

بررسی راه کارهای عملی و ارائه‌ی راه کاری نوین برای کاهش ولتاژ گام در الکتروود زمین مش



مهدی مؤمن
کارشناس ارشد برق قدرت



ارسلان نجفی
دکترای برق قدرت



چکیده

کاهش ولتاژ گام^۱ در مکان‌هایی مانند پست‌های برق، نیروگاه‌ها و ... از آن جهت دارای اهمیت است که به دلیل احتمال وجود جریان‌های خطای بالا، امکان شکل‌گیری گرادیان‌های ولتاژ خطرناک در محل وجود داشته و ممکن است باعث وارد شدن خطرات جبران‌ناپذیر به افراد و تجهیزات مستقر در محل شود.

در این تحقیق ابتدا بررسی و شبیه‌سازی روش‌های علمی و عملی موجود و متداول (با نرم‌افزار ETAP) برای کاهش ولتاژ گام به شرح ذیل انجام شده و تأثیر هر روش بر کاهش ولتاژ گام بررسی شده است:

- بررسی تأثیر جنس الکتروود در ولتاژ گام؛
- بررسی رابطه‌ی ولتاژ گام با تعداد هادی‌های الکتروود زمین (مش)؛
- بررسی اثر هم‌بندی الکتروودهای ارت یک سیستم بر ولتاژ گام؛
- بررسی تأثیر اضافه شدن الکتروود میله‌ای قائم^۲ به الکتروود مش، بر ولتاژ گام؛
- بررسی اثر استفاده هم‌زمان از راهکارهای ارائه‌شده فوق جهت کاهش ولتاژ گام؛
- بررسی اثر استفاده از مواد کاهنده‌ی مقاومت ویژه‌ی خاک، بر ولتاژ گام.

در ادامه، پیشنهاد تحقیق مبنی بر اثر فاصله‌ی نابرابر هادی‌های الکتروود به روش مش بر ولتاژ گام، بررسی و شبیه‌سازی شده است که نتایج به دست آمده بیان‌گر کاهش چشمگیر ولتاژ گام در صورت وجود فاصله‌های نابرابر هادی‌های الکتروود مش، نسبت به الکتروود مش دارای هادی‌هایی با فاصله‌ی برابر، است.

1- step voltage

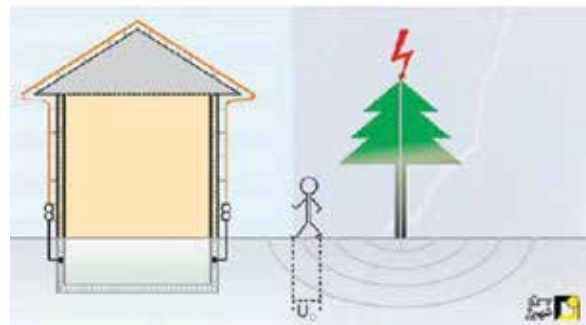
2- rod

پیش‌گفتار

مقاومت الکتروود نسبت به جرم کلی زمین از نظر فیزیکی یک مقاومت مشخص با ابعادی معین نیست، بل که متشکل از توده‌ای خاک است که الکتروود را احاطه می‌کند. این ساختار مقاومت در اطراف الکتروود سبب می‌شود که افت ولتاژ در توده‌ی خاک در حجمی بزرگ و به‌تدریج صورت گیرد. در نقطه‌ای از زمین که جریان وارد زمین می‌شود (مثلاً بروز خطای فاز به زمین، اصابت صاعقه به زمین یا...)، از هم پاشیده شده و در مسیرهای زیادی جریان می‌یابد. این انشعابات جریان بستگی به ترکیبات و مقاومت زمین دارد. در اطراف نقطه‌ی ورود به زمین، دایره‌های فرضی متحدالمرکزی در نظر گرفته می‌شود که باهم اختلاف پتانسیل دارند. در نقطه‌ای که جریان وارد زمین می‌شود، ولتاژ بیش‌تر است و دایره‌های دورتر سطح ولتاژ کم‌تری دارند.

حال اگر فردی روی زمین برق‌دار بایستد، اختلاف قابل ملاحظه‌ای در ولتاژ بین محل قرارگیری هر پا می‌تواند وجود داشته باشد (ولتاژ گام شکل ۱-۱) و جریان الکتریکی می‌تواند از یک پا به پای دیگر جریان یافته و منجر به صدمات جبران‌ناپذیر و حتی مرگ شود. گرادیان ولتاژ در اطراف همه‌ی الکتروودهای قائم و افقی و صفحه‌ای ایجاد می‌شود؛ اما در اطراف الکتروود قائم بارزتر از همه است به‌طوری‌که گرادیان ولتاژ (افت ولتاژ) در چند سانتی‌متری الکتروود بسیار شدید است (۳۰ تا ۴۰ درصد). اگر حداکثر ولتاژ زیاد باشد لازم است حتماً نوعی حفاظ پیش‌بینی شود که از تماس افراد و حیوانات با خود الکتروود و زمین‌های اطراف جلوگیری کند یا راه‌کاری برای کاهش ولتاژ گام اندیشیده شود.

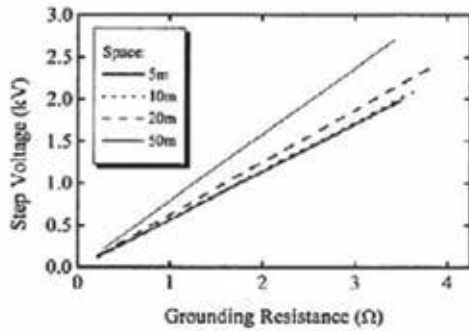
با توجه به این‌که در استانداردهای بین‌المللی حد قابل تحمل ولتاژ برای انسان بدون وارد آمدن صدمه و آسیب ۵۰ ولت در نظر گرفته شده است، افزایش ولتاژ گام از ۵۰ ولت باعث آسیب‌های جبران‌ناپذیر و حتی مرگ در افراد می‌شود. بنابراین با توجه به این‌که سطح ولتاژ گام حاصل شده در خطاهای پست‌های برق هزاران ولت است، بررسی راه‌کارهای کاهش آن تا زیر ۵۰ ولت از اهمیت بسیار بالایی برخوردار خواهد بود.



شکل ۱-۱: ولتاژ گام

بررسی تأثیر جنس الکتروود در ولتاژ گام

می‌دانیم که جنس الکتروود، در مقدار مقاومت آن نسبت به زمین بی‌تأثیر است. (الدیک موسسیان، ۱۳۸۸) از طرفی مطابق نمودار شکل ۱-۲ بین ولتاژ گام و مقاومت الکتروود تقریباً رابطه‌ی خطی وجود دارد.



Relationship between step voltage and grounding resistance.

شکل ۱-۲: رابطه‌ی بین ولتاژ گام و مقاومت زمین (برای شبکه‌ی زمین گسترده با فاصله‌ی هادی‌ها به میزان ۵ و ۱۰ و ۲۰ و ۵۰ متر)

در ادامه شبیه‌سازی ولتاژ گام الکتروود نمونه با سه جنس مختلف (مس، آلومینیوم و استیل) ارائه شده است.

در مرحله‌ی اول، از الکتروود مسی برای شبیه‌سازی استفاده شد. (الکتروود شکل ۲-۲). مطابق شبیه‌سازی انجام شده (شکل ۲-۳)، کم‌ترین ولتاژ گام در محدوده‌ی ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ اهم (رنگ سبز کم‌رنگ) و ماکزیمم ولتاژ گام (در اطراف نمودار) به میزان ۷۵۰۰ ولت حاصل شد.

در مرحله‌ی دوم، از الکتروود آلومینیومی برای شبیه‌سازی استفاده شد. مطابق شبیه‌سازی انجام شده (شکل ۲-۴) دوباره کم‌ترین ولتاژ گام در محدوده‌ی ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ اهم (رنگ سبز کم‌رنگ) و ماکزیمم ولتاژ گام (در اطراف نمودار) به میزان ۷۵۰۰ ولت حاصل شد؛ و همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نتیجه‌ی شبیه‌سازی مشابه حالت قبل است.

در مرحله‌ی سوم، از الکتروود استیل برای شبیه‌سازی استفاده شد. مطابق شبیه‌سازی انجام شده (شکل ۲-۵) باز هم کم‌ترین ولتاژ گام در محدوده‌ی ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ اهم (رنگ سبز کم‌رنگ) و ماکزیمم ولتاژ گام (در اطراف نمودار) به میزان ۷۵۰۰ ولت حاصل شد؛ و همان‌گونه که مشخص است، نتیجه‌ی شبیه‌سازی مشابه مرحله‌ی اول و دوم است.

تشابه نتایج شبیه‌سازی (شکل‌های ۲-۳ و ۲-۴ و ۲-۵) نشان دهنده‌ی عدم تأثیر جنس الکتروود در تغییر ولتاژ گام است که با توجه به رابطه‌ی خطی بین ولتاژ گام و مقاومت الکتروود و مستقل بودن مقاومت الکتروود از جنس آن، نتیجه‌ی حاصل شده قابل پیش‌بینی بود.

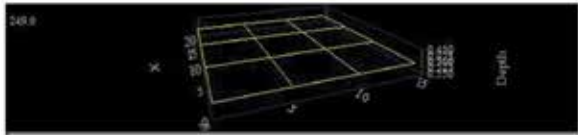
نکته‌ی قابل تأمل در مورد جنس الکتروود، مسئله‌ی خوردگی آن در مجاورت سایر اجسام، فلزات، خاک و مواد شیمیایی موجود در خاک است. دلیل استفاده‌ی گسترده از الکتروودهای مسی در مقایسه با سایر الکتروودها، کم‌تر بودن خوردگی در مس نسبت به سایر الکتروودهای آلومینیومی، فولاد، گالوانیزه و ... است.



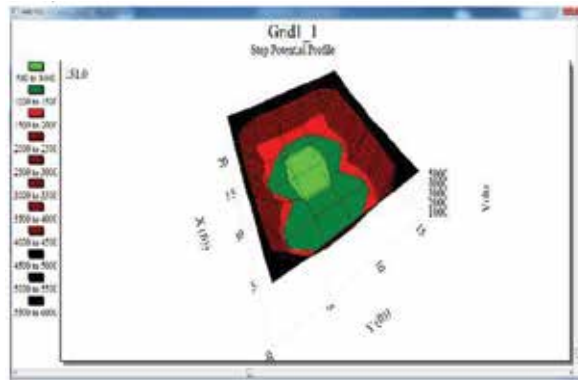
شکل ۲-۲: تصویر نمونه‌ی الکتروود برای شبیه‌سازی ولتاژ گام

در مرحله‌ی اول الکتروود مش با ۸ هادی شبیه‌سازی شد. (شکل ۲-۳ و ۳-۳). در مقایسه با شبیه‌سازی الکتروود با ۴ هادی (شکل ۲-۲) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد هادی‌ها حداقل ولتاژ گام مشاهده شده، ۵۰۰ ولت کاهش یافته و در محدوده‌ی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ ولت قرار گرفته است (ناحیه‌ی سبز کم‌رنگ)؛ هم‌چنین ملاحظه می‌شود که حداکثر ولتاژ گام نیز با ۲۵۰۰ ولت کاهش از ۷۵۰۰ ولت به ۵۰۰۰ ولت رسیده است.

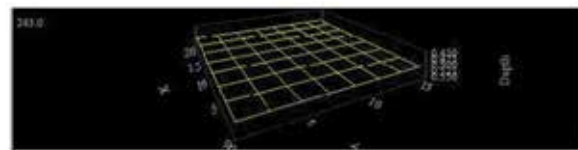
در مرحله‌ی دوم الکتروود مش با ۱۶ هادی شبیه‌سازی شده است. شکل (۳-۳ و ۵-۳). در مقایسه با الکتروود مش با ۸ هادی مشاهده می‌شود که حداقل ولتاژ گام مجدداً ۵۰۰ ولت کاهش یافته و در محدوده‌ی ۰ تا ۵۰۰ ولت قرار گرفته و سطح منطقه با ولتاژ گام ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ ولت نیز افزایش یافته است (منطقه‌ی سبز کم‌رنگ). جمع‌بندی نتایج شبیه‌سازی‌های بالا بیان‌گر کاهش ولتاژ گام با افزایش تعداد هادی‌های الکتروود است.



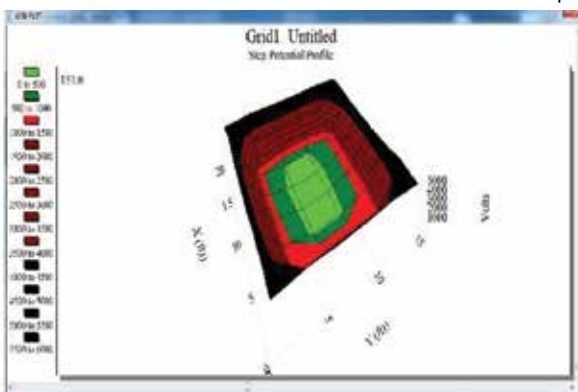
شکل ۲-۳: تصویر نمونه‌ی الکتروود مش با ۸ هادی برای شبیه‌سازی ولتاژ گام



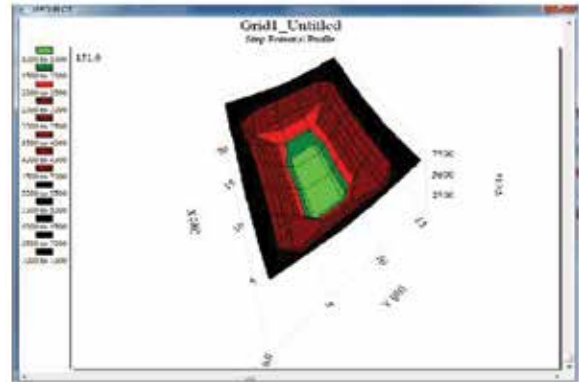
شکل ۳-۳: نتیجه‌ی شبیه‌سازی ولتاژ گام الکتروود مش با ۸ هادی



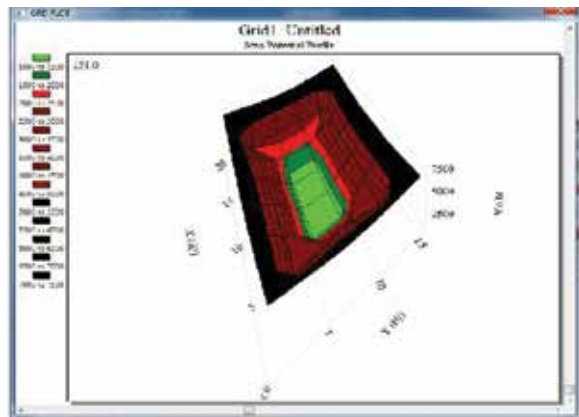
شکل ۳-۴: تصویر نمونه‌ی الکتروود مش با ۱۶ هادی برای شبیه‌سازی ولتاژ گام



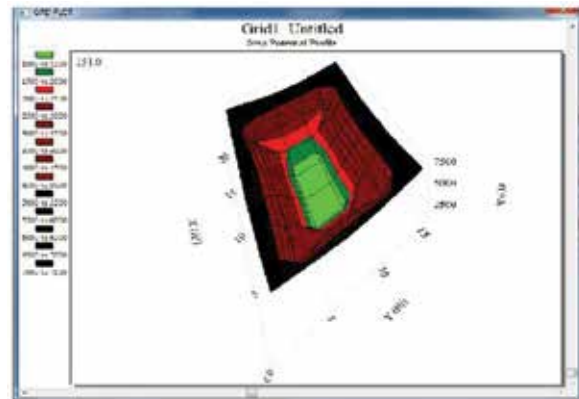
شکل ۳-۵: نتیجه‌ی شبیه‌سازی ولتاژ گام الکتروود مش با ۱۶ هادی



شکل ۲-۳: نتیجه‌ی شبیه‌سازی ولتاژ گام با الکتروود مسی

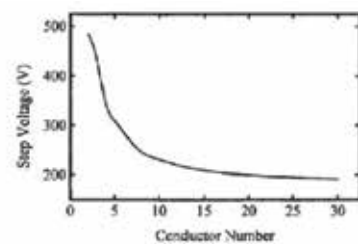


شکل ۲-۴: نتیجه‌ی شبیه‌سازی ولتاژ گام با الکتروود آلومینیومی



شکل ۲-۵: نتیجه‌ی شبیه‌سازی ولتاژ گام با الکتروود استیل

بررسی رابطه‌ی ولتاژ گام با تعداد هادی‌های الکتروود زمین
مطابق نمودار شکل ۳-۱ افزایش تعداد هادی الکتروود زمین مش منجر به کاهش ولتاژ گام شده است (البته با ادامه‌ی افزایش تعداد هادی‌ها، اثر آن در کاهش ولتاژ گام نیز تعدیل شده است).



Relationship between step voltage and grounding conductor number.

شکل ۳-۱: رابطه‌ی تعداد هادی الکتروود زمین گسترده با ولتاژ گام



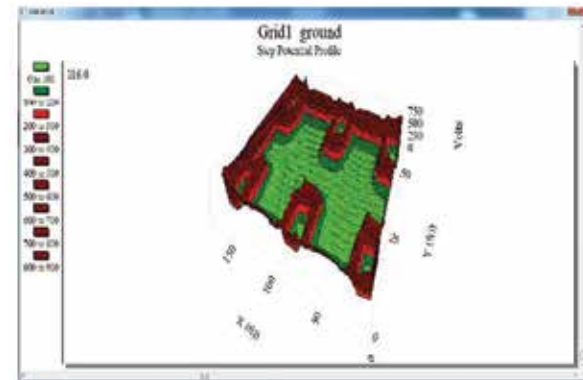
بررسی اثر همبندی الکتروودهای ارت یک سیستم بر ولتاژ گام

تعداد ۶ الکتروود مش که هر کدام ۱۶ هادی دارند (مشابه شکل ۴-۱) به یکدیگر متصل شده و همبند شده‌اند. مقایسه‌ی نتیجه‌ی شبیه‌سازی به دست آمده در شکل ۴-۲ با شکل ۳-۵ نشان می‌دهد حداقل سطح ولتاژ گام به میزان ۴۰۰ ولت کاهش یافته و در بازه‌ی ۰ تا ۱۰۰ ولت قرار گرفته است (ناحیه‌ی سبز کم‌رنگ). هم‌چنین حداکثر ولتاژ گام قابل مشاهده به میزان ۴۲۵۰ ولت کاهش یافته و در محدوده‌ی ۷۵۰ ولت قرار گرفته است.

جمع‌بندی نتایج شبیه‌سازی‌های بالا بیان‌گر کاهش محسوس ولتاژ گام با همبندی الکتروودهای این سیستم است.



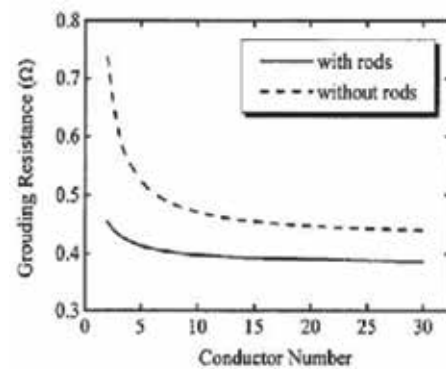
شکل ۴-۱: تصویر نمونه‌ی ۶ الکتروود مش دارای ۱۶ هادی همبند شده



شکل ۴-۲: نتیجه‌ی شبیه‌سازی ولتاژ گام ۶ الکتروود مش دارای ۱۶ هادی همبند شده

بررسی اثر اضافه شدن الکتروود میله‌ای قائم بر ولتاژ گام

مطابق نمودار شکل ۵-۱ وجود راد در الکتروود مش نقش قابل توجهی در کاهش مقاومت الکتروود می‌تواند داشته باشد.

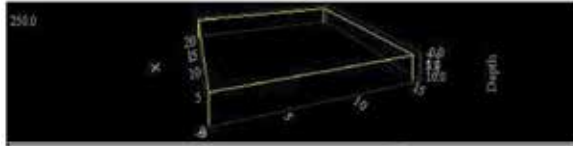


Relationship between grounding resistance and conductor number.

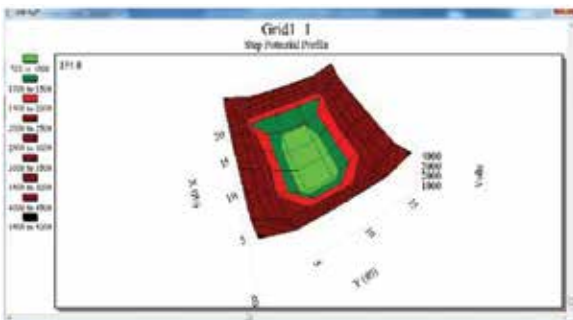
شکل ۵-۱: رابطه‌ی بین مقاومت زمین با تعداد هادی‌های الکتروود ارت در حضور راد و بدون راد

در مرحله‌ی اول به الکتروود شکل ۲-۲ تعداد ۴ راد اضافه شد (شکل ۲-۵). بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده (شکل ۳-۵) و مقایسه‌ی آن با نتایج شبیه‌سازی الکتروود مشابه قبلی بدون راد (شکل ۲-۳) نشان می‌دهد حداقل ولتاژ گام با ۵۰۰ ولت کاهش در

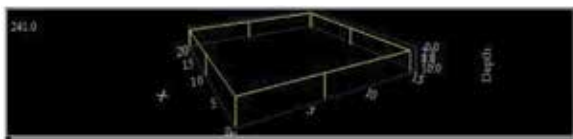
محدوده‌ی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ ولت قرار گرفته است. هم‌چنین حداکثر ولتاژ گام با ۳۵۰۰ ولت کاهش در محدوده‌ی ۴۰۰۰ ولت قرار گرفته است. در مرحله‌ی دوم به الکتروود شکل ۵-۲ تعداد ۴ راد دیگر اضافه شد. (شکل ۵-۴) مطابق شبیه‌سازی‌های انجام شده (شکل ۵-۵) و مقایسه‌ی آن با نتایج شبیه‌سازی الکتروود مشابه قبلی با ۴ راد (شکل ۵-۳) نشان می‌دهد حداقل ولتاژ گام با ۵۰۰ ولت کاهش در محدوده‌ی ۰ تا ۵۰۰ ولت قرار گرفته است. هم‌چنین حداکثر ولتاژ گام با ۱۰۰۰ ولت کاهش در محدوده‌ی ۳۰۰۰ ولت قرار گرفته است.



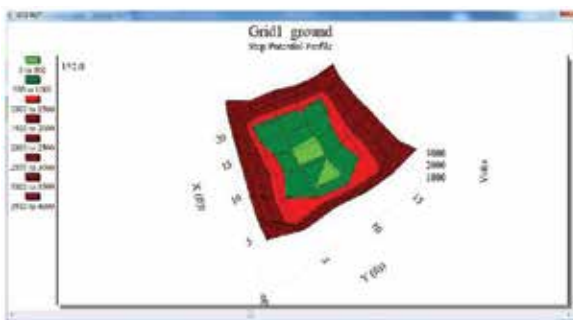
شکل ۵-۲: تصویر نمونه‌ی الکتروود با ۴ راد



شکل ۵-۳: نتیجه‌ی شبیه‌سازی ولتاژ گام الکتروود با ۴ راد



شکل ۵-۴: تصویر نمونه‌ی الکتروود با ۸ راد

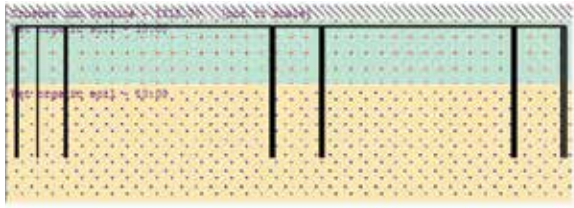


شکل ۵-۵: نتیجه‌ی شبیه‌سازی ولتاژ گام الکتروود با ۸ راد

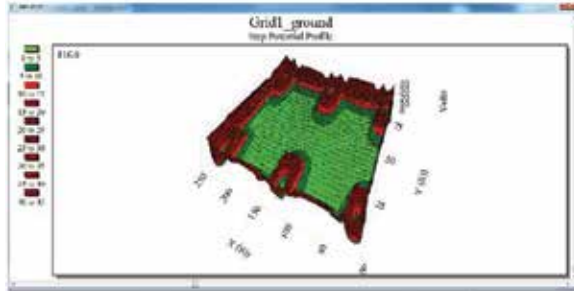
بررسی اثر استفاده‌ی هم‌زمان از راه‌کارهای ارائه شده برای کاهش ولتاژ گام

برای کاهش ولتاژ گام، ترکیب اقدامات قبلی (شامل افزایش تعداد هادی، نصب راد و همبند کردن الکتروودها) انجام (شکل ۶-۱) و نتایج شبیه‌سازی مطابق شکل ۶-۲ حاصل شد.

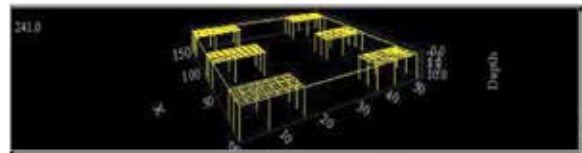
بر اساس مقایسه‌ی شبیه‌سازی انجام شده در این حالت با بهترین حالت به دست آمده در مراحل قبلی (شکل ۴-۲) مشاهده می‌شود حداقل ولتاژ گام با ۵۰۰ ولت کاهش در محدوده‌ی ۰ تا ۵۰۰ ولت قرار گرفته و حداکثر ولتاژ قابل مشاهده با ۳۵۰ ولت کاهش در محدوده‌ی ۴۰۰ ولت قرار گرفته است.



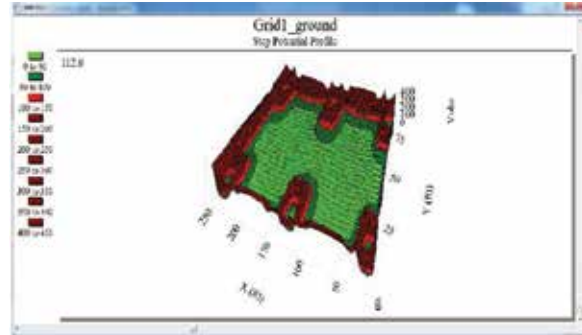
شکل ۷-۳: تنظیم لایه‌ی سطحی خاک ۱۳۱۵ و لایه‌ی دوم و سوم و ۱۰ اهم‌متر



شکل ۷-۴: نتیجه‌ی شبیه‌سازی ولتاژ گام و الکتروود مش دارای راد همبند شده با لایه‌ی سطحی خاک ۱۳۱۵ و لایه‌ی دوم و سوم و ۱۰ اهم‌متر



شکل ۶-۱: تصویر نمونه‌ی الکتروود مش دارای راد و همبند شده



شکل ۶-۲: نتیجه‌ی شبیه‌سازی ولتاژ گام و الکتروود مش دارای راد و همبند شده

بررسی پیشنهاد تحقیق مبنی بر اثر فاصله‌های نابرابر هادی‌های الکتروود مش بر ولتاژ گام

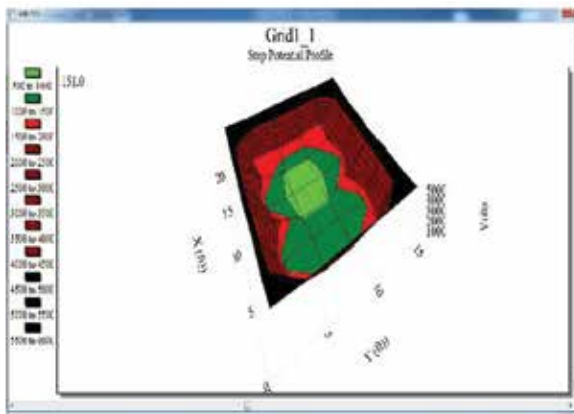
الکتروودهای مش اجرا شده و شبیه‌سازی شده به‌صورت معمول، مطابق شکل ۸-۱ دارای هادی‌های با فاصله‌ی برابر هستند.

در مورد اجرای هادی‌های مش با فاصله‌های نابرابر مطابق شکل ۸-۳ شبیه‌سازی‌هایی مطابق با شکل‌های ۸-۴، ۸-۵ و ۸-۶ و ۸-۷ انجام شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با قرار دادن هادی‌ها با فاصله‌های نابرابر (مقایسه‌ی شکل‌های ۸-۲ و ۸-۷) حداقل ولتاژ گام با ۳۰۰ ولت کاهش در محدوده‌ی ۱۰۰ تا ۲۰۰ ولت قرار گرفته است. همچنین حداکثر ولتاژ گام مشاهده شده با ۳۰۰۰ ولت کاهش به ۲۰۰۰ ولت رسیده است.

جمع‌بندی نتایج شبیه‌سازی‌های بالا بیان‌گر کاهش ولتاژ گام در اثر تغییر جانمایی هادی‌های الکتروود مش با فاصله‌های نابرابر از یکدیگر است.



شکل ۸-۱: تصویر نمونه‌ی الکتروود دارای ۸ هادی با فاصله‌های برابر



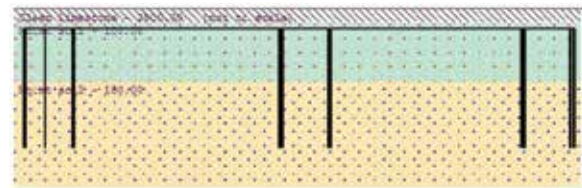
شکل ۸-۲: نتیجه‌ی شبیه‌سازی نمونه‌ی الکتروود مش دارای ۸ هادی با فاصله‌های برابر

بررسی اثر استفاده از مواد کاهنده‌ی مقاومت ویژه‌ی خاک بر ولتاژ گام

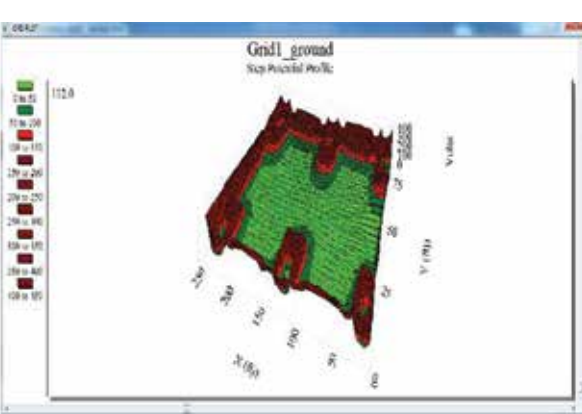
پیشنهاد مؤثر بعدی در مورد کاهش مقاومت الکتروود مش و ولتاژ گام استفاده از مواد کاهنده‌ی مقاومت ویژه‌ی خاک اطراف الکتروود است که تأثیر آن در دو شبیه‌سازی زیر قابل مشاهده است.

در مرحله‌ی اول، از الکتروود شکل ۷-۱ استفاده شده و مقاومت ویژه‌ی خاک ۱۰۰ اهم متر (شکل ۷-۲) در نظر گرفته شده است. در مرحله‌ی دوم، از همان الکتروود مرحله‌ی اول استفاده شده و مقاومت ویژه‌ی خاک ۱۰ اهم متر لحاظ شده است. (شکل ۷-۳ و شکل ۷-۴).

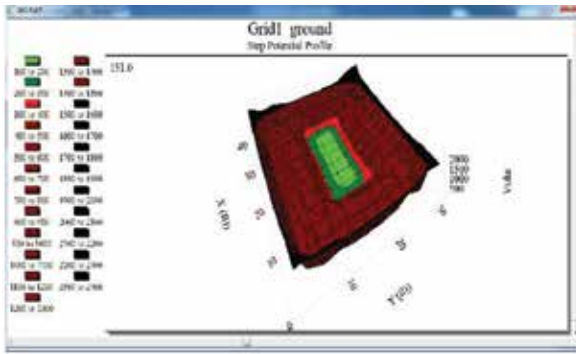
مقایسه‌ی شکل ۷-۲ و شکل ۷-۴ نشان می‌دهد حداقل ولتاژ گام مشاهده شده با ۴۵ ولت کاهش در محدوده‌ی ۰ تا ۵ ولت قرار گرفته و حداکثر ولتاژ گام مشاهده شده با ۳۶۰ ولت کاهش، در محدوده‌ی ۴۰ ولت قرار گرفته است.



شکل ۷-۱: تنظیم لایه‌ی سطحی خاک ۲۵۰۰ و لایه‌ی دوم و سوم و ۱۰۰ اهم‌متر



شکل ۷-۲: نتیجه‌ی شبیه‌سازی ولتاژ گام و الکتروود مش دارای راد همبند شده با لایه‌ی سطحی خاک ۲۵۰۰ و لایه‌ی دوم و سوم و ۱۰۰ اهم‌متر



شکل ۸-۷: نتیجه‌ی شبیه‌سازی نمونه‌ی الکتروود مش دارای ۸ هادی با فاصله‌های نابرابر

نتیجه‌گیری

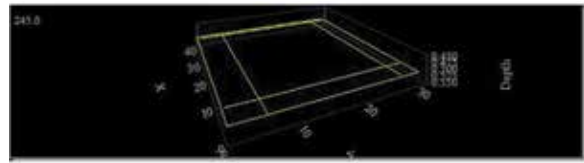
با توجه با شبیه‌سازی‌های ارائه شده، نتایجی مطابق با متون و سوابق قبلی به شرح زیر حاصل شد که خلاصه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌ها نیز در جدول ۹-۱ و ۹-۲ قابل مشاهده است:

- افزایش تعداد هادی‌های الکتروود (مش) باعث کاهش ولتاژ گام می‌شود؛
- اضافه شدن الکتروود میله‌ای قائم، به الکتروود زمین (مش) باعث کاهش ولتاژ گام می‌شود؛
- افزایش تعداد الکتروود میله‌ای قائم باعث کاهش بیش‌تر ولتاژ گام می‌شود؛
- هم‌بند کردن الکتروودهای زمین یک سیستم، باعث کاهش ولتاژ گام می‌شود؛
- آماده‌سازی خاک اطراف الکتروود و کاهش مقاومت ویژه‌ی خاک باعث کاهش ولتاژ گام می‌شود؛
- جنس الکتروود تأثیری در کاهش ولتاژ گام ندارد.

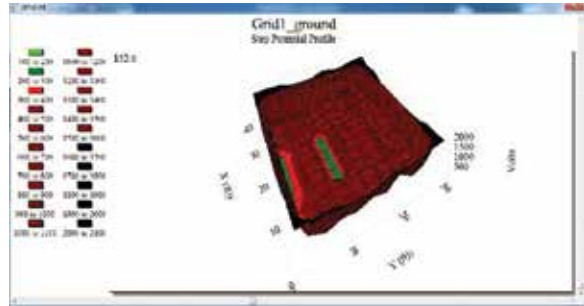
پیشنهاد تحقیق بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، تغییر در جانمایی هادی‌های مش و فاصله‌گذاری‌های نابرابر از یکدیگر برای کاهش ولتاژ گام است. برخلاف روش‌های قبلی که برای کاهش ولتاژ گام (افزایش تعداد هادی، استفاده از الکتروود میله‌ای عمودی، هم‌بندی، آماده‌سازی خاک اطراف) هر کدام، به فراخور شرایط خود به انجام هزینه نیاز دارند. روش پیشنهادی این تحقیق بدون اضافه شدن هیچ‌گونه هزینه‌ای و صرفاً با جابه‌جایی هادی‌های مش و تغییر فاصله‌ی آن‌ها قابل دست‌یابی است.

پیشنهادها (لیست فعالیت‌های باز در راستای ادامه‌ی این تحقیق)

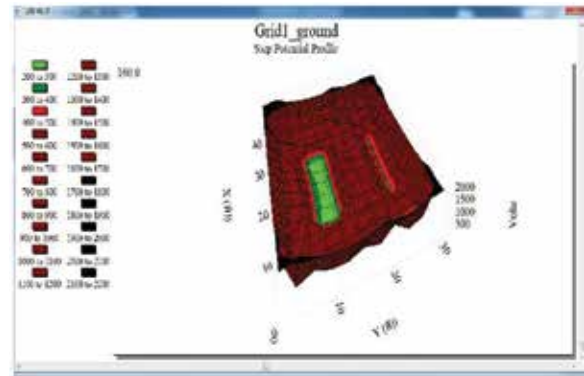
- تعیین حالت بهینه قرار دادن هادی‌های مش با فاصله‌های نابرابر؛
- بررسی تأثیر شکل هندسی مش خصوصاً اشکال غیرمستطیل بر ولتاژ گام.



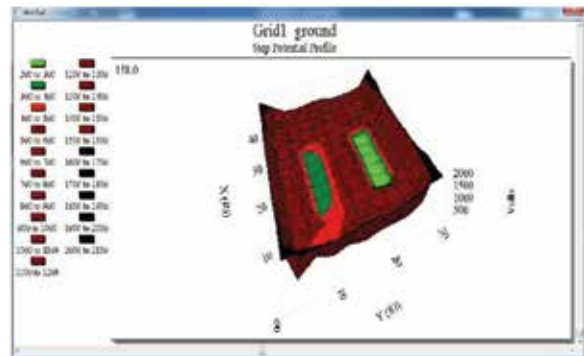
شکل ۸-۳: تصویر نمونه‌ی الکتروود دارای ۸ هادی با فاصله‌های نابرابر



شکل ۸-۴: نتیجه‌ی شبیه‌سازی نمونه‌ی الکتروود مش دارای ۸ هادی با فاصله‌های نابرابر



شکل ۸-۵: نتیجه‌ی شبیه‌سازی نمونه‌ی الکتروود مش دارای ۸ هادی با فاصله‌های نابرابر



شکل ۸-۶: نتیجه‌ی شبیه‌سازی نمونه‌ی الکتروود مش دارای ۸ هادی با فاصله‌های نابرابر

ردیف	شرح	حداقل ولتاژ گام (V) حداکثر ولتاژ گام (V)
۱	الکتروود با ۸ هادی با فاصله‌های برابر هادی‌ها	۵۰۰-۱۰۰۰
۲	الکتروود با ۸ هادی با فاصله نابرابر هادی‌ها	۲۰۰-۱۰۰

جدول ۹-۲: مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی روش جدید پیشنهادی با روش مشابه متداول

ردیف	شرح	حداکثر ولتاژ گام (V) حداقل ولتاژ گام (V)
۱	الکتروود با ۴ هادی از جنس مس	۱۰۰۰-۱۵۰۰ ۷۵۰۰
۲	الکتروود با ۴ هادی از جنس آلومینیوم	۱۰۰۰-۱۵۰۰ ۷۵۰۰
۳	الکتروود با ۴ هادی از جنس استیل	۱۰۰۰-۱۵۰۰ ۷۵۰۰
۴	الکتروود با ۸ هادی	۵۰۰-۱۰۰۰ ۵۰۰۰
۵	الکتروود با ۱۶ هادی	۰-۵۰۰ ۵۰۰۰
۶	همبندی ۶ الکتروود با ۱۶ هادی در هر کدام	۰-۱۰۰ ۷۵۰
۷	الکتروود با ۴ هادی و ۴ راد	۵۰۰-۱۰۰۰ ۴۰۰۰
۸	الکتروود با ۴ هادی و ۸ راد	۰-۵۰۰ ۳۰۰۰
۹	همبندی ۶ الکتروود با ۱۶ هادی برای هر کدام و ۸ راد (ترکیب گام‌های قبل)	۰-۵۰ ۴۰۰
۱۰	همبندی ۶ الکتروود با ۱۶ هادی در هر کدام و ۸ راد و مقاومت خاک $10 \Omega m$	۰-۵ ۴۰

جدول ۹-۱ : مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده روش‌های متداول

منابع

- موسسیان، آلدیک (۱۳۸۸) راهنمای طرح و اجرای تأسیسات برقی. تهران: نشر توسعه‌ی ایران.
- Aikaterini D. Baka, Nikolaos K. Uzunoglu. (2015). *Detecting and Avoiding Step Voltage Hazards. IEEE Transactions on Power Delivery*, 2519 - 2526.
- A. Esmaeilian, A. A. ShayeganiAkmal, M. SalayNaderi. (2012). *Wind farm grounding systems design regarding the maximum permissible touch & step voltage. 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 74-79.
- J. G. Sverak. (1981). *Simplified Analysis of Electrical Gradients Above a Ground Grid-I How Good Is The Present IEEE Method IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 51-59.
- YanqingGao, RongZeng, Xidong Liang, Jinliang He, Weimin Sun, Qi Su. (2000). *Safety analysis of grounding grid for substations with different structure. Power System Technology. Proceedings. PowerCon. International Conference on*, 1487-1492.

