصله این تیرها از تیر P5 نیز ۹۰ متر است. برای شبکه‌ی سه‌فاز LV



#### ۶-۱- نمایش شبکه مورد مطالعه و مشخصات آن

به منظور بررسی اضافه ولتاژهای به وجود آمده ناشی از صاعقه در شبکه توزیع یک فیدر نمونه با نام راه آهن از شرکت توزیع برق مازندران (امور برق نکا) انتخاب شده که در شکل (۱۲) فیدر نمونه مورد مطالعه نشان داده شده است. مشخصات این فیدر در جدول ۳ ارائه شده است. ترانسفورماتورها توسط یک الکتروود میله‌ای مسی به طول ۳ متر زمین شده‌اند. مقاومت مخصوص خاک در نظر گرفته شده برابر با  $15-30 \Omega.m$  که مربوط به زمین‌های مرطوب و باتلاقی است. همچنین مقاومت مخصوص هادی مس برابر با  $10^{-1} \times 1/7241 \Omega.m$  در نظر گرفته شده است. مشخصات برق گیر استفاده شده در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۱۲- فیدر نمونه مورد مطالعه.

نرم افزار ATP انجام شده است.

نتایج حاصل از شبیه سازی شبکه مذکور در نرم افزار EMTP-RV با توجه به شکل (۱۱) کاملاً با نتایج حاصل از شبیه سازی شبکه در نرم افزار ATP که در [۴] ارائه شده است، همخوانی دارد.

#### ۶-۲ شبیه سازی شبکه مورد مطالعه و ارائه نتایج

در این بخش با شبیه سازی تمامی اجزا و پارامترهای یک فیدر نمونه از شبکه ی توزیع برق ایران، حساسیت اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه به پارامترها و اجزای شبکه ی توزیع مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۶-۲- سیستم زمین به ازای مقاومت های ویژه مختلف خاک

در شکل (۱۳) سیستم زمین شبکه با مقاومت ویژه خاک بین ۳۰ تا ۶۰ اهم متر و ۶۰ تا ۱۰۰ اهم متر برای برخورد مستقیم صاعقه ۱۲ کیلو آمپری به میانه خط بررسی شده است. شکل (۱۳) ولتاژ پایه شماره ی ۲۵ را که شامل ترانسفورماتور فاقد برق گیر و در فاصله ۱۵۰ متری محل برخورد صاعقه قرار دارد، نشان می دهد. در جدول ۵ مقدار حداکثر دامنه اضافه ولتاژ پایه ی ۲۵ برای حالت های مختلف مقاومت ویژه خاک آورده شده است. نتایج نشان می دهد با کاهش مقاومت ویژه خاک و در نتیجه کاهش مقاومت زمین، اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه بر روی ترانسفورماتورها

#### جدول ۳- مشخصات فیدر راه آهن.

مشخصات	تعداد	واحد
پایه بتنی ۱۲ یا ۱۴ متری	۶۸	اصله
طول خط	۲۱۰۵	متر
پست هوایی	۲۵	پست
پست زمینی	۱	پست
ترانسفورماتور فاقد برق گیر	۳	دستگاه

#### جدول ۴- مشخصات فنی برق گیر مورد مطالعه (توس).

ولتاژ نامی (kV)	۲۴
ولتاژ کار دائم (kV)	۲۰
ارتفاع ستون برق گیر با محفظه سلیکون رابر (m)	۰/۳۷
تعداد ستون های برق گیر	۱

به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

جدول ۵- اضافه ولتاژ پایه شماره‌ی ۲۵ در اثر برخورد صاعقه ۱۲ کیلوآمپری به میانه خط.

مقاومت ویژه خاک ( $\Omega.m$ )	۱۵-۳۰	۳۰-۶۰	۶۰-۱۰۰
حداکثر دامنه ولتاژ (kV)	۱۰۸	۱۴۲	۱۹۲

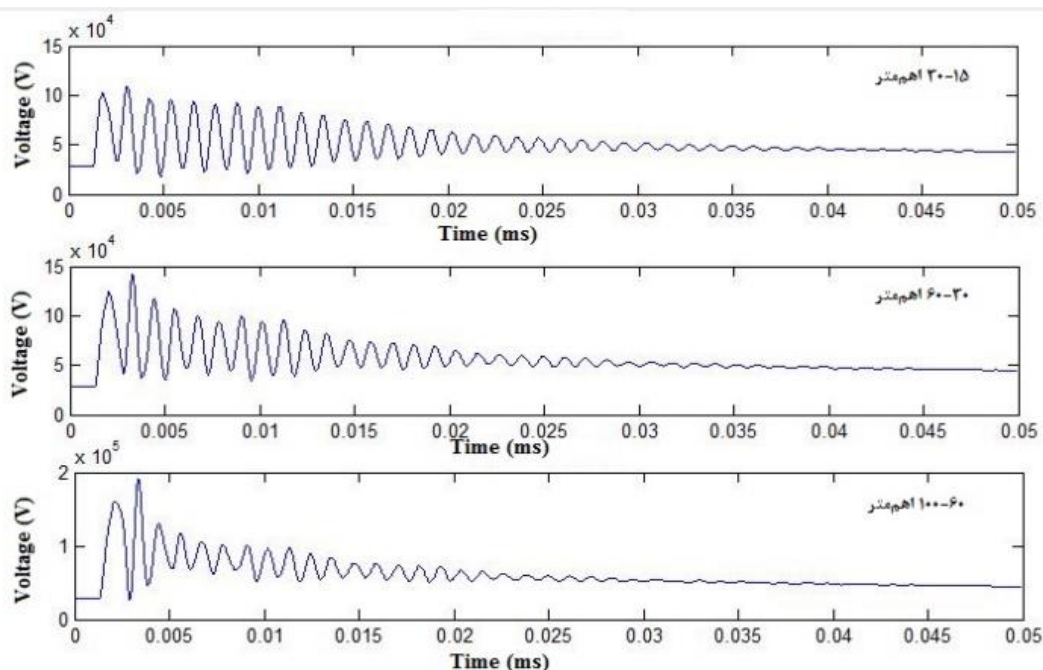
ندارد، بلکه به نحوه سیم‌کشی، حضور دستگاه‌های حفاظتی و رفتار تصادفی بار نیز بستگی دارد. در این بخش تلاش شده است با در نظر گرفتن سه نوع مدل بار مختلف، یعنی:

- مدل بار عمومی [۲۲]
- مدل بار اهمی (۳۰ اهمی) [۴]
- مدل بار مدارباز (open-circuited)

حساسیت اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه به مدل بار مورد بررسی قرار گیرد.

### ۳-۶- مدل بار

در شرایط واقعی تأثیری که صاعقه بر روی تأسیسات مصرف‌کننده می‌گذارد فقط به نوع بار مصرفی بستگی



شکل ۱۳- ولتاژ پایه شماره‌ی ۲۵ به ازای مقاومت ویژه خاک مختلف.

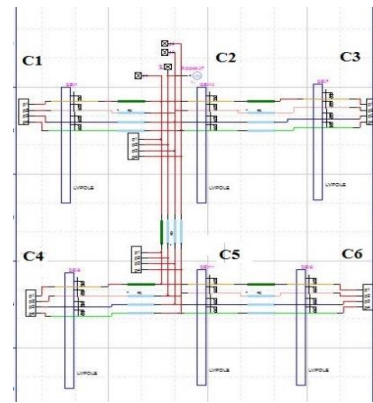
محاسبه‌شده در مدل مدارباز یک رفتار نوسانی شدیدی را نشان می‌دهد که در منحنی‌های مربوط به مدل‌های دیگر نمی‌بینیم. جدا از نوسانی بودن شکل موج ولتاژ در مدل بار مدارباز، مقدار پیک ولتاژ ایجادشده نیز در مقایسه با مدل‌های دیگر خیلی زیاد هست. این موضوع بیان می‌کند اگرچه مدل مدارباز برای اجتناب از برخی پیچیدگی‌های موجود در مدل‌ها مناسب است، اما ممکن است منجر به اضافه ولتاژهای خیلی بزرگ شود. اضافه ولتاژ ایجادشده در مدل بار اهمی تقریباً برابر با (حتی کمتر از) اضافه ولتاژ ایجادشده در مدل RLC که مدل مرجع این مقاله است، است. این نتایج نشان می‌دهد که برای بررسی دقیق اضافه ولتاژهای ناشی صاعقه در شبکه LV انتخاب صحیح مدل بار مناسب مهم است.

شکل (۱۴) شبکه فشار ضعیف شامل ۶ مصرف‌کننده‌ی C1-C6 را نشان می‌دهد. پایه‌ی فشار ضعیف متصل به مصرف‌کننده C2 از طریق پایه شماره‌ی ۵ شامل ترانسفورماتور ۴kV، ۲۰٪، شبکه فشار متوسط را به شبکه فشار ضعیف متصل می‌کند.

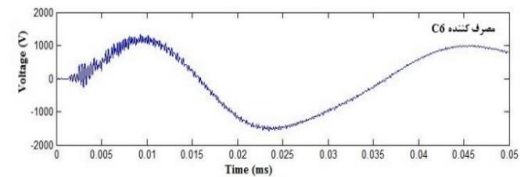
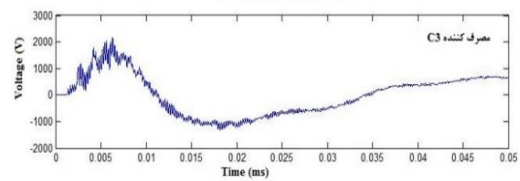
همان‌طور که در شکل‌های (۱۵) الی (۱۷) نشان داده شده است، اضافه ولتاژهای ایجادشده ناشی از برخورد مستقیم موج صاعقه‌ی ۱۶ کیلوآمپری در ابتدای خط، به شدت به مدل بار مصرفی وابسته‌اند. به‌طور نمونه حداکثر دامنه اضافه ولتاژ برای مصرف‌کننده C3 با در نظر گرفتن مدل بار عمومی، اهمی و مدارباز به ترتیب برابر با ۲، ۱/۶ و ۱۲/۲ کیلوولت است. به‌طور خاص، اضافه ولتاژ فاز به نول

## ۴-۶- اثر ساختمان‌های بلند

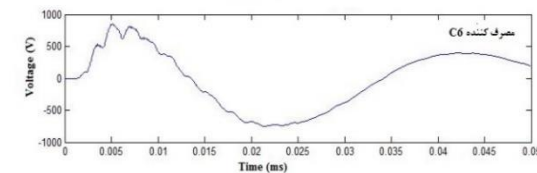
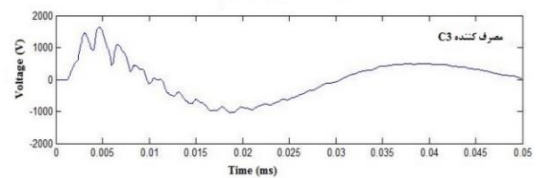
با برخورد صاعقه به ساختمان‌های اطراف خطوط هوایی شبکه‌ی توزیع، به دلیل کوپلینگ میدان‌های الکترومغناطیسی صاعقه و خطوط هوایی، اضافه ولتاژهای القایی در شبکه توزیع ایجاد می‌گردد. این اضافه ولتاژهای القایی به شدت به ارتفاع ساختمان، فاصله ساختمان از خط و هدایت الکتریکی ساختمان وابسته‌اند. اما تا به حال به ندرت این مسئله مورد بررسی قرار گرفته است [۷ و ۸]. در اکثر مطالعات، ساختمان به عنوان هادی الکتریکی ایده‌آل فرض شده است. البته با توجه به عواملی چون ارجحیت پی ساختمان نسبت به انواع دیگر الکترودها به جهت سطح تماس وسیع بتن با زمین و در نتیجه کم شدن مقاومت آن، مقاومت ویژه بتن (در حدود ۳۰ الی ۹۰ اهم‌متر) و عبور جریان‌های الکتریکی از داخل میلگردها این فرض تا حدودی درست هست. در این بخش، اثر ساختمان‌های بلند بر اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه در دو نرم‌افزار LIOV و CST شبیه‌سازی شده است. در حالت شبیه‌سازی با استفاده از کد LIOV در محیط برنامه‌نویسی JAVA، ساختمان به عنوان هادی ایده‌آل فرض شده و برای مدل‌سازی کانال صاعقه از اطلاعات کانال صاعقه در [۲۷] استفاده شده است. در حالت شبیه‌سازی با نرم‌افزار CST برای مدل‌سازی کانال صاعقه از مدل استوانه‌ای با ماده‌ای به ضخامت ۱mm و رسانایی  $22200 \text{ s/m}$  و برای مدل‌سازی ساختمان از ماده‌ی بتن  $40 \text{ s/m}$  ساله که در کتابخانه‌ی نرم‌افزار موجود است، استفاده شده است [۸]. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار CST در اثر برخورد موج صاعقه ۱۲ کیلوآمپری با پیشانی  $0.5 \mu\text{s}$ ، پشت موج  $4/4 \mu\text{s}$  و شیب ماکزیمم برابر با  $40 \text{ kA}/\mu\text{s}$  به ساختمان با ارتفاع ۲۵ متر در شکل (۱۸) نشان داده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در دو حالت فوق تقریباً شبیه به هم می‌باشند، لذا در این بخش از کد LIOV برای محاسبات اضافه ولتاژهای القایی استفاده شده است. لازم به ذکر است در حل مسئله با کد LIOV از مدل خط انتقال اصلاح‌شده (MTLE) استفاده شده است که میرایی موج صاعقه را نیز لحاظ می‌کند (برخلاف حل مسئله توسط نرم‌افزار CST) و ثابت میرایی برابر با  $\lambda = 2000 \text{ m}$  در نظر گرفته شده [۲۸] و از مدل هایدلر دابل برای مدل‌سازی کانال جریان صاعقه  $16 \text{ kA}$  استفاده شده است که اطلاعات مربوط به آن در جدول ۶ آورده شده است.



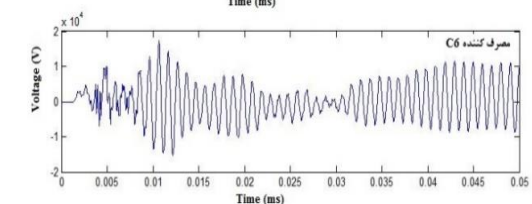
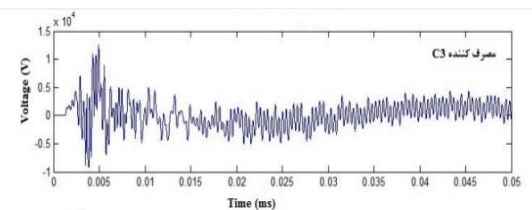
شکل ۱۴- شبکه فشار ضعیف.



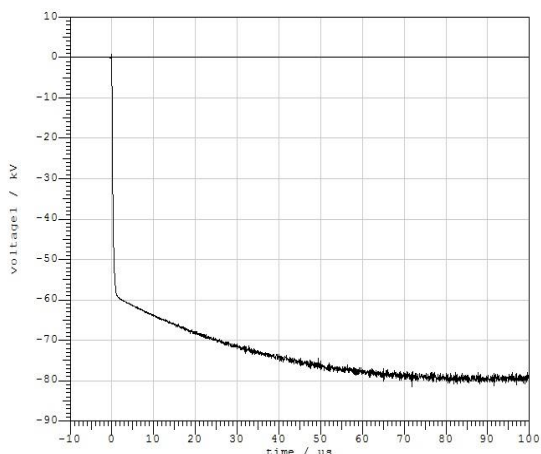
شکل ۱۵- ولتاژ مصرف‌کننده‌ی C3 و C6 برای مدل بار عمومی.



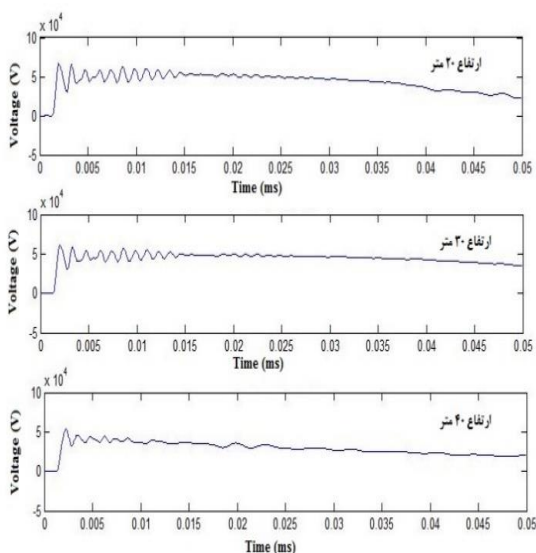
شکل ۱۶- ولتاژ مصرف‌کننده‌ی C3 و C6 برای مدل بار اهمی.



شکل ۱۷- ولتاژ مصرف‌کننده‌ی C3 و C6 برای مدل بار مدار باز (بی‌باری).



شکل ۱۸- ولتاژ القایی خط توزیع در اثر برخورد صاعقه به ساختمان بتنی به ارتفاع ۲۰ متر در فاصله ۱۵ متری از شبکه (در نرم‌افزار CST).



شکل ۱۹- ولتاژ القاشده بر روی پایه ترانسفورماتور P25 به ازای ارتفاعات مختلف ساختمان مجاور.

همان‌طور که در شکل (۲۰) نشان داده شده است اضافه ولتاژ ایجادشده بر روی پایه شماره ۵ که شامل ترانسفورماتور دارای برق‌گیر هست، در اثر برخورد ضربه صاعقه ۱۶ کیلوآمپری به ابتدای خط و با حضور کابل به طول ۶۰ متر در نقطه انشعابی خط به ترانسفورماتور، کاهش محسوسی داشته است. مقدار حداکثر اضافه ولتاژ از ۱۹۰kV به ۱۵۵kV رسیده است.

مطابق شکل (۲۱) با افزایش طول کابل دامنه اضافه ولتاژ بر روی ترانسفورماتور کاهش می‌یابد. مقدار حداکثر دامنه ولتاژ برای استفاده از کابل با طول‌های مختلف در جدول ۷ آمده است.

پایه‌ی شماره ۲۵ شامل ترانسفورماتور فاقد برق‌گیر است. فرض می‌شود صاعقه‌ی ۱۶ کیلوآمپری به ساختمان با ارتفاعات به ترتیب ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر و در فاصله ۱۵ متری از میانه خط برخورد کند. همان‌طور که در شکل (۱۹) نشان داده شده است با افزایش ارتفاع ساختمان، دامنه‌ی ولتاژ القایی بر روی خط کاهش می‌یابد. حداکثر دامنه اضافه ولتاژ القایی پایه‌ی شماره ۲۵ برای ارتفاعات مختلف ساختمان (۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر) به ترتیب برابر با (۶۶، ۶۰ و ۵۳ کیلوولت) است. با توجه به نقش ساختمان‌های بلند اطراف شبکه‌ی توزیع در کاهش دامنه‌ی اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه، می‌توان برخی از برق‌گیرهای ترانسفورماتورهای هم‌جوار ساختمان‌های بلند را حذف نمود.

جدول ۶- مقادیر پارامترهای دو تابع نمایی مدل هایدلر برای جریان صاعقه ۱۶kA [۲۵].

k	$I_{0k}$ (kA)	$\tau_{1k}$ ( $\mu$ s)	$\tau_{2k}$ ( $\mu$ s)	$n_k$
۱	۱۵/۴	۰/۶	۴	۳/۴
۲	۷/۲	۴	۱۲۰	۲

#### ۶-۵- استفاده از کابل متصل به ترانسفورماتور

با استفاده از کابل در محل اتصال خطوط انتقال به ترانسها، اندازه و شکل موج اضافه ولتاژهایی که به پایه‌های ترانسفورماتور توزیع می‌رسند، به طرز قابل توجهی تعدیل می‌شود. به سبب اختلاف قابل‌ملاحظه امپدانس مشخصه کابل و خط، ضربه صاعقه‌ای که در طول خط به سمت ترانسفورماتور پیش می‌رود، شدیداً کاهش می‌یابد. با توجه به ضرایب انتشار و انعکاس موج ولتاژ واردشده در کابل با استفاده از امپدانس‌های موجی کابل و خط هوایی به ترتیب معادل  $50 \Omega$  و  $450 \Omega$ ، محاسبه می‌شوند [۲۰]. ضریب انتشار موج از رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$K_D = \frac{2Z_C}{Z_L + Z_C} = \frac{50 \times 2}{450 + 50} = \frac{100}{500} = 0.2 \quad (19)$$

ضریب انعکاس موج از رابطه (۲۰) به دست می‌آید.

$$K_R = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} = \frac{450 - 50}{450 + 50} = \frac{400}{500} = 0.8 \quad (20)$$

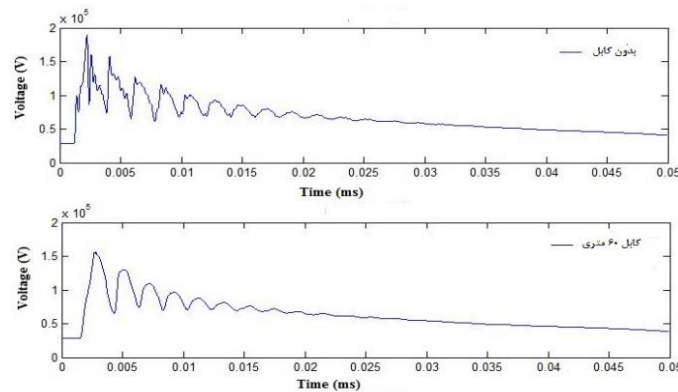
که  $Z_C$  امپدانس موجی کابل و  $Z_L$  امپدانس موجی خط هوایی ۲۰kV می‌باشند.

از صاعقه استفاده از سیم گارد است. پوشیده نیست حداقل فاصله سیم گارد تا هادی‌های فاز با توجه به ساختار پایه‌های شبکه توزیع، کم است. سیم‌های گارد به فاصله ۲۰۰ متری به‌طور مجزا زمین می‌شوند که در شبیه‌سازی، امپدانس سیمی که سیم گارد را به زمین متصل می‌کند (هادی میانی) با یک سلف  $7/2$  میکروهانری و مقاومت زمین با یک مقاومت ۱۰ اهمی مدل می‌شود [۲۹].

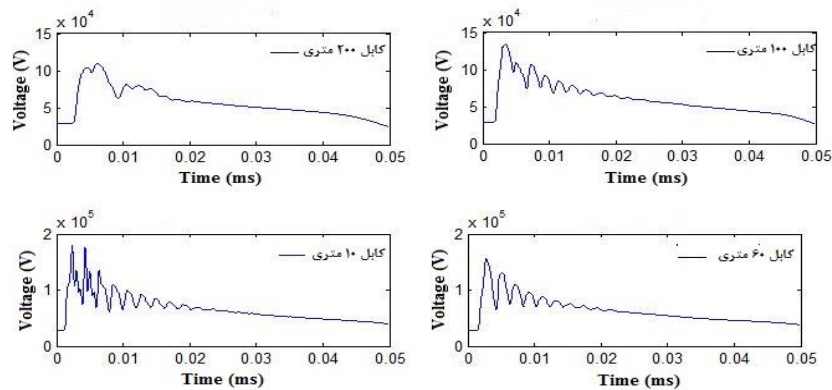
جدول ۷- اضافه ولتاژ انتهای کابل متصل به ترانسفورماتور برای طول‌های مختلف کابل.

طول کابل (m)	۱۰	۶۰	۱۰۰	۲۰۰
حداکثر دامنه ولتاژ (kV)	۱۸۵	۱۵۵	۱۳۴	۱۱۰

۶-۶- استفاده از سیم گارد در مناطق صاعقه خیز یکی از راهکارهای حفاظتی در برابر اضافه ولتاژهای ناشی



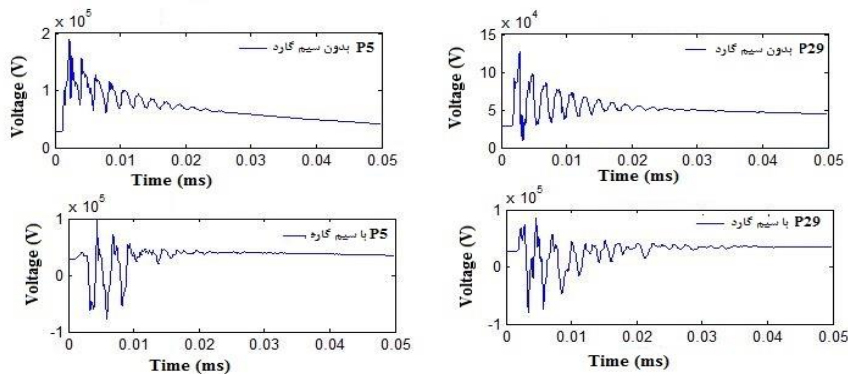
شکل ۲۰- تأثیر استفاده از کابل در نقاط انشعابی ترانسفورماتور بر روی اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه.



شکل ۲۱- ولتاژهای انتهای کابل متصل به ترانسفورماتور به ازای طول‌های مختلف کابل.

صاعقه کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که حداکثر دامنه‌ی اضافه ولتاژ برای پایه‌ی شماره ۵ از  $188kV$  به  $10kV$  و برای پایه‌ی شماره ۲۹ از  $128kV$  به  $87kV$  تغییر کرده است.

یک صاعقه استاندارد ۱۶ کیلوآمپری به ابتدای خط برخورد می‌کند. با استفاده از سیم گارد همان‌طور که در شکل (۲۲) نشان داده شده است دامنه‌ی اضافه ولتاژهای ناشی از



شکل ۲۲- تأثیر استفاده از سیم گارد بر اضافه ولتاژهای پایه‌های P5 و P29.

## ۷- اظهار در مورد حذف و اضافه نمودن برق‌گیر

### در شبکه نمونه

برای اظهارنظر در مورد حذف و اضافه نمودن برق‌گیر لازم به ارزیابی اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه، کلیدزنی و یا ایجاد خطا بر روی شبکه می‌باشد. در این بخش با تمرکز بر اضافه ولتاژهای احتمالی ناشی از صاعقه و با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای فوق‌الذکر و همچنین در نظر گرفتن بدترین شرایط اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه، یعنی برخورد مستقیم صاعقه ۱۲ کیلوآمپری و برخورد غیرمستقیم موج صاعقه ۳۱ کیلوآمپری، در مورد حذف و اضافه نمودن برق‌گیرهای شبکه اظهارنظر می‌شود. لازم به ذکر است دلیل انتخاب چنین این شکل موج‌ها با توجه به استاندارد بودن این امواج و پیش‌بینی بدترین شرایط صاعقه بر شبکه می‌باشد. لذا با توجه به موارد مطروحه در این پژوهش، در فیدر نمونه راه‌آهن، ۵ مورد از ۲۳ مورد برق‌گیر قابل حذف خواهد بود. بر طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی: حداکثر دامنه اضافه ولتاژ ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه بر روی پایه شماره ۳۷ شامل ترانسفورماتور هوایی بانام "رفاه ۵" به دلیل حضور ساختمان‌های بلند در حریم ترانسفورماتور، ۱۱۳ کیلوولت هست که از مقدار BIL شبکه (۱۲۵ کیلوولت) کمتر است. لذا می‌توان برق‌گیر این ترانسفورماتور را حذف نمود. حداکثر دامنه اضافه ولتاژ ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه بر روی پایه شماره ۱۲ شامل ترانسفورماتور هوایی با نام "مجتمع فلاحی و احمدآبادی" به دلیل حضور ساختمان‌های بلند در حریم ترانسفورماتور، ۱۰۵ کیلوولت است. حداکثر دامنه اضافه ولتاژ ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه بر روی پایه شماره ۱۶ شامل ترانسفورماتور هوایی با نام "مجتمع مهتاب" به دلیل حضور ساختمان‌ها و درختان بلند در حریم ترانسفورماتور، ۱۰۵ کیلوولت است. حداکثر دامنه اضافه ولتاژ ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه بر روی پایه شماره ۱۹ شامل ترانسفورماتور هوایی بانام "آپارتمان پویا" به دلیل حضور ساختمان‌ها و درختان بلند در حریم ترانسفورماتور، ۱۰۴ کیلوولت است. حداکثر دامنه اضافه ولتاژ ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه بر روی پایه شماره ۵۶ شامل ترانسفورماتور هوایی با نام "مرتضی منصوری" به دلیل حضور ساختمان‌های بلند در حریم

ترانسفورماتور، ۱۱۲ کیلوولت است. لذا می‌توان برق‌گیر این ترانسفورماتورها را حذف نمود.

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثرات ناشی از اضافه ولتاژهای صاعقه بر روی شبکه‌های توزیع پیچیده با مدل‌سازی فرکانس بالای اجزای شبکه و لحاظ کردن پارامترهای مؤثر بر این نوع از اضافه ولتاژها، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده است همان‌طور که انتظار می‌رفت، اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه به‌شدت وابسته به مقدار پیک جریان موج صاعقه، مدل سیستم زمین و مقاومت ویژه خاک می‌باشند. همچنین مشاهده شد با افزایش طول کابل متصل‌کننده خط هوایی و ترانسفورماتور حداکثر دامنه‌ی اضافه ولتاژها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، که این موضوع باید در انتخاب BIL تجهیزات و روش‌های حفاظت از ترانسفورماتور در برابر امواج گذرا موردتوجه قرار گیرد. پیچیدگی‌های محاسبات اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد غیرمستقیم صاعقه، موجب شده تا کمتر مطالعه‌ای در کشور به این موضوع بپردازد. اما در این مقاله نشان داده شد که برای طراحی مناسب سیستم عایقی خطوط توزیع، ارزیابی عملکرد خطوط در برابر اضافه ولتاژهای القایی ناشی از برخورد غیرمستقیم صاعقه ضروری است. در این مقاله یک الگوریتم پیشنهادی برای ارزیابی اثرات ناشی از صاعقه ارائه شده است. همان‌طور که اشاره شد این الگوریتم صرفاً بر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه متمرکز می‌باشد و برای دقیق‌تر شدن نتایج باید در پژوهش‌های بعدی اثرات گذرای ناشی از کلیدزنی نیز لحاظ شود. با توجه به نقش حفاظتی ساختمان‌های بلند از خطوط توزیع در برابر صاعقه، پیشنهاد می‌شود در مناطق شهری تا فاصله افقی ۴۵ متری ساختمان‌های بلند (با ارتفاع حداقل ۲۰ متر) از شبکه، برق‌گیر ترانسفورماتور مجاور آن حذف شود تا بدین ترتیب بخشی از هزینه‌های اجرا و بهره‌برداری شبکه‌ی توزیع کاهش یابد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده اضافه ولتاژ بار به‌شدت به مدل بار وابسته است و برای بررسی دقیق از اثرات اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه، نیاز به مدل بار مناسب داریم. الگوریتم پیشنهادی و نتایج مطالعات انجام‌شده در این مقاله به دلیل جامعیت مدل‌سازی و دقت جواب‌ها می‌تواند برای شرکت‌های توزیع برق کشور مورد استفاده قرار گیرد.

## مراجع

- [1] F. Napolitano, A. Borghetti, C. Nucci, M. Martinez, G. Lopesb, and G. J. G. Dos Santos, "Protection against lightning overvoltages in resonant grounded power distribution networks", *Electric Power Systems Research*, Vol. 113, August 2014, pp. 121 – 128.
- [2] F. Napolitano, A. Borghetti, M. Paolone and M. Bernardi, "Voltage transient measurements in a distribution network correlated with data from lightning location system and from sequence of events recorder", *Electric Power Systems Research*, Vol. 81, NO. 2, February 2011, pp. 237 – 253.
- [3] M. Araújo, R. Flauzino, R. Altafim, O. Batista, and L. Moraes, "Practical methodology for modeling and simulation of a lightning protection system using metal-oxide surge arresters for distribution lines", *Electric Power Systems Research*, Vol. 118, January 2015, pp. 47 – 54.
- [4] A. Conti, F. Silveira, and S. Visacro, "Lightning over voltages on complex low-voltage distribution networks", *Electric Power Systems Research*, Vol. 85, April 2012, pp. 7 – 15.
- [5] C. Nucci, F. Rachidi, M. Ianoz, and C. Mazzetti, "Lightning induced voltages on overhead lines", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 35, NO. 1, February 1993, pp. 75 – 86.
- [6] F. Rachidi, C. Nucci, M. Ianoz, and C. Mazzetti, "Influence of a lossy ground on lightning induced voltages on overhead lines", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 38, NO. 3, August 1996, pp. 250 – 264.
- [7] A. Borghetti, F. Napolitano, C. Nucci, and F. Napolitano, "Effects of nearby buildings on lightning induced voltages on overhead power distribution lines", *Electric Power Systems Research*, Vol. 94, January 2013, pp. 38 – 45.
- [8] M. Vieira, and J. Janiszewski, "Propagation of lightning electromagnetic fields in the presence of buildings", *Electric Power Systems Research*, Vol. 118, January 2015, pp. 101 – 109.
- [9] R. Moini, B. Kordi, and M. Abedi, "Evaluation of LEMP effects on complex wire structures located above a perfectly conducting ground using electric field integral equation in time domain", *IEEE Transactions on EMC*, Vol. 40, NO. 2, May 1998, pp. 154 – 162.
- [10] P. Georgilakis, and A. Kagiannas, "A novel validated solution for lightning and surge protection of distribution transformers", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 63, December 2014, pp. 373 – 381.
- [11] M. Omidiora, and M. Lehtonen "A comparative study on the shielding effect of tree, concrete building on direct lightning strokes to medium voltage distribution line", *Proc. 40th conference in Power Symposium*, Calgary, North American, September 2008, pp. 1-7.
- [12] L. Zhou, and S. Boggs, "Effect of shielded distribution cables on lightning-induced over voltages in a distribution system", *In Power Delivery*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, NO. 2, April 2002, pp. 569 – 574.
- [13] Cigre Working Group 01 of SC 33. (1991). "Guide to Procedure for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines". No. 63.
- [14] D. Gazzana, A. Bretas, D. Dias, M. Tello, and D. Thomas, "The Transmission Line Modeling Method to Represent the Soil Ionization Phenomenon in Grounding Systems", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, NO. 2, February 2014, pp. 505 – 508.
- [15] V. Cooray, "Horizontal Electric Field Above- and Underground Produced by Lightning Flashes", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 52, NO. 4, November 2010, pp. 936 – 943.

- [16] M. Saran, M. Martinez, H. Oliviera, C. Nucci, and M. Palone "Performance analysis of medium voltage overhead distribution line against lightning", roc. 19th CIRED - International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 2007.
- [17] C. Bruce, and R. Golde, "The lightning discharge", Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part II: Power Engineering, Vol. 88, NO. 6, December 1941, pp. 487 – 505.
- [18] J. Martinez, and F. Aranda, "Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, NO. 3, July 2005, pp. 2200 – 2210.
- [19] M. Nafar, G. Solookinejad, and M. Jabbari, "Comparison of IEEE and Pinceti Models of Surge Arresters", Research Journal of Engineering Sciences, Vol. 3, NO. 5, 2014, pp. 32 – 34.
- [20] L. Zhou, and S. Boggs, "Effect of shielded distribution cable on very fast transients", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, NO. 3, July 2000, pp. 857 – 863.
- [21] P. Unahalekhaka, "Simplified Modeling of Metal Oxide Surge Arresters", Energy Procedia, Vol. 56, January 2014, pp. 92 – 101.
- [22] W. Bassi, " High frequency input impedance modeling of low-voltage residential installations - influence on lightning overvoltage simulations results ", Springer Plus Journal, Vol. 3, NO. 1, December 2014, pp. 690 – 701.
- [23] S. Matsuura, T. Noda, A. Asakawa, and S. Yokoyama "EMTP Modeling of a Distribution Line for Lightning Overvoltage Studies", International Conference on Power Systems Transients (IPST), Lyon, France, 2007.
- [24] F. Silveira, and S. Visacro "Evaluation of Lightning-induced Voltages in Low-Voltage Distribution networks", International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguaçu, Brazil, 2007.
- [25] A. De Conti, and S. Visacro, "Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 49, NO. 2, May 2007, pp. 448 – 451.
- [26] A. F. Imece, D. W. Durbak, and H. Elahi, "Modeling Guidelines for Fast Front Transients", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, NO. 1, January 1996, pp. 493 – 506.
- [27] V. A. Rakov, and M. A. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 40, NO. 4, November 1998, pp. 403 – 426.
- [28] A. De Conti, E. Perez, E. Soto, F. Silveira, S. Visacro, and H. Torres, "Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Distribution Lines Including Insulation Breakdown", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, NO. 4, October 2010, pp. 3078 – 3084.
- [29] J. Author1, B. Author2, and K. Author3, "Mitigation of lightning-induced overvoltages in medium Voltage distribution lines by means of periodical grounding of shielding wires and of surge arresters: modeling and experimental validation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, NO. 1, January 2004, pp. 423 – 431.