

محاسبه اضافه ولتاژ القایی بر روی خطوط انتقال قدرت با استفاده از یک مدل جدید الکترومغناطیسی برای ضربه برگشت صاعقه

سیامک بنیادی رامⁱ، روزبه معینی مازندرانⁱⁱ، سید حسین (حسام الدین) صادقیⁱⁱⁱ

چکیده

در این مقاله روش جدیدی برای مدل‌سازی کانال ضربه برگشت صاعقه و تزویج ناشی از کانال بر روی خطوط انتقال مجاور آن بر اساس نظریه پراکنندگی ارائه شده است. در این روش، کانال به صورت یک آنتن مونوپل عمودی بر روی زمین از جنس هادی کامل منظور شده و معادلات ماکسول در حوزه زمان برای کانال و ساختار فلزی توأمأ تحلیل می‌شود و سپس توزیع زمانی و مکانی جریان بر روی کانال و ساختارهای فلزی مجاور آن به دست می‌آید. ویژگی مهم مدل جدید عدم نیاز به تغییر مصنوعی گذردهی نسبی محیط اطراف کانال و نیز امکان تغییر سرعت کانال از طریق اعمال بارهای توزیعی سلفی دلخواه در طول کانال است. این ویژگی امکان اعمال سرعت‌های متفاوت به موج جریان کانال و موج الکترومغناطیسی منتشره در فضا را فراهم می‌سازد. به جهت ارزیابی مدل پیشنهادی، توزیع جریان کانال و میدانهای الکترومغناطیسی ناشی از آن محاسبه و با نتایج حاصل از مدل قبلی تئوری آنتن و نتایج اندازه‌گیری مقایسه شده‌اند. تطابق ویژگی‌های میدان‌های محاسبه شده با نتایج اندازه‌گیری و هم‌خوانی نتایج محاسبات جریان با مشاهدات نوری از کانال صاعقه نشانگر استحکام مدل پیشنهادی و مطابقت آن با واقعیات فیزیکی است. با استفاده از مدل جدید، ولتاژهای القایی بر روی خطوط انتقال مجاور کانال محاسبه و با نتایج حاصل از مدل قبلی نظریه آنتن مقایسه شده‌اند. اختلاف در پیش‌بینی قله ولتاژ القایی و شیب افت ولتاژ در انتهای خط نشان دهنده تاثیر سرعت‌های متفاوت کانال ضربه برگشت و موج الکترومغناطیسی تابشی، بر محاسبه شکل موج میدانهای القایی در خطوط انتقال و سایر ساختارهای فلزی مجاور کانال صاعقه است.

کلمات کلیدی

ضربه برگشت صاعقه، مدل‌سازی، نظریه آنتن، تزویج الکترومغناطیسی، اضافه ولتاژ

Calculation of Induced Over Voltages on the Power Transmission Lines, Using a New Electromagnetic Model of Lightning Return-Stroke Channel

S. Bonyadi-ram, R. Moini, S. H. H. Sadeghi

ABSTRACT

In this paper, a new approach is presented to model a lightning return-stroke channel and to calculate induced over-voltages on adjacent overhead power transmission lines. In this model, the lightning channel is approximated by a lossy monopole antenna above a perfectly conducting ground. A new electric field integral equation (EFIE) is presented for inductively loaded elements of the channel and its nearby power lines. Solving the new EFIE by the method of moment in time domain, the temporal-spatial current distribution along the lightning channel and coupled over voltages on the adjacent metal structures is

ⁱدانشجوی دکتری، آزمایشگاه تحقیقاتی الکترومغناطیس، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، bonyadi@cra.ir

ⁱⁱعضو هیئت علمی، استاد دانشکده برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر، moini@aut.ac.ir

ⁱⁱⁱعضو هیئت علمی، استاد دانشکده برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر، sadeghi@aut.ac.ir

obtained. An important feature of the proposed model, as opposed to the conventional models, is the fact that the relative permittivity of the surrounding medium equals to unit. In addition, the channel speed can be adjusted using the distributed inductive loads along the channel. The latter enables one to allocate a desired propagation speed to the channel current and the propagated electromagnetic waves. To demonstrate the validity of the model, the current distribution along the channel and the radiated electromagnetic field are computed and compared with the measured data and those obtained using the conventional model. For several power lines, the induced over-voltages are computed and compared with those obtained using the conventional model. It is shown that both the peak value and time duration of the over voltage pulses can remarkably vary. This is sought to be due the effect of propagation speed of the channel current, which can be readily included in the proposed model.

KEYWORDS

Lightning return stroke, modeling, antenna theory, electromagnetic coupling, over voltage.

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت فنآوری الکترونیک، تجهیزات مکانیکی و الکترومکانیکی مورد استفاده در امور اندازه‌گیری، حفاظتی، کنترلی و مخابراتی جای خود را به هم‌تاهای الکترونیکی خود داده‌اند. اما تجهیزات حساس الکترونیکی به هیچ وجه با اضافه ولتاژ سازگاری ندارند. بخش عمده‌ای از پالس‌های اضافه ولتاژ ناشی از پدیده طبیعی صاعقه هستند. از دیدگاه فیزیکی صاعقه عبارت است از یک تخلیه الکتریکی گذرا با جریان زیاد به طول چندین کیلومتر [۱]. صاعقه ممکن است بین ابرها و یا بین ابر و زمین رخ دهد. صاعقه ابر به زمین با بار منفی به جهت فراوانی بیشتر، شدت جریان زیاد، زمان تخلیه کوتاه و نزدیکی به تجهیزات مستقر در سطح زمین دارای اهمیت بالایی در مطالعات مربوط به صاعقه است. یک صاعقه کامل از قسمتهای متفاوتی تشکیل شده است که از آن میان ضربه برگشت اهمیت فراوان دارد و بیشترین اثرات و خسارات ناشی از صاعقه چه به صورت اصابت مستقیم و چه بصورت اثرات تزویج، ناشی از آن 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. اکثر محققین سه مرحله (۱) مدل‌سازی کانال ضربه برگشت، (۲) محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی تولید شده و (۳) مدل‌سازی و محاسبه تزویج امواج الکترومغناطیسی بر خطوط انتقال را برای مدل کردن اثرات القایی و محاسبه اضافه ولتاژ بر خطوط معرفی نموده و به کار می‌برند [۲].

مدار گسترده و مدل‌های الکترومغناطیسی [۲]. مدل‌های فیزیکی نوعاً با حل معادلات هیدرودینامیک سروکار دارند و بدلیل پیچیدگی معادلات حاکم، معمولاً مورد استفاده مهندسیین سازگاری الکترومغناطیس قرار نمی‌گیرند [۳]. مدل‌های مهندسی به صورت رابطه‌ای تحلیلی تعریف می‌شوند که ارتباط جریان طولی کانال، $i(z,t)$ با ارتفاع را در هر لحظه از زمان بر حسب جریان پای کانال، $i(0,t)$ بیان می‌کند [۲]. مدل‌های مهندسی تقریبی هستند و در عین سهولت استفاده، بسیاری از ویژگی‌های کانال ضربه برگشت صاعقه را توصیف نمی‌کنند [۲]، [۴]. در مدل‌های مدار گسترده، کانال صاعقه به عنوان یک خط انتقال یکنواخت عمودی در نظر گرفته می‌شود و جریان کانال بر حسب زمان و ارتفاع کانال با حل عددی معادلات تلگرافی (که تخمینی از معادلات ماکسول هستند) به دست می‌آید [۳]. در مدل‌های الکترومغناطیسی، کانال ضربه برگشت صاعقه به صورت یک آنتن سیمی نازک تلفاتی در مجاورت زمین ایده‌آل فرض می‌شود. در این مدل‌ها توزیع جریان بر روی کانال با استفاده از حل عددی معادلات ماکسول، به دست می‌آید [۲]. اغلب مدل‌های الکترومغناطیسی تحلیل را در حوزه فرکانس انجام می‌دهند و برای به دست آوردن پاسخ زمانی از عکس تبدیل فوریه استفاده می‌شود. استفاده از روشهای حوزه فرکانس برای تحلیل سیگنال‌هایی با پهنای باند وسیع بخصوص فرکانس‌های پایین (نظیر پدیده صاعقه) با دشواری‌هایی همراه است. بنابراین روش‌های حوزه زمان برای تحلیل حالت‌های گذرا مناسب‌تر هستند [۲]. معینی و کریمی برای اولین بار از تحلیل زمانی نظریه پراکندگی یا مدل تئوری آنتن^۲ (AT) با حل معادله انتگرال میدان الکتریکی^۲ (EFIE) درحوزه زمان [۵] برای مدل‌سازی کانال صاعقه استفاده کردند [۲]، [۶].

محاسبه و مقایسه میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از مدل‌های مختلف از دید مطالعات سازگاری الکترومغناطیس، بسیار مهم است چرا که اثرات الکترومغناطیسی ناشی از ضربه

در اغلب مقالات منتشر شده، مدل‌های ضربه برگشت صاعقه را به چهار دسته کلی تقسیم بندی نموده‌اند: مدل‌های دینامیک گاز یا مدل‌های فیزیکی، مدل‌های مهندسی، مدل‌های

صاعقه باعث القای اضافه ولتاژهای مضر بر روی خطوط است و جزو اصلی‌ترین علل بروز اختلال در سیستم‌ها محسوب می‌شود. اکثر مدل‌های کانال صاعقه، توزیع جریان را در طول کانال ارائه می‌کنند و بنابراین برای محاسبات تزویج باید میدان‌های ناشی از کانال صاعقه در مجاورت کانال به طور جداگانه محاسبه شوند.

تا کنون از دو روش عمده محاسبه تزویج بین میدان‌های الکترومغناطیسی و خطوط انتقال استفاده شده است، یکی نظریه خط انتقال و دیگری نظریه پراکندگی [۲]. در نظریه خط انتقال اثر میدان‌های الکترومغناطیسی بصورت منابع گسترده ولتاژ و جریان در طول خط در نظر گرفته می‌شود. نحوه انتخاب منابع منجر به روش‌های متعددی در نظریه خط انتقال شده است. در مدل‌های مختلف، عامل تحریک، مولفه افقی میدان الکتریکی [۷] و یا مولفه عمودی میدان مغناطیسی [۸] و یا هر دو [۹] در نظر گرفته می‌شود. در تمام این مدل‌ها فرض بر این است که خط یکنواخت بوده و پاسخ خط TEM است. همچنین ابعاد عرضی خط نسبت به کمترین طول موج ولتاژ تحریک بسیار کوچکتر در نظر گرفته می‌شود [۲].

در نظریه پراکندگی یک موج مسطح یکنواخت به خط تابانده شده و توزیع جریان و در نتیجه ولتاژ القایی در هر نقطه از خط با حل کامل معادله انتگرال میدان الکتریکی برای ساختار خط به دست می‌آید. استفاده از مدل تئوری آنتن (AT) این امکان را فراهم می‌کند که تحلیل جریانی کانال صاعقه و خط انتقال مجاور آن به طور هم‌زمان صورت پذیرد و بنابراین نیازی به انجام سه مرحله محاسبات تزویج ذکر شده در بالا نخواهد بود. به عبارت دیگر مدل تئوری آنتن قابلیت مدل‌سازی توأم جریان کانال صاعقه و اثر تزویج را فراهم می‌کند [۲]؛ [۴]. این خاصیت یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد مدل تئوری آنتن است و علاوه بر آن محدودیت‌های روش‌های مبتنی بر خطوط انتقال مانند یکنواخت بودن خط و محدود بودن ابعاد نسبت به طول موج در آن وجود ندارد [۲]. سرعت انتشار موج جریان در کانال صاعقه نیز یکی از پارامترهای مهم در همه مدل‌ها است که تغییر آن در اثرات القایی ناشی از صاعقه تاثیر محسوسی بر جای می‌گذارد [۲]؛ [۴]. اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات نوری نشان می‌دهند که سرعت انتشار ضربه برگشت در کانال بین یک سوم تا یک دوم سرعت نور است [۱]؛ [۴]. در مدل تئوری آنتن برای کاهش سرعت کانال به مقدار دلخواه $10^8 \times 1/3$ m/s، گذردهی نسبی محیط با توجه به رابطه $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$ برابر با $5/3$ انتخاب شده است [۲]. از دیدگاه مدل سازی، $\epsilon_r > 1$ بیانگر پدیده کورونای در طول کانال است که باعث کاهش سرعت موج در طول کانال

می‌شود [۲]. اما از جنبه الکترومغناطیسی، این توصیف فاقد تعبیر فیزیکی است و با واقعیت محیط اطراف کانال تطابق ندارد که این موضوع یکی از کاستی‌های مدل AT محسوب می‌شود. همچنین این انتخاب باعث تغییر سرعت انتشار موج الکترومغناطیسی تابشی از کانال و همچنین تغییر سرعت موج جریان در ساختار خط انتقال مجاور کانال به مقداری کمتر از سرعت نور می‌شود. اما سرعت واقعی انتشار موج در فضای اطراف کانال برابر سرعت نور است و سرعت موج در طول ساختار نیز بسته به مشخصات آن با سرعت جبهه موج در کانال تفاوت دارد. بنابراین یکی دیگر از نقایص مهم مدل AT این است که قادر به اعمال سرعت‌های متفاوت به جریان کانال صاعقه، موج الکترومغناطیسی تابشی و موج ولتاژ القایی در ساختارهای مجاور کانال نیست. کربدی و معینی در [۱۰]؛ [۱۱] اثر تزویج صاعقه بر خطوط انتقال تک فاز و سه فاز را مورد بررسی قرار داده‌اند اما در این دو مقاله سرعت انتشار موج بر روی کانال و خط و همچنین سرعت موج الکترومغناطیسی تابشی هر سه برابر با سرعت نور فرض شده است. محاسبه هم‌زمان توزیع جریان کانال و تزویج با سرعت‌های یکسان و برابر با سرعت نور، باعث پیش‌بینی ولتاژهای القایی متفاوت با مقادیر واقعی می‌شود.

در این مقاله، روش جدیدی برای مدل‌سازی توأم کانال صاعقه و تزویج کانال بر روی ساختارهای فلزی مجاور آن ارائه شده است. در مدل جدید بر خلاف مدل قبلی تئوری آنتن، احتیاجی به تغییر مصنوعی و غیر واقعی گذردهی نسبی محیط به مقداری بزرگتر از واحد نیست. این روش همچنین قادر است سرعت‌های متفاوت را به جریان کانال، ساختارهای فلزی مجاور کانال و همچنین میدان‌های الکترومغناطیسی تابشی ناشی از کانال اعمال نماید. به عبارت دیگر مدل جدید قادر است کانال صاعقه و تزویج ناشی از آنرا به صورت هم‌زمان و با دقت بیشتری شبیه‌سازی کند.

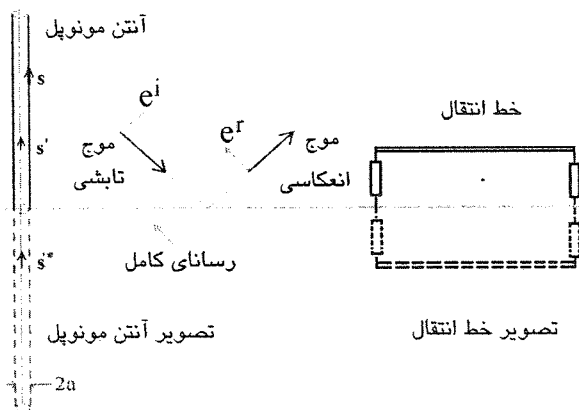
تقسیم‌بندی ارائه مطالب در این مقاله به این شرح خواهد بود. در بخش دوم این مقاله ابتدا چگونگی بدست آوردن معادله انتگرال میدان الکتریکی شرح داده شده است. در ادامه، پتانسیل الکتریکی بر روی المان‌های ساختار در حضور منبع، بارهای مقاومتی، سلفی و همچنین نحوه تنظیم سرعت کانال مورد بحث قرار گرفته است. سپس نحوه گسسته‌سازی و استخراج فرم ماتریسی معادله انتگرال با حضور بارهای راکتیو، شرح داده شده است. در ادامه صحت عملکرد مدل جدید با مقایسه نتایج عددی حاصل به صورت توزیع جریان بر روی کانال صاعقه و میدان‌های الکترومغناطیسی تشعشعی، با نتایج حاصل از

که در آن:

$$R = \sqrt{(s-s')^2 + a^2} \quad R^* = \sqrt{(s-s'')^2 + a^2}$$

$$t' = t - R/v \quad t'' = t - R^*/v$$

و شعاع سیم، s بردار یکه در محل مشاهده، s' بردار یکه در محل بار (Charge) است و داریم: $R = |\mathbf{R}| = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$. بطور کلی مختصات پریم‌دار محل و زمان منبع و مختصات بدون پریم، زمان و مکان نقطه مشاهده را نشان می‌دهد. این معادله رابطه‌ای بین میدان الکتریکی در فضا و یک توزیع جریان خطی برقرار می‌کند. C منحنی سیم هادی بوده و v نشانگر سرعت موج الکترومغناطیسی در فضا است. سه جمله آخر در (۲) ناشی از تصویر کانال به واسطه زمین رسانای کامل و پارامترهای ستاره‌دار نیز مشابه پارامترهای بدون ستاره اما مربوط به تصویر رساناها هستند.



شکل (۱): مدل کانال صاعقه بصورت مونوپل عمودی بر روی زمین هادی آرمانی در مجاورت خط انتقال

۲-۲- بیان پتانسیل رساناها در حضور بار

شرط مرزی میدان الکتریکی بر روی رسانای کامل به صورت زیر است:

$$\mathbf{s} \cdot \mathbf{e}(M, t) = 0 \quad (3)$$

که M نقطه مشاهده و \mathbf{e} بردار میدان الکتریکی است. ولتاژ تحریک به صورت یک منبع ولتاژ در پای کانال طوری قرار داده می‌شود که جریان پای کانال با مقادیر نوعی اندازه‌گیری شده مطابقت داشته باشد. شرط مرزی برای یک قطعه از سیم به طول Δ شامل منبع ولتاژ به صورت زیر است:

$$\mathbf{s} \cdot \mathbf{e}(M, t) = \mathbf{s} \cdot (-\nabla v(M, t)) = -v_g(t) / \Delta \quad (4)$$

که v_g ولتاژ منبع می‌باشد. در حالتی که ساختار از جنس هادی کامل نباشد، هدایت الکتریکی غیر کامل به صورت یک بار

مشاهدات نوری و میدان‌های اندازه‌گیری شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در انتها ترویج الکترومغناطیسی بر یک نمونه خط انتقال تک‌فاز و دو نمونه خط انتقال سه‌فاز در مجاورت کانال، با استفاده از مدل جدید محاسبه شده و با نتایج مدل قبلی تئوری آنتن مقایسه شده‌اند.

۲- مدل جدید الکترومغناطیسی کانال صاعقه

۱-۲- معادله انتگرال میدان الکتریکی

کانال صاعقه طبق شکل (۱) به صورت یک سیم نازک عمود بر سطح زمین در نظر گرفته می‌شود. در تحلیل ساختار سیمی مورد نظر، محیط انتشار خطی، همگن و همسان‌گرد و هادی‌ها، ابتدا، بصورت رسانای کامل در نظر گرفته شده‌اند. فرض می‌شود که جریان خطی $i(r, t)$ در مرکز ساختار سیمی $C(r)$ در جریان است. شرط مرزی میدان الکتریکی بر روی سطح سیم لازم می‌دارد که [۵]:

$$\mathbf{s} \cdot \mathbf{e}(r, t) = \mathbf{s} \cdot (\mathbf{e}' + \mathbf{e}^d) = \mathbf{s} \cdot \mathbf{e}' + \mathbf{s} \cdot L \{i(r, t)\} \quad (1)$$

که در آن $\mathbf{e}' = \mathbf{e}' + \mathbf{e}^d$ مجموع میدان تابشی و انعکاسی از سطح زمین در غیاب ساختار سیمی و \mathbf{e}^d میدان پراکنده شده از سیم است و L یک عملگر انتگرال-دیفرانسیلی است. حروف پر رنگ در این معادله و سایر روابط، نمایانگر بردار یا ماتریس بوده و نماد \cdot بیانگر ضرب داخلی دو بردار است. در تحلیل ضربه صاعقه و در محدوده فرکانسی که ضربه صاعقه دارای مولفه‌های قابل توجه است (از صفر تا حدود یک مگاهرتز) می‌توان زمین را رسانای کامل در نظر گرفت و بنابراین می‌توان از روش تصویر برای یافتن میدان تابشی کل استفاده کرد. در روش تصویر، زمین رسانای کامل حذف شده و در عوض رسانای دیگری که تصویر رسانای اصلی نسبت به صفحه زمین است به هندسه مسأله اضافه می‌شود.

با اعمال شرط مرزی میدان الکتریکی بر روی رسانا و اعمال تقریب سیم نازک^۱ با در نظر داشتن اثر تصویر معادله انتگرالی حاکم بر مسأله به صورت زیر بدست می‌آید [۲][۵][۶]:

$$\mathbf{s} \cdot \mathbf{e}(r, t) = \frac{-\mu_0}{4\pi \epsilon_0} \int_V \left[\frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}'}{R} \frac{\partial i(s', t')}{\partial t'} + v \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{R}}{R^2} \frac{\partial i(s', t')}{\partial s'} + v^2 \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{R}}{R^3} - \int_{-\infty}^{t'} \frac{\partial}{\partial s'} i(s', \tau) d\tau \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}''}{R^*} \frac{\partial i(s', t'')}{\partial t''} - v \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{R}^*}{R^{*2}} \frac{\partial i(s', t'')}{\partial s''} - v^2 \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{R}^*}{R^{*3}} \int_{-\infty}^{t''} \frac{\partial}{\partial s'} i(s', \tau) d\tau \right] ds' \quad (2)$$

۲-۳- گسسته سازی معادله‌ی انتگرال

برای حل عددی مسأله از گسسته سازی به روش ممان در حوزه زمان استفاده شده است. در این رابطه ساختار سیمی به N_s قطعه^۷ و بازه زمانی مورد نظر نیز به N_T قسمت تقسیم شده است. سپس یک سری توابع پایه برای بیان جریان معلوم در هر قطعه طبق رابطه زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$I(s_0, t_0) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_T} I_{ij}(s_i'', t_j'') U(s_i'') V(t_j'') \quad (10)$$

$$t_i'' = t_0 - t_i \quad s_i'' = s_0 - s_i$$

که در آن:

$$U(s_i'') = \begin{cases} 1 & |s_i''| \leq \Delta_i/2 \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (\text{الف-۱۱})$$

$$V(t_j'') = \begin{cases} 1 & |t_j''| \leq \Delta_i/2 \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (\text{ب-۱۱})$$

با استفاده از چند جمله‌ای درجه دوم درونیابی لاگرانژ مقدار $I_{ij}(s_i'', t_j'')$ به صورت زیر تخمین زده می‌شود [۶]:

$$I_{ij}(s_i'', t_j'') = \sum_{l=-1}^{+1} \sum_{m=v}^{v+2} B_{ij}^{(l,m)} I_{i+1, j+m} \quad (12)$$

$$B_{ij}^{(l,m)} = \prod_{p=-1}^{+1} \prod_{q=v}^{v+2} \frac{(s_0 - s_{i+p})(t_0 - t_{j+q})}{(s_{i+1} - s_{i+p})(t_{j+m} - t_{j+q})} \quad (13)$$

و

$$\begin{cases} v = -1; & \frac{R}{c(t_j - t_{j-1})} > 0.5 \\ v = -2; & \Delta R < 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

جریان در مرکز قطعه $i+1$ و بازه زمانی $j+1$ است. آخرین مرحله در روش ممان، انتخاب تابع آزمون منظور به دست آوردن یک دستگاه معادلات خطی است. با استفاده از روش تطبیق نقطه‌ای بر اساس تابع دلتای دیراک دستگاه معادلات ماتریسی به فرم زیر حاصل می‌شود:

$$\mathbf{E}_j^{total} = \mathbf{E}_j^{inc} + \mathbf{E}_j^{sca} = \mathbf{Z} \mathbf{I}_j \quad j=1, \dots, N_i \quad (15)$$

که j اندیس برای نمایش قطعه‌ها، \mathbf{E}_j^{sca} نشانگر مولفه مماسی میدان پراکنده شده ناشی از جریان در بازه‌های زمانی قبلی و \mathbf{E}_j^{inc} مولفه مماسی میدان تابشی (یا میدانهای اعمالی خارجی) است. ماتریس \mathbf{Z} که اصطلاحاً ماتریس امیدانس ساختار نامیده می‌شود، ماتریس بر هم کنش قطعه‌ها و مستقل از زمان است. این ماتریس رابطه جریان و مجموع میدانهای تابشی و پراکنده شده از سایر قسمت‌های ساختار را در بازه

توزیعی Ω در طول ساختار در نظر گرفته می‌شود. به واسطه جریان موجود در ساختار فلزی، بر روی این بار موضعی ولتاژ v_L القاء می‌شود. میدان الکتریکی اضافی بر روی قطعه ناشی از بار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$s \cdot \mathbf{e}(M, t) = e^L(M, t) = -v^L(t) / \Delta = -\Omega(M) i(M, t) \quad (5)$$

ولتاژ دو سر بار تابعی از جریان القا شده روی قطعه دارای بار بوده و مقدار آن به نوع بار بستگی خواهد داشت. در حالتی که قطعه دارای بار شامل مقاومت باشد، ولتاژ را می‌توان بطور مستقیم از روابط زیر حساب کرد.

$$v^R(t) = Ri(s_L, t) \quad (6)$$

در صورتی که قطعه توسط عنصر سلفی بار گذاری شود ولتاژ قطعه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$v^L(t) = L \frac{\partial i(s_L, t)}{\partial t} \quad (7)$$

و

نحوه‌ی انتشار موج بر روی مونوپل عمودی بر روی زمین هادی کامل، مشابه انتشار موج بر روی یک خط انتقال است. این ساختار اساساً یک خط انتقال غیر یکنواخت است که مشخصه‌های آن با ارتفاع تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان سرعت انتشار موج بر روی ساختار مونوپل عمودی بر روی زمین هادی آرمانی را از رابطه معروف خط انتقال $(v = 1/\sqrt{L_0 C_0})$ محاسبه کرد. به کمک این رابطه امکان کنترل سرعت کانال با تغییر مشخصات خط وجود دارد. برای کاهش سرعت انتشار موج جریان کانال، با توجه به رابطه زیر می‌توان سلف توزیعی بر روی ساختار فلزی طوری قرار داد که سرعت انتشار موج در طول کانال به مقدار دلخواه تنظیم شود.

$$v' = \frac{1}{\sqrt{L' C_0}} = \frac{1}{\sqrt{(L_0 + L^{add}) C_0}} \quad (8)$$

در این رابطه L_0 و C_0 مقادیر سلف و خازن ذاتی خط در واحد طول بوده و برای یک دیپل از روابط زیر حساب می‌شوند [۱۲]:

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2z}{a}\right) \quad (\text{الف-۹})$$

$$C_0 = 2\pi\epsilon_0 / \ln\left(\frac{2z}{a}\right) \quad (\text{ب-۹})$$

که z فاصله از مرکز دیپل و a شعاع مونوپل است. باید توجه داشت که فرض مقدار ثابت L به خاطر متغیر بودن مشخصات کانال با ارتفاع فرض چندان صحیحی به نظر نمی‌رسد اما در اینجا به خاطر اهمیت موضوع تزویج و به جهت سادگی تحلیل از اعمال تغییرات مشخصات کانال با ارتفاع صرف نظر شده است و در مقالات دیگری مورد بحث قرار گرفته است.

$$E_{i,j}^{L_1} = -\frac{V_{i,j}^{L_1}}{\Delta i} = -\frac{L_i}{\Delta i} \frac{3}{2\Delta t} I_{i,j} = Z_{ii}^{L_1} I_{i,j} \quad (19-ب)$$

$$E_{i,j}^{L_2} = -\frac{V_{i,j}^{L_2}}{\Delta i} = -\frac{L_i}{\Delta i} \left\{ \frac{1}{2\Delta t} I_{i,j-2} - \frac{2}{\Delta t} I_{i,j-1} \right\} = E_{i,j}^{add} \quad (19-ج)$$

باید توجه داشت که ماتریس امپدانس به دست آمده از (19-ب) قطری است و با ماتریس امپدانس Z که تابع هندسه ساختار است جمع می‌شود. قسمت دوم میدان ناشی از سلف، (19-ج)، در هر پله زمانی معلوم است و از پله‌های زمانی قبلی بدست می‌آید. این میدان به صورت یک منبع اضافی میدان الکتریکی با طرف معلوم معادله یعنی مجموع میدانهای تابشی و انعکاسی جمع می‌شود. بنابراین این معادله ماتریسی نهایی به صورت زیر در خواهد آمد:

$$E_j^{sca} + E_j^{inc} + E_j^{add} = [Z + Z_j^{L_1}] I_j \quad (20)$$

جواب معادله انتگرال گسسته‌سازی شده جدید، توسط روش عددی ممان در حوزه زمان به دست می‌آید [6]. در این روش، تقسیم بندی در چهار بعد زمان و مکان انجام می‌شود و جریان برای هر قطعه از سیم برای پله‌های زمانی به دست می‌آید. جریان هر قطعه زمانی تابعی از جریان و بار سایر قطعه‌ها در بازه‌های زمانی قبلی است. در صورتی که محاسبه‌ی اضافه ولتاژ القایی بر روی ساختارهای مجاور کانال (مانند خط انتقال قدرت) مد نظر باشد، سایر پراکنده‌گرهای موجود در اطراف کانال نیز به همراه کانال صاعقه بصورت مجموعه‌ای از ساختارهای سیمی نازک در نظر گرفته می‌شوند. در نتیجه توزیع جریان در طول کانال و همچنین بر روی ساختارهای فلزی مجاور آن از قبیل خطوط انتقال توأم و بدون نیاز به محاسبات اضافی میدانهای الکترومغناطیسی و استفاده از مدل تزویج بدست می‌آیند [5]، [6].

در مدل جدید، کانال صاعقه توسط یک منبع ولتاژ در پای کانال تغذیه می‌شود. شکل موج این منبع ولتاژ طوری انتخاب می‌شود که جریان پای کانال با نمونه‌های اندازه‌گیری شده توافق داشته باشد. مقاومت توزیعی برابر 0.4 اهم بر متر در طول کانال قرار داده می‌شود که برای مدل نمودن تضعیف یا کاهش دامنه جریان و در نتیجه تطابق بهتر میدانهای الکترومغناطیسی با نتایج اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است.

۳- ارزیابی مدل

در این بخش به منظور ارزیابی صحت مدل، نتایج عددی

زمانی حاضر بیان می‌کند. به دلیل اثرات متقابل قطعه‌ها بر هم ماتریس Z قطری نخواهد بود اما در حالت کلی Z تنگ بوده و مسلط قطری^۱ است. معادله (5) برای ساختارهای سیمی از جنس رسانای کامل کاربرد دارد [5]. باید توجه داشت که عناصر ماتریس امپدانس تابع ساختار هندسی مسأله هستند و تابعیت زمانی ندارند. به عبارت دیگر در فرایند محاسبات در طول زمان، عمل معکوس سازی فقط یکبار لازم است در حالت‌هایی که آنتن بار^۱ شده و یا ساختار سیمی از هادی غیر آرمانی تشکیل شده باشد، باید تغییراتی در معادلات انتگرال صورت گیرد. این تغییرات به صورت اضافه کردن بار در مدل کانال انجام می‌شود. اثر بارهای توزیعی اضافی بر روی هر قطعه به صورت یک افت ولتاژ اضافی، طبق (5)، بر روی قطعه نمایان خواهد شد. با اعمال بار توزیعی به ساختار، (5) بدین صورت تصحیح می‌شود:

$$E_j^{sca} + E_j^{inc} = [Z + Z_j^L] I_j \quad (16)$$

که Z_j^L نشانگر بار اعمالی به قطعه‌ها در لحظه j است. اگر بار بصورت مقاومتی باشد (6) را ببینید)، ماتریس امپدانس بدین صورت اصلاح می‌شود که با صرف نظر از امپدانس متقابل بین قطعه‌ها، مقادیر مقاومت‌های توزیعی به عناصر قطری ماتریس Z اضافه می‌شوند. اعمال مقاومت توزیعی به معادله ماتریسی مستقل از زمان بر طبق رابطه زیر به راحتی انجام پذیر است.

$$E_{i,j}^R = -\frac{V_{i,j}^R}{\Delta i} = -\frac{1}{\Delta i} R_i I_{i,j} \quad (17)$$

با توجه به رابطه ولتاژ و جریان برای اندوکتانس، گسسته‌سازی (8) برای محاسبه میدان الکتریکی اضافی ناشی از بار قطعه i ام در لحظه j ام، با استفاده از بسط درجه دو درون‌یابی نیوتن [15] به صورت زیر محقق می‌شود:

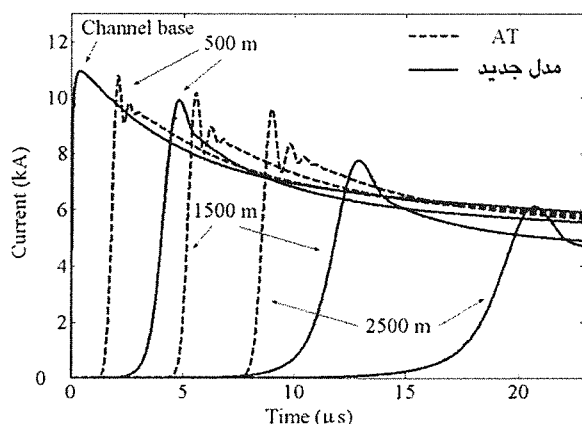
$$E_{i,j}^L = -\frac{V_{i,j}^L}{\Delta i} = -\frac{1}{\Delta i} L_i \frac{dI_{i,j}}{dt} = -\left(\frac{L_i}{\Delta i} \frac{3}{2\Delta t} I_{i,j} + \frac{L_i}{\Delta i} \left\{ \frac{1}{2\Delta t} I_{i,j-2} - \frac{2}{\Delta t} I_{i,j-1} \right\} \right) \quad (18)$$

در این روابط، R_i و L_i به ترتیب مقاومت و سلف بر روی قطعه i ، Δt طول بازه زمانی و Δi طول قطعه i بوده $I_{i,j}$ جریان قطعه i در بازه زمانی j بوده که هنوز محاسبه نشده است. $I_{i,j-1}$ و $I_{i,j-2}$ به ترتیب جریان قطعه i در بازه‌های زمانی $j-1$ و $j-2$ بوده که قبلاً محاسبه شده و معلوم هستند. بنابراین طبق روابط زیر میدان الکتریکی روی هر قطعه را می‌توان به دو بخش معلوم و مجهول تقسیم کرد.

$$E_{i,j}^L = E_{i,j}^{L_1} + E_{i,j}^{L_2} \quad (19-الف)$$

که

حاصل از مدل جدید به صورت توزیع جریان کانال و میدانهای الکترومغناطیسی تابشی از کانال ارائه شده است. صحت 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 قبلاً صحت آنها مورد تایید قرار گرفته است. گرچه به دلیل ماهیت تصادفی پدیده صاعقه هیچ یک از مدل‌هایی که تا کنون ارائه شده‌اند با شرایط واقعی به طور کامل تطابق ندارند، اما مدلی مورد تایید است که مشخصه‌های آن با پدیده‌های فیزیکی قابل اندازه‌گیری ناشی از صاعقه توافق بیشتری نشان دهد [۲]. مقایسه توزیع جریان کانال صاعقه با نتایج حاصل از مشاهدات نوری یکی از ابزارهای تعیین صحت مدل‌هاست [۲]. واضح است که بجز در پای کانال و روی 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 مستقیماً با جریان گذرنده از آن قسمت کانال متناسب است [۱]، [۲]. در بخش [۳-۱-۳] توزیع جریان کانال که به کمک مدل جدید بدست آمده با نتایج حاصل از مشاهدات نوری مقایسه شده است. روش دیگر ارزیابی مدل‌ها، مقایسه میدان‌های الکترومغناطیسی تابشی از کانال از دیدگاه مشخصه‌های مهم میدان (نظیر 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) با نتایج نوعی اندازه‌گیری میدان و یا مقایسه با نتایج مدل‌های معتبر است. مقایسه میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از مدل جدید با نتایج مدل قبلی تئوری آنتن و اندازه‌گیری‌های میدان در بخش [۳-۲-۳] آمده است.



شکل (۲): توزیع جریان روی کانال صاعقه در ارتفاع‌های متفاوت که با استفاده از مدل AT [۲]، [۵] با سرعت کانال برابر با سرعت نور و مدل جدید با سرعت کانال برابر با 1.3×10^8 m/s محاسبه شده است.

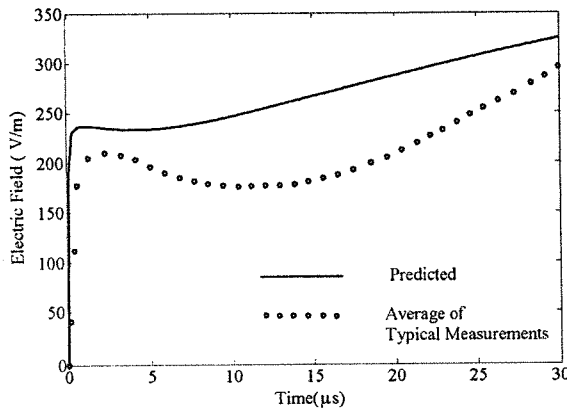
برای مقایسه جریان کانال با مقادیر واقعی، یک نمونه پروفیل شدت نور کانال که توسط وانگ و همکارانش با استفاده از اندازه‌گیری‌های نوری در سال ۱۹۹۹ ثبت شده در شکل (۳) نشان داده شده است [۱۷]. همان‌طور که پیشتر گفته شد به دلیل وابستگی مستقیم شدت نور کانال به جریان، پروفیل شدت نور کانال به عنوان مرجعی برای ارزیابی صحت مدل‌های ضربه برگشت صاعقه مورد توجه محققین قرار دارد. مقایسه جریان‌های شبیه‌سازی شده با نتایج اندازه‌گیری‌های نوری مبین آن است که شکل موج پیش‌بینی شده توسط مدل جدید تطابق بیشتری با نتایج اندازه‌گیری‌های نوری نشان می‌دهد. این تطابق

حاصل از مدل جدید به صورت توزیع جریان کانال و میدانهای الکترومغناطیسی تابشی از کانال ارائه شده است. صحت 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 قبلاً صحت آنها مورد تایید قرار گرفته است. گرچه به دلیل ماهیت تصادفی پدیده صاعقه هیچ یک از مدل‌هایی که تا کنون ارائه شده‌اند با شرایط واقعی به طور کامل تطابق ندارند، اما مدلی مورد تایید است که مشخصه‌های آن با پدیده‌های فیزیکی قابل اندازه‌گیری ناشی از صاعقه توافق بیشتری نشان دهد [۲]. مقایسه توزیع جریان کانال صاعقه با نتایج حاصل از مشاهدات نوری یکی از ابزارهای تعیین صحت مدل‌هاست [۲]. واضح است که بجز در پای کانال و روی 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 مستقیماً با جریان گذرنده از آن قسمت کانال متناسب است [۱]، [۲]. در بخش [۳-۱-۳] توزیع جریان کانال که به کمک مدل جدید بدست آمده با نتایج حاصل از مشاهدات نوری مقایسه شده است. روش دیگر ارزیابی مدل‌ها، مقایسه میدان‌های الکترومغناطیسی تابشی از کانال از دیدگاه مشخصه‌های مهم میدان (نظیر 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) با نتایج نوعی اندازه‌گیری میدان و یا مقایسه با نتایج مدل‌های معتبر است. مقایسه میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از مدل جدید با نتایج مدل قبلی تئوری آنتن و اندازه‌گیری‌های میدان در بخش [۳-۲-۳] آمده است.

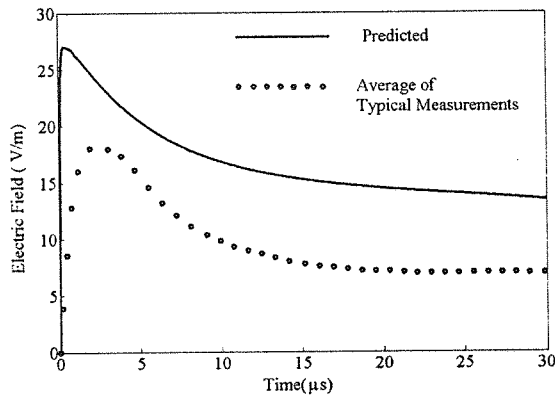
۳-۱-۳- توزیع جریان کانال

در این بخش یک کانال صاعقه عمودی به طول سه کیلومتر و ضخامت یک سانتی‌متر بر روی زمین از جنس رسانای کامل تحلیل شده است. تعداد قطعه‌ها طوری انتخاب شده‌اند که شرط سیم نازک رعایت شود. ولتاژ تحریک همان است که در [۲]، [۴] و [۶] استفاده شده است. این ولتاژ، جریان نوعی پای کانال را تولید می‌کند که در اکثر مدل‌ها به کار می‌رود. توزیع جریان روی کانال صاعقه توسط دو مدل AT و مدل جدید محاسبه و در شکل (۲) برای ارتفاع‌های صفر، ۵۰۰ m، ۱۵۰۰ m و ۲۵۰۰ m نشان داده شده‌اند. در هر دو مدل (به منظور تنظیم سرعت امواج الکترومغناطیس برابر با سرعت نور در انجام محاسبات توزیع) $\epsilon_r = 1$ بوده و بنابراین سرعت انتشار موج در کانال برای مدل AT برابر سرعت نور است. در مدل جدید،

به قدری شناخته شده و معروف هستند که معمولاً در تحقیقات صاعقه به عنوان مرجعی برای ارزیابی مدل‌ها به کار می‌روند. توافق مشخصه‌های اصلی میدان الکتریکی محاسبه شده در فاصله ۲ کیلومتری نظیر شیب تند اولیه، قله اولیه، مینیمم بعد از قله اولیه و شیب افزایشی میدان در زمان‌های بزرگ‌تر و همچنین در فاصله ۱۵ کیلومتری از کانال نظیر شیب صعودی اولیه، قله و کاهش میدان بعد از شیب اولیه با مشخصه‌های میدان‌های اندازه‌گیری شده بر استحکام و اعتبار مدل پیشنهادی تاکید می‌کند.



(الف)



(ب)

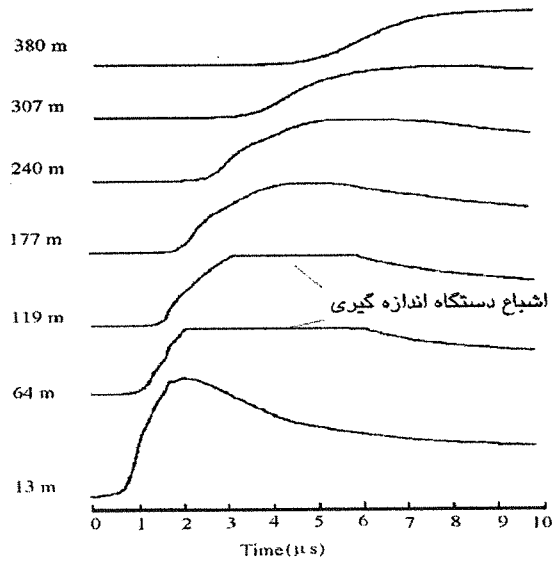
شکل (۴): میدان‌های الکتریکی محاسبه شده ناشی از کانال در فاصله (الف): ۲ km و (ب): ۱۵ km در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری‌های نوعی که توسط لین [۱۸] انجام شده است.

۴- محاسبات اضافه ولتاژ بر روی خطوط انتقال

۴-۱- خط انتقال تک فاز

در این بخش برای تحلیل تزویج موج الکترومغناطیسی تابشی از یک کانال صاعقه، یک خط انتقال تک فاز به طول ۰.۰۰

در سرعت انتشار موج و همچنین پاشیدگی مشاهده شده در پیشانی موج جریان به خوبی قابل مشاهده است. این مقایسه صحت اعتبار مدل جدید را تایید می‌کند.



شکل (۳): پروفیل شدت نور ناشی از کانال صاعقه که توسط وانگ و همکارانش بدست آمده است [۱۷].

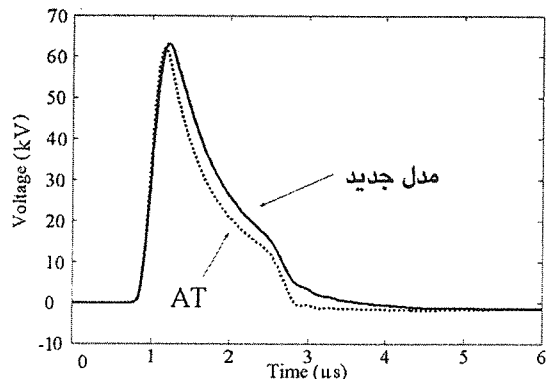
۳-۲- میدان‌های الکترومغناطیسی

میدان‌های الکتریکی تابشی از کانال مونوپل عمودی در مجاورت زمین رسانای کامل از رابطه زیر به دست می‌آید [۲]، [۶]:

$$e_z(r, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\int_0^h \frac{2z'^2 - r^2}{R^5} i(z', \tau - R/c) d\tau dz' + \int_0^h \frac{2z'^2 - r^2}{cR^4} i(z', t - R/c) dz' - \int_0^h \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz' \right] \quad (21)$$

مؤلفه اول در (۲۰) ناشی از میدان‌های الکتروستاتیک، مؤلفه دوم ناشی از میدان‌های القایی، و عبارت آخر ناشی از مولفه‌های تشعشعی است. h بیانگر طول کانال صاعقه و c سرعت نور است. شکل‌های (الف-۴) و (ب-۴) میدان‌های الکترومغناطیسی محاسبه شده توسط رابطه (۲۱) را در فاصله ۲ و ۱۵ کیلومتری از پای کانال نشان می‌دهد. به منظور مقایسه، دو نمونه از میدان‌های الکتریکی اندازه‌گیری نوعی که توسط لین و همکارانش [۱۸] تهیه شده در همان فواصل با نمودار نقطه چین در شکل‌ها نشان داده شده است. این میدان‌ها برآیند تعداد اندازه‌گیری‌های فراوان میدان الکتریکی است که به صورت نتایج نوعی میدان در فواصل متفاوت عرضه شده‌اند. این نتایج

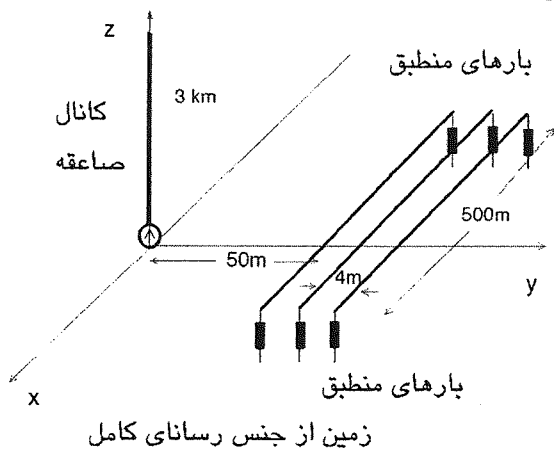
عبارت دیگر یک تجهیز در انتهای خط باید مدت زمان بیشتری اضافه ولتاژ را تحمل کند. طولانی شدن مدت زمان اضافه ولتاژ مسأله‌ای است که باید در طراحی و انتخاب عایق‌ها و حفاظت-کننده‌های انتهای خط مد نظر قرار گیرد.



شکل (۶) ولتاژ القایی در انتهای خط تک‌فاز پیش بینی شده توسط مدل جدید در مقایسه با نتیجه حاصل از مدل AT.

۴-۲- خط انتقال سه فاز افقی

در این بخش ساختاری مشابه هندسه بخش قبل به کار رفته است منتهی بجای خط انتقال تک فاز از یک خط انتقال سه فاز افقی طبق شکل (۷) استفاده می‌شود.



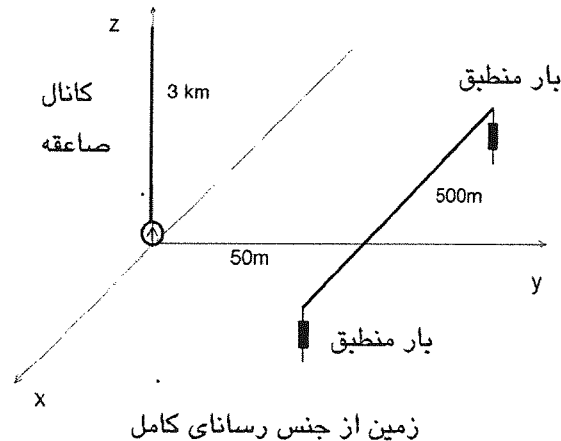
زمین از جنس رسانای کامل

شکل (۷): خط انتقال سه فاز افقی در مجاورت کانال صاعقه [۱۱].

فاصله فاز نزدیک به محل برخورد صاعقه برابر ۵۰ m و فاصله فازها از هم ۴ m فرض می‌شود. این ساختار در [۱۱] با استفاده از مدل قبلی AT تحلیل شده است. در مقاله حاضر به منظور مقایسه‌ی نتایج، از همان ساختار استفاده شده است. اضافه جریان‌های القایی در طول خط سه فاز با استفاده از دو مدل AT و مدل جدید با پارامترهای کانال ذکر شده در بخش [۴-۱] محاسبه و اضافه ولتاژهای ناشی از آن در شکل (۸-الف) تا (۸-پ) برای فازهای مختلف رسم شده‌اند.

هر فاز خط انتقال توسط یک بار طوری ختم می‌شود که

متر و به ارتفاع ۱۰ متر از سطح زمین طبق شکل (۵) در نظر گرفته شده است. در دو انتهای خط بارهای منطبق قرار داده شده است. جنس سیم از هادی کامل و شعاع آن ۱۰ میلی‌متر فرض شده است. همچنین فرض می‌شود که ضربه‌ی صاعقه به فاصله ۵۰ متری از وسط خط (روی عمود منصف خط) اصابت کرده است. این همان هندسه‌ای است که معینی در [۱۱] برای تحلیل تزویج با مدل AT با صرف نظر از تلفات خط بکار برده است. گرچه مدل جدید قادر به اعمال تلفات متفاوت به کانال و خط است اما در اینجا نیز برای مقایسه بهتر نتایج حاصل از دو مدل، از تلفات خط صرف نظر می‌شود.



زمین از جنس رسانای کامل

شکل (۵): خط انتقال تک‌فاز در مجاورت کانال صاعقه [۱۱].

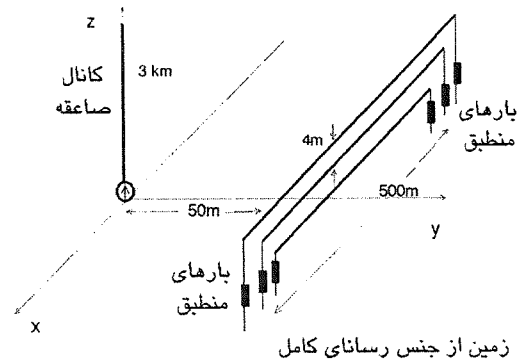
جریان پای کانال بصورت یک شکل موج گذرا با زمان صعود در حدود میکروثانیه فرض می‌شود که در بخش [۲-۱-۳] برای به دست آوردن توزیع جریان استفاده شد. جریان القایی در طول خط با استفاده از دو مدل AT و مدل جدید با مشخصات کانال ذکر شده در بخش [۳-۱-۳] محاسبه و اضافه ولتاژ ناشی از آن برای انتهای خط در شکل (۶) نمایش داده شده است. تاخیر شروع پالس ولتاژ در انتهای خط به دلیل بعد مکانی انتهای خط تا پای کانال می‌باشد.

در مدل AT سرعت انتشار موج بر روی خط انتقال و کانال و همچنین سرعت امواج الکترومغناطیسی هر سه برابر سرعت نور است. اما در مدل جدید سرعت انتشار موج جریان بر روی کانال صاعقه برابر $1/3 \times 10^8$ m/s است و سرعت امواج الکترومغناطیسی در مجاورت کانال و همچنین سرعت موج القایی بر روی خط انتقال برابر با سرعت نور می‌باشد که با واقعیت منطبق است. با توجه به نتایج به دست آمده دیده می‌شود که مدل جدید قله ولتاژ بیشتری را در انتهای خط انتقال پیش‌بینی می‌کند. همچنین زمان نزول پالس ولتاژ القایی در انتهای خط برای مدل AT کمتر از مدل جدید است. این بدان معنی است که مدل جدید پالس پهن‌تری را پیش‌بینی می‌کند، به

۴-۳- خط انتقال سه فاز عمودی

ساختار کلی خط انتقال سه فاز عمودی مورد استفاده، مشابه هندسه خط انتقال سه فاز افقی بخش قبل است، منتهی فازها طبق شکل (۹) با فاصله افقی برابر از پای کانال قرار دارند. ارتفاع فاز پایین ۷ m از سطح زمین و فاصله افقی فازها از پای کانال برابر ۵۰ m و فاصله عمودی آنها از هم ۴ m فرض شده است. فاصله افقی بین شاخه‌های عمودی انتهای خطوط که بار بر روی آنها قرار دارد ناچیز فرض می‌شود.

اضافه جریان القایی در طول خط سه فاز عمودی از دو مدل AT و مدل جدید با پارامترهای کانال مشابه بند قبلی محاسبه و اضافه ولتاژ ناشی از آن در شکل‌های (۱۰-الف) تا (۱۰-پ) برای فازهای مختلف در انتهای خط نشان داده شده‌اند. مقایسه ولتاژهای القایی در انتهای خط برای خطوط سه فاز افقی و عمودی نشان می‌دهد که انعکاس در اثر عدم تطبیق در خط سه فاز عمودی به مراتب



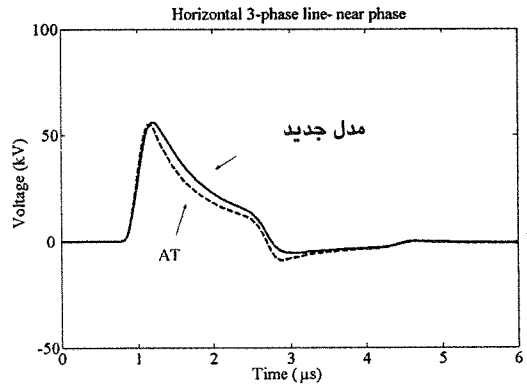
شکل (۹): خط سه فاز عمودی در مجاورت کانال صاعقه [۱۱].

از خط سه فاز افقی بیشتر است. در اینجا نیز اثر حفاظتی فاز بالایی برای سایر فازها مشاهده می‌شود که بدلیل مرتفع بودن کانال صاعقه، اثر حفاظتی فاز بالا در خط سه فاز عمودی بیشتر از مورد مشابه برای فاز نزدیکتر به کانال در خط سه فاز افقی است. نکته قابل توجه دیگر آن است که اختلاف ولتاژهای القایی برای خط سه فاز افقی کمتر از خط سه فاز عمودی است که باز هم به خاطر اثر حفاظتی متفاوت فازها بر روی هم در دو نوع خط انتقال مورد بررسی است.

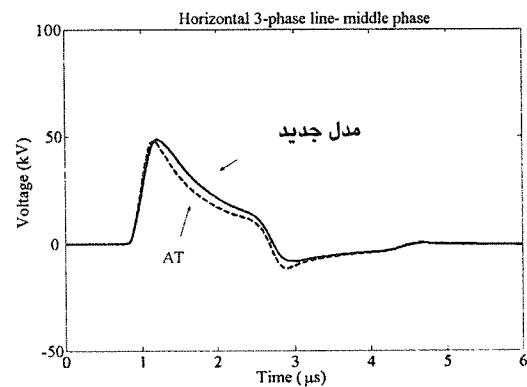
۴-۴- تأثیر فاصله‌ی محل برخورد صاعقه بر اضافه ولتاژ القایی

به منظور بررسی تأثیر فاصله‌ی محل برخورد صاعقه با خط انتقال ولتاژهای القایی در انتهای یک خط تک فاز در فواصل ۱۰ m، ۲۰ m و ۵۰ m از پای کانال محاسبه و در شکل

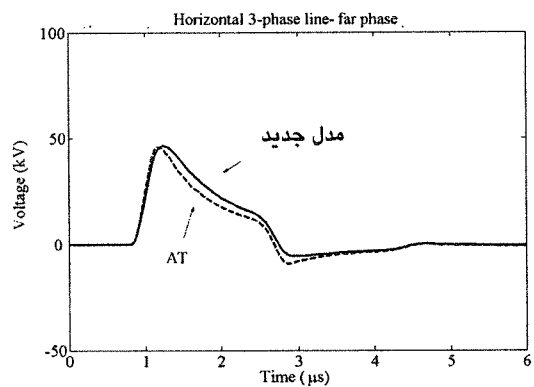
خط به صورت تک فاز منطبق باشد [۱۱]. به هر حال به علت توزیع متقابل بین خطوط در حالت خط سه فاز بارها با خط کاملاً منطبق نخواهند بود. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که ولتاژ القایی در فاز نزدیکتر به خط انتقال بیشتر از فازهای دیگر است که به دلیل اثر حفاظتی فاز نزدیکتر برای سایر فازها حاصل شده است.



(الف)

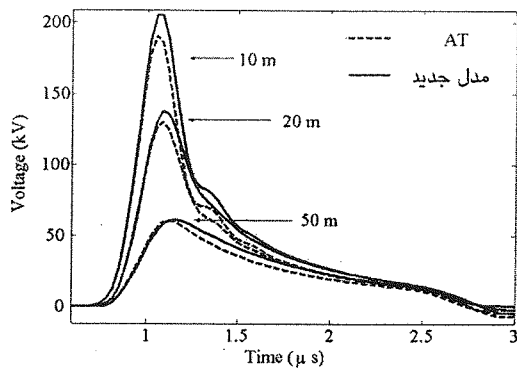


(ب)



(پ)

شکل (۸): ولتاژ القایی در انتهای خط سه فاز افقی برای فازهای (الف): نزدیک (ب): میانی (پ): دور نسبت به پای کانال



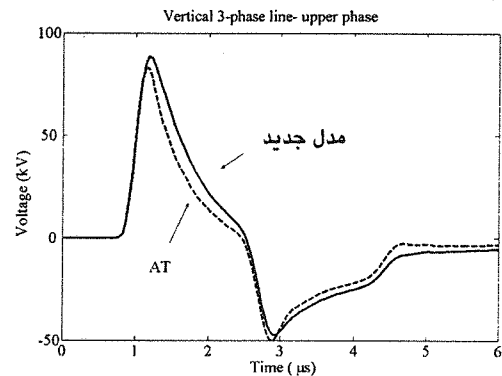
شکل (۱۱): اضافه ولتاژ القایی در انتهای خط تک فاز با فواصل مختلف از پای کانال.

۵- نتیجه گیری

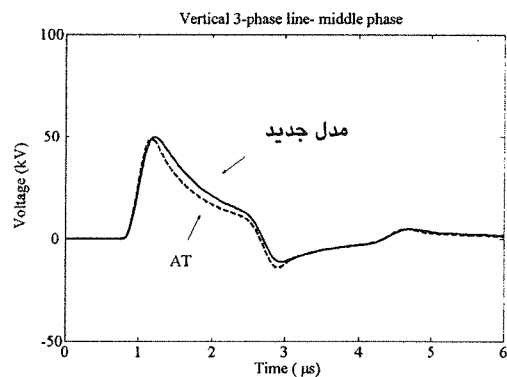
در این مقاله روشی جدید بر اساس نظریه‌ی پراکندگی برای محاسبه‌ی اضافه ولتاژ القایی ناشی از ضربه برگشت صاعقه بر روی خطوط انتقال قدرت ارائه شده است. در مدل جدید برای تنظیم سرعت انتشار جبهه موج جریان بر روی کانال صاعقه به جای تغییر مصنوعی و غیر واقعی گذردهی نسبی محیط، از اندوکتانس توزیعی بر روی کانال استفاده شده است. در این حالت اثر پدیده کورونا با اعمال بارهای راکتیو به نحو مطلوب و با توجه فیزیکی مناسبی مدل می‌شود.

نوسانات دیده شده در پیک جریان در مدل AT، در نتایج مدل جدید حذف شده‌اند و همچنین پاشیدگی جریان کانال در مدل جدید تطابق بیشتری با نتایج اندازه‌گیری‌های نوری دارد. مدل جدید مشخصه‌های میدان‌های الکترومغناطیسی را به خوبی مدل می‌کند. مقایسه توزیع جریان کانال ناشی از مدل جدید با نتایج حاصل از مشاهدات نوری و همچنین مقایسه میدان‌های محاسبه با نتایج اندازه‌گیری بیانگر صحت مدل ارائه شده است. مدل جدید بر خلاف مدل AT، قادر به اعمال سرعت‌های متفاوت به جریان کانال، موج الکترومغناطیسی تابشی و ولتاژهای القایی بر ساختارهای فلزی مجاور کانال صاعقه است. این توانایی باعث شده است که مدل نمودن کانال و توزیع الکترومغناطیسی ناشی از آن به طور همزمان و با دقت بیشتری نسبت به مدل AT انجام پذیرد. مقایسه ولتاژهای القایی کانال صاعقه بر روی خطوط انتقال تک فاز و سه فاز نشان می‌دهد که مدل جدید نسبت به مدل AT قله ولتاژ بیشتری را در انتهای خط پیش‌بینی می‌کند. همچنین شیب کاهش ولتاژ القایی برای مدل جدید کمتر از مدل AT است که به معنای پهن‌تر شدن پالس ولتاژ القایی است. با کم شدن فاصله محل برخورد صاعقه با خط تاثیر سرعت بر نتایج ولتاژهای القایی و

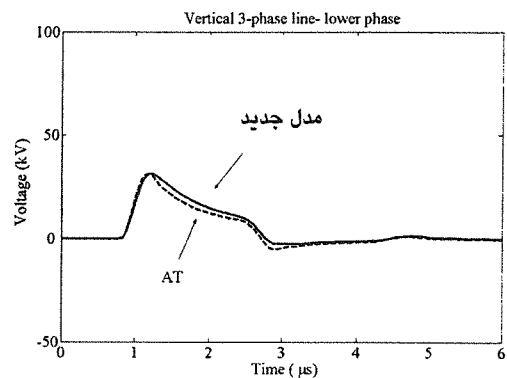
(۱۱) رسم شده است. واضح است که با افزایش فاصله علاوه بر کاهش دامنه، پالس اضافه ولتاژ القایی پهن‌تر شده است. نکته قابل توجه آن است که با کاهش فاصله اختلاف مشاهده شده بین نتایج مدل AT و مدل جدید بیشتر می‌شود. این بدان معنی است که مسأله‌ی سرعت کانال در برخوردهای نزدیک صاعقه در مجاورت خط از حساسیت و اهمیت بیشتری برخوردار است. بدلیل مشابهت نتایج برای خط انتقال سه فاز از محاسبه و رسم نتایج برای این خط انتقال خودداری شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل (۱۰): ولتاژ القایی در انتهای خط سه فاز عمودی فازهای (الف): انتهای فاز میانی و (ب): وسط (پ): انتهای فاز پایین.

Rachidi, F.; "Formulation of the field-to-transmission line coupling equation in terms of magnetic excitation field", IEEE Trans. on EMC, Vol. 25, No. 3, Aug. 1993.

Agraval, A. K.; Price, H. J.; Gourbaxani, S., "Transient response of a multi conductor transmission line excited by a non uniform electromagnetic field", IEEE Trans. on EMC, Vol. EMC-22, No. 2, pp. 119-129, May 1980.

Kordi, B.; Moini, R.; Alaghemand, H.; "Evaluation of the lightning induced over-voltages in sagged transmission lines using electric field integral equation in time domain", Proc. ICLP, 1998.

Moini, R.; Kordi, B.; Abedi, M.; "Evaluation of LEMP effect on complex wire structure located above a perfectly conducting ground using electric field integral equation in time domain", IEEE Trans. on EMC, Vol. 40, No. 2, May 1998.

Tesche, F. M.; Ianoz, M. V.; Karlsson, T.; "EMC Analysis methods and computational models", John Wiley & sons, inc., 1997.

Baba, Y.; Ishii, M.; "Characteristic of electromagnetic return-stroke models", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, No. 1, pp. 129-135, Feb. 2003.

Nucci, C. A.; Guerrieri, S.; Teresa Correia de Barros, M.; Rachidi, F.; "Influence of Corona on the Voltages Induced by Nearby Lightning on Overhead Distribution Lines", IEEE Trans. on Power delivery, VOL. 15, NO. 4, October 2000.

Guedira, M. R.; "Etude en regime transiroire du comportement de structures filaires presenant de charges lineaires ou non lineaires", These pour l'obtention du doctorat, Univercite de Limoges, 1983 (French).

Bonyadi-ram, S.; Moini, R.; Sadeghi, S. H. H.; "Incorporation of distributed inductive loads in the antenna theory model of lightning return stroke channel", Proc. ICLP-2004, Avignon, France.

Wang, D.; Takagi, N.; Watanabe, T.; Rakov, V.A.; Uman, M.A.; "Observed leader and return-stroke propagation characteristics in the buton 400 m of a rocket triggered lightning channel", Journal of Geophysical Research, Vol. 104, No. D12, Pages 14369-14376, June 27, 1999.

Lin, Y.T.; Uman, M.A.; Tiller, J.A.; Brantley, R.D.; Beasley, W.H.; Krider, E.P.; Weidman, C.D.; "Characterization of lightning return stroke electric and magnetic field from simultaneous two-station measurements", Journal of Geophysical Research, 846307-6314, 1979.

[۸] به عبارتی اختلاف نتایج دو مدل مشهودتر است. در مدل ارائه شده در این مقاله امکان اعمال انواع بارهای توزیعی راکتیو به کانال صاعقه و خط انتقال مجاور آن وجود دارد که مدل AT و سایر مدل‌های تزویج فاقد آن هستند.

۶- قدردانی

[۱۰] این مقاله با مساعدت مرکز تحقیقات مخابرات ایران طی قرار داد همکاری تحقیقاتی به شماره ۴۸۵۲/۵۰۰/ت مورخ ۸۲/۵/۱۳ نگاشته شده است که جا دارد از مسئولان محترم آن مرکز تشکر و قدردانی شود.

۷- مراجع

- [۱] Uman M.; "Lightning Discharge", Academic press, New York 1987
- [۲] کردی، بهزاد؛ مدلسازی پدیده صاعقه به کمک تئوری پراکندگی و سنجش میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از آن، پایان نامه دکتری مخابرات، دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۷۹.
- [۳] Rakov, V. A.; Uman, M.; "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their applications", IEEE Trans. on EMC, Vol. 40, No. 4, 1998
- [۴] بنیادی رام، سیامک؛ مدلسازی غیر خطی کانال ضربه برگشت صاعقه از نوع ابر به زمین به کمک تئوری پراکندگی، پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۲.
- [۵] Miller, E.K.; "An integro-differential technique for time-domain analysis of thin wire structures," Journal of computational physics, 12, pp. 24-48, 1973.
- [۶] Moini, R.; Kordi, B.; Rafi, G. Z.; Rakov, V.; "A new lightning return stroke model based on antenna theory", Journal of Geophysical Research, Vol. 105, NO. D24, pp. 29693-29702, Dec. 2000.
- [۷] Chowdhuri, P.; Gross, E. T. B.; "Voltage Source induced on overhead lines by lightning stroke", Proc. IEE, Vol. 114, No. 12, pp. 1899-1907, Dec. 1967.

زیرنویس ها

- ¹ Return Stroke
- ² Antenna Theory
- ³ Electric Field Integral Equation
- ⁴ Corona Effect
- ⁵ Isotropic
- ⁶ Thin Wire Approximation
- ⁷ Segment
- ⁸ Sparse
- ⁹ Banded Diagonal
- ¹⁰ Load
- ¹¹ Scatterer
- ¹² Dispersion