

## A New Method to Evaluate the Launch Pad Lightning Protection System Performance by Using LPM in 3-D

M. Yahyaabadi\*, A. Sadoughi

\*Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

( Received: 01/09/2014, Accepted: 10/05/2015)

### ABSTRACT

*Direct lightning strokes to launch pad damage some vital instruments. Thus, the lightning protection system is used to protect instruments. Calculating the probability of direct lightning strokes is the main consideration in lightning protection system design, however this calculation is not simple since the shape of launch pad is complex. In this paper, a 3-D numerical analysis model based on Leader Progression Model (LPM) is proposed to calculate the probability of direct lightning strokes to launch pads. The progression of lightning downward leader, the inception and propagation of upward leaders are modeled step by step until final jump. Launch pad, lightning protection system, downward and upward leaders are modeled by different shapes of charges, and the environment electric field is computed using charge simulation method. Then, lightning performance of two actual launch pads are evaluated, and the simulation results are compared. Finally, the high voltage laboratory tests have been achieved to validate the proposed protection system design.*

**Keywords:** Launch Pad, Leader Progression Model, Charge Simulation Method, Upward leaders.

## ارائه راه کاری نوین در ارزیابی عملکرد سامانه حفاظت سایت پرتاب ماهواره در برابر صاعقه به روش انتشار گام به گام صاعقه در فضای سه بعدی

مصطفی یحیی آبادی<sup>۱\*</sup>، علیرضا صدوقی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و اویونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و اویونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

(دریافت: ۹۳/۰۶/۱۰؛ پذیرش: ۹۴/۲/۲۱)

### چکیده

برخورد مستقیم صاعقه به سایت پرتاب ماهواره می تواند موجب تخریب بسیاری از تجهیزات ارزنده گردد، بنابراین به منظور حفاظت تجهیزات از سامانه حفاظت در برابر صاعقه استفاده می شود. اما با توجه به اشکال پیچیده و نامتعارف سایت های پرتاب، محاسبه احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی از مباحث کلیدی در طراحی سامانه حفاظت به شمار می رود. در این مقاله یک مدل آنالیز عددی مبتنی بر روش انتشار گام به گام صاعقه در فضای سه بعدی به منظور محاسبه احتمال برخورد مستقیم صاعقه به سایت پرتاب پیشنهاد شده است. بدین منظور لیدر پایین رونده صاعقه و لیدرهای بالارونده از اجسام روی زمین دنبال می شوند و محل برخورد نهایی صاعقه تعیین می گردد. روش بارهای فرضی برای شبیه سازی کامل سایت پرتاب، صاعقه، سامانه حفاظتی و لیدرهای بالارونده استفاده می شود. احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی برای دو نمونه سایت پرتاب واقعی محاسبه گردیده و عملکرد سامانه های حفاظتی مذکور مورد مقایسه قرار می گیرد. در نهایت، به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، تست صاعقه در آزمایشگاه فشارقوی انجام شده و تطابق مناسبی بین نتایج شبیه سازی و آزمون عملی مشاهده گردیده است.

**واژه های کلیدی:** سایت پرتاب ماهواره، روش انتشار گام به گام صاعقه، روش بارهای فرضی، لیدرهای بالارونده

### ۱- مقدمه

یکی از تجهیزات بسیار پیچیده و گران قیمت که همواره در معرض برخورد مستقیم صاعقه قرار دارد سکوی پرتاب ماهواره است. این مجموعه تجهیزات و تأسیسات مربوط به سکوی پرتاب ماهواره معمولاً در نواحی هموار نصب می گردند و به دلیل ساختار بلندی که دارند در معرض برخورد مستقیم صاعقه قرار داشته و احتمال برخورد صاعقه به آنها زیاد است. به منظور جلوگیری از برخورد مستقیم صاعقه به سایت پرتاب ماهواره از سامانه حفاظت در برابر صاعقه استفاده می شود. این سامانه دارای ارتفاعی بلندتر از سکوی پرتاب ماهواره است و با یک مقاومت بسیار اندک زمین می شود تا جریان صاعقه را به زمین منتقل کند. سامانه حفاظت در برابر صاعقه وظیفه دارد جریان صاعقه را بدون اینکه به سکوی پرتاب و تجهیزات نصب شده بر روی آن آسیب برساند وارد زمین نماید [۹-۲].

سامانه های حفاظت در برابر صاعقه، از ایجاد صاعقه جلوگیری نمی کنند، بلکه آن را تحت کنترل به سمت خود جذب کرده و با وارد کردن انرژی صاعقه به زمین از آسیب های احتمالی جلوگیری می نمایند [۱۱-۱۰].

صاعقه یکی از پدیده های قدرتمند طبیعت است که در صورت برخورد به تجهیزات، تأسیسات و یا موجودات زنده می تواند موجب وارد شدن آسیب های جبران ناپذیر به آنها گردد. در هر لحظه در جهان حدود ۲۰۰۰ طوفان شدید در حال وقوع است و این طوفان ها در حدود ۱۰۰ صاعقه بر ثانیه ایجاد می نمایند. به طور متوسط صاعقه ها دارای ولتاژ ۳۰۰ مگا ولت، جریان ۲۰ کیلو آمپر و دمایی در حدود ۵۰ هزار درجه فارنهایت می باشند. صاعقه های بزرگتر می توانند ولتاژی تا ۱۰۰۰ مگا ولت، جریانی تا ۲۰۰ کیلو آمپر و دمایی بیش از ۵۴ هزار درجه فارنهایت داشته باشند. یک ابر طوفانی می تواند چندین مگاوات توان الکتریکی تولید کند که تقریباً با خروجی یک نیروگاه اتمی کوچک برابری می کند. با چنین مقداری از انرژی تعجبی نخواهد داشت که صاعقه توانایی آسیب رساندن به تجهیزات و تأسیسات حیاتی در هر سطحی را داشته باشد [۱].

به دست می‌آید. در مدل EGM، نقطه برخورد با استفاده از محاسبه هندسی فواصل برخورد به دست می‌آید. فواصل برخورد نیز به شکل جسم و جریان صاعقه بستگی دارند. فاصله برخورد فاصله‌ای است که وقتی لیدر پایین‌رونده از سوی ابر به آن فاصله از جسم رسید، صاعقه به آن جسم برخورد خواهد نمود.

فاصله برخورد ( $r_s$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r_s = AI^b \quad (1)$$

در این رابطه I، جریان صاعقه برخوردکننده و A و b مقادیر ثابت هستند. IEEE مقادیر A و b را برای محاسبه فاصله برخورد چنین پیشنهاد کرده است:

$$r_s = 10I^{0.65} \quad (2)$$

معمولاً فاصله برخورد برای اجسام مرتفع و زمین به صورت متفاوت اما متناسب در نظر گرفته می‌شود. فاصله برخورد صاعقه به زمین ( $r_g$ ) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$r_g = k_g r_s \quad (3)$$

در این رابطه،  $k_g$  نسبت فاصله برخورد زمین به فاصله برخورد جسم است. مقدار پیشنهادی برای  $k_g$  در محدوده ۰/۶ تا ۱ می‌باشد.

به طور کلی اگر پیشانی صاعقه وارد فاصله برخورد سامانه حفاظتی گردد توسط آن جذب خواهد گردید. ولی در صورتی که لیدر پایین‌رونده وارد فاصله برخورد سایت پرتاب ماهواره و تجهیزات آن گردد به آن‌ها اصابت می‌کند و سامانه حفاظتی عملکرد مناسبی نخواهد داشت.

#### ۲-۱-۲ روش Collection Volume Method (CVM)

روش CVM که در واقع یک متد بهبود یافته از روش EGM می‌باشد در سال ۱۹۸۷ توسط Eriksson [۱۹-۲۰] مطرح شده و مورد استفاده قرار گرفت. در این روش علاوه بر فاصله برخورد، نسبت سرعت لیدرهای پایین‌رونده و بالارونده نیز در نظر گرفته می‌شود و همچنین فرض می‌گردد که صاعقه به هیچ وجه نمی‌تواند به نقاطی پایین‌تر از نوک جسم برخورد نماید. این فرض ایرادات بسیاری را به روش CVM وارد نموده است و مثال‌های نقض فراوانی مبنی بر برخورد صاعقه به میانه برج‌های بلند ارائه شده است [۲۱].

#### ۲-۱-۳ روش Rolling Sphere Method (RSM)

روش RSM نیز بر گرفته از اصول اولیه روش EGM می‌باشد و به منظور تحلیل ساختارهای پیچیده‌تر مطرح گردیده است. این روش امروزه به عنوان کاربردی‌ترین روش تحلیلی در محاسبات حفاظت

یک سامانه حفاظت مناسب باید به نحوی طراحی شود که تمام صاعقه‌هایی را که تهدیدی برای سایت پرتاب ماهواره به شمار می‌روند به سمت خود جذب نموده و از برخورد آنها به تجهیزات و تأسیسات جلوگیری نماید. یکی از نکات کلیدی در طراحی مناسب سامانه حفاظت در برابر صاعقه ارزیابی دقیق و قابل اطمینان عملکرد سامانه حفاظتی است. در واقع محاسبه احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی و برخورد مستقیم آن به تجهیزات و تأسیسات همواره از اهمیت بالایی برخوردار است. اما از آنجایی که صاعقه یک پدیده کاملاً تصادفی بوده و پارامترهای بسیار متنوعی بر مسیر حرکت آن مؤثر می‌باشند، تعیین محل دقیق برخورد صاعقه و لذا محاسبه احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی پیچیده، دشوار و بسیار زمانبر است. خوشبختانه امروزه با وجود رایانه‌های قدرتمند و پرسرعت می‌توان حجم بسیار زیادی از محاسبات را در زمان اندک انجام داد و این قابلیت ما را در مدل‌سازی صاعقه و محاسبه احتمال فرار آن از سامانه‌های حفاظتی یاری می‌رساند.

#### ۲- انواع روش‌های مدل‌سازی صاعقه

به طور کلی انواع روش‌هایی که در زمینه مدل‌سازی صاعقه و محاسبه احتمال فرار آن از سامانه حفاظتی وجود دارند را می‌توان به دو گروه اصلی شامل روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی تقسیم نمود.

#### ۲-۱- روش‌های آنالیز تحلیلی

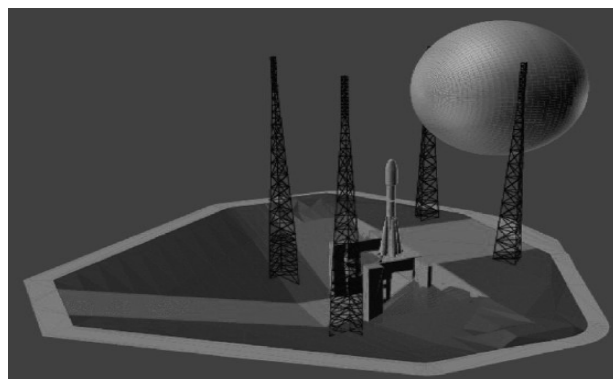
به منظور ارزیابی عملکرد سامانه حفاظت در برابر صاعقه، روش‌های تحلیلی بسیاری پیشنهاد شده است. در این روش‌ها همان‌طور که از نامشان پیداست به صورت تحلیلی با مسأله برخورد می‌شود و به منظور محاسبه احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی و برخورد آن به تجهیزات و تأسیسات از روابط هندسی استفاده می‌گردد. ولی از آنجایی که روابط هندسی معمولاً دارای تقریب‌های ساده‌کننده هستند ممکن است پاسخ‌هایی که به دست می‌دهند تا حدودی آمیخته با تقریب باشد. در اینجا به معرفی اصلی‌ترین روش‌های تحلیلی در محاسبه نواحی حفاظت شده در برابر صاعقه پرداخته شده است.

#### ۲-۱-۱ روش (Electro-Geometric Model) EGM

یکی از روش‌های تحلیلی مورد استفاده به منظور محاسبه ناحیه حفاظت شده در برابر صاعقه، مدل بسیار مشهور EGM یا مدل الکترونیکی - هندسی می‌باشد که در سال ۱۹۶۳ توسط Young [۱۲] پیشنهاد شد و محققین زیادی آن را توسعه دادند [۱۸-۱۳]. در این روش، پیشانی صاعقه به زمین نزدیک می‌شود و نقطه خاصی روی تجهیزات سکوی پرتاب، صاعقه‌گیر یا زمین برای برخورد نهایی لیدر

آن مؤثر می باشد.

نکته ۲: در روش های تحلیلی اثر انتشار و حرکت لیدرهای بالارونده در نظر گرفته نمی شود و لذا دقت در روش های تحلیلی محدود است.



شکل (۲): نحوه استفاده از روش RSM به منظور طراحی حفاظت سایت پرتاب ماهواره

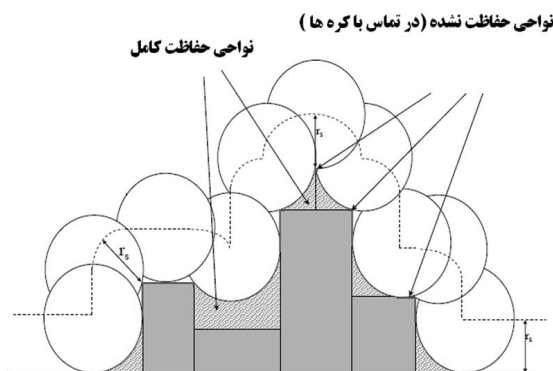
نکته ۳: در روش های تحلیلی ناحیه حفاظت شده و ناحیه حفاظت نشده به تفکیک مشخص می شوند اما نکته قابل تأمل این است که آیا احتمال برخورد صاعقه به نقاط مختلف ناحیه حفاظت نشده برابر است؟ با قطعیت می توان پاسخ داد: خیر. زیرا به عنوان مثال احتمال برخورد صاعقه به نقاط نوک تیز لبه های ساختمان شکل (۱) می بایست از سطوح مسطح کنار ساختمان بیشتر باشد. بنابراین در روش های تحلیلی هیچ معیار عددی جهت مقایسه داده نمی شود و تنها چیزی که اشاره شده است حفاظت یا عدم حفاظت در برابر صاعقه است.

نکته ۴: با استفاده از روش RSM نمی توان به بررسی ناحیه حفاظت شده توسط یک تک برج بلند پرداخت. زیرا همواره کره های فرضی در کنار برج جای گرفته و تقریباً کل ناحیه سطحی اطراف آن را آسیب پذیر نشان می دهند. در حقیقت سطح آسیب پذیری مشخص نیست و معیاری جهت مقایسه داده نمی شود.

### روش آنالیز عددی

با پیشرفت روزافزون نرم افزارها و سخت افزارها استفاده از روش های آنالیز عددی به منظور ارائه راه کاری دقیق جهت تعیین مسیر حرکت صاعقه و نقطه برخورد نهایی آن مورد توجه بسیاری از دانشمندان و محققین قرار گرفت. مدل انتشار گام به گام صاعقه (Leader Progression Model) توسط Rizk [۲۵-۲۲] و Dellera و Garbagnati [۲۷-۲۶] پیشنهاد شد و محققین زیادی به منظور

تجهیزات در برابر صاعقه مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل (۱) نحوه استفاده از روش RSM به منظور تعیین نواحی حفاظت شده و نواحی حفاظت نشده در برابر صاعقه برای یک ساختار پیچیده و نامتقارن نشان داده شده است.



شکل (۱): نحوه استفاده از روش RSM به منظور طراحی حفاظت یک ساختار پیچیده

در روش RSM تعدادی کره با شعاعی برابر فاصله برخورد بر روی ناحیه مورد مطالعه به نحوی قرار داده می شوند که از هر طرف به جسمی تکیه کنند. سپس نواحی که در تماس با سطوح کره ها هستند یا اینکه توسط کره ها پوشش داده نمی شوند به عنوان نواحی حفاظت نشده شناخته می شوند. این نواحی حفاظت نشده به ازای هر جریان صاعقه منحصر به فرد خواهند بود زیرا شعاع کره ها با تغییر جریان صاعقه تغییر می یابد. بنابراین با توجه به سطح حفاظتی مورد نظر (حداکثر جریان صاعقه برخورد کننده قابل قبول) می توان سامانه حفاظتی را طوری طراحی نمود که ناحیه حفاظت نشده برابر صفر گردد.

در شکل (۲) نحوه استفاده از روش RSM به منظور طراحی سامانه حفاظت سایت پرتاب ماهواره نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشخص شده است کره فرضی بین دو برج صاعقه گیر قرار گرفته است و سایت پرتاب در این حالت به طور کامل محافظت می شوند. این حفاظت می بایست به ازای کمترین جریان های صاعقه انجام شود تا از عملکرد سامانه حفاظتی اطمینان حاصل گردد.

در اینجا ذکر نکات اساسی ذیل در مورد روش های آنالیز تحلیلی ضروری است:

نکته ۱: در روش های تحلیلی محاسبات فاصله برخورد، به طور مستقل از محاسبه شدت میدان الکتریکی و تنها با توجه به شکل قرارگیری و چیدمان تجهیزات انجام می گیرد. این در حالی است که شدت میدان الکتریکی بر مسیر حرکت صاعقه و محل برخورد نهایی

سامانه معادلات آورده شده‌اند.

برای یک سامانه فیزیکی ممکن است میدان الکتریکی به روش‌های مختلف تحلیلی یا عددی به دست آید. اما طبق قضیه یکتایی که در مراجع [۴۳-۴۱] بیان شده است، اثبات می‌شود که جواب معادله پواسن  $\nabla^2 V = -\rho/\epsilon$  که شرایط مرزی مفروض را برآورده سازد، جواب یکتای مسأله است.

ویژگی بارز این روش آن است که در این حالت گسسته‌سازی فضایی برخلاف روش‌های حل عددی دیگر از قبیل روش تفاضل محدود FDM و روش المان محدود FEM تنها به سطوح الکترودها و یا فصل مشترک عایق‌های مختلف محدود خواهد گردید. این بدین معناست که در مقایسه با روش‌های دیگر، حل عددی با استفاده از روش بارهای فرضی با تعداد بسیار کمتری از عناصر قابل انجام می‌باشد.

همان‌طور که اشاره شد در روش بارهای فرضی، بارهای الکتریکی سطحی بر روی الکترودها یا فصل مشترک دو عایق توسط یک مجموعه از بارهای الکتریکی فرضی که خارج از حوزه میدان یا روی مرز قرار دارند جانشین می‌شوند. محل و نوع این بارهای الکتریکی فرضی از قبل تعیین می‌شود، ولی مقدار آنها مجهول می‌باشد. مقادیر این بارهای فرضی بایستی به نحوی محاسبه گردند که شرایط مرزی را دقیقاً در تمام نقاط بر روی مرز برقرار سازند. جمع آثار پتانسیل بارهای فرضی باید برابر با پتانسیل مرزی باشد:

$$V = \sum_{j=1}^n p_j Q_j \quad (4)$$

در این رابطه  $Q_j$  مقدار بار الکتریکی  $j$  ام  $p_j$  ضریب پتانسیل است و می‌توان با حل تحلیلی معادلات لاپلاس و پواسون برای شکل‌های مختلف بار، آن را محاسبه کرد. معمولاً تعداد بارهای فرضی و نقاط مرزی انتخاب شده یکسان می‌باشند. نقاط مرزی نقاطی هستند که پتانسیل آنها داده شده و صحت پتانسیل آنها کنترل می‌شود. به این ترتیب با اعمال رابطه (۴) به تمام نقاط مرزی، یک سامانه شامل  $n$  معادله خطی را برای  $n$  بار الکتریکی خواهیم داشت:

$$PQ = V \quad (5)$$

ماتریس  $P$  دارای بُعد  $(n \times n)$  می‌باشد و عناصر آن به نوع و محل بارهای الکتریکی وابسته می‌باشند.

ضرایب پتانسیل مربوط به بارهای با اشکال مختلف با در نظر گرفتن اثر زمین عبارت است از [۴۳-۴۱]:

شبه‌سازی حرکت صاعقه و تعیین نقطه برخورد نهایی آن از این روش استفاده نموده و سعی در بهبود آن داشتند [۳۵-۲۸]. شبه‌سازی پروسه انتشار گام به گام صاعقه در فضای سه بعدی نیز برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ انجام گردید و در سال‌های بعد توسعه داده شد [۴۰-۳۶].

در این مقاله، مبنای مدل آنالیز عددی دنبال کردن مسیر صاعقه و علاوه بر آن در نظر گرفتن آغاز و انتشار لیدرهای بالارونده از اجسام روی زمین در هر موقعیتی در فضای سه بعدی از طریق محاسبه میانگین شدت میدان الکتریکی می‌باشد.

به منظور تعیین محل برخورد صاعقه، ۱- مسیر صاعقه به صورت گام به گام دنبال می‌شود و در هر گام مقدار گرادیان ولتاژ بین پیشانی صاعقه و نقاط محتمل برخورد صاعقه محاسبه می‌شود. ۲- همزمان با حرکت صاعقه معیار شروع لیدر بالارونده محاسبه می‌شود و هر گاه این معیار برای نقطه‌ای برآورده شد، برخورد صاعقه به آن در نظر گرفته خواهد شد.

در اینجا علاوه بر در نظر گرفتن معیار شروع لیدرهای بالارونده، مسیر آنها تا برخورد نهایی دنبال می‌شود. در این حالت ممکن است بیش از یک لیدر بالارونده شروع به حرکت به سمت پیشانی صاعقه نمایند، ولی نهایتاً فقط یکی از آنها می‌تواند به پیشانی صاعقه رسیده و مسیر برخورد صاعقه را تکمیل نماید.

به منظور محاسبه شدت میدان الکتریکی، از روش بارهای فرضی برای شبه‌سازی کامل سایت پرتاب ماهواره، صاعقه، سامانه حفاظتی و لیدرهای بالارونده استفاده شده است. روش بارهای فرضی، یکی از دقیق‌ترین و قوی‌ترین روش‌های عددی برای حل مسائل میدانی است [۴۳-۴۱].

در روش بارهای فرضی میدان الکتریکی واقعی با یک میدان ناشی از تعدادی بارهای الکتریکی گسسته شبه‌سازی می‌شود. این بارها خارج از ناحیه‌ای که قرار است میدان الکتریکی در آن محاسبه شود قرار داده می‌شوند. آنگاه مقادیر این بارهای گسسته طوری تعیین می‌شود که شرایط مرزی در تعدادی نقاط دلخواه روی مرز برآورده شود. وقتی مقادیر و موقعیت بارها معلوم شد، با استفاده از آنها می‌توان پتانسیل و میدان الکتریکی هر نقطه از فضای مسأله را تعیین نمود.

روش بارهای فرضی از یک مدل ریاضی انتگرالی برای حل عددی میدان پتانسیل استفاده می‌کند. در این روش مدل ریاضی به شکل یک سامانه معادلات انتگرالی بیان شده است و شرایط مرزی در

بارهای فرضی کاربرد داشت ولی در سال‌های اخیر مدل بارهای حلقه‌ای و استوانه‌ای نیز معرفی شده است. بارهای صفحه‌ای، حجمی و بارهای با چگالی متغیر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. بسته به این که چه نوعی از بارها انتخاب می‌شود باید ضرایب پتانسیل و میدان مورد محاسبه قرار گیرد.

در حالت کلی، ضرایب پتانسیل و میدان بارهای نقطه‌ای و خطی با فرمول‌های تحلیلی ساده‌تر که احتیاج به زمان محاسبه کمی دارند محاسبه می‌شود. برای بارهای با شکل و نوع پیچیده‌تر ضرایب پتانسیل و میدان به صورت عددی به دست می‌آیند. به عبارت دیگر در یک مدل سازی داده شده ممکن است بتوان با تعداد بار الکتریکی کمتر ولی با شکل و نوع پیچیده‌تر به جواب رسید. بنابراین، اگر شکل پیچیده بار را به جای شکل ساده به کار بریم، وقت کلی محاسبه ممکن است کاهش یابد.

معمولاً بیشتر سامانه‌های فشار قوی به طور موفقیت آمیزی می‌توانند با استفاده از مدل بارهای پایه مثل نقطه، خط و حلقه یا یک تلفیق مناسب از این بارها شبیه سازی شوند. در حالت کلی، انتخاب انواع بارهای فرضی بستگی به پیچیدگی فیزیک سامانه و حافظه کامپیوتری در دسترس و تجربه شخصی دارد.

### ۳- مدل سازی صاعقه

مدل سازی صاعقه شامل شبیه سازی مسیر حرکت صاعقه و لیدرهای بالارونده از اشیای روی زمین است که به صورت مرحله به مرحله انجام می‌شود. در این راستا آشنایی با مفاهیم ذیل از اهمیت بالایی برخوردار است.

#### ۳-۱- آغاز و انتشار صاعقه

ابرها در ارتفاع ۲۰۰۰ متری فرض شده‌اند و مسیر حرکت صاعقه از ابر تا ابتدای شروع شبیه سازی به صورت پاره خط مستقیم عمودی و با چگالی بار متغیر در نظر گرفته شده است. شبیه سازی صاعقه می‌بایست از جایی که اثر اشیای روی زمین در آنجا قابل صرف نظر است، یعنی بالاتر از دو برابر ارتفاع بلندترین نقطه اجسام روی زمین شروع گردد [۱۸].

مسیر حرکت صاعقه در هر گام در جهتی است که گرادبان ولتاژ ماکزیمم است. همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، در هر مرحله یک نیمکره فرضی در زیر صاعقه و به مرکز نوک آن و با شعاعی برابر با طول گام آن در نظر گرفته می‌شود. سپس شدت میدان الکتریکی بر روی این نیمکره فرضی محاسبه می‌شود و مسیر صاعقه به سمت نقطه‌ای خواهد بود که بیشترین شدت میدان الکتریکی را دارد.

بار خطی عمودی و محدود:

$$P = \frac{1}{4\pi\epsilon(z_{j2} - z_{j1})} \times \text{Ln} \frac{(z_{j2} - z_i + \gamma_1)(z_{j1} + z_i + \gamma_2)}{(z_{j1} - z_i + \delta_1)(z_{j2} + z_i + \delta_2)} \quad (6)$$

در این رابطه:

$$\gamma_1 = \sqrt{r_i^2 + (z_{j2} - z_i)^2} \quad \gamma_2 = \sqrt{r_i^2 + (z_{j1} + z_i)^2}$$

$$\delta_1 = \sqrt{r_i^2 + (z_{j1} - z_i)^2} \quad \delta_2 = \sqrt{r_i^2 + (z_{j2} + z_i)^2}$$

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

بار خطی افقی و محدود:

$$P = \frac{1}{4\pi\epsilon(x_{j2} - x_{j1})} \times \text{Ln} \frac{(x_{j2} - x_i + \gamma_1)(x_{j1} + x_i + \gamma_2)}{(x_{j1} - x_i + \delta_1)(x_{j2} + x_i + \delta_2)} \quad (7)$$

در این رابطه:

$$\gamma_1 = \sqrt{r_i^2 + (x_{j2} - x_i)^2} \quad \gamma_2 = \sqrt{r_j^2 + (x_{j1} - x_i)^2}$$

$$\delta_1 = \sqrt{r_i^2 + (x_{j1} - x_i)^2} \quad \delta_2 = \sqrt{r_j^2 + (x_{j2} - x_i)^2}$$

$$r_i = \sqrt{(z_i - z_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad r_j = \sqrt{(z_i + z_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

بار حلقوی :

$$P = \frac{1}{4\pi\epsilon} \times \frac{2}{\pi} \left[ \frac{K(k_1)}{\alpha_1} - \frac{K(k_2)}{\alpha_2} \right] \quad (8)$$

در این رابطه:

$$\alpha_1 = \sqrt{(r_i + r_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad k_1 = \frac{2\sqrt{r_j r_i}}{\alpha_1}$$

$$\alpha_2 = \sqrt{(r_i + r_j)^2 + (z_i + z_j)^2} \quad k_2 = \frac{2\sqrt{r_j r_i}}{\alpha_2}$$

و  $K(k)$ ، انتگرال بیضوی نوع اول است.

یکی از تدابیری که می‌تواند روش بارهای فرضی را بهینه کند انتخاب صحیح مدل بارهای گسسته می‌باشد. در ابتدا فقط بارهای نقطه‌ای و بارهای خطی به طول بی نهایت و نیمه نهایت در روش

است که چگالی بار الکتریکی در آن نقطه محاسبه می‌گردد.

بار الکتریکی لیدرهای بالارونده با استناد به مراجع [۲۶-۲۷] به صورت خطی و برابر ۵۰ میکروکولن بر متر در نظر گرفته شده است.

### ۳-۳- معیار شروع لیدر بالارونده

در هنگام شکل‌گیری صاعقه و به دلیل تجمع بارهای الکتریکی درون ابر، شدت میدان الکتریکی در قسمت بالایی اجسام روی زمین، مانند درختان، ساختمان‌ها و دکل‌های بلند افزایش می‌یابد. لذا هوای اطراف این نقاط یونیزه شده و لیدرهای بالارونده از سطح زمین شروع به حرکت می‌کنند. شناسایی زمان شروع و مسیر حرکت لیدرهای بالارونده از اشیای روی زمین به منظور ارزیابی دقیق و قابل اطمینان رفتار صاعقه و تعیین نقطه برخورد نهایی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین به منظور ارزیابی صحیح عملکرد سامانه حفاظتی در جلوگیری از برخورد صاعقه می‌بایست لیدرهای بالارونده مورد توجه قرار گرفته و با دقت بررسی شوند [۴۵-۴۸].

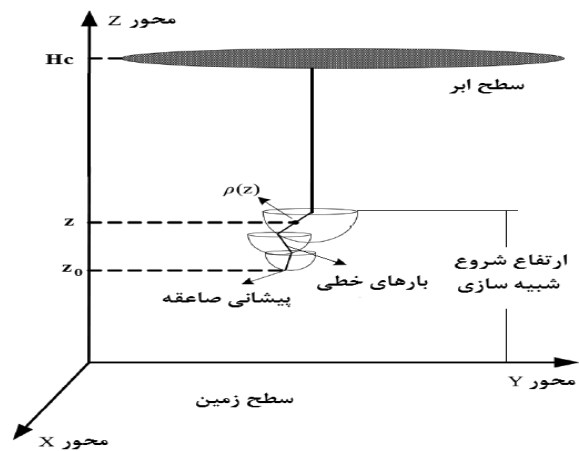
برای تشخیص صحیح نقطه شروع لیدرهای بالارونده می‌بایست روند رشد گرادیان ولتاژ در نقاط مختلف تجهیزات، سامانه حفاظتی و زمین به طور لحظه‌ای و گام به گام همراه با حرکت صاعقه مورد بررسی قرار گیرند. پارامترهای متعددی از قبیل جریان لیدر پایین‌رونده صاعقه، فاصله طولی نقطه مورد ارزیابی از صاعقه، شکل هندسی و جغرافیایی محیط و ... می‌توانند بر زمان شروع لیدرهای بالارونده مؤثر باشند.

در این مقاله، معیار شروع لیدر بالارونده از نقاط مختلف اجسام روی زمین معیاری است به نام طول معادل استریم بحرانی Critical Equivalent Streamer Length (CESL) که در مرجع [۴۷] ارائه شده است. در این روش یک نیمکره فرضی به مرکز نقطه مورد بررسی و به شعاع ۲/۲ متر و به سوی پیشانی صاعقه در نظر گرفته می‌شود. سپس شدت میدان الکتریکی به صورت شعاعی و بر روی تمامی سطح نیمکره ارزیابی می‌گردد. اگر شدت میدان الکتریکی به ۴۰۰ کیلوولت بر متر برسد، شرایط آغاز لیدر بالارونده فراهم شده است. بنابراین لیدر بالارونده از آن نقطه شروع شده و در جهتی که بیشترین گرادیان ولتاژ را دارد حرکت خواهد نمود.

### ۳-۴- سرعت انتشار لیدرهای پایین‌رونده و بالارونده

هم‌زمان با شکل‌گیری لیدرهای بالارونده، این لیدرها حرکت خود را به سمت پیشانی صاعقه شروع می‌کنند و سعی در رسیدن به آن و بستن مسیر خود دارند. وقتی یک لیدر بالارونده موفق به

هر گام لیدر پایین‌رونده صاعقه با بارهای خطی افقی و عمودی مدل می‌شود و بدین ترتیب با پیشروی گام به گام صاعقه بر تعداد بارهای الکتریکی افزوده می‌گردد. با توجه به نتایج آزمایشات و نیز مشاهدات ثبت شده طول گام صاعقه در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ متر متغیر است. متوسط طول گام حدود ۵۰ متر است و در نزدیکی زمین این طول گام به حدود ۱۰ متر خواهد رسید [۳۸]. در این شبیه‌سازی طول هر گام صاعقه از نقطه شروع شبیه‌سازی تا هنگام برخورد نهایی برابر ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. این طول گام به منظور اطمینان داشتن از تطبیق محاسبات با تحقیقات آزمایشگاهی در مورد شکست فواصل هوایی طولانی و افزایش دقت محاسبات انتخاب شده است.



شکل (۳). نیمکره فرضی برای تعیین مسیر صاعقه

### ۳-۲- بار الکتریکی لیدرهای پایین‌رونده و بالارونده

چگالی بار الکتریکی صاعقه در هر گام با استفاده از رابطه (۹) که مبتنی بر اندازه‌گیری‌های الکترواستاتیک شکل موج‌های جریان صاعقه است، محاسبه می‌شود [۴۴].

$$\rho(z) = I \left\{ m_0 \left( 1 - \frac{z - z_0}{H_C - z_0} \right) \left( 1 - \frac{z_0}{H_C} \right) + \frac{m_1 + m_2(z - z_0)}{1 + m_3(z - z_0) + m_4(z - z_0)^2} \right. \\ \left. \times \left[ 0.3e^{\frac{10-z_0}{75}} + 0.7 \left( 1 - \frac{z_0}{H_C} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

در این رابطه  $m_1 = 4.857 \times 10^{-5}$ ،  $m_0 = 1.476 \times 10^{-5}$ ،  $m_2 = 3.9097 \times 10^{-6}$ ،  $m_3 = 0.522$ ،  $m_4 = 3.73 \times 10^{-3}$  است.

$z_0$  ارتفاع پیشانی صاعقه نسبت به زمین به متر،  $H_C$  ارتفاع ابر به متر،  $I$  جریان صاعقه بر حسب کیلوآمپر،  $\rho$  چگالی بار الکتریکی صاعقه بر حسب کولن بر متر و  $z$  ارتفاع نقطه‌ای بر روی صاعقه

#### ۴- مدل سامانه حفاظتی و سایت پرتاب ماهواره

در این مقاله سایت پرتاب ۳۹B در مرکز فضایی کندی در فلوریدا به‌منظور ارزیابی سامانه حفاظت در برابر صاعقه مورد مطالعه قرار گرفته است. پایه‌ریزی و ساخت اولیه سایت پرتاب ۳۹A و B در سال ۱۹۶۰ و به‌منظور پرتاب فضاپیماي Apollo انجام شده است. این سکوهاي پرتاب تاکنون به‌منظور پرتاب شاتل‌های فضایی بسیاری از جمله Apollo، Soyuz، Skylab، Endeavor، Discovery و Atlantis مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین و اصلی‌ترین مراکز فضایی در سطح بین‌المللی به شمار می‌روند. تعداد بیشماری از موشک‌های ماهواره‌بر و کاوشگرهای فضایی از قبیل Saturn-V و Orion و سری موشک‌های نسل Ares نیز از این سایت پرتاب شده‌اند.

سایت پرتاب ۳۹B در سال ۲۰۰۹ مورد بازسازی قرار گرفته و بخش‌های مختلفی از آن مجدداً طراحی، به روز رسانی و ساخته شده است. یکی از تغییرات واضح و قابل مشاهده در این بازسازی، تغییر در سامانه حفاظت در برابر صاعقه می‌باشد. در مقاله حاضر با استفاده از مدل آنالیز عددی پیشنهادی سعی خواهد شد تا سامانه حفاظت در برابر صاعقه در دو حالت قدیم و جدید مورد مدل‌سازی قرار گرفته و عملکرد آنها ارزیابی گردد. در نهایت به استناد نتایج حاصله عملکرد سامانه‌های حفاظت در برابر صاعقه با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

هر سکوی پرتاب در سایت‌های ۳۹A و B از دو بخش ثابت و متحرک تشکیل شده است که متناسب با مأموریتی که در پیش دارد طراحی، ساخته و نصب می‌شود. در این مقاله، ارتفاع سکوی پرتاب برابر ۱۰۶ متر و ماهواره‌بر ارتفاع Ares-IX با ارتفاع ۹۹ متر به‌عنوان نمونه در نظر گرفته شده است.

سامانه حفاظت در برابر صاعقه قدیمی مربوط به سایت پرتاب ۳۹B در ابتدا شامل یک میله صاعقه‌گیر بلند بر روی سکوی پرتاب ثابت و دو سیم محافظ بود (مشابه شکل ۴). در این سامانه حفاظتی میله صاعقه‌گیر با ارتفاعی برابر ۲۴ متر طراحی شده بود و سیم‌های محافظ دارای زاویه ۴۵ درجه با آن بوده و تا روی زمین امتداد داده شده بودند. این سامانه به منظور حفاظت سکوی پرتاب و کلیه تجهیزات مربوطه در برابر صاعقه طراحی شده بود. در این سامانه سکوی پرتاب می‌بایست همواره از ماهواره‌بر بلندتر باشد تا حفاظت به‌طور کامل صورت پذیرد.

به‌منظور مدل‌سازی ماهواره‌بر از بارهای فرضی حلقوی استفاده شده است. سکوی نگهدارنده و سیم محافظ توسط بارهای فرضی

برخورد با پیشانی صاعقه شود یک مسیر هادی بزرگ بین مرکز ابر و زمین ایجاد می‌شود و جریان صاعقه برقرار می‌گردد. نقطه برخورد لیدر پایین‌رونده صاعقه با لیدر بالارونده به سرعت هر دو لیدر بستگی دارد.

لیدر پایین‌رونده صاعقه معمولاً بدون تأثیر گرفتن از عوامل روی زمین منتشر می‌شود. این در حالی است که لیدرهای بالارونده تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی ایجاد شده توسط لیدر پایین‌رونده می‌باشند و به‌طور کلی مشخصات اصلی آنها (جریان، گرادیان ولتاژ و سرعت انتشار) بستگی به جریان و سرعت حرکت لیدر پایین‌رونده دارد [۴۹-۵۰].

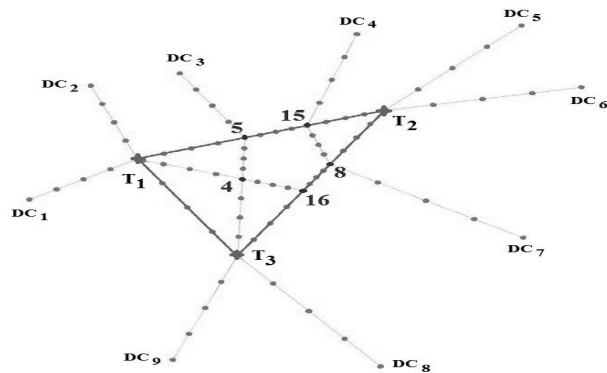
آنچه در مدل‌سازی انتشار لیدرهای پایین‌رونده و بالارونده از اهمیت برخوردار است، نسبت سرعت لیدر پایین‌رونده به لیدرهای بالارونده (Rv) می‌باشد. در واقع نسبت طول گام لیدر پایین‌رونده به طول گام لیدر بالارونده در هر مرحله از شبیه‌سازی را سرعت انتشار لیدرها مشخص می‌نماید. در این مقاله نسبت سرعت لیدر پایین‌رونده به لیدرهای بالارونده (Rv) برابر یک در نظر گرفته شده است [۲۵-۱۹].

#### ۳-۵- برخورد نهایی صاعقه

در صورتی که شدت میدان الکتریکی بین پیشانی صاعقه و نوک یکی از لیدرهای بالارونده از ماهواره‌بر، سکوی پرتاب و صاعقه‌گیر یا زمین از شدت میدان الکتریکی شکست بحرانی هوا (۵۰۰ کیلوولت بر متر) بیشتر شود، صاعقه به آن جسم برخورد خواهد کرد و مسیر صاعقه بسته می‌شود. ولی معمولاً شدت میدان الکتریکی لازم جهت شکست فاصله هوایی بین پیشانی صاعقه و زمین بزرگ‌تر از شدت میدان الکتریکی ذکر شده در بالا می‌باشد. در این مقاله شدت میدان الکتریکی شکست فاصله هوایی بین پیشانی صاعقه و زمین ۷۵۰ کیلوولت بر متر در نظر گرفته می‌شود، که هم ارز با  $K_g = 0.67$  در روش EGM می‌باشد [۵۱].

علاوه بر این، در صورتی که صاعقه وارد فاصله برخورد جسمی شود، بدون اینکه معیار شدت میدان الکتریکی برآورده شود، صاعقه به آن جسم برخورد خواهد نمود. این امر در مورد صاعقه‌هایی که با جریان کم و از بالای اجسام به آنها نزدیک می‌شوند صدق می‌کند. همچنین در صورتی که ارتفاع پیشانی صاعقه از ارتفاع لیدرهای بالارونده کمتر شود و برخوردی بین آنها اتفاق نیافتد، شبیه‌سازی ادامه داده نخواهد شد و فرض می‌شود که صاعقه به زمین برخورد خواهد کرد و بدین ترتیب شبیه‌سازی در همین مرحله خاتمه داده می‌شود [۲۳]. این مورد برای صاعقه‌های با جریان کم که در فواصل دور از تجهیزات به زمین نزدیک می‌شوند صدق می‌نماید.





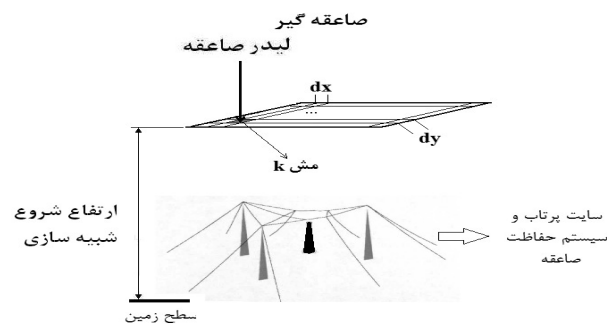
شکل (۶). دید از بالای سامانه حفاظتی جدید به منظور تعیین فواصل

جدول (۱). جدول فواصل بین نقاط مشخص شده در شکل (۶)

فاصله (متر)	نقطه ابتدایی	نقطه انتهایی
۱۹۰	T1	T3
۱۱۸	T1	5
۶۸	5	15
۸۴	15	T2
۱۲۴	T3	16
۵۰	16	8
۱۰۱	8	T2

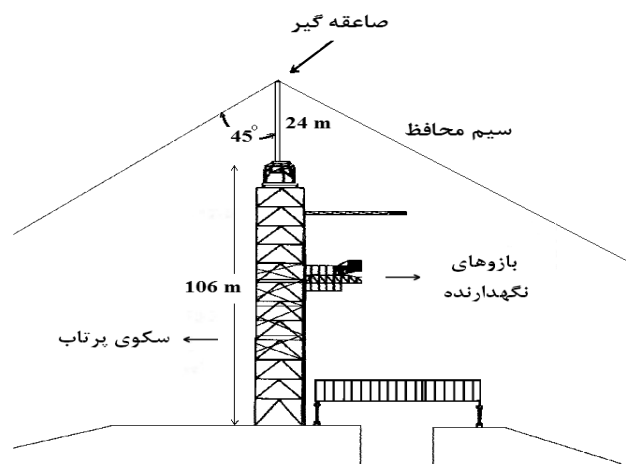
### ۵- محاسبه احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی

در شکل (۷) تصویر سایت پرتاب ۳۹ B و سامانه حفاظت آن نشان داده شده و فضای بالای این مجموعه به مش‌های با طول  $dx$  و عرض  $dy$  تقسیم‌بندی شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، مش‌ها در صفحه‌ای فرضی به ارتفاع شروع شبیه‌سازی قرار دارند. محدوده این مش‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شود که صاعقه‌های خارج از آن با هر جریانی به زمین برخورد نمایند و در واقع تمام صاعقه‌هایی که تهدیدی برای سکوی پرتاب به شمار می‌روند از این مش‌ها عبورنموده و در محدوده مورد بررسی و محاسبه قرار گیرند.



شکل (۷). مش‌بندی فضای بالای سکوی پرتاب و سامانه حفاظتی

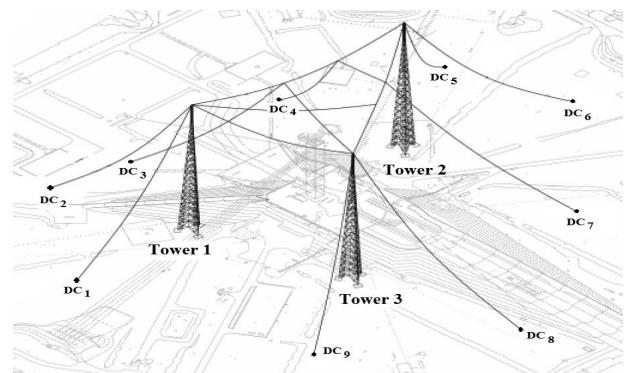
خطی افقی و عمودی مدل گردیده‌اند و صاعقه‌گیر نیز توسط بارهای فرضی خطی عمودی مدل شده است.



شکل (۴). نمای شماتیک سکوی پرتاب قدیمی و سامانه حفاظت صاعقه

سامانه حفاظتی جدید که برای سایت پرتاب ۳۹B طراحی و اجرا شده است، دارای ۳ برج بلند ۱۸۱ متری می‌باشد که در رئوس یک مثلث قرار گرفته‌اند (مشابه شکل ۵) مجموعه‌ای از سیم‌های محافظ بر روی این برج‌ها قرار داده شده و ۹ سیم محافظ (هر یک به طول تقریبی ۲۵۰ متر) از بالای برج‌ها تا روی زمین کشیده شده است و این شبکه به هم پیچیده سایت پرتاب ماهواره را در برابر صاعقه محافظت می‌نماید. نکته قابل توجه در مورد سامانه حفاظتی جدید این است که سکوی پرتاب و نگهدارنده می‌تواند از ماهواره بر کوتاه‌تر طراحی و ساخته شوند.

در شکل (۶) و جدول (۱) مشخصات کامل فواصل مربوط به شبکه سیم‌های محافظ سایت پرتاب ۳۹B در حالت جدید آورده شده است.



شکل (۵). نمای شماتیک سامانه حفاظتی جدید

در این رابطه  $I$ ، دامنه جریان صاعقه در واحد  $kA$  است.

در نهایت احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی در سال حاصل جمع‌های  $SFN_k$  مربوط به تمامی مش‌هاست:

## ۶- نتایج مدل آنالیز عددی

$$SFN_T = \sum_{k=1}^n SFN_k \quad (13)$$

همان‌طور که اشاره شد در این مقاله سامانه حفاظت مربوط به سایت پرتاب ۳۹B در مرکز فضایی کندی در دو حالت قدیمی و جدید مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور احتمال برخورد صاعقه به سایت پرتاب ماهواره در حالات مختلف محاسبه گردیده و نتایج محاسبات در اشکال و جدول زیر آورده شده است.

در اشکال زیر نتایج محاسبات در یک صفحه فرضی در ارتفاع شروع شبیه‌سازی نشان داده شده است. در نواحی که تراکم خطوط بیشتر است، احتمال برخورد صاعقه به سکوی پرتاب بیشتر بوده و نواحی سفید رنگ نشان‌دهنده حفاظت کامل می‌باشند. در این اشکال تصویری از سکوی پرتاب، ماهواره بر و صاعقه‌گیر ترسیم شده است که به‌منظور داشتن تصویری بهتر از محل قرارگیری آن‌ها بر روی زمین است.

سامانه حفاظت در برابر صاعقه قدیمی در دو حالت بررسی شده است. در حالت اول یک میله صاعقه‌گیر ۲۴ متری بر روی سکوی ثابت نصب شده است و از ماهواره بر حفاظت می‌کند. در حالت دوم دو سیم محافظ در نوک صاعقه‌گیر قرار داده شده‌اند و با زاویه ۴۵ درجه تا روی زمین امتداد یافته‌اند (شکل ۴).

در بررسی نتایج حاصله در حالت دوم (شکل ۹) ناحیه حفاظت نشده نسبت به حالت اول شکل (۸) کاهش یافته و در مجموع حفاظت در برابر صاعقه بهبود می‌یابد. همچنین به استناد جدول (۲) احتمال فرار صاعقه از مقدار ۰/۲۸۱۶ به مقدار ۰/۱۶۱۲ صاعقه در سال کاهش خواهد یافت.

در این اشکال نواحی آسیب‌پذیر در سطوح فوقانی به‌نحوی مشخص شده‌اند که علاوه بر مقایسه عددی بین عملکرد سامانه‌های حفاظتی، می‌توان نقاط ضعف سامانه‌ها را به وضوح رؤیت نمود و اقدامات مناسب در راستای بهبود عملکرد حفاظت انجام داد.

سامانه حفاظت در برابر صاعقه جدید در سه حالت مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- سه برج ۱۸۱ متری از سکو و ماهواره بر در برابر برخورد مستقیم صاعقه حفاظت می‌کند. در این حالت مطابق شکل (۱۰) در

با فرض این‌که پیشانی صاعقه در موقعیت  $k$  (مش هاشورخورده با طول  $dx$  و پهنای  $dy$ ) قرار دارد، محدوده جریان برخوردکننده به تجهیزات محاسبه می‌گردد. سپس با در اختیار داشتن اطلاعات آماری در مورد این‌که با چه احتمالی صاعقه در موقعیت  $k$  قرار خواهد گرفت می‌توان احتمال برخورد صاعقه به سایت پرتاب ماهواره را محاسبه نمود.

با قرار گرفتن پیشانی صاعقه در موقعیت  $k$ ، به‌ازای جریان‌های مختلف صاعقه، مسیر آن به‌صورت گام به‌گام دنبال‌شده و در هر مرحله شرایط آغاز لیدرهای بالارونده از اشیای روی زمین ارزیابی می‌شود. در صورتی‌که شرط آغاز لیدر بالارونده در نقطه یا نقاطی فراهم شود، مسیر لیدر بالارونده از آن نقطه یا نقاط دنبال خواهد شد. در هنگام دنبال کردن لیدرهای بالارونده، شرط برخورد نهایی لیدر پایین‌رونده با لیدرهای بالارونده بررسی می‌شود و پس از برقرار شدن شرط مذکور برای یکی از لیدرهای بالارونده، موقعیت برخورد نهایی صاعقه یافته می‌شود.

این پروسه برای تمام جریان‌های صاعقه تکرار می‌شود و محدوده جریان صاعقه برخوردکننده به تجهیزات  $[I_{min}, I_{max}]$  به‌ازای موقعیت  $k$  به‌دست می‌آید. به عبارت دیگر صاعقه‌هایی که دامنه جریان آنها در این بازه قرار می‌گیرد به تجهیزات و تأسیسات مستقر در سایت پرتاب برخورد خواهند کرد. اما صاعقه‌های با دامنه جریان کمتر از  $I_{min}$  به زمین برخورد می‌کند و صاعقه‌های با دامنه جریان بیشتر از  $I_{max}$  توسط سامانه حفاظت جذب شده و تهدیدی برای سکوی پرتاب به شمار نمی‌روند.

اکنون با در اختیار داشتن محدوده جریان برخوردکننده صاعقه، می‌توان احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی و برخورد آن به سایت پرتاب ماهواره را هنگامی‌که پیشانی صاعقه در موقعیت  $k$  می‌باشد، محاسبه نمود [۳۶]:

$$SFN_k = 10^{-6} \gamma T_d \times A \times \int_{I_{min}}^{I_{Max}} P(I) dI \quad (10)$$

در این رابطه  $T_d$  تعداد روزهای صاعقه‌ای در سال و  $\gamma$  احتمال بروز صاعقه می‌باشد که به‌ترتیب ۴۰ روز در سال و ۰/۱۵ صاعقه بر کیلومتر مربع بر روز صاعقه‌ای در نظر گرفته شده‌اند [۳۶].  $A$  مساحت مش  $k$  ام برحسب متر مربع می‌باشد.

$$A = dx dy \quad (11)$$

$P(I)$  احتمال تجمعی جریان‌های صاعقه تجاوزکننده از  $I$  می‌باشد، که می‌تواند به‌وسیله فرمول تقریبی زیر محاسبه شود.

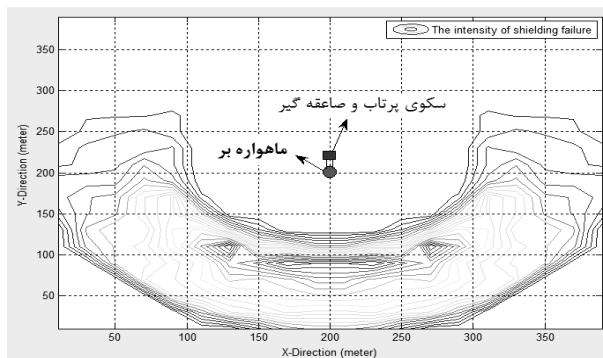
$$\log_{10} P(I) = 0.05 - \frac{I}{74} \quad (12)$$

ناحیه وسیعی احتمال برخورد مستقیم صاعقه به سکو و تجهیزات آن وجود دارد. باستناد نتایج جدول (۲) در این حالت احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی برابر ۰/۱۲۴۴ صاعقه در سال است.

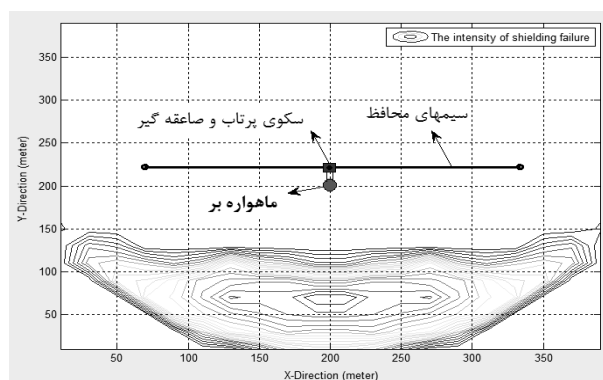
۲- علاوه بر سه برج ۱۸۱ متری ۳ سیم محافظ بین آن‌ها کشیده شده و مطابق شکل (۱۱) حفاظت بهبود خواهد یافت. در این حالت احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی برابر ۰/۰۱۶۶ صاعقه در سال است.

۳- در این حالت ۳ برج ۱۸۱ متری و ۶ سیم محافظ که مشابه با سایت ۳۹B هستند به‌طور کامل شبیه‌سازی می‌شوند. ناحیه حفاظت نشده به حداقل ممکن کاهش می‌یابد اما باز هم وجود دارد (شکل ۱۲). احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی نیز برابر ۰/۰۰۲۸ است.

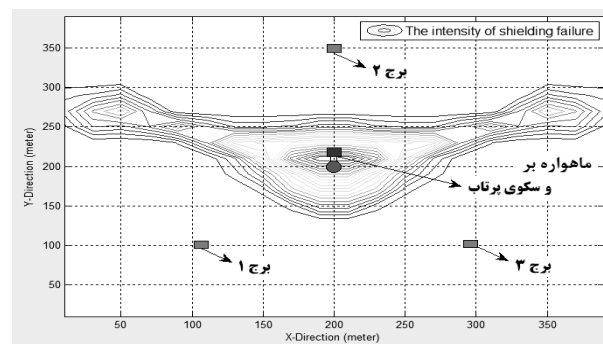
همان‌طور که ملاحظه گردید در سامانه حفاظتی قدیمی در بهترین حالت یعنی هنگامی که صاعقه‌گیر و دو سیم محافظ نصب شده باشند احتمال فرار صاعقه ۰/۱۶۱۲ صاعقه در سال است. اما این احتمال در سامانه حفاظتی جدید می‌تواند تا ۰/۰۰۲۸ صاعقه در سال کاهش یابد. نتایج شبیه‌سازی اجرا شده در این تحقیق تأییدکننده ارجحیت سامانه حفاظت جدید نسبت به سامانه قدیمی است.



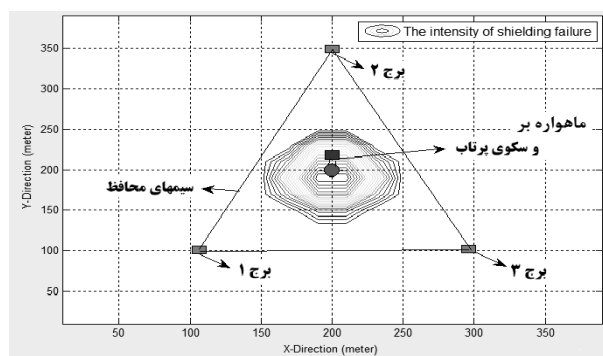
شکل (۸). شدت احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی برای میله صاعقه‌گیر مستقر بر روی سکوی پرتاب



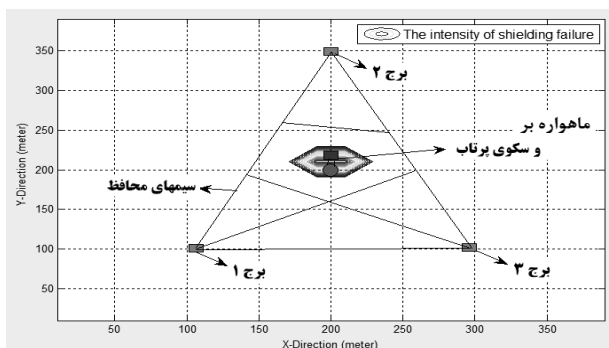
شکل (۹). شدت احتمال فرار صاعقه یک میله صاعقه‌گیر و دو سیم محافظ



شکل (۱۰). شدت احتمال فرار صاعقه برای سه برج صاعقه‌گیر



شکل (۱۱). شدت احتمال فرار صاعقه از سامانه حفاظتی برای سه برج صاعقه‌گیر و سه سیم محافظ



شکل (۱۲). شدت احتمال فرار صاعقه سه برج صاعقه‌گیر و شش سیم محافظ

جدول (۲). نتایج محاسبات مربوط به احتمال برخورد مستقیم صاعقه

نوع سیستم حفاظت	تعداد صاعقه‌های برخورد کننده به سکوی پرتاب در سال	تعداد صاعقه‌های برخورد کننده به سکوی پرتاب در سال
قدیمی	۱ میله صاعقه‌گیر	0.2816
	۱ صاعقه‌گیر و ۲ سیم محافظ	0.1612
جدید	سه برج صاعقه‌گیر	0.1244
	سه برج و ۳ سیم محافظ	0.0166
	سه برج و ۶ سیم محافظ	0.0028

## ۷- ساخت و تست نمونه آزمایشگاهی

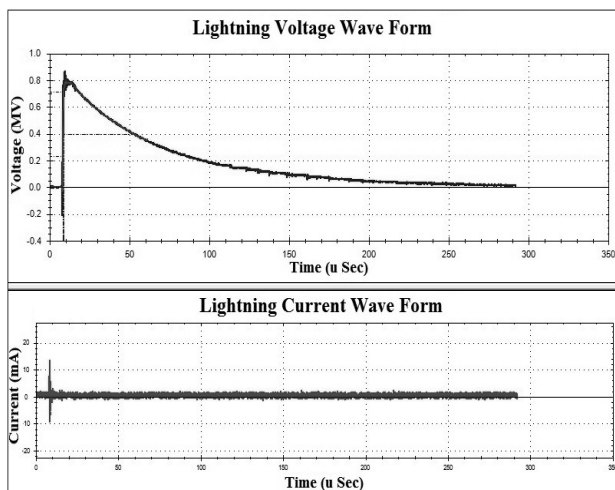
به‌منظور اطمینان از طرح سامانه حفاظت در برابر صاعقه، قبل از تقبل هزینه‌های سنگین اجرای آن باید سامانه طراحی شده ارزیابی شود. هدف این مقاله، ارائه روشی جهت ارزیابی این سامانه حفاظتی است. چنانچه بخواهیم یک ارزیابی آزمایشگاهی مقایسه‌ای از نتایج به‌دست آمده در جدول (۲) داشته باشیم باید تعداد بسیار زیادی آزمون صاعقه اجرا کنیم.

در اینجا به‌منظور ارزیابی کلی از نتایج حاصله، یک نمونه آزمایشگاهی سایت پرتاب ماهواره با سامانه‌های حفاظتی قدیمی و جدید (با نسبت ۱ به ۲۵۰) ساخته شد و در آزمایشگاه فشارقوی پژوهشگاه نیرو مورد آزمایش ضربه قرار گرفت. در این آزمایش محل شروع صاعقه در مکان‌های مختلف (از جمله نواحی آسیب‌پذیر که شدت احتمال فرار صاعقه در آن‌ها بیشتر است) قرار داده شد و نقطه برخورد مشاهده گردید. نتایج آزمایشات عملی، حاکی از وجود تطابق مناسب با نتایج شبیه‌سازی بود.

در شکل (۱۳) یک نمونه برخورد صاعقه به سامانه حفاظتی مشاهده می‌گردد. در این مورد سامانه حفاظت عملکرد مناسبی داشته است. شکل موج ضربه ایجاد شده به‌منظور تست صاعقه در شکل (۱۴) آورده شده است.



شکل (۱۳). نمونه تست صاعقه انجام شده بر روی مدل سایت پرتاب



شکل (۱۴). شکل موج صاعقه ایجاد شده به‌منظور تست مدل سایت پرتاب

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش آنالیز عددی بسیار دقیق و قدرتمند به‌منظور ارزیابی عملکرد سامانه حفاظت در برابر صاعقه پیشنهاد شده است. صاعقه، لیدرهای بالارونده از اجسام روی زمین، سایت پرتاب ماهواره و سامانه حفاظتی به‌طور کامل مدل‌سازی شده‌اند. لیدر پایین‌رونده صاعقه و لیدرهای بالارونده از اجسام روی زمین در هر موقعیتی از طریق محاسبه میانگین شدت میدان الکتریکی اطراف آن‌ها دنبال شده و محل برخورد نهایی هر صاعقه تعیین شده است. احتمال برخورد مستقیم صاعقه به سایت پرتاب ماهواره به‌ازای هر موقعیت صاعقه محاسبه شده و مقایسه عددی بین احتمال فرار صاعقه از سامانه‌های حفاظتی قدیمی و جدید صورت گرفته است. در نهایت، به‌منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی، یک نمونه سایت پرتاب در مقیاس کوچک ساخته شده و در آزمایشگاه فشارقوی تست شده است و تطابق نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمون‌های عملی صاعقه مناسب ارزیابی شده است.

## ۹- مراجع

- [1] M. Marinaki, Y. Marinakis, and C. Zopounidis, "Lightning and the Space Program," National Aeronautics and Space Administration, John F. Kennedy Space Center, Florida 32899 AC 321/867-2468, August 1998.
- [2] P. Durai Kannu and M. Joy Thomas, "Lightning induced voltages on conductors interlinking the towers of a satellite launch pad," Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, pp. 479-484, 1999.
- [3] C. T. Mata and V. A. Rakov, "Evaluation of lightning incidence to elements of a complex structure: a Monte Carlo approach," International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects, Florianopolis, Brazil, November 2008.
- [4] C. T. Mata, V. A. Rakov, T. Bonilla, A. G. Mata, E. Navedo, and G. P. Snyder, "A new comprehensive lightning instrumentation system for PAD 39B at the Kennedy Space Center Florida," International Conference on Lightning Protection 2010, Cagliari, Italy, September 2010.
- [5] C. T. Mata, A. G. Mata, V. A. Rakov, A. Nag, and J. Saul, "Evaluation of the performance characteristics of CGLSS II and U.S. NLDN using ground-truth data from Launch Complex 39B," Kennedy Space Center, Florida, International Lightning Detection Conference (ILDC), Broomfield, USA, April 2012.
- [6] C. T. Mata, J. G. Wilson, "Future Expansion of the Lightning Surveillance System at the Kennedy Space Center and the Cape Canaveral Air Force Station," Florida, USA, International Lightning Detection Conference (ILDC), Broomfield, USA, April 2012.
- [7] C. T. Mata, A. G. Mata, V. A. Rakov, A. Nag, and J. Saul, "Evaluation of the performance characteristics of CGLSS II and U.S. NLDN using ground-truth data from Launch Complex 39B," Kennedy Space Center, Florida, International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, September 2012.

- [22] F. A. M. Rizk, "Switching impulse strength of air insulation: leader inception criterion," IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 4, pp. 2187-2195, Oct. 1989.
- [23] F. A. M. Rizk, "Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes," IEEE Trans. Power Del., vol. 5, no. 4, pp. 1983-1997, Nov. 1990.
- [24] F. A. M. Rizk, "Modeling of Lightning Incidence to Tall Structures Part I: Theory," IEEE Trans. Power Del., vol. 9, no. 1, pp. 162-171, Jan. 1994.
- [25] F. A. M. Rizk, "Modeling of Lightning Incidence to Tall Structures Part II: Application," IEEE Trans. Power Del., vol. 9, no. 1, pp. 172-193, Jan. 1994.
- [26] L. Deller and E. Garbagnati, "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model Part I: Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures," IEEE Trans. Power Del., vol. 5, no. 4, pp. 2009-2022, Nov. 1990.
- [27] L. Deller and E. Garbagnati, "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model PART II: Exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs," IEEE Trans. Power Del., vol. 5, no. 4, pp. 2023-2029, Nov. 1990.
- [28] A. Berkopec and V. Valencic, "Numerical Modal of Stepped Leader growth Process in Homogeneous Dielectric," Journal of Atmospheric Electricity, vol. 21, no. 2, pp. 61-70, 2001.
- [29] J. He, Y. Tu, R. Zeng, J. B. Lee, S. H. Chang, and Z. Guan, "Numerical Analysis Model for Shielding Failure of Transmission Line Under Lightning Stroke," IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pp. 815-821, Apr 2005.
- [30] Zhou, B. Qi-Bin, and D. Ya-Ping, "Numerical analysis of the charge distribution on building structure in the preliminary breakdown phase of lightning," 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 405-408, Feb. 2006.
- [31] A. Borghetti, F. Napolitano, C. A. Nucci, M. Paolone, and M. Bernardi, "Numerical solution of the leader progression model by means of the Finite Element Method," 30th International Conference on Lightning Protection, Cagliari, Italy, September 2010.
- [32] H. Zhou, N. Theethayi, G. Diendorfer, R. Thottappillil, and V. A. Rakov, "On estimation of the effective height of towers on mountaintops in lightning incidence studies," Journal of Electrostatics, pp. 415-418, 2010.
- [33] H. He, J. He, S. Xie, and S. Yao, "Assessment of lightning shielding performance of double-circuit UHV overhead transmission lines," IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-8, Jul. 2010.
- [8] C. T. Mata, A. G. Mata, "Calculating the Lightning Protection System downconductors grounding resistance at Launch Complex 39B," Kennedy Space Center, International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, September 2012.
- [9] C. T. Mata and A. G. Mata, "Summary of 2011 Direct and Nearby Lightning Strikes to Launch Complex 39B," Kennedy Space Center, Florida, International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, September 2012.
- [10] R. H. Golde, "Lightning Protection," Edward Arnold Publishing Co., London, Britain, 1973.
- [11] M. A. Uman, The Art and Science of Lightning Protection, Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2008.
- [12] F. S. Young, J. M. Clayton, and A. R. Hileman, "Shielding of transmission lines," AIEE Trans. Power App., pp. 132-154, 1963.
- [13] H. R. Armstrong and E. R. Whitehead, "Field and analytical studies of transmission lines shielding," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-87, no. 1, pp. 270-281, Jan. 1968.
- [14] G. W. Brown and E. R. Whitehead, "Field and analytical studies of transmission lines shielding: part II," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-88, no. 3, pp. 617-626, Mar. 1969.
- [15] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kraninger, "Parameters of Lightning Flashes," Electra, no. 41, pp. 23-37, Jul. 1975.
- [16] E. R. Love, "Improvements on Lightning Stroke Modeling and Applications to Design of EHV and UHV Transmission Lines," M.Sc. Thesis, Univ. Colorado, Denver, CO, 1973.
- [17] A. M. Mousa and K. D. Srivastava, "The implications of the electrogeometric model regarding effect of height of structure on the median amplitude of collected lightning strokes," IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 2, pp. 1450-1460, Apr. 1989.
- [18] T. Horvath, "Computation of Lightning Protection," London, U.K. Research Studies Press, 1991.
- [19] A. J. Eriksson, "The incidence of lightning strikes to power lines," IEEE Trans. Power Del., vol. 2, no. 3, pp. 859-870, Jul. 1987.
- [20] A. J. Eriksson, "An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis," IEEE Trans. Power Del., vol. 2, no. 3, pp. 871-886, Jul. 1987.
- [21] A. M. Mousa, "Failure of the Collection Volume Method and Attempts of the ESE Lightning Rod Industry to Resurrect it," Journal of Lightning Research, vol. 4, pp. 118-128, 2012.

- [43] N. H. Malik, "A review of the charge simulation method and its application," *IEEE Trans. Elect. Insul.*, vol. 24, no. 1, pp. 3–20, Feb. 1989.
- [44] H. He, J. He, S. Xie, and S. Yao, "Assessment of lightning shielding performance of double-circuit UHV overhead transmission lines," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, 25-29 Jul. 2010.
- [45] D. Zheng, M. Chen, Y. Zhang, and W. Lu, "A new method for the calculation of the linear charge density and current in upward positive leader," *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1526-1529, 12-16 Apr. 2010.
- [46] H. He, J. He, and S. Xie, "Experimental study on the positive upward leader inception condition of horizontal conductors," *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, pp. 1-5, 2-7 Sept. 2012.
- [47] U. Kumar, P. K. Bokka, and J. Padhi, "A Macroscopic Inception Criterion for the Upward Leaders of Natural Lightning," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 904-911, Apr. 2005.
- [48] M. Becerra and V. Cooray, "A Simplified Physical Model to Determine the Lightning Upward Connecting Leader Inception," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 2, pp. 897-908, Apr. 2006.
- [49] H. Wei, W. Linghui, and W. Ying, "Influence of developing velocity of lightning leader on the electric field distribution," *10th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory*, pp. 1048-1051, 22-26 Oct. 2012.
- [50] M. Becerra, and V. Cooray, "On the velocity of lightning upward connecting positive leaders," *IX International Symposium on Lightning Protection*, Nov. 2007.
- [51] R. H. Golde, "Lightning and tall structures," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 125, pp. 347–351, Apr. 1978.
- [34] Y. Xu and M. Chen, "An improved 3-D self-consistent stochastic stepped leader model," *7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*, pp. 699-705, 1-4 Nov. 2011.
- [35] Y. Xu and M. Chen, "Striking distance calculation for flat ground and lightning rod by a 3D self-organized Leader Propagation Model," *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, pp. 1-5, 2-7 Sept. 2012.
- [36] B. Vahidi, M. Yahyaabadi, M. R. Bank Tavakoli, and S. M. Ahadi, "Leader Progression Analysis Model for Shielding Failure Computation by Using Charge Simulation Method," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 2201-2206, Oct. 2008.
- [37] M. Yahyaabadi, B. Vahidi and M. R. Bank Tavakoli, "Estimation of shielding failure number of different configurations of double-circuit transmission lines using leader progression analysis model," *Electrical Engineering*, vol. 92, no. 2, pp. 79-85, Jul. 2010.
- [38] M. R. Bank Tavakoli and Behrooz Vahidi, "Transmission-Lines Shielding Failure-Rate Calculation by Means of 3-D Leader Progression Models," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, no. 2, pp. 507-516, Apr. 2011.
- [39] M. R. Bank Tavakoli and B. Vahidi, "A Metamodeling Approach for Leader Progression Model-based Shielding Failure Rate Calculation of Transmission Lines Using Artificial Neural Networks," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 6, no. 6, pp. 760-768, 2011.
- [40] M. Yahyaabadi and B. Vahidi, "Estimation of shielding failure number of transmission lines for different trace configurations using leader progression analysis," *Electrical Power and Energy Systems* 38, pp. 27–32, 2012.
- [41] H. Singer, H. Steinbigler, and P. Weiss, "A charge simulation method for the calculation of high voltage fields," *IEEE Power Apparatus and Systems*, pp. 1660-1668, 1974.
- [42] Yializis, E. Kuffel, and P. H. Alexander, "An optimized charge simulation method for the calculation of high voltage fields," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 97, no. 6, pp. 2434–2438, Dec. 1978.