

## تحلیل گذرای خطوط انتقال تک سیمه متصل به برقگیر در حضور مستقیم صاعقه با در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک با استفاده از الگوریتم ژنتیک

حمید یزدی<sup>۱</sup>، سعیدرضا استادزاده<sup>۲\*</sup>، فرزین طاهری آستانه<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک، ۲ و ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک

(دریافت: ۹۵/۰۲/۱۳، پذیرش: ۹۵/۰۹/۲۱)

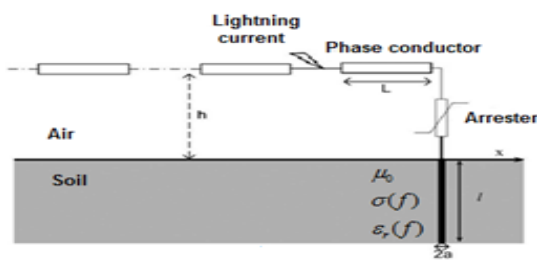
**چکیده:** در این مقاله روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تحلیل گذرای خطوط انتقال تک سیمه متصل به برقگیر ارائه می‌شود. در تحلیل فرض می‌شود که سامانه‌های زمین در خاکی که پارامترهای الکتریکی آن وابسته به فرکانس است، دفن شده‌اند. ابتدا جریان پالس صاعقه به تعداد محدودی از هارمونی‌های سینوسی تقریب زده می‌شود سپس با استفاده از روش خط انتقال، مدار معادل نورتن دیده شده از دو سر برقگیر و سیستم زمین محاسبه شده، نهایتاً با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مدار غیرخطی در حوزه فرکانس تحلیل می‌شود. در این مقاله با ارائه این روش پیشنهادی که دارای بازده محاسباتی بالاتری نسبت به سایر روش‌های غیرخطی می‌باشد، محاسبات ولتاژ گذرای دو سر برقگیر با و بدون در نظر گرفتن اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که لحاظ کردن این اثر، نقش مهمی را در انتخاب محل و تعداد بهینه برقگیرها در راستای خطوط انتقال دارد.

**کلید واژه‌ها:** خطوط هوایی، برقگیر، صاعقه، الگوریتم ژنتیک، خاک تلفاتی.

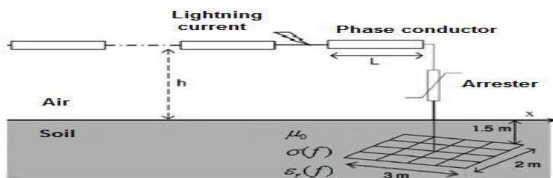
### ۱- مقدمه

تبدیل کرد به عنوان مثال روش تطبیق بردار [۸-۶] یک روش در این زمینه می‌باشد. ثانیاً در تحلیل خطوط انتقال با این نرم افزار، پارامترهای الکتریکی خاک ثابت فرض می‌شوند.

برقگیرهای صاعقه جهت حفاظت در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از سوئیچینگ، صاعقه و غیره در راستای خطوط انتقال بکار برده می‌شوند. انتخاب و محل دقیق برقگیرها بستگی به محاسبه دقیق ولتاژ گذرای دو سر آن دارد و این محاسبه زمانی میسر می‌شود که تمام بخشهایی که به آن متصل هستند به درستی تحلیل شوند. به عنوان مثال شکل (۱) خط انتقال متصل به برقگیر که به صورت مستقیم در معرض صاعقه قرار گرفته است را نشان می‌دهد. در این شکل، برقگیر با دو روش زمین شده است. اخیراً تحلیل خطوط انتقال تک سیمه و سه سیمه متصل به برقگیر با روش ممان [۱] انجام شده است منتهی فرض شده است که خاک به عنوان رسانای کامل باشد [۲]. در ادامه همین مساله با در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک به صورت تک سیمه [۳] و سه سیمه [۴] با روش المان محدود انجام شده است منتهی با این روش اثر برقگیرها را نمی‌توان لحاظ کرد.



(الف)

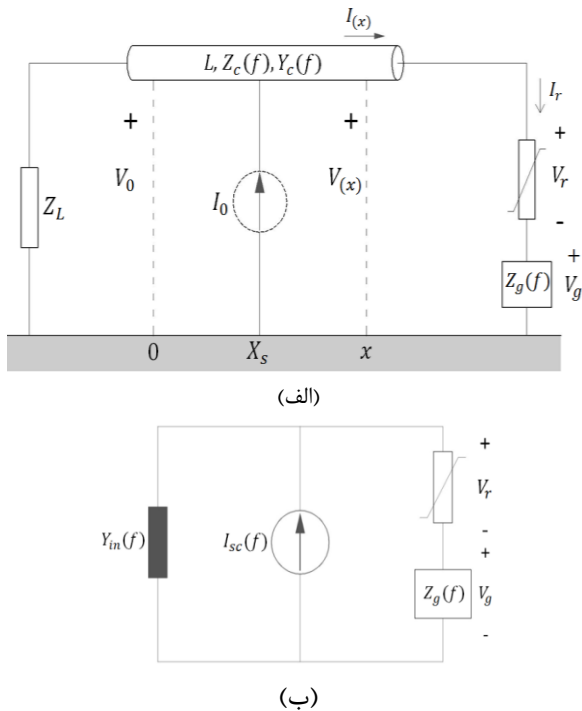


(ب)

شکل (۱): خطوط انتقال هوایی متصل به برقگیر که با دو روش زمین شده است. (الف) با میله عمودی. (ب) به صورت شبکه

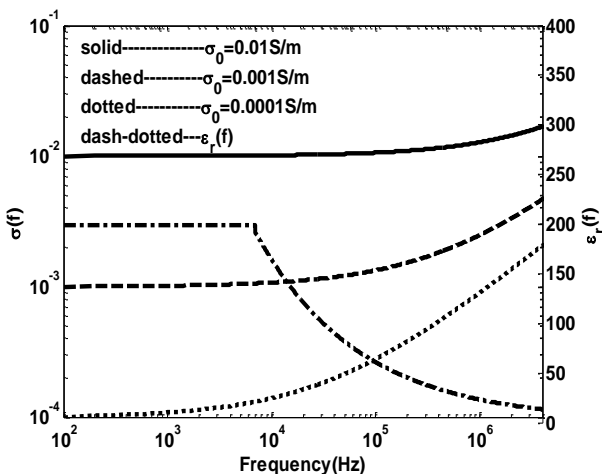
در سال ۲۰۰۹ یک روش ترکیبی بر مبنای روش خط انتقال و روش عملگر ریاضی [۹] در حوزه فرکانس برای خطوط انتقال

ذکر این نکته حائز اهمیت است که نرم‌افزارهای تحلیل گذرا نظیر EMTP [۵] می‌توانند چنین مسائل غیرخطی را تحلیل کنند منتهی در این گونه نرم‌افزارها، اولاً هر سیستمی را ابتدا باید در حوزه فرکانس بررسی و سپس به مدار معادل در حوزه زمان



شکل (۲): (الف) بیان حوزه فرکانس شکل (۱). (ب) شکل (۲-الف) که خط هوایی با مدار معادل نورتن آن جایگزین شده است.

در رابطه فوق،  $\sigma_0$  رسانایی فرکانس پایین می‌باشد. شکل (۳) تغییرات پارامترهای الکتریکی خاک بر حسب فرکانس را به ازای مقادیر مختلف  $\sigma_0$  نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ KHz تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پارامترهای الکتریکی خاک ظاهر می‌شود.



شکل (۳): تغییرات پارامترهای الکتریکی خاک با فرکانس.

در سال ۲۰۰۷ [۱۴]، این اثر روی پارامترهای خط انتقال امپدانس مشخصه و ثابت انتشار بررسی شدند و نتایج نشان دادند در فرکانس‌های بالاتر از ۱ MHz، این اثر قابل توجه است.

متصل به برقگیر ارائه شد. در روش پیشنهادی ابتدا شکل (۱) به صورت شکل (۲-الف) در حوزه فرکانس بیان می‌شود به‌گونه‌ای که خط انتقال با طول  $L$  و امپدانس مشخصه  $Z_c$  و سیستم زمین با امپدانس  $Z_g(f)$  جایگزین می‌شود. سپس همان‌طوری که در شکل (۲-ب) دیده می‌شود، با استفاده از روابط (۱) و (۲) که از روش خط انتقال به‌دست می‌آید، خط هوایی با مدار معادل نورتن دیده شده دو سر برقگیر و سیستم زمین جایگزین می‌شود.

$$\begin{pmatrix} V(0) \\ V(L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+\rho_1 & 0 \\ 0 & 1+\rho_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\rho_1 & e^{\gamma L} \\ e^{\gamma L} & -\rho_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} e^{\gamma x_s} (V_0 + Z_c I_0) / 2 \\ -e^{\gamma(L-x_s)} (V_0 - Z_c I_0) / 2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} I(0) \\ I(L) \end{pmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{pmatrix} 1-\rho_1 & 0 \\ 0 & 1+\rho_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\rho_1 & e^{\gamma L} \\ e^{\gamma L} & -\rho_2 \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} e^{\gamma x_s} (V_0 + Z_c I_0) / 2 \\ -e^{\gamma(L-x_s)} (V_0 - Z_c I_0) / 2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

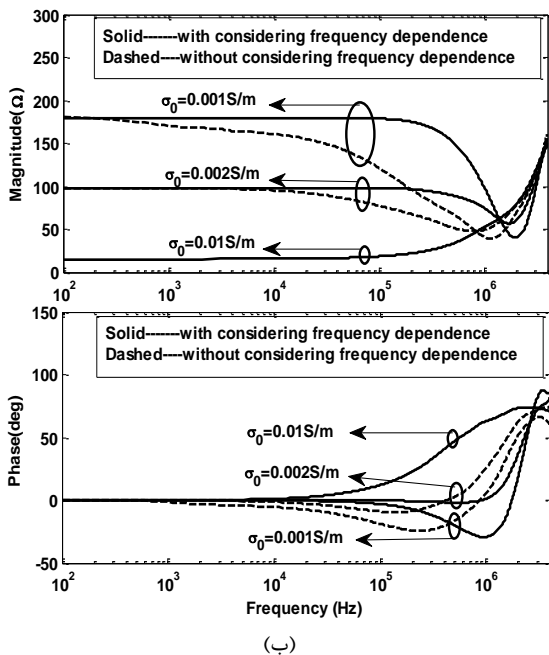
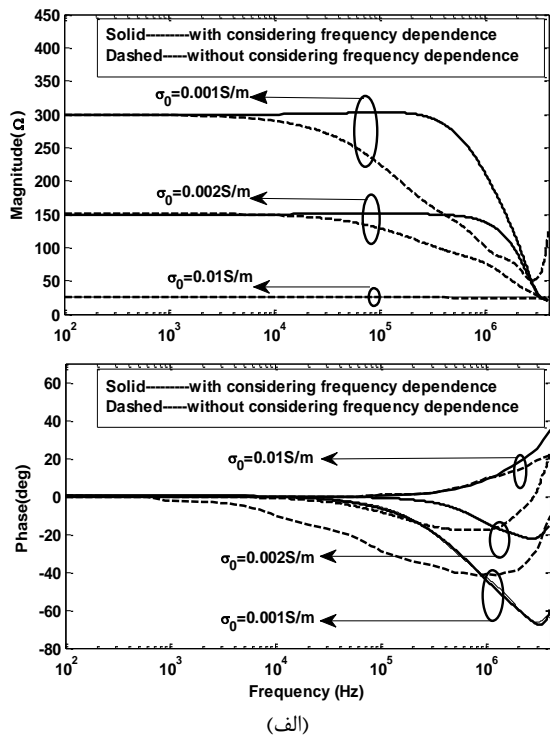
در روابط فوق،  $\rho_i$  به عنوان ضریب انعکاس در ابتدا و انتهای خط به صورت زیر تعریف شده و در حالت تطبیق  $\rho_i = 0$  لحاظ می‌شود.

$$\rho_i = \frac{Z_{Li} - Z_c}{Z_{Li} + Z_c} \quad (3)$$

همچنین  $x = x_s$  نقطه ضربه صاعقه روی خط می‌باشد. نحوه محاسبه  $I_{sc}$  و  $Y_{in}$  با استفاده از روابط فوق در مرجع [۹] ارائه شده است. نهایتاً با اعمال روش حوزه فرکانس عملگر ریاضی روی مدار غیرخطی منتجه، ولتاژ گذرا محاسبه می‌شود.

بر طبق اصول روش عملگر ریاضی [۱۱]، این روش دارای مشکلاتی نظیر حساس بودن به حدس اولیه جواب، محاسبه ماتریس تبدیل از زمان به فرکانس و محاسبات مشتق‌گیری در فرایند تکرار عددی می‌باشد که اینها زمان‌بر بوده و این معضلات هنگامی که شرایط آب و هوایی تغییر می‌کنند، تکرار می‌شوند. ضمناً، تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که در فرکانس‌های بالا، پارامترهای الکتریکی خاک وابسته به فرکانس می‌باشند. در این راستا مدل‌های متفاوتی ارائه شده است [۱۲] به عنوان مثال مدل پیشنهادی ویساکرو [۱۳] به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \epsilon_r(f) &= 7.6 \cdot 10^3 \cdot f^{-0.4} + 1.3f > 10\text{KHz} \\ \sigma(f) &= \sigma_0 (1 + (1.2 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma_0^{-0.73}) (f - 100)^{0.65}) \end{aligned} \quad (4)$$



شکل (۴): (الف) امیدانس ورودی زمین به صورت میله عمودی. (ب) امیدانس ورودی زمین به صورت شبکه‌ای

در شکل (۵)، برقیگر به صورت یک مقاومت غیرخطی با مشخصه زیر بیان می‌شود:

$$i_r = p \left( \frac{v_r}{v_{ref}} \right)^q \quad (7)$$

که در آن،  $i_r$  و  $v_r$  به ترتیب جریان و ولتاژ برقیگر می‌باشند و مقادیر سایر پارامترها در رابطه (۴) در مرجع [۱۶ و ۱۷] توضیح

در ادامه این اثر روی دو نوع سیستم زمین نیز توسط شیشیکانی و همکارانشان [۱۵] مطابق شکل (۴) بررسی شد. همان‌طور که در این دو شکل نشان داده شده است، با افزایش فرکانس، اثر وابستگی فرکانسی منجر به تفاوت قابل ملاحظه‌ای در امیدانس ورودی می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده، بدیهی است به دلیل عدم لحاظ کردن این اثر،  $I_{sc}$  و  $Y_{in}$  در شکل (۲-ب) دقیق محاسبه نمی‌شوند و از این رو ولتاژ گذرای دو سر برقیگر دقیق ارزیابی نخواهد شد.

تا آنجا که می‌دانیم تا کنون هیچ تحلیل جامعی برای خطوط انتقال متصل به برقیگر بالای زمینی که پارامترهای الکتریکی آن وابسته به فرکانس باشند، وجود ندارد به گونه‌ایی که ولتاژ گذرای برقیگر به صورت دقیق و با بازده محاسباتی بالاتر نسبت به کارهای گذشته محاسبه شود.

از این رو در این مقاله، ابتدا با استفاده از روابط (۱) و (۲)، پارامترهای مدار معادل نورتن با و بدون لحاظ کردن این اثر محاسبه می‌شوند سپس با الگوریتم ژنتیک مدار غیرخطی شکل (۲-ب) در حوزه فرکانس تحلیل شده و به صورت موثر، ولتاژ گذرا محاسبه می‌شود.

این مقاله به صورت زیر سازماندهی می‌شود. در بخش دوم اصول تحلیل گذرا با الگوریتم ژنتیک ارائه می‌شود. سپس در بخش سوم جهت اعتبارسنجی، روش پیشنهادی با نرم‌افزار تحلیل گذرا مقایسه می‌شود. در بخش چهارم، با استفاده از روش پیشنهادی اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای خاک روی ولتاژ برقیگر که به دو صورت زمین‌شده، بررسی می‌شود. نهایتاً در بخش پنجم، نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

## ۲- اصول تحلیل با الگوریتم ژنتیک

همان‌طور که در شکل (۲-الف) نشان داده شده است، ضربه صاعقه به خط در یک نقطه خاص مثل  $x = x_s$  به صورت یک پالس منبع جریان است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$i_0(t) = I_m (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (8)$$

که  $\alpha = 2(1/ms)$  و  $\beta = 400(1/ms)$  انتخاب می‌شوند. در ابتدای تحلیل با الگوریتم ژنتیک، این پالس جریان با تعداد محدودی از هارمونی‌های سینوسی تقریب زده می‌شود. پالس جریان تقریب زده شده به صورت زیر می‌باشد:

$$i_0(t) \approx \sum_{i=1}^9 \{ I_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \} \quad (9)$$

سپس جهت تسهیل در ارزیابی اضافه ولتاژ، مدار معادل فرکانس بالای شکل (۲-ب) مطابق شکل (۵) ترسیم می‌شود.

متناظرا جریان برقگیر مطابق رابطه (۷) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$i_r = p \left\{ \left( V_0 + \sum_{j=1}^N V_j \cos(\omega_j t + \phi_j) \right) / v_{ref} \right\}^q \quad (14)$$

چون در شکل (۶)، برقگیر و  $Y'_{in}$  به صورت موازی می‌باشند، لذا جریان وارد شونده به  $Y'_{in}$  برابر است با:

$$i'_{in}(t) = \sum_{j=1}^N G'_{in}(\omega_j) V_j \sin(\omega_j t + \phi_j) + \sum_{j=1}^N B'_{in}(\omega_j) V_j \cos(\omega_j t + \phi_j) \quad (15)$$

که  $G'_{in}$  و  $B'_{in}$  به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی  $Y'_{in}$  می‌باشند. با جایگزینی روابط (۱۱)، (۱۴) و (۱۵) در رابطه (۱۰) داریم:

$$\sum_{i=1}^M I_{sc,i} \cos(\omega_i t + \phi_i) - \sum_{j=1}^N G'_{in}(\omega_j) V_j \cos(\omega_j t + \phi_j) + \sum_{j=1}^N B'_{in}(\omega_j) V_j \sin(\omega_j t + \phi_j) - p \left( \frac{V_0 + \sum_{j=1}^N V_j \cos(\omega_j t + \phi_j)}{v_{ref}} \right)^q = 0 \quad (16)$$

در روابط فوق،  $V_0$ ،  $V_j$  و  $\phi_j$  مجهولات مساله مورد نظر بوده و می‌خواهیم از طریق الگوریتم ژنتیک به دست آوریم. از این‌رو تابع هدف را به گونه‌ای تعریف می‌کنیم تا رابطه (۱۶) به سمت صفر میل کند یعنی

$$\| \bar{\varepsilon}(t) \| = \left\| \begin{array}{l} \sum_{i=1}^M I_{sc,i} \cos(\omega_i t + \phi_i) \\ - \sum_{j=1}^N G'_{in}(\omega_j) V_j \cos(\omega_j t + \phi_j) \\ + \sum_{j=1}^N B'_{in}(\omega_j) V_j \sin(\omega_j t + \phi_j) \\ - p \left( \frac{v_0 + \sum_{j=1}^N V_j \cos(\omega_j t + \phi_j)}{v_{ref}} \right)^q \end{array} \right\| \rightarrow \bar{0} \quad (17)$$

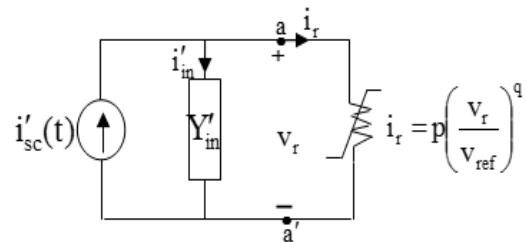
در رابطه فوق،  $(2N + 1)$  مجهول وجود دارد. برای به دست آوردن آن‌ها، ابتدا رابطه فوق در  $(2N + 1)$  زمان نمونه‌برداری گسسته می‌شود.

زمان نمونه‌برداری  $t = k \cdot \Delta t$ ،  $k = 0, 1, \dots, 2N$  به گونه‌ای انتخاب می‌شود که حداقل شرط ناپذیرت را برای بالاترین فرکانس در محتوای فرکانسی جریان صاعقه برآورده شود. سپس  $(2N + 1)$  معادله غیرخطی منتهج به استفاده از الگوریتم ژنتیک حل می‌شوند. در تحلیل مساله مذکور با الگوریتم ژنتیک هر

داده شده‌اند. دو کمیت حوزه فرکانس  $I'_{sc}$  و  $Y'_{in}$  در شکل (۶) به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$I'_{sc} = \frac{I_{sc}}{1 + Z_g Y_{in}} \quad (8)$$

$$Y'_{in} = \frac{Y_{in}}{1 + Z_g Y_{in}} \quad (9)$$



شکل (۵): مدار معادل ساده شده شکل (۲-ب).

در رابطه (۵)،  $I'_{sc}$  فقط در فرکانس‌های مرتبط به جریان صاعقه (جدول (۱)) محاسبه می‌شود در صورتی که در رابطه (۵)،  $Y'_{in}$  در کلیه فرکانس‌هایی که در محتوای طیفی ولتاژ برقگیر می‌باشند، محاسبه می‌شود.

با محاسبه  $I'_{sc}$  و  $Y'_{in}$  از معادلات (۱) و (۲)،  $I'_{sc}$  طبق رابطه (۸) در حوزه فرکانس و سپس  $i'_{sc}(t)$  در حوزه زمان محاسبه می‌شود.

حال اگر قانون جریان کیرشهف را به گره (a) در شکل (۵) اعمال کنیم، خواهیم داشت:

$$KCL(a) \Rightarrow i'_{sc} - i'_{in} - i_r = 0 \quad (10)$$

که

$$i'_{sc}(t) = \sum_{i=1}^M I_{sc,i} \sin(\omega_i t + \phi_{sc,i}) \quad (11)$$

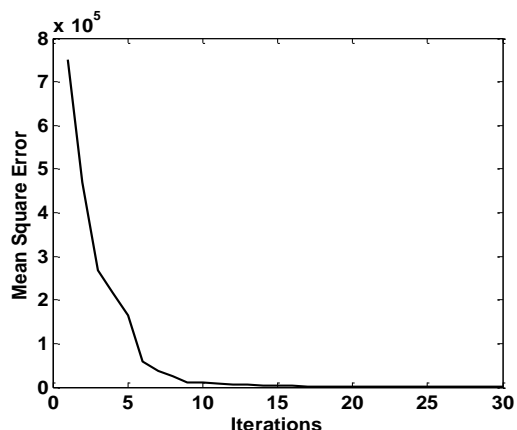
در رابطه (۱۱)،  $M$  تعداد هارمونی‌های سینوسی برای تقریب پالس جریان است. واضح است که تعداد فرکانس‌های موجود در محتوای طیفی ولتاژ برقگیر به مراتب بیشتر از  $M$  است که مطابق مرجع [۱۸] ترکیب خطی از فرکانس‌های موجود در محتوای فرکانسی جریان صاعقه است. به عبارت دیگر:

$$\omega_j = k_1 \omega_1 + k_2 \omega_2 + \dots + k_M \omega_M, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

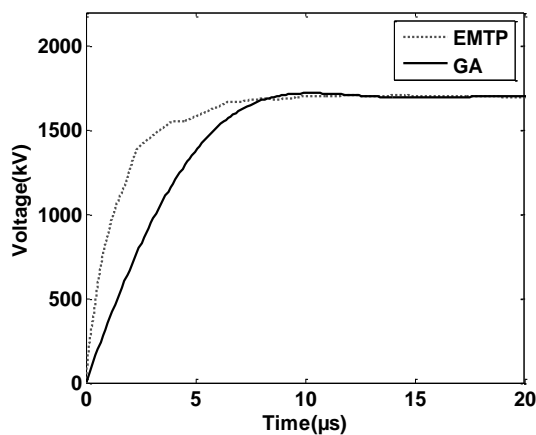
در رابطه فوق،  $k_i$ 's اعداد صحیح بوده و به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که  $\sum_{i=1}^M |k_i| \leq q$ . همچنین  $N$  تعداد فرکانس‌های موجود در ولتاژ دو سر برقگیر می‌باشد. از این‌رو ولتاژ برقگیر به صورت زیر فرض می‌شود:

$$v_r(t) = V_0 + \sum_{j=1}^N V_j \sin(\omega_j t + \phi_j) \quad (13)$$

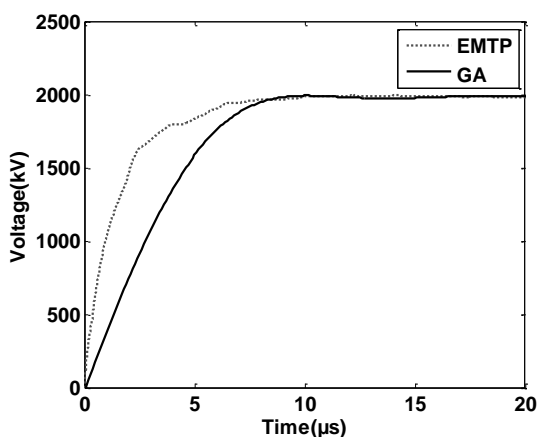
مربوطه ارجحیت دارد.



شکل (۶): متوسط مجذور خطا برای محاسبه ولتاژ گذرا



(الف)



(ب)

شکل (۷): ولتاژ گذرای دو سر برقگیر وقتی که الف: با میله عمودی و ب: به صورت شبکه زمین شده است.

#### ۴- ولتاژ گذرای برقگیر زمین شده

##### ۴-۱- سیستم زمین به صورت میله عمودی

در این قسمت یک خط هوایی که مانند قسمت قبل است مورد ارزیابی قرار می‌گیرد با این تفاوت که پارامترهای الکتریکی

متغیر مجهول در رابطه (۱۷) به  $B-b$  کد دوتایی  $b_{j_1} b_{j_2} \dots b_{j_B}$  که یک ژن نامیده می‌شود، کدگذاری می‌شود. تعداد کل ژن‌ها برابر است با  $(2N+1)B$  یعنی:

$$\text{chromosome} = b_{0_1} b_{0_2} \dots b_{0_B} \dots b_{N_1} b_{N_2} \dots b_{N_B} \quad (18)$$

رابطه بین  $V_j$  و  $\phi_j$  و  $B-b$  ژن به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$V_j = V_{j_{\min}} + \frac{V_{j_{\max}} + V_{j_{\min}}}{2^B - 1} \sum_{k=1}^B b_{j_k} 2^{B-k}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, N \quad (19)$$

$$\phi_j = \phi_{j_{\min}} + \frac{\phi_{j_{\max}} + \phi_{j_{\min}}}{2^B - 1} \sum_{k=1}^B b_{j_k} 2^{B-k}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, N \quad (20)$$

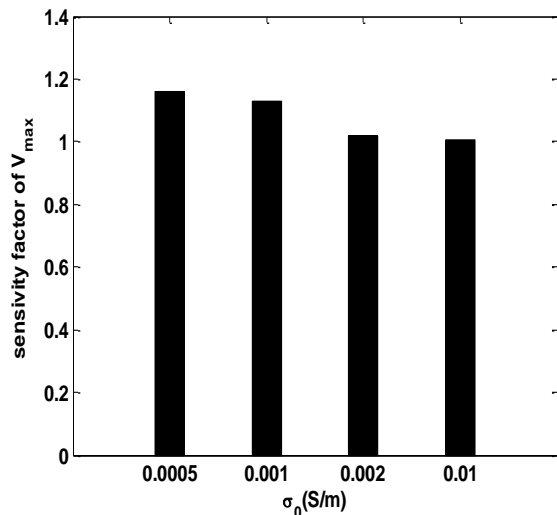
در روابط فوق،  $V_j(\min), (\max)$  و  $\phi_j(\min), (\max)$  به ترتیب بیشینه و کمینه  $V_j$  و  $\phi_j$  می‌باشند. هر کروموزوم در رابطه (۱۸) دارای تابع هدفی مطابق رابطه (۱۷) می‌باشد. توضیحات بیشتر درباره الگوریتم ژنتیک در مراجع [۲۰-۱۹] ارائه شده است.

#### ۳- اعتبار سنجی روش پیشنهادی

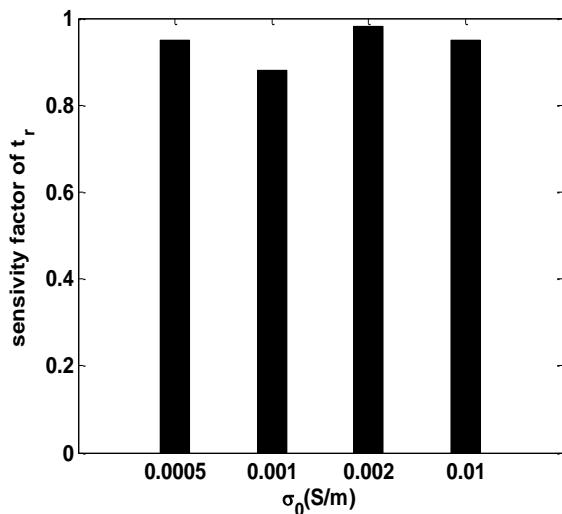
در این قسمت یک خط هوایی به طول  $L = 600m$ ، گرفته است، بررسی می‌شود. این خط در سمت چپ به بار تطبیق و در سمت راست به یک برقگیر زمین شده متصل شده است. سیستم زمین شامل یک میله عمودی به طول  $l = 3m$  و شبکه زمین با ابعادی مطابق شکل (۱-ب) است که در خاکی با پارامترهای الکتریکی ثابت  $\epsilon_r = 10$  و  $\sigma = 0.00 \text{ S/m}$  دفن شده‌اند.

تابع هدف در رابطه (۱۷) در بازه زمانی  $[1-30] \mu s$  با گام زمانی  $\Delta t = 0.1 \mu s$  گسسته و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک کمینه می‌شود. در شکل (۶) متوسط مجذور خطا بر حسب تعداد تکرارها رسم شده است. نتایج تحلیل با روش پیشنهادی و نرم‌افزار تحلیل گذرا به دست آمده و در شکل‌های (۷ و ۸) مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده است، از نظر ماکزیمم ولتاژ و افزایش زمان ولتاژ دو روش در تطابق بسیار خوبی با هم هستند. ضمناً در استخراج نتایج با نرم‌افزار، ابتدا امیدانس ورودی زمین مطابق شکل (۴)، با استفاده از روش تطبیق بردار به مدار معادل در حوزه فرکانس تبدیل شده سپس وارد نرم افزار می‌شوند در صورتی که روش پیشنهادی تحلیل براساس پاسخ فرکانسی است. همچنین نرم افزار مورد نظر قادر به تحلیل گذرای خطوط هوایی در مجاورت زمین‌هایی که پارامترهای الکتریکی خاک وابسته به فرکانس هستند، نمی‌باشد. بنابراین روش پیشنهادی از این حیث نیز نسبت به نرم‌افزار

شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نشان می‌دهند هنگامی که رسانایی فرکانس پایین خاک بیشتر می‌شود ( $\sigma_0 \geq 0.01 S/m$ )، اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک قابل صرف‌نظر کردن است.



شکل (۱۰): ضریب تاثیر برای بیشینه ولتاژ برقیتر وقتی که به صورت عمودی زمین شده است.

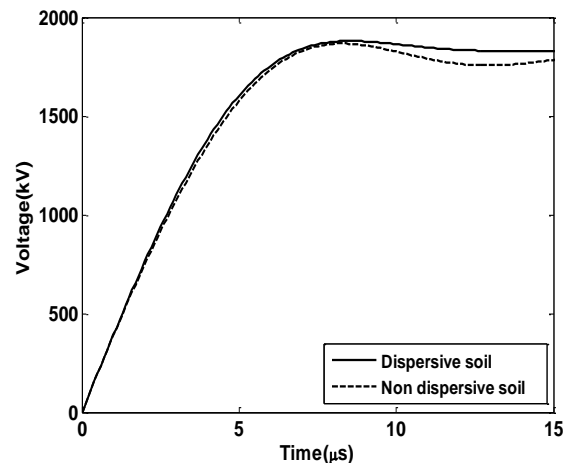


شکل (۱۱): ضریب تاثیر برای زمان بیشینه ولتاژ برقیتر وقتی که به صورت عمودی زمین شده است.

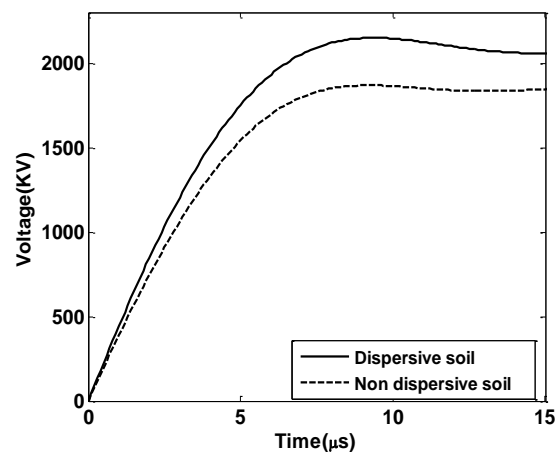
#### ۲-۴- سیستم زمین به صورت شبکه‌ای

تحلیل خط انتقال هوایی متصل به برقیتر که به صورت شبکه‌ای زمین شده است همانند زمین کردن با میله عمودی است. شبکه زمین انتخاب شده با ابعاد  $2m \times 3m$  و در عمق  $1.5m$  داخل خاک دفن می‌باشد. پس از همگرایی الگوریتم، ولتاژ گذرای برقیتر برای ارتفاع  $10m$  و به ازای مقادیر مختلف رسانایی فرکانس پایین زمین محاسبه و سپس در شکل‌های (۱۲ و ۱۳) نشان داده شده‌اند.

خاک وابسته به فرکانس می‌باشد. نتایج تحلیل برای دو مقدار رسانایی فرکانس پایین در شکل‌های (۸ و ۹) نمایش داده شده‌اند. ضمناً در این شکل‌ها، نتایج با حالتی که پارامترهای الکتریکی خاک ثابت هستند مقایسه شده‌اند.



شکل (۸): ولتاژ گذرای برقیتر برای خط هوایی که که با میله عمودی زمین شده و در ارتفاع  $h = 10m$  از سطح زمین با رسانایی  $\sigma_0 = 0.01 S/m$  قرار گرفته است.

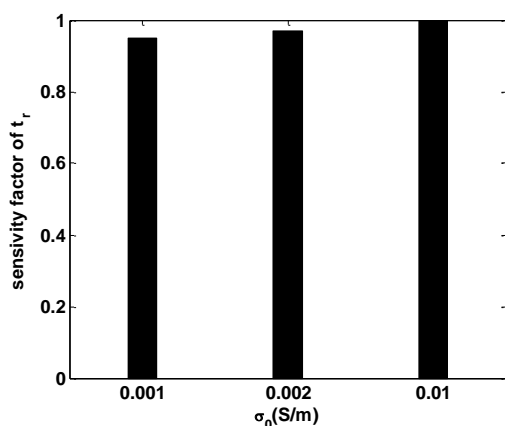


شکل (۹): ولتاژ گذرای برقیتر برای خط هوایی که که با میله عمودی زمین شده و در ارتفاع  $h = 10m$  از سطح زمین با رسانایی  $\sigma_0 = 0.001 S/m$  قرار گرفته است.

برای این‌که اثر وابستگی فرکانسی روی ولتاژ ماکزیمم برقیتر نسبت به حالتی که این اثر چشم پوشی می‌شود، مشخص شود، ضریب تاثیر که به صورت زیر تعریف می‌شود، بررسی و در شکل (۱۰ و ۱۱) نشان داده می‌شود.

$$\text{ولتاژ ماکزیمم وقتی پارامترهای الکتریکی خاک وابسته به فرکانس هستند} \\ \text{ولتاژ ماکزیمم وقتی پارامترهای الکتریکی خاک وابسته به فرکانس نیستند} = \text{ضریب حساسیت ولتاژ} \quad (21)$$

$$\text{زمان پیک ولتاژ وقتی پارامترهای الکتریکی خاک وابسته به فرکانس هستند} \\ \text{زمان پیک ولتاژ وقتی پارامترهای الکتریکی خاک وابسته به فرکانس نیستند} = \text{ضریب حساسیت زمان پیک ولتاژ} \quad (22)$$



شکل (۱۵): ضریب تاثیر برای زمان بیشینه ولتاژ برقگیر وقتی که به صورت شبکه ای زمین شده است.

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیک، تحلیل گذرای خطوط هوایی متصل به برقگیر بالای زمینی با پارامترهای الکتریکی وابسته به فرکانس انجام شد. در تحلیل این مساله، ابتدا مدار معادل نورتن خط هوایی که از دو سر برقگیر و سیستم زمین دیده می شود با روش خط انتقال در حوزه فرکانس محاسبه می شود سپس مدار معادل غیرخطی حاصل شده را با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل می کنیم. از مقایسه تحلیل های انجام شده در این مقاله، دستاوردهای زیر حاصل می شود:

الف: در مقایسه با نرم افزارهای تحلیل گذرا، در تحلیل مساله مورد نظر فقط پاسخ فرکانسی نیاز می باشد.

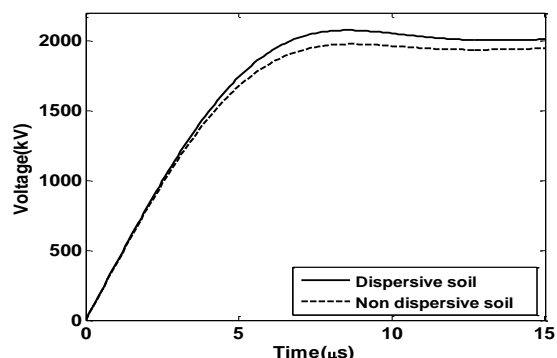
ب: بر خلاف روش عملگر ریاضی، روش ارائه شده حساس به حدس اولیه نمی باشد همچنین نیاز به عملیات مشتق گیری در فرایند تکرار عددی نمی باشد.

ج: در همه حالات بحث شده، اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک منجر به تغییر بیشینه و زمان بیشینه ولتاژ گذرای برقگیر شد به گونه ای که هر چه رسانایی فرکانس پایین افزایش یابد، اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک کمتر می شود. بنابراین انتخاب نوع و محل بهینه برقگیرها در خاک هایی با رسانایی کم، اهمیت این اثر نقش مهمتری را ایفا می کند.

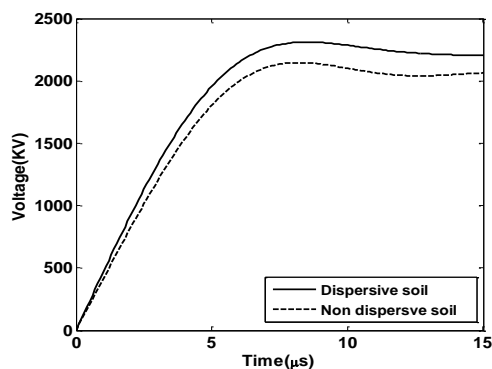
تحلیل مساله مذکور در حالت سه فاز و با استفاده از روش های بهینه سازی جدید، گام بعدی است که در حال انجام می باشد.

### ۶- مراجع

- [1] R. F. Harrington, "Field Computation by Moment Methods," Macmillan, New York, 1968.
- [2] H. Janani et al, "Evaluation of Lightning-Induced Voltage on Overhead Lines with Nonlinear Loads

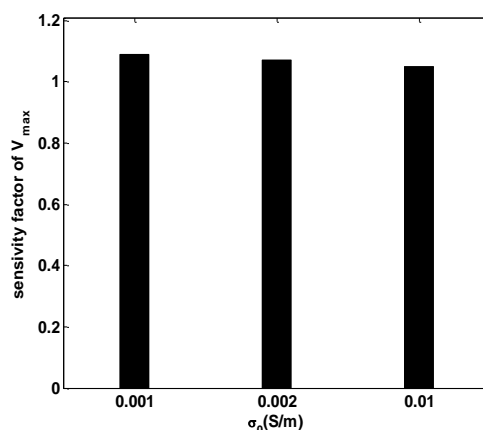


شکل (۱۲): ولتاژ گذرای برقگیر برای خط هوایی که به صورت شبکه ای زمین شده و در ارتفاع  $h = 10 m$  از سطح زمین با رسانایی  $\sigma_0 = 0.01 S / m$  قرار گرفته است.



شکل (۱۳): ولتاژ گذرای برقگیر برای خط هوایی که به صورت شبکه ای زمین شده و در ارتفاع  $h = 10 m$  از سطح زمین با رسانایی  $\sigma_0 = 0.001 S / m$  قرار گرفته است.

به طور مشابه با زمین عمودی، ضریب تاثیر مطابق رابطه (۲۱) و (۲۲) محاسبه و در شکل (۱۴ و ۱۵) نشان داده شده است. این شکل ها نشان می دهد که با افزایش رسانایی خاک، اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک، قابل صرف نظر کردن است. ضمناً این اثر در حالت زمین شبکه ای نسبت به حالتی که زمین به صورت میله عمودی زمین می شود، کمتر است.



شکل (۱۴): ضریب تاثیر برای بیشینه ولتاژ برقگیر وقتی که به صورت شبکه ای زمین شده است.

- [12] Damir Cavka et al, "A comparison of frequency-dependent soil models: Application of analysis of grounding systems," IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, IEEE Trans. Power. Delivery, vol. 37, no. 2, pp. 127-135, 2015.
- [13] S. Visacro et al., "Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes," IEEE Transaction, Power Delivery, vol. 27, no. 2, pp. 927-935, 2012.
- [14] A. Carlos Siqueira de Lima and C. Portela, "Inclusion of Frequency-Dependence Soil Parameters in Transmission-Line Modeling," IEEE Transaction, Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 492-499, 2007.
- [15] M. Akbari, K. Sheshyekani, and M. R. Alemi, "The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on the Lightning Performance of Grounding Systems," IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, vol. 55, no. 4, pp. 739-746, 2013.
- [16] L. Liljstrand and E. Lindell, "Efficiency of Surge Arresters as Protective Devices against Circuit-Breaker-Induced Overvoltages," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 31, no. 4, pp. 1562-1570, 2016.
- [17] A. Bayadi et al, "Parameter Identification of ZnO Arrester Models Based on Genetic Algorithms," Electric Power System Research, New York: Elsevier, vol. 78, no. 1, pp. 1204-1208, 2008.
- [18] S. A. Mass, "Nonlinear Microwave Circuits," Artech House, Norwood, MA, 2003.
- [19] R. L. Haupt, "An introduction to genetic algorithms for electromagnetics," IEEE Antennas on Propagation Magazine, vol. 37, no. 4, pp. 7-15, 1995.
- [20] J. M. Johnson and Y. Rahmat-Samii, "Genetic algorithms in engineering electromagnetics," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 39, pp. 7-21, 1997.
- [21] IEEE Guide for Application of Insulation Coordination, IEEE Standard 1313.2, 1999.
- using the Scattering Theory," IEEE Transaction on. Power Delivery, vol. 21, no. 1, pp. 31-324, 2012.
- [3] M. Akbari et al, "Evaluation of Lightning Electromagnetic Fields and their Induced Voltages on Overhead lines Considering the Frequency-dependence of Soil Electrical Parameters," IEEE Transaction on Electromagnetic, Compatibility, vol. 55, no. 6, pp. 1210-1219, 2013.
- [4] K. Sheshyekani et al, "Evaluation of Lightning-Induced Voltage on Multi-conductor Overhead Lines Located above a Lossy Dispersive Ground," IEEE Transaction on Electromagnetic, Compatibility, vol. 55, no. 6, pp. 1210-1219, 2014.
- [5] J. Mahseredjian, S. Denetiere, L. Dube, B. Khodabakhchian, and L. Gerin-Lajoie, "On a new approach for the simulation of transients in power systems," Elect. Power Syst. Res., vol. 77, no. 11, pp. 1514-1514, 2007.
- [6] B. Gustavsen, and A. Semlyen, "Rational Approximation of Frequency Domain Responses By Vector Fitting," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 14, no. 3, pp. 1051-1061, 1999.
- [7] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Enforcing Passivity for Admittance Matrices Approximated By Rational Functions," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 16, no. 1, pp. 97-103, 2001.
- [8] B. Gustavsen, "Improving the Pole Relocating Properties of Vector Fitting," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 21, no. 3, pp. 1587-1590, 2006.
- [9] K. Sheshyekani, S. H. Hesamedin Sadeghi, R. Moini, F. Rachidi, and M. Paolone, "Analysis of transmission lines with arrester termination, considering the frequency-dependence of grounding systems," IEEE Transaction on Electromagnetic, Compatibility, vol. 51, no. 4, pp. 986-994, 2009.
- [10] F. Rachidi, "A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models With Special Emphasis to Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines," IEEE Transaction on Electromagnetic, Compatibility, vol. 54, no. 4, pp. 898-911, 2012.
- [11] P. H. Frank et al, "Mathematical Foundations of Frequency-Domain Modeling of Nonlinear Circuits and Systems using the Arithmetic Operator Method," International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering, vol. 13, no. 5, pp. 473-495, 2003.



---

**Transient Analysis of Single-Conductor Overhead Lines Terminated to Grounded Arrester Considering Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil using Genetic Algorithm**

**H. Yazdi, S. R. Ostadzadeh\*, F. Taheri Astane**

**Arak University**

(Received: 02/05/2016, Accepted: 11/12/2016)

**Abstract**

*In this paper, a genetic algorithm-based approach for transient analysis of single-conductor overhead line connected to grounded arrester is proposed. In analysis, the grounding systems are buried in lossy dispersive soil, i.e., the electrical parameters of soil are frequency-dependent. In dealing with the problem, the lightning current pulse is first approximated by a finite set of sinusoidal harmonies in a time domain. Norton equivalent circuit viewed across the arrester is then computed via transmission line model (TLM). Finally analyzing this nonlinear circuit by genetic algorithm, transient voltage across the arrester is easily computed. Comparison of the achieved transient voltages with and without considering dispersion of soil shows that this effect plays an important role in selecting lightning arresters and the insulation coordination study of power systems. Moreover, in comparison with arithmetic operator method (AOM), the run-time is reduced.*

**Keywords:** Arrester; overhead line; genetic algorithm

---

\* Corresponding author E-mail: s-ostadzadeh@araku.ac.ir