

# بهینه‌سازی طراحی دیوارهای خاکی مسلح شده با تسمه‌های فلزی با استفاده از الگوریتم PSO

حسین غیاثیان (دانشیار)

کاوہ الادینی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

دیوارها و شیروانی‌های خاکی مسلح از جمله سازه‌های خاکی مقرون به صرفه‌ی اقتصادی هستند که با استفاده از المان‌های کششی ضریب پایداری آنها افزایش می‌یابد. به علت ضعف خاک در کشش، از المان‌های تسلیح نظیر ژئوستتیک‌ها، تسمه‌های فلزی و... برای مقابله با بخشی از نیروی فشار جانبی خاک در سازه‌های خاکی مسلح استفاده می‌شود. در این تحقیق مدل شبیه‌ساز رفتار دیوارهای خاک مسلح با الگوریتم بهینه‌سازی ذرات جمعی (PSO)<sup>۱</sup> تلفیق شده تا در یک فرایند ترکیبی «شبیه‌سازی-بهینه‌سازی»<sup>۲</sup> بهترین طرح دیوار با ضرایب اطمینان مطلوب حاصل شود. در مدل شبیه‌سازی با استفاده از روش تعادل حدی مبتنی بر دستورالعمل اداری فدرال بزرگراه‌های آمریکا (FHWA)<sup>۳</sup> ضرایب اطمینان برای پایداری داخلی و خارجی به دست آمده و در مدل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO بهینه‌ترین ترکیب متغیرهای تصمیم برای ارضای ضرایب اطمینان مورد نظر جست‌وجو می‌شوند. این مطالعه نشان داد که استفاده از این روش موجب ۱۱ درصد صرفه‌جویی در هزینه‌های اجرایی نسبت به روش FHWA می‌شود که مقدار نسبتاً قابل توجهی است.

h\_ghiassian@iust.ac.ir  
aladini@civileng.iust.ac.ir

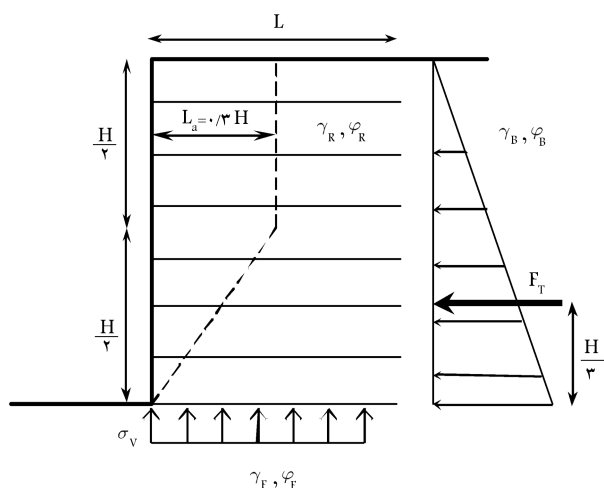
واژگان کلیدی: شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، خاک مسلح، الگوریتم PSO.

## ۱. مقدمه

دیوارها و شیروانی‌های خاکی مسلح از جمله سازه‌های نگهبان خاکی هستند که علاوه بر صرفه‌ی اقتصادی، کارایی و انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به سازه‌های نگهبان سنتی دارند. ایده‌ی خاک مسلح مبتنی است بر استفاده از المان‌های کششی استوار، که با قرار گرفتن این المان‌ها در جهات مناسب خاک، ضعف مقاومت خاک در کشش جبران شده و در نتیجه مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد. این سازوکار مشابه نقش آرماتورها در بتن مسلح است. استفاده از پوشش نهایی (پوسته) بر روی سطح دیوار به منظور کنترل ناپایداری‌های موضعی، امکان ساخت سازه‌هایی با شیب بسیار تند (تا ۹۰ درجه نسبت به افق) را فراهم می‌سازد. از جمله مزایای این سازه‌های خاکی می‌توان به اقتصادی‌بودن، ساخت سریع و ساده، عملکرد مناسب در برابر زلزله و تحمل تغییر مکان‌های بزرگ اشاره کرد. یک برتری دیگر نسبت به سیستم‌های سنتی، نظیر دیوارهای حائل بتن مسلح و وزنی، قابلیت احداث آنها در مناطقی با خاک پی ضعیف است. در چنین مواردی، حذف هزینه‌های مربوط به بهسازی خاک پی یا استفاده از شمع باعث صرفه‌جویی تا ۵۰٪ هزینه‌ی کل پروژه می‌شود. این هزینه‌ها تابعی از عواملی نظیر حجم خاکریزی، ابعاد سازه، خصوصیات خاک محل، پوسته‌ی نهایی و کاربرد آن (موقت یا دائم) و همچنین اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سیستم هستند. به‌طور معمول، هزینه‌ی المان‌های تسلیح ۴۵ تا ۶۵ درصد، حجم عملیات خاکریزی ۳۰ تا ۴۵ درصد، و نوع پوسته ۵ تا ۱۰ درصد کل هزینه‌ی پروژه

را به خود اختصاص می‌دهند. در دیوارها و شیروانی‌های مسلح بلند هزینه‌ی نسبی مصالح تسلیح بیشتر و هزینه‌ی عملیات خاکریزی کم‌تر است، و این هزینه متناسب با ارتفاع سازه بین ۱۱۰ تا ۲۶۰ دلار در متر مربع متغیر است.<sup>[۱]</sup> بررسی پایداری دیوارهای خاک مسلح براساس دو پایداری خارجی و داخلی انجام می‌شود. در پایداری خارجی، خاک مسلح به‌عنوان توده‌ی یک‌پارچه در نظر گرفته می‌شود، و سپس برای تحلیل سیستم از روش‌های معمول آنالیز دیوارهای وزنی برای تحلیل بهره‌مند می‌شویم. در همین راستا سه حالت ناپایداری مورد بررسی قرار می‌گیرند: ۱. لغزش توده‌ی مسلح در سطح تماس با خاک پی؛ ۲. واژگونی توده‌ی مسلح حول پنجه؛ ۳. ظرفیت باربری خاک پی زیر توده‌ی مسلح. بررسی پایداری داخلی نیز در تراز هر یک از المان‌ها برای دو حالت بیرون‌کشیدگی<sup>۴</sup> ناشی از کوتاه‌بودن طول گیرداری المان، و گسیختگی<sup>۵</sup> کششی المان انجام می‌شود. در این ارتباط این تحلیل‌ها ضرایب اطمینان بین ۱/۵ تا ۳ در نظر گرفته می‌شود.<sup>[۱]</sup> در این ارتباط روش تحلیلی FHWA (اداره‌ی فدرال بزرگراه‌های آمریکا) برای طراحی دیوار خاک مسلح مورد استفاده قرار گرفته و از نتایج آن در آنالیز بهینه‌سازی استفاده شده است. در بحث طراحی بهینه‌ی سازه‌های خاک مسلح، علی‌رغم تحقیقات گسترده در زمینه‌ی آنالیز و طراحی این سازه‌ها، مطالعات محدودی انجام شده و نیاز به تحقیق بیشتر در این زمینه محسوس است. پیش‌تر محققین روشی برای طراحی بر مبنای اعتماد‌پذیری دیوارهای خاکی مسلح ارائه داده‌اند.<sup>[۲]</sup> آنها ابتدا با استفاده از الگوریتم شبیه‌ساز مونت‌کارلو پارامترهای مؤثر بر احتمال گسیختگی داخلی دیوار را شناسایی

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۰/۱۴، اصلاحیه ۱۳۸۸/۲/۱۳، پذیرش ۱۳۸۸/۳/۲۷.



شکل ۱. مقطع عرضی دیوار، نیروها و تنش‌های وارده، و سطح لغزش فرضی در روش FHWA.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز.

نماد	پارامتر
$H$	ارتفاع دیوار
$\varphi_R$	زاویه اصطکاک داخلی خاک در قسمت مسلح شده
$\gamma_R$	وزن مخصوص خاک در قسمت مسلح شده
$\varphi_B$	زاویه اصطکاک داخلی خاک در قسمت مسلح نشده
$\gamma_B$	وزن مخصوص خاک در قسمت مسلح نشده
$\varphi_F$	زاویه اصطکاک داخلی خاک پی
$\gamma_F$	وزن مخصوص خاک پی
$F_Y$	مقاومت نهایی تسمه‌ی فلزی
$FS_{SL}$	کم‌ترین ضریب اطمینان در مقابل لغزش
$FS_{OT}$	کم‌ترین ضریب اطمینان در مقابل واژگونی
$FS_{BC}$	کم‌ترین ضریب اطمینان ظرفیت باربری
$FS_{\gamma}$	کم‌ترین ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی المان
$FS_{PO}$	کم‌ترین ضریب اطمینان در مقابل بیرون‌کشیدگی المان
$c_1$	ضریب هزینه‌ی المان‌های تسلیح
$c_2$	ضریب هزینه‌ی خاکریزی

روش محاسبه‌ی این ضرایب اطمینان عبارت است از:

$$FS_{SL} = \frac{W \times \mu}{F_T} \quad (1)$$

$$FS_{BC} = \frac{q_{ult}}{\sigma_v} \quad (2)$$

$$FS_{OT} = \frac{3 \times W \times L}{\gamma \times F_T \times H} \quad (3)$$

در این معادلات،  $W$  وزن توده‌ی مسلح، و  $\mu$  ضریب اصطکاک خاک در سطح تماس توده‌ی خاک مسلح و پی است. برای محاسبه‌ی ضریب فشار جانبی خاک

کرده و سپس تأثیر آنها را در پایداری داخلی مورد بررسی قرار دادند. تحقیقات آنان درخصوص پایداری خارجی ادامه یافت و نهایتاً منجر به ارائه‌ی نمودارهای طراحی بر مبنای اعتمادپذیری شد.<sup>[۴]</sup> در تحقیقات دیگری، از روش کمینه‌سازی غیر مقید متوالی (SUMT)<sup>۶</sup> برای بهینه‌سازی دیوارهای خاکی مسلح استفاده شد.<sup>[۴]</sup> ابعاد اولیه و مقاومت المان‌های تسلیح که در واقع مؤلفه‌های بردار طراحی بودند چنان انتخاب شدند که بردار حاصله موجد طرحی عملی و موجه بود. استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراکوشی در مهندسی ژئوتکنیک بسیار تازه بوده و از قدمت چندانی برخوردار نیست. در میان کلیه‌ی الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکوشی فقط در موارد معدودی از الگوریتم ژنتیک (GA) در مهندسی ژئوتکنیک استفاده شده است. اغلب تحقیقات گزارش شده در این زمینه برای یافتن سطح لغزش بحرانی در مبحث پایداری شیروانی‌های خاکی است.<sup>[۷-۵]</sup>

در این تحقیق مدل شبیه‌سازی رفتاری دیوارهای خاک مسلح با الگوریتم PSO که یکی از الگوریتم‌های مناسب تکاملی یا فراکوشی<sup>۷</sup> است تلفیق شده تا در یک فرایند ترکیبی «شبیه‌سازی - بهینه‌سازی» بهترین طرح دیوار با ضرایب اطمینان مورد نظر حاصل شود. فرایند ترکیب بدین صورت است که در مدل شبیه‌سازی با استفاده از روش تعادل حدی ضرایب اطمینان برای پایداری داخلی و خارجی به دست آمده و در مدل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO بهترین ترکیب متغیرهای تصمیم برای ارضای ضرایب اطمینان جست‌وجو می‌شوند و در نهایت نتایج با طراحی FHWA مقایسه می‌شود. این تحقیق که از ترکیب دو مدل شبیه‌ساز و بهینه‌ساز برای طراحی بهینه‌ی دیوارهای خاکی مسلح استفاده می‌کند، در نوع خود اولین بوده و ایده‌ی جدیدی در بهینه‌سازی سازه‌های خاک مسلح ارائه می‌کند.

## ۲. مدل شبیه‌ساز دیوارهای خاکی مسلح

از روش تعادل حدی FHWA برای تحلیل پایداری دیوارهای خاکی مسلح در این تحقیق استفاده شده است. در تحلیل پایداری خارجی کل توده‌ی مسلح به‌عنوان توده‌ی یک‌پارچه فرض شده و از روش معمول تحلیل دیوارهای وزنی برای بررسی پایداری استفاده می‌شود. در تحلیل پایداری داخلی، سطح لغزش دوخطی فرض شده و برای تحلیل پایداری دو حالت گسیختگی و بیرون‌کشیدگی المان در هر یک از ترازها بررسی می‌شود (شکل ۱). در این مسئله، خاکریز پشت دیوار دانه‌ی فرض شده و در نتیجه زهکشی به‌راحتی انجام می‌شود. خصوصیات خاک و المان‌های تسلیح به‌همراه نمادهای استفاده شده در تحلیل در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۱.۲. پایداری خارجی

در تحلیل پایداری خارجی عموماً سه سازوکار گسیختگی در نظر گرفته می‌شود:

الف) لغزش توده‌ی مسلح در سطح تماس با خاک پی؛

ب) واژگونی توده‌ی مسلح حول پنجه؛

ج) ظرفیت باربری خاک پی.

ضریب اطمینان لغزش از نسبت نیروی برشی مقاوم در سطح تماس توده‌ی خاک مسلح و پی به نیروی افقی رانش به دست می‌آید. ضریب اطمینان در مقابل واژگونی از نسبت گشتاور ناشی از وزن توده‌ی مسلح به گشتاور ناشی از نیروی رانشی حول پنجه‌ی دیوار به دست می‌آید. ضریب اطمینان ظرفیت باربری نیز از نسبت ظرفیت باربری خاک پی به تنش ناشی از وزن توده‌ی خاک مسلح به دست می‌آید.

( $K_a$ )، می توان از نظریه ی رانکین استفاده کرد:

$$K_{a(e,xt)} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (4)$$

در این صورت نیروی ناشی از فشار جانبی خاک با استفاده از رابطه ی ۵ قابل محاسبه است:

$$F_T = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (5)$$

برای محاسبه ی ظرفیت باربری خاک پی از رابطه ی ۶ (معادله ی مایر هوف) استفاده شده است: [۸]

$$q_{ult} = 0.5 \gamma_f (L - 2e) N_\gamma \quad (6)$$

که در آن، پارامتر  $N_\gamma$  و  $e$  از روابط ۷ و ۸ به دست می آید:

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1/4 \varphi_f) \quad (7)$$

$$N_q = \exp(\pi \times \tan \varphi_f) \times \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi_f}{2}\right) \quad (8)$$

$$e = \frac{p_a \times H}{3W} \quad (9)$$

تنش ناشی از وزن خاک مسلح، در سطح تماس پی با استفاده از رابطه ی ۱۰ محاسبه می شود:

$$\sigma_v = \frac{W}{L - 2e} \quad (10)$$

ضریب اصطکاک خاک ( $\mu$ )، در سطح تماس توده ی خاک مسلح و پی طبق رابطه ی ۱۱ به دست می آید:

$$\mu = \text{Min}(\tan \varphi_F, \tan \varphi_R) \quad (11)$$

## ۲.۲. پایداری داخلی

سطح لغزش بحرانی دیوارهای خاک مسلح براساس روش FHWA به صورت دوخطی و مطابق شکل ۱ است. ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی المان و ضریب اطمینان در مقابل بیرون کشیدگی المان در هر عمق چنین محاسبه می شود:

$$F_{SY} = \frac{F_Y}{P_{\max}} \quad (12)$$

$$F_{SPO} = \frac{2 \times F^* \times \gamma_R \times L_e \times z \times b}{T_{\max}} \quad (13)$$

در این رابطه ی ۱۳،  $L_e$  طول گیرداری المان است و از رابطه ی ۱۴ به دست می آید.

$$L_e = L - L_a \quad (14)$$

نیروی کششی بیشینه در تراز هر المان، و تنش وارد به هر المان چنین محاسبه می شود:

$$T_{\max} = \sigma_H \times S_H \times S_V \quad (15)$$

تنش بیشینه ایجاد شده در هر المان از رابطه ی ۱۶ به دست می آید:

$$P_{\max} = \frac{T_{\max}}{b \times t} \quad (16)$$

که در آن  $b$  و  $t$  به ترتیب عرض و ضخامت المان هستند. همچنین داریم:

$$\sigma_V = \gamma_r \times z \quad (17)$$

$$\sigma_H = K_r \times \sigma_V \quad (18)$$

$$K_r = K_a \times 1.2 \quad \text{تا عمق ۶ متر} \quad (19)$$

$$K_r = K_a \times \left(\frac{2.0 \times 4 - z}{1.2}\right) \quad \text{از عمق ۶ متر به پایین} \quad (20)$$

## ۳. الگوریتم بهینه سازی ذرات جمعی PSO

در طی سه دهه ی گذشته، الگوریتم هایی توسعه یافتند که اساساً سعی در ترکیب اصول اولیه ی روش های کاوشی و جست و جوی مؤثر و کارا در محدوده ی مورد نظر دارند. امروزه این روش ها عمدتاً به روش های فراکاوشی موسوم اند. [۹] الگوریتم هایی مانند ژنتیک (GA)، بهینه سازی ذرات جمعی (PSO)، جامعه ی مورچه ها (ACO) و ... نمونه یی از روش های فراکاوشی هستند. [۱۰] اخیراً الگوریتم های فراکاوشی با توجه به قابلیت آنها به عنوان یک روش بهینه سازی برای مسائل پیچیده، بسیار مورد توجه قرار گرفته و با موفقیت در علوم مهندسی کاربرد پیدا کرده اند. از جمله این کاربردها می توان به مسائل برنامه ریزی، زمان بندی، طراحی، مسیریابی و وسایل نقلیه، تخصیص و جاگذاری تسهیلات، حمل و نقل و بسیاری دیگر اشاره کرد.

الگوریتم ذرات جمعی (PSO) نیز که امروزه جایگاه ویژه یی در علوم مهندسی یافته است، برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ به عنوان یک روش بهینه سازی به منظور شبیه سازی رفتار دسته جمعی پیشنهاد شد. [۱۱] این روش یکی از اعضای مجموعه ی وسیع روش های هوش جمعی<sup>۸</sup> برای حل مسائل بهینه سازی فراگیر (GO) است. [۱۲] مزیت این روش نسبت به سایر روش ها این است که در برخی حالات، دشواری های پیش روی سایر روش های محاسبات تکاملی را متحمل نمی شود. [۱۳] در دهه ی اخیر این روش بهینه سازی کاربرد گسترده یی در مهندسی یافته است. [۱۴] اگر چه جای کاربرد روش های بهینه سازی به طور عام، و روش PSO به طور خاص، در مسائل مهندسی ژئوتکنیک کاملاً خالی است.

الگوریتم PSO اساساً بر این اصل استوار است که در هر لحظه، هر ذره مکان خود را در فضای جست و جو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته و بهترین مکانی که در کل همسایگی اش وجود دارد، تنظیم می کند. به عبارت دیگر، PSO روش شبیه سازی یک رفتار دسته جمعی است که از آن برای نشان دادن حرکت گروه پرندگان و ماهیان استفاده می شود. مدل های متعددی برای شبیه سازی توسعه یافت که در آنها مفاهیمی چون سرعت انطباق نزدیک ترین همسایه و شتاب حرکت وارد شده اند. [۱۵، ۱۶]

این روش نیز مانند سایر روش های محاسبات تکاملی، از جمعیتی شامل راه حل های بالقوه ی مسئله ی تحت بررسی برای اکتشاف در فضای جست و جو استفاده می کند. فرایند متداول PSO با ایجاد جمعیتی تصادفی از افراد، که در اینجا گروهی از ذرات نامیده شده، شروع می شود. مانند آنچه که در همه ی الگوریتم های تکاملی وجود دارد، هر ذره در گروه مجموعه ی مختلف از پارامترهای نامشخص است که باید مقادیر بهینه ی آن تعیین شود. در واقع هر ذره یک نقطه از فضای راه حل را ارائه می دهد. مانند همه ی الگوریتم های تکاملی، این پارامترها می توانند بسته به شرایط مسئله، به صورت مقادیر حقیقی یا به صورت کدگذاری شده، تعریف شوند. این الگوریتم مبتنی است بر جست و جوی فضای راه حل ها به روش مناسب، که توسط حرکت گروهی ذره ها به سوی بهترین موقعیتی که در گذشته با آن روبرو شده اند

مدل بهینه‌ساز PSO استفاده شده است. مدل‌های شبیه‌ساز کوچک و اغلب خطی را می‌توان به راحتی در ساختار مدل بهینه‌سازی وارد، و عملاً با هم تلفیق و در یک مدل خلاصه کرد. این کار برای مدل‌های شبیه‌ساز غیرخطی و بعضاً بزرگ مقیاس کار سخت و گاه غیرممکن است. در این گونه موارد، مدل شبیه‌ساز به صورت مدلی مستقل در مدل بهینه‌سازی (در یک فرایند رفت و برگشتی) ادغام می‌شوند. مسئله‌ی مورد نظر دارای ویژگی‌هایی است که استفاده از روش‌های ترکیبی فراکوشی و شبیه‌سازی را کاملاً توجیه می‌کند. علاوه بر موانع رفتاری سیستم، طرح باید بتواند ضرایب اطمینان عملکرد سیستم را در مقابل رفتارهایی کاملاً متفاوت - نظیر واژگونی، لغزش، ظرفیت باربری خاک پی و همچنین بیرون‌کشیدگی و گسیختگی المان‌ها - در حد متعارف و تعریف شده تضمین کند. این موانع غیرخطی فضای تصمیم را کاملاً غیرمحدب کرده که دارای بهینه‌های موضعی متفاوتی بوده و امکان تعریف جامع رفتار مسئله را در داخل مدل‌های بهینه‌ساز ریاضی با مبنای گرادینتی، تقریباً مستفی می‌کند. نمونه‌ی این مشکلات در تنها کار انجام‌شده در این زمینه مطرح شده است.<sup>[۲]</sup> لذا روش ترکیبی بهینه‌سازی - شبیه‌سازی پیشنهادشده، با حفظ دقت و صحت لازم در شبیه‌سازی رفتاری دیوار مسلح، قادر به ارائه‌ی گزینه‌های طراحی نزدیک به بهینه خواهد بود. در صورت استفاده از بهینه‌سازهای با مبنای گرادینتی باید تقریب‌هایی را در رفتار شبیه‌سازی سیستم پذیرفت. کاهش دقت شبیه‌سازی رفتاری ممکن است به بروز خطای قابل توجه در نتایج بینجامد. با توجه به تمامی موارد یادشده، و پیچیدگی نسبی مدل تحلیلی دیوارهای خاکی مسلح، در این پژوهش از رویکرد دوم استفاده شده است. مدل شبیه‌ساز با دریافت اطلاعات مربوط به طرح پیشنهادی و متغیرهای طراحی مربوطه از مدل بهینه‌ساز، ضمن تحلیل دیوار خاکی مسلح به محاسبه‌ی ضرایب اطمینان پنج‌گانه‌ی مورد نظر می‌پردازد. موجه یا ناموجه بودن طرح پیشنهادی با کنترل ضرایب اطمینان تعیین می‌شود. پس از محاسبه‌ی ضرایب اطمینان کلیه‌ی طرح‌های پیشنهادی، موارد به مدل بهینه‌ساز ارجاع می‌شود. با اعمال جریمه، درجه‌ی برزندگی طرح‌های غیرموجه به تناسب کاهش داده شده و سرعت و موقعیت هر عضو از جمعیت محاسبه و فرایند بهینه‌سازی ادامه پیدا می‌کند. شکل ۲ چگونگی ادغام مدل بهینه‌ساز و شبیه‌ساز، و نیز فرایند رفت و برگشت اطلاعات را نشان می‌دهد. در این تحقیق برای طراحی بهینه‌ی دیوارهای خاک مسلح پنج متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است: طول المان ( $L$ )، عرض المان ( $b$ )، ضخامت المان ( $t$ )، فاصله‌ی عمودی المان‌ها از یکدیگر ( $S_V$ ) و فاصله‌ی افقی المان‌ها از یکدیگر ( $S_H$ ).

صورت می‌گیرد، با این امید که در این فرایند به یک موقعیت بهتری برسند. سرانجام همه‌ی ذرات در نقطه‌ی بهینه هم‌گرا می‌شوند. تفاوت بین PSO و سایر الگوریتم‌های تکاملی در روشی است که از طریق آن، جمعیت ایجادشده در فضای جست‌وجو حرکت می‌کند. الگوریتم PSO از روش مختص خود برای هدایت گروه استفاده می‌کند.

اگرچه در الگوریتم PSO، هر عضو از جمعیت دارای یک سرعت انطباقی (تغییر مکان) است که مطابق با آن در فضای جست‌وجو حرکت می‌کنند، هر کدام از آنها همچنین دارای حافظه‌اند و بهترین موقعیتی را که در فضای جست‌وجو به آن می‌رسند، به خاطر می‌سپارند. بنابراین حرکت هر عضو در دو جهت صورت می‌گیرد: ۱. به سوی بهترین موقعیتی که ملاقات کرده‌اند؛ ۲. به سوی بهترین موقعیتی که بهترین عضو در همسایگی آنها ملاقات کرده است.

اگر فضای جست‌وجوی مسئله  $D$  بعدی باشد، پس  $i$  امین ذره از جمعیت را می‌توان با یک بردار موقعیت  $X_i^k$  و سرعت آن را با بردار  $V_i^k$  نمایش داد. تغییر مکان هر ذره با تغییر در ساختار موقعیت و سرعت قبلی امکان‌پذیر است. هر ذره بهترین مقداری را که تاکنون به آن رسیده و بهترین جوابی را که تاکنون در گروه به دست آمده، می‌شناسد. بدین ترتیب سرعت و موقعیت هر ذره چنین تغییر می‌کند:

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1r_1(pb_{est_i} - x_i^k) + c_2r_2(g_{best} - x_i^k) \quad (21)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^k \quad (22)$$

که در آن  $V_i^k$  سرعت هر نماینده در تکرار  $k$ ام،  $w$  پارامتر وزنی،  $c_1$  و  $c_2$  فاکتورهای وزنی، اعداد تصادفی بین ۰ و ۱،  $X_i^k$  موقعیت  $i$  در تکرار  $k$ ام،  $pb_{est_i}$  برابر  $pb_{est}$  در ذره  $i$  است.  $w$  نیز پارامتر وزنی است.

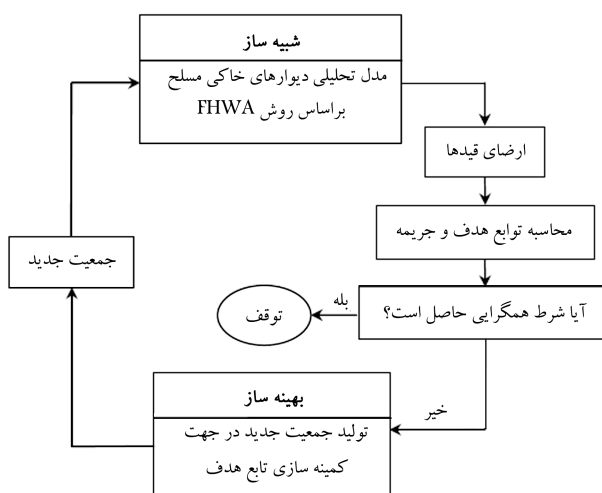
پارامتر وزنی برای تضمین همگرایی در PSO به کار می‌رود و انتخاب مناسب برای آن میزان تکرار برای یافتن جواب بهینه را کاهش می‌دهد. ابرهارت و شی<sup>[۱۰]</sup> پارامتر وزنی را به صورت خطی از مقدار بیشینه‌ی  $V_{max}$  تا مقدار حداقل آن  $V_{min}$  به صورت زیر تغییر دادند:

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \cdot iter \quad (23)$$

که در آن  $w_{max}$  وزن ابتدایی،  $w_{min}$  وزن نهایی،  $iter$  شماره تکرار و  $iter_{max}$  بزرگ‌ترین شماره تکرار است.

#### ۴. مدل طراحی بهینه دیوارهای خاکی مسلح

به طور کلی برای تهیه‌ی مدل طراحی بهینه، ضروری است که از دو مدل شبیه‌ساز و بهینه‌ساز در یک فرایند تکراری استفاده شود. مدل شبیه‌ساز عملاً رفتار سیستم مورد نظر را به ازای مجموعه‌ی مشخصی از متغیرهای طراحی تحلیل می‌کند. در این فرایند تحلیلی صحت یا عدم صحت الزامات طراحی کنترل می‌شود. چنانچه کلیه‌ی قیود مربوطه - شامل الزامات و باید و نبایدها - رعایت شده باشد، طرح حاصله به عنوان یک طرح عملی یا موجه شناخته می‌شود. در صورتی که الزامات طراحی ارضا نشوند جواب به عنوان یک طرح غیرموجه (غیرعملی) طبقه‌بندی می‌شود. با پذیرش این اصل که تعداد ترکیب‌های ممکن متغیرهای طراحی بسیار زیاد است و عملاً بی‌نهایت طرح عملی وجود دارد، تحلیل همه‌ی طرح‌ها غیرضروری و غیرممکن به نظر می‌رسد. لذا یک مدل بهینه‌ساز می‌تواند تعداد تحلیل‌های لازم را به شدت کاهش داده و به سمت طرح‌های بهینه هدایت کند. در این مدل ترکیبی پیشنهادی از



شکل ۲. ساختار کلی مدل پیشنهادی بهینه‌ساز-شبیه‌ساز.

## ۱.۵. مسئله‌ی طراحی

### ۱.۱.۵. خصوصیات خاک و هندسه‌ی دیوار

ارتفاع دیوار ۷/۸ متر، و سربرآورده بر آن  $9/4 \text{ kN/m}^2$  است. ضریب زلزله در محل  $0/5$  بوده و در نتیجه از تحلیل پویا صرف نظر می‌شود. زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک پی  $30^\circ$  درجه و ظرفیت باربری مجاز آن  $30 \text{ kN/m}^2$  است. خاک مسلح دارای زاویه‌ی اصطکاک داخلی  $34^\circ$  درجه و وزن مخصوص  $18/8 \text{ kN/m}^3$  و خاک مسلح پشت سازه دارای زاویه‌ی اصطکاک داخلی  $30^\circ$  درجه و وزن مخصوص  $18/8 \text{ kN/m}^3$  است. تنش نهایی تسمه‌های آهنی  $41370 \text{ kN/m}^2$  و وزن مخصوص آهن  $7850 \text{ kN/m}^3$  در نظر گرفته شده و عمر مفید سازه ۷۵ سال است. کمینه‌ی ضرایب اطمینان برای پایداری دیوار عبارت است از:

$$1/5 = (FSS_L)$$

$$2 = (FSOT)$$

$$2 = (FSBC)$$

$$1/8 = (FSY)$$

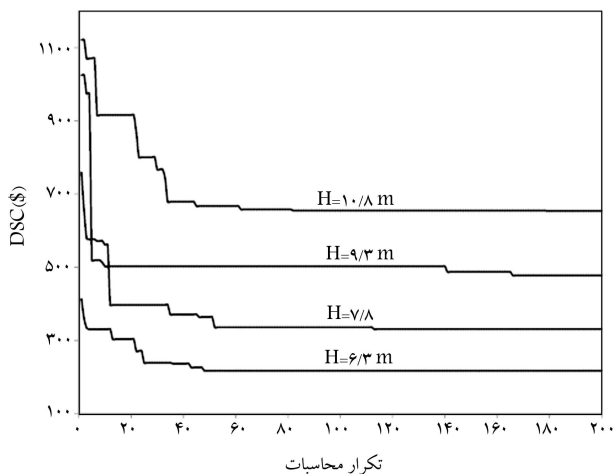
$$1/5 = (FSPO)$$

جدول ۲ نتایج مقایسه‌ی بین طراحی براساس روش FHWA و روش شبیه‌ساز

- بهینه‌ساز را ارائه می‌نماید و مبین این واقعیت است که با تغییر پارامترهای طراحی می‌توان هزینه پروژه را کاهش داد. به عبارتی ابعاد توصیه شده در روش‌های کلاسیک طراحی دیوارهای خاکی مسلح ضرورتاً بهینه نمی‌باشند.

این مدل برای دیوارهای با ارتفاع مختلف نیز اجرا شده و نتایج طراحی با استفاده از روش بهینه‌سازی پیشنهادی در جدول ۳ خلاصه شده‌اند. فرضیات فوق برای تمام دیوارها یکسان در نظر گرفته شده است. نمودار هم‌گرایی مدل برای بهترین جواب در  $20^\circ$  تکرار برای هر یک از دیوارها در شکل ۳ نشان داده شده است.

هزینه‌ی اجرایی وابسته به طرح برای دیوار ۷/۸ متری طبق طرح FHWA معادل ۳۶۲ دلار، و طبق طرح PSO-MSEW معادل ۳۲۲ دلار است. در نتیجه مبلغ صرفه‌جویی شده با استفاده از روش بهینه‌سازی ۱۱٪ است. لازم به ذکر است که هزینه‌های مؤثر در یافتن طرح بهینه شامل هزینه‌ی آهن مصرفی برای تسلیح و حجم خاکریزی بوده و سایر هزینه‌ها نظیر ترازکردن سطح جاده، بلوک‌های نمای دیوار، آزمایشات، نصب و اجرای دیوار در هر دو طرح یکسان خواهد بود. چنان که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، ضرایب اطمینان ظرفیت باربری پی، گسیختگی



شکل ۳. نمودار هم‌گرایی جواب‌ها برحسب ارزیابی تابع هدف.

تابع هدف در این مسئله کمینه‌سازی هزینه‌های اجرایی دیوارهای خاکی مسلح است. این هزینه‌ها عبارت‌اند از: ۱. هزینه‌ی المان‌های تسلیح ( $\$/Kg$ ); ۲. هزینه‌ی عملیات خاکریزی ( $\$/Kg$ ).

یادآور می‌شود که مجموع عوامل یادشده تشکیل‌دهنده‌ی تابع هدف است؛ به عبارت دیگر، تابع هدف تابعی از حجم عملیات خاکریزی و المان‌های تسلیح است:

$$Min Cost = (c_1 \times n \times b \times t \times \frac{1}{SH} \times \gamma_{street}) + (c_2 \times \gamma_R \times H \times L \times \frac{1000}{g})$$

محدودیت‌های این مسئله را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. بخش اول محدودیت‌های مربوط به مرزهای بالا و پایین متغیرهای تصمیم است که چنین تعریف شده‌اند:

$$L_{min} \leq L \leq L_{max} \quad (24)$$

$$SH_{,min} \leq SH \leq SH_{,max} \quad (25)$$

$$SV_{,min} \leq SV \leq SV_{,max} \quad (26)$$

$$b_{min} \leq b \leq b_{max} \quad (27)$$

$$t_{min} \leq t \leq t_{max} \quad (28)$$

بخش دوم، قیدهای اعمال شده مربوط به الزامات طراحی است که عدم رعایت آنها به یک طرح ناموجه و ناشدنی منجر خواهد شد. تخطی از این قیود منجر به اعمال جریمه می‌شود. این قیدها مطابق روابط ۲۹ تا ۳۳ تعریف شده‌اند:

$$FSS_{L,min} \leq FSS_L \quad (29)$$

$$FSS_{OT,min} \leq FSS_{OT} \quad (30)$$

$$FSS_{BC,min} \leq FSS_{BC} \quad (31)$$

$$FSS_{Y,min} \leq FSS_Y \quad (32)$$

$$FSS_{PO,min} \leq FSS_{PO} \quad (33)$$

توجه به این نکته ضروری است که هر یک از قیود فوق یک مجموعه عبارات ریاضی غیرصریح را شامل می‌شود که عموماً به یک فضای تصمیم غیرمحدب با کمینه‌های موضعی متعدد منجر می‌شوند. تابع جریمه تابعی است که در صورت تخطی از هر قید به تابع هدف اعمال و سبب کاهش برابری آن خواهد شد.

## ۵. اجرای مدل، مطالعه‌ی موردی و بررسی نتایج

برای طراحی بهینه‌ی دیوار خاکی مسلح دو رمزگان رایانه‌ی در محیط برنامه‌نویسی فترن نوشته شده که پس از تلفیق با یکدیگر منجر به تولید جواب بهینه برای طراحی دیوار خواهند شد. رمزگان اول مدل شبیه‌ساز رفتار دیوارهای خاکی مسلح و رمزگان دوم الگوریتم بهینه‌سازی PSO است.

به منظور تأیید برتری روش تلفیقی شبیه‌ساز - بهینه‌ساز (PSO-MSEW) نسبت به سایر روش‌ها در طراحی بهینه و صرفه‌جویی اقتصادی اجرای دیوارهای خاکی مسلح، یک مثال طراحی با دو روش FHWA و PSO-MSEW بررسی، و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۲. نتایج مدل شبیه‌سازی-بهینه‌ساز و روش FHWA برای دیوار با ارتفاع ۷٫۸ متر.

هزینه‌ی اجرایی وابسته به طرح در هر متر طول دیوار (\$) )	متغیرهای تصمیم					روش طراحی
	t (m)	b (m)	S <sub>V</sub> (m)	S <sub>H</sub> (m)	L (m)	
۳۶۲	۰٫۰۰۴	۰٫۰۵	۰٫۷۵	۰٫۷۵	۵٫۵	FHWA
۳۲۲	۰٫۰۰۴	۰٫۰۳۳	۱٫۳۰	۰٫۲۰	۴٫۵۹	PSO-MSEW

جدول ۳. نتایج مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز برای دیوار با ارتفاع‌های مختلف.

هزینه اجرایی وابسته به طرح در هر متر طول دیوار (\$) )	متغیرهای تصمیم					H (m)
	t (m)	b (m)	S <sub>V</sub> (m)	S <sub>H</sub> (m)	L (m)	
۲۰۸	۰٫۰۰۳	۰٫۰۴۸	۱٫۵۸	۰٫۲۰	۳٫۷۳	۶٫۳۰
۳۲۲	۰٫۰۰۳	۰٫۰۳۳	۱٫۳۰	۰٫۲۰	۴٫۵۹	۷٫۸۰
۴۶۵	۰٫۰۰۴	۰٫۰۹۵	۱٫۰۳	۰٫۸۰	۵٫۴۶	۹٫۳۰
۶۴۹	۰٫۰۰۴	۰٫۰۶۲	۱٫۳۵	۰٫۴۰	۶٫۳۲	۱۰٫۸۰

جدول ۴. ضرایب اطمینان مربوط به طرح PSO-MSEW.

ارتفاع دیوار (m)				ضرایب اطمینان
۱۰٫۸	۹٫۳	۷٫۸	۶٫۳	
۱٫۸۶	۱٫۸۴	۱٫۸۰	۱٫۷۷	FS <sub>SL</sub>
۲٫۷۳	۲٫۶۹	۲٫۶۴	۲٫۵۷	FS <sub>OT</sub>
۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	FS <sub>BC</sub>
۱٫۸۰	۱٫۸۲	۱٫۸۰	۱٫۸۰	FS <sub>Y</sub>
۱٫۵۰	۱٫۵۰	۱٫۵۰	۱٫۵۰	FS <sub>PO</sub>

## ۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق روش تلفیقی جدیدی ارائه شد که با استفاده از آن می‌توان بهترین طرح اقتصادی با ضرایب اطمینان مطلوب را برای دیوارهای خاکی مسلح شده با تسمه‌های آهنی به دست آورد. امروزه متداول‌ترین روشی که در طراحی دیوارهای خاکی مسلح استفاده می‌شود روش اداری فدرال بزرگراه‌های آمریکا (FHWA) است اما لزوماً طرح به دست آمده از این روش اقتصادی‌ترین طرح نیست. در این تحقیق روش ترکیبی بهینه‌سازی - شبیه‌سازی برای طراحی بهینه‌ی دیوارهای خاکی مسلح ارائه و عملکرد آن با یکی از متداول‌ترین رویکردهای طراحی بین‌المللی موجود مقایسه شده است. مدل ارائه شده در زمان بسیار اندک و با تعداد محدود ارزیابی تابع هدف قادر به یافتن جواب نزدیک به بهینه است. در مجموع نتایج کلیه‌ی اجراهای مدل پیشنهادی بهتر از رویکرد متداول طراحی FHWA بود. در بهترین شرایط برای دیوار با ارتفاع ۱۰٫۸ متر، هزینه‌های اجرایی دیوار بیشتر از ۲۰ درصد کاهش یافت، اما با کاهش ارتفاع دیوار کاهش هزینه‌ها روند نزولی داشته که کاملاً قابل توجه به نظر می‌رسد. اگرچه در اجراهای مختلف نتایج مدل و طرح حاصله کمی متفاوت است، طیف نسبتاً وسیع طرح‌های پیشنهادی خوب، فرصت انتخاب طرح مطلوب را در اختیار تصمیم‌گیران قرار خواهد داد.

و لغزش المان کنترل‌کننده است و دقیقاً برابر ضرایب اطمینان کمینه‌ی به دست آمده هستند. این بدان معناست که در مثال مورد نظر، دو ضریب اطمینان دیگر نقش تعیین‌کننده‌ی بر طراحی ندارند. مدل ترکیبی پیشنهادی برای تمامی دیوارها با ارتفاع‌های مختلف ۲۰ بار اجرا، و بهترین جواب‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. گرچه اجراهای مختلف منتج به طرح‌هایی با هزینه‌ها و ویژگی‌های هندسی متفاوت شد، پراکنش تابع هدف بسیار اندک و بدترین جواب حاصله نیز بهتر از نتایج مدل FHWA بود.

## پانویس

1. particle swarm optimization
2. simulation-optimization
3. federal high way administration
4. pullout
5. breakage
6. sequential unconstrained minimization technique
7. metaheuristic
8. swarm intelligence methods
9. global optimization

## منابع

1. Elias, V. and Christopher, B., *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines*, National Highway Institute, US Department of Transportation FHWA, Washington, D.C. (2001).
2. Chalermyanont, T. and Benson, C.H. "Reliability-based design for internal stability of mechanically stabilized earth walls", *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**, pp. 163-173 (2004).

3. Chalermyanont, T. and Benson, C.H. "Reliability-based design for external stability of mechanically stabilized earth walls", *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **5**, pp. 196-205 (2005).
4. Basudhar, P.K.; Vashistha, A.; Deb, k. and Dey, A. "Cost optimization of reinforced earth walls", *Geotechnical and Geological Engineering*, **26**, pp. 1-12 (2007).
5. Das, S.K. "Slope stability analysis using genetic algorithm, electron", *Journal of Geotechnical Engineering*, **10**, (2005).
6. Goh, A.T.C. "Genetic algorithm search for critical slip surface in multiple-wedge stability analysis", *Canadian Geotechnical Journal*, **36**, pp. 382-391 (1999).
7. McCombic, P. "The use of the simple genetic algorithm in finding the critical factor of safety in slope stability analysis", *Computers and Geotechnics Journal*, **29**, pp. 699-714 (2002).
8. Mayerhof, G. "Some recent research on the bearing capacity of foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, **1**, pp 16-26 (1963).
9. Glover, F. "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence", *Computer and Operation Research*, **13**, pp. 533-549 (1986).
10. Holland, J.H., *Application in Natural and Artificial Systems*, Cambridge, MA, MIT Press.
11. Kennedy, J. and Eberhart, R.C. "Particle swarm optimization", *Proc., IEEE Conf. on Neural Networks, IV*, Piscataway, N.J., pp. 1942-1948, (1995).
12. Kennedy, J.; Eberhart, R.C. and Shi, Y., *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann, San Francisco, California (2001).
13. Zhang, H.; Li, H. and Tam, C.M. "Permutation-based particle swarm optimization for resource constrained project scheduling", *ASCE, Journal of Construction Engineering and Management*, **132**(3), pp. 259-267 (2006).
14. Eberhart, R.C. and Kennedy, J. "A new optimizer using particle swarm theory", *Proc., 6th Symp, On Micro Machine and Human Science*, IEEE Service Center, Piscataway, N.J., pp. 39-43 (1995).
15. Eberhart, R.C. and Shi, Y. "Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization", *Proc., 7th Annual Conf. on Evolutionary Programming: VII*, Springer, New York, pp. 611-616 (1998).

