



مبانی تئوری اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین به روش افت پتانسیل و محدودیت‌های عملی



همت‌علی رفیعی کراچی

کارشناس ارشد برق و الکترونیک



چکیده

هدف از این مقاله، ارائه‌ی محاسبات مربوط به روش افت پتانسیل برای اندازه‌گیری مقاومت سیستم اتصال زمین به شکل صحیح و دقیق در حوزه‌ی استاندارد مقررات ملی ساختمان است و در ادامه، به بعضی از مشکلات و محدودیت‌های اندازه‌گیری اشاره خواهد شد.

واژگان کلیدی: مقاومت الکتروود زمین، روش افت پتانسیل، ارت متر

مقدمه

مقاومت هر نوع الکتروود زمین حداقل به یکی از روش‌های افت پتانسیل^۱، بدون الکتروود (بدون میل)^۲ یا امپدانس حلقه^۳ اندازه‌گیری می‌شود. بر اساس استاندارد BS-7430، دقت اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین در صورتی که کمتر از دو درصد باشد، قابل قبول است؛ ولی در اکثر موارد دقت پنج درصد هم پذیرفته می‌شود. روش افت پتانسیل، کاربردی‌ترین و از نظر استانداردهای معتبر جهانی، مطمئن‌ترین روش برای اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین برای دستیابی به دقت لازم است. اندازه‌گیری افت پتانسیل شامل روش افت پتانسیل کلاسیک، روش ۶۲٪، روش ۵۰٪، روش شیب^۴، روش آزمون ۹۰/۱۸۰ درجه، تکنیک چیدمان مثلثی^۵ و تکنیک الکتروود متصل^۶ است. ویژگی مشترک روش‌های افت پتانسیل این است که دستگاه ارت متر از مسیر میلی‌متری که در زمین کوبیده شده‌اند، جریان به زمین تزریق می‌کند و افت پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود. در این روش‌ها جانمایی و فواصل پروب‌های دستگاه ارت متر بر روی دقت اندازه‌گیری بسیار مؤثر است. در این مقاله محاسبات مربوط به فواصل الکتروودهای دستگاه ارت متر و چیدمان آن‌ها برای دستیابی به دقت مورد نظر انجام شده است و

در مورد محدودیت‌های آن‌ها نیز توضیحاتی داده شده است.

تعاریف و نمادها

الکتروود زمین^۷: قطعه‌ای هادی است که در خاک یا محیط هادی خاص (مانند بتن) دفن می‌شود تا ارتباط الکتریکی مستقیم با جرم کلی زمین برقرار کند.

الکتروودهای زمین مستقل: از نظر الکتریکی الکتروودهایی هستند که در فواصل دور از هم قرار دارند به گونه‌ای که در صورت عبور حداکثر جریان از یک الکتروود، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی ولتاژ الکتروودهای دیگر نداشته باشد. در دستگاه‌های ارت متر، سه نوع الکتروود وجود دارند شامل الکتروود ارت E، الکتروود جریان C، الکتروود پتانسیل P که طبق شکل (۱) رسم شده‌اند [۱].

۱-۲- به شرطی که الکتروود E در خاک قرار گرفته باشد و جریان از آن نگذرد و فاصله‌ی طولانی با دیگر الکتروودهای حاوی جریان داشته باشد، پتانسیل آن با P_E^E یا GPR^8 یا پتانسیل زمین راه دور معرفی می‌شود و برابر با صفر می‌شود.

۲-۲- اگر جریان I از الکتروود E عبور کند، افزایش پتانسیل در الکتروود E برابر است با:

$$P_E^E = R_E * I \quad (1)$$

امپدانس الکتروود $R_E = E$

اگر $I=1A$ باشد، آنگاه:

$$P_E^E = V_E^E = R_E * 1 = R_E \quad (2)$$

افزایش پتانسیل الکتروود E هنگامی که جریان یک آمپر از آن می‌گذرد

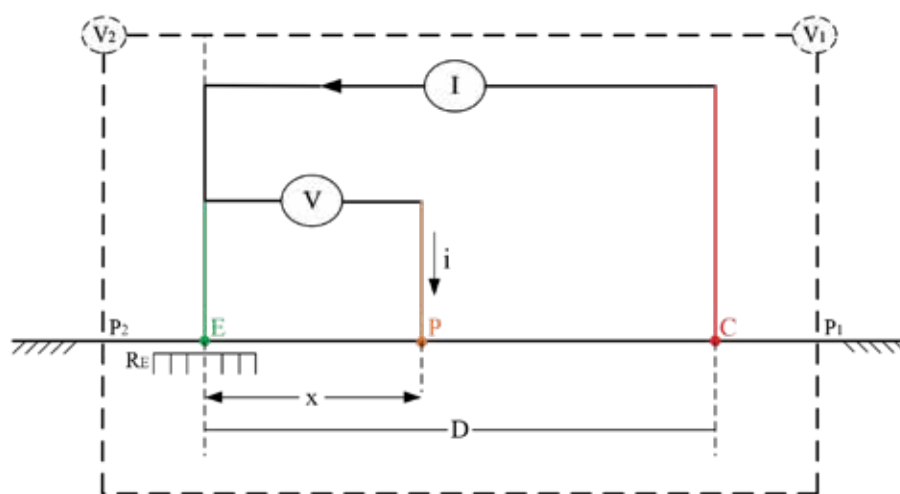
$$V_E^E =$$

با توجه به توضیحات قبل، V_E^E از نظر عددی با مقاومت الکتروود R_E برابر است.

۳-۲- اگر جریان I از الکتروود جریان که با C نشان داده شده است و در فاصله‌ی نزدیک به الکتروود E قرار دارد، به خاک تزریق شود (هیچ جریانی از E نمی‌گذرد)، به دلیل افزایش پتانسیل محلی، پتانسیل الکتروود E که در آغاز صفر بود در اثر کوپلینگ مقاومتی^۹ به P_E^C تغییر می‌کند که مقدار عددی آن برابر با مقاومت متقابل بین الکتروودهای E و C است.

$$I = 1A \rightarrow P_E^C = V_E^C$$

۴-۲- اگر جریان عبوری از الکتروود E برابر با 1A باشد و هم‌زمان از الکتروود C نیز جریان 1A عبور کند، افزایش پتانسیل الکتروود E برابر است با $V_E^E + V_E^C$. از نظر تئوری، محاسبه‌ی V_E^E یا V_E^C پیچیده است؛ اما در اینجا با ساده سازی ساختار الکتروود و خاک اطراف قابل محاسبه هستند.



شکل ۱: اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین به روش افت پتانسیل

معادلات اساسی

ساختار اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین به روش افت پتانسیل در شکل (۱) نشان داده شده است.



جریان i که از الکتروود P عبور می کند ، در مقایسه با جریان I که از الکتروود E وارد زمین می شود ، نادیده گرفته می شود. در لحظه‌ی زمانی مشخص t ، جریان I که از مسیر الکتروود E به زمین تزریق می شود ، مثبت دیده می شود و جریان برگشتی I که از زمین به سمت الکتروود C هدایت می شود ، منفی در نظر گرفته می شود. بر اساس تعاریف قبل ، روابط زیر به دست می آیند :

$$V_P = V_P^E \times (I') + V_P^C \times (-I') \quad (3)$$

$$V_E = V_E^E \times (I') + V_E^C \times (-I') \quad (4)$$

$$I' = I A / 1 A$$

V_E و V_P به ترتیب برابر با پتانسیل یا افزایش پتانسیل زمین الکتروودهای P و E (نسبت به زمین راه دور)^۱ هستند. دستگاه ارت متر ، ولتاژ V بین دو نقطه‌ی E و P را با روش افت پتانسیل اندازه گیری می کند.

$$V = V_E - V_P \quad (5)$$

$$V = I' (V_E^E - V_E^C - V_P^E + V_P^C) \quad (6)$$

طبق تعریف V_E^E عبارت است از افزایش پتانسیل الکتروود E در اثر عبور جریان IA که برابر است با امپدانس R_E حاصل از الکتروود E. پس رابطه (۶) را می توان به صورت زیر نوشت :

$$R = \frac{V}{I} = R_E + (V_P^C - V_E^C - V_P^E) / 1A \quad (7)$$

ولتاژهای V_P^E و V_P^C به فاصله‌ی بین الکتروودهای E و C و P ، وضعیت قرار گرفتن آنها نسبت به یکدیگر ، ساختار الکتروود و مشخصات خاک وابسته هستند.

خاک یکنواخت

برای ساده سازی محاسبات ، خاک اطراف الکتروود زمین به شکل یکنواخت در نظر گرفته می شوند. طبق مختصات تعریف شده در شکل (۱) توابع η و ϕ و ψ بر حسب فواصل D و x تعریف می شوند.

$$V_E^C = \eta(D) \quad (8)$$

$$V_P^C = \phi(D - x) \quad (9)$$

$$V_P^E = \psi(x) \quad (10)$$

در رابطه‌ی (۷) امپدانس اندازه گیری شده $R = V/I$ برابر با امپدانس الکتروود زمین واقعی R_E است به شرطی که :

$$V_P^C - V_E^C - V_P^E = 0 \quad (11)$$

$$\phi(D - x) - \eta(D) - \psi(x) = 0 \quad (12)$$

الکتروودهای مشابه با فاصله‌ی زیاد

اگر الکتروودهای E و C مشابه هم باشند و D فاصله‌ی الکتروود جریان C از الکتروود آزمون E به حد کافی زیاد باشد آن گاه :

$$V_E^C = \eta(D) = 0 \quad (13)$$

$$\phi(D - x) - \psi(x) = 0 \quad (14)$$

برای تحقق شرط قبل لازم است که $x_0 = D/2$ باشد. یعنی الکتروود پتانسیل مربوط به دستگاه ارت متر باید وسط الکتروود زمین مورد آزمایش و الکتروود جریان قرار بگیرد که همان روش افت پتانسیل ۵۰٪ می شود. به این ترتیب از جمله شرطهایی که نتایج اندازه گیری به روش افت پتانسیل به طور عام و روش ۵۰٪ به شکل خاص قابل اعتماد باشد و دقت اندازه گیری قابل قبول باشد ، این است که الکتروودهای جریان C و الکتروود آزمون E شبیه به هم باشند و به اندازه‌ی کافی دور از یکدیگر باشند تا حوزه‌ی مقاومتی آنها با یکدیگر تداخل نداشته باشد. توصیه شده است که فاصله‌ی الکتروود زمین و الکتروود جریان از پنج برابر بزرگترین بعد الکتروود زمین کوچک تر نباشد.

الکتروودهای نیم کروی

چنانچه الکتروودهای E و C نیم کروی باشند ، به گونه‌ای که جریان به شکل یکنواخت در خاک پراکنده شود ، توابع پتانسیل ϕ ، η ، ψ متناسب با عکس فاصله از مرکز نیم کره می شوند.

۶-۱- اگر مبدأ مختصات در مرکز نیم کره E باشد ، معادله‌ی (۱۲) را می توان به شکل زیر درآورد :



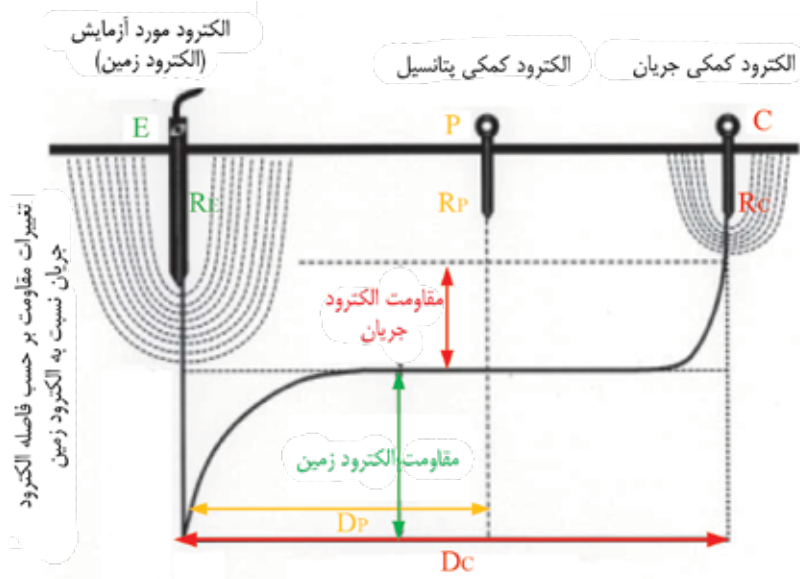
$$\frac{1}{D-x} - \frac{1}{D} - \frac{1}{x} = 0 \quad (15)$$

با ساده‌سازی رابطه‌ی قبل، جواب مثبت معادله‌ی درجه‌ی دوم حاصل از آن برابر است با:

$$x_0 = 0.618D$$

که با تقریب همان آزمون روش افت پتانسیل 62% می‌شود و x_0 مناسب‌ترین نقطه برای اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین مورد آزمایش می‌شود، به شرطی که الکتروودهای E و C همان‌گونه که پیش از این گفته شد دور از هم باشند.

۲-۶- اگر پراب پتانسیل در طرف E در نقطه‌ی P_2 کوبیده شود، به جای $D-x$ باید $D+x$ قرار داد که در این صورت معادله دارای ریشه‌ی مختلط می‌شود و پاسخ حقیقی ندارد. چگونگی قرار گرفتن الکتروودها در این روش همانند روش آزمون 180° است که برای صحت سنجی روش 62% استفاده می‌شود.



شکل ۲: منحنی‌های تغییر مقاومت بر حسب فاصله‌ی الکتروودها در روش افت پتانسیل کلاسیک

۳-۶- اگر پراب P در نقطه‌ی P_1 قرار داده شود، در این حالت باید به جای $D-x$ در معادله (15) مقدار $x-D$ قرار داد که ریشه‌ی مثبت آن برابر است با:

$$x_0 = 1.618D$$

در منابع و مراجع استاندارد آمده است که الکتروود پتانسیل بین الکتروودهای جریان و الکتروود زمین مورد آزمون قرار می‌گیرد و محاسبه‌ی قبل فقط کاربرد تئوری دارد و در هیچ‌جا چیدمان قبل ارائه نشده است.

بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهاد

محاسباتی که برای اندازه‌گیری به روش افت پتانسیل به‌خصوص روش‌های 50% و 62% انجام شد با تقریب‌ها و ساده‌سازی همراه بود که در پاره‌ای موارد از عالم واقعی به دور است. در ادامه نمونه‌هایی گفته می‌شوند:

۷-۱- برای ساده‌سازی رابطه‌ی (13) فرض شد که الکتروود زمین E و الکتروود جریان C شبیه به هم هستند و دور از یکدیگر مستقر شده‌اند. اما الکتروود زمین E به شکل‌های مختلف صفحه‌ای، افقی و قائم با ابعاد متفاوت و در عمق‌های مختلف در زمین اجرا می‌شوند؛ ولی الکتروود جریان C به عمق چند سانتی‌متر در زمین کوبیده می‌شود. بنابراین نواحی مقاومتی که اطراف هر یک از الکتروودهای E یا C تشکیل می‌شود طبق آن‌چه در شکل (۲) نشان داده شده است، با دیگری متفاوت است. برای این که اندازه‌گیری به روش افت پتانسیل به دقت مطلوب منجر شود، لازم است که فاصله‌ی الکتروود جریان C از الکتروود زمین مستقل E تا حد ممکن زیاد باشد. در این حالت منحنی تغییرات مقاومت (بر حسب فاصله‌ی الکتروود پتانسیل از الکتروود زمین) به صورت افزایشی - تخت - افزایشی خواهد بود. در بعضی از منابع فاصله‌ی الکتروود کمکی جریان



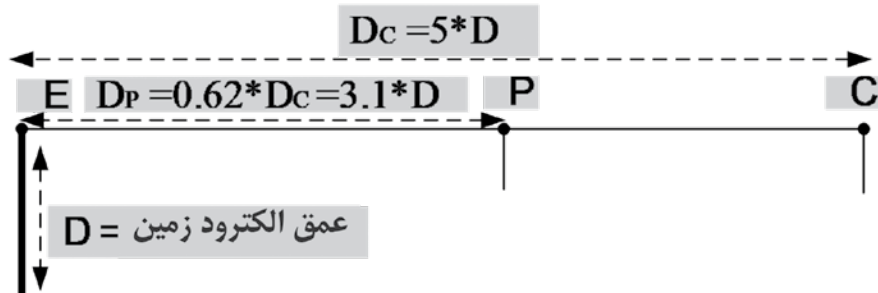
از الکتروود زمین برابر با ۵۰ متر در نظر گرفته شده است.

- فاصله‌ی بین میل جریان و مرکز الکتروود زمین گسترده بر اساس استاندارد BS 7430 از جدول (۲) به دست می‌آید که منظور از حداکثر بُعد الکتروود زمین در جدول (۲) ، فاصله‌ی بین دورترین نقاط آن الکتروود است.

جدول ۲: فاصله‌ی پیشنهادی مناسب برای میل جریان در روش افت پتانسیل ۰.۶۲٪ بر حسب بعد الکتروود زمین گسترده

فاصله‌ی میل جریان از مرکز الکتروود زمین گسترده	حداکثر بعد الکتروود زمین تحت آزمایش
۱۰۰	۵
۱۵۰	۱۰
۲۰۰	۲۰

در معابر و کوچه‌های شهری و مناطقی که دارای ساختمان‌های متراکم هستند یا الکتروود زمین به صورت گسترده هستند ، دست‌یابی به فاصله‌ی مطلوب گفته شده در جدول (۲) دشوار است. ساختمانی در نظر گرفته شود که در آن الکتروود صفحه‌ای در چاه الکتروود در طبقه‌ی منفی دو (طبقه‌ی دوم زیرزمین) به عمق دو متر اجرا شده باشد. اگر ارتفاع هر طبقه سه متر باشد ، بنابراین الکتروود زمین در عمق $D=8$ متر ($2 + 2 * (3) = 8$) نسبت به سطح زمین بکر اجرا شده است. بر اساس شکل (۳) برای اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین به روش افت پتانسیل باید شرط مشهور $D_c = 5 * D$ و $D_p = 3.1 * D$ که از طرف سازندگان دستگاه‌های اندازه‌گیری پیشنهاد می‌شود ، رعایت شود که در این صورت $D_c = 5 * 8 = 40m$ می‌شود. دست‌یابی به فاصله‌ی تقریبی ۴۰ متر بین الکتروود زمین و الکتروود جریان در نقاط متراکم شهری و معابر دشوار است ؛ زیرا از یک طرف اجرام فلزی مدفون در خاک و جریان‌های سرگردان حاصل از منابع مختلف AC یا DC در کوچه‌ها و معابر باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری می‌شوند و از طرف دیگر ، به دلیل موانع فیزیکی و محدودیت‌های عملی ، امکان قرار دادن هر سه الکتروود در یک راستا مقدور نیست.



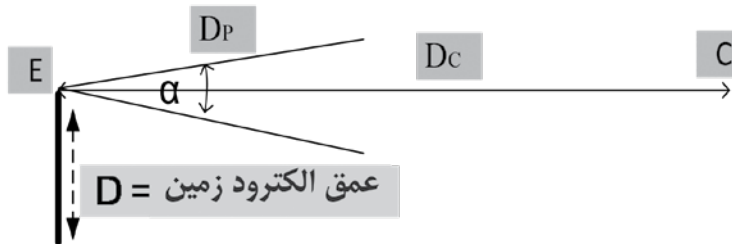
شکل ۳: چگونگی استقرار الکتروودهای دستگاه ارت متر در حالت معمولی به روش افت پتانسیل

اگر فاصله‌ی الکتروودهای E و C کمتر از مقدار محاسباتی یا پیشنهادی سازندگان دستگاه ارت متر باشد ، در حوزه‌ی مقاومتی یکدیگر قرار می‌گیرند و نتایج اندازه‌گیری دچار خطا می‌شود و در اکثر موارد مقدار اندازه‌گیری شده کمتر از واقعی می‌شود.

در مکان‌هایی که امکان قرار گرفتن سه الکتروود در یک راستا بر روی یک خط راست در سطوح هم تراز مهیا نباشد یا سطح شیب‌دار باشد ، شخص مسئول اندازه‌گیری مجبور است یکی از میل‌ها را برای مثال در آسفالت بکوبد. بهتر است میل جریان در مکان مناسبی کوبیده شود و پس از آن میل پتانسیل



در آسفالت یا هر بستر دیگر کوبیده شود؛ زیرا مشکلات و خطای اندازه‌گیری کمتری نسبت به کوبیدن میل جریان در آسفالت دارد. برای رفع این مشکل، در برخی مراجع اجازه داده شده که میل‌ها کمی نسبت به خط راست انحراف داشته باشند. انحراف تا حدی مجاز است که میل‌های کوبیده شده در زمین در داخل یک زاویه‌ی حداکثر ۱۵ درجه نسبت به رأس الکتروود زمین قرار بگیرند. در اندازه‌گیری‌ها باید کوشید تا شروط گفته شده در دستورالعمل‌های تست و کتابچه‌ی راهنمای کاربری دستگاه رعایت شود و هر بار پس از اندازه‌گیری باید نتایج اعتبارسنجی شود تا درصد خطای اندازه‌گیری بیش‌تر از حد مجاز نباشد.



شکل ۴: چیدمان الکتروودهای ارت متر در حالتی که موانع فیزیکی بر سر راه باشند

تا این‌جا گفته شد که در روش افت پتانسیل، اگر اندازه‌گیری مقاومت الکتروود زمین به طور دقیق طبق محاسبات دنبال شود تا دقت لازم را داشته باشد، با محدودیت‌ها و مشکلات اجرایی مواجه می‌شویم. از طرف دیگر ثابت شده است که کیفیت اجرا و طول عمر الکتروودهای زمین با وضعیتی که برای ساختمان‌ها در کشور اجرا می‌شود، جواب‌گوی نیازهای واقعی الکتروود زمین نیست و الکتروودها پس از چند سال کارایی خود را از دست می‌دهند و دوام لازم را ندارند. نظر متخصصان بر این است که از همان آغاز کار، روش مناسب برای اجرای الکتروود زمین در محل موردنظر طبق روش‌های گفته شده در منابع و مراجع ارائه شود، از مصالح با کیفیت مطلوب و استاندارد برای عمل‌آوری اطراف الکتروود زمین استفاده شود، قابلیت الکتروود زمین قبل از پوشش با دقت کنترل و ارزیابی شود و گرنه بازرسی و آزمون‌های دوره‌ای موضوع فصل هفتم مبحث بیست و دوم مقررات ملی ساختمان برای ساختمان‌های موجود که با الکتروودهای صفحه‌ای مستقل و مواد کاهنده بی‌کیفیت اجرا می‌شوند، کاری وقت‌گیر و هزینه‌بر است.

منابع

- [۱] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۲)، مبحث ۱۳- طرح و اجرای تأسیسات برقی ساختمان‌ها، تهران، نشر توسعه‌ی ایران
- [۲] ال‌دیک موسیسیان، (۱۳۸۲)، راهنمای طرح و اجرای تأسیسات برقی ساختمان‌ها، تهران، نشر توسعه‌ی ایران

3-BS7430:2011+A1:2015, Code of Practice for protective earthing of electrical installations, BSI Standard Publication
 4-IEC 60364:2016, Low voltage electrical installations
 5-IEEE Std 81:2012, IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of grounding system

- 1 - Fall of Potential
- 2 - Electrodeless
- 3 - Loop Impedance
- 4 - Fall of Potential- Slope method
- 5 - Triangular formation
- 6 - Attached Rod Technique
- 7 - Earth Electrode
- 8 - Ground Potential Rise
- 9 - Resistive Coupling
- 10 - Remote Earth

