

تحلیل شیروانی‌های خاکی و سنگی به روش عددی مانیفولد و تئوری گراف

سعید غفاریپور جهرمی^{*۱}

فاطمه بداغی^۲

چکیده

تاکنون روش‌های مختلفی به منظور تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی و سنگی ارائه شده است که هر یک دارای محدودیت‌هایی بخصوص در محیط‌های ناهمگن می‌باشند. در این تحقیق به منظور تحلیل شیب‌های خاکی و سنگی غیرهمگن که دارای ناپیوستگی، درزه و مصالح متفاوت می‌باشند از روش عددی مانیفولد با تحلیل تنش‌های موجود استفاده شده که محدودیت‌های روش‌های سنتی در محیط‌های ناهمگن را ندارد. همچنین به منظور تخمین سطح لغزش بحرانی و ضریب اطمینان پایداری از تئوری گراف با الگوریتم بلمن-فورد استفاده می‌شود. به منظور بررسی عملکرد این روش، مطالعه موردی با تحلیل پایداری شیروانی سنگی مجاور نیروگاه برقی سیمره مورد ارزیابی قرار گرفت و با نتایج تحلیل عددی به روش اجزای محدود مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این مقایسه نشان داد که این روش دارای دقت لازم و کافی است به طوری که استفاده از این روش می‌تواند برای محیط‌های ناهمگن بسیار سودمند بوده و حجم عملیات مدل‌سازی و زمان تحلیل را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی

تحلیل پایداری، شیروانی، محیط ناهمگن، تئوری گراف.

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، Saeed_ghf@sru.ac.ir

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

مقدمه

در سال‌های گذشته پژوهشگران فراوانی نظیر چن و مورگن استر^۹ (۱۹۸۳)، لام و فردلانند^{۱۰} (۱۹۹۳)، ژو و همکارانش^{۱۱} (۲۰۰۳) تلاش کرده‌اند تا انواع متفاوت روش تعادل حدی را در شکل یک چهارچوب و شکل کلی بیان کنند. روش‌های تعادل حدی نتایج نظری و تئوری بسیار دقیق دارند که می‌توان از آن‌ها در تحلیل و تخمین سطح لغزش بحرانی و محتمل استفاده کرد؛ اما فرضیه جسم صلب از محدودیت‌های این روش است و در این روش نمی‌توان الگوهای مختلف رفتاری مواد که نشان‌دهنده روابط تنش- کرنش مصالح شیروانی باشد را اعمال کرد. در نتیجه در این روش‌ها نمی‌توان مسیر انتقال بارگذاری را مدل‌سازی و شبیه‌سازی نمود (چینگ و فردلانند^{۱۲} (۱۹۸۳)). برای رفع محدودیت روش‌های تعادل حدی، روش‌های عددی متعددی در تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی و سنگی ارائه شده‌اند اما هرکدام دارای نارسایی‌های خاص در رفع نیاز مهندسی جهت تحلیل و طراحی شیب‌های خاکی و سنگی دارند.

روش عددی مانیفولد^{۱۳} که توسط محقق بنام شی^{۱۴} (۱۹۹۱) پیشنهاد شده است یک روش عددی ویژه در تحلیل محیط‌های پیوسته است به طوری که محیط‌های غیرپیوسته و ناهمگن را نیز یکپارچه تحلیل می‌کند. این روش تحلیل پاسخ مواد و مصالح در اثر تغییرات تنش یا نیروی داخلی و خارجی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این نظریه امکان استفاده از تابع جابجایی متفاوت در یک محیط ناهمگن و با مواد و مصالح مختلف و دارای ناپیوستگی فراهم است.

این روش در دو دهه گذشته مورد توجه محققین بسیاری بوده است و در تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی و خاکی مناسب تشخیص داده شده است. این روش در شبیه‌سازی شیروانی خاکی و سنگی به منظور تحلیل پایداری و تعیین تغییر مکان شیروانی‌ها عملکرد بسیار مناسب نشان داده است. این روش برای اولین بار توسط شی^۷ در سال ۱۹۹۱ معرفی گردید و نوعی روش نوین

روش‌های تعادل حدی، آنالیز حدی، اجزای محدود با تکنیک کاهش مقاومت برشی و تفاضل محدود از روش‌های پرکاربرد و سنتی در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی و خاکی بوده که عموماً دارای محدودیت‌هایی می‌باشند. روش تعادل حدی در برای تحلیل شیروانی‌های با طول نامحدود کاربرد دارد، همچنین فرضیات بسیاری در محیط ناهمگن بخصوص مرز خاک و سنگ نیازمند است. روش اجزای محدود با کاهش مقاومت برشی نیازمند محاسبات مکرر برای تخمین سطح لغزش بحرانی است که این موضوع زمان زیادی برای مدل‌سازی و تحلیل نیاز دارد. روش‌های متعددی جهت تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی و خاکی همچون روش‌های پیشنهادی فلنیوس^۱ (۱۹۳۶)، دانکن و رایت^۲ (۲۰۰۵)، ابرامسن و همکارانش^۳ (۲۰۰۱) پیشنهاد شده است. از بین این روش‌ها روش تعادل حدی، متداول‌ترین روش بوده زیرا روابط ساده‌ای دارد. در این روش، حجم مصالح در حالت لغزش به تعداد محدودی عضو صلب تقسیم شده و فرضیات مختلفی در رابطه با شرایط تعادل و نیروهای درونی اعضا در نظر گرفته می‌شود تا بدین وسیله پایداری شیروانی به یک مسئله معین استاتیکی تبدیل گردد. در مجموعه روش‌های تعادل حدی، روش‌های معروف و شناخته شده‌ای شامل بیشاپ^۴ (۱۹۵۵)، مورگن استرن-پرایس^۵ (۱۹۶۵)، جانبو^۶ (۱۹۶۵) و روش سارما^۷ (۱۹۷۳) وجود دارند که روش بیشاپ و سارما در تحلیل شیروانی سنگی کاربرد بسیار زیادی دارند. در مقابل استفاده از روش آنالیز حدی در تحلیل شیروانی‌های خاکی کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته که یکی از مهم‌ترین آن‌ها توسط میخالوفسکی^۸ (۱۹۹۷) ارائه شده است. از طرفی از تحلیل حدی مرز بالا جهت تحلیل شیروانی‌های خاک مسلح اخیراً مورد توجه و مطالعه برخی محققان همچون محمدزاده و همکارانش (۱۳۹۰) قرار گرفته است.

۹. Chen- Morgenstern

۱۰. Lam- Fredlund

۱۱. Zhu

۱۲. Ching Fredlund

۱۳. Manifold Method

۱۴. Shi

۱. Fellenius

۲. Duncan

۳. Abramson

۴. Bishop

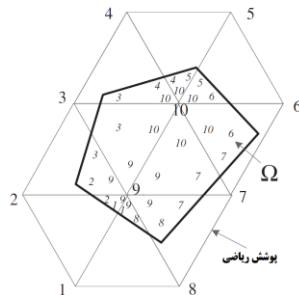
۵. Morgenstern-Price

۶. Jumbo

۷. Sarma

۸. Michalowski

اجزاء محدود است و شامل معادلات تعادل، معادلات سازگاری و معادلات خاص شرایط مرزی است که در شرایط خاص می‌توان با مشتق‌گیری از تابع انرژی پتانسیل کل نسبت به یک متغیر حداقل کرد.



شکل (۱): مفهوم تصویری روش عددی مانیفولد (گودمن^۴، ۱۹۶۳)

برای نشان دادن ناپیوستگی درزه و گسل مطابق شکل (۲) ابتدا از یک دسته مش‌بندی اجزای محدود بدون ناپیوستگی به‌عنوان پوشش‌های ریاضی استفاده شده است. پوشش‌های ریاضی به‌وسیله خطوط فیزیکی به تعدادی پوشش فیزیکی تقسیم می‌شود. به‌عنوان مثال، پوشش‌های ریاضی M_2, M_5, M_6 در شکل (۲) توسط خطوط فیزیکی به ترتیب به پوشش‌های فیزیکی $P_2^1, P_2^2, P_5^1, P_5^2, P_6^1, P_6^2$ تقسیم‌بندی شده‌اند. دو المان مانیفولد به نام المان $ME_{2_5,6_1}$ و $ME_{2_5,2_6_2}$ از تقاطع پوشش‌های فیزیکی به وجود آمده‌اند. همچنین از المان درزه گودمن (بدون ضخامت) برای مدل‌سازی رفتار درزه استفاده می‌شود (گودمن^۴، ۱۹۶۳). لازم به ذکر است روابط مورد استفاده در روش عددی مانیفولد با روش اجزای محدود قدری متفاوت است. در روش عددی مانیفولد جهت محاسبه ماتریس سختی درزه از گره‌های مجازی $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ و \bar{d} استفاده شده و جابجایی‌های این گره‌های فرضی نیز از طریق پوشش‌های فیزیکی مرتبط درون‌یابی می‌شوند (لی و همکارانش^۵، ۲۰۱۴).

تئوری گراف در تحلیل شیروانی

تئوری گراف شاخه‌ای مهم در ریاضیات و علوم کامپیوتر است که منشأ اولیه آن حل مسئله یک پُل در شهر کوئینزبرگ^۶ با استفاده از این تئوری توسط ریاضیدان معروف به نام اویلر^۷ است.

شناخته می‌شود. اغلب تحقیقات انجام‌شده با این روش به‌صورت دوبعدی انجام‌شده است درحالی‌که امروزه با گسترش روش‌های عددی پیشرفته می‌توان به‌صورت سه‌بعدی نیز از آن در تحلیل مسائل مکانیک سنگ و مکانیک خاک بهره گرفت. روش عددی مانیفولد در یک ساختار قابل‌درک شامل تعریف پوشش ریاضی، پوشش فیزیکی، الگوی مانیفولد و المان مانیفولد است که در ادامه این مقاله به بیان این مفاهیم پرداخت می‌شود.

برای بررسی مسائل مرتبط با تحلیل پایداری شیروانی، در این مقاله با بهره‌گیری از دستاوردهای محققان پیشین شامل کارهای انجام‌یافته توسط ژنگ و همکارانش^۱ (۲۰۱۴) و انپو و همکارانش^۲ (۲۰۱۴) به معرفی یک روش جدید و کارآمد پرداخته می‌شود که مبتنی بر مفاهیم روش عددی مانیفولد با استفاده از تئوری گراف است.

روش عددی مانیفولد در مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها

نحوه مدل‌سازی شیب‌های خاکی فاقد ناپیوستگی در روش عددی مانیفولد همانند روش اجزای محدود است؛ اما در شیب‌های سنگی ناهمگن و با ناپیوستگی‌های متعدد، روش عددی مانیفولد از پوشش دوگانه برای مدل‌سازی استفاده می‌کند زیرا پوشش ریاضی نیازمند تطابق حرکات خارجی نیست و همچنین محدودیت‌های داخلی یعنی درزه‌ها و مفاصل را پوشش می‌دهد. مدل‌سازی با شبکه پوشش ریاضی می‌تواند ناپایداری‌ها در تحلیل عددی که وابسته به اعوجاج المان است را کاهش دهد. این خصوصیت می‌تواند یکی دیگر از مزایا و قابلیت‌های روش عددی مانیفولد در قیاس با روش اجزای محدود باشد (ژنگ و همکارانش^۳، ۲۰۱۴). در روش عددی مانیفولد از یک سیستم پوشش دوگانه شامل یک پوشش فیزیکی و یک پوشش ریاضی استفاده می‌شود. مطابق شکل (۱) در این روش ابتدا از شبکه مش مثلثی بر روی دامنه یک مسئله نمونه تحت عنوان Ω استفاده می‌شود. باید توجه داشت مرزهای این مش‌بندی مثلثی با مرزهای شیروانی یا ناپیوستگی‌های مصالح در تطابق باشد. مرزهای خارجی و ناپیوستگی‌های داخلی، هر پوشش ریاضی را به قسمت‌های مختلفی تقسیم می‌کند که به هر یک پوشش فیزیکی گفته می‌شود. معادلات حاکم در روش عددی مانیفولد مشابه روش

۴. Goodman

۵. Li

۶. Koenigsberg

۷. Euler

۱. Zheng.

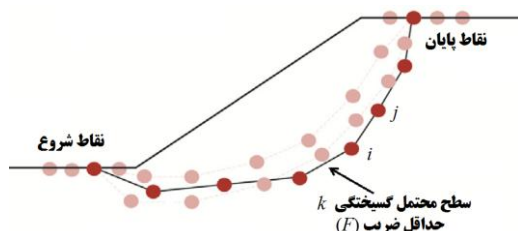
۲. Enpu

۳. Zheng

در تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی و سنگی، سطح لغزش محتمل و بحرانی دارای ضریب اطمینان حداقل است. ضریب اطمینان پایداری شیروانی بیانگر نسبت عامل مقاوم به عامل محرک در امتداد صفحه لغزش تعریف می‌شود. لذا می‌توان با استفاده از نظریه گراف، کوتاه‌ترین مسیر که دارای کمترین ضریب اطمینان بین دو نقطه در پایین‌دست و بالادست شیروانی باشد را به‌عنوان سطح لغزش بحرانی معرفی کرد. در این روش برای اندازه‌گیری وزن هر یال یک تابع وزنی بایستی تعریف شود تا بتوان ضریب اطمینان حداقل را محاسبه و ارزیابی کرد. مطابق شکل (۴) با فرض وجود صفحه لغزش بحرانی مطابق مسیر (k) ، ضریب اطمینان حداقل شیروانی با رابطه (۱) قابل تعیین است (انیو و همکارانش^۳، ۲۰۱۴).

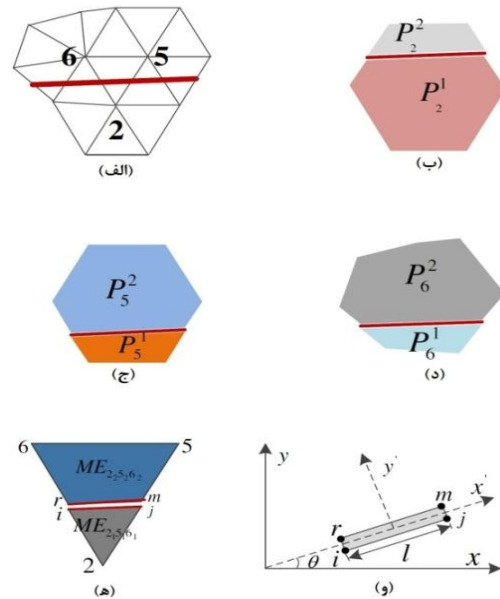
$$F_k = \frac{\sum_i R_{k,i}}{-\sum_i S_{k,i}} \quad (1)$$

این رابطه نشان‌دهنده مسیر k ام و i نشان‌دهنده شماره یال است که در مسیر k ام قرار دارد و آن مسیر را تشکیل می‌دهد.



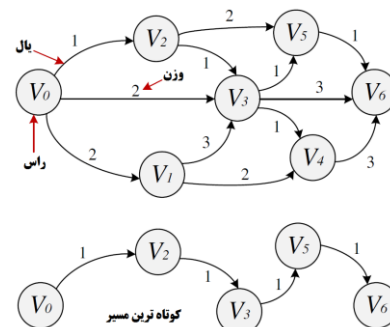
شکل (۴): سطح محتمل لغزش (انیو و همکارانش^۴، ۲۰۱۴)

این روش‌ها انعطاف‌پذیری زیادی دارند به‌طوری‌که پژوهشگران زیادی در تلاش هستند که از ادغام روش عددی مانیفولد با یک الگوریتم مناسب و مبتنی بر معیار مقاومت برشی موهر-کلمب^۵ در تحلیل پایداری شیروانی‌ها استفاده نمایند. با توجه به جنس سنگ‌های موجود در منطقه و میزان مقاومت فشاری تک‌محوری این‌گونه سنگ‌ها که جزء سنگ‌های نرم می‌باشند، استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب توجیه‌پذیر است. بلمن و همکارانش در سال ۱۹۵۷ برای اولین بار الگوریتم معروف خود تحت عنوان بلمن-فورد^۶ را برای تحقیق و بررسی پیرامون تعیین



شکل (۲): شبیه‌سازی درزها در روش عددی مانیفولد، (الف) تداخل خط فیزیکی با پوشش ریاضی، (ب) ناحیه تفکیکی $M2$ ، (ج) ناحیه تفکیکی $M5$ ، (د) ناحیه تفکیکی $M6$ ، و (ه) المان گودمن و (و) المان‌های مانیفولد

پس از صدها سال پیشرفت و گسترش علم ریاضی، پژوهشگران از تئوری گراف در حل مسائل مختلف از جمله یافتن کوتاه‌ترین مسیر، شبکه جریان، مقاومت الکتریکی، برنامه‌ریزی‌های دینامیکی، اصلاح هندسی راه، حل مسائل ترافیکی، برنامه حرکت قطارها، بهینه‌سازی مسیر حرکت مسافران و غیره استفاده می‌کنند (بوندی^۱، ۱۹۷۶) و (ونگ و همکارانش^۲، ۲۰۱۱). گراف مجموعه‌ای از نقاط است که به‌وسیله خطوط به هم وصل شده‌اند به عبارتی شامل رئوس و یال‌ها هستند. خطی که دو رأس را به هم متصل می‌کند یال گفته می‌شود که می‌تواند با جهت و یا بدون جهت باشد (شکل (۳)). هدف بسیاری از مسائل در تئوری گراف یافتن کوتاه‌ترین مسیر، یافتن کمترین هزینه یا کمترین مجموع وزنی بین تمام مسیرهاست.



شکل (۳): توضیح مسئله کوتاه‌ترین مسیر

۳. Enpu
۴. Enpu
۵. Mohr-Coulomb Criterion
۶. Bellman-Ford

۱. Bondy
۲. Wang

بیان مسئله در تئوری گراف و روش عددی مانیفولد

در این روش ترکیبی با تعریف سطح k به‌عنوان سطح لغزش بحرانی شیروانی، ضریب اطمینان پایداری این سطح لغزش (F_k) با تعریف نسبت کل نیروی مقاوم به کل نیروی محرک در امتداد صفحه k قابل بیان است که با رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$F_k = \frac{\sum_k R_{i,j}}{-\sum_k S_{i,j}} \quad (\sum_k R_{i,j} > 0, \quad \sum_k S_{i,j} < 0) \quad (2)$$

در این رابطه R و S به ترتیب نیروی مقاوم و نیروی محرک یال متصل‌کننده دو نقطه i و j است. از آنجایی که سطح k صفحه لغزش بحرانی با کمترین ضریب اطمینان است، F_k دارای کمترین مقدار در بین تمامی سطوح لغزش احتمالی است.

$$F_k = \min (F_1, F_2, F_3, \dots, F_k, \dots, F_n) \quad (3)$$

رابطه (۳) را می‌توان به‌گونه‌ای دیگر و با تعریف تابع جدید G نیز بیان کرد. این تابع طوری تعریف می‌شود که با ضریب اطمینان حداقل در امتداد سطح لغزش مقدار تابع برابر با صفر خواهد شد و برای سایر سطوح لغزش (مثلاً سطح لغزش فرضی m)، مقدار این تابع بزرگ‌تر از صفر خواهد بود (ژنگ و همکارانش^۷، ۲۰۰۵).

$$G = \sum R_{i,j} + F_k \cdot \sum S_{i,j} = \sum (R_{i,j} + F_k \cdot S_{i,j}) = \sum G_{i,j} \quad (4)$$

$$G = \sum_m R_{i,j} + F_k \cdot \sum_m S_{i,j} \geq \sum_m R_{i,j} + F_m \cdot \sum_m S_{i,j} = 0 \quad (5)$$

بر این اساس جستجو برای سطح لغزش بحرانی با ضریب اطمینان حداقل می‌تواند به جستجوی برای کوچک‌ترین مقدار تابع G تبدیل گردد. وزن هر یال را نیز می‌توان با رابطه ۶ محاسبه کرد (ژنگ و همکارانش^۷، ۲۰۰۵).

$$G_{i,j} = R_{i,j} + F \cdot S_{i,j} \quad (6)$$

ساختار روش عددی مانیفولد در تحلیل پایداری شیروانی در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل رأس‌ها شامل تمامی گره‌ها در پوشش‌های ریاضی، تمامی گره‌ها در امتداد خطوط مرزی و خطوط بیانگر درزه (در صورت وجود) و همچنین تمامی گره‌ها فرضی نقاط آغاز و پایان می‌باشند. یال‌ها نیز در حقیقت خطوطی هستند که رؤس مجاور را به یکدیگر متصل می‌کند. در این تحقیق سه نوع ایجاد یال مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل (۶)). در نوع اول تولید یال در یک توده سنگی همگن اتفاق افتاده و یال‌ها تداخلی با درزه ندارند. در این حالت، یال‌ها از طریق اتصال رأس i با رؤس مجاور ایجاد می‌شوند (ژنگ و همکارانش، ۲۰۱۴).

سطح لغزش بحرانی در سنگ‌های درزه‌دار معرفی و توسعه دادند.

به‌عنوان نمونه چرکاسکی^۱ و همکارانش (۱۹۹۳) به تحقیق پیرامون استفاده از این روش در تعیین سطح لغزش و ضریب ایمنی با استفاده از الگوریتم Dijkstra بر مبنای نتایج آنالیز محدود پرداختند. تاکنون پژوهشگران بسیاری تلاش کردند از تئوری گراف در تحلیل سطح لغزش بحرانی و تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب‌های خاکی و سنگی استفاده نمایند.

ژنگ و همکارانش^۲ (۲۰۰۵) دریافتند که در اغلب روش‌های مبتنی بر تئوری گراف، تنش موجود در مصالح مبنای تحلیل است که می‌تواند بر معایب روش تعادل محدود سنتی LEM غلبه کند زیرا این روش‌ها نمی‌توانند شامل روابط بین جرم خاک یا سنگ به‌صورت ترکیبی باشند. همچنین در مقایسه با روش کاهش مقاومت^۳ به محاسبات مکرر نیاز دارد بنابراین نمی‌تواند مستقیماً محل سطح لغزش را تعیین کند. فانگ^۴ (۲۰۰۷) تئوری گراف را جهت تحلیل سه‌بعدی پایداری شیب‌های خاکی توسعه داد و از آن در تحلیل اولیه پایداری شیروانی‌ها اطراف تونل استفاده نمود. ژو و همکارانش^۵ (۲۰۰۸) از تئوری گراف به‌منظور ارزیابی پایداری شیب‌های خاکی تحت شرایط مختلف محیطی بخصوص نفوذ باران و جریان‌های سطحی استفاده کردند. ژانگ و همکارانش^۶ در سال ۲۰۰۸ میلادی روش تئوری گراف بدون مش را معرفی و توسعه دادند.

در این تحقیق از روش عددی مانیفولد برای محاسبه تنش محرک و مقاوم در شیروانی یعنی وزن هر یال استفاده می‌شود. سپس بر اساس این تنش‌ها و با تعیین مناسب یال‌ها و رؤس، جستجو برای تعیین سطح لغزش بحرانی و ضریب اطمینان حداقل استفاده می‌شود که در این مسئله کوتاه‌ترین مسیر وزنی یعنی کمترین ضریب اطمینان است. کوتاه‌ترین مسیر در این تحقیق با استفاده از الگوریتم بلمن-فوردر تعیین می‌شود. ترکیب این دو روش عددی مانیفولد و نظریه گراف، مشکلات و دشواری تکرار محاسبات در تعیین ضریب اطمینان حداقل را کاهش می‌دهد.

۱. Cherkassky

۲. Zheng

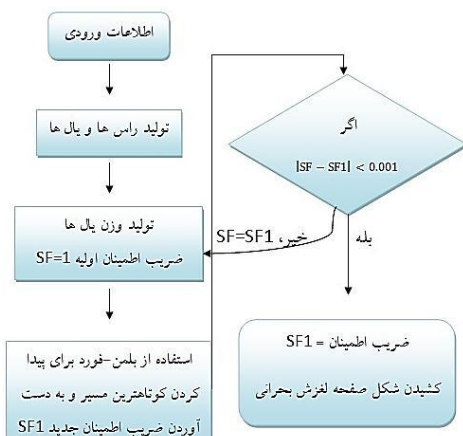
۳. Strength Reduce Method

۴. Fang

۵. Zhou

۶. Zhuang

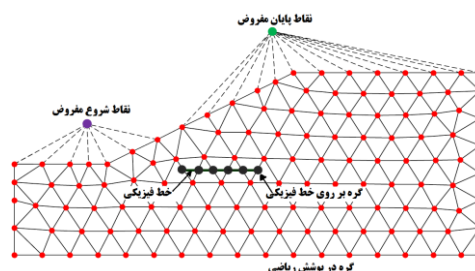
تابع G (رابطه (۶)) استفاده می‌شود. جزئیات الگوریتم بلمن-فوردم توسط بلمن و همکارانش (۱۹۵۷) ارائه شده است. با تعیین سطح لغزش بحرانی، ضریب اطمینان جدیدی به نام $SF1$ به عنوان نسبت نیروی مقاوم به نیروی محرک به دست می‌آید. اگر اختلاف مقدار SF و $SF1$ اولیه کوچکتر از خطای مجاز باشد، سطح لغزش به دست آمده به عنوان سطح لغزش بحرانی تلقی خواهد شد و نسبت نیروی مقاوم به نیروی محرک در امتداد این سطح لغزش برابر با ضریب اطمینان بحرانی اعلام خواهد شد. اگر این اختلاف بزرگتر از مقدار مجاز باشد، وزن‌های جدید بر روی یال‌ها اعمال شده و $SF1$ جدید محاسبه می‌شود تا سطح لغزش جدید توسط الگوریتم بلمن-فوردم به دست می‌آید.



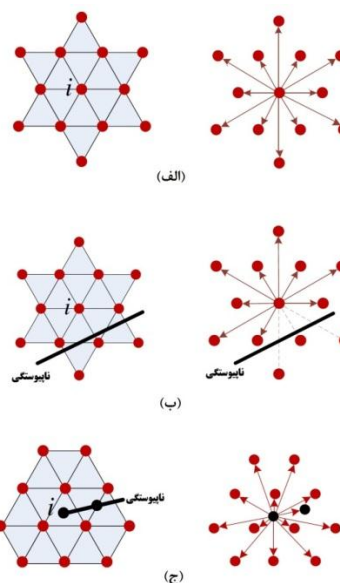
شکل (۷): الگوریتم تحلیل شیروانی با استفاده از تئوری گراف (لی و همکارانش، ۲۰۱۴)

صحت‌سنجی

در این بخش از تحقیق به عنوان مثال یک شیروانی خاکی مطابق شکل (۸) جهت تأیید دقت برنامه و روش تحلیل عددی مانیفولد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتیجه حاصل از تعیین ضریب اطمینان به روش تحلیلی پیشاپ اصلاح شده در نرم‌افزار ژئواسلوپ^۱ با مقدار محاسبه شده برای سطح گسیختگی متناظر به روش عددی مانیفولد که در نرم‌افزار متلب^۲ برنامه‌نویسی شده، مقایسه می‌شود. شیروانی در شرایط غیراشباع به صورت کرنش مسطح و دوبعدی در ۶ قطعه مورد تحلیل قرار می‌گیرد و مشخصات خاک شامل وزن مخصوص، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی به ترتیب 19 kN/m^3 ، 32 درجه و 10 kPa در نظر گرفته می‌شود. در این بررسی ضریب اطمینان به روش تحلیلی



شکل (۵): نقاط یک گراف در پایداری شیروانی با استفاده روش عددی مانیفولد (لی و همکارانش، ۲۰۱۴)



شکل (۶): سه نوع تولید یال در روش عددی مانیفولد (ژنگ و همکارانش، ۲۰۱۴). (الف) تولید یال در یک توده همگن بدون وجود ناپیوستگی، (ب) تولید یال در یک توده همگن و تداخل با ناپیوستگی، (ج) تولید یال در ناپیوستگی

در نوع دوم توده سنگی همگن نیست و دارای درزه است به طوری که برخی یال‌ها با درزه تداخل دارند. در این حالت نیز ایجاد یال از طریق اتصال رأس i با رئوس مجاور شکل می‌گیرد به جز یال‌هایی که با درزه تداخل دارند. در نوع سوم تولید یال در درزه مطرح می‌شود. یال‌ها از طریق اتصال رأس i با رأس درزه مجاور و رئوس نزدیک در توده همگن سنگی تولید می‌شوند. وزن هر سه نوع یال با استفاده از رابطه ۶ قابل محاسبه است.

حل مسئله در تئوری گراف

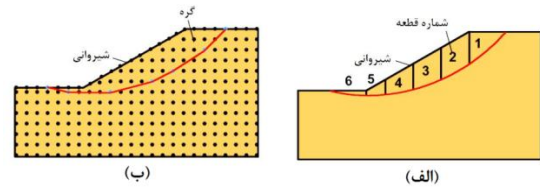
پس از تعیین مناسب رئوس و یال‌ها و وزن آن‌ها، ضریب اطمینان حداقل شیروانی از طریق الگوریتم جستجو مطابق شکل (۷) به دست می‌آید. با استفاده از الگوریتم بلمن-فوردم که روشی معروف در حل مسائل گراف جهت‌دار، جستجو برای تعیین سطح بحرانی بر اساس مقدار حداقل

^۱. GeoSlope

^۲. Matlab

است. ارزیابی شاخص کیفی توده سنگ نیز نشان می‌دهد که شاخص کیفی توده سنگ^۱ در محدوده موردبررسی بالاتر از ۵۰ درصد است. شکل (۹) نمایی از شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه برقی سد سیمره را نشان می‌دهد. در این مرحله تأثیر انجام حفاری احتمالی و تغییر هندسه در ایجاد تونل انحرافی یا تأسیسات نیروگاهی و یا دیگر تأسیسات موردنیاز به روش تئوری گراف موردبررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا با بررسی اولیه مقاطع محدوده طرح، مقطع نشان داده‌شده در شکل (۱۰) به منظور انجام تحلیل دقیق انتخاب گردید و مدل‌سازی آن در نرم‌افزار پلکسیس در شکل (۱۱) نشان داده‌شده است. در این مقطع، سه ناحیه سنگی متفاوت شامل آهک، مارن و آهک مارنی وجود دارد که با N_1 ، N_2 و N_3 نشان داده‌شده است. همچنین در این مقطع دو درزه نیز با امتداد D_1 و D_2 نشان داده‌شده است. حفاری در نزدیک به پنجه در سه مرحله انجام می‌شود. درزه D_2 به موازات سطح شیروانی قرار دارد و درزه D_1 را قطع می‌کند. با عملیات حفاری در مرحله سوم، یک سطح آزاد عمودی پدید آمده و درزه D_2 آشکار می‌شود. این شیروانی سنگی پس از حفاری احتمال بسیار زیادی دارد در امتداد صفحه‌ای متشکل از دو درزه مذکور لغزش کند بنابراین لازم است با تحلیل پایداری تعیین شود که در طول کدام مرحله حفاری نیاز به پایدارسازی وجود دارد. مدل‌سازی عددی در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس^۲ انجام شده است. در جدول (۱) مشخصات درزه و لایه‌های سنگی بکر آمده است. مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای ناپیوستگی‌ها در مدل‌سازی زون شکست، مدل لغزش موهر-کولمب می‌باشد. همچنین مدل الاستیک-پلاستیک با معیار لغزش موهر-کولمب برای لایه‌های تشکیل‌دهنده شیروانی در نظر گرفته شده است. دلیل استفاده از این مدل رفتاری در تحلیل پایداری شیروانی مورد مطالعه این است که با توجه به جنس سنگ‌های موجود در منطقه و میزان مقاومت فشاری تک‌محوری، این‌گونه سنگ‌ها و قرارگیری آن‌ها جزء سنگ‌های نرم، بهترین و مناسب‌ترین مدل رفتاری، مدل موهر کولمب است چراکه با توجه به ویژگی‌های این مدل، استفاده از آن در محیط‌های خاکی که به شدت دارای درزه و شکاف است به جواب مناسب‌تری در تحلیل‌ها منجر خواهد شد.

بیشاپ اصلاح‌شده معادل ۱/۶۳۲ محاسبه می‌شود درحالی‌که مقدار ضریب اطمینان در روش عددی مانیفولد برای سطح گسیختگی متناظر معادل ۱/۷۵۳ تعیین می‌شود که خطای آن کمتر از ۸ درصد است و می‌تواند بیانگر قابل‌اعتماد بودن نتایج تحقیق باشد.



شکل (۸): مقایسه روش تحلیلی بیشاپ اصلاح‌شده با روش عددی مانیفولد، (الف) بیشاپ اصلاح‌شده، (ب) تئوری گراف

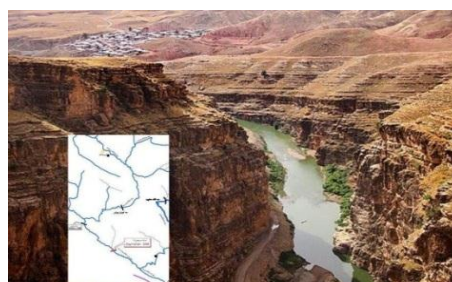
مطالعه موردی

در ادامه این تحقیق از روش تئوری گراف در تحلیل یک شیروانی سنگی مجاور نیروگاه برقی-آبی سد سیمره استفاده می‌شود. این سد در حدفاصل دو استان ایلام و لرستان و در ۴۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان دره‌شهر بر روی رودخانه سمیره واقع شده است. این سد از نوع بتنی دو قوسی است و توانایی تولید انرژی به میزان سالانه ۶۷۳ گیگاوات ساعت را دارد. بررسی پایداری شیروانی مذکور با توجه به نزدیکی آن با سه واحد نیروگاهی به دامنه شیب‌دار، دارای پتانسیل ریزش است که توجه به ایمن‌سازی کامل آن برای سه واحد نیروگاه، ساختمان و تأسیسات خروجی نیروگاهی ضروری به نظر می‌رسد. همچنین تنوع جنس سنگ‌های دربرگیرنده شیروانی مذکور و نقش ناپیوستگی‌ها و درزه‌ها بر اهمیت آن برای انجام چنین تحلیلی می‌افزاید. محدوده مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی در ناحیه زاگرس چین‌خورده و در بخش جنوب غربی آن واقع شده است. از دیدگاه زمین‌ریخت‌شناسی از رشته‌کوه‌های نسبتاً مرتفع با روند کلی شمال غرب-جنوب شرق تشکیل شده است و توالی طاق‌دیس‌ها و ناودیس‌ها در آن به‌وفور دیده می‌شود. طاق‌دیس‌ها از سنگ‌های مقاوم آهکی و ناودیس‌ها از سنگ‌های شکل‌پذیر و فرسایشی گچی و مارنی انباشته‌شده‌اند (گزارش زمین‌شناسی مه‌هاب قدس، ۲۰۰۴). جهت تولید برق، سه واحد نیروگاه سطحی در پایین‌دست بدنه سد و در فاصله ۱/۵ کیلومتری ورودی سازه آبگیر و جناح چپ رودخانه قرار دارد. شیروانی سنگی مشرف به این نیروگاه شامل سنگ‌آهک، آهک مارنی و مارلستون بوده و دارای ارتفاعی حدود ۸۰ متر و شیب تند یک به چهار

۱. RQD

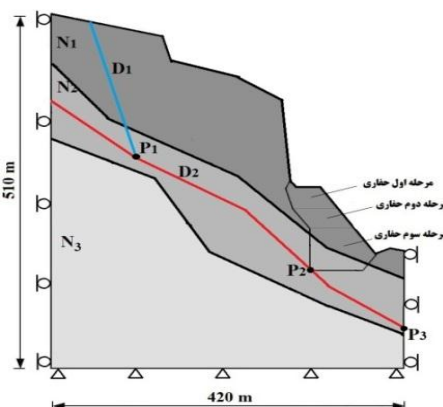
۲. Plaxis

-	-	۲	۱/۰۸	۲/۹۲	مدول حجمی <i>GPa</i>
-	-	۵	۲/۸	۷	مدول تغییر <i>GPa</i> شکل
۰/۳	۰/۰۷	-	-	-	سختی برشی
۱/۳	۰/۷	-	-	-	سختی نرمال

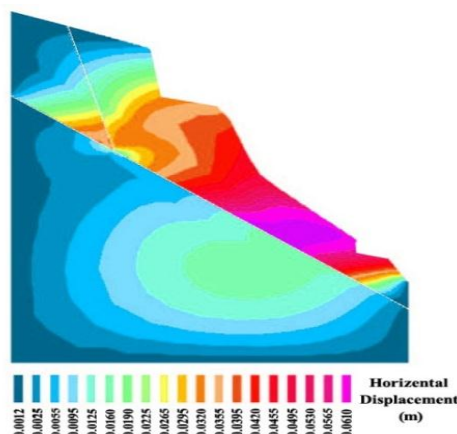


شکل ۹: خروجی تونل انحرافی و سطح مقطع شیروانی

همان‌طور که در شکل (۱۱) قابل پیش‌بینی است جابجایی افقی حداکثر در هنگام عملیات حفاری، در نزدیکی سطح رخ می‌دهد. این جابجایی در مرحله سوم حفاری و با آشکار شدن درزه D_2 و سطح عمودی آزاد، افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد. ضریب اطمینان برای شیروانی طبیعی و قبل از حفاری $1/41$ است که با شرایط واقعی نیز تطابق دارد زیرا شیروانی طبیعی پایدار باقی‌مانده است. در حفاری مرحله اول، ضریب اطمینان حفاری از ضریب اطمینان شیروانی طبیعی کمی بزرگ‌تر می‌شود که علت آن می‌تواند باربرداری از سطح شیروانی و به تبع آن کاهش وزن و عوامل محرک ناپایداری است. در دومین مرحله حفاری، جابجایی افقی بیشینه در نزدیکی منطقه حفاری افزایش یافته و ضریب اطمینان به $1/19$ کاهش می‌یابد. در سومین مرحله از حفاری، ضریب اطمینان به‌طور فراوانی کاهش داشته و به $0/92$ می‌رسد که علت آن وجود یک سطح عمودی و آشکار شدن درزه D_2 است. قبل از مرحله سوم حفاری، تنش‌های برشی و نرمال در درزه تقریباً ثابت است اما پس‌از این مرحله، تنش برشی در درزه D_1 افزایش یافته درحالی‌که تنش فشاری در همان درزه تقریباً به همان مقدار کاهش می‌یابد. تغییرات تنش در قسمت پایینی این درزه بیشتر از قسمت بالایی است چراکه این قسمت به منطقه حفاری نزدیک‌تر است. در درزه D_2 تغییرات تنش بسیار پیچیده است زیرا با درزه دیگر در تقاطع بوده و در سطح شیروانی آشکار شده است. تنش برشی در این درزه بین دو نقطه نشان داده‌شده در شکل (۱۱) (P_1 و P_2) با عملیات حفاری افزایش می‌یابد و شیروانی مستعد لغزش در امتداد درزه D_2 است. آشکار شدن درزه D_2 در نقطه P_2 باعث آزاد شدن ناگهانی تنش در امتداد نقطه P_2 و P_3 می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که حفاری باعث ناپایداری شیروانی سنگی خواهد شد و نیاز به پایدارسازی با استفاده از روش‌های مختلف از جمله میل مهار به‌منظور افزایش ضریب پایداری در طی عملیات حفاری در درزه D_2 در حوالی نقطه P_2 و بالای آن ضروری است.



شکل (۱۰): شماتیک تقریبی سطح مقطع شیروانی سنگی

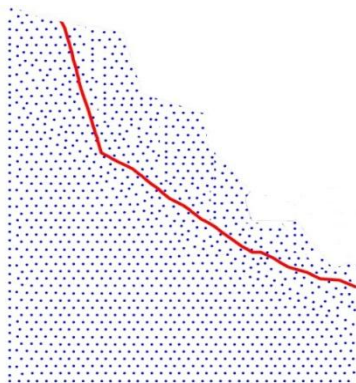


شکل (۱۱): مدل سازی آن در نرم‌افزار پلکسیس

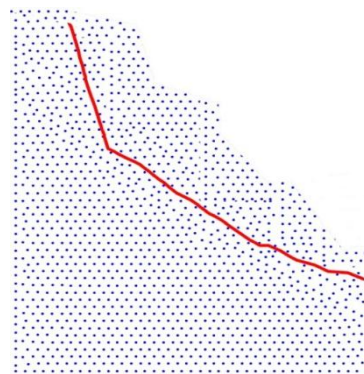
جدول (۱): مشخصات مصالح سنگی در تحلیل پایداری

شیروانی (گزارش زمین‌شناسی مه‌آب قدس، ۲۰۰۴)

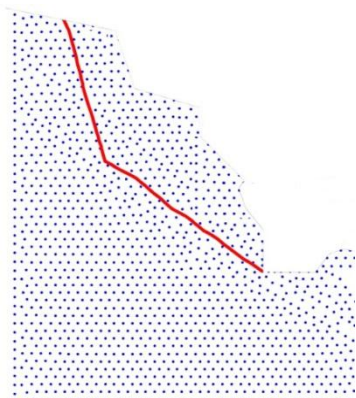
مشخصات	سنگ آهک	مارن	آهک مارنی	درزه اول	درزه دوم
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۴۵	۲۰	۳۵	۲۰	۲۴
چسبندگی (<i>kPa</i>)	۴۰۰	۷۰	۲۵۰	۷۰	۱۰۰
وزن مخصوص (<i>kN/m³</i>)	۲۶/۸	۲۶	۲۶/۵	-	-
نسبت پواسون	۰/۳۲	۰/۳	۰/۲۷	-	-
مدول برشی <i>GPa</i>	۳/۸۹	۲/۳۳	۳/۳۳	-	-



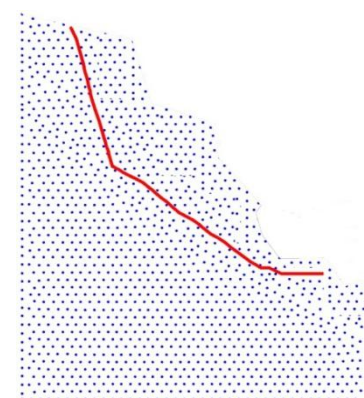
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۱۱): مقایسه تغییرات جابجایی افقی و ضریب اطمینان سطح لغزش بحرانی در مراحل مختلف حفاری، الف) قبل از حفاری (SF=1.41)، ب) مرحله اول حفاری (SF=1.42)، ج) مرحله دوم حفاری (SF=1.19) و د) مرحله سوم حفاری (SF=0.92)

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

همچنین به منظور کاهش تکرار محاسبات و زمان تحلیل از تئوری گراف برای یافتن سطح لغزش بحرانی استفاده شد. در این راستا با استفاده از الگوریتم بلمن-فورد، سطح لغزش بحرانی و ضریب اطمینان حداقل با تعریف نسبت نیروی مقاوم به نیروی محرک در طول مسیر خط لغزش قابل محاسبه است و هیچ‌گونه فرضیاتی در رابطه با سطح لغزش نیاز نیست. از نتایج این تحقیق می‌توان برای تمامی سطوح لغزش صفحه‌ای، شکسته و پله‌ای یا دایروی و با هندسه‌های متفاوت، مصالح متفاوت یا معیارهای مختلف گسیختگی استفاده کرد. در یک مطالعه موردی برای شیروانی سنگی مجاور نیروگاه برقی-آبی سد سیمره که دارای ناپیوستگی، درزه و ناهمگنی در مصالح است، مقایسه نتایج این روش با نتایج تحلیل‌های عددی نشان‌دهنده دقت مناسب و کارایی این روش است.

روش‌های مختلف تحلیل پایداری شیب‌های سنگی و خاکی عموماً دارای محدودیت‌هایی می‌باشند که مهم‌ترین آن‌ها فرضیات بسیار در محیط ناهمگن و مرز خاک و سنگ و همچنین نیاز به محاسبات مکرر برای تخمین سطح لغزش بحرانی می‌باشد که این موضوع زمان زیادی برای مدل‌سازی و تحلیل نیاز دارد. در این تحقیق یک روش عددی ترکیبی به منظور تعیین سطح لغزش بحرانی و ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌های خاکی و سنگی همگن و ناهمگن معرفی شد. به منظور تحلیل محیط‌های ناهمگن، در این تحقیق از روش عددی مانیفولد استفاده شده است که برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی ناپیوستگی‌ها نظیر درزه در شیروانی‌های ناهمگن بسیار سودمند است. روش عددی مانیفولد توانایی و قابلیت حل مشکلات احتمالی ناشی از چرخش و تغییر شکل المان در هنگام شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها را دارا بوده و به تبع آن ناپایداری و بی‌ثباتی در روش‌های عددی را کاهش می‌دهد.

stability analysis. *Can. Geotech. J.* 30(6), 905–919.

منابع

- 15- Li, E. Zhuang, X. Zheng, W. & Cai, Y. (2014) Effect of graph generation on slope stability analysis based on graph theory. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(4), 380-386.
- 16- Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, (2004) Geology Report of Saymareh Dam (In Persian).
- 17- Michalowski, R. L. June (1997) "Stability of uniformly reinforced slopes" ASCE, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(6), 546-556.
- 18- Morgan, R.P.C. and Styczen, M.E. 1995. Engineering properties of vegetation. Slope stabilization and erosion control, A bioengineering approach, edited by Morgan, R.P.C and Rickson, R.J. Chapman and Hall.
- 19- Morgenstern, N.R. and Price, V.E. 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15(1): 79-93.
- 20- Sarma, S.K. (1973). Stability analysis of embankment sand slopes. *Geotechnique* 23(3), 423–433.
- 21- Shi, G. (1991). Manifold method of material analysis. 9th Army Conference on Applied Mathematics and Computing, Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 57–76.
- 22- Wang G, Wang Y, Ren J. (2011). Theory, implementation and application of graph theory. Beijing: Peking University Press.
- 23- Zheng H, Tian B, Liu D, Feng Q. (2005) On definitions of safety factor of slope stability analysis with finite element method. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*; 24(13):2225-2230 (in Chinese).
- 24- Zheng W. Zhuang X. Tannant D. Cai Y. and Nunoo S. (2014), Unified continuum discontinuum modeling framework for slope stability assessment, *Engineering Geology* 179, 90–101.
- 25- Zhou J, Xu W, Deng J, Liu X. (2008) Stability analysis of slope under the condition of rainfall infiltration. *Journal of Hydraulic Engineering*;39(9):1066e73.
- 26- Zhu, D. Lee, C. Jiang, H. (2003) Generalised framework of limit equilibrium method sand numerical procedure for slope stability analysis. *Geotechnique* 53(4), 377–395.
- 27- Zhuang X, Cai Y, Zhu H, Zhou D. (2008) Rock slope stability analysis based on meshless method and shortest path algorithms. *Chinese Quarterly of Mechanics*; 29(4):537-543.
- 2- Abramson, L.W. Lee, T.S. Sharma, S. Boyce, G.M. (2001). *Slope Stability and Stabilization Methods*, 2nd edition. John Wiley & Sons.
- 3- Bellman R. *Dynamic programming*. Princeton, USA: Princeton University Press; 1957.
- 4- Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 5(1), 7–17.
- 5- Bondy JA. (1976) Murty *USR Graph theory with applications*, London: The Macmillan Press Ltd.
- 6- Chen, Z. Morgenstern, N.R. 1983. Extensions to the generalized method of slices for stability analysis. *Can. Geotech. J.* 20(1), 104–119.
- 7- Cherkassky B. Goldberg A. and Radzik T. (1993), *Shortest paths algorithms: theory and experimental evaluation*. Technical report 93-1480. Stanford: Stanford University;
- 8- Ching, R.K.H. Fredlund, D.G. (1983) some difficulties associated with the limit equilibrium method of slices. *Can. Geotech. J.* 20, 661–672.
- 9- Duncan, J.M. Wright, S.G. (2005) *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons.
- 10- Enpu L. Xiaoying Zh. Wenbo Zh. and Yongchang C. (2014) Effect of graph generation on slope stability analysis based on graph theory, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6 (2014) 380-386.
- 11- Fang J. (2007) Slope stability analysis using direct search method based on 3D FEM and its application in tunnel excavation. PhD Thesis. Shanghai: Tongji University.
- 12- Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. *Proceedings of the Second Congress of Large Dams*. International Commission on Large Dams, Washington DC, USA, 445–463.
- 13- Goodman, R.E. Taylor, R.L. Brekke, T.L. (1968) A model for the mechanics of jointed rock. *J. Soil Mech. Found. Div.* 94(3), 637–659.
- 14- Lam, L. Fredlund, D.G. (1993) A general limit equilibrium model for three-dimensional slope

۱- هادی محمدزاده، اورنگ فرزانه و فرج اله عسکری "تحلیل پایداری شیروانی‌های خاک مسلح به روش آنالیز حدی مرز بالا" نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دوره ۴۵، شماره ۶، ۱۳۹۰، صفحات ۶۹۷ الی ۷۰۷

Slope stability analysis based on numerical manifold method and graph theory

Saeed Ghaffarpour Jahromi^{1*}
Fateme Bodaghi²

Abstract

Limit equilibrium method, strength reduction method and Finite Difference Methods are the most prevalently used methods for soil and rock slope stability analysis. However, it can be mention that those have some limitations in practical application. In the Limit equilibrium method, the constitutive model cannot be considered and many assumptions are needed between slices of soil and rock. The strength reduction method requires iterative and continual calculations and does not give the slip surface directly. For slope stability analysis a new method based on the numerical Manifold method and Graph theory is this research developed that can directly calculate the potential critical slip surface and minimum safety factor according to the stress results of numerical simulation. This method is based on current stress state and can overcome the disadvantages mentioned above in those three traditional methods. The results of benchmark examples and a rock slope show good accuracy and efficiency of the presented method. In this research new method based on the numerical Manifold method and Graph theory is this research developed that can directly calculate the potential critical slip surface and minimum safety factor according to the stress results of numerical simulation. Graph theory is an important branch of combinatorial mathematics .The theory originated from the Koenigsberg bridge problem, and the mathematician Euler used the theory to address this problem. After hundreds years of development, the graph theory has been used to solve the problems of the shortest path, network flow, dynamic planning, etc. It has been widely used in engineering fields, such as the analysis of drainage pipe network system, the optimal island distribution of smart grid, the train operation plan, and the tourism route optimization. For slope stability analysis a new method based on the numerical Manifold method and Graph theory is this research developed that can directly calculate the potential critical slip surface and minimum safety factor according to the stress results of numerical simulation. This method is based on current stress state and can overcome the disadvantages mentioned above in those three traditional methods. The results of benchmark examples and a rock slope show good accuracy and efficiency of the presented method.

Keywords:

Soil and Rock slope, Stability Analysis, Numerical Manifold Method, Graph Theory, Heterogeneous Geometry.

1- Professor Assistant, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, Saeed_ghf@sru.ac.ir
2- Master of Geotechnical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran