سازمان نظام مهندسی ساختمان
(شورای مرکزی)

دستورالعمل اندازه‌گیری مقاومت الکترود 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 الکترود 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 الکترود زمین (Earth Resistance) ۵

۳-۲-مقاومت ویژه خاک (Soil (earth) Resistivity) ۶

۳-۳-الکترود زمین (Earth Electrode) ۶

۳-۴-مقاومت متقابل الکترودهای 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-الکترود 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 الکترودهای 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 $90^{o}/180^{o}$ ۱۵
۷-۵-تکنیک چیدمان مثلثی ۱۷
۷-۶-تکنیک الکترودِ 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 الکترود 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 ونر 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[1]

این دستورالعمل در راستای اجرای مواد ۱۳-۲-۵ و پ۱-۹-۴ مبحث سیزدهم و اجرایی نمودن بند ۲۲-۷-۸ مبحث بیست‌و دوم مقررات ملی ساختمان، به منظور اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی الکترودهای زمین و مقاومت ویژه خاک در کلیه ساختمان‌های تحت پوشش مقرارت ملی ساختمان تهیه شده است.

۲– مراجع الزامی[2]

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 الکترود زمین (Earth[3] Resistance)

امپدانس الکترود زمین عبارت است از امپدانس مابین یک الکترود، 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 به‌جای امپدانس زمین استفاده می‌شود.

در اصل مقاومت الکترود زمین، مقاومت آن الکترود نسبت به جرم کلی زمین[4] است.

---

[1] Scope

[2] Normative References

[3] 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.

[4] General 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- الکترود زمین (Earth Electrode)

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

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

تغییرات ولتاژ در یک الکترود که به‌دلیل تغییرات جریان درالکترود دیگر به‌وجود می‌آید و با واحد اهم بیان می‌شود.

۳-۵-زمین دور (Remote Earth)

یک مفهوم تئوری است که به یک الکترود 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 الکترود 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 الکترود 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 به‌منظور زمین کردن فراهم می‌کند.

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

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

۳-۹- پتانسیل زمین (Earth Potential)

پتانسیل الکتریکی زمین اطراف یک الکترود نسبت به جرم کلی زمین است که هنگام عبور جریان از الکترود 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 الکترود 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 الکترودهای زمین باید نسبت به سنجش ولتاژهای سرگردان برروی سیستم زمین و قابل قبول بودن آن، اطمینان حاصل نمود.

۸- پیش از جداکردن یک الکترود از سیستم زمین بایستی از عدم وجود جریان‌های بزرگ در آن اطمینان حاصل نمود.

۹- نباید تمامی الکترودهای زمین یک سیستم را یک‌جا قطع نمود، مگرآنکه تأسیسات مربوطه از قبل به طور کامل بی‌برق شده باشد.

۵–کلیات

۵–۱– لزوم اندازه‌گیری

بر اساس ماده ۱۳-۲-۵ "تاسیسات الکتریکی را باید قبل از شروع بهره‌برداری و یا پس از هر تغییر عمده در آن، آزمود تا نسبت به صحت کارهای انجام شده طبق این مقررات اطمینان حاصل شود". همچنین براساس بند پ۱-۹-۴ مبحث سیزدهم مقررات ملی ساختمان "در پایان کار احداث هر الکترود زمین و از آن پس به صورت دوره‌ای باید مقاومت آن را نسبت به جرم کلی زمین به کمک دستگاه‌های قابل‌قبول 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 الکترودهای جدید اقدام نمود".

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

۵–۲– فرد کارآزموده

فرد کارآزموده 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 فراگرفته 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 برآن 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

به‌دلیل ارتباط مقدار مقاومت الکترودهای زمین به شرایط محیطی (مانند دما و رطوبت خاک) اندازه‌گیری یک الکترود معین در زمان‌های مختلف، نتایج متفاوتی را به‌دست 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 به‌دلایل موجه نتوان از این روش‌ها استفاده کرد، می‌توان از روش‌های دیگری که در استانداردهای مندرج در پیوست ۶ مبحث سیزدهم مقررات ملی ساختمان ذکر شده، با رعایت کاربرد، دقت، اولویت‌ها و سایر عوامل مؤثر استفاده نمود.

۵–۶–قابلیت استناد نتایج اندازه‌گیری

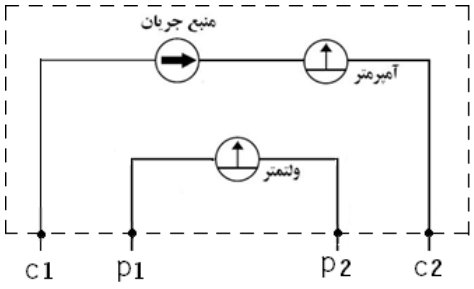
نتایج اندازه‌گیری مقدار مقاومت سیستم زمین به شرطی ارزشمند بوده و از نظر مطابقت با مقررات ملی و حصول ایمنی در ساختمان قابل استناد است که اندازه‌گیری در بدترین شرایط تست انجام شده باشد.

۵–۷–دقت اندازه‌گیری

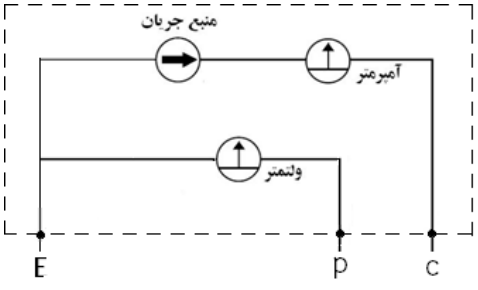
اندازه‌گیری مقدار مقاومت سیستم زمین کار آسانی محسوب نشده و در عمل پارامترهای مختلفی اندازه‌گیری را با خطا مواجه می‌کند. بر اساس استاندارد BS-7430 رسیدن به دقت ٪۲ قابل قبول بوده ولی با این حال در اغلب موارد دقت ٪۵ هم قابل قبول در نظر گرفته می‌شود.

۵-۸-دستگاه اندازه‌گیری مقاومت اتصال زمین (ارت سنج)[5]

این دستگاه از یک منبع جریان متناوب، یک دستگاه آمپرمتر، یک دستگاه ولت‌متر 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 P, E و C نام‌گذاری می‌گردند. به دستگاه‌هایی که دارای چهار ترمینال خروجی هستند، "چهار سیمه" (شکل ۱) و به دستگاه‌های دارای سه ترمینال خروجی، " سه‌سیمه" (شکل ۲) گفته می‌شود.



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



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

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

۶-انواع روش‌های اندازه‌گیری مقاومت الکترودهای زمین

مقاومت هر نوع الکترود 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 ٪۶۲
۳- روش شیب
۴- آزمون ۹۰° /۱۸۰°
۵- تکنیک چیدمان مثلثی
۶- تکنیک الکترود متصل

[5]Earth tester

ب– روش‌های بدون میل

۱- روش دونقطه (ارت مرده)

۲- روش تزریق جریان (کلمپی)

۳- روش سه‌نقطه

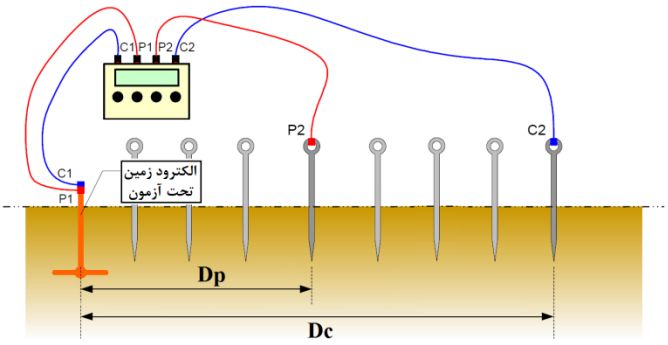
ج– روش امپدانس حلقه

۷–روش‌های افت پتانسیل

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

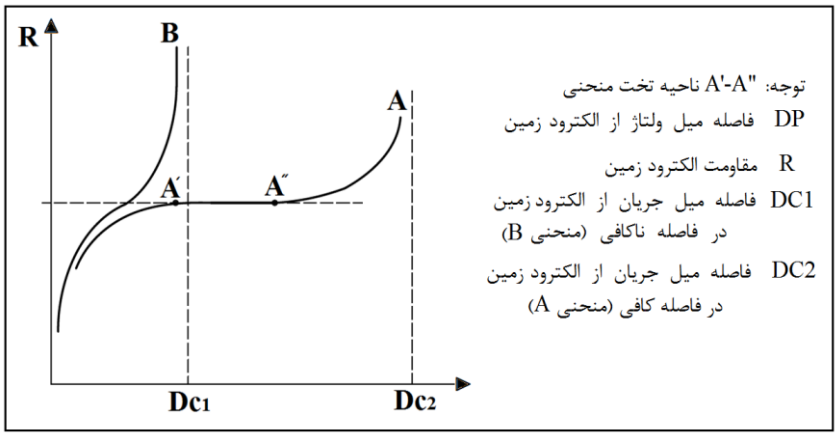
۷–۱– روش افت پتانسیل کلاسیک[۶]

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 الکترود اصلی کوبیده می‌شود به گونه‌ای که این دو خارج از حوزه مقاومتی هم قرار گیرند (فاصله **Dc**). میل نزدیک‌تر یعنی میل ولتاژ در فاصله **Dp** نزدیک به الکترود اصلی (مثلا پنج درصد **Dc**) کوبیده شده و مقاومت نشان داده شده توسط دستگاه یادداشت می‌شود. سپس میل ولتاژ در نقاط متعدد با فواصل مساوی (مثلا 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 الکترود جریان با الکترود 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 الکترود اصلی می‌باشد. در شرایطی که فاصله **Dc** کمتر از مقدار مناسب باشد، نمودار مانند منحنی **B** در شکل (۴) بوده و در این‌صورت اندازه‌گیری معتبر نیست. در چنین حالتی باید با افزایش فاصله میل جریان از الکترود اصلی، تمامی مراحل اندازه‌گیری را تکرار نمود تا منحنی مناسب حاصل شود.



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

[6]Fall 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 الکترود زمین تداخل نداشته باشد. توصیه می‌شود این فاصله از ۵ برابر بزرگترین بعد الکترود زمین کوچک‌تر نباشد.

۲) توصیه می‌شود الکترود 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 الکترود 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 محدویت‌هایی در کوبیدن میل ولتاژ در چیدمان خطی میل‌ها به وجود آید، توصیه می‌شود از روش تست ۹۰°/۱۸۰° 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 الکترود 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).

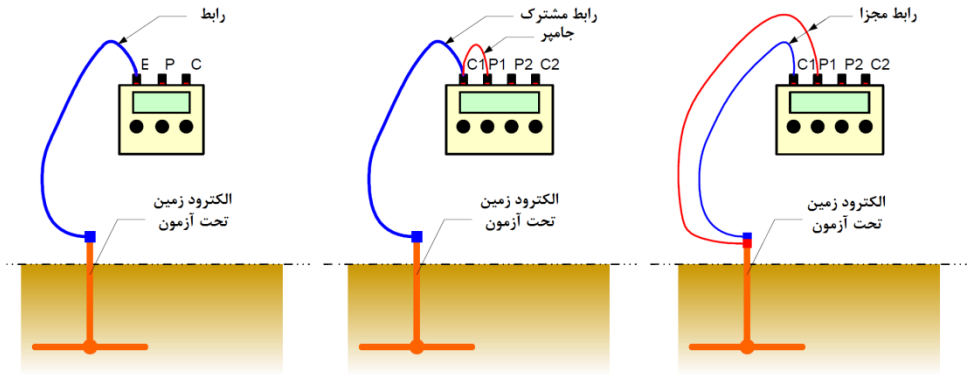
۷-۱-۲- نحوه اتصال دستگاه ارت‌سنج

اتصال دستگاه به میل‌های ولتاژ و جریان و الکترود اصلی به دو شکل امکان‌پذیر است:

الف- روش چهارسیمه: در این روش ترمینال‌های P1 و C1 با دو سیم مجزا به الکترود 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 الکترود 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 الکترود اصلی در مقدار مقاومت اندازه‌گیری، وارد شده و زمانی که مقاومت الکترود اصلی، کوچک باشد ممکن است ایجاد خطا کند. بنابراین می‌توان گفت در روش اندازه‌گیری سه‌سیمه، بهتر است دستگاه ارت‌سنج در نزدیکی الکترود زمین قرار گیرد. تفاوت اتصالات این روش‌ها در شکل زیر آمده است.



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

۷-۱-۳- اعتبارسنجی اندازه‌گیری

درصورتی 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 الکترود زمین مورد آزمایش منظور خواهد شد. درصورت 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 این‌صورت 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 برمبنای روش پایه افت پتانسیل هستند، استفاده می‌شود.

۷-۲- روش افت پتانسیل - ٪۶۲[7]

این روش اندازه‌گیری، مبتنی بر این قاعده است که در روش افت پتانسیل، مقدار واقعی مقاومت الکترود زمین تحت آزمون هنگامی به‌دست می‌آید که فاصله میل ولتاژ تا الکترود زمین برابر با ٪۶۱/۸ (تقریباً ۶۲ درصد) فاصله میل جریان تا الکترود زمین باشد. البته کماکان صحت این روش منوط بر مناسب بودن فاصله بین میل جریان و الکترود تحت آزمون است. برای اجرای این روش مراحل زیر باید انجام شوند:

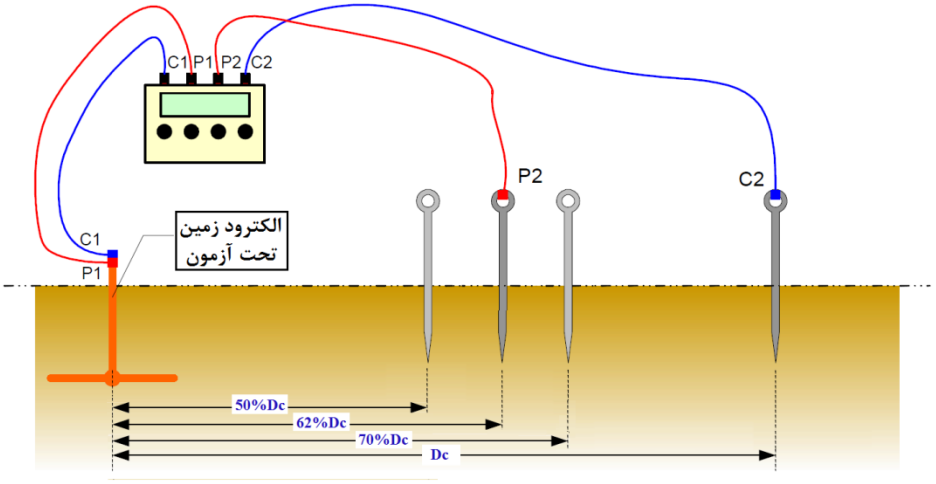
۱) الکترود زمین تحت آزمون اندازه‌گیری از مابقی سیستم به طور کامل جدا و ایزوله شود.

۲) میل جریان دستگاه آزمون در فاصله مناسبی از الکترود زمین کوبیده شود.

۳) میل ولتاژ در فاصله‌ای برابر با ٪۶۲ فاصله بین الکترود زمین و میل جریان نسبت اکترود 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 الکترود 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 الکترود زمین به روش افت پتانسیل ٪۶۲

تذکر۱- کلیه مندرجات نکات اجرایی روش افت پتانسیل کلاسیک (بخش ۷-۱) باید در روش ٪۶۲ نیز مورد توجه قرار گیرد.

تذکر۲- فاصله پیشنهادی مناسب، بین میل جریان و یک الکترود زمین منفرد حدود ۵۰ متر است. این فاصله، بین میل جریان و مرکز یک الکترود زمین گسترده از جدول (۱) به‌دست می‌آید.

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

جدول (۱): فاصله پیشنهادی مناسب برای میل جریان در روش ٪۶۲
برای الکترودهای گسترده با ابعاد مختلف بر حسب متر براساس توصیه استاندارد BS 7430

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

* منظور از حداکثر بعد الکترود زمین، فاصله بین دورترین نقاط آن الکترود 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 ٪۶۲ بوده و تنها تفاوت در انتخاب فاصله میل ولتاژ از مرکز الکتریکی سیستم زمین بوده که به جای ٪۶۲، 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 الکترود 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 الکترود منظور می‌گردد.

۷-۳-روش افت پتانسیل – شیب[8]

این روش زمانی به‌کار می‌رود که:

۱) **امکان ایجاد فاصله کافی بین الکترود اصلی و میل جریان فراهم نبوده و قسمت تخت منحنی قابل دستیابی نیست.**
۲) **مرکز الکتریکی مؤثر سیستم زمین، قابل تشخیص نیست.**
۳) **الکترود 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 محدویت‌های عملیاتی) از الکترود زمین مستقر شود (این فاصله با D_C نمایش داده می‌شود).**
۲) **میل ولتاژ در سه نقطه مختلف در فواصل $0.2D_C$، $0.4D_C$ و $0.6D_C$ کوبیده شده و به ترتیب مقاومت‌های R_1، R_2 و R_3خوانده می‌شود. (شبیه به شکل (۶) ولی با فواصل فوق)**
۳) **این مقادیر در فرمول زیر قرار گرفته و مقدار μ به‌دست می‌آید:**

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1}$$

۴) **با قراردادن مقدار μ در جدول (۲)، نسبت D_P/D_C به دست می‌آید. که D_P فاصلهٔ میل ولتاژ تا الکترود زمین است.**
۵) **با داشتن نسبت D_P/D_C و دانستن D_C مقدار D_P بدست می‌آید.**
۶) **با کوبیدن میل ولتاژ در نقطه D_P مقاومت الکترود زمین اندازه‌گیری و به‌عنوان نتیجه درنظر 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 D_C را افزایش داده و مراحل فوق را تکرار نمود.**

[8] Fall of potential – Slop 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 $^{\circ}۹۰/^{\circ}۱۸۰$[9]

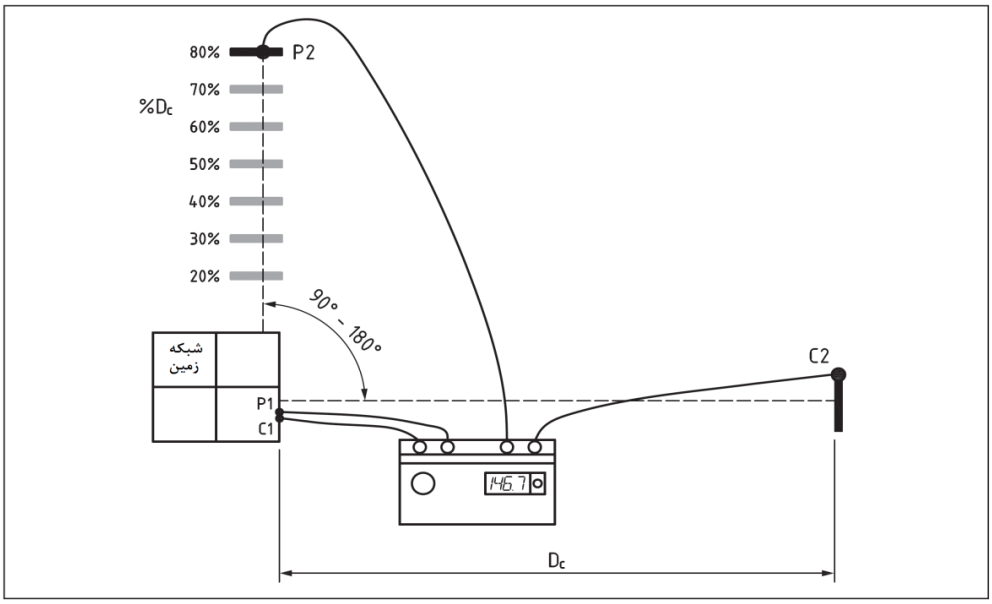
این تکنیک معمولاً برای اعتبارسنجی روش‌های شیب و ٪۶۲ از طریق مقایسه نتایج حاصله به‌کار می‌رود. دستگاه ارت‌سنج و میل‌ها باید مطابق شکل (۷) پیکربندی گردد.

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

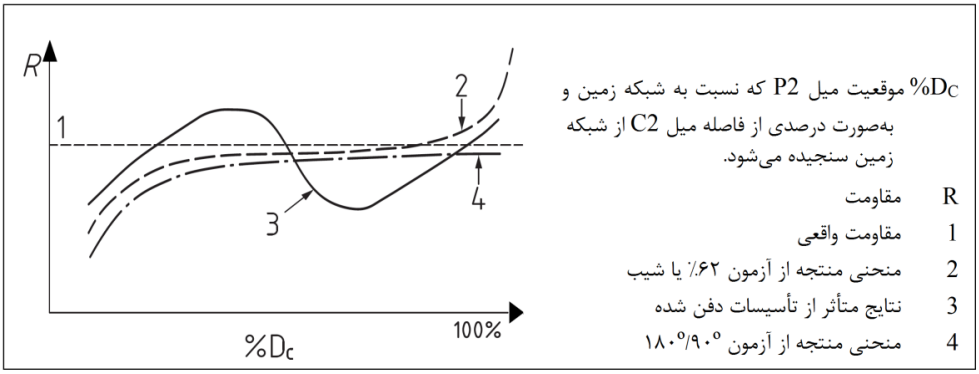
[9] 90°/180° test [BS 7430]

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 Dc می‌توان مقدار واقعی مقاومت الکترود 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 ۹۰°/۱۸۰° با اندازه‌گیری به شیوه معمول (کوبیدن میل‌های ولتاژ و جریان در امتداد یک خط راست) درهر یک از روش‌های شیب یا ٪۶۲ بیانگر صحت این آزمون‌ها می‌باشد.



شکل (۷): آزمون ۹۰°/۱۸۰°



%Dc موقعیت میل P2 که نسبت به شبکه زمین و به‌صورت درصدی از فاصله میل C2 از شبکه زمین سنجیده می‌شود.

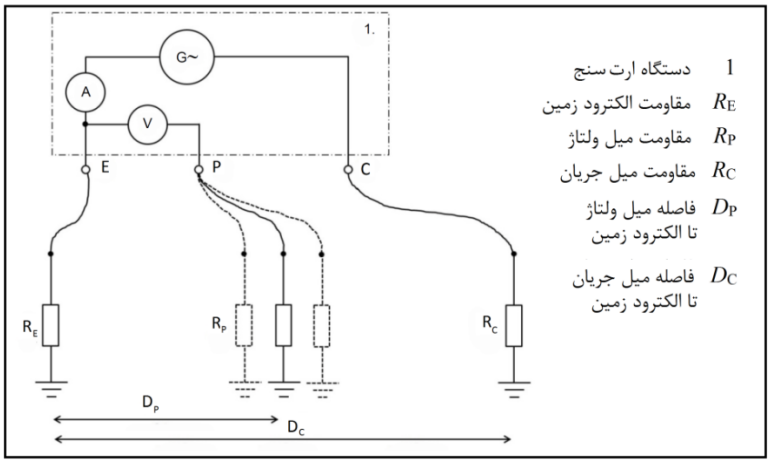
R	مقاومت
1	مقاومت واقعی
2	منحنی منتجه از آزمون ٪۶۲ یا شیب
3	نتایج متأثر از تأسیسات دفن شده
4	منحنی منتجه از آزمون ۱۸۰°/۹۰°

شکل (۸): نتایج آزمون ۹۰°/۱۸۰° نوعی

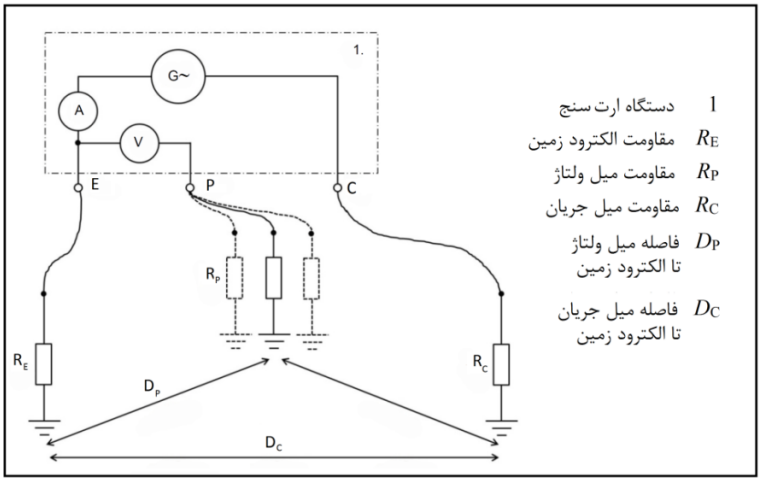
۷-۵-تکنیک چیدمان مثلثی[10]

معمولاً میل‌های ولتاژ و جریان مانند شکل (۹) در امتداد یک خط راست کوبیده شده و اندازه‌گیری انجام می‌شود. در صورتی که به‌دلیل 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 Dp و Dc نباید زیاد باشد زیرا در صورتی که این زاویه در چیدمان مثلثی به سمت ۹۰° نزدیک شود باید نکات مربوطه را از بخش ۷-۴ در نظر گرفت و مقدار Dp باید به Dc نزدیک باشد.



شکل (۹): چیدمان الکترودها به صورت خطی



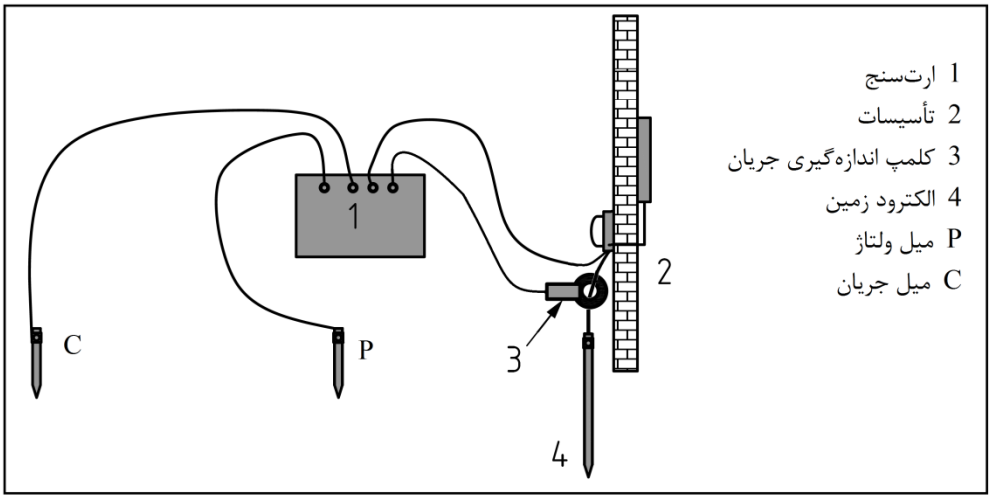
شکل (۱۰): چیدمان الکترودها به صورت مثلثی

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

۷-۶- تکنیک الکترودِ متصل[11]

با توجه به اینکه آمپرمترهای درونی دستگاه‌های ارت‌سنج، کل جریان خارج شده از دستگاه را می‌خوانند لذا پیش از اقدام به اندازه‌گیری مقاومت یک الکترود زمین، بایستی آن را از سیستم زمین جدا نمود تا کل جریان آزمون از الکترود موردنظر عبورکرده و مقاومت همان الکترود اندازه‌گیری شود وگرنه مقاومت کل سیستم زمین خوانده می‌شود.

برای رفع این مشکل و اندازه‌گیری بدون نیاز به جداکردن الکترود تحت آزمون، بعضی از دستگاه‌های ارت‌سنج، مجهز به یک آمپرمتر کلمپی (چنگکی) هستند که روی الکترود 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 الکترود آزمون و میل‌های ولتاژ و جریان وصل می‌شود. با توجه به محل استقرار آمپرمتر کلمپی فقط جریان آزمون عبوری از الکترود مورد نظر خوانده شده و اندازه‌گیری مقاومت آن مشابه یکی از روش‌های افت پتانسیل کلاسیک، ٪۶۲ یا ٪۵۰ ولی بدون نیاز به جداکردن الکترود از سامانه زمین امکان‌پذیر می‌گردد.

توجه به این نکته ضروری است که جدا کردن یک الکترود 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 الکترود زمین هستند و یا پایین بودن مقاومت سیستم زمین، متکی به الکترود مورد نظر است، صدق می‌کند) در چنین وضعیت‌هایی تکنیک "الکترود متصل" می‌تواند راه‌گشای حل مشکل باشد.

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

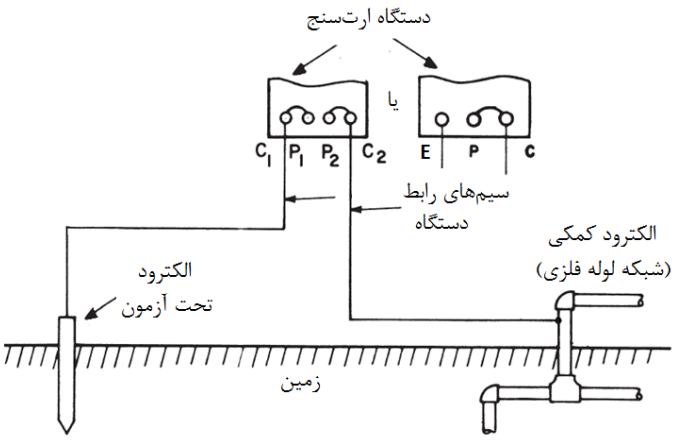
[11] Attached Rod Technique (ART) or FOP/clamp-on method (IEEE 81- 8.2.2.6)

۸–روش‌های بدون میل

ویژگی مشترک این روش‌ها عدم نیاز به میل‌کوبی و درنتیجه 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[12]

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



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

۸–۱–۱– محدودیت‌ها، مزایا و کاربرد

آشکار است که این روش برای اندازه‌گیری سامانه‌های کم مقاومت، می‌تواند دربردارنده خطاهای بزرگی باشد. ضمناً اگر الکترود تحت آزمون در محدوده الکترود کمکی قرار گرفته باشد، آنگاه تداخل نواحی مقاومتی دو الکترود می‌تواند منشأ خطای قابل‌توجهی گردد. لذا این روش، تنها در مواردی مفید است که کل نیاز ما، انجام آزمونی از نوع رد/ قبول[13] باشد. عدم نیاز به میل‌کوبی موجب سرعت و سهولت اجرای این روش می‌گردد.

[12] Two-point method [IEEE Std 81]
[13] Go or no go

۸-۱-۲- اعتبارسنجی اندازه‌گیری

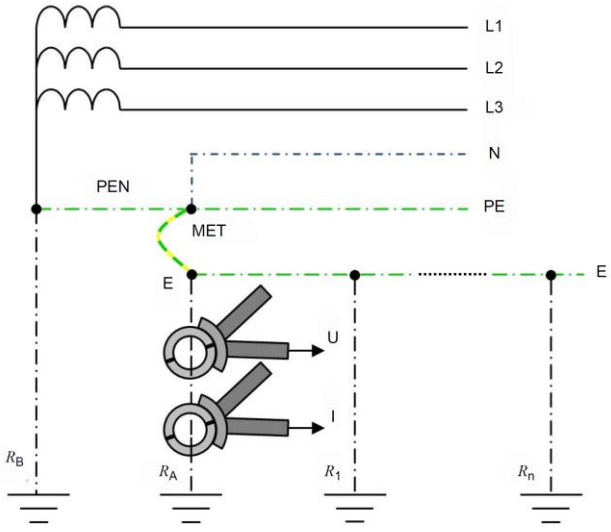
در این روش امکان اعتبارسنجی و اطمینان از صحت نتایج اندازه‌گیری وجود ندارد که ازمعایب بزرگ این روش است.

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 الکترود تحت آزمون از سامانه زمین نیست. بنابراین علاوه بر سهولت و سرعت بیشتر در اجرای کار، مزایای متصل ماندن الکترود 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 به‌علت ویژگی‌های دستگاه خصوصاً فرکانس بالای اندازه‌گیری (معمولاً بین 1KHz 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 هردو وظیفه القاء ولتاژ و اندازه‌گیری جریان را انجام می‌دهد.



شکل (۱۲): اندازه‌گیری مقاومت الکترود 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 الکترود کمکی است. در این روش مقاومت الکترود تحت آزمون و الکترودهای کمکی با استفاده از روش دونقطه‌ای یا روش تزریق جریان کلمپی، به صورت دو به دو اندازه‌گیری شده و نتایج ثبت می‌گردد. اگر مقاومت الکترود تحت آزمون را r_1 و الکترودهای کمکی را به ترتیب r_2 و r_3 بنامیم آنگاه با اندازه‌گیری مقاومت‌های هر جفت از الکترودها 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 الکترود 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 الکترود 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 الکترودهای کمکی با مقاومت کم امکان‌پذیر نیست و با توجه به اینکه معمولاً الکترودهای 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 الکترود تحت آزمون با دو الکترود کمکی، مطمئن‌تر از روش‌های دو نقطه‌ای و تزریق جریان کلمپی است.

[15] Three-point method [IEEE Std 81]

[۱۶] در مورد الکترودهای میله‌ای، این فاصله حداقل ۳ برابر عمق الکترودهاست.

۹– روش امپدانس حلقه [۱۷]

در این روش مطابق با استاندارد **IEC60364-6:2016** اندازه‌گیری مقاومت الکترود زمین باید با استفاده از دستگاه آزمون امپدانس 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.

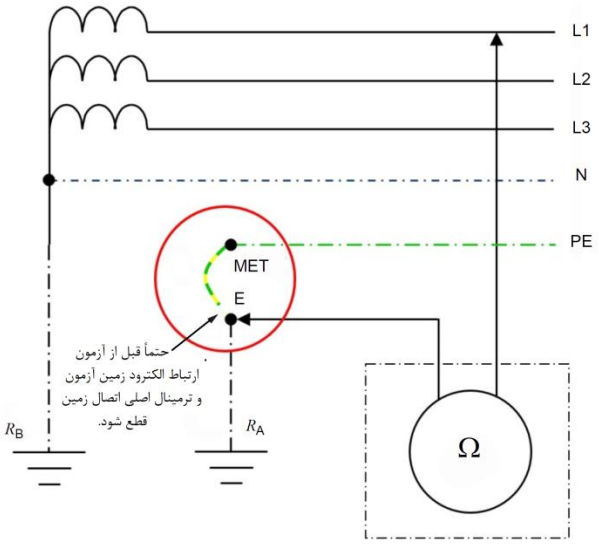
۲) ارتباط الکتریکی بین الکترود زمین آزمون و شینه اصلی اتصال زمین (**MET**) به طور موقت قطع شود.

۳) دستگاه آزمون امپدانس حلقه، بین یک هادی برق‌دار در تابلو اصلی و الکترود زمین آزمون متصل گردد.

۴) نحوه سیم‌بندی آزمون مطابق شکل (۱۳) و با درنظر گرفتن توصیه‌های سازنده دستگاه انجام شود.

۵) در این روش، امپدانس یک حلقه شامل امپدانس 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 الکترود زمین آزمون، اندازه‌گیری می‌شود. با فرض کوچک بودن مقاومتهای سری با الکترود زمین آزمون، مقدار قرائت شده توسط دستگاه با تقریب قابل قبولی نشان دهنده مقاومت الکترود زمین خواهد بود.

۶) به این نکته مهم توجه شود که بعد از پایان تست و قبل از برق‌دار کردن تأسیسات داخلی، اتصال الکترود زمین به شینه اصلی اتصال زمین (**MET**) مجدداً برقرار گردد.



شکل (۱۳): اندازه‌گیری مقاومت الکترود زمین با استفاده از دستگاه آزمون امپدانس حلقه

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

۱۰– انتخاب روش اندازه‌گیری

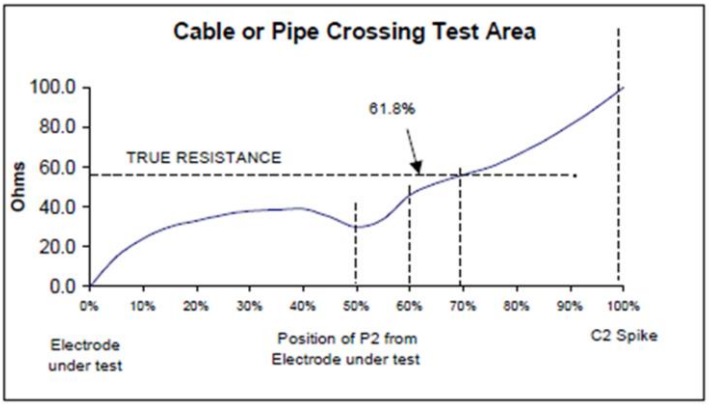
روش‌های افت پتانسیل کلاسیک و ٪۶۲ را می‌توان برای اندازه‌گیری هر نوع الکترود زمین به‌کار برد. در صورتی که به‌دلیل گستردگی حوزه مقاومتی یک الکترود و محدودیت فضای میل‌کوبی نتوان نمودار بدون شیب (یا با شیب اندک) به‌دست آورد، می‌توان از روش شیب استفاده کرد و در صورتی که روش شیب نیز قابل اجرا نباشد، می‌توان یکی از روش‌های سه‌نقطه‌ای،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 الکترود 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 میل‌کوبی 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.



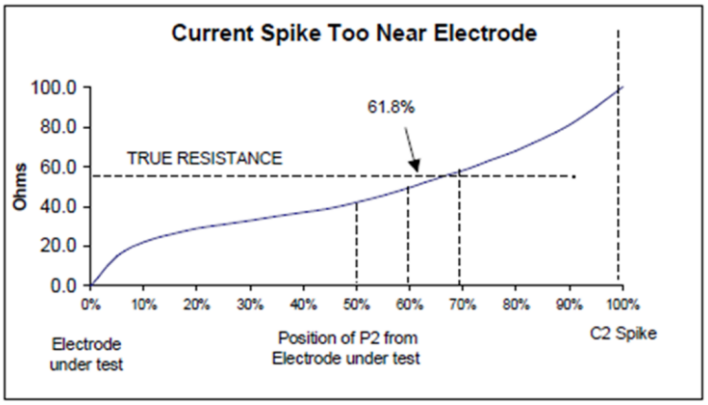
شکل (۱۴): ایجاد خطای اندازه‌گیری ناشی از اثر فلزات مدفون در خاک

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 الکترود 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 الکترودهای زمین را در حد مطلوب کاهش داد، استفاده از کاهنده‌های موقت مختلف از جمله آبیاری منظم با آب و یا تزریق مواد شیمیایی به خاک با رعایت موارد زیر مجاز است:

الف) برنامه مشخصی که شامل همه جزئیات و اطلاعات اجرایی لازم، مانند دوره‌های آبیاری، نوع و مقدار مواد شیمـیایی و ... باشد، در دسترس بهره‌برداران قرار گیرد.

ب) استفاده از کاهنده‌ها به‌نحوی طرح شده باشد که برای ساختمان و تأسیسات آن زیان‌آور نباشد.

ج) تمهیدات اجرایی لازم برای استفاده از کاهنده‌ها (مانند اجرای لوله آبیاری در نزدیکی الکترودهای 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 الکترودها
۵) شرایط محیطی (خاک و هوا)
۶) روش آزمون انتخابی
۷) مشخصات و آرایش الکترودها
۸) نوع اتصالات
۹) کاربری ساختمان و الکترود
۱۰) جداول
۱۱) نمودار نتایج اندازه‌گیری (بسته به روش اندازه‌گیری)
۱۲) نتیجه نهایی اندازه‌گیری

۱۴–اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک

۱۴–۱– روش تک راد[18]

در این روش به مانند شکل (۱۴) یک الکترود 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 الکترود 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:

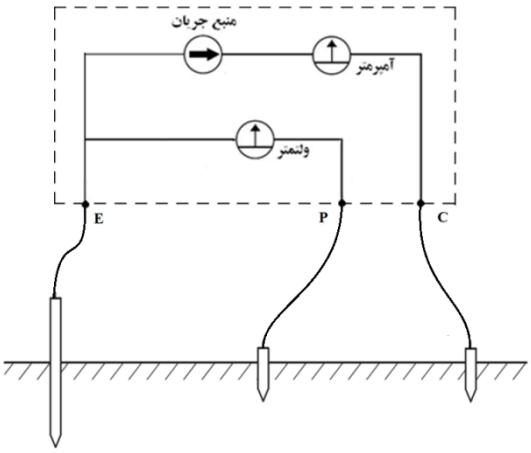
$$\rho = \frac{2\pi R_r L}{\left[\log_e\left(\frac{8L}{d}\right) - 1\right]}$$

پارامترهای این رابطه عبارتند از:

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

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

مقاومت‌های به‌دست آمده، ساختار الکتریکی خاک را نشان می‌دهد. این روش به‌دلیل مشکلات اجرایی از جمله دشواری کوبیدن الکترود در عمق‌های زیاد، به‌ندرت به‌کار برده می‌شود.



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

۱۴-۲- روش چهار نقطه[19]

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 به‌کار می‌رود که عبارتند از:

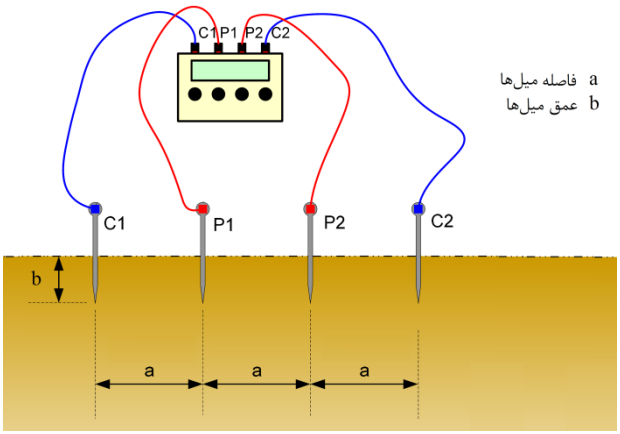
الف) روش ونر یا فاصله‌گذاری مساوی

ب) روش اشلومبرگر-پالمر[20] یا فاصله‌گذاری نامساوی

۱۴-۲-۱- روش ونر[21]

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 ونر

پس از اتصال سیم‌های رابط مقاومت R از دستگاه ارت‌سنج خوانده شده و از رابطه زیر مقاومت ویژه خاک ρ[۲۲] متناسب با واحد انتخاب شده برای طول‌های a و b به‌دست می‌آید:

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

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

$$\rho = 2\pi aR$$

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

مهم‌ترین مزیت روش ونر این است که به آسانی با افزایش فاصله بین میل‌ها در سطح زمین می توان مقاومت ویژه متوسط خاک را تا عمق‌های زیاد به‌دست آورد.(عمق خاک ≡ a)

۱۴-۲-۲- روش اشلومبرگر

روش ونر 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 ونر 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.

[22] Apparent resistivity

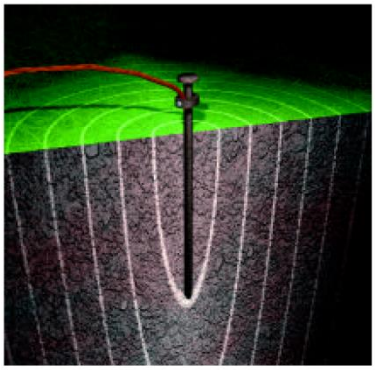
۱۵–پیوست ۱ (الزامی[۲۳]): مشخصات استاندارد دستگاه اندازه‌گیری

در ویرایش بعدی تکمیل می شود.

۱۶–پیوست ۲ (اطلاعی[۲۴]): مفاهیم پایه اتصال زمین

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

هرگاه الکترودی 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 الکترود به سرعت کاهش یابد. نهایتا اگر فاصله کافی از الکترود گرفته شود عملاً دیگر پتانسیل پوسته ها به صفر می رسد. این منطقه که دیگر اثر وجود پتانسیل یا جریان در الکترود در آن احساس نمی‌شود را منطقه هم‌پتانسیل[۲۶] و ماقبل آن که تأثیر الکترود محسوس است را منطقه مقاومتی[۲۷] گویند.



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

آنچه مقاومت الکترود زمین نامیده می‌شود در واقع مقاومت بین الکترود و نقطه‌ای در منطقه هم‌پتانسیل است. مقاومتی که در این حالت اندازه‌گیری می شود در واقع برابر است با حاصل جمع مقاومت تعدادی پوسته حول الکترود 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 الکترود، سطح کمتری داشته و در نتیجه مقاومتشان بیشتر است. و هرچه از الکترود دور شویم سطح پوسته‌ها بیشتر و مقاومتشان کمتر می‌شود . نهایتاً اگر فاصله کافی را تا الکترود درنظر بگیریم به جایی می‌رسیم که لایه‌ها آنچنان تغییر قابل توجهی در مقاومت نمی‌دهند. در این حالت مقدار نهایی مقاومت الکترود حاصل شده و این همان مقداری است که

---

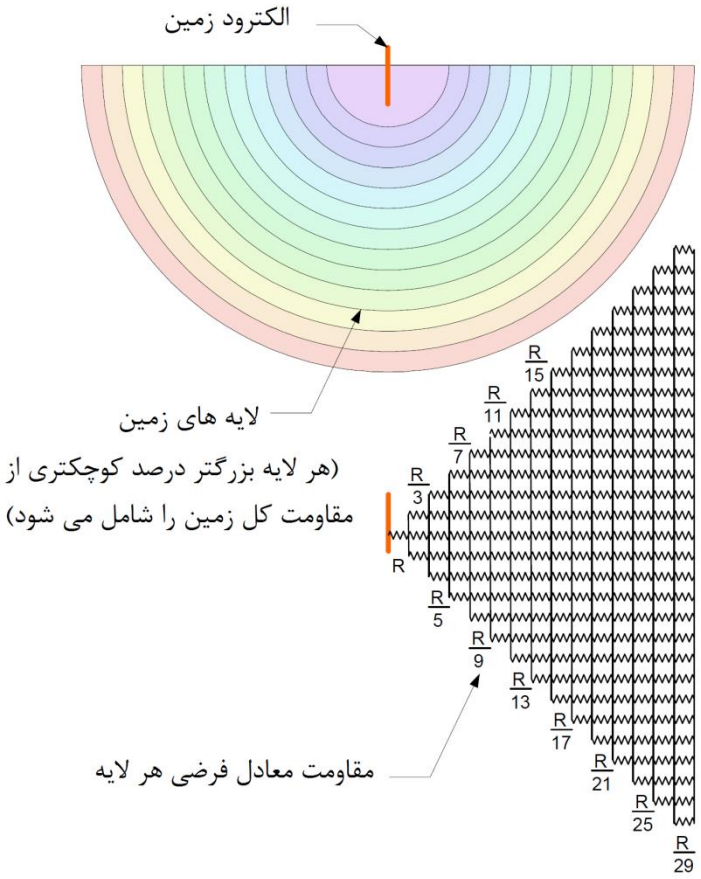
[23] Normative
[24] Informative

[۲۵] 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 الکترود 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 مسأله نقش محسوسی ندارد.[۲۸]



شکل (۱۷): مدار معادل پوسته‌های هم‌پتانسیل طراف یک الکترود

[۲۸] البته جنس الکترود و پوشش آن از حیث عمر می تواند بسیار مهم باشد.

۱۶-۲- واژه نامه

الکترود اصلی آزمون	**main earthing electrode**
الکترود تحت آزمون	**subject electrode**
الکترود زمین کمکی	**auxiliary electrode**
الکترود زمین منفرد	**single earthing electrode**
الکترود زمین گسترده	**large earthing electrode**
ناحیه مقاومتی	**resistance area or resistance zone**
گرادیان ولتاژ	**voltage gradient**
ولتاژ انتقالی	**transferred voltage**
میل جریان	**current spike**
میل ولتاژ	**potential spike**
ارت‌سنج	**earth tester**

ارت‌سنج مجهز به کلمپ	**clamp-on device**
پراب (آزمون)	**Probe**
شینه اصلی اتصال زمین	**main earthing bar**
هادی حفاظتی	**protective conductor**
هادی اتصال به زمین	**earthing conductor**
الکترود زمین	**earthing electrode**
اتصال زمین	**Earthing**
الکترود میله‌ای	**rod electrode**
الکترود صفحه‌ای	**plate electrode**
مقاومت تماسی میل‌ها	**spikes touch resistance**

۱۷-مراجع

[۱] راهنمای طرح و اجرای تأسیسات برقی ساختمان‌ها، دفتر نشر مقررات ملی ساختمان، آلدیک موسسیان-ویرایش۸۲

[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 دستورالعمل‌های گروه تخصصی برق شورای مرکزی (دوره ششم):

جلد اول: دستورالعمل طرح و اجرای همبندی اصلی در ساختمان‌ها

جلد دوم: دستورالعمل طرح و اجرای همبندی اضافی در ساختمان‌ها

جلد سوم: دستورالعمل اجرای سیستم زمین در ساختمان‌ها

جلد چهارم: دستورالعمل اندازه‌گیری مقاومت الکترود زمین و مقاومت ویژه خاک

جلد پنجم: دستورالعمل سیستم‌های اتوماسیون و کنترل ساختمان

جلد ششم: دستورالعمل ضوابط طراحی و اجرای سیستم‌های اعلام حریق

جلد هفتم: دستورالعمل حفاظت ساختمان‌ها در برابر صاعقه