

نفوذ به عمق زمین

راهنمای عملی اندازه گیری
 مقاومت سیستم های اتصال زمین

ترجمه: دکتر شاهرخ شجاعیان

عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

Megger®

مقدمه مترجم

در جهان هیچ چیز به اندازه خاک، در دسترس و همه جا حاضر نیست. ما اغلب خاک را متراծ با زراعت و کشاورزی در نظر می‌گیریم و یا با شنیدن آن به یاد حفاری و ساختمان‌سازی می‌افتیم. ولی خاک دارای خواص الکتریکی نیز هست. هدایت خاک (یا به عبارت بهتر مقاومت کم آن) خاصیتی است که هر روزه در تأسیسات الکتریکی صنایع و شرکت‌های برق به کار می‌رود.

در واقع، خاک در مقام مقایسه با هادی‌های معمول مانند مس و آلومینیوم، رسانای ضعیفی بهشمار می‌رود. اما از آنجا که بزرگ بودن سطح مقطع یک هادی منجر به کاهش میزان مقاومت آن می‌شود، زمین را می‌توان نهایتاً یک هادی خوب بهشمار آورد. فراوانی و در دسترس بودن خاک در همه جا، عواملی هستند که آن را به عنوان یکی از اجزای کم هزینه سیستم‌های الکتریکی مطرح ساخته‌اند.

اندازه‌گیری مقاومت خاک به دو دلیل مهم انجام می‌شود:

۱- برای تعیین کارآیی شبکه اتصال زمین که وظیفه حفاظت تجهیزات و اشخاص را برعهده دارد.

۲- یافتن یک محل خوب (کم مقاومت) برای اجرای سیستم اتصال زمین و یا به عبارت دیگر تعیین مقاومت ویژه زمین در نقاط مختلف که ما را از آنچه در فاصله کمی در زیر زمین قرار گرفته است آگاه می‌کند (مانند لایه‌های سنگی واقع در عمق خاک).
قصد ما در این کتاب آن نیست که تئوری‌ها و روابط ریاضی حاکم برای موضوع را به طور مشروح بیان نماییم. چنان‌چه در بخش منابع و مأخذ هم نمونه‌هایی ذکر شده، کتابهای و مقالات بسیار خوبی در این زمینه وجود دارد که می‌توان برای بررسی دقیق‌تر به آنها رجوع کرد. آنچه ما در اینجا بیان می‌کنیم توصیفی به زبان ساده است که برای افراد شاغل در صنعت گویا و قابل درک باشد.

شرکت Megger در نتیجه سالها تولید لوازم اندازه‌گیری مناسب برای مقاصد فوق، تجربیات خود را در مجموعه مباحث این کتاب، به‌گونه‌ای مختصر و مفید ارائه کرده است. هدف مترجم از برگرداندن این کتاب به فارسی، پرکردن خلاء مرجعی برای آموزش و استناد مهندسین برق در صنعت و یا سازمانهای نظام مهندسی ساختمان بوده است که به نحوی با اندازه‌گیری مقاومت سیستم‌های زمین درگیر هستند. این کتاب در کنار استاندارد IEEE Std81 می‌تواند پاسخگوی بسیاری از نیازهای روزمره آنان باشد.

مترجم مایل است در این مقدمه بیش از همه مراتب احترام خود را به دوست و همکار ارجمندش آقای مهندس جلیل خدایاری تقدیم نماید، زیرا گرایش خود به مطالعه و تحقیق در مبحث سیستم‌های زمین در یک دهه اخیر را عمده‌اً وامدار بیان شیرین و وسعت نظر او می‌داند. علاوه بر این، تشویق و علاقمندی همه دانشجویان و همکاران مترجم که در این سالها در کلاسها و سمینارهای مختلف وی حضور داشته و همواره مستمعینی بوده‌اند که او را بر سر ذوق آورده‌اند، شایان سپاس بیکران است.

ترجمه این کتاب در سال ۱۳۸۶ به اتمام رسیده بود ولی تقدیر آن بود که نهایتاً به همت و چیره‌دستی دوستان نگارنده در انتشارات مؤسسه علمی دانشپژوهان برین، آقای مهندس محسن جوادیان مدیر انتشارات و خانمها ماندانا مرادی در بخش نظارت و هماهنگی و مرضیه عبادی‌نیک در بخش حروفچینی و صفحه‌آرایی، به زیور طبع آراسته شود.

شاهرخ شجاعیان
اصفهان-۱۳۹۲
Shojaeian@iaukhsh.ac.ir

فهرست

ایمنی

فصل اول : اندازه‌گیری مقاومت سیستم‌های اتصال زمین ۱
عواملی که می‌توانند مقاومت کم یک سیستم زمین را زیاد کنند ۲
برخی تعاریف اساسی ۳
عوامل تأثیرگذار در مقاومت سیستم زمین ۵
حداکثر مقادیر مجاز ذکر شده در مقررات ملی برق (NEC) ۷
ساختار الکترود ارت ۷
اصولی که در اندازه‌گیری مقاومت زمین باید در نظر گرفته شوند ۹
روش‌های اصلی اندازه‌گیری مقاومت زمین ۱۲
روش افت پتانسیل ۱۴
روش زمین مرد ۱۶
تأثیر محل کوبیدن میلهای تست ۱۷
حداقل فاصله برای الکترود C ۱۷
روش افت پتانسیل ساده شده ۱۹
برخی قوانین سرانگشتی برای یافتن فاصله مناسب P و C ۲۰
میلهای سست ۲۳
تست‌های تکمیلی ۲۳
چگونه می‌توان مقاومت ارت را بهبود داد ۲۵

۲۵	اثر اندازه میله
۲۶	استفاده از میله‌های مرکب
۲۹	عمل آوری خاک

۳۱	فصل دوم : مقاومت مخصوص خاک
۳۲	چگونه مقاومت مخصوص اندازه‌گیری می‌شود
۳۳	مثالی عملی از روش‌های تست
۳۵	تأثیر گونه‌های مختلف خاک بر مقاومت مخصوص
۳۶	کاهش مقاومت مخصوص با افزایش رطوبت و نمک‌های محلول
۳۸	تأثیر درجه حرارت بر مقاومت مخصوص
۳۹	تغییرات فصلی مقاومت مخصوص خاک
۴۰	تعیین یک محل مناسب برای اجرای سیستم زمین
۴۱	راه دیگر

۴۳	فصل سوم: اندازه‌گیری دقیق مقاومت در سیستم‌های اتصال زمین‌های گستردگی
۴۴	چالش‌های موجود در تست‌های سیستم‌های ارت گستردگی
۴۵	فهرست‌بندی چالش‌های موجود در تست سیستم‌های ارت گستردگی
۴۷	ضمیمه اول: نوموگرام تخمین مقدار مقاومت سیستم ارت
۵۱	ضمیمه دوم: روش تزریق جریان
۵۷	ضمیمه سوم: روش میله‌ای بهم پیوسته

ضمیمه چهارم: اندازه‌گیری مقاومت سیستم‌های ارت گسترده (روش منحنی‌های متقاطع)	۶۱
انجام تست در پست‌های فشار قوی بزرگ	۶۳
توصیه‌های کلی	۶۳
ضمیمه پنجم: روش شبیب	۶۷
ضمیمه ششم: روش چهار پتانسیلی	۷۱
ضمیمه هفتم: روش ستاره مثلث	۷۳
ضمیمه هشتم: تعیین ولتاژهای گامی و تماسی	۷۷
ضمیمه نهم: جدول مقایسه انواع روشهای اندازه‌گیری اتصال زمین	۷۹

مراجع

فهرست شکلها

شکل ۱-۱ یک سیستم ساده اتصال زمین برای یک مصرف‌کننده صنعتی	۲
شکل ۲-۱ مثالی از یک مدار الکتریکی دارای مقاومت زمین خیلی زیاد	۴
شکل ۳-۱ شرایط نوعی که در هر سیستم زمین باید در نظر گرفته شوند	۶
شکل ۴-۱ اجزاء مؤثر در مقاومت یک الکترود ارت	۹
شکل ۵-۱ اصول اندازه‌گیری مقاومت ارت	۱۱
شکل ۶-۱ روش سه الکترودی یا افت پتانسیل	۱۳
شکل ۷-۱ روش دو الکترودی یا زمین مرده	۱۴
شکل ۸-۱ تأثیر محل C روی منحنی‌های مقاومت زمین	۱۸
شکل ۹-۱ مثالی در مورد تأثیر محل C روی منحنی‌های مقاومت زمین	۲۱
شکل ۱۰-۱ کاهش مقاومت زمین با افزایش عمق الکترود	۲۱
شکل ۱۱-۱ تأثیر ناچیز قطر الکترود بر میزان مقاومت ارت	۲۶
شکل ۱۲-۱ میانگینی از نتایج حاصل از نصب الکترودهای موازی متعدد و...	۲۷
شکل ۱۳-۱ مقاومت نسبی چند الکترود موازی نسبت به یک الکترود تنها	۲۸
شکل ۱۴-۱ روش گودال محیطی برای عمل آوری خاک	۳۰
شکل ۱۵-۱ تأثیر عمل آوری خاک به روش‌های شیمیایی در کاهش...	۳۰
شکل ۱-۲ روش چهار الکترودی برای تعیین مقاومت مخصوص خاک	۳۲
شکل ۲-۲ تعیین مقاومت مخصوص در مجاورت لوله‌های نفت برای شناسایی خوردگی‌ها	۳۴
شکل ۳-۲ نمودار رابطه مقاومت مخصوص خاک با مقاومت سیستم زمین	۳۵
شکل ۴-۲ تغییرات فصلی مقاومت برای یک الکترود لوله‌ای $\frac{3}{4}$ اینچی در...	۴۰

شکل ۲-۱ روش یافتن بهترین محل برای اجرای سیستم اتصال زمین عمق a از خاک	۴۱
شکل ض ۱-۱ نوموگرام مرتبط کننده عوامل مختلف مؤثر در مقاومت ارت	۴۹
شکل ض ۱-۲ اصول روش تزریق جریان	۵۲
شکل ض ۲-۱ کاربرد شیوه تزریق جریان	۵۴
شکل ض ۳-۱ کاربرد غلط روش تزریق جریان در یک دکل مهار کننده	۵۶
شکل ض ۱-۳ روش میل های بهم پیوسته- مرحله اول: اندازه گیری مقاومت زمین	۵۹
شکل ض ۲-۳ روش میل های بهم پیوسته- مرحله دوم: اندازه گیری جریان نشتی	۵۹
شکل ض ۳-۳ روش میل های بهم پیوسته	۶۰
شکل ض ۱-۴ یک نمونه از منحنی های مقاومت ارت که در سیستم های با...	۶۲
شکل ض ۲-۴ منحنی های مقاومت ارت برای یک پست فشار قوی	۶۴
شکل ض ۳-۴ منحنی های متقطع مربوط به شکل ض ۲-۴	۶۵
شکل ض ۱-۵ محل میل های تست در روش شب	۶۸
شکل ض ۱-۶ روش اندازه گیری چهار پتانسیلی	۷۲
شکل ض ۱-۷ روش اندازه گیری ستاره مثلث	۷۴
شکل ض ۲-۷ نحوه انجام اندازه گیری به روش دو سیمه	۷۴
شکل ض ۱-۸ روش تعیین ولتاژ های گامی و تماسی	۷۸

فهرست جداول

۲۲	جدول ۱-۱ راهنمای انتخاب محل میل ها
۳۶	جدول ۱-۲ مقاومت مخصوص خاک های مختلف
۳۷	جدول ۲-۲ مقاومت مخصوص خاک های مختلف
۳۷	جدول ۲-۳ تأثیر رطوبت در مقاومت مخصوص خاک
۳۸ ۳۸	جدول ۴-۲ تأثیر وجود نمک در مقاومت مخصوص خاک (برای خاک دستی ماسه ای) ...
..... ۳۸	جدول ۵-۲ تأثیر درجه حرارت در مقاومت مخصوص خاک برای خاک دستی و ماسه ای با رطوبت٪ ۱۵
۷۰	جدول ض ۱-۵ مقادیر D_p/D_c برای مقادیر مختلف μ

هشدارهای ایمنی

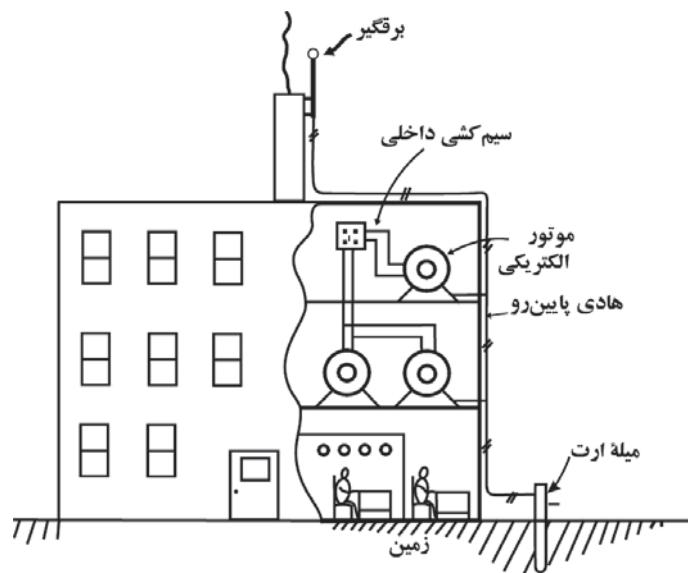
به هنگام اندازه‌گیری ارت، مسائل ایمنی ویژه‌ای وجود دارند که آزمایش کنندگان باید دقیقاً آنها را مورد توجه قرار دهند. برای مثال امکان دارد در همان زمانی که تست‌ها در حال انجام هستند، یک اتصالی در سیستم قدرت منجر به عبور جریان زیادی از سیستم اتصال زمین شود. این مسئله ممکن است ولتاژ‌های بزرگی را روی میله‌های ولتاژ و جریان و خود دستگاه اندازه‌گیری ایجاد نماید.

میزان احتمال این خطر باید توسط کسی که در مورد آزمایش‌ها مسئولیت را بر عهده دارد، ارزیابی شده و میزان جریان اتصالی و ولتاژ‌های تماسی متناظر با آن برآورد گردد. بدین منظور می‌توان از استاندارد IEEE-80 تحت عنوان "راهنمای IEEE برای ایمنی به هنگام کار با سیستم زمین پست‌های فشار قوی" استفاده کرد (یا استانداردهای معتبر دیگری که در نقاط دیگر جهان تهیه شده‌اند).

توصیه می‌کنیم به هنگام کار با دستگاه‌ها اپراتورها، دستکش‌های لاستیکی (تولید شده براساس ANSI/ASTM-D120) را به هنگام متصل کردن سیم‌ها و میله‌ها و سایر اتصالات استفاده کرده و فرش‌های عایق (که براساس ANSI/ASTM-D178 ساخته شده باشند) را به کار بزن.

اندازه‌گیری مقاومت سیستم‌های اتصال زمین

ساده‌ترین راه برای ایجاد یک اتصال زمین، که در عین سادگی غلط انداز هم هست، فرو بردن یک لوله آهنی در زمین و وصل کردن آن توسط یک سیم به مدار است (شکل ۱-۱). این روش بسته به شرایط اجرا و محل، ممکن است یک مسیر خوب یا بد را برای هدایت جریان به زمین و حفاظت از اشخاص و تجهیزات فراهم کند. تعیین الکترود مناسبی که بتواند یک مقاومت زمین پایین را نتیجه دهد، اغلب چندان آسان نیست. ولی با استفاده از تجربیات دیگران، می‌توان آموخت که چگونه یک سیستم اتصال زمین مطمئن ایجاد نموده و مناسب بودن مقاومت آن را با دقیق قابل قبول تست کرد. چنانچه در ادامه خواهیم دید عمق، اندازه و شکل الکترود در مقاومت آن مؤثر هستند. اصول و روش‌های اندازه‌گیری مقاومت ارت که در این فصل ذکر شده را می‌توان در مورد ارت برق‌گیرها و سایر بخش‌هایی که به یک اتصال زمین کم‌ مقاومت نیاز دارند هم به کار برد. این تست‌ها را ممکن است در نیروگاه‌ها، شبکه‌های توزیع، کارخانه‌ها، صنایع و ایستگاه‌های مخابراتی انجام دهیم.



شکل ۱-۱ یک سیستم ساده اتصال زمین برای یک مصرف کننده صنعتی

عواملی که می‌توانند مقاومت کم یک سیستم زمین را زیاد کنند

در آینده راجع به اینکه چه میزان مقاومت برای یک سیستم اتصال زمین "کم" دانسته می‌شود بحث خواهیم کرد. ملاحظه خواهد شد که یک قانون کلی در این مورد برای همه حالات وجود ندارد. در این قسمت به سه عامل مهم که می‌توانند مقاومت سیستم اتصال زمین را در طول چند سال تغییر دهند، اشاره می‌کنیم:

- ممکن است سیستم الکتریکی که اتصال زمین به آن متصل است، کم‌کم توسعه یابد. برای مثال مربوط به ساختمانی باشد که به طبقات یا واحدهای آن اضافه گردد. در چنین وضعیتی طبیعتاً مقاومت ارت مورد نیاز هم تغییر می‌یابد و مقاومتی که قبلاً "کم" دانسته می‌شد ممکن است نامناسب باشد.

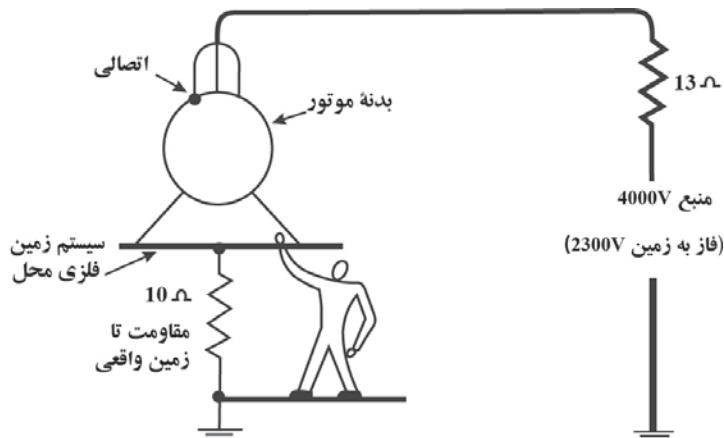
- چنانچه در محل، سیستم‌های کنترل کامپیوتری پیشرفته نصب گردد، مسأله نویز الکتریکی اهمیت خواهد یافت. سطحی از نویز که دستگاههای قدیمی را تهدید نمی‌کرد، ممکن است برای دستگاههای پیشرفته جدید مشکلات زیادی تولید نماید.
- با افزایش استفاده از لوله‌های پلاستیکی به جای لوله‌های فلزی، از قابلیت اطمینان سیستم اتصال زمین ساختمان‌ها کاسته می‌شود.
- در بسیاری نقاط، سفره‌های آب زیر زمینی به مرور به نقاط عمیق‌تری رفته‌اند. لذا برخی سیستم‌های اتصال زمین که پیش از این مسأله مقاومت خوبی داشته‌اند، در حال حاضر مقاومت بالایی را نشان می‌دهند.
- وجود این عوامل بر لزوم داشتن یک برنامه مستمر و منظم اندازه‌گیری ارت صحة گذاشته و ثابت می‌کنند اندازه‌گیری ارت، یکبار فقط در زمان نصب، به هیچ عنوان کافی نیست.

برخی تعاریف اساسی

اجازه دهید در اینجا به برخی تعاریف اساسی اشاره‌های داشته باشیم. از سال ۱۹۱۸ عبارت "زمین"، "زمین دائم" و "اتصال زمین" برای بیان مفهوم زیر به کار رفته‌اند: اتصال الکتریکی که به طور عامدانه بین بدن‌های هادی (یا بدن‌های فلزی که در نزدیکی مدارهای برقدار واقعند) از طریق الکترودهایی همچون میله ارت، لوله‌های آب، صفحه ارت و یا.... با زمین ایجاد می‌شود.

بخش فلزی سیستم ارت که در زمین قرار می‌گیرد را "الکترود" می‌نامند و ممکن است لوله آب، تسمه، سیم یا صفحه مدفون باشد. اگر ترکیبی از این الکترودها به کار رود، الکترود را "شبکه‌ای" گویند. مقاومت ارت، عبارت است از مقاومت موجود بر سر راه جریان در عبور از الکترود به خاک اطراف آن. برای درک اینکه چگونه این مقاومت می‌تواند مقداری کم داشته باشد، کافیست قانون اهم را بنویسیم ($E = RI$). در اینجا E بر حسب ولت، R بر حسب اهم و I بر حسب آمپر است.

فرض کنید یک منبع ولتاژ 4000V (یعنی با ولتاژ فازی 2300V) و خطی به مقاومت 13Ω داشته باشیم (شکل ۲-۱ را ببینید). حال فرض کنید یک سیم لخت، بدنه موتوری که با این منبع تغذیه می‌شود را به ارتباط به مقاومت 10Ω متصل نماید. براساس قانون اهم، جریانی که در اثر اتصالی تکفاز به بدنه در این مدار جاری می‌شود برابر با 100A است. اگر در چنین شرایطی فردی بدنه موتور را لمس نماید و روی زمین ایستاده باشد ولتاژ 1000V را خواهد دید. این ولتاژ بسیار بیشتر از مقداری است که برای کشتن انسان کافی می‌باشد. اگر مقاومت ارت کمتر از یک اهم باشد، ممکن است ولتاژ تماسی از 7V کمتر شود و فرد زنده بماند. تجهیزات نیز به طرز مشابهی ممکن است در این شرایط بر اثر اضافه ولتاژ ناشی از ارت پر مقاومت، آسیب ببینند.



شکل ۲-۱ مثالی از یک سیستم الکتریکی دارای مقاومت زمین خیلی زیاد

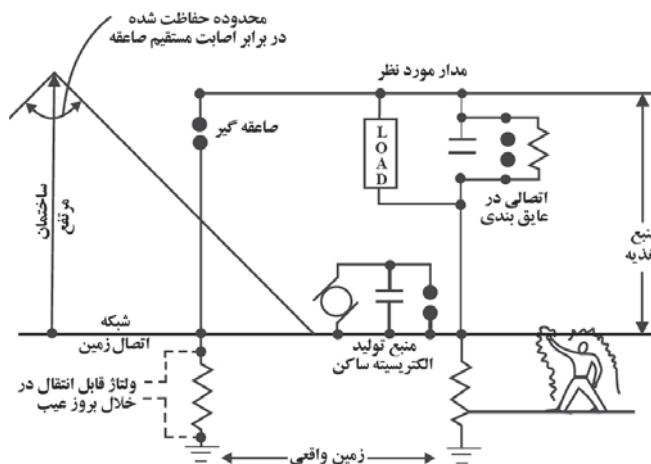
عوامل تأثیرگذار در مقادیر مورد قبول یک اتصال زمین مطلوب

برای یک کارخانه یا ساختمان که قرار است سیستم اتصال زمین اجرا شود باید موارد زیر را دقیقاً مشخص کرد:

۱- حد مجاز ولتاژ فاز به زمین در سیستم الکتریکی محل: وجود یک سیستم اتصال زمین مناسب می‌تواند با اتصال نقاطی از مدار الکتریکی مورد نظر به زمین، رعایت چنین حد مجازی را تأمین نماید. وجود این سیستم اتصال زمین مزایای زیر را در بی خواهد داشت:

- مقادیر ولتاژ را محدود کرده و لذا عایق‌هایی که بین سیستم و زمین وجود دارند را می‌توان برای سطح ولتاژ یکسانی طراحی کرد.
- با محدود کردن ولتاژ فاز به زمین و فاز به بدن، سلامت کاربران را تأمین می‌نماید.
- با می‌نیمم کردن تعداد اضافه ولتاژها، به پایداری سیستم کمک می‌کند.
- امکان آن را فراهم می‌آورد که اتصال‌های فاز به زمین سریعاً شناسایی و قطع گرددند.

۲- زمین کردن مناسب بدنه‌های فلزی: که شامل زمین کردن بدنه تجهیزات و سکوهای فلزی آنها که ممکن است برقدار شوند، می‌باشد. به این دو، باید تجهیزات برقی سیار را نیز اضافه نمود. توجه داشته باشید که مقدار جریان بسیار کمی (مثلاً کمتر از ۱/۰ آمپر بهمدت یک ثانیه) کشنده است و مقداری کمتر از آن کافی است تا کنترل عضلات از دست برود. جریان‌های مذکور، می‌توانند حتی با وجود یک ولتاژ ۱۰۰V، هنگامی که بدن فرد مرطوب است ایجاد شوند.



شکل ۳-۱ شرایط نوعی که برای هر سیستم اتصال زمین باید در نظر گرفته شوند

۳- حفاظت در برابر الکتریسیته ساکن حاصل از اصطکاک: این الکتریسیته ساکن ممکن است باعث ایجاد شوک‌های خطرناک شود و یا تولید انفجار و آتش‌سوزی نماید. برخی اشیاء متحرک که خود ذاتاً عایقند، مثل کاغذ، پارچه، نوارهای نقاله یا تسممهای انتقال نیرو و ... اگر به نحو مناسبی زمین نشوند ممکن است چنین الکتریسیته ساکنی را تولید کنند.

۴- حفاظت در برابر برخورد مستقیم صاعقه: برای ساختمان‌های مرتفع همچون سیلوها، منبع‌های آب، داربست‌ها و ... ممکن است لازم باشد برق‌گیر نصب شده و به سیستم اتصال زمین متصل گرد.

۵- حفاظت در برابر صاعقه غیرمستقیم: این حالت عمدتاً زمانی پیش می‌آید که خطوط هوایی برق یا مخابرات وجود داشته باشند. برای رفع اثرات صاعقه در این حالت، موج‌گیرهای^۱ مورد نیاز هستند که باید در ورودی مدار الکتریکی ساختمان نصب شوند.

1- Surge Arrester

۶- ایجاد یک سیستم اتصال زمین ویژه برای مدارهای مخابراتی و سیستم کنترل: با افزایش تجهیزات کنترل صنعتی، تجهیزات مخابراتی و ... حصول یک مقاومت کم برای سیستم اتصال زمین دفاتر، خطوط تولید و... ضروری شده است.

حداکثر مقادیر مجاز ذکر شده در مقررات ملی برق (NEC)

در بخش ۲۵۰-۵۶ از مقررات ملی برق ذکر گردیده است که اگر مقاومت الکترودی نسبت به زمین بیش از 25Ω باشد، باید در کنار آن الکترود دیگری نصب نمود (استانداردهای مشابهی در نقاط دیگر دنیا وجود دارند). توصیه ما آن است که هر الکترود پس از نصب و در بازدیدهای منظم دوره‌ای، تست و مقاومت آن اندازه‌گیری شود.

مقاومت ارت ممکن است با تغییر آب و هوا و درجه حرارت تغییر نماید. این تغییرات ممکن است بهمیزان قابل توجهی باشند و الکترودی که مقاومتش خوب بوده، می‌تواند به مرور زمان دارای مقاومت بالایی بشود. لذا به طور مستمر باید آن را تست کرد. کسی نمی‌تواند برای همه موارد تعیین کند که مقاومت اتصال زمین مناسب، چقدر باید باشد. تعیین این مقدار بستگی به شرایط محل و نوع سیستم دارد. برخی حداکثر ۵ و برخی 3Ω را کافی دانسته‌اند، در شرایط خاصی هم کسری از یک اهم توصیه شده است.

ساختار الکترود ارت

مقدار مقاومت یک الکترود ارت در برابر جریان عبوری شامل سه مؤلفه است (شکل ۴-۱ را ببینید):

- ۱- مقاومت خود فلز الکترود و سیم رابط با آن نقطه اتصال مربوطه.
- ۲- مقاومت سطح تماس الکترود با خاک اطراف آن.
- ۳- مقاومت خاک اطراف الکترود.