نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره یازدهم، شماره ۳۲، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۲۳ تا ۳۲
Vol.11, No. 32, 2016, pp23-32

بررسی قابلیت توسعه روش گروه‌های کلیدی با روش‌های عددی برای یافتن گروه کلیدی بحرانی در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی

میر حسین شهامی[۱]؛ علیرضا یاراحمدی بافقی[۲*]؛ روزبه گرایلی میکلا[۳]

۱- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، m.h.shahami@gmail.com
۲- استادیار، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، ayarahmadi@yazd.ac.ir
۳- دکترای ژئوتکنیک، دانشگاه برکلی امریکا، roozbehg@live.com

(دریافت۱۴ خرداد ۱۳۹۴، پذیرش۲۲ شهریور ۱۳۹۴)

چکیده

ناهمسانی و وجود ناپیوستگی‌ها، در مقاومت و رفتار توده سنگ نقش اساسی دارد. امروزه مهندسین با محدوده وسیعی از روش‌ها، به‌منظور تحلیل پایداری شیب های سنگی مواجه هستند. به‌دلیل سادگی و سرعت اجرا، روش‌های به‌کار رفته در تحلیل‌های استاتیکی همچنان جایگاه ویژه‌ای در بررسی پایداری شیب های سنگی درزه‌دار دارند. یکی از معروف‌ترین روش‌های استاتیکی موجود در تحلیل پایداری توده سنگ‌های درزه‌دار، تئوری بلوکی و روش بلوک‌ها ی کلیدی است که تنها برمبنای یافتن و تحلیل بلوک کلیدی بوده و چنان‌چه هیچ یک از این بلوک‌ها ناپایدار نباشند، دلالت بر پایداری توده سنگ می‌کند. در بعضی مواقع، اجتماع تعدادی بلوک پایدار منجر به تشکلیل گروهی شده که اغلب سبب ناپایداری می‌شود؛ بنابراین تحلیل پایداری توده سنگ درزه‌دار، منجر به بررسی گروه‌هایی از بلوک‌ها می‌شود که به‌صورت بالقوه برای پایداری یک شیب سنگی خطرناک می‌باشند. روش گروه‌های کلیدی با عملکردی پیشرونده اقدام به معرفی این گروه‌های بحرانی کرده و محاسبات پایداری را در آن‌ها متمرکز می‌کند. برای افزایش کارایی، دقت و سرعت روش گروه‌های کلیدی و همچنین توسعه آن در سه بعد، تلفیق آن با یکی از روش‌های عددی مورد توجه است، تا ضمن توسعه این روش مشکل زمان زیاد محاسبه در کدهای رایآن‌های مربوط به روش‌های عددی مرتفع شود. این هدف در دو بخش تحقق می‌یابد: الف) تحلیل اندرکنش بلوک‌ها ی یک گروه کلیدی و یافتن گروه کلیدی بحرانی ب) تحلیل اندرکنش گروه کلیدی بحرانی با توده سنگ و بررسی پایداری توده سنگ. در این مقاله با هدف تحلیل اندرکنش بلوک‌های گروه کلیدی، ابتدا به بررسی عملکرد روش گروه‌های کلیدی پرداخته و سپس برای انتخاب بهترین روش عددی برای توسعه، از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه فازی بهره گرفته شده است. در پایان روش تحلیل تغییر شکل ناپیوسته (DDA) به‌عنوان سازگارترین روش عددی با معیارهای توسعه، انتخاب شد و سپس تلفیق این دو روش، مورد توجه قرار گرفت و الگوریتم و برنامه اولیه در محیط نرم افزاری Mathematica تهیه شد. نتایج این مرحله از توسعه روش گروه‌های کلیدی که عملا نوعی تلفیق با روش تحلیل تغییر شکل ناپیوسته است، بیان‌گر قابلیت توسعه روش گروه های کلیدی در شناسایی و تحلیل پایداری گروه‌های کلیدی بحرانی در شیب های سنگی درزه دار است.

کلمات کلیدی

تحلیل پایداری، بلوک کلیدی، گروه‌های کلیدی، تحلیل تغییر شکل ناپیوسته، تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

سنگ‌ها اغلب سطوح ضعیفی دارند که بلوک‌های مجزا از هم را به‌صورت کاملاً درگیر با یکدیگر، در کنار هم قرار می‌دهند. چنین سنگ‌هایی، سنگ‌های ناپیوسته نامیده می‌شوند. برای تحلیل پایداری شیروانی های موجود در سنگ‌های ناپیوسته، روش‌های متنوع استاتیکی (تعادل حدی)، شبه-استاتیکی و دینامیکی استفاده می‌شوند که در این میان روش‌های استاتیکی به‌دلیل سادگی و زمان محاسبه بسیار کم و وجود تجربه زیاد همواره مورد توجه هستند.

یکی از معروف‌ترین روش‌های تعادل حدی شناخته شده برای تحلیل پایداری شیب سنگ‌های درزه‌دار، روش تحلیل بلوک کلیدی (تئوری بلوک کلیدی) است [۱]، که با دو روش گرافیکی [۱] براساس نگاشت استریوگراف و برداری [۲] به بررسی ناپایداری می‌پردازد.

تئوری بلوک کلیدی به بررسی جابجایی بلوک‌های سنگی و تحلیل تعادل حدی این بلوک‌ها در سطح حفریات مختلف می پردازد. جابجایی یک بلوک، فضایی را به‌وجود می‌آورد که باعث حرکت بلوک‌های محدود شده دیگر می‌شود. بدین ترتیب ممکن است گسیختگی شدیدی به‌صورت پسرونده اتفاق افتد که اغلب بسیار سریع است.

پس از معرفی تئوری بلوک کلیدی توسط گودمن، مطالعات زیادی توسط گیانی [۳]، مولدن ـ اورتا [۴]، مولدن و همکاران [۵]، فالویو ـ تونتون [۶] و سگاستا [۷]، برای توسعه ی روش بلوک‌های کلیدی انجام شده است.

این روش‌ها تنها به مطالعه رفتار بلوک کلیدی پرداخته اند. نکته قابل تأمل در این روش‌ها، این است که با فرض مهار بلوک کلیدی، ترکیب بلوک‌ها ی همسایه بلوک کلیدی با آن می‌تواند ایجاد یک گروه بحرانی کند که مستعد ریزش است. از طرفی با توجه به این‌که این روش‌ها تنها به تحلیل بلوک کلیدی می‌پردازند، چنان‌چه هیچ یک از بلوک‌ها ، کلیدی شناخته نشوند، این نتیجه حاصل می‌شود که سیستم بلوکی پایدار است؛ درحالی که می‌توان گروهی از بلوک‌ها را فرض کرد که درصورت ادغام باهم ایجاد ناپایداری کنند.

یکی از روش‌های معرفی شده برای رفع مشکلات بیان شده در روش بلوک کلیدی، روش گروه‌های کلیدی یاراحمدی و وردل (۲۰۰۳) است که این روش در یک تحلیل تکرار شونده و پیشرونده پایداری شیب سنگ‌های درزه‌دار را بررسی کرده و در انتها بحرانی‌ترین گروه کلیدی که موجب ناپایداری می‌شود را معرفی می‌کند [۸]. مفاهیم اصلی به‌کار رفته در روش بلوک کلیدی در این روش نیز تکرار شده و برای شناسایی گروه کلیدی به‌کاربسته شده اند.

پس از آن، این روش با نام گروه‌های کلیدی احتمالاتی [۹] با هدف بررسی عدم قطعیت در ناپایداری گروه کلیدی معرفی شد و برای تحلیل حرکت بلوک‌ها نسبت به یکدیگر، گروه‌های کلیدی بر پایه روش سارما [۱۰] معرفی شد. گروه‌های کلیدی توسط امامی و همکاران با عنوان گروه‌های کلیدی جهت‌دار برای یافتن سطح بحرانی ریزش [۱۲] و سپس توسط نوروزی و همکاران در سه بعد گسترش یافت [۱۱].

روش گروه‌های کلیدی بر مبنای کاربرد اصول استاتیکی و سینماتیکی بنا نهاده شده است و زمانی که علاوه بر وزن بلوک، تنش های برجا و القایی، اثرات ناشی از جریان سیال و غیره نیز درنظر گرفته شوند، سیستم معادلات حاکم به‌طور استاتیکی نامعین و سیستم بلوکی غیر قابل تحلیل خواهد بود.

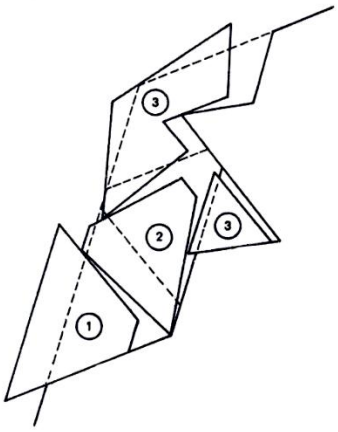
تلفیق روش گروه‌های کلیدی با روش‌های عددی، توجه مستقیم به گروهی از بلوک‌ها بجای مجموعه بلوک‌های توده سنگ است که موجب افزایش سرعت، دقت و قابلیت تحلیل خواهد شد و همچنین امکان شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر محیط مورد مطالعه، از طریق اعمال تنش های برجا، نیروهای اینرسی وغیره بر مدل را ایجاد می‌کند. همچنین ضمن توسعه این روش مشکل زمان زیاد محاسبه و کمبود حافظه در روش‌های عددی نیز تا حدودی رفع می‌شود.

۲- گروه‌های کلیدی

در شیب‌های سنگی انواع مختلفی از گسیختگی‌ها اتفاق می‌افتد. با بررسی دقیق می‌توان دریافت که همه این گسیختگی‌ها از چند نوع گسیختگی اصلی ناشی می‌شود. گسیختگی‌های اصلی عبارتند از: لغزش بلوک در امتداد یک سطح؛ لغزش بلوک روی دو سطح و به موازات فصل مشترک آن‌ها؛ چرخش بلوک حول یکی از لبه‌های آن؛ و گسیختگی سنگ در اثر یکی از تنش‌های برشی یا خمشی. گسیختگی‌های واقعی در شیب‌های سنگی ترکیبی از گسیختگی‌های اصلی بوده و ممکن است با ایجاد ترک‌های جدید همراه باشد. برای مثال گسیختگی شیب سنگی شکل ۱ ناشی از جابجایی‌های همزمان چهار بلوک مختلف است که هر یک از طریق مکانیزم-های خاصی انجام می‌شود. در این حالت احتمال زیادی وجود

دارد که با جلوگیری از حرکت بلوک ۱، تمام جابجایی‌ها متوقف شود. اما در عین حال این امکان وجود دارد که همراهی بلوک ۱ با بلوک‌های موجود در همسایگی آن، موجب ایجاد ناپایداری در مقیاسی بزرگ‌تر شود. بنابراین عدم امکان پیش‌بینی برخی از گسیختگی‌ها توسط روش ساده بلوک کلیدی را نمی‌توان رد کرد.

روش گروه‌های کلیدی بر اساس یک تحلیل پایداری پیشرونده اجرا می‌شود. به این صورت که اگر بلوک‌ها با یکدیگر در نظر گرفته شوند می‌توانند یک گروه کلیدی را به‌وجود آورند که به‌صورت بالقوه خطرناک‌تر از یک بلوک کلیدی تنها است [۸]. برای تعیین گروه‌های کلیدی بایستی شرایط زیر را درنظر گرفت:

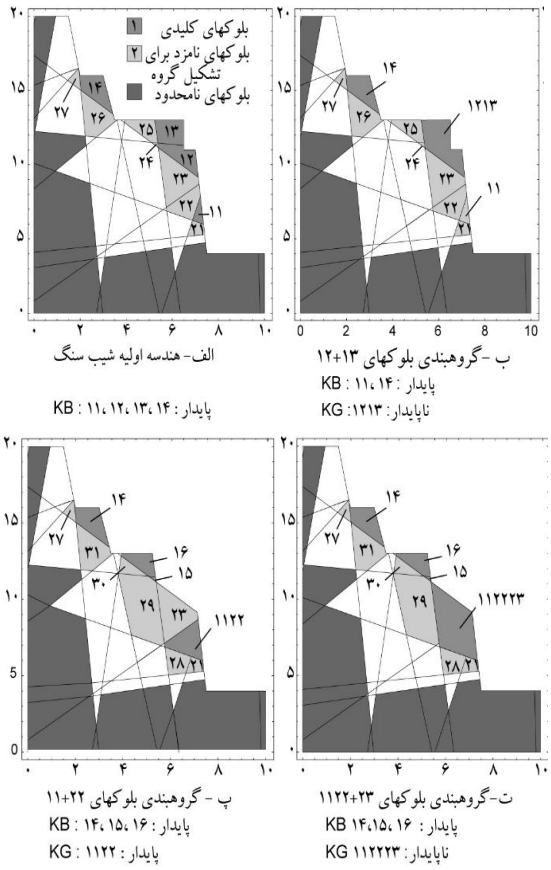


شکل۱: گسیختگی فزاینده شیب سنگی [۱۲]

۱- یک گروه کلیدی حداقل یک بلوک کلیدی اولیه را دربر دارد (بلوک کلیدی، بلوکی است که یک سطح آزاد یا سطح استخراجی دارد و کلید حرکت دیگر بلوک‌ها است). بنابراین در هنگام جستجوی گروه‌های کلیدی، این نتیجه به‌عنوان شرط اولیه محسوب می‌شود.

۲- یک گروه کلیدی باید خاصیت کلیدی داشته باشد (به عبارتی فعال، محدود و از نظر هندسی قابل حرکت باشد).

برای مثال در شکل ۲ به‌طور شماتیک چهار مرحله از تکنیک گروه‌بندی انجام شده برروی یک شیب سنگ درزه‌دار فرضی نشان داده شده است. در مرحله ابتدایی (شکل ۲- الف)، چهار بلوک کلیدی شناسایی و مشخص شده است. اگر از روش بلوک‌های کلیدی برای تحلیل استفاده شود، هیچ یک از بلوک-ها ناپایدار نبوده و تحلیل در این مرحله پایان می یابد. اما در صورت استفاده از روش KGM پنج نامزد گروه کلیدی (۱۱+۲۲ ، ۱۲+۱۳، ۱۲+۲۴ ، ۱۳+۲۵ ، ۱۴+۲۷) را می‌توان شناسایی کرد. در این مرحله تنها گروه کلیدی حاصل از بلوک‌های کلیدی ۱۲ و ۱۳ ناپایدار خواهد بود، بنابراین در مرحله بعد این گروه حذف خواهد شد. سپس بلوک‌های شماره ۱۱ و ۲۲ با یکدیگر ترکیب شده و گروه کلیدی ۱۱۲۲ را به‌وجود می آورد که کمترین فاکتور ایمنی را دارد (شکل ۲- پ). در این مرحله سه موقعیت گروه‌بندی با گروه ۱۱۲۲ وجود دارد (۲۳+۱۱۲۲ ، ۲۸+۱۱۲۲ ، ۲۱+۱۱۲۲) که تنها گروه ۲۳+۱۱۲۲، گروه کلیدی است. در این مرحله سه گروه کلیدی دیگر نیز قابل تشکیل است؛ (۱۶+۱۵ ، ۳۰+۱۶ و ۲۷+۱۴). مطالعه برروی کلیه گروه‌ها منجر به شناسایی گروه حاصل از بلوک‌های ۱۱۲۲ و ۲۳ به‌عنوان ناپایدارترین گروه می‌شود (شکل ۲) [۸].



شکل ۲: الف: هندسه اولیه شیب، ب: گروه‌بندی بلوک‌های۱۲و۱۳، پ: گروه‌بندی بلوک‌ها ی ۱۱و۲۲، ت: گروه‌بندی بلوک‌های ۱۱۲۲و۲۳ [۹]

همان‌گونه که مشخص شد، استفاده از روش KGM به جای روش KBM منجر به در نظر گرفتن تعداد بیشتری از بلوک‌ها در تحلیل پایداری خواهد شد و روش KGM حجم بزرگ‌تری از بلوک‌های ناپایدار را نسبت به روش KBM به‌دست خواهد داد.

تحلیل پایداری توده‌سنگ درزه‌دار، منجر به بررسی گروه-هایی از بلوک‌ها و نه فقط یک بلوک منفرد خواهد شد. روش گروه‌های کلیدی یک تکنیک گروه‌بندی بر مبنای تحلیل تمام بلوک‌های همسایه یک بلوک کلیدی است که به جستجوی یک گروه کلیدی ناپایدارتر از بلوک‌های کلیدی مجزا می‌پردازد که سطح ریزش آن، سطح بحرانی ریزش خواهد بود.

۳- انتخاب روش عددی مناسب

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، برای غلبه بر محدودیت‌های موجود در روش گروه‌های کلیدی، تلفیق آن با یکی از روش‌های عددی مورد نظر است. با توجه به تنوع و قابلیت‌های گسترده روش‌های عددی، از روش تصمیم‌گیری چند شاخصه برای انتخاب سازگارترین مورد با معیارهای توسعه روش گروه‌های کلیدی استفاده می‌شود. همچنین باتوجه به طبیعت فازی معیارها، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه فازی، به انتخاب مناسب‌ترین گزینه می‌انجامد؛ چون مدل کردن عدم قطعیت در مسائل تصمیم‌گیری به‌وسیله تئوری مجموعه‌های فازی انجام می‌شود [۱۳].

۳-۱- تصمیم گیری چند شاخصه فازی

در مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره، هر گزینه با چند معیار ارزیابی می‌شود و انتخاب گزینه از طریق تعیین سطح مورد نظر برای معیارها و یا از طریق مقایسه‌های زوجی معیارها و گزینه‌ها انجام می‌شود. در این روش‌ها، شاخصه‌های کیفی به اعداد کمی تبدیل می‌شوند و با مقایسه شاخص‌ها با یکدیگر، اهمیت و برتری هر یک تعیین و گزینه بهتر انتخاب می‌شود [۱۴].

در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره کلاسیک سعی می‌شود که تأثیر عوامل مختلف در تصمیم‌گیری با استفاده ازمفاهیم ریاضی محاسبه شود. اما بیان بسیاری از عوامل با منطق ریاضی کلاسیک امکان‌پذیر نیست. از طرف دیگر همیشه در دنیای واقعی عدم قطعیت وجود داشته و شرایط نامطمئن، همواره در مراحل مختلف مطالعه و بررسی یک مسأله وجود دارد. بنابراین در بسیاری موارد، تمام و یا قسمتی از داده‌های یک مسأله تصمیم‌گیری چندمعیاره، فازی هستند.

۳-۲- روش یاگر در تصمیم‌گیری چند شاخصه فازی

در روش یاگر درایه های ماتریس تصمیم بیان‌گر درجه عضویت هرگزینه از نظر هر معیار است. در این روش وزن معیارها براساس روش ساعتی (مقایسه های زوجی) به‌دست می‌آید. سپس برای هر گزینه از نظر هر شاخص درجه عضویت-ها به توان وزن شاخص‌ها رسانده می‌شود. در نهایت بر اساس اصل بیشینه ـ کمینه بالمن و زاده، گزینه برتر تعیین می‌شود. مراحل روش یاگر عبارتند از [۱۴]:

الف- تشکیل ماتریس تصمیم فازی

اگر مجموعه گزینه‌های ممکن $A=\{A_1,A_2,\ldots,A_m\}$ و مجموعه معیارهای مؤثر در تصمیم‌گیری $C=\{C_1,C_2,\ldots,C_m\}$ باشد، ماتریس تصمیم به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} \mu_{c1}(A_1) & \cdots & \mu_{cn}(A_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{c1}(A_m) & \cdots & \mu_{cn}(A_m) \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که در آن $\mu_{c1}(A_1)$ درجه عضویت گزینه iام $(i=1,2,3,\ldots,m)$ در رابطه با شاخص j ام $(j=1,2,3,\ldots,n)$ است. مقدار $\mu_{c1}(A_1)$ بین ۰ و ۱ قرار دارد و نشان می‌دهد گزینه A1 چقدر شاخص C_j را ارضا می‌کند.

ب- محاسبه وزن هر شاخص به روش ساعتی

در این مرحله ماتریس مقایسه زوجی بین معیارها تشکیل و با به‌کار بردن یکی از روش‌های موجود، وزن هر شاخص (W_j) تعیین می‌شود. این بردار وزن‌های نمایی روش یاگر است.

پ- تشکیل ماتریس تصمیم وزن دار

برای تشکیل این ماتریس، درایه‌های ماتریس به توان وزن شاخص مربوطه رسانده می‌شود. به‌عبارت دیگر درایه‌های ماتریس به صورت $(\mu_{c1}(A_1))^{wj}$ خواهند بود.

ت- تعیین کوچک‌ترین مقدار هر سطر ماتریس تصمیم وزن دار

بدین منظور به‌ازای هر سطر ماتریس تصمیم وزن‌دارکه مربوط به هر گزینه است، کوچک‌ترین مقدار تعیین می‌شود. بنابراین یک بردار ستونی $m\times 1$ به‌دست خواهد آمد. به‌عبارت دیگر:

$$\mu_D(A_i) = \min\{ (\mu_{c1}(A_i))^{W1}, (\mu_{c2}(A_i))^{W2}, \ldots, (\mu_{cn}(A_i))^{Wn} \} \quad I = 1,2,\ldots,m \quad (۲)$$

ج- تعیین گزینه برتر

در این مرحله بیشترین مقدار در بردار ستونی مرحله قبل تعیین و گزینه مربوط به این مقدار به‌عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شود. به‌عبارت دیگر:

$$\mu_D(A_i^*) = \max \{ \mu_D(A_i) \} \quad (۳)$$

۳-۳- انتخاب بهترین روش عددی

پس از جمع‌آوری داده‌ها به فازی‌سازی آن پرداخته شد. در این تحقیق، روش‌های عددی مورد بررسی شامل تبادل مومنتوم، المان مجزا (DEM)، تحلیل تغییر شکل ناپیوسته (DDA) و روش مودال (Modal) بوده و شاخصه های سنجش،

برمبنای بهترین تطابق با اهداف گسترش روش گروه‌های کلیدی (KGM) به شرح شکل ۳ انتخاب شده‌اند.

برای تبدیل شاخص‌های کیفی به شاخص‌های کمی، از روش مقیاس دوقطبی با جنبه مثبت استفاده می‌شود. ارزش-های ۲، ۴، ۶ و ۸ ارزش‌های واسط بین دو ارزش دیگر می‌باشند. در این نوع اندازه‌گیری فرض می‌شود فاصله‌های بین ارزش‌ها یکسان است و امتیازها مقیاس نسبی دارند.

جدول ۱: فازی سازی داده ها

عبارت کلامی	اعداد قطعی	اعداد فازی مثلثی
بسیارخوب	۹	(۷،۹،۹)
خوب	۷	(۵،۷،۹)
متوسط	۵	(۳،۵،۷)
نا مطلوب	۳	(۱،۳،۵)
بسیار نامطلوب	۱	(۱،۱،۳)

پس از فازی کردن داده‌ها جدول۱، فرآیند یاگر در تصمیم-گیری چند معیاره، آن‌چنان که بیان شد، به‌کار برده می‌شود. جدول ۲ ماتریس تصمیم کمی شده را نمایش می‌دهد.

در تحلیل انجام شده، برای توسعه روش تحلیلی گروه‌های کلیدی و افزایش دقت آن، روش‌های عددی مذکور به ترتیبی که بیان شد، توسط روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی سنجیده شد و در نهایت روش عددی تحلیل تغییر شکل ناپیوسته (DDA) به‌عنوان مناسب‌ترین روش معرفی شد.

رتبه‌بندی نهایی عبارتست از:

Modal methods > Momentum-exchange methods

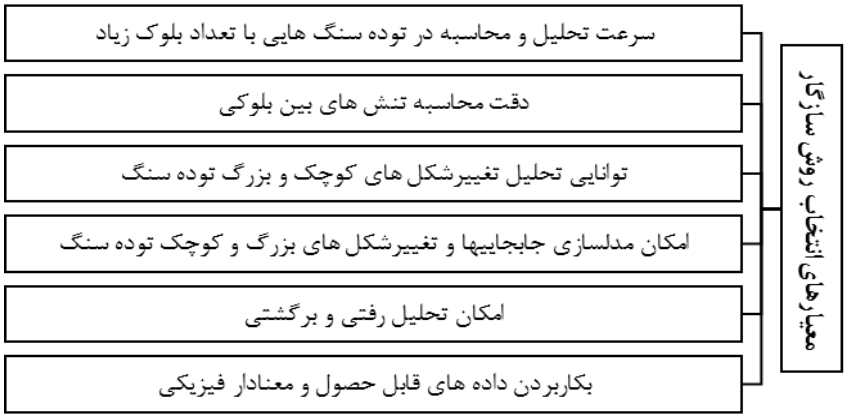
DDA > DEM >

آن گونه که بررسی شد، قابلیت‌های مورد انتظار برای توسعه روش گروه‌های کلیدی بهترین انطباق را با این روش عددی دارد.

۴- تلفیق روش‌های گروه‌های کلیدی و تحلیل تغییرشکل ناپیوسته (DDA)

پس از درک ضرورت تلفیق روش گروه‌های کلیدی با یک روش عددی و یافتن مناسب‌ترین روش سازگار با معیارهای توسعه روش گروه‌های کلیدی، تلفیق این دو روش از طریق اعمال معادلات حاکم بر سیستم بلوکی در روش تحلیل تغییر شکل ناپیوسته بر گروه کلیدی بحرانی مورد نظر قرار گرفت.

روش تحلیل تغییر شکل ناپیوسته (DDA) الگوریتمی است که در ابتدا توسط شی [۱۵] برای تحلیل توده سنگ‌های ناپیوسته تحت شرایط بارگذاری متفاوت پیشنهاد شده است. در فرمولاسیون DDA یک تابع جابجایی چند جمله‌ای مرتبه اول در نظر گرفته شده است، به‌طوری که تنش‌ها و کشش‌ها در داخل یک بلوک در مدل ثابت است. با اتخاذ تقریب جابجایی مرتبه اول، روش DDA فرض می کند که تنش‌ها و کرنش‌ها در سطح یک بلوک ثابت است.



شکل ۳: معیارهای انتخاب سازگارترین روش

جدول ۲: ماتریس تصمیم کمی شده

روش تحلیل	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
تبادل مومنتوم	۳	۵	۱	۵	۷	۶
المان مجزا	۵	۹	۸	۹	۷	۵
تحلیل تغییر شکل ناپیوسته	۹	۸	۹	۸	۹	۷
مودال	۷	۹	۹	۹	۷	۷

جابجایی‌های (u ،v) در هر نقطه (x ،y) در یک بلوک i، می‌تواند در دو بعد با شش متغیر جابجایی مرتبط باشد [۱۶]:

$$D_i=(d_{1i}\ \ d_{2i}\ \ d_{3i}\ \ d_{4i}\ \ d_{5i}\ \ d_{6i})^T = (u_0\ \ v_0\ \ r_0\ \ \varepsilon_x\ \ \varepsilon_y\ \ \gamma_{xy})^T \quad (۴)$$

که در آن (u_0 ،v_0) جابجایی انتقالی جسم صلب در یک نقطه خاص (x_0 ،y_0) در بلوک است، r_0 زاویه چرخش بلوک با مرکز چرخش در (x_0 ،y_0) و ε_x و ε_y و γ_{xy} کرنش‌های برشی و نرمال در بلوک است. همان‌طور که شی نشان داد[۱۵]، تقریب کامل جابجایی مرتبه اول به‌صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = T_i D_i \quad (۵)$$

که در آن

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & (y-y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & (x-x_0)/2 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

این معادله محاسبه جابجایی‌ها را در هر نقطه در داخل بلوک (به طور خاص، در گوشه ها)، هنگامی که جابجایی‌ها در مرکز دوران داده شده‌اند و نیز کرنش‌ها (ثابت در سطح بلوک) شناخته شده‌اند قادر می‌سازد. در فرمولاسیون روش DDA ، مرکز چرخش با مختصات (x_0,y_0) منطبق بر مرکز بلوک است.

۱-۴- معادلات تعادل همزمانی

روش DDA بر مبنای کمینه کردن مجموع انرژی پتانسیل بنا نهاده شده است. انرژی پتانسیل کل، مجموع تمام منابع انرژی پتانسیل نشان داده شده در معادله زیر برای هر بلوک است. انرژی پتانسیل کل برای همه بلوک‌ها به کمک DDA در گام زمانی nام را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد[۱۷]:

$$\prod^{(n)} = \prod^{(n)}_{elastic} + \prod^{(n)}_{initialstress} + \prod^{(n)}_{po\,int\,load} + \prod^{(n)}_{body\ force} + \prod^{(n)}_{inertia} + \prod^{(n)}_{contact} + \prod^{(n)}_{fixpo\,int} \quad (۷)$$

که در آن $\prod^{(n)}$ انرژی پتانسیل کل، $\prod^{(n)}_{elastic}$ انرژی پتانسیل ناشی از تغییر الاستیک بلوک‌ها ، $\prod^{(n)}_{initialstress}$ انرژی پتانسیل ناشی از تنش‌های اولیه، $\prod^{(n)}_{po\,int\,load}$ انرژی پتانسیل ناشی از بارگذاری نقطه‌ای، $\prod^{(n)}_{body\ force}$ انرژی پتانسیل ناشی از بار های حجمی، $\prod^{(n)}_{inertia}$ انرژی پتانسیل ناشی از نیروهای اینرسی، $\prod^{(n)}_{contact}$ انرژی پتانسیلی است مربوط به زمانی که دو بلوک با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند و $\prod^{(n)}_{fixpo\,int}$ انرژی پتانسیل ناشی از قیود جابجایی در نقاط مشخص است.

برای تنها یک بلوک، معادلات همزمانی در هر گام زمانی از طریق کمینه کردن انرژی پتانسیل کل $\prod$ نسبت به هر یک از متغیرهای جابجایی حاصل می‌شود [۱۷،۱۵]:

$$\frac{\partial \prod}{\partial v_0}=0;\ \frac{\partial \prod}{\partial u_0}=0;\ \frac{\partial \prod}{\partial \varepsilon_x}=0;\ \frac{\partial \prod}{\partial \varepsilon_y}=0;\ \frac{\partial \prod}{\partial \gamma_{xy}}=0\ \frac{\partial \prod}{\partial r_0}=0; \quad (۸)$$

این قاعده، حالتی مشابه معادلات لاگرانژی حرکت است، که از قانون همیلتون برای یک سیستم دینامیک منتج شده است [۱۷]:

$$[M].\{A\}+[\bar{K}].\{D\}=\{\bar{F}\} \quad (۹)$$

که در آن $[M]$ ماتریس جرم، $\{A\}$ بردار شتاب، $[\bar{K}]$ ماتریس سختی، $\{D\}$ بردار جابجایی و $\{\bar{F}\}$ بردار نیرو است.

در تحلیل تغییر شکل ناپیوسته، بردار شتاب $\{A\}$ را می‌توان به‌عنوان تابعی از بردار جابجایی و سرعت تخمین زد؛ و به‌عنوان یک نتیجه معادله بالا را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۱۷]:

$$[\bar{K}].\{D\}=\{\bar{F}\} \quad (۱۰)$$

برای تحلیل توده‌سنگی متشکل از m بلوک، معادلات تعادل کلی، مجموع زیر ماتریس‌های هریک از بلوک‌ها است [۱۵،۱۸،۱۹،۲۰]:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} \quad (۱۱)$$

$\{D_i\}$ و $\{F_i\}$ در معادله بالا بردارهایی با بعد ۶×۱ هستند که $\{D_i\}$ بیانگر ۶ متغیر جابجایی و $\{F_i\}$ بیانگر بارها و ممان های ناشی از نیروهای خارجی و تنش‌های مؤثر بر بلوک iام است. زیر ماتریس سختی $[K_{ii}]$ با بعد ۶×۶ مربوط به خصوصیات مواد بلوک iام و زیر ماتریس $[K_{ij}]_{i\neq j}$ با توجه به شرایط تماس بین بلوک‌ها ی iام و jام تعیین می‌شود.

۲-۴- فلوچارت روش توسعه یافته

فلوچارت نمایش داده شده در شکل ۴، مراحل محاسبات لازم برای توسعه روش گروه‌های کلیدی را نمایش می‌دهد. این فلوچارت برای شفاف‌تر بودن نحوه تلفیق دو روش و نیز جایگاه هر یک در روش توسعه یافته، در چهار بخش ورود اطلاعات، تحلیل گروه کلیدی، تحلیل تغییر شکل ناپیوسته و نتایج ارائه شده است.

هدف از تلفیق KGM و DDA، استفاده از قابلیت‌های روش DDA در تحلیل پایداری گروه کلیدی و یافتن گروه کلیدی بحرانی در یک پروسه تکراری و پیشرونده است که به تبع آن سطح ریزش بحرانی در توده سنگ تخمین زده می‌شود. بنابراین طی این فرآیند پس از شناخت گروه کلیدی، محاسبات برای بررسی اندرکنش بلوک‌های یک گروه کلیدی با یکدیگر به‌کار برده می‌شوند. در مرحله بعد با شناخت گروه کلیدی بحرانی، فاز جدید محاسبات شامل بررسی اندرکنش میان گروه کلیدی بحرانی و توده سنگ خواهد بود. الگوریتم ارائه شده در این مقاله، تلاش دارد علاوه بر مدل‌سازی مرحله اول توسعه، دقت و کیفیت تحلیل در یک گروه کلیدی را ارتقا دهد.

همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، پس از ورود اطلاعات اولیه، تلاش برای جستجوی گروه کلیدی در سیستم بلوکی آغاز می‌شود. پس از شناسایی این گروه و حصول تعادل اولیه در مدل، تحلیل پایداری گروه کلیدی با هدف یافتن گروه کلیدی بحرانی توسط روش تحلیل تغییر شکل ناپیوسته صورت می‌پذیرد. بر این مبنا، تحلیل تغییر شکل ناپیوسته گروه کلیدی نامزد را مورد تحلیل قرار می‌دهد. برای تحلیل، ابتدا زیر ماتریس‌های غیر تماسی تشکیل و سپس زیر ماتریس‌های تماسی برمبنای شرایط تماس میان بلوک‌ها ایجاد می‌شوند و با حل معادلات تعادل حاصل، نتایج اولیه حاصل می‌شود. با توجه به این نکته که در طول هرگام زمانی، تکرار برای تحقق شرایط عدم نفوذ و عدم کشش میان بلوک‌ها الزامی است، نتایج مرحله قبل وارد چرخه‌ی باز و بسته (open-close) [۲۱] شده و با تغییر زیر ماتریس‌های تماسی، شرایط بیان شده تحقق می‌یابند. در مرحله بعد جابجایی‌های حاصل از نظر معقول و منطقی بودن بررسی و درصورت نیاز، با کاهش طول گام زمانی و به تبع آن تغییر زیر ماتریس‌های اینرسی، میزان جابجایی در هر سیکل کنترل می‌شود.

نتایج تحلیل تغییر شکل ناپیوسته با میزان جابجایی مجاز از پیش تعیین شده مقایسه شده و چنانچه گروه ناپایدار تلقی شود، ضمن حذف آن و تشکیل هندسه جدید بلوکی، تلاش برای یافتن گروه کلیدی جدید از سر گرفته می‌شود. این فرآیند تا زمانی تکرار می‌شود که جستجو برای یافتن گروه کلیدی جدید حاکی از عدم وجود نامزد جدید بوده و درنتیجه گروه کلیدی بحرانی معرفی شود. لازم به ذکر است در این مرحله از تحلیل، بلوک‌های خارج از گروه کلیدی نامزد تحلیل نمی‌شوند.

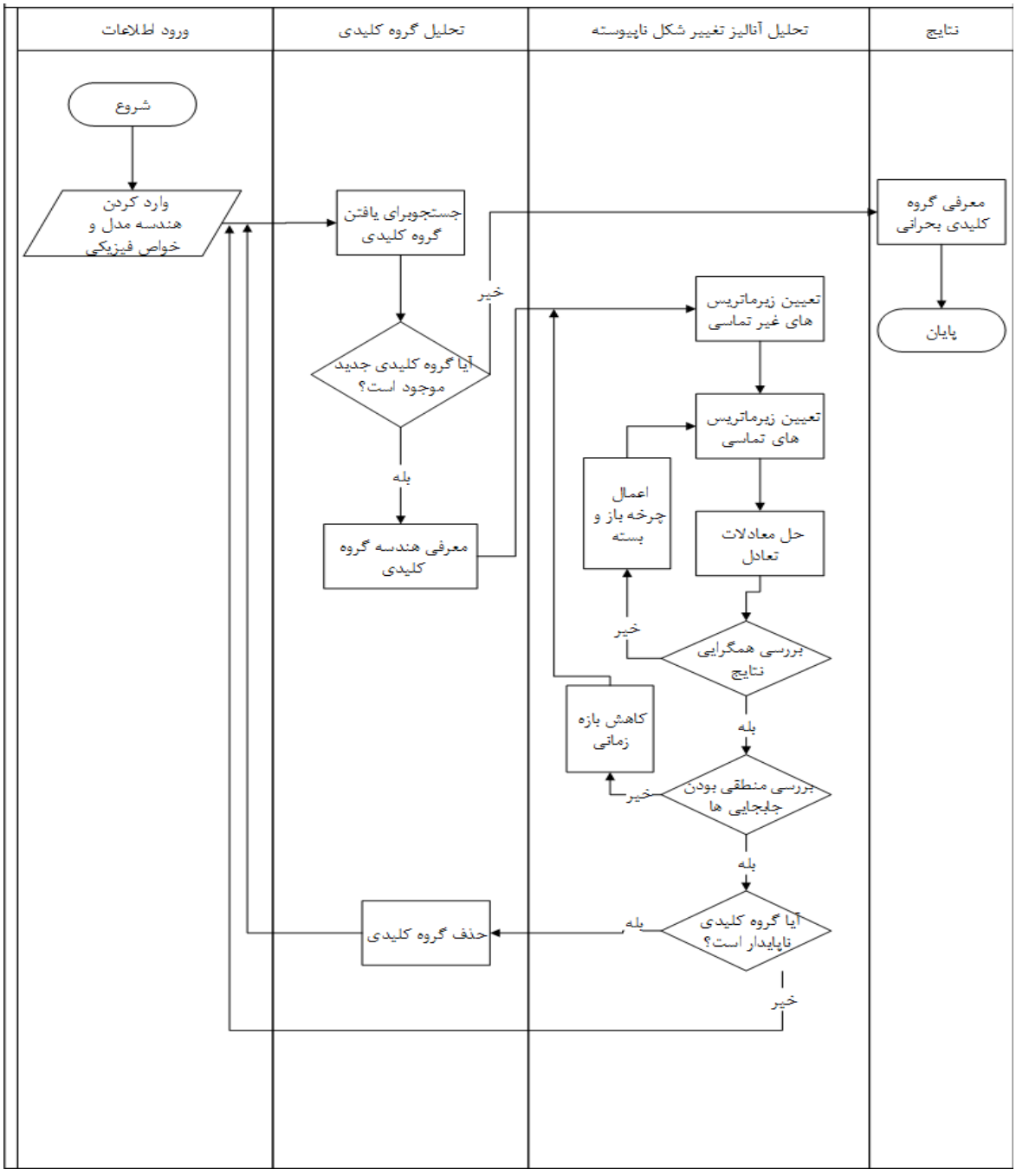
۳-۴- حل یک مثال ساده به کمک روش توسعه یافته اولیه

مدل‌سازی الگوریتم برنامه در محیط نرم‌افزاری Mathematica انجام گرفت و برنامه تهیه شده DDA-KGM نام گرفت و یک مثال ساده (شکل ۴) توسط آن حل شد. برای بررسی صحت روش، نتایج با روش عددی اجزای مجزا در محیط نرم‌افزاری UDEC [۲۲] که در حال حاضر به‌عنوان یک روش کاربردی در تحلیل دو بعدی شیب سنگ‌های درزه‌دار مرسوم است، مقایسه شد.

مدل مورد مطالعه مجموعه‌ای متشکل از سه بلوک قرار گرفته روی یک سطح شیبدار است که خواص فیزیکی و مکانیکی توده سنگ فرضی، در جدول ۳ ارائه شده است. مطالعه این مدل ساده امکان مدل‌سازی هرچه دقیق تر عوامل مؤثر بر پایداری سیستم بلوکی را فراهم آورده و بررسی گروه کلیدی فارغ از تأثیر عوامل مؤثر نامأنوس صورت می‌گیرد.

جدول ۲: خواص فیزیکی و مکانیکی به‌کار رفته در ساخت مدل

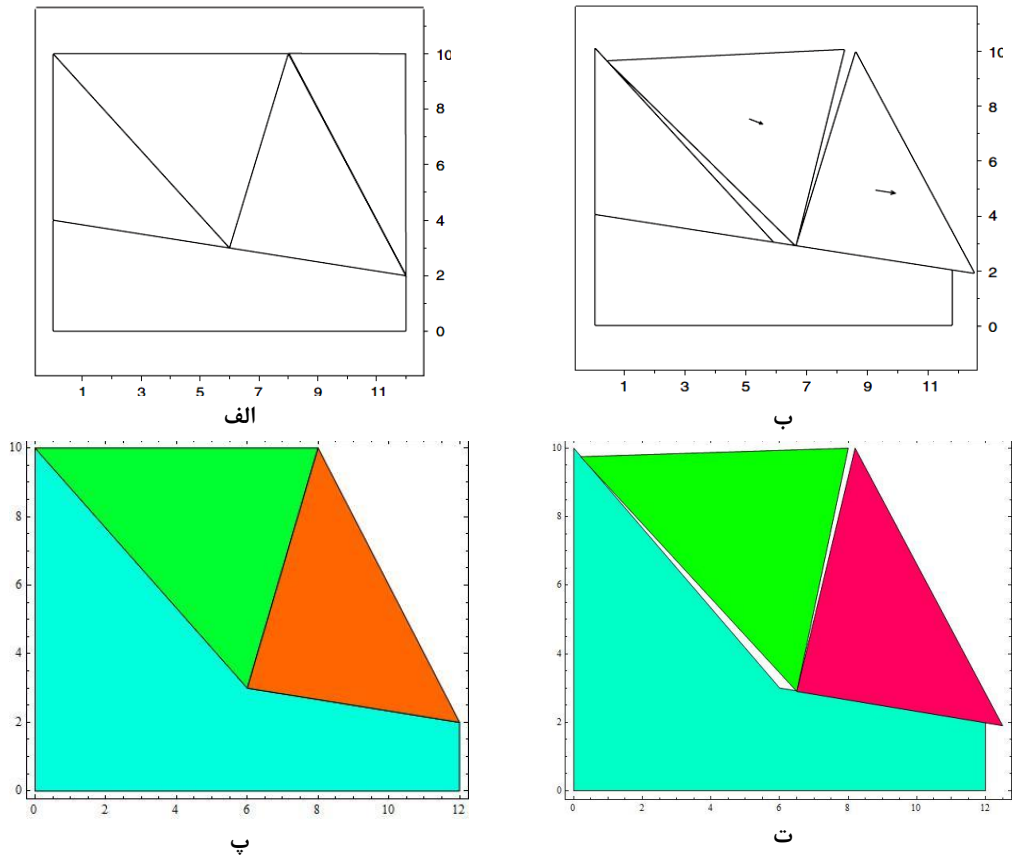
مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ و درزه‌ها	چگالی	سختی نرمال سطح درزه	سختی برشی سطح درزه	چسبندگی	مقاومت کششی	زاویه اصطکاک
واحد	Kg/ m3	GPa m-1	GPa m-1	MPa	MPa	درجه
مقدار	۲۵۰۰	۱	۱	۰/۰۲	۰	۱۱



شکل ۴: الگوریتم روش گروه‌های کلیدی توسعه یافته برمبنای روش تحلیل تغییر شکل ناپیوسته

در روش گروه کلیدی توسعه یافته اولیه، با توجه به ماهیت تعادل حدی آن، تنها رفتار گروه کلیدی در لحظه ناپایداری توده سنگ مطرح است، به عبارت دیگر در این مرحله این روش تنها امکان وجود ناپایداری در سیستم بلوکی را بررسی می‌کند و رفتار بلوک‌ها بعد از ریزش را مد نظر قرار نمی‌دهد. بدین ترتیب طبق فلوچارت شکل ۴، بلوک‌های ناپایدار طی یک فرآیند به روز رسانی از هندسه مدل حذف می‌شوند.

شکل (۵- الف) هندسه بلوک‌ها را در شرایط اولیه‌ی تحلیل نشان می‌دهد. با توجه به شکل، بلوک قرار گرفته در سطح پایینی سایر بلوک‌ها در جهات افقی و عمودی ثابت شده است. زاویه اصطکاک بحرانی محاسبه شده توسط KGM (بیشترین مقداری که منجر به شکست کامل می‌شود) برابر ۱۱ درجه است [۸]. همان‌طور که در شکل (۵- ب) مشاهده می‌شود، این مقدار منجر به شروع ناپایداری در نرم افزار UDEC نیز می‌شود.



شکل ۵: الف: هندسه اولیه، ب: مدل تحلیل شده به کمک روش اجزای مجزا (UDEC)، پ: هندسه مدل پس از شناسایی گروه کلیدی در روش DDA-KGM ، ت:مدل تحلیل شده به کمک روش DDA-KGM

شکل (۵- پ) هندسه بلوک‌ها را پس از شناسایی گروه کلیدی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در این مرحله بلوک‌ها ی خارج از گروه کلیدی با یکدیگر ترکیب شده و اندرکنش آن‌ها با یکدیگر بررسی نمی-شود. پس از معرفی هندسه گروه کلیدی، تحلیل آن با اعمال معادلات تحلیل تغییر شکل ناپیوسته صورت گرفته که نتایج آن در شکل (۵- ت) مشاهده می‌شود. پس از مشاهده ناپایداری گروه کلیدی و حذف آن، عدم وجود گروه کلیدی جدید سبب معرفی این گروه‌ها به‌عنوان گروه کلیدی بحرانی و شناسایی سطح ریزش بحرانی می شود.

مقایسه نتایج روش توسعه یافته اولیه و UDEC و نیز بررسی هندسی و مکانیکی بلوک‌ها ی ناپایدار، بیانگر شباهت جابجایی‌های انجام شده در دو روش است. با توجه به اتمام چرخه محاسبات، گروه کلیدی بررسی شده به‌عنوان گروه کلیدی بحرانی تلقی می‌شود و در ادامه حذف می‌شود. نکته مهم دیگر درمورد قابلیت روش توسعه یافته، امکان تشخیص مُد شکست در آن است.

۵- نتیجه گیری

یکی از روش‌های معرفی شده برای رفع مشکلات موجود در روش بلوک کلیدی، روش گروه‌های کلیدی است. این روش در یک تحلیل تکرار شونده و پیشرونده پایداری شیب سنگ‌های درزه‌دار را بررسی می‌کند و بحرانی ترین گروه کلیدی را تعیین‌می نماید.

برای افزایش دقت و توانایی تحلیل اندرکنش بلوک‌های موجود در گروه های کلیدی، طی فرآیند تصمیم‌گیری چندشاخصه فازی، روش عددی تحلیل تغیر شکل ناپیوسته (DDA) به‌عنوان روشی سازگار با معیارهای توسعه انتخاب شد. الگوریتم مورد نیاز برای توسعه روش گروه‌های کلیدی برمبنای روش تحلیل تغییر شکل ناپیوسته، ارائه شد و مدل‌سازی هندسی و مکانیکی الگوریتم گروه کلیدی توسعه یافته، توسط نویسندگان در محیط برنامه نویسی Mathematica و در بیش از ۲۰۰۰ سطر صورت گرفت.

مقایسه نتایج یک مثال ساده روش توسعه یافته اولیه و روش عددی المان مجزا (UDEC) و نیز بررسی بلوک‌های ناپایدار، بیان‌گر دقت در بررسی جابجایی گروه کلیدی توسط

DDA-KGM است. از سوی دیگر عدم جابجایی در سایر بلوک‌ها پس از به تعادل رسیدن سیستم بلوکی، نشان از صحت عملکرد روش توسعه یافته در ترکیب کردن این بلوک‌ها در مرحله تحلیل گروه کلیدی دارد. در روش گروه‌های کلیدی اندرکنش بین بلوک‌ها درنظر گرفته نمی‌شد، اما در روش توسعه یافته با محاسبه تغییر شکل و تغییر مکان این بلوک‌ها به کمک روش DDA ریزش و یا عدم ریزش گروه کلیدی با دقتی بالاتر پیش‌بینی می‌شود و همچنین توانایی تشخیص مُد شکست در روش گروه کلیدی نیز فراهم می‌شود.

مراجع

[1] Goodman RE, Shi G.; 1985; "*Block Theory and its Application to Rock Engineering*", Prentice-Hall: New Jersey.

[2] Warburton PM.; 1981; "*Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free faces*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 18:415–427.

[3] Giani GP.; 1992; "*Rock slope stability analysis*", Balkema: Rotterdam-Brookfield,.

[4] Mauldon M, Ureta J.; 1996; "*Stability analysis of rock wedges with multiple sliding surfaces*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 33:51–66.

[5] Mauldon M, Chou KC, Wu Y.; 1997; "*Limit Analysis of 2-D Tunnel Key blocks*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34:379–397.

[6] Fulvio-Tonon PE.; 1998; "*Generalization of Mauldon's and Goodman's Vector Analysis of Key block Rotations*", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering; 124:913–922.

[7] Sagaseta C, Sanchez JM, Canizal JA.; 2001; "*General analytical solution for the required anchor force in rock slopes with toppling failure*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38:379–397.

[8] Yarahmadi Bafghi AR, Verdel T.; 2003; "*The key-group method*", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 27:495key-g.

[9] Yarahmadi Bafghi AR, Verdel T.; 2004; "*The probabilistic key-group method*", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 28:899ic ke.

[10] Yarahmadi-Bafghi A.R., Verdel T.; 2005; "*Sarma-based key-group method for rock slope stability analysis*", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 29:1019ghi A.

[11] M. Noroozi, S. E. Jalali, and A. R. Yarahmadi-Bafghi.; 2011; "*3D key-group method for slope stability analysis*", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.

[۱۲] امامی میبدی ع.، یاراحمدی بافقی. ع.، سالاری راد ح.؛ ۱۳۸۷؛ **روش گروه های کلیدی جهت دار در تحلیل پایداری شیب سنگ های درزه‌دار**، نشریه مهندسی معدن، ۵۵:۴-۶۳.

[۱۳] عطایی، محمد؛ ۱۳۸۹؛ **"تصمیم گیری چند معیاره"**؛ انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۱۴] عطایی، محمد؛ ۱۳۸۹؛ **"تصمیم گیری چند معیاره فازی"**؛ انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

[15] Shi GH.; 1993; "*Block system modelling by discontinuous deformation analysis*", Computational Mechanics Publications.

[16] Jing L.; 1998; "*Formulation of discontinuous deformation analysis (DDA) an implicit discrete element model for block systems*", Engineering Geology 49, 371-381.

[17] Wu J.H., Ohnishi Y., Shi G. H., Nishiyama S.; 2005; "*Theory of Three-Dimensional Discontinuous Deformation Analysis and Its Application to a Slope Toppling at Amatoribashi*", Japan, International Jornal of Geomechanics, September, 1532-3641/3-179–195

[18] Shi, G. H., and Goodman, R. E.; 1988; "*Discontinuous deformation analysis: A new method for computing stress, strain and sliding of block system.*" Key Questions in Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 381–393.

[19] Lin CT, Amadei B, Jung J, Dwyer J.; 1996; "*Extension of discontinuous deformation analysis for jointed rock masses*", Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 33:671–33:

[20] Tsesarsky M, Hatzor YH, Sitar N.; 2005; "*Dynamic displacement of a block on an inclined plane: analytical, experimental and DDA results*", Rock Mech Rock Eng;38:153–38:

[21] Doolin DM, Sitar N.; 2002; "*Displacement accuracy of discontinuous deformation analysis method applied to sliding block*", J Eng Mech, 128:1158–128

[22] Itasca Consulting Group; 1993; Inc. "*UDEC (Universal distinct element code)*", Version 4.0, USA.