مجله علمی ترویجی «پدافند غیرعامل»

سال یازدهم، شماره ٤، زمستان ١٣٩٩، (پیاپی ٤٤): صص ١٦-٧

علمی- ترویجی

مروری بر روش‌های طراحی سیستم زمین و حفاظت صاعقه سایت‌های مخابراتی در ارتفاع بالا و زمین‌های صخره‌ای

رضا غفارپور*[1]، محمد لونی[2]

تاریخ دریافت: ١٣٩٨/٠٨/١٧

تاریخ پذیرش: ١٣٩٨/١١/٢٨

چکیده

رعایت اصول پدافند غیرعامل در طراحی و اجرای طرح‌های حساس و مهم و نیز تاسیسات زیربنایی و به‌منظور پیشگیری و کاهش مخاطرات ناشی از سوانح طبیعی از جمله صاعقه، لازم و ضروری می‌باشد. صاعقه یک پدیده طبیعی جوی است و هیچ وسیله و روشی وجود ندارد که قادر باشد از تخلیه صاعقه جلوگیری نماید. برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه به ساختمان‌ها و انتقال جریان آن از طریق خطوط خدماتی ورودی به آن‌ها می‌تواند برای انسان‌ها، ساختمان‌ها و محتویات با ارزش آن‌ها، آسیب زننده و خطرناک باشد، لذا به‌کارگیری تمهیدات لازم برای حفاظت در مقابل صاعقه امری ضروری است. از آنجایی‌که عموما ایستگاه‌های مخابراتی و داده در نقاط مرتفع کوهستانی و یا در فضاهای باز مستقر هستند، اهمیت حفاظت در برابر صاعقه در آن‌ها بسیار با اهمیت می‌باشد. در این مقاله، مروری بر روش‌های مختلف طراحی و اجرای سیستم‌های حفاظت در برابر صاعقه سایت‌های مخابراتی در نقاط با ارتفاع بالا و زمین‌های صخره‌ای از نگاه استانداردها و توصیه نامه‌های بین‌المللی ارائه می‌گردد. همچنین در این مقاله به‌منظور لزوم داشتن یک سیستم حفاظتی مناسب و با کیفیت، استانداردهای مخابراتی، نظامی و بین‌المللی مختلفی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: حفاظت صاعقه، سیستم زمین، مناطق کوهستانی، سایت‌های مخابراتی، استانداردهای بین‌المللی

[1] استادیار دانشگاه جامع امام حسین(ع)- (rghaffarpour@ihu.ac.ir)- نویسنده مسئول

[2] فارغ التحصیل مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی

۱- مقدمه

بر اساس تحقیقات به‌طور متوسط در هر ثانیه بیش از پنجاه صاعقه به زمین اصابت می‌نماید و خسارات جانی و مالی فراوانی بر جای می‌گذارد [۱]. به‌طور کلی حوادثی که توسط صاعقه پدید می‌آید شامل حوادثی است که به سبب برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه به‌وجود می‌آید. برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه به ساختمان‌ها و انتقال جریان آن از طریق خطوط خدماتی ورودی به آن‌ها می‌تواند برای انسان‌ها، ساختمان‌ها و محتویات با ارزش آن‌ها، آسیب زننده و خطرناک باشد [۲]. در واقع برخورد صاعقه به ساختمان می‌تواند منجر به آسیب مکانیکی، حریق و انفجار در اثر حرارت ایجاد شده در نقطه جرقه به‌علت انرژی ایجاد شده در هادی‌های مسیر عبور جریان و یا نقطه تخلیه بار الکتریکی، گردد. هدف از نصب صاعقه‌گیر حفاظت از سیستم‌ها و افراد در برابر صاعقه و ایجاد مسیری مطمئن جهت انتقال جریان عظیم صاعقه به زمین می‌باشد. سیستم صاعقه‌گیری که به درستی طراحی و نصب شده باشد امنیت جانی افراد و ایمنی تجهیزات را به‌دنبال خواهد داشت. یکی از عوامل مهم در ناکارآمدی سیستم صاعقه‌گیر، موضوع احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی می‌باشد [۳]. جهت محاسبه احتمال فرار صاعقه، استفاده از روش‌های عددی و مدل‌سازی صاعقه ضروری است. در مراجع [۹-۴] مدل انتشار گام‌به‌گام لیدر صاعقه توسط محققینی از جمله Rizk، Dellera و Garbaganti پیشنهاد گردید. همچنین از جمله فعالیت‌های قابل توجه در این زمینه می‌توان به مدل‌سازی سیستم حفاظت در برابر صاعقه مربوط به سایت‌های پرتاب ماهواره در سال ۲۰۰۳ توسط Kumar [۱۰] و همچنین شبیه‌سازی‌های دوبعدی خطوط انتقال به‌منظور محاسبات احتمال فرار صاعقه از سیم‌های گارد در سال ۲۰۰۵ توسط J.He [۱۱] اشاره نمود.

برج‌های مخابراتی برحسب ضرورت، در مناطق کوهستانی و در ارتفاعات بالا نصب می‌شوند و همواره در معرض برخورد صاعقه قرار دارند. صاعقه‌گیر دکل‌های مخابراتی و رادیویی وظیفه دارد صاعقه را به‌سمت خود جذب نموده و از برخورد مستقیم آن به آنتن و تجهیزات، جلوگیری نماید. سیستم حفاظت در برابر صاعقه باید بدون این‌که به دکل و آنتن‌های نصب شده روی آن آسیب برسد، جریان صاعقه را وارد زمین نماید. بنابراین سیستم حفاظت در برابر صاعقه از ایجاد صاعقه جلوگیری نمی‌کند، بلکه آن را تحت کنترل به‌سمت خود جذب نموده و با انتقال انرژی صاعقه به زمین، از آسیب‌های احتمالی جلوگیری می‌شود [۱۲].

علاوه‌بر استانداردها، مقالات زیادی به بررسی و مدل‌سازی سیستم حفاظت صاعقه در شرایط مختلف عملکردی آن پرداخته‌اند. مراجع [۱۳ و ۱۴] به بررسی اضافه ولتاژهای ایجاد شده بین سیستم حفاظت از صاعقه و سازه مورد حفاظت در هنگام برخورد صاعقه می‌پردازد. در مرجع [۱۴] بر اساس مدل‌سازی‌ها و نتایج به‌دست‌آمده در این مرجع، حتی اگر فاصله‌های بیان شده در استانداردهای بین‌المللی رعایت شده باشد، امکان تخلیه الکتریکی بین سیستم حفاظت از صاعقه و سازه مورد حفاظت وجود دارد. مرجع [۱۵]، به بررسی آزمایشگاهی ضریب ماده عایقی بین سیستم حفاظت از صاعقه و سازه می‌پردازد به‌طوری که تخلیه الکتریکی بین این دو رخ ندهد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده در این مرجع، استفاده از بتن وقوع تخلیه الکتریکی بین سازه و سیستم صاعقه‌گیر را می‌تواند به شدت کاهش دهد. در سال‌های اخیر بسیاری از مقالات درخصوص طراحی سیستم زمین و حفاظت از صاعقه منابع تولید انرژی‌های نو شامل سیستم‌های فوتوولتائیک و بادی بوده است [۱۹-۱۶].

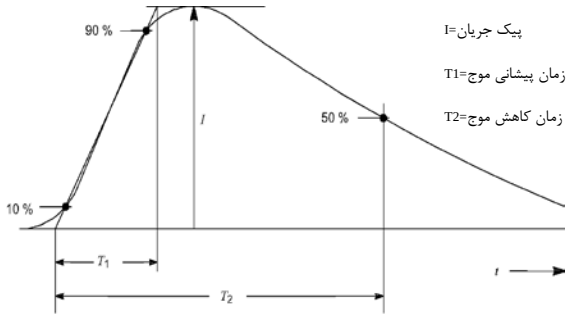
از آن‌جایی که تحقیقات کاملی در خصوص سیستم حفاظت در برابر صاعقه در ارتفاعات بالا در کشور وجود نداشته و با توجه به حساسیت بالای موضوع، در این مقاله به مروری بر روش‌های مختلف طراحی و اجرای سیستم‌های حفاظت در برابر صاعقه و ارتینگ سایت‌های مخابراتی در نقاط با ارتفاع بالا و زمین‌های صخره‌ای پرداخته شده است. همچنین در این مقاله تمامی استانداردها و توصیه نامه‌های بین‌المللی از جمله استاندار جهانی سیستم‌های مخابراتی ITU (K series)، استاندار بین‌المللی حفاظت ساختمان‌ها و تجهیزات در مقابل صاعقه (IEC62305-1,3,4)، استاندار NFC17-102 فرانسه، استاندارد CSA-B72 کانادا، استانداردهای نظامی ایالات متحده آمریکا و برخی استانداردهای داخلی در این خصوص مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

لذا در ادامه این مقاله و در بخش دوم نظریه صاعقه، روابط ریاضی در این خصوص و سطح شدت صاعقه در کشور ارائه خواهد شد. در بخش سوم مروری بر انواع روش‌های طراحی سیستم صاعقه‌گیر و در بخش چهار روش اجرای سیستم زمین در ارتفاعات و زمین‌های صخره‌ای پرداخته خواهد شد. در انتها نیز نتیجه‌گیری از بحث ارائه خواهد شد.

۲- تئوری صاعقه

با باردار شدن ابر و با توجه به بار ابر و ظرفیت بین ابر و زمین، ولتاژ بسیار بزرگی بین ابر و زمین به‌وجود می‌آید که ممکن است به چندین میلیون ولت برسد. ظرفیت خازنی بین ابر و زمین در حد میکروفاراد و شدت میدان الکتریکی بین ابر و زمین چندین

هزار ولت بر متر است. چنانچه شدت میدان الکتریکی بین زمین و ابر به‌قدر کافی بزرگ باشد، هوا در یک نقطه از سطح ابر شروع به یونیزاسیون نموده و در اثر آن به‌صورت یک گاز هادی در می‌آید و الکترود میله‌ای را تشکیل می‌دهد [۲۰]. مسیر یونیزه شدن هوا را کانال هادی می‌گویند. رشد این کانال به‌سرعت و با توقف‌های کوتاهی انجام می‌شود. کانال هادی پس از هر توقف، مسیر خود را بسته به شرایط موجود تعیین می‌کند و لذا مسیر کانال هادی شاخه به شاخه می‌شود. نزدیک‌ترین شاخه به الکترودهای تیز و بلند مانند درختان، ساختمان‌ها، خطوط و پست‌های انتقال برق موجب می‌شود شدت میدان بزرگی در حد یونیزاسیون هوا در نوک آن‌ها ایجاد شود و در نتیجه یک کانال هادی نیز از این نقاط به طرف کانال هادی پایین آمده صعود می‌کند. در لحظه‌ای که این دو کانال به یکدیگر می‌رسند، یک مسیر هادی بین ابر و زمین به‌بوجود می‌آید که از این مسیر جریان الکتریکی شدیدی در حدود ۲ تا ۳۰۰ کیلوآمپر عبور میکند [۲۱]. زمان مربوط به پیشانی موج جریان ناشی از صاعقه در مقایسه با کل زمان برقراری آن خیلی کوچک است. این زمان در بسیاری از موارد کمتر از ۱۰ میکروثانیه می‌باشد. شکل (۱) نمونه یک موج جریان صاعقه را نشان می‌دهد.

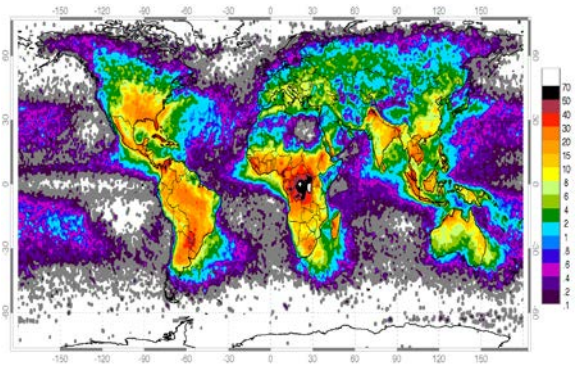


شکل (۱): نمونه یک موج جریان صاعقه [۲۱].

۲-۱- سطح کرونیک

سطح کرونیک به‌صورت تعداد متوسط روزها یا ساعات رعد و برقی در سال برای یک مکان ویژه تعریف می‌گردد. سطح کرونیک روزانه که سطح رعد و برق روزانه نیز نامیده می‌شود عبارت است از تعداد متوسط روزهایی از سال که رعد و برق در یک دوره ۲۴ ساعته در آن روزها مشاهده می‌گردد. در این تعریف، اگر رعد و برق در یک روز بیش از چند بار هم مشاهده گردد، آن روز همچنان بر اساس یک روز رعد و برقی طبقه‌بندی می‌شود. سطح کرونیک ساعتی که سطح رعد و برق ساعتی نیز نامیده می‌شود عبارت است از تعداد متوسط ساعت‌هایی از سال که رعد و برق در یک پریود ۶۰ دقیقه‌ای در آن ساعات مشاهده می‌گردد.

این طبقه‌بندی از سطوح کرونیک، اطلاعات جامع‌تری از چگالی صاعقه در یک سطح معین را ارائه می‌دهد. نقشه پراکندگی صاعقه در جهان توسط سازمان فضایی ایالات متحده[1] با اهداف امنیتی و اقتصادی به‌صورت زیر تهیه و ارائه شده است که در آن منطقه رنگ سیاه، در مرکز آفریقا محل بیشترین و بزرگترین فعالیت صاعقه‌ها در جهان می‌باشد. مناطق قرمز، نارنجی و زرد دارای فعالیت زیاد و مناطق سفید و آبی دارای فعالیت پایینی هستند. شکل (۲) نمایی از تعداد صاعقه‌هایی که در طول یک‌سال به واحد سطح زمین (کیلومتر مربع) در نقاط مختلف جهان اصابت کرده است را نشان می‌دهد.



شکل (۲): سطح کرونیک نقاط مختلف زمین [۲۲].

مطابق شکل (۲)، تراکم رعد و برق در ایران برای همه مناطق یکسان نیست و برخی مناطق دارای تراکم کمتر و برخی مناطق دارای تراکم بیشتری هستند. در این شکل، دامنه‌های غربی رشته‌کوه زاگرس، البرز مرکزی و جنوب سیستان و بلوچستان و بخش‌هایی از استان خراسان شمالی و رضوی دارای فراوانی بیشتری هستند. این مناطق عموما بر ارتفاعات و دامنه ناهمواری‌ها قرار گرفته‌اند. بیشینه تراکم سالانه رعد و برق، در شمال استان خوزستان و جنوب استان لرستان قرار دارد که در دامنه‌های رشته‌کوه زاگرس قرار گرفته است.

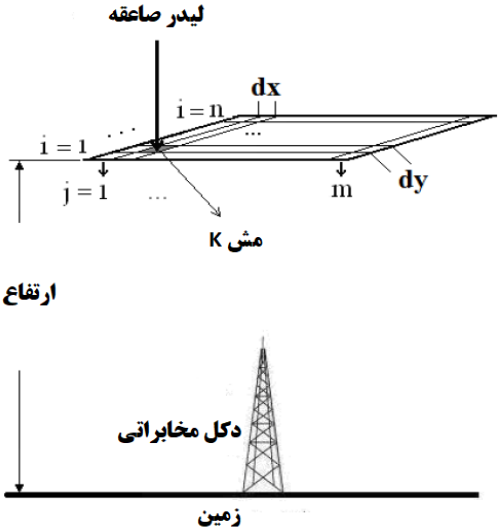
۲-۲- محاسبه احتمال فرار صاعقه از سیستم حفاظتی

در شکل (۳) 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 به‌توان گفت که تمام صاعقه‌های برخورد کننده به دکل و صاعقه‌گیر که تهدیدی برای آنتن و تجهیزات به‌شمار می‌روند از این مش‌ها شروع خواهند شد. وقتی نوک لیدر صاعقه

[1] NASA

در موقعیت k (مش هاشور خورده با طول dx و پهنای dy) قرار گرفت، می‌توان احتمال برخورد آن به آنتن را محاسبه نمود. بدین منظور محدوده جریان صاعقه برخورد کننده به آنتن $[I_a,I_b]$ به‌دست می‌آید و با استفاده از رابطه ذیل احتمال فرار صاعقه از صاعقه‌گیر و برخورد آن به آنتن به ازای قرارگیری صاعقه در مش kام محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$SFN_K = 10^{-6}\gamma T_d \times A \times \int_{I_a}^{I_b} P(I)dI \quad (۱)$$



شکل (۳): مدل تحلیل عددی محاسبه احتمال فرار صاعقه [۱۱].

که T_d تعداد روزهای صاعقه‌ای در سال و احتمال بروز صاعقه و A مساحت مش kام بر حسب مترمربع می‌باشد[۱۱]:

$$A = d_x.d_y \quad (۲)$$

P(I) احتمال تجمعی جریان‌های صاعقه تجاوز کننده از I می‌باشد که می‌تواند به‌وسیله فرمول تقریبی زیر محاسبه شود:

$$log_{10}^{P(I)} = ۰/۰۵ - \frac{I}{۷۴} \quad (۳)$$

در این رابطه I دامنه جریان صاعقه بر حسب کیلوآمپر می‌باشد. در نهایت احتمال فرار صاعقه به دکل در سال (SFN_T) حاصل جمع SFN_Kهای مربوط به تمامی مش‌هاست.

$$SFN_T = \sum_{k=1}^{n} SFN_K \quad (۴)$$

۳- روش‌های طراحی صاعقه‌گیر

به‌دلیل طبیعت احتمالی صاعقه، پیشگیری از برخورد آن و حفاظت کامل تجهیزات امری بسیار پیچیده، دشوار و تا حدودی غیرعملی است. اما سیستم حفاظت در برابر صاعقه در صورتی که به‌طور 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. لذا به‌منظور جلوگیری از فرار صاعقه، انتخاب بهترین روش طراحی سیستم حفاظت صاعقه ضروری می‌باشد [۲۳].

۳-۱- تراز سیستم حفاظت در مقابل صاعقه

براساس استاندارد IEC62305 [۲۴] چهار سطح حفاظتی (I الی IV) تعریف شده است. هدف از انتخاب تراز حفاظتی، حفاظت یک سایت در مقابل برخورد مستقیم صاعقه و کاهش آثار خرابی‌های ناشی از آن، دستیابی به یک حفاظت مطمئن تا حد امکان همراه با صرفه‌جویی اقتصادی است. از آنجایی‌که عموما ایستگاه‌های مخابراتی و داده در نقاط مرتفع کوهستانی و یا در فضاهای باز مستقر هستند و با توجه به سایر عوامل از جمله لزوم تداوم عملیات و وجود تجهیزات با ارزش و گران قیمت، لازم است برای آن‌ها سیستم حفاظتی نوع I طراحی و اجرا گردد. همچنین می‌توان برای سایر ایستگاه‌های مخابراتی، مراکز PC ,SC و سوئیچ شهری و ایستگاه‌های مایکروویو و دیتا که در مناطق شهری مستقر هستند، انواع مختلف سیستم حفاظتی را پس از محاسبه تراز حفاظتی مورد نیاز انتخاب، طراحی و اجرا نمود. در هنگام طراحی سیستم حفاظتی، درصورتی که ساختمان در حال احداث باشد، می‌بایست امکان استفاده از قطعات فلزی سازه ساختمان به‌عنوان اجزائی از سیستم حفاظتی، مورد توجه قرار گیرند. در آن صورت ایجاد پیوستگی میان آرماتورهای ستون و پی و یا اسکلت فلزی ساختمان، به‌طوری‌که مقاومت الکتریکی کل سازه بیش از ۰/۲ Ω نباشد، می‌بایست در هنگام بنای سازه، در دستور کار اجرای ساختمان قرارگیرد [۲۴].

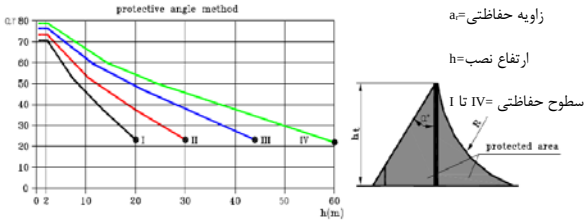
۳-۲- انواع روش‌های طراحی صاعقه‌گیر سیستم‌های مخابراتی

به‌طور کلی روش‌های حفاظتی برای مشخص کردن مکان قرارگرفتن پایانه‌های صاعقه‌گیر سه روش زاویه حفاظتی، گوی غلتان و شبکه‌بندی می‌باشد.

۳-۲-۱- روش زاویه حفاظتی [۲۵]

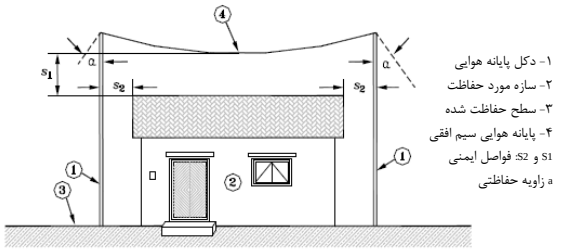
در این روش، فضای مورد حفاظت می‌بایست کاملا در مخروط حفاظتی ایجاد شده توسط میله محصور گردد. برای تعیین ابعاد مخروط حفاظتی می‌بایست تنها ابعاد فیزیکی بخش فلزی میله مورد توجه قرار گیرد. فضای حفاظت شده توسط یک میله عمودی به‌صورت یک مخروط قائم می‌باشد که راس آن بر نوک میله منطبق شده است و زاویه آن متناسب با منحنی تصویر با

توجه به ترازهای مختلف حفاظتی، متفاوت خواهد بود. این روش برای ساختمان‌هایی با شکل هندسی ساده یا برای بخش‌های کوچکی از یک ساختمان بزرگ مناسب است. شکل (۴) ارتباط بین زاویه و ارتفاع نصب در روش زاویه حفاظتی برای چهار سطح حفاظتی I تا IV را نشان می‌دهد.



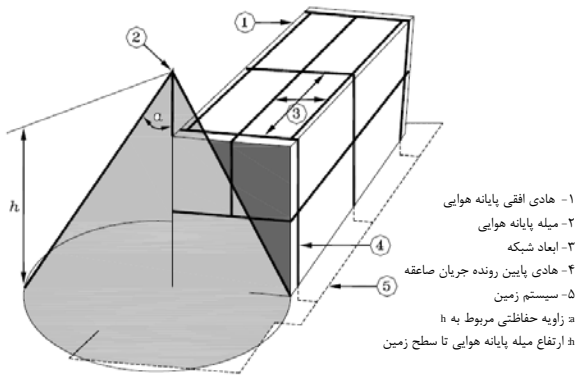
شکل (۴): ارتباط بین تراز حفاظتی، زاویه و ارتفاع نصب در روش زاویه حفاظتی [۲۵].

شکل (۵) حجم حفاظت شده توسط پایانه هوایی که به‌صورت سیم و میله نصب شده است را نشان می‌دهد. این حجم ترکیبی است از سطح حفاظت شده توسط میله‌های عمودی که راس آن‌ها به سیم متصل است و فضای ایجاد شده توسط سیم می‌باشد.



شکل (۵): حجم حفاظت شده توسط پایانه هوایی که به‌صورت سیم و میله نصب شده [۲۵].

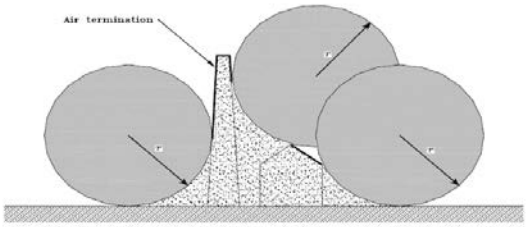
شکل (۶) حجم حفاظت شده توسط پایانه هوایی که به‌صورت میله‌های جدا از سازه که به‌صورت سیم‌های شبکه‌بندی شده، نصب شده است را نشان می‌دهد.



شکل (۶): حجم حفاظت شده توسط پایانه هوایی که به‌صورت میله‌های جدا از سازه نصب شده [۲۵].

۳-۲-۲- به‌کارگیری روش گوی غلتان برای نصب هادی‌های پایانه هوایی [۲۶]

در این روش با غلتاندن " گوی غلتان" به بدنه خارجی ساختمان از تمامی جهات و یافتن نقاط تماس گوی با ساختمان، محل نصب هادی‌های پایانه هوایی مشخص می‌شوند. در این روش، نقاطی از ساختمان که در تماس با گوی قرار نمی‌گیرند، حفاظت شده و نیاز به نصب هادی پایانه هوائی نمی‌باشد. شعاع گوی غلتان متناسب با تراز حفاظتی ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ متر می‌باشد.



شکل (۷): شعاع‌های مختلف حفاظتی به روش گوی غلتان [۲۶].

در روش گوی غلتان هنگامی‌که از دو میله موازی استفاده شود، مقدار p (اندازه نفوذ گوی غلتان میان دو میله) می‌بایست از تفاوت ارتفاع میله‌ها و ارتفاع شی مورد حفاظت کم‌تر باشد.

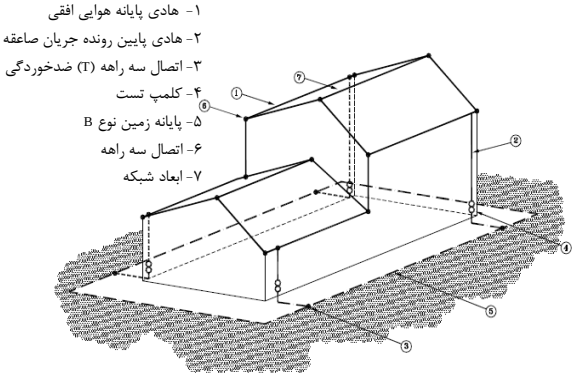
$$P = r - \left[\left(r^{2} - \frac{d}{2}\right)^{2}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad P < h_1 - h \quad , \quad h_1 < r \qquad (۶)$$

که در آن r شعاع گوی غلتان، d فاصله دو میله، h_t ارتفاع میله‌ها و h ارتفاع سازه مورد حفاظت می‌باشد.

۳-۲-۳- به‌کارگیری روش شبکه‌بندی برای نصب هادی‌های پایانه هوایی [۲۶]

در این روش هادی صاعقه‌گیر از مش‌های متقاطع در فواصل یکسان و معین تشکیل شده است. از این نوع پایانه هوایی که به قفس فارادی نیز مشهور است، در ساختمان‌هایی که دارای بام مسطح بوده و تجهیزات داخلی آن حساس باشند استفاده می‌شود. تراکم هادی‌های مش در این سیستم موجب می‌شود که طبق تئوری فارادی، میدان الکتریکی به داخل قفس نفوذ نکند. البته میزان نفوذ فقط زمانی به صفر می‌رسد که قفس به‌شکل یک صفحه فلزی یکپارچه باشد. از آنجایی‌که این امر در حالت عادی عملی نیست، استفاده از شبکه‌ای از هادی‌های متراکم در اولویت قرار خواهد گرفت و در عمل مقداری از میدان به داخل سازه نفوذ خواهد کرد. با افزایش تعداد هادی‌های متقاطع می‌توان از شدت این میدان نفوذی کاست. در این روش، شبکه هادی‌ها می‌بایست به گونه‌ای اجرا شوند که حداقل دو مسیر برای انتقال جریان صاعقه به طرف پایانه زمین داشته باشند. شکل (۸) نمونه‌ای از روش شبکه‌بندی حفاظتی برای یک ساختمان را نشان

می‌دهد. به‌طور کلی برای حفاظت سطوح صاف، هادی‌های شبکه‌بندی‌شده که تمامی سطح بام را بپوشاند، بهترین روش برای حفاظت سطح مورد نظر می‌باشند.



شکل (۸): زاویه و حجم حفاظتی در روش شبکه‌بندی.

۴- طراحی سیستم زمین در مناطق کوهستانی و صخره‌ای

به منظور متفرق کردن جریان صاعقه در زمین (موج فرکانس بالا) به‌طوری‌که اختلاف پتانسیل خطرناکی ایجاد نشود، شکل و گستردگی شبکه زمین (الکترودهای زمین) مهم‌ترین عامل به‌شمار می‌آید، هر چند که دستیابی به یک مقاومت کم تا حدممکن برای فرکانس dc ، (زیر ۱۰۰ Ω) توصیه می‌شود [۲۷]. از طرفی شبکه الکترودهای زمین می‌بایست در نقاط مناسب سایت و به‌گونه‌ای نصب شوند که اختلاف پتانسیل گام، به حداقل برسد. همچنین عمق دفن الکترودها و نوع آن‌ها به‌گونه‌ای باشند که از شرایط یخزدگی، خشکی و خوردگی مصون بوده و در طول زمان عمر خود، مقدار مقاومت نسبتا یکنواخت و پایدار داشته باشند. الکترودهای عمقی نیز در صورتی که با افزایش عمق، هدایت الکتریکی خاک بالا رود، مناسب می‌باشند [۲۷]. به‌طور کلی دو نوع آرایش سیستم پایانه زمین وجود دارد که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

• آرایش نوع A [۲۸]

سیستم پایانه زمین نوع A برای ساختمان‌های کوچک و کم اهمیت (خانه‌های مسکونی) و یا سازه‌های موجود که امکان اجرای نوع دیگری را ندارند و یا برای سیستم حفاظتی با استفاده از میله و یا سیم‌های کشیده شده، کاربرد دارند. در این روش، هر هادی پائین‌رونده جریان صاعقه به یک الکترود (افقی یا عمقی) متصل است، در این حالت یک هادی حلقه‌ای در تماس با خاک می‌توانند این الکترودها را به هم متصل کنند. عمق دفن الکترودهای افقی می‌بایست بیش از ۵۰ سانتی‌متر باشد تا از افزایش پتانسیل در سطح زمین جلوگیری شود. عمق یخزدگی خاک در زمستان و نیز امکانات حفاری از عواملی هستند که در نهایت عمق دفن الکترود را تعیین می‌کنند. گاهی لزوما الکترود زمین در داخل ساختمان و در زیر زمین نصب می‌شود، در این صورت عمق دفن هادی با توجه به کنترل پتانسیل گام و سایر ملاحظات هم پتانسیل‌سازی، می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

• آرایش نوع B [۲۸]

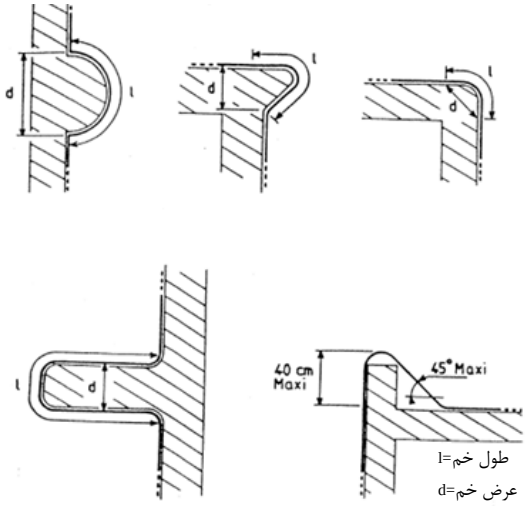
سیستم پایانه زمین نوع B برای ساختمان‌هایی که در سیستم حفاظتی آن‌ها از هادی‌های شبکه‌بندی شده و تعداد زیادی هادی پائین رونده جریان صاعقه استفاده شده است، بسیار مناسب است. در این روش هادی حلقه شده‌ای در فاصله یک متر از دیواره بیرونی ساختمان و در عمق حداقل ۵۰ سانتی‌متر پیرامون سازه مورد حفاظت درون خاک، نصب می‌گردد که می‌بایست حداقل ۸۰ درصد طول پیرامونی سازه را در برگیرد. برای سایت‌هایی که بر روی صخره‌های سنگی مستقر هستند، تنها این روش نوع B می‌بایست اجرا گردد.

لازم به‌ذکر است رابط بین سیستم صاعقه‌گیر و زمین، هادی‌های پایین رونده می‌باشد. در صورت وجود حلقه و یا خم در هادی‌های پایین رونده، سیستم صاعقه‌گیر طراحی شده در مناطق کوهستانی و مرتفع عملکرد مطلوبی نخواهد داشت.

در مراجع [۲۴ و ۲۵] به‌صورت اخصاصی در خصوص هادی‌های پایین رونده و خم‌های این نوع هادی‌ها به تفصیل صحبت شده است. هادی‌های پایین‌رو باید تا آن‌جایی که ممکن است مستقیم و بدون خمیدگی نصب گردند.

همچنین مسیر این هادی‌ها باید کوتاه‌ترین مسیر باشد و از خم هادی نیز به شدت اجتناب گردد. شعاع خمش نباید کمتر از ۲۰ سانتی‌متر باشد. از قرار دادن هادی‌های پایین‌رو در مسیر یا تقاطع با کانال‌ها و داکت‌های برقی باید اجتناب گردد. در تعیین مسیر هادی میانی باید از دیواره‌های کوتاه یا گچبری‌های ساختمان اجتناب شود و تمهیداتی جهت اطمینان از انتخاب مستقیم‌ترین مسیر انجام شود ولی عبور هادی میانی از روی دیواره‌های کوتاه، حداکثر تا ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و با شیب ۴۵ درجه یا کم‌تر مجاز می‌باشد.

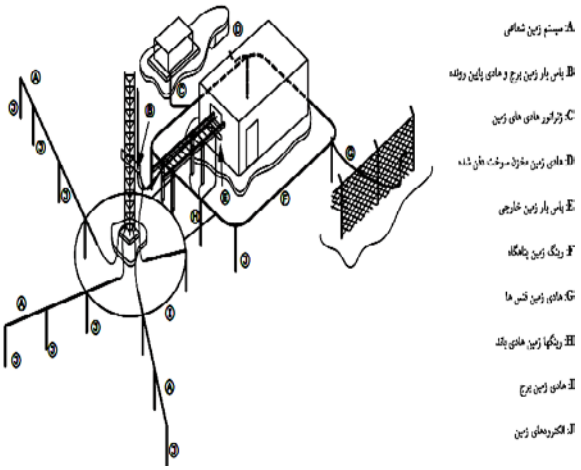
در صورتی که نتوان هادی پایین‌رو را در خارج ساختمان تعصب کرد می‌توان آن‌را در قسمتی از مسیر یا کلا در داخل ساختمان جایگذاری نمود. در این شرایط هادی پایین‌رو را باید داخل یک داکت عایق و غیرقابل اشتعال اختصاصی قرار داد. شکل (۹)، نمونه‌ای از خم‌های استاندارد هادی‌های پایین رونده که در مرجع [۲۵] بیان شده است را نشان می‌دهد.



شکل (۹): اجزای کلی یک سیستم مخابراتی [۲۵].

۴-۱- اجرای الکترود زمین در محیط‌های صخره‌ای

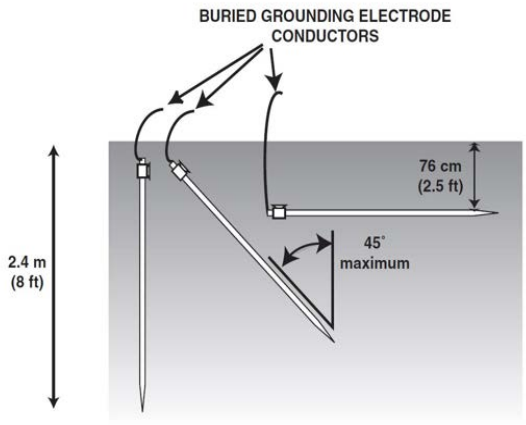
در هنگام ساخت ایستگاه‌های مخابراتی در کوه‌های صخره‌ای و سنگی، استفاده از فونداسیون ساختمان و پیش‌بینی‌های لازم، بهترین روش برای اجرای الکترود زمین می‌باشد. مقاومت این شبکه اگر هم بالا باشد، اما همچنان یک شبکه هم‌پتانسیل شده و مرجع مناسب پتانسیل برای ساختمان فراهم آمده است [۲۶]. شکل (۱۰) نمایی از اجزاء یک سیستم مخابراتی در ارتفاع بالا را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): اجزاء کلی یک سیستم مخابراتی [۲۶].

در این سایت‌ها، همچنان استفاده از روش نوع B و اتصال حلقه شده و هم‌پتانسیل کننده به هادی‌های پائین برنده جریان صاعقه، لازم است. در جایی‌که از روش نوع B استفاده می‌شود و امکان حفاری و دفن هادی درون زمین وجود نداشته باشد سیم‌ها روی صخره و یا شیار آن‌ها نصب شده و به طریقی از صدمات مکانیکی (پوشیده شدن با بتن و یا سنگ) محافظت می‌گردند [۲۵]. در سایت‌هایی که ساختمان‌های متعدد وجود دارند و کابل‌های برق، دیتا، سیگنال و ... میان آن‌ها کشیده شده است، لازم است مجموعه شبکه‌های زمین ساختمان (الکترود فونداسیون ، نوع A و یا B) از دو یا چند مسیر به یکدیگر متصل شوند. این روش مقاومت انتقالی میان ساختمان‌ها را کاهش داده و از نقطه نظر EMC (سازگاری الکترومغناطیسی) به ویژه در سایت‌هایی که تجهیزات حساس مخابراتی/داده موجود است بسیار مفید خواهد بود. آرماتورهای فولادی بهم پیوسته درون پی ساختمان و یا سایر قطعات فلزی که در زیر زمین مدفون شده‌اند، می‌توانند به‌عنوان الکترودهای زمین محسوب شوند. استفاده از پی ساختمان این مزیت را دارد که ضمن ایجاد کم‌ترین امپدانس در مقابل عبور جریان صاعقه به جرم کلی زمین، می‌تواند یک مرجع پتانسیل ثابت، یکنواخت و غیرقابل تغییر باشد. بدیهی است در جایی‌که فونداسیون دارای عایق رطوبتی است استفاده از آن برای شبکه زمین منتفی است [۲۵].

رادهای سیستم زمین که به‌علت تماس با سازه‌های سنگی و صخره‌ای نمی‌توانند مستقیما به سمت پایین حرکت کنند بهتر است با زاویه تقاطع کوچک‌تر یا مساوی ۴۵ درجه نسبت به عمود (زاویه مورب ۴۵ درجه) و یا به صورت افقی یا عمود بر ساختمان در عمق (۳۰ اینچ) ۷۶۲ میلی‌متر دفن شوند [۲۹]. این موضوع در مرجع [۲۳] نیز آمده است با این تفاوت که به‌جای ۷۶۲ میلی‌متر به ۸۰۰ میلی‌متر اشاره شده است. بخش فوقانی رادهای سیستم زمین نباید به‌علت عدم فرو رفتن در زمین و صخره‌ای بودن بریده شوند بلکه باید از روش‌هایی که در بالا گفته شد برای درایو کردن رادها در زمین استفاده کرد. اگر سازه‌های سنگی مانع حرکت رادهای سیستم زمین به عمق مشخص شوند، یک روش عملی و کاربردی برای دستیابی به یک سیستم الکترود زمین قابل قبول باید طراحی و اجرا گردد. شکل (۱۱) زاویه دفن رادها در سیستم زمین را نشان می‌دهد.

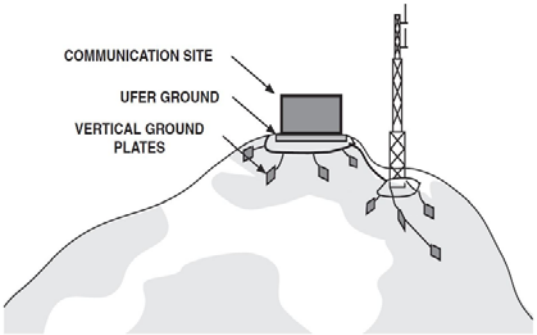


شکل (۱۱): زاویه دفن رادها در زمین [۲۹].

برخی سایت‌های مخابراتی به‌علت خصوصیات انتشار RF در محیط‌های صخره‌ای قرار می‌گیرند، جایی که هیچ یا مقدار کمی خاک وجود دارد و نیاز به طراحی خاصی دارد [۲۹]. در این حالت حداکثر تلاش برای استفاده از گزینه‌های ممکن و مورد نیاز برای دستیابی به مقاومت زمین مناسب باید صورت گیرد. نصب هادی‌های زمین شعاعی از برج‌ها و ساختمان‌ها تا عمقی که خاک اجازه می‌دهد (ترجیحا ۳۰-۱۸ اینچ). در هادی‌های زمین شعاعی می‌توان از مواد کاهنده مقاومت زمین استفاده نمود. ازآنجایی که بتن رسانا نیازی به پوشش محافظتی ندارد می‌تواند به‌عنوان بهترین ماده کاهنده مقاومت زمین در این مناطق مورد استفاده قرار گیرد.

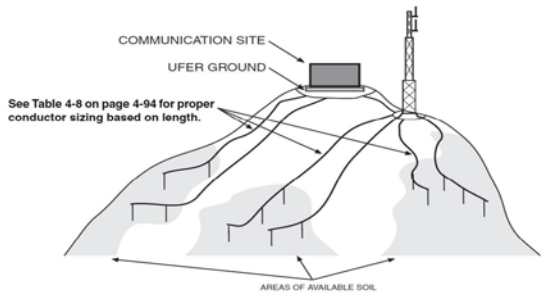
یکی دیگر از روش‌های مورد تاکید در مرجع [۲۹]، استفاده از حلقه زمین مدفون در عمقی که خاک اجازه می‌دهد. رینگ زمین باید در ماده محافظ الکترودهای زمین محکم شود. در این میان، بتن رسانا می‌تواند بهترین ماده پوشش دهنده الکترودهای زمین برای استفاده در محیط‌های خاکی کم عمق باشد؛ چرا که بتن‌های رسانا برای حفاظت از الکترودها نیازی به پوشش کف زمین ندارند. نصب رادهای زمین افقی یا رادهای زمین الکترولیتی افقی در طول حلقه‌های زمین به‌جای استفاده از رادهای عمودی نیز یکی دیگر از روش‌های متداول می‌باشد. رادهای سیستم زمین باید عمود بر ساختمان‌ها و دکل‌ها نصب شوند همچنین محکم کردن الکترودهای زمین در یک ماده محافظ الکترودهای زمین باعث افزایش بیشتر کارایی سیستم زمین می‌شود.

مرجع [۳۰] نصب صفحات زمین در طول رینگ زمین به‌جای رادهای عمودی را به عنوان بهترین روش اجرای سیستم زمین پیشنهاد می‌هد. محکم کردن الکترودهای زمین در یک ماده محافظ الکترودهای زمین باعث افزایش بیشتر کارایی سیستم زمین می شود [۳۰]. شکل (۱۲)، روش استفاده از صفحات مسی در سیستم زمین سایت‌های در مناطق کوهستانی صخره‌ای را نشان می‌دهد.



شکل(۱۲): سیستم زمین در کوهستان به کمک صفحات مسی [۳۰]

نصب هادی‌های پایین رونده در مناطق با ارتفاعات کم‌تر که در آن‌ها خاک قابل استفاده برای رادهای عمودی وجود دارد، یکی دیگر از روش‌های مطرح شده در مرجع [۲۹] می‌باشد که در شکل (۱۳) نشان داده شده است. استفاده از هادی‌های پایین رونده اگر مانند هادی‌های زمین شعاعی در زیر زمین که امکان نفوذ دارند دفن شوند بسیار موثرتر خواهند بود. هادی‌های پایین رونده به تنهایی برای سیستم الکترود زمین کارا و موثر نیستند و باید در کنار سایر روش‌های مطرح شده مانند استفاده از رینگ، هادهای شعاعی و افقی و به‌عنوان سیستم کمکی استفاده شوند، تا سیستم زمین موثرتر محقق گردد [۲۹].



شکل (۱۳): نمونه‌ای از ایجاد سیستم زمین به کمک هادی‌های پایین رونده [۳۰]

نصب هادی‌های زمین شعاعی تسمه‌ای مسی روی سطوح یا در شکاف سنگ‌ها در تمام جهات اطراف برج‌ها و ساختمان‌ها می‌توان استفاده نمود. در این میان می‌توان از مواد تقویت کننده رسانایی زمین، مانند بتن رسانا استفاده نمود. هر تسمه شعاعی مسی باید طول متفاوتی داشته باشد تا از آسیب رسیدن به برج و یا ساختمان در زمان وقوع صاعقه جلوگیری کند. در سایت‌هایی که در ارتفاعات کوهستانی و صخره‌ای که دستیابی به سیستم الکترود زمین موثر مشکل می‌باشد، ایده حفاری و حفر سوراخ در صخره و سنگلاخ برای وارد کردن رادهای سیستم زمین با مواد محافظ الکترود زمین پیرامون آن عموما غیر موثر در نظر گرفته می‌شود؛ چرا که سطوح سنگ‌ها بسیار رساناتر از سوراخ‌های ایجاد شده به‌وسیله حفاری هستند. بنابراین در صورت حفاری باید از اجزا سیستم الکترود زمین اضافی استفاده گردد [۲۹].

۵- نتیجه‌گیری

صاعقه پدیده‌ای است طبیعی که احتمال وقوع آن نیز امری تصادفی می‌باشد و از یک قانون تبعیت نکرده بلکه یک واقعه احتمالی است. هدف از نصب صاعقه‌گیر حفاظت از سیستم‌ها و افراد در برابر صاعقه و ایجاد مسیری مطمئن جهت انتقال جریان عظیم صاعقه به زمین می‌باشد، در سیستم صاعقه‌گیر رادهای هوایی وظیفه جذب صاعقه و هادی‌های نزولی وظیفه انتقال جریان را به شبکه ارتینگ برعهده دارند. از آن‌جایی‌که عموما ایستگاه‌های مخابراتی و دیتا، در نقاط مرتفع کوهستانی و یا در

فضاهای باز مستقر هستند، اهمیت حفاظت در برابر صاعقه در آن‌ها بسیار با اهمیت می‌باشد. در این مقاله، مروری بر روش‌های مختلف طراحی و اجرای سیستم‌های حفاظت در برابر صاعقه و ارتینگ سایت‌های مخابراتی در نقاط با ارتفاع بالا و زمین‌های صخره‌ای از نگاه استانداردها و توصیه‌نامه‌های بین‌المللی ارائه گردید. همچنین در این مقاله به منظور لزوم داشتن یک سیستم حفاظتی مناسب و با کیفیت، استانداردهای مخابراتی، نظامی و بین‌المللی مختلفی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. لذا در ابتدا تئوری صاعقه، روابط ریاضی در این خصوص و سطح کرونیک صاعقه ارائه و سپس مروری بر انواع روش‌های طراحی سیستم صاعقه‌گیر روش اجرای سیستم زمین در ارتفاعات و زمین‌های صخره‌ای پرداخته شد. روش‌های حفاظتی برای مشخص کردن مکان قرارگرفتن پایانه‌های صاعقه‌گیر از جمله روش زاویه حفاظتی، گوی غلتان و شبکه‌بندی معرفی و مورد بررسی قرار گرفت. روش زاویه حفاظتی، برای حفاظت سازه‌هایی با شکل ساده و سایر تأسیسات کوچک با ارتفاع محدود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی روش شبکه‌بندی برای حفاظت سطوح وسیع مانند سطح روی بام‌ها به‌کار می‌رود. در طراحی صاعقه‌گیر در نقاط مرتفع بیشتر از روش گوی‌غلتان استفاده می‌شود. استفاده از این روش برای کلیه سازه‌ها مناسب است. در ادامه این مقاله روش‌های مختلف طراحی سیستم زمین در ارتفاعات بالا بررسی شد. استانداردهای مختلفی در این خصوص ایده‌ها و راه حل‌هایی را مطرح کرده بودند که در این میان مرجع [۲۹] کامل‌ترین مرجع بوده است. با توجه به موارد بیان شده در اکثر استانداردها برای اجرای سیستم زمین در ارتفاع بالا و مکان‌های صخره‌ای، استفاده از هادی‌های شعاعی محکم شده به‌وسیله مواد محافظ الکترود زمین مثل بتن رسانا، موثرتر و به لحاظ اقتصادی به‌صرفه‌تر است.

۶- مراجع

[۱] احمدی، اسحاق، عباسی سمنگانی، محمود، بررسی اثر طول خط انتقال در میرایی اضافه ولتاژهای ناشی از اصابت مستقیم موج گذرای صاعقه در خط انتقال تک مداره ۴۰۰ کیلوولت، پنجمین کنفرانس بین المللی پژوهش های کابردی در مهندسی برق مکانیک و مکاترونیک، تهران، ۱۳۹۷.

[۲] پارسا، محمد، سیدامین، سعید، اکبری رکن آبادی، حمیدرضا، بررسی میزان تاثیر جریان عبوری از سامانه زمین بر تخلیه صاعقه در شبکه قدرت، دومین کنفرانس ملی پژوهش های نوین در مهندسی برق، بابل، موسسه علمی تحقیقاتی کومه علم آوران دانش، ۱۳۹۵.

[۳] نیاستی، محسن، رشیدی، حسین، مطالعه‌ی حفاظت اضافه ولتاژ القایی ناشی از صاعقه بر روی شبکه ی توزیع، چهارمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران، گناباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد، ۱۳۹۱.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] L. Dellera 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] J. He, Y. Tu, R. Zeng, J. B. Lee, S. H. Chang, and Z. Guan, "Numeral analysis model for shielding failure of transmission line under lightning stroke," IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pp. 815-821, Apr. 2005.

[۱۲]یحیی آبادی، صدوقی، نمونه سازی و آنالیز عملکرد صاعقه گیر دکلهای مخابراتی به منظور هماهنگی سیستم حفاظت با شرایط محیطی، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، الف- مهندسی برق، سال ۱۳ ، شماره ۲، پاییز ۱۳۹۴.

[13] R. Markowska, "Induced and ground potential voltage components in analysis of separation distance for lightning protection in buildings," Przeklad Elektrotechniczny, vol. 92, pp. 265–270, 2017.

[14] A. R. Panicali, J. C. O. Silva, C. F. Barbosa, and N. V. B. Alves, "Preventing sparks between external LPS and structure conductive parts," Electric Power Systems Research, vol. 153, pp. 144-151, 2017.

[15] J. Bendík, M. Cenký, M. Pípa, A. Kment, M. Chudý, and A. Beláň, "Experimental verification of material coefficient defining separation distance for external lightning protection system," Journal of Electrostatics, vol. 98, pp. 69-74, 2019.

[16]Yang Zhang, Hongcai Chenb, and Yaping Du, "Lightning protection design of solar photovoltaic systems: Methodology and guidelines" Electric Power Systems Research, vol. 174, pp. 121-132, 2019.

[17]K. Yamamoto, T. Noda, S. Yokoyama, and A. Ametani, "Experimental and analytical studies of lightning overvoltage in wind turbine generator systems," Electric Power Systems Research, vol. 79, pp. 436–442, 2019.

[18]N. I. Ahmad, et al., "Lightning protection on photovoltaic systems: a review on current and recommended practices," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 82, pp. 1611–1619, 2018.

[19]C. A. Charalambous, N. D. Kokkinos, and N. Christofides, "External lightning protection and grounding in large-scale photovoltaic applications," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 56, pp. 427–434, 2015.

[20] R. H. Golde, "Lightning Protection," Edward Arnold Publishing Co., London, Britain, 1973.

[21] M. A. Uman, "The Art and Science of Lightning Protection," Cambridge, U. K.: Cambridge University Press, 2008.

[22] http://www.mappery.com/map-of/Global-Lightning-Strike-Map

[23] 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.

[24] IEC 62305: Protection against lightning – Physical damage to structures and life hazard, 2012.

[25] NFC 17-102 Protection against lightning: Early streamer emission lightning protection systems, 2011.

[۲۶] جزوه آموزشی نظارت بر طراحی و اجرای سامانه های اتصال زمین و حفاظت ابنیه و تجهیزات الکترونیکی در مقابل صاعقه و فراتاخت ولتاژ، شرکت ارتباطات زیر ساخت، ۱۳۸۷.

[27] DOE/ M440.1-1, Department of Energy Electrical Storms and Lightning Protection, 1996.

[28] FAA-STD-019e Lightning Protection, Grounding, Bonding and Shielding Requirements for Facilities, 2005.

[29] Motorola R-56, Standards & Guidelines for communications sites, 2012.

[30] British Standard, BS6651 Protection of Structures against Lightning, 1992.

A Review on Earthing Systems and Lightning Protection Techniques for Telecommunication Towers on Mountains and Rocky Land

R. Ghaffarpour*, M. Loni

Abstract

Passive defense principles are essential in the design and implementation of vital and critical plans as well as infrastructures to prevent and reduce the risks of natural disasters such as lightning. Lightning is a natural atmospheric phenomenon and there are no means to prevent it from happening. Direct and indirect exposure to lightning and the transmission of lightning discharge through the buildings and their inbound service lines can be harmful and hazardous to humans, buildings and their valuable contents, so it is imperative that measures be taken to protect against lightning. Since telecommunications and data stations are generally located in highlands or outdoors, lightning protection is essential and urgent. This paper provides an overview of the different methods of designing and implementing lightning protection systems and grounding of telecommunication sites at high altitudes and rocky terrains from the standpoint of international standards and recommendations. In this article, a review and analysis of earthing systems and lightning protection techniques and related international, military and communication standards for telecommunication towers on mountains and rocky land have been presented in order to design and propose a good quality protection system in accordance with relevant standards.

Key Words: *Lightning Protection, Earthing System, Mountainous Areas, Telecommunication Sites, International Standards*

* Imam Hossein Comprehensive University - (rghaffarpour@ihu.ac.ir) - Writer-in-Charge