

## مدل‌سازی خطوط انتقال تحریک شده بر اثر اصابت صاعقه در حوزه فرکانس

حسین پرهیزکار<sup>۱\*</sup>، حسین شایقی<sup>۲</sup>

چکیده	اطلاعات مقاله
در این مقاله مدل‌سازی در حوزه فرکانس یک خط دارای چندین هادی که بر اثر اصابت صاعقه روشن شده، با لحاظ کردن تغییرات پارامترهای خط در امتداد طول آن تعریف شده است. مدل‌سازی خط روشن شده بر روی رابطه تیلور قرار داده شده است در حالی که میدان الکترومغناطیسی تولید شده از روابط مستر و اومان تعریف شده است. الگوریتم تبدیل لاپلاس عددی برای تبدیل فرکانس-زمان بکار برده شده است. برای ارزیابی اولیه روش، نتیجه آن با یک آزمایش منتشر شده قبلی مقایسه شده است. همچنین یک آزمایش نیز برای آنالیز اثر نقطه برخورد بر روی حجم و شکل موج اضافه ولتاژهای گذرای بدست آمده، انجام داده شده است. اثر خط غیر همسان نیز بحث شده است.	دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۰۳ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۸
	<b>واژگان کلیدی:</b> آنالیز حوزه فرکانس، مدل‌سازی خط تحریک شده، حالت گذرای صاعقه، مدل‌سازی خط غیر همسان، تبدیل لاپلاس عددی.

### ۱- مقدمه

مدل‌سازی بر روی روابط تیلور قرار داده شده است که در آن میدان تولیدشده به وسیله منابع توزیع شده متصل در طول خط تقریب زده شده است. ادامه این روش، تکنیکی برای تنظیم یکی کردن منابع جریان متصل انتهای خط است. این روش به ساده‌سازی اساسی آنالیز بدون کاهش در دقت نتایج بدست آمده کمک می‌کند. میدان الکترومغناطیسی تولید شده در اثر اصابت صاعقه از رابطه تعریف شده توسط مستر و اومان [۴] محاسبه می‌شود که اساساً به متغیرهایی که به نقطه برخورد و جریان هجومی برگشتی مربوط هستند وابسته است. در این روش مدل خط روشن شده به وسیله ماتریس ادمیتانس گره خط بدون تحریک، و ارتباط منابع جریان در انتهای خط که نشان دهنده میدان الکترومغناطیسی تولید شده بر اثر اصابت صاعقه است، نشان داده می‌شود. همچنین محاسبه پارامترهای الکتریکی خط که آنالیز آن در حوزه فرکانس

اثر صاعقه که اضافه ولتاژهایی در خطوط انتقال و توزیع ایجاد می‌کند با توجه به نقطه برخورد می‌تواند به دو دسته حادثه صاعقه مستقیم و غیر مستقیم طبقه بندی شود. اگر چه، اصابت صاعقه مستقیم اضافه ولتاژ بیشتری تولید می‌کند [۳-۱]، میدان الکترومغناطیسی تولید شده می‌تواند برای طراحی ابزارهای عایقی و حفاظتی، خصوصاً برای سطح ولتاژ خطوط توزیع حائز اهمیت باشد. به طور معمول، یک خط تحریک‌شده به وسیله میدان الکترومغناطیسی تولیدشده توسط هر منبعی، به عنوان خط روشن شده شناخته می‌شود. در تحقیقات زیادی این مسئله را برای کاربردهای قدرتی و الکترونیکی هم مدل کرده‌اند و هم آنالیز کرده‌اند [۱۶-۴]. این کار، مدل‌سازی خط روشن شده دارای چندین هادی، با توجه به تغییرات پارامترهای خط در امتداد طول آن را در حوزه فرکانس تعریف می‌کند.

\*. پست الکترونیک نویسنده مسئول: Hosein.parihizkar@yahoo.com

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، اردبیل

۲. استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه محقق اردبیلی

پرونیته هستند که به ترتیب از روابط  $Z = R + sL$  و  $Y = G + sC$  بدست می‌آیند. قابل توجه است که برای خط غیر همسان معمولی این ماتریس‌ها تابعی از  $Z$  هستند. همچنین با توجه به اثر پوستی در هادی‌ها و سطح زمین، ماتریس امپدانس وابسته به فرکانس است. از طرف دیگر،  $V_F$  و  $I_F$  بردارهای منابع توزیع شده را نشان می‌دهند که به میدان الکترومغناطیسی تولید شده مربوط هستند.

$$V_F(z, s) = s \begin{bmatrix} \vdots \\ \int_0^{h_i(z)} B_{x,i}(z, s) dy + E_{z,i}(0, s) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$I_F(z, s) = -Y(z) \begin{bmatrix} \vdots \\ \int_0^{h_i(z)} E_{y,i}(z, s) dy \\ \vdots \end{bmatrix}$$

که  $h_i(z)$  ارتفاع هادی  $i$  ام است،  $B_{x,i}(z, s)$  و  $E_{y,i}(z, s)$  به ترتیب اجزای میدان الکتریکی قائم و میدان مغناطیسی مورب هادی  $i$  ام در حوزه لاپلاس هستند. این متغیرها نیز برای خط غیر همسان تابعی از  $Z$  هستند. علاوه بر این،  $E_{z,i}(0, s)$  میدان الکتریکی افقی در سطح زمین است. از مفهوم ماتریس نمائی و کاربرد روش تجزیه، حل رابطه (۱) برای  $\Delta Z$  بخشی از خط در قسمت‌های ماتریس رشته ای  $\varphi(\Delta Z, s)$  مطابق (۲) بدست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} V(z + \Delta Z, s) \\ I(z + \Delta Z, s) \end{bmatrix} = \Phi(\Delta Z, s) \begin{bmatrix} V(z, s) \\ I(z, s) \end{bmatrix} + \int_z^{z+\Delta Z} \Phi(-\tau, s) \begin{bmatrix} V_F(\tau, s) \\ I_F(\tau, s) \end{bmatrix} d\tau \quad (3)$$

که

$$\Phi(\Delta Z, s) = \begin{bmatrix} \cosh(\Psi \Delta x) & -Y_0 \sinh(\Psi \Delta x) \\ -Y_0 \sinh(\Psi \Delta x) & \cosh(\Psi \Delta x) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\Psi$  ثابت حوزه فاز ماتریس انتقال بخشی از خط است که به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$\Psi = M\sqrt{\lambda}M^{-1} \quad (5)$$

انجام می‌گیرد، باعث می‌شود اثرات پوستی در هادی‌ها و سطح زمین محاسبه  $Z$  لحاظ شود. به هر حال، فرم انتگرال-دیفرانسیل معادلات در حوزه زمان با معادلات جبری مناسب در حوزه فرکانس جایگزین می‌شود. الگوریتم تبدیل لاپلاس عددی برای تبدیل زمان-فرکانس استفاده شده است. عملکرد روش نتیجه‌گیری شده به وسیله مقایسه با نتایج آزمایشی از روش کاهش عددی ارزیابی شده است [۹]. سپس، تاثیر نقطه برخورد در حجم و شکل موج اضافه ولتاژهای گذرا در انتهای خط بر روی یک مورد امتحانی آنالیز شده است.

بخش عمده این مقاله بکارگیری و ترکیب روش‌ها و ابزارهای متعدد است، مانند آنالیز مودال، تبدیل لاپلاس عددی، رابطه مستر و اومان بین روابط دیگر، ارائه یک روش در حوزه فرکانس برای مدل‌سازی یک خط تحریک شده بر اثر اصابت صاعقه است.

کارهای قبلی قابلیت‌های مدل حوزه فرکانس را نه تنها به عنوان ابزارهای آنالیز بلکه برای ارزیابی مدل‌های جدید حوزه زمان و تکنیک‌های عددی نشان داده‌اند. این کار به عنوان توسعه قابلیت‌های ابزارهای آنالیز حوزه فرکانس در نظر گرفته شده است که از آنالیز در حوزه زمان نیز می‌تواند با ارزش باشد.

## ۲- مدل‌سازی خط انتقال روشن شده

با توجه به رابطه تیلور [۱۰ و ۱۱]، یک خط انتقال تحریک شده به وسیله میدان الکترومغناطیسی می‌تواند توسط منابع ولتاژهای سری توزیع شده و منابع جریان موازی در طول خط تعریف شود. برای خط دارای چندین هادی، معادلات تلگراف در حوزه لاپلاس به شکل رابطه (۱) تعریف شده است:

$$\frac{dV(z, s)}{dz} = -Z(z, s)I(z, s) + V_F(z, s) \quad (1)$$

$$\frac{dI(z, s)}{dz} = -Y(z)V(z, s) + I_F(z, s)$$

که  $s$  متغیر لاپلاس،  $V(z, s)$  و  $I(z, s)$  بردارهای ولتاژ و جریان در امتداد محور  $Z$  هستند.  $Y(z)$  و  $Z(z, s)$  ماتریس‌های سری امپدانس و موازی کندوکتانس در مبنای

لحاظ شود. اگر خط همسان در نظر گرفته شود، این بخش با ماتریس رشته‌ای خط کامل می‌تواند جایگزین شود. از طرف دیگر، دومین بخش سمت راست رابطه (۸) به صورت رابطه (۹) تعریف شده است.

$$\begin{bmatrix} V_{FT}(l, s) \\ I_{FT}(l, s) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{M-1} \left\{ \left[ \prod_{n=1}^{M-i-1} \Phi^{(M-n)} \right] \begin{bmatrix} V_F(i\Delta z, s) \Delta z \\ I_F(i\Delta z, s) \Delta z \end{bmatrix} \right\} \quad (9)$$

قابل توجه است که وقتی  $\Delta z \rightarrow 0$ ، رابطه (۹) می‌تواند به عنوان یک حلقه در  $Z$  ما بین بردار منابع توزیع شده و ماتریس رشته‌ای خط مطابق (۱۰) بیان شود.

$$\begin{bmatrix} V_{FT}(l, s) \\ I_{FT}(l, s) \end{bmatrix} = \int_0^l \Phi(l-z, s) \begin{bmatrix} V_F(z, s) \\ I_F(z, s) \end{bmatrix} dz \quad (10)$$

نتایج تقویت دوباره جبری معادله (۸) در نمایش گره معادل در رابطه (۱۱) تعریف شده است، در حالی که مسیر  $I(l, s)$  معکوس شده است. در این مورد میدان الکترومغناطیسی تولید شده به وسیله منابع جریان متصل در دو انتهای خط نشان داده شده است:

$$\begin{bmatrix} I(0, s) \\ I(l, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{SS} & -Y_{SR} \\ -Y_{SR} & Y_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(0, s) \\ V(l, s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{SC}(0, s) \\ I_{SC}(l, s) \end{bmatrix} \quad (11)$$

درایه‌های ماتریس ادمیتانس گره از رابطه (۱۲) بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} Y_{SS} &= -\Phi_{12}^{-1} \Phi_{11} \\ Y_{SR} &= -\Phi_{12}^{-1} = -\Phi_{22} \Phi_{12}^{-1} \Phi_{11} + \Phi_{21} \\ Y_{RR} &= -\Phi_{22} \Phi_{12}^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

منابع جریان در انتهای خط به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned} I_{SC}(0, s) &= -\Phi_{12}^{-1} V_{FT}(l, s) \\ I_{SC}(l, s) &= \Phi_{22} \Phi_{12}^{-1} V_{FT}(l, s) \\ &- I_{FT}(l, s) \end{aligned} \quad (13)$$

که  $\Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_{21}, \Phi_{22}$  درایه‌های ماتریس رشته‌ای برای خط کامل هستند:

$$\left[ \prod_{i=1}^M \Phi^{(M+1-i)} \right] = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

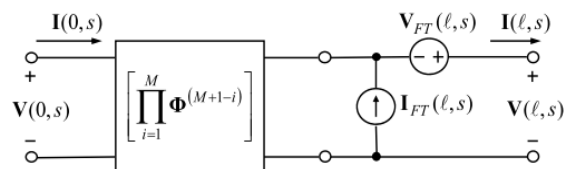
فرم گره بدست آمده از رابطه (۱۱)، مدل خط روشن شده به وسیله ماتریس ادمیتانس گره خط بدون تحریک، و ارتباط منابع جریان در انتهای خط که نشان دهنده میدان

$M$  و  $\lambda$  به ترتیب بردار ویژه و مقدار ویژه ماتریس  $Y(Z, s).Y(Z, s)$  هستند، و  $Y_0$  ماتریس ادمیتانس ویژه بخشی از خط است که به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$Y_0 = Z(z, s)^{-1} \Psi \quad (6)$$

معادله (۳) ولتاژها و جریان‌های انتهای یک بخش خط را با متغیرهای مشابه در انتهای دیگر با لحاظ کردن ارتباط یکسان جریان در دو انتها ارتباط می‌دهد. اگر بخش از نظر الکتریکی کوچک باشد، انتگرال در رابطه (۳) می‌تواند با رابطه (۷) تقریب زده شود.

$$\int_z^{z+\Delta z} \Phi(z-\tau, s) \begin{bmatrix} V_F(\tau, s) \\ I_F(\tau, s) \end{bmatrix} d\tau \approx \begin{bmatrix} V_F(\tau, s) \Delta z \\ I_F(\tau, s) \Delta z \end{bmatrix} \quad (7)$$



شکل (۱): نمایش خط روشن شده توسط منابع معادل

با استفاده از روابط (۳) و (۷) یک خط روشن شده می‌تواند با تقسیم خط در  $M$  بخش الکتریکی کوچک در طول  $\Delta z$  و شامل منابع تعریف شده در رابطه (۲) بین هر یک از بخش‌ها تعریف شود. با بکار بردن شرایط مرزی  $z = l, z = 0$ ، که  $l$  طول کل خط است، یک نمایش معادل بدست می‌آید، که در میدان تولید شده منابع یکی شده متصل در انتهای خط گنجانده شده است (شکل (۱)). این نمایش بردار منابع توزیع شده در هر پله ماتریس رشته‌ای  $M$  را به شکل رابطه (۸) بدست آورده است.

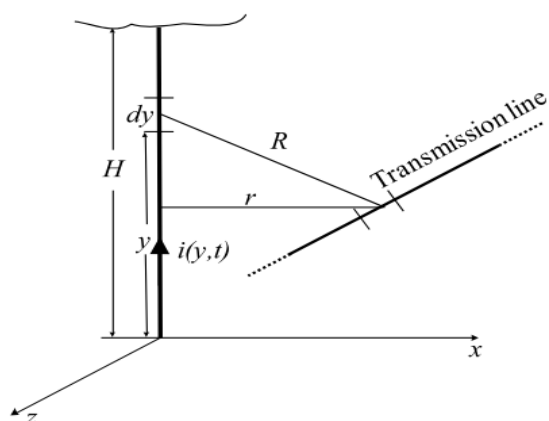
$$\begin{bmatrix} V_F(l, s) \\ I_F(l, s) \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^M \Phi^{(M+1-i)} \begin{bmatrix} V(0, s) \\ I(0, s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{FT}(l, s) \\ I_{FT}(l, s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

که  $\Phi^{(i)}$  ماتریس رشته‌ای  $i$  امین بخش خط است. اولین بخش در سمت راست رابطه (۸) با ارتباط گرهی ماتریس رشته‌ای خط تحریک نشده مطابق است. از آنجائیکه هر ماتریس رشته‌ای می‌تواند از دیگری متفاوت باشد تغییرات پارامترهای الکتریکی خط در طول آن می‌تواند مستقیماً

$$dE_y(r, y, t) = \frac{dy}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{2(h-y)-r^2}{R^5} \int_0^t i\left(y, \tau - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{3(h-y)-r^2}{cR^4} i\left(y, t - \frac{R}{c}\right) + \frac{r^2}{c^2R^3} \frac{\partial i\left(y, t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] \quad (15b)$$

$$dB(r, y, t) = \frac{\mu_0 dy}{4\pi} \times \left[ \frac{r}{R^3} i\left(y, t - \frac{R}{c}\right) + \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i\left(y, t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] \quad (15c)$$

که  $h$  ارتفاع خط،  $r$  فاصله افقی بین یک نقطه در امتداد محور  $Z$  و  $C$  سرعت نور در فضای آزاد است. جریان کانال صاعقه منتقل شده به سوی ابر،  $i(y, t)$ ، از روش MTLE تعریف شده است [۵].



شکل (۲): ترکیب هندسی خط انتقال تحریک شده بوسیله صاعقه

$$i(y, t) = \exp(-\alpha y) i\left(0, t - \frac{y}{v}\right) \quad (16)$$

جریان  $i(0, t)$  در سطح زمین (جریان اولیه)،  $\alpha$  ثابت جریان که در مسیر عمودی منتقل می‌شود (به سمت ابر)، و  $v$  سرعت جریان برگشتی است. با تبدیل رابطه (۱۵) به حوزه لاپلاس و انتگرال گیری در بازه کانال صاعقه و عکس آن، داریم:

$$E_r(r, y, s) = \frac{\exp\left(-\frac{Rs}{c}\right)}{4\pi\epsilon_0} \times \int_{-H}^H I(y, s) \left[ \frac{3r(h-y)}{R^5 s} + \frac{3r(h-y)}{cR^4} + \frac{r(h-y)s}{c^2 R^3} \right] dy \quad (17a)$$

$$E_r(r, y, s) = \frac{\exp\left(-\frac{Rs}{c}\right)}{4\pi\epsilon_0} \times$$

الکترومغناطیسی تولید شده بر اثر اصابت صاعقه است را تعریف می‌کند. بنابراین، سه جنبه اساسی برای کاربرد صحیح مدل وجود دارد:

(الف) محاسبه پارامترهای الکتریکی خط، که از روش ماتریس ادمیتانس گره بدست آمده است: از زمانی که آنالیز در حوزه فرکانس انجام می‌گیرد، اثرات پوستی در هادی‌ها و سطح زمین می‌تواند مستقیماً در هنگام محاسبه  $Z$  لحاظ شود.

(ب) محاسبه میدان الکترومغناطیسی تولید شده از متغیرهای مناسب اصابت صاعقه:

رابطه مستر و اومان [۴]، با لحاظ کردن ضریب تصحیح کوری-روبینستین برای سطح هدایتی محدود بکار برده شده است [۱۵]. مجموعه معادلات انتگرال دیفرانسیل تعریف شده در حوزه زمان با فرم جبری مستقیم در حوزه فرکانس جایگذاری شده است. این روش در بخش سه تعریف شده است.

(ج) راه حل تبدیل فرکانس-زمان: تبدیل لاپلاس عددی در این روش استفاده شده است.

### ۳- محاسبه میدان الکترومغناطیسی تولید شده

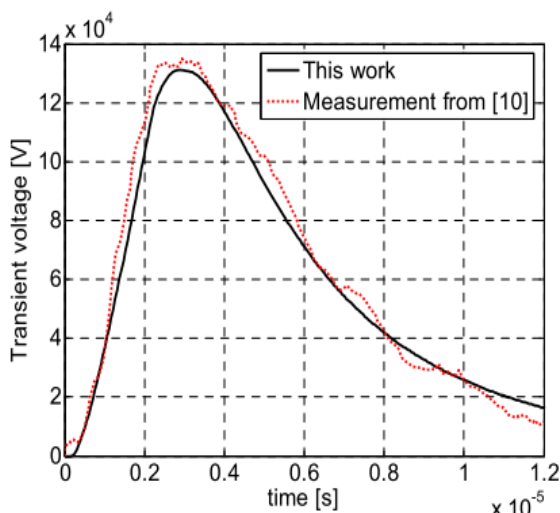
شکل (۲) ترکیب هندسی یک خط انتقال تحریک شده به وسیله میدان الکترومغناطیسی تولید شده بر اثر اصابت صاعقه را نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن زمین به عنوان هادی کامل، مستر و اومان اجزای میدان الکتریکی و مغناطیسی را تعریف می‌کنند که به وسیله بخش دیفرانسیلی کانال صاعقه تولید شده است [۴]:

$$dE_r(r, y, t) = \frac{dy}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{3r(h-y)}{R^5} \int_0^t i\left(y, \tau - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{3r(h-y)}{cR^4} i\left(y, t - \frac{R}{c}\right) + \frac{r(h-y)}{c^2 R^3} \frac{\partial i\left(y, t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] \quad (15a)$$

صفحات آلومینیومی متصل بهم برای تشکیل دادن سطح زمین استفاده شده است، بنابراین زمین به عنوان هادی کامل در نظر گرفته شده است.

شکل (۳)، شکل موج بدست آمده از روش حوزه فرکانسی معرفی شده در این کار و مقایسه آن با مقدار اندازه گیری شده آزمایشی را نشان می‌دهد.



شکل (۳): مقایسه آنالیز نتایج حوزه فرکانسی با مقدار آزمایشی گزارش شده در [۱۰]

#### ۴-۲- تست

تغییر نقطه برخورد در یک خط سه فاز با لحاظ کردن شکم بین دکل‌ها: در این مثال، اضافه ولتاژهای گذرا بر اثر اصابت ساعقه در یک خط سه فاز با ساختار افقی آنالیز شده است. سیم‌های زمین در ترکیب دکل‌ها لحاظ نشده است. مشخصه‌های اصلی خط در جدول ۱ داده شده است.

جدول (۱): اطلاعات خط برای مثال B

عنوان	مقدار
شعاع هادی	۷/۵ mm
ارتفاع دکل‌ها	۱۰ m
ارتفاع شکم میانه	۶/۵ m
فاصله بین دکل‌ها	۲۰۰ m
مقاومت هادی	$۳/۲۱ \times ۱۰^{-۸} \Omega\text{-m}$
مقاومت زمین	$۱۰۰ \Omega\text{-m}$
فاصله بین فازها	۲ m

خط برای جلوگیری از انعکاسات در دو انتهای خودش مچ شده است. اجزای میدان الکتریکی و مغناطیسی، با لحاظ

$$\int_{-H}^H I(y, s) \left[ \frac{2(h-y)^2 - r^2}{R^5 s} + \frac{2(h-y)^2 - r^2}{cR^4} - \frac{-r^2 s}{c^2 R^3} \right] dy \quad (17b)$$

$$B(r, y, s) = \frac{\mu_0 \exp(-\frac{Rs}{c})}{4\pi} \int_{-H}^H I(y, s) \left[ \frac{r}{R^3} + \frac{r}{cR^2} \right] dy \quad (17c)$$

که  $H$  ارتفاع ابر و  $I(y, s)$  عکس تبدیل لاپلاس کانال ساعقه است، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I(y, s) = \exp(-\alpha y) \exp\left(-\frac{ys}{v}\right) I(0, s) \quad (18)$$

انتگرال تعریف شده در رابطه (۱۷) بوسیله یک الگوریتم عددی حساب شده است. به هر حال، تا به حال زمین به عنوان هادی کامل لحاظ شده است. با توجه به لحاظ کردن سطح رسانائی محدود، رابطه کوری-روبینستین بکار برده شده است [۱۵]:

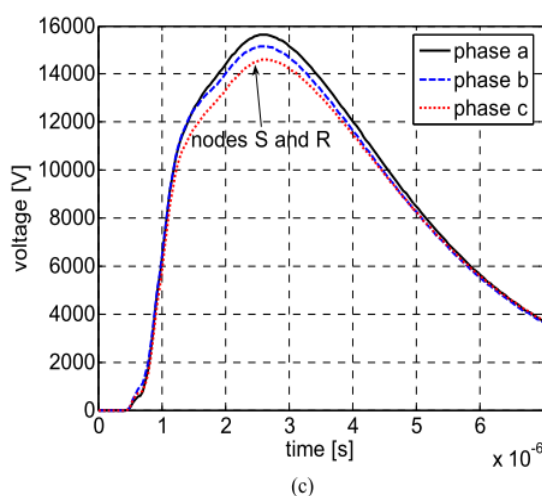
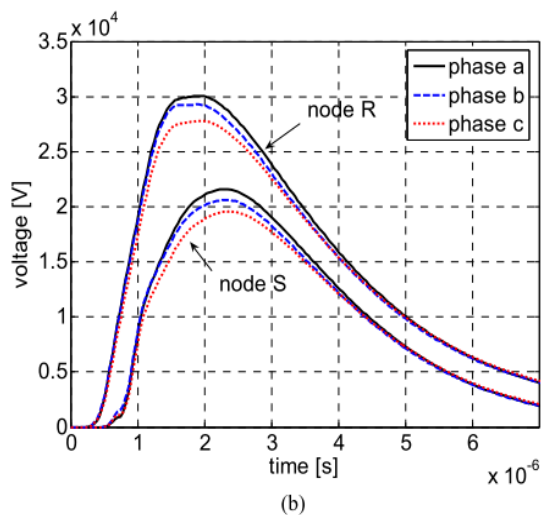
$$\vec{E}_r(r, y, s) = \frac{E_r(r, y, s)}{cB(r, 0, s) \sqrt{\epsilon_{rg} + 1/(\epsilon_0 \rho_g s)}} \quad (19)$$

که  $\vec{E}_r(r, y, s)$  میدان الکتریکی افقی اصلاح شده با در نظر گرفتن مقاومت ویژه زمین  $\rho_g$ ،  $\epsilon_{rg}$  نسبت مجاز زمین، و  $B(r, 0, s)$  میدان مغناطیسی در سطح زمین برای سطح رسانایی کامل است. میدان الکتریکی عمودی نیز با یک روش مناسب اصلاح شده است.

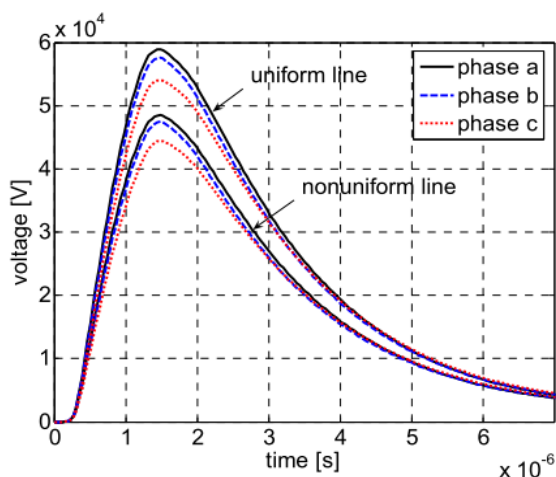
#### ۴- مثال‌های کاربردی

##### ۴-۱- مقایسه با نتیجه آزمایش

به عنوان اولین مثال (و وسیله ارزیابی)، روش تعریف شده در این مقاله برای دوباره نشان دادن نتیجه آزمایش بدست آمده از روش کاهش عددی بکار برده شده است [۹]. انجام آزمایش شامل یک دایره با قطر ۲ سانتی متر، تک هادی، ۱۰ متر ارتفاع بالاسری خط است. خط بوسیله میدان جریان هجومی برگشتی که ۷۰ متر دورتر از خط قرار دارد تحریک شده است. جریان در سطح زمین بوسیله یک شکل موج مثلثی با زمان پیشانی ۲ میکرو ثانیه و نیم زمان ۸۵ میکرو ثانیه‌ای تقریب زده شده است. برای مثال یک حجم ۳۴ کیلو آمپری در نظر گرفته شده است.



شکل (۵): اضافه ولتاژهای بدست آمده برای نقاط برخورد متفاوت اصابت صاعقه در انتهای خط:  $aP(50, 25)$ ،  $bP(70, 150)$ ،  $cP(100, 100)$ .



شکل (۶): اضافه ولتاژهای بدست آمده در گره S برای نقطه برخورد  $P(50, 25)$

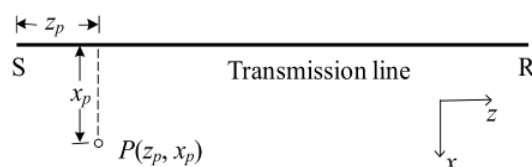
تغییر داده شده در رابطه (۱۹) برای رسانایی محدود زمین از رابطه (۱۷) محاسبه شده‌اند.

شبیه سازی برای سه مقدار متفاوت نقطه برخورد انجام شده است:

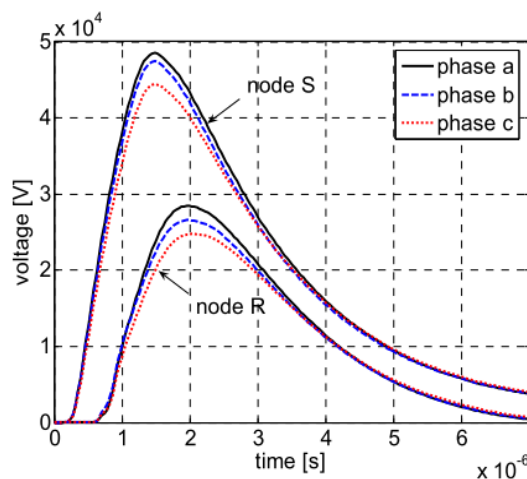
ترتیب به ترتیب  $P(100, 100)$ ،  $P(70, 150)$ ،  $P(50, 25)$  نشان داده شده در شکل (۴)، که  $x_p$  فاصله بین کانال صاعقه و هادی میانی ( فاز b ) است. همپایه  $P(0,0)$  با قطب S خط مطابق است.

شکل‌های (۵) اضافه ولتاژها در دو انتهای خط را همپایه-های مذکور را نشان می‌دهد. اختلاف‌ها در زمان تاخیر و حداکثر اضافه ولتاژها در گره‌های S و R خط با تفاوت‌هایی که در نقاط برخورد لحاظ شده برای شبیه سازی‌ها است سازگار هستند.

به علاوه اثر شکم لحاظ شده بین دکل‌ها برای این مثال امتحان شده است. شبیه سازی برای همپایه  $P(50,25)$  با لحاظ کردن خط به عنوان کاملاً همسان تکرار شده است (ارتفاع دکلها= ارتفاع دو ستون میانی=۱۰ متر). شکل (۶) مقایسه برای گره S را نشان می‌دهد. حداکثر اضافه ولتاژ در همه فازها با در نظر گرفتن خط همسان تقریباً ۱۸ درصد بیشتر از لحاظ کردن شکم بین دکل‌ها است.



شکل (۴): همپایه‌های نقطه برخورد



(a)

## ۵- نتایج

شده، ارزیابی شده است که به بهترین حالت شکل موجها رسیده است.

سپس، این مدل بر روی یک خط سه فاز با ساختار دکل افقی تست شده است. مقادیر متفاوت نقطه برخورد اصابت صاعقه، برای مشاهده کردن تفاوتها در زمان تاخیر و حجم اضافه ولتاژها در انتهای خط لحاظ شده است. علاوه بر این، شبیه سازی نیز نشان می دهد که غفلت کردن از شکم بین دکلها می تواند به تخمین مهم اضافه ولتاژهای ماکزیم منجر شود.

در این مقاله، مدل خط انتقال روشن شده دارای چندین هادی غیر همسان با به کار بردن روش حوزه فرکانسی تعریف شده است. این مدل، گنجایش میدان الکتریکی تولید شده به وسیله منابع جریان یکی شده متصل در انتهای خط را نشان می دهد. این مدل در ابتدا به وسیله مقایسه با یک مقدار اندازه گیری شده آزمایشی بر روی روش کاهش عددی که قبلا منتشر

## ۶- مراجع

- [1] M.Z.A.Ab Kadir, I.Cotton,(2010) , “Application of the insulator coordination gap models and effect of line design to backflashover studies”, International Journal of Electrical Power and Energy System, Vol. 32, No. 5, PP. 443-449
- [2] B. Tavakoli, B. Vahidi ,(2010),“Statistical analysis of the lightning performance of high voltage OHLs using dynamic simulation of lightning leaders movements”, International Journal of Electrical Power and Energy System, Vol. 32, No. 9,PP. 1024-1030
- [3] M. Moghavvemi, C. Y. Chiang, (2011), “Insulation coordination associated with distributed generation connected at distribution level”, International Journal of Electrical Power and Energy System, Vol. 33, No. 4, PP. 1077-1091.
- [4] M. J. Master, M. A. Uman, (1984), “Lightning induced voltages on power lines: Theory”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 103, No.9, PP. 2502 - 2518.
- [5] C. D. Taylor, J.P. Castillo, (1978),“ On electromagnetic-field excitation of unshielded multi conductor cables”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 20, No. 4, PP. 495 - 500.
- [6] P. Gomez, F. Uribe, (2009), “The numerical Laplace transform: an accurate tool for analyzing electromagnetic transients on power system devices”, International Journal of Electrical Power and Energy System, Vol. 31, No. 2. PP. 116-123.
- [7] Y. Baba, V. A. Rakov, (2006), “Voltages induced on an overhead wire by lightning strikes to a nearby tall grounded object”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 48, No. 1, PP. 212 – 224.
- [8] M. Paolo, F. Rachidi, A. Borgetti, C. A. Nucci, M. Rubbinstein, V. A. Rakov, (2009), “Lightning electromagnetic field coupling to overhead lines: theory, numerical simulations, and experimental”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No. 3, PP. 532 – 547.
- [9] X. Liu, X. Cui, L. Qi, (2011), “Time-domain finite-element method for the transient response of multi conductor transmission lines excited by an electromagnetic”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 53, No. 2, PP. 462 – 474.
- [10] P. Gomez, P. Moreno, J. L. Naredo, (2005), “Frequency-domin transient analysis of nonuniform lines with incident field excitation”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, PP. 2273 – 2280.
- [11] P. Moreno, A. Ramirez, (2008) “Implementation of the numerical laplace transform; A Review”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, PP. 2599 – 2609.
- [12] F. A. Uribe, J. L. Naredo, P. Moreno, L. Guardado, (2002),“Electromagnetic transients in underground transmission systems through the numerical laplace transform”, International Journal of Electrical Power and Energy System, Vol. 24, No. 3, PP. 215-221.
- [13] P. Moreno, P. Gomez, J. L. Naredo, L. Guardado, (2005),“Frequency domain transient analysis of electrical networks including nonlinear conditions”, International Journal of Electrical Power and Energy System, Vol. 27, No.2, PP. 139-146

- [14] P. Gomez, J. C. Scamilla, (2013), "Frequency domain modeling of nonuniform multi conductor lines excited by indirect lightning", International Journal of Electrical Power and Energy System, Vol. 45, No. 4, PP. 420-426
- [15] H. Janani, R. Moini, Sh. Sadeghi, (2012), "Evaluation of lightning-induced voltage on overhead lines with nonlinear load using the scattering theory", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 27, No. 1, PP. 317 - 324
- [16] P. Gomez, J. C. Scamilla, (2009), "Frequency domain modeling of transmission lines by nearby lightning strokes", International Conference on Power system Transients (IPST2009) in Kyoto, Japan, June 3-6.