

تعیین سطوح لغزش بحرانی در تحلیل پایداری شیروانیها با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات

فرج‌اله عسکری، استادیار، پژوهشکده ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
ابراهیم شجاعی، فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی عمران - مهندسی ژئوتکنیک، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی

چکیده

اکثر روشهای مبتنی بر تعادل حدی از روند مقایسه ضریب اطمینان مرتبط با سطوح شکست احتمالی بیشمار و انتخاب هندسه شکست مربوط به کمترین ضریب اطمینان به مینیمم ضریب اطمینان و بحرانی‌ترین سطح شکست همگرا می‌گردند. غالباً در این تحلیل‌ها، برای خاکهای همگن از سطوح شکست دایره‌ای و برای خاکهای غیرهمگن و چندلایه از سطوح شکست دایره‌ای و غیردایره‌ای استفاده می‌شود. باید اذعان نمود که نحوه تولید سطوح شکست بحرانی غیردایره‌ای یکی از موضوعات مطرح در بررسی پایداری شیروانیها می‌باشد. از طرف دیگر، یافتن سطح شکست بهینه، مسأله‌ای غیرخطی و پیچیده است و لذا بهره‌گیری از روشهای بهینه‌یابی به روزتر، می‌تواند در حل این مسأله بسیار سودمند واقع گردد.

در طی سی سال گذشته همگام با پیشرفت کامپیوترها و علم محاسبات عددی و همچنین روشهای بهینه‌یابی روشهای مختلفی جهت تحلیل پایداری شیروانیها ارائه شده است.

بیکر [۱] برای اولین بار هندسه سطح لغزش را به صورت نقاطی در مختصات دو بعدی نشان داد که این نقاط به وسیله پاره‌خطهایی به هم وصل می‌شدند. در این روش مختصات عمودی نقاط سطح لغزش به عنوان متغیر به حساب می‌آمدند. او از روش برنامه‌ریزی پویا و روش اسپنسر برای حل این مسأله بهینه‌سازی استفاده کرد. در این روش هیچ‌گونه قیدی بر سطح لغزش اعمال نمی‌گردید.

سلسستینو و دانکن [۲] کاربرد روش متغیرهای تناوبی را برای یافتن سطوح شکست بحرانی غیردایره‌ای ارائه کردند. در این روش تخمین اولیه موقعیت سطح شکست باید نسبتاً دقیق باشد، در غیر این صورت، یک مقدار حداقل موضعی به

تعیین سطح شکست بحرانی شیروانیهای خاکی و بهینه نمودن آنها یکی از مسائل مهم در آنالیز پایداری شیبه می‌باشد. غیرخطی بودن توابع مرتبط با بهینه‌یابی سطح شکست بحرانی شیروانیها، وجود مینیمم‌های محلی گسترده طی فرآیند بهینه‌یابی و همچنین نیاز به الگوریتمی سریع و کارا جهت تولید سطوح شکست در زمانی که این سطوح غیردایره‌ای هستند، از جنبه‌های درخور توجه پیچیدگیهای این مسأله می‌باشد. در تحقیق حاضر به کمک الگوریتم اجتماع ذرات، سطوح شکست محتمل دایره‌ای و غیردایره‌ای شیروانیهای خاکی همگن و غیرهمگن، تحت بارگذاریهایی مختلف استاتیکی و لرزه‌ای تعیین گردیده است. مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج سایر محققین و همچنین برخی نرم‌افزارهای متداول، نشان‌دهنده کارایی بالای این روش و بهبود روند محاسبات می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی اجتماع ذرات، پایداری شیروانی سطح شکست بحرانی غیردایره‌ای

۱- مقدمه

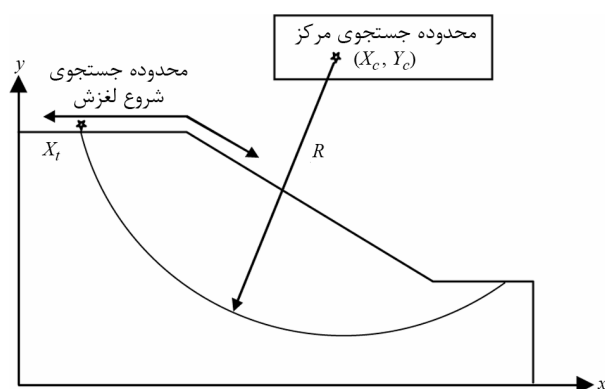
تحلیل پایداری شیروانیهای خاکی با استفاده از روشهای مختلفی صورت می‌پذیرد که از آن جمله می‌توان به روشهای حدی نظیر تعادل حدی و تحلیل حدی و روشهای عددی نظیر اجزاء محدود و تفاضل محدود اشاره کرد.

با توجه به ساده‌تر بودن کاربرد روشهای حدی و قابلیت بالا و نتایج نسبتاً خوب آنها، این روشها همچنان از کاربرد بیشتری در میان روشهای تحلیل پایداری شیروانیها برخوردار هستند. در میان روشهای حدی نیز، کاربرد روش تعادل حدی به دلیل ساده‌تر بودن آن از دیگر روشهای حدی بیشتر بوده است.

الگوریتم بهینه‌یاب اجتماع ذرات بهینه‌یابی می‌گردد.

۲- تولید سطوح شکست تصادفی

در تحقیق حاضر برای خاکهای همگن سطح شکست به صورت دایره‌ای و با در نظر گرفتن سه پارامتر شامل مختصات x_c ، y_c مرکز شعاع لغزش و مختصات x_f نقطه آغازین لغزش که در محدوده خاص جستجو، تعریف می‌شوند جهت بهینه‌یابی در نظر گرفته می‌شود. این پارامترهای کنترلی به عنوان ورودیهای بهینه‌یابی مطرح می‌باشند و برای هر سری از پارامترهای فوق یک سطح لغزش دایره‌ای تعریف می‌گردد. با در نظر گرفتن اثرات بار لرزه‌ای به صورت نیروهای شبه استاتیکی، برای هر سطح لغزش ایجاد شده، ضریب اطمینان توسط رابطه بیشاپ اصلاح شده به دست می‌آید، شکل (۱).



شکل (۱): روند تولید سطوح شکست تصادفی.

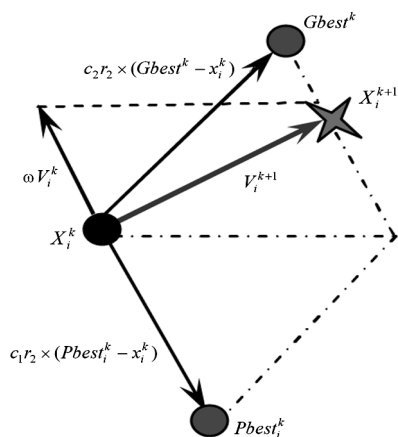
از طرفی برای خاکهای چند لایه، سطح شکست به صورت غیردایره‌ای در نظر گرفته می‌شود که معمول‌ترین شکل آن استفاده از زنجیره‌ای از پاره‌خطها است. در این حالت سطح گسیختگی به صورت مجموعه‌ای از پاره‌خطهای به هم پیوسته که شیب هر پاره‌خط در ارتباط با شیب پاره‌خطهای گسیختگی مجاور است، تعریف می‌شود. در تحلیل پایداری شیروانی که جسم لغزان از چپ به راست به حرکت در می‌آید، زاویه خطوط (αf_i) معمولاً به حالت پادساعتگرد از چپ به راست تغییر می‌کند. در شکل (۲)، نمونه‌ای از این سطح لغزش نشان داده شده است. در این حالت $X_1, Y_1, \alpha f_i, \nabla \alpha f_i$ متغیرهای مسأله و تعیین‌کننده سطح لغزش می‌باشند.

دست می‌آید. نگوین [۳] الگوریتم سیمپلکس را برای یافتن ضریب اطمینان حداقل و سطح گسیختگی مربوط به آن تشریح کرد. این روش نتایجی شبیه به جستجوهای دستی را گزارش می‌داد اما سطوح گسیختگی مورد نیاز آن به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر بود. آرای و تاگیو [۴] نیز با استفاده از روش گرادیان مزدوج و روش جانبی اقدام به حل این مسأله نمودند. در این روش با ثابت نگاه داشتن مرزهای بین قطعات، مجموعه‌ای از عمق قطعات که ضریب اطمینان حداقل را نتیجه می‌دهند، تعیین می‌شد.

گرکو [۵] و ملکوی و همکارانشان [۶] نیز با استفاده از تکنیک مونت کارلو در پی حل مسأله تعیین سطح لغزش بحرانی برآمدند و در برخی موارد نیز به موفقیت‌هایی دست یافتند. با این حال، در سالهای اخیر و همزمان با پیشرفت و ارائه روشهای بهینه‌یابی مدرن، بهینه‌یابی سطوح لغزش بحرانی شیروانیها نیز دوره جدیدی از عمر خود را تجربه می‌کند.

ژان وون و همکارانش [۷] برای اولین بار با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک اقدام به یافتن سطح لغزش بحرانی نمود. مک کومبی و ویلکینسون [۸] با روش الگوریتم ژنتیک ساده و در نظر گرفتن سطوح لغزش دایره‌ای به بررسی پایداری یک شیروانی خاکی پرداختند. هی و چن [۹] نیز با استفاده ترکیبی از دو الگوریتم ژنتیک و نورد شبیه‌سازی شده اقدام به حل مسأله تعیین سطح لغزش بحرانی کردند. پس از آنها ذوالفقاری و همکارانش [۱۰] این روند را دنبال کرده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک ساده و روش مورگنسترن-پرایس به بررسی پایداری شیروانیهای خاکی اقدام نمودند. سپس چنگ و همکارانش [۱۱] به تعیین سطح لغزش بحرانی غیردایره‌ای، با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات پرداختند. در نهایت، کاهاتادنیا و همکارانش [۱۲] با استفاده از الگوریتم مورچگان و روش اسپنسر راهکاری مشابه ذوالفقاری را ارائه داد.

در تحقیق حاضر سطوح شکست محتمل دایره‌ای با در نظر گرفتن سه پارامتر کنترل و سطوح شکست محتمل غیردایره‌ای با استفاده از زنجیره‌ای از پاره‌خطها مدل‌سازی گردیده و بحرانی‌ترین سطح شکست محتمل با استفاده از



شکل (۳): جهت‌گیری جستجوی i امین ذره در PSO .

بعد از ارائه الگوی اولیه PSO ، پیشنهادهایی برای بهبود همگرایی آن انجام گرفت. کلرک و کندی [۱۶] با استناد به اصولی از ریاضیات، ضریب انقباض k را در جهت پایداری و همگرایی بهتر الگوریتم در مسائل چند بعدی پیچیده PSO ارائه دادند. با وارد شدن ضریب کلرک معادله سرعت به صورت زیر تغییر می‌نماید.

$$V_i^{k+1} = K \times (V_i^k + c_1 r_1 \times (Pbest_i^k - X_i^k) + c_2 r_2 \times (Gbest^k - X_i^k)) \quad (4)$$

که در آن:

$$K = \frac{2}{\varphi - 2 - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}}, \quad \varphi = c_1 + c_2 \geq 4 \quad (5)$$

بنابراین پارامتر همگرایی (K) به وسیله φ کنترل می‌شود. در روش کلرک، φ باید بزرگتر از ۴ باشد تا پایداری سیستم تضمین شود. برای معادلات فوق، کلرک مقادیر $\varphi_1 = \varphi_2 = 2/0.5$ را پیشنهاد می‌کند. به این ترتیب مقادیر پارامترهای الگوریتم عبارتند از:

$$c_1 = c_2 = 1/49 \quad \text{و} \quad \omega = 0.7298$$

بر خلاف سایر روشهای محاسبات تکاملی، وجود فاکتور انقباض کلرک (k) روند جستجوی روش اجتماع ذرات را بر اساس تئوریهای ریاضی تضمین می‌نماید. بنابراین با معادله (۴) تضمین بالاتری نسبت به نسخه اولیه PSO به دست می‌آید.

مطابق آنچه که گفته شد، ذرات در PSO به طور تصادفی در یک فضای جستجو پراکنده شده و کم کم به سمت بهینه سراسری حرکت می‌کنند، به طوری که در طول روند شبیه-سراسری

ضرایب شناسایی $c_1 = c_2 = 1.49$ و r_1 و $r_2 =$ عددی تصادفی در بازه $[0, 1]$ و صفر، $Pbest_i^k =$ بهترین موقعیت به دست آمده ذره بر اساس تجربه خود ذره و در مرحله k ، $X_i^k =$ مکان ذره i ام در مرحله k و $Gbest^k =$ بهترین موقعیت ذره بر اساس تجربه کل گروه و در مرحله k می‌باشد. با معلوم بودن سرعت ذره، حرکت ذره به سمت موقعیت بعدی بسیار ساده می‌باشد. سرعت ذره طبق معادله (۱) به دست می‌آید و مختصات جدید برای هر بعد ذره مطابق با معادله (۲) تعیین می‌گردد.

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (2)$$

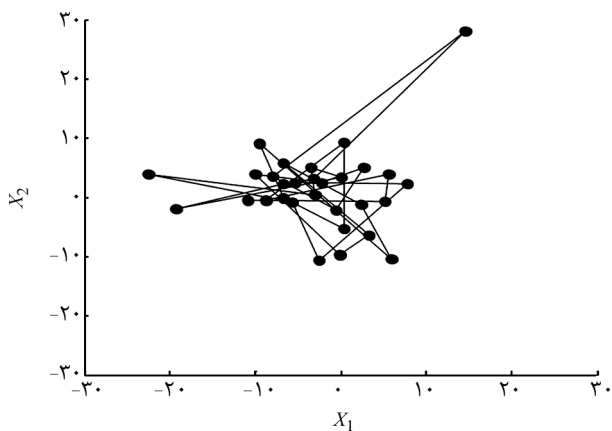
$X_i^{k+1} =$ مکان ذره i ام در مرحله $k+1$ و $X_i^k =$ مکان ذره i ام در مرحله k .

ضرایب شتاب تعیین‌کننده میزان تأثیر $Pbest$ و $Gbest$ بر سرعت ذره می‌باشند. پارامتر وزن اینرسی (ω) برقرارکننده نوعی تعادل میان قابلیت‌های جستجوی فراگیر و محلی است. مقادیر بزرگ اینرسی وزنی جستجوی فراگیر را آسانتر می‌کند، در حالی که مقادیر کوچک آن کمک بهتری برای جستجوی محلی الگوریتم است.

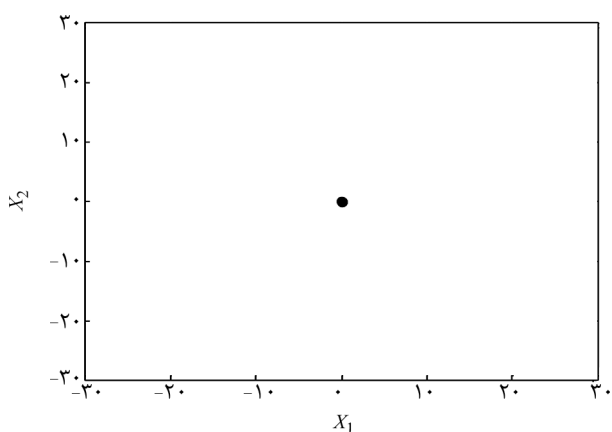
در روند تکامل (PSO) و در نسخه‌های اولیه این الگوریتم مقدار ثابتی برای وزن اینرسی در نظر گرفته می‌شد، اما بدیهی است که با گذشت زمان، رفته‌رفته ذرات به سوی نقاط بهینه حرکت می‌کنند و در نتیجه نیاز به جستجو در فضایی وسیع کاهش می‌یابد و بهتر است ذرات در حوالی جوابهای یافته‌شده به جستجوی خود ادامه دهند. در نتیجه مقادیری کوچکتر برای وزن اینرسی مناسبتر است. پس به‌طور کلی بهتر است وزن اینرسی به‌صورت تابعی کاهنده با زمان در نظر گرفته شود. ایبره‌هارت و شی [۱۵] وزن اینرسی را متغیر در نظر گرفتند و آن را به صورت خطی از ۰/۹ تا ۰/۴ در طول روند تغییر دادند. روند تغییر ω در طول کورس طبق رابطه (۳) می‌باشد:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} \times iter \quad (3)$$

که $iter_{\max}$ ، تعداد ماکزیمم تکرار و $iter$ شماره تکرار جاری می‌باشد. جهت‌گیری جستجوی i امین ذره در PSO در شکل (۳) مشخص می‌باشد.



شکل (۶): فاصله وضعیت جاری ذرات متوالی از همدیگر در الگوریتم PSO، تکرار دوم.



شکل (۷): فاصله وضعیت جاری ذرات متوالی از همدیگر در الگوریتم PSO، تکرار آخر.

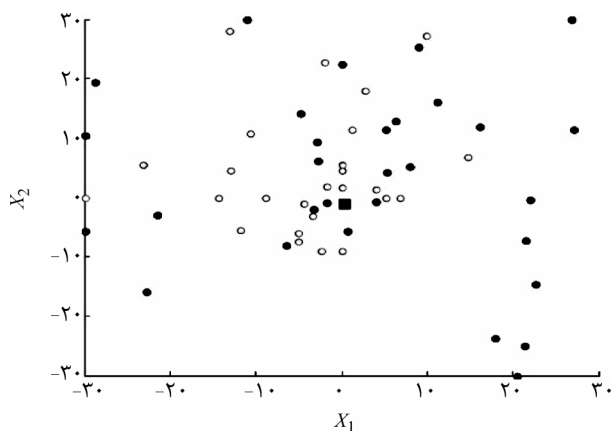
۴- مثالهای عددی و مقایسه نتایج

همان طور که در مقدمه نیز بیان گردید، روشهای مختلفی جهت تخمین سطوح شکست بحرانی شیروانیهای خاکی ابداع و ارائه شده‌اند. روشهای بهینه‌یابی برخی از این تحقیقات، جزء اجتناب‌ناپذیری از روند بهینه‌یابی برخی نرم‌افزارهای تجاری نظیر Slide هستند. بنابراین، ضمن بررسی مثالهای عددی انجام گرفته در این تحقیق، علاوه بر مقایسه نتایج با روش کار سایر محققین، به مقایسه نتایج حاصل با خروجی برخی نرم-افزارهای مطرح نیز خواهیم پرداخت. در تمام مراحل بعد، نرم‌افزار ایجاد شده در این تحقیق با نام *PSO/Slope* نامیده خواهد شد.

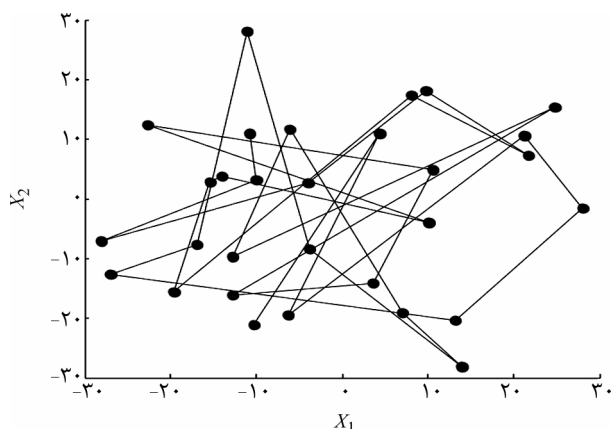
۴-۱- مثال شماره یک

در کتاب مکانیک خاک لمب^۱، یک شیروانی ساده با زهکش

سازی، نوسانات و حرکت ذرات گرداگرد نقطه بهینه سراسری (هدف) کاهش یافته و ذرات به سمت بهینه سراسری همگرا می‌شوند. به عبارت دیگر، در طول روند تکرار در الگوریتم PSO فاصله ذرات از بهترینهای محلی و سراسری کاهش می‌یابد. خطوط رسم شده در اشکال (۵) تا (۷) فاصله مابین وضعیت جاری ذرات متوالی از یکدیگر را نشان می‌دهد. همان طور که از اشکال فوق آشکار است، در طول روند شبیه‌سازی فاصله مابین ذرات رفته رفته از یکدیگر کاهش یافته و تمام ذرات به سمت بهینه سراسری همگرا می‌گردند. شکل (۴) جمعیتی تصادفی از ذرات را در یک فضای جستجوی دوبعدی X_1 و X_2 در یک تکرار مشخص نشان می‌دهد. در شکل (۴)، ذرات توپر نشان‌دهنده وضعیت جاری ذرات بوده و ذرات توخالی نشان‌دهنده *Pbest* می‌باشند. ذره مرکزی نیز نشان‌دهنده *Gbest* در یک مرحله می‌باشد.

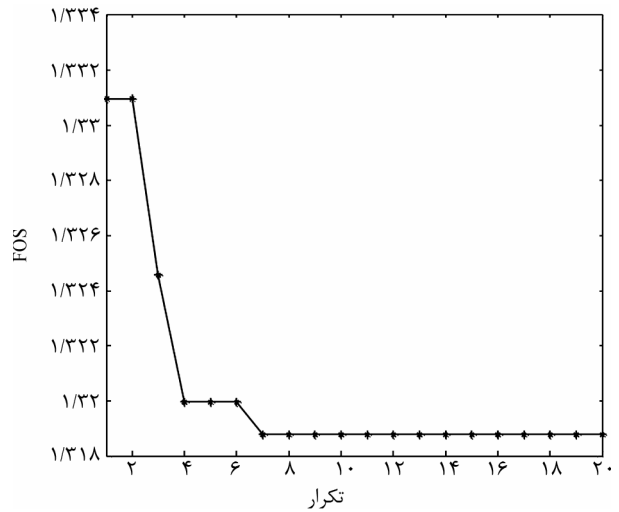


شکل (۴): ذرات پراکنده در یک فضای جستجوی دوبعدی در یک تکرار مشخص.



شکل (۵): فاصله وضعیت جاری ذرات متوالی از همدیگر در الگوریتم PSO، تکرار اول.

نیز اکثر مقالات معتبر در زمینه هوش مصنوعی و پایداری شیروانی با روشهای تعادل حدی از این مثال جهت بررسی صحت نتایج خود استفاده گسترده‌ای می‌کنند. هندسه کلی مثال و مشخصات خاک در جدول (۴) داده شده است. در مرجع اصلی ضریب اطمینان شیروانی و سطح شکست بحرانی متناظر آن در حالت لرزه‌ای با فرض سطح شکست دایره‌ای و روش بیشاپ مورد تحلیل قرار گرفته است ولی در تحقیق حاضر، جهت بررسی سطوح شکست غیردایره‌ای، خروجی‌های نرم‌افزار Slide در حالت بارگذاری لرزه‌ای و سطح شکست غیردایره‌ای نیز به‌عنوان مرجع کنترل مورد استفاده قرار خواهد گرفت. مرجع اصلی ضریب اطمینان را با فرض سطح شکست دایره‌ای و روش بیشاپ، برابر یک گزارش می‌دهد. مشخصات تحلیل شکست دایره‌ای و غیردایره‌ای انجام شده توسط Slide در جداول (۵) و (۶) ارائه شده است.



شکل (۱۱): نمودار همگرایی الگوریتم PSO، مثال یک.

جدول (۳): مقایسه نتایج Slope/W، PSO/Slope و منابع معتبر مثال یک.

تحقیق حاضر	مرجع [۱۸]	مرجع [۱۷]	مرجع
۱/۳۱۶	۱/۳۲۷	۱/۳۱ الی ۱/۳۹	ضریب اطمینان

جدول (۵): مشخصات تحلیل Slide - مثال دوم - لغزش دایره‌ای.

روش آنالیز	تعداد قطعات	ضریب لرزه‌ای	دامنه خطا	تعداد تکرار
روش آنالیز ساده	۳۰	۰/۱۵	۰/۰۰۰۱	۵۰

جدول (۶): مشخصات تحلیل Slide - مثال دوم - لغزش غیردایره‌ای.

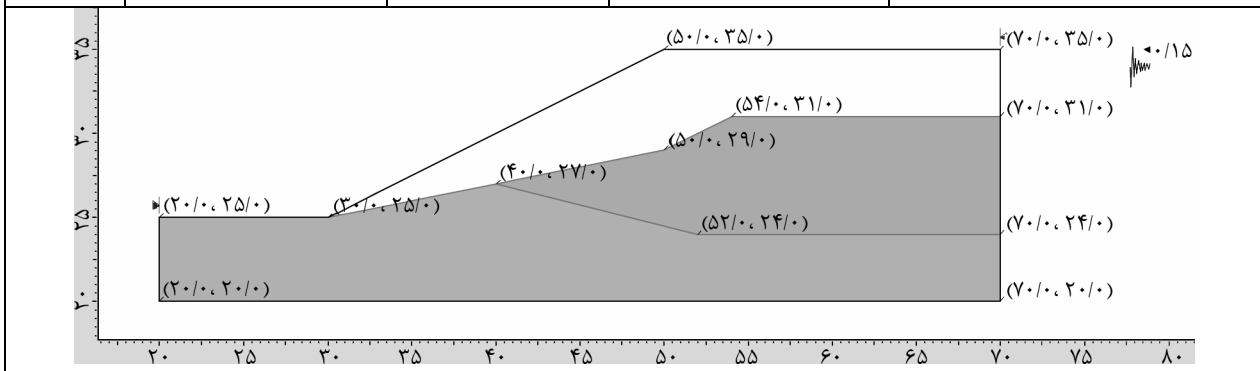
روش آنالیز	تعداد قطعات	ضریب لرزه‌ای	دامنه خطا	تعداد تکرار
روش آنالیز ساده	۳۰	۰/۱۵	۰/۰۰۰۱	۵۰

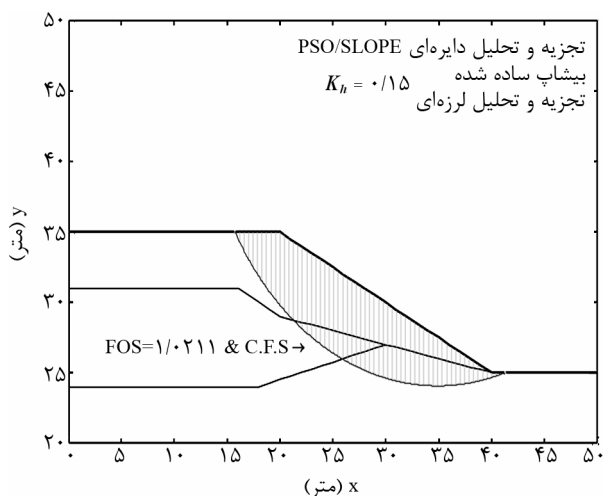
۴-۲- مثال شماره دو

در سال ۱۹۸۸ انجمن ژئوتکنیک استرالیا مثالهایی پایه برای کنترل نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی ارائه کرد [۱۹]. عمده این کارها بر عهده ژيام و دونالد^۳ بود. این مثال به خاطر اینکه به عنوان مرجعی مناسب برای کارهای عددی در اکثر مقالات استفاده می‌شود و همچنین به خاطر اینکه شامل بارگذاری لرزه‌ای می‌باشد، مورد توجه و تحلیل قرار می‌گیرد. هم‌اکنون

جدول (۴): هندسه کلی مثال و مشخصات مقاومتی خاک - مثال دوم.

مشخصات	c' (کیلو نیوتن / متر مربع)	φ' (درجه)	γ (کیلو نیوتن / متر مکعب)	K _i
لایه اول - بالا	۰	۳۸	۱۹/۵	۰/۱۵ g
لایه دوم - میانه	۵/۳	۲۳	۱۹/۵	
لایه سوم - زیرین	۷/۲	۲۰	۱۹/۵	



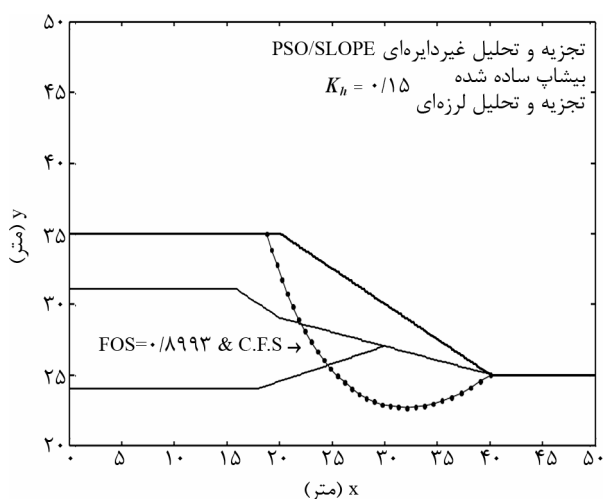


شکل (۱۲): سطح شکست بحرانی دایره‌ای - تحلیل با PSO/Slope.

نتایج تحقیق حاضر و با در نظر گرفتن سطح شکست غیردایره‌ای در جدول (۱۰) و شکل (۱۳) ارائه شده است. مقایسه بین نتایج تحقیق حاضر، Slide و کارهای ژيام و دونالد در جدول (۱۱) انجام گرفته است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده صحت و در برخی موارد بهبود برخی از پاسخها در این تحقیق می‌باشد.

جدول (۱۰): مشخصات تحلیل PSO/Slope - شکست غیردایره‌ای مثال دو.

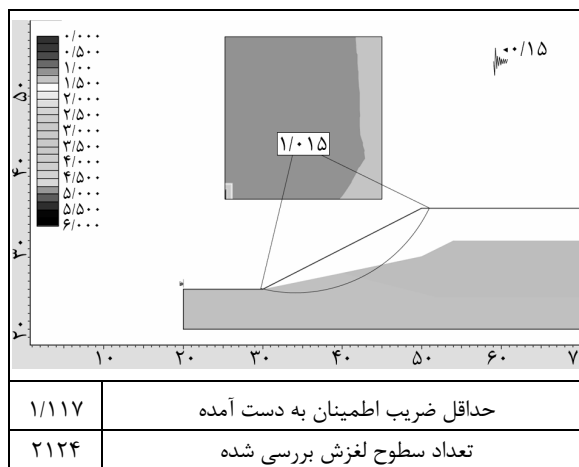
تعداد تکرار	دامنه خطا	تعداد ذرات PSO	تعداد قطعات	روش آنالیز
۵۰	۰/۰۰۰۱	۳۰	۳۰	جانبو ساده اجتماع ذرات
تعداد سطوح لغزش تصادفی بررسی شده				مینیمم ضریب اطمینان
۱۵۰۰				۰/۸۹۹۳



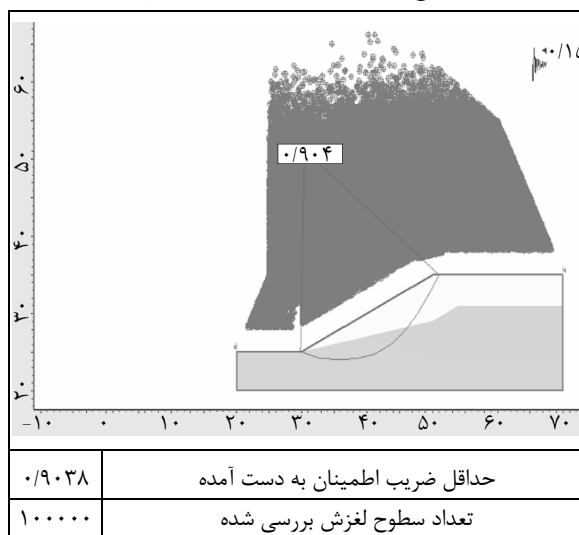
شکل (۱۳): سطح شکست بحرانی غیردایره‌ای - تحلیل با PSO/Slope.

نتایج حاصل از تحلیل شکست دایره‌ای و غیردایره‌ای به همراه هندسه سطح شکست، توسط Slide به ترتیب در جداول (۷) و (۸) ارائه شده است. نتایج تحقیق حاضر با در نظر گرفتن سطح شکست دایره‌ای در جدول (۹) ارائه شده است. سطح شکست بحرانی دایره‌ای به دست آمده از تحقیق حاضر نیز در شکل (۱۲) مشخص می‌باشد.

جدول (۷): نتایج تحلیل شکست دایره‌ای مثال دو با Slide.



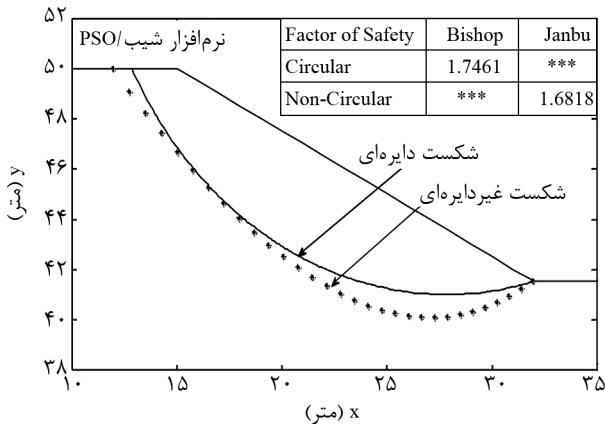
جدول (۸): نتایج تحلیل شکست غیردایره‌ای مثال دو با Slide.



جدول (۹): مشخصات تحلیل PSO/Slope - شکست دایره‌ای مثال دو.

تعداد تکرار	دامنه خطا	تعداد ذرات	تعداد قطعات	روش آنالیز
۵۰	۰/۰۰۰۱	۳۰	۳۰	بیشاپ ساده
تعداد سطوح لغزش تصادفی بررسی شده				مینیمم ضریب اطمینان
۱۵۰۰				۱/۰۲۱۱

لازم به ذکر است که منحنی شکست و ضرایب اطمینان به دست آمده نیز همزمان در شکل (۱۴) ارائه شده است. در تحقیق حاضر بعد از مدلسازی شیروانی ارائه شده در شکل (۱۴)، نتایج تحلیل $PSO/Slope$ به ترتیب در شکل (۱۵) و جدول (۱۳) ارائه شده است. مقایسه انجام شده نیز نشاندهنده صحت نتایج تحقیق حاضر در مقایسه با الگوریتم ژنتیک می باشد.



شکل (۱۵): نتایج تحلیل $PSO/Slope$.

جدول (۱۳): مشخصات تحلیل $PSO/Slope$ - شکست دایره‌ای.

تعداد تکرار	دامنه خطا	تعداد ذرات PSO	تعداد قطعات	روش آنالیز
۵۰	۰/۰۰۰۱	۳۰	۳۰	بیشاپ ساده اجتماع ذرات
تعداد سطوح لغزش تصادفی بررسی شده				مینیمم ضریب اطمینان
۱۵۰۰				۱/۷۴۶۱

۴-۴ - مثال شماره چهار

پوکوسکی و دانکن [۲۰] مقاله‌ای را برای مقایسه عملکرد هشت نرم‌افزار کامپیوتری مختلف برای آنالیز شیروانیهای مسلح ارائه دادند. این مثال، شیروانی شماره یک مقاله فوق می باشد. این مثال جهت انجام مقایسه بین تحلیل نرم‌افزارهای مختلف برای یک شیروانی همگن و غیرمسلح می باشد. سطح آب زیرزمینی در هندسه مسأله کاملاً مشخص می باشد. سطح شکست به صورت دایره‌ای در نظر گرفته شده و از روشهای اسپنسر، بیشاپ ساده شده، جانبو ساده شده، لوء کارافیت و روش معمولی قطعات جهت تحلیل استفاده می گردد. مشخصات خاک و شیروانی در جدول (۱۴) داده شده است.

همچنین در جدول (۱۲) مقایسه‌ای بین تعداد تکرار محاسبات تحقیق حاضر با نرم‌افزار $Slide$ صورت گرفته است که این نتایج نشاندهنده کاهش چشمگیر میزان محاسبات می باشد.

جدول (۱۱): مقایسه نتایج ضریب اطمینان مثال دوم.

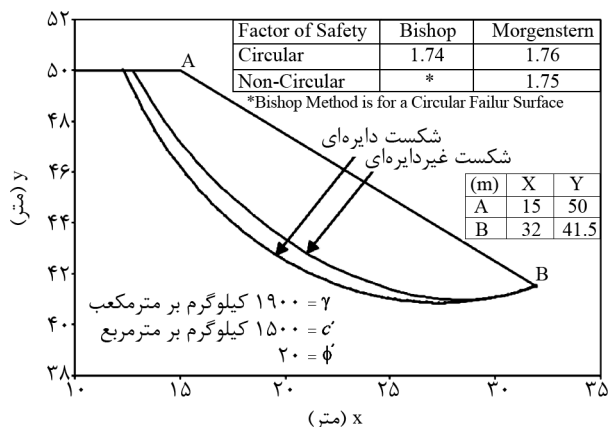
مرجع	نوع شکست	ژیام و دونالد	Slide	PSO/Slope
دایره‌ای	۱	۱/۱۱۷	۱/۰۲۱۱	
غیردایره‌ای	۰/۹۹۵	۰/۹۰۳۸	۰/۸۹۹۳	

جدول (۱۲): مقایسه نتایج تعداد سطوح شکست بررسی شده.

مرجع	نوع شکست	Slide	PSO/Slope
دایره‌ای	۲۱۲۴	۱۵۰۰	
غیردایره‌ای	۱۰۰۰۰	۱۵۰۰	

۴-۳ - مثال شماره سه

این مثال از کارهای ذوالفقاری و کومبی [۱۰] می باشد. الگوریتم به کار گرفته شده در این مرجع عبارت است از: الگوریتم ژنتیک ساده که به خاطر اطلاعات کامل ارائه شده در مثالهایش به عنوان یک مرجع بسیار پرطرفدار برای مقایسه سایر الگوریتم‌ها و محققین می باشد. این مثال یک شیروانی طبیعی با خاکی همگن می باشد. مشخصات خاک و هندسه شیروانی در شکل (۱۴) نشان داده شده است. ضریب اطمینان به دست آمده در حالت شکست دایره‌ای بر حسب روش بیشاپ و در حالت غیردایره‌ای بر حسب روش مرگنسترن - پرایس می باشد.



شکل (۱۴): مشخصات شیروانی و نتایج تحلیل الگوریتم ژنتیک مرجع [۱۰].

۵- نتیجه گیری

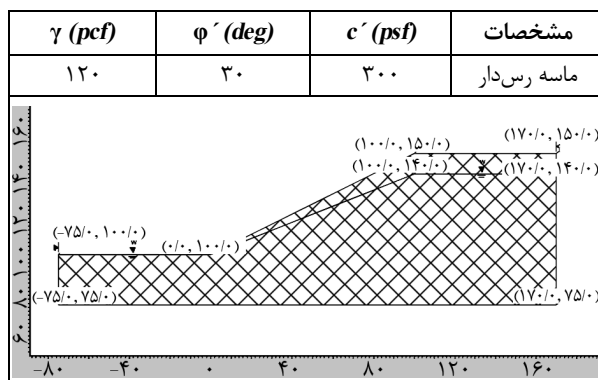
در این تحقیق به اجمال، روند بهینه یابی سطوح لغزش بحرانی شیروانیهای خاکی همگن و غیرهمگن در حالت شکست دایره ای و غیردایره ای بررسی گردید و الگوریتم اجتماع ذرات به عنوان یک الگوریتم بهینه یاب فرا ابتکاری با توانایی فرار از مینیمم های محلی جهت تخمین کمترین ضریب اطمینان به کار بسته شد. نتایج حاصل از نرم افزار ارائه شده توسط این تحقیق به نام *PSO/Slope* در مقایسه با نتایج برخی نرم افزارهای مطرح نظیر *Slide* و *Slope/W* و همچنین نتایج کار سایر محققین نشان دهنده توانایی بالای الگوریتم اجتماع ذرات در بهینه یابی سطوح لغزش بحرانی می باشد.

با بررسی چندین مسأله مطرح در این زمینه، ضرایب اطمینان به دست آمده در این تحقیق در مقایسه با سایر تحقیقات و برخی نرم افزارها، نشان دهنده صحت نتایج این تحقیق می باشد. از طرفی با توجه به توانایی الگوریتم اجتماع ذرات در فرار از مینیمم های محلی و عدم گرفتاری در جوابهای غیربهینه، در برخی موارد ضرایب اطمینان به دست آمده، بهبود یافته اند. با بررسی دقیق، نتایج ارائه شده توسط این تحقیق در مثالهای عددی مطرح شده کاهش چشمگیر میزان محاسبات و کاهش میزان سطوح شکست تصادفی بررسی شده، همگرایی بالای این روش را در مقایسه با سایرین بیان می نماید.

۶- تشکر و قدردانی

این مقاله در زمینه بهینه سازی روشهای طراحی لرزه ای شیروانیها و در راستا و ادامه پروژه شماره ۱۶/۹۳۰ کد ۲۳۵ در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله به انجام رسیده که به این وسیله از آن پژوهشگاه در حمایت از انجام این تحقیقات تشکر و قدردانی می گردد.

جدول (۱۴): مشخصات مصالح و ژئومتری شیب مثال چهار.



ضریب اطمینان شیروانی، با فرض سطح شکست دایره ای و با هشت نرم افزار مختلف تحلیل پایداری شیب بررسی شده است. از سوی دیگر این مثال نوعی محک جهت کنترل مثالهای مدل شده قبلی توسط *Slide* می باشد، چرا که در این مقاله خروجی های خود نرم افزار *Slide* نیز به عنوان نتیجه ارائه گردیده اند. مدلسازیهای انجام گرفته به وسیله *Slide* در این تحقیق به صورت ستاره دار مشخص شده است. بنابراین جهت اطمینان از صحت مدلسازیهای پیشنهادی بر کنترل نتایج حاصل از *PSO/Slope* صحت مدلسازیهای مثالهای قبلی توسط *Slide* نیز به آمایش گزاردده می شود. نتایج تحلیل با هشت نرم افزار مختلف و با روشهای مختلف به نقل از مرجع [۲۰] به همراه نتایج حاصل از این تحقیق (*PSO/Slope*) در جدول (۱۵) ارائه شده است. نتایج فوق نشان دهنده صحت نتایج حاصل از این تحقیق می باشد، که در برخی موارد نیز، جوابها نسبت به نتایج برخی نرم افزارها بهبود پیدا کرده است. دلیل این بهبود قابلیت فرار از مینیمم های محلی می باشد که در فرآیند بهینه یابی چنین توابعی موجود می باشد.

جدول (۱۵): مقایسه نتایج حاصل از مقاله پوکوسکی و دانکن با مدلسازی *Slide* و *PSO/Slope*.

PSO/Slope	SLIDE	RRS	XSTABL	WINSTABL	SLOPE/W	UTEXAS4	SLIDE	نرم افزار روش
۱/۲۸۴۴	۱/۲۹۲۸۴	۱/۲۹	۱/۲۹	۱/۳۴	۱/۲۹	۱/۲۹	۱/۲۹	بیشاب ساده شده
۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۵۳	۱/۱۵	۱/۲۴	۱/۲	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۵	جانپو ساده شده
۱/۰۵۸۹	۱/۰۵۲۴	-	-	-	۱/۰۴	-	۱/۰۵	قطعات معمولی

۷- مراجع

- location of critical non-circular failure surface in two dimensional slope stability analysis, *Comput. Geotech.*, **34**, 92-103.
12. Kahatadeniya, K.S., Nanakorn, P., and Neaupane, K.M. (2009). Determination of the critical failure surface for slope stability analysis using ant colony optimization, *Journal homepage: www.elsevier.com/locate/enggeo*.
 13. Eberhart, R.C. and Shi, Y. (2000). Comparing inertia weights and construction factors in particle swarm optimization, *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, **1**, 84-88.
 14. Eberhart, R.C. and Shi, Y. (2001). Particle swarm optimization developments, applications, and resources, *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation*, **1**, 81-86.
 15. Eberhart, R.C. and Shi, Y. (1998). Evolving artificial neural networks, *Proc. of the Int. Conf. Neural Networks and Brain*, Beijing, P.R.C.
 16. Clerc, M. and Kennedy, J. (2002). The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, **6**(1), 58-73.
 17. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1969). *Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, 359-365.
 18. Krahn, J. (2004). *Stability modeling with SLOPE/W-An engineering methodology*, First Ed.
 19. Giam, P.S.K. and Donald, I.B. (1989). Example problems for testing soil slope stability programs, Civil Engineering Research Report No. 8/1989, Monash University, ISBN 0867469218, ISSN 01556282.
 20. Pockoski, M. and Duncan, J.M. (2000). Comparison of computer programs for analysis of reinforced slopes, Virginia Polytechnic Institute and State University.
 1. Baker, R. (1980). Determination of the critical slip surface in slope stability computations, *Int. J. Numer Anal Methods Geomech.*, **4**, 333-359.
 2. Celestino, T.B. and Duncan, J.M. (1981). Simplified search for non-circular slip surface, *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 391-394, Stockholm, Sweden.
 3. Nguyen, V.U. (1985). Determination of critical slope failure surfaces, *J. Geotech. Eng., ASCE*, **111**, 238-250.
 4. Arai, K. and Tagyo, K. (1985). Determination of noncircular slip surfaces giving the minimum factor of safety in slope stability analysis, *Soils and Foundations*, **21**, 43-51.
 5. Greco, V.R. (1996). Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface, *J. Geotech. Eng., ASCE*, **122**, 517-525.
 6. Malkawi, A.I.H., Hassan, W.F., and Sarma, S.K. (2001). Global search method for locating general slip surface using Monte Carlo techniques, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **127**, 688-698.
 7. Zhuanwen, X., Qizhi, Z., Li, L., and Yunmei, L. (1998). Application of genetic evolutionary algorithm for slope stability analysis, *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 44-46.
 8. McCombie, P. and Wilkinson, P. (2002). The use of the simple genetic algorithm in finding the critical factor of safety in slope stability analysis, *Comput Geotech*, **29**, 699-714.
 9. He, Z.G. and Chen, S.H. (2004). Application of mixed genetic-simulated annealing algorithms to slope stability analysis, *Rock and Soil Mechanics*, 316-319.
 10. Zolfaghari, A.R., Heath, A.C., and McCombie, P.E. (2005). Simple genetic algorithm search for critical non-circular failure surface in slope stability analysis, *Computer and Geotechnics*, **32**, 139-152.
 11. Cheng, Y.M., Li, L., and Li, S.C. (2007). Particle swarm optimization algorithm for

۸- پانویس

۱- Particle Swarm Optimization

۲- Lambe

۳- Giam & Donald