

مدل سازی و آنالیز عملکرد صاعقه گیر دکل های مخابراتی به منظور هماهنگی سیستم حفاظت با شرایط محیطی

مصطفی یحیی آبادی و علیرضا صدوقی

دقیق مسأله و افزایش تعداد نمونه‌ها می‌توان به دقت‌های بالا دست یافت. در سال‌های ۱۹۸۹ و ۱۹۹۰، مدل انتشار گام به گام لیدر^۱ صاعقه توسط Rizk [۱۱] تا [۱۴] و Dellera و Garbagnati [۱۵] و [۱۶] پیشنهاد شد و محققین زیادی به منظور شبیه‌سازی حرکت صاعقه و تعیین نقطه برخورد نهایی آن از این روش استفاده نموده و سعی در بهبود آن داشتند [۱۷] تا [۲۴].

شایان ذکر است به منظور شبیه‌سازی پروسه انتشار لیدر پایین‌رونده صاعقه و همچنین لیدرهای بالارونده در اکثر فعالیت‌های انجام شده از روش بارهای فرضی^۲ به عنوان یک روش آنالیز عددی قدرتمند استفاده شده است [۲۵] تا [۲۷].

از جمله فعالیت‌های قابل توجه در این زمینه می‌توان به مدل‌سازی و محاسبات سیستم حفاظت در برابر صاعقه مربوط به سایت‌های پرتاب ماهواره در سال ۲۰۰۳ توسط Kumar [۱۷] و همچنین شبیه‌سازی‌های دوبعدی خطوط انتقال به منظور محاسبات احتمال فرار صاعقه از سیم‌های گارد در سال ۲۰۰۵ توسط J. He [۱۸] اشاره نمود.

شبیه‌سازی پروسه انتشار گام به گام صاعقه در فضای سه‌بعدی نیز برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ و به منظور حفاظت خطوط انتقال فشار قوی در برابر صاعقه انجام گردید و در سال‌های بعد توسعه داده شد [۲۸] تا [۳۲].

به دلیل طبیعت احتمالی صاعقه، پیشگیری از برخورد آن و حفاظت کامل تجهیزات امری بسیار پیچیده، دشوار و تا حدودی غیر عملی است. اما سیستم حفاظت در برابر صاعقه در صورتی که به طور مناسب طراحی شود می‌تواند تا حد قابل قبولی احتمال برخورد صاعقه به تجهیزات را کاهش دهد. در اکثر موارد رفتار صاعقه به گونه‌ای است که به بلندترین نقطه جسم، برج یا تجهیز برخورد می‌نماید اما در بسیاری موارد نشان داده شده که صاعقه می‌تواند به میانه برج نیز برخورد کند و به اصطلاح از سیستم حفاظتی فرار کند [۳۳].

نکته قابل توجه در مورد میله صاعقه‌گیر این است که فقط باید صاعقه‌هایی را به سمت خود جذب کند که تهدیدی برای آنتن و تجهیزات مورد حفاظت به حساب می‌آیند. در حالی که افزایش بیش از حد ارتفاع میله صاعقه‌گیر صاعقه‌های دوردست با دامنه جریان بالا را به سمت صاعقه‌گیر جذب می‌نماید و این امر به نوبه خود باعث ایجاد مشکلات در عایق‌ها در هنگام تخلیه صاعقه به زمین و همچنین تولید میدان‌های الکترومغناطیسی مخرب خواهد شد.

در این مقاله به منظور ارزیابی هماهنگی سیستم حفاظت در برابر صاعقه با شرایط مختلف محیطی به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد سیستم حفاظتی برج‌های مخابراتی پرداخته شده است. بدین

چکیده: در این مقاله عوامل مختلفی که می‌توانند بر عملکرد حفاظتی دکل‌های مخابراتی در برابر صاعقه مؤثر باشند مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله این عوامل می‌توان به محل نصب دکل از نظر شیب زمین، پستی و بلندی‌های اطراف و قرارگیری روی تپه و بلندی یا نزدیک و دور بودن از ساختمان‌ها و درختان بلند اشاره نمود. شرایط آب و هوایی مانند بارندگی و رطوبت نیز از طریق تغییر ولتاژ شکست الکتریکی هوا عملکرد حفاظتی صاعقه‌گیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در اینجا از یک مدل آنالیز عددی مبتنی بر تئوری بارهای فرضی برای به دست آوردن احتمال فرار صاعقه از صاعقه‌گیر و برخورد مستقیم آن به آنتن استفاده شده است. بدین منظور لیدر پایین‌رونده صاعقه، دکل مخابراتی، آنتن، صاعقه‌گیر و لیدرهای بالارونده از اجسام روی زمین به صورت سه‌بعدی و با در نظر گرفتن اثر زمین شبیه‌سازی شده‌اند. به ازای تمام فضای بالای دکل مخابراتی و هر جریان صاعقه، مسیر انتشار صاعقه به صورت گام به گام دنبال شده تا محل برخورد نهایی مشخص شود. بدین ترتیب محدوده صاعقه‌های برخوردکننده به آنتن و عملکرد سیستم حفاظتی تعیین شده است. این پروسه در شرایط مختلف تکرار شده و در هر مورد نتایج حاصل، بررسی و تحلیل شده‌اند.

کلید واژه: دکل مخابراتی، آنتن، روش بارهای فرضی، صاعقه‌گیر، لیدر بالارونده.

۱- مقدمه

صاعقه‌گیر دکل‌های مخابراتی و رادیویی وظیفه دارد صاعقه را به سمت خود جذب نموده و از برخورد مستقیم آن به آنتن و تجهیزات جلوگیری نماید. سیستم حفاظت در برابر صاعقه باید بدون این که به دکل و آنتن‌های نصب‌شده روی آن آسیب برسد، جریان صاعقه را وارد زمین نماید و بنابراین سیستم حفاظت در برابر صاعقه از ایجاد صاعقه جلوگیری نمی‌کند، بلکه آن را تحت کنترل به سمت خود جذب نموده و با وارد کردن انرژی صاعقه به زمین از آسیب‌های احتمالی جلوگیری می‌نماید [۱] تا [۴].

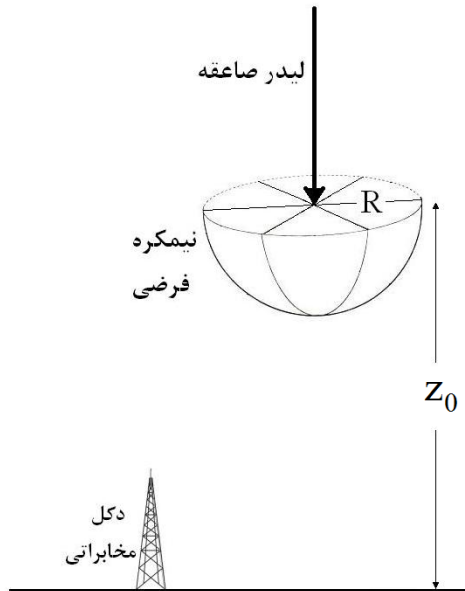
به منظور ارزیابی عملکرد سیستم حفاظت در برابر صاعقه، روش‌های تحلیلی بسیاری پیشنهاد شده است. در این روش‌های تحلیلی محاسبه احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی عمدتاً توسط روابط هندسی صورت می‌گیرد لیکن این روابط معمولاً دارای تقریب‌های ساده‌کننده هستند و بنابراین ممکن است در برخی موارد نتوانند کلیه نیازها را برطرف کنند و در واقع پاسخ‌هایی که به دست می‌دهند تا حدودی آمیخته با تقریب است [۵] تا [۱۰]. این در حالی است که در روش‌های آنالیز عددی با مدل‌سازی

این مقاله در تاریخ ۲۸ اردیبهشت ماه ۱۳۹۳ دریافت و در تاریخ ۸ آذر ماه ۱۳۹۳ بازنگری شد.

مصطفی یحیی آبادی، دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، اصفهان، (email: yahyaabadi_aut@yahoo.com).

علیرضا صدوقی، استادیار دانشکده برق و اویونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، اصفهان، (email: Sadoughi@mut-es.ac.ir).

1. Leader Progression Model
2. Charge Simulation Method



شکل ۲: نیم کره فرضی برای تعیین مسیر لیدر صاعقه.

گردد. در این شبیه سازی تعداد بارهای فرضی حلقوی برای دکل مخابراتی ۵۰ عدد و تعداد بارهای فرضی خطی برای آنتن و صاعقه گیر به ترتیب ۲۰ و ۲۴ عدد در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب زمان اجرای برنامه با یک کامپیوتر شخصی با مشخصات CPU Core i۵ ۲٫۶۷ GHz و CPU RAM ۲ GB در حدود ۶ ساعت است. با افزایش تعداد بارهای حلقوی دکل به ۸۰ عدد زمان اجرا به بیش از ۲۰ ساعت افزایش یافت.

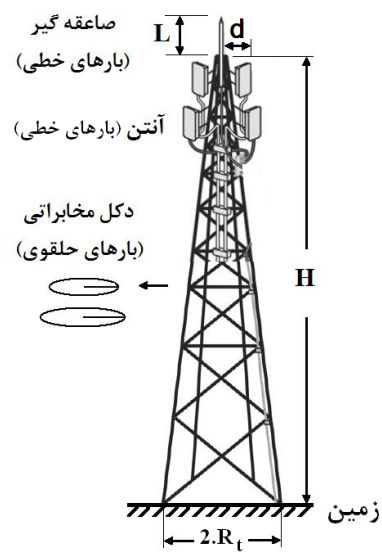
با توجه به ابعاد یک دکل مخابراتی موجود که در واقع هدف طراحی سیستم حفاظت آن بوده است، ارتفاع دکل مخابراتی (H) برابر ۹۱ متر، فاصله بالاترین نقطه آنتن تا مرکز دکل (d) برابر ۲ متر و شعاع پایه دکل (R_t) برابر ۵/۵ متر در نظر گرفته شده و ارتفاع صاعقه گیر نیز L می باشد.

۳- فرآیند انتشار صاعقه و برخورد نهایی

برج های مخابراتی بر حسب ضرورت در مناطق مختلف جغرافیایی نصب می شوند و همواره در معرض برخورد صاعقه قرار دارند. این امر بسیاری از محققین را بر آن داشته تا به منظور بهبود عملکرد سیستم های حفاظت در برابر صاعقه، تحقیقات خود را روی پروسه انتشار صاعقه تا مراحل برخورد نهایی آن متمرکز نمایند.

در این مقاله شبیه سازی مسیر انتشار لیدر پایین رونده صاعقه و پروسه پیشروی تا برخورد نهایی آن به صورت مرحله به مرحله انجام می گیرد. نقطه آغاز لیدر پایین رونده صاعقه همان طور که در [۷] آمده است باید از جایی که اثر اشیای روی زمین در آنجا قابل نظر است، یعنی بالاتر از دو برابر ارتفاع بلندترین نقطه جسم شروع گردد. در این مقاله ارتفاع شروع شبیه سازی به منظور بررسی تأثیر عوامل مختلف بر مسیر حرکت لیدر پایین رونده صاعقه ۲/۵ برابر ارتفاع دکل مخابراتی در نظر گرفته شده تا تغییرات در ارتفاع صاعقه گیر را نیز پوشش دهد.

ابرها در ارتفاع ۲۰۰۰ متری فرض شده اند و مسیر حرکت لیدر پایین رونده صاعقه از ابر تا نقطه شروع شبیه سازی به صورت پاره خط مستقیم عمودی و با چگالی بار متغیر در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج آزمایشات و نیز مشاهدات ثبت شده طول گام لیدر صاعقه (شعاع R در شکل ۲) در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ متر متغیر و متوسط آن حدود ۵۰ متر است و در نزدیکی زمین این طول گام به حدود ۱۰ متر خواهد رسید [۳۴].



شکل ۱: مدل سازی دکل به همراه آنتن و صاعقه گیر.

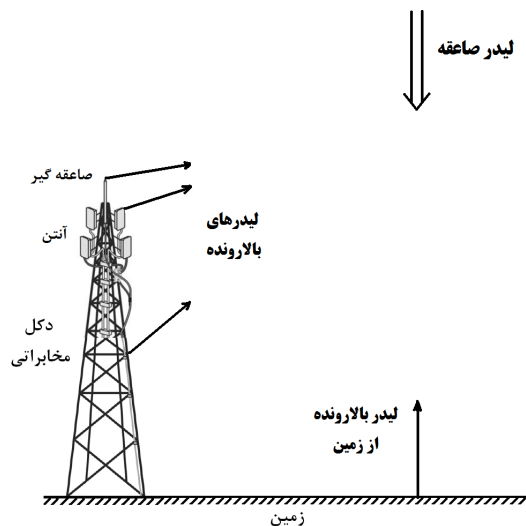
منظور یک مدل آنالیز عددی در فضای سه بعدی پیشنهاد شده است و شبیه سازی پروسه انتشار صاعقه، لیدرهای بالارونده، دکل مخابراتی، آنتن ها و تجهیزات و همچنین صاعقه گیر با در نظر گرفتن اثر زمین و اشیای اطراف با استفاده از روش بارهای فرضی در محیط نرم افزار Matlab انجام شده است.

از روش انتشار گام به گام لیدر صاعقه به منظور تعیین مسیر حرکت لیدر پایین رونده استفاده شده است. فضای مسأله به صورت سه بعدی مدل شده و همچنین لیدرهای بالارونده مورد مدل سازی قرار گرفته اند. پس از شروع هر لیدر بالارونده، مسیر حرکت آن به صورت گام به گام و هم زمان با حرکت لیدر پایین رونده دنبال می شود. بدین ترتیب در هر گام لیدر صاعقه و لیدرهای بالارونده رشد می کنند و به یکدیگر نزدیک می شوند. فاصله دقیق نوک لیدرهای پایین رونده و بالارونده و همچنین اختلاف پتانسیل بین لیدرها اندازه گیری شده و شرایط برخورد نهایی سنجیده می شود. در صورتی که شدت میدان الکتریکی از شدت میدان الکتریکی شکست بحرانی هوا بیشتر شود، برخورد صورت خواهد گرفت. در این تحقیق به صورت جامع به مسأله حفاظت آنتن های مخابراتی در برابر صاعقه پرداخته شده و لذا مطالعات صورت گرفته منحصر به فرد است. در نهایت نتایج حاصل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۲- مدل سازی دکل، آنتن ها و صاعقه گیر

به منظور محاسبه میدان الکتریکی در محیط مورد مطالعه نیاز است تا دکل مخابراتی، آنتن ها و صاعقه گیر با شکل مناسبی از بارهای فرضی مدل شوند. مقادیر این بارهای فرضی باید به نحوی تعیین گردد که شرایط مرزی در نقاط مشخص برآورده گردد.

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده، دکل از بارهای فرضی حلقوی تشکیل شده که در راستای ارتفاع دکل روی یکدیگر قرار گرفته اند. شعاع این بارهای فرضی حلقوی متناسب با شعاع دکل در هر نقطه (برابر ۰/۹ شعاع دکل) و فاصله آنها از یکدیگر مساوی در نظر گرفته شده و صاعقه گیر نیز با بارهای فرضی خطی مدل شده است [۲۸] تا [۳۲]. شایان ذکر است هرچه تعداد بارهای فرضی بیشتر باشد بر دقت محاسبات افزوده شده ولی سرعت محاسبه کاهش خواهد یافت. به طوری که افزایش بیش از حد تعداد بارهای فرضی می تواند باعث کاهش قابل توجه سرعت محاسبات و افزایش بیش از حد زمان اجرای شبیه سازی



شکل ۴: انتشار لیدرهای بالارونده از اشیای روی زمین.

که $m_1 = 1,476 \times 10^{-5}$ ، $m_2 = 4,857 \times 10^{-5}$ ، $m_3 = 3,9097 \times 10^{-6}$ ، $m_4 = 0,522$ ، $m_5 = 3,73 \times 10^{-7}$ ، ارتفاع نوک لیدر صاعقه نسبت به زمین به متر، H_C ارتفاع ابر به متر، I جریان صاعقه بر حسب کیلوآمپر، ρ چگالی بار الکتریکی صاعقه بر حسب کولن بر متر و z ارتفاع نقطه‌ای روی لیدر صاعقه است که چگالی بار الکتریکی در آن نقطه محاسبه می‌گردد.

بار الکتریکی لیدرهای بالارونده نیز بر اساس پیشنهاد [۱۴] و [۱۵] به صورت خطی و برابر ۵۰ میکروکولن بر متر در نظر گرفته شده است.

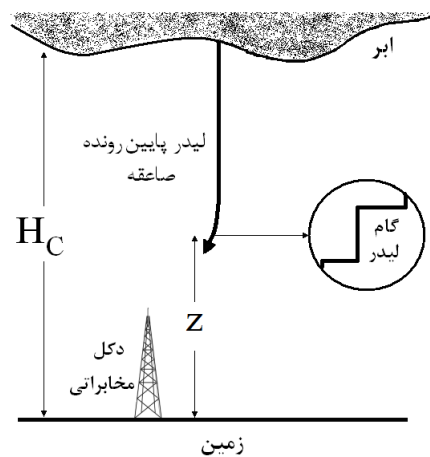
۳-۲ معیار شروع لیدر بالارونده

در حین شکل‌گیری صاعقه در قسمت بالایی اجسام روی زمین، مانند درختان، ساختمان‌ها و دکل‌های بلند شدت میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. لذا هوای اطراف این نقاط یونیزه شده و لیدرهای بالارونده از سطح زمین شروع به حرکت می‌کنند.

به منظور ارزیابی دقیق و قابل اطمینان رفتار صاعقه و همچنین ارزیابی قابلیت و توانایی سیستم حفاظتی در جلوگیری از برخورد صاعقه لیدرهای بالارونده از اشیای روی زمین می‌بایست مورد توجه قرار گرفته و با دقت بررسی شوند [۳۵] و [۳۶].

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

در این مقاله، معیار شروع لیدر بالارونده از نقاط مختلف اجسام روی زمین مطابق [۳۵] در نظر گرفته شده است. بدین صورت که یک نیم‌کره فرضی به مرکز نقطه مورد بررسی و به شعاع ۲/۲ متر در گرفته می‌شود. اگر شدت میدان الکتریکی در این فاصله به ۴۰۰ کیلوولت بر متر برسد، لیدر بالارونده از آن نقطه شروع خواهد شد و در جهتی که بیشترین گرادیان ولتاژ را دارد حرکت خواهد نمود. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده، نقاط منتخبی که به منظور ارزیابی معیار شروع لیدر بالارونده در نظر گرفته شده‌اند عبارتند از (۱) نوک صاعقه‌گیر، (۲) بالاترین نقطه آنتن، (۳) میانه دکل مخابراتی و (۴) زمین زیر لیدر صاعقه.



شکل ۳: مدل لیدر پایین‌رونده صاعقه.

در این شبیه‌سازی طول هر گام لیدر پایین‌رونده صاعقه از نقطه شروع شبیه‌سازی تا هنگام برخورد نهایی برابر ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. این طول گام به منظور اطمینان‌داشتن از تطبیق محاسبات با نتایج تحقیقات آزمایشگاهی در مورد شکست فواصل هوایی طولانی و افزایش دقت محاسبات انتخاب شده است. هنگامی که گام لیدر صاعقه بزرگ‌تر انتخاب شود، ممکن است مسیر صاعقه به خوبی تعیین نگردد. به عنوان مثال صاعقه با گام ۱۰ متری بهتر از گام ۵۰ متری می‌تواند مسیر منحنی‌وار خود را طی نماید زیرا رشد آن به صورت تدریجی خواهد بود. همچنین توزیع بار الکتریکی روی گام‌های قبلی می‌تواند بر تعیین مسیر گام بعدی مؤثر باشد.

مسیر لیدر پایین‌رونده صاعقه در هر گام در جهتی است که گرادیان ولتاژ ماکسیمم است. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در هر مرحله یک نیم‌کره فرضی در زیر لیدر صاعقه، به مرکز نوک آن و شعاع R (برابر با طول گام لیدر صاعقه) در نظر گرفته می‌شود. سپس شدت میدان الکتریکی روی این نیم‌کره فرضی محاسبه می‌شود و مسیر لیدر صاعقه به سمت نقطه‌ای تعیین خواهد شد که بیشترین شدت میدان الکتریکی را دارد. بدین ترتیب مسیر حرکت لیدر پایین‌رونده صاعقه به صورت گام به گام تعیین می‌گردد.

۳-۱ بار الکتریکی لیدرهای پایین‌رونده و بالارونده

همان طور که اشاره شد مسیر حرکت لیدر پایین‌رونده صاعقه از زیر ابر تا نقطه ابتدای شروع شبیه‌سازی به صورت مستقیم و عمودی است. پس از آن مطابق شکل ۳ هر گام لیدر پایین‌رونده صاعقه با بارهای خطی عمودی و افقی مدل می‌شود. از آنجایی که شبیه‌سازی در فضای سه‌بعدی انجام می‌پذیرد، لذا هر گام لیدر پایین‌رونده با سه بار خطی در جهت‌های x ، y و z مدل می‌شود. بدین ترتیب با پیشروی گام به گام لیدر پایین‌رونده صاعقه بر تعداد بارهای الکتریکی افزوده می‌گردد.

چگالی بار الکتریکی لیدر پایین‌رونده صاعقه در هر گام با استفاده از (۱) که مبتنی بر اندازه‌گیری‌های الکترواستاتیک شکل موج‌های جریان صاعقه است محاسبه می‌شود [۲۲]

$$\rho(z) = I \left\{ m_1 \left(1 - \frac{z - z_1}{H_C - z_1} \right) \left(1 - \frac{z}{H_C} \right) + \frac{m_1 + m_2 (z - z_1)}{1 + m_2 (z - z_1) + m_3 (z - z_1)^2} \times \left[0,7 e^{\frac{1-z}{10}} + 0,7 \left(1 - \frac{z}{H_C} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

۳-۳ سرعت انتشار لیدرهای پایین‌رونده و بالارونده

هم‌زمان با شکل‌گیری لیدرهای بالارونده، این لیدرها حرکت خود را به سمت لیدر صاعقه شروع می‌کنند و سعی در رسیدن به آن و بستن مسیر خود دارند. وقتی یک لیدر بالارونده موفق به برخورد با لیدر پایین‌رونده صاعقه شود یک مسیر هادی بزرگ بین مرکز ابر و زمین ایجاد می‌شود و جریان صاعقه بین ابر و زمین برقرار می‌گردد. نقطه برخورد لیدر پایین‌رونده صاعقه با لیدر بالارونده به سرعت هر دو لیدر بستگی دارد.

لیدر پایین‌رونده صاعقه با سرعتی در حدود 8×10^4 تا 3.9×10^6 متر بر ثانیه [۳۷] و معمولاً بدون تأثیر گرفتن از عوامل روی زمین منتشر می‌شود. این در حالی است که لیدرهای بالارونده تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی ایجادشده توسط لیدر پایین‌رونده می‌باشند و به طور کلی مشخصات اصلی آنها (جریان، گرادیان ولتاژ و سرعت انتشار) بستگی به جریان و سرعت حرکت لیدر پایین‌رونده دارد.

لیدر بالارونده در ابتدا و در هنگامی که هنوز میدان الکتریکی جهت ادامه لیدر به اندازه کافی قدرتمند نیست (400 کیلوولت بر متر [۱۷]) با سرعتی کمتر از 2×10^4 متر بر ثانیه [۳۷] انتشار می‌یابد. شکل‌گیری و حرکت این لیدرهای بالارونده ممکن است منجر به برخورد نهایی صاعقه نگردد اما وقتی میدان الکتریکی به اندازه کافی قدرتمند شد، سرعت حرکت لیدر بالارونده می‌تواند تا 1.4×10^6 متر بر ثانیه [۳۷] افزایش یابد. این افزایش سرعت تا وقتی که برخورد نهایی با لیدر پایین‌رونده صاعقه صورت گرفته و مسیر جریان صاعقه بسته شود ادامه می‌یابد.

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 را سرعت انتشار لیدرها مشخص می‌نماید. Eriksson [۸] و [۹] سرعت حرکت لیدرهای پایین‌رونده و بالارونده را برابر فرض کرده است. Dellera در [۱۵] و [۱۶] نسبت سرعت لیدر پایین‌رونده به لیدر بالارونده را در ابتدا برابر ۴ در نظر گرفته و فرض کرده که این نسبت به مرور کاهش می‌یابد تا وقتی که در هنگام برخورد نهایی برابر یک خواهد شد اما در مورد روند این تغییر اشاره‌ای نکرده است. Rizk [۱۱] تا [۱۴] نیز در شبیه‌سازی‌هایی که انجام داده همواره سرعت لیدرهای پایین‌رونده و بالارونده را برابر فرض کرده است. در این مقاله طول گام لیدرهای بالارونده برابر با طول گام لیدر پایین‌رونده در نظر گرفته شده و بدین ترتیب مسافت طی‌شده توسط لیدر پایین‌رونده و بالارونده در هر مرحله برابر و به عبارت دیگر سرعت لیدرها مساوی است.

۳-۴ برخورد نهایی صاعقه

همان‌طور که اشاره شد مسیر لیدر پایین‌رونده به صورت گام به گام دنبال شده و در هر مرحله شرایط آغاز لیدرهای بالارونده از اشیای روی زمین ارزیابی می‌شود. در صورتی که شرط آغاز لیدر بالارونده در نقطه یا نقاطی فراهم شود، لیدر بالارونده از آن نقطه یا نقاط حرکت نموده و مسیر حرکت آن در گام‌های بعدی دنبال خواهد شد. علاوه بر این در هر مرحله شدت میدان الکتریکی بین نوک لیدر صاعقه و نوک هر یک از لیدرهای بالارونده از دکل، صاعقه‌گیر، آنتن و زمین بررسی شده و در صورتی که شدت میدان الکتریکی بین نوک لیدر پایین‌رونده صاعقه و نوک یکی از لیدرهای بالارونده از شدت میدان الکتریکی شکست بحرانی هوا (500 کیلوولت بر متر [۱] و [۳۸]) بیشتر شود، صاعقه به آن جسم برخورد خواهد نمود.

دو نکته در بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی صاعقه با جریان‌های

مختلف و در موقعیت‌های مکانی متفاوت مشاهده شد که عبارتند از:

- صاعقه‌های با جریان کم و در موقعیت مکانی نزدیک به دکل مخابراتی می‌توانند از صاعقه‌گیر فرار کرده و به آنتن برخورد کنند.
- صاعقه‌های در موقعیت مکانی دور و با جریان کم و یا بعضاً زیاد از کنار لیدرهای بالارونده از صاعقه‌گیر و آنتن عبور کرده و بدون برخورد به آنها مسیر خود را تا برخورد به زمین ادامه می‌دهند.
- بنابراین در مراحل متوالی حرکت لیدر پایین‌رونده و همچنین در هنگام آغاز و حرکت لیدرهای بالارونده، همواره می‌بایست فاصله مکانی نوک لیدرها نسبت به یکدیگر و نیز نسبت به تجهیزات محاسبه گردد. در صورتی که قبل از برآورده‌شدن معیار برخورد نهایی فاصله لیدر پایین‌رونده از یکی از لیدرهای بالارونده و یا تجهیزات نصب‌شده کمتر از فاصله‌ای معین گردد، صاعقه به آن جسم برخورد خواهد نمود که به این فاصله، فاصله بحرانی برخورد می‌گویند. از سوی دیگر اگر صاعقه به حرکت خود ادامه داده و ارتفاع نوک لیدر پایین‌رونده از ارتفاع لیدر بالارونده از صاعقه‌گیر و آنتن کمتر شود و برخوردی بین لیدرها اتفاق نیافتد، شبیه‌سازی ادامه داده نخواهد شد و برخورد صاعقه با زمین در نظر گرفته می‌شود [۳۸]. در این مقاله فاصله بحرانی برخورد از روابط هندسی روش EGM¹ محاسبه می‌گردد [۱۸].

۴- نحوه محاسبه محدوده جریان برخوردکننده به آنتن

به طور کلی صاعقه‌های با جریان بالا معمولاً جذب بالاترین نقطه یا همان نوک صاعقه‌گیر می‌شوند و مشکل خاصی ایجاد نمی‌کنند. صاعقه‌های با جریان کم نیز بدون این که جذب صاعقه‌گیر شوند یا به تجهیزات اصابت کنند به طور مستقیم حرکت نموده و به زمین برخورد می‌کنند. بنابراین آنچه مشکل‌ساز می‌شود صاعقه‌هایی است با جریان‌هایی نه چندان زیاد و نه چندان کم که از سیستم حفاظتی فرار کرده و به تجهیزات برخورد می‌نمایند. تعیین محدوده این جریان‌های تهدیدکننده تجهیزات، چالش اصلی در محاسبات احتمال برخورد صاعقه است. هنگام استفاده از روش انتشار گام به گام لیدر صاعقه به منظور شبیه‌سازی مسیر حرکت صاعقه و تعیین نقطه برخورد آن به صاعقه‌گیر دکل مخابراتی، آنتن یا زمین به موارد ذیل باید توجه داشت:

- اگر مسیر صاعقه‌ای با جریان I_b که از موقعیت خاص x و y می‌گذرد، دنبال شده و نهایتاً به صاعقه‌گیر برخورد کند و به عبارت دیگر توسط سیستم حفاظتی جذب شود، می‌توان نتیجه گرفت که تمام صاعقه‌های با جریان بیشتر از آن و گذرنده از همان موقعیت مکانی به صاعقه‌گیر برخورد خواهند نمود.

- اگر مسیر صاعقه‌ای با جریان I_a که از موقعیت خاص x و y می‌گذرد، دنبال شده و نهایتاً به زمین برخورد کند و به عبارت دیگر توسط سیستم حفاظتی، دکل مخابراتی و آنتن جذب نشود، می‌توان نتیجه گرفت که تمام صاعقه‌های با جریان کمتر از آن و گذرنده از همان موقعیت مکانی به زمین برخورد خواهند نمود.

بدین ترتیب به ازای هر موقعیت خاص قرارگیری صاعقه، محدوده محتمل جریان برخوردکننده به آنتن $[I_a, I_b]$ می‌باشد و جریان‌های بالاتر از I_b به صاعقه‌گیر و جریان‌های کمتر از I_a به زمین برخورد خواهند نمود. بدین ترتیب سیستم حفاظت بهینه باید به گونه‌ای طراحی گردد که این محدوده جریان به ازای تمام موقعیت‌های ممکن صاعقه حداقل گردد.

$$I_{a(n+1)} = \frac{I_{\min} + I_{a(n)}}{2} \quad (4)$$

$$I_{b(n+1)} = \frac{I_{b(n)} + I_{\max}}{2} \quad (5)$$

شایان ذکر است در هر مرحله $I_{a(n+1)}$ ممکن است به زمین یا به آنتن برخورد نماید و $I_{b(n+1)}$ می‌تواند به صاعقه‌گیر و یا آنتن برخورد نماید. فلذا در هر حالت فرایندهای اشاره‌شده در حالات سه‌گانه فوق تا یافتن محدوده جریان $[I_a, I_b]$ با دقت مورد نظر دنبال می‌شوند.

۵- محاسبه احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی

در شکل ۵ تصویر یک دکل مخابراتی و صاعقه‌گیر آن آمده که فضای بالای این دکل به مش‌های مربعی تقسیم‌بندی شده است. محدوده این مش‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شود که صاعقه‌های خارج از این محدوده با هر جریانی به زمین برخورد نمایند و در واقع با اطمینان بتوان گفت که تمام صاعقه‌های برخوردکننده به دکل و صاعقه‌گیر که تهدیدی برای آنتن و تجهیزات به شمار می‌روند از این مش‌ها شروع خواهند شد. وقتی نوک لیدر صاعقه در موقعیت k (مش هاشورخورده با طول dx و پهنای dy) قرار گرفت، می‌توان احتمال برخورد آن به آنتن را محاسبه نمود. بدین منظور محدوده جریان صاعقه برخوردکننده به آنتن $[I_a, I_b]$ به دست می‌آید و با استفاده از رابطه ذیل احتمال فرار صاعقه از صاعقه‌گیر و برخورد آن به آنتن به ازای قرارگیری صاعقه در مش k ام (SFN_k) محاسبه می‌شود [۲۸]

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

که T_d تعداد روزهای صاعقه‌ای در سال است که برابر ۴۰ روز در سال در نظر گرفته شده، γ احتمال بروز صاعقه می‌باشد که برابر 0.15 صاعقه بر کیلومتر مربع بر روز صاعقه‌ای در نظر گرفته شده [۱۸] و A مساحت مش k ام بر حسب متر مربع می‌باشد

$$A = dx \cdot dy \quad (7)$$

$P(I)$ احتمال تجمعی جریان‌های صاعقه تجاوزکننده از I می‌باشد که می‌تواند به وسیله فرمول تقریبی زیر محاسبه شود [۱۸]

$$\log_e P(I) = 0.05 - \frac{I}{74} \quad (8)$$

در این رابطه I دامنه جریان صاعقه در واحد kA است. در نهایت احتمال برخورد صاعقه به دکل در سال (SFN_T) حاصل جمع SFN_k های مربوط به تمامی مش‌هاست

$$SFN_T = \sum_{k=1}^n SFN_k \quad (9)$$

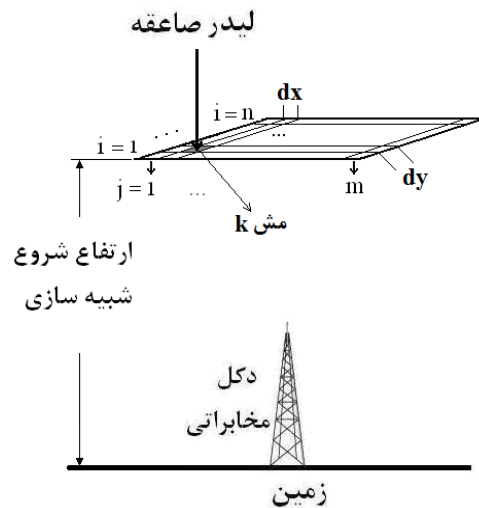
۶- نتایج مدل آنالیز عددی

در این بخش نتایج مدل آنالیز عددی عملکرد سیستم حفاظت در برابر صاعقه در شرایط مختلف ارائه شده است.

۶-۱ احتمال برخورد صاعقه به آنتن و زاویه حفاظت

بهینه

احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی (صاعقه‌گیر) و برخورد آن به آنتن و تجهیزات به ازای مقادیر مختلف ارتفاع صاعقه‌گیر (L) محاسبه



شکل ۵: مدل آنالیز عددی محاسبه احتمال فرار صاعقه.

یکی از روش‌های محاسبه محدوده جریان برخوردکننده به آنتن، بررسی تمام جریان‌های ممکن صاعقه در محدوده $[I_{\min}, I_{\max}]$ به طور پیوسته می‌باشد. I_{\max} و I_{\min} به ترتیب حداقل و حداکثر جریان ممکن صاعقه هستند و در این مقاله برابر ۳ و ۲۰۰ کیلوآمپر در نظر گرفته شده‌اند اما این روش بسیار زمان‌بر بوده و حجم محاسبات به شدت زیاد خواهد بود. پس به منظور دستیابی سریع‌تر به پاسخ دقیق، روش پیشنهادی ذیل به کار گرفته شده است:

در ابتدا محل برخورد برای یک جریان صاعقه تصادفی (I_n) در بازه جریان‌های ممکن صاعقه تعیین می‌گردد. محل برخورد از سه حالت ممکن خارج نخواهد بود و برای هر حالت روند منحصر به فردی دنبال خواهد شد.

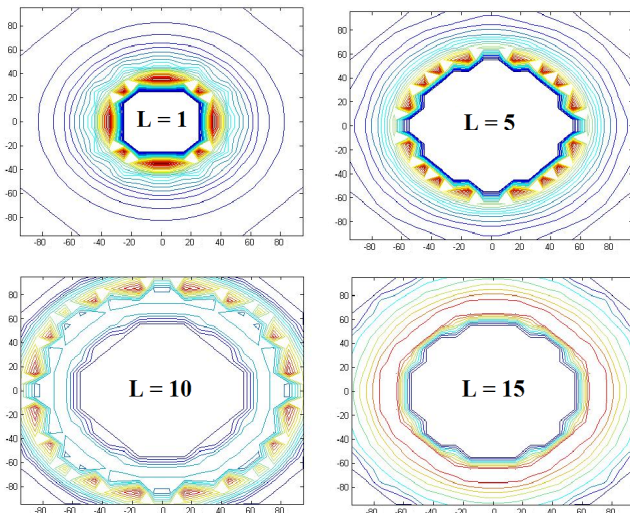
حالت اول) صاعقه به صاعقه‌گیر برخورد نماید: در این صورت با توجه به مطالب ارائه‌شده می‌دانیم که صاعقه‌های با جریان بیشتر از (I_n) به صاعقه‌گیر برخورد می‌کنند. بنابراین جریان صاعقه بعدی (I_{n+1}) با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد. در این مرحله حد بالای جریان صاعقه (I_{\max}) نیز برابر با مقدار (I_n) قرار داده شده و در واقع محدوده جریان‌های مورد بررسی محدود می‌گردد

$$\begin{aligned} I_{\max} &= I_n \\ I_{n+1} &= \frac{I_{\min} + I_n}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

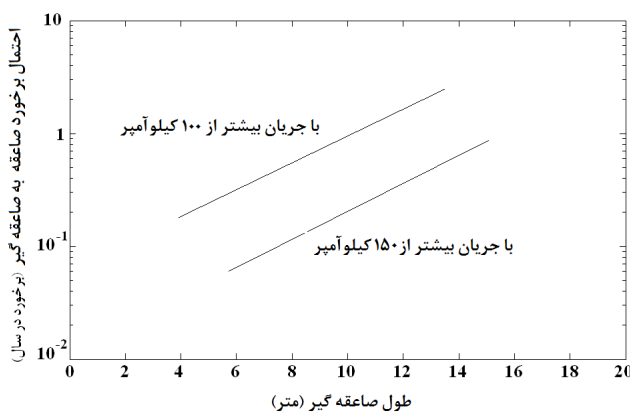
حالت دوم) صاعقه به زمین برخورد نماید: در این صورت با توجه به مطالب گفته‌شده اطمینان داریم که صاعقه‌های با جریان کمتر از (I_n) به زمین برخورد خواهند نمود. بنابراین جریان صاعقه بعدی با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد. در این مرحله نیز حد پایین جریان صاعقه (I_{\min}) برابر با مقدار (I_n) قرار داده می‌شود

$$\begin{aligned} I_{\min} &= I_n \\ I_{n+1} &= \frac{I_n + I_{\max}}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

حالت سوم) صاعقه به آنتن برخورد نماید: در این صورت جریان صاعقه (I_n) در محدوده جریان صاعقه‌های برخوردکننده به آنتن $[I_a, I_b]$ قرار گرفته و برای به دست آوردن مقادیر دقیق I_a و I_b مقادیر $I_{a(n)}$ و $I_{b(n)}$ برابر (I_n) قرار داده شده و به طور هم‌زمان از روابط ذیل استفاده می‌گردد و بدین ترتیب در هر مرحله دو جریان صاعقه بررسی می‌شوند



شکل ۸: شدت احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی بر حسب ارتفاع صاعقه گیر.

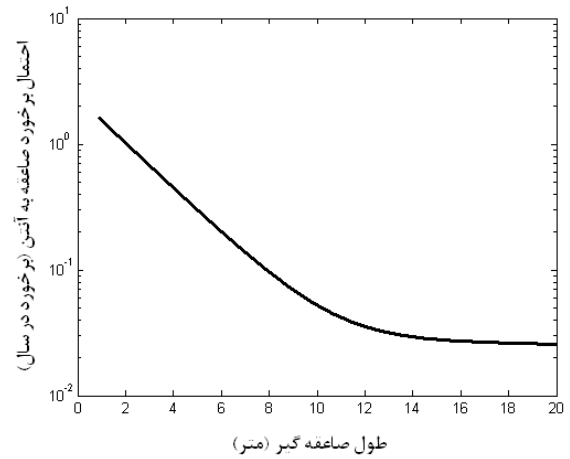


شکل ۹: احتمال برخورد صاعقه به سیستم حفاظتی.

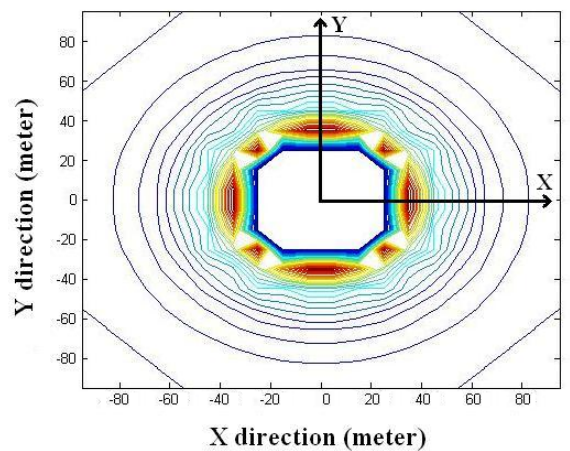
افزایش ارتفاع صاعقه گیر مشاهده نمود. همچنین با افزایش ارتفاع میله صاعقه گیر تمرکز و پیوستگی خطوط که نشان دهنده نقاط با احتمال بالای فرار صاعقه هستند کمتر و کمتر می شود و لذا احتمال برخورد صاعقه به آنتن کاهش می یابد.

با توجه به آنچه که قبلاً اشاره شد بهترین طراحی برای سیستم حفاظتی باید چنان باشد که تمام صاعقه های تهدیدکننده آنتن و تجهیزات مورد حفاظت به سمت میله صاعقه گیر جذب شوند و از برخورد مستقیم آنها به تجهیزات جلوگیری گردد. اما افزایش بیش از حد ارتفاع میله صاعقه گیر صاعقه های دوردست با دامنه جریان بالا را نیز به سمت صاعقه گیر جذب می نماید و این امر به نوبه خود باعث ایجاد مشکلات عایقی در هنگام تخلیه صاعقه به زمین و همچنین تولید میدان های الکترومغناطیسی مخرب خواهد شد.

اینک به بررسی تأثیر افزایش ارتفاع میله صاعقه گیر بر احتمال جذب صاعقه های با جریان های بالا می پردازیم. احتمال برخورد صاعقه با جریان های بالاتر از ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوآمپر به میله صاعقه گیر بر حسب ارتفاع میله محاسبه و در شکل ۹ رسم شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود با افزایش ارتفاع میله صاعقه گیر احتمال برخورد صاعقه های با جریان بالاتر از ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوآمپر به سیستم حفاظتی به شدت افزایش می یابد و این در حالی است که مطابق شکل ۶ به ازای صاعقه گیرهای با ارتفاع بیشتر از ۱۲ متر تغییرات چندانی در احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی روی نمی دهد. بنابراین بهترین ارتفاع میله صاعقه گیر ۱۲ متر تعیین می گردد.



شکل ۶: احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی و برخورد مستقیم به آنتن.



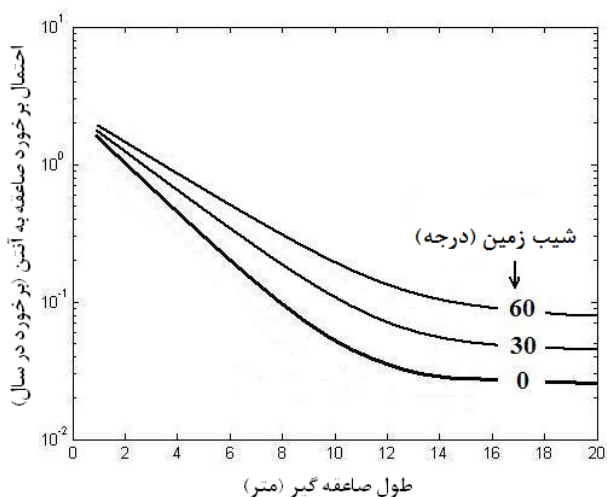
شکل ۷: شدت احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی.

شده و نتایج محاسبات در شکل ۶ آمده است. همان طور که در این شکل دیده می شود با افزایش ارتفاع میله صاعقه گیر تعداد صاعقه هایی که می توانند از سیستم حفاظتی فرار کنند کاهش یافته و در واقع حفاظت بهبود می یابد [۳۹].

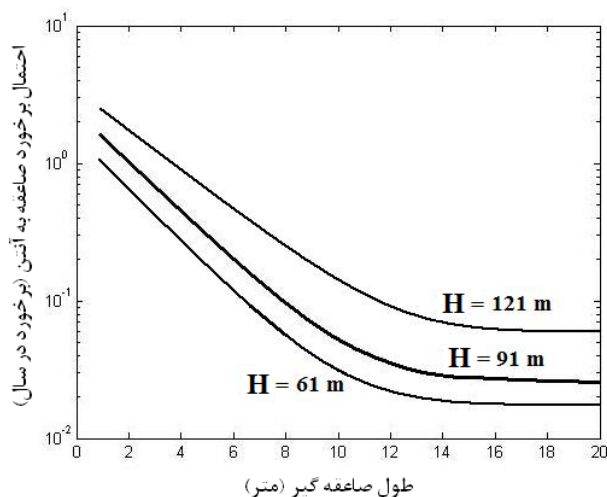
یکی از مواردی که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته شدت احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی می باشد، بدین معنی که احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی به ازای هر یک از نقاط فضای بالای دکل مخابراتی (مشابه شکل ۵) محاسبه و ترسیم می گردد. بدین ترتیب نتایج حاصل، شدت احتمال فرار صاعقه را به ازای فضای بالای دکل مخابراتی در دسترس قرار خواهد داد. در شکل ۷ نمای شماتیک شدت احتمال فرار صاعقه برای دکل مخابراتی نمونه ۹۱ متری و با صاعقه گیری به ارتفاع ۱ متر نشان داده شده است. در این شکل تراکم خطوط و یا تیرگی نواحی نشان دهنده بیشتر بودن احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی و برخورد آن به آنتن در آن ناحیه است.

همان طور که در این شکل دیده می شود، احتمال فرار صاعقه تا فاصله ۲۵ متری از مرکز دکل صفر است و در واقع حفاظت کامل می باشد. از طرف دیگر بیشترین احتمال فرار صاعقه از صاعقه گیر مربوط به فاصله ۳۰ تا ۴۵ متری از مرکز دکل می باشد. از طرفی صاعقه ها تا فاصله حدود ۸۰ متری به دکل برخورد می کنند که با [۱۵] و [۴۰] همخوانی دارد.

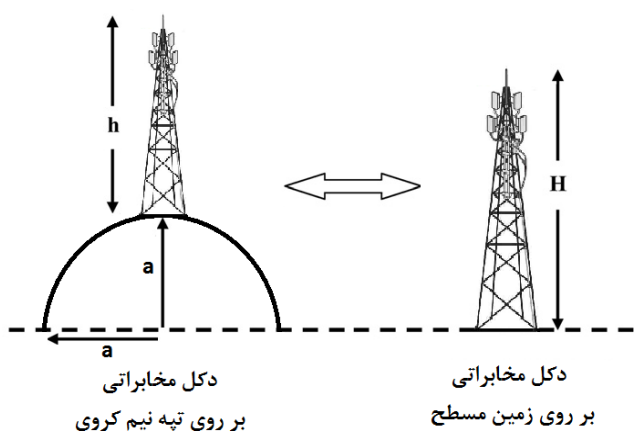
در شکل ۸ شدت احتمال فرار صاعقه از صاعقه گیر برای دکل مخابراتی نمونه و به ازای صاعقه گیر با ارتفاع های متفاوت محاسبه و رسم شده است. در این شکل می توان وسیع تر شدن ناحیه حفاظت کامل را با



شکل ۱۲: اثر نصب دکل در زمین شیب‌دار بر احتمال برخورد صاعقه به آنتن.



شکل ۱۰: اثر ارتفاع دکل مخابراتی بر احتمال برخورد صاعقه به آنتن.



شکل ۱۳: دکل مخابراتی نصب‌شده روی تپه.

دکل مخابراتی و صاعقه‌گیر است. هنگامی که دکل مخابراتی در زمین شیب‌دار نصب می‌گردد فواصل بارهای الکتریکی حقیقی و فرضی نسبت به زمین تغییر خواهد نمود.

الف) نصب دکل در زمین شیب‌دار

شیب محل نصب دکل مخابراتی (مطابق شکل ۱۱) در سه مقدار متفاوت، صفر (زمین مسطح)، ۳۰ و ۶۰ درجه در نظر گرفته شده و نتایج به دست آمده در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود وقتی دکل مخابراتی در زمین شیب‌دار نصب می‌گردد، عملکرد سیستم حفاظت متأثر گردیده و احتمال برخورد صاعقه به آنتن و تجهیزات بیشتر خواهد شد. این اثر مربوط به سمتی است که شیب زمین به سمت دره است و در حقیقت در این قسمت ارتفاع مؤثر دکل بیشتر می‌باشد. از طرف دیگر در سمتی که به طرف کوه قرار دارد ارتفاع مؤثر دکل کمتر خواهد بود ولی در مجموع مشاهده شده که عملکرد سیستم حفاظتی در زمین شیب‌دار تضعیف شده است.

ب) نصب دکل روی تپه و بلندی

به منظور شبیه‌سازی دکل مخابراتی نصب‌شده روی بلندی یا تپه، مطابق شکل ۱۳ دکل مخابراتی با ارتفاع h روی یک نیم‌کره به شعاع a قرار داده شده است. در این حالت ارتفاع مؤثر دکل بیشتر از مقدار واقعی و معادل H خواهد بود و با توجه به نتایج شکل ۱۰ (مربوط به تغییر ارتفاع دکل) پیش‌بینی می‌شود که احتمال برخورد صاعقه به آنتن افزایش یابد.

در اینجا شبیه‌سازی برای تپه‌های با ارتفاع ۱۰۰ و ۲۰۰ متر انجام شده



شکل ۱۱: دکل مخابراتی نصب‌شده در سطح شیب‌دار.

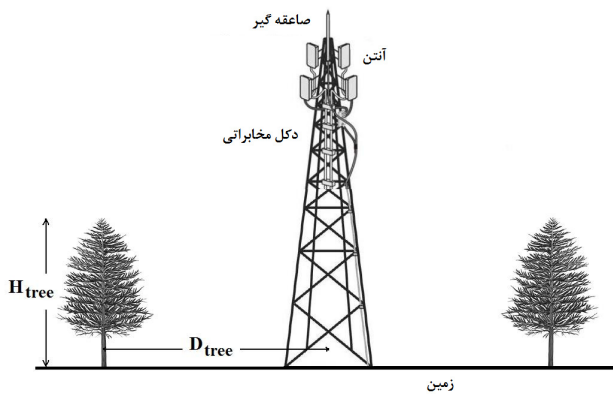
۲-۶ تأثیر ارتفاع دکل مخابراتی بر احتمال فرار صاعقه

در این بخش اثر تغییر در ارتفاع دکل بر روی احتمال فرار صاعقه مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور کلیه ابعاد دکل (H, R_f, d) که در شکل ۱ اشاره شد با یک نسبت تغییر داده می‌شوند و نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۰ آورده شده است.

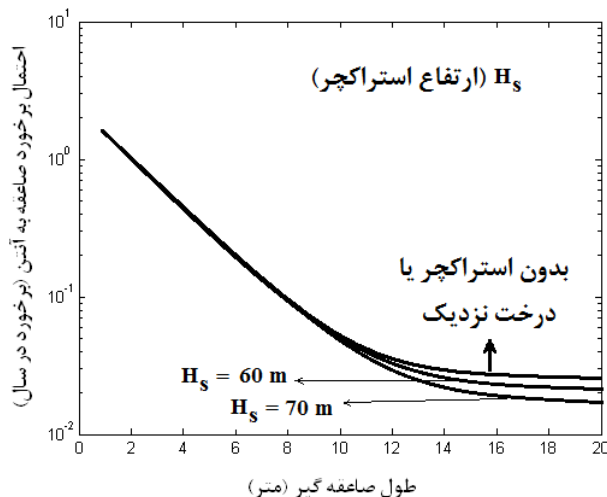
با توجه به نتایج حاصل، می‌توان ارزیابی نسبی از اثر افزایش ارتفاع دکل مخابراتی بر عملکرد سیستم حفاظتی آن داشت. بدین ترتیب که هر چه ارتفاع دکل بیشتر باشد برای داشتن سطح حفاظتی معین، نیاز به برقراری با ارتفاع بیشتر است.

۳-۶ تأثیر شیب زمین بر احتمال فرار صاعقه

با توجه به این که برج‌های مخابراتی و آنتن‌های رادیویی نیاز به پهنه وسیع دسترسی دارند، در ارتفاعات و روی تپه‌ها و بلندی‌ها نصب می‌گردند. بنابراین در این قسمت اثر شیب زمین محل نصب روی عملکرد سیستم حفاظتی مورد بررسی قرار گرفته است. در روش بارهای فرضی هر بار الکتریکی در فضای مسأله دارای اثر معکوسی نسبت به زمین است و در واقع اثر زمین با در نظر گرفتن بارهای الکتریکی مخالف و با فاصله معکوس نسبت به زمین در نظر گرفته می‌شوند. این اثر شامل بارهای الکتریکی ابر، صاعقه، لیدرهای بالارونده و همچنین بارهای القاشده روی



شکل ۱۶: دکل مخابراتی و درختان هم‌جوار.

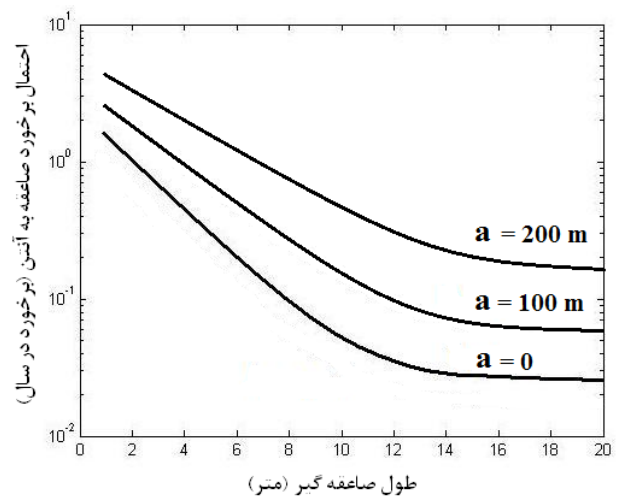


شکل ۱۷: اثر درختان و ساختمان‌های نزدیک بر احتمال فرار صاعقه.

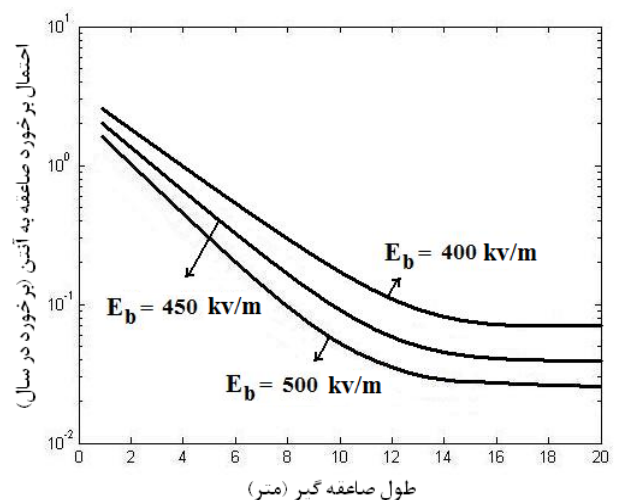
۵-۶ تأثیر درختان و ساختمان‌های اطراف دکل بر احتمال فرار صاعقه

در این قسمت سعی شده اثر حضور درختان و ساختمان‌های بلندی که ممکن است در اطراف برج مخابراتی قرار داشته باشند مورد بررسی قرار گیرد و عملکرد سیستم حفاظت در برابر صاعقه در حضور آنها محاسبه گردد. بدین منظور و مطابق شکل ۱۶ در هر سمت دکل مخابراتی درختی با ارتفاع H_{tree} و به فاصله D_{tree} از مرکز دکل در نظر گرفته می‌شود.

در این مقاله درخت‌ها مشابه آنچه در [۲۰] توضیح داده شده مدل‌سازی گردیده‌اند. فاصله درخت‌ها از مرکز دکل مخابراتی ۲۵ متر در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی برای درختانی با ارتفاع مفروض ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر انجام شده است. نتایج محاسبات نشان داد که حضور درختان تا ارتفاع ۳۰ متر نمی‌تواند هیچ گونه تأثیری بر عملکرد سیستم حفاظتی داشته باشد و بنابراین شبیه‌سازی برای ساختمان‌های بلند در اطراف دکل مخابراتی انجام گرفت و مشاهده گردید وقتی ارتفاع ساختمان‌ها (H_s) از ۵۰ متر تجاوز می‌کند، عملکرد سیستم حفاظتی دکل مخابراتی تحت تأثیر قرار گرفته و بهبود می‌یابد. در شکل ۱۷ تأثیر ساختمان‌های نزدیک بر عملکرد سیستم حفاظتی دکل مخابراتی مورد ملاحظه قرار گرفته است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود تعداد صاعقه‌های برخوردکننده به آنتن در حالتی که ساختمان‌های بلند در اطراف دکل هستند کمتر خواهد گردید. بدین ترتیب می‌توان استناد نمود که حضور ساختارهای بلندی که در نزدیکی دکل‌های مخابراتی قرار دارند در راستای بهتر شدن عملکرد سیستم حفاظتی عمل خواهند نمود.



شکل ۱۴: اثر نصب دکل روی تپه بر احتمال برخورد صاعقه به آنتن.



شکل ۱۵: اثر ولتاژ شکست الکتریکی هوا بر احتمال برخورد صاعقه به آنتن.

و نتایج حاصل در شکل ۱۴ آورده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نصب دکل مخابراتی روی تپه موجب تضعیف عملکرد سیستم حفاظتی شده زیرا ارتفاع مؤثر دکل در این حالت بیشتر از ارتفاع واقعی دکل خواهد بود.

۶-۴ تأثیر شرایط بارندگی بر احتمال فرار صاعقه

در شرایط بارندگی و رطوبت، ولتاژ شکست الکتریکی هوا تغییر می‌کند به طوری که هرچه رطوبت هوا بیشتر شود ولتاژ شکست الکتریکی هوا کمتر خواهد شد. نحوه محاسبه ولتاژ شکست الکتریکی هوا با تغییر در چگالی هوا و همچنین رطوبت موجود در هوا در [۴۱] شرح داده شده است. بنابراین به منظور شبیه‌سازی شرایط مختلف بارندگی می‌توان مدل‌سازی را با استفاده از مقادیر مختلف ولتاژ شکست الکتریکی هوا انجام داد. در شکل ۱۵ احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی و برخورد آن به آنتن با در نظر گرفتن سه ولتاژ شکست الکتریکی ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوولت بر متر نشان داده شده است.

هنگامی که ولتاژ شکست الکتریکی هوا کاهش می‌یابد، شکست الکتریکی بین نوک لیدر پایین‌رونده صاعقه و لیدرهای بالا رونده دیرتر اتفاق می‌افتد. بدین معنی که صاعقه باید به تجهیزات نزدیک‌تر شود و پایین‌تر بیاید تا شکست الکتریکی رخ دهد. این امر موجب می‌شود سیستم حفاظتی عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان دهد.

- evaluation of exposure of free-standing structures," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 4, pp. 2009-2022, Nov. 1990.
- [16] L. Dellera 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.
- [17] U. Kumar and N. T. Joseph, "Analysis of air termination system of the lightning protection scheme for the indian satellite launch pad," in *IEE Proc. Science, Measurement, and Technology*, vol. 150, no. 1, pp. 3-10, Jan. 2003.
- [18] 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.
- [19] Q. B. Zhou and Y. Du, "Numerical analysis of the charge distribution on building structure in the preliminary breakdown phase of lightning," in *Proc. 17th Int. Zurich Sym. on Electromagnetic Compatibility*, pp. 405-408, 27 Feb.- 3Mar. 2006.
- [20] 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," in *Proc. 30th Int. Conf. on Lightning Protection*, 8 pp., Cagliari, Italy, 13-17 Sep. 2010.
- [21] 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," *J. of Electrostatics*, vol. 68, no. 5, pp. 415-418, Oct. 2010.
- [22] H. He, J. He, S. Xie, and S. Yao, "Assessment of lightning shielding performance of double-circuit UHV overhead transmission lines," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 8 pp., Minneapolis, US, 25-29 Jul. 2010.
- [23] Y. Xu and M. Chen, "An improved 3-D self-consistent stochastic stepped leader model," in *Proc 7th Asia-Pacific Int Conf. on Lightning, APL'11*, pp. 699-705, Chengdu, China, 1-4 Nov. 2011.
- [24] Y. Xu and M. Chen, "Striking distance calculation for flat ground and lightning rod by a 3D self-organized leader propagation model," in *Proc Int. Conf. on Lightning Protection, ICLP'12*, 5 pp., Vienna, Austria, 2-7 Sep. 2012.
- [25] H. Singer, H. Steinbigler, and P. Weiss, "A charge simulation method for the calculation of high voltage fields," *IEEE Power Apparatus and Systems*, vol. 93, no. 5, pp. 1660-1668, Sep. 1974.
- [26] A. 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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*, vol. 38, no. 1, pp. 27-32, Jun. 2012.
- [31] M. R. Bank Tavakoli and B. 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.
- [32] 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," *J. of Electrical Engineering & Technology*, vol. 6, no. 6, pp. 760-768, Nov. 2011.
- [33] A. M. Mousa, "Failure of the collection volume method and attempts of the ESE lightning rod industry to resurrect it," *J. of Lightning Research*, vol. 4, Supp. 2: M9, pp. 118-128, Jan. 2012.
- [34] V. Cooray, *The Mechanism of the Lightning Flash*, in the Lightning Flash, V. Cooray, Ed. London, U. K.: Inst. Elect. Eng., pp. 144-159, 2003.
- [35] 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.
- [36] 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.

اما از سوی دیگر حضور ساختمان‌ها و درختان یا موارد مشابه نمی‌تواند در طراحی به عنوان یک پارامتر دائمی در نظر گرفته شود. فلذا از واردکردن محاسبات مربوط به ساختمان‌ها و درختان در طراحی سیستم حفاظتی خودداری می‌گردد. این بدان معنا است که اگر درختان بریده شدند یا دکل مخابراتی در محلی فاقد درخت نصب گردید، کاربران می‌توانند از عملکرد صحیح سیستم حفاظتی اطمینان داشته باشند.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله دکل مخابراتی، آنتن و صاعقه‌گیر با استفاده از روش بارهای فرضی در فضای سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. مسیر حرکت لیدر صاعقه به صورت گام به گام دنبال شده و محل برخورد نهایی آن تعیین شده است. این پروسه به ازای تمام مکان‌های ممکن بروز صاعقه انجام شده و محدوده جریان برخوردکننده به آنتن به دست می‌آید. بدین ترتیب عملکرد سیستم حفاظتی دکل مخابراتی در برابر برخورد مستقیم صاعقه در شرایط گوناگون تعیین گردیده و تأثیر عوامل مختلف از جمله ارتفاع دکل، شرایط آب و هوایی از نظر بارندگی، رطوبت هوا و همچنین محل نصب دکل از نظر شیب زمین، پستی و بلندی‌های اطراف و نزدیک یا دوربودن از ساختمان‌ها و درختان بلند بر عملکرد سیستم حفاظتی مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین با استفاده از نتایج این روش پیشنهادی، طراحان و سازندگان دکل‌های مخابراتی و رادیویی می‌توانند بهترین تصمیم را در راستای طراحی و ساخت سیستم حفاظت در برابر صاعقه با توجه به بدترین شرایط جوی و عوارض طبیعی و ساختمان‌های اطراف محل نصب دکل مخابراتی اتخاذ نمایند.

مراجع

- [1] R. H. Golde, *Lightning Protection*, Edward Arnold Publishing Co., London, Britain, 1973.
- [2] M. A. Uman, *The Art and Science of Lightning Protection*, Cambridge, U. K.: Cambridge University Press, 2008.
- [3] F. A. M. Rizk, "Modeling of lightning exposure of buildings and massive structures," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 4, pp. 1987-1998, Oct. 2009.
- [4] F. A. M. Rizk, "Modeling of lightning exposure of sharp and blunt rods," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 4, pp. 3122-3132, Oct. 2010.
- [5] F. S. Young, J. M. Clayton, and A. R. Hileman, "Shielding of transmission lines," *AIEE Trans. Power App.*, pp. 132-154, 1963.
- [6] G. W. Brown and E. R. Whitehead, "Field and analytical studies of transmission lines shielding: part ii," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 88, no. 3, pp. 617-626, Mar. 1969.
- [7] T. Horvath, *Computation of Lightning Protection*, London, U. K. Research Studies Press, 1991.
- [8] A. J. Eriksson, "The incidence of lightning strikes to power lines," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 2, no. 3, pp. 859-870, Jul. 1987.
- [9] 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.
- [10] M. M. Drabkin, "Lightning protection of tall structures," in *Proc. Int. Conf. on Lightning Protection, ICLP'12*, 6 pp., 2-7 Sep. 2012.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] L. Dellera and E. Garbagnati, "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model part i: description of the model and

مصطفی یحیی آبادی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۵ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر به پایان رسانده است و از سال ۱۳۹۰ تا کنون دانشجوی دکتری مهندسی برق- قدرت دانشگاه صنعتی مالک اشتر می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: سیستم‌های قدرت، مباحث فشارقوی، حفاظت تجهیزات در برابر صاعقه، روش‌های نوین بهینه‌سازی.

علیرضا صدوقی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۶۷ از دانشگاه تهران و در مقطع دکتری مهندسی برق قدرت در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه صنعتی اصفهان به پایان رسانده است و هم اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و اویونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان می‌باشد. نام‌برده قبل از پیوستنش به دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان در سال‌های ۱۳۶۸ الی ۱۳۷۰ عضو هیأت علمی دانشگاه شهید چمران اهواز بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: تحلیل و طراحی ماشین‌های الکتریکی، کنترل محرکه‌های الکتریکی، مانیتورینگ و عیب‌یابی ماشین‌های الکتریکی، سیستم‌های انرژی و تأسیسات الکتریکی.

- [37] M. Becerra and V. Cooray, "On the velocity of lightning upward connecting positive leaders," in *Proc. IX Int. Sym. on Lightning Protection*, 6 pp., 26-30 Nov. 2007.
- [38] 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.
- [39] M. Ishii, M. Saito, F. Fujii, and A. Sugita, "Probability of lightning hits to tall structures taking account of upward lightning," in *Proc. Asia-Pacific Int. Sym. on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1185-1188, Beijing, China, 12-16 Apr. 2010.
- [40] S. Ait-Amar and G. Berger, "A model of protection of earthed structures by means of lightning rod conductors," in *Proc. IEEE Russia Power Tech*, 6 pp., Russia, 27-30 Jun. 2005.
- [41] M. Nayel, "Investigation of lightning rod striking distance," in *Proc. 7th Asia-Pacific Int Conf. on Lightning*, pp. 155-159, Chengdu, China, 1-4 Nov. 2011.