

## «یادداشت فنی»

# روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار در تحلیل پایداری شیب سنگ‌های درزه‌دار

عنایت الله امامی میبیدی<sup>۱\*</sup>، علیرضا یاراحمدی بافقی<sup>۲</sup>، حسین سالاری راد<sup>۳</sup>

۱. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، enayatemam@yahoo.com
۲. دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، ayarahmadi@yazduni.ac.ir
۳. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، salarih@aut.ac.ir

(دریافت ۲۰ شهریور ۱۳۸۶، پذیرش ۴ خرداد ۱۳۸۷)

### چکیده

امروزه هنوز روش‌های استاتیکی یا تعادل حدی به علت سادگی و سرعت بالای آنها در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از شناخته شده‌ترین آنها جهت تحلیل توده سنگ‌های درزه‌دار روش بلوک‌های کلیدی گودمن-شی است. در سال‌های اخیر روش گروه‌های کلیدی که توسعه یافته روش بلوک‌های کلیدی است، ارائه شده است. در این روش علاوه بر توجه به بلوک‌های کلیدی، گروه‌هایی از بلوک‌ها که قابلیت لغزش دارند مورد تحلیل قرار می‌گیرند. از جمله مشکلات این روش چگونگی گروه‌بندی و تعیین گروه کلیدی بحرانی (دارای سطح بحرانی ریزش) است. روشی که در اینجا برای یافتن گروه‌های کلیدی بحرانی پیشنهاد شده است، روش گروه کلیدی جهت‌دار نامیده می‌شود، در این روش گروه‌بندی در راستای سطوح قابل لغزش گروه‌ها پیش می‌رود. در این مقاله مدل هندسی و مکانیکی الگوریتم پیشنهادی، در محیط نرم افزاری Mathematica تهیه و اجرا شده است. در نهایت جهت کنترل مدل تهیه شده، نتایج حاصل از این روش پیشنهادی با نتایج روش گروه‌های کلیدی پایه و روش عددی اجزای مجزا به وسیله نرم افزار UDEC مقایسه شده است. نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی تطابق خوبی با نتایج حاصل از روش اجزای مجزا را نشان می‌دهد.

### کلمات کلیدی

تحلیل پایداری، شیب سنگ، روش بلوک‌های کلیدی، روش گروه‌های کلیدی، روش گروه کلیدی جهت‌دار

\* عهده‌دار مکاتبات

## ۱- مقدمه

معروف‌ترین روش استاتیکی استفاده شده در سی سال گذشته در تحلیل توده سنگ‌های درزه‌دار روش تحلیل بلوک‌های کلیدی<sup>۱</sup> یا تئوری بلوکی می‌باشد [۱]. این روش براساس تحلیل تعادل حدی بلوک‌هایی بنا شده است، که اگر نگهداری نشوند، می‌توانند ناپایدار شده و باعث ناپایداری دیگر بلوک‌ها به صورت پیش رونده شوند. این دسته از بلوک‌ها، بلوک‌های کلیدی نامیده می‌شوند که توسط چهار شرط زیر تعریف می‌گردند [۱]:

۱- فعال هستند (دارای تماس با سطح آزاد یا سطح استخراجی هستند).

۲- تعریف شده‌اند یا محدود هستند (توسط ناپیوستگی‌ها و سطح آزاد محدود شده و از توده جدا شده‌اند)

۳- از نظر هندسی قابل جابجایی‌اند.

۴- کلید حرکت دیگر بلوک‌ها هستند.

اغلب تحلیل‌ها به روش بلوک‌های کلیدی، بر اساس روش برداری واربرتون [۲] و یا روش گرافیکی گودمن - شی [۱] بنا شده است.

دو مشکل اساسی در استفاده از روش بلوک‌های کلیدی وجود دارد:

- نخست اینکه این روش تنها بلوک‌های کلیدی را در نظر می‌گیرد. اگر هیچ یک از بلوک‌ها ناپایدار نباشد این روش نتیجه می‌گیرد که مجموعه توده سنگ مورد مطالعه پایدار است.

- تئوری اولیه بلوک‌های کلیدی، بلوک‌ها را به صورت مجموعه‌های صلب تنها متأثر از وزن خالص آنها و یا دیگر نیروهای استاتیکی موثر بر آنها می‌داند و وجود تنش‌های برجا و نیروهای بین بلوکی را به حساب نمی‌آورد [۳].

روش‌های عددی استفاده شده برای تحلیل پایداری محیط‌های ناپیوسته تا حدی مشکلات فوق را مرتفع نموده است. این روش‌ها معمولاً برای استفاده پیچیده‌ترند و زمان زیادی را نسبت به روش‌های استاتیکی برای محاسبه به خود اختصاص می‌دهند.

اخیراً روشی جهت توسعه و تعمیم روش بلوک‌های کلیدی پیشنهاد شده است. این روش 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، این روش بر اساس یک تحلیل پایداری پیش‌رونده اجرا می‌شود که به روش گروه‌های کلیدی<sup>۲</sup> موسوم است [۴].

یکی از مسائل مهم و اساسی در روش‌های تحلیل استاتیکی (تعادل حدی) از جمله گروه‌های کلیدی تعیین سطح بحرانی

ریزش (گروه کلیدی بحرانی) است. این مسئله مستلزم تعیین تمامی گروه‌ها و بررسی قابلیت جابجایی هندسی و مکانیکی آنها است. در عمل شناسایی و بررسی تمام گروه‌های حاصل از بلوک‌های موجود در شیب سنگ کاری مشکل و بعضاً غیر ممکن است.

از جمله مسائل در حال توسعه در این روش، انتخاب شیوه مناسب برای یافتن گروه کلیدی بحرانی (دارای سطح بحرانی ریزش) است. روشی که در این مقاله برای یافتن سطوح بحرانی به آن اشاره شده، روشی تحت عنوان روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار<sup>۳</sup> است که به عنوان یک کار تحقیقی در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد [۱] برای تکمیل روش گروه‌های کلیدی و حل مشکل یافتن سطوح بحرانی ارائه شده است.

روش تحلیل گروه‌های کلیدی پیشنهادی جزء روش‌های قطعی (غیر احتمالاتی) محسوب می‌شود. در روش‌های قطعی ضریب ایمنی (SF) بصورت نسبت نیروهای مقاوم به نیروهای محرک روی سطوحی که دارای پتانسیل حرکت هستند، تعیین می‌شود. اگر این فاکتور برای سازه مورد تحلیل بزرگ‌تر از ضریب ایمنی استاندارد (کمترین ضریب ایمنی تعریف شده برای پایداری) باشد، سازه ایمن در نظر گرفته می‌شود.

## ۲- تحلیل پایداری بلوک‌های کلیدی

بطور معمول برای تحلیل پایداری بلوک‌های کلیدی به روش قطعی (غیر احتمالاتی) یک مدل هندسی قطعی بلوک‌ها و یک مدل مکانیکی، شامل میانگین خواص فیزیکی و مکانیکی توده، روابط رفتاری و معیار شکست حاکم نیاز است. به‌طوریکه قابلیت حرکت و یا امکان شکست به‌وسیله مقایسه ضریب

ایمنی محاسباتی ( $F = \frac{R}{S}$ ) طوریکه R برآیند نیروهای مقاوم و S برآیند نیروهای مخرب یا محرک است) با ضریب ایمنی استاندارد (SF) تعریف شده برای پایداری تعیین می‌شود. به عبارت دیگر هرگاه ضریب ایمنی محاسبه شده از مقدار استاندارد کمتر باشد، سیستم ناپایدار در نظر گرفته می‌شود.

در روش بلوک‌های کلیدی (KBM) ابتدا سعی بر تعیین قابلیت هندسی حرکت (سیسنماتیک) بلوک‌های فعال است. سپس نیروهای موثر بر این بلوک‌ها تعیین شده و پس از آن اثرات این نیروها بر روی پتانسیل حرکت تحلیل می‌گردد. اگر برآیند نیروهای محرک و مقاوم برای ایجاد یک حرکت کافی باشد، فرض می‌شود که این حرکت به صورت نامحدود ادامه خواهد یافت و یا به عبارت دیگر این نیروها با حرکت تغییر نخواهد

عوض روش تحلیل برداری واربرتن قابلیت‌ها و مزایای نظیر امکان و سهولت برنامه‌نویسی کامپیوتری را داراست که این ویژگی باعث انتخاب این روش به عنوان مبنای محاسبات در تحقیق حاضر شده است.

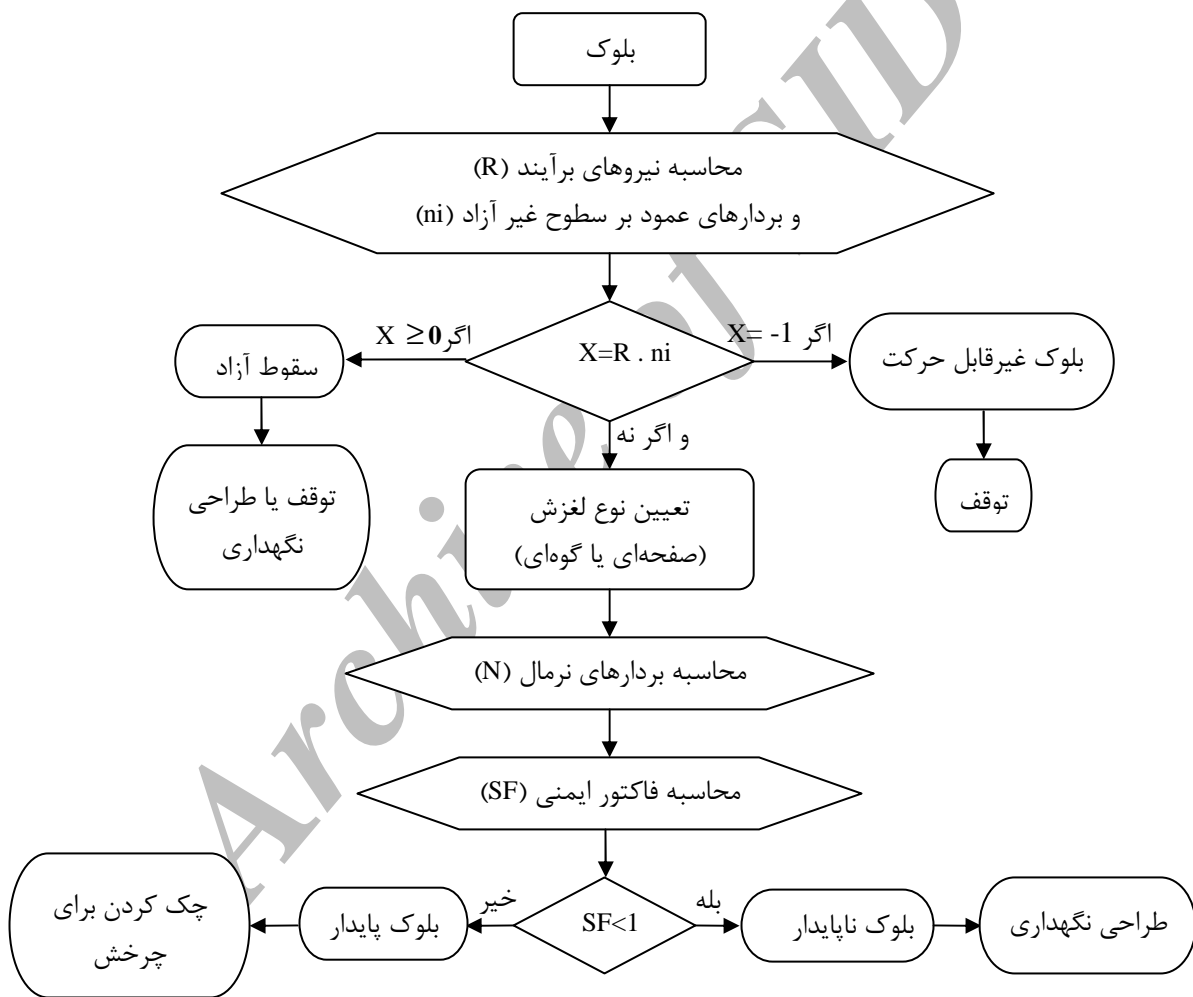
مراحل محاسبات لازم برای تعیین وضعیت پایداری و یا ناپایداری یک بلوک در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین شرایط برداری مربوط به انواع مختلف مدل‌های ریزش در شکل ۲ ارائه شده است.

کرد (علیرغم واقعیت موجود در بحث دینامیک). بدین ترتیب نتیجه‌گیری می‌شود که بلوک بطور کامل ناپایدار است. همانطور که در مقدمه اشاره شد دو روش اصلی برای تحلیل بلوک‌های کلیدی وجود دارد:

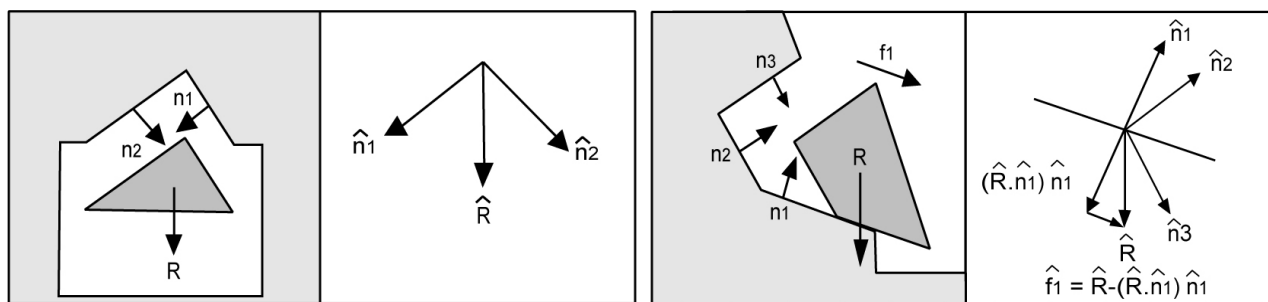
۱- روش برداری واربرتن [۲]

۲- روش گرافیکی گودمن - شی [۱].

بدون شک روش گرافیکی گودمن - شی یک روش قانونمند مفید و معقول در تحلیل پایداری بلوک‌های کلیدی است. اما به هر حال استفا ده از آن به سرعت پیچیده و دشوار می‌شود. در

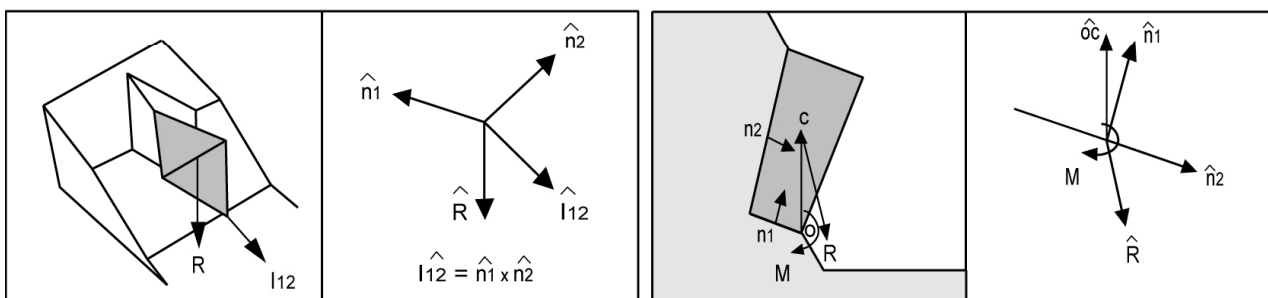


شکل ۱: مراحل تحلیل برداری یک بلوک کلیدی [۲]



الف - شرایط سقوط آزاد:  
( $n_i.R > 0$ )

ب - شرایط شکست صفحه ای:  
( $n_i.R < 0$ ) ( $n_1.R \neq -1$ ) ( $n_i.f_1 \geq 0$ )



ب - شرایط شکست گوه ای:

( $n_i.R < 0$ ) ( $n_i.R \neq -1$ ) ( $n_1.f_2 \geq 0$ ) ( $n_2.f_1 \geq 0$ ) ( $R.I_{12} \neq 1$ )

ت - شرایط ریزش واژگونی:

( $M = oc \times R < 0$ ) ( $n_1.n_2 \geq 0$ )

$n$  = بردارهای عمود بر سطح  
 $R$  = بردار برآیند نیروها  
 $f$  = بردار جهت لغزش  
 $I$  = بردار جهت تقاطع  
 $M$  = گشتاور چرخشی  
 $c$  = مرکز جرم

شکل ۲: شرایط برداری مدل‌های مختلف ریزش یا شکست [۴]

در این معادله متغیرهای مکانیکی ظاهر نمی‌شوند بدین ترتیب ریزش واژگونی، بدون در نظر گرفتن مقاومت کششی درزه‌ها تنها به پارامترهای هندسی وابسته است.

در روش گروه‌های کلیدی (KGM) و گروه‌های کلیدی جهت دار (DKGM) که در زیر مورد بحث قرار خواهد گرفت از روش برداری واربروتون [۷] برای تحلیل حرکت لغزشی و از روش لین و فیهورست (رابطه ۲) [۶] برای تحلیل حرکت چرخشی بلوک استفاده شده است.

### ۳- روش گروه‌های کلیدی

همانگونه که قبلاً اشاره شد در تحلیل پایداری توده سنگ‌های درزه‌دار اگر به‌جای بررسی بلوک‌های منفرد کلیدی، ترکیبی از بلوک‌ها مورد توجه قرار گیرند می‌توانند گروه‌های کلیدی را به وجود آورند که به صورت بالقوه خطرناک‌تر از یک بلوک کلیدی تنها باشند [۴]. اما نکته اساسی در این بحث نحوه ترکیب بلوک‌ها است.

با استفاده از معیار شکست موهر-کلمب ضریب ایمنی یک لغزش صفحه‌ای ساده (بلوک خشک بدون توجه به نیروهای لرزه‌ای و مقاومت کششی) عبارتست از:

$$F = \frac{CA + R_n \tan \phi}{R_t} \quad (1)$$

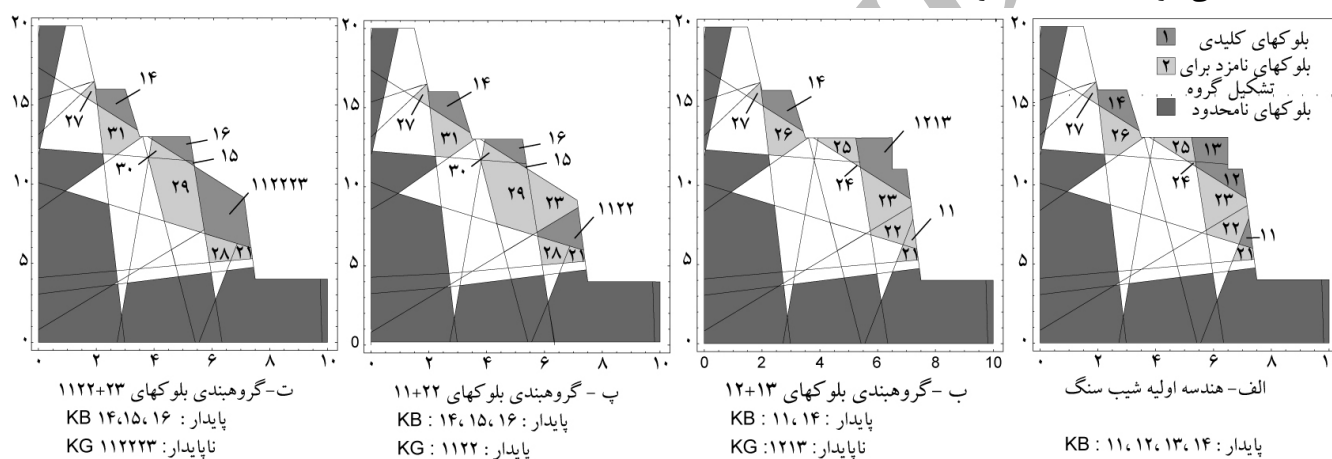
که  $C$  چسبندگی درزه‌ها،  $A$  مساحت سطح لغزش،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی درزه،  $R_n$  و  $R_t$  مولفه‌های مماسی و نرمال نیروهای برآیند اعمال شده بر سطح لغزش ( $R$ ) هستند. همچنین معادله ضریب ایمنی حرکت چرخشی بلوک عبارتست از [۶]:

$$F = \frac{M_n}{M_t} = \frac{R_n \times d_n}{R_t \times d_t} = \frac{d_n \times R \cos \alpha}{d_t \times R \sin \alpha} = \frac{d_n/d_t}{\tan \alpha} \quad (2)$$

که در آن  $M_n$  گشتاور نرمال (مقاوم)،  $M_t$  گشتاور مماسی (مهاجم)،  $\alpha$  زاویه سطح پایه بلوک با افق (سطح یا مجموعه سطوحی که وزن بلوک روی آن قرار می‌گیرد) و  $d_t$ ،  $d_n$  به ترتیب فاصله عمودی بین گرانیگاه بلوک و مؤلفه‌های عمودی  $R_n$  و مماسی  $R_t$  بردار برآیند ( $R$ ) می‌باشند.

- تشکیل گروه‌های ممکن متشکل از بلوک‌های کلیدی و همسایه‌های آنها.
  - تحلیل پایداری گروه‌ها و حذف گروه‌های ناپایدار ( $SF < 1$ ) یا گروهی با کمترین پایداری ( $SF_{min}$ ) در بین گروه‌های تشکیل شده.
  - تکرار مجدد تحلیل بر اساس هندسه و توپوگرافی جدید بلوک‌ها.
- برای مثال در شکل ۳ بطور شماتیک چهار مرحله از تکنیک گروه‌بندی انجام شده بر روی یک شیب سنگ درزه‌دار فرضی نشان داده شده است.

- یاراحمدی - وردل شرایط ترکیب و تشکیل یک گروه کلیدی را به شرح ذیل تعیین می‌نمایند [۴]:
- ۱- یک گروه کلیدی حداقل شامل یک بلوک کلیدی اولیه است.
  - ۲- بلوک‌های بعدی گروه دارای شرایطی هستند که با حذف بلوک یا بلوک‌های کلیدی اولیه، خود به یک بلوک کلیدی تبدیل شوند.
- فرآیند گروه بندی بر اساس الگوریتم ارائه شده توسط یاراحمدی - وردل [۴] به شرح ذیل می‌باشد:
- شناسایی بلوک‌های کلیدی.
  - حذف بلوک‌های کلیدی ناپایدار.
  - شناسایی بلوک‌های همسایه بلوک‌های کلیدی باقیمانده.



شکل ۳: مثالی از روش گروه کلیدی انجام شده بر روی یک شیب سنگ درزه‌دار [۴]

گروه‌ها منجر به شناسایی گروه حاصل از بلوک‌های ۱۱۲۲ و ۲۳ به عنوان ناپایدارترین گروه می‌شود (شکل ۳-ت)). همانگونه که مشخص شد استفاده از روش KGM به جای روش KBM منجر به در نظر گرفتن اکثریت بلوک‌ها در تحلیل پایداری توده خواهد شد. روش KGM حجم بزرگ‌تری از بلوک‌های ناپایدار را نسبت به روش KBM به دست خواهد داد. همچنین در مقایسه این روش با روش اجزای مجزای انجام شده بوسیله نرم افزار UDEC، نتایج شباهت بسیار زیادی را در هندسه بلوک‌های ریزشی و زون ناپایدار حاصله نشان می‌دهد. که حاکی از توانایی خوب این روش تحلیل استاتیکی برای مواقعی که تنش‌های برجا وجود نداشته باشد، است [۴].

یکی از مشکلات اساسی موجود در روش گروه‌های کلیدی این است که گروه‌بندی‌ها الزاماً منجر به تشخیص گروه کلیدی بحرانی (دارای سطح بحرانی ریزش) نمی‌شود. این مشکل معمولاً در موارد زیر به وجود می‌آید:

در مرحله ابتدایی (شکل ۳-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)، (۱۲+۱۳)، (۱۲+۲۴)، (۱۳+۲۵)، (۱۴+۲۷) را می‌توان شناسایی نمود. 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 به وجود می‌آورد که کمترین ضریب ایمنی را دارد (شکل ۳-ب)). در این مرحله سه موقعیت گروه‌بندی با گروه ۱۱۲۲ وجود دارد (۱۱۲۲+۲۳)، (۱۱۲۲+۲۱)، (۱۱۲۲+۲۸) که تنها گروه ۱۱۲۲+۲۳، گروه کلیدی است. در این مرحله سه گروه کلیدی دیگر نیز قابل تشکیل هستند (۱۴+۲۷ و ۱۶+۳۰، ۱۵+۱۶). مطالعه بر روی کلیه

در این روش عدم حذف گروه‌ها تا رسیدن به انتهای توده مورد تحلیل و نهایتاً یافتن گروه بحرانی می‌باشد. چون الگوریتم روش بصورت مرحله‌ای پیش می‌رود، امکان از دست دادن گروه یا گروه‌های ریزشی قابل تشکیل وجود ندارد. مراحل کار در روش پیشنهادی به شرح ذیل می‌باشد.

#### ۴-۱- الگوریتم روش گروه‌بندی جهت‌دار

در این روش سطوح اطراف یک بلوک یا یک گروه کلیدی به سه دسته تقسیم شده‌اند.

- ۱- سطح لغزشی (سطحی که لغزش بر روی آن اتفاق می‌افتد).
- ۲- سطح آزاد (سطحی که به فضای آزاد راه دارد و یا سطح استخراجی).
- ۳- سطح غیرلغزشی (سطوحی غیر از سطوح لغزشی و آزاد).

این سطوح در شکل ۴- ب نشان داده شده است و در الگوریتم برنامه به آنها اشاره خواهد شد.

خلاصه الگوریتم روش پیشنهادی به شرح ذیل می‌باشد [۵]:

- ۱- تعیین بلوک‌های کلیدی.
- ۲- تعیین نوع سطوح اطراف بلوک یا گروه کلیدی و مشخص کردن سطوح غیرلغزشی.
- ۳- تعیین بلوک‌های داخل گروه که به سطوح غیر لغزشی و غیر آزاد آن متصلند.
- ۴- یافتن بلوک‌های دارای سطح مشترک با بلوک‌های یافت شده در مرحله ۳، از خارج گروه.
- ۵- اضافه کردن بلوک‌های تعیین شده در مرحله قبل به بلوک یا گروه کلیدی اولیه (پایه) و تشکیل گروه‌های جدید.
- ۶- انجام تست قابلیت حرکت (لغزشی و واژگونی) بر روی گروه‌های جدید و تعیین گروه‌های قابل حرکت از لحاظ هندسی.
- ۷- تکرار مراحل ۲ تا ۶ برای هر یک از گروه‌های قابل حرکت هندسی تا جایی که امکان تشکیل گروهی با این قابلیت وجود نداشته باشد.
- ۸- تحلیل پایداری کلیه گروه‌های بدست آمده بر اساس معیار شکست موه‌رکلمب و روش تحلیل تصحیح شده برش‌های مایل سارما [۷]، [۸] و حذف گروه ناپایدار ( $SF < 1$ ) یا گروهی با کمترین پایداری ( $SF_{min}$ ) در بین گروه‌های تشکیل شده.
- ۹- به روز کردن هندسه شیب سنگ، تعیین بلوک‌های کلیدی جدید واقع در سطح جدید و رفتن به مرحله ۱.

۱- امکان از دست دادن سطوح بحرانی به‌علت حذف مرحله‌ای و پیش‌رونده گروه‌های دو تایی ناپایدار بصورت مرحله‌ای.  
 ۲- انتخاب بلوک‌های کلیدی آغازینی که الزاماً به گروه کلیدی بحرانی ختم نمی‌شود.  
 برای حل این مشکل، روش جدیدی تحت عنوان روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار پیشنهاد شده است.

#### ۴-۲ روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار

در کلیه روش‌های تحلیل استاتیکی به‌خصوص در حرکات لغزشی توده‌های سنگی، یافتن سطح بحرانی ریزش از جمله مهم‌ترین مسائل در تحلیل پایداری محسوب می‌شود. بطوریکه با تعیین نیروهای محرک و مقاوم موجود بر روی سطح مزبور امکان یافتن ضریب ایمنی کمینه و تحلیل پایداری میسر می‌گردد.

همانگونه که قبلاً اشاره شد مسئله مهم در روش گروه‌های کلیدی، چگونگی تعیین گروه کلیدی بحرانی است. راه حل مناسب، یافتن تمام گروه‌های ریزشی قابل تشکیل و سپس تحلیل پایداری آنهاست تا گروه با حداکثر ریزش تعیین شود. سپس با حذف گروه بحرانی (گروه ریزشی با کمترین ضریب ایمنی)، الگوریتم بصورت پیش‌رونده اجرا شود.

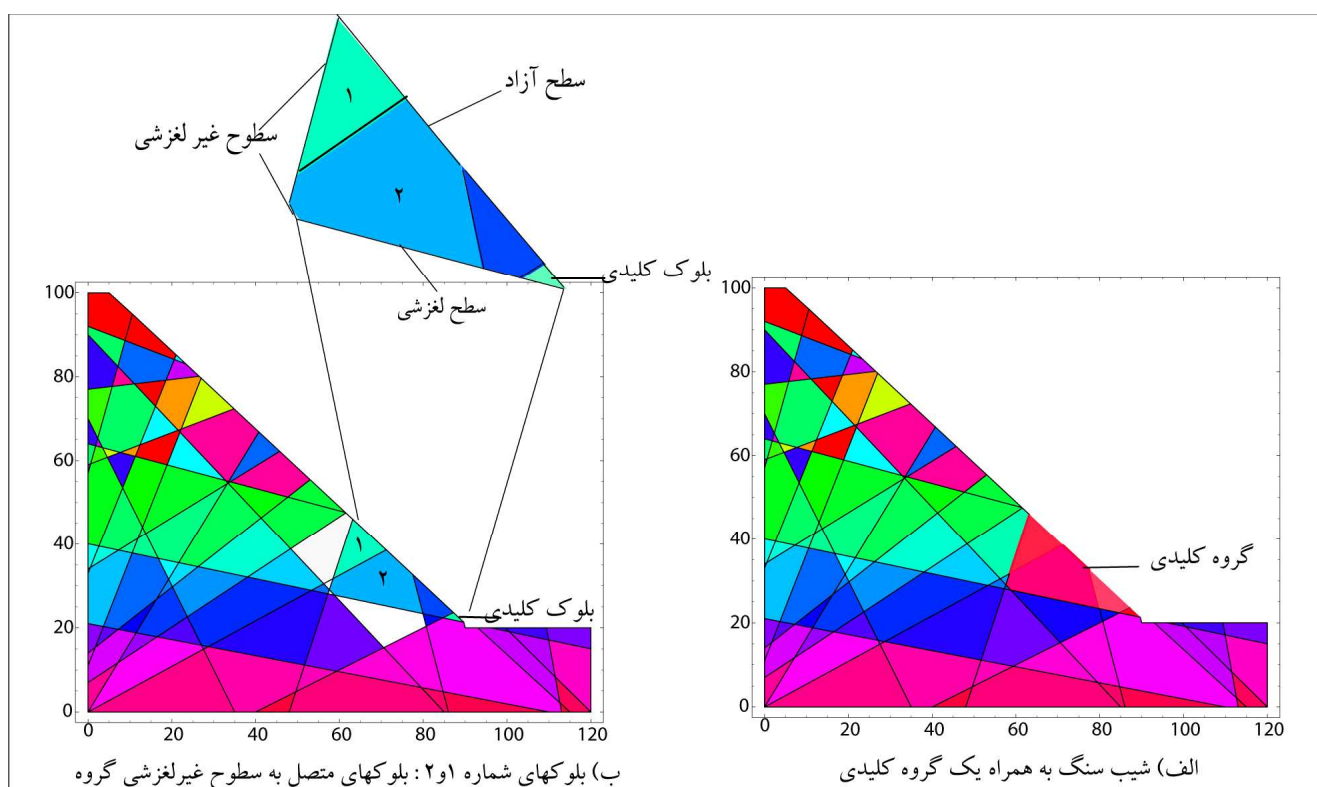
برای یافتن گروه کلیدی بحرانی روش‌های گوناگونی از جمله روش‌های برنامه‌ریزی پویا و روش الگوریتم ژنتیک به‌کار گرفته شد. آنچه که سبب شد این روش‌ها به جواب بهینه منجر نشوند به ماهیت مسئله برمی‌گشت چرا که هیچ رابطه خاصی بین بلوک‌ها برای ترکیب شدن با یکدیگر و تشکیل گروه قابل حرکت وجود ندارد و مسئله گسسته تعریف می‌شود. از اینرو برای رسیدن به جواب مطلوب به حجم بالایی از محاسبات نیاز بود. حتی با در نظر گرفتن یک درصد از کل ترکیبات در یک شیب سنگی کوچک با حدود ۱۰۰ بلوک نیازمند رایانه‌هایی با قدرت پردازش بسیار بالا هست و در عمل با وضعیت موجود نمی‌توان به گروه‌هایی با ترکیب بیش از چهار بلوک دست یافت.

روش پیشنهاد شده (گروه‌های کلیدی جهت‌دار)، بر مبنای حرکت در مسیر سطوح لغزشی مختلف حاصل از یک گروه قابل حرکت است. در این روش از به‌وجود آمدن گروه‌های غیر کلیدی جلوگیری شده است. در نتیجه حجم محاسبات بدون از دست دادن گروه‌های قابل ریزش نسبت به روشی که کلیه گروه‌ها را بررسی کند، به میزان زیادی کاهش می‌یابد.

این روش نیز مانند روش گروه‌های کلیدی پایه، بصورت مرحله‌ای و با شروع از بلوک کلیدی انجام می‌شود. تفاوت عمده

در مرحله بعد تمام زیرمجموعه‌های حاصل از این سه بلوک که شامل ۷ زیر مجموعه (۱-۲۳) است، تعیین می‌شود و به گروه کلیدی اولیه اضافه می‌شود. حال با انجام تست قابلیت حرکت، گروه‌های جدید قابل حرکت مشخص می‌شوند؛ در این مورد از بین حالات ترکیب تنها دو حالت ترکیب گروه اولیه با بلوک‌های ۴ و ۵+۴ قابلیت جابجایی هندسی را دارد. در نهایت تمامی این مراحل برای هر یک از گروه‌های قابل حرکت جدید نیز تکرار می‌شود.

از شکل ۴ می‌توان برای تشریح الگوریتم پیشنهادی استفاده کرد. شکل ۴-الف شیب سنگی فرضی به همراه یک گروه کلیدی واقع بر سطح استخراجی آن را نشان می‌دهد. این گروه از یک بلوک کلیدی آغاز شده و حاصل ترکیب چهار بلوک است (شکل ۴-ب). بلوک‌هایی که با شماره‌های ۱ و ۲ مشخص شده‌اند، بلوک‌هایی هستند که از داخل به سطوح غیرلغزشی گروه کلیدی متصلند، بلوک‌هایی که با شماره‌های ۳، ۴ و ۵ مشخص شده‌اند، از خارج گروه با بلوک‌های ۱ و ۲ دارای سطح مشترک هستند.



شکل ۴: یک شیب سنگ فرضی به همراه یک گروه کلیدی نشان داده شده

نتایج حاصل از تحلیل‌های استاتیکی مختلف (KGM, KBM) و (DKGM) و همچنین تحلیل عددی در شکل ۵ نشان داده شده است.

همانگونه که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود نتیجه تحلیل براساس روش بلوک‌های کلیدی شیب سنگ را پایدار نشان می‌دهد، زیرا تمامی بلوک‌های کلیدی دارای ضریب ایمنی بالایی هستند.

نتایج حاصل از روش گروه کلیدی، گروه نشان داده شده در شکل ۵-ب را به عنوان گروهی با کمترین ضریب ایمنی بدست می‌دهد. ضریب ایمنی این گروه بزرگ‌تر از ۱ است در این روش امکان یافتن گروهی دیگر با ضریب ایمنی کمتر وجود ندارد.

#### ۲-۴- کنترل روش پیشنهادی

برای کنترل دقت روش پیشنهادی نتایج حاصل از تحلیل با روش عددی اجزای مجزا در محیط نرم افزاری UDEC که در حال حاضر به عنوان یک روش کاربردی در تحلیل دو بعدی شیب سنگ‌های درزه‌دار مرسوم است، مقایسه گردید [۹].

مدل مورد مطالعه شیب سنگی با سه دسته درزه نامحدود است که درزه‌ها به صورت تصادفی توزیع شده‌اند.

مدلسازی هندسی و مکانیکی برای تحلیل استاتیکی در محیط با استفاده از زبان برنامه‌نویسی سطح بالای نرم افزار Mathematica انجام شده است [۱۰].

خواص فیزیکی و مکانیکی توده سنگ فرضی استفاده شده در تحلیل‌های استاتیکی و عددی در جدول ۱ ارائه شده است.

خود می‌گیرد. بردارهای جابجایی و سطح برشی در شکل ۵ - ت نشان داده شده است. مقایسه نتایج بدست آمده تطابق خوبی را بین گروه کلیدی بحرانی (دارای سطح ریزش بحرانی) بدست آمده از روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار (شکل ۵ - پ) و سطح برش بدست آمده از روش عددی (شکل ۵ - ت)، نشان می‌دهد.

با استفاده از روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار، گروه بدست آمده در سیکل ۱۲ ناپایدارترین گروه‌های کلیدی محسوب شده و دارای ضریب ایمنی کمتر از ۱ است (شکل ۵ - پ). در تحلیل عددی به‌منظور مقایسه صحیح این دو روش، شیروانی تنش زوده فرض شده است. رفتار ماده سنگ صلب و درزه‌ها بصورت الاستوپلاستیک مدل شده‌اند. با اجرای برنامه، به میزان ۷۰۰۰۰۰ سیکل شیروانی حالت پایدار (تعادل) به

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ و ناپیوستگی‌های استفاده شده در تحلیل

زاویه اصطکاک	مقاومت کششی	چسبندگی	سختی برشی سطح درزه	سختی نرمال سطح درزه	چگالی	مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ و درزه‌ها
درجه	MPa	MPa	$GPa m^{-1}$	$GPa m^{-1}$	$Kg / m^3$	واحد
۲۵	۰	۰/۰۰۲	۹/۱	۲۶/۷	۲۵۰۰	مقدار

- روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار با توجه به دقت نسبتاً بالا در تحلیل و همخوانی خوب نتایج با نتایج روش تحلیل عددی، می‌تواند به‌عنوان جایگزین یا مکمل دیگر روش‌ها در مواردیکه شرایط استفاده از تحلیل‌های استاتیکی موجود باشد، مورد استفاده قرار گیرد.
- در تحلیل‌های پایداری قطعی سازه‌های مهندسی به‌خصوص سازه‌های ژئوتکنیکی که محیط‌هایی اغلب به شدت ناهمگن و ناهمسانگرد هستند، عدم توجه به ابهامات موجود خطاهای غیرقابل جبرانی را در مدل ایجاد می‌نماید. از این‌رو استفاده از روش‌های احتمالاتی جهت شناسایی و تقلیل ابهامات مذکور ضروری به‌نظر می‌رسد. پیشنهاد می‌شود با تعمیم این روش برای حالت سه بعدی امکان تحلیل عملکرد واقعی شیب‌های سنگی تحت شرایط بارگذاری استاتیکی معین بوجود آید.

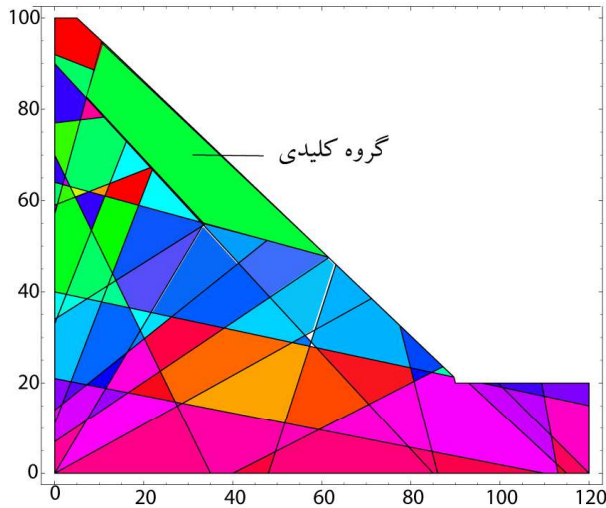
#### ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

- با توجه به مطالب مطرح شده می‌توان به نتایج و پیشنهادات زیر اشاره نمود:
- روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار می‌تواند بجای روش بلوک کلیدی پایه به منظور یافتن گروه‌های بحرانی‌تر از بلوک‌های کلیدی در محاسبه تحلیل پایداری توده سنگ درزه‌دار استفاده شود.
  - چون در روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار، تمامی گروه‌های قابل حرکت مورد بررسی قرار می‌گیرد، امکان از دست دادن گروه کلیدی ریزشی وجود ندارد.
  - مقایسه بین روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار و روش المان‌های مجزای انجام شده بوسیله UDEC تشابه زیاد بین هندسه ریزش را نشان می‌دهد اما مزیت اصلی استفاده از روش گروه کلیدی جهت‌دار نسبت به روش المان‌های مجزا در سرعت فرایند تحلیل است.

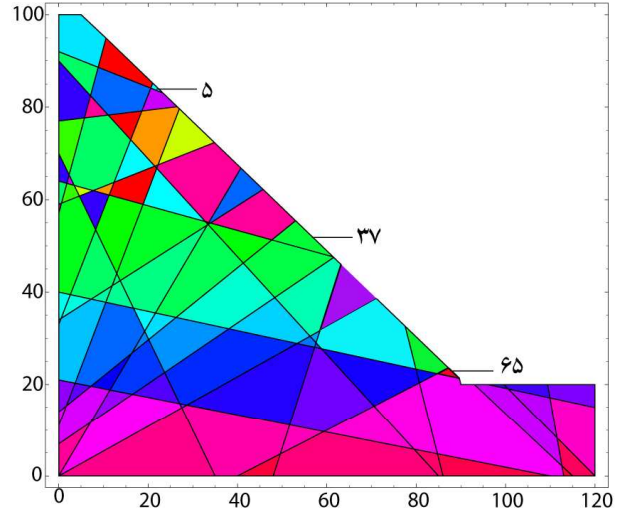
#### ۶- منابع

- [4] Yarahmadi-Bafghi A.R., Verdel T.; 2003; "The key-group method"; International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics; Vol. 27(6), pp. 495-511.
- [5] امامی میبیدی، عنایت الله؛ (۱۳۸۵)؛ **تحلیل قابلیت اعتماد دیواره نهایی بلوک تکتونیک ۲ معدن چغارت**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [6] Lin D., Fairhurst C.; 1988; "Static Analysis of the Stability of Three-Dimensional Blocky Systems Around Excavations in Rock"; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences; Vol. 25(3), pp. 139-147
- [1] Goodman R.E., Shi G.; 1985; "Block theory and its application to rock engineering"; Prentice-Hall, New Jersey.
- [2] Warburton P.M.; 1981; "Vector Stability Analysis of an Arbitrary Polyhedral Rock Block with any Number of Free Faces"; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 18, pp. 415-427.
- [3] Mauldon M., Chou K.C., Wu Y.; April 1997; "Limit Analysis of 2-D Tunnel Key blocks"; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences; Vol. 34(3-4), pp. 379-397.

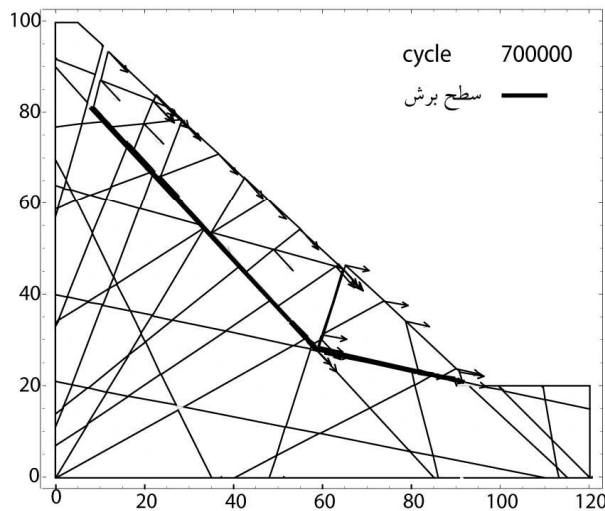




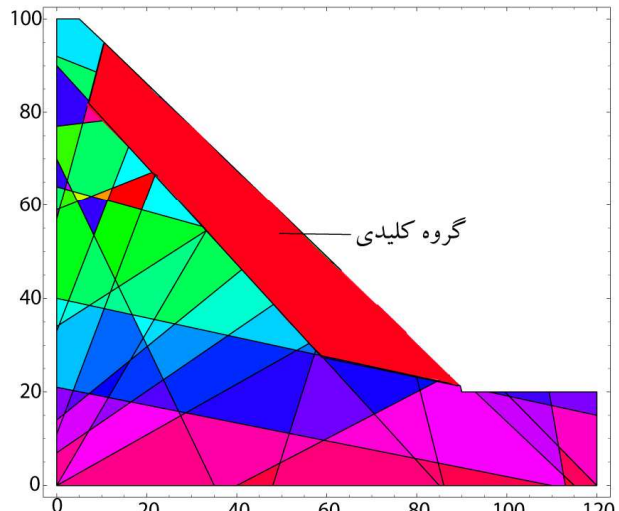
ب) گروه با کمترین ضریب اطمینان حاصل از روش گروه کلیدی.  
ضریب ایمنی (SF): ۱/۲۵۱



الف) هندسه اولیه شیب سنگ به همراه بلوک‌های کلیدی  
شماره بلوک کلیدی: ۵ ۳۷ ۶۵  
ضریب ایمنی (SF): ۵/۱۴۲ ۲/۹۰۱ ۶/۷۵۱



ت) تحلیل عددی انجام شده بوسیله UDEC.  
ماکزیمم جابجایی برشی: ۱/۹ m



پ) ناپایدارترین گروه حاصل از روش گروه کلیدی جهت‌دار.  
ضریب ایمنی (SF): ۰/۷۵۶

شکل ۵: تحلیل پایداری یک شیب سنگ فرضی.

[10] Wolfram S.; 1999; "The Mathematica Book"; 4th Ed., Wolfram Media - Cambridge University Press.

[7] Sarma S.K.; 1974; "Stability analysis of embankments and slopes." Geotechnique; Vol. 24(4), pp. 45-67.

[8] 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; Vol. 29, Issue. 10, pp. 1019-1043.

[9] Itasca Consulting Group Inc.; 1993; UDEC (Universal distinct element code), Version 2.0, USA,.

#### زیر نویس‌ها

- 1 - Key Blocks Method (KBM)
- 2 - Key Groups Method (KGM)
- 3 - Directional Key Group Method (DKGM)