

مدل‌سازی صاعقه‌ی از نوع ابر به زمین بر اساس سرعت متغیر انتشار موج جریان در کانال صاعقه در مجاورت زمین تلفاتی

منصور نجاتی جهرمی^۱؛ روزبه معینی مازندران^۲؛ سید حسین (حسام الدین) صادقی^۳

چکیده

در این مقاله روش جدیدی برای مدل‌سازی کانال ضربه برگشت صاعقه‌ی از نوع ابر به زمین، ارائه شده است. در این مدل، کانال صاعقه به صورت یک آنتن مونوپل عمودی با بارگذاری اهمی-سلفی بر روی زمین تلفاتی در نظر گرفته می‌شود. با حل عددی معادله‌ی انتگرال میدان الکتریکی در رژیم فرکانسی، توزیع جریان در طول کانال بدست می‌آید. حل معادله با استفاده از روش ممان با شرایط مرزی مناسب با مسئله، صورت می‌گیرد. مدل جدید دو ویژگی مهم را با هم در نظر گرفته که شامل سرعت متغیر انتشار موج جریان در کانال صاعقه و تلفاتی بودن زمین است. این مدل نیازی به استفاده از گذردهی نسبی محیط اطراف کانال به مقدار بزرگتر از یک را ندارد و امکان تغییر سرعت در طول کانال صاعقه از طریق اعمال بارهای توزیعی سلفی دلخواه را فراهم می‌کند. این ویژگی به سرعت‌های متفاوت موج جریان بر روی کانال صاعقه منجر می‌شود. در مورد ویژگی دوم گفتنی است که چون در سایر مدل‌ها اغلب زمین ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود، بدیهی است در این حالت، مولفه‌ی افقی میدان الکتریکی، موجود و قابل استخراج نیست در حالی‌که در مدل جدید با فرض زمین تلفاتی، امکان استخراج مولفه‌ی افقی میدان الکتریکی وجود دارد که مقدار آن به علت واقعی‌تر بودن سرعت انتشار موج جریان در کانال به مقدار واقعی نزدیک‌تر است. به منظور ارزیابی مدل پیشنهادی، توزیع جریان در طول کانال صاعقه و میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از آن در فواصل مختلف تولید شده و با نتایج بدست آمده با سایر مدل‌های مبتنی بر تئوری آنتن مقایسه می‌شود. مقایسه‌ی نتایج نشانگر اعتبار مدل پیشنهادی است و به همراه آن نشان داده شده است که بر خلاف مدل‌های موجود، مدل پیشنهادی قادر به پیش‌بینی "عبور از صفر" میدان‌های الکترومغناطیسی راه دور است که در اندازه‌گیری‌ها دیده می‌شود.

کلمات کلیدی

تئوری آنتن، توزیع جریان، میدان‌های الکترومغناطیسی، بار اهمی-سلفی، مدل ضربه برگشت صاعقه، زمین تلفاتی.

A CG Lightning Model Based on Varying of Propagation Speed of the Upward traveling Current Wave along the Channel in the Vicinity of Lossy Ground

M. Nejati-Jahromi, R. Moini and S.H.H. Sadeghi

^۱ دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی امیرکبیر، آزمایشگاه تحقیقاتی الکترومغناطیس Email:Nejati@aut.ac.ir

^۲ استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر Email:Moini@aut.ac.ir

^۳ استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر Email:Sadeghi@aut.ac.ir

ABSTRACT

In this paper, a new method is presented to model a Cloud-to-Ground (CG) lightning return-stroke channel. In this method, the lightning channel is approximated by a lossy monopole antenna with distributed resistive-inductive load above a lossy ground. To determine the temporal-spatial current distribution along the channel, the governing electric field integral equation (EFIE) in frequency domain is solved numerically by the method of moment. As opposed to the conventional models, the proposed model enables one to assign the realistic value of unity to the relative permittivity of the surrounding medium. In addition, the channel speed can be appropriately adjusted using the distributed inductive loads along the channel. The latter enables one to assign a realistic propagation speed to the channel current. In addition, the inclusion of lossy ground in the proposed model further enhances its superiority over the conventional models for accurate modeling of a lightning channel. In fact, a lossy ground produces a nonzero horizontal component of electric field whose value is found to be closer to its actual value for having a more realistic current propagation speed along the channel. To demonstrate the validity of the model, the current distribution along the channel and the radiated electromagnetic field are computed and compared with those obtained using the conventional Antenna Model (AT) models. A comparison of the results confirms the validity of the proposed model. It is also shown that, as opposed to the conventional AT models, the proposed model is capable of predicting the zero-crossing feature of electromagnetic fields waveform in a far range as observed in all measurement data.

KEYWORDS

Antenna theory, Current distribution, Electromagnetic fields, Resistive-Inductive Loading, Lightning return stroke Modeling, lossy ground

است. مدل‌سازی ضربه‌ی برگشت صاعقه بیشتر به توصیف تغییرات زمانی و مکانی موج جریان در طول کانال می‌پردازد که برای محاسبه‌ی میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از صاعقه لازم است. مقایسه و مرور جزئیات بیشتر مدل‌های متعارف را می‌توان در [۳] یافت. خروجی یک مدل مناسب باید شامل ویژگی‌های مشاهده شده از ضربه‌ی برگشت کانال صاعقه باشد که می‌توان به تغییرات شدت نور با ارتفاع، سرعت انتشار شدت اولیه و مولفه‌های مختلف میدان‌های الکترومغناطیسی، در فواصل متفاوت از کانال، اشاره نمود. بیشتر مدل‌های شناخته شده، سرعت انتشار موج جریان را ثابت فرض می‌کنند، در حالیکه سرعت ضربه‌ی برگشت در طول کانال صاعقه با ارتفاع تغییر می‌کند [۴]. برای نمونه، مشاهدات نوری ارائه شده در [۵] از کاهش سرعت انتشار امواج نور اولیه متناسب با ارتفاع، برای ضربه‌ی برگشت اولیه و ثانویه گزارش می‌دهد. در [۶] یک مدل الکترومغناطیسی از ضربه‌ی برگشت ارائه شده که مبتنی بر تغییر سرعت انتشار موج با تابعی از مشخصات فیزیکی کانال مثل شعاع و دمای آن و زمان‌خیز^۲ شکل موج جریان پای کانال است. مطالعه‌ی سرعت انتشار موج جریان در کانال، بمنظور مقایسه‌ی میدان‌های پیش‌بینی شده‌ی سایر مدل‌ها و میدان‌های اندازه‌گیری شده، بسیار مهم است. مدل تئوری آنتن [۷] از مدل‌های الکترومغناطیسی در حوزه‌ی زمان است که کانال صاعقه را بصورت یک آنتن مونوپل تلفاتی^۳ در مجاورت زمین ایده‌آل ارائه می‌کند. در این مدل، سرعت انتشار موج ثابت و کمتر از سرعت نور است و با ضریب گذرده‌ی^۴ محیط در داخل

۱- مقدمه

گسترش و پیشرفت فناوری در حوزه‌ی الکترونیک و صنایع ارتباطات، منجر به بکارگیری تجهیزات حساس الکترونیکی شده است. درحالی‌که این تجهیزات، با اضافه ولتاژ، سازگاری ندارند. بخش زیادی از پالس‌های اضافه ولتاژ، ناشی از پدیده طبیعی صاعقه هستند. از دیدگاه فیزیکی، صاعقه، یک تخلیه الکتریکی گذرا با جریان زیاد به طول چندین کیلومتر است [۱]. از انواع مختلف صاعقه، نوع ابر به زمین با بار منفی به جهت فراوانی بیشتر، شدت جریان زیاد، زمان تخلیه کوتاه و از نظر نزدیکی به تجهیزات مستقر در سطح زمین از اهمیت بالایی در مطالعات مربوط به صاعقه برخوردار است. یک صاعقه کامل از قسمت‌های متفاوتی تشکیل شده که در این میان ضربه برگشت^۱ دارای اهمیت فراوان بوده و بیشترین اثرات و خسارات ناشی از صاعقه، به صورت برخورد مستقیم و یا بصورت اثرات تزویج، ناشی از ضربه‌ی برگشت است [۲]. ولتاژهای القایی تولید شده در اثر میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه، یکی از اصلی‌ترین علت‌های بروز اختلال در سیستم‌های توزیع نیرو، انتقال داده و سیستم‌های مخابراتی است و محاسبه آنها از مسائل مهم در طراحی سیستم‌های حفاظتی محسوب می‌شود. یکی از شاخه‌هایی که بیشتر محققین مطالعات خود را در آن دنبال می‌کنند، مدل‌سازی کانال ضربه‌ی برگشت است. یکی از مدل‌های مختلف ضربه برگشت مدل الکترومغناطیسی است [۲] که مدل مورد توجه در این مقاله

۲- تئوری مدل [۱۳]

معادلات مورد استفاده در این مقاله مانند روابط استفاده شده در [۱۲] است. در مدل تئوری آنتن ارائه شده، مطابق شکل (۱) ضربه‌ی برگشت صاعقه بصورت یک آنتن سیمی مونوپل بر روی زمین تلفاتی در نظر گرفته می‌شود. معادله‌ی انتگرال میدان الکتریکی با فرض اینکه کانال ضربه‌ی برگشت^۱ مانند یک سیم رسانا باشد، بصورت رابطه‌ی (۱) بیان می‌شود.

$$\nabla \cdot (E^i + E^s) = 0 \quad (1)$$

بطوریکه ∇ بردار یگه مماس به سطح سیم و دو ترم داخل پرانتز، میدان تابشی (E^i) و میدان پراکنده شده (E^s) است و میدان پراکنده شده‌ی E^s با رابطه‌ی (۲) بدست می‌آید.

$$E^s(r) = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)} \int_l \{ [I_l(r) \cdot \nabla] \nabla g(r', r) - \gamma^2 I_l(r) g(r', r) \} dl \quad (2)$$

بطوریکه l بردار یگه مماس به محور سیم و $I_l(r)$ جریان در طول سیم است که باید محاسبه شود. r' و r به ترتیب بردارهای نقاط مشاهده و منبع هستند. همچنین $\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$ ثابت انتشار مختلط در محیط یا عدد موج محیط و $g(r', r) = (e^{-\gamma R}/R)$ تابع گرین محیط همگن است که در آن $R = |r' - r|$ است. با ترکیب دو معادله‌ی (۱) و (۲)، معادله‌ی انتگرال از نوع الکتریکی شکل می‌گیرد که با حل آن می‌توان جریان $I_l(l)$ را بدست آورد.

برای حل معادله‌ی انتگرال میدان الکتریکی، جریان در طول سیم ($I_l(l)$) بصورت یک جریان توزیعی بر روی M دو قطبی^{۱۱} سری در نظر گرفته می‌شود با این شرایط، معادله‌ی انتگرال میدان الکتریکی حاصل از معادله‌ی (۱) و (۲) بصورت معادله‌ی (۳) بدست می‌آید.

$$F(I_l(l)) = -E_{tan}^i \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)، F یک اپراتور دیفرانسیل و انتگرال است که مولفه مماسی میدان الکتریکی ناشی از جریان طولی $I_l(l)$ را روی سطح سیم محاسبه می‌کند و E_{tan}^i مولفه مماسی میدان الکتریکی تابشی روی سطح سیم است.

با بکارگیری روش ممان در معادله‌ی (۳)، برای M دو قطبی، این معادله بصورت M معادله‌ی جبری-خطی بصورت زیر (۴) در می‌آید [۱۳].

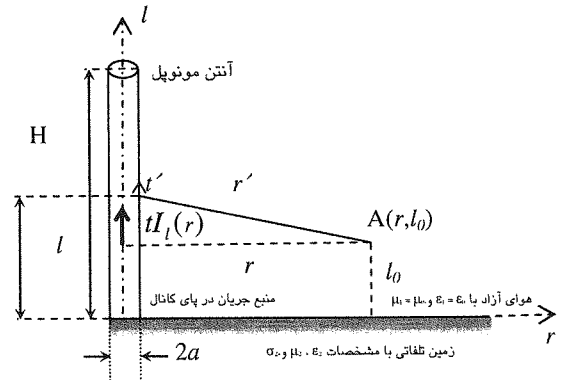
$$ZI = V \quad (4)$$

بطوریکه V بردار تحریک، Z ماتریس امپدانس و I بردار جریان است که باید بدست آورد.

در اینجا از روش ارائه شده در [۸] و [۱۵]-[۱۶]، برای تعیین آفت

کانال (ϵ_r)، تنظیم می‌شود که مقدار آن بزرگتر از ضریب گذردهی فضای آزاد است. برای داشتن سرعت انتشار $1/3 \times 10^8$ متر بر ثانیه، از ϵ_r برابر $5/3$ استفاده می‌شود. افزایش ϵ_r باعث افزایش ظرفیت خازنی کانال می‌گردد در حالی که ظرفیت سلفی ثابت مانده است به این ترتیب محیط پیرامون کانال صاعقه شبیه‌سازی می‌شود [۷]. در [۸] مدلی اصلاحی از مدل AT اولیه در حوزه‌ی زمان ارائه شده است که از انرژی ذخیره شده بمنظور کنترل سرعت ضربه‌ی برگشت استفاده می‌کند. این انرژی در سلف هر بخش تشکیل دهنده‌ی آنتن کانال صاعقه و با توجه به تئوری خط انتقال، ذخیره می‌شود. از آنجا که سرعت فاز^{۱۲} تابعی از حاصل ضرب اندازه‌ی سلف و خازن در واحد طول است، توزیع سلف بصورت سری جهت بیان تاثیر کانال، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹]. از این مدل به منظور پرهیز از تغییر و افزایش مصنوعی ضریب گذردهی محیط پیرامون کانال استفاده می‌شود. در تمام روش‌های قبل، از تقریب زمین ایده‌آل در مدل‌سازی ضربه‌ی برگشت استفاده شده است. بمنظور بیان تاثیر زمین تلفاتی، تقریب‌های متفاوتی پیشنهاد شده که دارای خطاست و جزئیات آنها را می‌توان در [۱۰] یافت. دقیق‌ترین فرمول جهت محاسبه مولفه مماسی میدان الکتریکی توسط کوری^{۱۳} ارائه شده است [۱۱]. اختلاف مولفه عمودی میدان الکتریکی با زمین تلفاتی از حالت ایده‌آل نیز، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. نتایج به دست آمده در این زمینه محدود به فرمول‌های تقریبی است [۱۲]. در [۱۳] مدلی اصلاحی از مدل AT اولیه در حوزه‌ی فرکانس ارائه شده است که در آن با فرض ثابت بودن سرعت انتشار موج جریان در کانال صاعقه، زمین را، بصورت تلفاتی در نظر گرفته و با یک تقریب خوب از انتگرال‌های سامرفلد^{۱۴} مولفه‌های مختلف میدان‌های الکترومغناطیسی را استخراج نموده است. در همه‌ی مدل‌های پیش‌گفته، یکی از دو فرض سرعت ثابت انتشار موج جریان یا زمین ایده‌آل، وجود دارد. نوآوری مدل ارائه شده در این مقاله این است که در آن سرعت متغیر انتشار موج جریان در کانال صاعقه با زمین تلفاتی وجود دارد و الگوهای سرعت، شبیه حالت واقعی و پاشیدگی جریان کانال^{۱۵} بهتر تولید و ظاهر می‌شود. این ویژگی‌ها برخلاف مدل‌های AT معمول، عبور از صفر^{۱۶} میدان‌های الکترومغناطیسی راه دور که در اندازه‌گیری‌ها دیده می‌شود را بخوبی نشان می‌دهد. در ادامه توزیع جریان در طول کانال و میدان‌های الکترومغناطیسی تشعشی ناشی از آن در مدل جدید توصیف شده و با سایر مدل‌های الکترومغناطیسی و نتایج حاصل از مشاهدات نوری و میدان‌های اندازه‌گیری شده‌ی لین [۱۴] مقایسه شده است.

موج جریان بالارونده در کانال و سرعت انتشار آن استفاده شده است. برای انجام این کار با مقاومت و اندوکتانس توزیعی مناسب به ترتیب میزان آفت و سرعت انتشار موج جریان تعیین می‌شود. در این روش، طول کانال صاعقه بطور مناسب به m قطعه‌ی مساوی تقسیم می‌گردد.



شکل (۱) مدل کانال صاعقه بصورت یک آنتن سیمی مونوپل بر روی زمین تلفاتی

هر قطعه n (قطعه‌ی m)، با یک امیدانس ورودی (اهمی-سلفی) بنام $Z_n(l)$ بارگذاری می‌شود که رابطه‌ی آن با منبع ولتاژ $V_n(l)$ و جریان هر قطعه $I_n(l)$ در حوزه‌ی فرکانس بصورت (۵) بیان می‌گردد.

$$V_n(l) = Z_n(l)I_n(l) \quad 0 \leq n \leq m \quad (5)$$

بطوریکه

$$Z_n(l) = R_n(l) + j2\pi fL_n(l) \quad 0 \leq n \leq m \quad (6)$$

در اینجا f فرکانس، $R_n(l)$ و $L_n(l)$ به ترتیب اجزاء مقاومتی و اندوکتانسی در $Z_n(l)$ هستند. با استفاده از (۶) در (۵):

$$V_n(l) = R_n(l)I_n(l) + j2\pi fL_n(l)I_n(l) = (R_n(l) + j2\pi fL_n(l))I_n(l) \quad (7)$$

با توجه به معادلات (۷) و (۴) در فرمول مسئله [۱۲]، معادله‌ی انتگرال میدان الکتریکی در هر دو قطبی بصورت معادله‌ی جبری-خطی در می‌آید.

$$Z_{n \times n} I_{n \times 1} = V_{n \times 1} \quad n = m \quad (8)$$

با حل عددی معادله‌ی (۸) جریان توزیعی در طول کانال صاعقه بدست می‌آید و با آن، میدان‌های تشعشعی در یک نقطه مشخص محاسبه می‌شود، چون میدان‌ها در حوزه‌ی فرکانس استخراج می‌شوند، با تبدیل فوریه معکوس پاسخ در حوزه‌ی زمان محاسبه و نمایش داده می‌شود.

۳- معرفی مدل جدید

با استفاده از روابط (۴) تا (۸)، جریان توزیعی در طول کانال صاعقه قابل استخراج است و تفاوت مدل‌های معمول AT

در تفاوت این جریان‌ها و میدان‌های الکترومغناطیسی استخراج شده در آنها است. با تئوری مورد اشاره در بخش ۲ که زمین را تلفاتی در نظر می‌گیرد و با توزیع مناسب بار که سرعت انتشار موج جریان را تنظیم می‌کند، مدل جدید، جریان توزیعی در طول کانال صاعقه را تولید کرده و سپس با این جریان‌ها طبق تئوری محاسبه‌ی میدان با زمین تلفاتی، میدان‌های الکترومغناطیسی را محاسبه می‌کند. در ادامه چگونگی تنظیم سرعت انتشار موج جریان توضیح داده می‌شود.

۳-۱- ارتباط بین سرعت انتشار موج جریان در کانال و بارگذاری در مدل جدید

یک سیم هادی کامل، در مجاورت زمین ایده‌آل مانند یک خط انتقال بوده و سرعت انتشار موج در آن ثابت و برابر سرعت نور است که از رابطه‌ی $c = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ بدست می‌آید بطوریکه، L_0 و C_0 به ترتیب سلف و خازن در واحد طول هستند. با تأکید بر این نکته، در [۸] با توجه به اثر غیر یکنواخت خط انتقال، بار غیر یکنواخت در آنتن مونوپل اعمال شده است و بیان شده که مقادیر L_0 و C_0 برای یک خط انتقال به طول l و شعاع a از روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$C_0(l) = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(2l/a)} \quad (F/m) \quad (9)$$

$$L_0(l) = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(2l/a) \quad (H/m) \quad (10)$$

با توجه به رابطه‌ی $c = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ ، برای رسیدن به سرعت متغیر، با در نظر گرفتن بارهای سلفی متغیر با ارتفاع، سرعت انتشار موج جریان در کانال به صورت رابطه‌ی (۱۱) اصلاح می‌شود

$$v(l) = \frac{1}{\sqrt{L'(l) \cdot C_0(l)}} = \frac{1}{\sqrt{(L_0(l) + L^{add}(l)) \cdot C_0(l)}} \quad (11)$$

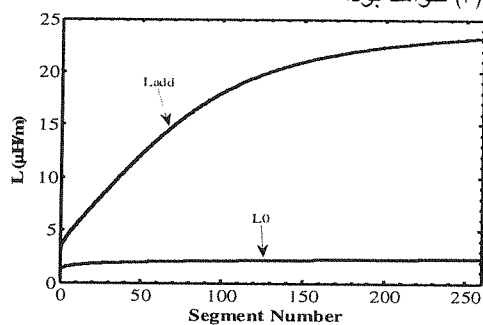
که $L^{add}(l)$ اندوکتانس اضافی اعمال شده به کانال و تابع ارتفاع است. با توجه به رابطه (۱۱) با داشتن مشخصه‌ی سرعت انتشار موج در کانال، مشخصه‌ی سلف توزیعی در طول کانال از رابطه (۱۲) محاسبه می‌گردد [۸]:

$$L^{add}(z) = \frac{1}{v^2(l) \cdot C_0(l)} - L_0(l) \quad (12)$$

برخی پژوهشگران رابطه‌ی نمایشی را برای مدل‌سازی سرعت کانال مناسب می‌دانند [۱۷]. رابطه کلی برای مشخصه‌ی نمایشی سرعت غیر یکنواخت کانال به صورت (۱۳) است.

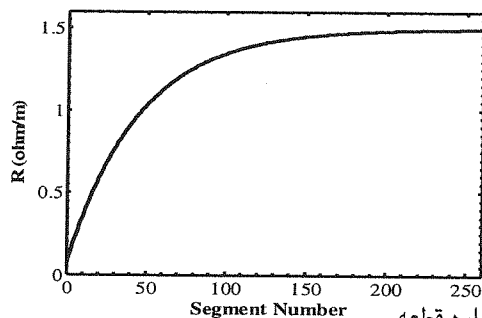
$$v(l) = v_h - (v_h - v_0)e^{-\frac{l}{\lambda}} \quad (13)$$

که λ ثابت ارتفاع و v_0 سرعت انتشار موج در ابتدای کانال و v_H سرعت انتشار موج در انتهای کانال است ($l=H$). مشاهدات نوری نشان می‌دهد که سرعت انتشار در پایین کانال بین یکدوم تا یک‌سوم سرعت نور است [۱۸] و با ارتفاع کاهش می‌یابد. بر این اساس و در این مقاله، با استفاده از رابطه‌ی (۱۲) و با $\lambda=450$ nm و $v_0=1/6 \times 10^8$ m/s و $v_H=0/9 \times 10^8$ m/s و طول کانال، ۲۶۰۰ متر، منحنی سرعت استخراج شده است. با در نظر گرفتن $m=260$ (تعداد قطعه‌ها) و این‌که طول هر قطعه ۱۰ متر است و با توجه به منحنی سرعت و با استفاده از رابطه‌ی (۱۲)، سلف توزیعی L شامل L_0 و L_{add} در کانال، مطابق شکل (۳) خواهد بود.



شماره قطعه
شکل (۳) مشخصه‌ی اندوکتانس توزیعی نسبت به هر قطعه [۸]

نتایج اندازه‌گیری‌های نوری، اُفت تدریجی و متغیر شکل موج جریان در طول کانال را نشان می‌دهند [۱۹]، بنابراین برای ایجاد این اُفت، مقاومت توزیعی متغیر در کانال، در نظر گرفته شده است. مشخصه‌ی مقاومت R در ابتدای کانال (اولین قطعه) شبیه مدل تئوری آنتن [۷] برابر $0/7$ اهم بر متر و در انتهای آن (آخرین قطعه) برابر $1/5$ اهم بر متر انتخاب شده است. با $m=260$ میزان افزایش مقاومت به صورت نمایی مشابه رابطه‌ی (۱۲) و با $\lambda=450$ nm می‌باشد. در شکل (۳) مشخصه‌ی مقاومت R متناسب با هر قطعه (سگمنت)، نشان داده شده است.



شماره قطعه
شکل (۴) مشخصه‌ی مقاومت توزیعی در طول کانال به هر قطعه [۸]

۴-۱-۴- ارزیابی مدل

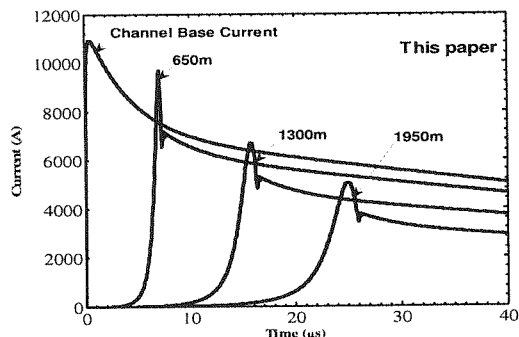
در این بخش به منظور ارزیابی درستی مدل جدید، نتایج عددی حاصل، بصورت توزیع جریان و میدان‌های

الکترومغناطیسی تابشی از کانال ارائه شده است. درستی اعتبار مدل‌های ضربه برگشت صاعقه به کمک مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج اندازه‌گیری، و یا مقایسه با نتایج سایر مدل‌هایی انجام می‌پذیرد که پیشتر درستی آنها مورد تایید قرار گرفته است. گرچه بدلیل ماهیت تصادفی پدیده صاعقه هیچ یک از مدل‌هایی که تا کنون ارائه شده‌اند با شرایط واقعی بطور کامل همخوانی ندارند، اما مدلی مورد تایید است که مشخصه‌های آن با پدیده‌های فیزیکی قابل اندازه‌گیری ناشی از صاعقه، همخوانی بیشتری نشان دهد [۳]. مقایسه توزیع جریان کانال صاعقه با نتایج حاصل از مشاهدات نوری یکی از ابزارهای تعیین درستی مدل‌هاست [۳]. واضح است که بجز در پای کانال و روی سطح زمین، امکان اندازه‌گیری مستقیم جریان صاعقه بالاتر از سطح زمین و در ارتفاع‌های متفاوت وجود ندارد. محققین نشان داده‌اند که شدت نور ایجاد شده در هر بخش از کانال صاعقه بطور مستقیم با جریان گذرنده از آن قسمت کانال، متناسب است [۱] - [۲]. در بخش ۴-۱ توزیع جریان در کانال که به کمک مدل جدید بدست آمده، با نتایج حاصل از سنایر مدل‌ها و مشاهدات نوری مقایسه شده است. روش دیگر ارزیابی مدل‌ها، مقایسه میدان‌های الکترومغناطیسی تابشی کانال از دیدگاه مشخصه‌های مهم میدان است (مانند شیب افزایش یا کاهش میدان در زمان‌های مختلف، برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های شکل موج میدان‌ها در فواصل مختلف و عبور از صفر میدان در راه دور) که این مقایسه‌ها با نتایج اندازه‌گیری میدان و نتایج مدل‌های معتبر انجام می‌شود. مقایسه‌ی میدان‌های الکترومغناطیسی مدل‌ها و اندازه‌گیری‌های میدان در بخش ۴-۲ آمده است.

۴-۱-۴- توزیع جریان کانال

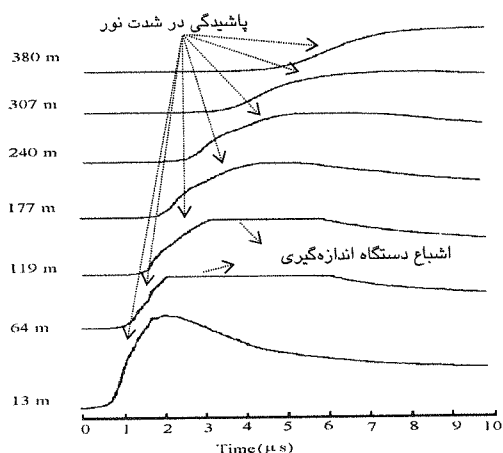
در این بخش توزیع جریان در یک کانال صاعقه‌ی عمودی تحلیل شده است. در این تحلیل، طول کانال ۲۶۰۰ متر و شعاع آن، $a=5$ cm بر روی زمین تلفاتی با هدایت الکتریکی $\sigma=0/43$ S/m و گذردهی الکتریکی نسبی $\epsilon_2=85$ در نظر گرفته می‌شود. جریان تحریک در پای کانال، جریانی است که در [۷] و [۱۳] نیز استفاده شده است. این جریان دارای بیشینه‌ی ۱۱ کیلوآمپر و زمان خیز 105 kA/ μ s است. توزیع جریان روی کانال صاعقه توسط دو مدل ارائه شده در [۷] و [۱۳] برای زمین ایده‌آل و در مدل جدید با زمین تلفاتی، محاسبه شده و در شکل (۴) (الف) - (ج)، برای ارتفاع‌های ۶۵۰ متر، ۱۳۰۰ متر و ۱۹۵۰ متر نشان داده شده است.

شکل (۴) نشان می‌دهد که، با افزایش ارتفاع، شکل جریان در مقایسه با دو مدل دیگر دچار تغییر می‌شود. با افزایش ارتفاع،



شکل (ج) توزیع جریان‌ها در مدل ارائه شده در مقاله

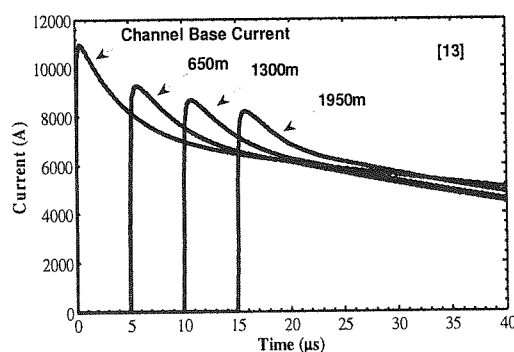
شکل (۴) الف-ج- توزیع جریان در ارتفاع‌های ۱۳۰۰، ۶۵۰ و ۱۹۵۰ متر برای مدل‌های [۷] و [۱۳] با سرعت انتشار ثابت و مدل جدید با سرعت متغیر



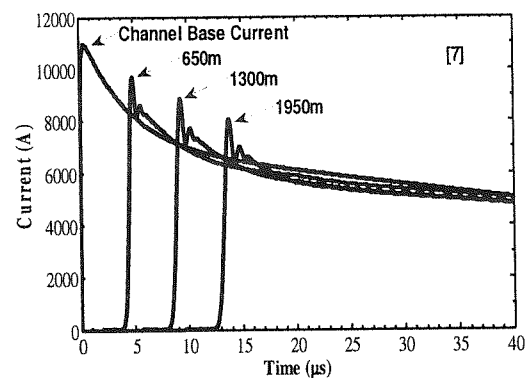
شکل (۵) مشخصه‌ی شدت نور ناشی از کانال صاعقه [۱۹]

یک نمونه مشخصه‌ی شدت نور کانال که توسط وانگ و همکارانش با استفاده از اندازه‌گیری‌های نوری در سال ۱۹۹۹ ثبت شده در شکل (۵) نشان داده شده است [۱۹]. همانطور که پیشتر بیان شد، بدلیل وابستگی مستقیم شدت نور کانال به جریان، مشخصه‌ی شدت نور کانال به عنوان مرجعی برای ارزیابی درستی مدل‌های ضربه برگشت صاعقه مورد توجه محققین است. مقایسه جریان‌های شبیه سازی شده با نتایج اندازه‌گیری‌های نوری نشان دهنده این مسئله است که شکل موج پیش بینی شده توسط مدل جدید با نتایج اندازه‌گیری‌های نوری، همخوانی خوبی دارد. این همخوانی در سرعت انتشار موج و همچنین پاشیدگی در پیشانی موج جریان قابل مشاهده است. این مقایسه درستی و اعتبار مدل جدید را تایید می‌کند. وجود نوسانی که پس از پیشینه‌ی جریان رخ می‌دهد و به سرعت میرا می‌شود، بعلت خطای عددی است و بخشی از آن، با مقدار بارسلفی، ارتباط مستقیم دارد.

دامنه‌ی جریان نسبت به دو مدل دیگر کاهش و زمان خیز آن افزایش می‌یابد و دیده می‌شود که مدل جدید، پاشیدگی بیشتری را برای جریان کانال (با توجه به زمان صعود و افزایش آن) نسبت به دو مدل دیگر پیش‌بینی می‌کند که با نتایج حاصل از مشاهدات نوری کانال صاعقه همخوانی بیشتری دارد. علت افزایش زمان خیز و پاشیدگی جریان، سلف توزیعی است که باعث کاهش سرعت جبهه موج روی کانال می‌شود در حالی که سرعت انتشارموج در مدل [۷] و [۱۳] به مقدار $1/3 \times 10^8$ m/s ثابت است. عامل دیگر کاهش دامنه‌ی جریان، اثر مقاومت توزیعی و همچنین وجود زمین تلفاتی است که منجر به تغییر شکل موج و کاهش پیشینه‌ی جریان‌ها در مدل این مقاله می‌شود. اختلاف سرعت بین جریان کانال در مدل‌ها (شکل (۴)) با توجه به تاخیر ایجاد شده در شکل موج‌های جریان در یک ارتفاع مشخص را می‌توان با مقادیر واقعی نیز مقایسه نمود.



شکل (الف) توزیع جریان‌ها در مدل [۱۳]



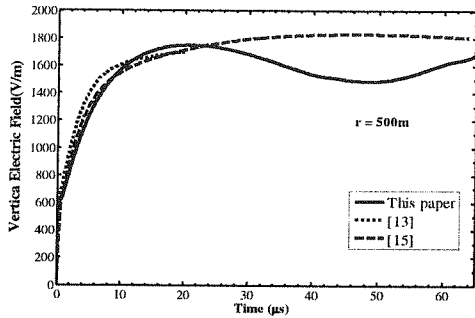
شکل (ب) توزیع جریان‌ها در مدل [۷]

۴-۴- میدانهای الکترومغناطیسی

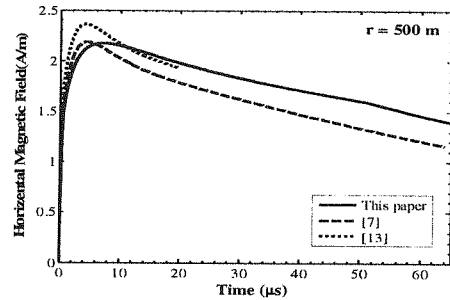
نظر گرفته شده است در حالی که در مدل مقاله، زمین تلفاتی با هدایت الکتریکی $\sigma = 0.4 \text{ S/m}$ و گذردهی الکتریکی نسبی $\epsilon_2 = 8\epsilon_0$ و سرعت انتشار موج جریان و افت آن، متغیر با ارتفاع، در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به شکل (۶)، میدان مغناطیسی در ۵۰۰ متر از ۱۰ میکروثانیه به بعد در هر سه مدل شبیه هم تخمین زده شده و تا

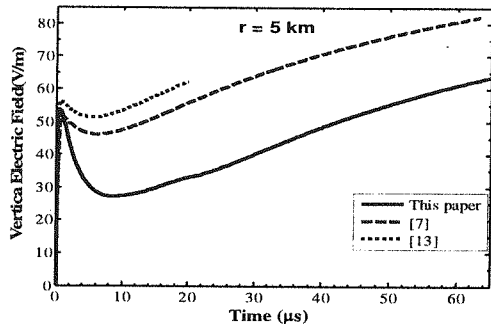
در شکل (۶) (الف - ج) و شکل (۶) (د - و) به ترتیب مولفه افقی میدان مغناطیسی و مولفه عمودی میدان الکتریکی در فاصله‌های ۵۰۰ متر، ۵ کیلومتر و ۱۰۰ کیلومتر، نشان داده شده است. در این شکل مقایسه برای نتایج مدل‌های [۷]، [۱۳] و مدل این مقاله، انجام شده، بطوری که در مدل‌های [۷] و [۱۳] زمین ایده‌آل و سرعت انتشار موج ثابت و بمیزان $1/3 \times 10^8 \text{ m/s}$ در



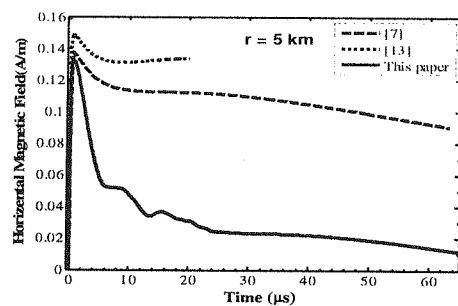
(د) مولفه عمودی میدان الکتریکی در فاصله‌ی ۵۰۰ متری



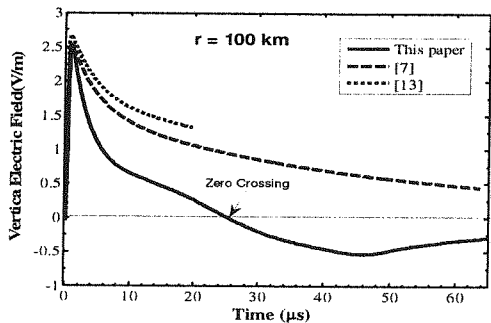
(الف) مولفه افقی میدان مغناطیسی در فاصله‌ی ۵۰۰ متری



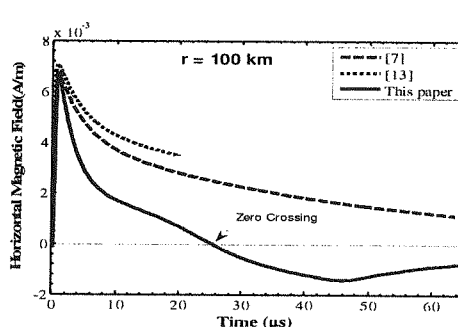
(ه) مولفه عمودی میدان الکتریکی در فاصله‌ی ۵ کیلومتری



(ب) مولفه افقی میدان مغناطیسی در فاصله‌ی ۵ کیلومتری



(و) مولفه عمودی میدان الکتریکی در فاصله‌ی ۱۰۰ کیلومتری



(ج) مولفه افقی میدان مغناطیسی در فاصله‌ی ۱۰۰ کیلومتری

شکل (۶) (الف) - (ج) مولفه افقی میدان مغناطیسی و (د) - (ه) مولفه عمودی میدان الکتریکی در فاصله‌های ۵۰۰ متر، ۵ کیلومتر و ۱۰۰ کیلومتر از پای کانال برای زمین ایده‌آل و سرعت انتشار ثابت $1/3 \times 10^8 \text{ m/s}$ در [۷] و [۱۳] و در این مقاله با زمین تلفاتی با هدایت الکتریکی $\sigma = 0.4 \text{ S/m}$ و گذردهی الکتریکی نسبی $\epsilon_2 = 8\epsilon_0$ با سرعت انتشار متغیر و افت متغیر با ارتفاع موج جریان

تخمین اولیه‌ی میدان الکتریکی در فاصله‌ی ۵۰۰ متر، در یک میکروثانیه‌ی اول در هر سه مدل شبیه هم است اما سرعت افزایش در این فاصله‌ی زمانی، در مدل مقاله نسبت به دو مدل [۷] و [۱۳] کمی بیشتر است و بیان می‌کند که تغییر سرعت و زمین تلفاتی در شکل موج میدان الکتریکی در یک میکروثانیه

یک میکروثانیه، شیب افزایش آنها، یکی است. مدل مقاله پیشینه‌ی اولیه را کوچکتر از دو مدل دیگر تخمین می‌زند چون جریان در پایین کانال، کمتر از دو مدل دیگر است (شکل (۴)). از طرف دیگر زمان وقوع پیشینه‌ی میدان مغناطیسی بیشتر از دو مدل دیگر و ناشی از هدایت محدود زمین است.

اول، تغییر کمی ایجاد می‌کند اما با توجه به اینکه سرعت انتشار موج در پایین کانال بیشتر از بالای آن و هدایت زمین نیز محدود است پس از یک میکروثانیه شیب میدان الکتریکی به روشنی، بیشتر می‌شود. مقدار میدان الکتریکی در مدل مقاله از ۱۰ تا ۲۵ میکروثانیه، بیش از سایر مدل‌ها است. از ۲۵ تا ۴۸ میکروثانیه مقدار میدان الکتریکی کاهش و از ۴۸ میکروثانیه به بعد دوباره افزایش می‌یابد. این روند با اندازه‌گیری‌های لین در ۵۰۰ متر [۱۴] در بازه‌ی زمانی مورد اشاره که شیب میدان الکتریکی ابتدا کم و سپس زیاد می‌شود، همخوانی دارد.

مؤلفه‌ی افقی میدان مغناطیسی در ۵ کیلومتر، تا ۲ میکروثانیه‌ی اول شبیه هم هستند این در حالی است که در مدل مقاله زمان خیز بیشتر و بیشینه‌ی آن کمتر از دو مدل دیگر است که دلیل آن سرعت زیاد در بخش پایین کانال و اثر هدایت محدود زمین است. از ۳ تا ۲۰ میکروثانیه کاهش شدید میدان مغناطیسی را شاهد هستیم این کاهش بیشتر از دو مدل دیگر و اندازه‌گیری لین در ۵ کیلومتری است و ناشی از تاثیر زمین تلفاتی است. از ۲۰ میکروثانیه به بعد کاهش میدان مغناطیسی با شیب کند ادامه می‌یابد که مدل مقاله در مقایسه با دو مدل دیگر با اندازه‌گیری لین مطابقت بیشتری دارد. در فاصله ۸ تا ۲۰ میکروثانیه اعوجاج‌هایی وجود دارد که بعلت خطای عددی در تولید میدان است و بیشتر در فاصله‌های متوسط (۲ تا ۱۰ کیلومتر) رخ می‌دهد.

هیچکدام از مدل‌ها قوز^{۱۳} را در فواصل نزدیک که در اندازه‌گیری‌های لین [۱۴] وجود دارد، نشان نمی‌دهند.

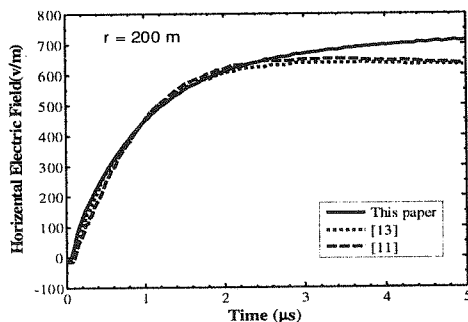
مؤلفه‌ی عمودی میدان الکتریکی در فاصله‌ی ۵ کیلومتری تا ۲ میکروثانیه‌ی اول شبیه هم هستند اما بیشینه‌ی میدان کمتر از دو مدل دیگر است از ۲ میکروثانیه به بعد روند تخمین میدان در هر سه مدل شبیه است با این تفاوت که مدل مقاله کاهش بیشتری نسبت به دو مدل دیگر دارد این کاهش ناشی از کاهش بیشینه‌ی جریان در مدل مقاله است که از تغییر سرعت انتشار جریان و هدایت محدود الکتریکی زمین تاثیر می‌پذیرد. شکل میدان الکتریکی در هر سه مدل همخوانی مناسبی با اندازه‌گیری‌های لین در ۵ کیلومتر دارد.

شکل میدان الکتریکی و مغناطیسی در ۱۰۰ کیلومتری شبیه هم هستند. در مدل مقاله اندازه‌ی میدان‌ها کوچکتر و زمان خیز آن بیشتر از دو مدل دیگر است. که دلیل آن سرعت کم در بخش بالای کانال و اثر زمین تلفاتی بر کاهش جریان است.

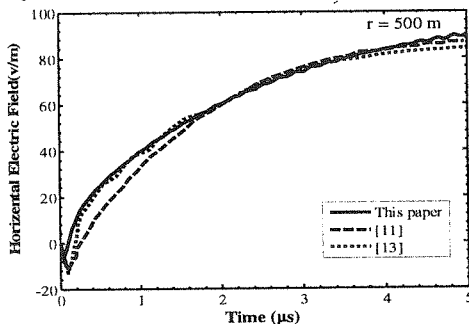
تحلیل شکل (۶) را به این صورت می‌توان جمع‌بندی نمود که، هدایت محدود زمین می‌تواند مؤلفه‌ی میدان را نسبت به حالت زمین ایده‌آل، دچار اعوجاج کند. بطوری‌که کاهش بیشینه‌ی موج جریان، باعث کاهش مقدار بیشینه‌ی مؤلفه

عمودی میدان الکتریکی و مؤلفه افقی میدان مغناطیسی و افزایش زمان خیز آنها به ویژه در فواصل دور می‌شود. همچنین اثر سرعت متغیر با تاثیر بر موج جریان (کاهش دامنه و پایداری آن) باعث کاهش بیشینه‌ی میدان‌ها می‌شود. مدل مقاله عبور از صفر در فاصله ۲۶ میکرو ثانیه را نشان می‌دهد که در اندازه‌گیری‌های لین در ۱۰۰ کیلومتر نیز وجود دارد. مدل جدید در این فاصله همخوانی خوبی با اندازه‌گیری‌های لین دارد.

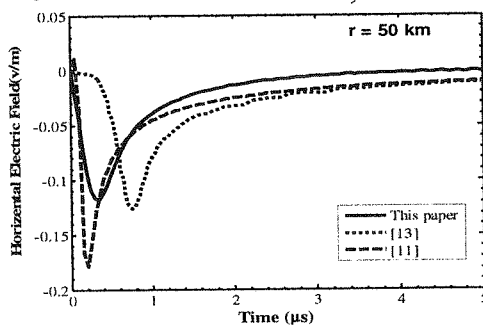
در شکل (۷) - (الف - د) مؤلفه‌ی افقی میدان‌های الکتریکی در فاصله‌های ۲۰۰ متر، ۵۰۰ متر، ۵۰ کیلومتر و ۱۰۰ کیلومتر، برای مدل مقاله، نتایج [۱۱] و مدل [۱۲]، نشان داده شده است. بررسی مؤلفه‌ی افقی میدان الکتریکی در تداخل امواج الکترومغناطیسی ناشی از صاعقه با خطوط انتقال قدرت و



(الف) مؤلفه افقی میدان الکتریکی در فاصله‌ی ۲۰۰ متری



(ب) مؤلفه افقی میدان الکتریکی در فاصله‌ی ۵۰۰ متری



(ج) مؤلفه افقی میدان الکتریکی در فاصله‌ی ۵۰ کیلومتری

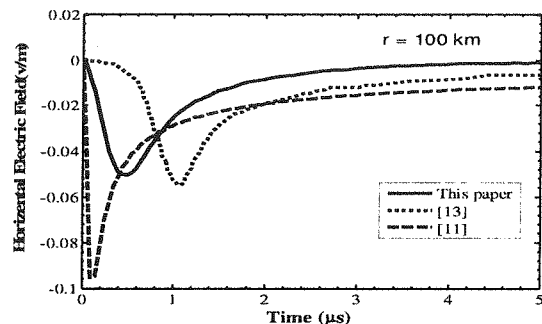
صاعقه با یک آنتن عمودی مونوپل سلفی-اهمی در مجاورت زمین تلفاتی، مدل می‌شود. در مدل جدید برای تنظیم سرعت انتشار جبهه موج جریان بر روی کانال صاعقه به جای تغییر مصنوعی و غیر واقعی گذردهی نسبی محیط، از اندوکتانس توزیعی بر روی کانال استفاده شده است. در این حالت اثر کانال صاعقه با اعمال بارهای راکتیو به نحو مطلوب و با توجیه فیزیکی مناسبی مدل می‌شود و پاشیدگی جریان کانال در مدل جدید همخوانی بیشتری با نتایج اندازه‌گیری‌های نوری دارد. در این مقاله، اثر توأم سرعت متغیر انتشار موج جریان و زمین تلفاتی در کاهش قله و پاشیدگی جریان توزیع شده در کانال، بررسی شده است. مدل جدید مشخصه‌ها و مولفه‌های میدان‌های الکترومغناطیسی را به خوبی مدل می‌کند. اثر زمین تلفاتی و سرعت متغیر انتشار موج جریان، منجر به کاهش بیشینه‌ی موج جریان شده، باعث کاهش مقدار بیشینه‌ی مولفه‌های میدان و افزایش زمان خیز آنها به ویژه در فواصل دور می‌شود. مدل ارائه شده، مولفه‌ی افقی میدان الکتریکی را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد و بیان می‌کند که هرچه متوسط سرعت انتشار موج جریان در کانال کمتر و اندازه‌ی امپدانس توزیعی در کانال بیشتر باشد، اندازه‌ی دامنه‌ی مولفه‌ی افقی میدان الکتریکی و زمان وقوع بیشینه‌ی منفی هم، کمتر خواهد شد. مقایسه‌ی توزیع جریان کانال ناشی از مدل جدید با نتایج حاصل از مشاهدات نوری و همچنین مقایسه‌ی میدان‌های محاسبه شده با نتایج اندازه‌گیری بیانگر درستی مدل ارائه شده است.

۶- قدردانی

از همیاری مرکز تحقیقات مخابرات ایران و مسئولین محترم آن، در تدارک این مقاله، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷- مراجع

- [۱] M. Uman, Lightning Discharge, Academic press, New York 1987.
- [۲] بهزاد کردی، مدلسازی پدیده صاعقه به کمک تئوری پراکندگی و سنجش میدانهای الکترومغناطیسی ناشی از آن، پایان نامه دکتری مخابرات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۹
- [۳] V.A. Rakov and M.A. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their applications," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 40, no. 4, pp. 403-426, Nov. 1998.
- [۴] V.A. Rakov, "Lightning return stroke speed: A review of experimental data," in Proc. Int. Conf. Lightning Protection, Avignon, France, 2004, pp. 139-144.
- [۵] V.P. Idone and R.E. Orville, "Lightning return stroke velocities in the Thunderstorm Research International Program (TRIP)," J. Geophys. Res., vol. 87, pp. 4903-15, 1982.



د) مولفه افقی میدان الکتریکی در فاصله‌ی ۱۰۰ کیلومتری

شکل (۷) الف) - (د) مولفه‌ی افقی میدان الکتریکی

خطوط انتقال داده، بسیار با اهمیت است [۲۰] و در فواصل نزدیک اضافه ولتاژ تزریقی به خطوط توزیع و انتقال قدرت و تاثیرات آن، اهمیت بررسی آنرا دوچندان می‌کند. در این راستا مدل مقاله با توجه به توضیحات قبلی امکان بررسی مولفه‌ی افقی میدان الکتریکی را فراهم می‌کند. مولفه افقی میدان الکتریکی با فرض زمین ایده‌آل، روی سطح زمین صفر است و با کاهش هدایت زمین اندازه‌ی آن افزایش می‌یابد.

در شکل (۷) الف) و (ب) توافق مولفه‌ی افقی میدان‌های الکتریکی در فاصله‌های ۲۰۰ متر و ۵۰۰ متر دیده می‌شود و نشان می‌دهد که رابطه‌ی تقریبی در [۱۱]، در فاصله‌ی نزدیک، از دقت مناسبی برخوردار است و در فواصل نزدیک، مدل مقاله و مدل [۱۳] همخوانی و شباهت زیادی دارند که نمایانگر تاثیر کم سرعت انتشار امواج بر مولفه‌ی افقی میدان الکتریکی است.

شکل (۷) ج) و (د) وضعیت مولفه‌ی افقی میدان‌های الکتریکی را در فاصله‌های دور یعنی ۵۰ و ۱۰۰ کیلومتر، نمایش می‌دهد. در فواصل دور رابطه‌ی تقریبی در [۱۱]، از دقت کافی برخوردار نیست و اختلاف آن با دو مدل دیگر، هم در اندازه‌ی دامنه و هم در زمان وقوع قله‌ی منفی مشهود است. در فاصله‌های دور مدل مقاله و مدل [۱۳] در زمان وقوع قله‌ی منفی و اندازه‌ی دامنه اختلاف دارند. این اختلاف ناشی از نحوه‌ی بارگذاری و ایجاد سرعت متغیر در مدل مقاله است. هرچه متوسط سرعت انتشار موج جریان در کانال کمتر باشد (اندازه‌ی امپدانس توزیعی بیشتر)، اندازه‌ی دامنه میدان الکتریکی نیز کمتر است و زمان وقوع قله‌ی منفی هم، کمتر خواهد شد (شیب منفی اولیه تندتر). چون اندازه‌ی امپدانس در مدل [۱۳] کمتر از مدل مقاله و متوسط سرعت انتشار موج جریان آن در کانال بیشتر است، بنابراین در دو مدل اختلاف وجود دارد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله مدل جدیدی ارائه شده است که در آن، کانال

- Y.M. Lin, M.A Uman, J.A. Tiller, R.D. Brantley, W.H. Beasley, E.P. Krider, and C.D. Weidman, "Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simulations two-station measurements," J. Geophys. Res., vol. 84, pp. 6307-6314, 1979. [۱۴]
- Y. Baba and M. Ishii, "Numerical electromagnetic field analysis of lightning current in tall structures," IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 2, pp. 324-328, Apr. 2001. [۱۵]
- Y. Baba and M. Ishii, "Characteristics of electromagnetic return-stroke models," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 45, no. 1, pp. 129-135, Feb. 2003. [۱۶]
- V.A. Rakov and M. A. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application," IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, Vol. 40, No. 4, May 1998. [۱۷]
- C.E. Baum, "Return-stroke initiation," in Proc. EMC Symposium, Zurich, 1989, pp. 383-388. [۱۸]
- D. Wang, N. Takagi, T. Watanabe, V.A. Rakov and M.A. Uman, Observed leader and return-stroke propagation characteristics in the button 400 m of a rocket triggered lightning channel, Journal of Geographical Research, Vol. 104, No. D12, Pages 14369-14376, June 27, 1999. [۱۹]
- F. Rachidi, "Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation fields," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 35, no. 3, pp. 404-407, Aug. 1993. [۲۰]
- J.E. Borovski "An electrodynamic description of lightning return strokes and dart leaders: guided wave propagation along conducting cylindrical channels," J. Geophys. Res., vol. 100, no. D2, pp. 2697-2726, Feb. 1995. [۲۱]
- R. Moini, B. Kordi, G.Z. Rafi, and V.A. Rakov, "A new lightning return stroke model based on antenna theory model," J. Geophys. Res., vol. 105, no. D24, pp. 29693-29702, Dec. 2000. [۲۲]
- Bonyadi-Ram, S.; Moini, R.; Sadeghi, S.H.H.; Rakov, V.A., "On Representation of Lightning Return Stroke as a Lossy Monopole Antenna With Inductive Loading", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume 50, Issue 1, Feb. 2008 Page(s):118 - 127 [۲۳]
- S. Bonyadi-ram, R. Moini, and S.H.H. Sadeghi, "Incorporation of distributed inductive loads in the antenna theory model of lightning return stroke channel," in Proc. Int. Conf. Lightning Protection, Avignon, France, 2004, pp. 101-105. [۲۴]
- M. Rubinstein, "An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long ranges," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 38, no. 3, pp. 531-535, 1996. [۲۵]
- V. Cooray, "Some considerations on the Cooray-Rubinstein formulation used in deriving the horizontal electric field of lightning return strokes over finitely conducting ground," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 44, no. 4, pp. 560-566, Nov. 2002. [۲۶]
- V. Cooray, and S. Lundquist "Effects of propagation on the rise times and the initial peaks of radiation fields from return strokes," Radio Sci., vol. 22, pp. 409-415, 1983. [۲۷]
- A. Shoory, R. Moini, S. H. H. Sadeghi, and V. A. Rakov, "Analysis of lightning radiated electromagnetic fields in the vicinity of lossy ground" IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, Vol. 47, No. 1, February 2005., pp. 131-145. [۲۸]

۸- زیر نویس ها

- ʰ Return stroke
- ʰ Rise time
- ʰ Lossy monopole
- ʰ Permittivity
- ʰ Element
- ʰ Phase velocity n
- ʰ Cooray
- ʰ Sommerfeld integrals
- ʰ Dispersion of the channel current
- ʰ Return Stroke Channel
- ʰ Dipoles
- ʰ Segment
- ʰ Hump