# فصل یازدهم

# زمین کردن حفاظتی

زمین از موادی تشکیل یافته که غالبا الکتریسته هستند به خصوص در حالاتی که مرطوب باشند. بنابراین اگر شخصی که روی زمین قرار دارد با جسمی که نسبت به زمین دارای پتانسیل است تماس حاصل نماید به علت برقرار شدن جریان دچار برق گرفتگی می شود.

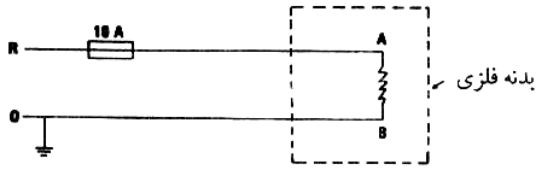
در ابتدای پیدایش صنعت برق نقطه نوترال (خنثی) آلترناتور ترانسفورماتورها را به زمین متصل نمی‌کردند . برای شبکه‌های کوچک آن دوران که دارای طول کم و ولتاژ پایین بودند نیازی به زمین کردن نوترال احساس نمی‌شد. این شبکه‌ها به شبکه‌های «نوترال مجزا» یا «غیر متصل به زمین» یا «زمین نشده» معروف بودند. البته حتی این شبکه‌ها هم از طریق خازن‌های کوچ بین فازها و زمین با زمین اتصال الکتریکی با امپدانس زیاد داشتند. این شبکه‌ها نسبت به شبکه‌های زمین شده امروزی دارای چند امتیاز بودند. یکی از این که اتصال اتفاقی یک فاز به زمین موجب برقراری جریان قابل ملاحظه و سبب قطع جریان برق و خاموشی نمی‌شد. دیگر این که در صورت تماس بدن شخص که روی زمین قرار داشت با یکی از فازها به علت برقرار نشدن جریان خطرناک، شخص دچار برق گرفتگی نمی‌گردید.

با توسعه شبکه‌ها و افزایش ولتاژ آنها جریانها در حالت اتصال یک فاز به زمین قابل ملاحظه گردید که متناوبا خود به خود قطع و وصل می‌شد و در محل اتصالی جرقه‌ای ایجاد می‌نمود. که به پدیده «زمین جرقه زن» معروف گردید. این پدیده سبب افزایش ولتاژ فازهای سالم نسبت به زمین و موجب اختلالات شبکه می‌گردید که به وسایل متصل صدمات و خساراتی وارد می آورد.

اتصال نوترال شبکه به زمین مانع این افزایش ولتاژها می‌گردد زیرا در صورت اتصال اتفاقی یک فاز به زمین جریان زیادی در مدار برقرار می‌شود که سبب قطع مدار توسط رله‌های حفاظتی می گردد. یک عیب مهم سیستمهای زمین شده این است که اگر شخصی روی زمین قرار داشته باشد در صورت تماس با یکی از فازها دچار برق گرفتگی می‌شود که جلوگیری از آن با عایق بندی مناسب سیمهای گرم به سهولت ممکن است. این عیب با فایده بزرگی همراه است و آن این است که همه بدنه‌های فلزی دستگاه‌های برقی را می‌توان به زمین متصل نمود. به این ترتیب هیچ گاه پتانسیلی بین بدنه فلزی دستگاه‌ها و زمین برقرار نمی‌شود که سبب برق گرفتگی گردد. در صورت اتصال یک فاز به بدنه جریان زیادی از طریق زمینی در مدار برقرار می‌شود که سبب قطع برق توسط رله‌های حفاظتی و رفع خطر می‌شود. اتصال بدنه فلزی دستگاه های برقی که در حالات عادی جریان برقی حمل نمی‌کنند به زمین را «زمین کردن حفاظتی» می‌نامیم که موضوع بحث این فصل کتاب می‌باشد. در قسمتهای بعدی این فصل به تشریح اصول و نحوه زمین کردن حفاظتی و مقررات مربوط به آن می‌پردازیم.

## ۱۱-۱- اصول زمین کردن حفاظتی

هدف از زمین کردن حفاظتی جلوگیری از برقرار شدن ولتاژهای زیاد و خطرناک روی بدنه فلزی وسایل و تجهیزات برقی نسبت به زمین است. برای پی بردن به خطرات بالقوه دستگاه‌های زمین نشده یک وسیله برقی زمین نشده را مطابق شکل ۱۱-۱ در نظر بگیرید.




**شکل ۱۱ ـ ۱ : وسیله برقی تک‌فاز با بدنه زمین نشده**

نوترال شبکه در پست توزیع به زمین متصل شده و دارای مقاومت محدودی مثلا ۲ اهم نسبت به زمین است. در صورتی که نقطه A وسیله برقی با بدنه اتصالی پیدا کند ولتاژ ۲۲۰ ولت نسبت به زمین روی بدنه برقرار می‌شود که بسیار خطرناک است. دقت کنید این گونه اتصالی موجب قطع فیوز نمی‌گردد و کسی از وقوع آن مطلع نمی‌شود. در صورتی که شخصی که روی زمین ایستاده با بدنه وسیله که پیوسته بدون خطر فرض می‌شود تماس حاصل کند دچار برق گرفتگی شددی خواهد شد. حال ببینیم اتصال بدنه به زمین چگونه خطر برق گرفتگی را دفع می‌کند. فرض کنید بدنه فلزی وسیله برقی به زمین متصل باشد و مقاومت اتصال آن نیز ۲ اهم باشد. حال به محض اتصال نقطه A به بدنه یک مدار برقی کامل از طریق فاز R، نقطه اتصالی A، بدنه فلزی ، اتصال به زمین بدنه فلزی و اتصال به زمین نوترال که دارای مقاومت کل ۴ اهم است تشکیل می‌شود که جریانی برابر ۵۵=۴÷۲۲۰ آمپر حمل می کند که سریعا موجب قطع فیوز ۱۰ آمپری مدار و قطع ولتاژ خطرناک از بدنه وسیله می شود.

حالا وضعیت دیگری را در نظر بگیرید. فرض کنید مقاومتهای اتصال به زمین نوترال و بدنه هر کدام به جای ۲ اهم برابر ۱۰ اهم باشند. در این حالت مقاومت کل مدار اتصال ۲۰ اهم خواهد بود که جریانی برابر ۱۱=۲۰÷۲۲۰ آمپر می‌کشد که البته قادر به قطع کردن فیوز ۱۰ آمپری نخواهد بود . در این حالت بدنه وسیله برقی در ولتاژ ۲۲۰ ولت باقی می‌ماند و می‌تواند موجب برق گرفتگی و هلاکت افراد شود. بنابراین دقت کنید که کار حفاظت از طریق ایجاد مسیری با امپدانس کم برای جریان انجام می‌شود به طوری که جریان زیادی برقرار شود و سبب عمل کردن رله‌ها یا فیوزهای حفاظتی که خفاظت علیه بار اضافی را عهده داری هستند گردد.

از بحث بالا روشن است تنها در حالاتی که امپدانس کل مداری که در صورت اتصالی برقرار می‌شود از حد متعارفی کمتر باشد وسایل حفاظتی علیه بار اضافی نظیر فیوز یا رله می توانند موجب قطع مدار و رفع خطر گردند. در حالاتی که مقاومت کل مدار شامل مقاومت اتصالهای زمین، مقاومت محل اتصالی و غیره از حد متعارف بیشتر باشد وسایل حفاظت علیه بار اضافی قادر به قطع برق و رفع خطر نخواهند بود و لازم است از وسایل دیگر مانند رله جریان نشتی به زمین استفاده به عمل آید. این دو طریق حفاظت در دو قسمت بعدی فصل تشریح می‌شوند.

## ۱۱-۲- حفاظت علیه بار اضافی

اتکاء به وسایل حفاظت علیه بار اضافی برای تامین ایمنی در موارد اتصالی زمین تنها مواردی مجاز است که جریانی که در مدار برقرار می شود حداقل سه برابر ظرفیت اسمی فیوز محافظ مدار یا بیشتر ۱/۵ برابر ظرفیت اسمی کلید خودکار محافظ مدار باشد تا از قطع کردن به موقع آن اطمینان حاصل شود. بنابراین در مورد مدارهای تک فاز که با فیوز و کلید اتوماتیک محافظت می شوند حداکثر امپدانس مجاز مدار اتصالی زمین به ترتیب از این قرارند:

$$Z = \frac{220}{3I} \qquad (۱-۱۱)$$

$$Z = \frac{220}{1.5I_{ch}} \qquad (۲-۱۱)$$

در معادلات بالا $I_f$ و $I_{cb}$ به ترتیب ظرفیت اسمی فیوز و کلید خودکار محافظ است.

**مثال ۱۱-۱**

حداکثر امپدانس مجاز مدار اتصالی زمین را برای مدار تک فازی که با فیوز ۱۰ آمپری و همچنین برای مدار تک فازی که با کلید خودکار ۱۰ آمپری محافظت می‌شود حساب کنید. برای مداری که با فیوز محاظت می‌شود با استفاده از (۱۱-۱)

$$Z = \frac{220}{3 \times 10} = 7.33\,\Omega$$

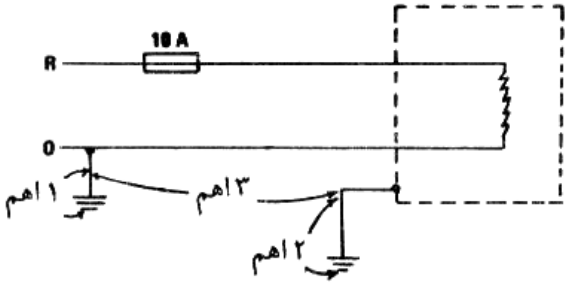
برای مداری که با کلید خودرکا حفاظت می شود با استفاده از (۱۱-۲)

$$Z = \frac{220}{1.5 \times 10} = 14.66\,\Omega$$

در حالاتی که امپدانس مدار اتصال زمین از حداکثر مقدار مجاز متجاوز گردد وسیله حفاظت علیه بار اضافی به احتمالی زیاد قادر به قطع مدار و رفع خطر نخواهد بود و در این صورت بدنه فلزی دستگاه در ولتاژی نسبت به زمین باقی می‌ماند. اگر این ولتاژ بیش از ۴۰ ولت باشد خطرناک است و در این گونه موارد باید برای حفاظت از رله‌های جریان نشتی به زمین استفاده کرد.

**مثال ۱۱-۲**

در مدار اتصال زمین یک بخاری برقی تک فاز ۲ کیلووات ۲۲۰ ولت مطابق شکل ۱۱-۲ مقاومت بین الکترود زمین پست و ترمینال زمین خانه ۳ اهم است (الکترود زمین خانه ۲ اهم و الکترود زمین پست ۱ اهم) مقاومت اتصالی و سیمها قابل صرف نظر است. در صورت بروز اتصال آیا حفاظت کافی توسط فیوز حفاظتی ۱۰ آمپری مدار تامین می‌شود؟




**شکل ۱۱ ـ ۲ : مدار بخاری مثال ۱۱ ـ ۲**

برای تامین حفاظت کافی، مقاومت کل مدار اتصالی نباید از مقدار زیر متجاوز گردد.

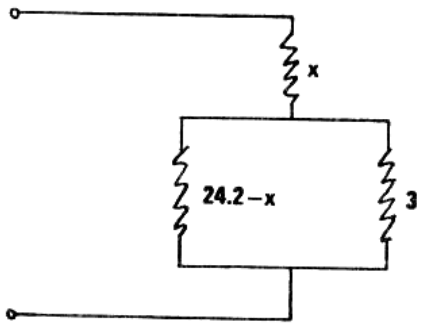
$$Z = \frac{220}{3 \times 10} = 7.33\,\Omega$$

مقاومت بخاری برابر است با

$$R = \frac{(220)^2}{2000} = 24.2\Omega$$

بسته به محل اتصالی ممکن است مقاومت کل مدار اتصالی از ۷/۳۳ اهم متجاوز گردد. فرض کنید اتصالی در محلی که تا انتهایی که به فاز متصل است مقاومت X اهم دارد اتفاق بیفتد. مدار معادل چنین می‌شود:

$$x + \frac{(24.2 - x)(3)}{(24.2 - x) + 3} = 7.33 \Longrightarrow x = 4.73$$




شکل ۱۱ ـ ۳ : مدار معادل اتصالی مثال ۱۱ ـ ۲

بنابراین روشن است که اگر اتصالی تا محل ۴/۷۳ اهم از انتهایی که به فاز متصل است اتفاق بیفتد می‌توان اطمینان داشت که فیوز قطع و خطر رفع می‌گردد. در صورتی که محل اتصالی پایینتر از این نقطه باشد احتمالا فیوز عمل نمی‌کند و موجب رفع خطر نمی‌گردد. ولتاژ بدنه نسبت به زمین در این حالت حداکثر مقدار خود را خواهد دات. ولتاژ بدنه نسبت به زمین پست برابر است با

$$220 - \frac{220}{7.33} \times 4.73 = 78.04$$

ولتاژ بدنه نسبت به زمین ۲/۳ مقدار بالاست

$$78.04 \times \frac{2}{3} = 52$$

که ولتاژی خطرناک است. لذا حفاظت با فیوز محافظ مدار علیه بار اضافی کافی نیست.

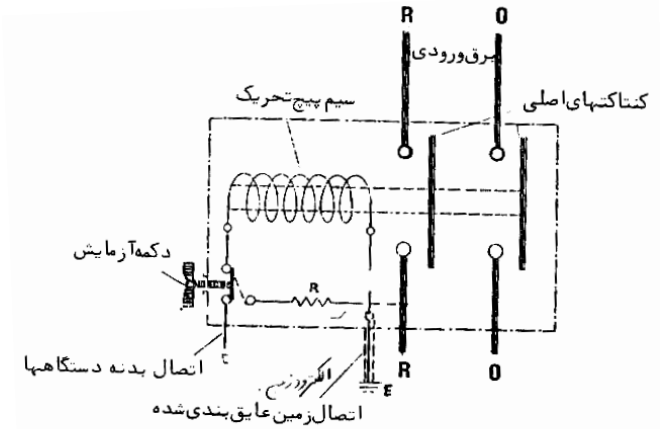
## ۱۱-۳- حفاظت با استفاده از رله جریان نشتی به زمین

در بسیاری موارد به علت سیمهای زمین معیوب یا قطع شده و با افزایش مقاومت بین الکترود و زمین به علت خشک شدن زمین اطراف الکترود مقاومت مدار اتصالی بیش از حد مجاز می‌شود و در این صورت لازم است از رله‌های جریان نشتی به زمین و کلیدهای خودکار برای قطع برق و رفع استفاده کنیم. دو نوع کلید خودکار معمول یکی بر اساس ولتاژ بدنه دستگاه‌ها نسبت به زمین و دیگری بر اساس جریان نشتی به زمین عمل می‌کنند.

### ۱۱-۳-۱- کلید قطع خودکار با استفاده از ولتاژ

این روش محافظت در شکل ۱۱-۴ نشان داده شده است. این کلید خودکار به صورت یک کنتاکتور روی برق ورودی قرار می‌گیرد. سیم پیچ کنتاکتور بین سیم زمین که بدنه همه وسایل برقی را به هم متصل نموده و الکترود زمین ساختمان متصل است. سیمی که الکترود زمین را به سیم پیچ متصل می کند عایق بندی شده است به طوری که مانع نشت جریان به مسیرهای دیگر شود. کنتاکتور را طوری طرح ریزی می کنیم که در صورتی که ولتاژی در حدود ۴۰ ولت بین سیم زمین و الکترود برقرار شود جریان کافی در مدار سیم پیچ جاری شود و سبب باز شدن کنتاکتور گردد. برای کسب اطمینان از درست کار کردن کلید آن را به مداری برای آزمایش مجهز می کنیم و هر چند وقت یک بار آن را مورد آزمایش قرار می‌دهیم. با فشار بر دکمه آزمایش ولتاژی برابر ۴۰ ولت به سیم پیچ اعمال می شود که باید موجب قطع کنتاکتور گردد. با برداشتن انگشت از دکمه مدار به حالت کار بر می‌گردد.

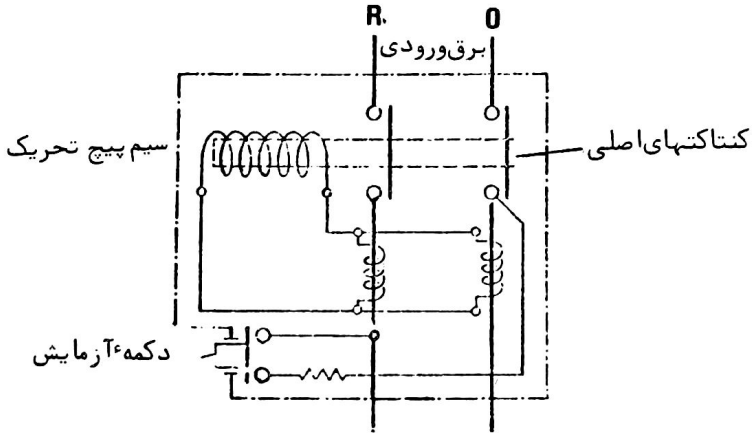
A.N.T




**شکل ۱۱ ـ ۴ : کلید قطع خودکار با استفاده از ولتاژ**

## ۱۱-۳-۲- کلید فطع خودکار با استفاده از جریان نشتی به زمین

این روش مطابق شکل ۵-۱۱ است .




**شکل ۱۱ ـ ۵ : کلید قطع خودکار با استفاده از جریان نشتی به زمین**

به طوری که ملاحظه می کنید در این روش دو سیم پیچ ثانویه روی فاز و نوترال پیچیده شده و به طور موازی متصل شده‌اند. در حالات عادی که سیستم اتصالی ندارد و جریانی به زمین نشت نمی‌کند جریانهای فاز و نوترال برابرند. مجموع جریان ثانویه القایی صفر می شود و هیچ گونه جریانی از مدار سیم پیچ کنتاکتور نمی‌گذرد. در صورت بروز اتصالی قسمتی از جریان فاز از طریق اتصال زمین بر می‌گردد و جریان نوترال کمتر از جریان فاز می شود که موجب برقراری جریانی در مدار سیم پیچ و باعث تحریک آن و باز شدن کنتاکتور می شود. برای کسب اطمینانی از درست بودن کلید خودکار آن را به مدار آزمایش مجهز می‌کنیم. با فشار بر دکمه آزمایش جریان مناسب در مدار سیم پیچ برقرار می‌شود که باید موجب قطع کنتاکتور گردد. با برداشتن انگشت از دکمه آزمایش مدار به حالت کار بر می‌گردد.

## ۱۱-۴- الکترود زمین

الکترود زمین عبارت از یک قطعه جسم هادی است که در زمین قرار داده می شود و سیم زمین به آن متصل می شود. الکترودها به اشکال مختلف ساخته می‌شوند که اهم آنها از این قرار است:

**الف**- میله‌های مسی معمولا به قطر ۱۶ میلیمتر که با چکش در زمین کوبیدن می‌شوند. این میله‌ها دارای نوک تیز فولادی هستند که فرو رفتن در زمین را آسان می‌کنند. پس از کوبیدن یک میله می‌توان میله دیگری به آن پیچ کرد و کوبیدن را ادامه داد تا میله‌ای با طول مورد نظر تا حدود ۳ متر به دست آید.

**ب**- صفحه‌های مسی که در عمق ۶۰ سانتیمتر یا بیشتر به صورت افقی خوابانده می شود. به این ترتیب زمین بسیار مناسبی عاید می شود لیکن اجرای این روش با زحمت بیشتری همراه است.

**پ**- استفاده از لوله های آب شهری در گذشته بسیار معمول بوده است ولی امروزه که بیشتر از لوله های پلاستیکی استفاده به عمل می‌آید این روش قابل استفاده نیست.

**ت**- غلاف یا زره فلزی کابلهای زیر زمینی امروزه بیشتر و بیشتر به عنوان الکترود زمین و سیم زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. غلاف و زره کابل در پست به نوترال متصل هستند. در این سیستمها در صورت اتصالی جریان از غلاف یا زره عبور میکند و به زمین نفوذ نمی‌کند.

**ث**- سیم زمین در سیستمهای توزیع هوایی گاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش در توزیع هوایی علاوه بر سیمهای سه فاز و نوترال سیم پنجمی کشیده می شود که در پست به نوترال متصل می‌گردد و در طی مسیر نیز در نقاطی به زمین متصل می شود و در نقاط مصرف به عنوان الکترود زمین مورد استفاده قرار می گیرد.

**ج**- زمین کردن نوترال در نقاط متعدد در مکانهایی که مقاومت ویژه زمین زیاد است و یا در فصول مختلف به علت تغییرات میزان رطوبت تغییرات فاحش دارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش که در ایران نیز معمول است در سیستمهای توزیع سیم نوترال را در طی مسیر در فواصل معین (سه تیر در میان) به الکترودی در زمین متصل می کنند. در این روش در صورت بروز اتصالی جریان دارای دو مسیر یکی از طریق سیمی نوترال و دیگری از طریق زمین دارد که مقاومت را کاهش می‌دهد.

ج- در بسیاری موارد برای کاهش دادن مقاومت زمین از مجموعه‌ای از میله‌ها استفاده می‌کنند و با اتصال الکتریکی آنها به یکدیگر آنها را به صورت الکترود واحد مورد استفاده قرار می‌دهند.

## ۱۱-۵- مقاومت ویژه زمین

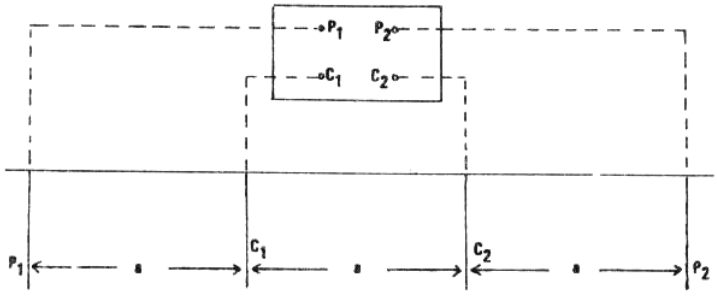
مقاومت بین الکترود وزمین بستگی به مقاومت ویژه زمین دارد که خود بسته به جنس زمین و میزان رطوبت آن تغییر می کند. خاکهای سطحی به علت داشتن رطوبت کمتر دارای مقاومت ویژه بالاتر هستند. برای کاهش مقاومت الکترود در این موارد از الکترودهای بلندتر استفاده می‌کنیم و یا با اضافه کردن املاح هادی در اطراف الکترود ویژه زمین را کاهش می‌دهیم. مقاومت ویژه انواع معمول زمین به صورت جدول زیر است.

**جدول ۱۱ ـ ۱ : مقاومت ویژه انواع معمول زمین**

| نوع زمین | مقاومت ویژه (اهم‌متر) |
|---|---|
| خاک باغچه | ۵ـ۵۰ |
| گل | ۱۰ـ۱۰۰ |
| گل شن‌زار | ۱۰۰ـ۲۰۰ |
| شنزار | ۲۵۰ـ۵۰۰ |
| صخره | ۱۰۰۰ـ۱۰۰۰۰ |

برای اندازه گیری مقاومت ویژه زمین می توان از دستگاه مخصوصی به نام مگر (megger) چهار ترمینالی با ضمائم مربوط شامل چهار الکترود و کابلهای اتصال استفاده کرد (مگر که شرحش در فصل بعد خواهد آمد اساسا یک مولد دستی است که با گرداندن دسته آن تولید برق می کند و می‌تواند با استفاده از ولتاژ تولید شده مقاومت بین دو نقطه را اندازه گیری کند). چهار الکترود میله‌ای را مطابق شکل ۱۱-۶ به فاصله‌های بیشتر از ۱۰ برابر طول میله از یکدیگر می‌کوبیم (a>200) میله‌ها را می‌توان تا

حداکثر یک متر در زمین فرو برد لیکن طول لوله در زمین نباید از ۱/۲۰ فاصله بین الکترودهای مجاور تجاوز کند. تحت این شرایط به طوری که در قسمت بعد خواهیم دید مقاومت هر الکترود زمین تقریبا $\frac{100p}{2\pi a}$ اهم می‌شود




شکل ۱۱ ـ ۶ : اندازه‌گیری مقاومت ویژه زمین به وسیله مگر چهار ترمینالی

اگر مقاومت خوانده شده توسط مگر R اهم باشد مقاومت ویژه زمین از فرمول زیر به دست می‌آید.

$$\frac{2\pi aR}{100}$$

با استفاده از a معین می‌توان دستگاه را طوری کالیبره کرد که مستقیما مقاومت ویژه را نشان دهد.

## ۱۱-۶- محاسبه مقاومت الکترودها

برای محاسبه مقاومت بین الکترود و زمین می‌توان به منظور سهولت زمین را بی نهایت بزرگ فرض کرد. بسته به شکل الکترودها محاسبه مقاومت برخی از آنها آسان و بعضی دیگر مشکل است.

### ۱۱-۶-۱- محاسبه مقاومت الکترود نیم کره

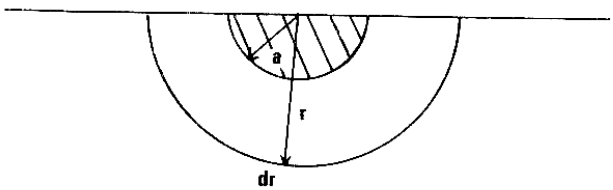
یک الکترود که حل ریاضی آن آسان است الکترود نیم کره است که مطابق شکل ۱۱-۷ در زمین قرار گیرد. شعاع نیم کره a متر است و مقاومت یک المان نشان داده شده زمین چنین است.

$$dR = \frac{pdr}{2\pi p^2}$$

برای محاسبه مقاومت کل رابطه بالا را بین a و ∞ انتگرال می گیریم.

$$R = \int_a^{\infty} \frac{pdr}{2\pi r^2}$$

$$R = \frac{p}{2\pi a} \qquad (۲-۱۱)$$




شکل ۱۱ ـ ۷ : الکترود نیم کره در زمین

دقت کنید که بیشتر مقاومت در نزدیک الکترود که چگالی جریان زیاد می‌باشد متمرکز است به طوری که اگر به عوض فاصله بی نهایت، مقاومت را تا فاصله ۱۰a محاسبه کنید ۹۰ درصد مقاومت کل حاصل می شود.

**مثال ۱۱-۳**

الکترود نیم کره‌ای به شعاع ۲۰ سانتیمتر در زمین گلی با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم متر کار گذاشته شده است. مقاومت الکترود چقدر است؟ مقاومت بین الکترود و نقطه‌ای از زمین به فاصله ۴ متر از الکترود چقدر است؟ با استفاده از (۱۱-۲)

$$R = \frac{100}{2\pi \times 0.2} = 80\Omega$$

مقاومت بین الکترود و نقطه‌ای از زمین در فاصله ۴ متری برابر است با

$$R = \frac{100}{2\pi}\left[\frac{1}{0.20} - \frac{1}{4}\right] = 76\Omega$$

## ۱۱-۶-۲- محاسبه مقاومت الکترود میله‌ای

محاسبه مقاومت الکترود میله‌ای مانند الکترود نیم کره به آسانی میسر نیست برای محاسبه از فرمول تقریبی که با تجربه نیز وفق می‌دهد استفاده می‌کنیم. مقاومت میله‌ای به شعاع r مترکه ۱ متر در زمین با مقاومت ویژه P فرو رفته شده است برابر است با:

$$R = 2.05\left(log\frac{21}{r}\right)\left(\frac{P}{2\pi l}\right) \qquad (۱۱-۴)$$

**مثال ۱۱-۴**

مقاومت یک میله ۱۶ میلیمتری که به طول ۱/۵ متر در زمین باغچه فرو برده شده است را حساب کنید.

$$\frac{l}{r} = \frac{1500}{16} = 93.7$$

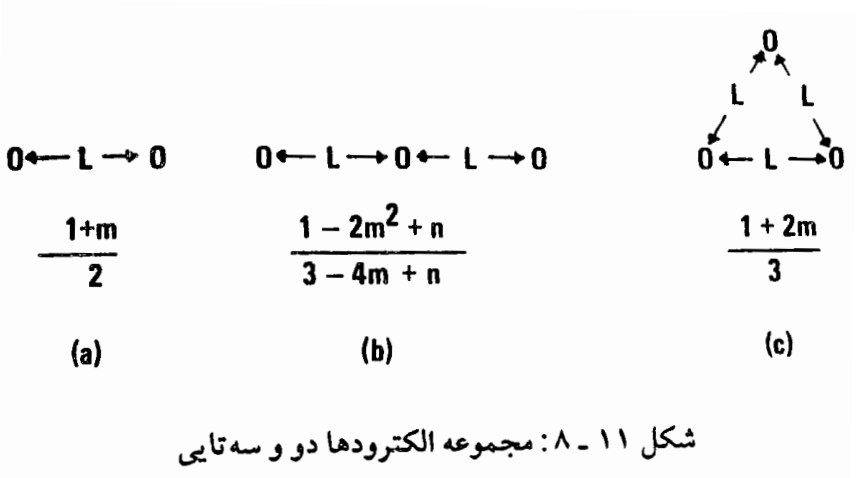
با فرض مقاومت ویژه ۲۰ اهم متر، مقاومت برابر می‌شود با

$$R = 2.05[Log(2 \times 93.7)].\left(\frac{20}{2\pi \times 1.5}\right)$$

$$R=8.5\ \Omega$$

## ۱۱-۶-۳- محاسبه مقاومت مجموعه الکترودهای میله‌ای

برای کاهش دادن مقاومت الکترودها می‌توان از مجموعه‌هایی از میله‌های به طور l متر در زمین استفاده نمود. سه مجموعه معمول دو و سه الکترودی به شکل زیر هستند. مقاومت هر یک از این مجموعه‌ها ضریبی از مقاومت یک میله است. این ضرایب نیز در شکل نشان داده شده است.




**شکل ۱۱ ـ ۸ : مجموعه الکترودها دو و سه‌تایی**

m و n در ضرایب بالا به شرح زیر هستند.

$$m = \frac{Lnx}{Ln\frac{1}{r}} \qquad x = \frac{1+L}{L} \qquad (۵-۱۱)$$

$$n = \frac{Lny}{Ln\frac{1}{r}} \qquad y = \frac{1+2L}{2L} \qquad (۶-۱۱)$$

ملاحظه می‌کنید در حالتی که فاصله بین میله‌های مجموعه خیلی بیشتر از طول آنها باشد ضریب کاهش مقاومت برابر عکس تعداد میله‌های مجموعه می‌شود که حداکثر کاهش ممکنه است. در فاصله‌های کمتر به علت استفاده اشتراکی میله‌ها از یک حوزه زمین ضریب کاهش مقاومت مجموعه کوچکتر است.

**مثال ۱۱-۵**

سه میله ۱۶ میلیمتر ۱/۵ متری (L=1.5,r=16mm) را مطابق شکل ۱۱-۸ (c) به فاصله یک متر (L=1m) از یکدیگر در زمین با مقاومت ویژه ۲۰ اهم متر می‌کوبیم. مقاومت آن چقدر است؟

$$X = \frac{1.5+1}{1} = 2.5$$

$$\frac{1}{r} = \frac{1500}{16} = 93.7$$

$$m = \frac{Ln\ 2.5}{Ln\ 93.7} = 0.202$$

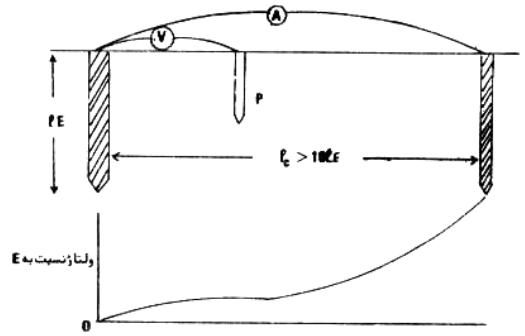
$$\frac{1+2m}{3} = \frac{1+2\times 0.202}{3} = 0.47$$

با استفاده از نتیجه مثال ۱۱-۴

$$R=8.5\times 0.47=4\Omega$$

## ۱۱-۷- اندازه گیری مقاومت الکترود زمین

مقاومت یک الکترود و یا یک مجموعه الکترود زمین را پس از نصب می‌توان به سهولت اندازه‌گیری کرد. برای این کار مطابق شکل ۱۱-۹ عمل می‌کنیم.




**شکل ۱۱ ـ ۹ : اندازه‌گیری مقاومت الکترود زمین**

در این شکل E الکترودی است که مقاومتش اندازه گیری می‌شود. در فاصله‌ای بیشتر از ده برابر طول الکترود E الکترود کمکی C را در زمین می‌کوبیم. با اتصال یک منبع تغذیه متناوب به این دو جریانی در زمین برقرار می‌کنیم که با آمپرمتر A اندازه گیری

می‌شود. حالا با جابجا کردن الکترود P می‌توان ولتاژ بین نقطه Pو الکترود E را اندازه گیری کرد. تجربه نشان می‌دهد که این ولتاژ با فاصله تغییراتی نظیر منحنی نشان داده شده در زیر شکل دارد که در وسط دو الکترود تغییرات زیادی ندارد. به این دلیل معمولا الکترود P را در وسط دو الکترود دیگر قرار می‌دهند و ولتاژ را اندازه گیری می‌کنند. حال مقاومت الکترود E به زمین از تقسیم ولتاژ بر جریان به دست می‌آید. برای مجموعه الکترودها فاصله $I_C$ را بزرگتر از ۲۰۱ انتخاب می‌کنیم تا مسیر جریان در زمین برای هر الکترود مستقل باشد

## ۱۱-۸- نحوه صحیح اتصال بدنه وسایل به زمین

بدنه فلزی همه وسایل برقی باید به سیم زمین متصل باشد و سیم زمین هم به ترمینال الکترود زمین متصل می‌شود که خود به الکترود متصل است. بدنه فلزی بسیاری از وسایل خود در مجاورت زمین قرار دارند لیکن هیچگاه نمی‌توان به این اتصال ناقص اکتفا کرد و اتصال الکتریکی آنها ضرورت دارد. سیم زمین ممکن است یک سیم لخت مسی، یک رشته سیم مخصوص در داخل کابل، لوله‌های فولادی سیم کشی یا جا کابلهای فلزی، غلاف یا زره فلزی کابلها یا ترکیبی از اینها باشد. در مواقعی که از سیم مخصوص استفاده می‌شود اندازه آن نباید از نصف اندازه بزرگترین سیمی که برای حمل جریان به کار گرفته شده است کمتر باشد.

بیشتر مقررات امروزه لازم میدانند که تجهیزات فلزی غیر برقی نظیر لوله‌های آب و گاز، رادیاتورهای فلزی، تیرهای آهنی ساختمان اگر در دسترس باشند به هم و به سیم زمین متصل گردند. این کار از برقرار شدن ولتاژهای خطرناک بین اجسام فلزی جلوگیری می‌کند و به ایمنی کمک می‌نماید.