

تأثیر رطوبت خاک در طراحی ارتینگ با استفاده از روش تحلیل اجزاء محدود (FEM)

محمد بخشی پور^{۱*}، بهروز رضایی علم^۲، سجاد صمدی نسب^۳

^۱ و ^۲ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

^۳ bakhsipour_m@yahoo.com

^۲ rezaealam@gmail.com

^۳ sajad.samadinasab@gmail.com

چکیده - حفاظت از تجهیزات، ایمنی افراد و تداوم تامین برق از اهداف اصلی سیستم زمین هستند. برای طراحی دقیق سیستم زمین، تعیین توزیع پتانسیل بر روی سطح زمین و مقاومت معادل سیستم ضروری است. آگاهی از چنین پارامترهایی اجازه چک کردن امنیت ارائه شده توسط سیستم زمین، هنگامی که خرابی در سیستم های قدرت وجود دارد را می دهد. یک روش جدید برای طراحی سیستم ارتینگ با استفاده از روش اجزاء محدود (FEM) در این مقاله ارائه شده است. در این روش، تأثیری که رطوبت خاک بر رفتار مقاومت مخصوص زمین دارد در طراحی سیستم ارتینگ در نظر گرفته شده است. سیستم ارتینگ در دو حالت الکتروود میله عمودی و صفحه فلزی دفن شده در زمین در نظر گرفته شده است. مقاومت سیستم زمین، عامل بسیار مهمی در فرایند طراحی است که با استفاده از روش اجزاء محدود محاسبه می شود. روش المان محدود برای تخمین حل معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی که حاکم بر رفتار سیستم است استفاده شده است. *COMSOL Multiphysics 4.4* یکی از بسته هایی است که با *FEM* کار می کند که به عنوان یک ابزار در این طراحی استفاده می شود. در نهایت به منظور صحت نتایج ارائه شده، مقادیر مقاومت طراحی شده توسط *COMSOL Multiphysics* با مقادیر فرمول تحلیلی اثبات شده برای مقاومت زمین، مقایسه شده است.

کلید واژه- روش اجزاء محدود (FEM)، پتانسیل زمین، شبکه های زمین (grounding grids)، مقاومت زمین، مدل سازی.

با ایمنی افراد و تجهیزات مرتبط است. اگر مقاومت زمین بسیار بالا و خطای زمین رخ دهد، کارکنان ممکن است کشته و یا زخمی و تجهیزات ممکن است آسیب بینند. مقاومت زمین در سیستم های قدرت الکتریکی به عنوان U / i ، که در آن U پتانسیل الکتریکی شبکه زمین و i جریان خطای زمین (جریان الکتریکی که از طریق شبکه زمین به زمین جاری می شود) تعریف شده است.

زمین به عنوان یک نیمه هادی تلقی می شود، در حالی که الکتروود زمین به خودی خود یک هادی خالص است. آگاهی از شرایط محلی خاک الزامی است و اولین گام در فرآیند طراحی است. طراحی دقیق سیستم زمین نیاز به یک ارزیابی دقیق از شرایط مکان خاک دارد. این عوامل باعث طراحی یک سیستم زمین پیچیده شده است.

روش های مختلف محاسبه، بر اساس تعیین ولتاژ شبکه و یا براساس "ظرفیت خازنی شبکه" هستند. روش اول براساس تعیین پتانسیل شبکه زمین، معمولاً با استفاده از روش تصویر [۲-۳] می باشد. روش دوم براساس تعیین ظرفیت خازنی الکتروود بر اساس رابطه بین بار الکتریکی و پتانسیل، هنگامی که میدان

۱- مقدمه

شبکه های سیستم زمین، بدون شک مهم ترین بخش یک سیستم الکتریکی از نقطه نظر ایمنی افراد و تجهیزات هستند. ایمنی، قابلیت اطمینان، و بهره برداری صحیح از سیستم های قدرت الکتریکی، به کیفیت طراحی و احداث شبکه های زمین آنها بستگی دارد [۱].

ارتینگ هنر برقراری اتصال به زمین به منظور حفاظت از تجهیزات سیستم قدرت و پرسنل، از خطر شوک الکتریکی می باشد. سیستم زمین کامل ممکن است تنها شامل یک الکتروود زمین، یک گروه کامل از الکتروودها با شبکه زمین، و یا هر چیزی در میان و فراتر از آن باشد. در بسیاری از برنامه های کاربردی زمین کردن، مقاومت زمین کم، برای پاسخگویی به استانداردهای ایمنی برق ضروری است. مقاومت زمین برای یک جریان خطا داده شده، تعیین کننده ولتاژهای خطرناک است که در داخل و یا اطراف پست و یا ایستگاه تولید (نیروگاه) می توان وجود داشته، می باشد. در نتیجه، مقاومت زمین یک پارامتر فنی مهم است که

الکتریکی موجود در خاک محاسبه شده است، می باشد. هنگامی که پتانسیل شبکه زمین و جریان خطای زمین را ارزیابی شده است، مقاومت زمین شبکه زمین با استفاده از قانون اهم محاسبه می گردد. فرمول های ساده برای محاسبه مقاومت زمین در شبکه های زمین مربعی توسط دوایت و همکاران [۴-۷]، در شبکه های مستطیل شکل توسط شوارتز [۸]، و در شبکه های زمین از هر شکلی توسط Thapar و همکارانش [۹] مطرح شده است.

روش های محاسبه کردن جریان شبکه زمین، تعیین کننده مقاومت زمین ولتاژهای گام و تماس، با استفاده از روش های مختلف ریاضی است، با بکاربردن فرضیه ای که به ما اجازه مدل کردن سیستم واقعی در سیستم های نظری با نتایج قابل مقایسه را می دهد. این مطالعات معمولاً برای شبکه های زمین متقارن با خاک های یکنواخت، دو لایه، و یا چند لایه انجام می شود [۱۰-۱۳].

مطالعاتی بر اساس روش عناصر محدود (FEM) برای محاسبه مقاومت زمین شبکه های زمین استفاده شده است. FEM این اجازه را می دهد تا مقاومت زمین را به عنوان یک تابع از مقاومت ویژه خاک به دست آورده شود. سپس، توجیه استفاده از روش المان محدود در ابعاد مختلف سیستم های زمین امکان پذیر خواهد بود. اولین مطالعات شبیه سازی رفتار شبکه زمین با استفاده از FEM، بر اساس محاسبه مقاومت زمین برای یک پتانسیل شبکه دلخواه بوده است. جریان شبکه برای تنظیم پتانسیل شبکه با تجزیه و تحلیل جریان جاری (شارجریان) تعیین شده، پس از محاسبه جریان، مقاومت زمین به عنوان خارج قسمت بین تنظیم ولتاژ و جریان محاسبه شده، تعیین گردیده است [۱]. انتخاب اندازه مدل در این روش مشکل بوده و مشروط به مقدار مقاومت زمین محاسبه شده است. برای کاهش خطای مقاومت زمین محاسبه شده، مهندسی برق قدرت، مجبور به تجزیه و تحلیل مدل های با اندازه های مختلف با تعداد بالا گره ها شدند. با توجه به پایین بودن سطح دقت و صحت نتایج و زمان محاسبات طولانی مورد نیاز، این روش بسیار عملی نیست. به عنوان یک نتیجه از مشکلات روش فوق الذکر، یک روش جدید توسعه داده شده است که مقاومت زمین با محاسبه توان تلف شده و یا از انرژی ذخیره شده در مدل تعیین شده است. سپس با انتگرالگیری از چگالی سطحی، اندازه جریان عبوری از میله یا صفحه زمین شده محاسبه شده است. در انتها با تقسیم ولتاژ به جریان، مقاومت سیستم زمین، به دست آورده شده است. این روش دارای مزیت اضافی مستقل بودن از شرایط مرزی،

شکل و اندازه شبکه و ساختار خاک است. روش ارائه شده در این مقاله در تعیین فرمول های دقیق برای محاسبه مقاومت زمین در انواع مختلف شبکه زمین، بدون نیاز به ساخت و اندازه گیری تعداد زیادی از شبکه های زمین و یا مطالعه مدل های مقیاس بسیار مفید است.

۲- بررسی روش های ارائه شده

در این بخش روش های سیستم ارتینگ طراحی شده، اثر مقاومت ویژه خاک، ساختار مدل خاک، و روش محاسبه مقاومت سیستم ارتینگ، همراه با یک بررسی از روش المان محدود را معرفی شده است.

۲-۱- الزامات سیستم های ارتینگ

اهداف اصلی یک شبکه زمین ایمن عبارتند از:

- محافظت پرسنل در برابر خطرات الکتریکی، با محدود کردن ولتاژهای تماس و گام به مقدار ایمن، برای اطمینان از اینکه اگر خطاهای زمین در پست ها یا ایستگاه های تولید رخ دهد، فرد در مجاورت تجهیزات زمین شده در معرض خطر شوک الکتریکی بحرانی نیست.

- سازگاری الکترومغناطیسی (EMC)، محدودیت اختلالات الکترومغناطیسی شبکه تامین برق، اطمینان از ایمنی و تداوم تجهیزات برق با محدود کردن اضافه ولتاژهایی که می توان تحت شرایط بهره برداری شدید و یا در صورت بروز حادثه ظاهر شود.

- اطمینان از عملکرد صحیح تجهیزات و دستگاه های حفاظت الکتریکی با فعال کردن خطاهای زمین، برای شناسایی و انتخاب اقدامات قطع آن زون هایی از تاسیسات الکتریکی که در آن خطاهایی رخ می دهد.

- به منظور ارائه وسیله هایی برای حمل جریان های الکتریکی به زمین تحت شرایط عادی و خطا، بدون تجاوز از هر عامل و محدودیت های تجهیزات.

- حفاظت از ساختمان در برابر رعد و برق را فراهم می کند.

۲-۲- اجزا و پارامترهای طراحی سیستم ارتینگ

- الکتروود زمین: یک هادی فلزی یا یک سیستم هادی های فلزی به هم متصل، و یا دیگر قطعات فلزی، به همان روش تعبیه شده در زمین و الکتریسیته متصل به آن عمل می کند.

• زمین: محل زمین شده باید ابتدا برای تعیین ساختار خاک، نوع، عمق و مقاومت ویژه هر لایه ای از خاک، و به داشتن یک پیش زمینه بررسی کابل های دفن شده، لوله های فلزی، و غیره مورد بررسی قرار گیرد.

• مقاومت ویژه زمین (ρ): مقاومت اندازه گیری شده یک متر مکعب زمین که در واحد $\Omega \cdot m$ بیان شده است. مقاومت ویژه خاک عامل کلیدی که تعیین کننده مقاومت شارژ کردن الکتروود خواهد بود و عمق آن باید برای به دست آوردن مقاومت زمین کم هدایت تعیین شود. مقاومت ویژه خاک به طور گسترده ای در سراسر جهان و تغییرات فصلی متفاوت است. هرچه مقاومت ویژه کمتر باشد، الکتروودهای کم تری برای رسیدن به مقدار مقاومت ویژه زمین مورد نظر، مورد نیاز است. این یک مزیت برای دانستن مقدار مقاومت ویژه در مرحله برنامه ریزی بوده، که آن یک نشانه برای تعیین مقدار الکتروود مورد نیاز می باشد [۱۴].

۳- روش اجزاء محدود

در ریاضیات، روش المان محدود (FEM) یک روش عددی برای حل تقریبی با مسائل مقدار مرزی است. این روش مشابه به ایده اتصال بسیاری از خطوط کوچک مستقیم که می تواند یک دایره بزرگتر را تقریب بزند می باشد.

FEM شامل تمام روش ها، برای اتصال بسیاری از معادلات عناصر ساده در طول بسیاری از زیر دامنه های کوچک (که عناصر محدود نامیده می شوند) می باشد که یک معادله پیچیده تر با یک دامنه بزرگتر را تقریب می زند [۱۶]. به طور کلی، FEM شامل سه ماتریس اصلی، که عبارتند از: ماتریس مالکیت، ماتریس رفتار و ماتریس عمل.

$$\{K\} \cdot \{u\} = \{F\} \quad (1)$$

که در آن: $\{K\}$ ماتریس مالکیت، $\{u\}$ ماتریس رفتار و $\{F\}$ ماتریس عمل است.

در کاربردهای الکتریکی، $\{K\}$ می تواند نشان دهنده ثابت گذردهی دی الکتریک، $\{u\}$ نشان دهنده پتانسیل الکتریکی و $\{F\}$ بار الکتریکی می باشد [۱۷].

$$\{u\} = \{F\} \{K\}^{-1} \quad (2)$$

FEM برای مطالعه رفتار بسیاری از سیستم های الکتریکی، با پیدا کردن راه حل های معادله بالا استفاده شده است.

۳-۱- معادله لاپلاس

برای جریان مستقیم ماندگار، رابطه دیفرانسیل به صورت زیر می باشد [۱۸]:

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (3)$$

که در آن: J چگالی جریان است.

قانون اهم در یک نقطه به صورت زیر می باشد:

$$J = \sigma E \quad (4)$$

که در آن: J چگالی جریان، E میدان الکتریکی و σ هدایت الکتریکی رسانا و یا مواد است.

میدان الکتریکی E می تواند به صورت منفی گرادیان پتانسیل الکتریکی به دست آید:

$$E = -\nabla \cdot V \quad (5)$$

• مقاومت ویژه زمین (ρ): مقاومت اندازه گیری شده یک متر مکعب زمین که در واحد $\Omega \cdot m$ بیان شده است. مقاومت ویژه خاک عامل کلیدی که تعیین کننده مقاومت شارژ کردن الکتروود خواهد بود و عمق آن باید برای به دست آوردن مقاومت زمین کم هدایت تعیین شود. مقاومت ویژه خاک به طور گسترده ای در سراسر جهان و تغییرات فصلی متفاوت است. هرچه مقاومت ویژه کمتر باشد، الکتروودهای کم تری برای رسیدن به مقدار مقاومت ویژه زمین مورد نظر، مورد نیاز است. این یک مزیت برای دانستن مقدار مقاومت ویژه در مرحله برنامه ریزی بوده، که آن یک نشانه برای تعیین مقدار الکتروود مورد نیاز می باشد [۱۴]. خاک یکنواخت خاکی است که یک لایه با مقدار ثابت مقاومت ویژه دارد. اندازه گیری های کمکی، لایه های خاک را تعریف و آنها نشان می دهند که مقاومت ویژه تابعی از عمق است [۱۴].

جدول ۱: مقادیر مقاومت مخصوص برای انواع مختلف خاک

مقاومت مخصوص $[\Omega \cdot m]$		نوع زمین
مقدار متوسط	حدود مقدار	
۳۰	۵-۵۰	مرداب و زمین باتلاقی
۱۰۰	۲۰-۲۵۰	خاک رس و زمین زراعی
۲۰۰	۵۰-۳۰۰	ماسه نرم و مرطوب
۵۰۰	۴۰۰-۱۰۰۰	شن یا سنگریزه مرطوب
۱۰۰۰	۵۰-۳۰۰۰	سنگریزه، ماسه یا شن خشک
۳۰۰۰	۲۵۰-۵۰۰۰	زمین سنگلاخ
۱۰۰۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰۰	صخره

• مقاومت ارتینگ: از آنجا که خاک ارائه دهنده یک مقاومت در برابر جاری شدن (شارژ) یک جریان الکتریکی و هادی "ایده آل" نیست، مقداری مقاومت بین الکتروود زمین و "زمین واقعی" همیشه وجود خواهد داشت. مقاومت بین الکتروود زمین و "زمین واقعی" که به عنوان مقاومت زمین یک الکتروود شناخته شده است، و آن به مقاومت ویژه خاک، نوع و اندازه الکتروود و عمقی

که در آن: V پتانسیل الکتریکی است.

از معادلات (۳) و (۵)، معادلات زیر به دست آمده است:

$$\sigma \nabla \cdot \mathbf{V} = E \quad (6)$$

$$\sigma \nabla \cdot (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (7)$$

در نهایت، معادله لاپلاس به صورت زیر است:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (8)$$

برای تعیین توزیع خاص از میدان الکتریکی، به عنوان مثال، برای تعیین منحصر به فرد حل معادله دیفرانسیل، شرایط مرزی داده شده در مرز منطقه پژوهش مورد نیاز است. سه نوع شرایط مرزی وجود دارد.

• مرزی که دور از منبع جریان، شرط مرزی دیریکله [۱۹] را

معرفی می کند:

$$V = 0 \quad (9)$$

یا

$$V = V_0 \quad (10)$$

که در آن: V_0 مقدار شناخته شده است.

• سطح عایق (به عنوان مثال، زمین)، که شرط مرزی نیومن

[۱۹] را معرفی می کند:

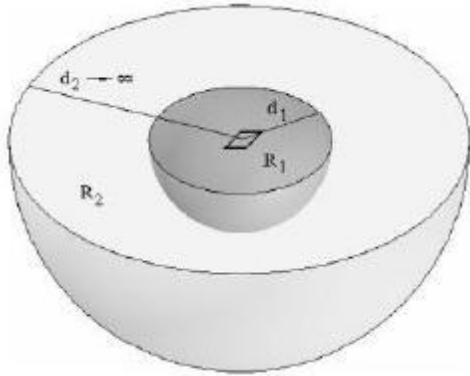
$$\frac{\partial V}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

۲-۲- روش اجزاء محدود سیستم زمین

مطالعات اخیر در مورد تجزیه و تحلیل سیستم زمین بر اساس روش اجزاء محدود (FEM) است. FEM مورد استفاده برای تعیین مقاومت اتصال به زمین، یک طراحی و یا یک منطقه زمین شده دارند. آنها نتایج دقیق تری در مقایسه با روش مرسوم اتصال به زمین ارائه می دهند [۲۰]. روش قدیمی FEM، از تجزیه و تحلیل جریان جاری با استفاده از پتانسیل الکتروود تشکیل شده است. بعد از اینکه جریان محاسبه می شود، مقاومت زمین را می توان با تقسیم ولتاژ به جریان پیدا کرد. در این روش، نقطه ضعف اصلی، انتخاب اندازه مدل مانند فاصله زمین در نظر گرفته شده با شروع از الکتروود اتصال به زمین می باشد. از آنجا که تجزیه و تحلیل هر پتانسیل در خاک برای یک نقطه انتخاب شده، از الکتروود زمین تا این نقطه در نظر گرفته می شود.

روش جدید FEM توسط محققان توسعه داده شده است، یعنی اینکه بر نقطه ضعف اصلی روش های قدیمی FEM غلبه

کرده اند. در مرحله اول، آنها فرض می کنند که مقاومت سیستم زمین، پارامتری است که به پتانسیل و یا جریان در الکتروود بستگی ندارد. فرض دوم این است که، این منطقه یک سطح صاف بی نهایت است. ساختار مدل برای این راه حل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: مدل جدید FEM خاک

d_2, d_1, R_2, R_1 متغیرهایی مدل می باشند.

که در آن: d_1 فاصله از الکتروود به نقطه ای که مدل نیمه کره دارای اختلالات سطحی هم پتانسیل است. d_2 فاصله از الکتروود به نقطه ای که پتانسیل الکتریکی به صفر می رود. با مشخصات فنی، این نقطه در بی نهایت است. R_1 مقاومت در داخل سطح نیمه کره است. R_2 مقاومت در خارج از سطح نیمه کره است.

از آزمون های طرح های مختلف، d_1 می تواند توسط رابطه زیر تعیین شود:

$$d_1 = \frac{D}{2} + 30 \quad (12)$$

که در آن: D فاصله قطری الکتروود اتصال به زمین است.

مقاومت الکتروود اتصال به زمین را می توان به راحتی از شکل (۱) به دست آورد:

$$R = R_1 + R_2 \quad (13)$$

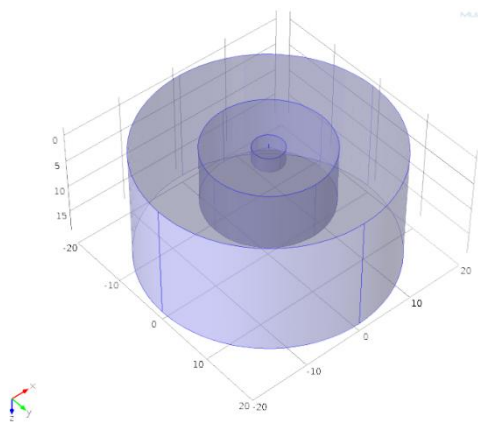
R_2 از معادله زیر محاسبه می شود:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi d_1} \quad (14)$$

که در آن: ρ مقاومت ویژه خاک است.

تعیین R_1 ، به سادگی R_2 نیست. این جایی است که تجزیه و تحلیل المان محدود دقیقاً آنجا اتفاق می افتد. به طور کلی، R_1 می تواند از تلف شده داده شده در معادله زیر محاسبه می شود:

طراحی ساخته شده، شبیه سازی یک میله زمین عمودی و یک صفحه هدایت شده به یک حجم خاک یکسان یکنواخت با مقاومت ویژه ثابت است.



شکل ۲: طراحی ارتینگ ارائه شده

$$R_1 = \frac{(\text{voltage})^2}{\text{dissipated power}} \quad (15)$$

R_1 می تواند با جایگزین کردن شرایط در معادله (۱۵) تفصیل داده شود [۱].

$$R_1 = \frac{(V_G - V_B)^2}{\int_V \sigma E^2 dV} \quad (16)$$

که در آن: V_G : پتانسیل در الکتروود اتصال به زمین، V_B : پتانسیل در مرز $d1$ ، E میدان الکتریکی، dV حجم عنصر و σ رسانایی الکتریکی است.

در روش جدید توسعه داده شده، با محاسبه توان تلف شده و یا از انرژی ذخیره شده (توسط میدان الکتریکی)، مقاومت زمین در مدل تعیین می شود [۱].

۴- روش جدید طراحی و پیاده سازی سیستم ارتینگ

طراحی و پیاده سازی سیستم ارتینگ به دو قسمت تقسیم شده است: طراحی الکتروود و طراحی خاک. هر کدام از این بخش ها دارای معیارهای طراحی خود، پارامترها، و محدودیت هایی است. طراحی و پیاده سازی با استفاده از یک بسته ویژه نرم افزار FEM به نام کامسول مولتی فیزیکس ۴،۴ (COMSOL Multiphysics 4.4) انجام شده است. این نرم افزار تجزیه و تحلیل المان محدود را همراه با مش بندی تطبیقی و کنترل خطا، با استفاده از انواع حل کننده های عددی اجرا می کند. طراحی با مشخص کردن ابعاد فضا، که یک فضای ۳ بعدی است، شروع می شود و پس از آن شعاع میله، طول میله، شعاع خاک و طول خاک تعیین می شود. مدل اولیه در کامسول مولتی فیزیکس ۴،۴ کشیده شده است، همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است. این مدل با استفاده از مفاهیم اساسی [۱] و [۱۶] طراحی شده است، که در ادامه به آن پرداخته شده است.

۴-۱ الزامات طراحی و پارامترها

این ایده برای طراحی یک مدل که هر نوع مورد نظر از سیستم های زمین مانند یک میله عمودی پایه، یک میله افقی زمین، یک الکتروود نوع صفحه ای و یا یک نوع الکتروود نیم کره، هدایت الکتریکی به خاک، تجزیه و تحلیل گرادینان ولتاژ در اطراف آن و در سطح خاک، را شبیه سازی می کند. همچنین برای محاسبه مقاومت کل مدل شامل الکتروود، خاک و مقاومت تماس بین الکتروود و خاک از مفهوم FEM استفاده شده است.

۴-۲ طراحی میله سیستم زمین و حوزه نفوذ

تعیین کردن چگونگی تاثیر الکترون های تخلیه الکتروودهای زمین به زمین، یک مفهوم مهم، "حوزه نفوذ" است. حوزه نفوذ، حجم در سراسر خاک است که جریان تخلیه های الکتروود به خاک می باشد. بنابراین، حوزه نفوذ را می توان به بیشتر از ۱،۱ برابر طول میله، (در این زمینه هیچ میله های دیگر نباید وجود داشته باشد، برای جلوگیری از تداخل بین حوزه نفوذ هر میله)، و با داشتن حداکثر بهره وری از سیستم زمین در نظر گرفته می شود. دسته ای از میله های عمودی در زمین قرارداد می شوند. میله مسی، به عنوان یک عنصر استوانه ای شکل با شعاع r_r و طول l_r و ساخته شده از مس طراحی شده است، که ضریب هدایت مس $\sigma_r = 5.99 * 10^7 (\Omega.m)^{-1}$ و مقاومت ویژه مس $\rho_r = 1.66 * 10^{-8} \Omega.m$ است. میله به صورت عمودی در خاک قرارداد می شود. طول و شعاع میله را به ترتیب 1m و 0.008m انتخاب می شوند.

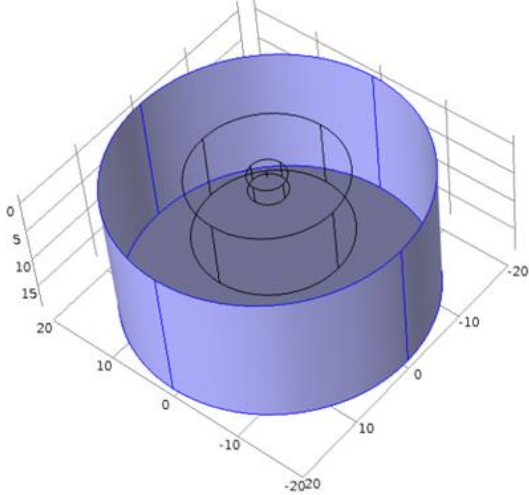
۴-۳ طراحی صفحه سیستم زمین

صفحه مسی به ابعاد $۴۰ * ۴۰ * ۵/۵$ سانتیمتر برای مناطق مرطوب شمالی کشور و $۵۰ * ۵۰ * ۵/۵$ سانتیمتر برای مناطق نیمه خشک مانند تهران و $۷۰ * ۷۰ * ۵/۵$ سانتیمتر برای مناطق کویری استفاده می شود.

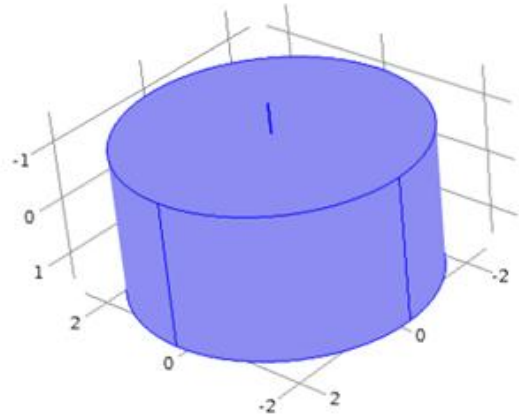
۴-۴ طراحی خاک سیستم زمین

تصور می شود که خاک در سیستم های زمین به عنوان یک ماده نیمه رسانا باشد. خاک در مدل طراحی شده، یکنواخت در نظر گرفته شده ، با داشتن مقاومت ویژه ثابت ρ_s ، و رسانایی ثابت σ_s است. خاک به عنوان یک عنصر استوانه ای شکل، که دارای شعاع r_s و طول یا ارتفاع l_s بوده در اطراف میله زمین که در مرکز خاک قرار داده شده طراحی شده است.

متر در نظر گرفته می شود را soil در نظر می گیرند (شکل ۴). لایه بعدی یا استوانه سوم، با شعاع و ارتفاع بیشتر از ۱۰ متر را که تاثیر چندانی در مقاومت مخصوص خاک ندارد را به صورت بی نهایت فرض می کنند(شکل ۵).



شکل ۵: مدل بی نهایت



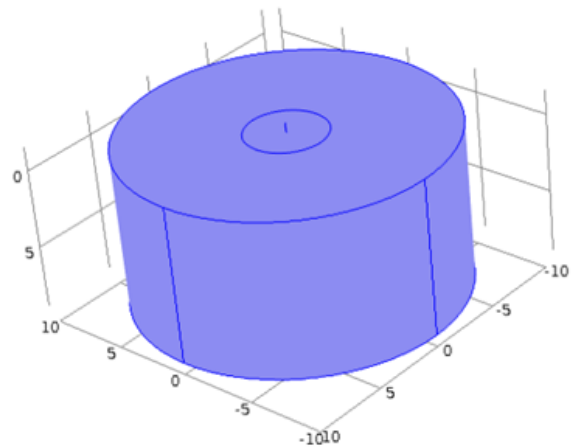
شکل ۳: مدل چاه

تغییرات مقاومت ویژه خاک نسبت به تغییرات دما و رطوبت به صورت جداول ۲ و ۳ می باشد.

جدول ۲: تغییرات مقاومت ویژه خاک نسبت به تغییرات دما

مقاومت مخصوص ($\Omega.cm$)	فاراد (F)	سانتی گراد ($^{\circ}C$)
7200	68	20
9900	50	10
13800	32	0 (آب)
30000	32	0 (یخ)
79000	23	-5
330000	14	-15

خاک ماسه ای در ۱۵/۲ درصد



شکل ۴: مدل soil

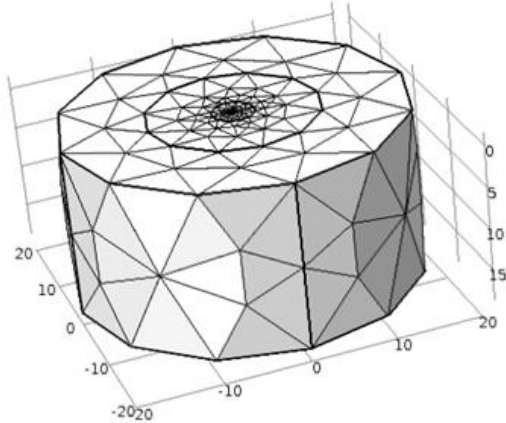
جدول ۳: تغییرات مقاومت ویژه خاک نسبت به تغییرات رطوبت

درصد رطوبت بر اساس وزن	مقاومت مخصوص ($\Omega.cm$)	
	خاک رس مخلوط با شن	خاک سطحی
0	$>1000 \times 10^6$	$>1000 \times 10^6$
۲/۵	۲۵۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰
۵	۱۶۵۰۰۰	۴۳۰۰۰

در روش جدید ارائه شده، خاک اطراف میله به سه استوانه تقسیم می شود. استوانه اول اطراف میله که به آن چاه ارت گفته می شود با شعاع و ارتفاع ۲٫۵ برابر طول میله ، برای به دست آوردن حجم کافی از خاک که حداقل دشارژ جریان موثر را تضمین می کند در نظر گرفته شده است(شکل ۳). استوانه دوم یا خاک موثر در مقاومت مخصوص، که معمولا با شعاع و ارتفاع ۱۰

۵-۱- مقداردهی اولیه مش

FEM با مثلث های منحصر به فرد خود شناخته می شود. مقداردهی اولیه مش به طراح اجازه دیدن مثلث های ساخته شده توسط حل کننده کامسول مولتی فیزیکس ۴,۴ را می دهد که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: مش بندی مدل طراحی شده

۵-۲- نتایج طراحی

نتایج بدست آمده با لحاظ کردن تاثیر دما و رطوبت محیط بر روی مقاومت مخصوص خاک که در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است می باشد. شکل ۷ توزیع پتانسیل در سطح خاک و همچنین در سطح یک صفحه با عمق ۰/۵ متر (صفحه شبکه زمین) را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود بیشترین توزیع پتانسیل در سطح صفحه مسی می باشد و هرچه از صفحه مسی دور می شویم توزیع پتانسیل کمتر می شود. در شکل ۸ توزیع پتانسیل در سطح خاک و همچنین در سطح یک میله با عمق ۱ متر را نشان می دهد. در اینجا نیز بیشترین توزیع پتانسیل در سطح میله مسی می باشد و هرچه از میله مسی دور می شویم توزیع پتانسیل کمتر می شود.

۱۰	۵۳۰۰۰	۱۸۵۰۰
۱۵	۱۹۰۰۰	۱۰۵۰۰
۲۰	۱۲۰۰۰	۶۳۰۰
۳۰	۶۴۰۰	۴۲۰۰

۴-۵- تنظیمات مرزی کامسول مولتی فیزیکس ۴,۴

شرایط مرزی واسط بین هندسه مدل و محیط اطراف خود را باید تعریف کرد. شرایط رابط در مرزهای داخلی در هندسه مدل نیز می تواند تنظیم شود. همچنین شرایط مختلف مرزی برای هر مرز تنظیم می شود. برای میله پتانسیل الکتریکی مرزی را روی ۱۰ ولت تنظیم شده است. برای خاک بی نهایت، مرزها به شرح زیر انتخاب می شوند، که در شکل زیر نشان داده شده است:

- در چهار طرف (چهارضلع)، و پایین استوانه خاک، شرایط مرزی زمین تنظیم شدند.
- بالای استوانه خاک، بر روی شرایط مرزی عایق الکتریکی تنظیم شده است.

در حال حاضر مدل به طور کامل طراحی شده است، همه زیر دامنه، همراه با شرایط مرزی برای هر مرز مدل تعریف شده است.

۵- حل معادله لاپلاس مدل

پس از اینکه مدل طراحی شد، به منظور به دست آوردن جواب، معادله لاپلاس باید حل شود. این مدل، مدل حاکم بر معادله لاپلاس است، که معادله حاکم، برای سیستم ارتینگ طراحی شده است. متغیر وابسته، به طور پیش فرض 10V تنظیم شده است، که رفتار پارامتر مورد مطالعه و مورد تجزیه و تحلیل می باشد. همچنین مقدار اولیه پتانسیل الکتریکی را روی مقدار $V(t_0) = 0$ تنظیم شده است. معادله لاپلاس به فرم زیر نوشته شده است:

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V - J^e) = Q_j \quad (17)$$

که در آن: V پتانسیل الکتریکی، σ هدایت الکتریکی، J^e چگالی جریان بیرونی و Q_j چگالی منبع جریان است.

برتری استفاده از روش تجزیه و تحلیل شده توسط *FEM* را نشان می دهد.

جدول ۴: مقایسه مقاومت سیستم زمین روش ارائه شده و روش های مرجع [1] و [9]

مقدار مقاومت	روش
2.16	Thapar
2.31	Sverak
2.12	Schwarz
2.06	Thapar-Gerez
2.26	مرجع [1]
1.8951	روش ارائه شده در مقاله

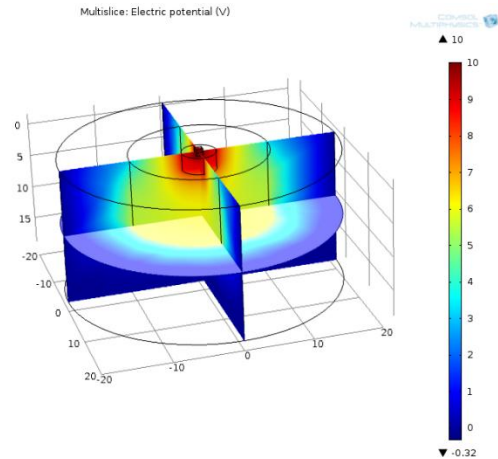
با در نظر گرفتن این نتایج و مطابق جدول ۵، ما می توانیم ببینیم که تفاوت بین مقادیر محاسبه شده و آنهایی که در [۱] پیشنهاد شده است بیش از ۱۸٪ نیست.

جدول ۵: تفاوت بین مقادیر محاسبه شده با دیگر مراجع

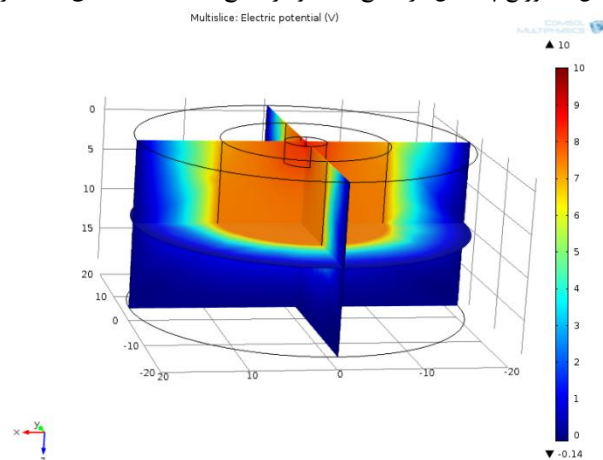
اختلاف مقدار مقاومت %	روش
-12.26	Thapar
-17.96	Sverak
-10.60	Schwarz
-8.00	Thapar-Gerez
-16.14	مرجع [1]

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روشی برای محاسبه مقاومت زمین شبکه های زمین با استفاده از روش *FEM*، با لحاظ کردن اثر رطوبت و دما بر روی مقاومت مخصوص خاک ارائه شده است. مدل *FEM* یک سیستم ارتینگ از یک الکتروود به صورت عمودی دفن شده در زمین و همچنین قرار دادن یک صفحه مسی ارائه شده است. مقدار عددی مقاومت میله و صفحه از *COMSOL* محاسبه شده است. برای طراحی سیستم زمین از نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس استفاده شده است که دارای توانایی طراحی مدل در یک، دو یا سه بعد، محاسبه گرادیان های ولتاژ، چگالی جریان، خاصیت هدایت الکتریکی، پخش بار می باشد. این نرم افزار تجزیه و تحلیل المان محدود را همراه با مش بندی تطبیقی و کنترل خطا، با استفاده از انواع حل کننده های عددی مانند PDEs اجرا می کند. روش ارائه شده در این مقاله در تعیین فرمول دقیق اعمال شده برای محاسبه مقاومت زمین در انواع مختلف شبکه زمین بسیار مفید است. هنگامی که مقاومت زمین و جریان خطای زمین معلوم شود، پتانسیل های در گره های سطح خاک و ولتاژهای تماس و گام می تواند محاسبه شود. نتایج، مزیت و برتری روش ارائه شده و استفاده از روش تجزیه و



شکل ۷: توزیع پتانسیل در سطح خاک و در سطح یک صفحه با عمق ۰/۵ متر



شکل ۸: توزیع پتانسیل در سطح خاک و همچنین در سطح یک میله با عمق ۱ متر

با تقسیم مقدار ولتاژ به جریان، مقدار مقاومت سیستم زمین صفحه مسی به صورت زیر می باشد:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{10}{5.27666} = 1.8951 \Omega$$

همچنین با تقسیم مقدار ولتاژ به جریان، مقدار مقاومت

سیستم زمین میله مسی به صورت زیر می باشد:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{10}{2.9064} = 3.4407 \Omega$$

همانطوری که مشاهده می شود مقدار مقاومت میله از صفحه بیشتر می باشد. برای رفع این مشکل معمولا به جای استفاده از تک میله، از یک شبکه که شامل چندین میله موازی می باشد استفاده می شود.

جدول ۴ مقاومت زمین به دست آمده با استفاده از روش توضیح داده شده در این مقاله و آنهایی که در [۱] و [۹] با استفاده از روش توسعه یافته توسط *Thapar* و همکارانش محاسبه می شود را نشان می دهد. نتایج مدل های طراحی،

تحلیل شده توسط *FEM* را در مقایسه با دیگر روش های
تحلیلی ارائه شده نشان می دهد.

مراجع

- IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-94, pp. 252–261, Mar./Apr. 1975.
- [11] F. P. Dawalibi and D. Mukhedkar, "Optimum design of substation grounding in two-layer earth structure–Part II, Comparison between theoretical and experimental results," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-94, pp. 262–266, Mar./Apr. 1975.
- [12] H. R. Seedher, J. K. Arora, and B. Thapar, "Finite expressions for computation of potential in two layer soil," IEEE Trans. Power Delivery, vol. PWRD-2, pp. 1098–1102, Oct. 1987.
- [13] H. S. Lee, J. H. Kim, F. P. Dawalibi, and J. Ma, "Efficient ground grid designs in layered soils," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, pp. 745–751, July 1998.
- [14] Gabriel A. Adegboyega and Kehinde O. Odeyemi, "Assessment Of Soil Resistivity On Grounding Of Electrical Systems: A Case Study Of North-East Zone, Nigeria", Journal Of Academic and Applied Studies, vol. 1(3), PP 28 38, September 2011.
- [15] Prof. Henryk Markiewicz and Dr. Antoni Kljan, "Earthing and EMC- fundamentals of calculations and design", Wroclaw University of Technology, June 2003.
- [16] Wikipedia [online]. http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method, July 10, 2013.
- [17] Prof. Olivier de Weck and Dr. Il Yong Kim, "Engineering Design and Rapid Prototyping- Finite Element Method", Massachusetts Institute Of Technology, January 12, 2004.
- [18] Chong Kiat Ng, "simplified numerical based method for calculation of DC ground electrode resistance in multi-layered earth", Master Of Science Dissertation, Univ. of Manitoba, Dept. Of Electrical and Computer Engineering, Manitoba, Canada, June 2000.
- [19] Zhou Xixiang, Zhong Benshan and Brynjolfur Eyjolfsson, "Finite Element Resistivity Modelling Using Specialized Mesh Structure", The United Nations Univ., Geothermal Training Program, Iceland, April 1987.
- [20] J. A. Güemes and F. E. Hernando, "Cálculo de Redes de Tierra Utilizando el Método de Elementos Finitos. Comparación de Resultados," in Proc. IEEE Andean Region Int. Conf., vol. 2, 1997, pp. 902–906.
- [1] J. A. Güemes, and F. E. Hernando, "Method for calculating the ground resistance of grounding grids using FEM." IEEE Trans. Power Delivery, VOL. 19, No. 2, pp. 595-600, APRIL 2004.
- [2] Asimakopoulou, Fani E., et al. "Transient behavior of grounding systems embedded in different earth structures." Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), 7th Mediterranean Conference and Exhibition on. IET, 2010.
- [3] P. J. Lagace, D. Mukhedkar, H. H. Hoang, and H. Greiss, "Evaluation of the effect of vertical faults on the voltage distribution around HVDC electrodes using a super-computer," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 5, pp. 1309–1313, July 1990.
- [4] H. B. Dwight, "Calculation of resistance to ground," Elect. Eng., vol. 55, pp. 1319–1328, Dec. 1936.
- [5] P. Laurent, "General fundamentals of electrical grounding techniques," Le bulletin de la Société Française des Electriciens, vol. I, pp. 368–402, July 1951.
- [6] J. Niemann, "Unstellung von Hochspannungs-Erdungsalagen Aufden betrieb mit starr geerdetem sternpunkt," Electrotech. Z., vol. 73, pp. 333–337, May 1952.
- [7] J. G. Sverak, "Simplified analysis of electrical gradients above a ground grid: Part I – How good is the present IEEE method?," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-103, pp. 7–25, Jan. 1984.
- [8] S. J. Schwarz, "Analytical expression for resistance of grounding systems," AIEE Trans., pt. III-B, vol. 73, pp. 1011–1016, 1954.
- [9] B. Thapar, V. Gerez, A. Balakrishnan, and D. A. Blank, "Evaluation of a grounding grid of any shape," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 6, pp. 640–647, Mar./Apr. 1991.
- [10] F. Dawalibi and D. Mukhedkar, "Optimum design of substation grounding in two-layer earth structure- Part. I, Analytical study,"