

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

میر حسین شهامی<sup>۱</sup>؛ علیرضا یاراحمدی بافقی<sup>۲\*</sup>؛ روزبه گرایلی میکلا<sup>۳</sup>

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

(دریافت ۱۴ خرداد ۱۳۹۴، پذیرش ۲۲ شهریور ۱۳۹۴)

### چکیده

ناهمسانی و وجود ناپیوستگی‌ها، در مقاومت و رفتار توده سنگ نقش اساسی دارد. امروزه مهندسی با محدوده وسیعی از روش‌ها، به‌منظور تحلیل پایداری شیب‌های سنگی مواجه هستند. به‌دلیل سادگی و سرعت اجرا، روش‌های به‌کار رفته در تحلیل‌های استاتیکی همچنان جایگاه ویژه‌ای در بررسی پایداری شیب‌های سنگی درزه‌دار دارند. یکی از معروف‌ترین روش‌های استاتیکی موجود در تحلیل پایداری توده سنگ‌های درزه‌دار، تئوری بلوکی و روش بلوک‌های کلیدی است که تنها بر مبنای 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 تشکیل 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 رایج‌های مربوط به روش‌های عددی مرتفع شود. این هدف در دو بخش تحقق می‌یابد: الف) تحلیل اندرکنش بلوک‌های 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 عملاً نوعی تلفیق با روش تحلیل تغییر شکل ناپیوسته است، بیان‌گر قابلیت توسعه روش گروه‌های کلیدی در شناسایی و تحلیل پایداری گروه‌های کلیدی بحرانی در شیب‌های سنگی درزه دار است.

### کلمات کلیدی

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

## 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 شیروانی‌های موجود در سنگ‌های ناپیوسته، روش‌های متنوع استاتیکی (تعادل حدی)، شبه-استاتیکی و دینامیکی استفاده می‌شوند که در این میان روش‌های استاتیکی به دلیل 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 حفريات مختلف می‌پردازد. 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 - اورتا [۴]، مولدن و همکاران [۵]، فالویو - تونتون [۶] و سگاستا [۷]، برای توسعه ی روش بلوک‌های کلیدی انجام شده است.

این روش‌ها تنها به مطالعه رفتار بلوک کلیدی پرداخته‌اند. نکته قابل تأمل در این روش‌ها، این است که با فرض مهار بلوک کلیدی، ترکیب بلوک‌های 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؛ درحالی‌که می‌توان گروهی از بلوک‌ها را فرض کرد که در صورت 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 به‌کار بسته شده‌اند.

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، تنش‌های برجا و القایی، اثرات ناشی از جریان سیال و غیره نیز در نظر 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 تنش‌های برجا، نیروهای اینرسی و غیره 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.

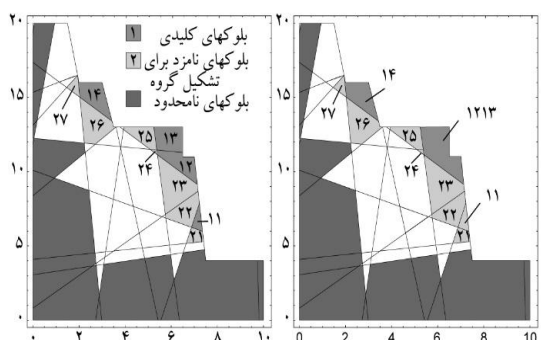
## ۲- گروه‌های کلیدی

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 مکانیزم‌های خاصی انجام می‌شود. در این حالت احتمال زیادی وجود

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 می‌آورد که کمترین فاکتور ایمنی را دارد (شکل ۲- پ). در این مرحله سه موقعیت گروه‌بندی با گروه ۱۱۲۲ وجود دارد (۱۱۲۲+۲۳، ۱۱۲۲+۲۸، ۱۱۲۲+۲۱) که تنها گروه ۱۱۲۲+۲۳، گروه کلیدی است. در این مرحله سه گروه کلیدی دیگر نیز قابل تشکیل است؛ (۱۵+۱۶، ۱۶+۳۰، ۱۴+۲۷). مطالعه بر روی کلیه گروه‌ها منجر به شناسایی گروه حاصل از بلوک‌های ۱۱۲۲ و ۲۳ به‌عنوان ناپایدارترین گروه می‌شود (شکل ۲) [۸].

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 در نظر گرفت:

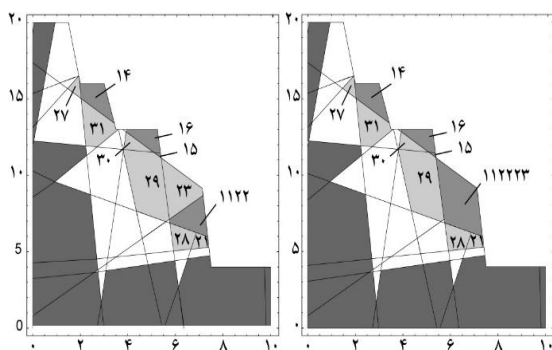


الف- هندسه اولیه شیب سنگ

KB: ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴: پایدار

ب- گروه‌بندی بلوک‌های ۱۲+۱۳

KB: ۱۱، ۱۴: پایدار  
KG: ۱۲، ۱۳: ناپایدار



پ- گروه‌بندی بلوک‌های ۱۱+۲۲

KB: ۱۴، ۱۵، ۱۶: پایدار

KG: ۱۱، ۲۲: پایدار

ت- گروه‌بندی بلوک‌های ۱۱۲۲+۲۳

KB: ۱۴، ۱۵، ۱۶: پایدار

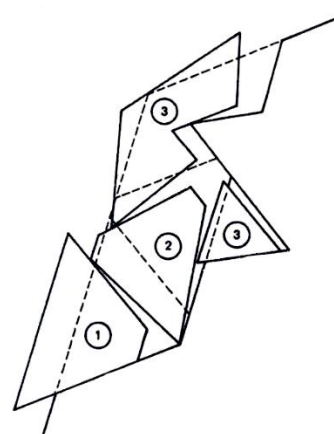
KG: ۱۱، ۲۲، ۲۳: ناپایدار

شکل ۲: الف: هندسه اولیه شیب، ب: گروه‌بندی

بلوک‌های ۱۲ و ۱۳، پ: گروه‌بندی بلوک‌های ۱۱ و ۲۲، ت: گروه‌بندی

بلوک‌های ۱۱۲۲ و ۲۳ [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.



شکل ۱: 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 بر روی 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 بلوک‌ها ناپایدار نبوده و تحلیل در این مرحله پایان می‌یابد. اما در صورت استفاده از روش KGM پنج نامزد گروه کلیدی (۱۱+۲۲)

اصل بیشینه - کمینه بالمن و زاده، گزینه برتر تعیین می‌شود. مراحل روش یاگر عبارتند از [۱۴]:

#### الف- تشکیل ماتریس تصمیم فازی

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

$$\begin{bmatrix} \mu_{c1}(A_1) & \dots & \mu_{cn}(A_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{c1}(A_m) & \dots & \mu_{cn}(A_m) \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن  $\mu_{c1}(A_1)$  درجه عضویت گزینه  $A_1$  در  $C_1$  (i=1,2,3,...,m) در رابطه با شاخص  $C_j$  (j=1,2,3,...,n) است. مقدار  $\mu_{c1}(A_1)$  بین ۰ و ۱ قرار دارد و نشان می‌دهد گزینه  $A_1$  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 به کار 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. به عبارت دیگر درایه‌های ماتریس به صورت  $(\mu_{c1}(A_1))^{W_j}$  خواهند بود.

ت- تعیین کوچک‌ترین مقدار هر سطر ماتریس تصمیم وزن دار

بدین منظور به ازای هر سطر ماتریس تصمیم وزن دار که مربوط به هر گزینه است، کوچک‌ترین مقدار تعیین می‌شود. بنابراین یک بردار ستونی  $m \times 1$  به دست خواهد آمد. به عبارت دیگر:

$$\mu_D(A_i) = \min \{ (\mu_{c1}(A_i))^{W_1}, (\mu_{c2}(A_i))^{W_2}, \dots, (\mu_{cn}(A_i))^{W_n} \} \quad I = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

#### ج- تعیین گزینه برتر

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

$$\mu_D(A_i^*) = \max \{ \mu_D(A_i) \} \quad (3)$$

#### 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 شاخصه‌های سنجش،

تحلیل پایداری توده سنگ درزه‌دار، منجر به بررسی گروه‌هایی 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.

#### ۳-۲- 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 با توجه به طبیعت فازی معیارها، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه فازی، به انتخاب مناسب‌ترین گزینه می‌انجامد؛ چون مدل کردن عدم قطعیت در مسائل تصمیم‌گیری به وسیله تئوری مجموعه‌های فازی انجام می‌شود [۱۳].

#### ۳-۱- تصمیم‌گیری 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 از مفاهیم 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 درایه‌های ماتریس تصمیم بیان‌گر درجه عضویت هرگزینه از نظر هر معیار است. در این روش وزن معیارها بر اساس روش ساعتی (مقایسه‌های زوجی) به دست می‌آید. سپس برای هر گزینه از نظر هر شاخص درجه عضویت‌ها به توان وزن شاخص‌ها رسانده می‌شود. در نهایت بر اساس

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، به طوری که تنش‌ها و کشش‌ها در داخل یک بلوک در مدل ثابت است. با اتخاذ تقریب جابجایی مرتبه اول، روش DDA فرض می‌کند که تنش‌ها و کرنش‌ها در سطح یک بلوک ثابت است.

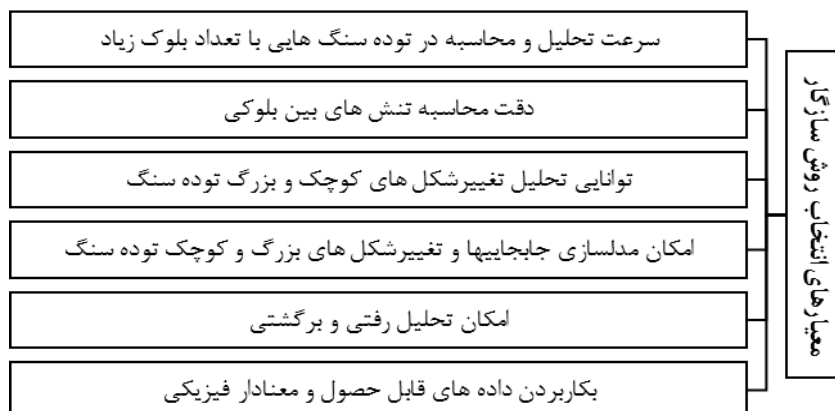
بر مبنای بهترین تطابق با اهداف گسترش روش گروه‌های کلیدی (KGM) به شرح شکل ۳ انتخاب شده‌اند.

برای تبدیل شاخص‌های کیفی به شاخص‌های کمی، از روش مقیاس دوقطبی با جنبه مثبت استفاده می‌شود. ارزش‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ ارزش‌های واسطه 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 داده‌ها

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

پس از فازی کردن داده‌ها جدول ۱، فرآیند یاگر در تصمیم‌گیری چند معیاره، آن‌چنان که بیان شد، به کار 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 سنجدیده شد و در نهایت روش عددی تحلیل تغییر شکل ناپیوسته (DDA) به‌عنوان مناسب‌ترین روش معرفی شد.



شکل ۳: معیارهای انتخاب سازگارترین روش

جدول ۲: ماتریس تصمیم کمی شده

روش تحلیل	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
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

دو بلوک با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند و  $\Pi_{fixpoint}^{(n)}$  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  $\Pi$  نسبت به هر یک از متغیرهای جابجایی حاصل می‌شود [۱۷، ۱۵]:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial v_0} = 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial u_0} = 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \varepsilon_x} = 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \varepsilon_y} = 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \gamma_{xy}} = 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial r_0} = 0;$$

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

$$[M] \cdot \{A\} + [\bar{K}] \cdot \{D\} = \{\bar{F}\} \quad (9)$$

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]:

$$[\bar{K}] \cdot \{D\} = \{\bar{F}\} \quad (10)$$

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

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

$\{D_i\}$  و  $\{F_i\}$  در معادله بالا بردارهایی با بعد  $6 \times 1$  هستند که  $\{D_i\}$  بیانگر ۶ متغیر جابجایی و  $\{F_i\}$  بیانگر بارها و ممان‌های ناشی از نیروهای خارجی و تنش‌های مؤثر بر بلوک نام است. زیر ماتریس سختی  $[K_{ij}]$  با بعد  $6 \times 6$  مربوط به خصوصیات مواد بلوک نام و زیر ماتریس  $[K_{ij}]_{i \neq j}$  با توجه به شرایط تماس بین بلوک‌ها ی نام و زام تعیین می‌شود.

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

$$D_i = (d_{1i} \ d_{2i} \ d_{3i} \ d_{4i} \ d_{5i} \ d_{6i})^T \quad (4)$$

$$= (u_0 \ v_0 \ r_0 \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy})^T$$

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  $\varepsilon_x$  و  $\varepsilon_y$  و  $\gamma_{xy}$  کرنش‌های برشی و نرمال در بلوک است. همان‌طور که شی نشان داد [۱۵]، تقریب کامل جابجایی مرتبه اول به‌صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = T_i D_i \quad (5)$$

که در آن

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & (y-y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & (x-x_0)/2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

این معادله محاسبه جابجایی‌ها را در هر نقطه در داخل بلوک (به‌طور خاص، در گوشه‌ها)، 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.

#### ۴-۱- 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  $n$ ام را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۱۷]:

$$\Pi^{(n)} = \Pi_{elastic}^{(n)} + \Pi_{initialstress}^{(n)} + \Pi_{pointload}^{(n)} \quad (7)$$

$$+ \Pi_{bodyforce}^{(n)} + \Pi_{inertia}^{(n)} + \Pi_{contact}^{(n)} + \Pi_{fixpoint}^{(n)}$$

که در آن  $\Pi^{(n)}$  انرژی پتانسیل کل،  $\Pi_{elastic}^{(n)}$  انرژی پتانسیل ناشی از تغییر الاستیک بلوک‌ها،  $\Pi_{initialstress}^{(n)}$  انرژی پتانسیل ناشی از تنش‌های اولیه،  $\Pi_{pointload}^{(n)}$  انرژی پتانسیل ناشی از بارگذاری نقطه‌ای،  $\Pi_{bodyforce}^{(n)}$  انرژی پتانسیل ناشی از بارهای حجمی،  $\Pi_{inertia}^{(n)}$  انرژی پتانسیل ناشی از نیروهای اینرسی،  $\Pi_{contact}^{(n)}$  انرژی پتانسیلی است مربوط به زمانی که

## ۲-۴- فلوجارت روش توسعه یافته

فلوجارت نمایش داده شده در شکل ۴، مراحل محاسبات لازم برای توسعه روش گروه‌های کلیدی را نمایش می‌دهد. این فلوجارت 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 به کار 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 مبنای، 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 بر مبنای شرایط تماس میان بلوک‌ها ایجاد می‌شوند و با حل معادلات تعادل حاصل، نتایج اولیه حاصل می‌شود. با توجه به این نکته که در طول هر گام 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 در صورت 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 در نتیجه گروه کلیدی بحرانی معرفی شود. لازم به ذکر است در این مرحله از تحلیل، بلوک‌های خارج از گروه کلیدی نامزد تحلیل نمی‌شوند.

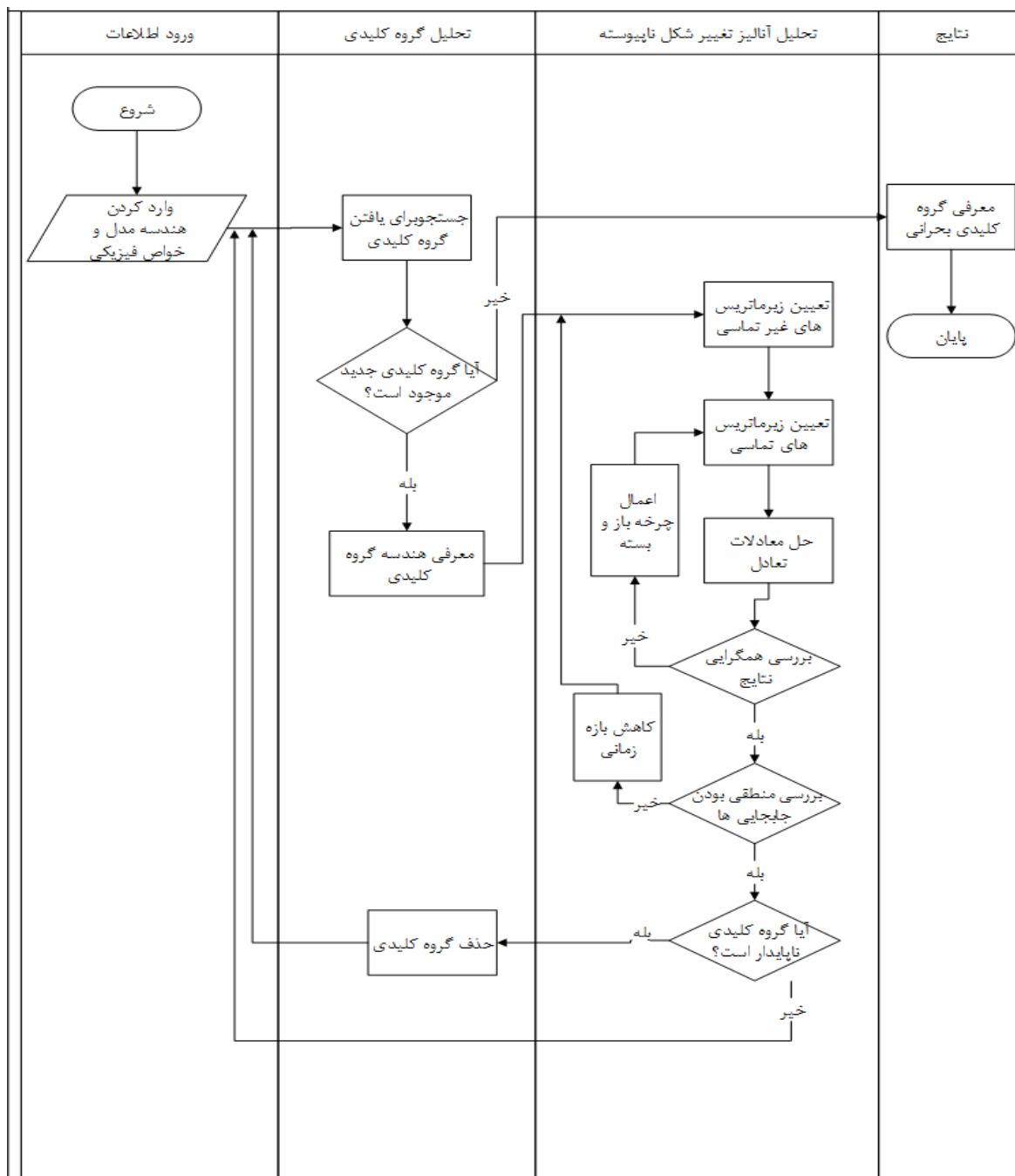
## ۴-۳- حل یک مثال ساده به کمک روش توسعه یافته اولیه

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 دقیق‌تر 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 به کار 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

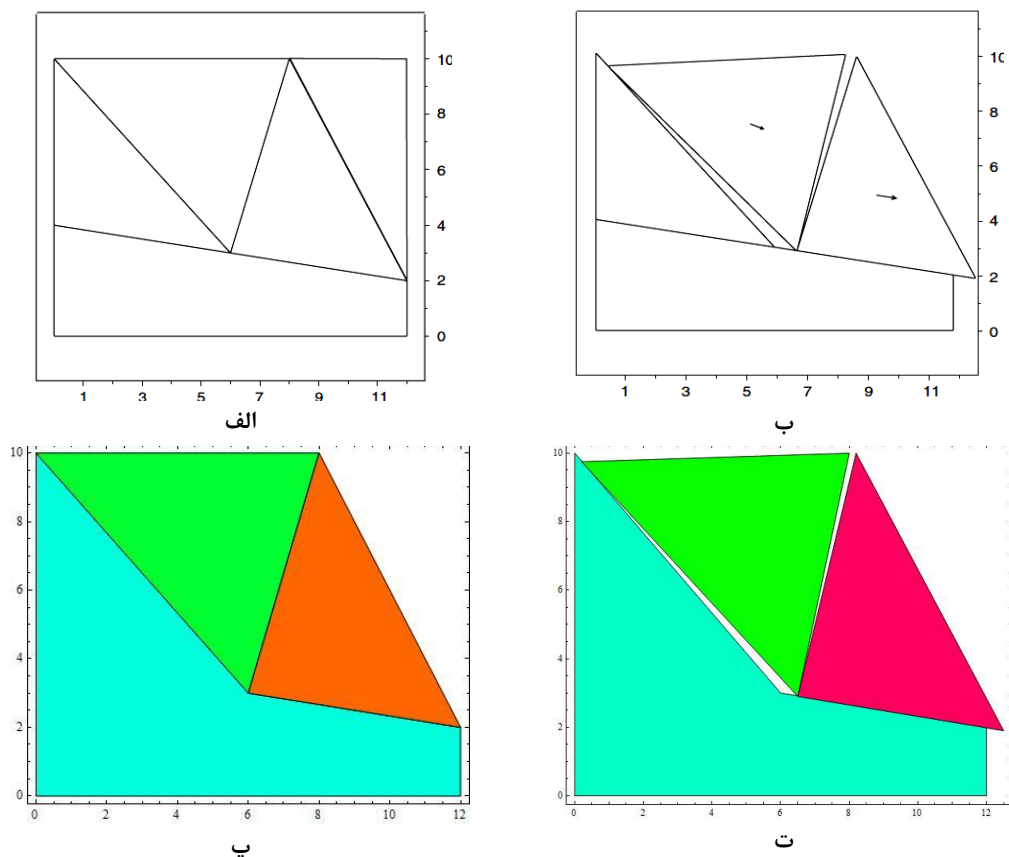


شکل ۴: الگوریتم روش گروه‌های کلیدی توسعه یافته بر مبنای روش تحلیل تغییر شکل ناپیوسته

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.

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 فلوجارت شکل ۴، بلوک‌های ناپایدار طی یک فرآیند به روز رسانی از هندسه مدل حذف می‌شوند.





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

#### 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 بحرانی‌ترین گروه کلیدی را تعیین می‌نماید.

برای افزایش دقت و توانایی تحلیل اندرکنش بلوک‌های موجود در گروه‌های کلیدی، طی فرآیند تصمیم‌گیری چندشاخصه فازی، روش عددی تحلیل تغییر شکل ناپیوسته (DDA) به‌عنوان روشی سازگار با معیارهای توسعه انتخاب شد. الگوریتم مورد نیاز برای توسعه روش گروه‌های کلیدی بر مبنای 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

شکل (۵-پ) هندسه بلوک‌ها را پس از شناسایی گروه کلیدی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در این مرحله بلوک‌های خارج از گروه کلیدی با یکدیگر ترکیب شده و اندرکنش آن‌ها با یکدیگر بررسی نمی‌شود. 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 می‌شود.

مقایسه نتایج روش توسعه یافته اولیه و UDEC و نیز بررسی هندسی و مکانیکی بلوک‌های 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 در مورد قابلیت روش توسعه یافته، امکان تشخیص مد شکست در آن است.

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 باقی.ع.، سالاری راد ح.؛ ۱۳۸۷؛ روش گروه های کلیدی جهت دار در تحلیل پایداری شیب سنگ های درزه دار، نشریه مهندسی معدن، ۴:۵۵-۶۳.

[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 Journal 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.

DDA-KGM است. از سوی دیگر عدم جابجایی در سایر بلوک ها پس از به تعادل رسیدن سیستم بلوکی، نشان از صحت عملکرد روش توسعه یافته در ترکیب کردن این بلوک ها در مرحله تحلیل گروه کلیدی دارد. در روش گروه های کلیدی اندرکنش بین بلوک ها در نظر گرفته نمی شود، اما در روش توسعه یافته با محاسبه تغییر شکل و تغییر مکان این بلوک ها به کمک روش DDA ریزش و یا عدم ریزش گروه کلیدی با دقتی بالاتر پیش بینی می شود و همچنین توانایی تشخیص مُد شکست در روش گروه کلیدی نیز فراهم می شود.

## 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] Sagasetta 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