هجدهمین کنفرانس حفاظت و اتوماسیون در سیستم‌های قدرت
دانشگاه صنعتی شاهرود
۱۹ و ۲۰ دی ماه ۱۴۰۲

برآورد مقاومت الکتریکی سیستم های اتصال زمین با مطالعات نرم افزاری و مدل سازی لایه های خاک در حوزه عملیاتی شرکت توزیع برق شمال کرمان

حسین شمس الدین سعید[۱]، عبدالرضا محمدی[۲]، وحید زند[۳]، شهرنوش خالقی[۴]

[۱] کارشناس نظارت بر شبکه های توزیع برق، معاونت مهندسی و نظارت، شرکت توزیع نیروی برق شمال کرمان
msc.h.saeed@gmail.com

[۲] مدیر دفتر مهندسی و نظارت، معاونت مهندسی و نظارت، شرکت توزیع نیروی برق شمال کرمان
a_mohammadi@nked.co.ir

[۳] مدیر پروژه نظارت بر شبکه های توزیع برق، معاونت مهندسی و نظارت، شرکت توزیع نیروی برق شمال کرمان
vahid_zand.1360@yahoo.com

[۴] گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان
Shahrnoush.khaleghi@eng.uk.ac.ir

چکیده

همواره بخشی از طراحی ها و عملیات مهندسی حفاظت شبکه های توزیع برق، انتخاب سیستم اتصال زمین مناسب این شبکه ها و تجهیزات مرتبط با آن است. در یک پروژه سیستم ارتینگ الویت اصلی و هدف، به دست آوردن مقاومت الکتریکی مطلوب و انتخاب نوع سیستم زمین مناسب منطقه و تاسیسات مورد نظر می‌باشد. برای رسیدن به این هدف و همچنین تنوع زدایی در روش‌های بسیار متنوع اجرای سیستم زمین که اغلب بدون توجه به استانداردهای معتبر و صرفاً بر مبنای ابتکارهای شخصی و سلایق فردی اجرا می‌شوند، وجود اطلاعات دقیق از مقاومت ویژه ی لایه های خاک در مطالعات نرم افزاری و طراحی یک سیستم بهینه برای الکترودهای زمین و نیز نصب سیستم مذکور در عمق مناسب نقش اساسی ایفا می‌کند. در این مقاله انتخاب روش اجرایی مناسب و برآورد مقاومت الکتریکی سیستم زمین با کمک اطلس مقاومت ویژه خاک حوزه عملیاتی شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان و مدل سازی دقیق خاک با استفاده از نرم افزارهای تخصصی این حوزه انجام شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده از مدل سازی منطقه مورد مطالعه با مقادیر واقعی و جداول مطرح شده در آخرین دستورالعمل ها و استانداردها از میزان خطا و صحت نتایج اطمینان حاصل شده است.

کلمات کلیدی

مقاومت الکتریکی زمین، مدل سازی، لایه‌های خاک،

۱- مقدمه

هدف اصلی از اتصال زمین تجهیزات و ایجاد سیستم زمین، تامین ایمنی کافی برای کسانی است که با این تجهیزات در تماس می‌باشند. همچنین تامین حفاظت کافی برای تجهیزات الکتریکی در برابر زوال یا خرابی آنها از دیگر اهداف شبکه زمین است[۱].

روشهای بسیار متنوع اجرای سیستم اتصال زمین در شبکه های توزیع برق که اغلب بدون توجه به استانداردهای معتبر و صرفاً بر مبنای ابتکارهای شخصی و سلایق فردی می‌باشد، چالش مهمی در شرکت های توزیع برق بوجود آورده است[۲]. بررسی‌ها و تجربیات کارشناسان نظارت، مجریان و بهره برداران سیستم های اتصال زمین نشان داده است که این اتصال زمین‌ها صرفنظر از عمرکم و مقاومت بالا، به لحاظ اقتصادی نیز بسیار

پرهزینه و گران تمام می‌شوند. از دیگر سو مشکلات اجرای سیستم زمین به روش سنتی (که همگی مبتنی بر حفاری عمیق و ترمیم محل هستند) باعث شده افزودن اتصال زمین جدید به شبکه کاری سخت تلقی شود که بسیاری افراد تا حد امکان از اجرای آن طفره بروند[۲].

قبل از تهیه اطلس مقاومت ویژه خاک و کمک گرفتن از مطالعات نرم افزاری و آنالیز لایه های خاک در حوزه های عملیاتی شرکت توزیع برق شمال کرمان، یکی از چندین مناطقی که مجریان و بهره برداران این شرکت در هنگام اجرا و تحویل گرفتن سیستم اتصال زمین با مشکلات بسیار زیادی مواجه بودند، حوزه عملیاتی امور برق شهر ماهان (در ۳۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر کرمان) بوده است. که در این امور نیز روستای کهنوج به عنوان یکی از سخت ترین مناطق از لحاظ رسیدن به مقاومت الکتریکی سیستم اتصال زمین استاندارد به حساب می‌آمده است. طی نتایجی که از تجربیات ناظرین و بهره برداران این منطقه بدست آوردیم، مشخص شد در برخی از پروژه های این منطقه گاهی برای هر دستگاه زمین حفاظتی پست های هوایی، از حفر و موازی کردن چندین حلقه چاه (با عمق های ۸ تا ۱۰متر با الکترولیت و بک فیلدهای بسیار زیاد) استفاده می‌شده اما به سختی و با صرف وقت و هزینه های زیاد به مقاومت قابل قبول دست پیدا شده است. از این رو در این مقاله سیستم اتصال زمین یکی از پست های هوایی در دست اجرای این منطقه به عنوان نمونه مورد مطالعه قرارگرفته است.

به دلیل تاثیر بالایی که طراحی و اجرای صحیح سیستم زمین در افزایش کارایی تجهیزات و حفاظت ایمنی دارد، استانداردهای بین المللی متعددی در این زمینه منتشر شده و هر ساله به‌روزرسانی می‌شوند، که از آن جمله می‌توان به استانداردهای IEEE Std142، IEEE Std80، BS7430 اشاره کرد[۳-۵]. همچنین تاکنون مقررات و دستورالعمل های تخصصی زیادی در خصوص سیستم‌های اتصال زمین از سمت مراجع علمی و فنی داخلی کشور (مانند وزارت نیرو، شرکت توانیر و سازمان نظام مهندسی ساختمان کشور) تدوین و ابلاغ شده است. که از به‌روزترین و جامع ترین دستورالعمل‌های داخلی، می‌توان به دستورالعمل سیستم اتصال زمین شبکه های توزیع که توسط کمیته تخصصی سیستم زمین شرکت توانیر در سال ۱۴۰۲ تدوین شده است اشاره کرد[۱]. مراجع این دستورالعمل مبتنی بر آخرین مقررات و استانداردهای بین المللی می‌باشد و همانگونه که در این دستورالعمل اشاره شده است مادامیکه ویرایش‌های جدیدی از مقررات یا استانداردها به تصویب نرسیده و جانشین این دستورالعمل نشده باشد، رعایت آنها برای تمامی شرکت‌های توزیع برق تابعه وزارت نیرو الزامی می‌باشد[۱]. لذا در این مقاله برای اطمینان از صحت نتایج و میزان خطا حاصل از نرم افزارهای محاسبگر مقاومت الکتریکی زمین از جداول عددی این دستورالعمل استفاده شده است.

۲- خواص الکتریکی زمین یا مقاومت ویژه خاک

مقاومت خاک در سراسر جهان بسیار متفاوت است و به صورت فصلی تغییر می کند. مقاومت به شدت تحت تأثیر محتوای الکترولیت‌های موجود در خاک، میزان رطوبت آن و حتی دمای آن است. بنابراین اندازه گیری و دانستن مقاومت ویژه خاک یک منطقه، کمک می‌کند قبل از اجرای سیستم زمین در آن منطقه با استفاده از روش های ریاضی و یا مدل سازی نرم افزاری نوع و تجهیزات سیستم اتصال زمین مناسب آن منطقه طراحی و پیش بینی شود تا از هدر رفت هزینه‌های اضافی جهت اجرای سیستم‌های زمین نامناسب با آن منطقه جلوگیری شود[۶،۷].

برای جلوگیری از سردرگمی احتمالی، درک اساسی از معنی اصطلاحات مقاومت خاک و مقاومت ویژه خاک و تفاوت آنها با اهمیت است. به بیان ساده تر، مقاومت که با حرف R نشان داده می‌شود، کمیت یک ماده‌ی فیزیکی خاص می‌باشد که وابسته به اندازه و شکل آن ماده است. در حالی که مقاومت ویژه که با مشخصه حرف یونانی ρ نشان داده می‌شود، صرف نظر از شکل و اندازه آن یک ویژگی ذاتی ماده است. مقاومت ویژه خاک (Soil Resistivity) مقداری است که نشان می‌دهد یک حجم معینی از خاک (مکعبی از خاک به طول، عرض و ارتفاع یک متر) چقدر در برابر عبور جریان الکتریکی مقاومت می‌کند. این مقدار یک پارامتر مهم در سیستم‌هایی است که وابسته به عبور جریان از زمین می‌باشند[۶،۷].

اندازه مقاومت ویژه خاک می‌تواند از یک اهم-متر (آب دریا) تا چند میلیون اهم-متر (ماسه سنگ) تغییر یابد. همانطور که در ابتدا بیان شد مقاومت خاک همانند کیفیت خاک ممکن است به شدت با توجه به عواملی چون دما، رطوبت، مواد شیمیایی موجود در خاک و فشردگی آن وابسته باشد و با توجه به عواملی چون عمق و ناحیه عرضی آن تغییر داشته باشد، بنابراین برآورد مقاومت ویژه خاک براساس طبقه بندی خاک، تنها یک تقریب غیر دقیق می‌باشد[۶،۷].

۲-۱- برآورد مقاومت ویژه خاک

با وجود تعریف نسبتا ساده ای از ρ که در بالا آمده است، تعیین مقدار دقیق آن اغلب به دو دلیل اصلی که در ادامه به آن‌ها می‌پردازیم یک کار پیچیده است:

- زمین یک ساختار همگن ندارد، و از لایه هایی با مواد مختلف تشکیل شده است.
- مقاومت ویژه با توجه به نوع زمین دارای طیف گسترده ای است که محاسبه ی آن نیاز به دانش خوبی از نظر مشخصات خاک دارد.

بنابراین از آنجاییکه مقدار ρ تنوع وسیعی دارد، برآورد خود آن در عمل یک مشکل است، بطوریکه در بسیاری از موارد عملی، یک ساختار زمین

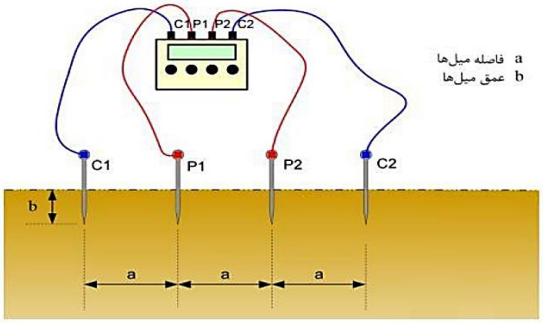
همگن باید با یک مقدار متوسط ρ که براساس تجزیه و تحلیل خاک و یا با اندازه گیری برآورد توان فرض می‌شود، محاسبه و اندازه گیری شود[۷]. تکنیک های تعیین شده ای برای اندازه گیری مقاومت ویژه خاک وجود دارد، اما نکته مهم این است که توزیع موجود در لایه های خاک مورد استفاده شده در سیستم زمین باید در طول اندازه گیری، نصب و اجرا شبیه سازی شود. در نتیجه اندازه گیری همیشه باید با دقت تفسیر شود.

در همین راستا در زمان تهیه ی اطلس مقاومت ویژه خاک حوزه عملیاتی شرکت توزیع برق شمال استان کرمان، ابتدا تحت شرایط فصلی و بازه های زمانی منطبق بر استاندارد، مقاومت ها توسط دستگاه های تست مقاومت ویژه خاک (دستگاه ارت سنج چهارسیمه کیوریتسو مدل ۴۱۰۶) و روش متداول چهار نقطه ای ونر Wenner که مورد تایید IEEE Std.81 هم می‌باشد اندازه گیری و ثبت شده و سپس این مقادیر با مدل سازی لایه های خاک هر منطقه در نرم افزارهای تخصصی مانند CymGRD و CDEGS تفسیر و خطایابی شده است. که این مهم منجر به ایجاد یک بلنک جامع و اطلس کاربردی از مقاومت ویژه خاک در حوزه های عملیاتی این شرکت شده است.

علیرغم اینکه کارشناسان معاونت مهندسی و نظارت شرکت توزیع برق شمال کرمان پس از مدل سازی لایه های خاک از ماژول Grid نرم افزار CymGRD و ماژول Resap نرم افزار CDEGS جهت تعیین پارامترهای تخصصی سیستم زمین و تجهیزات آن استفاده می‌نمایند، نویسندگان این مقاله بدلیل اینکه صرفا تاثیر مدل سازی لایه های خاک در تعیین روش اجرایی و برآورد مقاومت الکتریکی سیستم اتصال زمین را برجسته سازند و همچنین وجود محدودیت‌های دسترسی به ماژول‌های بروز و نرم افزارهای تخصصی جدید این حوزه در کشور، سعی داشته با استفاده از نرم افزارهای پرتابل مانند نرم افزار G.E.M شرکت ERICO و یا نرم افزار تحت پلتفرم اندروید Earthing Calculator که هر دو بر پایه استاندارد BS7430 نوشته شده اند، صرفا به برآورد مقاومت الکتریکی سیستم های اتصال زمین شبکه های توزیع پرداخته شود و از محاسبات تخصصی مهم (از جمله امپدانس حلقه اتصال کوتاه، ولتاژ گام، ولتاژ تماس، سطح مقطع هادی اتصال زمین و...) در این مقاله پرهیز شده است[۸،۹]. در ادامه جزییات مراحل فوق با بیان یک مثال عملی و مقایسه نتایج آن، مورد مطالعه قرار داده شده است.

۳- مدل سازی لایه های خاک با نرم افزارCymGRD

نرم افزار CymGRD امکان طراحی سیستم اتصال زمین را برای زمین های یکنواخت و دولایه افقی فراهم می‌نماید، و ولتاژهای تماس و گام را بر اساس استاندارد IEEE محاسبه می‌کند. این نرم افزار پارامترهایی مانند اندازه و دوره زمانی جریان خطا، ارتفاع و ضخامت لایه سطحی محل (ضخامت کف پوش محل مانند آسفالت، موزاییک یا...جهت محاسبه ولتاژ تماس گام قابل تحمل افراد) و وزن بدن را از کاربر دریافت کرده و با استفاده از مدول های خاک، شبکه و دیاگرام ها عملیات مدل سازی لایه های خاک را انجام می‌دهد. ازآنجاکه اندازه گیری مقاومت ویژه خاک با روش Wenner انجام شده است شکل (۱) (فواصل بین الکترودهای همجوار یکسان می‌باشد[۱،۲])، در شکل (۲) نتایج مقادیر اندازه گیری شده مقاومت ظاهری در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.



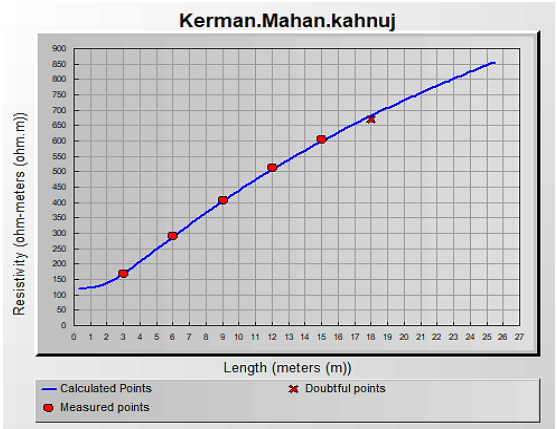
شکل (۱) : اندازه گیری مقاومت ویژه خاک به روش ونر

	Enabled	Probe distance (m)	Resistivity (ohm-m)
1	☑	3	168.2
2	☑	6	290.02
3	☑	9	407.05
4	☑	12	510.8
5	☑	15	605.11
6	☑	18	669.3
7	☑		

Soil Measurements | Buses | Electrodes | Asymmetrical Conductors | Symm

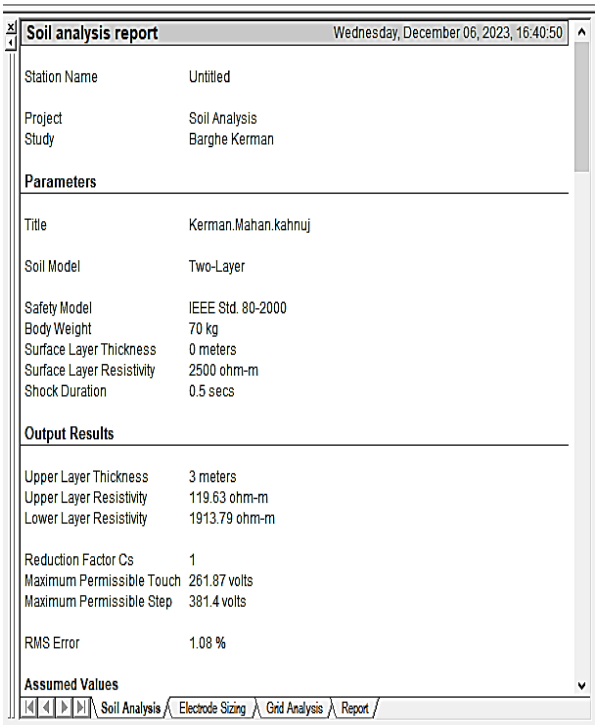
شکل (۲) : مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده با روش ونر

در شکل (۳) مدل سازی لایه های خاک در نرم افزار CymGRD با توجه به داده های فوق نشان داده شده است.



شکل (۳) : مدل سازی لایه های خاک در نرم افزار CymGRD

در ادامه شکل (۴) گزارش آنالیز لایه های خاک منطقه را با خطای تقریبی ۱.۰۸درصد نشان می‌دهد.



شکل (۴) : گزارش آنالیز لایه های خاک در نرم افزار CymGRD

همانگونه که از نتایج خروجی از نرم افزار CymGRD در شـکل (۴) دیده می‌شـود خاک منطقه مورد مطالعه (روسـتای کهنوج ماهان) دارای دو لایه ناهمگن و با مقاومت های ویژه بسیار متفاوت می‌باشد. به طوریکه مقاومت ویژه خاک تا عمق ۳ متر (لایه‌ی بالایی خاک) حدود ۱۱۹.۶ اهم متر است و در عمق بیشـــتر از ۳ متر (لایه‌ی پایینی خاک) حدود ۱۹۱۳.۷ اهم متر می‌باشد.

از این رو در این پروژه روش مناسب اجرایی سیسـتم اتصال زمین اسـتفاده از الکترودهای زمین یکپارچه یا حفر چاه‌های ارت با عمق حداکثر ۳ متر به جای حفر چاه‌های ارت عمیق (بیش از ۳ متر) و رفتن به لایه ی پایین خاک با مقاومت ویژه بسیار بالاتر، خواهد بود.

۴- برآورد مقاومت الکتریکی زمین با نرم افزار

شـکل (۵) مقادیر مقاومت الکتریکی زمین، که براسـاس مقاومت ویژه خاک محاسـبه شـده اسـت را برای روش اجرایی الکترودهای میله ای ۳ متری پیاپی (با فاصـله ۶ متر) نشـان می‌دهد. این شـکل در فصـل پنجم آخرین دستورالعمل سیستم اتصال زمین شبکه های توزیع شرکت توانیر[۱] آمده است.

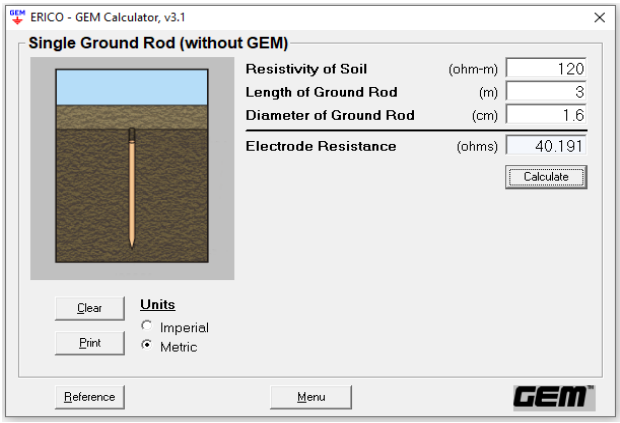
مقاومت مخصوص خاک / تعداد الکترود میله‌ای	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰
۱۰	۳,۲	۱,۲	۰,۸	۰,٦	۰,٥	۰,٤	۰,٤	۰,۳	۰,۳	۰,۳
۲۰	٦,٤	۲,٥	۱,٦	۱,۳	۱,۱	۰,۹	۰,۸	۰,۷	۰,٦	۰,٦
۳۰	۹,٦	۳,۷	۲,٥	۱,۹	۱,٦	۱,۳	۱,۲	۱,۰	۰,۹	۰,۹
٥۰	۱٦,۰	٦,۲	٤,۲	۳,۲	۲,٦	۲,۲	۱,۹	۱,۷	۱,٦	۱,٤
۷۰	۲۲,٤	۸,۷	٥,۸	٤,٥	۳,۷	۳,۱	۲,۷	۲,٤	۲,۲	۲,۰
۱۰۰	۳۱,۹	۱۲,٥	۸,٤	٦,٤	٥,۲	٤,٥	۳,۹	۳,٥	۳,۱	۲,۹
۱۲۰	۳۸,٤	۱٥,۰	۱۰,۰	۷,۷	٦,۳	٥,٤	٤,۷	٤,۲	۳,۸	۳,٤
۱۳۰	٤۱,٦	۱٦,۲	۱۰,۹	۸,۳	٦,۸	٥,۸	٥,۱	٤,٥	٤,۱	۳,۷
۱٥۰	٤۸,۰	۱۸,۷	۱۲,٥	۹,٦	۷,۹	٦,۷	٥,۹	٥,۲	٤,۷	٤,۳

شکل (۵) : مقادیر مقاومت زمین محاسبه شده در روش اجرایی الکترودهای میله ای ۳ متری پیاپی با فاصله ۶ متر [۱]

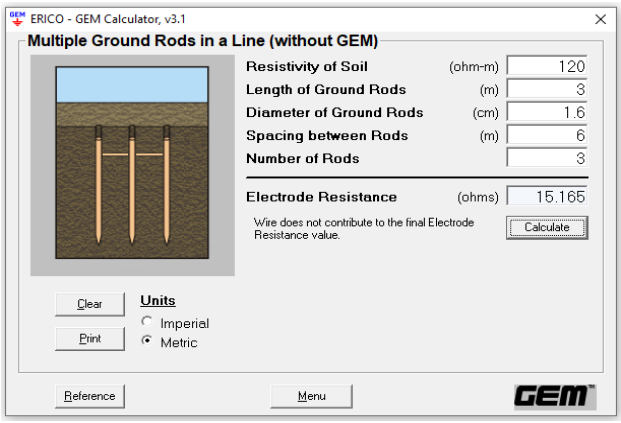
همانطور که از جدول شـکل (۵) مشـخص اسـت (اعداد هایلایت شـده) در منطقه ایی که مقاومت ویژه خاک آن ۱۲۰ اهم متر می‌باشـد، با اجرای یک الکترود ۳ متری به مقاومت الکتریکی حدودی ۳۸ اهم و یا با اجرای ۳ الکترود موازی به مقاومت الکتریکی ۱۰ اهم خواهیم رسید. نتایج حاصل از مدل سـازی روش اجرایی فوق (الکترودهای میله ای پیاپی) برای منطقه مورد مطالعه، با کمک نرم افزار Earthing Calculator در شـکل (۶) و شکل (۷) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۸) و شکل (۹) نتایج مدل سازی روش فوق در نرم افزار محاسبگر سیستم اتصال زمین شرکت ERICO نشان داده شده است.

شکل (۶): مدل سازی روش اجرایی یک الکترود میله ای ۳ متری در نرم افزار Earthing Calculator

شکل (۷): مدل سازی روش اجرایی الکترودهای میله ای ۳ متری پیاپی در نرم افزار Earthing Calculator



شکل (8): مدل سازی روش اجرایی یک الکترود میله ای ۳ متری در نرم افزارمحاسبه گرسیستم اتصال زمین شرکت ERICO



شکل (9): مدل سازی روش اجرایی الکترود میله ای ۳ متری پیاپی در نرم افزارمحاسبه گرسیستم اتصال زمین شرکت ERICO

۵- واقعیت سنجی مقاومت های سیستم زمین برآورد شده

جهت واقعیت سنجی مقادیر برآورد شده در منطقه ی مورد مطالعه سه دستگاه ارت کوبشی ۳ متری (با فاصله ی ۶ متر) بوسیله ی هادی اتصال زمین از نوع سیم فولادی روکش گالوانیزه با مقطع $۷۰mm^2$ موازی شد. که همانگونه در شکل (۱۰) مشخص است به مقاومت الکتریکی ۹.۷ اهم دست یافته شد (ارت سنج مورد استفاده کیوریتسو مدل ۴۱۰۵a می‌باشد). که این میزان از دقت با وجود اتصالات پیچی مسیر هادی اتصال زمین و عدم استفاده از مواد کاهنده مقاومت الکتریکی زمین بسیار شگفت انگیز می‌باشد.

شکل (۱۰) : مقاومت الکتریکی زمین واقعی در روش اجرایی الکترودهای میله ای ۳ متری پیاپی با فاصله ۶ متر

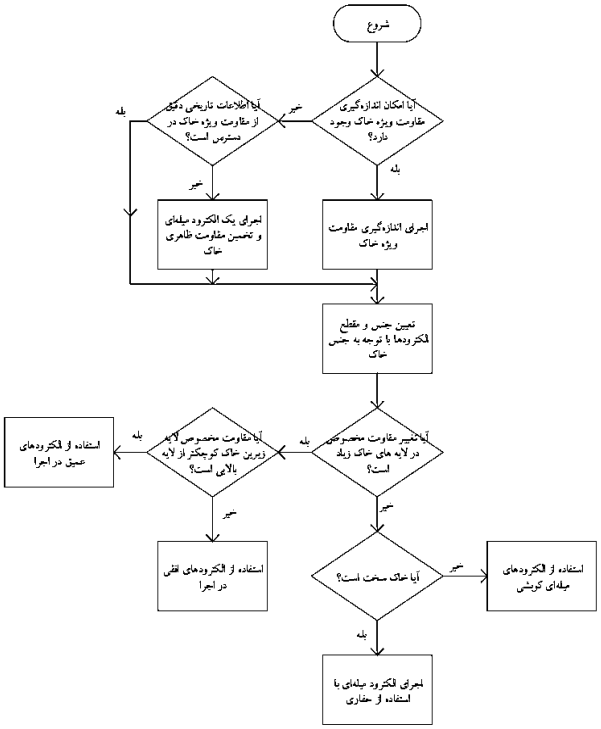
۶- نتیجه

با مقایسه مقادیر هایلایت شده در شکل (۵) و نتایج بدست آمده از نرم افزارهای مدل ساز برای منطقه مورد مطالعه، میتوان به این نتیجه رسید مقاومت الکتریکی سیستم های اتصال زمین با کمک این نرم افزارها پس از آنالیز لایه های خاک و انتخاب روش اجرایی مناسب با خطای ناچیز و قابل قبولی برآورد شده است. در شکل (۱۱) نتایج فوق با مقاومت الکتریکی سیستم زمین اجرا شده مقایسه شده است.

مقاومت الکتریکی طبق جدول آخرین دستورالعمل سیستم اتصال زمین شبکه های توزیع [۱]	مقاومت الکتریکی برآورد شده با نرم افزار Earth Calculation	مقاومت الکتریکی برآورد شده با نرم افزار ERICO	مقاومت الکتریکی سیستم اتصال زمین اجرا شده
۱۰Ω	۱۰,۷۶Ω	۱۵,۱۶۶Ω	۹,۷Ω

شکل (۱۱) : مقایسه مقاومت الکتریکی زمین های برآورد شده با سیستم زمین اجرا شده

با توجه به نتایج بدست آمده به نوعی میتوان گفت با مدل سازی و یا در اختیار داشتن آنالیز لایه های خاک هر منطقه تا حدودی روش مناسب اجرای سیستم اتصال زمین آن منطقه قابل انتخاب اولیه خواهد بود شکل(۱۲). در ادامه برای اینکه بتوانیم مقاومت الکتریکی حاصل از آن را نیز برآورد نماییم، با استفاده از نرم افزارهای محاسبگر بیان شده در قسمت قبل که در آن‌ها چندین نمونه سیستم زمین تیپ وجود دارد (با الکترودهای مختلف قائم و افقی)، با وارد کردن پارامترهایی مانند: میزان مقاومت ویژه خاک، میزان مقاومت ویژه مواد کاهنده مورد نظر، ابعاد الکترود انتخابی (که با توجه به مقاومت ویژه لایه های خاک انتخاب می‌شود) و ... مقاومت الکتریکی سیستم زمین مورد نظر با میزان خطای قابل قبول برآورد خواهد شد. که این مدلسازی می‌تواند کمک بسیار زیادی به طراحان و مجریان سیستم اتصال زمین در شبکه های توزیع داشته باشد تا علاوه بر جلوگیری از هدر رفت وقت و سرمایه های شرکت های توزیع، تنوع زدایی از روش های اجرایی سنتی و غیر استاندارد سیستم های اتصال زمین را به همراه خواهد داشت.



شکل (۱۲) : فرآیند انتخاب مناسب روش اجرایی سیستم اتصال زمین [۱]

مراجع

[۱] کمیته سیستم اتصال زمین شبکه های توزیع، **دستورالعمل سیستم اتصال زمین شبکه های توزیع**، شرکت مادر تخصصی توانیر، ۱۴۰۲.

[۲] سلطانی، محسن، شجاعیان، شاهرخ، **"تهیه اطلس مقاومت مخصوص خاک استان فارس در مناطق مختلف در ۲۱شهرستان تابعه و نتایج آن"**، کنفرانس منطقه‌ای سیرد، ششمین دوره، ۰۲۱۴۱-۰۲۱۳۵، تهران، ایران، ۱۳۹۶.

[3] *BS7430 Std.*, "Code of practice for protective earthing of electrical installations", 2011.

[4] *IEEE Std. 80-2013*, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding ", New York, 2013.

[5] *IEEE142-200 Std*, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems",2007.

[۶] محمدی، رضا، قلیزاده، مهیار، ابتهاج، مهدی، **اصول سیستم اتصال زمین در شبکه های توزیع**، ویرایش اول، جلد اول، واحد صنعتی امیرکبیر، انتشارات جهاد دانشگاهی، ۱۴۰۲.

[7] *IEEE Std. 81TM-1983*, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System".

[8] Earthing & bonding Calculator Application, Version 1.0. " *Calculating the electrical equipment earthing electrodes (Re) all over the world develops by Hadi Basravi Team*".

[9] ERICO GEM Calculator Application, Note3, "*Grounding & Bonding for Electrical Systems develope by ERICO Inc*".