



سازمان نظام مهندسی ساختمان
(شورای مرکزی)

دستورالعمل اندازه‌گیری مقاومت الکترو زمین و مقاومت ویژه خاک

گروه تخصصی برق

پاییز ۹۵

به نام خدا



سازمان نظام مهندسی ساختمان
(شورای مرکزی)

گروه تخصصی برق (دوره ششم)

جلد چهارم:

دستورالعمل اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین و مقاومت ویژه خاک

تدوین کنندگان:

رئیس کارگروه:

دکتر سلیمان شیرزادی

اعضاء کارگروه:

مهندس رحیم سلیمان‌آذر

دکتر ایمان سریری‌آجیلی

مهندس سیدبدرالدین رضازاده

مهندس پوریا ساسانفر

مهندس ایرج امینی‌باغبادرانی

دکتر علی‌اصغر امینی

مهندس مسعود باقرزاده‌یزدی

مهندس جلیل خدایاری

مهندس عزت‌ا... پرتوی‌شال

دکتر شاهرخ شجاعیان

مهندس محمدرضا حامدمحجوب

مهندس محمود رنجبر

پاییز ۱۳۹۵

فهرست مطالب

۱-هدف و دامنه کاربرد	۵
۲-مراجع الزامی	۵
۳-تعاریف و کلمات	۵
۳-۱-مقاومت الکتروود زمین (Earth Resistance)	۵
۳-۲-مقاومت ویژه خاک (Soil (earth) Resistivity)	۶
۳-۳-الکتروود زمین (Earth Electrode)	۶
۳-۴-مقاومت متقابل الکتروودهای زمین (Mutual Resistance of Earthing Electrodes)	۶
۳-۵-زمین دور (Remote Earth)	۶
۳-۶-ولتاژ انتقالی (Transferred Voltage)	۶
۳-۷-پایانه زمین اصلی (Main Earthing Terminal (Main Earthing Busbar))	۶
۳-۸-الکتروود زمین کمکی (Auxiliary Earth Electrode)	۶
۳-۹-پتانسیل زمین (Earth Potential)	۶
۳-۱۰-سیستم زمین (Earthing System)	۶
۴-ایمنی	۷
۵-کلیات	۷
۵-۱-لزوم اندازه‌گیری	۷
۵-۲-فرد کارآزموده	۸
۵-۳-دستگاه قابل قبول	۸
۵-۴-زمان اندازه‌گیری	۸
۵-۵-روش‌های قابل قبول	۸

- ۵-۶- قابلیت استناد نتایج اندازه‌گیری ۸
- ۵-۷- دقت اندازه‌گیری ۸
- ۵-۸- دستگاه اندازه‌گیری مقاومت اتصال زمین (ارت سنج) ۹
- ۶- انواع روش‌های اندازه‌گیری مقاومت الکتروودهای زمین ۹
- ۷- روش‌های افت پتانسیل ۱۰
- ۷-۱- روش افت پتانسیل کلاسیک ۱۰
- ۷-۱-۱- نکات اجرایی ۱۱
- ۷-۱-۲- نحوه اتصال دستگاه ارت‌سنج ۱۱
- ۷-۱-۳- اعتبارسنجی اندازه‌گیری ۱۲
- ۷-۱-۴- ساده‌سازی روش افت پتانسیل ۱۲
- ۷-۲- روش افت پتانسیل - ۶۲٪ ۱۳
- ۷-۳- روش افت پتانسیل - شیب ۱۴
- ۷-۴- تکنیک آزمون $90^{\circ}/180^{\circ}$ ۱۵
- ۷-۵- تکنیک چیدمان مثلثی ۱۷
- ۷-۶- تکنیک الکتروود متصل ۱۸
- ۸- روش‌های بدون میل ۱۹
- ۸-۱- روش دو نقطه‌ای ۱۹
- ۸-۱-۱- محدودیت‌ها، مزایا و کاربرد ۱۹
- ۸-۱-۲- اعتبارسنجی اندازه‌گیری ۲۰
- ۸-۲- روش تزریق جریان کلمپی ۲۰
- ۸-۳- روش سه نقطه‌ای ۲۱
- ۹- روش امپدانس حلقه ۲۲

- ۱۰- انتخاب روش اندازه‌گیری ۲۳
- ۱۱- عوامل ایجاد خطا در اندازه‌گیری ۲۳
- ۱۱-۱- اجرام فلزی مدفون در خاک ۲۳
- ۱۱-۲- جریان‌های سرگردان ۲۳
- ۱۱-۳- نزدیکی بیش از حد میل جریان به الکتروود زمین آزمون ۲۴
- ۱۱-۴- سایر خطاها ۲۴
- ۱۲- استفاده از کاهش‌دهنده‌های موقت ۲۴
- ۱۳- گزارش اندازه‌گیری ۲۵
- ۱۴- اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک ۲۵
- ۱۴-۱- روش تک راد ۲۵
- ۱۴-۲- روش چهار نقطه ۲۶
- ۱۴-۲-۱- روش وئر ۲۶
- ۱۴-۲-۲- روش اشلومبرگر ۲۷
- ۱۵- پیوست ۱ (الزامی): مشخصات استاندارد دستگاه اندازه‌گیری ۲۸
- ۱۶- پیوست ۲ (اطلاعی): مفاهیم پایه اتصال زمین ۲۸
- ۱۶-۱- شرح حوزه مقاومتی و مفهوم مقاومت سیستم زمین ۲۸
- ۱۶-۲- واژه نامه ۳۰
- ۱۷- مراجع ۳۰

۱- هدف و دامنه کاربرد^۱

این دستورالعمل در راستای اجرای مواد ۱۳-۲ و ۵-۱ و پ ۹-۴ مبحث سیزدهم و اجرایی نمودن بند ۲۲-۷-۸ مبحث بیست و دوم مقررات ملی ساختمان، به منظور اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی الکتروودهای زمین و مقاومت ویژه خاک در کلیه ساختمان‌های تحت پوشش مقررات ملی ساختمان تهیه شده است.

۲- مراجع الزامی^۲

مدارک زیر حاوی مقرراتی است که در متن این دستورالعمل به آن‌ها ارجاع شده است. در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن مورد نظر این دستورالعمل نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه‌های بعدی آن‌ها مورد نظر است.

[۱] مبحث سیزدهم مقررات ملی ساختمان (طرح و اجرای تاسیسات برقی ساختمانها)

[۲] مبحث بیست و دوم مقررات ملی ساختمان (مراقبت و نگهداری از ساختمان‌ها)

[3] IEC 60364-6:2016, Low voltage electrical installations –Part 6: Verification

[4] IEC 61010, Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use

[5] IEC 61577, Radiation protection instrumentation - Radon and radon decay product measuring instrument

۳- تعاریف و کلمات اختصاری

۳-۱- مقاومت الکتروود زمین (Earth^۳ Resistance)

امپدانس الکتروود زمین عبارت است از امپدانس مابین یک الکتروود، شبکه یا سیستم زمین و زمین دور پس از خارج کردن پارامتر راکتانس. البته در این دستورالعمل با توجه به این که بخش راکتیو امپدانس ناچیز است، از واژه مقاومت زمین به جای امپدانس زمین استفاده می‌شود. در اصل مقاومت الکتروود زمین، مقاومت آن الکتروود نسبت به جرم کلی زمین^۴ است.

¹Scope

² Normative References

^۳ در استانداردهای اروپایی معمولاً برای زمین کردن واژه Earthing و در استانداردهای آمریکایی واژه Grounding متداول است. این دو واژه، کاملاً یکسان بوده و در این دستورالعمل از هر دو واژه استفاده شده است.

⁴General Mass of the Earth

۳-۲- مقاومت ویژه خاک (Soil (earth) Resistivity)

مقداری است که نشان می‌دهد یک حجم معینی از خاک (مکعبی از خاک به طول و عرض و ارتفاع یک متر) چقدر در برابر عبور جریان الکتریکی مقاومت می‌کند و واحد آن اهم-متر یا اهم-سانتی‌متر است.

۳-۳- الکتروود زمین (Earth Electrode)

قطعه هادی که در خاک یا یک محیط هادی خاص (مانند بتن) و در تماس الکتریکی مستقیم با زمین جاسازی شده‌است.

۳-۴- مقاومت متقابل الکتروودهای زمین (Mutual Resistance of Earthing Electrodes)

تغییرات ولتاژ در یک الکتروود که به دلیل تغییرات جریان در الکتروود دیگر به وجود می‌آید و با واحد اهم بیان می‌شود.

۳-۵- زمین دور (Remote Earth)

یک مفهوم تئوری است که به یک الکتروود زمین با امپدانس صفر که در یک فاصله بینهایت دور از زمین تحت آزمون قرار دارد، اطلاق می‌شود. در عمل، زمین دور تا جایی که مقاومت متقابل مابین زمین تحت آزمون و الکتروود آزمون ناچیز است نزدیک انتخاب می‌شود. زمین دور معمولاً به عنوان پتانسیل صفر در نظر گرفته می‌شود.

۳-۶- ولتاژ انتقالی (Transferred Voltage)

حالت خاصی از ولتاژ تماس است که در اثر عبور جریان‌های بزرگ اتصال کوتاه از الکتروود یا اتصال زمین به بدنه‌های هادی انتقال می‌یابد.

۳-۷- پایانه زمین اصلی (Main Earthing Terminal (Main Earthing Busbar))

ترمینال یا شینه‌ای که بخشی از سیستم زمین یک تأسیسات است و امکان اتصال الکتریکی تعدادی از هادیها را به منظور زمین کردن فراهم می‌کند.

۳-۸- الکتروود زمین کمکی (Auxiliary Earth Electrode)

یک الکتروود زمین که براساس شرایط عملکرد سیستم، طراحی خاص خود را دارد. وظیفه اصلی این الکتروود ممکن است موردی به جز هدایت جریان خطای اتصالی به زمین باشد.

۳-۹- پتانسیل زمین (Earth Potential)

پتانسیل الکتریکی زمین اطراف یک الکتروود نسبت به جرم کلی زمین است که هنگام عبور جریان از الکتروود به زمین، بر روی سطح زمین یا داخل آن ایجاد می‌شود.

۳-۱۰- سیستم زمین (Earthing System)

مجموعه‌ای از اتصالات و تجهیزات که برای زمین کردن یک سیستم به صورت جداگانه یا مشترک مورد نیاز است.

۴- ایمنی

- اقدامات احتیاطی لازم برای برقراری ایمنی در هنگام کار و انجام آزمون بر روی سیستم زمین، همواره می‌بایست در نظر گرفته شوند به همین خاطر هنگام اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین، بایستی موارد زیر رعایت گردد:
- ۱- کلیه اندازه‌گیری‌ها باید توسط فرد یا افراد کارآزموده و ماهر انجام شود.
 - ۲- انجام اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سیستم اتصال زمین در روزهای طوفانی، بارانی و یا مواقعی که احتمال وقوع صاعقه باشد مجاز نیست.
 - ۳- استفاده از لوازم حفاظت فردی مانند دست‌کش عایق و کفش کار مناسب در هنگام اندازه‌گیری الزامی است.
 - ۴- جهت انجام آزمون از تجهیزاتی استفاده شود که استاندارد IEC-61010 را برای ایمنی و استاندارد IEC-61557 را برای کارآیی، دارا باشند.
 - ۵- مسیر آزمون باید به نحوی انتخاب شود که خطرات احتمالی به حداقل برسد. در این راستا بهتر است مسیر انتخابی با خیابان‌های پر رفت و آمد یا پیاده‌روهای شلوغ، تلاقی نداشته باشد و از علائم و نشانه‌های مناسب، حین آزمون استفاده شود.
 - ۶- فرد کارآزموده و ماهر همواره باید در ارتباط کامل با افرادی باشد که در محل آزمون حضور دارند و قرار است میل‌های آزمون را در نقاط دور جابجا نمایند.
 - ۷- قطع برق تأسیسات (حتی پست برق) ممکن است منجر به بی‌برق شدن سیستم زمین نشود زیرا ولتاژ می‌تواند از طریق پست‌های مجاور (با استفاده از نول فشار ضعیف، شیلد کابل‌ها و غیره) به خاطر کلیدزنی و یا وقوع خطا در آن، به سیستم زمین منتقل شود به همین دلیل قبل از اقدام به اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی الکتروودهای زمین باید نسبت به سنجش ولتاژهای سرگردان بر روی سیستم زمین و قابل قبول بودن آن، اطمینان حاصل نمود.
 - ۸- پیش از جداکردن یک الکتروود از سیستم زمین بایستی از عدم وجود جریان‌های بزرگ در آن اطمینان حاصل نمود.
 - ۹- نباید تمامی الکتروودهای زمین یک سیستم را یک‌جا قطع نمود، مگر آنکه تأسیسات مربوطه از قبل به طور کامل بی‌برق شده باشد.

۵- کلیات

۵-۱- لزوم اندازه‌گیری

بر اساس ماده ۱۳-۲-۵ "تأسیسات الکتریکی را باید قبل از شروع بهره‌برداری و یا پس از هر تغییر عمده در آن، آزمون تا نسبت به صحت کارهای انجام شده طبق این مقررات اطمینان حاصل شود". همچنین براساس بند ۱-۹-۴ مبحث سیزدهم مقررات ملی ساختمان "در پایان کار احداث هر الکتروود زمین و از آن پس به صورت دوره‌ای باید مقاومت آن را نسبت به جرم کلی زمین به کمک دستگاه‌های قابل قبول برای انجام این کار و توسط افراد کارآزموده اندازه‌گیری کرد و اگر تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مقاومت الکتریکی مشاهده شد نسبت به توسعه سیستم اتصال زمین یا احداث الکتروودهای جدید اقدام نمود".

علاوه بر آن بر اساس ماده ۲۲-۷-۸-۵ مبحث بیست و دوم مقررات ملی ساختمان "آزمون اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین باید با استفاده از تجهیزات و روش‌های تأیید شده به صورت دوره‌ای انجام شود".

۵-۲- فرد کار آزموده

فرد کار آزموده کسی است که دارای پروانه اشتغال معتبر در رشته تاسیسات برقی ساختمان از وزارت راه و شهرسازی بوده و دانش و مهارت لازم در زمینه اتصال زمین را فرا گرفته و صلاحیت مربوطه را از مراجع ذیصلاح دریافت کرده است. این فرد باید عملیات اندازه‌گیری را شخصاً انجام دهد. علاوه بر آن تفسیر نتایج اندازه‌گیری و اعتبارسنجی آن نیز باید توسط همین فرد انجام شود.

تبصره: منظور از تفسیر نتایج اندازه‌گیری، مشخص نمودن صحت، دقت، تعیین مقدار واقعی مقاومت و پیشنهاد زمان اندازه‌گیری بعدی براساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری و پیشنهاد روش‌های اصلاحی است. یادآوری: تطبیق نتایج آزمون با مقررات ملی، برعهده مهندس ناظر تأسیسات برقی ساختمان مورد نظر است.

۵-۳- دستگاه قابل قبول

دستگاه قابل قبول، ارت‌سنجی است که استاندارد بوده و دارای گواهی کالیبراسیون معتبر باشد. فرکانس منبع جریان این دستگاه باید با فرکانس شبکه و هارمونیک‌های آن متفاوت بوده و حتی‌الامکان نزدیک به فرکانس شبکه برق باشد. علاوه بر آن یک دستگاه قابل قبول باید بتواند مقاومت حداقل یک اهم را با دقت کافی و با هر یک از روش‌هایی که از نظر این دستورالعمل معتبر است، اندازه‌گیری نماید.

۵-۴- زمان اندازه‌گیری

به دلیل ارتباط مقدار مقاومت الکتروودهای زمین به شرایط محیطی (مانند دما و رطوبت خاک) اندازه‌گیری یک الکتروود معین در زمان‌های مختلف، نتایج متفاوتی را به دست می‌دهد بنابراین باید این موضوع در تفسیر نتایج اندازه‌گیری مورد توجه قرار گیرد.

۵-۵- روش‌های قابل قبول

در این دستورالعمل روش‌های اندازه‌گیری قابل قبول، اولویت‌ها و محدودیت‌های این روش‌ها ارائه شده است. در صورتی که به دلایل موجه نتوان از این روش‌ها استفاده کرد، می‌توان از روش‌های دیگری که در استانداردهای مندرج در پیوست ۶ بحث سیزدهم مقررات ملی ساختمان ذکر شده، با رعایت کاربرد، دقت، اولویت‌ها و سایر عوامل مؤثر استفاده نمود.

۵-۶- قابلیت استناد نتایج اندازه‌گیری

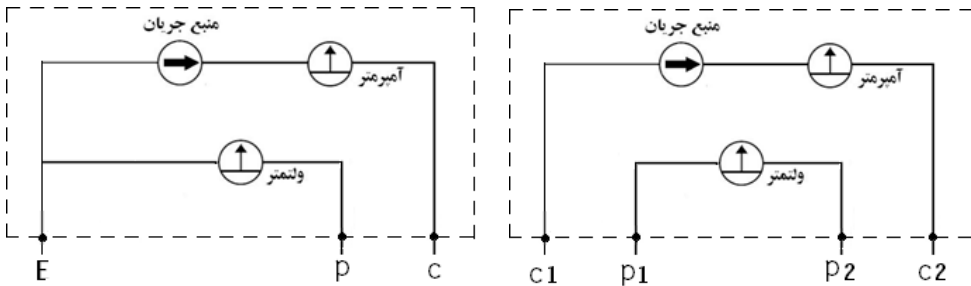
نتایج اندازه‌گیری مقدار مقاومت سیستم زمین به شرطی ارزشمند بوده و از نظر مطابقت با مقررات ملی و حصول ایمنی در ساختمان قابل استناد است که اندازه‌گیری در بدترین شرایط تست انجام شده باشد.

۵-۷- دقت اندازه‌گیری

اندازه‌گیری مقدار مقاومت سیستم زمین کار آسانی محسوب نشده و در عمل پارامترهای مختلفی اندازه‌گیری را با خطا مواجه می‌کند. بر اساس استاندارد BS-7430 رسیدن به دقت ۲٪ قابل قبول بوده ولی با این حال در اغلب موارد دقت ۵٪ هم قابل قبول در نظر گرفته می‌شود.

۵-۸- دستگاه اندازه‌گیری مقاومت اتصال زمین (ارت سنج)^۵

این دستگاه از یک منبع جریان متناوب، یک دستگاه آمپر متر، یک دستگاه ولت متر و یک صفحه نمایش تشکیل می‌شود. نمایشگر دستگاه، حاصل تقسیم ولتاژ بر جریان اندازه‌گیری شده را به عنوان مقدار مقاومت نشان می‌دهد. قاعدتاً این دستگاه دارای چهار ترمینال خروجی به نام‌های P1, P2, C1 و C2 می‌باشد. برخی دستگاه‌ها تنها دارای سه ترمینال خروجی می‌باشد که معمولاً با حروف E, P, و C نام‌گذاری می‌گردند. به دستگاه‌هایی که دارای چهار ترمینال خروجی هستند، "چهار سیمه" (شکل ۱) و به دستگاه‌های دارای سه ترمینال خروجی، "سه سیمه" (شکل ۲) گفته می‌شود.



شکل (۲): دستگاه ارت سنج نمونه (سه سیمه)

شکل (۱): دستگاه ارت سنج نمونه (چهار سیمه)

دستگاه‌های چهارسیمه به دلیل دارا بودن قابلیت "اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک" و همچنین دقت بالا در اندازه‌گیری مقاومت الکتروودهای زمین با مقادیر پایین، بر دستگاه سه سیمه ارجحیت دارند.

۶- انواع روش‌های اندازه‌گیری مقاومت الکتروودهای زمین

مقاومت هر نوع الکتروود زمین اعم از ساده، اساسی و شبکه همبند به صورت جداگانه و یا متصل به هم باید حداقل با یکی از روش‌های زیر اندازه‌گیری شود:

الف- روش‌های افت پتانسیل

- ۱- روش کلاسیک
- ۲- روش ۶۳٪
- ۳- روش شیب
- ۴- آزمون ۹۰° / ۱۸۰°
- ۵- تکنیک چیدمان مثلثی
- ۶- تکنیک الکتروود متصل

⁵Earth tester

ب- روش‌های بدون میل

۱- روش دونقطه (ارت مرده)

۲- روش تزریق جریان (کلمپی)

۳- روش سه نقطه

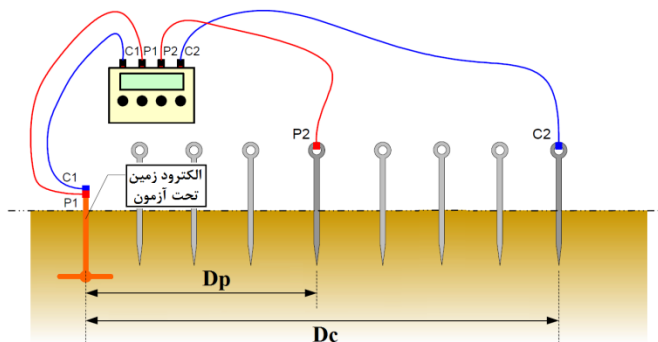
ج- روش امپدانس حلقه

۷- روش‌های افت پتانسیل

ویژگی مشترک این روش‌ها اندازه‌گیری افت پتانسیل ناشی از تزریق جریان به زمین توسط دستگاه ارت‌سنج و با استفاده از میل کوبی است. روش‌های مبتنی بر افت پتانسیل پرکاربردترین و قابل اطمینان‌ترین روش‌ها هستند.

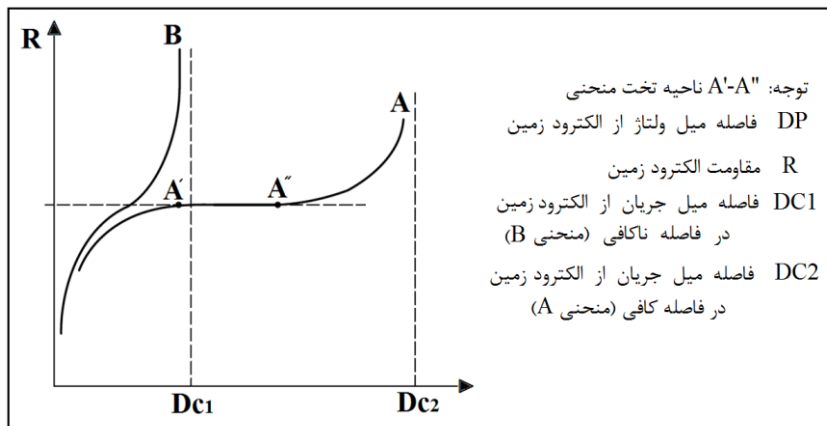
۷-۱- روش افت پتانسیل کلاسیک^۶

در این روش از دو میل برای اتصال ترمینال‌های دستگاه به زمین که یکی "میل جریان" و دیگری "میل ولتاژ" نامیده می‌شوند، استفاده می‌شود. مطابق شکل زیر میل دورتر یعنی میل جریان در فاصله‌ای کافی و مناسب از الکتروود اصلی کوبیده می‌شود به گونه‌ای که این دو خارج از حوزه مقاومتی هم قرار گیرند (فاصله DC). میل نزدیک‌تر یعنی میل ولتاژ در فاصله D_p نزدیک به الکتروود اصلی (مثلاً پنج درصد DC) کوبیده شده و مقاومت نشان داده شده توسط دستگاه یادداشت می‌شود. سپس میل ولتاژ در نقاط متعدد با فواصل مساوی (مثلاً در ۲۰ نقطه) تا نزدیک میل جریان به مانند شکل (۳) جابه‌جا شده و هر بار مقاومت اندازه‌گیری شده یادداشت می‌شود. نمودار مقاومت‌های اندازه‌گیری شده بر حسب فاصله در دو حالت مختلف در شکل زیر نشان داده شده است. هرگاه فاصله الکتروود جریان با الکتروود اصلی مناسب بوده و شرایط اندازه‌گیری صحیح نیز فراهم باشد مانند منحنی A در شکل (۴)، مقاومت زمین به صورت صعودی با یک ناحیه تخت در وسط شکل خواهد بود که مقدار ناحیه تخت، اندازه واقعی مقاومت الکتروود اصلی می‌باشد. در شرایطی که فاصله DC کمتر از مقدار مناسب باشد، نمودار مانند منحنی B در شکل (۴) بوده و در این صورت اندازه‌گیری معتبر نیست. در چنین حالتی باید با افزایش فاصله میل جریان از الکتروود اصلی، تمامی مراحل اندازه‌گیری را تکرار نمود تا منحنی مناسب حاصل شود.



شکل (۳): اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین به روش افت پتانسیل کلاسیک

^۶Fall of Potential



شکل (۴): منحنی‌های مقاومت-فاصله در روش افت پتانسیل کلاسیک

۷-۱-۱- نکات اجرایی

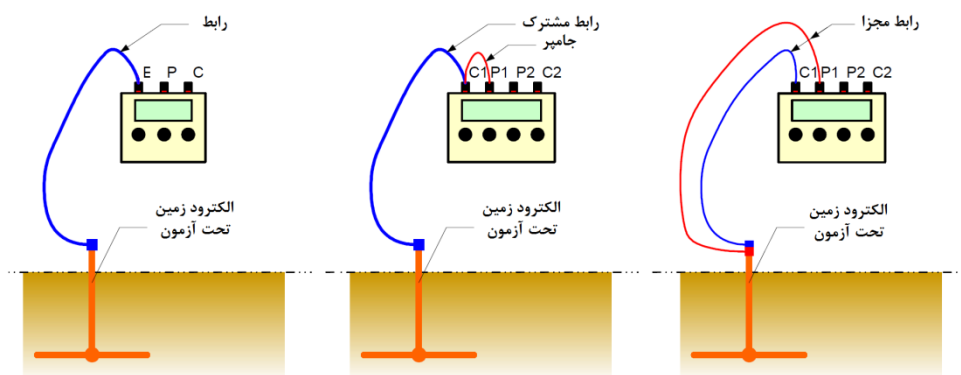
- (۱) فاصله مناسب جهت کوبیدن میل جریان باید به گونه‌ای انتخاب شود که حوزه مقاومتی آن با حوزه مقاومتی الکتروود زمین تداخل نداشته باشد. توصیه می‌شود این فاصله از ۵ برابر بزرگترین بعد الکتروود زمین کوچک‌تر نباشد.
- (۲) توصیه می‌شود الکتروود زمین، میل جریان و میل ولتاژ در یک راستا و به صورت خطی چیدمان شوند.
- (۳) در صورت وجود موانع و فراهم نبودن فاصله کافی جهت کوبیدن میل‌ها در یک راستا، مطابق شکل (۹) چیدمان میل‌ها می‌تواند به صورت مثلثی اجرا شود.
- (۴) برای اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین گسترده که نیاز به استفاده از سیم‌های بلند برای اتصال به میل‌های جریان و ولتاژ و در نتیجه احتمال بروز خطای ناشی از تداخل الکترومغناطیسی وجود دارد و همچنین در مواردی که محدودیت‌هایی در کوبیدن میل ولتاژ در چیدمان خطی میل‌ها به وجود آید، توصیه می‌شود از روش تست $90^\circ/180^\circ$ استفاده شود که در بخش ۷-۴ توضیح داده شده است.
- (۵) برای بهبود کیفیت آزمون اندازه‌گیری مقاومت پیشنهاد می‌شود مقداری آب نمک در اطراف میل جریان و میل ولتاژ به خاک ریخته شود. توجه شود که این عمل برای الکتروود زمین تحت آزمون ممنوع می‌باشد.
- (۶) سیم‌های رابط بین دستگاه و میل‌ها باید به طور کامل از روی قرقره‌ها باز شوند و به صورت باز شده روی زمین رها شوند (دقت شود که سیم‌های رابط تشکیل حلقه ندهند).

۷-۱-۲- نحوه اتصال دستگاه ارت‌سنج

- اتصال دستگاه به میل‌های ولتاژ و جریان و الکتروود اصلی به دو شکل امکان‌پذیر است:
- الف- روش چهارسیمه: در این روش ترمینال‌های P1 و C1 با دو سیم مجزا به الکتروود اصلی متصل شده و P2 و C2 هم به ترتیب به میل‌های ولتاژ و جریان وصل می‌شوند. این روش در دستگاه‌های سه ترمیناله (سه سیمه) قابلیت اجرا ندارد.

ب- روش سه‌سیمه: در این روش ترمینال‌های $P1$ و $C1$ به کمک رابط (یا جامپر) به هم متصل شده و توسط یک سیم مشترک به الکتروود اصلی و $P2$ و $C2$ هم به ترتیب به میل‌های ولتاژ و جریان وصل می‌شوند. در برخی دستگاه‌های ارزان قیمت ترمینال‌های $P1$ و $C1$ در داخل دستگاه به هم متصل شده و معمولاً E نام‌گذاری می‌شود. بدیهی است چنین دستگاه‌هایی قابلیت اندازه‌گیری به روش چهارسیمه را ندارند.

تفاوت مهم این دو روش در این است که در روش سه‌سیمه، مقاومت سیم رابط الکتروود اصلی در مقدار مقاومت اندازه‌گیری، وارد شده و زمانی که مقاومت الکتروود اصلی، کوچک باشد ممکن است ایجاد خطا کند. بنابراین می‌توان گفت در روش اندازه‌گیری سه‌سیمه، بهتر است دستگاه ارت‌سنج در نزدیکی الکتروود زمین قرار گیرد. تفاوت اتصالات این روش‌ها در شکل زیر آمده است.



شکل (۵): انواع روش‌های اتصال (سه‌سیمه یا چهارسیمه) دستگاه ارت‌سنج به الکتروود تحت آزمون
(در این شکل، اتصال $P2$ یا P به میل ولتاژ و $C2$ یا C به میل جریان نشان داده نشده است.)

۷-۱-۳- اعتبارسنجی اندازه‌گیری

در صورتی که منحنی مقاومت-فاصله دارای شکل طبیعی خود بوده و دارای ناحیه تخت (یا شیب اندک) باشد، اندازه‌گیری به درستی انجام شده و مقدار مقاومت در ناحیه تخت به عنوان مقاومت الکتروود زمین مورد آزمایش منظور خواهد شد. در صورت عدم حصول ناحیه تخت و شیب‌دار بودن منحنی در وسط شکل، باید با افزایش فاصله میل جریان، اندازه‌گیری را تکرار نمود. وجود شکل غیرطبیعی در نمودار می‌تواند ناشی از اثر فلزات مدفون در خاک مانند لوله‌های تأسیسات باشد. در این حالت باید مسیر کوبیدن میل‌های ولتاژ و جریان را تغییر داد.

گاهی نیز شکل غیرطبیعی منحنی ناشی از وجود جریان‌های سرگردان در خاک و ناتوانی دستگاه اندازه‌گیری در حذف آنها می‌باشد که در این صورت می‌توان منابع نویز را با قطع برق تأسیسات و یا موکول نمودن اندازه‌گیری به زمان دیگر و یا استفاده از دستگاهی با فیلتر قوی‌تر به طور کامل از بین برد و یا کاهش داد.

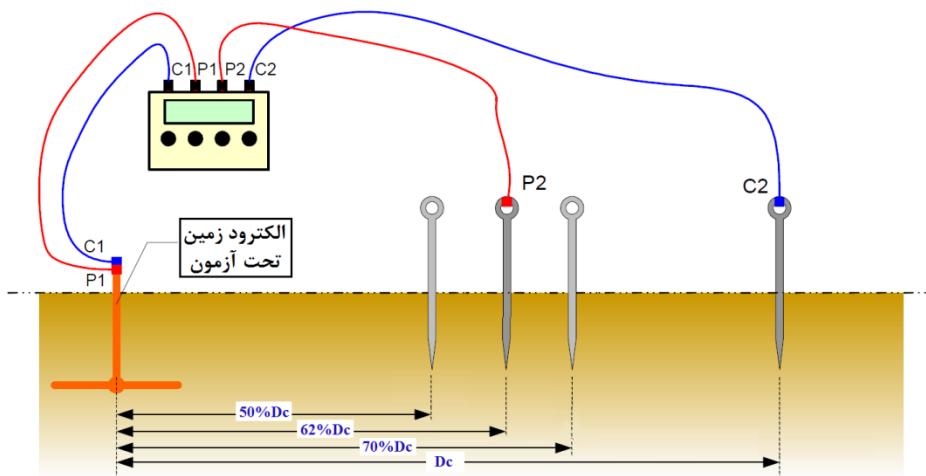
۷-۱-۴- ساده‌سازی روش افت پتانسیل

تعدد نقاط اندازه‌گیری و ترسیم دقیق نمودار مقاومت-فاصله در روش افت پتانسیل نیاز به صرف زمان زیادی دارد و در برخی موارد نیز رسیدن به ناحیه تخت به علت محدودیت‌های فضا و یا اجرا، امکان‌پذیر نیست. در این‌گونه موارد از روش‌های ۵۰٪، ۶۲٪ و شیب که هر سه بر مبنای روش پایه افت پتانسیل هستند، استفاده می‌شود.

۷-۲- روش افت پتانسیل - ۶۲٪

این روش اندازه‌گیری، مبتنی بر این قاعده است که در روش افت پتانسیل، مقدار واقعی مقاومت الکتروود زمین تحت آزمون هنگامی به دست می‌آید که فاصله میل ولتاژ تا الکتروود زمین برابر با $\frac{61}{8}\%$ (تقریباً ۶۲ درصد) فاصله میل جریان تا الکتروود زمین باشد. البته کماکان صحت این روش منوط بر مناسب بودن فاصله بین میل جریان و الکتروود تحت آزمون است. برای اجرای این روش مراحل زیر باید انجام شوند:

- (۱) الکتروود زمین تحت آزمون اندازه‌گیری از مابقی سیستم به طور کامل جدا و ایزوله شود.
- (۲) میل جریان دستگاه آزمون در فاصله مناسبی از الکتروود زمین کوبیده شود.
- (۳) میل ولتاژ در فاصله‌ای برابر با ۶۲٪ فاصله بین الکتروود زمین و میل جریان نسبت الکتروود زمین کوبیده شود.
- (۴) مقدار نشان داده شده توسط دستگاه آزمون خوانده و ثبت شود.
- (۵) برای بررسی صحت مقدار قرائت شده در گام قبلی، میل ولتاژ یک‌بار در فاصله ۵۰٪ و بار دیگر در فاصله ۷۰٪ کوبیده شده و دو عدد دیگر خوانده شود. چنانچه هر دو مقدار به دست آمده در این آزمون‌ها نسبت به مقدار خوانده شده در فاصله ۶۲٪ بیش از ۵٪ تفاوت نداشته باشد، آنگاه مقاومت اندازه‌گیری شده در فاصله ۶۲٪ به عنوان مقدار مقاومت الکتروود زمین منظور می‌گردد. در صورت اختلاف بیش از ۵٪، میل جریان باید در فاصله‌ای دورتر نسبت به حالت قبل جابه‌جا شده و گام‌های ۳ و ۴ تکرار شود.



شکل (۶): اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین به روش افت پتانسیل ۶۲٪

تذکره ۱- کلیه مندرجات نکات اجرایی روش افت پتانسیل کلاسیک (بخش ۷-۱) باید در روش ۶۲٪ نیز مورد توجه قرار گیرد.

تذکره ۲- فاصله پیشنهادی مناسب، بین میل جریان و یک الکتروود زمین منفرد حدود ۵۰ متر است. این فاصله، بین میل جریان و مرکز یک الکتروود زمین گسترده از جدول (۱) به دست می‌آید.

⁷Fall of potential – 62% method [BS 7430, IEEE Std 81]

جدول (۱): فاصله پیشنهادی مناسب برای میل جریان در روش ۶۳٪
برای الکترودهای گسترده با ابعاد مختلف بر حسب متر براساس توصیه استاندارد BS 7430

فاصله میل جریان از مرکز الکترو د زمین گسترده	حداکثر بُعد الکترو د زمین* تحت آزمایش
۱۰۰	۵
۱۵۰	۱۰
۲۰۰	۲۰

* منظور از حداکثر بُعد الکترو د زمین، فاصله بین دورترین نقاط آن الکترو د است.

یادآوری: در برخی از مراجع و همچنین توصیه سازندگان دستگاه‌های ارت‌سنج به روش افت پتانسیل ۵۰٪ اشاره شده است. مراحل اجرای کار در این روش مشابه با روش ۶۳٪ بوده و تنها تفاوت در انتخاب فاصله میل ولتاژ از مرکز الکتریکی سیستم زمین بوده که به جای ۶۳٪، میل ولتاژ باید در فاصله ۵۰٪ مستقر شود. به عبارت دیگر میل ولتاژ دقیقاً در وسط فاصله Dc کوبیده شده و مقاومت زمین مانند روش افت پتانسیل کلاسیک، توسط دستگاه، اندازه‌گیری می‌شود. سپس میل ولتاژ به دو نقطه با فاصله 10%Dc از نقطه وسط به طرفین جابه‌جا شده (در فواصل 40%Dc و 60%Dc از الکترو د اصلی کوبیده می‌شود) و دو عدد دیگر برای مقاومت به دست می‌آید. اگر این دو عدد حداکثر ۵٪ با مقاومت وسط اختلاف داشته باشند، این اندازه‌گیری معتبر خواهد بود و میانگین این سه عدد به عنوان مقاومت الکترو د منظور می‌گردد.

۷-۳- روش افت پتانسیل – شیب^۸

این روش زمانی به کار می‌رود که:

- (۱) امکان ایجاد فاصله کافی بین الکترو د اصلی و میل جریان فراهم نبوده و قسمت تخت منحنی قابل دستیابی نیست.
- (۲) مرکز الکتریکی مؤثر سیستم زمین، قابل تشخیص نیست.
- (۳) الکترو د زمین از نوع گسترده با مقاومت کوچک است. در چنین حالتی روش‌های دیگر به دلیل خطای اندازه‌گیری زیاد، قابل استفاده نیستند

مراحل انجام کار در این روش به شرح زیر است:

- (۱) میل جریان در فاصله هر چه دورتر (حداکثر مقدار ممکن با توجه به محدودیت‌های عملیاتی) از الکترو د زمین مستقر شود (این فاصله با Dc نمایش داده می‌شود).
- (۲) میل ولتاژ در سه نقطه مختلف در فواصل 0.2Dc، 0.4Dc و 0.6Dc کوبیده شده و به ترتیب مقاومت‌های R₁، R₂ و R₃ خوانده می‌شود. (شبیه به شکل (۶) ولی با فواصل فوق)
- (۳) این مقادیر در فرمول زیر قرار گرفته و مقدار μ به دست می‌آید:
- (۴) با قراردادن مقدار μ در جدول (۲)، نسبت Dp/Dc به دست می‌آید. که Dp فاصله میل ولتاژ تا الکترو د زمین است.
- (۵) با داشتن نسبت Dp/Dc و دانستن Dc مقدار Dp بدست می‌آید.
- (۶) با کوبیدن میل ولتاژ در نقطه Dp مقاومت الکترو د زمین اندازه‌گیری و به عنوان نتیجه در نظر گرفته می‌شود.
- (۷) در صورتی که مقدار μ بدست آمده از مرحله ۳ در جدول موجود نباشد، شیب منحنی بیش از حد مجاز بوده و لازم است Dc را افزایش داده و مراحل فوق را تکرار نمود.

⁸ Fall of potential – Slope method [BS 7430, IEEE Std 81]

جدول (۲): ضرایب روش شیب

μ	Dp/Dc	μ	Dp/Dc	μ	Dp/Dc
0.40	0.643	0.80	0.580	1.20	0.494
0.41	0.642	0.81	0.579	1.21	0.491
0.42	0.640	0.82	0.577	1.22	0.488
0.43	0.639	0.83	0.575	1.23	0.486
0.44	0.637	0.84	0.573	1.24	0.483
0.45	0.636	0.85	0.571	1.25	0.480
0.46	0.635	0.86	0.569	1.26	0.477
0.47	0.633	0.87	0.567	1.27	0.474
0.48	0.632	0.88	0.566	1.28	0.471
0.49	0.630	0.89	0.564	1.29	0.468
0.50	0.629	0.90	0.562	1.30	0.465
0.51	0.627	0.91	0.560	1.31	0.462
0.52	0.626	0.92	0.588	1.32	0.458
0.53	0.624	0.93	0.556	1.33	0.455
0.54	0.623	0.94	0.554	1.34	0.452
0.55	0.621	0.95	0.552	1.35	0.448
0.56	0.620	0.96	0.550	1.36	0.445
0.57	0.618	0.97	0.548	1.37	0.441
0.58	0.617	0.98	0.546	1.38	0.438
0.59	0.615	0.99	0.544	1.39	0.434
0.60	0.614	1.00	0.542	1.40	0.431
0.61	0.612	1.01	0.539	1.41	0.427
0.62	0.610	1.02	0.537	1.42	0.423
0.63	0.609	1.03	0.535	1.43	0.418
0.64	0.607	1.04	0.533	1.44	0.414
0.65	0.606	1.05	0.531	1.45	0.410
0.66	0.604	1.06	0.528	1.46	0.406
0.67	0.602	1.07	0.526	1.47	0.401
0.68	0.601	1.08	0.524	1.48	0.397
0.69	0.599	1.09	0.522	1.49	0.393
0.70	0.597	1.10	0.519	1.50	0.389
0.71	0.596	1.11	0.517	1.51	0.384
0.72	0.594	1.12	0.514	1.52	0.379
0.73	0.592	1.13	0.512	1.53	0.374
0.74	0.591	1.14	0.509	1.54	0.369
0.75	0.589	1.15	0.507	1.55	0.364
0.76	0.587	1.16	0.504	1.56	0.358
0.77	0.585	1.17	0.502	1.57	0.352
0.78	0.584	1.18	0.499	1.58	0.347
0.79	0.582	1.19	0.497	1.59	0.341

۷-۴- تکنیک آزمون ۹۰°/۱۸۰°

این تکنیک معمولاً برای اعتبارسنجی روش‌های شیب و ۶۲٪ از طریق مقایسه نتایج حاصله به کار می‌رود. دستگاه ارت‌سنج و میل‌ها باید مطابق شکل (۷) پیکربندی گردد.

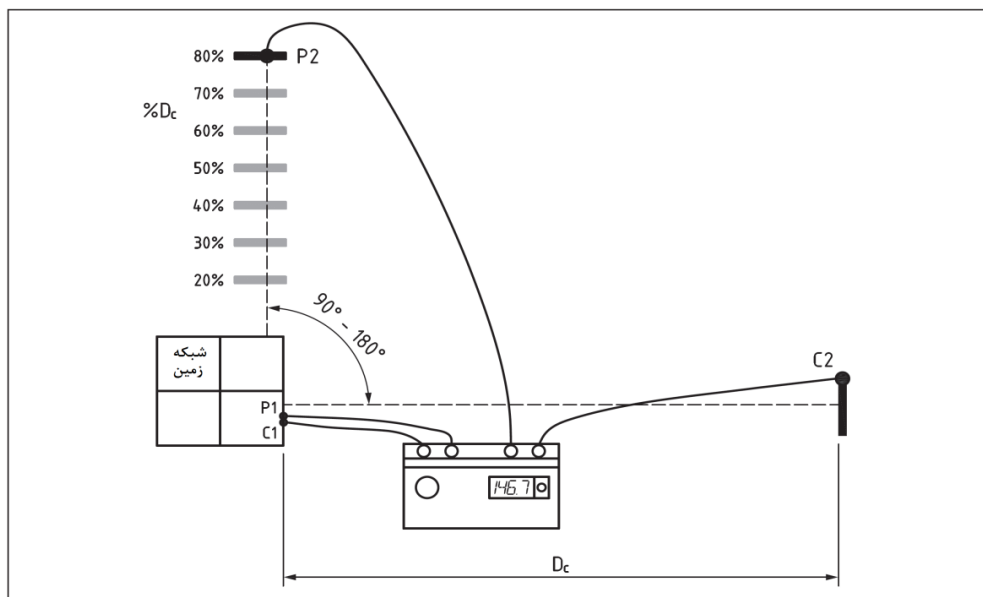
در این روش، میل جریان C2 در فاصله مناسبی از سیستم تحت آزمون (Dc) و میل ولتاژ با زاویه ۹۰° یا ۱۸۰° نسبت به راستای استقرار میل جریان کوبیده می‌شود و چند اندازه‌گیری در فواصل مختلف (برای میل ولتاژ) مانند 0.4Dc, 0.6Dc و 0.8Dc انجام می‌گیرد (Dc همان فاصله میل جریان تا سیستم تحت آزمون است). نموداری که ترسیم می‌شود به مانند

⁹ 90°/180° test [BS 7430]

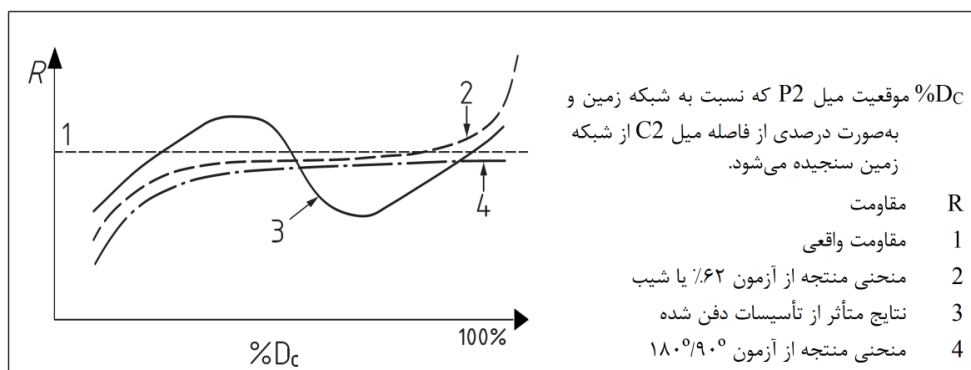
دستور العمل اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین و مقاومت ویژه خاک

منحنی ۴ در شکل (۸) می‌باشد و باید به سمت مقدار واقعی مقاومت میل کند ولی هرگز به این مقدار نخواهد رسید. از طریق برون‌یابی برای نقطه D_c می‌توان مقدار واقعی مقاومت الکتروود تحت آزمون را تخمین زد.

توجه: اجرام فلزی یا کابل‌های مدفون در خاک می‌توانند با ایجاد تغییرات جدی در شکل نمودار، آزمون را به سوی نتایج اشتباه سوق دهند. یکسانی نتایج حاصل از اندازه‌گیری به کمک تکنیک $90^\circ/180^\circ$ با اندازه‌گیری به شیوه معمول (کوبیدن میل‌های ولتاژ و جریان در امتداد یک خط راست) در هر یک از روش‌های شیب یا 62% بیانگر صحت این آزمون‌ها می‌باشد.



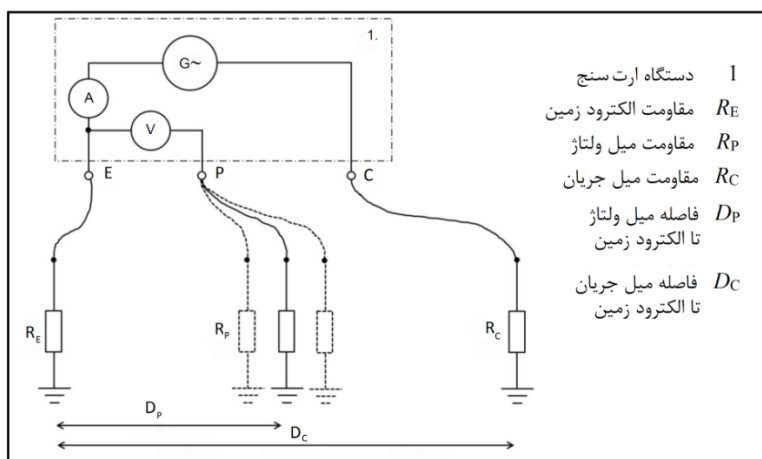
شکل (۷): آزمون $90^\circ/180^\circ$



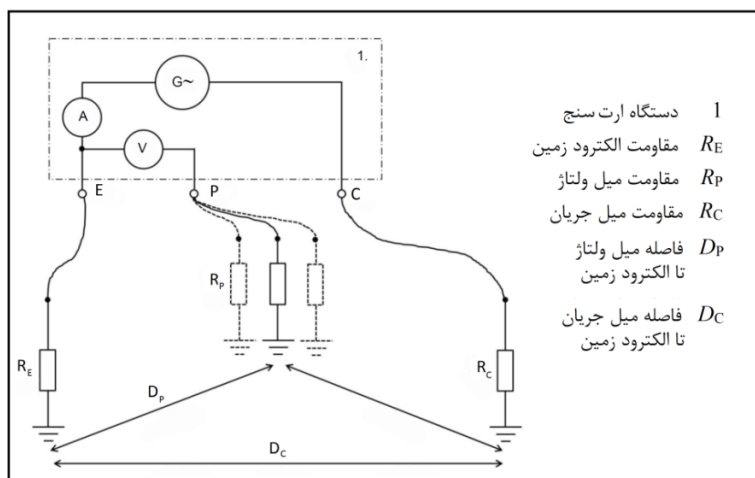
شکل (۸): نتایج آزمون $90^\circ/180^\circ$ نوعی

۷-۵- تکنیک چیدمان مثلثی^{۱۰}

معمولاً میل‌های ولتاژ و جریان مانند شکل (۹) در امتداد یک خط راست کوبیده شده و اندازه‌گیری انجام می‌شود. در صورتی که به دلیل محدودیت‌های مختلفی که در فضاهای شهری وجود دارد، امکان میل‌کوبی در امتداد یک خط راست وجود نداشته باشد، می‌توان میل‌ها مانند شکل (۱۰) را در یک چیدمان مثلثی کوبیده و اندازه‌گیری را انجام داد. تذکر: در چیدمان مثلثی زاویه بین دو راستای D_p و D_c نباید زیاد باشد زیرا در صورتی که این زاویه در چیدمان مثلثی به سمت 90° نزدیک شود باید نکات مربوطه را از بخش ۷-۴ در نظر گرفت و مقدار D_p باید به D_c نزدیک باشد.



شکل (۹): چیدمان الکتروودها به صورت خطی

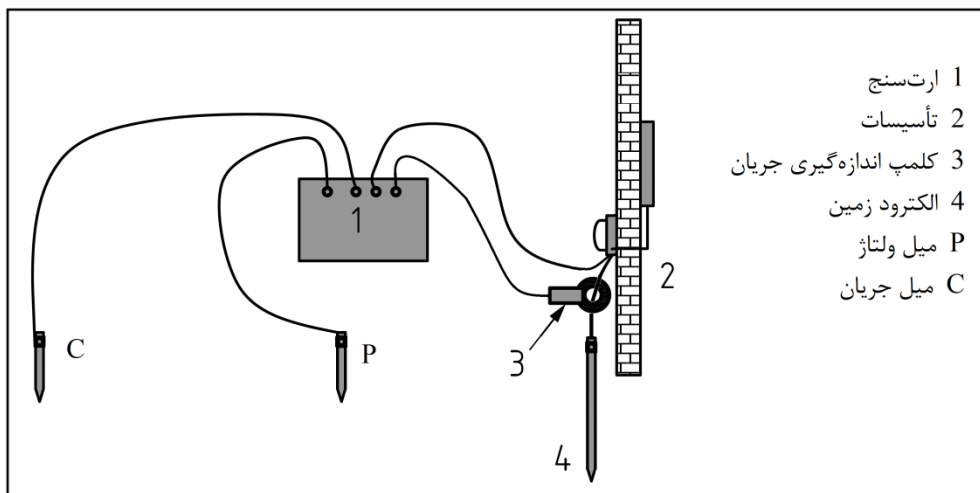


شکل (۱۰): چیدمان الکتروودها به صورت مثلثی

¹⁰ Measurement of the earth electrode resistance, Electrodes arranged in triangular formation [IEC 60364-6]

۷-۶- تکنیک الکتروود متصل^{۱۱}

با توجه به اینکه آمپرمترهای درونی دستگاه‌های ارت‌سنج، کل جریان خارج شده از دستگاه را می‌خوانند لذا پیش از اقدام به اندازه‌گیری مقاومت یک الکتروود زمین، بایستی آن را از سیستم زمین جدا نمود تا کل جریان آزمون از الکتروود موردنظر عبور کرده و مقاومت همان الکتروود اندازه‌گیری شود وگرنه مقاومت کل سیستم زمین خوانده می‌شود. برای رفع این مشکل و اندازه‌گیری بدون نیاز به جداکردن الکتروود تحت آزمون، بعضی از دستگاه‌های ارت‌سنج، مجهز به یک آمپرمتر کلمپی (چنگکی) هستند که روی الکتروود تحت تست قرار داده شده و مطابق شکل (۱۱) توسط یک سیم رابط به دستگاه وصل می‌شود. در حقیقت این آمپرمتر جایگزین آمپرمتر درونی دستگاه می‌گردد.



شکل (۱۱): ارت‌سنج سه ترمیناله همراه با کلمپ جریان

سه ترمینال دیگر این دستگاه مشابه روش افت پتانسیل کلاسیک به الکتروود آزمون و میل‌های ولتاژ و جریان وصل می‌شود. با توجه به محل استقرار آمپرمتر کلمپی فقط جریان آزمون عبوری از الکتروود مورد نظر خوانده شده و اندازه‌گیری مقاومت آن مشابه یکی از روش‌های افت پتانسیل کلاسیک، ۶۲٪ یا ۵۰٪ ولی بدون نیاز به جداکردن الکتروود از سامانه زمین امکان‌پذیر می‌گردد.

توجه به این نکته ضروری است که جدا کردن یک الکتروود زمین از تأسیسات برق‌دار با هدف اندازه‌گیری مقاومت آن، می‌تواند خطراتی را برای سیستم به‌وجود آورد (این موضوع در مورد تمامی تأسیساتی که دارای فقط یک الکتروود زمین هستند و یا پایین بودن مقاومت سیستم زمین، متکی به الکتروود مورد نظر است، صدق می‌کند) در چنین وضعیتی تکنیک "الکتروود متصل" می‌تواند راه‌گشای حل مشکل باشد.

یکی دیگر از مزایای این روش به خاطر عدم نیاز به جداسازی الکتروود، تسریع و تسهیل در اندازه‌گیری است.

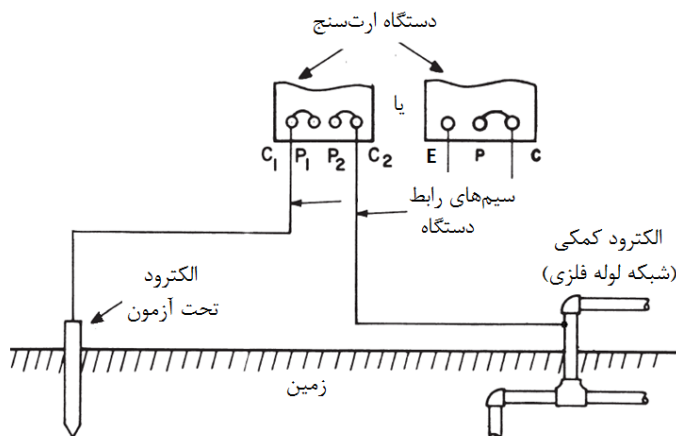
¹¹Attached Rod Technique (ART) or FOP/clamp-on method (IEEE 81- 8.2.2.6)

۸- روش‌های بدون میل

ویژگی مشترک این روش‌ها عدم نیاز به میل کوبی و در نتیجه سرعت و سهولت اندازه‌گیری است، هرچند محدودیت‌های زیادی برای استفاده از آنها وجود دارد و حتماً باید با رعایت شرایط و در موارد خاص استفاده شود.

۸-۱- روش دو نقطه‌ای^{۱۲}

در این روش علاوه بر الکتروود زمین تحت آزمون، یک الکتروود زمین کمکی نیز مورد نیاز است. نتیجه اندازه‌گیری هم حاصل جمع مقاومت هر دو الکتروود فوق می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار اندازه‌گیری شده به عنوان مقاومت الکتروود تحت آزمون منظور می‌گردد در این روش بایستی مقاومت الکتروود کمکی در برابر مقاومت الکتروود تحت آزمون، ناچیز باشد. به عنوان مثال یکی از کاربردهای این روش، اندازه‌گیری مقاومت یک الکتروود زمین با کمک سامانه زمین شبکه توزیع برق است (هادی PEN شبکه توزیع برق). به طور معمول امپدانس سامانه زمین یک شبکه توزیع به دلیل داشتن تعداد زیادی الکتروود زمین، اندک است (از مقاومت تک تک الکتروودها خیلی کمتر است) بنابراین استفاده از این سامانه زمین می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه نماید. مطابق با کاتالوگ سازنده، اتصالات لازم به الکتروود آزمون و الکتروود کمکی انجام و اندازه‌گیری انجام می‌شود. (شکل (۱۱))



شکل (۱۱): اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین به روش دونقطه‌ای

۸-۱-۱- محدودیت‌ها، مزایا و کاربرد

آشکار است که این روش برای اندازه‌گیری سامانه‌های کم مقاومت، می‌تواند در بردارنده خطاهای بزرگی باشد. ضمناً اگر الکتروود تحت آزمون در محدوده الکتروود کمکی قرار گرفته باشد، آنگاه تداخل نواحی مقاومتی دو الکتروود می‌تواند منشأ خطای قابل توجهی گردد. لذا این روش، تنها در مواردی مفید است که کل نیاز ما، انجام آزمونی از نوع رد/ قبول^{۱۳} باشد. عدم نیاز به میل کوبی موجب سرعت و سهولت اجرای این روش می‌گردد.

^{۱۲} Two-point method [IEEE Std 81]

^{۱۳} Go or no go

۸-۱-۲- اعتبارسنجی اندازه‌گیری

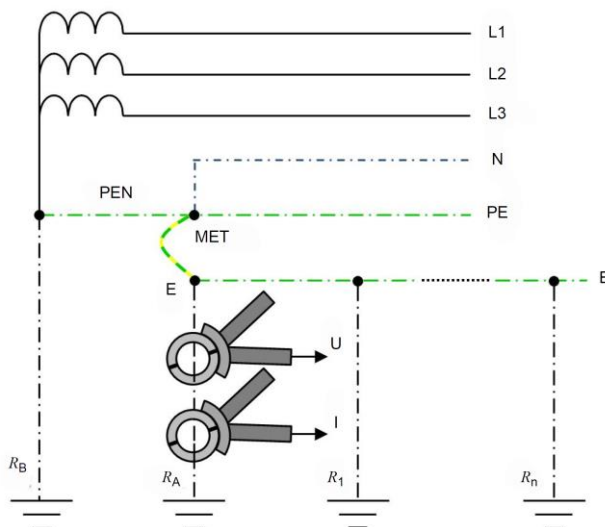
در این روش امکان اعتبارسنجی و اطمینان از صحت نتایج اندازه‌گیری وجود ندارد که از معایب بزرگ این روش است.

۸-۲- روش تزریق جریان کلمپی^{۱۴}

این روش ذاتاً مشابه روش دو نقطه‌ای است و محدودیت‌ها و کاربردهای همان روش را داشته و مانند آن، امکان اعتبارسنجی نتایج آزمون وجود ندارد. اجرای آن نیز شبیه روش دو نقطه‌ای می‌باشد، تنها تفاوت این است که در این روش نیازی به جدا کردن الکتروود تحت آزمون از سامانه زمین نیست. بنابراین علاوه بر سهولت و سرعت بیشتر در اجرای کار، مزایای متصل ماندن الکتروود تحت آزمون به سامانه زمین را نیز داراست.

در این روش از دستگاه‌های ارت‌سنج مخصوصی استفاده می‌شود که معمولاً دو کلمپ دارند و این دو کلمپ توسط دو سیم رابط به دستگاه وصل می‌شوند. روش اندازه‌گیری به این شکل است که این دو کلمپ به فاصله مشخصی از هم که در کاتالوگ دستگاه ذکر شده (معمولاً حدود ۳۰ سانتی‌متر) به مانند شکل (۱۲) روی هادی اتصال زمین مورد نظر، حلقه می‌شوند. ولتاژ معینی توسط کلمپ اول در هادی اتصال زمین القاء شده و سپس جریان جاری شده در مدار توسط کلمپ دوم اندازه‌گیری می‌شود. آنگاه مقاومت کل مدار توسط دستگاه محاسبه شده و روی نمایشگر نشان داده می‌شود. مقدار این مقاومت برابر با مقاومت R_A سری با موازی شده سایر مقاومت‌ها است که برای کاهش خطا باید معادل موازی این مقاومت‌ها خیلی از R_A کوچک‌تر باشد (مانند روش دو نقطه‌ای). ضمن اینکه خطای این روش به علت ویژگی‌های دستگاه خصوصاً فرکانس بالای اندازه‌گیری (معمولاً بین ۱KHz تا 3.4KHz) بیشتر از روش دو نقطه‌ای است.

توضیح: در برخی از دستگاه‌های ارت‌سنج مخصوص این روش، دو کلمپ به صورت واحد درآمده و در یک کلمپ جاسازی شده‌اند. این کلمپ هر دو وظیفه القاء و ولتاژ و اندازه‌گیری جریان را انجام می‌دهد.



شکل (۱۲): اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین به روش تزریق جریان کلمپی

¹⁴ clamp-on or stakeless method [IEC 60364-6, IEEE Std 81]

۸-۳-روش سه نقطه‌ای^{۱۵}

اجرای این روش اندازه‌گیری، نیازمند دسترسی همزمان به دو الکتروود کمکی است. در این روش مقاومت الکتروود تحت آزمون و الکتروودهای کمکی با استفاده از روش دونقطه‌ای یا روش تزریق جریان کلمپی، به صورت دو به دو اندازه‌گیری شده و نتایج ثبت می‌گردد. اگر مقاومت الکتروود تحت آزمون را R_1 و الکتروودهای کمکی را به ترتیب R_2 و R_3 بنامیم آنگاه با اندازه‌گیری مقاومت‌های هر جفت از الکتروودها مقادیر R_{12} ، R_{13} و R_{23} به‌دست می‌آید:

$$R_{12} = R_1 + R_2, \quad R_{13} = R_1 + R_3, \quad R_{23} = R_2 + R_3$$

با قراردادن مقادیر حاصل از اندازه‌گیری در رابطه زیر مقدار مقاومت الکتروود تحت آزمون R_1 به‌دست می‌آید:

$$R_1 = \frac{(R_{12}) + (R_{13}) - (R_{23})}{2}$$

مقدار مقاومت‌های R_2 و R_3 نیز به طور مشابه قابل محاسبه است:

$$R_2 = \frac{(R_{12}) + (R_{23}) - (R_{13})}{2}$$

$$R_3 = \frac{(R_{13}) + (R_{23}) - (R_{12})}{2}$$

توجه شود که نباید مقدار مقاومت‌های R_2 و R_3 در حد قابل توجهی بزرگ‌تر از R_1 باشند. در غیر این صورت خطای قابل‌ملاحظه‌ای در اندازه‌گیری رخ می‌دهد.

از طرف دیگر این سه الکتروود بایستی فاصله کافی از یکدیگر داشته باشند^{۱۶} (خارج از حوزه مقاومتی یکدیگر باشند)، در غیر این صورت مقدار بعضی مقاومت‌ها صفر یا منفی به‌دست می‌آید.

این ضرورت‌ها نشان می‌دهد که این روش برای اندازه‌گیری مقاومت‌های زمین کوچک، مناسب نیست زیرا یافتن یا ایجاد الکتروودهای کمکی با مقاومت کم امکان‌پذیر نیست و با توجه به اینکه معمولاً الکتروودهای با مقاومت کم، حوزه مقاومتی وسیعی دارند، حتی در صورت وجود، به‌علت تداخل حوزه آنها قابل استفاده نیستند.

روش سه نقطه‌ای به‌دلیل مقایسه نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتروود تحت آزمون با دو الکتروود کمکی، مطمئن‌تر از روش‌های دو نقطه‌ای و تزریق جریان کلمپی است.

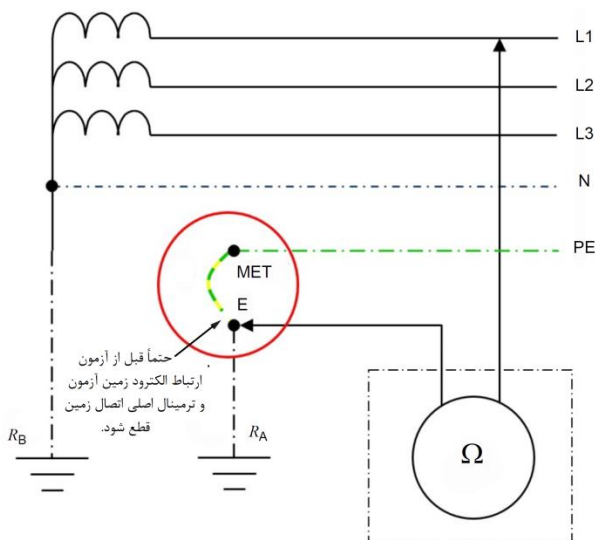
^{۱۵} Three-point method [IEEE Std 81]

^{۱۶} در مورد الکتروودهای میله‌ای، این فاصله حداقل ۳ برابر عمق الکتروودهاست.

۹- روش امیدانس حلقه^{۱۷}

در این روش مطابق با استاندارد IEC60364-6:2016 اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین باید با استفاده از دستگاه آزمون امیدانس حلقه انجام شود. مراحل انجام این آزمون به شرح زیر است:

- (۱) ابتدا توصیه می‌شود به کمک قطع کلیدهای مینیاتوری یا کلیدهای کمپکت تابلوهای اصلی، تأسیسات داخلی به‌طور کامل بی‌برق شود.
- (۲) ارتباط الکتریکی بین الکتروود زمین آزمون و شینه اصلی اتصال زمین (MET) به‌طور موقت قطع شود.
- (۳) دستگاه آزمون امیدانس حلقه، بین یک هادی برق‌دار در تابلو اصلی و الکتروود زمین آزمون متصل گردد.
- (۴) نحوه سیم‌بندی آزمون مطابق شکل (۱۳) و با در نظر گرفتن توصیه‌های سازنده دستگاه انجام شود.
- (۵) در این روش، امیدانس یک حلقه شامل امیدانس هادی فاز، سیم‌پیچ ترانسفورماتور و مقاومت معادل نوترال شبکه (شامل مقاومت موازی شده اتصال زمین‌های مکرر در شبکه توزیع و اتصال زمین نقطه خنثی ترانسفورماتور) به صورت سری با مقاومت الکتروود زمین آزمون، اندازه‌گیری می‌شود. با فرض کوچک بودن مقاومتهای سری با الکتروود زمین آزمون، مقدار قرائت شده توسط دستگاه با تقریب قابل قبولی نشان دهنده مقاومت الکتروود زمین خواهد بود.
- (۶) به این نکته مهم توجه شود که بعد از پایان تست و قبل از برق‌دار کردن تأسیسات داخلی، اتصال الکتروود زمین به شینه اصلی اتصال زمین (MET) مجدداً برقرار گردد.



شکل (۱۳): اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین با استفاده از دستگاه آزمون امیدانس حلقه

¹⁷ Measurement of earth electrode resistance using a fault loop impedance test instrument [IEC 60364-6]

۱۰- انتخاب روش اندازه‌گیری

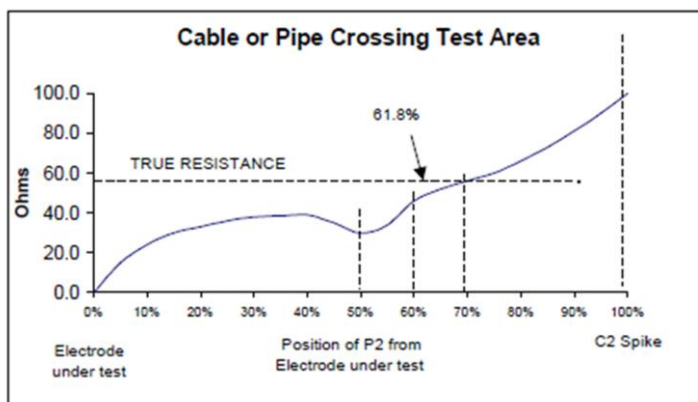
روش‌های افت پتانسیل کلاسیک و ۶۲٪ را می‌توان برای اندازه‌گیری هر نوع الکتروود زمین به کار برد. در صورتی که به دلیل گستردگی حوزه مقاومتی یک الکتروود و محدودیت فضای میل کوبی نتوان نمودار بدون شیب (یا با شیب اندک) به دست آورد، می‌توان از روش شیب استفاده کرد و در صورتی که روش شیب نیز قابل اجرا نباشد، می‌توان یکی از روش‌های سه نقطه‌ای، آزمون امپدانس حلقه، دو نقطه‌ای یا تزریق جریان کلمپی را با رعایت شرایط هر روش استفاده نمود.

۱۱- عوامل ایجاد خطا در اندازه‌گیری

عوامل متعددی ممکن است باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین شوند که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. این عوامل عبارتند از:

۱۱-۱- اجرام فلزی مدفون در خاک

اجرام فلزی مدفون در خاک که در راستای میل کوبی اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند، می‌توانند خطای قابل توجهی در نتایج اندازه‌گیری به بار آورند. همان‌طور که در شکل زیر دیده می‌شود مقدار مقاومت واقعی با مقادیر خوانده شده در روش ۵۰٪ و ۶۲٪ تفاوت زیادی دارد.



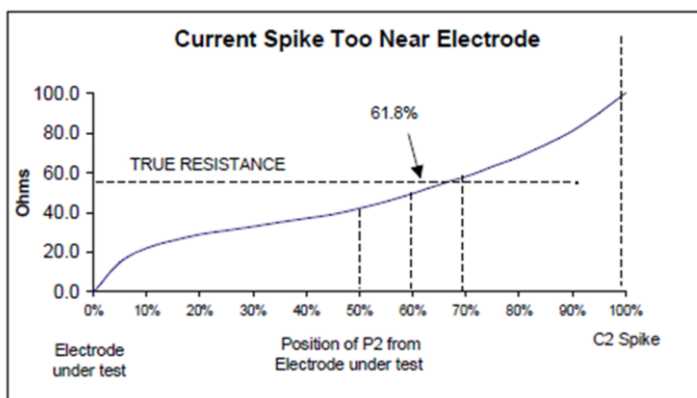
شکل (۱۴): ایجاد خطای اندازه‌گیری ناشی از اثر فلزات مدفون در خاک

۱۱-۲- جریان‌های سرگردان

جریان‌های سرگردان در خاک می‌توانند ناشی از منابع مختلف AC یا DC باشند (مانند حفاظت کاتدیک، شبکه تغذیه ناوگان قطار برقی، نشت مقره و برق‌گیرهای خطوط انتقال، جریان‌های نامتعادل شبکه سه فاز در هادی خنثی). هر نوع جریان سرگردان در خاک ممکن است با جریان تزریق شده از دستگاه ارت سنج تداخل نماید و این تداخل می‌تواند باعث ایجاد خطا در نتیجه اندازه‌گیری شود.

۱۱-۳- نزدیکی بیش از حد میل جریان به الکتروود زمین آزمون

عدم رعایت فاصله مناسب برای میل جریان باعث می‌شود ناحیه تخت در منحنی مقاومت تشکیل نشده و همان‌طور که در شکل زیر دیده می‌شود در این حالت مقدار مقاومت واقعی با مقادیر خوانده شده در روش ۵۰٪ و ۶۲٪ تفاوت زیادی خواهد داشت.



شکل (۱۴): ایجاد خطای اندازه‌گیری ناشی از اثر فلزات مدفون در خاک

۱۱-۴- سایر خطاها

- خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری
- خطاهای اپراتوری
- به‌کارگیری دستگاه یا روش اندازه‌گیری نامناسب

۱۲- استفاده از کاهش‌دهنده‌های موقت

در هر جا که به دلیل بزرگی مقاومت ویژه خاک و محدودیت ابعاد زمین ساختمان و با وجود همه تمهیدات از جمله استفاده از بنتونیت و سایر کاهش‌دهنده‌های دائمی، نتوان مقاومت الکتروودهای زمین را در حد مطلوب کاهش داد، استفاده از کاهش‌دهنده‌های موقت مختلف از جمله آبیاری منظم با آب و یا تزریق مواد شیمیایی به خاک با رعایت موارد زیر مجاز است:

- برنامه مشخصی که شامل همه جزئیات و اطلاعات اجرایی لازم، مانند دوره‌های آبیاری، نوع و مقدار مواد شیمیایی و ... باشد، در دسترس بهره‌برداران قرار گیرد.
- استفاده از کاهش‌دهنده‌ها به‌نحوی طرح شده باشد که برای ساختمان و تأسیسات آن زیان‌آور نباشد.
- تمهیدات اجرایی لازم برای استفاده از کاهش‌دهنده‌ها (مانند اجرای لوله آبیاری در نزدیکی الکتروودهای زمین) پیش‌بینی شده باشد.

۱۳- گزارش اندازه‌گیری

یک گزارش اندازه‌گیری بایستی شامل موارد زیر باشد :

- (۱) نام و نام خانوادگی شخص اندازه‌گیرنده
- (۲) تاریخ اندازه‌گیری
- (۳) مشخصات دستگاه اندازه‌گیری
- (۴) آدرس ساختمان و جانمایی الکتروودها
- (۵) شرایط محیطی (خاک و هوا)
- (۶) روش آزمون انتخابی
- (۷) مشخصات و آرایش الکتروودها
- (۸) نوع اتصالات
- (۹) کاربری ساختمان و الکتروود
- (۱۰) جداول
- (۱۱) نمودار نتایج اندازه‌گیری (بسته به روش اندازه‌گیری)
- (۱۲) نتیجه نهایی اندازه‌گیری

۱۴- اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک

۱۴-۱- روش تک راد^{۱۸}

در این روش به مانند شکل (۱۴) یک الکتروود میله‌ای (Rod) تا عمق معینی در زمین کوبیده شده و مقاومت آن به یکی از روش‌های مناسب و مورد تأیید این دستورالعمل اندازه‌گیری می‌شود. سپس الکتروود مورد نظر را تا عمق بیشتری در خاک کوبیده و مجدداً اندازه‌گیری انجام می‌شود. این کار برای همه عمق‌های لازم (معمولاً ۵ تا ۱۰ عمق مختلف) تکرار شده و در هر عمق با جایگذاری مقاومت اندازه‌گیری شده در رابطه زیر، مقدار مقاومت ویژه متوسط برای عمق‌های مختلف محاسبه می‌شود:

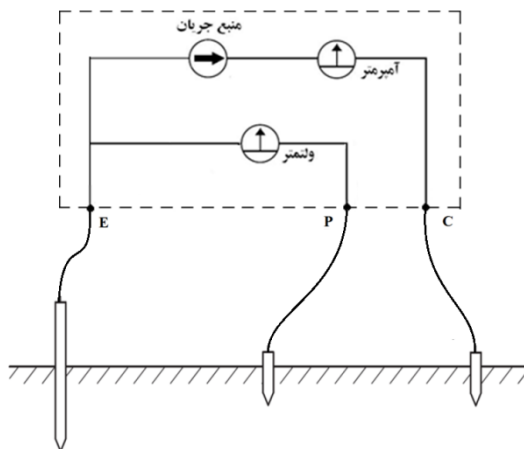
$$\rho = \frac{2\pi R_r L}{\left[\log_e \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right]}$$

پارامترهای این رابطه عبارتند از:

- | | |
|--------|---|
| R_r | مقاومت الکتروود میله‌ای خوانده شده توسط ارت‌سنج بر حسب اهم (Ω) |
| L | طول کوبیده شده الکتروود میله‌ای در زمین بر حسب متر (m) |
| d | قطر الکتروود میله‌ای بر حسب متر (m) |
| ρ | مقاومت ویژه خاک بر حسب اهم-متر (Ωm) |

¹⁸ Soil resistivity – One-rod test method [BS 7430]

مقاومت‌های به دست آمده، ساختار الکتریکی خاک را نشان می‌دهد. این روش به دلیل مشکلات اجرایی از جمله دشواری کوبیدن الکتروود در عمق‌های زیاد، به ندرت به کار برده می‌شود.



شکل (۱۴): اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک به روش تک راد

۱۴-۲- روش چهار نقطه^{۱۹}

در این روش چهار عدد میل در امتداد یک خط راست در زمین کوبیده می‌شود که همگی با فاصله معین از یکدیگر قرار گرفته‌اند. یک جریان آزمون I از دستگاه به خاک، بین دو میل بیرونی (میل‌های جریان) گذرانده می‌شود و ولتاژ بین دو میل درونی (میل‌های ولتاژ) به کمک یک ولت‌متر دارای امپدانس درونی بالا، اندازه‌گیری می‌شود. سپس از روی نسبت V/I مقدار R توسط دستگاه نشان داده می‌شود. اغلب دو سبک مختلف از روش چهار نقطه به کار می‌رود که عبارتند از:

الف) روش ورنر یا فاصله‌گذاری مساوی

ب) روش اسلومبرگر-پالمر^{۲۰} یا فاصله‌گذاری نامساوی

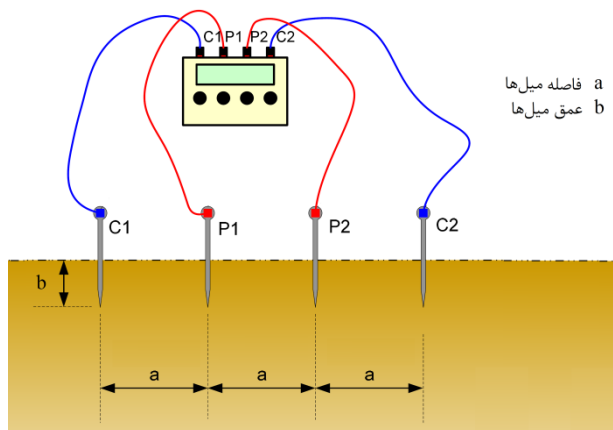
۱۴-۲-۱- روش ورنر^{۲۱}

در این روش هر چهار میل اندازه‌گیری در امتداد یک خط راست، با فاصله مساوی a از یکدیگر و در عمق b کوبیده می‌شوند و به شکل زیر به ترمینال‌های یک دستگاه ارت‌سنج چهارسیمه وصل می‌شود.

¹⁹ Soil resistivity – Fourpoint method [IEEE Std 81, BS 7430]

²⁰ Schlumberger – Palmer method [IEEE Std 81]

²¹ Soil resistivity – Wenner method [IEEE Std 81, BS 7430]



شکل (۱۵): اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک به روش ورنر

پس از اتصال سیم‌های رابط مقاومت R از دستگاه ارت‌سنج خوانده شده و از رابطه زیر مقاومت ویژه خاک ρ^{22} متناسب با واحد انتخاب شده برای طول‌های a و b به‌دست می‌آید:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

از نظر تئوری، الکتروودها باید دارای تماس نقطه‌ای با خاک بوده و یا از نیم‌کره‌هایی با شعاع b ساخته شوند. ولی در عمل چهار عدد میل به کار برده می‌شود که برای جلوگیری از بروز خطا بایستی عمق کوبیدن میل‌ها (b) از ۱۰٪ فاصله آنها (a) بیشتر نشود. در این صورت می‌توان در رابطه فوق از b در برابر a چشم‌پوشی نمود و از رابطه ساده شده زیر استفاده کرد:

$$\rho = 2\pi a R$$

در این رابطه ρ ، مقاومت ویژه متوسط خاک از سطح تا عمق a می‌باشد.

مهم‌ترین مزیت روش ورنر این است که به آسانی با افزایش فاصله بین میل‌ها در سطح زمین می‌توان مقاومت ویژه متوسط خاک را تا عمق‌های زیاد به‌دست آورد. (عمق خاک $\equiv a$)

۱۴-۲-۲- روش اشلوم‌برگر

روش ورنر با توجه به کارآمدی آن و با در نظر گرفتن اینکه اغلب دستگاه‌های ارت‌سنج موجود فقط همین روش را پشتیبانی می‌کنند، در بیشتر موارد توصیه می‌شود، به همین دلیل در این دستورالعمل فقط روش ورنر توضیح داده شده است. گرچه در صورت ضرورت می‌توان با استفاده از دستگاه مناسب از روش‌های دیگر مانند اشلوم‌برگر یا اشلوم‌برگر-پالمر نیز استفاده نمود. برای آشنایی با جزئیات این روش‌ها می‌توان به مرجع [۲] مراجعه نمود.

²²Apparent resistivity

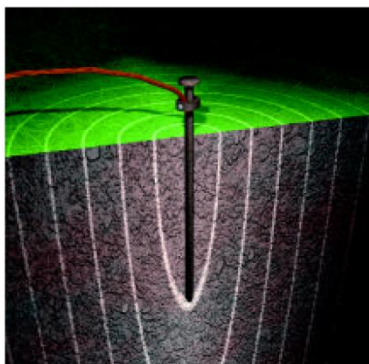
۱۵- پیوست ۱ (الزامی)^{۲۳}: مشخصات استاندارد دستگاه اندازه‌گیری

در ویرایش بعدی تکمیل می‌شود.

۱۶- پیوست ۲ (اطلاعی)^{۲۴}: مفاهیم پایه اتصال زمین

۱۶-۱- شرح حوزه مقاومتی و مفهوم مقاومت سیستم زمین

هرگاه الکتروودی که در داخل زمین قرار گرفته به ولتاژی متصل شده و حاملی جریانی شود حول آن پوسته‌های فرضی هم‌پتانسیلی به مانند شکل (۱۶) تشکیل می‌شود.^{۲۵} براساس قانون عکس مجذور فاصله در الکترومغناطیس انتظار داریم پتانسیل هر پوسته با دور شدن از الکتروود به سرعت کاهش یابد. نهایتاً اگر فاصله کافی از الکتروود گرفته شود عملاً دیگر پتانسیل پوسته‌ها به صفر می‌رسد. این منطقه که دیگر اثر وجود پتانسیل یا جریان در الکتروود در آن احساس نمی‌شود را منطقه هم‌پتانسیل^{۲۶} و ماقبل آن که تأثیر الکتروود محسوس است را منطقه مقاومتی^{۲۷} گویند.



شکل (۱۶): پوسته‌های هم‌پتانسیل اطراف یک الکتروود حامل جریان

آنچه مقاومت الکتروود زمین نامیده می‌شود در واقع مقاومت بین الکتروود و نقطه‌ای در منطقه هم‌پتانسیل است. مقاومتی که در این حالت اندازه‌گیری می‌شود در واقع برابر است با حاصل جمع مقاومت تعدادی پوسته حول الکتروود که با هم سری شده‌اند. واضح است که سطح هر پوسته نسبت به پوسته ما قبل افزایش می‌یابد و از آنجا که مقاومت با سطح نسبت معکوس دارد رفته رفته به پوسته‌هایی می‌رسیم که نقش زیادی در مقاومت کل ندارند. به بیان دیگر پوسته‌های نزدیک‌تر به الکتروود، سطح کمتری داشته و در نتیجه مقاومتشان بیشتر است. و هرچه از الکتروود دور شویم سطح پوسته‌ها بیشتر و مقاومتشان کمتر می‌شود. نهایتاً اگر فاصله کافی را تا الکتروود در نظر بگیریم به جایی می‌رسیم که لایه‌ها آنچنان تغییر قابل توجهی در مقاومت نمی‌دهند. در این حالت مقدار نهایی مقاومت الکتروود حاصل شده و این همان مقداری است که

²³ Normative

²⁴ Informative

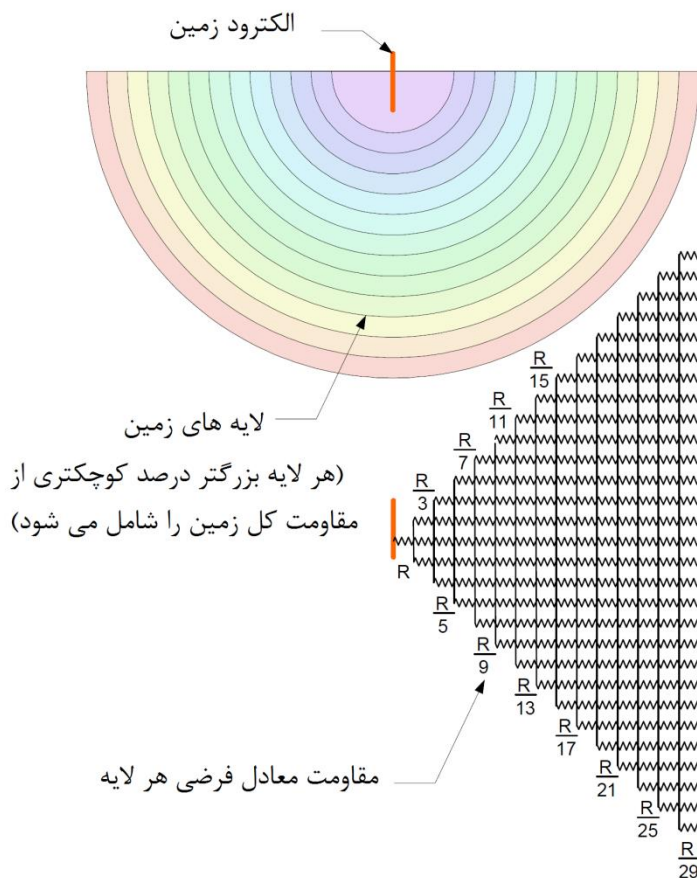
²⁵ به این معنی که پتانسیل همه نقاطی که روی پوسته مورد نظر واقعند یکسان است.

²⁶ Equipotential Zone

²⁷ Resistive Zone

باید اندازه‌گیری شود. شکل (۱۷) یک پوسته‌های هم‌پتانسیل یک الکتروود زمین و مقاومت معادل این پوسته‌ها را نشان داده است.

اندازه‌گیری مقاومت زمین در مقایسه با سایر اندازه‌گیری‌های الکتریکی از این لحاظ متفاوت است که اندازه‌گیری روی یک نقطه نیست بلکه در یک حجم انجام می‌شود. در مجموع مقاومت خاک اطراف الکترود بیشترین سهم را در مقاومت آن دارد و جنس الکترود در این مسئله نقش محسوسی ندارد.^{۲۸}



شکل (۱۷): مدار معادل پیوسته‌های هم‌پتانسیل طرف یک الکترو

^{۲۸} البته جنس الکتروود و پوشش آن از حیث عمر می تواند بسیار مهم باشد.

۱۶-۲- واژه نامه

clamp-on device	ارت‌سنج مجهز به کلمپ	main earthing electrode	الکتروود اصلی آزمون
Probe	پراب (آزمون)	subject electrode	الکتروود تحت آزمون
main earthing bar	شینه اصلی اتصال زمین	auxiliary electrode	الکتروود زمین کمکی
protective conductor	هادی حفاظتی	single earthing electrode	الکتروود زمین منفرد
earthing conductor	هادی اتصال به زمین	large earthing electrode	الکتروود زمین گسترده
earthing electrode	الکتروود زمین	resistance area or resistance zone	ناحیه مقاومتی
Earthing	اتصال زمین	voltage gradient	گرادیان ولتاژ
rod electrode	الکتروود میله‌ای	transferred voltage	ولتاژ انتقالی
plate electrode	الکتروود صفحه‌ای	current spike	میل جریان
spikes touch resistance	مقاومت تماسی میل‌ها	potential spike	میل ولتاژ
		earth tester	ارت‌سنج

۱۷- مراجع

[۱] راهنمای طرح و اجرای تأسیسات برقی ساختمان‌ها، دفتر نشر مقررات ملی ساختمان، آدیک موسسیان-ویرایش ۸۲

[2] IEEE Std 81:2012, IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system.

[3] BS 7430:2011+A1:2015, Code of practice for protective earthing of electrical installations.

مجموعه دستور العمل‌های گروه تخصصی برق شورای مرکزی (دوره ششم):

جلد اول: دستور العمل طرح و اجرای همبندی اصلی در ساختمان‌ها

جلد دوم: دستور العمل طرح و اجرای همبندی اضافی در ساختمان‌ها

جلد سوم: دستور العمل اجرای سیستم زمین در ساختمان‌ها

جلد چهارم: دستور العمل اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین و مقاومت ویژه خاک

جلد پنجم: دستور العمل سیستم‌های اتوماسیون و کنترل ساختمان

جلد ششم: دستور العمل ضوابط طراحی و اجرای سیستم‌های اعلام حریق

جلد هفتم: دستور العمل حفاظت ساختمان‌ها در برابر صاعقه