

علمی-پژوهشی

تحلیل گذرای خطوط انتقال متصل به برق گیر در برخورد مستقیم صاعقه با در نظر گرفتن پدیده غیر خطی یونیزاسیون و اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک تلفاتی

سعیدرضا استادزاده^{۱*}، علی باقری^۲

۱- استادیار، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق دانشگاه اراک

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

چکیده

در این مقاله، اضافه ولتاژ خطوط هوایی متصل به برق گیر در برخورد مستقیم صاعقه با در نظر گرفتن پدیده غیر خطی یونیزاسیون و اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک محاسبه می‌شود. بدین منظور، از تحلیلگرهای گذرای الکترومغناطیسی می‌توان استفاده کرد. در این سناریو، برق گیر توسط یک الکتروود عمودی زمین می‌شود. جهت اعمال وابستگی فرکانسی پارامترهای خاک، از تقریب فرکانس معادل استفاده می‌شود به گونه‌ای که خاک با پارامترهای الکتریکی ثابت معادل جایگزین می‌شود. همچنین برای لحاظ کردن اثر یونیزاسیون خاک، از مقاومت غیر خطی در مدار معادل RLC الکتروود عمودی استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ولتاژ القایی برق گیر در چهار حالت (بدون یونیزاسیون و وابستگی فرکانسی، فقط اثر یونیزاسیون، فقط اثر وابستگی فرکانسی، یونیزاسیون و وابستگی فرکانسی به صورت هم‌زمان) متفاوت می‌باشد به گونه‌ای که ولتاژ القایی برق گیر در حالتی که هر دو اثر لحاظ می‌شود نسبت به حالت‌هایی که هیچ اثر یا یک اثر لحاظ می‌شود، کمتر می‌شود این کاهش در خاک‌هایی که مقاومت ویژه بالا است یا طول الکتروود عمودی زیاد می‌شود، محسوس‌تر است. این حقیقت نقش مهمی در طراحی برق‌گیرها ایفا می‌کند که باید توسط مهندسی قدرت لحاظ شود.

کلیدواژه‌ها: یونیزاسیون، وابستگی فرکانسی، برق گیر، صاعقه، خطوط انتقال

۱. مقدمه

برق‌گیرها به منظور حفاظت در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه که در خطوط انتقال القا می‌شوند، به کار 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 مدل شوند. مدل‌سازی تمام قسمت‌ها بستگی به لحاظ کردن کامل رفتار پیچیده خاک نظیر وابستگی فرکانسی پارامترهای خاک (خاک پراکنده‌ساز)^۱، پدیده غیر خطی یونیزاسیون و غیره دارد. شکل (۱) خط انتقال متصل به برق گیر که در معرض مستقیم صاعقه قرار گرفته است را نشان می‌دهد. در این شکل، برق گیر توسط یک الکتروود عمودی به طول L داخل خاک یونیزه و پراکنده‌ساز زمین شده است. تحلیل چنین مسائلی معمولاً با استفاده از تحلیلگرهای گذرای الکترومغناطیسی^۲ [۱] انجام

می‌شود. در این نرم‌افزارها خطوط هوایی معمولاً به صورت خط انتقال مدل می‌شوند در حالیکه برق گیر به صورت یک مقاومت غیر خطی جایگزین می‌شود. برای مدل‌سازی الکتروود زمین نیز می‌توان از مدار معادل تقریبی RLC [۲ و ۳] یا تطبیق بردار^۳ [۴] استفاده کرد.

تحلیل خطوط انتقال بالای خاک‌های پراکنده‌ساز با روش‌های حوزه فرکانس نظیر المان محدود^۴ انجام می‌شود [۵-۷]. واضح است که این روش‌ها قادر به مدل‌سازی پدیده‌های غیر خطی نظیر برق گیر و یونیزاسیون نمی‌باشند. برای مدل‌سازی این پدیده‌ها باید از روش‌های حوزه زمان نظیر روش حوزه زمان تفاضل محدود^۵ [۸] استفاده کرد. برای لحاظ کردن دو اثر مذکور به صورت هم‌زمان باید از روش‌های ترکیبی فرکانس-زمان^۶ نظیر روش ترکیبی ممان و توازن هارمونیک‌ها^۷ [۹] استفاده کرد. تمامی روش‌های ذکر شده دارای محاسبات زمان بر به واسطه حل

³ Vector fitting (VF)⁴ Finite element method (FEM)⁵ Finite difference time domain (FDTD)⁶ Mixed frequency-time domain method⁷ Moment-Harmonic Balanced method (MoM-HBM)

* نویسنده پاسخگو: s-ostadzadeh@araku.ac.ir

¹ Dispersive soil² Electromagnetics transient solvers

بخش سوم، اعتبارسنجی روش پیشنهادی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف خاک انجام می‌شود. در بخش چهارم، تحلیل حساسیت روی رفتار گذرای خطوط انتقال در برخورد مستقیم صاعقه با در نظر گرفتن یونیزاسیون و پراکندگی خاک به صورت مجزا و هم‌زمان بررسی می‌شود. در نهایت در بخش پنجم، نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲. اصول مدل‌سازی

در این قسمت مدل‌سازی کلیه قسمت‌های ساختار شکل (۱) شامل جریان صاعقه، الکتروود زمین، خط انتقال و برق‌گیر با در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی و یونیزاسیون خاک ارائه می‌شود.

۱-۲. جریان صاعقه

بر اساس آنچه در مقالات ارائه شده است مدل‌های متفاوتی برای مدل‌سازی جریان صاعقه تعریف شده است. رایج‌ترین نوع آن، مدل‌سازی بر اساس منبع جریان با توابع نمایی به صورت زیر است [۱۳]:

$$i(t) = I_p (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

که $\alpha = 0.69/T_h$ و $\beta = 2.2/T_r$ می‌باشند به گونه‌ای که T_h و T_r به ترتیب بیان‌کننده پیشانی موج یا زمان اوج^۳ و طول عمر^۴ شکل موج جریان صاعقه می‌باشند. همچنین مقدار بیشینه جریان صاعقه برابر است با $I_p / \{1 + (\alpha/\beta)(\ln(\alpha/\beta) - 1)\}$.

۲-۲. برق‌گیر

برق‌گیر که به منظور کاهش اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه به خطوط هوایی متصل می‌شود به صورت‌های مختلف در حوزه زمان بیان می‌شود [۱۴]. در این مقاله برق‌گیر به صورت یک مقاومت غیرخطی با مشخصه ولتاژ-جریان به صورت زیر مدل می‌شود:

$$i = p(v/v_{ref})^q \quad (2)$$

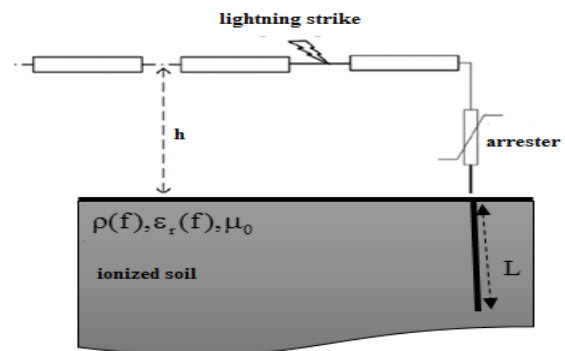
کلیه پارامترها در رابطه فوق، رفتار غیرخطی برق‌گیر را تعیین می‌کنند. در این مقاله برق‌گیر سیلیکن کربید^۵ انتخاب شده است. پارامترهای این برق‌گیر در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.

جدول (۱): پارامترهای برق‌گیر SiC مورد استفاده در این مقاله.

parameters	p	q	v _{ref}
Arrester			
SiC	۱ kA	۴	۴۹ kV

عددی معادلات ماکسول می‌باشند. در کنار روش‌های ذکر شده، روش‌های حوزه فرکانس عملگر ریاضی^۱ [۱۰] نیز می‌توان استفاده کرد منتهی این روش در مدل‌سازی اثر یونیزاسیون در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری دارای خطای زیاد می‌شود [۱۱].

در مقابل روش‌های زمان‌بر فوق، اخیراً تقریبی برای خاک پراکنده‌ساز در مدار معادل RLC ارائه شده است [۱۲]. در این تقریب، با استفاده از تعریف فرکانس معادل، پارامترهای الکتریکی وابسته به فرکانس خاک در یک فرکانس معادل محاسبه شده و با خاکی با پارامترهای الکتریکی ثابت معادل جایگزین می‌شوند. در این مقاله، این تقریب برای لحاظ کردن پراکندگی خاک روی الکتروود عمودی زمین و خط انتقال استفاده می‌شود.



شکل (۱): خط انتقال متصل به برق‌گیر در برخورد مستقیم صاعقه در مجاورت خاک یونیزه و وابسته به فرکانس.

همچنین برای مدل‌سازی اثر یونیزاسیون، در مدار معادل RLC از مقاومت غیرخطی وابسته به جریان استفاده می‌شود [۳]. از این‌رو به سادگی می‌توان دو اثر فوق را به صورت مجزا و هم‌زمان در رفتار الکتروود زمین و خط انتقال در تحلیل‌گرهای گذرای الکترومغناطیسی لحاظ کرد. تاکنون کاربرد جداگانه و هم‌زمان دو اثر فوق روی اضافه ولتاژ برق‌گیر با این روش ارائه نشده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با روش ارائه شده، تطبیق بسیار خوبی با بازده محاسباتی بالا در مقایسه با روش‌های تمام موج^۲ و اندازه‌گیری حاصل می‌شود. همچنین، تحلیل گذرای خطوط انتقال در حضور برق‌گیر با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف خاک به صورت مجزا و هم‌زمان انجام می‌شود. نهایتاً تحلیل حساسیت روی مقاومت ویژه خاک و طول الکتروود زمین برای اضافه ولتاژ القایی برق‌گیر در چهار سناریو خاک ارائه می‌شود.

این مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی می‌شود. در بخش دوم اصول مدل‌سازی پیشنهادی در این مقاله برای خطوط انتقال متصل به برق‌گیر در مجاورت خاک‌های یونیزه و وابسته به فرکانس در محیط تحلیل‌گرهای گذرای الکترومغناطیسی ارائه می‌شود. در

³ Rise time

⁴ Pulse duration

⁵ Silicon Carbide (SiC)

¹ Arithmetic operator method (AOM)

² Full wave

به فرکانس ارائه شده توسط آقای ویساکرو و همکارشان [۱۵]. مقاومت ویژه و ثابت دی الکتریک نسبی معادل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\rho_{eq} = \rho_0 \left(1 + \left(1.2 \times 10^{-6} \times \rho_0^{0.73} \right) \left(f_{eq} - 100 \right)^{0.65} \right)^{-1} \quad (7)$$

$$\epsilon_{req} = \begin{cases} 192.2 & f_{eq} \leq 10 \text{kHz} \\ 1.3 + 7.6 \cdot 10^{-3} \cdot f_{eq}^{-0.4} & f_{eq} \geq 10 \text{kHz} \end{cases} \quad (8)$$

در رابطه فوق، ρ_0 مقاومت ویژه فرکانس پایین خاک تلفاتی است. طبق روابط فوق، برای جریان هایی با پیشانی موج پایین این اثر محسوس تر است.

۲-۳-۲. اثر یونیزاسیون

هنگامی که دامنه جریان تزریقی به داخل الکتروود زمین آن قدر زیاد باشد که میدان الکتریکی القایی داخل خاک از مقدار بحرانی خاک بیشتر باشد، پدیده غیرخطی یونیزاسیون اتفاق می افتد. برای مدل سازی این پدیده مقدار مقاومت در هر قسمت مدار معادل RLC به مقدار غیرخطی زیر تغییر می یابد [۳]:

$$R_k^i = \frac{R_k}{\sqrt{1 + i/I_g}} \quad (9)$$

در رابطه فوق، i پالس جریان تزریقی به الکتروود است و I_g به صورت زیر تعریف می شود:

$$I_g = \frac{E_c \rho}{2\pi R_k^2} \quad (10)$$

که E_c میدان الکتریکی بحرانی خاک بر حسب kV/m است و معمولاً مقداری برابر 300 kV/m انتخاب می شود. همچنین مقدار R_k از رابطه (۳) محاسبه می شود. با ادغام روابط (۷)، (۸) و (۹) در مدار معادل شکل (۲)، می توان مدار معادل الکتروود عمودی در خاک هایی که وابستگی فرکانسی و یونیزاسیون به صورت هم زمان اتفاق می افتد را استخراج کرد. اعتبار سنجی مدار فوق هنگامی که دو اثر خاک به صورت مجزا و هم زمان اتفاق می افتند در قسمت بعدی بررسی می شوند.

۲-۴-۲. مدل سازی خط انتقال

همان طور که می دانیم در تحلیلگرهای گذرای الکترومغناطیسی نظیر EMTP^۴ برای مدل سازی خطوط انتقال از دو مدل پارامتر ثابت^۵ (CP) و وابسته به فرکانس^۶ (FD) استفاده می شود. در این

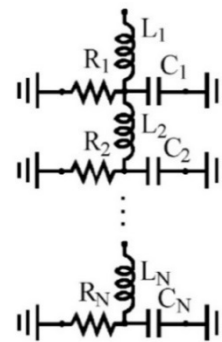
۲-۳-۳. مدار معادل RLC الکتروود زمین

بر اساس نتایج مقالات، رفتار فرکانسی یک الکتروود زمین در خاک تلفاتی با پارامترهای الکتریکی ثابت را می توان با مدار معادل RLC توزیع شده مطابق شکل (۲) مدل کرد. در این شکل الکتروودی به طول L به N قسمت تقسیم شده و هر قسمت با مدار معادل RLC جایگزین شده است. کلیه عناصر فشرده در هر قسمت به صورت زیر محاسبه می شوند [۲]:

$$R_k = \frac{\rho}{2\pi l_k} \left[\ln \left(\frac{4l_k}{a} \right) - 1 \right] (\Omega) \quad (3)$$

$$C_k = 2\pi \epsilon I_k / \left[\ln \left(\frac{4l_k}{a} \right) - 1 \right] (F) \quad (4)$$

$$L_k = \frac{\mu_0 I_k}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2l_k}{a} \right) - 1 \right] (H) \quad (5)$$



شکل (۲): مدار معادل RLC برای الکتروود زمین در خاک تلفاتی با پارامترهای الکتریکی ثابت.

لازم بذکر است مدار فوق با پارامترهای ذکر شده برای جریان هایی با پیشانی موج بالا^۱ است. در غیر این صورت برای جریان هایی با پیشانی موج پایین^۲ مقادیر اندوکتانس ها باید تغییر کنند [۲] که از ذکر آن خودداری می شود.

۲-۳-۱. اثر وابستگی فرکانسی

مدار معادل ذکر شده در قسمت قبلی را می توان با استفاده از تقریب فرکانس معادل برای خاک هایی که پارامترهای الکتریکی وابسته به فرکانس دارند، به کار برد. در این تقریب، پارامترهای الکتریکی خاک در یک فرکانس معادل به صورت زیر محاسبه می شوند [۱۲]:

$$f_{eq} = \frac{1}{4T_f} \quad (6)$$

که T_f زمان پیشانی موج است. به عنوان مثال برای مدل وابسته

³ Visacro et al

⁴ Electromagnetic Transient Program (EMTP)

⁵ Constant parameter (CP)

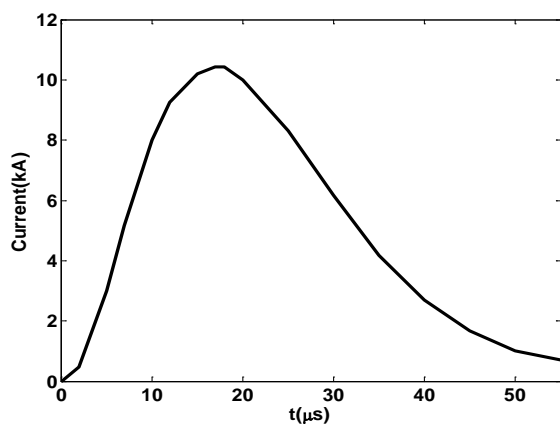
⁶ Frequency dependent (FD)

¹ First stroke current

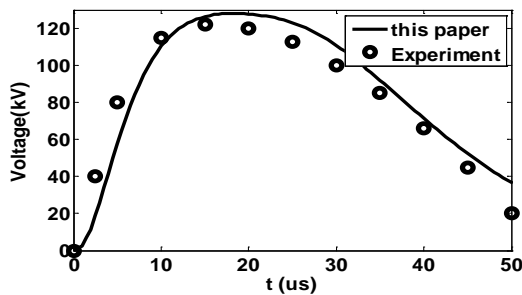
² Subsequent stroke current

۲-۳. خاک فقط با اثر یونیزاسیون

در سناریو دوم فرض کنید تنها اثر یونیزاسیون خاک اتفاق می‌افتد. الکتروود عمودی زمین دارای طول $3/05$ m و شعاع $12/7$ mm و در خاکی با مقاومت ویژه $87/2 \Omega m$ ، ثابت دی‌الکتریک نسبی 10 و میدان الکتریکی بحرانی 127 Kv/m مدفون است. جریانی مطابق شکل (۵) تزریق می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ولتاژ گذرای الکتروود با روش پیشنهادی و اندازه‌گیری [۱۷] در شکل (۶) نشان داده است. همان‌طور که از شکل می‌توان مشاهده کرد روش پیشنهادی به‌خوبی رفتار خاک را پیش‌بینی می‌کند.



شکل (۵): شکل موج جریان تزریقی به الکتروود در سناریو دوم [۱۷].



شکل (۶): ولتاژ گذرای الکتروود زمین در سناریو دوم بر مبنای مدل‌سازی الکتروود با روش RLC و مقایسه با نتایج اندازه‌گیری [۱۷].

۳-۳. خاک فقط با اثر وابستگی فرکانسی

در سناریو سوم اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک به‌تنهایی بررسی می‌شود. الکتروود عمودی زمین دارای طول 3 m و در خاکی با مقاومت ویژه فرکانس پایین $1000 \Omega m$ مدفون است و جریان‌های اولیه و ثانویه مطابق شکل (۹) تزریق می‌شوند. پارامترهای معادل برای دو جریان مذکور در جدول (۲) ارائه شده‌اند. نتایج ولتاژ گذرای الکتروود با روش پیشنهادی محاسبه و با روش المان محدود [۱۸] در شکل (۱۰) مقایسه شده است. با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که برای دو جریان، ولتاژ

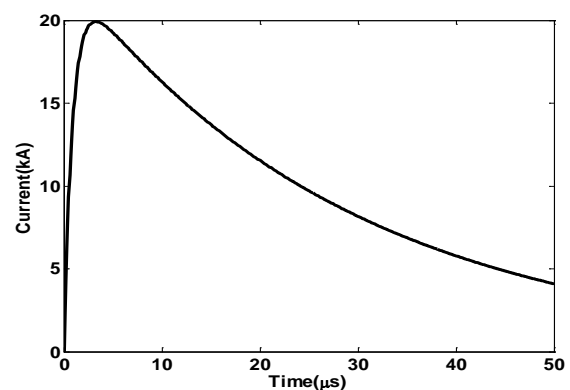
مقاله با استفاده از تقریب فرکانس معادل از مدل CP استفاده شده است. مدل‌سازی خطوط انتقال در مجاورت خاکه‌ای تلفاتی با پارامترهای الکتریکی ثابت توسط مدل CP در مرجع [۱۶] توضیح داده شده است.

۳. اعتبارسنجی

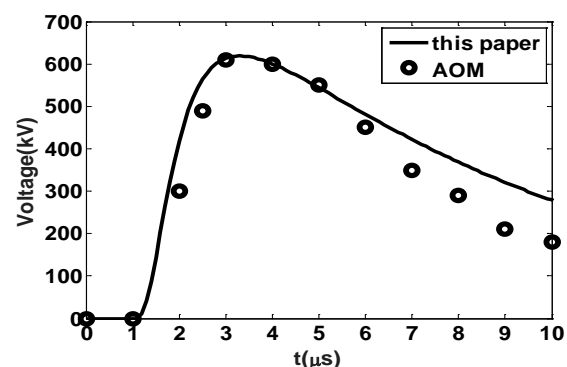
در این قسمت اعتبار مدل‌سازی پیشنهادی برای سناریوهای مختلف خاک بررسی و با نتایج اندازه‌گیری و روش‌های تمام موج موجود در مقالات مقایسه می‌شود.

۱-۳. خاک بدون یونیزاسیون و وابستگی فرکانسی

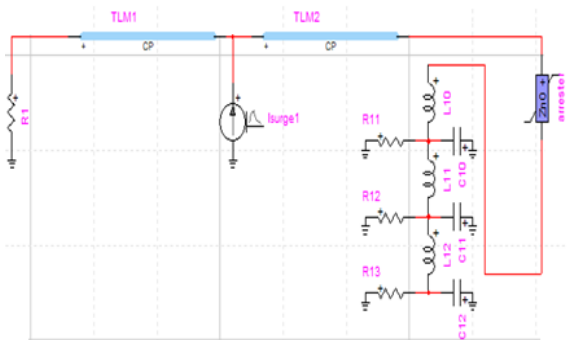
در سناریو اول فرض می‌شود اثرات وابستگی فرکانسی و یونیزاسیون خاک هیچ کدام در خاک اتفاق نمی‌افتد. فرض کنید یک خط انتقال به طول 400 m در ارتفاع 22 m از سطح زمین قرار بگیرد. طول الکتروود عمودی زمین 3 m است و در خاکی با مقاومت ویژه و ثابت دی‌الکتریک نسبی به ترتیب 100 و 10 مدفون می‌باشد. همچنین درجه غیرخطی برق‌گیر مطابق جدول (۱) می‌باشد. جریان صاعقه مورد استفاده در این سناریو در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار EMTD با روش عملگر ریاضی AOM [۱۰] مقایسه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۴)، توافق خوب دو روش را نشان می‌دهد.



شکل (۳): شکل موج جریان صاعقه مورد استفاده در سناریو اول.



شکل (۴): محاسبه اضافه ولتاژ دو سر برق‌گیر بر مبنای مدل‌سازی الکتروود با روش RLC و مقایسه با مرجع [۱۰] در سناریو اول.



شکل (۱۱): ساختار کلی شبیه‌سازی شده در محیط EMTP برای محاسبه اضافه ولتاژ برق گیر.

۴-۱. ولتاژ القایی برق گیر

فرض کنید خط انتقال به طول ۴۰۰ km در ارتفاع ۱۰ m از سطح خاک تلفاتی با ثابت دی‌الکتریک نسبی ۱۰ و با سه مقدار مقاومت ویژه فرکانس پایین ۱۰۰۰ Ωm، ۱۰۰ Ωm و ۱۰ Ωm قرار گرفته است. این خط در معرض برخورد مستقیم صاعقه با جریان ۲۰ KA - ۲/۲ μs قرار گرفته است. جدول (۳) تغییرات مقاومت ویژه و ثابت دی‌الکتریک نسبی معادل را بر حسب سه مقدار مقاومت ویژه فرکانس پایین نشان می‌دهد که در محاسبات بعدی به کار گرفته می‌شوند.

جدول (۳): مقاومت ویژه و ثابت دی‌الکتریک نسبی معادل به‌زای مقادیر مختلف از مقاومت ویژه فرکانس پایین خاک.

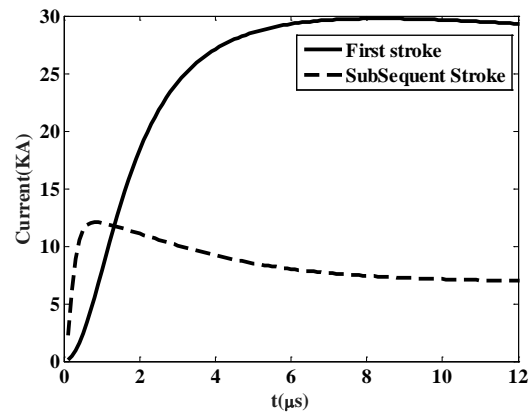
ρ_0 (Ω.m)	۱۰۰		۱۰۰۰		۱۰۰۰۰	
$f_{eq} = 125$ kHz	ρ_{eq}	ϵ_{req}	ρ_{eq}	ϵ_{req}	ρ_{eq}	ϵ_{req}
	۹۰	۸۰	۸۰۰	۸۰	۳۰۰۰	۸۰

الکتروود زمین نیز به‌صورت عمودی و دارای طول‌های ۳ m و ۶m در خاک مدفون می‌باشد. برق‌گیر مورد استفاده دارای پارامترهای موجود در جدول (۱) است. نتایج شبیه‌سازی برای ولتاژ القایی دو سر برق‌گیر به‌زای مقادیر مختلف مقاومت ویژه خاک و طول الکتروود در شکل‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. ضمناً در هر شکل، چهار سناریو برای خاک در نظر گرفته شده است. جهت درک اهمیت طول الکتروود و مقاومت ویژه خاک در هر سناریو، آنالیز حساسیت روی ولتاژ خاک در هر سناریو نسبت به حالتی که یونیزاسیون و وابستگی فرکانسی پارامترهای خاک اتفاق نمی‌افتند، انجام می‌شود. از این‌رو، ضریب کاهش نسبی ولتاژ برق‌گیر در سناریوهای مختلف خاک به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

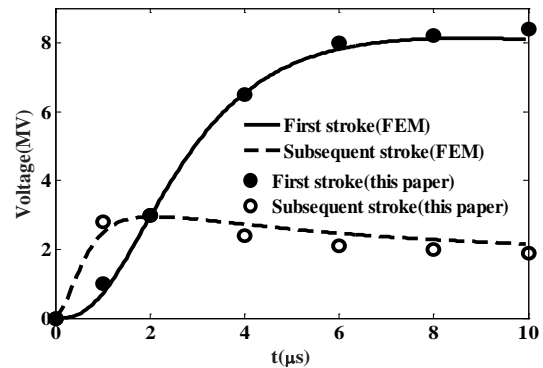
گذرا با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌شود.

جدول (۲): فرکانس معادل، مقاومت ویژه معادل و ثابت دی‌الکتریک نسبی معادل برای دو جریان اولیه و ثانویه در سناریو سوم.

جریان اولیه			جریان ثانویه		
f_{eq} (kHz)	ρ_{eq} (Ω.m)	ϵ_{req}	f_{eq} (kHz)	ρ_{eq} (Ω.m)	ϵ_{req}
۳۱/۲۵	۹۰۰	۱۳۰	۳۱۲/۵	۷۰۰	۵۰



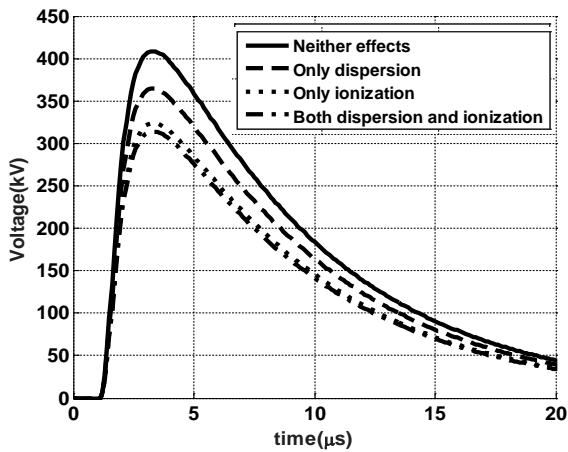
شکل (۹): شکل موج جریان‌های اولیه و ثانویه به الکتروود در سناریو سوم [۱۸].



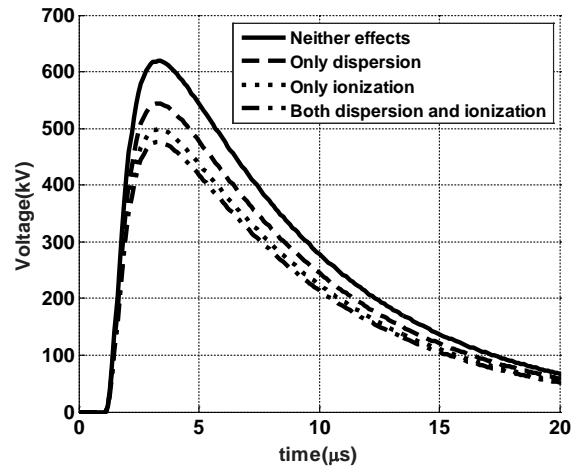
شکل (۱۰): ولتاژ گذرای الکتروود زمین در سناریو دوم بر مبنای مدل‌سازی الکتروود با روش RLC و مقایسه با نتایج المان محدود [۱۸].

۴. تحلیل گذرای خطوط انتقال متصل به برق‌گیر

در این قسمت مدل‌سازی ارائه شده در قسمت‌های قبلی برای خط انتقال، برق‌گیر و الکتروود زمین موجود در شکل (۱)، وارد نرم‌افزار EMTP شده و اثرات سناریوهای مختلف یونیزاسیون و وابستگی فرکانسی خاک به‌صورت مجزا و هم‌زمان روی ولتاژ القایی برق‌گیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شماتیک مساله در محیط نرم‌افزار EMTP در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

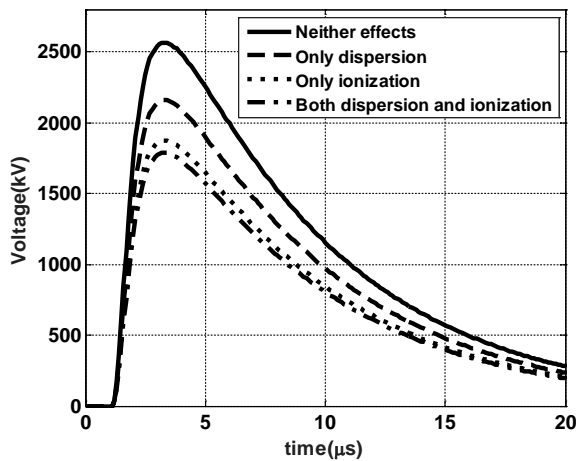


(ب)

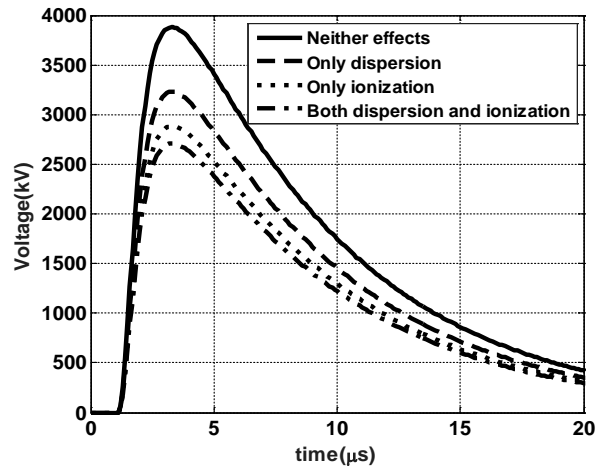


(الف)

شکل (۱۲): ولتاژ دو سر برق گیر در مجاورت خاک تلفاتی با مقاومت ویژه $\rho = 100 \Omega m$ برای دو مقدار طول الکترود. الف) ۳ m ب) ۶ m

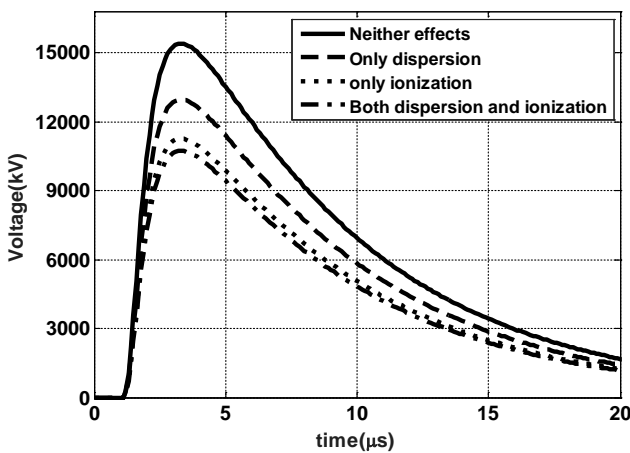


(ب)

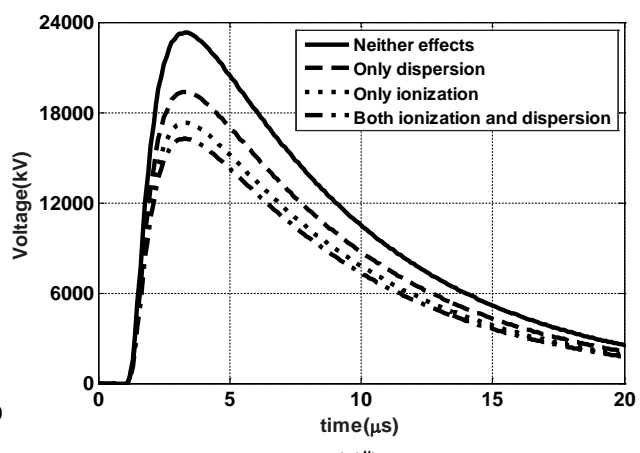


(الف)

شکل (۱۳): ولتاژ دو سر برق گیر در مجاورت خاکی با مقاومت ویژه $\rho = 100 \Omega m$ برای دو مقدار طول الکترود. الف) ۳ m ب) ۶ m



(ب)



(الف)

شکل (۱۴): ولتاژ دو سر برق گیر در مجاورت خاکی با مقاومت ویژه $\rho = 100 \Omega m$ برای دو مقدار طول الکترود. الف) ۳ m ب) ۶ m

لازم به ذکر است کلیه یافته‌های فوق برای جریانی است که دارای پیشانی موج نسبتاً بالایی می‌باشد (جریان اولیه). در مورد جریان‌هایی با پیشانی موج پایین (جریان ثانویه)، به دلیل داشتن مؤلفه‌های فرکانسی بالاتر، میزان تضعیف ولتاژ القایی برق گیر در سناریوهای مختلف بیشتر خواهد شد. این واقعیت از نظر فیزیکی بدان علت است که هنگامی که فرکانس افزایش یابد، میزان تضعیف میدان الکتریکی نیز افزایش خواهد یافت. از جهتی می‌دانیم اختلاف ولتاژ دو سر خط انتقال بر حسب میدان الکتریکی برابر است با:

$$V = \int_0^h \bar{E} \cdot d\bar{l} \quad (14)$$

در رابطه فوق، h ارتفاع خط انتقال از سطح خاک است. واضح است هنگامی که میدان الکتریکی کاهش می‌یابد، متعاقباً، اختلاف ولتاژ دو سر برق گیر نیز کاهش خواهد یافت.

۴-۲. بازده محاسباتی

به‌عنوان آخرین دستاورد این مقاله، زمان محاسبه روش پیشنهادی با روش‌های موجود در مقالات برای محاسبه اضافه ولتاژ برق گیر در جدول (۴) مقایسه می‌شوند. از این جدول به‌راحتی می‌توان بازده محاسباتی بالای روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها مشاهده کرد. این موضوع از دیدگاه مهندسی قدرت حائز اهمیت است. همچنین، روش حوزه فرکانس المان محدود فقط اثر وابستگی فرکانسی را می‌تواند لحاظ کند. ضمناً زمان محاسبات مربوط به دو روش AOM و HBM در غیاب یونیزاسیون مربوط به محاسبه ادمیتانس ورودی دیده شده از دو سر برق گیر در حوزه فرکانس است که با روش عددی ممان محاسبه می‌شود. جزئیات این دو روش در مراجع [۹-۱۰] توضیح داده شده است.

محاسبه ولتاژ برق گیر با روش پیشنهادی با فرض زمان نمونه‌برداری $\Delta t = 0.1 \mu s$ در بازه زمانی $[0-20] \mu s$ می‌باشد. در این جدول کلیه محاسبات توسط نرم‌افزار EMTP با کامپیوتری با پردازشگر $470.2 \text{ MQ} - iV$ و حافظه 6 GB انجام شده است.

جدول (۴): مقایسه زمان محاسبه (ثانیه) برای پیش‌بینی رفتار گذرای خط انتقال متصل به برق گیر در سناریوهای مختلف خاک تلفاتی.

Situation Method	Both effects	Only ionization	Only dispersion	Neither effects
FEM []	----	----	۱۶۵۸	۱۶۵۰
AOM []	۵۵	۵۳	۲۲	۲۰
HBM []	۴۲۳	۴۲۰	۲۲	۲۰
This paper	۲	۲	۱/۲	۱/۲

$$RF_f = \left| \frac{V_{\text{arrestor}}^{\text{only-dispersion}} - V_{\text{arrestor}}^{\text{neither-effects}}}{V_{\text{arrestor}}^{\text{neither-effects}}} \right| \quad (11)$$

$$RF_i = \left| \frac{V_{\text{arrestor}}^{\text{only-ionization}} - V_{\text{arrestor}}^{\text{neither-effects}}}{V_{\text{arrestor}}^{\text{neither-effects}}} \right| \quad (12)$$

$$RF_b = \left| \frac{V_{\text{arrestor}}^{\text{both-effects}} - V_{\text{arrestor}}^{\text{neither-effects}}}{V_{\text{arrestor}}^{\text{neither-effects}}} \right| \quad (13)$$

روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) به ترتیب کاهش نسبی ولتاژ برق گیر در خاکی که فقط وابستگی فرکانسی، فقط یونیزاسیون و هر دو اثر رخ می‌دهد نسبت به حالتی که هیچ اثری در خاک اتفاق نمی‌افتد، را بیان می‌کنند. جدول (۳) کاهش نسبی اضافه ولتاژ برق گیر را به ازای مقادیر مختلف طول الکتروود و مقاومت ویژه خاک نشان می‌دهد. از این جدول نکات زیر استخراج می‌شود:

جدول (۳): مقایسه درصد کاهش نسبی اضافه ولتاژ برق گیر برای خاک در سناریوهای مختلف خاک تلفاتی.

RF	RF _f		RF _i		RF _b	
$\rho_0 (\Omega.m)$	۳ m	۶ m	۳ m	۶ m	۳ m	۶ m
۱۰۰	۱۰%	۱۲%	۱۸%	۲۲%	۲۱%	۲۴%
۱۰۰۰	۱۳%	۱۶%	۲۴%	۳۱%	۲۹%	۳۳%
۱۰۰۰۰	۱۸%	۲۳%	۳۰%	۴۰%	۳۷%	۴۷%

الف: برای هر مقدار ثابت مقاومت ویژه خاک، هنگامی که طول الکتروود افزایش می‌یابد، ولتاژ القایی برق گیر نیز کاهش می‌یابد. واضح است این کاهش برای هر سناریو خاک تا طول مؤثر الکتروود [۲۰-۱۹] ادامه می‌یابد.

ب: برای هر مقدار طول الکتروود، کاهش ولتاژ به‌واسطه پدیده غیرخطی یونیزاسیون به‌تنهایی بیشتر از اثر فقط وابستگی فرکانسی پارامترهای خاک، است. هنگامی که هر دو اثر هم‌زمان رخ می‌دهند به‌خصوص وقتی مقاومت فرکانس پایین خاک افزایش می‌یابد، این کاهش محسوس‌تر است.

ج: کاهش به‌وجود آمده به‌واسطه دو اثر وابستگی فرکانسی و یونیزاسیون خاک تلفاتی در دو بند قبل از نظر فیزیکی قابل پیش‌بینی است. با توجه به مرجع [۱۰] هنگامی که رسانایی خاک افزایش می‌یابد، ولتاژ برق گیر کاهش می‌یابد (شکل (۱۷) و (۱۸) در مرجع [۱۰] را ملاحظه کنید). در خاک‌هایی با پارامترهای الکتریکی وابسته فرکانس، چون رسانایی خاک افزایش می‌یابد [۲۱]، بنابراین انتظار می‌رود ولتاژ برق گیر کاهش یابد. به طریق مشابه هنگامی که اثر یونیزاسیون رخ می‌دهد، به دلیل افزایش شدت میدان الکتریکی القایی داخل خاک، رسانایی خاک اطراف الکتروود زمین افزایش می‌یابد [۲۲] لذا ولتاژ برق گیر کاهش می‌یابد.

- [3] L. Grcev, "Modeling of Grounding Electrodes under Lightning Currents," IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, vol. 51, no. 3, pp. 559-571, 2009.
- [4] S. Mehrabi and S. R. Ostadzadeh, "Impact of Ocean-Land Mixed Propagation Path on Equivalent Circuit of Grounding Rods," Journal of Communication Engineering, vol. 8, no. 2, pp. 197-207, 2019.
- [5] D. Cavka, N. Mora, and F. Rachidi, "A comparison of frequency-dependence soil models: application to the analysis of grounding systems," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 56, no. 1, pp. 177-187, 2014.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Z. Feng, X. Wen, X. Tong, H. Lu, L. Lan, and P. Xing, "Impulse characteristics of tower grounding devices considering soil ionization by the timedomain difference method," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 4, pp. 1906-1913, Aug. 2015.
- [9] J. Ghayur Safar, R. Shariatinasab, and Jinliang He, "Comprehensive Modeling of Grounding Electrodes Buried in Ionized Soil Based on MoM-HBM Approach," IEEE Trans. Power. Del., vol. 57, no. 1, pp. 1627-1636, 2019.
- [10] 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.
- [11] K. Sheshyekani, S. H. H. Sadeghi, R. Moini, and F. Rachidi, "Frequency-domain analysis of ground electrodes buried in an ionized soil when subjected to surge currents: A MoM-AOM approach," Electric Power System Research, vol. 81, pp. 290-296, 2011.
- [12] M. Mokhtari, Z. Abdul-Malek, and C. L. Wooi, "Integration of Frequency Dependent Soil Electrical Properties in Grounding Electrode Circuit Model," International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), vol. 6, no. 2, pp. 792-799, 2016.
- [13] M. W-Wik, "Double exponential models for comparison of lightning, nuclear and electrostatic discharge spectra," Proc. 6th Symp. Tech. Exhib. Electromagn. Compat, Mar. 5-7, Zurich, pp. 169-174, 1985.
- [14] J. A. Martinez et al, "Parameters determination for Modeling Systems Transients-Part V: Surge Arrester," IEEE Trans on Power Delivery, vol. 20, no. 3, pp. 2073-2078, 2005.
- [15] 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.
- [16] F. Rachidi, "A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models With Special Emphasis to Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 54, no. 4, pp. 898-911, Aug. 2012.
- [17] A. C. Liew and M. Darveniza, "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths," Proc. Inst. Elect. Eng.-London, vol. 121, no. 2, pp. 123-135, 1974.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از تقریب فرکانس معادل، اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک در مدار معادل RLC الکترومغناطیسی عمودی زمین ادغام شد. سپس اثر یونیزاسیون خاک به صورت مقاومت غیرخطی در مدار RLC لحاظ شد. نهایتاً رفتار گذرای خطوط انتقال متصل به برق‌گیر در مجاورت خاک تلفاتی با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف خاک با استفاده از نرم‌افزار EMTP بررسی شد. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، نتایج زیر قابل استنتاج است:

الف: برای خاک‌هایی با مقاومت ویژه پایین ($\rho \leq 100 \Omega m$) می‌توان از اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک صرف‌نظر کرد به‌گونه‌ای که رفتار خاک در جاهایی که وابستگی فرکانسی و یونیزاسیون هم‌زمان اتفاق می‌افتد، با رفتار خاکی که فقط اثر یونیزاسیون اتفاق می‌افتد، تقریباً معادل است.

ب: برای خاک‌هایی با مقاومت ویژه بالا ($\rho \geq 1000 \Omega m$) اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک محسوس است به‌گونه‌ای که رفتار خاک در جاهایی که وابستگی فرکانسی و یونیزاسیون هم‌زمان اتفاق می‌افتد، با رفتار خاکی که فقط اثر یونیزاسیون اتفاق می‌افتد، کاملاً متمایز است. این تمایز برای جریان‌هایی با پیشانی موج پایین، محسوس‌تر است.

ج: در حالت کلی وقتی یونیزاسیون و وابستگی فرکانسی پارامترهای خاک به‌صورت مجزا یا هم‌زمان اتفاق می‌افتد، ولتاژ القایی برق‌گیر کاهش می‌یابد این کاهش در صورت حضور هم‌زمان دو اثر بیشتر است به‌خصوص زمانی که مقاومت ویژه خاک و طول الکترومغناطیسی زمین افزایش می‌یابد.

د: مدار معادل RLC در خاک‌هایی که دو اثر اتفاق می‌افتد از دو نظر مفید می‌باشد. اولاً مدل‌سازی بر اساس تفسیر فیزیکی از پارامترهای مساله است و دوما دارای زمان محاسبات بسیار کم است.

و: علی‌رغم فوائد مدار معادل RLC، این مدل مداری فقط برای الکترودهای زمین ساده (افقی و عمودی) به‌کار برده می‌شود در حالیکه برای ساختارهای پیچیده نظیر شبکه‌های زمین [۲۳] باید از روش تطبیق بردار [۲۴] استفاده شود.

۶. مراجع

- [1] 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.
- [2] L. Grcev and M. popov, "On High-Frequency Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1598-1061, 2005.

- Lightning Currents,” IEEE Transaction on Industry Application, vol. 51, pp. 4943-4951, 2015.
- [22] Jinliang He, “Progress in Lightning Impulse Characteristics of Grounding Electrodes with Soil Ionization,” IEEE Transaction on Industry Application, vol. 51, pp. 4924-4933, 2015.
- [23] H. Yazdi, S. R. Ostadzadeh, and F. Taheri Astaneh, “Transient Analysis of Single-Conductor Overhead Lines Terminated to Grounded Arrester Considering Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil using Genetic Algorithm,” Journal of Applied Electromagnetics, vol. 3, no. 2, pp. 35-42, 2015. (In Persian)
- [24] H. Chen and Y. Du, “Lightning Grounding Grid Model Considering Both the Frequency-Dependent Behavior and Ionization Phenomenon,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 54, no. 4, pp. 898-911, Aug. 2018.
- [18] 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 Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 55, no. 4, pp. 739-746, Apr. 2013.
- [19] S. S. Sajjadi, V. Aghajani, and S. R. Ostadzadeh, “Comprehensive Formulae for Effective Length of Multiple Grounding Electrodes Considering Different Aspects of Soils: Simplified Multiconductor Transmission Line-Intelligent Water Drop Approach,” Int. J. Numer. Model El. 2020; e2721, <https://doi.org/10.1002/jnm.2721>.
- [20] S. R. Ostadzadeh, “Validity of Improved MTL for Effective Length of Counterpoise Wires under Low and High-Valued Lightning Currents,” Advanced Electromagnetics, vol. 9, no. 1, pp. 1-8, 2020.
- [21] S. Visacro, “What Engineers in Industry Should Know About the response of Grounding Electrodes Subjected to