نشریه علمی «الکترومغناطیس کاربردی»
سال هشتم، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۹؛ ص ۱۱۷- ۱۰۷

علمی– پژوهشی

پیاده‌سازی سامانه زمین بهینه به‌منظور حداقل‌سازی ولتاژ گام و تماس سایت‌های مخابراتی در محیط‌های صخره‌ای و ارتفاع بالا (مورد مطالعاتی: سایت بمو)

رضا غفارپور[1*]، سعید زمانیان[2]

۱- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۳، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۸)

چکیده

هدف از اجرای طرح‌های پدافند غیرعامل، کاستن از آسیب‌پذیری نیروی انسانی و تجهیزات حیاتی و حساس کشور در شرایط بحرانی می‌باشد. ازاین‌رو، رعایت اصول پدافند غیرعامل به‌منظور پیشگیری و کاهش مخاطرات ناشی از سوانح طبیعی از جمله صاعقه ضروری و لازم می‌باشد. برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه به ساختمان‌ها و انتقال جریان آن از طریق خطوط خدماتی ورودی به آن‌ها می‌تواند باعث ایجاد ولتاژ گام و تماس گردد که برای انسان‌ها، ساختمان‌ها و محتویات با ارزش آن‌ها، آسیب‌زننده و خطرناک می‌باشد. به‌طور کلی ولتاژ گام تا شعاع چند متر در اطراف محل اصابت صاعقه، پراکنده می‌شود و امر موجب برق‌گرفتگی افرادی می‌شود که در اطراف آن حضور دارند. از این‌رو، تحقیق حاضر با هدف به حداقل رساندن آسیب‌های ناشی از برخورد صاعقه به مراکز حساس در ارتفاع بالا و مناطق صخره‌ای از منظر پدافند غیرعامل می‌پردازد. از آنجایی‌که عموماً ایستگاه‌های مخابراتی و دیتا در نقاط مرتفع کوهستانی و یا در فضاهای باز مستقر هستند، اهمیت حفاظت کارکنان در برابر صاعقه در آنها بسیار با اهمیت می‌باشد. در این مقاله، بهترین و بهینه‌ترین روش جهت اجرای سامانه زمین به‌منظور حداقل‌سازی ولتاژ گام و تماس سایت‌های مخابراتی در ارتفاع بالا با کمک نرم‌افزار قدرتمند CDEGS و مطابق استانداردهای بین‌المللی ارائه می‌گردد.

کلید واژه‌ها: سامانه زمین، ولتاژ گام، ولتاژ تماس، حفاظت صاعقه، مناطق کوهستانی، سایت‌های مخابراتی

۱. مقدمه

صاعقه پدیده‌ای است که احتمال وقوع آن تصادفی و احتمالاتی می‌باشد و از یک قانون کلاسیک تبعیت نمی‌کند. هدف از نصب صاعقه‌گیر، حفاظت از سامانه‌ها و افراد در برابر صاعقه و ایجاد مسیری مطمئن جهت انتقال جریان عظیم صاعقه به زمین می‌باشد، در سامانه صاعقه‌گیر میله‌های هوایی وظیفه جذب صاعقه و هادی‌های نزولی وظیفه انتقال جریان را به شبکه زمین به عهده دارند. به‌طور کلی، زیرساخت اصلی در حفاظت تجهیزات چه در برابر اصابت مستقیم صاعقه و چه در مقابله با اضافه ولتاژهای به‌وجودآمده از آن در گذشته و حال، سامانه زمین حفاظتی یا ارت بوده است [۱]. معمولاً برج‌های مخابراتی بر حسب ضرورت، در مناطق کوهستانی و در ارتفاع بالا نصب می‌شوند و همواره در معرض برخورد صاعقه قرار دارند. 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. سامانه حفاظت در برابر صاعقه باید بدون این که به دکل و آنتن‌های نصب‌شده روی آن آسیب برسد، جریان صاعقه را وارد زمین نماید. بنابراین سامانه حفاظت در برابر صاعقه از ایجاد صاعقه جلوگیری نمی‌کند، بلکه آن را تحت کنترل به سمت خود جذب نموده و با انتقال انرژی صاعقه به زمین از آسیب‌های احتمالی جلوگیری نمایند [۲]. به‌طور کلی هدف از نصب سامانه صاعقه‌گیر و زمین حفاظت از سامانه‌ها و افراد در برابر صاعقه و ایجاد مسیری مطمئن جهت انتقال جریان عظیم صاعقه به زمین می‌باشد. سامانه صاعقه‌گیری که به درستی طراحی و نصب‌شده باشد امنیت جانی افراد و ایمنی تجهیزات را بدنبال خواهد داشت [۳]. تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص مدل‌سازی صاعقه و چگالی برخورد آن انجام گرفته است. با توجه به اینکه رفتار صاعقه در محدوده گسترده‌ای از مقادیر پارامترهای آن تصادفی است، لذا مدل‌سازی آن با کمک روش‌های احتمالاتی از جمله مونت کارلو جهت به‌دست‌آوردن نتایج واقعی‌تر استفاده می‌گردد که از جمله آن می‌توان به مراجع [۴ و ۵] اشاره نمود. علاوه بر مدل‌سازی صاعقه، مقالات زیادی به بررسی و مدل‌سازی سامانه حفاظت صاعقه در شرایط مختلف عملکردی آن پرداخته‌اند. مراجع [۶] و [۷] به بررسی اضافه ولتاژهای ایجادشده بین سامانه حفاظت از صاعقه و سازه مورد حفاظت در هنگام برخورد صاعقه می‌پردازد. در مرجع [۷] بر اساس مدل‌سازی‌ها و

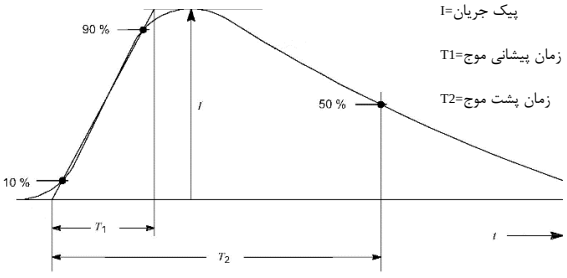
* نویسنده پاسخگو: rghaffarpour@ihu.ac.ir

نتایج به‌دست‌آمده در این مرجع، حتی اگر فاصله‌های بیان‌شده در استانداردهای بین‌المللی رعایت شده باشد، امکان تخلیه الکتریکی بین سامانه حفاظت از صاعقه و سازه مورد حفاظت وجود دارد. مرجع [۸]، به بررسی آزمایشگاهی ضریب ماده عایقی بین سامانه حفاظت از صاعقه و سازه می‌پردازد به‌طوری تخلیه الکتریکی بین این دو رخ ندهد. در اجرای روش‌ها و تمهیدات مقابله با صاعقه در پایگاه‌های حساس مطابق با استانداردهای پدافندی غیرعامل، اولویت با حفاظت جان کارکنان می‌باشد. لذا اگر در اجرای این روش‌ها، خدشه‌ای به حفاظت از جان کارکنان وارد شود، از اجرای آن روش باید جلوگیری به عمل آمده و از روشی استفاده شود که این اولویت بسیار مهم در آن در نظر گرفته شده باشد. لذا بعد از وقوع صاعقه و با فرض عملکرد مناسب سامانه صاعقه گیر در مهار صاعقه و انتقال جریان آن به سامانه زمین، در صورتی سامانه زمین طراحی مناسبی نداشته باشد می‌تواند باعث آسیب‌های جانی گردد [۹]. از جمله پارامترهای مهم در طراحی سامانه زمین، کاهش ولتاژ گام و تماس در هنگام وقوع صاعقه می‌باشد. به‌طور کلی تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص ولتاژ گام و تماس انجام شده است. مراجع [۱۰-۱۲] به روش‌های اندازه‌گیری ولتاژ گام و تماس در سامانه‌های مختلف می‌پردازند. در مرجع [۱۲]، کاهش اثرات صاعقه بر ولتاژ گام و تماس دکل‌های سامانه انتقال قدرت با کمک الگوریتم ژنتیک ارائه گردیده است. مرجع [۱۳] اثرات ولتاژ گام و تماس و نحوه کاهش آن با طراحی مناسب و بهینه سامانه زمین در یک شبکه میکروگرید را مورد بررسی قرار داده است. لازم به ذکر است که تاکنون تحقیق جامعی در خصوص انتخاب بهترین سامانه زمین جهت کاهش ولتاژ گام و تماس در سایت‌های در ارتفاع بالا و محیط‌های صخره‌ای انجام نگرفته است. در این مقاله به‌منظور کاهش تلفات جانی، بهترین و بهینه‌ترین روش پیاده‌سازی سامانه زمین جهت حداقل‌سازی ولتاژ گام و تماس سایت‌های مخابراتی در ارتفاع بالا مطابق استانداردها بین‌المللی ارائه می‌گردد.

لذا در ادامه این مقاله و در بخش دوم تئوری صاعقه، روابط ریاضی در این خصوص و همچنین روش‌های طراحی صاعقه‌گیر ارائه خواهد شد. در بخش سوم و چهارم ولتاژهای مجاز در طراحی سامانه حفاظت یک سایت شامل ولتاژ گام و ولتاژ تماس و همچنین روش‌های اندازه‌گیری مقاومت زمین پرداخته خواهد شد. در بخش پنجم شبیه‌سازی پتانسیل سطحی و میدان الکتریکی، ولتاژ گام و تماس برای سه نمونه آرایش سامانه زمین (شعاعی، درختی و مش) برای سایت نمونه ارائه می‌گردد. در انتها نیز نتیجه‌گیری از بحث ارائه خواهد شد.

۲. صاعقه و طراحی صاعقه‌گیر

وقتی بار الکتریکی انباشته‌شده در ابرها، تخلیه شده و به‌صورت یک قوس الکتریکی به زمین برخورد کند، صاعقه اتفاق می‌افتد. توزیع بار الکتریکی در ابرها معمولاً به‌گونه‌ای است که بار منفی در لایه‌های پائینی قرار می‌گیرد. در اثر وجود این بار منفی، روی سطح زمین بار مثبت القا می‌شود. با ادامه این فرآیند اندازه بار مثبت و منفی و اختلاف پتانسیل بین ابر و زمین افزایش می‌یابد. در این شرایط بارها به‌طور ناگهانی شروع به حرکت نموده و صاعقه ایجاد می‌شود. 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 به قدر کافی بزرگ باشد، هوا در یک نقطه از سطح ابر شروع به یونیزاسیون نموده و در اثر آن به‌صورت یک گاز هادی در می‌آید [۱۴]. مسیر یونیزه شدن هوا را کانال هادی می‌گویند. رشد این کانال به سرعت 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 به‌وجود می‌آید که از این مسیر جریان الکتریکی شدیدی در حدود ۲ تا ۳۰۰ کیلوآمپر عبور می‌کند [۱۵]. به دلیل طبیعت احتمالی صاعقه، پیشگیری از برخورد آن و حفاظت کامل تجهیزات امری بسیار پیچیده، دشوار و تا حدودی غیرعملی است. اما سامانه 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 به‌گونه‌ای 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 سامانه حفاظتی فرار کند. لذا به‌منظور جلوگیری از فرار صاعقه، انتخاب بهترین روش طراحی سامانه حفاظت صاعقه ضروری می‌باشد [۱۵]. شکل (۱) نمونه یک موج جریان صاعقه را نشان می‌دهد. 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[۱۴]

هر صاعقه دارای سه پارامتر مهم است که در شکل (۱) این پارامترها مشخص شده‌اند. مهم‌ترین آنها حداکثر دامنه جریان صاعقه (I) است و دیگر پارامترها عبارت‌اند از T_1 زمان پیش موج (زمان پیشانی) و T_2 زمان پشت موج می‌باشد. در بیشتر مراجع پارامترهای صاعقه را I=31 kv و T_1= 1.2 µs و T_2= 50 µs در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به اینکه رفتار صاعقه در محدوده گسترده‌ای از مقادیر I، T_1 و T_2 تصادفی است، لذا شبیه‌سازی‌های احتمالاتی از جمله مونت کارلو نتایج واقعی‌تری را نسبت به انجام بررسی با یک I، T_1 و T_2 مشخص به بار خواهد آورد.

$$i(t) = AI \times (e^{\frac{-\alpha t}{T_1}} - e^{\frac{-\beta t}{T_2}}) \qquad (۱)$$

که در آن I حداکثر دامنه جریان صاعقه، T_1 زمان پیش موج و T_2 زمان پشت موج می‌باشد. استانداردهای معتبر همچون IEEE توزیع زیر را برای دامنه جریان صاعقه پیشنهاد کرده‌اند.

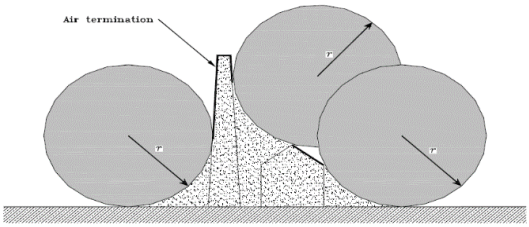
$$P(i > I) = \frac{1}{1 + \frac{I^{2.6}}{31}} \qquad (۲)$$

که در این رابطه واحد جریان کیلوآمپر می‌باشد. به کمک این رابطه و بر اساس روش معکوس‌سازی متغیر تصادفی I در رابطه (۱) تولید می‌شود [۱۶].

در این میان، به‌منظور حفاظت از ساختمان‌ها و سایت‌های حساس از اصابت مستقیم صاعقه از صاعقه‌گیر استفاده می‌شود. به‌طور کلی روش‌های حفاظتی برای مشخص کردن مکان قرار گرفتن صاعقه‌گیرها سه روش زاویه حفاظتی، گوی غلتان و شبکه‌بندی می‌باشد. به‌طور کلی بر اساس توصیه‌های استانداردها از جمله مرجع [۱۷]، در سایت‌های در ارتفاع بالا از روش گوی غلتان استفاده می‌شود. 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 که برای سایت‌های در ارتفاع بالا این شعاع ۲۰ متر در نظر گرفته می‌شود. شکل (۲) طراحی حفاظتی به روش گوی غلتان را نشان می‌دهد. 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 شئی مورد حفاظت کمتر باشد.

$$P = r - \left[\left(r^2 - \frac{d}{2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad P < h_t - h \quad , \quad h_t < r \qquad (۳)$$

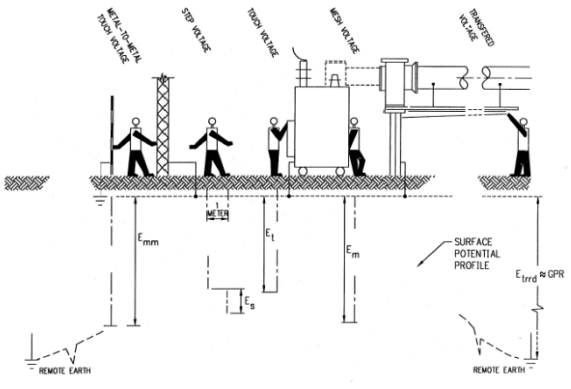
که در آن r شعاع گوی غلتان، d فاصله دو میله، h_t ارتفاع میله‌ها و h ارتفاع سازه مورد حفاظت می‌باشد.



شکل (۲): شعاع‌های مختلف حفاظتی به روش گوی غلتان [۱۷]

۳. معیارهای انتخاب ولتاژ تماس و گام مجاز

ولتاژ گام و تماس از جمله مهم‌ترین پارامترهای یک سامانه حفاظت صاعقه و زمین می‌باشد که به‌منظور جلوگیری از آسیب‌های جانی، می‌بایست در محدوده مجاز قرار گیرد. ولتاژ گام، اختلاف پتانسیل بین پاهای انسان به فاصله یک متر می‌باشد. ولتاژ تماس نیز اختلاف پتانسیل بین پتانسیل زمین و پتانسیل سطح در نقطه‌ای که شخص به سازه فلزی دست میزند، می‌باشد. در استانداردهای مختلف پیش‌فرض‌های مختلف برای محاسبات ولتاژ گام و تماس وجود دارد از جمله می‌توان به نوع خاک سطحی و مقاومت ویژه‌ی آن، کفش و یا دستکش کارکنان و مقدار جریان متوسطی که می‌تواند به انسان آسیب برساند. لذا با توجه به پیش‌فرض‌ها مقدار ولتاژ گام و تماس مجاز می‌تواند متغیر باشد. از مهم‌ترین استانداردها در این زمینه می‌توان به IEEE80 و BS EN 50522 اشاره نمود. در شکل (۳) اساس ایجاد ولتاژهای گام و تماس را نشان می‌دهد.



شکل (۳): اساس ایجاد ولتاژهای گام و تماس[۱۸]

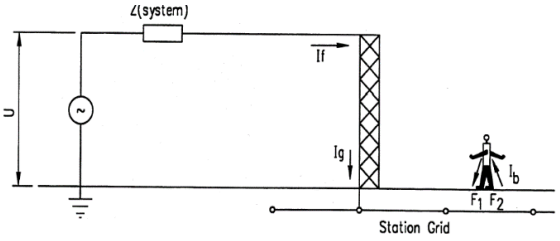
۳-۱. ولتاژ مجاز گام

شکل (۴) بیانگر خطا روی ساختمان می‌باشد و شخص در محیط در حال حرکت است. مطابق شکل (۴) جریان خطا I_f بین دو

پای شخص جاری می‌گردد. همچنین مقاومت کف پای انسان نسبت به جرم کلی زمین را R_f در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، ولتاژ گام مجاز بین دو پای شخص را می‌توان از رابطه به‌دست آورد [۱۹]:

$$E_{Step} = (2R_f + R_B) \times I_B \qquad (۴)$$

که در آن R_B مقاومت بدن انسان که برابر ۱۰۰۰ اهم می‌باشد، R_f مقاومت کف پای انسان نسبت به زمین، E_{Step} ولتاژ مجاز گام انسان و I_B جریان مجاز عبوری از بدن انسان هستند.



شکل (۴): دیاگرام نحوه ایجاد ولتاژ گام [۱۸]

مقدار مقاومت R_f کف پای انسان نسبت به زمین از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \qquad (۵)$$

که در آن ρ مقاومت ویژه خاک برحسب Ω.m، b شعاع صفحه می‌باشد. مقدار b از رابطه (۲-۶) محاسبه می‌گردد.

$$b = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \qquad (۶)$$

که در آن A مساحت کف پای انسان می‌باشد و مقدار آن برای پاهای بزرگسالان برابر ۲۰۰ سانتی‌متر مربع در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، مقدار b=0.08m محاسبه می‌گردد. بنابراین، مقاومت پایی که با زمین ارتباط دارد برابر است با:

$$R_f = 3\rho \qquad (۷)$$

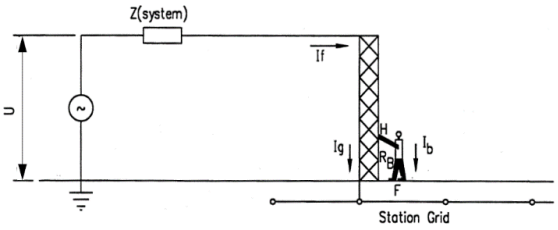
رابطه ولتاژ گام مجاز طبق روابط (۸) و (۹) برای افراد ۵۰ و ۷۰ کیلوگرم، به‌صورت زیر استخراج می‌گردد [۱۹]:

$$E_{Step} = (6\rho + 1000) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \qquad for \quad 50kg \qquad (۸)$$

$$E_{Step} = (6\rho + 1000) \times \frac{0.151}{\sqrt{t_s}} \qquad for \quad 70kg \qquad (۹)$$

۲-۳. ولتاژ مجاز تماسی

مطابق شکل (۵) شخص با لمس کردن سازه در زمان وقوع خطای بدنه، در معرض ولتاژ تماس ناشی از اتصال کوتاه قرار می‌گیرد. بنابراین، مقدار ولتاژ تماسی مجاز شخص باید بیشتر از مقدار ولتاژ تماسی تولیدشده توسط اتصال کوتاه فاز به بدنه باشد تا شخص در معرض برق‌گرفتگی قرار نگیرد.



شکل (۵): اساس ایجاد ولتاژ تماس [۱۸]

مطابق شکل (۵)، جریان از طریق دست جاری و از طریق پای انسان به قسمت تقسیم می‌گردد. به عبارت دیگر مقاومت بین دو پای انسان با هم موازی و با مقاومت بدن انسان سری می‌گردد. بنابراین، ولتاژ تماسی مجاز طبق رابطه ۲-۷ برابر است با:

$$E_{Step} = (\frac{R_f}{2} + R_B) \times I_B \qquad (۱۰)$$

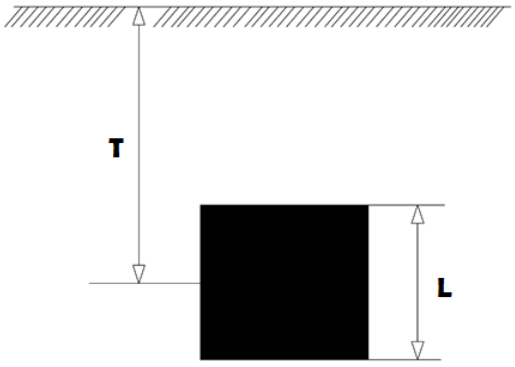
بنابراین، مقدار ولتاژ تماسی مجاز برای اشخاص ۵۰ و ۷۰ کیلوگرم برابر است با [۱۹]:

$$E_{Step} = (1.5\rho + 1000) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \qquad for \quad 50kg \qquad (۱۱)$$

$$E_{Step} = (1.5\rho + 1000) \times \frac{0.151}{\sqrt{t_s}} \qquad for \quad 70kg \qquad (۱۲)$$

۴. مقاومت سامانه زمین

در این مقاله اندازه‌گیری مقاومت زمین با پکیج نرم‌افزاری CDEGS با استفاده از دو ماژول RESAP و MALZ انجام شده است. علاوه بر محاسبه مقاومت زمین توسط نرم‌افزار، مقدار مقاومت زمین برای حالات مختلف از جمله الکترود میله‌ای و صفحه‌ای قابل محاسبه می‌باشد. شکل (۶) یک الکترود صفحه‌ای در داخل زمین را نشان می‌دهد.

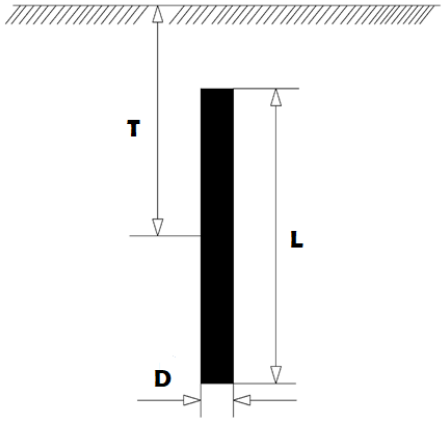


شکل (۶): الکترود صفحه‌ای در زمین، L : طول صفحه به متر، T : فاصله سطح زمین تا وسط الکترود صفحه‌ای

برای محاسبه مقاومت الکترود صفحه‌ای می‌توان از رابطه (۱۳) استفاده نمود [۲۰]:

$$R=\frac{\rho}{4\sqrt{\pi L^2}}\left(\frac{\pi}{2}+\sin^{-1}\sqrt{\frac{0.5^2}{4T^2\pi+L^2}}\right) \qquad (۱۳)$$

که در آن ρ مقاومت ویژه زمین، L طول صفحه به متر و T عمق چاه زمین به متر می‌باشد. شکل (۷) یک الکترود میله‌ای در زمین را نشان می‌دهد.



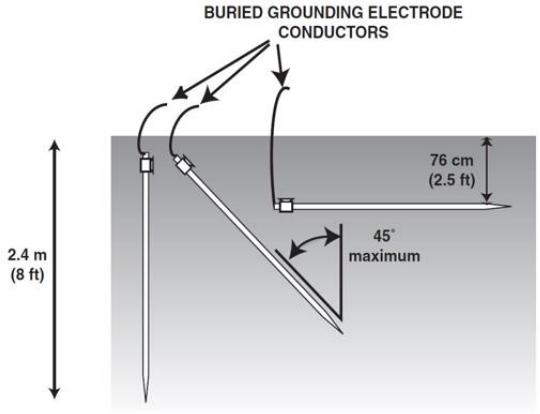
شکل (۷): الکترود میله‌ای در زمین L: طول میله به متر، T: فاصله سطح زمین تا وسط تسمه به متر و D قطر میله مسی به متر

برای محاسبه مقاومت الکترود میله‌ای می‌توان از رابطه (۱۴) استفاده نمود [۲۰]:

$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{2L}{D}+\frac{1}{2}\ln\frac{4T+L}{4T-L}\right) \qquad (۱۳)$$

به‌طور کلی 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 [۱۷].

به‌طور کلی در مناطق صخره‌ای از الکترودهای میله‌ای در سامانه زمین استفاده می‌شود. الکترودهای میله‌ای سامانه زمین، به علت تماس با سازه‌های سنگی و صخره‌ای نمی‌توانند به‌طور مستقیم به سمت پایین حرکت کنند بهتر است با زاویه تقاطع کوچک‌تر یا مساوی ۴۵ درجه نسبت به عمود (زاویه مورب ۴۵ درجه) و یا به‌صورت افقی یا عمود بر ساختمان در عمق (۳۰ اینچ) ۷۶۲ میلی‌متر دفن شوند [۲۱].این موضوع در مرجع [۲۲] نیز آمده است با این تفاوت که به‌جای ۷۶۲ میلی‌متر به ۸۰۰ میلی‌متر اشاره شده است. بخش فوقانی میله‌های سامانه زمین نباید به علت عدم فرو رفتن در زمین و صخره‌ای بودن بریده شوند بلکه باید از روش‌هایی که در بالا گفته شد برای درایو کردن میله‌ها در زمین استفاده کرد. اگر سازه‌های سنگی مانع حرکت میله‌های سامانه زمین به عمق مشخص شوند، یک روش عملی و کاربردی برای دست‌یابی به یک سامانه الکترود زمین قابل قبول باید طراحی و اجرا گردد. شکل (۸) زاویه دفن میله‌ها در سامانه زمین را نشان می‌دهد.



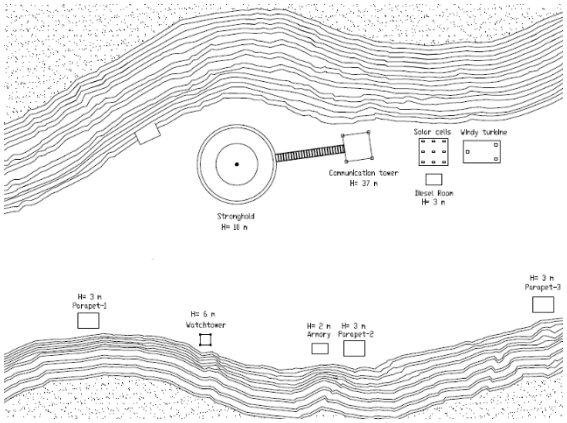
شکل (۸): زاویه دفن میله‌ها در زمین [۲۱]

برخی سایت‌های مخابراتی به علت خصوصیات انتشار RF در محیط‌های صخره‌ای قرار می‌گیرند، جایی که هیچ یا مقدار کمی خاک وجود دارد و نیاز به طراحی خاصی دارد[۲۱]. در این حالت حداکثر تلاش برای استفاده از گزینه‌های ممکن و مورد نیاز برای دست‌یابی به مقاومت زمین مناسب باید صورت گیرد. مطابق استاندارد BS6651 [۲۳] هادی‌های زمین شعاعی، از برج‌ها و ساختمان‌ها تا عمقی که خاک اجازه می‌دهد (ترجیحاً ۳۰-۱۸ اینچ) می‌بایست نصب شوند. در هادی‌های زمین شعاعی می‌توان از مواد کاهنده مقاومت زمین استفاده نمود. از آنجایی 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 تأکید در مرجع [۲۱]، استفاده از رینگ 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 ماده‌ی پوشش‌دهنده الکترودهای زمین برای استفاده در محیط‌های خاکی کم‌عمق باشد؛ چرا که بتن‌های رسانا برای حفاظت از الکترودها نیازی به پوشش کف زمین ندارند. نصب میله‌های زمین افقی یا میله‌های زمین الکترولیتی افقی در طول حلقه‌های زمین به‌جای استفاده از میله‌های عمودی نیز یکی دیگر از روش‌های متداول می‌باشد. میله‌های سامانه زمین باید عمود بر ساختمان‌ها و دکل‌ها نصب شوند همچنین محکم کردن الکترودهای زمین در یک ماده

محافظ الکترودهای زمین باعث افزایش بیشتر کارایی سامانه زمین می‌شود.

۵. مورد مطالعاتی

شکل (۹) نمای کلی سایت مورد مطالعه که شامل دکل، پناهگاه و تعدادی سنگر می‌باشد را نشان می‌دهد. سایت مورد مطالعه در این مقاله در منطقه کوهستانی صخره‌ای قرار دارد. لذا سامانه زمین و حفاظت صاعقه می‌بایست برای چنین شرایطی طراحی گردد. در هنگام ساخت سایت‌های نظامی همراه با سامانه‌های 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. به‌طور کلی در این سایت‌ها، استفاده از اتصال حلقه شده و هم‌پتانسیل‌کننده به هادی‌های پایین برنده جریان صاعقه، لازم است.



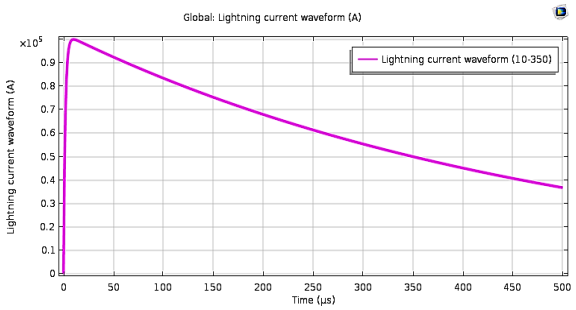
شکل (۹): نقشه سایت مورد مطالعه

به‌طور کلی، در سایت‌هایی که در ارتفاعات کوهستانی و صخره‌ای که دست‌یابی به سامانه الکترود زمین مؤثر مشکل می‌باشد، ایده‌ی حفاری و حفر سوراخ در صخره و سنگلاخ برای وارد کردن میله‌های سامانه زمین با مواد محافظ الکترود زمین پیرامون آن عموماً غیر مؤثر در نظر گرفته می‌شود؛ چرا که سطوح سنگ‌ها بسیار رساناتر از سوراخ‌های ایجادشده به‌وسیله حفاری هستند. بنابراین در صورت حفاری باید از اجزا سامانه الکترود زمین اضافی استفاده گردد.

۶. نتایج شبیه‌سازی

بر مبنای نقشه سایت بمو که در شکل (۹) نشان داده شده، برای اجرای سامانه ارتینگ این پایگاه طراحی و شبیه‌سازی جامع و بر اساس استانداردها و توصیه‌نامه‌های معتبر بین‌المللی انجام گردید.

در این طراحی علاوه بر محافظت کارکنان در برابر صاعقه، حفظ تجهیزات حساس الکترونیکی و مخابراتی طرح نیز در نظر گرفته شده است. در این‌گونه سایت‌ها که سطح اتصال کوتاه محدود به سطح اتصال کوتاه دیزل ژنراتور است، طراحی برای مقابله با موج صاعقه صورت می‌گیرد. بنابراین با توجه به موجی بودن جریان صاعقه و فرکانس بالای آن، می‌بایست در طراحی امپدانس موجی برای سامانه زمین محاسبه گردد و لذا محاسبه مقاومت زمین به‌تنهایی قابل قبول نمی‌باشد. این موضوع به‌طور کلی در طراحی انجام‌شده در نظر گرفته شده و با نرم‌افزار قدرتمند CDEGS بررسی و تحلیل گردید. بدین صورت که ابتدا با استفاده از ماژول FFTSES موج صاعقه به‌صورت استاندارد مدل شده و فرکانس های اصلی این موج استخراج شده است و به‌صورت ورودی در ماژول HIFREQ وارد شده است و شبیه‌سازی ولتاژ سطحی، میدان‌های الکتریکی، ولتاژ گام و تماس انجام گردید. موج صاعقه و فرکانس‌های خروجی در شکل (۱۰) قابل مشاهده است.



شکل (۱۰): موج صاعقه و فرکانس‌های خروجی مورد استفاده شبیه‌سازی

به‌طور کلی پایگاه بمو در ۳ آرایش الکترودی مختلف شامل آرایش الکترودی درختی، شعاعی و مش طراحی شبیه‌سازی گردید که در ادامه این مقاله نتایج ارائه خواهد شد. جدول (۱)، مقایسه امپدانس موجی سامانه زمین در سه آرایش درختی، شعاعی و مش در صاعقه‌های با فرکانس ۲۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۱۰۲۴۰۰۰ هرتز را نشان می‌دهد.

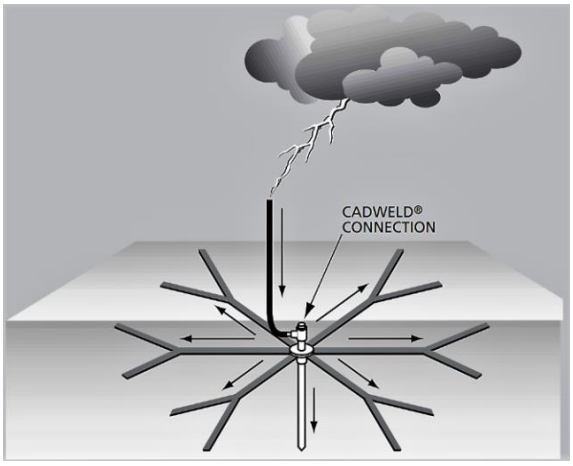
جدول (۱): مقایسه امپدانس موجی سامانه زمین در سه آرایش درختی، شعاعی و مش در فرکانس‌های صاعقه مختلف

فرکانس صاعقه (Hz)	امپدانس موجی سامانه زمین (Ohms)		
	آرایش درختی	آرایش شعاعی	آرایش مش
۲۰۰۰	۱۲/۲۸۷	۱۱/۵۲۴	۱۱/۵۱۸
۲۰۰۰۰	۱۳/۰۹۵	۱۲/۲۱۴	۱۱/۷۵۸
۱۰۲۴۰۰۰	۳۰/۳۰۴	۲۷/۳۴۳	۲۰/۳۸۱

با توجه به جدول (۱)، بیشترین مقدار امپدانس موجی سامانه زمین با هر آرایشی در صاعقه با فرکانس ۱۰۲۴۰۰۰ هرتز اتفاق میافتد. لذا در ادامه، فرکانس صاعقه در شبیه‌سازی‌های پتانسیل سطحی، میدان الکتریکی، ولتاژ گام و تماس، همین مقدار در نظر گرفته شده است.

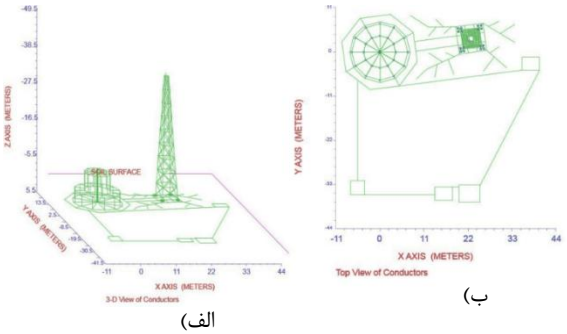
۶-۱. آرایش درختی

در این روش برای تخلیه‌ی سریع و هدفمند جریان صاعقه، مطابق دستورالعمل [۲۴]، الکترودهای زمین پیرامونی رینگ دکل با آرایش درختی استفاده شده‌اند که در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): آرایش درختی الکترودهای زمین [۲۵].

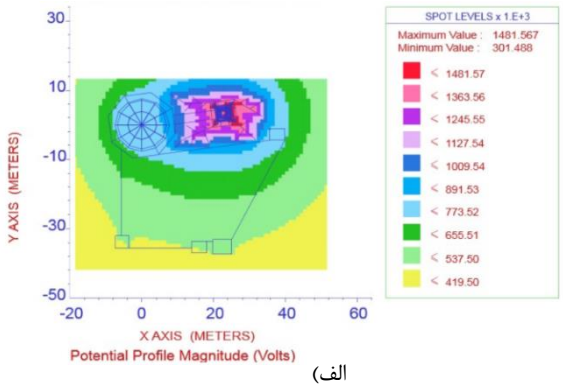
در شکل (۱۲) نمای سه‌بعدی و نمای از بالای طراحی سامانه زمین پایگاه بمو با استفاده از آرایش درختی را نشان می‌دهد.



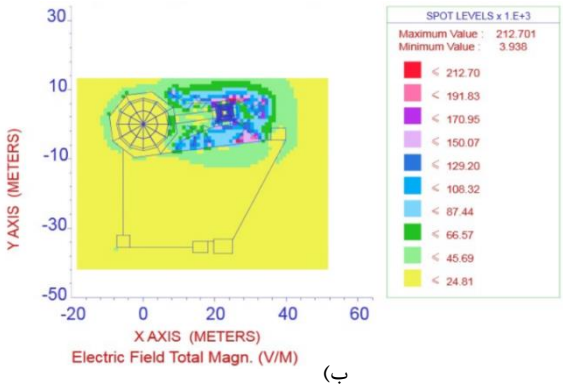
الف) ب)

شکل (۱۲) : آرایش درختی سامانه زمین سایت بمو، الف) نمای سه‌بعدی ب) نمای از بالا

برای محاسبه ولتاژ گام و تماس در هر آرایش سامانه زمین، ابتدا پتانسیل سطحی و میدان الکتریکی سایت مورد مطالعه شبیه‌سازی شده و سپس ولتاژ گام و تماس آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که میدان الکتریکی از گرادیان پتانسیل سطحی محاسبه می‌گردد. شکل (۱۳) پتانسیل سطحی و میدان الکتریکی سایت بمو با آرایش درختی سامانه زمین را نشان می‌دهد.



الف)

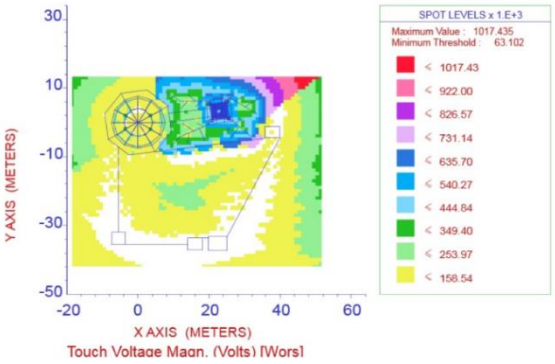


ب)

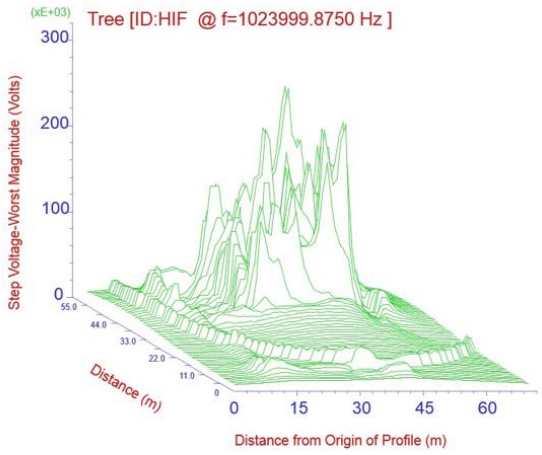
شکل (۱۳): پارامترهای مهم سامانه زمین با آرایش درختی، الف) پتانسیل سطحی ب) میدان الکتریکی

مطابق نتایج به‌دست‌آمده، حداکثر پتانسیل سطحی در این حالت، برابر ۱۴۸۱//۵۷ ولت بوده که در اطراف پایه‌های دکل رخ می‌دهد. حداکثر میدان الکتریکی در این حالت ۲۱۲/۷ ولت بر متر و حداقل آن ۳/۹۳۸ ولت بر متر بوده است. شکل (۱۴) ولتاژ گام و تماس در آرایش درختی سامانه زمین سایت مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مطابق نتایج به‌دست‌آمده می‌توان مشاهده نمود که بیشترین ولتاژ تماس و گام در اطراف دکل رخ می‌دهد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که سنگرهای پایین سایت و همچنین پناهگاه اصلی تحت تأثیر ولتاژ تماس در لحظه برخورد صاعقه قرار نمی‌گیرد. لازم به ذکر است حداکثر ولتاژ گام در این حالت ۲۶۵/۱۱ ولت بوده است. در بسیاری از استانداردها، پیش‌فرض‌های مختلف برای محاسبات ولتاژ گام و تماس وجود دارد از جمله می‌توان به نوع خاک سطحی و مقاومت ویژه‌ی آن، کفش و یا دستکش کارکنان و مقدار جریان متوسطی که می‌تواند به انسان آسیب برساند، اشاره نمود. لذا با توجه به پیش‌فرض‌های گفته‌شده، مقدار ولتاژ گام و تماس مجاز می‌تواند متغیر باشد.



الف)



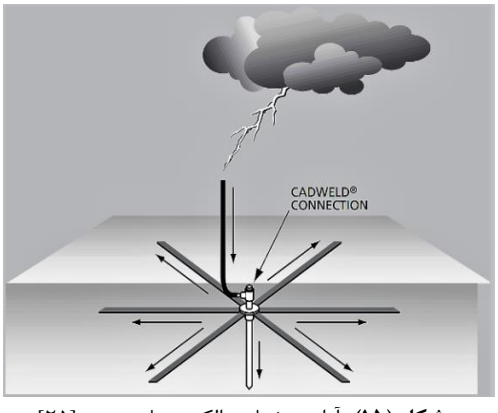
ب)

شکل (۱۴): الف) ولتاژ گام ب) ولتاژ تماس در حالت آرایش درختی

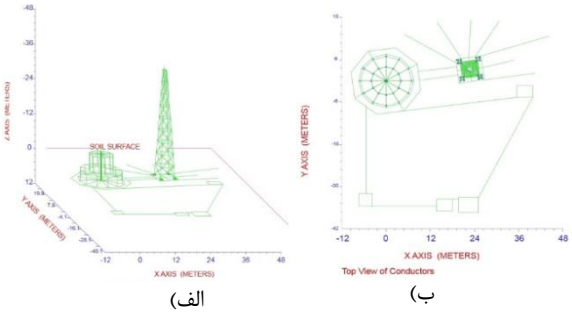
۶-۲. آرایش شعاعی

در این روش برای تخلیه‌ی سریع جریان صاعقه، الکترودهای زمین پیرامونی رینگ دکل با آرایش شعاعی استفاده می‌شود که در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در شکل (۱۶) نمای سه‌بعدی و نمای از بالای طراحی سامانه زمین پایگاه بمو با استفاده از آرایش شعاعی قابل مشاهده است.

شکل (۱۷) پتانسیل سطحی و میدان الکتریکی سایت بمو با آرایش شعاعی سامانه زمین را نشان می‌دهد.

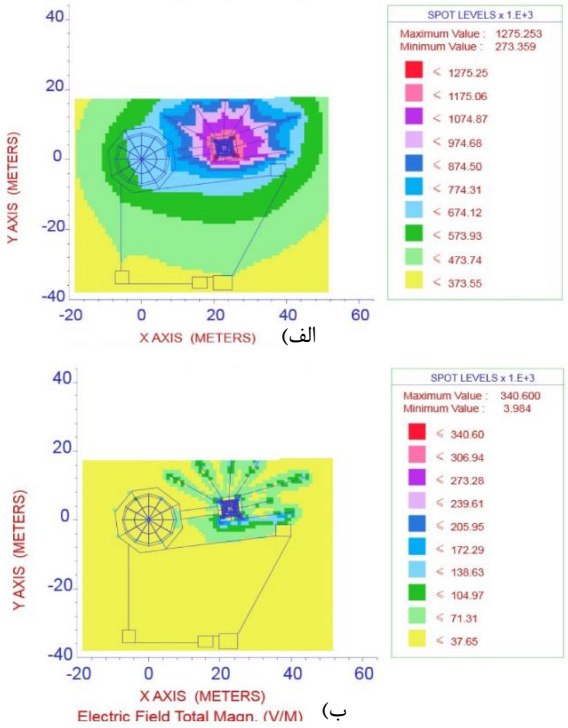


شکل (۱۵): آرایش شعاعی الکترودهای زمین [۲۵].



الف) ب)

شکل (۱۶): آرایش شعاعی سامانه زمین سایت بمو، الف) نمای سه‌بعدی ب) نمای از بالا



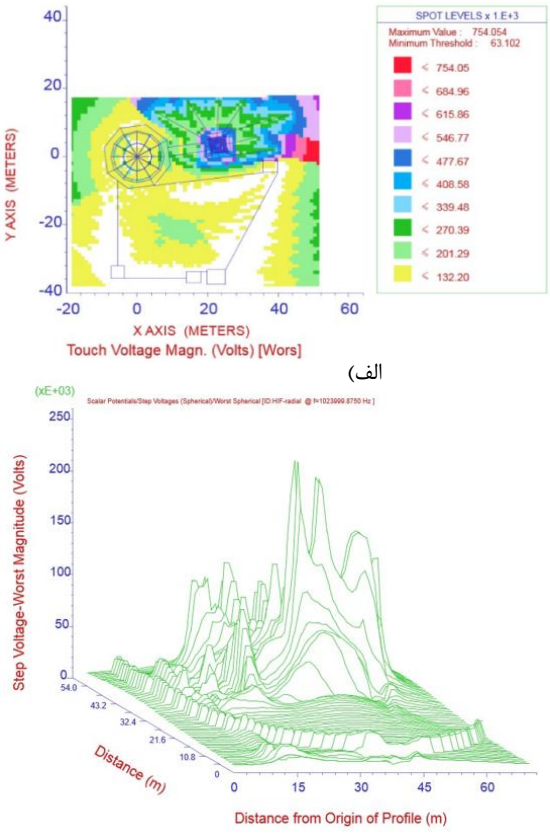
الف)

ب)

شکل (۱۷): الف) پتانسیل سطحی ب) میدان الکتریکی در آرایش شعاعی

لازم به ذکر است که هادی‌های شعاعی متصل به رینگ دکل باید به سمتی کشیده شوند که از ساختمان یا محل رفت و آمد نفرات به دور باشد چرا که این هادی‌ها هنگام وقوع صاعقه گرادیان‌های ولتاژ نامتقارن در سطح زمین ایجاد می‌کنند که منجر به بالا بردن میزان ولتاژ گام ، ولتاژ تماس و آسیب رسیدن به نفرات و تجهیزات می‌شود.

همواره کلیه استانداردها و به‌ویژه استاندارد IEC 62305-3 به عمق دفن ۰/۵ متری الکترود افقی اشاره نموده است تا بیشترین کارایی را در خصوص کنترل یکنواختی گرادیان ولتاژ نشان دهد افزودن میله یا صفحه در انتهای مسیرهای شعاعی در دمپ جریان صاعقه و افکتیو شدن خاک و نیز رسیدن به زیر عمق یخزدگی بسیار حائز اهمیت است.

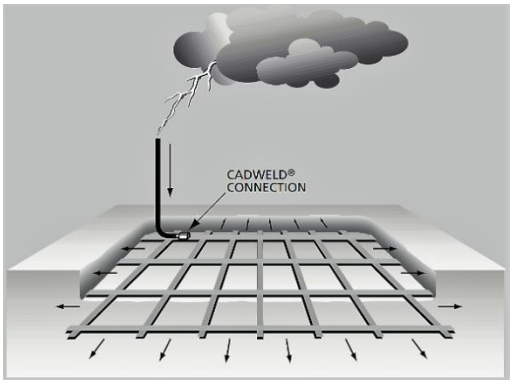


شکل (۱۸): الف) ولتاژ گام ب) ولتاژ تماس در روش شعاعی

مطابق توصیه استاندارد IEEE 1692، حداقل طول هادی شعاعی ۷/۶ مترو حداکثر طول آن ۲۴ متر است لازم به ذکر است حداقل از ۴ هادی شعاعی متصل به رینگ اصلی باید استفاده شود که در مرجع [۲۱] به حداقل ۳ تا ۵ هادی شعاعی اشاره شده است در نهایت به پیشنهاد IEEE 1692 بهتر است حداقل از ۵ هادی ۱۲ متری استفاده شود.

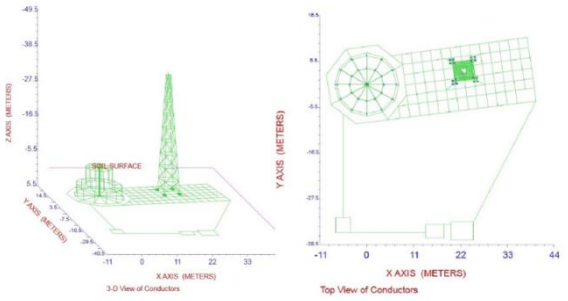
۶-۳. آرایش مش

مطابق شکل (۱۹) الکترودهای زمین پیرامونی رینگ دکل با آرایش مش استفاده شده‌اند که در دستورالعمل‌های معتبر به آن اشاره شده است.



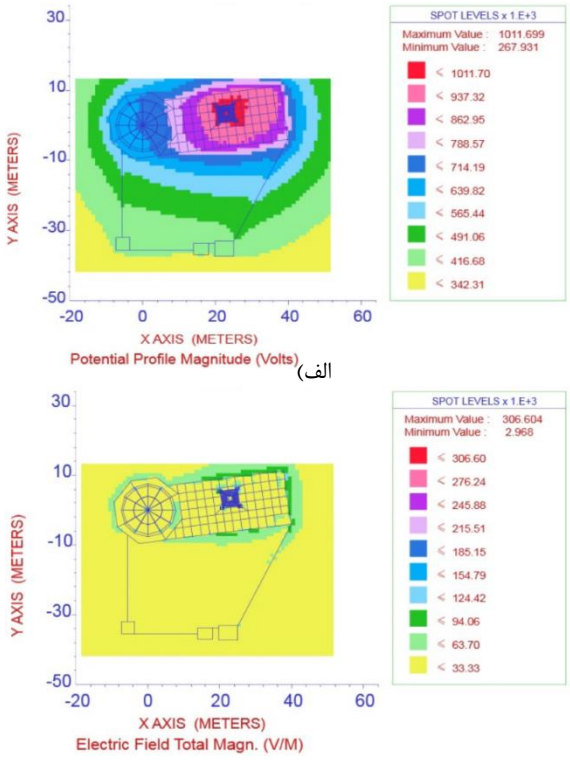
شکل (۱۹): آرایش مش الکترودهای زمین [۲۵].

در شکل (۲۰) نمای سه‌بعدی و بالا از طراحی سامانه زمین پایگاه بمو با استفاده از آرایش شعاعی قابل مشاهده است.



شکل (۲۰) : آرایش مش سامانه زمین سایت بمو، الف) نمای سه‌بعدی ب) نمای از بالا

شکل (۲۱) پتانسیل سطحی و میدان الکتریکی سایت بمو با آرایش مش سامانه زمین را نشان می‌دهد.

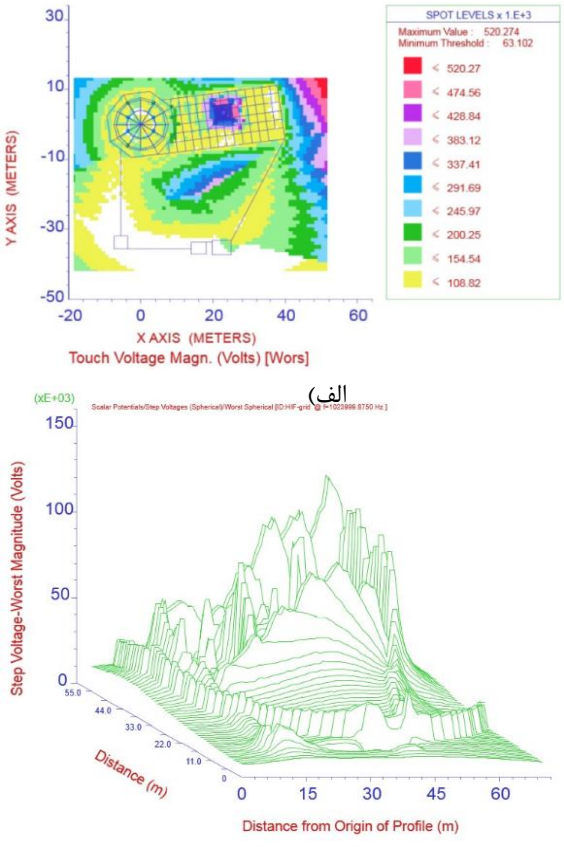


شکل (۲۱): پارامترهای مهم سامانه زمین با آرایش مش، الف) پتانسیل سطحی ب) میدان الکتریکی

مطابق توصیه‌های استاندار IEC62305-2~3 و مرجع [۲۳] در راستای کنترل ولتاژ گام و عدم ایجاد آسیب‌های ناشی از توزیع غیریکنواخت گرادیان‌های ولتاژ به هنگام برخورد صاعقه، راهکار پیشنهادی ریختن سنگریزه به ضخامت ۱۵ سانتیمتر و یا آسفالت به ضخامت ۵ سانتیمتر بر روی سطح زمین و ویژه در اطراف

الکترودهای میله تا شعاع حدود ۲ متر می‌باشد. این موضوع باعث افزایش مقاومت مدار ایجاد جریان صاعقه در بدن انسان شده و میزان تلفات را بسیار کم خواهد نمود. اهمیت این موضوع در مطالعات ریسک در برآورد میزان از دست دادن افراد و یا میزان از دست دادن تجهیزات خود را نشان می‌دهد.

همچنین به‌منظور حذف تماس مستقیم افراد با مسیر تخلیه صاعقه و بالطبع حذف ریسک ناشی از ولتاژ تماس، هادی‌های نزولی با محصورشدن درون لوله PVC به ضخامت حداقل ۳ میلی‌متر تا ارتفاع حداقل ۲/۱ متر از سطح زمین به‌طور کامل ایزوله شوند. در مطالعات ریسک، وجود این لوله در برآورد احتمال آسیب خود را نشان می‌دهد. شکل (۲۲) ولتاژ گام و تماس در روش مش را نشان می‌دهد.



شکل (۲۲): الف) ولتاژ گام ب) ولتاژ تماس در روش مش

با توجه به نتایج مقدار ولتاژ سطحی، میدان الکتریکی و مقاومت سامانه زمین برای فرکانس دلخواه ۱۰۲۴۰۰۰ هرتز و با در نظر گرفتن عوامل مهم کارآمد بودن طرح، انتقال مؤثر جریان صاعقه، سهولت اجرا و کم‌هزینه بودن طرح ضمن حصول بهترین نتیجه، آرایش شعاعی می‌تواند بهترین گزینه برای اجرا در مناطق صخره‌ای باشد. لذا در اجرای سامانه ارتینگ به روش شعاعی توجه به کلیه‌ی نکات ذکرشده در استاندارد IEEE1692 و مراجع [۲۱] لازم می‌باشد.

با توجه به مقاومت ویژه‌ی بالای مناطق صخره‌ای استفاده از مواد تقویت‌کننده رسانایی زمین مانند بتن رسانا حداقل به طول ۴ متر از هر الکترود شعاعی و عرض ۳۰ سانتی‌متر پیرامون آن توصیه شده است. هر الکترود 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 سامانه الکترود زمین مؤثر مشکل می‌باشد، ایده‌ی حفاری و حفر سوراخ در صخره و سنگلاخ برای وارد کردن میله‌های سامانه زمین با مواد محافظ الکترود زمین پیرامون آن عموماً غیر مؤثر در نظر گرفته می‌شود؛ چرا که سطوح سنگ‌ها بسیار رساناتر از سوراخ‌های ایجادشده به‌وسیله حفاری هستند. بنابراین در صورت حفاری باید از اجزا سامانه الکترود زمین اضافی و مواد کاهنده استفاده گردد. شایان ذکر است برای الکترودهای زمین حداقل سطح مقطع کابل یا تسمه‌ی مسی $50\ mm^2$ در نظر گرفته شود تا برای تحمل جریان ناشی از صاعقه و مقابله با خوردگی مقاوم باشد.

۷. نتیجه‌گیری

هدف از نصب صاعقه‌گیر و سامانه زمین حفاظت از سامانه‌ها و افراد در برابر صاعقه و ایجاد مسیری مطمئن جهت انتقال جریان عظیم صاعقه به زمین می‌باشد. در سامانه صاعقه گیر میله‌های هوائی وظیفه جذب صاعقه و هادی‌های نزولی وظیفه انتقال جریان را به شبکه ارتینگ به عهده دارند. از آنجائی که عموماً 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. انتخاب بهترین و بهینه‌ترین آرایش سامانه زمین جهت حفاظت از کارکنان و تجهیزات گران‌قیمت سایت‌های حساس، بسیاری ضروری می‌باشد. در این مقاله به‌منظور کاهش تلفات جانی و حفاظت از تجهیزات، بهترین و بهینه‌ترین روش پیاده‌سازی سامانه زمین جهت حداقل‌سازی ولتاژ گام و تماس سایت‌های مخابراتی در ارتفاع بالا مطابق استانداردها بین‌المللی ارائه گردید. لذا در ابتدا تئوری صاعقه، روابط ریاضی در این خصوص و روش‌های محاسبه مقاومت زمین ارائه و سپس سه نوع روش آرایش سامانه زمین شامل آرایش درختی، شعاعی و مش جهت محاسبه ولتاژ گام و تماس مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به نتایج مقادیر ولتاژ سطحی، میدان الکتریکی، مقاومت زمین، ولتاژ گام و تماس و نیز با در نظر گرفتن عوامل مهم کارآمد بودن طرح، سهولت اجرا و کم‌هزینه بودن طرح، آرایش شعاعی به‌عنوان بهترین گزینه برای اجرا در مناطق صخره‌ای انتخاب گردید.

۸. مراجع

[۱] اسحاق احمدی, محمود عباسی سمنگانی، "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 بین‌المللی پژوهش‌های کابردی در مهندسی برق مکانیک و مکاترونیک، تهران، ۱۳۹۷.

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

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

[4] Z. X. Hu, Y. P. Wen, W. G. Zhao, H. P. Zhu and S. L. Liu, "Numerical Simulation of Lightning Location Based on Monte Carlo Method," International Conference on Management and Service Science, Wuhan, pp. 1-4, 2009.

[5] Abhay Srivastava, Mrinal Mishra," Lightning modeling and protection zone of conducting rod using Monte Carlo technique"Applied Mathematical Modelling,Vol. 37, no. 24,pp, 9858-9864, 2013.

[6] 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.

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

[8] Jozef Bendík, Matej Cenký, Marek Pípa, Attila Kment, Michal Chudý, Anton Beláň "Experimental verification of material coefficient defining separation distance for external lightning protection system" Journal of Electrostatics, Vol.98, pp. 1-7, 2019.

[۹] جزوه آموزشی نظارت بر طراحی و اجرای سامانه‌های ارتینگ و حفاظت ابنیه و تجهیزات الکترونیکی در مقابل صاعقه و فراتاخت ولتاژ، شرکت ارتباطات زیر ساخت، ۱۳۸۷

[10] Meliopoulos, A.P. & Patel, Shashi & Cokkinides, George." A New Method and Instrument for Touch and Step Voltage Measurements". Power Delivery, IEEE Transactions on. 9. Pp.1850 – 1860, 1994.

[11] T.R. Ayodele, A.S.O. Ogunjuyigbe, O.E. Oyewole, "Comparative assessment of the effect of earthing grid configurations on the earthing system using IEEE and Finite Element Methods", Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol 21, no. 5, 2018.

[12] S. Gholami Farkoush, A. Wadood, T. Khurshaid, C. Kim, M. Irfan and S. Rhee, "Reducing the Effect of Lightning on Step and Touch Voltages in a Grounding Grid Using a Nature-Inspired Genetic Algorithm With ATP-EMTP," in IEEE Access, vol. 7, pp.81903-81910, 2019.

[13] G. S. Bendale and K. Bhatia, "Evaluation of different grounding grid designs for Microgrid," IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Genova, Italy, pp. 1-6, 2019.

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

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

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

[۱۷] جزوه آموزشی نظارت بر طراحی و اجرای سامانه‌های ارتینگ و حفاظت ابنیه و تجهیزات الکترونیکی در مقابل صاعقه و فراتاخت ولتاژ، شرکت ارتباطات زیر ساخت، ۱۳۸۷.

[18] MIL-HDBK-419A, GROUNDING, BONDING, AND SHIELDING FOR ELECTRONIC EQUIPMENTS AND FACILITIES, 1982.

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

[20]J. A. Guemes and F. E. Hernando, "Method for calculating the ground resistance of grounding grids using FEM," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 2, pp. 595-600, April 2004.

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

[22] 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.

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

[24] IEEE 1692 Guide for the Protection of Communication Installations fromLightning Effects, 2011.

[25] ERICO HANDBOOK, Grounding product and system protection, 2002.

Journal of Applied Electromagnetics

12 Vol. 8, No.2, 2020-2021 (Serial No. 21)

Implementation of an Optimized Earthing System To Minimize Step and Touch Voltage of Telecommunication Sites in Rocky And High-Altitude Environments (Case Study: Bamo Site)

R. Ghaffarpour[*1], S. Zamanian[2]

Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 02/05/2020; Accepted: 08/07/2020)

Abstract

The purpose of passive defense plans is to reduce the vulnerability of human resources and critical equipment in the country. Therefore, compliance with non-operating defense principles is essential to prevent and reduce the risks of natural disasters such as lightning. Direct and indirect lightning strikes on buildings and transmitting current through incoming service lines can cause step-and-contact voltages that are harmful and dangerous to the humans and, the buildings and their valuable contents. In general, the step voltage is scattered to a radius of several meters around the location of the lightning stroke, causing injury to the people nearby. Therefore, from the passive defense perspective, the present study aims to minimize the damage of lightning strikes on sensitive centers placed at high altitudes and located in rocky areas. Since telecommunications and data stations are generally positioned in highlands or open areas, lightning protection is very important. Observing the compliance with international standards and recommendations in such environments, this paper uses the CDEGS Software to present the best and most optimal way to implement the ground system in order to minimize the step-and-contact voltages of telecommunication sites.

Keywords: Earthing System, Step Voltage, Touch Voltage, Lightning Protection, Telecommunication Sites

[*] Corresponding author E-mail: rghaffarpour@ihu.ac.ir