

مدل سازی جامع سیستم زمین جهت تحلیل رفتار گذرای آن در مقابل ضربات صاعقه

جلیل غیور صفار^۱ و رضا شریعتی نسب^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۱	
واژگان کلیدی: سیستم زمین، تحلیل گذرا، روش ممان، تعادل هارمونیک، یونیزاسیون خاک.	در هنگام تخلیه‌ی صاعقه، رفتار گذرای سیستم زمین تحت تأثیر رفتار غیرخطی وابسته به زمان ناشی از یونیزاسیون و اثرات وابسته به فرکانس پارامترهای الکتریکی خاک ناشی از طیف فرکانسی بالای جریان صاعقه می‌باشد. در این مقاله، برای مدل سازی سیستم زمین، از یک روش جدید مبتنی بر ترکیب روش ممان (MOM) و روش تعادل هارمونیک (HBM) استفاده شده است. به طوری که جهت افزایش دقت، پدیده یونیزاسیون خاک در حوزه زمان و وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک در حوزه فرکانس، به صورت همزمان در مدل سازی لحاظ شده است. در روش پیشنهادی ابتدا با تحلیل سیستم زمین با استفاده از حل معادلات انتگرالی به روش ممان، بدون در نظر گرفتن یونیزاسیون خاک و با لحاظ کردن وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک، مدار معادلی از نوع نورتن در حوزه فرکانس استخراج می‌شود. سپس، با لحاظ نمودن بار غیر خطی ناشی از یونیزاسیون خاک به مدار معادل نورتن منتهی، سیستم زمین به مدار معادل غیرخطی تبدیل می‌شود. جهت تحلیل مدار معادل غیرخطی استخراجی، از روش تعادل هارمونیک (HBM) استفاده می‌گردد. برای بررسی عملکرد مدل پیشنهادی، نتایج حاصل از مدل سازی سیستم زمین به روش پیشنهادی با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری عملی مقایسه و صحت‌سنجی شده است که نتایج حاصله، کارایی و دقت بالای روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

قابلیت اطمینان شبکه‌های قدرت به عملکرد شبکه در مقابل اضافه ولتاژها بستگی زیادی دارد [۱]. یکی از منابع اصلی اضافه ولتاژ در شبکه‌های قدرت، ولتاژ ایجاد شده ناشی از ضربات برگشتی صاعقه در سیستم زمین ترانسفورماتورها، دکل‌ها و تجهیزات حفاظتی می‌باشد [۲]؛ که موجب تأثیرپذیری زیاد عملکرد صاعقه در شبکه‌های قدرت به امپدانس سیستم زمین گردیده است [۳]. در نتیجه طراحی مناسب سیستم زمین نقش کلیدی در عملکرد مناسب شبکه قدرت، ایمنی پرسنل، حفاظت تجهیزات، بهبود کیفیت توان و سازگاری الکترومغناطیسی

(EMC) دارد [۴-۶]. از این رو ارزیابی عملکرد سیستم زمین در مقابل ضربات صاعقه امری ضروری بوده و نیاز به مدل سازی دقیق آن دارد. رفتار دینامیکی و گذرای سیستم زمین تحت اصابت صاعقه، به دلیل وابستگی زیاد عملکرد آن به فرکانس عامل تحریک، با عملکرد سیستم زمین تحت شرایط فرکانس قدرت متفاوت است [۷]. به طور کلی، رفتار پویای الکترودهای زمین که تحت اصابت صاعقه قرار می‌گیرند، شامل سه فرآیند فیزیکی اصلی است [۸]: ۱- رفتار غیر خطی ناشی از یونیزاسیون خاک [۹]، ۲- وابستگی فرکانسی سیستم زمین که ناشی از محتوای بالای فرکانسی جریان صاعقه است [۱۰]، ۳- وابستگی به فرکانس

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: shariatinasab@birjand.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند

پارامترهای الکترومغناطیسی خاک [۱۱]. در هنگام تخلیه صاعقه در سیستم زمین، در صورت افزایش میدان الکتریکی منتهی به اطراف الکتروود نسبت به استقامت بحرانی خاک، امکان وقوع یونیزاسیون وجود دارد. تاکنون مطالعات زیادی بر روی پدیده یونیزاسیون خاک انجام گرفته و مدل‌های متنوعی نیز ارائه گردیده است [۱۳]. اما اساساً، در روش‌های کاربردی در تحلیل سیستم‌های زمین، رفتار یونیزاسیون خاک توسط یک روش هندسی الکتروود متغیر مدل شده است. در این نوع مدل‌سازی، مقاومت ویژه خاک ثابت در نظر گرفته شده و ناحیه یونیزه شده بصورت راسا شبیه‌سازی گردیده است. بنابراین، میدان الکتریکی در آن ناحیه صفر در نظر گرفته می‌شود؛ شرایط مذکور، تفاوت زیادی با اصول فیزیکی یونیزاسیون خاک داشته [۱۴] و منجر به تأثیرگذاری مثبت و دور از واقعیت، پدیده یونیزاسیون می‌گردد [۱۵].

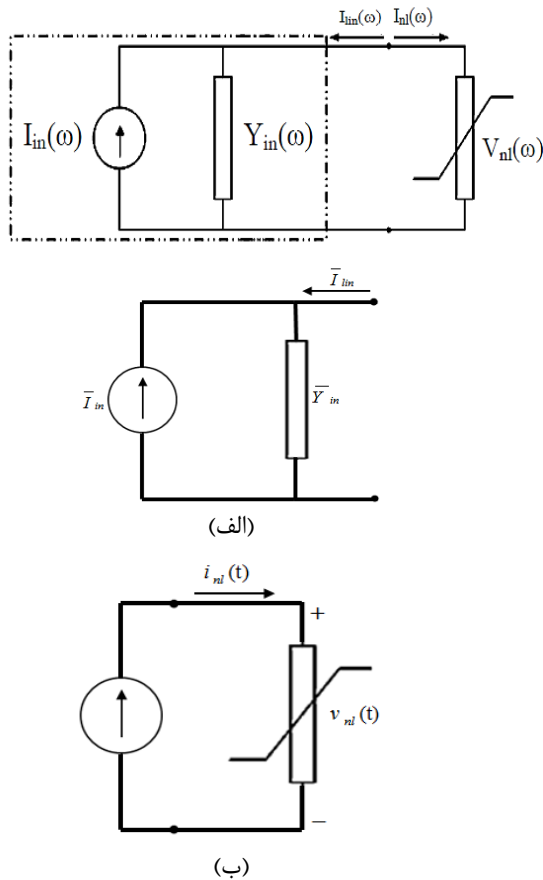
همچنین، در هنگام برخورد صاعقه به سیستم زمین، وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک نیز آشکار می‌شود که می‌بایست در مدل‌سازی سیستم زمین به ویژه در خاک‌های با مقاومت ویژه بالا در نظر گرفته شود [۱۶]. با توجه به تحقیقات انجام شده [۱۷]، وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک منجر به کاهش پتانسیل الکتروودهای زمین در مقایسه با حالتی می‌گردد که این پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، مدل‌سازی دقیق سیستم زمین، تحت تأثیر دو عامل یونیزاسیون خاک و وابستگی به فرکانس پارامترهای الکترومغناطیسی خاک می‌باشد که لحاظ نمودن توأم آن‌ها باعث پیچیدگی تحلیل‌ها می‌گردد.

روش‌های عددی کاربردی جهت تحلیل رفتار گذرای سیستم‌های زمین تحت اصابت صاعقه، شامل روش مداری [۱۸ و ۱۹]، روش خط انتقال [۲۰ و ۲۱] و روش میدان الکترومغناطیسی [۲۲ و ۲۳] هستند. اعتبار روش مداری و روش خط انتقال به یک بازه فرکانسی مشخص محدود می‌گردد و ممکن است نتایج دقیقی برای صاعقه‌هایی با زمان پیشانی سریع که دارای محتوای فرکانسی بالایی هستند را فراهم نکنند [۲۳]. در مقابل روش‌های مبتنی بر میدان الکترومغناطیسی، نتایج دقیقی برای بازه فرکانسی وسیعی فراهم می‌کنند. از میان روش‌های میدان الکترومغناطیسی، روش ممان (MoM) در حوزه فرکانس با توجه به دقت بالای آن جهت تحلیل فرکانس بالای

سیستم‌های زمین پیچیده مناسب می‌باشد [۲۴]. روش ممان امکان ارزیابی دقیق پدیده‌های بسیار سریع و همچنین پارامترهای وابسته به فرکانس را فراهم می‌کند؛ اما یونیزاسیون خاک به صورت مستقیم در این روش لحاظ نمی‌گردد. مطالعاتی در خصوص لحاظ نمودن اثر یونیزاسیون خاک در روش ممان حوزه فرکانس با ترکیب در روش‌های مداری [۲۵] و عملگرهای ریاضی [۲۶] انجام شده است؛ در [۲۵]، یونیزاسیون خاک با استفاده از روش هندسه الکتروود متغیر پیاده‌سازی شده که باعث پایین آمدن دقت مدل‌سازی می‌شود؛ روش پیشنهادی در مرجع [۲۶] نیز در مقایسه با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری و نتایج میدانی، فاقد دقت کافی و دارای اختلاف می‌باشد. با توجه به مطالب فوق، نیاز به روشی جهت مدل‌سازی سیستم زمین می‌باشد که به صورت توأم رفتار غیرخطی ناشی از یونیزاسیون و وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک را به صورت دقیق و توأم لحاظ نماید. اما چون در نظر نگرفتن هم‌زمان این دو پدیده باعث به دست آوردن پاسخ‌هایی محافظه کارانه می‌شود، در اغلب مطالعات انجام شده یا به صورت جداگانه بررسی شده‌اند [۱۱ و ۲۷-۳۰] یا اینکه به علت محدودیت‌های موجود در روش پیشنهادی، مدل دقیقی ارائه نشده است [۲۱، ۲۵، ۳۱ و ۳۲]. از جمله محدودیت‌های مدل‌های ارائه شده می‌توان محدود بودن بازه فرکانسی قابل پوشش [۳۱]، لحاظ نمودن رفتار ایده‌آل و دور از واقعیت پدیده یونیزاسیون [۲۵]، ساده‌سازی و تقریب زیاد در بررسی وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک [۲۱] را نام برد که منجر به بروز اختلاف در عملکرد مدل‌های ارائه شده نسبت به نتایج عملی گردیده است.

در این مقاله، برای مدل‌سازی سیستم زمین، از یک روش ترکیبی جدید مبتنی بر ممان (MOM) و روش تعادل هارمونیک (HBM) استفاده شده است. به طوری که، رفتار غیرخطی سیستم زمین ناشی از یونیزاسیون خاک در حوزه زمان، به صورت توأم با وابستگی فرکانسی میدان‌های الکترومغناطیسی و پارامترهای الکتریکی خاک در حوزه فرکانس مدل‌سازی شده است. برای بررسی عملکرد مدل پیشنهادی نیز نتایج حاصل از مدل‌سازی سیستم زمین به روش پیشنهادی با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری عملی

لحاظ نمودن توأم اثر میدان ناشی از سیستم زمین بدون حضور یونیزاسیون خاک و میدان ناشی از بار غیر خطی منتجه از یونیزاسیون خاک، تعیین می‌گردد.



شکل ۲- مدار معادل سیستم زمین شکل ۱، (الف) بخش خطی مدل سیستم زمین (در حوزه فرکانس)، (ب) بخش غیر خطی مدل سیستم زمین (در حوزه زمان)

به عبارت دیگر، مدل‌سازی سیستم زمین شامل دو مرحله است. ابتدا بدون حضور یونیزاسیون و با در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک، یک مدار معادل نورتن مطابق شکل (۲-الف) برای سیستم زمین در حوزه فرکانس با حل معادلات انتگرالی به روش ممان استخراج می‌شود. سپس، با لحاظ نمودن بار غیر خطی ناشی از یونیزاسیون خاک (شکل ۲-ب) به مدار معادل منتجه در مرحله قبل، سیستم زمین به مدار معادل نورتن غیر خطی مطابق شکل (۲) تبدیل می‌گردد. که برای تحلیل مدار غیر خطی به دست آمده، از روش تعادل هارمونیک استفاده می‌شود.

۲-۱- مدل‌سازی در حوزه فرکانس با استفاده از روش ممان (MOM)

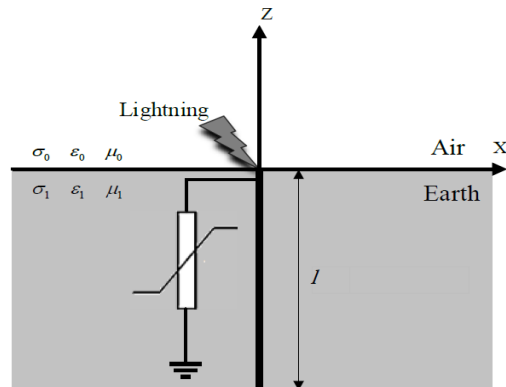
با توجه به شکل (۲-الف)، سیستم زمین بدون حضور

مقایسه شده است که نتایج حاصله، کارایی و دقت بالای روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

در این مقاله برای بررسی رفتار صاعقه، سیستم زمین به سه صورت مدل شده است: ۱- مدل باند وسیع با پارامترهای ثابت و بدون حضور پدیده یونیزاسیون خاک، ۲- مدل باند وسیع با پارامترهای الکتریکی وابسته به فرکانس و بدون حضور پدیده یونیزاسیون خاک و ۳- مدل باند وسیع با پارامترهای الکتریکی وابسته به فرکانس و در حضور پدیده یونیزاسیون خاک. در بخش دوم این مقاله، تئوری روش پیشنهادی و نحوه مدل‌سازی سیستم زمین به همراه روش تعادل هارمونیک بیان شده است. اعتبارسنجی و نتایج مدل‌سازی روش پیشنهادی بر روی سیستم زمین مورد مطالعه در بخش سوم آمده است. در نهایت در بخش چهارم نیز نتیجه‌گیری حاصل از این مقاله ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی سیستم زمین

در این بخش، تئوری مدل‌سازی سیستم زمین که مطابق شکل (۱)، تحت اصابت جریان صاعقه قرار گرفته است، ارائه می‌گردد. بدون از دست دادن جامعیت موضوع، فرض می‌شود که سیستم زمین از یک الکتروود عمودی به طول l و سطح مقطع با شعاع r که در یک خاک همگن با گذردهی الکتریکی ϵI و رسانایی σI قرار گرفته است، تشکیل شده است. یونیزاسیون خاک نیز با یک بار غیر خطی که مشخصه ولتاژ-جریان آن بصورت عملی و با اندازه‌گیری قابل استخراج است، معادل گردیده است.



شکل ۱- سیستم زمین با بار غیر خطی ناشی از پدیده یونیزاسیون خاک که تحت اصابت صاعقه قرار گرفته است

تحلیل سیستم زمین فوق را می‌توان بر مبنای تحقیقات انجام شده در حوزه تحلیل آنتن‌های دارای بار غیرخطی ([۳۳] و [۳۴])، با حل مدار معادل مناسب مطابق شکل (۲) تعیین نمود. پاسخ الکترومغناطیسی چنین سیستمی با

می آید. در این راستا، ابتدا نقاط نمونه‌ای جریان در طول هادی تعریف می‌شوند و هر دو قطعه که دارای یک نقطه اتصال باشند، به عنوان یک دو قطبی در نظر گرفته می‌شوند. توزیع جریان برای هر دو قطبی خطی مطابق شکل (۳-الف) به صورت زیر فرض می‌شود [۱۱]:

$$F(z) = \frac{\bar{z}P_1 \sinh \gamma(z - z_1)}{\sinh \gamma d_1} + \frac{\bar{z}P_2 \sinh \gamma(z_3 - z)}{\sinh \gamma d_2} \quad (2)$$

$$\gamma = -\omega^2 \mu \epsilon_1$$

که P_1 یک تابع پالس با مقدار واحد برای $z_1 < z < z_2$ و در غیر این صورت برابر صفر است. تابع پالس P_2 برابر مقدار واحد برای $z_2 < z < z_3$ و صفر برای مابقی z ها می‌باشد. طول قطعه‌ها نیز برابر $d_1 = z_2 - z_1$ و $d_2 = z_3 - z_2$ می‌باشد. در روش ممان، توزیع جریان روی هادی‌ها به صورت متناهی بسط می‌یابد:

$$I(l) = \sum_{n=1}^N I_n F_n(l) \quad (3)$$

که N تعداد دو قطبی‌ها، I_n جریان مجهول که باید تعیین گردد، l طول سیم و $F_n(l)$ توزیع جریان در طول دو قطبی n ام می‌باشد. برای محاسبه جریان‌های مجهول، ابتدا بایستی میدان الکتریکی منتشر شده در یک نقطه دلخواه تعیین گردد (شکل ۳-ب). بدین منظور توزیع جریان در هر قسمت به صورت زیر فرض می‌گردد:

$$I(z) = \frac{I_1 \sinh \gamma(z_2 - z) + I_2 \sinh \gamma(z - z_1)}{\sinh \gamma d} \quad (4)$$

که $d = z_2 - z_1$ و I_1 و I_2 جریان‌های نقاط انتهایی هستند. پس از انجام محاسبات، اجزای مختلف میدان الکتریکی در سیستم زمین به صورت زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$E_\rho = \frac{\eta}{4\pi\rho \sinh \gamma d} \left[(I_1 e^{-\gamma R_1} - I_2 e^{-\gamma R_2}) \sinh \gamma d + (I_1 \cosh \gamma d - I_2) e^{-\gamma R_1} \cos \theta_1 + (I_2 \cosh \gamma d - I_1) e^{-\gamma R_2} \cos \theta_2 \right]$$

$$E_z = \frac{\eta}{4\pi\rho \sinh \gamma d} \left[(I_1 - I_2 \cosh \gamma d) \frac{e^{-\gamma R_2}}{R_2} + (I_2 - I_1 \cosh \gamma d) \frac{e^{-\gamma R_1}}{R_1} \right] \quad (5)$$

$$E_\phi = 0, \quad \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

یونیزاسیون خاک به مدار معادل نورتن تبدیل شده است. در این شکل، $Y_{in}(\omega)$ ادمیتانس ورودی سیستم زمین در نقطه تحریک و $I_{in}(\omega)$ جریان تحریک است. $Y_{in}(\omega)$ و $I_{in}(\omega)$ با استفاده از روش ممان در حوزه فرکانس و بدون حضور یونیزاسیون خاک استخراج می‌شوند.

با توجه به این که بار غیرخطی ناشی از یونیزاسیون خاک در ایجاد میان هارمونیک‌ها در تشکیل ماتریس ادمیتانس مؤثر است، می‌بایست $Y_{in}(\omega)$ در فرکانس‌های تولید شده توسط بار غیرخطی ناشی از یونیزاسیون خاک به دست آید. فرکانس‌های موردنیاز برای استخراج $Y_{in}(\omega)$ ، توسط جدول BIPD^۱ تعیین می‌گردد. جدول BIPD با توجه به فرکانس‌های تحریک و بیشینه مرتبه بار غیر خطی، کلیه ترکیبات فرکانسی ممکن را برای تشکیل بردارهای طیفی خروجی و ماتریس ادمیتانس تعیین می‌کند (توضیحات بیشتر در مرجع [۳۵]). بنابراین، $I_{in}(\omega)$ در فرکانس‌های تحریک و $Y_{in}(\omega)$ بر اساس فرکانس‌های خروجی جدول BIPD استخراج می‌گردند.

۲-۱-۱- معادلات انتگرالی میدان الکتریکی سیستم زمین
 سیستم زمین به صورت مجموعه‌ای از هادی‌های فلزی استوانه‌ای متصل به هم با رسانایی محدود که به چندین قسمت کوچک تقسیم می‌شود، تعریف می‌گردد. در این مقاله از مدل الکترومغناطیسی به کار رفته در [۲۲] برای استخراج جریان ورودی $I_{in}(\omega)$ و ادمیتانس ورودی $Y_{in}(\omega)$ سیستم زمین در بازه‌ی فرکانسی dc تا ۲ مگاهرتز استفاده شده است. در این روش، با استفاده از روش تقریب سیم نازک، رابطه انتگرالی میدان الکتریکی (EFIE^۲) جهت محاسبه‌ی جریان‌های جاری شده در طول بخش‌های مختلف هادی زمین، به صورت زیر فرموله می‌شود [۱۱]:

$$u \cdot E^i = \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_l I_l(r') G(r, r') dl \quad (1)$$

که u بردار مماسی واحد در طول سیم l ، μ نفوذپذیری مغناطیسی، E^i میدان الکتریکی ایجاد شده توسط منبع خارجی، $G(r, r')$ تابع گرین دوتایی برای میدان الکتریکی در مختصات r ، ناشی از جریان در مختصات r' است؛ $I_l(r')$ نیز جریان مجهول در طول سیم می‌باشد که باید محاسبه شود. رابطه EFIE با استفاده از روش ممان حل شده و در نتیجه توزیع جریان در قسمت‌های مختلف هادی، به دست

² Electric Field Integral Equation

¹ Basic Intermodulation Product Description

$$I_{nl}(t) = \sum_{n=1}^N a_n V_{nl}^n(t) \quad (۶)$$

که V_{nl} مربوط به ولتاژ دو سر ترمینال بار غیر خطی و I_{nl} مربوط به جریان عبوری از بخش غیر خطی مدار می‌باشد. با لحاظ نمودن بار غیر خطی ناشی از یونیزاسیون خاک (شکل ۲-ب) به مدار معادل نورتن منتجه در حوزه فرکانس، سیستم زمین به مدار معادل نورتن غیر خطی تبدیل می‌شود، که برای تحلیل آن از روش تعادل هارمونیک استفاده می‌شود.

روش تعادل هارمونیک، یک روش ترکیبی حوزه‌ی زمان و فرکانس است که امکان بهره‌مندی از همه‌ی مزایای مدل-سازی سیستم غیر خطی حوزه‌ی زمان را به همراه استفاده از توانمندی یک تکنیک حوزه‌ی فرکانس فراهم می‌نماید. بدون از دست دادن جامعیت موضوع، می‌توان از روش تعادل هارمونیک برای پیاده‌سازی اثرات ناشی از الکتریکی وابسته به فرکانس خاک استفاده کرد؛ همچنین، امکان به‌کارگیری روش تعادل هارمونیک در کاربردهای چند تونی وجود دارد [۳۶]. بنابراین، روش تعادل هارمونیک ابزار مناسبی جهت تحلیل گذرای سیستم زمین مدفون در خاک یونیزه شده می‌باشد که تحت اصابت صاعقه واقع شده است.

تئوری روش تعادل هارمونیک بر اساس ایجاد توازن هارمونیک بین جریان‌های منتجه در بخش غیر خطی سیستم زمین (تحلیل در حوزه‌ی زمان) با بخش خطی آن (تحلیل در حوزه‌ی فرکانس) عمل می‌کند؛ به عبارت دیگر، می‌بایست قانون جریان کیرشلف برای کلیه مؤلفه‌های فرکانسی جریان‌های بخش خطی و غیر خطی مدل سیستم زمین در دو سر ترمینال بار غیر خطی، برای کل فرکانس-های موجود در بردار طیف خروجی برقرار باشد. به عبارت دیگر:

$$\bar{I}_{lin} + \bar{I}_{nl} = 0 \quad (۷)$$

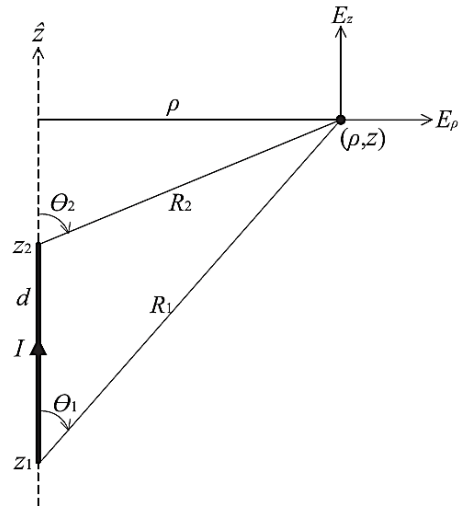
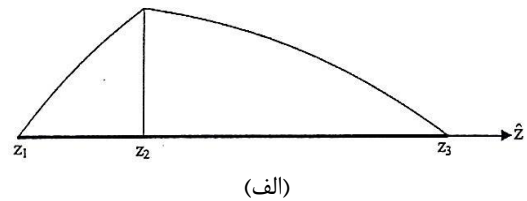
جریان عبوری از بخش خطی مدار در حوزه فرکانس، به صورت زیر قابل بیان است:

$$\bar{I}_{lin} = -\bar{I}_{in} + \bar{Y}_{in} \bar{V}_{nl} \quad (۸)$$

که در آن:

$$\bar{I}_{in} = [I_{in,0}, I_{in,1}, \dots, 0, 0]^T_{1 \times (2k+1)} \quad (۹)$$

E_ρ ، E_z و E_φ مولفه‌های میدان الکتریکی در مختصات استوانه‌ای، η امپدانس ذاتی محیط و $\mathcal{V} = -\omega^2 \mu \epsilon I$ می‌باشند.



شکل ۳- (الف) یک دو قطبی خطی و توزیع جریان سینوسی آن (نقاط انتهایی Z_1 و Z_3 و نقطه ترمینال Z_2 می‌باشد) (ب) منبع خطی الکتریکی روی محور Z و نقطه مشاهده در (ρ, z)

میدان الکتریکی در یک نقطه از فضا حاصل جمع میدان‌های حاصل از منابع جریان سینوسی تمام قطعه‌ها می‌باشد و ولتاژ بین دو نقطه در طول یک مسیر از طریق انتگرال خطی بردار میدان الکتریکی محاسبه می‌گردد. همچنین، امپدانس نسبت به زمین نیز به صورت نسبت بین ولتاژ از نقطه تزریق به زمین دوردست به جریان تزریقی به دست می‌آید [۱۱].

در این مقاله، انتگرال‌های سامرفلد بر اساس روابط ساده شده‌ای که در آن‌ها از تئوری اصلاح تصویر جهت لحاظ نمودن اثر مرز خاک- هوا استفاده می‌شود، حل می‌گردد [۱۱-۲۲].

۲-۲- فرمولاسیون مدار معادل نورتن غیر خطی

همان‌طور که در شکل (۲-ب) مشاهده می‌شود، یونیزاسیون خاک با یک مقاومت غیر خطی مدل می‌شود. مشخصه ولتاژ-جریان این مقاومت غیر خطی با رابطه ذیل تقریب زده می‌شود:

$$F(\bar{V}_{nl}) = -\bar{I}_{in} + \bar{Y}_{in} \times \bar{V}_{nl} + \Gamma f(\Gamma^{-1} \bar{V}_{nl}) \quad (17)$$

در نهایت، جهت استخراج پاسخ مدار و یافتن \bar{V}_{nl} ، روش تعادل هارمونیک [۳۶] مطابق مراحل ذیل اعمال می گردد. (۱) تخمین اولیه ی شکل موج ولتاژ خروجی در حوزه زمان، $v_{nl}(t)$ ، و تبدیل فوریه آن جهت محاسبه \bar{V}_{nl}^0 (نمونه های زمانی توسط روش APFT^۱ به صورت غیر یکنواخت انتخاب می شوند تا سطرهای Γ^{-1} متعامد باشند و تبدیل فوریه گسسته بهینه شود [۳۷])

(۲) تعیین جریان بار غیر خطی \bar{I}_{nl} با جایگذاری $v_{nl}(t)$ در مشخصه ولتاژ-جریان بار و اعمال تبدیل فوریه.

(۳) تشکیل رابطه (۱۷) جهت تعیین $F(\bar{V}_{nl})$. اگر دامنه ی مؤلفه های تابع خطا $(F(\bar{V}_{nl}))$ به اندازه ی کافی کوچک باشند، پاسخ مسئله استخراج شده است. در غیر این صورت، \bar{V}_{nl} باید با استفاده از روش نیوتن-رافسون به صورت زیر اصلاح شود و الگوریتم پیشنهادی از مرحله ی ۲ تکرار گردد.

$$\bar{V}_{nl}^{i+1} = \bar{V}_{nl}^i - J^{-1} F(\bar{V}_{nl}^i) \quad (18)$$

که در آن J ماتریس ژاکوبین بوده و به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$J = \frac{dF(\bar{V}_{nl})}{d\bar{V}_{nl}} = \bar{Y}_{in} + \Gamma \frac{di}{dv} \Gamma^{-1} \quad (19)$$

در نهایت، پس از به دست آوردن جریان های منتجه در مدار غیر خطی، سیستم زمین مورد مطالعه با جریان های جدید در فرکانس های خاص تحریک شده و خروجی های مورد نظر با استفاده از حل معادلات انتگرال الکتریکی حاکم بر سیستم زمین به روش ممان در حوزه فرکانس به دست می آید.

۳- اعتبار سنجی و نتایج عددی

در این مقاله، سیستم زمین با توجه به وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک و اثرات غیرخطی ناشی از یونیزاسیون خاک، به سه صورت زیر مدل سازی شده است:

- مدل باند وسیع با پارامترهای ثابت و بدون حضور پدیده یونیزاسیون خاک (CP^۲ model): در این مدل، پارامترهای الکتریکی خاک ثابت بوده و از یونیزاسیون خاک صرف نظر شده است.

$$\bar{Y}_{in} = \begin{bmatrix} Y_{r0} & -Y_{i0} & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & Y_{r1} & -Y_{i1} & 0 & 0 \\ \cdot & Y_{i1} & Y_{r1} & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & Y_{rk} & -Y_{ik} \\ 0 & 0 & \cdot & Y_{ik} & Y_{rk} \end{bmatrix}_{(2k+1) \times (2k+1)} \quad (10)$$

$$\bar{V}_{nl} = [V_{nl,0}, V_{nl,1}, \dots, V_{nl,2k}]^T_{1 \times (2k+1)} \quad (11)$$

\bar{I}_{in} بردار طیفی جریان ورودی است که در فرکانس های تحریک محاسبه می شود؛ k تعداد مؤلفه های فرکانسی در بردار طیف خروجی است که توسط جدول BIPD تعیین می گردد؛ Y_{rk} و Y_{ik} به ترتیب بخش حقیقی و موهومی هر درایه ماتریس ادمیتانس ورودی است که توسط روش ممان استخراج گردیده است. در نهایت، $V_{nl,2k}$ و $V_{nl,2k-1}$ مربوط به k امین مؤلفه فرکانسی شکل موج ولتاژ خروجی، $v_{nl}(t)$ است که به صورت زیر فرض می گردد:

$$v_{nl}(t) = V_{nl,0} + \sum_{p=1}^k (V_{nl,2p-1} \cos \omega_p t + V_{nl,2p} \sin \omega_p t) \quad (12)$$

با جایگذاری رابطه (۸) در رابطه (۷) خواهیم داشت:

$$-\bar{I}_{in} + \bar{Y}_{in} \times \bar{V}_{nl} + \bar{I}_{nl} = 0 \quad (13)$$

که \bar{I}_{nl} بردار طیفی جریان بار غیر خطی است که به صورت زیر بیان می گردد:

$$\bar{I}_{nl} = [I_{nl,0}, I_{nl,1}, \dots, I_{nl,2k}]^T_{1 \times (2k+1)} \quad (14)$$

که $I_{nl,2k}$ و $I_{nl,2k-1}$ مربوط به k امین مؤلفه فرکانسی شکل موج جریان خروجی، $i_{nl}(t)$ است.

$$i_{nl}(t) = I_{nl,0} + \sum_{p=1}^k (I_{nl,2p-1} \cos \omega_p t + I_{nl,2p} \sin \omega_p t) \quad (15)$$

در نهایت به منظور حل رابطه (۱۳)، نیاز به تعیین \bar{I}_{nl} با استفاده از تبدیل فوریه $i_{nl}(t)$ می باشد. $i_{nl}(t)$ با توجه به مشخصه ولتاژ-جریان بار غیر خطی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{I}_{nl} = \Gamma f(\Gamma^{-1} \bar{V}_{nl}) \quad (16)$$

که $f(\cdot)$ مشخصه ولتاژ-جریان بار غیرخطی و Γ ماتریس تبدیل بین حوزه زمان و فرکانس است که روش ساخت آن در مرجع [۳۶] بیان گردیده است.

بنابراین، رابطه (۱۳) را می توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

² Constant Parameter

¹ Almost Periodic Fourier Transform

۳-۱- اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

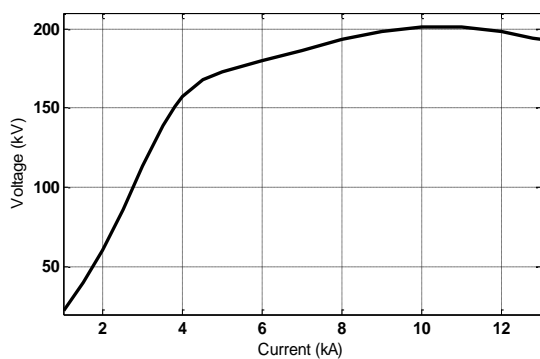
به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، یک سیستم زمین با مشخصات جدول ۲ که در مرجع [۳۹] نیز به صورت عملی مورد آزمایش قرار گرفته است انتخاب می‌گردد.

جدول ۲- مشخصات الکتروود زمین و خاک مورد مطالعه [۳۹]

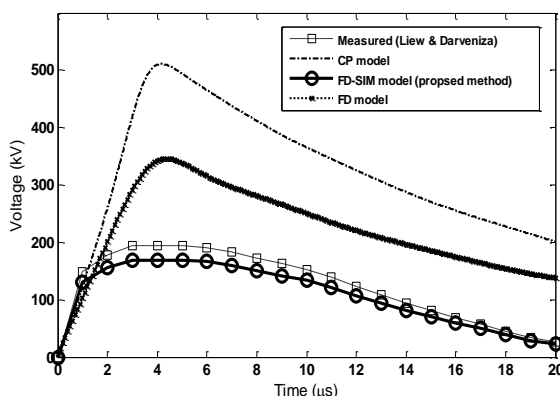
نوع الکتروود	شعاع (mm)	طول (m)	ρ (Ωm)	ϵ
عمودی	۲۵	۰/۶۱	۵۰	۱۰

برای مقایسه نتایج، در اینجا نیز مشابه مرجع [۳۹] سیستم زمین توسط جریانی با دامنه ۱۳ kA و زمان پیشانی ۴ μs تحریک گردیده است. شکل موج صاعقه توسط تابع هیدرلر پیاده‌سازی شده است [۴۰].

رفتار غیر خطی سیستم زمین ناشی از یونیزاسیون خاک با یک بار غیر خطی مطابق شکل (۴) مدل‌سازی می‌شود که مشخصه ولتاژ- جریان آن به صورت عملی در مرجع [۳۹] استخراج گردیده است.



شکل ۴- مشخصه غیر خطی خاک یونیزه شده [۳۹]



شکل ۵- افزایش پتانسیل زمین (GPR) در نزدیکی الکتروود عمودی به طول ۰/۶۱ متر ناشی از اصابت صاعقه با دامنه جریان ۱۳ kA

• مدل باند وسیع با پارامترهای الکتریکی وابسته به فرکانس و بدون حضور پدیده یونیزاسیون خاک (model FD^۱): در این مدل، پارامترهای الکتریکی خاک وابسته به فرکانس بوده و از یونیزاسیون خاک صرف‌نظر شده است.

• مدل باند وسیع با پارامترهای الکتریکی وابسته به فرکانس و در حضور پدیده یونیزاسیون خاک (FD-SIM model^۲): با فرض اینکه در حضور یونیزاسیون خاک، پارامترهای الکتریکی خاک وابسته به فرکانس باشند.

لازم به ذکر است پیاده‌سازی مدل پیشنهادی (FD-SIM) و مدل‌های CP و FD و مقایسه نتایج آنها با استفاده از کدنویسی در محیط نرم‌افزار متلب انجام شده است. وابستگی به فرکانس پارامترهای الکتریکی خاک به صورت زیر می‌باشد [۳۸]:

$$\rho_0 = 125 \cdot (p/10)^{-0.54} (\Omega m), \quad \epsilon_\infty = 5$$

$$\rho(f) =$$

$$\left(\rho_0^{-1} + 2\pi\epsilon_0 \sum_{n=1}^{14} \frac{a_n \left((p/10)^{1.28} \cdot 10^{n-1} \right) \left(\frac{f}{(p/10)^{1.28} \cdot 10^{n-1}} \right)^2}{1 + \left(\frac{f}{(p/10)^{1.28} \cdot 10^{n-1}} \right)^2} \right)^{-1}$$

$$\epsilon_r(f) = \epsilon_\infty + \sum_{n=1}^{14} \frac{a_n}{1 + \left(\frac{f}{(p/10)^{1.28} \cdot 10^{n-1}} \right)^2} \quad (20)$$

که f فرکانس تحریک در بازه dc تا ۲ مگاهرتز، $\rho(f)$ و $\epsilon_r(f)$ به ترتیب مقاومت ویژه و گذردهی الکتریکی خاک، ρ_0 مقاومت ویژه در فرکانس پایین، p درصد آب خاک و a_n ضریب ثابت مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱- ضرایب کاربردی در رابطه وابستگی فرکانس پارامترهای الکتریکی خاک [۳۸].

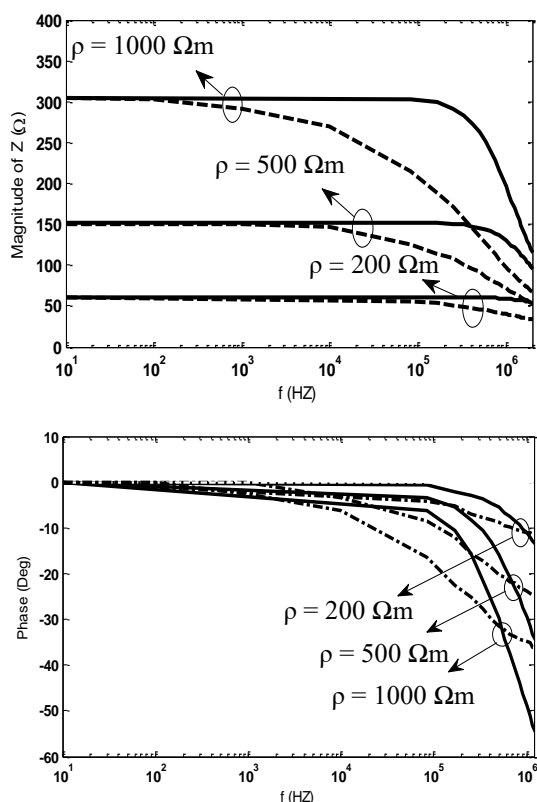
۳	۲	۱	n
$2/58 \times 10^4$	$2/74 \times 10^5$	$3/4 \times 10^6$	a_n
۶	۵	۴	n
$1/33 \times 10^2$	$5/26 \times 10^2$	$3/38 \times 10^3$	a_n
۹	۸	۷	n
۴/۸	۱۲/۵	۲۷/۲	a_n
۱۲	۱۱	۱۰	n
۰/۳۹۲	۰/۹۸	۲/۱۷	a_n
	۱۴	۱۳	n
	۰	۰/۱۷۳	a_n

² Soil Ionization Model

¹ Frequency-dependent

۲- وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک به طور معمول دارای اثر کاهشی بر دامنه امپدانس سیستم زمین می‌باشد.

۳- امپدانس سیستم زمین، بسته به طول الکتروود و پارامترهای الکتریکی خاک (σ و ϵ)، با افزایش فرکانس دارای خاصیت خازنی و سلفی می‌باشد. به طوری که در خاک‌های با مقاومت ویژه بالا، دامنه امپدانس هارمونیک با افزایش فرکانس کاهش یافته و رفتار خازنی سیستم زمین غالب می‌گردد (برای $\rho = 1000$ در شکل ۷).



شکل ۷- اندازه و فاز امپدانس الکتروود عمودی به طول ۳ m و شعاع ۱۲/۵ mm. خط ممتد: خاک با پارامترهای الکتریکی ثابت (CP)، خط نقطه‌چین: خاک با پارامترهای الکتریکی وابسته به فرکانس (FD).

۳-۳- مدل‌سازی در حوزه زمان

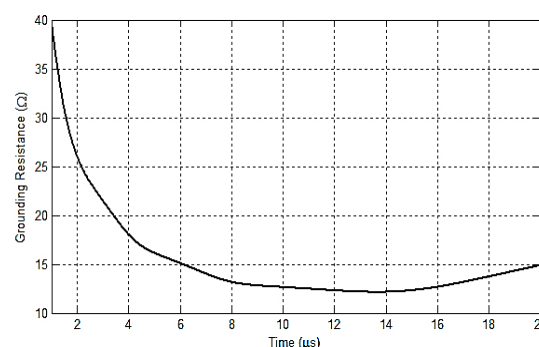
جهت بررسی تأثیر نوع مدل‌سازی سیستم زمین (تأثیرات وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک و اثر غیر خطی ناشی از یونیزاسیون خاک) بر افزایش پتانسیل آن در اصابت ضربات صاعقه، شبیه‌سازی دیگری در حوزه زمان ارائه شده است.

در این شبیه‌سازی، سیستم زمین از یک الکتروود عمودی به طول ۳/۰۵ متر و سطح مقطع با شعاع ۱۲/۵ mm که در

افزایش پتانسیل زمین (GPR) در نزدیکی الکتروود زمین با مشخصات مذکور در جدول ۲، برای سه روش مدل‌سازی FD، CP و FD-SIM در شکل (۵) مشاهده می‌گردد که در آن نتایج منتهی از روش پیشنهادی با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری در مرجع [۳۹] مقایسه شده است.

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، دامنه ولتاژ در مدل‌سازی FD از دامنه ولتاژ در مدل‌سازی FD-SIM (مدل پیشنهادی) بیشتر است. علت این امر، اثر کاهشی یونیزاسیون خاک بر روی پتانسیل زمین است که نسبت به عامل وابستگی فرکانسی پارامترهای خاک مؤثرتر بوده و نشان‌دهنده غالب بودن رفتار مقاومتی سیستم زمین می‌باشد.

جهت بررسی تأثیر رفتار غیرخطی یونیزاسیون خاک بر عملکرد سیستم زمین، شکل (۶) تغییرات مقاومت زمین برای الکتروود عمودی با طول ۰/۶۱ متر را نشان می‌دهد.



شکل ۶- رفتار مقاومتی الکتروود عمودی تحریک شده توسط جریان صاعقه با دامنه جریان ۱۳ kA و زمان پیشانی ۴ μs

۳-۲- مدل‌سازی در حوزه فرکانس

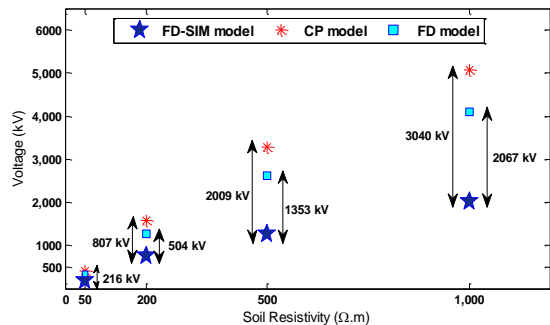
جهت بررسی رفتار فرکانس بالای سیستم زمین، دامنه و فاز امپدانس هارمونیک یک الکتروود عمودی به طول ۳ m و شعاع ۱۲/۵ mm محاسبه شده است (شکل ۷). دامنه و فاز امپدانس سیستم زمین، با استفاده از روش ممان و در بازه‌ی فرکانسی dc تا ۲ مگاهرتز برای مقادیر مختلف مقاومت ویژه خاک ($\rho = 200$ ، 5000 ، 10000) و در دو حالت CP (خاک با پارامترهای الکتریکی ثابت) و FD (خاک با پارامترهای الکتریکی وابسته به فرکانس) به دست آمده است.

با توجه به شکل (۷)، نتایج ذیل استخراج می‌گردد:

۱- تأثیر وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک بر روی امپدانس سیستم زمین، در خاک‌های با مقاومت ویژه بالا ($\rho \geq 500 \Omega m$)، اهمیت بیشتری دارد.

جریان در ضربات صاعقه اولیه حدود ۲/۵ برابر دامنه جریان در ضربات صاعقه ثانویه می‌باشد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که تأثیر مدلسازی سیستم زمین به روش FD در مقابل ضربات صاعقه ثانویه که دارای طیف فرکانسی بالاتری هستند، بیشتر است

شکل (۹) بیشینه مقدار GPR برای یک الکتروود عمودی به طول ۳/۰۵ متر را برای خاک با مقاومت‌های ویژه مختلف و انواع مدل‌سازی سیستم زمین نشان می‌دهد.



شکل ۹- مقایسه بیشینه مقدار GPR منتجه در نزدیک الکتروود عمودی به طول ۳/۰۵ متر ناشی از اصابت صاعقه اولیه (30 kA, 4 μs, 75 μs)

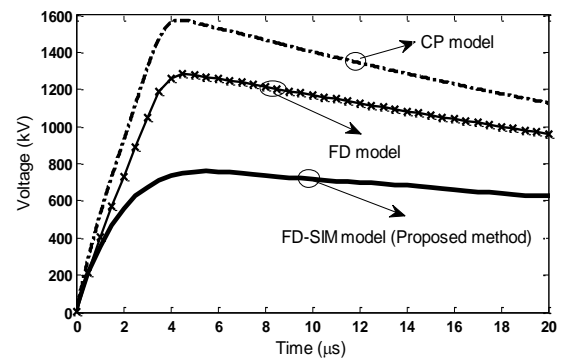
مشاهده می‌شود با افزایش مقاومت ویژه خاک، پتانسیل زمین (GPR) افزایش یافته و تفاوت بین حداکثر مقدار GPR در بین انواع مدل‌سازی سیستم زمین نیز بیشتر شده است. به طوری که، این تفاوت بین روش پیشنهادی (FD-SIM) با روش‌های CP و FD در خاک با مقاومت ویژه $\rho=1000 \Omega m$ ، به ترتیب در حدود ۳۰۴۰ kV و ۳۰۶۷ kV است که نسبت به خاک با $\rho=50 \Omega m$ ، حدود ۱۴ برابر گردیده است. همچنین، طبق نتایج مشخص است که در صورت در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک در مدل‌سازی سیستم زمین، بیشینه مقدار GPR منتجه کاهش می‌یابد، که این موضوع در خاک‌های با مقاومت ویژه بالا، بارزتر است.

در نتیجه، لحاظ نمودن وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک در مدل‌سازی سیستم زمین به ویژه در خاک‌های با مقاومت ویژه بالا امری ضروری می‌باشد که موضوع مذکور در مرجع [۱۱] اعتبارسنجی گردیده است.

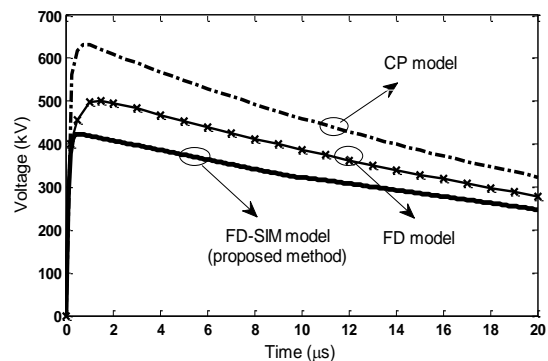
۳-۴- آنالیز حساسیت

جهت بررسی تأثیر پارامترهای موج جریان صاعقه بر رفتار گذاری الکتروودهای زمین، یک آنالیز حساسیت با تغییر اندازه جریان و زمان پیشانی موج جریان صاعقه انجام گرفته است.

یک خاک همگن با گذردهی الکتریکی $\epsilon=10$ و مقاومت ویژه $\rho=200 \Omega m$ قرار گرفته است، تشکیل شده است. یونیزاسیون خاک نیز با یک بار غیر خطی که مشخصه ولتاژ-جریان آن به صورت عملی از مرجع [۳۹] استخراج گردیده است، مدل‌سازی می‌گردد. فرض می‌شود که سیستم زمین تحت اصابت ضربه اولیه (30 kA, 4 μs, 75 μs) و ضربات ثانویه (12 kA, 0.8 μs, 20 μs) قرار گرفته است. شکل (۸) افزایش پتانسیل زمین را برای مدل‌های مختلف سیستم زمین نشان می‌دهد.



الف



ب

شکل ۸- افزایش پتانسیل زمین (GPR) برای الکتروود عمودی به طول ۳/۰۵ متر و در خاک همگن با $\rho=200 \Omega m$ ، (الف) ضربه اولیه صاعقه (۳۰ kA, ۴ μs, ۷۵ μs)، (ب) ضربه ثانویه صاعقه (۱۲ kA, ۰/۸ μs, ۲۰ μs).

نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی توأم یونیزاسیون خاک و وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک (روش پیشنهادی)، تأثیر قابل توجهی بر کاهش پتانسیل زمین در زمان اصابت ضربات اولیه و ثانویه صاعقه دارد.

با مقایسه‌ی شکل (۸-الف) و شکل (۸-ب)، مشاهده می‌گردد که میزان بیشینه اختلاف GPR منتجه بین روش پیشنهادی با سایر روش‌ها، در ضربات صاعقه اولیه بیشتر است؛ علت این امر، یونیزاسیون بیشتر خاک پیرامون الکتروود زمین در ضربات صاعقه اولیه است؛ زیرا دامنه

است.

جدول ۴- تغییرات افزایش پتانسیل زمین (GPR) به ازای تغییرات زمان پیشانی صاعقه در نزدیکی الکتروود عمودی به طول ۳/۰۵ متر (kV) ($\rho=100 \Omega m$)

نوع مدل سازی سیستم زمین			دامنه	زمان پیشانی	جریان
FD-SIM	FD	CP	(μs)	صاعقه	صاعقه (kA)
۴۴۵	۴۸۴	۵۶۶	$t_r=2$		
۳۵۹	۴۸۲	۵۶۰	$t_r=4$	۲۰	
۳۰۲	۴۸۰	۵۴۰	$t_r=6$		
۶۱۸	۹۶۸	۱۱۳۲	$t_r=2$		
۴۹۱	۹۶۴	۱۱۲۵	$t_r=4$	۴۰	
۴۲۲	۹۶۰	۱۱۱۵	$t_r=6$		
۷۳۹	۱۴۵۱	۱۶۹۹	$t_r=2$		
۵۸۲	۱۴۴۸	۱۶۸۴	$t_r=4$	۶۰	
۴۹۶	۱۴۳۸	۱۶۷۲	$t_r=6$		
۸۵۱	۱۹۳۵	۲۲۶۷	$t_r=2$		
۶۵۷	۱۹۲۹	۲۲۴۰	$t_r=4$	۸۰	
۵۸۴	۱۹۲۰	۲۲۳۰	$t_r=6$		
۹۶۱	۲۴۱۹	۲۸۳۵	$t_r=2$		
۷۶۳	۲۴۱۱	۲۸۱۰	$t_r=4$	۱۰۰	
۶۴۰	۲۴۰۱	۲۷۸۵	$t_r=6$		

مشاهده می شود در یک دامنه جریان ثابت، GPR با کاهش زمان پیشانی موج جریان صاعقه از ۶ میکرو ثانیه به ۲ میکرو ثانیه افزایش پیدا می کند. به عبارت دیگر، برای یک موج جریان صاعقه با زمان پیشانی کم (۲ میکرو ثانیه)، خاک فرصت زمانی کمتری جهت یونیزاسیون نسبت به شکل موج صاعقه با زمان پیشانی بالا (۶ میکرو ثانیه) دارد. در نتیجه، هرچه زمان رسیدن به قله در شکل موج صاعقه کوتاهتر باشد، انتظار می رود بروز پدیده یونیزاسیون خاک کمتر شده و GPR سیستم زمین افزایش یابد.

با توجه به نتایج جدول ۴ و مقایسه GPR ناشی از صاعقه در بین روش های مدل سازی سیستم زمین، می توان دید که GPR در روش پیشنهادی (FD-SIM) بیشتر تحت تأثیر تغییرات زمان پیشانی صاعقه قرار می گیرد. همچنین، مشاهده می گردد که مقادیر GPR در حالت مدل سازی FD با در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک نسبت به حالت CP کاهش چندانی نداشته است. زیرا مقاومت ویژه خاک پایین می باشد ($\rho=100 \Omega m$)، که با توجه به نتایج شکل ۷ اختلاف امپدانس سیستم زمین نیز در دو حالت CP و FD در مقاومت های ویژه کم، ناچیز

جدول ۳ افزایش پتانسیل زمین (GPR) به ازای تغییر دامنه جریان صاعقه اولیه ($30 \text{ kA}, 4 \mu s, 75 \mu s$) را برای یک الکتروود عمودی به طول ۳/۰۵ متر و برای هر سه نوع روش مدل سازی سیستم زمین نشان می دهد.

جدول ۳- تغییرات افزایش پتانسیل زمین (GPR) به ازای تغییرات دامنه جریان صاعقه اولیه ($30 \text{ kA}, 4 \mu s, 75 \mu s$) در نزدیکی الکتروود عمودی به طول ۳/۰۵ متر (kV)

دامنه	نوع مدل سازی سیستم زمین					
	FD-SIM	FD	CP	FD-SIM	FD	CP
جریان						
صاعقه	مقاومت ویژه خاک (Ωm)					
(kA)	$\rho=1000$	$\rho=200$	$\rho=1000$	$\rho=200$	$\rho=1000$	$\rho=200$
۱۰	۷۲۰	۳۷۲	۱۳۶۴	۴۲۶	۱۶۸۵	۵۲۳
۲۰	۱۱۶۹	۵۸۲	۲۷۲۰	۸۵۳	۳۳۷۵	۱۰۴۵
۳۰	۱۵۲۱	۷۴۲	۴۰۹۲	۱۲۷۹	۵۰۶۵	۱۵۶۰
۴۰	۱۸۷۳	۸۹۸	۵۴۵۸	۱۷۰۵	۶۷۵۴	۲۰۹۳
۵۰	۲۱۸۷	۱۰۳۴	۶۸۱۴	۲۱۳۳	۸۴۴۲	۲۶۲۳
۶۰	۲۵۴۲	۱۱۱۷	۸۱۹۰	۲۵۵۸	۱۰۱۳۰	۳۱۴۰
۷۰	۲۸۸۵	۱۲۳۲	۹۵۴۵	۲۹۸۲	۱۱۸۱۶	۳۶۶۴
۸۰	۳۲۸۲	۱۳۰۷	۱۰۹۱۰	۳۴۱۲	۱۳۵۰۸	۴۱۸۹
۹۰	۳۶۰۵	۱۴۷۰	۱۲۲۶۰	۳۸۳۸	۱۵۱۹۱	۴۷۱۴
۱۰۰	۳۹۸۷	۱۵۰۶	۱۳۶۵۰	۴۲۶۵	۱۶۸۸۰	۵۲۳۸

با بررسی نتایج به دست آمده می توان دریافت که GPR با افزایش دامنه جریان صاعقه افزایش پیدا می کند. به علاوه، با افزایش مقاومت ویژه خاک و دامنه جریان صاعقه، اختلاف بین حداکثر مقدار GPR به دست آمده بر مبنای روش پیشنهادی (FD-SIM) با مدل سازی بر مبنای روش CP و FD بیشتر می شود. دلیل این اختلاف، اثر کاهشی یونیزاسیون خاک بر روی پتانسیل زمین است؛ به طوری که با افزایش دامنه جریان صاعقه، یونیزاسیون در اطراف الکتروود زمین با شدت بیشتری اتفاق افتاده و ناحیه مؤثر الکتروود جهت تخلیه انرژی صاعقه افزایش می یابد و در نتیجه پتانسیل منتجه کاهش پیدا می کند. همچنین، در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی در روش مدل سازی FD، منجر به کاهش GPR منتجه و عملکرد بهتر سیستم زمین گردیده است.

برای نشان دادن تأثیر زمان پیشانی شکل موج جریان صاعقه بر میزان افزایش پتانسیل زمین (GPR)، در جدول ۴ حداکثر مقدار GPR منتجه برای یک الکتروود عمودی به طول ۳/۰۵ متر و برای هر سه نوع روش مدل سازی سیستم زمین و به ازای زمان های پیشانی مختلف محاسبه شده

روش ارائه شده را نشان می‌دهد. در روش پیشنهادی، کل بازه فرکانسی صاعقه پوشش داده شده و رفتار غیرخطی ناشی از یونیزاسیون خاک با استفاده از داده‌های واقعی مدل می‌شود که کارایی و دقت بالاتر این روش در مقایسه با سایر مدل‌های مرسوم را تأیید می‌کند.

برای بررسی کارایی، مدل پیشنهادی جهت تحلیل رفتار گذاری الکترودهای مدفون در خاک همگن استفاده شده است. با توجه به نتایج، تأثیر مدل پیشنهادی بر عملکرد سیستم زمین به ازای ضربات صاعقه اولیه و در خاک‌های با مقاومت ویژه بالا قابل توجه می‌باشد.

آنالیز حساسیت انجام شده روی مدل‌های مختلف (CP و FD) نیز نشان می‌دهد که کارایی روش پیشنهادی (FD-SIM) با افزایش دامنه جریان و زمان پیشانی شکل موج صاعقه بیشتر می‌شود. به طوری که با افزایش دامنه جریان و زمان پیشانی شکل موج صاعقه، یونیزاسیون خاک در اطراف الکتروود زمین افزایش یافته و پتانسیل زمین (GPR) کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند.

خواهد بود. به عبارت دیگر عملکرد سیستم زمین در برابر صاعقه برای خاک‌های با مقاومت ویژه پایین در دو حالت مدل‌سازی CP و FD مشابه می‌باشد. بنابراین، تأثیر رفتار غیر خطی خاک یونیزه شده بر روی GPR منتهی در کلیه مقادیر مقاومت ویژه خاک، لزوم شبیه‌سازی یونیزاسیون خاک را در تحلیل گذرای سیستم‌های زمین توجیه می‌نماید.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، برای مدل‌سازی سیستم زمین، از یک روش جدید مبتنی بر ترکیب روش ممان (MOM) و روش تعادل هارمونیک (HBM) استفاده شده است. به طوری که رفتار غیر خطی وابسته به زمان ناشی از یونیزاسیون خاک، تأثیرات الکترومغناطیسی وابسته به فرکانس و وابستگی فرکانسی پارامترهای الکتریکی خاک در مدل‌سازی سیستم زمین به صورت توأم لحاظ گردیده است. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی سیستم زمین به روش پیشنهادی با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری عملی، دقت

مراجع

- [۱] حسین پرهیزکار و حسین شایقی، "مدل‌سازی خطوط انتقال تحریک شده بر اثر اصابت صاعقه در حوزه فرکانس"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۲۳۷-۲۴۴.
- [2] "Guide on Lightning Protection of MV and LV Networks: Part I Common Topics", CIGRÉ Working Group C4.4.02 (Protection of MV and LV networks against lightning) of Study Committee C4, Paris, France, Feb. 2006.
- [3] L.A. Choy and M. Darveniza, "A Sensitivity Analysis of Lightning Performance Calculations for Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, No. 4, July 1971, pp. 1443-1451.
- [4] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Std 80-2000, Aug. 2000, pp. 1-192.
- [5] IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Green Book), in ANSI/IEEE Std 142-1982, Sept. 1982, pp. 1-135.
- [۶] زهرا مروج و جواد آذرخش، "شبیه‌سازی و طبقه بندی وقایع کیفیت توان با استفاده از شبکه عصبی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۳۷-۱۴۶.
- [7] B. Zhang, J. Wu, J. He and R. Zeng, "Analysis of Transient Performance of Grounding System Considering Soil Ionization by Time Domain Method," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, No. 5, May 2013, pp. 1837-1840.
- [8] S. Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, Jan. 2007, pp. 381-386.
- [9] V.A. Rakov and M.A. Uman, "Lightning: physics and effects. Cambridge University Press", Aug 2003, p. 600.
- [10] L.D. Grcev and M. Heimbach, "Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, Jan. 1997, pp. 172-178.
- [11] M.R. Alemi and K. Sheshyekani, "Wide-Band Modeling of Tower-Footing Grounding Systems for the Evaluation of Lightning Performance of Transmission Lines", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 57, No. 6, Dec. 2015, pp. 1627-1636.

- [13] J. Wang, A.C. Liew and M. Darveniza, "Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005, pp. 2160–2165.
- [14] M.E. Almeida and M.T. Correia De Barros, "Accurate modelling of rod driven tower footing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996, pp. 1606–1609.
- [15] Y. Liu, N. Theethayi, R. Thottappillil, R.M. Gonzalez and M. Zitnik, "An improved model for soil ionization around grounding system and its application to stratified soil", Journal of Electrostatics, Vol. 60, No.2-4, Mar 2004, pp.203–209.
- [16] S. Visacro, R. Alipio, M. H. Murta Vale, and C. Pereira, "The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequencydependent soil resistivity and permittivity", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, May 2011, Vol. 53, No. 2, pp. 401–406.
- [17] D. Cavka, N. Mora, and F. Rachidi, "A comparison of frequencydependent soil models: Application to the analysis of grounding systems", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 56, No. 1, Feb. 2014, pp. 177–187.
- [18] L. Grcev, "Modeling of Grounding Electrodes under Lightning Currents", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No. 3, Aug. 2009, pp. 559–571.
- [19] M. Ramamoorthy, M.M.B. Narayanan, S. Parameswaran and D. Mukhedkar, "Transient performance of grounding grids", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, Oct. 1989, pp. 2053–2059.
- [20] Yaqing Liu, M. Zitnik and R. Thottappillil, "An improved transmission-line model of grounding system", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 43, No. 3, Aug. 2001, pp. 348–355.
- [21] O. Kherif, S. Chiheb, M. Tegar, A. Mekhaldi and N. Harid, "Time-Domain Modeling of Grounding Systems' Impulse Response Incorporating Nonlinear and Frequency-Dependent Aspects", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 60, No. 4, Aug. 2018, pp. 907–916.
- [22] L. Grcev and F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, Oct. 1990, pp. 1773–1781.
- [23] L. Grcev and M. Popov, "On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005, pp. 1598–1603.
- [24] L.D. Grcev and F.E. Menter, "Transient electromagnetic fields near large earthing systems," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 3, May 1996, pp. 1525–1528.
- [25] Bo Zhang et al., "Numerical analysis of transient performance of grounding systems considering soil ionization by coupling moment method with circuit theory", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 5, May 2005, pp. 1440–1443.
- [26] K. Sheshyekani, SH. 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 Systems Research, Vol. 81, No. 2, Feb 2011 1, pp. 290–296.
- [27] B. Zhang, J. He, R. Zeng and S. Chen, "Effect of Grounding System on Electromagnetic Fields around Building Struck by Lightning", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 8, Aug. 2010, pp. 2955-2958.
- [28] J. Li, T. Yuan, Q. Yang, W. Sima, C. Sun and M. Zahn, "Numerical and Experimental Investigation of Grounding Electrode Impulse-Current Dispersal Regularity Considering the Transient Ionization Phenomenon", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 4, Oct. 2011, pp. 2647–2658.
- [29] J. Gholinezhad and R. Shariatinasab, "Interfacing electromagnetic model of tower-footing impedance with the EMTP software package", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 105, Feb 2019, pp. 394–403.
- [۳۰] فریدالدین صفایی، نبی‌اله رضائی و میلاد نیاز آذری، "ارزیابی و پیش‌بینی اثرات اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه بر روی شبکه‌های توزیع پیچیده با مدل‌سازی فرکانس بالا اجزای آن"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۲۴۳–۲۵۸.
- [31] R. Zeng, X. Gong, J. He, B. Zhang and Y. Gao, "Lightning Impulse Performances of Grounding Grids for Substations Considering Soil Ionization", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, April 2008, pp. 667–675.

- [32] J. Wu, B. Zhang, J. He and R. Zeng, "A Comprehensive Approach for Transient Performance of Grounding System in the Time Domain", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 57, No. 2, April 2015, pp. 250–256.
- [33] K. Sheshyekani, S.H.H. Sadeghi and R. Moini, "A Combined MoM-AOM Approach for Frequency Domain Analysis of Nonlinearly Loaded Antennas in the Presence of a Lossy Ground", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 56, No. 6, June 2008, pp. 1717–1724.
- [34] C.C. Huang and T.H. Chu, "Analysis of wire scatterers with nonlinear or time-harmonic loads in the frequency domain", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 41, No. 1, Jan. 1993, pp. 25–30.
- [35] F.P. Hart, D.G. Stephenson, C.R. Chang, K. Gharaibeh, R.G. Johnson and M.B. Steer, "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: Co-sponsored by the Center for Advanced Manufacturing and Packaging of Microwave, Optical, and Digital Electronics (CAMPmode) at the University of Colorado at Boulder*, Vol.13, No. 6, 2003. pp. 473–495.
- [36] S.A. Maas, *Nonlinear microwave and RF circuits*, Artech House, 2003.
- [37] G.B. Sorkin, K.S. Kundert and A. Sangiovanni-Vincentelli, "An Almost-Periodic Fourier Transform for Use with Harmonic Balance", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Palo Alto, CA, USA, 1987, pp. 717–720.
- [38] C.L. Longmire, and K.S. Smith, "A universal impedance for soils", *Mission Research Corp.*, Santa Barbara, CA, Rep. DNA3788T, Oct. 1975.
- [39] A.C. Liew and M. Darveniza, "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths", *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 121, No. 2, February 1974, pp. 123–135.
- [40] F. Heidler, J.M. Cvetcic and B.V. Stanic, "Calculation of lightning current parameters", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, April 1999, pp. 399–404.