

## بهینه سازی مدل چند لایه خاک در آزمایش تعیین مقاومت ویژه با استفاده از الگوریتم ژنتیک تحت نظارت

پویا حاجبی	عباسعلی حیدری	احمد میرزایی
دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه یزد	استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه یزد	استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه یزد
Hajebi@stu.yazduni.ac.ir	ahaidari@yazduni.ac.ir	mirzaei@yazduni.ac.ir

چکیده - یکی از مهمترین عوامل برای تعیین دقیق مقاومت زمین، دانستن مدلی دقیق از لایه بندی خاک و مقاومت ویژه این لایه ها می باشد. مدل مذکور باید تا حد امکان شبیه به مدل واقعی بوده و کمترین خطا را نسبت به آن داشته باشد. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از الگوریتم ژنتیک تحت نظارت و با داشتن نتایج اندازه گیری مقاومت ویژه خاک، تقریب دقیقی از مدل واقعی ساختار خاک ارائه شود. این روش خطای کمتری نسبت به روش های قبلی دارد. همچنین در پایان با استفاده از روش المان محدود برای مقادیر به دست آمده پارامترهای خاک، مقاومت یک شبکه مسطح مدفون در خاک به دست آمده است. کلید واژه- الگوریتم ژنتیک تحت نظارت، روش ۴ نقطه ای ونر، شبیه سازی، مدل چند لایه خاک، مقاومت ویژه

### ۱- مقدمه

روش ونر پرداخته شده است. بخش سوم ضمن معرفی الگوریتم ژنتیک، نحوه به کارگیری آن را در بهینه سازی مدل دو لایه نشان می دهد. در بخش چهارم مدل هایی دو لایه و چند لایه برای ساختار خاک معرفی شده اند. در بخش پنجم نتایج عددی برای حالت های مختلف ارائه شده است و سپس با استفاده از پارامترهای استخراج شده بهینه برای یک زمین مشخص، مقاومت شبکه زمین مدفون در آن توسط روش المان محدود، به دست آمده است.

### ۲- اندازه گیری عملی مقاومت ویژه زمین

برای اندازه گیری مقاومت ویژه خاک روش های مختلفی ارائه شده است که از این میان روش ۴ نقطه ای ونر، دقیق ترین روش اندازه گیری مقاومت ویژه خاک می باشد، لذا در این مقاله برای اندازه گیری عملی مقاومت ویژه خاک از روش ونر استفاده می شود. روش ونر به تفصیل در زیر توضیح داده شده است.

### ۲-۱- روش چهار نقطه ای ونر

دقیق ترین روش اندازه گیری در محاسبه میانگین مقاومت ویژه زمین طبیعی، روش ۴ نقطه ای ونر است [2].

برای تعیین دقیق مقاومت زمین نیاز به دانستن مدل دقیق پارامترهای خاک می باشد. مقاومت ویژه خاک به صورت تجربی توسط روش های مختلفی مانند روش ۳ نقطه ای، روش ۴ نقطه ای ونر (Wenner) و روش ۴ نقطه ای Schlumberger به دست می آید [1,2]. از این میان روش ونر دقیق ترین روش و روش Schlumberger حساس ترین روش نسبت به لوازم اندازه گیری می باشد [2]. بنابراین در این مقاله روش ۴ نقطه ای ونر به عنوان روش اندازه گیری مقاومت ویژه خاک در نظر گرفته شده است. برای ارائه مدلی بهینه از لایه بندی خاک، نیاز به بهینه سازی تابعی است که به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می شود. روش های مختلفی برای این منظور وجود دارد. در مرجع [3] روشی تحت عنوان روش سیمپلکس جهت بهینه سازی مدل دو لایه خاک ارائه شده است. در مراجع [4-8] روش های دیگری نیز ارائه شده است. در این مقاله بهینه سازی برای خاک چند لایه به روش الگوریتم ژنتیک تحت نظارت مورد بررسی قرار گرفته است، که این روش نتایج مطلوب تری را نسبت به سایر روش ها در بر دارد. در بخش دوم مقاله به روش اندازه گیری عملی و

مقدار تصادفی برای لایه بالایی ( $0 < \rho_1 < 1500$ )،  $100$  مقدار تصادفی برای مقاومت ویژه لایه دوم ( $0 < \rho_2 < 1500$ ) و  $100$  مقدار تصادفی برای ضخامت لایه اول ( $0 < h_1 < 8$ ) تولید می‌گردد. الگوریتم ژنتیک به صورت دو جمعیت مجزای  $50$  تایی و به طور موازی اجرا شده است. پس از اتمام هر مرحله از اجرا پنجاه درصد از کروموزوم‌های هر جمعیت توسط مکانیزم چرخ رولت انتخاب و جابجا شده‌اند. سپس با احتمال ترکیب ( $P_c$ ) و احتمال جهش ( $P_m$ ) تحت نظارت، الگوریتم ژنتیک بر اساس مکانیزم چرخ رولت برای هر جمعیت اجرا می‌گردد. مقدار  $P_m(\max)$  برای احتمال جهش و مقدار  $P_c(\max)$  برای احتمال ترکیب در نظر گرفته می‌شوند، سپس این مقادیر به صورت زیر کاهش می‌یابند:

$$\begin{aligned} P_m &= P_m(\max) & P_c &= P_c(\max) \\ P_m &= P_m(\max) \times 0.99 & P_c &= P_c(\max) \times 0.99 \\ P_m &\geq P_m(\min) & P_c &\geq P_c(\min) \end{aligned}$$

به طوری که:  $P_c \geq P_c(\min)$  کاهش احتمال تا حد  $P_{\min}$  ادامه می‌یابد، اگر در طی مراحل اجرای الگوریتم ماکزیمم احتمال انتخاب، که مربوط به بهترین کروموزوم است و با توجه به رابطه (۳) تعیین می‌شود.

$$P_{l \max} = \max\{P_{l,i}\}, \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

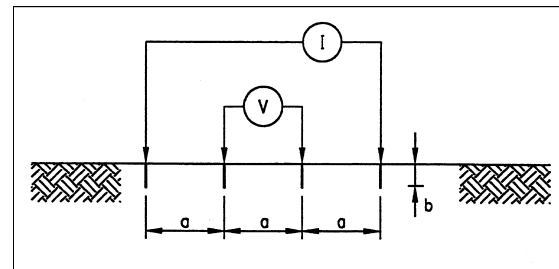
در چندین مرحله تغییرات کمی داشت، احتمال به مقدار اولیه  $P_{\max}$  افزایش یافته و مجدداً طبق روند ارائه شده، کاهش می‌یابد. با اجرای روش فوق، الگوریتم ژنتیک از قرار گرفتن در نقاط بهینه محلی رهایی یافته و به سمت نقطه بهینه سراسری حرکت می‌کند. پس از اینکه احتمال انتخاب بهترین کروموزوم برای تولید نسل بعدی در طی چندین مرحله در هر دو جمعیت ثابت ماند یا تغییرات بسیار کمی داشت، بهترین کروموزوم که تابع هدف را کمینه نماید، انتخاب می‌گردد. فلوجارت الگوریتم ژنتیک تحت نظارت در شکل (۵) رسم شده است.

الکترودهای کوچک در  $4$  نقطه از زمین با فاصله‌هایی به اندازه  $\alpha$  در امتداد یک خط قرار می‌گیرند. یک جریان  $I$  فرضی بین دو الکتروود خارجی عبور می‌کند و پتانسیل  $V$  بین دو الکتروود دیگر با یک ولت‌متر امپدانس بالا اندازه‌گیری می‌شود. نسبت  $\frac{V}{I}$  مقاومت  $R$  را بر حسب اهم می‌دهد. مقاومت ویژه خاک تا عمق  $\alpha$  از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [1].

$$\rho(\alpha) = \frac{4\pi\alpha R}{1 + \frac{2\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 4b^2}} - \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + b^2}}} \quad (1)$$

$b$  عمق کوبیدن میله‌ها (متر) و  $\alpha$  فاصله بین الکتروودها (متر) و  $\rho$  مقاومت ویژه (اهم-متر) می‌باشد. در عمل الکتروودهای اندازه‌گیری در عمق کمتر از  $0.1\alpha$  کوبیده می‌شوند، بنابراین می‌توان در رابطه (۱) از  $b^2$  صرف‌نظر کرد و به رابطه ساده (۲) رسید.

$$\rho = 2\pi\alpha R \quad (\Omega \cdot m) \quad (2)$$



شکل ۱: روش اندازه‌گیری وئر.

رابطه (۲) به طور تقریبی میانگین مقاومت ویژه خاک را تا عمق  $\alpha$  ارائه می‌دهد. برای شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر مدل خاک، می‌توان ساختار خاک را چند لایه در نظر گرفت، بر این اساس ساختار دو لایه می‌تواند تقریب خوبی از مدل خاک باشد، چون علاوه بر ارائه ساختار چند لایه، مدل برای تعیین مقاومت شبکه زمین خیلی پیچیده نمی‌شود.

### ۳- الگوریتم ژنتیک تحت نظارت

هر کروموزوم شامل  $60$  عنصر برای پارامترهای مقاومت ویژه لایه‌ها و ضخامت لایه‌ها می‌باشد. در مدل خاک دو لایه،  $22$  عنصر اول هر کروموزوم مربوط به  $\rho_1$ ،  $22$  عنصر دوم مربوط به  $\rho_2$  و  $16$  عنصر باقیمانده مربوط به  $h_1$  می‌باشد. تعداد جمعیت اولیه  $100$  در نظر گرفته شده است، که  $100$

#### ۴- مدل خاک‌های چند لایه

ایزوتروپیک ( $\rho_0$ ) ناشی از جریان  $I$ ، تا نقطه‌ای که الکتروود بر روی سطح واقع شده، توسط رابطه (۸) داده شده است [10].

$$V_0(x) = \frac{\rho_0 I}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda|z|} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (8)$$

که  $J_0$  تابع بسل نوع اول از مرتبه صفر می‌باشد. با استفاده از مدل Tagg [9]، در یک ساختار دو لایه افقی (با مقاومت ویژه‌های  $\rho_1$  و  $\rho_2$ )، پتانسیل  $V$  ناشی از جریان  $I$ ، در یک نقطه که الکتروود در آن سطح قرار گرفته، توسط رابطه (۹) بیان می‌شود.

$$V(x) = \frac{\rho_1 I}{2\pi x} [1 + F_2(x)] \quad (9)$$

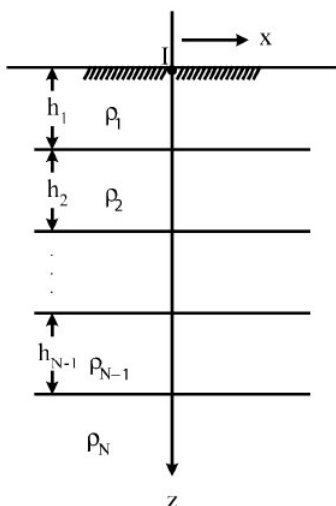
$$F_2(x) = 2x \int_0^\infty \frac{k_1 e^{-2\lambda h}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h}} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (10)$$

$k_1$  ثابت انعکاس لایه بالایی نسبت به لایه پایینی است.

$$k_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (11)$$

#### ۴-۲-۲- تغییرات پتانسیل سطح خاک چند لایه

یک روش برای محاسبه پتانسیل سطح در ساختار چند لایه در زمین توسط Takahashi و Kawase بسط داده شده است [10,11]. ساختار  $N$  لایه مدل زمین در شکل (۲) نشان داده شده است. ضخامت لایه  $i$  ام با  $h_i$  و مقاومت ویژه آن با  $\rho_i$  نشان داده شده است.



شکل ۲: مدل زمین چند لایه.

پتانسیل در هر نقطه  $x$  در سطح زمین ناشی از جریان  $I$  وارد شده به زمین، به صورت روابط (۱۲) تا (۱۶) بیان می‌گردد [11].

در مرجع [3,6] مدل دو لایه برای ساختار خاک ارائه شده است، در این مقاله تابع خطا برای مدل‌هایی با تعداد لایه بالاتر معرفی شده است.

#### ۴-۱- خاک‌های دو لایه

محاسبه پارامترهای ساختار دو لایه زمین یک مساله بهینه‌سازی است. برای محاسبه ۳ پارامتر (مقاومت ویژه لایه بالایی، مقاومت ویژه لایه پایینی و ضخامت لایه بالایی)، می‌بایست تابع  $F_g$  در رابطه (۴) مینیمم شود.

$$F_g = \sum_{i=1}^N \frac{|\rho_{\alpha_i}^m - \rho_{\alpha_i}^c|}{\rho_{\alpha_i}^m} \quad (4)$$

$\rho_{\alpha_i}^m$ ،  $i$  امین اندازه‌گیری مقاومت ویژه خاک است، که در این حالت فاصله پروب‌ها از همدیگر  $\alpha_i$  باشد.

$\rho_{\alpha_i}^c$  مقدار محاسبه شده مقاومت ویژه خاک (توسط الگوریتم ژنتیک) برای همین فاصله  $\alpha_i$  می‌باشد. مقاومت ویژه به کمک روابط (۵) تا (۷) محاسبه می‌شود [3-7].

$$\rho_{\alpha}^c = \rho_1 \left( 1 + 4 \sum_n k^n \left( \frac{1}{\sqrt{A}} - \frac{1}{\sqrt{B}} \right) \right) \quad (5)$$

که  $n = 1, \dots, \infty$  و  $k$  ضریب انعکاس است و

$$A = 1 + \left( \frac{2n h_1}{\alpha} \right)^2 \quad (6)$$

$$B = A + 3 \quad (7)$$

که  $\rho_1$  و  $h_1$  به ترتیب مقاومت ویژه و ضخامت لایه اول می‌باشند.

#### ۴-۲- خاک‌های چند لایه

در قسمت قبل تخمین پارامترهای خاک در خاک‌های دو لایه تشریح شد، در این قسمت تخمین پارامترهای خاک‌های سه لایه و بالاتر انجام می‌شود.

#### ۴-۱-۲- تغییرات پتانسیل سطح خاک دو لایه

قبل از بیان روابط مربوط به خاک‌های سه لایه و بالاتر، مناسب است ابتدا تغییرات پتانسیل برای خاک دو لایه ذکر شود. پتانسیل  $V_0$  در هر نقطه (مختصات استوانه ای  $x$  و  $\phi$  و  $z$ ) در زمین (با فرض خاک همگن و مقاومت ویژه

محاسبه پارامترهای خاک N لایه یک مساله بهینه‌سازی با (2N-1) متغیر می‌باشد. با استفاده از M اندازه‌گیری (اندازه‌گیری مقاومت ویژه به ازای  $\alpha$  های مختلف) باید تابع Fg در رابطه (۱۸) مینیمم گردد.

$$F_g = \sum_{i=1}^M \left| \frac{\rho_{\alpha_i}^m - \rho_{\alpha_i}^c}{\rho_{\alpha_i}^c} \right| \quad (18)$$

برای به دست آوردن  $\rho_{\alpha}^c$  به طریق زیر عمل می‌شود. با قرار دادن رابطه (۱۲) در رابطه (۱۷) داریم:

$$V_N(\alpha) - V_N(2\alpha) = \frac{\rho_1 I}{2\pi\alpha} \left[ \frac{1}{2} + F_N(\alpha) - \frac{F_N(2\alpha)}{2} \right] \quad (19)$$

$$\rho(\alpha) = \rho_1 [1 + 2F_N(\alpha) - F_N(2\alpha)] \quad (20)$$

#### ۵- نتایج شبیه‌سازی

نتایج الگوریتم ژنتیک برای اندازه‌گیری‌های عملی ارائه شده در جدول (۳)، در جدول (۴) آمده است. این نتایج نسبت به بهترین روش از ۸ روش ارائه شده در مرجع [8] دقیق‌تر است. در جدول (۱) نتایج عملی روش چهارنقطه‌ای که توسط Seedher و Arora اندازه‌گیری شده، آورده شده است. با استفاده از این نمونه‌ها سعی شده تا پارامترهای خاک دو لایه محاسبه شود. برای این کار تابع خطایی که در بخش ۴ معرفی شده با روش‌های گوناگون، مینیمم‌سازی گردیده تا پارامترهای بهینه سیستم به دست آید. نتایج این روش‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. نتایجی که توسط الگوریتم ژنتیک به دست آمده، نسبت به سایر روش‌های ارائه شده قبل [3-8] دقیق‌تر است. در جدول‌های (۲) و (۴)، [GA] نتایج الگوریتم ژنتیک می‌باشد. جدول (۳) نتایج عملی روش چهارنقطه‌ای که توسط Del Alamo اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. مشابه حالت پارامترهای بهینه خاک، با فرض دو لایه بودن به دست آمده است و نتایج در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول‌های (۲) و (۴) مشاهده می‌شود، بهینه‌سازی روش الگوریتم ژنتیک دقیق‌تر است. پارامترهای مدل سه لایه خاک نیز با توجه به اندازه‌گیری‌های ارائه شده در جدول (۵) محاسبه شده و نتایج در مدل مربوطه در شکل (۴) نشان داده شده است.

$$V_N(x) = \frac{\rho_1 I}{2\pi x} [1 + F_N(x)] \quad (12)$$

$$F_N(x) = 2x \int_0^{\infty} \frac{K_{N1} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{N1} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (13)$$

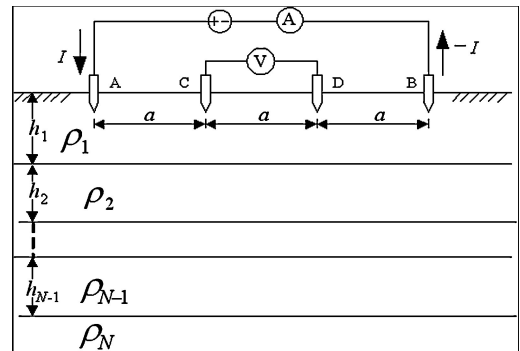
برای  $1 < i < N - 1$ . ثابت  $k_i$  برای دو لایه متوالی به صورت زیر می‌باشد:

$$k_i = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \quad (14)$$

و برای  $N > 2$  و  $1 < S < N - 2$  به صورت زیر می‌باشد:

$$K_{NS} = \frac{K_S + K_{NS+1} e^{-2\lambda h_{S+1}}}{1 + K_S K_{NS+1} e^{-2\lambda h_{S+1}}} \quad (15)$$

$$K_{NN-1} = k_{N-1} \quad (16)$$



شکل ۳: اندازه‌گیری مقاومت ویژه به روش ونر در خاک N لایه.

در شکل (۳)، قرار گرفتن الکترودها به روش ونر در خاک چند لایه نشان داده شده است. فاصله دو الکترود مجاور  $\alpha$  در نظر گرفته شده است. کمترین مقدار  $\alpha$  معمولاً یک متر می‌باشد. جریان I توسط الکترودهای A و B در خاک تزریق می‌شود. با تغییر اندازه فاصله الکترودها ( $\alpha$ )، منحنی‌های مختلف مقاومت ویژه بر حسب فاصله دو الکترود مجاور ( $\alpha$ ) به دست می‌آید.

اگر اختلاف پتانسیل بین الکترود C و الکترود D، در شکل (۳)،  $\Delta V_{CD}$  باشد، مقاومت ویژه معادل  $\rho(\alpha)$  توسط رابطه (۱۷) بیان می‌گردد [12].

$$\rho(\alpha) = 2\pi\alpha \frac{\Delta V_{CD}}{I} = 2\pi\alpha \frac{2[V_1(\alpha) - V_1(2\alpha)]}{I} \quad (17)$$

#### ۴-۲-۳- محاسبات پارامترهای خاک چند لایه

- [2] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of Ground System, ANSI/IEEE Std 81-1983.

[۳] هوشانفر بهرام، میرسلیم مجتبی، «تعیین پارامترهای مدل دو لایه خاک»، هشتمین کنفرانس بین المللی برق، ۱۳۷۲

- [4] F. P. Dawalibi and C. J. Blattner, "Earth resistivity measurement interpretation techniques," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-103, no.1, pp. 374–382, Feb. 1984.

- [5] J. L. Del Alamo, "A comparison among eight different techniques to achieve an optimum estimation of electrical grounding parameters in two-layered earth," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 4, pp.1890–1899, Oct. 1993.

- [6] H. R. Seedher and J. K. Arora, "Estimation of two layer soil parameters using finite wenner resistivity expressions," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 7, no. 3, pp. 1213–1217, Jul. 1992.

- [7] C. J. Blattner, "Analysis of soil resistivity test methods in two-layer earth," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-104, no. 12, pp.3603–3608, Dec. 1985.

- [8] J. L. Del Alamo, "A second order gradient technique for an improved estimation of soil parameters in two-layer earth," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 6, no. 3, pp. 1166–1170, Jul. 1991.

- [9] G. F. Tagg, *Earth Resistances*. London, U.K.: George Newnes Ltd., 1964.

- [10] T. Takahashi and T. Kawase, "Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 1, pp. 604–612, Apr. 1990.

- [11] T. Takahashi and T. Kawase, "Calculation of earth resistance for deep-driven rod in multi-layer earth structure," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 6, no. 1, pp. 608–614, Apr. 1991.

- [12] J. Zou, J. L. He, R. Zeng, W. M. Sun, G. Yu, and S. M. Chen, "Two-Stage Algorithm for Inverting Structure Parameters of the Horizontal Multilayer Soil," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 2, pp. 1136–1139, Mar. 2004.

- [13] L. Qi1, X. Cui, Z. Zhao and H. Li, "Grounding Performance Analysis of the Substation

در ادامه برای یک کاربرد عملی، از پارامترهای محاسبه شده برای خاک دو لایه، جهت طراحی شبکه زمین برای یک ایستگاه مخابراتی در استان یزد استفاده شده است. ابتدا پارامترهای بهینه خاک دو لایه توسط روش ارائه شده، استخراج شده و سپس به کمک روش المان محدود [13,14]، مقاومت شبکه زمین به دست آمده است. پارامترهای خاک دو لایه پس از اندازه‌گیری‌های عملی مقاومت ویژه خاک ایستگاه (نتایج جدول (۶)) و اجرای الگوریتم عبارتند از:

$$\rho_1 = 186.33 (\Omega \cdot m) \quad h_1 = 2.3095m$$

$$\rho_2 = 410.7 (\Omega \cdot m) \quad h_2 = \infty$$

که مقدار تابع خطای  $F_g$  در رابطه (۱۸) برابر ۰.۰۳۹ می‌شود. برای شبکه زمینی با ابعاد ۲۰ متر در ۷۰ متر و دارای ۲۵ مش داخلی و عمق دفن ۰/۵ متر، مقاومت شبکه با کمک روش المان محدود محاسبه شده و برابر با ۴/۳۹ اهم می‌باشد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

تعیین مدل دقیق خاک، مهمترین پارامتر در اندازه‌گیری مقاومت زمین محسوب می‌شود. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک به عنوان بهینه‌ساز تابع خطا استفاده شده است تا با استفاده از اندازه‌گیری‌های عملی مقاومت ویژه خاک، پارامترهای چند لایه خاک تعیین شود. در این مقاله با استفاده از نتایج عملی ارائه شده در مراجع قبلی، پارامترهای چند لایه خاک با استفاده از الگوریتم ژنتیک محاسبه شده و با نتایج مقالات قبل مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد خطای روش به کار رفته در اینجا کمتر از روش‌های مراجع قبلی می‌باشد. همچنین برای طراحی شبکه زمین یک ایستگاه مخابراتی در استان یزد، از این روش جهت تعیین پارامترهای خاک استفاده شده است.

#### سپاسگزاری

از شرکت مخابرات استان یزد که در این پژوهش همکاری داشته‌اند، قدردانی می‌شود.

#### مراجع

- [1] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 2000

$\rho_i [\Omega \cdot m]$	320	245	182	162	168	152	-	-
$\alpha_i [m]$	1.0	1.5	2.5	3.0	5.0	10.0	-	-
$\rho_i [\Omega \cdot m]$	255	290	315	376	528	690	-	-
$\alpha_i [m]$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
$\rho_i [\Omega \cdot m]$	58.71	61.79	58.10	61.00	73.79	78.00	79.13	78.19
$\alpha_i [m]$	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15	20.0	25.0
$\rho_i [\Omega \cdot m]$	451.6	366.7	250.2	180.0	144.2	120.2	115.5	96.5
$\alpha_i [m]$	1.0	2.0	3.0	4.0	-	-	-	-
$\rho_i [\Omega \cdot m]$	156.4	113.1	95.2	65.3	-	-	-	-
$\alpha_i [m]$	1.0	2.0	4.0	10.0	20.0	40.0	-	-
$\rho_i [\Omega \cdot m]$	136	140	214	446	685	800	-	-

جدول ۴: مقایسه نتیجه الگوریتم ژنتیک با بهترین روش مرجع [5].

آزمایش	روش	$\rho_1$ [ $\Omega \cdot m$ ]	$\rho_2$ [ $\Omega \cdot m$ ]	$h_1$ [m]	Error $F_g$
1	8 <sup>th</sup> [5]	372.729	145.259	2.690	0.1884
	[GA]	<b>374.956</b>	<b>144.529</b>	<b>2.558</b>	<b>0.1599</b>
2	7 <sup>th</sup> [5]	246.836	1058.62	2.139	0.2126
	[GA]	<b>242.166</b>	<b>983.66</b>	<b>1.974</b>	<b>0.1823</b>
3	5 <sup>th</sup> [5]	57.343	96.712	1.651	0.4043
	[GA]	<b>58.225</b>	<b>91.035</b>	<b>1.309</b>	<b>0.3634</b>
4	7 <sup>th</sup> [5]	494.883	93.663	4.370	0.2338
	[GA]	<b>481.283</b>	<b>89.572</b>	<b>4.527</b>	<b>0.1871</b>
5	8 <sup>th</sup> [5]	160.776	34.074	1.848	0.1852
	[GA]	<b>168.726</b>	<b>39.452</b>	<b>1.625</b>	<b>0.1508</b>
6	8 <sup>th</sup> [5]	125.526	1093.08	2.713	0.8538
	[GA]	<b>129.116</b>	<b>1033.943</b>	<b>2.896</b>	<b>0.2899</b>

جدول ۵: نتایج اندازه‌گیری‌های عملی برای مدل سه لایه خاک.

$\alpha_i [m]$	$\rho_i [\Omega \cdot m]$
1	214
3	256
5	273
10	307
15	284
20	250
30	225
50	210
80	186

Grounding Grids by Finite Element Method Systems by Vector Finite-Element Analysis Multilayer Soil," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 4, pp. 262–262, Apr. 2007.

[14] L. V. Cristine Silva, J. R. Cardoso, S. I. Nabeta, M. F. Palin, and F. H. Pereira, "Determination of Frequency-Dependent Characteristics of Substation Grounding Systems by Vector Finite-Element Analysis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 4, pp. 1825–1828, Apr. 2007.

جدول ۱: نتایج عملی روش چهارنقطه‌ای ارائه شده توسط Seedher و Arora [6].

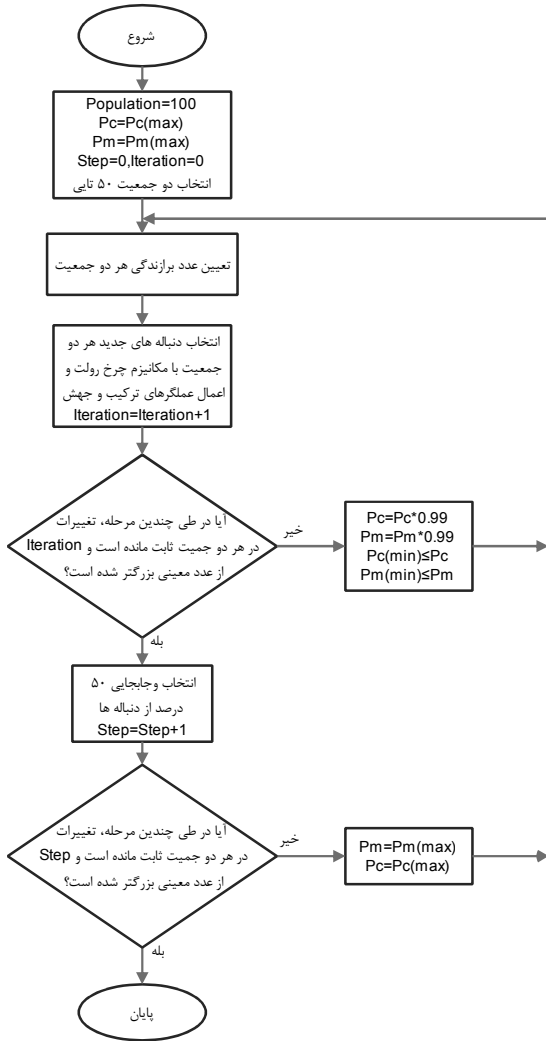
1	$\alpha_i [m]$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	-
	$\rho_i [\Omega \cdot m]$	693.74	251.62	84.56	37.64	25.32	-
2	$\alpha_i [m]$	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	-
	$\rho_i [\Omega \cdot m]$	123.33	189.99	258.93	320.97	374.13	-
3	$\alpha_i [m]$	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	-
	$\rho_i [\Omega \cdot m]$	102.26	113.07	129.77	147.52	163.95	-
4	$\alpha_i [m]$	2.5	5.0	7.5	10.0	12.0	15.0
	$\rho_i [\Omega \cdot m]$	320	245	182	162	168	152

جدول ۲: مقایسه شبیه‌سازی انجام شده در این مقاله با مراجع دیگر بر اساس داده‌های جدول (۱).

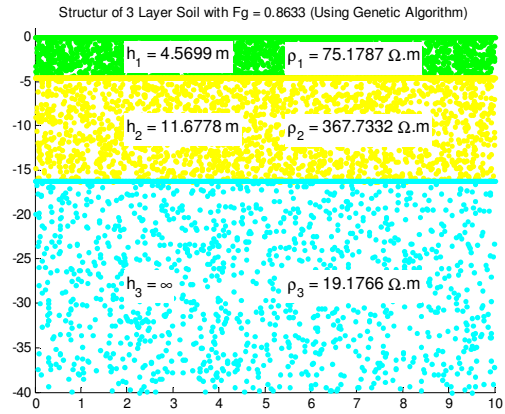
آزمایش	روش	$\rho_1$ [ $\Omega \cdot m$ ]	$\rho_2$ [ $\Omega \cdot m$ ]	$h_1$ [m]	Error $F_g$
1	[6]	1003.35	21.14	0.99	1.2913
	[GA]	<b>1032.679</b>	<b>20.093</b>	<b>0.9922</b>	<b>0.0429</b>
2	[6]	98.38	1018.80	2.44	0.0354
	[GA]	<b>98.7216</b>	<b>973.2839</b>	<b>2.4433</b>	<b>0.0093</b>
3	[6]	99.99	302.64	5.04	0.0054
	[GA]	<b>100.119</b>	<b>298.892</b>	<b>5.003</b>	<b>0.0029</b>
4	[3]	372.723	145.240	2.690	0.1882
	[4,6]	383.498	147.657	2.563	0.2084
	[6]	389.493	152.996	2.403	0.2417
	[GA]	<b>375.501</b>	<b>144.592</b>	<b>2.548</b>	<b>0.1597</b>

جدول ۳: نتایج عملی روش چهارنقطه‌ای ارائه شده توسط Del Alamo در مرجع [5].

1	$\alpha_i [m]$	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	-	-
---	----------------	-----	-----	-----	------	------	------	---	---



شکل ۵: فلوجارت الگوریتم ژنتیک تحت نظارت.



شکل ۴: مدل ۳ لایه خاک برای اندازه‌گیری‌های جدول (۵).

جدول ۶: نتایج عملی روش چهارنقطه‌ای برای یک ایستگاه مخابراتی، واقع در استان یزد.

$\alpha_i [m]$	3.0	3.0	6.0	6.0
$\rho_i [\Omega \cdot m]$	232.39	237.78	296.67	301.58