

## ارایه روشی برای کنترل راستای پیشروی استخراج تخریب بلوکی

فرشاد نژاد شاه محمد<sup>۱\*</sup>، محمدباقر فتحی<sup>۱</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

(دریافت ۱۳۹۸/۰۱/۲۱، پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۱۳)

### چکیده

امروزه توانایی تولید بزرگ مقیاس و میزان بالا در معادن تخریب بلوکی منجر به توجه بیشتر در بهینه‌سازی عملیات استخراج این معادن شده است. تخریب یکنواخت این معادن به معنای هم‌زمان بودن شروع تخریب از تمام بلوک‌ها نیست. در گسترش تخریب ایمن که با کنترل راستای پیشروی تخریب همراه است، باید دوره زمانی شروع به فعالیت هر بلوک مشخص و سپس بر مبنای برنامه‌ریزی تولید، آهنگ‌های تخریب کل معدن تعیین شود. در مسایل برنامه‌ریزی تولید تخریب بلوکی یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها کنترل راستای پیشروی تخریب است. در کنترل این راستا عامل بحرانی مساله برنامه‌ریزی تولید، اولویت‌بندی بین بلوک‌ها در شروع فرآیند تخریب با توجه به موقعیت مکانی هر بلوک است. هدف اصلی این تحقیق تعیین تقدم‌بندی بین بلوک‌ها با توجه به راستای پیشروی است. این مقاله سعی دارد تا رویکردی ابتکاری با استفاده از نرم‌افزار متلب ارایه کند تا وابستگی به محاسبات زمان‌بر و سلیقه‌ای طراحان در تقدم‌بندی شروع فعالیت بلوک‌ها حذف شود. در این رویکرد با وارد کردن هر راستای پیشروی تخریبی، نظم و ترتیب زمانی استخراج بین بلوک‌ها محاسبه شده و در نهایت خروجی آن به عنوان یک محدودیت اصلی در مسایل زمان‌بندی تولید استفاده می‌شود. در بررسی مدل پیشنهادی، ۹۸ بلوک از معدن نورثپارک برای ۱۲ دوره زمانی از عمر معدن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج اجرای مدل پیشنهادی در دو راستای غرب-شرق و جنوب-شمال نشان داد که بلوک‌های واقع در نقاط شروع راستای تخریب، در دوران اول و با پیشروی به نقاط واقع در انتهای راستای تخریب، بلوک‌ها در اواخر عمر معدن وارد فرآیند تخریب می‌شوند.

### کلمات کلیدی

تخریب بلوکی، کنترل راستای پیشروی تخریب، دوره زمانی شروع تخریب، نرم‌افزار متلب.

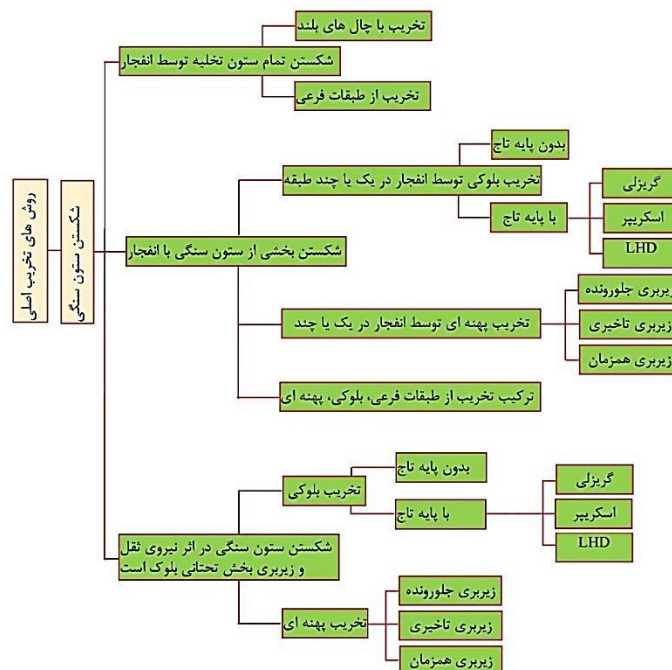
## ۱- مقدمه

پرکاربردترین روش استخراج تخریبی، تخریب بلوکی است. یکی از دلایل نام‌گذاری این روش به شیوه جانمایی شبکه معدن مربوط می‌شود که در آن کل محدوده به بخش‌های بزرگی به نام بلوک تقسیم و از هر بلوک، استخراج به وسیله تعدادی دهانه تخلیه انجام می‌شود. برای شروع استخراج در این روش تعدادی تونل در زیر هر بلوک ایجاد شده و در مرحله بعد این بلوک‌ها از طریق آتشباری تونل‌های ایجاد شده وارد فاز تخریب و تولید می‌شوند. با گسترش تخریب، دهانه‌های تخلیه هر بلوک به تدریج و بر اساس راستای پیشروی تخریب<sup>۶</sup> وارد تخلیه و فرآیند استخراج می‌شوند. مواد تخریب شده از طریق دهانه‌های تخلیه وارد تونل‌های بارگیری شده و بر اساس سیستم حمل و نقل موجود (نوار نقاله، LHD، اسلاشر و یا ثقل) به واحدهای فرآوری در سطح زمین ارسال می‌شود.

یکی از دغدغه‌های اصلی در تخریب بلوکی به دوره‌های استخراجی بعد از تخریب کامل بلوک‌ها برمی‌گردد. به نحوی که باید به طریقی تخریب و جابه‌جایی مواد در منطقه تخریب و آهنگ تخلیه از دهانه‌های تخلیه را کنترل کرد تا نشست‌های گسترده و ناخواسته در سطح زمین و رقیق‌شدگی رخ ندهد. بنابراین پیش‌بینی و کنترل نشست و آثار زیست‌محیطی و حفظ ایمنی در این روش بسیار مهم است [۵]. بزرگی این

اقتصاد صنعت معدنکاری باعث شده است که شرکت‌های بزرگ معدنی تمایل به سمت روش‌های استخراج توده‌ای<sup>۱</sup> داشته باشند. بررسی مسایل زیست‌محیطی و ژئوتکنیکی به دلیل ماهیت پیچیده آن‌ها و اثرات متقابل توده سنگ و تاثیر آن‌ها در چگونگی پیشروی افقی و قائم تخریب، روند رو به رشدی در محاسبات عملیات استخراج دارد [۱]. روش‌های تخریبی نیازمند آماده‌سازی‌های وسیع و روش‌هایی پرهزینه است ولی به دلیل تناژ تولید بالایی که دارند هزینه آن‌ها کاهش می‌یابد. طبق نتایج تحقیقات مونرو<sup>۲</sup>، اگر استخراج از معادن تخریبی با دیدگاه اقتصادی همراه باشد باید شروع تخریب از مناطق با عبارهای بالاتر انجام گیرد تا منجر به حداکثرسازی ارزش خالص فعلی<sup>۳</sup> شود [۲]. همچنین طبق نظر لابسچر<sup>۴</sup> [۳]، در روش‌های تخریبی بلوک معدنی به صورت طبیعی بعد از زیربری تخریب شده و مواد تخریبی از طریق دهانه‌های تخلیه بازیابی می‌شوند. چگونگی شروع و کنترل راستای پیشروی تخریب از پارامترهای بحرانی در افزایش بازیابی این معادن است.

تقسیم‌بندی روش‌های تخریبی در شکل ۱ نشان داده شده است [۴]. گوناگونی روش‌های تخریبی به شروع و روند گسترش تخریب<sup>۵</sup> در مرحله قبل از استخراج مربوط می‌شود.



شکل ۱: گوناگونی روش‌های تخریبی [۴]

فاصله‌داری دهانه‌های تخلیه و طراحی استراژی‌های تخلیه و تولید نقش اساسی را در برنامه‌ریزی تولید این معادن دارند [۱۳، ۱۴]. به طور کل طراحی صحیح معدن بر مبنای کنترل راستای پیشروی تخریب [۱۵]، ایجاد و سازمان‌دهی سیستم کنترل تخلیه دقیق [۳] دو معیار بحرانی در کارایی روش‌های تخریبی برای استخراج‌های توده‌ای را تعیین می‌کنند. اگر این دو عامل در نظر گرفته نشود، هزینه‌های استخراج مرتبط با تخریب ممکن است از سایر روش‌های استخراج بزرگ‌مقیاس زیرزمینی بیشتر شود [۷].

در تحقیقات یان و گرایسون<sup>۶</sup> [۱۶]، توپال<sup>۸</sup> [۱۷]، کوچتا<sup>۹</sup> و همکاران [۱۸]، مارتینز و نیومن<sup>۱۰</sup> [۱۹]، پوررحیمیان و همکاران [۶]، نژاد شاه محمد و همکاران [۸] و خدایاری و همکاران [۲۰]، از برنامه‌ریزی عدد صحیح به عنوان ابزاری در مدلسازی مساله استفاده شده است. در اکثر مدل‌های پیشنهادی که با هدف برنامه‌ریزی تولید است، راستای پیشروی از بلوک‌های استخراج به عنوان محدودیت در برنامه‌ریزی تولید وارد شده است. در تحقیقی که نژادشاه محمد و همکاران [۸، ۷] ارایه کردند کنترل راستای پیشروی تحقیق به عنوان یک محدودیت در مساله زمان‌بندی تولید وجود دارد ولی تقدم‌بندی استخراج از بلوک‌ها که باید قبل از مساله زمان‌بندی تولید انجام گیرد، به صورت دستی محاسبه شده است. این در حالی است که در معادنی با بلوک‌های زیاد امکان این تقدم‌بندی بین بلوک‌ها به صورت دستی وجود ندارد و یا با خطای زیادی همراه است. بنابراین لازم است تا رویکردی ارایه شود که وابستگی به این محاسبات دستی در محدودیت راستای پیشروی تخریب حذف شود و طبق یک رویکرد منطقی و بر اساس راستای پیشروی مورد نظر، محاسبات لازم قبل از زمان‌بندی تولید انجام گیرد.

در سایر تحقیقاتی که در معادن زیرزمینی انجام گرفته است می‌توان به تحقیقات ماگدا<sup>۱۱</sup> [۲۱] اشاره کرد. در این تحقیق وی از متغیرهای گسسته در ارزیابی تصمیم‌گیری‌های اقتصادی با هدف حداکثرسازی NPV در معدن جبهه‌کار طولانی بهره گرفت. وینکلر<sup>۱۲</sup> [۲۲] مدل برنامه‌ریزی تولید را برای تعیین مقدار مواد استخراجی در هر دوره زمانی بر اساس ترکیب مدل‌های برنامه‌ریزی خطی و شبیه‌سازی در معادن تخریب از طبقات فرعی پیشنهاد کرد. اسمیت<sup>۱۳</sup> و همکاران [۲۳] بدون توجه به ضرورت کنترل راستای پیشروی استخراج، مدل برنامه‌ریزی تولیدی در معدن مونت ایزا<sup>۱۴</sup> را با هدف

نشست‌ها تابعی مستقیم از اجرای صحیح فرآیند تخریب و تخلیه از دهانه‌های تخلیه، توپوگرافی سطح زمین و ساختار طبقات بالایی است. در دوره‌های قبل از استخراج برای برآورد دقیق از نحوه گسترش نشست در سطح زمین و کنترل آن، همچنین افزایش منافع اقتصادی استخراج و کنترل ایمنی معدن باید راستای گسترش تخریب تعیین و بهترین راستای استخراج با در نظر گرفتن ملاحظات ایمنی و اقتصادی انتخاب شود [۶]. پیشرفت‌های موجود در زمینه طراحی، برنامه‌ریزی، مدلسازی فرآیند تخریب و حجم تولید گسترده آن سبب شده است تا امروزه این روش‌ها به عنوان یکی از گزینه‌های اول در استخراج محدوده‌های معدنی عمیق با هندسه پیچیده و سنگ میزبان متوسط تا مقاوم مطرح شوند.

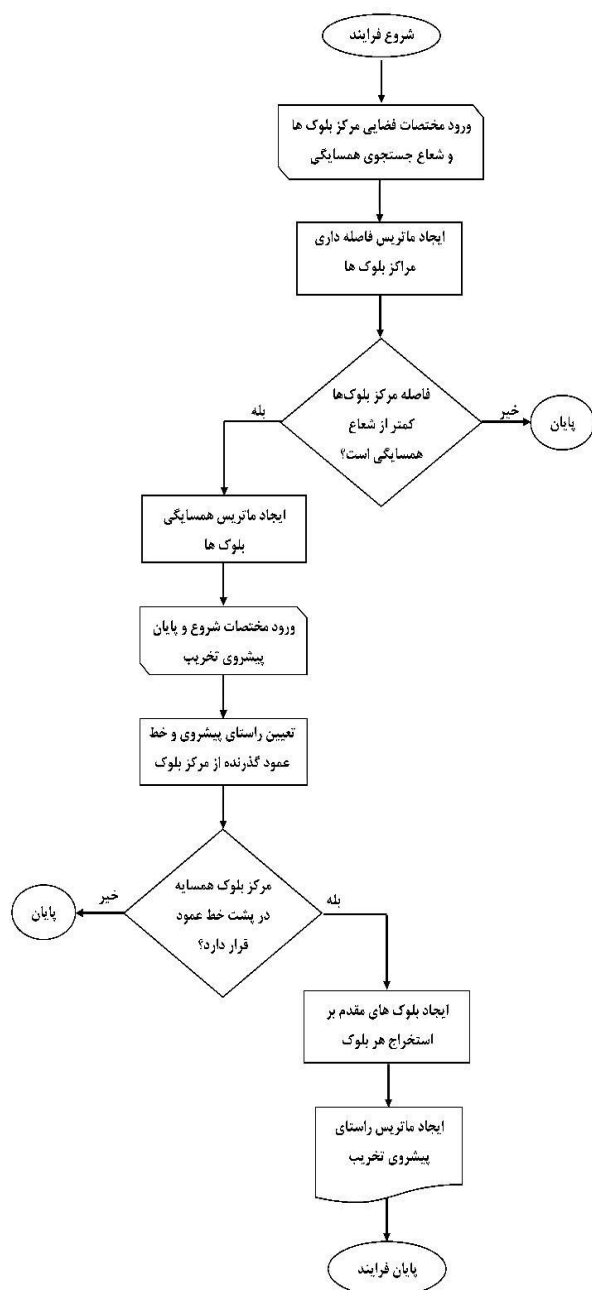
کنترل راستای پیشروی تخریب، فاصله‌داری دهانه‌های تخلیه، خردایش توده سنگ و الگوی تخلیه از دهانه‌های تخلیه به عنوان چهار عامل اصلی در معادن تخریبی می‌تواند فرآیند رقیق‌شدگی و استخراج مواد معدنی را تحت تاثیر قرار دهد [۸، ۷]. با توجه به کاهش قیمت جهانی فلزات در بلندمدت سعی بر آن است تا هزینه‌های استخراج و تولید مواد معدنی کاهش یابد بنابراین تحلیل و بررسی مسایل اقتصادی و عملیاتی تولید یکی از پارامترهای مهم در افزایش سودآوری صنایع معدنی است. با وجود پیشرفت‌های موجود در علوم محاسباتی، نرم‌افزاری و مدلسازی، طراحی‌های واقعی عمدتاً بر اساس قضاوت‌های مهندسی و عملیات تجربی است [۹]. بهبود قدرت سیستم‌های رایانه‌ای و الگوریتم‌های زمان‌بندی در طول سال‌های گذشته به مهندسان این اجازه را داده است تا بتوانند مدل‌هایی ایجاد کنند که قابلیت برنامه‌ریزی سیستم‌های استخراج پیچیده را داشته باشند [۱۰]. بنابراین امروزه می‌توان مدل‌های پیچیده‌ای ایجاد کرد که با در نظر گرفتن اجزا ضروری یک معدن تخریبی، زمان‌بندی تولید بهینه، عملی و قوی ارایه کنند. البته برنامه‌ریزی معادن شامل تعریف منبع، مقصد و زمان استخراج ماده معدنی از باطله در طول عمر معدن است. زمان‌بندی تولید هر پروژه معدنی تاثیر زیادی در اقتصاد آن پروژه دارد. امروزه به دلیل رویارویی با مواد معدنی با عبارهای کم و ذخایر حاشیه‌ای، برنامه‌ریزی تولید یکی از اجزا کلیدی در افزایش ارزش منابع معدنی است [۱۱، ۱۲]. تعیین ارتفاع بلوک استخراج، آهنگ‌های تولید، الگوهای زیربری (پیشروی تخریب)، جانمایی افق‌های تولید، آهنگ‌های استخراج، سیستم‌ها و زیرساخت‌های حمل و نقل مواد، پیش‌بینی خردایش، مطالعه جریان ثقلی مواد،

بتواند به طور منظم و در یک چارچوب عملیاتی به تقدمبندی بلوک‌های استخراجی در معادن تخریب بلوکی بپردازد در هیچ تحقیق و گزارشی ارایه نشده است، بنابراین یکی از اهداف مقاله حاضر ارایه مدلی است که بتواند راستای گسترش تخریب در معادن تخریب بلوکی و یا راستای پیشروی کارگاه‌های استخراج در هر نوع معدن زیرزمینی دیگر را در مدل‌های برنامه‌ریزی تولید پیش‌بینی و کنترل کند. این رویکرد با استفاده از نرم‌افزار متلب<sup>۲۳</sup> ماتریس بلوک‌های مقدم بر استخراج هر بلوک را ایجاد می‌کند. در مسایل برنامه‌ریزی تولید با استفاده از این ماتریس می‌توان قبل از استخراج هر بلوک، بلوک‌های ماقبل آن را محاسبه و تعیین کرد و با استخراج به موقع این بلوک‌ها، به راستای پیشروی تخریب مورد نظر رسید. بنابراین در مدل ارایه شده این تحقیق انتخاب راستای پیشروی تخریب هیچ نوع محدودیتی ندارد و طراح می‌تواند با وارد کردن راستای پیشروی مورد نظر بهترین مسیر تخریب را به مدل اعمال کند. این راستا ظرفیت استخراج و تولید بهینه را در سال‌های مختلف عمر معدن برآورده خواهد کرد. نکته مهم، خروجی این مدل است که می‌تواند در مسایل برنامه‌ریزی تولید در محدودیت کنترل راستای پیشروی استخراج استفاده شود. به نحوی که بر اساس نوع تابع هدف مساله برنامه‌ریزی (اقتصادی و یا غیراقتصادی)، طراح راستای پیشروی تخریب را تعیین و سپس توسط این رویکرد می‌تواند در طی کمترین زمان ممکن و بدون خطا تقدمبندی بلوک‌ها را تعیین و سپس در مساله زمان‌بندی تولید خود از آن استفاده کنند.

## ۲- فرمول‌بندی ریاضی مدل

در انتخاب راستای تخریب، معیارهای مختلفی وجود دارد. بر اساس طرح استخراج اگر هدف حداکثرسازی سودآوری باشد، بنابراین شروع تخریب از مناطق پر عیار و با تناژهای بالاتر است و به مناطق کم‌عیار پیشروی می‌کند. در برخی موارد توجه به راستای تنش‌های اصلی، تعیین‌کننده راستای پیشروی استخراج است در چنین حالاتی، طراح معدن باید بتواند بر اساس مدلی مناسب این راستای تخریب را قبل از انجام زمان‌بندی تولید، در معدن پیاده کند. در این حالت بلوک‌های استخراجی که قرار است در راستای مورد نظر به ترتیب و بر اساس تقدمبندی استخراج<sup>۲۴</sup> وارد فرآیند تخریب شوند، مشخص می‌شود. یا به بیان ساده‌تر، برای هر بلوک باید بلوک‌های مقدم بر تولید آن تعیین شود.

حداکثرسازی NPV ارایه کردند. سارین و وست هانسن<sup>۱۵</sup> [۲۴] مدل MIP<sup>۱۶</sup> در برنامه‌ریزی تولید بلند مدت را برای یک معدن جبهه‌کار طولانی و اتاق پایه با هدف حداکثرسازی NPV ارایه کردند. در این مدل‌ها اهمیت راستای پیشروی استخراج به عنوان یکی از عوامل موثر در طراحی نادیده گرفته شده است. ایپستین<sup>۱۷</sup> و همکاران [۲۵] بر اساس مدل MIP و نمایش جریان شبکه‌ای به بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید بلندمدت معادن تخریب بلوکی مس و معادن روباز با در نظر گرفتن محدودیت خوراک کارخانه فرآوری پرداختند. نیرینگ<sup>۱۸</sup> و همکاران [۲۶] در کار خود برای معادن استخراج از طبقات فرعی طرح‌های زمان‌بندی بلندمدت و کوتاه‌مدت را ارایه کردند. کنترل پیشروی استخراج کارگاه‌ها در مدل آن‌ها به صورت شبیه‌سازی بود. در مدلی دیگر آن‌ها سعی کردند تا اختلاف بین عیار تولیدی و عیار مطلوب را به حداقل برسانند. روبیو<sup>۱۹</sup> [۲۷]، روبیو و همکاران [۲۸] مفهوم کنترل پیشروی تخریب را با تمرکز بر سیستم کنترل از دهانه‌های تخلیه در معادن تخریب بلوکی و تخریب از طبقات فرعی در مدل‌های شبیه‌سازی و ریاضی استفاده کردند. مدل مفهومی در مورد اهمیت در نظر گرفتن راستای تنش‌های اصلی منطقه در پیشروی معادن تخریب بلوکی توسط بک<sup>۲۰</sup> و همکاران [۲۹] ارایه شد. آن‌ها در این تحقیق به بررسی روش زیربری در آثار مخرب زیست‌محیطی تخریب پرداختند. رهال<sup>۲۱</sup> [۳۰]، رهال و همکاران [۳۱] در مدل برنامه‌ریزی ریاضی که برای معادن تخریبی ارایه کرده بودند از روش‌های شبیه‌سازی به تعیین بلوک‌های مقدم بر تولید پرداختند و سپس با تعیین این بلوک‌ها به صورت مستقل، آن‌ها را در برنامه‌ریزی تولید وارد کردند. چنین فرآیندی همچنین توسط اسمالجنوییک<sup>۲۲</sup> و همکاران [۳۲] در مدلسازی یک معدن تخریب بلوکی استفاده شد. آن‌ها با وارد کردن محدودیت تقدمبندی استخراج در مدل‌های ریاضی برنامه‌ریزی تولید واقعی‌تری را انجام دادند. در اکثر تحقیقاتی که در زمینه برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی و به ویژه تخریب بلوکی انجام گرفته است، همواره اهمیت توجه به راستای پیشروی تخریب لحاظ شده است. همچنین در برخی از این تحقیقات محدودیت کنترل پیشروی تخریب در فرمول‌بندی این مسایل وجود دارد ولی در بیشتر موارد اعمال چنین محدودیتی در برنامه‌ریزی تولید بر اساس تجربه و یا تلفیقی از چند روش مختلف است. با توجه به آنچه گفته شد تا به امروز الگوریتم و روشی که



شکل ۲: الگوریتم کلی ایجاد مجموعه ماتریس راستای پیشروی تخریب (استخراج)

واقع در این دایره می‌توانند قبل و یا بعد از بلوک مورد نظر استخراج شوند. بنابراین ماتریس همسایگی بلوک ۱۴ دارای ابعاد  $(8 \times 1)$  و بلوک شماره ۱ با ابعاد  $(3 \times 1)$  است. رابطه کلی تعیین همسایگی از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$0 < E.D_{ij} \leq \frac{R}{E.D_{max}} \quad (2)$$

در این تحقیق برای ایجاد مدل تقدم‌بندی در حالت دوبعدی، از محیط برنامه‌نویسی متلب استفاده شد. اگر تعداد بلوک‌های استخراجی برابر با  $n$  فرض شود در آن صورت برای هر بلوک استخراجی چون  $i$ ، یک مجموعه ماتریس همانند  $S_i$  وجود دارد که دربرگیرنده تمام بلوک‌های مقدم بر استخراج بلوک  $i$  است. ابعاد چنین ماتریسی متغیر است و به تعداد بلوک‌های مقدم بر تولید آن بلوک بستگی دارد. الگوریتم کلی در ایجاد مدل مربوط به این تحقیق همانند شکل ۲ است. برای تشریح مدل راستای پیشروی تخریب، مدلی فرضی همانند شکل ۳ در نظر گرفته شد که در این مدل  $n=20$  است. پارامتر شعاع جستجو برای تعیین بلوک‌های مجاور به هر بلوک مورد نظر  $i$  با شاخص  $R$  نشان داده شده است بدین ترتیب برای هر بلوک، دایره‌ای با شعاع  $R$  در مرکز آن بلوک رسم و مراکز بلوک‌های مجاور که در داخل این دایره باشد، به عنوان همسایگی آن بلوک فرض می‌شود.

در اولین گام از فرآیند ساخت مدل، ابتدا ماتریس فاصله نرمال شده مابین بلوک‌ها ایجاد می‌شود. این ماتریس با ابعاد  $(n \times n)$  به محاسبه فاصله اقلیدسی میان مراکز تمام بلوک‌ها می‌پردازد. رابطه کلی تعیین فاصله مابین دو بلوک  $i$  و  $j$  به شکل رابطه ۱ است:

$$E.D_{ij} = \frac{\sqrt{(\chi_i - \chi_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{E.D_{max}} \quad (1)$$

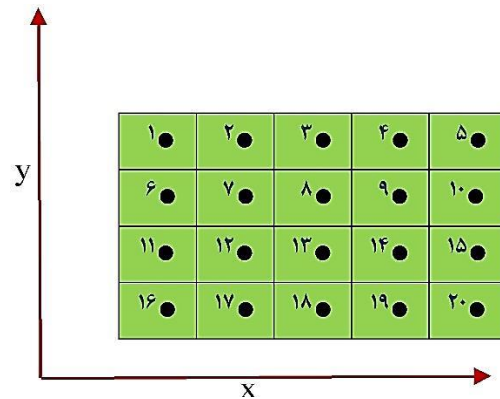
که در آن:

$x$  و  $y$ : مشخصات فضایی مراکز بلوک‌های  $i$  و  $j$   
 $E.D_{max}$ : بیشترین فاصله میان بلوک‌ها در ماتریس فاصله ساختار کلی برای ماتریس فاصله نرمال شده در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است باید فاصله مرکز به مرکز برای تمام بلوک‌ها تعیین شود. در این ماتریس، فاصله‌داری صفر برای بلوک‌های یکسان است.

در گام بعدی، همسایه‌های هر بلوک تعیین می‌شود. بدین منظور همان‌طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است در مرکزیت هر بلوک دایره‌ای به شعاع  $R$  در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۵ برای بلوک شماره ۱۴ بر اساس دایره همسایگی رسم شده، بلوک‌های همسایه عبارت‌اند از ۸، ۹، ۱۰، ۱۳، ۱۵، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ و برای بلوک شماره ۱ بلوک‌های همسایه ۲، ۶ و ۷ است. هدف از تعیین بلوک‌های همسایه در حقیقت به دست آوردن اولیه بلوک‌های مقدم بر تخریب از بلوک مورد نظر بر اساس راستای پیشروی است. این بدان معناست که بلوک‌های



شده از گام قبل، تعداد بلوک‌های مقدم بر تخریب برای هر بلوک تعیین می‌شود. در این گام همان‌طور که در شکل ۷ آمده است با داشتن مختصات فضایی برای نقطه شروع (S) و نقطه پایانی گسترش تخریب (E) با داشتن خط مربوط به راستای پیشروی تخریب، از مرکز هر بلوک یک خط فرضی عمود بر راستای پیشروی تخریب رسم و بلوک‌هایی که مرکز آن‌ها در زیر این خط فرضی باشند، استخراج آن‌ها زودتر از بلوک مورد نظر انجام می‌شود. بر اساس آنچه گفته شد مطابق شکل ۷ برای بلوک ۱۴ بلوک‌های مقدم بر استخراج این بلوک شامل ۸، ۱۳، ۱۸ و ۱۹ است. این بدان معناست که باید قبل از شروع به استخراج از بلوک ۱۴، بلوک‌های مقدم بر آن وارد فرآیند تخریب و استخراج شده باشند. همچنین برای بلوک شماره ۱، بلوک شماره ۶ قبل از استخراج این بلوک باید وارد فرآیند استخراج شود تا گسترش تخریب در راستای مورد نظر انجام گیرد. بدین ترتیب  $S_1 = \{6\}$  و  $S_{14} = \{8, 13, 18, 19\}$  می‌شود. روابط کلی برای تعیین ماتریس راستای تخریب (CD) به صورت زیر خواهد بود. در این ماتریس تعداد اعضا هر آرایه (بلوک) برابر با تعداد بلوک‌های مقدم بر استخراج آن بلوک



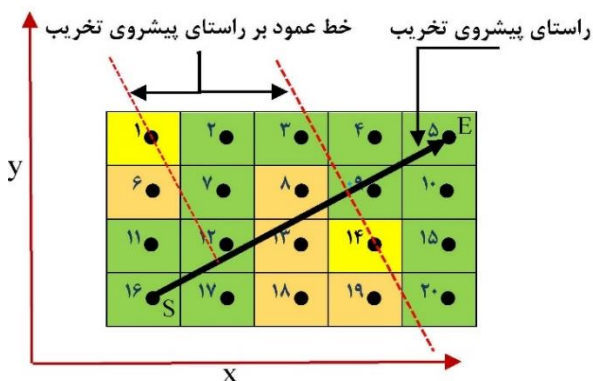
شکل ۳: مدل فرضی با داشتن ۲۰ بلوک استخراجی

$$\begin{matrix}
 \downarrow i & \begin{matrix} \rightarrow j \\ 1 & 2 & 3 & \dots & n \end{matrix} \\
 \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & ED_{1,2} & ED_{1,3} & \dots & ED_{1,n} \\ ED_{2,1} & 0 & ED_{2,3} & \dots & ED_{2,n} \\ ED_{3,1} & ED_{3,2} & 0 & \dots & ED_{3,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ ED_{n,1} & ED_{n,2} & ED_{n,2} & \dots & 0 \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

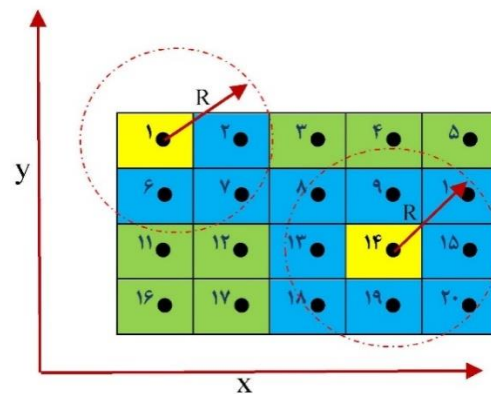
شکل ۴: ساختار ماتریس فاصله نرمال شده

$$NB = \begin{matrix} \downarrow i \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ n \end{matrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} \{b_{1k_1}, b_{1k_2}, \dots, b_{1k_k}\} \\ \{b_{2k_1}, b_{2k_2}, \dots, b_{2k_k}\} \\ \{b_{3k_1}, b_{3k_2}, \dots, b_{3k_k}\} \\ \dots \\ \{b_{nk_1}, b_{nk_2}, \dots, b_{nk_k}\} \end{bmatrix}$$

شکل ۶: ساختار ماتریس همسایگی



شکل ۷: تعیین بلوک‌های مقدم بر استخراج بر اساس راستای پیشروی تخریب



شکل ۵: تعیین بلوک‌های همسایگی

ماتریس همسایگی (NB) با ابعاد  $(n \times 1)$  است. شکل ۶ ساختار کلی ماتریس همسایگی را نشان می‌دهد. در ماتریس NB تعداد اعضا ( $S_k$ ) در هر آرایه برابر با تعداد بلوک‌های همسایگی برای هر بلوک بوده و بنابراین اندیس k در هر آرایه نشان‌دهنده تعداد همسایگی است. در گام بعد بر اساس راستای پیشروی تخریب و ماتریس همسایگی محاسبه

نظر در ماتریس راستای تخریب وارد می‌شود. این ماتریس در نهایت به عنوان خروجی رویکرد پیشنهادی این تحقیق وارد مسایل زمان‌بندی تولید می‌شود. برای درک بهتر از فرآیند برنامه‌نویسی انجام شده در گام‌های مورد نیاز این تحقیق، محیط برنامه‌نویسی این مدل به به صورت ساده شده در شکل ۹ نشان داده شده است.

```

Distance Finder
FOR EACH drawpoint ID dataset
dX=Calculating distance between drawpoints in X direction, Create dX^2
dY=Calculating distance between drawpoints in Y direction, Create dY^2
Distance between drawpoints = sqrt(Distance square)
Distance Matrix= Calculate Distance Matrix()
Adjacent Finder (Search Radius)
FOR EACH drawpoint Distance_Matrix dataset
Adjacement between drawpoints = find(Distance_Matrix ()<- SearchRadius &
Distance_Matrix ()>0)
Adjacement_Matrix= Calculate Adjacement_Matrix()
Caving Advancement Direction Finder
FOR EACH drawpoint ID, COORDINATION dataset
START__END_Point_Direction= Xs, Ys, XE, YE
Slope_Advancement_Line = Calculate Slope,AdvancemtLine
Xmin = Calculate Minimum X
FOR EACH drawpoint ID and FOR EACH Adjacement_Matrix
Ynew(j)= Slope_Advancement_Line.*(Xmin-X(j))+Y(j)
Precedence_finder()= IF(X_Adjacement_Matrix(j)-X(i).*(Ynew(j))-
(Y_Adjacement_Matrix(j)-Y(i)).*(Xmin-X(i))>0)
Precedence_Matrix= Precedence_finder().
NEXT
    
```

شکل ۹: محیط ساده شده از برنامه‌نویسی مدل پیشنهادی

### ۳- اجرای مدل

برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، ۹۸ دهانه تخلیه از معدن تخریب بلوکی نورثپارک<sup>۲۵</sup> مورد بررسی قرار گرفت. دهانه‌های تخلیه (مراکز بلوک‌ها) در این معدن در یک الگوی جناغی<sup>۲۶</sup> واقع شده‌اند (شکل ۱۰).

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، هر دهانه تخلیه دارای ستون تخلیه‌ای است که حداکثر تناژ قابل استخراج از آن دهانه تخلیه را مشخص می‌کند. با توجه به راستای پیشروی در یک معدن تخریب بلوکی، دهانه‌های تخلیه باید با نظم مشخصی شروع به تخریب شوند تا راستای پیشروی مورد نظر به دست آید. طول مدت زمان تخلیه از هر دهانه بر اساس عیار، تناژ ماده معدنی موجود در آن و با توجه به هدف برنامه‌ریزی تولید متغیر است ولی قبل از هر نوع برنامه‌ریزی تولید، طراح باید بر اساس راستای پیشروی و دوره زمانی مورد نظر شروع تخریب از هر دهانه تخلیه را مشخص کند تا راستای

( $S_i$ ) است.

در این روابط:

$x_{min}$ : حداقل طول جغرافیایی موجود در معدن  
 $x_{NB}$  و  $y_{NB}$ : مشخصات مکانی همسایه‌های بلوک  $i$  در ماتریس همسایگی است.

همچنین مشخصات نقاط شروع و پایان راستای پیشروی، به ترتیب با  $(x_S, y_S)$  و  $(x_E, y_E)$  بیان می‌شود. بر مبنای آنچه گفته شد، روابط ۳ و ۴ تعداد بلوک‌های مقدم بر استخراج هر بلوک را تعیین می‌کنند. در مورد بلوک‌هایی که در نقاط شروع مسیر حرکت تخریب‌اند تعداد اعضا ماتریس راستای تخریب برای آن بلوک‌ها صفر می‌شود. این بدین معناست که بلوک‌هایی با اعضا صفر، به عنوان اولین بلوک‌هایی‌اند که وارد فرآیند استخراج می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود اگر راستای پیشروی تخریب از  $S$  به  $E$  باشد، تعداد اعضا بلوک شماره ۱۶ در ماتریس راستای تخریب برابر با صفر می‌شود. بنابراین این بلوک اولین بلوکی است که مورد استخراج قرار می‌گیرد. ساختار کلی ماتریس راستای تخریب همانند شکل ۸ است.

$$\sum_{i=1}^n y_{m_i} = \frac{(x_S - x_E)}{(y_E - y_S)} \cdot [x_{min} - \sum_{i=1}^n x_i] + \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

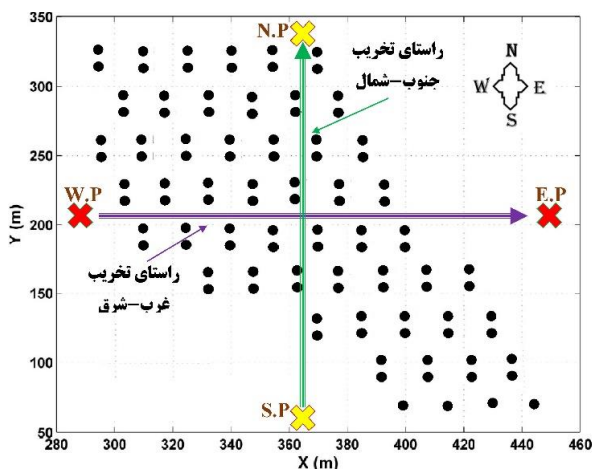
$$\sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K (x_{NB_i} - x_i) \cdot (y_{m_i} - y_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K (y_{NB_i} - y_i) \cdot (x_{min} - x_i) \quad (4)$$

$$CD = \begin{matrix} i \downarrow \\ \begin{Bmatrix} \{S_1\} \\ \{S_2\} \\ \{S_3\} \\ \dots \\ \{S_n\} \end{Bmatrix} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ n \end{matrix}$$

شکل ۸: ساختار کلی ماتریس راستای تخریب

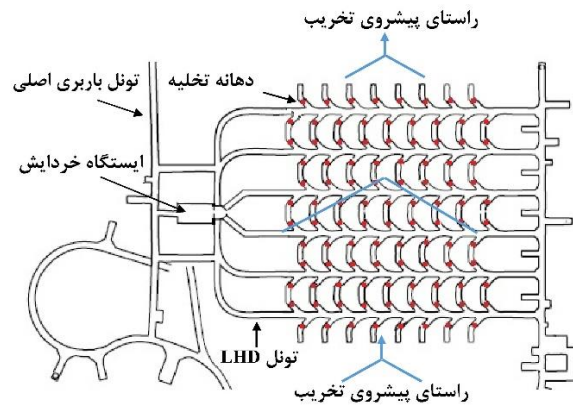
بدین ترتیب، برای استخراج هر بلوک باید بلوک‌های مقدم بر آن پیش‌تر استخراج شوند تا راستای پیشروی مورد نظر حاصل شود. این بلوک‌ها به عنوان تعداد اعضا آن بلوک مورد

در این رابطه  $Z$  متغیر عدد صحیح است که زمان شروع به فعالیت هر دهانه تخلیه را نشان می‌دهد. بر اساس این رابطه برای شروع به فعالیت هر دهانه تخلیه در هر دوره زمانی ( $t$ ) باید دهانه‌های تخلیه مقدم بر آن در ماتریس راستای تخریب وارد فاز تخریب و تولید شده باشد. بنابراین قبل از انجام برنامه‌ریزی تولید نیاز است تا ماتریس راستای تخریب به دست آید. برای شروع مدلسازی، با توجه به راستای تخریب، نقاط شروع و پایان پیشروی تعیین می‌شود. در ارزیابی مدل فرض می‌شود، دهانه‌های تخلیه در دو راستای پیشروی جنوب به شمال و غرب به شرق همانند شکل ۱۱ بتوانند وارد فرآیند تخریب و استخراج شوند. موقعیت دهانه‌های تخلیه و مشخصات راستای پیشروی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

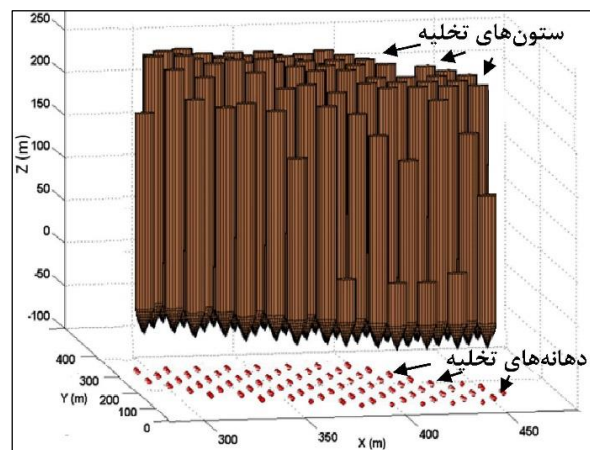


شکل ۱۲: موقعیت نقاط شروع و پایان راستای تخریب

در جدول ۱ مشخصات نقاط شروع و پایان راستای پیشروی در هر دو جهت آمده است. در این محدوده حداقل طول جغرافیایی موجود در محدوده معدن برای استفاده در رابطه ۳، ۲۸۰ و حداقل عرض جغرافیایی نیز ۵۰ متر است. فاصله دهانه‌های تخلیه در این معدن در راستای  $x$ ، ۱۵ متر و در راستای  $y$ ، ۱۲ متر است. با توجه به فاصله قطری میان دهانه‌ها در حداقل مقدار ۲۳ متر، مقدار پارامتر شعاع جستجو برای تعیین همسایگی بین دهانه‌ها، ۲۳ متر در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص شده است اگر شعاع جستجو عددی بزرگ انتخاب شود، تعداد همسایگی‌های مشترک مابین دو دهانه تخلیه مجاور افزایش می‌یابد. به عنوان مثال اگر شعاع جستجو همسایگی به ۳۵ متر افزایش یابد،



شکل ۱۰: مقطع افقی از الگوی قرارگیری دهانه‌های تخلیه



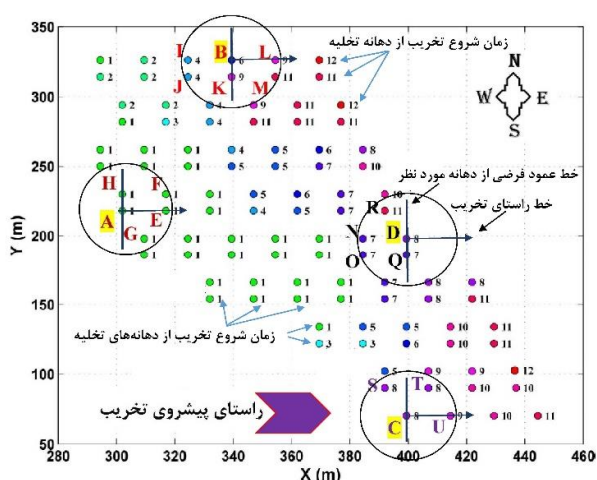
شکل ۱۱: موقعیت فضایی دهانه‌های تخلیه و ستون‌های تخلیه

تخریب کلی معدن به دست آید. با تعیین این دوره زمانی، در نهایت می‌توان برنامه‌ریزی تولید بهینه را انجام داد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد نژاد شاه محمد و همکاران [۷] در کار خود مدل MILP<sup>۲۷</sup> در برنامه‌ریزی تولید بلندمدت معدن تخریب بلوکی را بر اساس حداکثرسازی NPV و با در نظر گرفتن محدودیت‌های مختلف عملیاتی ارائه کردند. آن‌ها در مدل پیشنهادی خود محدودیت راستای پیشروی تخریب را به صورت دستی محاسبه کردند. با توجه به اینکه مبنای مدل MILP آن‌ها خارج از موضوع این مقاله است بنابراین مخاطب در صورت علاقه می‌تواند به منبع [۷] مراجعه کند. محدودیت راستای پیشروی تخریب در مساله زمان‌بندی تولید آن‌ها از رابطه ۵ به دست می‌آید [۷]:

$$Z_{i,t} - \sum_{k=1}^t Z_{k,t} \leq 0 \quad (5)$$



در شکل ۱۴ آمده است. دهانه‌های تخلیه می‌توانند در طی ۱۲ سال شروع به تخریب شوند، بنابراین با توجه به راستای پیشروی تخریب برای هر دهانه دوره زمانی شروع به فعالیت با در نظر گرفتن همسایه‌های آن، در بازه ۱ تا ۱۲ سال خواهد بود. برای تبیین مدل در شکل ۱۴، دهانه‌های تخلیه همسایه، خط راستای پیشروی و دهانه‌های مقدم بر استخراج دهانه‌های تخلیه A، B، C و D نشان داده شده است. در این شکل اعداد نشان داده شده در کنار هر دهانه تخلیه بیانگر زمان شروع به استخراج از آن دهانه برای رسیدن به راستای پیشروی تخریب مورد نظر است.

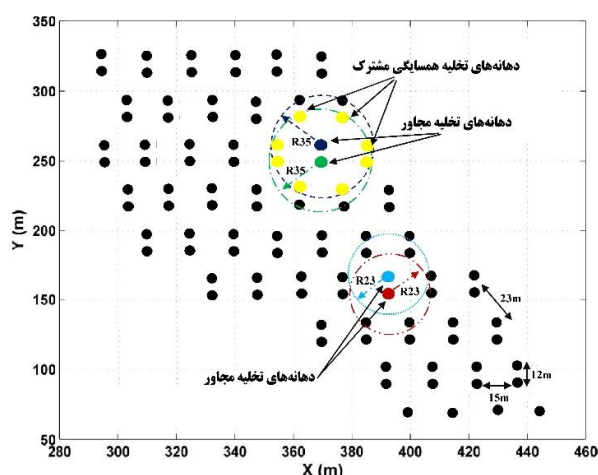


شکل ۱۴: اعمال مدل پیشروی تخریب در راستای غرب-شرق

در راستای نشان داده شده، دهانه تخلیه A با توجه به موقعیت خط فرضی عمود بر آن دارای دهانه تخلیه مقدم بر تولید نیست. این بدان معناست که این دهانه می‌تواند در اولین دوره از عمر معدن شروع به فعالیت کند. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، سال شروع تخریب این دهانه تخلیه با استفاده از مدل پیشنهادی نیز سال ۱ است. بر اساس نتایج مدل‌سازی انجام شده برای تمام دهانه‌های تخلیه در این راستا، آن دسته از دهانه‌های تخلیه‌ای که در بخش‌های غربی محدوده قرار دارند در سال‌های اول، دوم و سوم از عمر معدن شروع به فعالیت می‌کنند و با رسیدن به بخش‌های شرقی محدوده، دهانه‌های تخلیه در اواخر عمر معدن فعالیت خود را می‌توانند آغاز کنند. بنابراین در این راستا مدل به خوبی توانسته است گسترش راستای پیشروی تخریب را اعمال و ارزیابی مناسبی از عملکرد رویکرد پیشنهادی ارائه کند.

جدول ۱: موقعیت نقاط شروع و پایان پیشروی استخراج تخریب بر اساس راستای انتخابی

دهانه تخلیه	راستای S-N		راستای W-E	
	علامت	(X,Y)	علامت	(X,Y)
نقطه شروع	S.P	۶۰,۳۷۰	W.P	۲۹۰,۲۱۰
نقطه پایان	N.P	۳۴۰,۳۷۰	E.P	۴۴۰,۲۱۰



شکل ۱۳: تاثیر شعاع همسایگی در تعداد دهانه‌های مشترک

تعداد همسایه‌های مشترک بین دو دهانه تخلیه مجاور نشان داده شده در شکل ۱۳ به ۸ دهانه تخلیه می‌رسد.

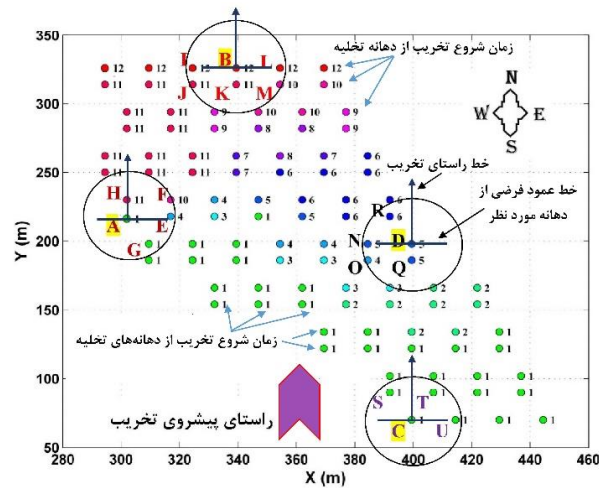
بنابراین ابعاد مدل در مسایل زمان‌بندی تولید افزایش خواهد یافت. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است با انتخاب شعاع همسایگی ۲۳ متر، نقاط تخلیه مجاور دارای همسایگی مشترک نخواهد بود. در این حالت نیاز به محاسبات اضافی وجود ندارد و ابعاد مساله برنامه‌ریزی تولید نیز کمتر است. به طور کلی، این شعاع باید در اندازه‌ای باشد که تعداد همسایه‌های مشترک بین دو دهانه تخلیه مجاور حداقل باشد. هرچند بزرگ بودن شعاع همسایگی مشکلی را در رویکرد پیشنهادی این تحقیق ایجاد نمی‌کند و فقط برای کاهش ابعاد مساله زمان‌بندی تولید بهتر است این همسایگی به نحو مناسب انتخاب شود.

با انتخاب شعاع جستجوی مناسب در گام نهایی با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۴ و با توجه به راستای پیشروی تخریب مورد نظر، دهانه‌های تخلیه مقدم بر استخراج هر دهانه به دست می‌آید. نتایج اجرای مدل پیشنهادی در راستای غرب به شرق

دهانه تخلیه A در هر دو راستا و در دوره اول از عمر معدن می‌تواند انجام شود. نکته مهم در این فرآیند راستای جنوب به شمال است به نحوی که این دهانه تخلیه دارای دهانه مقدم بر استخراج همانند G است ولی همان‌طور که در شکل ۱۵ نیز مشخص است هر دو دهانه تخلیه در دوره ۱ شروع به فعالیت می‌کنند. از آنجایی که در مسایل زمان‌بندی تولید محدودیت‌های مختلف دیگری نیز وجود دارد، بنابراین بر طبق محدودیت راستای پیشروی تخریب، استخراج این دو دهانه یا به صورت هم‌زمان خواهد بود و یا بر اساس سایر محدودیت‌های موجود در برنامه‌ریزی تولید که به عواملی همچون رقیق‌شدگی، کنترل نشست، مقادیر تناژ ستون تخلیه و نظایر آن مربوط می‌شود، تخریب از دهانه تخلیه A شروع می‌شود ولی می‌تواند استخراجی از آن انجام نشود.

بر اساس مدل‌سازی انجام شده، ابعاد ماتریس همسایگی متناسب با تعداد دهانه‌های تخلیه در هر دو راستا  $98 \times 1$  است. کل اعضا این ماتریس که همان تعداد کل دهانه‌های همسایگی برای تمام دهانه‌های تخلیه است، در هر دو راستا  $k=491$  است. این در حالی است که برای ماتریس راستای پیشروی تخریب با ابعاد  $98 \times 1$  در راستای جنوب به شمال تعداد دهانه‌های مقدم بر استخراج برای تمام دهانه‌های تخلیه،  $K'=195$  و در راستای غرب به شرق برابر با  $K'=214$  است. بدین ترتیب وابستگی دهانه‌های تخلیه به همدیگر در راستای غرب به شرق در کنترل تخلیه بیشتر است. بر اساس جدول و با توجه به موقعیت دهانه B در راستای جنوب به شمال ۳ دهانه تخلیه وجود دارد که باید زودتر از دهانه B شروع به فعالیت کنند و در راستای غرب به شرق دارای ۲ دهانه تخلیه مقدم بر استخراج است. بدین ترتیب رویکرد پیشنهادی ارائه شده در این تحقیق می‌تواند با دقت کافی و در کمترین زمان ممکن راستای پیشروی تخریب را بر اساس تعیین دوره زمانی شروع استخراج از هر دهانه تخلیه با توجه به دهانه‌های مجاور آن تعیین کند.

در شکل ۱۵ وضعیت دهانه‌های تخلیه را از لحاظ شروع فعالیت در راستای جنوب به شمال نشان داده شده است.



شکل ۱۵: اعمال مدل پیشروی تخریب در راستای جنوب-شمال

همان‌طور که در این شکل مشخص است در راستای جنوب به شمال، تمام دهانه‌های واقع در بخش‌های جنوبی مورد مطالعاتی در دوره‌های اولیه وارد فرآیند تخریب می‌شوند و با رسیدن به بخش‌های شمالی محدود، دوره‌های زمانی استخراج به مرز ۱۲ نزدیک می‌شود. همچنین نتایج در شکل ۱۵ نشان می‌دهد که مدل به خوبی توانسته است، راستای پیشروی تخریب را در راستای جنوب به شمال اعمال کند.

برای بررسی بیشتر کارایی مدل پیشنهادی، در جدول ۲ همسایگی‌های دهانه‌های تخلیه A, B, C و D آورده شده است. برای دهانه‌های فوق شکل‌های ۱۴ و ۱۵ همسایگی‌ها و دهانه‌های تخریب مقدم بر استخراج برای هر دهانه تخلیه به وسیله مدل محاسبه شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است فرآیند تخریب

جدول ۲: موقعیت همسایگی و دهانه‌های تخلیه مقدم بر تولید در دهانه‌های تخلیه A, B, C و D

دهانه‌های مقدم بر استخراج		دهانه‌های تخلیه همسایگی	دوره شروع به تخریب		دهانه تخلیه
			S-N	W-E	
S-N	W-E	H, E, F, G	۱	۱	A
G	ندارد		۱۲	۶	B
J, K, M	J, I	U, T, S	۱	۸	C
ندارد	S		۵	۸	D
O, Q	O, N	O, Q, N			

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل ابتکاری بر مبنای محاسبات ریاضی در زمینه چگونگی شروع و کنترل راستای پیشروی استخراج در معادن تخریب بلوکی در محیط متلب توسعه و ارایه شد. ساختار این مدل بر اساس کنترل موقعیت فضایی بلوک‌های استخراج طراحی شد تا بتواند مدل تخریب و زمان‌بندی تولید را واقعی‌تر کند. اگر شروع استخراج از دهانه‌های تخلیه با روند منظمی همراه نباشد، وقوع نشست‌های گسترده در سطح زمین، خرابی دهانه‌های تخلیه و رقیق‌شدگی امری واضح است. بنابراین لازم است تا دوره زمانی شروع فعالیت از دهانه‌های تخلیه به نحوی تعیین و کنترل شود که راستای پیشروی تخریب در محدوده معدن با توجه به عواملی همچون راستای تنش‌ها، توزیع عیار و توزیع تناژ در تمام عمر معدن حفظ شود. مدل پیشنهادی این تحقیق با ایجاد ماتریس راستای تخریب در هر معدن تخریبی به صورت گسترده و با توجه به هدف استخراج، راستای پیشروی تخریب را کنترل کرده و ارتباط موثر بین دهانه‌های تخلیه را بر اساس دوره زمانی شروع فعالیت آن‌ها تعیین می‌کند. همچنین این محدودیت به عنوان یکی از عوامل بحرانی در مسایل برنامه‌ریزی تولید بر اساس خواص آن معدن (عیار، تناژ و موارد مشابه) در تعیین طول مدت فعالیت دهانه‌های تخلیه نقش اساسی دارد. نتایج کاربرد مدل پیشنهادی بر روی مورد مطالعاتی با ۹۸ دهانه تخلیه نشان داد که در طی ۱۲ دوره زمانی برنامه‌ریزی شده، اگر راستای تخریب از بخش‌های جنوبی منطقه به بخش‌های شمالی پیشروی کند، دهانه‌های تخلیه واقع در بخش‌های جنوبی در اولین دوره از فعالیت معدن شروع به استخراج می‌شوند و با رسیدن به بخش‌های شمالی دوره‌های زمانی فعالیت نیز به اواخر عمر معدن نزدیک می‌شود. چنین روندی در پیشروی از غرب به شرق نیز مشاهده شد زیرا دهانه‌های واقع در بخش‌های غربی منطقه تخریب با نداشتن عضوی در ماتریس راستای تخریب، محدودیتی از بابت شروع استخراج در دوران اول از عمر معدن ندارند. از آنجا که اعمال راستای پیشروی تخریب با وارد کردن نقاط شروع و پایان تخریب همراه است، بنابراین مدل‌های مختلف بدون هیچ محدودیتی قابلیت استفاده از این رویکرد را در اجرای مسایل خود دارند. یکی دیگر از ویژگی‌های این مدل، ارایه ابعاد محدودیت راستای تخریب است، به نحوی که با داشتن این ابعاد می‌توان به بزرگی و پیچیدگی برنامه زمان‌بندی تولید رسید و متناسب با آن

محدودیت‌های مناسب دیگری به مسایل اعمال کرد. همان‌طور که در مدل اجرا شده مشاهده شد، تعداد آرایه‌های ماتریس راستای تخریب در راستای جنوب به شمال ۱۹۵ و در راستای غرب به شرق ۲۱۴ محاسبه شد، بنابراین با توجه به ابعاد کم راستای جنوب به شمال، اجرای آن در مدل‌های برنامه‌ریزی تولید با زمان کمتری همراه خواهد بود.

## ۵- مراجع

- [1] Moss, A., Diachenko, S., and Townsend, P. (2006). "Interaction between the block cave and the pit slopes at Palabora mine, in Stability of rock slopes in open pit mining and civil engineering situations". Johannesburg, The South African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM), 479-484.
- [2] Munro, D. D. (2013). "Incline caving as a massive mining method". The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 113: 555-563.
- [3] Laubscher, D. H. (1994). "Cave mining-the state of the art". The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 279-293.
- [4] Brown, E. T. (2002). "Block Cave Geomechanics". JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing 3, The University of Queensland, ITASCA Consulting Group, INC, 108-123.
- [5] Thomas, G. P. (2012). "Cave Mining Techniques". Mining Magazine, 2(1): 28-42.
- [6] Pourrahimian, Y., and Askari-Nasab, H. (2014). "An application of mathematical programming to determine the best height of draw in block-cave sequence optimisation". Mining Technology (Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy A), 123(3): 162-172.
- [7] Nezhadshahmohammad, F., Aghababaei, H., and Pourrahimian, Y. (2017). "Conditional draw control system in block-cave production scheduling using mathematical programming". International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 33(4): 1-24.
- [8] Nezhadshahmohammad, F., Pourrahimian, Y., and Aghababaei, H. (2018). "Presentation of a multi-index clustering technique for the mathematical programming of block-cave scheduling". International Journal of Mining Science and Technology, 28(6): 941-950.
- [9] Verdugo, R., and Ubilla, J. (2004) "Geotechnical analysis of gravity flow during block caving". Professor of Geotechnical Engineering, University of Chile, Chile, 195-200.

- mine production planning with MOLP*". In APCOM 98: Computer Applications in the Mineral Industries International Symposium, London, United Kingdom, 18-29.
- [23] Smith, M. L., Sheppard, I., and Karunatillake, G. (2003). "Using MIP for strategic life-of-mine planning of the lead/zinc stream at Mount Isa Mines". In Proceedings of 24th international symposium, Application of computers in the mineral industry, Cape Town, South Africa, 465-474.
- [24] Sarin, S. C., and West-Hansen, J. (2005). "The long-term mine production scheduling problem". IIE Transactions, 37(2): 109-121.
- [25] Epstein, R., Goic, M., Weintraub, A., Catalan, J., Santibanez, P., Urrutia, R., Cancino, R., Gaete, S., Aguayo, A., and Caro, F. (2012). "Optimizing Long-Term Production Plans in Underground and Open-Pit Copper Mines". Operations Research, 60(1): 4-17.
- [26] Nehring, M., Topal, E., and Little, J. (2010). "A new mathematical programming model for production schedule optimization in underground mining operations". The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 110: 437-446.
- [27] Rubio, E. (2014). "Block caving strategic mine planning using Risk-Return portfolio optimization". In 3rd International Symposium on Block and Sublevel Caving (Caving 2014), R. Castro, Edito, Universidad de Chile: Santiago-Chile. 466-476.
- [28] Rubio, E., Caceres, C., and Scoble, M. (2004). "Towards an integrated approach to block cave planning". In Massmin, Santiago, Chile, 128-134.
- [29] Becka, D., Arndt, S., Thinc, I., Stonec, C., and Butcher, R. (2006). "A conceptual sequence for a block cave in an extreme stress and deformation environment". In Deep and High Stress Mining, Quebec City, Canada, 1-16.
- [30] Rahal, D., (2008). "Draw Control in Block Caving Using Mixed Integer Linear Programming". In Sustainable Minerals Institute, The University of Queensland, pp. 342.
- [31] Rahal, D., Dudley, J., and Hout, G.v. (2008). "Developing an optimised production forecast at Northparkes E48 mine using MILP". In 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining. Luleå Sweden, 51-58.
- [32] Smoljanovic, M., Rubio, E., and Morales, N. (2011). "Panel Caving Scheduling Under Precedence Constraints Considering Mining System". In 35th APCOM Symposium, Wollongong, NSW, Australia, 407-417.
- [10] Alford, C., Brazil, M., and Lee, D. (2007). "Optimisation in Underground Mining". In Handbook Of Operations Research In Natural Resources, Springer US, 561-577.
- [11] Chanda, E. K. C., and Dagdelen, K. (1995). "Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems". International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 9(4): 203-208.
- [12] Pourrahimian, Y., Askari-Nasab, H., and Tannant, D. (2013). "A multi-step approach for block-cave production scheduling optimization". International Journal of Mining Science and Technology, 23(5): 739-750.
- [13] Diering, T. (2004). "Combining Long Term Scheduling and Daily Draw Control for Block Cave Mines". In Massmin. Santiago, Chile, 486-490.
- [14] Chitombo, G. P. (2010). "Cave mining: 16 years after Laubscher's 1994 paper 'Cave mining - state of the art'". Mining Technology, 119(3): 132-141.
- [15] Butcher, R. J. (1999). "Design rules for avoiding draw horizon damage in deep level block caves". The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 151-156.
- [16] Yuan, S., and Grayson, R. L. (1994). "A large-scale work scheduling algorithm for underground coal mines". SME Preprint, 1: 285-291.
- [17] Topal, E. (1998). "Long and short term production scheduling of the Kiruna iron ore mine, Kiruna, Sweden". Master of Science Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 111-125.
- [18] Kuchta, M., Newman, A., and Topal, E. (2003). "Production Scheduling at LKAB's Kiruna Mine Using Mixed-Integer Programming". In SME Annual Meeting Preprint. Phoenix, Arizona, USA, pp. 55.
- [19] Martinez, M. A., and Newman, A. M. (2011). "A solution approach for optimizing long- and short-term production scheduling at LKAB's Kiruna mine". European Journal of Operational Research, 211(1): 184-197.
- [20] Khodayari, F., and Pourrahimian, Y. (2016). "Quadratic programming application in block-cave mining". 1st International Conference on underground Mining, Santiago, Chile, 427-438.
- [21] Magda, R. (1994). "Mathematical model for estimating the economic effectiveness of production process incoale panels and an example of its practical application". International, 34(1): 47-55.
- [22] Winkler, B. M. (1998). "A system for quality oriented

- 
- <sup>13</sup> Smith  
<sup>14</sup> Mount Isa  
<sup>15</sup> Sarin and west- Hansen  
<sup>16</sup> Mixed Integer Programing  
<sup>17</sup> Epistein  
<sup>18</sup> Neihring  
<sup>19</sup> Rubio  
<sup>20</sup> Becka  
<sup>21</sup> Rahal  
<sup>22</sup> Smoljanovic  
<sup>23</sup> MATLAB  
<sup>24</sup> Mining precedence  
<sup>25</sup> Northparkes  
<sup>26</sup> Herringbone  
<sup>27</sup> Mixed Integer Linear Programing
- <sup>1</sup> Mass mining  
<sup>2</sup> Munro  
<sup>3</sup> Net Present Value (NPV)  
<sup>4</sup> Laubscher  
<sup>5</sup> Cave propagation  
<sup>6</sup> Caving advancement direction  
<sup>7</sup> Yuan and Grayson  
<sup>8</sup> Topal  
<sup>9</sup> Kuchta  
<sup>10</sup> Martinez and Newman  
<sup>11</sup> Magda  
<sup>12</sup> Winkler





DOI:10.30479/jmre.2019.10359.1246

## Introducing an Approach to Control Caving Direction in Block Caving Mining

Nezhadshahmohammad F.<sup>1\*</sup>, Fathi M.B.<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Urmia University, Urmia, Iran  
farshad.shahmohammad@gmail.com

2- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Urmia University, Urmia, Iran  
fathi.bagher@gmail.com

(Received: 10 Apr. 2019, Accepted: 04 Jul. 2019)

**Abstract:** Mass production and the high rate of block caving have caused to special considerations in operational optimization of these mines. In caving mines, the uniform extraction not means as equal extraction from blocks. In the uniform caving, controlling of caving propagation is one of the most critical factors in the stability of caving mines. Selection of advancement direction is one of the most important constraints in block caving and in the advancement direction controlling one of the critical aspects related to blocks precedence. So the goal of this research is to determine block precedence according to caving direction. It is crucial to control and validate the advancement direction to reach an optimum scheduling program. In this paper, an innovative approach is presented to control and predict the best advancement direction. MATLAB software is the framework of the presented model. The designer can find the desired direction by introducing a start and end points for caving propagation. Finally, its output can be used as input to scheduling programs of caving mines. Application and comparison of the model based on the advancement direction algorithms are validated using 98 using over 12 periods. The results show that the presented model respected to advancement direction and the model size is an accepted range for production planning problems.

**Keywords:** Caving mines, Caving advancement direction, Caving start period, MATLAB.

### INTRODUCTION

Among the underground mining methods available, caving methods are favoured because of their low cost and high level of production. Caving operations generate a much smaller environmental footprint than equivalent open-pit operations because the volume of waste that needs to be moved and handled is much smaller. Among the caving methods, the block caving is generally a large-scale production technique applicable to low-grade, massive ore-bodies and the least expensive of all underground mining methods. It is a technique that relies on natural processes for its success and therefore gravity in conjunction with internal rock stresses is used to fracture and break the rock mass into pieces, which can be handled by miners. This method requires more detailed geotechnical investigations of the ore-body than other methods in which conventional drilling and blasting are employed as part of the mine production [1].

Due to an increasing trend in the world to extract minerals and facing the mining industry with more marginal resources, it is becoming essential to generate production schedules that will provide optimal operating strategies while meeting practical, technical, and environmental constraints [2-5].

Unbalanced cave subsidence by poor ground control over time, decreased recovery and productivity, premature waste ingress and recompaction of broken material in the draw columns, infrastructure instability, fragmentation size distribution, more dilution, flow of muck at the drawpoints, and other safety and financial or safety damages to miners are faced in any block caving operation if draw from the drawpoints is not controlled.

Caveability, in the context of draw control, is primarily concerned with balancing caving rates and production. If caving direction are not controlled, either air gaps or damaging stress concentrations may occur. Stress is important because undercut advance rates must be maintained to prevent stress damage to the production level. Advancement direction must also be studied across the production level to ensure that local stress concentrations and premature dilution entry do not occur [6].

Yuan and Grayson [7], Topal [8], Kutcha and et al. [9], Martinz and Newman [10], Pourrahimian and et al. [11], Nezhadshahmohammad et al. [12] and Khodayari et al. [13] implemented some studies about caving methods. The advancement direction in their studies was a constraint, but they haven't mentioned a clear technique to find the optimum advancement direction. Smoljanovic [14] presented a MILP model to optimize the NPV value in a panel cave mine to study the drawpoints opening sequence. The emphasis is in the precedence, geometrical and production constraints. For panel or block caving, this model was a good start point, but the precedence constraints and capacities should be modified and other components need to complete the set of constraints.

By the way, one of the aims of this paper is to present models based on mathematical algorithms to control and predict the advancement direction in caving mines. This model is coded in MATLAB software to create the precedence block matrix. By using the precedence block matrix, the advancement direction responded in all caved area. In the production scheduling problems presented matrix cause an optimum program in all mining periods.

### MODEL FORMULATION

The proposed model has been developed in MATLAB. For each block,  $i$ , there is a set  $S_i$  defining the predecessor blocks that must be started prior to extraction of block  $i$ . If the number of all blocks equal to  $n$ , so the size of precedence block matrix is  $(n \times n)$ . In order to describe the problem, an assumed model is considered in Figure 1, in this model  $n=20$ . The search radius parameter ( $R$ ) is used to determine the neighboring blocks to each block. To create precedence matrix, three sequence steps are needed as follows:

- 1- Creating normalized distance matrix between all blocks. The equation (1) calculates Euclidean distance between block  $i$  and  $j$ .

$$E.D_{ij} = \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{E.D_{max}} \quad (1)$$

Where  $x$  and  $y$  show the coordinate characterizes of the centers of blocks  $i$  and  $j$ , and  $E.D_{max}$  is the maximum distance between blocks.

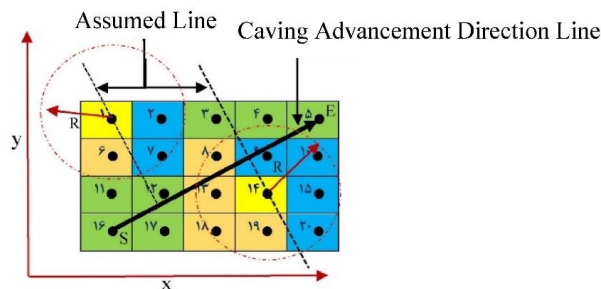


Figure 1. Assumed model with advancement direction

2- In this step the neighboring matrix will be created according to equation (2). For the center of block  $i$ , a circle with radius  $R$  be considered. If the centers of the adjacent blocks be inside this circle are considered as the neighboring blocks of assumed block. As shows in Figure 1 the neighboring blocks of block 14 are: 8, 9, 10, 13, 15, 18, 19 and 20.

$$0 < E.D_{ij} \leq \frac{R}{E.D_{\max}} \quad (2)$$

3- Finally after determining the advancement direction, the planner should define two points at the starting(S) and ending point (E) in the direction of advancement. Afterward, the precedence matrix can be calculated using equation (3) and (4)

$$\sum_{i=1}^n y_{m_i} = \frac{(x_S - x_E)}{(y_E - y_S)} \cdot [x_{\min} - \sum_{i=1}^n x_i] + \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K (x_{NB_i} - x_i) \cdot (y_{m_i} - y_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K (y_{NB_i} - y_i) \cdot (x_{\min} - x_i) \quad (4)$$

In this step imagine a line perpendicular to the desired advancement direction line at the center of the considered block. All adjacent blocks located behind the imaginary line are considered blocks from which extraction must be started before extracting from the considered block. The precedence block to the block 14 include 8, 13, 18 and 19.

### IMPLEMENTATION OF MODEL

To validate the model, a block cave mine with 98 blocks (drawpoints) was considered as the main dataset. Nezhad Shahmohammad et al. [12] presented a MILP model in scheduling of block caving. The precedence model in determining the advancement direction applied in their proposed model. In order to assessment the performance of the model, two directions from south to north (S-N) and west to east (W-E) were investigated. Figure 2 shows the results of implementing the proposed model in two different directions. The drawpoints in this model have been scheduled during the 12 periods. According to Figure 2 the model responded the advancement direction. The drawpoints in starting points extracted in first period of mine life and by going to the other side of advancement direction, starting points of drawpoints increase according to cave propagation.

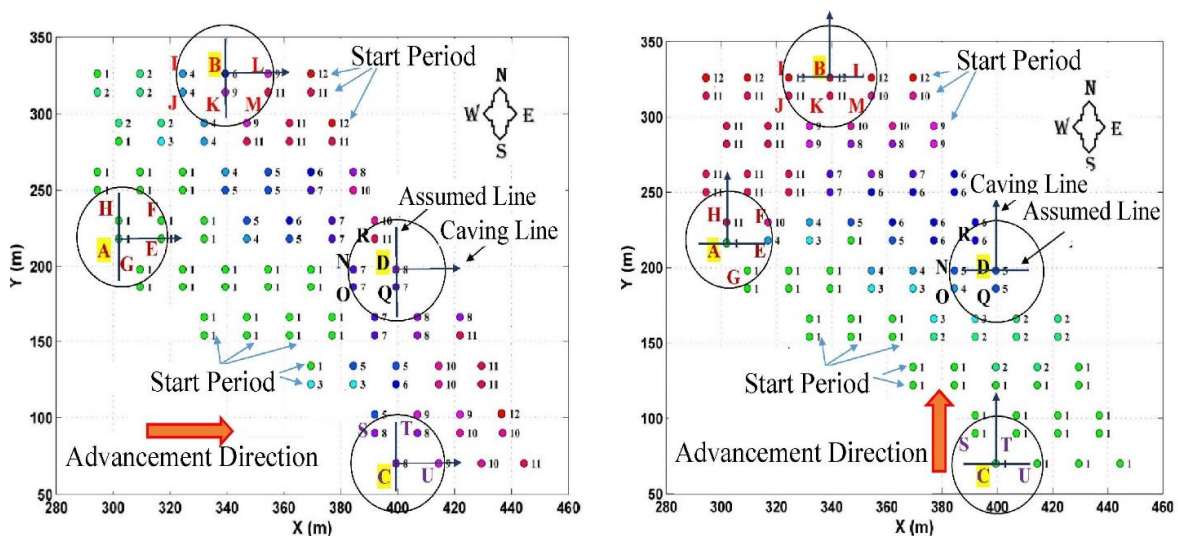


Figure 2. Implementation of presented model in different directions

## CONCLUSIONS

This paper presented a practical caving propagation control system based on advancement direction to manage the extraction rates of caving mines using mathematical models. The model, which was proposed by creating a precedence matrix, can be used to investigate the progress of caving in each mine based on the properties thereof and in the optimum advancement direction. Two models, one in S-N and one in W-E direction, were implemented, and the results were compared to show the effect of the precedence matrix on schedule programming. In both direction drawpoints started according to caving propagation, and the size of matrix created can be applied in scheduling problems in determining other constraints that related to advancement direction.

## REFERENCES

- [1] Rubio, E. (2014). "Block caving strategic mine planning using Risk-Return portfolio optimization", in 3rd International Symposium on Block and Sublevel Caving (Caving 2014), R. Castro, Edito, Universidad de Chile: Santiago-Chile. 466-476.
- [2] Nehring, M. T., and Little, J. (2010). "A new mathematical programming model for production schedule optimization in underground mining operations". The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 110: 437-446.
- [3] Smith, M. L., Sheppard, I., and Karunatillake, G. (2003). "Using MIP for strategic life-of-mine planning of the lead/zinc stream at Mount Isa Mines". in Proceedings of 24th international symposium, Application of computers in the mineral industry, Cape Town, South Africa, 465-474.
- [4] Laubscher, D. H. (1994). "Cave mining-the state of the art". The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 279-293.
- [5] Moss, A., Diachenko, S., and Townsend, P. (2006). "Interaction between the block cave and the pit slopes at Palabora mine, in Stability of rock slopes in open pit mining and civil engineering situations", Johannesburg, The South African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM), 479-484.
- [6] Alford, C., Brazil, M., and Lee, D. (2007). "Optimisation in Underground Mining". in Handbook Of Operations Research In Natural Resources, Springer US, 561-577.
- [7] Yuan, S., and Grayson, R. L. (1994). "A large-scale work scheduling algorithm for underground coal mines". SME Preprint.
- [8] Topal, E. (1998). "Long and short term production scheduling of the Kiruna iron ore mine, Kiruna, Sweden". Master of Science Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- [9] Kuchta, M., Newman, A., and Topal, E. (2003). "Production Scheduling at LKAB's Kiruna Mine Using Mixed-Integer Programming". In SME Annual Meeting Preprint. Phoenix, Arizona, USA, pp. 55.
- [10] Martinez, M. A., and Newman, A. M. (2011). "A solution approach for optimizing long- and short-term production scheduling at LKAB's Kiruna mine". European Journal of Operational Research, 211(1): 184-197.
- [11] Pourrahimian, Y., Askari-Nasab, H., and Tannant, D. (2013). "A multi-step approach for block-cave production scheduling optimization". International Journal of Mining Science and Technology, 23(5): 739-750.
- [12] Nezhadshahmohammad, F., Aghababaei, H., and Pourrahimian, Y. (2017). "Conditional draw control system in block-cave production scheduling using mathematical programming". International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 33(4): 1-24.
- [13] Khodayari, F., and Pourrahimian, Y. (2016). "Quadratic programming application in block-cave mining". 1st International Conference on underground Mining, Santiago, Chile, 427-438.
- [14] Smoljanovic, M., Rubio, E., and Morales, N. (2011). "Panel Caving Scheduling Under Precedence Constraints Considering Mining System". in 35th APCOM Symposium, Wollongong, NSW, Australia, 407-417.