نشریه علمی «مهندسی معدن» دوره ۱۶، شماره ۵۲، پاییز ۱۴۰۰، صفحه ۴۱ تا ۵۰
Journal of Mining Engineering (JME) Vol 16, No 52, 2021, pp 41-50

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید بلندمدت در روش استخراج تخریب در طبقات فرعی

مرتضی شناور[۱]، مجید عطایی‌پور[۲*]، مهدی رحمانپور[۳]

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، m_shenavar@aut.ac.ir
۲. دانشیار، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، map60@aut.ac.ir
۳. استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی دانشگاه تهران، mrahmanpour@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۰- پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۰)

چکیده

برنامه‌ریزی تولید در معادن زیرزمینی همچنان یک فرآیند طراحی دستی است و ابزارهای مناسب برای تهیه برنامه‌ریزی تولید بهینه برای این معادن وجود ندارد. دستیابی به نتیجه بهینه واقعی از طریق برنامه‌ریزی دستی به دلیل پیچیدگی معادن زیرزمینی و مشکلات برنامه‌ریزی تولید در این معادن امری غیرممکن است. با توجه به افزایش روز افزون مصرف مواد معدنی از یک طرف و افزایش عمق ذخایر معدنی از طرف دیگر، تلاش برای دستیابی به روش‌های جامع بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید در معادن زیرزمینی و به ویژه روش‌های استخراج بزرگ مقیاس با آهنگ تولید بالا اجتناب‌ناپذیر است. از بین روش‌های استخراج زیرزمینی، روش استخراج تخریب در طبقات فرعی روشی متداول برای استخراج سنگ‌های سخت با آهنگ تولید بالا است و مطالعات بسیار محدودی در زمینه برنامه‌ریزی تولید بلندمدت برای این روش وجود دارد. در این مقاله، برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید روش استخراج تخریب در طبقات فرعی، یک مدل جدید ریاضی با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی (NPV) ارایه شده است. محدودیت‌های فنی و اجرایی روش استخراج تخریب در طبقات فرعی مانند محدودیت‌های بازکننده‌ها و آماده‌سازی‌ها، ظرفیت تولید، هندسه طبقات فرعی و دسترسی به ذخیره در این مدل منظور شده‌اند. مدل ارایه شده بر روی یک مدل بلوکی اقتصادی اجرا و حداکثر NPV تعیین شد. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از روش برنامه‌ریزی دستی، افزایش قابل توجهی در NPV عملیات معدنکاری را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی تولید، معدنکاری زیرزمینی، ارزش خالص فعلی، تخریب در طبقات فرعی.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی تولید در فرآیند طراحی معادن سطحی و زیرزمینی اهمیت زیادی دارد. مسایل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است و در معدن زیرزمینی نسبت به این مسایل پیشرفت‌های ملموسی مشاهده نمی‌شود. تنوع روش‌های استخراج زیرزمینی و پیچیدگی پارامترهای اجرایی آن‌ها، یکی از دلایل عدم دستیابی به روش‌های قابل اجرای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید در این روش‌های استخراج است. تنوع روش‌های استخراج زیرزمینی و پیچیدگی‌های اجرایی آن‌ها، ارایه یک الگوی برنامه‌ریزی تولید کلی که بتواند برای همه این روش‌ها قابل استفاده باشد را دور از ذهن می‌کند. از بین روش‌های استخراج زیرزمینی روش‌های تخریبی بیشترین استفاده را در معدنکاری زیرزمینی دارند و از لحاظ نرخ و هزینه‌های تولید شرایط به مراتب بهتری را نسبت به سایر روش‌های استخراج زیرزمینی دارند. از بین روش‌های تخریبی، روش استخراج تخریب در طبقات فرعی یکی از روش‌ها با نرخ تولید بالا برای استخراج سنگ‌های سخت است و مطالعات محدودی در مورد بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید این روش وجود دارد.

برنامه‌ریزی تولید در یک معدن، برنامه‌ای است که زمان بهره‌برداری بلوک‌های معدنی با تناژ و عیار مشخص را تعیین می‌کند. عموما مسایل برنامه‌ریزی تولید معادن به دلیل ماهیت و تنوع محدودیت‌ها، پیچیدگی خاصی دارد. یک برنامه تولید باید با توجه به محدودیت‌های اجرایی، فنی و اقتصادی آن معدن، ترتیب استخراج مواد معدنی داخل آن معدن را در دوره‌های زمانی مشخص در طول عمر معدن مشخص کند. اهداف و استراتژی‌های مختلفی برای برنامه‌ریزی تولید وجود دارند. بیشینه کردن ارزش خالص فعلی (NPV)، کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن عمر معادن اهداف استراتژیکی‌اند که در معادن مختلف استفاده شده‌اند [۱] که از بین آن‌ها، بیشینه کردن NPV به صورت گسترده در دنیا پذیرفته شده و استفاده می‌شود.

روش‌های برنامه‌ریزی دستی، الگوریتم‌های جستجو محور و الگوریتم‌های ریاضی برای برنامه‌ریزی تولید در معادن زیرزمینی قابل استفاده‌اند. الگوریتم‌های ریاضی دقیق و تضمین کننده یک راه حل و جواب بهینه‌اند ولی روش‌های برنامه‌ریزی دستی یا الگوریتم‌های جستجو محور الزاما منجر به راه حل و جواب بهینه نمی‌شوند. اگرچه الگوریتم‌های ریاضی قادر به دستیابی به جواب بهینه‌اند اما معمولا اندازه یک مدل ریاضی برای مسایل برنامه‌ریزی تولید به گونه‌ای است که حل مساله در یک زمان معقول قابل دستیابی نبوده و استفاده از روش‌های ساده‌سازی و کاهش پارامترها و عملیات محاسباتی ضروری است.

طراحی و برنامه‌ریزی معدن زیرزمینی با بهینه‌سازی محدوده نهایی آن شروع می‌شود و روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای این منظور توسعه داده شده‌اند. برنامه‌نویسی پویا و روش شاخه و کران برای بهینه‌سازی محدوده نهایی و کارگاه‌های استخراج در مسایل دو بعدی (ذخایر لایه‌ای و نازک) استفاده شده است که این مدل‌ها قابل استفاده برای مسایل سه‌بعدی (ذخایر توده‌ای) نیستند. برای ذخایر توده‌ای و مسایل پیچیده سه‌بعدی نیز برخی از روش‌های سه‌بعدی استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به روش هندسه ریاضی، کارگاه شناور، با ارزش‌ترین همسایگی، تقسیم هشت‌تایی، شبیه‌سازی و تئوری گراف اشاره کرد [۲]. در کنار مدل‌های فوق، برخی از مدل‌ها برای بهینه‌سازی ذخایر معادن زیرزمینی تحت عدم قطعیت عیار و قیمت نیز ارایه شده‌اند [۳].

با مشخص شدن محدوده نهایی معدن و جانمایی بهینه کارگاه‌های استخراج، برنامه‌ریزی تولید برای بلوک‌های واقع در محدوده نهایی انجام می‌شود. در معدنکاری زیرزمینی، مدل‌های مختلفی برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید ارایه شده است که به‌طور کلی هیچکدام از این مدل‌ها استفاده تجاری نشده‌اند. بیشتر این مدل‌ها، برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت با هدف به حداقل رساندن انحراف تولید از برنامه بلندمدت موجود معدن‌اند. برخی از این مدل‌ها برای برنامه‌ریزی در یک معدن خاص تدوین شده‌اند و برای استفاده در معادن دیگر یا مناسب نیستند و یا نیاز به اصلاح دارند. برخی دیگر از این مدل‌ها راه‌حل‌های بهینه واقعی ندارند و بر اساس روش‌های مبتنی تجارب افراد متخصص بنا نهاده شده‌اند. اهداف و توابع هدف مختلف در فرآیند ارایه این مدل‌ها برای برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی استفاده شده‌اند، که از آن جمله می‌توان به هدف دستیابی به حداکثر سود، هدف به حداقل رساندن زمان پروژه و هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت در معادن زیرزمینی اشاره کرد [۴].

مدل‌سازی ریاضی به طور گسترده‌ای در مسایل بهینه‌سازی معدن استفاده می‌شود. استفاده از مدل‌سازی ریاضی برای برنامه‌ریزی معادن زیرزمینی به سال‌های خیلی دور (۱۹۷۳) برمی‌گردد که یک مدل ریاضی ساده با هدف

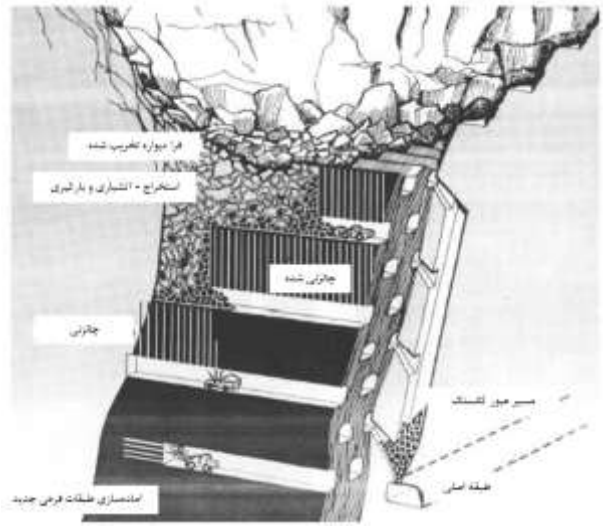
کمینه کردن انحراف از تولید برنامه‌ریزی شده برای روش استخراج از طبقات فرعی ارایه شد [۵]. در سال‌های اخیر چندین مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی توسعه داده شده است که از آن جمله می‌توان به برنامه‌ریزی تولید بلندمدت با هدف بیشینه کردن NPV برای روش تخریب بلوکی [۱]، برنامه‌ریزی تولید بلندمدت یک معدن خاص با هدف بیشینه کردن تولید فلز در طول عمر معدن [۶]، برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت در یک معدن خاص با روش استخراج کند و آکند با لحاظ محدودیت تهویه [۷] و مدل برنامه‌ریزی تولید بلندمدت با هدف بیشینه کردن NPV برای روش استخراج تخریب در طبقات فرعی [۴] اشاره کرد. همچنین در همین راستا مطالعاتی در رابطه با روش‌های جستجو محور برای بهینه‌سازی توام محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید در معادن به روش استخراج از طبقات فرعی ارایه شده است [۸ و ۹].

مطالعات بسیار محدودی برای برنامه‌ریزی تولید در روش استخراج تخریب در طبقات فرعی وجود دارد. اولین بار در سال ۱۹۹۸ یک مدل برنامه‌ریزی تولید با هدف کمینه کردن میزان انحراف از برنامه بلندمدت معدن برای روش تخریب در طبقات فرعی ارایه شد و نتایج مطلوبی از اجرای آن گزارش شده است [۱۰] ولی گزارشی از استفاده از این مدل در معادن دیگر در دست نیست. معروف‌ترین مدل برنامه‌ریزی تولیدی که برای روش تخریب در طبقات فرعی ارایه شده است به معدن سنگ‌آهن کایرونای سوئد با آهنگ تولید ۲۴ میلیون تن در سال مربوط است. در سال ۲۰۰۴ یک مدل برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت با هدف کمینه کردن انحراف از تولید برنامه‌ریزی شده ارایه شد [۱۱] که در سال ۲۰۰۷ محققان دیگری مدل جستجو محور متناظر با مدل قبلی ارایه و مدت زمان حل مساله قبلی را کاهش دادند [۱۲]. در سال ۲۰۱۱ محققان بر اساس مدل اولیه و روش کاهش زمان حل مدل، مدل جدیدی برای این معدن ارایه کردند که برنامه‌ریزی قبلی را بهینه می‌کرد [۱۳]. اخیرا یک مدل برنامه‌ریزی تولید دوبعدی در معادن با روش استخراج تخریب در طبقات فرعی ارایه شده است که هدف این مدل بیشینه کردن NPV بوده و برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت یک معدن واقعی لایه‌ای از آن استفاده شده است [۴].

در این مقاله یک مدل ریاضی سه‌بعدی در قالب برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح (IP) با هدف بیشینه کردن NPV برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت روش استخراج تخریب در طبقات فرعی ارایه شده است و از آن برای برنامه‌ریزی یک مدل بلوکی فرضی برای یک معدن توده‌ای استفاده شده است.

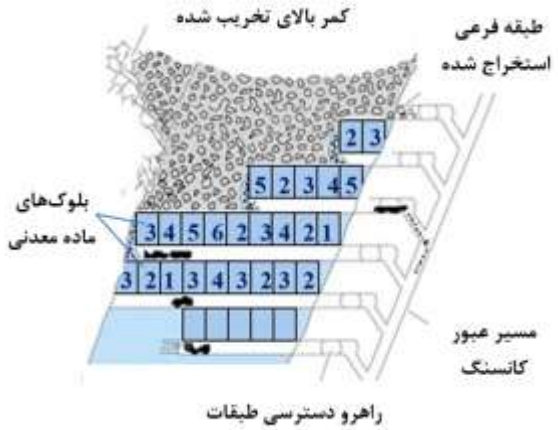
۲- تعریف مساله

روش استخراج تخریب در طبقات فرعی یکی از روش‌های معدنکاری زیرزمینی با آهنگ تولید بالا و مناسب برای سنگ‌های سخت است و در این روش همانطور که در شکل شماره ۱ نشان داده شده است، برای استخراج معدن از بالای ذخیره معدن آغاز و به ترتیب در یک فرآیند ایمن به سمت پایین حرکت می‌کند [۱۴]. همانطور که قبلا نیز اشاره شد، مطالعات اندکی در زمینه برنامه‌ریزی تولید در معادن زیرزمینی انجام شده است و به تبع آن مطالعات محدودی در برنامه‌ریزی تولید روش تخریب در طبقات فرعی و به ویژه در برنامه‌ریزی بلند مدت آن انجام شده است. از بین اهداف مختلفی که می‌توان برای برنامه‌ریزی تولید در نظر گرفت، در این مقاله هدف بیشینه کردن NPV هدف برنامه‌ریزی تولید بلندمدت است.



شکل ۱- روش استخراج تخریب در طبقات فرعی [۱۴].

در شکل ۲ روش تخریب در طبقات فرعی به صورت دوبعدی نمایش داده شده است که اگر اعداد داخل هر بلوک نشان‌دهنده ارزش اقتصادی آن بلوک باشد، اگر توالی‌های استخراج مختلف برای تقدم و تاخر استخراج این بلوک‌ها در نظر گرفته شود، ارزش خالص فعلی برای توالی‌های مختلف متفاوت خواهد بود که این امر امکان کاربرد و اهمیت برنامه‌ریزی تولید با هدف بیشینه کردن NPV برای روش تخریب در طبقات فرعی را نشان می‌دهد.

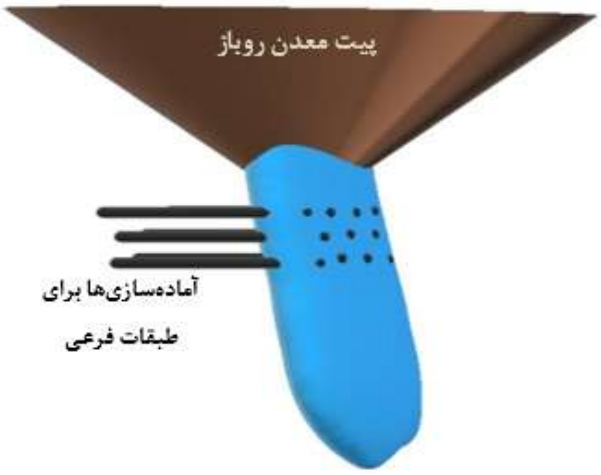


شکل ۲- مدل بلوکی اقتصادی روش تخریب در طبقات فرعی.

مساله برنامه‌ریزی تولید در این روش زمانی پیچیده‌تر و پراهمیت‌تر می‌شود که ذخایر توده‌ای که در دوبعد قابل بررسی نیستند، مد نظر باشند. هندسه سه‌بعدی یک ذخیره فرضی استوانه‌ای در شکل ۳ نشان داده شده است که قسمت فوقانی ذخیره به روش روباز استخراج شده است. همانطور که در شکل‌های ۳-ب و ۳-پ نشان داده شده است، طبقات فرعی در این ذخیره می‌توانند در جهات مختلف حفاری شوند و با توجه به توضیحات ارایه شده، جهت حفاری طبقات فرعی و جهت استخراج نیز می‌تواند NPVهای مختلفی را برای بهره‌برداری از معادن ایجاد کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که NPVهای مختلف برای جهت‌های متفاوت و توالی‌های مختلف استخراج قابل دستیابی است و بدین ترتیب اهمیت برنامه‌ریزی تولید با هدف بیشینه کردن NPV برای روش تخریب در طبقات فرعی مشخص می‌شود. برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید معدن، یک مدل ریاضی جدید در این مطالعه ارایه شده است که برای روش استخراج تخریب در طبقات فرعی مناسب است.

از آنجا که هدف بیشینه کردن NPV است، مدل ریاضی سعی می‌کند، بلوک‌های اقتصادی با ارزش‌تر را زودتر استخراج کند. در شکل ۴، ترتیب توالی استخراج بلوک‌ها در یک مدل بلوکی شماتیک را نشان می‌دهد که با روش تخریب در طبقات فرعی استخراج می‌شود. در این شکل شماتیک سعی شده است بلوک‌های با ارزش زودتر استخراج شوند ولی واضح است که بدون استفاده از مدل‌های ریاضی و ابزارهای محاسباتی پیشرفته، دستیابی به هدف بیشینه NPV در معادن با ذخیره بزرگ غیرممکن است.

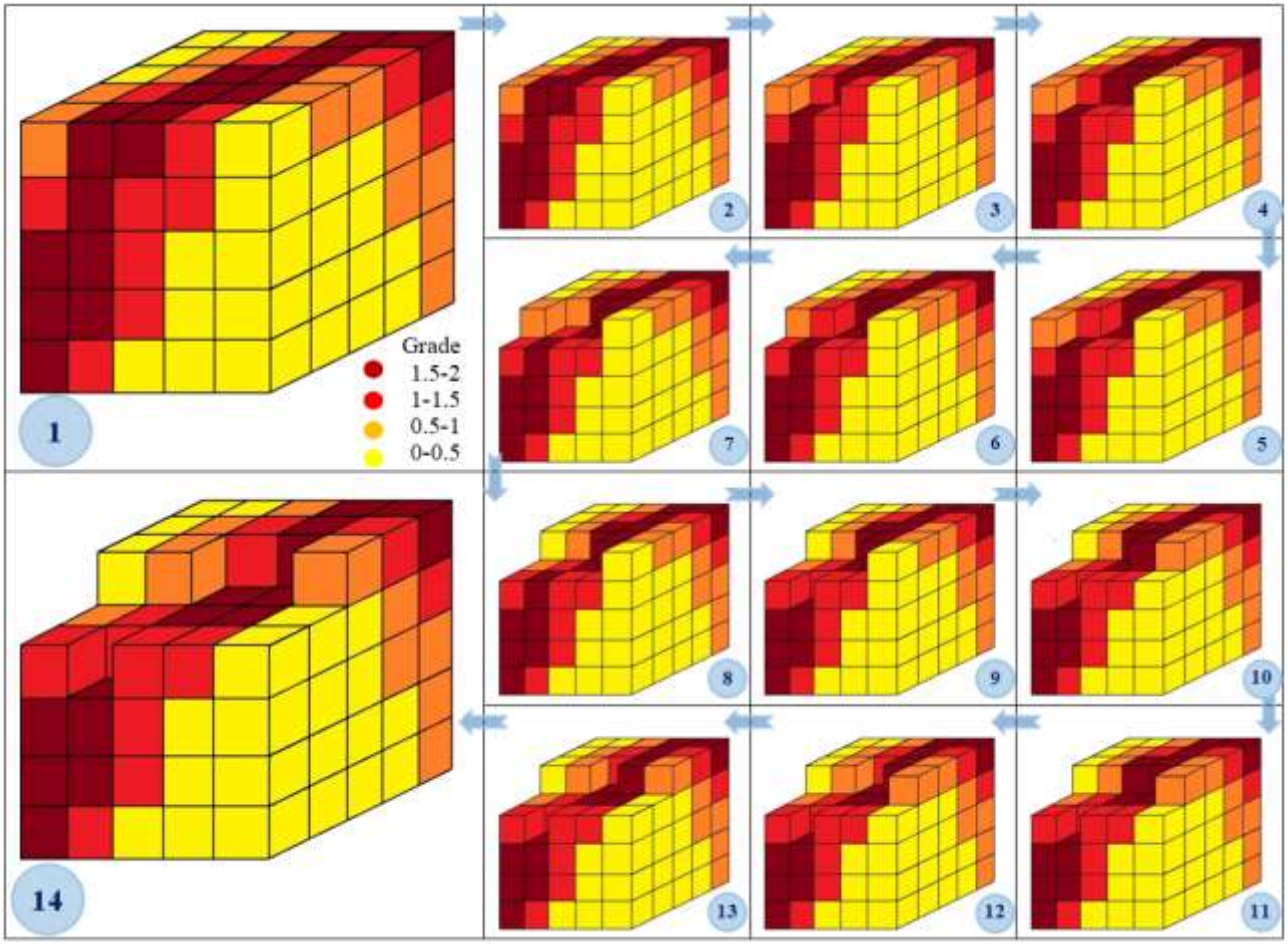
(الف)



(ب)

(پ)

شکل ۳- نمایش شماتیک جهت بازکننده‌های ذخیره در روش تخریب در طبقات فرعی.

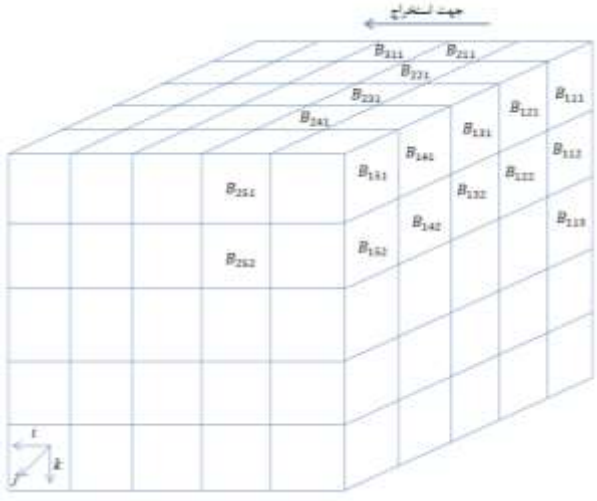


شکل ۴- روند استخراج در یک مدل بلوکی با روش استخراج تخریب در طبقات فرعی.

۳- مدل ریاضی

مدل برنامه‌ریزی تولید بلندمدت ارایه شده در این مقاله با تابع هدف بیشینه کردن NPV در چارچوب برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح (IP) تدوین شده است. مدل بلوکی شماتیک در شکل ۵ نمایش داده شده است. جهت‌های محورهای مختصات در این مدل بلوکی مشخص شده است که مدل ریاضی ارایه شده بر اساس این جهت‌ها تدوین شده است. جهت استخراج در مدل بلوکی شماتیک شکل ۵ نیز نمایش داده شده است و در جهت محور i فرض شده است. همانگونه که قبلا نیز اشاره شد، جهت استخراج می‌تواند متفاوت باشد و استخراج در جهت‌های مختلف باعث NPVهای متفاوت می‌شود. از آنجایی که روش استخراج تخریب در طبقات فرعی یک روش پایین‌رو است و جهت استخراج طبقات بالا به پایین است، جهت محور k بالا به پایین تعیین شده است.

مدل بلوکی شکل ۵ یک مدل بلوکی شماتیک است که برای شرح دقیق مدل ریاضی ارایه شده است. برخی محدودیت‌های معدنکاری زیرزمینی در هندسه روش معدنکاری نهفته‌اند و محدودیت‌های شرایط ژئومکانیکی سنگ معدنی و



شکل ۵- مدل بلوکی فرضی در فضای سه‌بعدی.

سنگ دربرگیرنده، تخریب‌پذیری سقف و ماشین‌آلات استخراج جزو این محدودیت‌ها است که با انتخاب ابعاد و فاصله‌داری آماده‌سازی‌های معدن، فاصله طبقات فرعی و ابعاد برش‌های استخراجی می‌توان این محدودیت‌ها را کنترل کرد. بدین ترتیب در انتخاب هندسه طبقات فرعی و آماده‌سازی‌ها،

محدودیت‌های شرایط ژئومکانیکی سنگ معدنی و سنگ دربرگیرنده، تخریب‌پذیری سقف و ماشین‌آلات استخراج باید مدنظر باشند. از آنجایی که هندسه طبقات فرعی و آماده‌سازی‌ها ابعاد مدل بلوکی اقتصادی را تعیین می‌کنند و مدل بلوکی در اصل یکی از ورودی‌های مدل ریاضی است، محدودیت‌های اشاره شده در انتخاب ابعاد مدل بلوکی اقتصادی مستتر خواهد بود. در این تحقیق ارتفاع بلوک‌ها در مدل بلوکی معادل ارتفاع یک طبقه فرعی، عرض بلوک‌ها معادل فاصله افقی طبقات فرعی از هم و عمق بلوک‌ها معادل طول هر برش استخراجی است.

عوامل طراحی در این روش به میزان زیادی تابع مکانیک تخریب است. این موضوع شاخه‌ای از مکانیک سنگ است که در آن به خرد شدن و جریان ثقلی مواد پرداخته می‌شود. نتایج حاصل از مطالعات جریان ثقلی مواد در روش استخراج تخریب در طبقات فرعی برای مشخص کردن شکل هندسی، ابعاد و جانمایی طبقات فرعی به کار گرفته می‌شود. مکانیک تخریب عوامل طراحی بسیار زیادی را در روش استخراج تخریب در طبقات فرعی تعیین می‌کند. برای مثال متناسب با ویژگی‌های کانسنگ و باطله خرد شده یا تخریب شده، ارتفاع بهینه طبقات فرعی (فاصله قائم بین طبقات فرعی) بین ۹ تا ۱۴ متر، فاصله افقی بین طبقات فرعی ۸ تا ۱۱ متر و ابعاد میانبرها در حدود ۳ تا ۴ متر مربع متغیر است. طول هر برش استخراجی بسته به شرایط تخریب و ماشین‌آلات استخراجی و فاصله ردیفی بهینه چال‌ها ۱٫۲ تا ۱٫۸ متر است [۱۴].

۳-۱- تابع هدف مدل ریاضی

تابع هدف مدل ریاضی ارایه شده برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید در روش استخراج تخریب در طبقات فرعی در رابطه ۱ آورده شده است:

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T}\frac{BEV_{i,j,k}}{(1+d)^t}\times x_{i,j,k,t} \qquad (۱)$$

که در آن:

I: تعداد بلوک‌ها در راستای افقی x

J: تعداد بلوک‌ها در راستای قائم y

K: تعداد بلوک‌ها در راستای افقی z

T: بازه زمانی برنامه‌ریزی.

$B_{i,j,k}$: بلوکی که در موقعیت i,j,k قرار گرفته است.

$BEV_{i,j,k}$: ارزش اقتصادی بلوک $B_{i,j,k}$.

d: نرخ تنزیل.

$x_{i,j,k,t}$: متغیر تصمیم که بیانگر استخراج بلوک $B_{i,j,k}$ در بازه زمانی t است. به طوری که اگر مقدار آن یک باشد نشان‌دهنده استخراج بلوک و اگر مقدار آن صفر باشد نشان‌دهنده عدم استخراج بلوک مورد نظر است.

۳-۲- محدودیت‌های استخراج

محدودیت‌های یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی تولید یک معدن به افق برنامه‌ریزی تولید و روش استخراج و عموما به معدن خاص مورد بهره‌برداری ارتباط دارد. در این مقاله محدودیت‌های برنامه‌ریزی تولید بلندمدت در روش استخراج تخریب در طبقات فرعی بررسی شده‌اند که این محدودیت‌ها در یک مدل بلوکی فرضی نیز حل و نتایج آن در ادامه بررسی شده‌اند. در این تحقیق سعی شده است کلیه محدودیت‌های برنامه‌ریزی تولید بلندمدت برای این روش استخراج بررسی شوند که در ادامه آورده شده‌اند.

۳-۲-۱- محدودیت ذخیره معدن

محدودیت ذخیره تعیین کننده این است که هر بلوک فقط یک بار در عمر معدن استخراج می‌شود و در رابطه ۲ آورده شده است:

$$\sum_{t=1}^{T} x_{i,j,k,t} = 1 \qquad (۲)$$

$$\forall\, i=(1,\dots,I);\ j=(1,\dots,J);k=(1,\dots,K);\ t\in T$$

۳-۲-۲- محدودیت ظرفیت تولید

این محدودیت، ظرفیت تولید معدن را کنترل می‌کند به طوری که تناژ کانسنگ استخراجی با ظرفیت از پیش تعیین شده برابر باشد. به عبارت دیگر، آهنگ تولید سالانه معدن را بین حداقل و حداکثر ظرفیت تولید تعریف شده حفظ می‌کند (رابطه ۳):

$$p_{y\,min} \le \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} P_{i,j,k}\, x_{i,j,k,t} \le p_{y\,max} \qquad (۳)$$

$$\forall\, t\in T$$

که در آن:

$p_{y\,min}$: کمینه آهنگ تولید سالانه معدن.

$p_{y\,max}$: بیشینه آهنگ تولید سالانه معدن.

$P_{i,j,k}$: تناژ مواد داخل بلوک $B_{i,j,k}$.

۳-۲-۳- محدودیت تعداد طبقات فرعی فعال

در یک معدن زیرزمینی که به روش تخریب در طبقات فرعی

بهره‌برداری می‌شود، تعداد طبقات فعال در آن واحد با توجه به حجم سرمایه‌گذاری، توان ماشین‌آلاتی و توان آماده‌سازی، محدود است و این محدودیت در رابطه ۴ آورده شده است:

$$x_{1,1,k,t} \le x_{I,J,k-S,t'} \quad (۴)$$

$$\forall\, k = (S,\dots,K);\ t,t' \in T; t' \le t$$

که در آن:

S حداکثر تعداد طبقات فعال در یک بازه زمانی.

۴-۲-۳- محدودیت دسترسی به بلوک‌ها

در روش استخراج به روش تخریب در طبقات فرعی برای استخراج یک بلوک باید بلوک کناری آن در خلاف جهت استخراج برداشت شده باشد تا بتوان دسترسی به استخراج آن بلوک فراهم شود که این محدودیت تحت عنوان محدودیت دسترسی افقی در رابطه ۵ آورده شده است. طبق این محدودیت در مدل بلوکی ارایه شده در شکل ۴، برای استخراج بلوک B_{221} باید بلوک B_{121} قبلا استخراج شده باشد.

$$x_{i,j,k,t} \le x_{i-1,j,k,t'} \quad (۵)$$

$$\forall\, i = (1,\dots,I);\ j = (1,\dots,J); k = (1,\dots,K);\ t,t' \in T;\ t' \le t$$

محدودیت دسترسی دوم مربوط به دسترسی قائم است. با توجه به اینکه روش تخریب در طبقات فرعی یک روش پایین‌رو است، برای استخراج بلوکی در طبقه دوم باید بلوک‌های متناظر بالای سر آن در طبقه اول استخراج شده باشد که به لحاظ رعایت ایمنی و شرایط ژئومکانیکی همواره طبقه بالایی باید در استخراج چندین بلوک جلوتر باشد و طبقه پایینی زمانی که طبقه بالایی به قدر کافی استخراج و پیشروی کرد امکان آغاز استخراج را دارد و این محدودیت با عنوان محدودیت دسترسی قائم در رابطه ۶ ارایه شده است. طبق این محدودیت در مدل بلوکی ارایه شده در شکل ۴، اگر فرض کنیم طبقه بالایی حداقل تعداد سه بلوک پیشروتر از طبقه پایین باشد، برای استخراج بلوک B_{112} باید بلوک‌های B_{111}، B_{211}، B_{311} و B_{411} قبلا استخراج شده باشند.

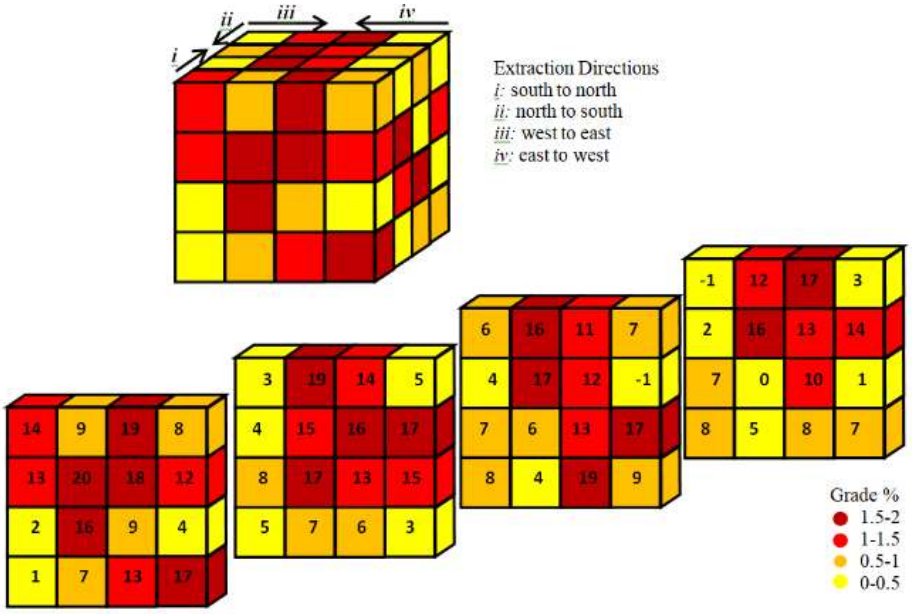
$$x_{i,j,k,t} \le x_{i+A,j,k-1,t'} \quad (۶)$$

$$\forall\, i = (1,\dots,I);\ j = (1,\dots,J); k = (1,\dots,K);\ t,t' \in T;\ t' \le t$$

که در این رابطه A حداقل تعداد بلوک‌هایی که لازم است برای استخراج طبقه پایینی در طبقه بالایی استخراج شده باشند.

۴- حل مدل

در این قسمت یک مدل بلوکی سه‌بعدی فرضی تشکیل و مدل ریاضی ارایه شده بر روی آن اجرا شده است. مدل بلوکی در شکل ۶ نشان داده شده و سود حاصل از استخراج هر بلوک بر روی آن نوشته شده است. در این مدل بلوکی، فرض بر این است که با نظر کارشناسان متخصص شرایط ژئومکانیکی و تخریب‌پذیری در ابعاد بلوک‌های آن که ناشی از فاصله‌داری طبقات فرعی و عمق برش‌های استخراجی است، مد نظر قرار گرفته‌اند. همچنین در این مدل بلوکی فرض بر آن است که این مدل بلوکی محدوده نهایی معدن نیز است که با یکی از روش‌های تعیین محدوده نهایی به دست آمده است.



شکل ۶- مدل بلوکی اقتصادی فرضی سه‌بعدی.

جدول ۱- نتایج استفاده از مدل برنامه‌ریزی تولید ارایه شده در مدل بلوک اقتصادی فرضی.

جهت استخراج	($) سود									NPV $
	سال ۱	سال ۲	سال ۳	سال ۴	سال ۵	سال ۶	سال ۷	سال ۸	جمع	
i	۱۲۹	۱۱۷	۹۳	۵۳	۹۶	۵۳	۴۷	۳۸	۶۲۶	۴۵۱.۴۱
ii	۱۲۴	۱۲۰	۵۶	۷۶	۸۶	۶۲	۶۳	۳۹	۶۲۶	۴۴۴.۸۰
iii	۱۱۳	۸۸	۸۶	۷۶	۷۸	۸۲	۴۵	۵۸	۶۲۶	۴۳۶.۸۴
iv	۱۱۰	۱۰۸	۸۳	۸۸	۹۸	۵۵	۴۴	۴۰	۶۲۶	۴۴۴.۸۶
برنامه دستی جهت *i*	۹۱	۷۱	۱۱۵	۷۷	۸۴	۶۱	۵۹	۶۸	۶۲۶	۴۲۸.۹۹
برنامه دستی جهت *iii*	۷۸	۸۴	۹۱	۱۰۱	۶۳	۸۲	۴۵	۸۲	۶۲۶	۴۲۴.۴۴

در این مساله مفروضات به شرح زیرند:

- تعداد بلوک‌ها در راستای افقی: i=4.
- تعداد بلوک‌ها در راستای قائم: j=4.
- تعداد بلوک‌ها در راستای افقی: k=4.
- بازه زمانی برنامه‌ریزی: T=8.
- ارزش اقتصادی بلوک‌ها در شکل ۶ بر روی بلوک‌ها نوشته شده است.
- نرخ تنزیل: d=10.
- حداکثر تعداد طبقات فعال در یک بازه زمانی: S=3.
- حداقل تعداد بلوک‌هایی که لازم است برای استخراج طبقه پایینی در طبقه بالایی استخراج شده باشند: A=2.

مدل فرضی ارایه شده بر اساس مدل ریاضی ارایه شده در روابط ۱ تا ۶ و با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار متلب حل شده است. در جدول ۱ نتایج استفاده از مدل برنامه‌ریزی تولید ارایه شده در مدل بلوکی اقتصادی شکل ۶ برای هشت سال تولید نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، NPVهای متفاوتی در جهت‌های مختلف استخراج به دست آمده‌اند و حداکثر NPV برای استخراج در جهت i است. برای امکان مقایسه نتایج این مدل با روش سنتی، نتایج حاصل از برنامه‌ریزی تولید دستی برای جهت‌های i و iii محاسبه و در انتهای جدول ۱ نشان داده شده است.

در برنامه‌ریزی دستی فرض بر این بود که طبقات به ترتیب از بالا به پایین استخراج شوند و توالی استخراج خاصی نداشته باشند. با توجه به محاسبات انجام شده و حل مدل در جهت‌های مختلف استخراج، حداکثر NPV قابل دستیابی برای مدل بلوکی ارایه شده در شکل ۶ معادل ۴۵۱٫۴۱ دلار به دست آمده است. در این حالت، جهت بهینه استخراج در جهت جنوب به شمال است. بنابراین، حداکثر NPV برای روش تخریب در طبقات فرعی با مدل ریاضی ارایه شده در این مقاله قابل دستیابی بوده و در این مثال بسیار ساده حدود ۲۳ دلار بیشتر از برنامه‌ریزی تولید دستی در همان جهت استخراج است. همچنین در این ذخیره فرضی، اختلاف بیشینه NPV در جهت بهینه با بیشینه NPV سایر جهت‌ها ۷ تا ۱۵ دلار (۱٫۷ تا ۳٫۵ درصد) است که نشان‌دهنده اهمیت انتخاب جهت بهینه استخراج است. با مقایسه برنامه بهینه در جهت بهینه با برنامه سنتی و دستی انجام شده برای همان جهت استخراج، اختلاف ۲۳ دلاری (۵٫۵ درصد) و اختلاف NPV حاصل از استخراج در جهت بهینه (جهت i) در مقایسه با استخراج سنتی در جهت iii اختلاف ۲۷ دلاری (۶٫۵ درصد) در آن مشهود است که این نتایج اهمیت برنامه‌ریزی تولید در معادن زیرزمینی را نشان می‌دهد.

در حقیقت محدودیت‌های ژئومکانیکی می‌توانند بعضی جهت‌های استخراج را منتفی کنند و امکان استخراج و حفاری بازکننده‌های اصلی در این جهت‌ها را غیرممکن کند. در این مقاله بعد از محاسبه ارزش خالص فعلی حاصل از معدنکاری ذخیره در جهت‌های مختلف و مقایسه آن‌ها، جهت و توالی استخراج بهینه تعیین شده و سپس با توجه به محدودیت‌های مربوط به محل بازکننده‌ها و جهت‌های ممکن استخراج، بهترین گزینه برای این ذخیره انتخاب و اجرایی می‌شود که در بخش بعدی بیشتر توضیح داده شده است.

۵- آماده‌سازی‌ها و بازکننده اصلی معدن

بازکننده‌ها و آماده‌سازی‌ها در معادن زیرزمینی یکی از اصلی‌ترین مراحل در روند طراحی معدن‌اند و معمولا بدون در نظر گرفتن آن‌ها هیچ کاری در فرآیند طراحی معادن زیرزمینی انجام نمی‌گیرد. به صورت سنتی در روند طراحی معادن زیرزمینی بعد از انتخاب روش استخراج، ابتدا بازکننده‌های اصلی و آماده‌سازی‌های معدن طراحی و سپس برنامه تولید برنامه‌ریزی می‌شود. در این مقاله این روند سنتی به چالش

کشیده شده و به اهمیت در نظر گرفتن برنامه‌ریزی تولید برای طراحی بازکننده‌های معدن تاکید می‌شود. در شیوه جدید پیشنهادی که در آن بازکننده‌ها و آماده‌سازی‌ها بر اساس برنامه تولید طراحی و جانمایی می‌شوند، ابتدا گزینه‌های مختلف بازکننده‌های اصلی (جانمایی و نوع بازکننده) با عنوان مجموعه بازکننده‌های ممکن (D_i) در نظر گرفته می‌شوند. سپس، برنامه‌ریزی بهینه تولید با مدل ارایه شده با هدف بیشینه کردنNPV تعیین می‌شود. پس از آن طبق نزدیکترین و بهترین گزینه بازکننده از بین مجموعه بازکننده‌های ممکن به برنامه‌ریزی تولید بهینه انتخاب و به عنوان بازکننده بهینه (D_{op}) طراحی می‌شود و سپس آماده‌سازی‌های معدن بر اساس بازکننده بهینه و برنامه‌ریزی تولید بهینه طراحی می‌شوند که انتخاب بازکننده بهینه از بین بازکننده‌های ممکن و با توجه به برنامه استخراج بهینه در رابطه ۷ نشان داده شده است. با توجه به اینکه مقدار بازکننده‌ها و آماده‌سازی‌ها برای یک معدن با هندسه یکسان با تغییر توالی استخراج بلوک‌های آن خیلی تغییر نمی‌کند، برنامه‌ریزی تولید بهینه تعیین شده نمی‌تواند تغییر معنی‌داری در حجم عملیات آماده‌سازی داشته باشد.

$$D_{op} = \{D_i \mid NPV_{D_i} \cong NPV_{max} \quad \forall\, i = 1, \dots, N\} \qquad (۷)$$

به عنوان مثال در مدل بلوکی فرضی شکل شماره ۶، برای استخراج در جهت‌های مختلف میزان بازکننده‌ها و آماده‌سازی‌ها تفاوتی نخواهند داشت و با یک میزان آماده‌سازی می‌توان در جهت‌های مختلف این ذخیره فرضی را استخراج کرد. بدین ترتیب با تعیین توالی بهینه و تطبیق آماده‌سازی‌ها با این توالی استخراج بهینه می‌توان به ارزش خالص فعلی بیشتری دست یافت. در صورتی که به عنوان مثال در جهت بهینه به دست آمده (جهت i) امکان آماده‌سازی جود نداشته باشد، در این صورت گزینه جهت استخراج شماره i از بین گزینه‌های ممکن حذف و از بین جهت‌های دیگر جهت بهینه بعدی که جهت استخراج شرق به غرب (iv) است، انتخاب خواهد شد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل ریاضی جدیدی با روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (IP) برای برنامه‌ریزی تولید معادن زیرزمینی با روش استخراج تخریب در طبقات فرعی توسعه داده شده است. تابع هدف این مدل ریاضی بیشینه کردن NPV عملیات معدنکاری است و بر روی مدل بلوکی اقتصادی اجرا می‌شود. محدودیت‌های فنی و اجرایی مناسب با روش استخراج در این مدل ریاضی لحاظ شده‌اند که از آن جمله می‌توان به محدودیت‌های ظرفیت تولید، دسترسی برای استخراج بلوک‌های اقتصادی ذخیره و تعداد طبقات فرعی فعال در آن واحد اشاره کرد. محدودیت‌هایی مانند شرایط ژئومکانیکی معدن، تخریب‌پذیری سقف و ماشین‌آلات مورد استفاده نیز در قالب هندسه طبقات فرعی و تشکیل مدل بلوکی ذخیره که یکی از ورودی‌های مدل ریاضی برنامه‌ریزی تولید ارایه شده محسوب می‌شود، مدنظر قرار گرفته‌اند.

در این مقاله روش جدیدی برای طراحی بازکننده‌های اصلی و آماده‌سازی‌های معادن زیرزمینی پیشنهاد شده است که طبق این روش پیشنهادی ابتدا گزینه‌های مختلف بازکننده‌های معدن بررسی و گزینه‌های ممکن به عنوان گزینه‌های کاندید در نظر گرفته می‌شوند. سپس براساس برنامه‌ریزی تولید بهینه نزدیکترین گزینه به برنامه تولید بهینه انتخاب و بر اساس آن آماده‌سازی‌های معدن طراحی می‌شوند.

در این تحقیق برای بررسی دقیق‌تر یک مدل برنامه‌ریزی تولید ریاضی توسعه داده شده و مدل یاد شده بر روی یک مدل بلوکی اقتصادی فرضی اجرا شد. بر اساس نتایج به دست آمده در این ذخیره فرضی، جهت استخراج بهینه جهت شمال به جنوب و بیشینه NPV قابل دستیابی بالغ بر ۴۵۱ دلار است. بدین ترتیب NPV حاصل از استخراج در جهت بهینه و توالی استخراج خروجی مدل ریاضی ارایه شده افزایش ۶/۵ درصد را نشان می‌دهد که گویای اهمیت برنامه‌ریزی تولید در معادن زیرزمینی است.

با توجه به بررسی‌های اولیه انجام شده به نظر می‌رسد در ذخایر واقعی و پیچیده اختلاف NPV برنامه بهینه با برنامه سنتی و دستی بسیار قابل توجه باشد و پیشنهاد می‌شود مدل ارایه شده در یک معدن واقعی اجرا و نتایج آن با برنامه دستی مقایسه شود.

منابع

1. Pourrahimian, Y., (2013), Mathematical programming for sequence optimization in block cave mining, Doctor of Philosophy Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta
2. Ataee-pour, M., (2005), A critical survey of the existing stope layout optimization techniques. Journal of Mining Science, Vol. 41, No. 5, 447-466
3. Shenavar, M. Ataee-pour, M. Rahmanpour M.; (2016), Evaluating mineable reserve in

presence of grade uncertainty using floating stope optimizer in underground mines; 6th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries (CAMI), 2016, Istanbul, Turkey

4. Shenavar M., Ataee-pour M., Rahmanpour M.; 2018; Production Scheduling in Sublevel Caving Method with the Objective of NPV Maximization; Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection.
5. Williams JK, Smith L, Wells PM (1973), Planning of underground copper mining.10th Internat. Appl. Sympos. Appl. Comput. Mineral Indust. (APCOM), Johannesburg, South Africa, 251–254
6. O'Sullivan, D., Newman, A., (2014), Extraction and Backfill Scheduling in a Complex Underground Mine, Interfaces 44(2), pp. 204–221, 2014 INFORMS
7. Brickey, A.J., (2015), Underground production scheduling optimization with ventilation constraints, PhD thesis of the Colorado School (Mining and Earth Systems Engineering).
8. Little, J., Knights, P., Topal, E., 2013. Integrated optimization of underground mine design and scheduling. J. S. Afr. Inst. Min. Metall 113 (10), 775–785.
9. Foroughi S., Khademi Hamidi J., Monjezi M., Nehring M., 2019, The integrated optimization of underground stope layout designing and production scheduling incorporating a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), Resources Policy 63 (2019) 101408
10. Winkler, B. (1998), System for quality-oriented mine production planning with MOLP. Proc. 27th Internat. Appl. Comput. Oper. Res. Mineral Indust. (APCOM) Sympos., Royal School of Mines, London, 53–59
11. Kuchta, M., Newman, A. Topal. E. (2004), Implementing a production schedule at LKAB's Kiruna Mine. Interfaces 34(2) 124–134
12. Newman, A., Kuchta. M. (2007), Using aggregation to optimize long-term production planning at an underground mine. Eur. J. Oper. Res. 176(2) 1205–1218
13. Martinez MA, Newman AM (2011), A solution approach for optimizing long- and short-term production scheduling at LKAB's Kiruna mine. Eur. J. Oper. Res. 211(1):184–197.

۱۴. هارتمن ال، ۱۹۸۷، اصول مهندسی معدن، ترجمه مهدی یاوری و علی‌اصغر خدایاری، انتشارات دانشگاه صنایع و معادن ایران