PSC 2008
23rd International Power System Conference
بیست و سومین
کنفرانس بین المللی برق
98-F-HVS-0330

طراحی سیستم زمین حفاظتی بهینه با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف موثر بر ایمنی آن به کمک الگوریتم ژنتیک

رضا حیدری
دانشجوی کارشناسی ارشد
rheidary84@yahoo.com

رضا قاضی
استاد گروه برق
rghazi@um.ac.ir

گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

واژه‌های کلیدی: سیستم زمین حفاظتی بهینه، ولتاژ تماس، ولتاژ گام، الگوریتم ژنتیک

چکیده

در این مقاله هدف، طراحی سیستم زمین بهینه از نظر اقتصادی برای پستهای برق، با شرط حفظ شرایط ایمنی سیستم زمین بر اساس استاندارد IEEE می باشد. این مطالعه برای شرایط مختلف سیستم زمین و خاک یک لایه و دو لایه انجام شده و برای هر کدام از این شرایط، سیستمهای طراحی شده، ارائه و با هم مقایسه گردیده است. در این مقاله، طراحی سیستم زمین در سه حالت انجام گرفته است. در حالت اول از شبکه زمین با فواصل یکسان استفاده می شود و حالت دوم مربوط به طراحی سیستم زمین با جایابی بهینه هادیهای شبکه زمین به کمک الگوریتم ژنتیک (GA) می باشد و نهایتاً در حالت سوم، طراحی سیستم زمین بهینه جامع، به کمک GA با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای مختلف موثر بر ایمنی سیستم زمین بعنوان متغیرهای بهینه سازی ارائه می شود که باعث افزایش قابلیت انعطاف بهینه سازی و کاهش قابل توجه هزینه های سیستم زمین می گردد.

۱- مقدمه

در طراحی و احداث یک پست برق، یکی از مهمترین مسائلی که باید مد نظر قرار گیرد، طراحی سیستم زمین حفاظتی مربوط به آن است. عبور جریان از سیستم زمین، باعث ایجاد گرادیانهای ولتاژ در سطح زمین شده که در اینصورت نقاط مختلف سطح زمین نسبت به هم و نسبت به زمین مرجع (زمین دور) دارای اختلاف پتانسیل می شوند که چنانچه طراحی بطور دقیق انجام نشود، ممکن است این ولتاژها به حدی برسند که ایمنی افراد را در محل به خطر بیندازند. در این شرایط، افراد در معرض احساس ولتاژهای بالا بین محل دو گام خود (ولتاژ گام[1]) بوده و همچنین چنانچه یک فرد در این لحظه در تماس با یک وسیله فلزی زمین شده باشد، در معرض ولتاژ بین آن نقطه و زمین محل پای خود (ولتاژ تماس[2]) می باشد. طراحی سیستم زمین باید طوری صورت گیرد که به ترتیب مقادیر ماکزیمم ولتاژهای تماس و گامی که

1. Step voltage
2. Touch voltage

امکان رخداد آنها در محل پست و در شرایط فالت وجود دارد از ماکزیمم مقادیر ولتاژهای تماس و گام قابل تحمل بدن انسان کمتر باشد[۱و۲و۳و۴].

یک روش برای طراحی سیستم زمین، استفاده از شبکه زمین با فواصل یکسان است. بر اساس نتایج، استفاده از این روش، تا حد زیادی باعث افزایش هزینه های سیستم زمین می شود و نیاز به ارائه روش بهتری است که علاوه بر برآورده کردن شرایط ایمنی، از هزینه های اضافی جلوگیری گردد.

در گذشته مقالاتی جهت بهینه سازی سیستم زمین ارائه شده اما در این مقالات تنها پارامتری که جهت بهینه سازی در نظر گرفته شده، طول هادیهای سیستم زمین است. در مرجع [۵] رابطه تغییرات ولتاژ تماس و گام با تعداد هادیهای سیستم زمین جهت تعیین میزان موثر بودن افزایش تعداد هادیها در کاهش ولتاژهای تماس و گام ارائه شده اما با مقادیر قابل تحمل، جهت ارزیابی ایمنی مقایسه نشده است. در مراجع [۶و۷و۸] مطالعه ای بر روی ضریب فشردگی هادیها و رابطه آن با ولتاژ تماس و گام انجام شده است و ضریب فشردگی متناسب با کمترین ولتاژ تماس بدست آمده اما مقایسه ای با مقادیر قابل تحمل جهت ارزیابی ایمنی انجام نشده است. در مرجع [۹] بهینه سازی به کمک GA انجام شده اما تعداد هادیهای شبکه زمین از قبل معلوم وثابت در نظر گرفته شده است و هدف حداقل کردن ولتاژ تماس است، اما با مقادیر قابل تحمل مقایسه نشده است. در مرجع [۱۰] جهت بهینه سازی سیستم زمین رابطه ای بین طول مشهای متوالی در نظر گرفته شده است. اما تنها متغیر بهینه سازی طول کل هادیهای شبکه زمین است. در مراجع [۱۱و۱۲و۱۳] بهینه سازی توسط GA انجام شده که در مرجع [۱۲] میله های عمودی هم در نظر گرفته شده اما در این مراجع، تنها طول کل هادیهای سیستم زمین بعنوان متغیر بهینه سازی لحاظ شده است.

با توجه به مطالب فوق ملاحظه می شود که در کلیه مقالات ارائه شده جهت بهینه سازی سیستم زمین، تنها طول کل هادیهای سیستم زمین بعنوان متغیر بهینه سازی در نظر گرفته شده است در صورتیکه طبق بررسیهای صورت گرفته، پارامترهای دیگری نیز بر ایمنی سیستم زمین موثرند. در مقاله حاضر قصد داریم در تکمیل مطالعات قبلی، یک بهینه سازی جامع با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف موثر بر ایمنی سیستم زمین ارائه دهیم. برای شرایط مختلف سیستم زمین، مطالعه در سه حالت انجام می شود. ابتدا طراحی سیستم زمین با شبکه با فواصل یکسان ارائه می شود. در حالت دوم، طراحی با جایابی بهینه هادیهای شبکه زمین به کمک GA (بهینه سازی تک متغیره) ارائه و نتایج آن با حالت قبل مقایسه می گردد. و نهایتاً بعنوان هدف اصلی مقاله، بهینه سازی جامع چند متغیره با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف موثر بر ایمنی سیستم زمین بعنوان متغیرهای بهینه سازی ارائه و نتایج آن با حالت بهینه سازی تک متغیره مقایسه می شود که بر اساس نتایج، استفاده از این روش باعث افزایش انعطاف بهینه سازی و کاهش قابل توجه هزینه های سیستم زمین و همچنین باعث یکنواخت تر شدن گرادیانهای ولتاژ سطحی می گردد.

ضمناً قابل ذکر است که در مقالات ارائه شده در زمینه بهینه سازی سیستم زمین، نقاط متناظر با محل قرارگیری هادیهای شبکه زمین در طول هر محور، بصورت یکنواخت در کل طول محور تقسیم شده است اما چون در عمل، سیستم زمین بهینه به گونه ای است که تمرکز هادیها به سمت محیط شبکه زمین افزایش می یابد، استفاده از این روش در شرایط سخت مثل مقاومت ویژه خاک بالا یا جریانهای فالت بالا باعث پیچیده و زمانبر شدن طراحی می شود. برای رفع این مساله، در مقاله حاضر، در حالت بهینه سازی تک متغیره، توزیع نقاط بصورت غیر یکنواخت انتخاب می شود بطوریکه تراکم به سمت محیط شبکه افزایش می یابد که باعث کاهش تعداد بیتهای کروموزومها نسبت به حالت توزیع یکنواخت و کاهش قابل توجه زمان محاسبات و بهبود عملکرد بهینه سازی می گردد.

۲- مساله طراحی

هدف از طراحی سیستم زمین، ارائه یک پیشنهاد از هادیهای زمین شده برای برآورده کردن شرایط ایمنی سیستم زمین

است. قبل از طراحی سیستم زمین باید مشخصات خاک منطقه پست، اعم از مقاومت ویژه آن و مدل خاک تعیین شود که روشهای مختلفی برای این کار ارائه شده است[۴]. همچنین باید بدترین جریان فالتی که باعث عبور بزرگترین جریان تزریقی از سیستم زمین می شود تعیین، و طراحی بر اساس آن انجام شود. جهت طراحی سیستم زمین در این مقاله دو شرط در نظر گرفته شده است اول اینکه سیستم زمین پیشنهادی باید از نظر استاندارد شرایط ایمنی را برآورده کند بدین ترتیب که ماکزیمم ولتاژ تماس و ماکزیمم ولتاژ گام ایجاد شده ناشی از عبور جریان فالت از سیستم زمین باید بترتیب از ماکزیمم ولتاژ تماس و گام قابل تحمل بدن کمتر باشد. دوم اینکه سیستم زمین پیشنهادی باید بگونه ای باشد که علاوه بر برآورده کردن شرایط ایمنی فوق، هزینه کلی آن نیز حداقل شود.

۲-۱- مقادیر ولتاژ تماس و گام قابل تحمل بدن

در صورت مواجه شدن یک فرد با شوک الکتریکی، احتمال ایجاد صدمه برای شخص به جریان عبوری از بدن وی و مدت زمان شوک بستگی دارد. بر اساس استاندارد IEEE، حداکثر ولتاژ تماس و گام قابل تحمل بدن را می توان با استفاده از روابط زیر تعیین نمود[۱و۲]:

ماکزیمم ولتاژهای گام قابل تحمل بدن برای وزنهای ۵۰Kg و ۷۰Kg:

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s\rho_s)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \qquad (۱)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s\rho_s)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \qquad (۲)$$

ماکزیمم ولتاژهای تماس قابل تحمل بدن برای وزنهای ۵۰Kg و ۷۰Kg:

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s\rho_s)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \qquad (۳)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \qquad (۴)$$

که C_s ضریب کاهشی لایه سطحی، ρ_s مقاومت ویژه لایه سطحی و t_s مدت زمان مواجهه با شوک می باشد.

معمولاً از یک لایه مواد با مقاومت ویژه بالا در سطح زمین پست استفاده می شود. استفاده از این لایه باعث می شود که مقاومت بین زمین و پاهای شخص افزایش یابد و بصورت یک مقاومت سری عمل می کند و باعث محدود شدن جریان عبوری از بدن می شود. ضریب کاهشی لایه سطحی بصورت زیر تعریف می شود[۱]:

$$C_S = 1 - \frac{0.09\left(1 - \frac{\rho}{\rho_S}\right)}{2h_S + 0.09} \qquad (۵)$$

که h_s ضخامت لایه سطحی، ρ_s مقاومت ویژه مواد لایه سطحی، و ρ مقاومت ویژه خاک زیر لایه سطحی می باشد.

۲-۲- آنالیز سیستم زمین و محاسبه ماکزیمم ولتاژهای تماس و گام ایجاد شده

در پروسه بهینه سازی GA، در هر تکرار بازای هر عضو جمعیت، یک سیستم زمین پیشنهادی ارائه می شود که باید این سیستم، آنالیز شده و اطلاعات پارامترهای مورد نیاز آن محاسبه شود. آنالیز سیستم زمین بوسیله نرم افزار CDEGS انجام می شود که یکی از معتبرترین نرم افزارها در زمینه تحلیل سیستم زمین در دنیاست. بررسیهای صورت گرفته بدین ترتیب است که یک لینک کامل بین نرم افزارهای CDEGS و MATLAB ایجاد شد که تبادل اطلاعات، بصورت اتوماتیک بین آنها انجام می شود. بدین ترتیب که در هر تکرار پروسه GA، بازای هر عضو جمعیت، سیستم پیشنهادی آنالیز شده و پتانسیل ولتاژهای سطحی مربوط به چند هزار نقطه از سطح زمین پست، استخراج شده و با آنالیز این اطلاعات، پارامترهای مورد نیاز سیستم زمین حاصل می شود.

۲-۲-۱-محاسبه ولتاژ تماس سیستمهای پیشنهادی

ابتدا GPR[1] (ماکزیمم ولتاژ ایجاد شده در شرایط فالت نسبت به زمین دور) سیستم پیشنهادی محاسبه می شود. سپس با داشتن ولتاژهای سطحی نقاط مختلف (V_{p_i})، ولتاژ تماس

1. Ground potential rise

مربوط به هر کدام از این نقاط (V_{t_i}) بوسیله رابطه زیر محاسبه می شود:

$$V_{t_i} = GPR - V_{p_i} \qquad \text{for i=1:n} \qquad (۶)$$

که n تعداد نقاط سطحی مورد بررسی می باشد.

و ماکزیمم ولتاژ تماس سیستم پیشنهادی بدست می آید:

$$V_{t_{\max}} = \max\left(V_{t_i}\right) \qquad \text{for i=1:n} \qquad (۷)$$

۲-۲-۲- محاسبه ماکزیمم ولتاژ گام

برای محاسبه ماکزیمم ولتاژ گام از رابطه زیر استفاده می شود:

$$V_{s_{\max}} = \max\left(V_{p_i} - V_{p_{i+1}}\right) \qquad (۸)$$

که V_{p_i} و $V_{p_{i+1}}$ پتانسیل مربوط به نقاط با فاصله ۱m از هم است. البته باید توجه داشت که معمولاً در اکثر موارد، حساسیت و اهمیت ولتاژ تماس برای ایمنی سیستم زمین خیلی بیشتر از ولتاژ گام است. اما در اینجا این شرط نیز بررسی می شود.

۳- استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه سازی

جهت بهینه سازی مساله از GA استفاده می شود. GA مبتنی بر جمعیت بوده و هر کدام از اعضای جمعیت، با اعمال کدینگ مناسب و با تعداد بیت معین، بیانگر یک سیستم زمین پیشنهادی است. در شکل ۱ مراحل عملکرد GA نشان داده شده است.

در ابتدا یک جمعیت اولیه تعریف می شود. در هر تکرار بازای هر یک از اعضا، هزینه مربوط به آن (C) محاسبه می شود. تنها حداقل کردن هزینه کافی نیست بلکه باید شرایط ایمنی نیز در نظر گرفته شود شرایط ایمنی شامل شرایط ولتاژ تماس و ولتاژ گام می باشد که این شرایط بعنوان قیود طراحی بصورت زیر تعریف می شوند:

$$V_{t_{\max}} < E_t \qquad (۹)$$

$$V_{s_{\max}} < E_s \qquad (۱۰)$$

E_t و E_s بترتیب ماکزیمم ولتاژهای تماس و گام قابل تحمل بدن هستند.

شرایط ایمنی را بصورت ضریب پنالتی اعمال می کنیم بدین ترتیب که آنرا با ضریب مشخصی با تابع هزینه جمع کرده و حاصل، تابع برازندگی[1] اعضا می باشد که هدف حداقل کردن آن است و مطابق زیر بدست می آید:

$$\Delta V_t = V_{t_{\max}} - E_t \qquad (۱۱)$$

$$\Delta V_s = V_{s_{\max}} - E_s \qquad (۱۲)$$

$$F = C + K_{pen1}\Delta V_t + K_{pen2}\Delta V_s \qquad (۱۳)$$

جهت انتخاب اعضا برای تولید نسل بعدی، باید به هر کدام از اعضا احتمال و شانسی نسبت دهیم. چون در این مساله، هدف کاهش تابع برازندگی می باشد، عکس آنرا برای محاسبه شانس اعضا برای انتخاب در نظر می گیریم:

$$f = \frac{K_p}{F} \qquad (۱۴)$$

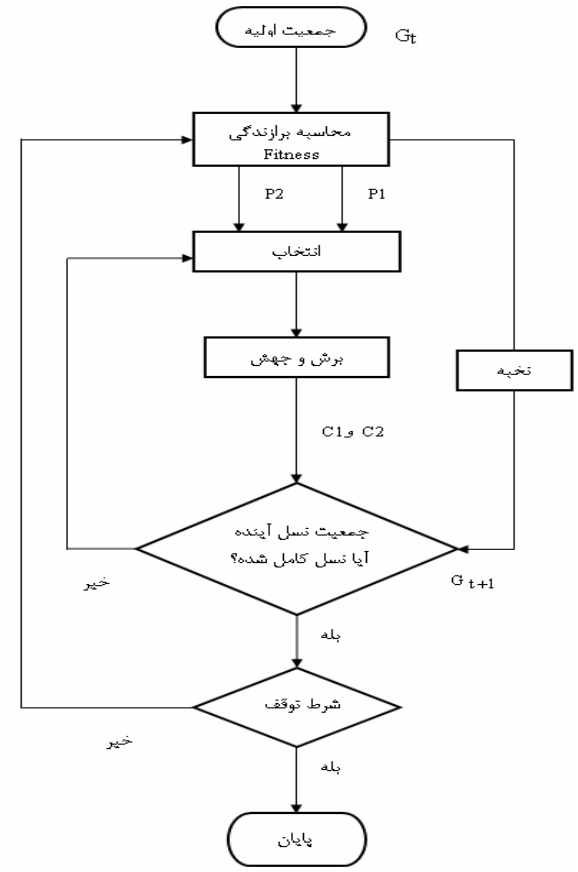
که K_p یک ضریب ثابت بوده و شانس هر یک از اعضا جهت انتخاب از رابطه زیر بدست می آید.

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{n} f_j} \qquad (۱۵)$$

که n تعداد اعضای جمعیت می باشد.

بدین ترتیب اعضایی که شرایط ایمنی را برآورده نکنند، احتمال انتخاب آنها برای تولید جمعیت بعد کمتر می شود. روند انتخاب والدین به کمک roulette wheel بر اساس شانس اعضا انجام می شود. و با اعمال عملگر cross over فرزندان جهت نسل بعد ایجاد می شوند. همچنین از عملگر mutation با نرخ مشخص استفاده می شود تا GA کلیه فضای مساله را جستجو کند. در هر مرحله دو عضو با بهترین برازندگی بعنوان اعضای نخبه مستقیماً و بدون تغییر به جمعیت بعدی منتقل می شوند. احتمال mutation برابر ۰/۰۱ درنظر گرفته شده است. اما چنانچه بازای تعداد تکرار معینی بهبود حاصل نشد افزایش می یابد.

1. fitness



شکل ۱- روند اجرایی GA

۴- نتایج طراحی سیستم زمین

۴-۱- مقایسه شبکه زمین با فواصل یکسان و شبکه زمین با جایابی بهینه محل هادیها

در این بخش، طراحی سیستم زمین را در دو حالت بررسی می کنیم. در حالت اول جهت طراحی، از شبکه زمین با فواصل یکسان استفاده می شود. برای این حالت، کمترین تعداد هادیها برای برآورده شدن شرایط ایمنی بدست می آید. بر اساس بررسیهای انجام شده، در شبکه های با مشهای یکسان، بیشترین جریان از محیط و گوشه های شبکه جاری می شود و معمولاً بعلت تمرکز جریانهای بالا، بیشترین مقادیر ولتاژهای تماس و گام، در محیط شبکه زمین ایجاد می شوند. و استفاده از این روش جهت برآورده کردن شرایط ایمنی، باعث افزایش قابل توجه هزینه ها می گردد.

اما در حالت دوم، جایابی بهینه هادیهای شبکه زمین به کمک GA انجام می شود. در این حالت، برای مدل کردن شبکه زمین، بازای هر نقطه مورد نظر جهت قرار گیری هادیهای شبکه، یک بیت در نظر گرفته می شود که چنانچه مقدار این بیت یک باشد به معنی وجود هادی در محل متناظر با آن و چنانچه صفر باشد به معنی عدم وجود هادی است.

شبکه زمین مورد مطالعه دارای ابعاد ۸۰×۸۰ m۲ است که طراحی برای یک چهارم از شبکه انجام شده و با تقارن به کل آن اعمال می شود. محل قرار گیری هادیها در طول ۰ تا ۴۰ محور لحاظ شده که هر بیت متناظر با یک نقطه قرارگیری هادی است و در نهایت با تقارن به کل شبکه اعمال می شود.

در مقالات ارائه شده در زمینه بهینه سازی سیستم زمین، نقاط متناظر با محل قرارگیری هادیهای شبکه زمین در طول هر محور، بصورت یکنواخت در کل طول محور تقسیم شده است اما چون بیشترین جریان شبکه زمین از هادیهای محیطی و هادیهای نزدیک به محیط شبکه به خاک جاری می شوند، هر چه به محیط شبکه نزدیک شویم نیاز بیشتری به استفاده از هادیها نسبت به مرکز شبکه وجود دارد و در عمل، سیستم زمین بهینه به گونه ای است که تمرکز هادیها به سمت محیط شبکه زمین افزایش می یابد و هرچه شرایط سیستم زمین سخت تر شود این مساله بیشتر نمود پیدا می کند. درنتیجه در شرایط سخت مثل مقاومت ویژه خاک بالا یا جریانهای فالت بالا، بعلت کوچک شدن فاصله هادیها در مجاورت محیط شبکه، استفاده از این روش باعث افزایش قابل توجه تعداد بیتها و پیچیده و زمانبر شدن طراحی می شود.

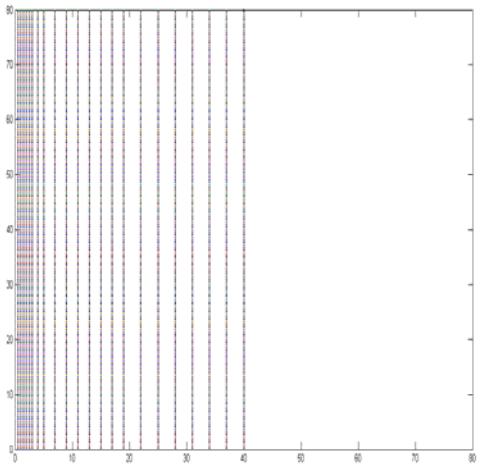
برای رفع این مساله، در این بررسی، نقاط متناظر با محل قرارگیری هادیها بصورت غیر یکنواخت انتخاب شده است بطوریکه تراکم این نقاط به سمت محیط شبکه افزایش می یابد که باعث کاهش تعداد بیتهای کروموزومها نسبت به حالت توزیع یکنواخت و کاهش قابل توجه زمان محاسبات و بهبود عملکرد بهینه سازی می گردد. نحوه اختصاص نقاط متناظر با محل قرارگیری هادیها در شکل ۲ نشان داده شده است.

روند اجرای مساله به این ترتیب است که در ابتدا یک جمعیت اولیه تعریف می شود که هر کدام از اعضای آن بیانگر یک سیستم زمین پیشنهادی می باشد. در هر تکرار

بازای هر یک از اعضا، بر اساس سیستم پیشنهادی آن، هزینه مربوط به آن محاسبه می شود که از رابطه زیر بدست می آید:

$$C = K \times \sum_{i=1}^{n} L_i \qquad (۱۶)$$

که K یک ضریب ثابت و L_i طول هادی i ام و n تعداد کل هادیهای سیستم زمین پیشنهادی است.



شکل۲- اختصاص نقاط غیر یکنواخت برای محل هادیها

مشابه آنچه در بخش ۳ توضیح داده شد، شرایط ولتاژ تماس و گام، بعنوان قیود طراحی لحاظ می شود و با استفاده از رابطه ۱۳ ضرایب پنالتی در تابع برازندگی اعمال می شود. ضرایب پنالتی بدین صورت است که بازای هر کدام از قیود ولتاژ تماس و گام، چنانچه شرط این قید برآورده نشود، مقدار ضریب پنالتی آن بالا بوده تا برازندگی آن خراب شود اما چنانچه برآورده شود، مقدار کمی لحاظ می شود. با استفاده از روابط ۱۴ و ۱۵ به هر عضو بر اساس عکس برازندگی آن شانس جهت انتخاب نسبت داده می شود.

مشخصات سیستم زمین مورد مطالعه:

عمق شبکه زمین h=۰/۵ m

- جریان تزریقی به شبکه زمین I_G=۳kA
- زمان رفع فالت t_s=۰/۵ s
- شعاع هادیهای مورد استفاده r_{cond}=۶ mm
- مقاومت ویژه لایه سطحی ρ_s=۲۵۰۰ Ωm
- قطر لایه سطحی h_s=۱۰cm

در این بخش برای دو حالت، بازای دو مقاومت ویژه خاک مختلف نتایج مقایسه می شود:

حالت۱: بازای مقاومت ویژه خاک ۳۰۰Ωm

حالت۱-a: شبکه زمین با فواصل یکسان

حالت ۱-b: جایابی بهینه هادیهای شبکه زمین بوسیله GA

حالت۲: بازای مقاومت ویژه خاک ۴۰۰Ωm

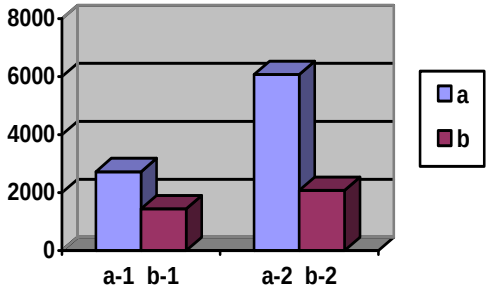
حالت۲-a: شبکه زمین با فواصل یکسان

حالت ۲-b: جایابی بهینه هادیهای شبکه زمین بوسیله GA

نتایج بررسیها در جدول۱ ارائه شده است. همچنین در شکل ۳ مقایسه بین طول کل هادیها برای حالتهای مختلف نشان داده شده است. بر اساس نتایج جدول ۱ و شکل ۳ مشاهده می شود که طول هادیها در سیستم بهینه نسبت به شبکه با فواصل یکسان بطور قابل ملاحظه ای کاهش پیدا کرده است و با افزایش مقاومت ویژه خاک، این تفاوت خیلی بیشتر می شود. بر اساس این نتایج، اهمیت بهینه سازی در طراحی سیستم زمین آشکار می شود و می توان گفت که استفاده از شبکه زمین با فواصل یکسان روش مناسبی جهت طراحی سیستم زمین نمی باشد.

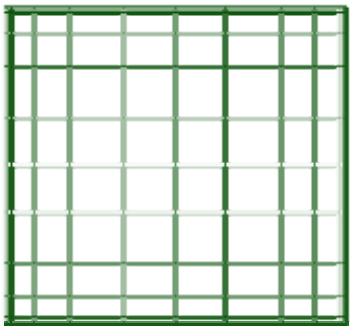
جدول۱- مقایسه شبکه زمین با فواصل یکسان با شبکه زمین با جایابی بهینه هادیها

حالت	ρ Ωm	$V_{t_{max}}$ v	E_t v	$V_{s_{max}}$ v	E_s v	L_{tot} m
a-۱	۳۰۰	۸۲۳/۲۴	۸۲۷/۲۶	۴۵۹	۲۶۴۳	۲۷۲۰
b-۱	۳۰۰	۸۲۴/۷۲	۸۲۷/۲۶	۵۶۶	۲۶۴۳	۱۴۴۰
a-۲	۴۰۰	۸۳۰/۲۱	۸۳۷/۵۹	۶۱۲	۲۶۸۴	۶۰۸۰
b-۲	۴۰۰	۸۳۶/۲۹	۸۳۷/۵۹	۷۷۲	۲۶۸۴	۲۰۸۰



شکل ۳- مقایسه طول کل هادیها (m) برای حالتهای طراحی

در اینجا بعنوان نمونه شبکه زمین بهینه مربوط بـه حالـت دوم در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- شبکه زمین بهینه بازای ρ=۴۰۰Ωm

مطابق شکل تعداد هادیها در این شبکه ۲۶ است درحالیکه در شبکه با فواصل یکسان این تعداد برابر ۷۶ می باشد.

۴-۲- طراحی سیستم زمین بهینه جـامع و مقایسـه بـا بهینه سازی تک متغیره

در بخش قبل نحوه طراحی سیستم زمین بهینه با جایابی بهینـه هادیهای شبکه زمین (بهینه سازی تک متغیـره) ارائـه شـد. در این بخش، بهینه سازی جامع با در نظر گرفتن عوامل مختلـف موثر بر ایمنی سیستم زمین بعنوان متغیرهای بهینه سازی، ارائه و نتایج آن بـا بهینـه سـازی تـک متغیـره مقایسـه مـی شـود. متغیرهای بهینه سازی عبارتند از: ۱- جایـابی بهینـه هادیهـای افقی شبکه زمین ۲- تعداد میله هـای عمـودی بکـار رفتـه در سیستم زمین ۳- طول میله های عمـودی ۴- شـعاع هادیهـای افقی شبکه ۵- شعاع میله هـای عمـودی ۶- قطـر مـواد لایـه سطحی ۷- عمق شبکه زمین

برای اعمال هر کدام از این متغیرها، تعداد بیت مناسبی لحـاظ می شود. یک جمعیت با تعداد ۴۰ عضو جهـت بهینـه سـازی استفاده می شود، هر کروموزوم یا عضـو جمعیـت از ۷ متغیـر تشکیل شده است. اولین متغیـر مربـوط بـه نحـوه قرارگیـری هادیهای افقی است که مشابه بخش قبل اعمال می شود با این تفاوت که بعلت استفاده از میله های عمودی در محیط شبکه، حساسیت هادیها در نزدیکی محـیط شـبکه کمتـر شـده و ۲۰ بیت برای نقاط با فواصل ۲m از ۰ تا ۴۰m در نظر می گیـریم که بر اساس بررسیهای تجربی انتخاب شده و با تقارن به کـل شبکه اعمال می شود. دومین متغیر بهینه سـازی، تعـداد میلـه های عمودی می باشد. بر اساس بررسـیهای صـورت گرفتـه، موثرترین حالت قرارگیری میله های عمودی، قرار گرفتن آنها در محیط شبکه است. بنابراین میله های عمودی را در محـیط شبکه زمین در نظر می گیـریم و یـک متغیـر ۵ بیتـی را بـرای تعیین تعداد میله های قرار گرفته در امتـداد طـول یـک ضـلع محیط شبکه در نظر گرفته و با تقارن به کل شبکه اعمـال مـی کنیم که عدد دهدهی متناظر با آن در محدوده ۳۱≥n2≥۰ می باشد و بوسیله رابطه زیر آنرا به تعداد هادیها کـه در محـدوده ۴۰≥nrod≥۰ تعیین شده متناظر می کنیم:

$$n_{rod} = round\left(\left(\frac{n_{rod_{\max}} - n_{rod_{\min}}}{2^{n_{bit}} - 1}\right) n_2 + n_{rod_{\min}}\right) \qquad (۱۷)$$

$$n_{bit} = 5 \quad , \quad n_{rod_{\min}} = 0 \quad , \quad n_{rod_{\max}} = 40$$

سومین متغیر، طول هادیهای عمـودی اسـت کـه در محـدوده ۱۰m≥lrod≥۰ لحاظ می شود. متغیر چهـارم شـعاع هادیهـای افقی شبکه زمین مـی باشـد کـه در محـدوده ۱۲mm≥rcond≥۶mm در نظر گرفته می شود. و متغیر پنجم، شعاع میله های عمودی سیستم زمین است که در دو حالت بررسی می شـود. در حالت اول در محدوده ۱۴mm≥ rrod≥۸mm و در حالت دوم در محـدوده ۱۴mm≥ rrod≥۶mm در نظـر گرفتـه مـی شود. متغیر ششم، قطر لایه سطحی می باشد که طبق استاندارد در محدوده ۰/۱۵m≥hs≥۰/۰۸m و متغیر هفـتم، عمـق شـبکه زمین اسـت کـه در محـدوده ۱/۷۵m≥h≥۰/۲۵m لحـاظ مـی شود. هر متغیر با یک رشته عدد دودویی در داخل کرومـوزوم مدل می شود و برای محاسبه مقـدار متنـاظر بـا هـر کـدام از متغیرها از رابطه زیر استفاده می شود:

$$x = \left(\left(\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^{n_{bit}} - 1}\right) n + x_{\min}\right) \qquad (۱۸)$$

که x_{max} و x_{min} بترتیب حدهای بالا و پایین متغیر مـورد نظـر، n_{bit} تعداد بیت رشته عدد دودویی متناظر با متغیر مورد نظـر و n مقدار دهدهی برابر با رشته دودویی متغیر است.

بازای هر سیستم پیشنهادی، هزینه کل سیستم، شامل هزینه هادیها، هزینه مواد لایه سطحی، هزینه نصب عمق و هزینه اتصالات هادیها می باشد.

برای محاسبه هزینه هادیهای سیستم زمین، وزن کلی هادیها محاسبه و در قیمت واحد وزن ضرب می شود.

قیمت کل هادیهای افقی:

$$\cos t_{cond} = K_c \times \pi r_{cond}^2 \times L_{tot_{cond}} \times G \qquad (۱۹)$$

قیمت کل میله های عمودی:

$$\cos t_{rod} = K_c \times \pi r_{rod}^2 \times L_{tot_{rod}} \times G \qquad (۲۰)$$

که Kc قیمت واحد وزن هادیها، G جرم حجمی هادیها، $L_{tot_{cond}}$ طول کل هادیهای افقی سیستم زمین و $L_{tot_{rod}}$ طول کل میله های عمودی سیستم زمین می باشد.

هزینه کلی سیستم زمین از رابطه زیر بدست می آید:

$$C = \cos t_{cond} + \cos t_{rod} + \cos t_{depth} + \cos t_{sl} + \cos t_b \qquad (۲۱)$$

که $\cos t_{depth}$ هزینه نصب سیستم زمین در عمق معین، $\cos t_{sl}$ هزینه مواد لایه سطحی و $\cos t_b$ هزینه اتصالات هادیها می باشد.

پروسه با یک جمعیت اولیه شروع می شود. در هر تکرار، برای هر کدام از اعضا، هزینه سیستم مربوطه محاسبه می شود. هدف حداقل کردن هزینه است اما باید شرایط ایمنی را نیز در نظر گرفت. شرایط ایمنی شامل شرایط ولتاژ تماس و گام بعنوان قیود طراحی با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه و بصورت ضریب پنالتی در تابع برازندگی اعمال می شود. و تابع برازندگی مطابق رابطه زیر بدست می آید:

$$F = C + K_{pen1}\Delta V_t + K_{pen2}\Delta V_s \qquad (۲۲)$$

که برای هر کدام از قیود طراحی، چنانچه شرط آن برآورده شود، یک مقدار کوچک برای ضریب پنالتی آن اعمال می شود اما چنانچه این شرط برآورده نشود، مقدار این ضریب بالا می باشد که باعث خراب شدن برازندگی این سیستم غیر ایمن و کاهش شانس انتخاب آن می گردد. همچنین با استفاده از روابط ۱۴ و ۱۵ به هر کدام از اعضا بر اساس عکس برازندگی آن شانس جهت انتخاب نسبت داده می شود.

در این بخش قصد داریم در چند حالت، روشهای بهینه سازی ارائه شده را مقایسه کنیم. این حالتها عبارتند از:

حالت۱: بازای مقاومت ویژه ۳۰۰Ωm و IG=۳kA

حالت۲: بازای مقاومت ویژه ۴۰۰Ωm و IG=۳kA

حالت۳: بازای مقاومت ویژه ۴۵۰Ωm و IG=۳kA

حالت۴: بازای خاک دو لایه با مقاومت ویژه لایه بالایی ۵۰۰Ωm و ضخامت ۷m و مقاومت ویژه لایه پایینی ۳۰۰Ωm و IG=۳/۵kA

برای هر یک از حالتهای فوق، سه مطالعه تحت عنوان مطالعه a، b و c انجام گرفته است که به شرح زیر می باشد:

مطالعه **a**: در این مطالعه، جایابی بهینه هادیهای شبکه زمین (بهینه سازی تک متغیره) به کمک GA انجام می شود. در این مطالعه، عمق شبکه زمین ۰/۵m، شعاع هادیهای شبکه ۶mm و قطر لایه سطحی مورد استفاده ۱۰cm در نظر گرفته شده است.

مطالعه b: این مطالعه مربوط به بهینه سازی با در نظر گرفتن تمام متغیرها می باشد. در این مطالعه حداقل شعاع میله های عمودی ۸mm لحاظ شده است.

مطالعه c: در این مطالعه، بهینه سازی با در نظر گرفتن تمام متغیرها انجام شده است و حداقل شعاع میله های عمودی ۶mm در نظر گرفته شده است.

نتایج حالتهای مختلف بهینه سازی در جدول ۲ ارائه شده است. و شکل ۵ مقایسه بین هزینه هادیها و شکل ۶ مقایسه بین هزینه کلیه پارامترهای سیستم زمین برای حالتهای مختلف را نشان می دهد. بررسی نتایج جدول ۲ و شکلهای ۵ و۶ نشان می دهد که در حالت بهینه سازی چند متغیره نسبت به تک متغیره هزینه های سیستم زمین بطور قابل توجهی کاهش می یابد و با سخت تر شدن شرایط، میزان صرفه جویی افزایش یافته است.

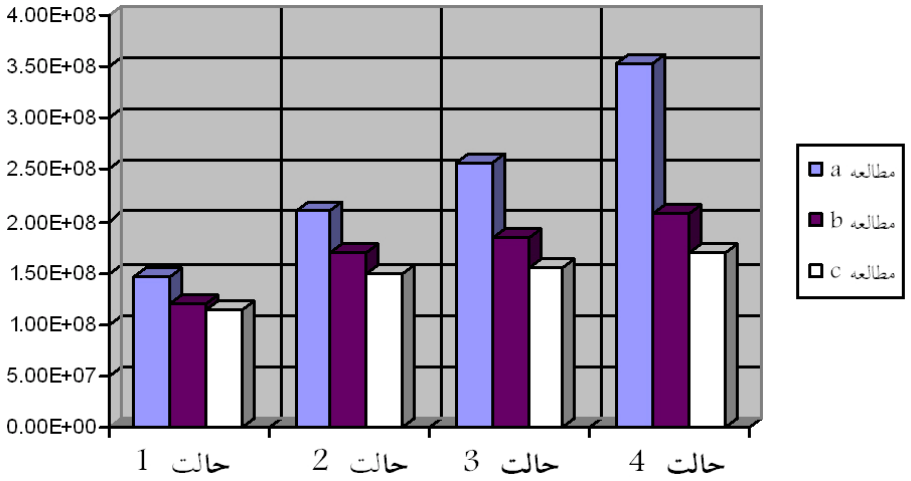
در مقالات ارائه شده جهت بهینه سازی سیستم زمین، تنها طول هادیها بعنوان متغیر بهینه سازی لحاظ شده است. اما در این مطالعه، بهینه سازی با درنظر گرفتن پارامترهای مختلف موثر بر ایمنی سیستم زمین بعنوان متغیرهای بهینه سازی انجام

شده است که بر اساس نتایج بدست آمده، استفاده از این روش باعث افزایش انعطاف بهینه سازی و کاهش قابل توجه هزینه های سیستم می شود.

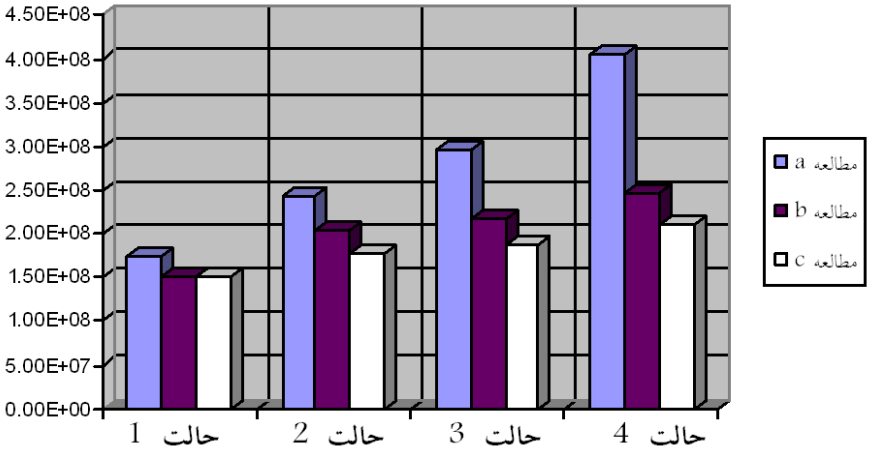
در سیستمهای بهینه بدست آمده در این روش، شعاع بهینه بدست آمده برای هادیها و میله های عمودی برابر حداقل محدوده شعاع لحاظ شده برای آنهاست. همچنین بررسی دو حالت بهینه سازی نشان می دهد که در حالتی که حداقل شعاع میله ها کمتر لحاظ شد، هزینه جواب بهینه نسبت به حالت با حداقل شعاع بیشتر، کاهش پیدا کرده است. پس می توان نتیجه گرفت که افزایش شعاع هادیها جهت برآورده شدن شرایط ایمنی، روش به صرفه ای نمی باشد و بهتر است از روشهای دیگری مثل افزایش تعداد یا طول هادیها استفاده نمود. البته باید توجه شود که قطر هادیها مطابق استاندارد تحمل جریانهای بالای الکتریکی و فشارهای مکانیکی احتمالی را داشته باشد.

جدول ۲- مقایسه نتایج پارامترهای سیستم زمین برای حالتهای مورد بررسی

حالت	مطالعه	ρ Ωm	I_G A	h_s m	h m	r_{rod} mm	l_{rod} m	n_{cond}	n_{rod}	$V_{t_{max}}$ v	E_t v	$V_{s_{max}}$ v	E_s v	هزینه هادیها ×۱۰^۶ ریال	درصد صرفه جویی در هزینه هادیها نسبت به تک متغیره (مطالعه a)	هزینه کل پارامترها ×۱۰^۶ ریال	درصد صرفه جویی در هزینه کل پارامترها نسبت به تک متغیره (مطالعه a)
۱	a	۳۰۰	۳۰۰۰	۰/۱	۰/۵	----	----	۱۸	----	۸۲۴/۷۲	۸۲۷/۲۶	۵۶۶	۲۶۴۳	۱۴۵/۲۷	----	۱۷۴/۶۷	----
	b	۳۰۰	۳۰۰۰	۰/۱۰۸	۰/۹۷۵۸	۸	۸/۶۶۷	۱۴	۴	۸۳۷/۶۵	۸۳۹/۱۵	۳۰۰	۲۶۹۰	۱۱۹/۲	۱۷/۹۴	۱۵۱/۶۹	**۱۳/۱۶**
	c	۳۰۰	۳۰۰۰	۰/۱۲۲۲	۱/۳۱۴۵	۶	۱۰	۱۲	۱۶	۸۵۵/۴۳	۸۵۷/۲۱	۲۳۹	۲۷۶۳	۱۱۲/۹۹	۲۲/۲۲	۱۴۹/۶۱	**۱۴/۳۵**
۲	a	۴۰۰	۳۰۰۰	۰/۱	۰/۵	----	----	۲۶	----	۸۳۶/۲۹	۸۳۷/۵۹	۷۷۲	۲۶۸۴	۲۰۹/۸۴	----	۲۴۴/۱۵	---
	b	۴۰۰	۳۰۰۰	۰/۱۰۸	۰/۸۷۹	۸	۱۰	۱۴	۳۲	۸۴۷/۹۳	۸۴۸/۹۴	۳۴۸	۲۷۳۰	۱۷۰/۳۸	۱۸/۸	۲۰۳/۱۹	**۱۶/۷۷**
	c	۴۰۰	۳۰۰۰	۰/۰۸۹۳	۱/۰۷۲۶	۶	۱۰	۱۲	۵۲	۸۱۶/۰۶	۸۲۰/۳۶	۲۷۵	۲۶۱۵	۱۴۹/۳۱	۲۸/۸۴	۱۷۸/۴۸	**۲۶/۹**
۳	a	۴۵۰	۳۰۰۰	۰/۱	۰/۵	----	----	۳۲	----	۸۲۷/۲۷	۸۴۲/۷۶	۸۷۷	۲۷۰۵	۲۵۸/۲۶	---	۲۹۷	---
	b	۴۵۰	۳۰۰۰	۰/۱۰۳۳	۰/۸۷۹	۸	۱۰	۱۴	۴۰	۸۴۱/۹۱	۸۴۷/۵۲	۳۷۰	۲۷۲۴	۱۸۴/۷۳	۲۸/۴۷	۲۱۶/۷۸	**۲۷**
	c	۴۵۰	۳۰۰۰	۰/۱۱۷۳	۰/۸۷۹	۶	۱۰	۱۴	۴۰	۸۶۴/۵۶	۸۶۵/۳۹	۳۷۳	۲۷۹۶	۱۵۳/۳۴	۴۰/۶۲	۱۸۸/۵۳	**۳۶/۵۲**
۴	a	۵۰۰ ۳۰۰	۳۵۰۰	۰/۱	۰/۵	---	----	۴۴	----	۸۴۵/۲۵	۸۴۷/۹۳	۹۵۶	۲۷۲۶	۳۵۵/۱۱	---	۴۰۴/۵۹	---
	b	۵۰۰ ۳۰۰	۳۵۰۰	۰/۱۳۱۳	۱/۱۲۱	۸	۱۰	۱۴	۵۲	۸۸۴/۰۶	۸۸۴/۶۶	۲۹۰	۲۸۷۳	۲۰۶/۲۵	۴۱/۹۲	۲۴۶/۶۲	**۳۹**
	c	۵۰۰ ۳۰۰	۳۵۰۰	۰/۱۲۶۷	۱/۱۲۱	۶	۱۰	۱۴	۵۶	۸۷۵/۶۴	۸۸۰/۰۴	۲۸۷	۲۸۵۴	۱۶۹/۴۸	۵۲/۲۷	۲۰۸/۹۴	**۴۸/۳۶**

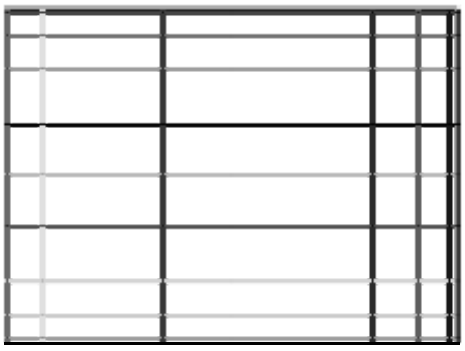


شکل ۵- مقایسه هزینه هادیهای سیستم زمین برای حالتهای مختلف بر حسب ریال

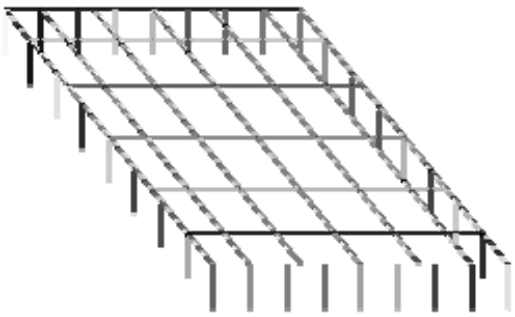


شکل ۶- مقایسه هزینه کل پارامترهای سیستم زمین برای حالتهای مختلف برحسب ریال

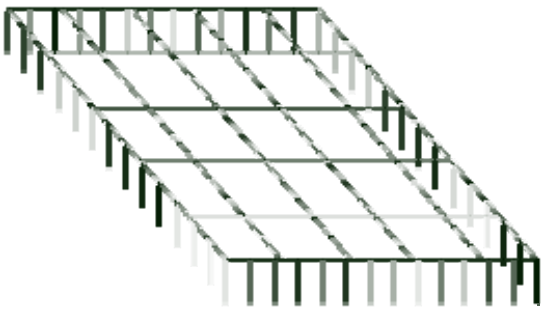
در اینجا بعنوان نمونه نتایج سیستمهای زمین مربوط به حالت دوم در شکلهای ۷ تا ۹ ارائه شده است.



شکل ۷- سیستم زمین بهینه مربوط به حالت ۲ مطالعه a



شکل ۸- سیستم زمین بهینه مربوط به حالت۲ مطالعه b



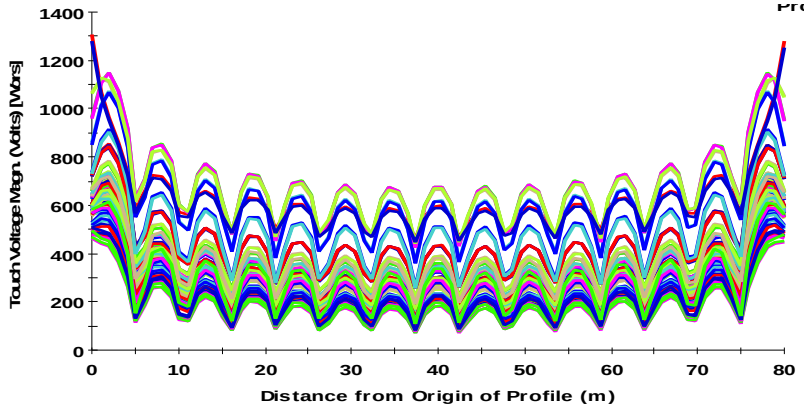
شکل ۹- سیستم زمین بهینه مربوط به حالت ۲ مطالعه c

شکل ۷ مربوط به حالت بهینه سازی تک متغیره، شکل ۸ مربوط به بهینه سازی چند متغیره با حداقل شعاع میله های عمودی ۸mm و شکل ۹ بهینه سازی چند متغیره با حداقل شعاع میله های عمودی ۶mm می باشد.

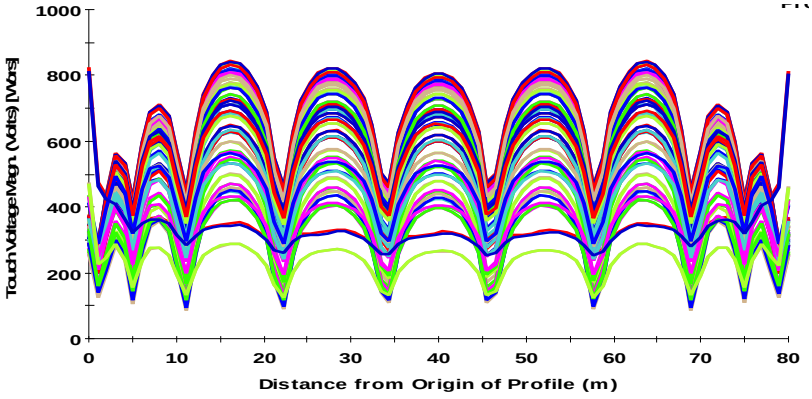
بر اساس این نتایج در حالت بهینه سازی چند متغیره هزینه سیستم زمین بطور قابل توجهی نسبت به بهینه سازی تک متغیره کاهش یافته است. همچنین مقایسه دو حالت بهینه سازی چند متغیره نشان می دهد که در حالت با حداقل شعاع کمتر میله های عمودی (شکل ۹) هزینه ها بطور محسوسی نسبت به حالت با حداقل شعاع بیشتر (شکل ۸) کاهش یافته است. که بیانگر این است که افزایش شعاع هادیها روش مناسبی نیست و بهتر است از افزایش طول یا تعداد هادیها استفاده شود.

۴-۳- بررسی ولتاژهای تماس سطحی

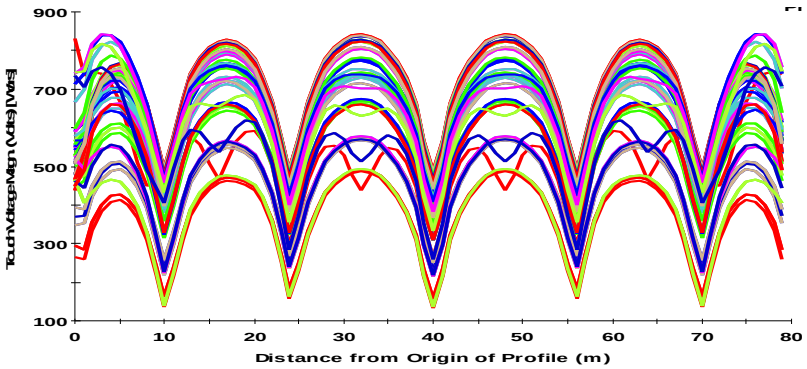
در این بخش بعنوان نمونه ولتاژهای تماس سطحی ایجاد شده را برای حالت سوم (با مقاومت ویژه خاک ۴۵۰Ωm) بررسی می کنیم. نتایج در شکلهای ۶ و۷ و۸ نشان داده شده است. شکل ۶ مربوط به ولتاژهای تماس ایجاد شده شبکه زمین با فواصل یکسان با تعداد هادیهای برابر با تعداد هادیهای شبکه در حالت بهینه سازی تک متغیره می باشد. شکل ۷ مربوط به ولتاژهای تماس ایجاد شده در حالت بهینه سازی تک متغیره و شکل ۸ مربوط به بهینه سازی با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف است.



شکل ۱۰- ولتاژهای تماس سطحی در حالت شبکه با فواصل یکسان



شکل ۱۱- ولتاژهای تماس سطحی در حالت بهینه سازی تک متغیره



شکل ۱۲- ولتاژهای تماس سطحی در حالت بهینه سازی چند متغیره

بررسی شکلها نشان می دهد کـه توزیـع مـاکزیمم ولتاژهـای تماس سطحی در حالت شبکه با فواصل یکسان تا حد زیادی غیر یکنواخت است. همچنین این مقـادیر در نزدیکـی محـیط شبکه بطور قابل توجهی افزایش می یابـد کـه ایـن مسـاله در بهینه سازی تک متغیره برطرف شده اسـت امـا بعلـت تمرکـز بالای جریانها در هادیهای نزدیک محیط، در این بهینه سـازی تمرکز هادیها هم به سمت محیط افزایش می یابد و این مساله باعث غیریکنواخت شدن ماکزیمم ولتاژهای تماس می گـردد. در حالت بهینه سازی با در نظر گـرفتن پارامترهـای مختلـف، این مساله برطرف شده و توزیـع مـاکزیمم ولتاژهـای تمـاس سطحی، یکنواخت تر می شود و باعث مـی شـود کـه هزینـه های سیستم زمین باز هم کاهش یابد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، بهینه سازی جامع سیستم زمین حفاظتی به کمک GA، با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف مـوثر بـر ایمنـی آن بعنوان متغیرهای بهینه سازی ارائه و نتایج آن با حالتهای دیگر طراحی سیستم زمین مقایسه شـد. طبـق نتـایج بدسـت آمـده، استفاده از این روش باعـث افـزایش انعطـاف بهینـه سـازی و کاهش قابل توجه هزینه های سیستم نسبت بـه حالـت بهینـه سازی تک متغیره (جایابی بهینه هادیهـا) مـی شـود. همچنـین باعث یکنواخت تر شدن گرادیانهای سطحی می گردد. ضـمناً در جایابی بهینه هادیها، توزیع نقاط متناظر با محل قرارگیـری هادیها بصورت غیر یکنواخت اعمال شد کـه باعـث افـزایش سرعت و بهبود کارایی بهینه سازی می شود.

۶- مراجع

[1] "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", *IEEE Std 80-2000, IEEE-SA Standards Board, Jan. 2000*

[2] "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", *ANSI/IEEE Std 80-1986*

[3] "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", *IEEE Std 81.2-1991*

[4] "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", *ANSI/IEEE Std 81-1983*

[5] Y. Gao, R. Zeng, X. Liang, J. He, W. Sun, Q. Su, "Safety Analysis of Grounding Grid for Substations with Different Structure", *IEEE Inter. Conference on Power System Technology, vol. 3, pp. 1487-1492, Dec. 2000*

[6] H. S. Lee, J. Kim, F. P. Dawalibi, J. Ma, " Efficient Ground Grid Design in Layered Soils", *IEEE Trans. Power Del., vol. 13, no. 3, pp. 745-751, Jul. 1998*

[7] W. Sun, J. He, Y. Gao, R. Zeng, W. Wu, Q. Su, " Optimal Design Analysis of Grounding Grids for Substations Built in Nonuniform Soil", *IEEE Inter. Conference on Power* System *Technology, vol. 3, pp. 1455-1460, Dec. 2000*

[8] J. He, Y. Gao, R. Zeng, W. Sun, J. Zou, Z. Guan, "Optimal Design of Grounding System Considering the Influence of Seasonal Frozen Soil Layer", *IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 1, pp. 107-115, Jan. 2005*

[9] F. Neri, "A New Evolutionary Method for Designing Grounding Grids By Touch Voltage Control", *Industrial Electronics, IEEE Inter. Symposium, vol. 2, pp. 1501-1505, May. 2004*

[10] M. C. Costa, M. L. P. Filho, Y. Maréchal, J. Coulomb, and J. R. Cardoso, "Optimization of Grounding Grids by Response Surfaces and Genetic Algorithms", *IEEE Trans. on Magn., vol. 39, no. 3, pp. 1301-1304, May 2003*

[11] A. F. Otero, J. Cidrbs, C. Garrido, "Genetic Algorithm Based Method for Grounding Grid Design", *Proc. of the IEEE Inter. Conference on Evolutionary Computation, pp. 120-123, May. 1998*

[12] A. Covitti, G. Delvecchio, A. Fusco, F. Lerario, and F. Neri, "Two Cascade Genetic Algorithms to Optimize Unequally Spaced Grounding Grids with Rods", *IEEE Inter. Conference on Computer as a Tool, vol. 2, pp. 1533-1536, 2005*

[13] Z. He, X. Wen, J. Wang, "Optimization Design of Substation Grounding Grid Based on Genetic Algorithm", *IEEE Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007), vol. 4, pp. 140 – 144, Aug. 2007*