

بهینه‌سازی محدوده نهایی معادن روباز با استفاده از نظریه گروه‌های کلیدی

مهدی نوروزی^۱؛ سید محمد اسماعیل جلالی^{۲*}؛ علیرضا یاراحمدی بافقی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، mehdii.noroozii@yahoo.com

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، jalalime@shahroodut.ac.ir

۳- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ayarahmadi@yazduni.ac.ir

(دریافت ۴ آذر ۱۳۸۷، پذیرش ۱۷ مرداد ۱۳۸۸)

چکیده

با وجود آن که تاکنون الگوریتم‌های متعددی برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری روباز ارائه شده اما بدلیل وجود بعضی محدودیت‌ها در الگوریتم‌های موجود، همواره ارائه الگوریتم‌های جدیدی که بتواند برخی از این محدودیت‌ها را پوشش دهد، مورد توجه متخصصان بوده است. در این مقاله، از مفاهیم روش گروه‌های کلیدی که به طور خاص به منظور تحلیل پایداری شیب‌های سنگی استفاده می‌شود، برای تدوین الگوریتم بهینه‌سازی محدوده نهایی معادن روباز استفاده شده است. این الگوریتم که KG-PLO نامیده شده است، بر روی نوع ویژه‌ای از مدل اقتصادی محدوده معدنی اجرا می‌شود و از آنجا که از پشتوانه قوی منطق ریاضی بهره می‌برد، قادر است محدوده بهینه واقعی را ارائه نماید. بدلیل اجرای مرحله‌ای الگوریتم، حجم محاسبات و در نتیجه زمان پردازش داده‌ها برای اجرای آن کم است. هر چند که با توجه به منطق فعلی روش گروه‌های کلیدی این الگوریتم به صورت دو بعدی ارائه شده اما در صورتی که مبانی نظری روش گروه‌های کلیدی از دو بعد به سه بعد گسترش یابد، می‌توان الگوریتم ارائه شده را به سه بعد تعمیم داد. برای اجرای الگوریتم KG-PLO، یک برنامه کامپیوتری با بهره‌گیری از منطق روش گروه‌های کلیدی در محیط Mathematica پیاده‌سازی شده است.

کلمات کلیدی

تئوری بلوکی، گروه‌های کلیدی، محدوده نهایی، معادن روباز، بهینه‌سازی

* عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

امروزه استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی که برای اجرا بر روی مدل‌های بلوکی اقتصادی توسعه داده شده‌اند، تقریباً به عنوان تنها راهکار قابل قبول، برای بهینه‌سازی اقتصادی محدوده‌نهایی معادن روباز مطرح هستند.

برای یافتن محدوده بهینه معادن روباز با استفاده از مدل بلوکی اقتصادی متناظر با آن، باید مدلی متشکل از تعداد بسیار زیادی بلوک تحلیل شود. محدوده بهینه اقتصادی به صورت ترکیبی از این بلوک‌ها تعریف می‌شود، به طوری که ضمن تامین شرایط فنی و هندسی معدنکاری روباز، سود حاصل از استخراج این بلوک‌ها بیشینه شود. طبیعی است که اگر هیچ رابطه خاصی برای ترکیب کردن بلوک‌ها وجود نداشته باشد، برای رسیدن به جواب مطلوب، به حجم بالایی از محاسبات نیاز است. بنابراین در مورد مدل‌های بلوکی واقعی معادن روباز که مشتمل بر تعداد بسیار زیادی بلوک هستند، حتی با رایانه‌های پرسرعت نیز امکان دستیابی به جواب، وجود ندارد. در این شرایط لازم است با تدوین الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابزار لازم برای برقراری ارتباط منطقی بین بلوک‌ها و در نتیجه کاهش حجم محاسبات و زمان اجرای عملیات بهینه‌سازی را فراهم نمود. در یک مدل بلوکی مشخص که داده‌های معینی را در بر دارد، حجم و زمان انجام محاسبات بهینه‌سازی به منطبق مورد استفاده در الگوریتم بستگی دارد [۱].

الگوریتم‌ها را در یک تقسیم‌بندی کلان می‌توان به دو گروه، منطق ریاضی^۱ و منطق جستجوگر^۲ تفکیک نمود. گروهی از الگوریتم‌ها که در محدوده فرضیات اعمال شده در آنها، همواره قادر به یافتن جواب بهینه هستند را الگوریتم‌های دارای منطق ریاضی و در مقابل گروه دیگر از الگوریتم‌ها که تنها توانایی یافتن محدوده‌ای نزدیک به جواب بهینه را دارند و قادر به ارائه تضمین برای بهینه بودن محدوده جستجو شده نیستند را الگوریتم‌های دارای منطق جستجوگر می‌نامند [۲].

مهمترین الگوریتم‌هایی که تا به حال بر مبنای مدل بلوکی یا عیاری برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری روباز ارائه شده‌اند، عبارتند از [۳]:

- الگوریتم مخروط شناور
- الگوریتم برنامه‌ریزی پویا
- الگوریتم مبتنی بر نظریه گراف
- الگوریتم مبتنی بر روش جریان شبکه
- الگوریتم وراثتی
- الگوریتم مبتنی بر روش‌های پارامتری
- الگوریتم مبتنی بر فرآیندهای تصادفی

اکثر این الگوریتم‌ها یا محدوده بهینه واقعی را ارائه نمی‌کنند و یا با بزرگ‌تر شدن مدل به سرعت به پیچیدگی آنها و زمان انجام محاسبات در آنها افزوده می‌شود [۴].

در این مقاله، از مفاهیم روش گروه‌های کلیدی که به طور خاص برای تحلیل پایداری شیب‌های سنگی درزه‌دار بکار می‌رود، استفاده شده است. این روش با بهره‌گیری از منطق ریاضی و با توجه به محدودیت‌های روش معدنکاری روباز، کمک می‌کند تا با انتخاب ترکیب خاصی از بلوک‌ها، حجم محاسبات و در نتیجه زمان پردازش داده‌ها کاسته شود.

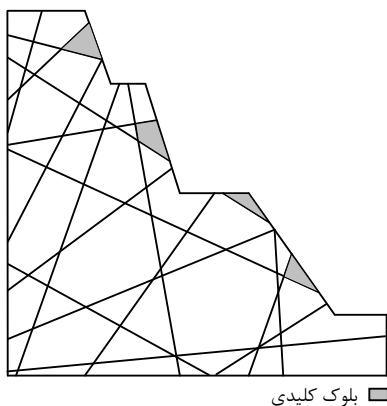
۲- مروری بر روش گروه‌های کلیدی

تقاطع دسته درزه‌های متعدد در توده سنگ، بلوک‌هایی با شکل و اندازه‌های متفاوت به وجود می‌آورد. در بین این بلوک‌ها، گاهی می‌توان بلوک‌هایی را یافت که جابجایی آنها ممکن است فضایی را بوجود آورد که موجب حرکت بلوک‌های محدود شده‌ی دیگر شود. بدین ترتیب ممکن است ناپایداری بزرگ مقیاسی اتفاق افتد که گاهی بسیار سریع توسعه می‌یابد. این دسته از بلوک‌ها، بلوک‌های کلیدی^۳ نامیده می‌شوند [۵]. این بلوک‌ها باید دارای چهار شرط زیر باشند [۶]:

الف- دارای تماس با سطح آزاد یا سطح استخراجی باشند.
ب- تعریف شده یا محدود باشند؛ یعنی توسط ناپیوستگی‌ها و سطح آزاد محدود شده و از توده جدا شده باشند.
ج- از نظر هندسی امکان جابجایی در آنها وجود داشته باشد.

د- حرکت سایر بلوک‌ها به حرکت بلوک مورد نظر وابسته باشد، به عبارت دیگر، کلیدی برای حرکت بلوک‌های دیگر باشند.

شکل ۱، بلوک‌های کلیدی در یک شیروانی سنگی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: بلوک کلیدی در یک شیروانی سنگی

۳- تعیین همسایه‌های بلوک‌های کلیدی پایدار و یا بلوک‌های دارای سطوح مشترک که با حذف بلوک‌های کلیدی بطور هندسی قابلیت جابجایی داشته باشند

۴- تشکیل گروه‌های ممکن متشکل از بلوک‌های کلیدی و همسایه‌های آنها

۵- تحلیل پایداری گروه‌ها و حذف گروه‌های ناپایدار یا ترکیب گروهی با کمترین پایداری در بین گروه‌های تشکیل شده

۶- تکرار مراحل ۱ تا ۵ بر اساس هندسه و توپوگرافی جدید بلوک‌ها

در شکل ۲ بطور شماتیک چهار مرحله از روش گروه‌بندی انجام شده بر روی یک شیب سنگی درزه‌دار فرضی نشان داده شده است. در مرحله ابتدایی (شکل ۲-الف)، چهار بلوک کلیدی شناسایی و مشخص شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از روش گروه‌های کلیدی، پنج نامزد گروه کلیدی (۱۱+۲۲، ۱۲+۱۳، ۱۲+۲۴، ۱۳+۲۵، ۱۴+۲۷) را می‌توان شناسایی کرد. در این مرحله، پس از تحلیل پایداری مشخص می‌شود که تنها گروه کلیدی حاصل از بلوک‌های کلیدی ۱۲ و ۱۳ ناپایدار خواهد بود، بنابراین در مرحله بعد این گروه حذف خواهد شد (شکل ۲-ب). سپس بلوک‌های شماره ۱۱ و ۲۲ با یکدیگر ترکیب شده و گروه کلیدی ۱۱۲۲ را بوجود می‌آورد که کمترین ضریب ایمنی را دارد اما ناپایدار نیست (شکل ۲-پ). در مرحله چهارم سه گزینه گروه‌بندی با گروه ۱۱۲۲ قابل تشخیص است (۱۱۲۲+۲۳، ۱۱۲۲+۲۸، ۱۱۲۲+۲۱) که تنها گروه ۱۱۲۲+۲۳، گروه کلیدی است. در این شرایط 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 به عنوان ناپایدارترین گروه می‌شود (شکل ۲-ت).

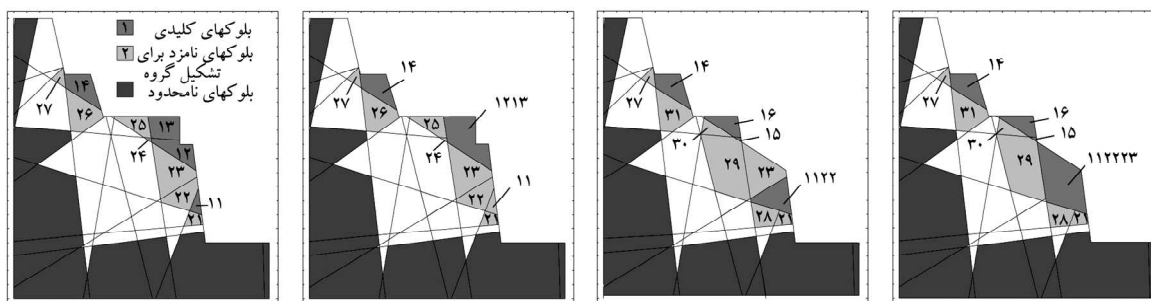
تئوری بلوکی به بررسی جابجایی بلوک‌های سنگی از سطح حفاریات مختلف با استفاده از تحلیل تعادل حدی این بلوک‌ها می‌پردازد. در تئوری بلوکی، مشابه دیگر روش‌های استاتیکی ابتدا باید قابلیت حرکت (جابجایی) بلوک‌های فعال از دیدگاه سینماتیک بررسی و سپس نیروهای موثر بر این بلوک‌ها تعریف شود. پس از آن باید اثرات این نیروها بر روی پتانسیل حرکت تحلیل شود. اگر برای این 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 بروز حرکت در سنگ تغییر نخواهند کرد. در این شرایط می‌توان گفت که بلوک بطور کامل ناپایدار است [۷].

مشکل اساسی در استفاده از تئوری بلوک‌های کلیدی این است که در این تئوری، بلوک‌های کلیدی صرفاً به صورت منفرد ارزیابی می‌شوند. بنابراین اگر هیچ یک از بلوک‌ها ناپایدار نباشند، از کاربرد این روش می‌توان نتیجه گرفت که مجموعه توده سنگ مورد مطالعه پایدار است، اما ممکن است بتوان گروه‌هایی از بلوک‌ها را یافت که اگر به صورت مجموعه واحد در نظر گرفته شوند، ناپایدار خواهند بود [۸].

روشی که برای حل این مشکل و تعمیم روش بلوک‌های کلیدی پیشنهاد شده، یک روش 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 و به روش گروه‌های کلیدی موسوم است [۹].

روند اجرای این روش به صورت زیر است:

- ۱- شناسایی بلوک‌های کلیدی
- ۲- حذف بلوک‌های انفرادی ناپایدار و ادامه آن تا آخرین بلوک با استفاده از روش بلوک‌های کلیدی



الف- هندسه اولیه شیب سنگ
پایدار: ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴

ب- گروه‌بندی بلوک‌های ۱۲+۱۳
پایدار: ۱۱، ۱۴
ناپایدار: ۱۲+۱۳

پ- گروه‌بندی بلوک‌های ۱۱+۲۲
پایدار: ۱۴، ۱۵، ۱۶
پایدار: ۱۱۲۲

ت- گروه‌بندی بلوک‌های ۱۱۲۲+۲۳
پایدار: ۱۴، ۱۵، ۱۶
ناپایدار: ۱۱۲۲+۲۳

شکل ۲: مثالی از روش گروه کلیدی که بر روی یک شیب سنگی درزه‌دار پیاده‌سازی شده است

۳- الگوریتم KG-PLO^۵

برای تبدیل مدل بلوکی به مدل پایداری شیب، باید مدل نشان داده شده در شکل ۳ به اندازه‌ی ۹۰ درجه به صورت ساعت‌گرد دوران نماید. بدین ترتیب سطح آزاد در مدل اقتصادی اولیه (شکل ۳) به دیواره سطح آزاد قائم در مدل شیروانی و خطوط تشکیل دهنده بلوک‌ها به سطوح درزه تبدیل می‌شوند. مدل بلوکی تغییر یافته و بلوک‌های کلیدی در مدل جدید، در شکل ۴ نشان داده شده است.

۳-۲- منطق الگوریتم

در این الگوریتم، استخراج بلوک‌های کلیدی و گروه‌هایی که در ارتباط با این بلوک‌ها تشکیل می‌شوند، همانند تمامی الگوریتم‌های شناخته شده بهینه‌سازی محدوده نهایی، منوط به داشتن دو شرط زیر است:

۱. بلوک‌های مورد نظر دارای شرط محدودیت فنی استخراج به روش روباز باشند. یک بلوک در صورتی دارای محدودیت فنی استخراج است که تمامی بلوک‌های بالای آن با توجه به شیب دیواره معدن استخراج شده باشند.

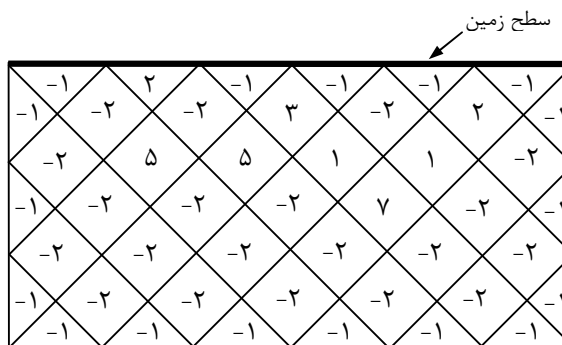
۲. بلوک‌های مورد نظر دارای ارزش کلی مثبت باشند. در این الگوریتم، دارا بودن دو شرط محدودیت فنی استخراج و ارزش مثبت برای یک بلوک یا یک گروه، به معنی احراز شرایط آن بلوک یا گروه برای استخراج شدن و یا جدا شدن آنها از محدوده مدل‌سازی شده است. در واقع این شرایط متناظر با ناپایدار بودن آن بلوک یا گروه در روش گروه‌های کلیدی، در نظر گرفته شده است.

شرایط بیان شده برای استخراج به طور گرافیکی در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل اعدادی که در مرکز هر بلوک قرار دارند، ارزش بلوک و اعدادی که در گوشه پایینی هر بلوک قرار دارند بیانگر درجه همسایگی در ارتباط با بلوک کلیدی واقع در گوشه پایین مدل است. بلوک‌هایی که دارای یک وجه مشترک با بلوک کلیدی هستند، همسایه‌های مرتبه اول بلوک کلیدی نامیده می‌شوند و گروه‌های حاصل از ترکیب آنها با بلوک کلیدی، گروه‌هایی با مرتبه همسایگی اول تعریف می‌شوند. همچنین بلوک‌هایی که دارای یک وجه مشترک با همسایه‌های درجه اول بلوک کلیدی هستند، همسایه‌های درجه دوم بلوک کلیدی محسوب می‌شوند و گروه‌های متشکله، گروه‌هایی با مرتبه همسایگی دوم تعریف می‌شوند. به همین ترتیب می‌توان درجه n ام همسایگی را برای بلوک کلیدی و گروه با درجه همسایگی n ام را تعریف نمود. بر همین اساس بلوک کلیدی منفرد، گروه با درجه همسایگی صفر در نظر گرفته شده است. در این شکل، ترکیب شماره ۱ که فقط شامل یک بلوک است، شرط محدودیت فنی استخراج را دارد، ولی

هدف اصلی الگوریتم ارائه شده در این مقاله، یافتن محدوده‌ای است که با استخراج آن و با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی و هندسی، حداکثر سود بدست آید. این الگوریتم که الگوریتم KG-PLO نامیده شده است، بر روی یک مدل بلوکی اقتصادی ویژه اجرا می‌شود و در آن از مفاهیم ذکر شده در روش گروه‌های کلیدی استفاده شده است. در این الگوریتم از همان مفاهیم بلوک، سطوح بین بلوک‌ها، ترتیب لغزش بلوک‌ها و بلوک همسایه که در روش گروه‌های کلیدی بیان شد، استفاده شده است. این الگوریتم از پشتوانه قوی منطق ریاضی بهره می‌برد و بنابراین قادر به ارائه جواب بهینه واقعی می‌باشد.

۳-۱- مدل‌سازی

الگوریتمی که در حال حاضر در این مقاله ارائه شده است بر روی نوع ویژه‌ای از مدل بلوکی اقتصادی^۶ دو بعدی اجرا می‌شود. برای ساخت مدل بلوکی اقتصادی، ابتدا محدوده معدنی مورد نظر با دو دسته خطوط مورب که با یکدیگر زاویه ۹۰ درجه و با افق زاویه ۴۵ درجه می‌سازند، به بلوک‌های کوچکتری تقسیم می‌شود. زاویه این خطوط با افق که در واقع نشان دهنده زاویه شیب نهایی دیواره معدن است، می‌تواند بین صفر تا ۹۰ درجه تغییر کند. در این مقاله، به منظور ساده‌تر شدن مسئله، ابعاد بلوک‌ها یکسان و زاویه شیب دیواره نهایی معدن در تمام جهات برابر ۴۵ درجه فرض شده است. در شکل ۳، یک نمونه از مدل بلوکی اقتصادی فرضی برای تشریح این الگوریتم، نشان داده شده است.



شکل ۳: نمایی شماتیک از مدل بلوکی فرضی برای اجرای الگوریتم ارائه شده

برای کاربرد روش ارائه شده در این مقاله، مدل بلوکی محدوده معدنی باید به مدل پایداری شیب تبدیل شود که در آن بلوک‌ها بر روی سطوح درزه‌ها دارای قابلیت لغزش باشند.

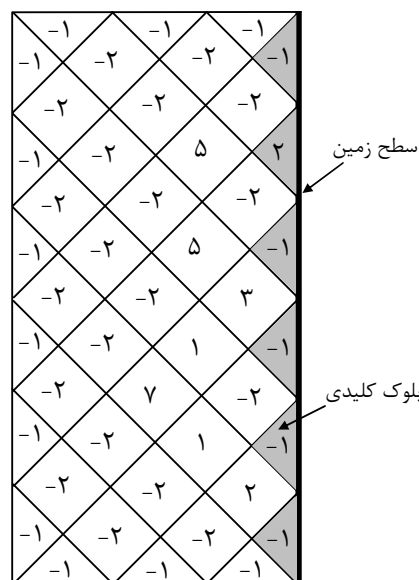
در این الگوریتم ابتدا بلوک‌های کلیدی در مدل جستجو می‌شوند و در صورت دارا بودن شرایط استخراج، از روی مدل حذف می‌شوند. اگر چند بلوک با ارزش مثبت وجود داشته باشد، ابتدا بلوکی که بیشترین ارزش را دارد استخراج می‌شود. در هر مرحله پس از حذف بلوک کلیدی، الگوریتم از ابتدا بر روی مدل به روز شده اجرا می‌شود و بلوک‌های کلیدی جدید یافت می‌شوند. این روند آنقدر ادامه پیدا می‌کند که دیگر بلوک کلیدی مثبت قابل استخراج وجود نداشته باشد.

در ادامه، مجموعه گروه‌هایی از همسایگی‌های مرتبه اول هر یک از بلوک‌های کلیدی غیر قابل استخراج، تشکیل می‌شوند. از میان گروه‌های تشکیل شده، گروه با بیشترین امتیاز مثبت، که دارای شرایط استخراج است حذف می‌شود و الگوریتم مجدداً از ابتدا اجرا می‌شود. اجرای مجدد الگوریتم بر روی مدل، پس از حذف هر بلوک یا گروه مثبت، باعث می‌شود که امکان از دست دادن کاواک مثبت قابل تشکیل، وجود نداشته باشد. این روند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که دیگر گروه کلیدی حاصل از همسایگی درجه اول بلوک کلیدی که دارای شرایط استخراج باشد، وجود نداشته باشد. در مراحل بعدی الگوریتم، به ازای هر مرحله، یک درجه به درجه همسایگی برای تشکیل گروه، اضافه می‌شود. این روند، بر اساس یک قانون سرانگشتی، تا مرتبه همسایگی $2(n-1)$ که در آن n تعداد بلوک‌های کلیدی در مدل از لحاظ دارا بودن شرایط استخراج بررسی می‌شوند. بیشترین مرتبه همسایگی مورد نیاز برای تشکیل گروه در یک مدل خاص، زمانی است که دو حالت زیر به طور همزمان رخ دهد:

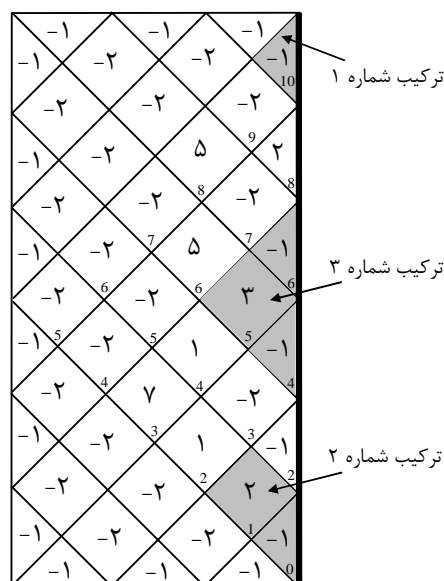
۱. فقط بزرگ‌ترین کاواک قابل تشکیل در مدل، دارای شرایط استخراج باشد و کاواک‌های داخل این کاواک بزرگ قبلاً استخراج نشده باشند.
۲. بلوک کلیدی انتخاب شده برای تشکیل گروه، در گوشه مدل قرار گرفته باشد.

به عنوان مثال، در شکل ۵ فرض شود که فقط بزرگ‌ترین کاواک نشان داده شده، دارای شرایط استخراج است و ترکیب شماره ۲ و دیگر ترکیبات مشابه دارای شرایط استخراج نباشند. همچنین فرض شود بلوک کلیدی نشان داده شده با شماره همسایگی صفر، بلوک کلیدی مبدأ برای ایجاد گروه است. در این حالت کاواک مورد نظر، با در نظر گرفتن مرتبه همسایگی ۱۰ برای بلوک کلیدی، تشکیل می‌شود که در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به اینکه در این شکل، ۶ بلوک کلیدی وجود دارد، مرتبه همسایگی ۱۰ برای تشکیل کاواک مورد نظر از رابطه $2(n-1)$ محاسبه شده است که در آن n برابر با ۶

دارای ارزش مثبت نیست و در نتیجه این محدوده در یک مدل پایداری شیب، پایدار است و در یک مدل بلوکی اقتصادی، قابلیت استخراج را ندارد. گروه بلوک‌های شماره ۲، ترکیبی است که با استفاده از همسایگی مرتبه اول بلوک کلیدی تشکیل شده و دارای ارزش مثبت است ولی شرط محدودیت فنی استخراج را ندارد. بنابراین این گروه نیز پایدار است ولی استخراج نمی‌شود. گروه شماره ۳ که توسط بلوک‌های همسایه مرتبه دوم بلوک کلیدی ایجاد شده، دارای هر دو شرط و بنابراین ناپایدار است و می‌تواند استخراج شود.



شکل ۴: دوران مدل بلوکی برای کاربرد روش گروه‌های کلیدی



شکل ۵: نمونه‌هایی از ترکیب بلوک‌ها

در شکل ۷-ب شرایط استخراج را ندارند، بنابراین گروه‌های شامل همسایه‌های مرتبه اول بلوک‌های کلیدی تشکیل می‌شوند که در مورد مدل مذکور، تمامی این گروه‌ها یکی از دو شرط بیان شده را ندارند. بنابراین مرحله بعدی الگوریتم اجرا می‌شود.

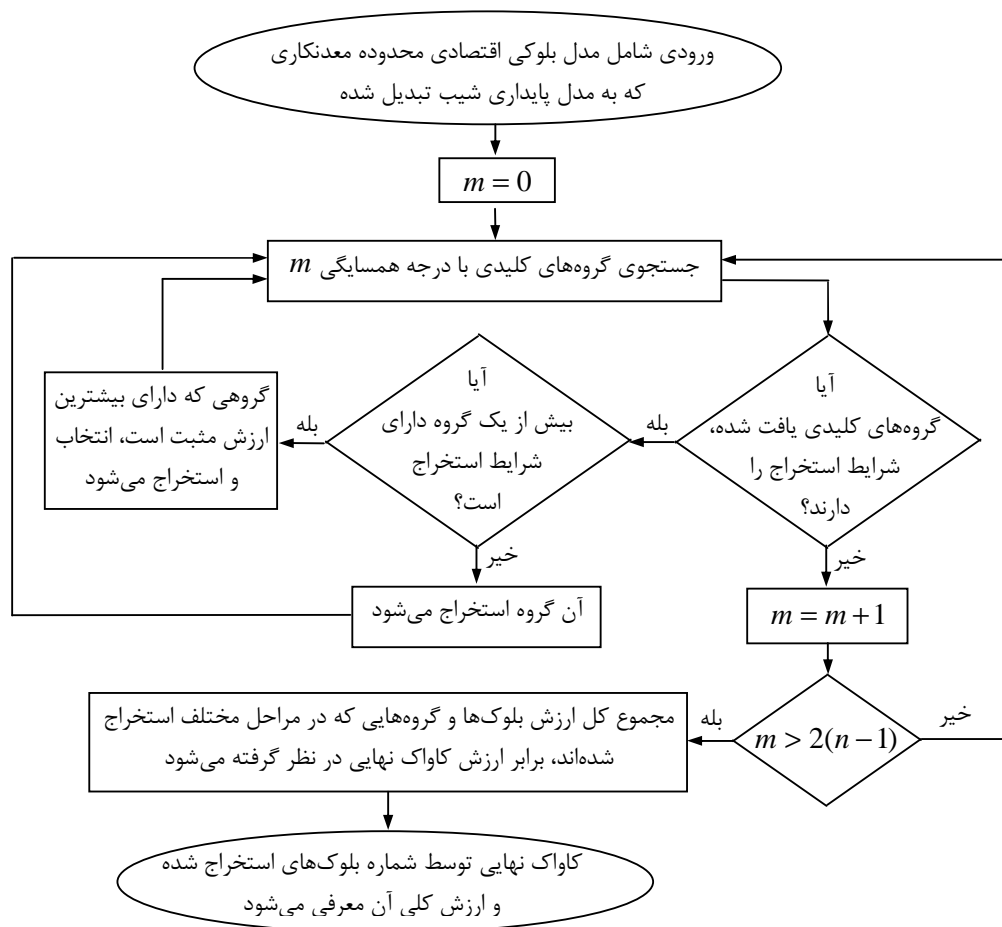
در صورتی که در میان گروه‌های با درجه همسایگی اول، گروه مثبتی وجود نداشت، مجموعه گروه‌هایی با همسایگی مرتبه دوم از بلوک‌های کلیدی تشکیل می‌شود. در صورتی که گروهی واجد شرایط استخراج یافت شد، آن گروه حذف خواهد شد. با یافتن همسایگی‌های مرتبه دوم برای هر یک از بلوک‌های کلیدی در شکل ۷-ب، می‌توان دریافت که گروه نشان داده شده در این شکل دارای شرایط استخراج می‌باشد. بنابراین، در این مرحله از الگوریتم این گروه حذف می‌شود و مدل به صورت شکل ۷-ج به‌روز می‌شود.

(تعداد بلوک کلیدی) است. در صورتی که کاواک مورد نظر کوچک‌تر از حالت بررسی شده باشد و یا برای تشکیل بزرگ‌ترین کاواک، بلوک کلیدی دیگری غیر از بلوک واقع در گوشه مدل به عنوان بلوک مبدأ انتخاب شود، مرتبه همسایگی کمتری مورد نیاز است.

برای تشریح بهتر الگوریتم، مراحل اجرای آن به صورت فلوچارتی در شکل ۶ نشان داده شده است.

۳-۳- مثال عددی

در شکل ۷ یک مدل بلوکی با ۴۵ بلوک نشان داده شده و الگوریتم KG-PLO بر روی آن پیاده‌سازی شده است. در اولین مرحله اجرای الگوریتم بر روی این شکل، ابتدا تنها بلوک کلیدی مثبت در شکل ۷-الف جستجو شده و حذف می‌شود. در این حالت مدل به صورت شکل ۷-ب به‌روز خواهد شد و الگوریتم دوباره به مرحله آغازین بر می‌گردد و بلوک‌های کلیدی جدید جستجو می‌شوند. هیچ یک از بلوک‌های کلیدی

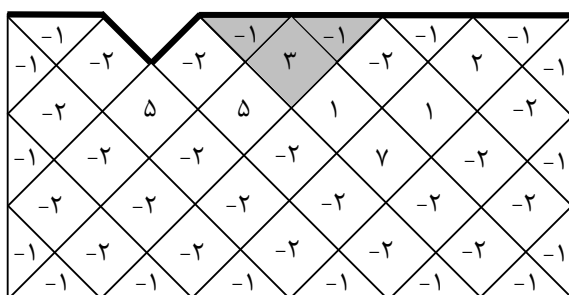


شکل ۶: فلوچارت الگوریتم KG-PLO

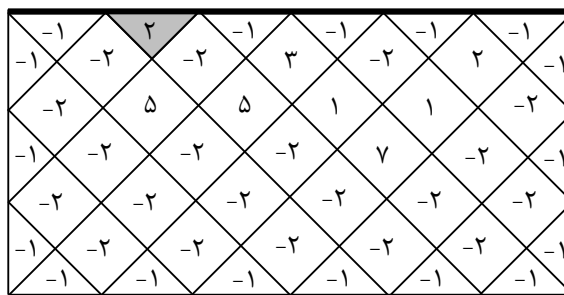
در مراحل بعدی الگوریتم، به ازای هر مرحله، یک درجه به درجه همسایگی بلوک‌ها برای تشکیل گروه اضافه می‌شود. در مثال مورد بررسی در شکل ۷-۵، گروه تشکیل شده از بلوک کلیدی با درجه همسایگی ۴ دارای شرایط استخراج بوده و در این مرحله حذف می‌شود. سپس الگوریتم از ابتدا بر روی مدل به‌روز شده (شکل ۷-۶) اجرا می‌شود و برای این مدل تا درجه همسایگی ۱۰ ادامه می‌یابد. در این مورد گروهی که دارای شرایط استخراج باشد، یافت نمی‌شود و در نتیجه الگوریتم وارد مرحله پایانی می‌شود.

در پایان مجموعه بلوک‌هایی که در هر مرحله به عنوان یک کاواک قابل اجرا، استخراج شده‌اند، کاواک بهینه نهایی معدن را تشکیل می‌دهند و مجموع ارزش کل این بلوک‌ها، ارزش اقتصادی کاواک بهینه را معرفی می‌کند. شکل ۷-۷ و کاواک بهینه نهایی را نشان می‌دهد که دارای ارزش اقتصادی ۱۵ است.

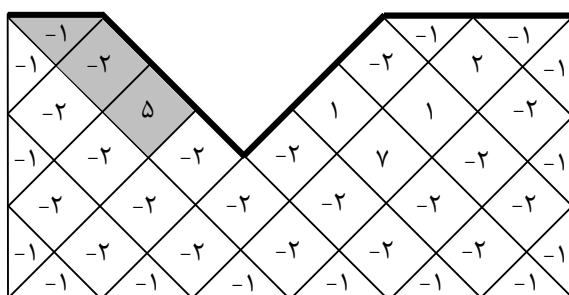
اکنون الگوریتم از ابتدا بر روی مدل جدید اجرا می‌شود و بلوک‌های کلیدی جستجو و هر کدام از لحاظ دارا بودن شرایط استخراج کنترل می‌شوند. در این حالت بلوکی برای استخراج یافت نمی‌شود. سپس گروه‌هایی از همسایگی‌های مرتبه اول بلوک‌های کلیدی تشکیل می‌شوند. در این مرحله از الگوریتم همانگونه که در شکل ۷-۶ نشان داده شده، یک گروه با ارزش ۳ یافت می‌شود که دارای شرایط استخراج است و در این مرحله حذف می‌شود. سپس مدل به صورت شکل ۷-۸ به‌روز می‌شود و الگوریتم از ابتدا بر روی مدل اجرا و در مرحله همسایگی مرتبه دوم گروهی با شرایط استخراج یافت شده و حذف می‌شود. در ادامه مدل به صورت شکل ۷-۹ به‌روز می‌شود و پس از اجرای مجدد الگوریتم، گروهی با درجه همسایگی مرتبه اول یا دوم که دارای شرایط استخراج باشد یافت نمی‌شود و الگوریتم به مرحله بعدی می‌رود.



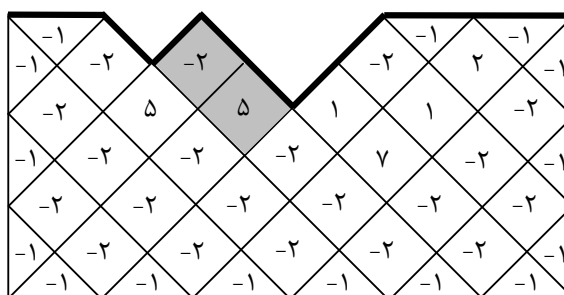
(ب)



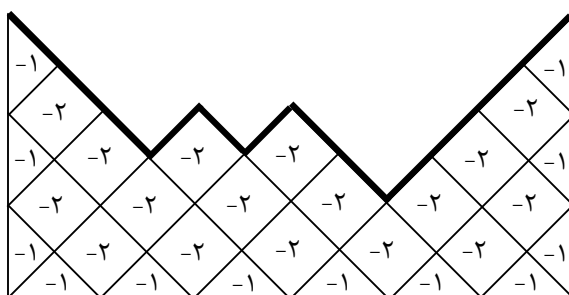
(الف)



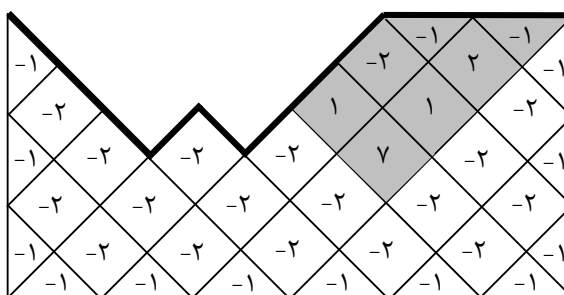
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۷: مراحل تعیین کاواک بهینه معدنکاری حاصل از اجرای برنامه کامپیوتری

۴- برنامه کامپیوتری KG-PLO

برای اجرای الگوریتم، یک برنامه کامپیوتری با بهره‌گیری از منطق روش گروه‌های کلیدی در محیط Mathematica پیاده‌سازی شده است.

این برنامه کامپیوتری، ابتدا هندسه بلوک بزرگ که نشان دهنده محدوده معدنکاری است را از طریق مختصات نقاط گوشه‌های آن دریافت می‌نماید. سپس خطوط را به عنوان دسته درزه و سطح زمین از طریق مختصات ابتدا و انتهای آنها دریافت می‌نماید. با دریافت این اطلاعات مدل بلوکی معدن از تقاطع خطوط ایجاد می‌شود و به هر بلوک شماره‌ای اختصاص می‌یابد. سپس مدل بلوکی اقتصادی با اختصاص دادن ارزش اقتصادی هر بلوک به آن با توجه به شماره بلوک، ایجاد می‌شود. مدل ایجاد شده، ۹۰ درجه دوران می‌کند تا به مدل پایداری شیب تبدیل شود.

در ادامه برنامه کامپیوتری با دریافت مختصات نقاط گوشه‌های هر بلوک در مدل بلوکی اقتصادی و ارزش هر بلوک، کاواک بهینه معدنکاری را توسط شماره بلوک‌های آن معرفی می‌کند و سرانجام ارزش اقتصادی آن تعیین می‌شود.

برنامه کامپیوتری تهیه شده، بر روی مدل بلوکی شکل ۸- الف اجرا شده و خروجی آن در شکل ۸-ب نشان داده شده است. ارزش محدوده بهینه معدن بر اساس خروجی برنامه برابر با ۱۶۵ واحد است.

۵- اعتبارسنجی الگوریتم

برای اعتبارسنجی الگوریتم، محدوده معدنی نشان داده شده در شکل ۸-الف، توسط برنامه کامپیوتری UPL^{۱۰} و با استفاده از سه روش برنامه‌ریزی پویا، مخروط شناور و کروبووف اصلاح شده، تحلیل و نتایج بدست آمده از نرم افزار در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: نتایج حاصل از اجرای نرم افزار UPL و برنامه کامپیوتری

مبتنی بر الگوریتم KG-PLO

الگوریتم	ارزش کاواک نهایی	زمان انجام محاسبات (میلی ثانیه)
کروبووف اصلاح شده	۱۵۴	۶۰
مخروط شناور	۱۵۸	۵۰
برنامه‌ریزی پویا	۱۶۵	۲۰
الگوریتم KG-PLO	۱۶۵	۳۲

همچنین محدوده‌های بدست آمده از طریق اجرای هر یک از الگوریتم‌ها بر روی محدوده معدنی مذکور در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتیجه بدست

آمده از اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی پویا که یک الگوریتم با منطق ریاضی است، دقیقاً با نتیجه حاصل از اجرای برنامه کامپیوتری تهیه شده مبتنی بر الگوریتم KG-PLO برابر است.

در جدول ۱ زمان انجام محاسبات برای یافتن محدوده بهینه بر روی محدوده نشان داده شده در شکل ۸-الف، با توجه به خروجی برنامه UPL بدست آمده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در مورد الگوریتم برنامه‌ریزی پویا که فرآیند اجرای آن مرحله‌ای است، زمان محاسبات در مقایسه با الگوریتم‌های کروبووف اصلاح شده و مخروط شناور کمتر است.

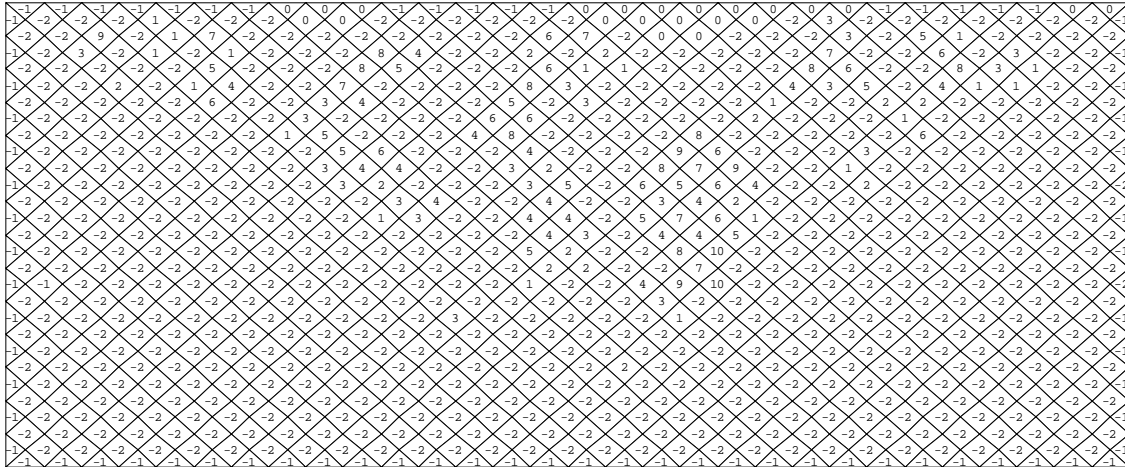
زمان انجام محاسبات برای اجرای الگوریتم KG-PLO نیز به دلیل اجرای مرحله‌ای آن در مقایسه با الگوریتم‌های کروبووف اصلاح شده و مخروط شناور کمتر است و از این بابت امکان کاربرد موفق آن بر روی مدل‌های بلوکی بزرگ وجود دارد.

باید توجه داشت که زمان انجام محاسبات برنامه کامپیوتری مبتنی بر KG-PLO بر اساس زمان‌سنجی اجرای برنامه در محیط Mathematica بدست آمده است. بنابراین در صورت بازنویسی برنامه تدوین شده با یک زبان سطح بالا ممکن است در زمان انجام محاسبات، کاهش چشم‌گیری بدست آید.

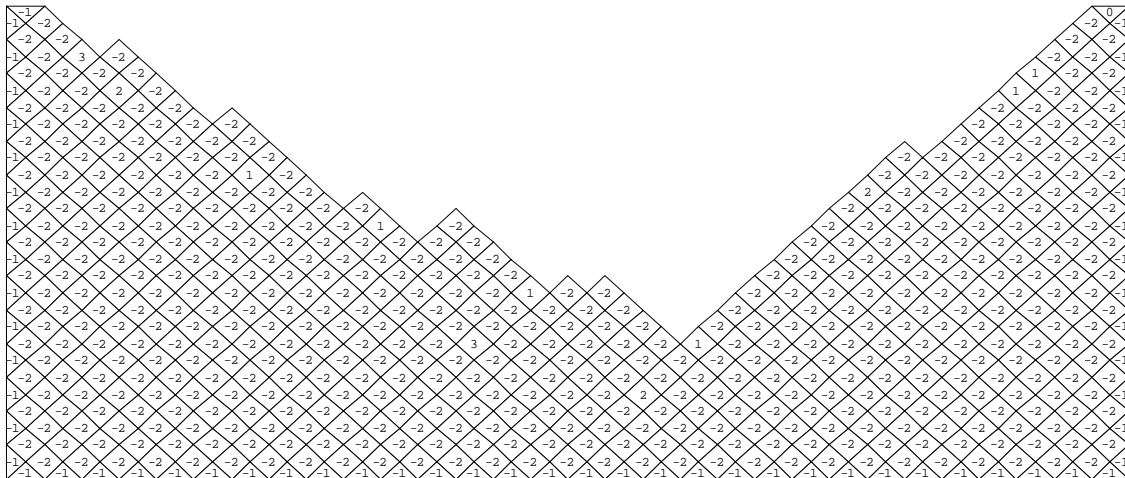
۶- نتیجه گیری

هدف از الگوریتم ارائه شده در این مقاله، یافتن محدوده‌ای است که با استخراج آن و با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی و هندسی معدنکاری روباز، حداکثر سود حاصل شود. در این مقاله، برای کاربرد الگوریتم KG-PLO ابتدا باید مدل بلوکی اقتصادی دو بعدی محدوده معدنی تهیه و سپس به مدل پایداری شیب تبدیل شود. برای تحلیل مدل اخیر، از مفاهیم روش گروه‌های کلیدی که به طور خاص به منظور تحلیل پایداری شیب‌های سنگی بکار می‌رود، استفاده شده است. این الگوریتم از گروه الگوریتم‌های دارای منطق ریاضی است و از این رو قادر است محدوده بهینه واقعی را ارائه نماید. بدلیل اجرای مرحله‌ای الگوریتم، حجم محاسبات و در نتیجه زمان پردازش داده‌ها برای اجرای آن کم است.

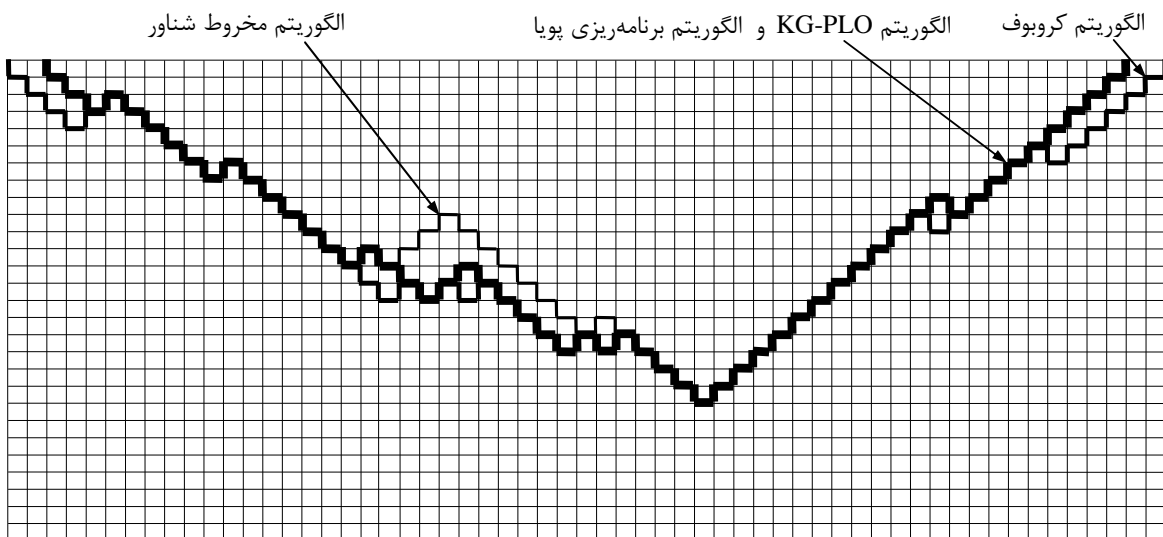
در صورتی که مبانی نظری روش دو بعدی گروه‌های کلیدی به سه بعد گسترش یابد می‌توان با بسط الگوریتم سه بعدی از آن برای بهینه‌سازی محدوده معدنکاری روباز استفاده کرد. برای اجرای الگوریتم، یک برنامه کامپیوتری در محیط Mathematica پیاده‌سازی شده و بر روی یک مدل دو بعدی اجرا و نتایج آن گزارش شده است. در پایان نتایج حاصله با نتایج بدست آمده از برنامه کامپیوتری UPL به روش‌های مختلف مقایسه شده است که نشان دهنده تطابق خوبی می‌باشد.



الف- مدل بلوکی معدن



ب- محدوده بهینه معدنکاری روباز پس از اجرای برنامه کامپیوتری
شکل ۸: نتیجه اجرای برنامه کامپیوتری بر روی یک مدل اقتصادی



شکل ۹: کاواک‌های معدن بدست آمده از چهار روش کروبووف، مخروط شناور، برنامه‌ریزی پویا و KG-PLO

منابع

- [۶] امامی میبیدی، عنایت ا...، یاراحمدی بافقی، علی رضا؛ سالاری راد، حسین؛ (۱۳۸۶)؛ "روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار در تحلیل پایداری شیب سنگ‌های درزه‌دار"؛ مجله علمی و پژوهشی مهندسی معدن، دور دوم، ش ۴، ص ۵۵ تا ۶۳.
- [7] 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, pp. 139-147.
- [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, pp. 1019-1043.
- [9] Yarahmadi-Bafghi, A.R.; Verdel, T.; 2003; "*The key-group method*", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, pp. 495-511.
- [10] David Drew; 2000; "Ultimate Pit Limit Generator Software, Version 1.13.
- [1] Cormen, T. H. and et al., 2001; "*Introduction to Algorithms*", 2nd Edition, McGraw Hill.
- [2] Kim, Y. C.; 1987; "*Ultimate Pit Design Methodologies Using Computer Models-The State of the Art*" Mining Engineering, Society For Mining Metallurgy and Exploration, Inc, Colorado, pp. 133-138.
- [3] Jalali, S. E.; Atae-pour, M.; Shahriar, K.; 2006; "*Pit Limit Optimization Using Stochastic Process*", CIM Bulletin, Vol. 99, No. 1024, pp. 1-11.
- [4] Jalali, S. E.; Ataeepur, M.; Shahriar, K.; 2007; "*Rigorous Algorithmes to Optimise Slope Boundaries*"; *Capabilities, Restrictions and Applications*, 7th International Scientific Conference, SGEM 2007, Bulgaria.
- [5] Goodman, Richard, E. and Shi-Gen-Hua; 1985; "*Block theory and its application to rock engineering*", Prentice- Hall, New Jersey.

- ¹ Rigorous
² Heuristic
³ Key block
⁴ Key group method (KGM)
⁵ Key Group – Pit Limits Optimizer
⁶ Economic block model
⁷ Ultimate Pit Limits