

(مقاله پژوهشی)

برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت خطی برای ذخایر معدنی با تغییرپذیری شدید زمین‌شناسی

رضا پوریزدان پناه^۱، علی عظیمی^{*}، علیرضا جبین پورا^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: مهر ۱۳۹۸، پذیرش: مرداد ۱۳۹۹)

چکیده

معادن خاک نسوز و خاک صنعتی به دلیل شرایط زمین‌شناسی و ماهیت رگه‌ای که دارند، معمولاً لایه‌های به‌شدت به‌هم‌ریخته و نامنظمی دارند و امکان برنامه‌ریزی تولید مبتنی بر مدل بلوکی برای آن‌ها به‌راحتی وجود ندارد. از این‌رو در این مطالعه، مدلی برای برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت این نوع معادن توسعه داده شده است. تابع هدف مدل بر اساس کمیته‌سازی هزینه‌ها تعریف شده است. در پژوهش حاضر، محدودیت‌های اکتشاف مواد جدید شیب در تابع هدف گنجانده شده است. مدل برای یکی از سینه‌های در حال کار معدن خاک نسوز استقلال‌آباد در نظر گرفته شده است. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، مدل استاندارد برنامه‌ریزی تولید به کار گرفته شده است. مدل برای هشت دوره زمانی (هفته) با نرم‌افزار CPLEX حل شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن بود که مدل توسعه داده شده توانست نسبت به مدل استاندارد هزینه‌ها را چهار درصد کاهش دهد. میزان برداشت از سینه کار ۱۸/۵ درصد و میزان انتقال مواد به انباشتگاه ۱۷ درصد نسبت به مدل استاندارد افزایش یافت؛ اما میزان برداشت مواد از انباشتگاه ۹۰ درصد نسبت به مدل استاندارد کاهش داشته است. به‌منظور بررسی وضعیت عملکرد پارامترهای مدل، تحلیل حساسیت روی پارامترها انجام شد. نتایج تحلیل حساسیت پارامترها نشان دادند که هزینه استخراج هر تن مواد هم‌اکنون در نقطه عطف نمودار قرار دارد. هزینه انتقال هر تن مواد به انباشتگاه دارای دونقطه کمیته است که هم‌اکنون تابع هدف در نقطه کمیته محلی قرار دارد. تابع هدف نسبت به هزینه برداشت از انباشتگاه حساسیتی نشان نداد. هزینه‌های ایجاد شیب در پله‌های دوم معدن بهینه نیست و با اندکی بهینه‌سازی در این هزینه‌ها می‌توان تابع هدف را کاهش داد. هزینه‌های ایجاد شیب کاری در ترازهای سوم و چهارم نیز از روال منطقی پیروی کرده و با افزایش این هزینه‌ها، تابع هدف نیز افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی:

برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت، برنامه‌ریزی خطی، تغییرپذیری زمین‌شناسی، خاک نسوز، معدن استقلال‌آباد

* عهده‌دار مکاتبات: azimi32@gmail.com

۱- مقدمه

- محدودیت فراوری: وزن کلی بلوک‌های ماده معدنی که در هر دوره زمانی فراوری شده‌اند، باید دست‌کم برابر با کمینه مقدار موردنیاز برای خوراک کارخانه فراوری بوده و نباید بیش از ظرفیت آن باشد. فرض می‌شود که بلوک‌های استخراج‌شده در هر دوره زمانی، در همان دوره فراوری می‌شوند.

- سایر محدودیت‌ها: بسته به نوع معدن و نظر کارشناسان، ممکن است محدودیت‌های نظیر محدودیت تولید فلز، محدودیت حداقل عرض کف پیت، محدودیت به‌کارگیری ماشین‌آلات و نظایر آن‌ها در برنامه‌ریزی در نظر گرفته شود.

بر اساس محدودیت‌هایی گفته‌شده نیاز است که مدلی برای برنامه‌ریزی تولید معدن توسعه داده شود. از این رو روش‌های قطعی برای برنامه‌ریزی تولید در معادن کوچک مقیاس معرفی شده است [۳،۲] اما این روش‌ها در مسائل با اندازه‌های واقعی به دلیل وجود محدودیت‌ها و پارامترهای زیاد، به زمان محاسباتی بسیار زیادی نیاز دارند. همچنین این روش‌ها به علت تعداد زیاد متغیرهای تصمیم‌گیری از نوع دودویی (باینری) از نظر محاسباتی بسیار گران هستند [۴].

در سال‌های اخیر برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی (SIP) برای مدیریت خطرات ناشی از عدم قطعیت زمین‌شناسی هنگام حل مسئله برنامه‌ریزی تولید معادن روباز به کار می‌رود. باین‌وجود، مشابه سایر تکنیک‌های برنامه‌ریزی ریاضی که متغیرهای عدد صحیح را بکار می‌گیرند، اصلی‌ترین مانع اعمال در مجموعه داده‌های واقعی، ناشی از تعداد بسیار زیاد متغیرهای عدد صحیح موردنیاز برای فرمول‌بندی ریاضی است؛ که این تعداد، تابعی از تعداد بلوک‌های استخراجی معدن در طول عمر پروژه معدنکاری است [۵].

مزایای در نظر گرفتن عدم قطعیت در پروژه‌های معدنی، اولین بار توسط ریونسکرافت [۶] و دوود و اونور [۷] مطرح شد. از آن زمان، مطالعات بسیاری در زمینه حل مشکلات ناشی از عدم قطعیت زمین‌شناسی ارائه شده است. تقریباً در همه این پژوهش‌ها، تابع هدف شامل جریمه برای انحراف از اهداف بوده و چارچوب پژوهش نیز برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی‌ای است که بر مدل‌هایی شبیه‌سازی شده از کانسار اعمال می‌شود [۸-۱۴]؛ در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری نیز به‌وفور در مسئله

عملیات معدنکاری به‌صورت معمول مبتنی بر مدل بلوکی حاصل از عملیات اکتشاف و مدل‌سازی ذخیره است. از این رو مدل کانسار آرایه‌ای سه‌بعدی از بلوک‌های منظم است که هر بلوک مفهوم یک واحد را برای معدنکاری دارد. مشخصات هر بلوک به‌منظور تنظیم عملیات مورد استفاده قرار می‌گیرد. مجموعه بلوک‌ها در سه بعد، ورودی فرآیند برنامه‌ریزی تولید را تشکیل می‌دهد. به‌منظور عملکرد صحیح یک معدن، معدنکاری بلوک‌ها باید در زمان صحیح، کارآمد و سودآور صورت گیرد. برنامه‌ریزی تولید معدن روباز به معنی استخراج توالی مواد معدن به سودآورترین شکل ممکن است، به‌نحوی که محدودیت‌های فیزیکی و عملیاتی نیز برآورده شوند.

بلوک‌ها به دودسته تقسیم‌بندی می‌شوند: بلوک‌های ماده معدنی که می‌توان آن‌ها را به نحو سودآوری استخراج و فراوری نمود؛ و بلوک‌های باطله که شامل باقی بلوک‌ها خواهد بود. ارزش اقتصادی هر بلوک به معنای سود خالص حاصل از آن بلوک است. فرآیند برنامه‌ریزی تولید در هر دوره زمانی مبتنی بر مجموعه‌ای از بلوک‌ها است که با استخراج آن‌ها، ارزش خالص فعلی معدنکاری در انتهای عمر معدن بیشینه می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت که مسئله برنامه‌ریزی تولید به دنبال انتخاب بلوک‌هایی برای استخراج، در دوره‌های زمانی مشخص استخراج آن‌ها و گزینه‌های فراوری آن‌ها، در عین برآورده کردن محدودیت‌های توالی در میان بلوک‌ها است. این فرآیند باید بر اساس محدودیت‌های منابع عملیاتی و بیشینه و/یا کمینه بودن عیار مجاز ماده معدنی یا آلاینده‌ها انجام می‌شود، به‌نحوی که ارزش خالص فعلی بیشینه شود [۱].

تصمیم‌گیری در مورد بلوک‌های استخراجی بر اساس چند محدودیت صورت می‌گیرد که عبارت است از:

- محدودیت ذخیره: یک بلوک در طول عمر معدن تنها یک مرتبه قابل استخراج است.

- محدودیت‌های شیب: به‌منظور استخراج یک بلوک خاص، باید تمامی بلوک‌های روبوی آن برداشته شده باشند.

- محدودیت‌های معدنکاری (ظرفیت استخراج): وزن کلی بلوک‌های استخراج‌شده (ماده معدنی یا باطله) در هر دوره زمانی باید دست‌کم برابر با یک مقدار مشخص باشد و نباید از ظرفیت تجهیزات بیشتر شود.

پیوسته به‌منظور تعیین تناژ برداشت از بلوک‌ها و انباشتگاه‌ها. البته تقریباً تمامی مدل‌های مطرح‌شده از در نظر گرفتن انباشتگاه صرف‌نظر کرده‌اند. علت این امر نیز تبدیل مسئله برنامه‌ریزی تولید به یک مسئله ریاضی غیرخطی است که می‌تواند چالش محاسباتی باشد.

در بعضی از موارد نیز محققان برای در نظر گرفتن کلیه موارد، مجبور به استفاده هم‌زمان از تمامی انواع متغیرها (پیوسته، عدد صحیح و باینری) شده‌اند، نظیر تحقیق یو‌پادای و عسکری‌نسب [۲۸] که در تحقیق خود از ۱۴ نوع متغیر استفاده کرده‌اند؛ و یا دیمیتراکوپولوس و جوبالی [۲۷] که از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تصادفی استفاده کردند.

بیشتر تحقیقات انجام‌گرفته در زمینه برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت، به‌استثنای تحقیقات در مورد الگوریتم‌های گسیل کامیون‌ها، بر افق‌های زمانی یک تا چند ماه متمرکز هستند. تحقیقاتی که به دوره‌های زمانی هفتگی یا دوهفته‌ای^۱ پرداخته باشند، بسیار اندک است. برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده در این دوره‌های زمانی، بلوک‌های در دسترس را به‌صورت یک رشته از ساختارها^۲ در نظر می‌گیرند که هر ساختار دارای خصوصیات مشخصی است. چگونگی در نظر گرفتن طرح ساختار در زمینه معدنکاری روباز توسط لیپووچکی و همکاران [۲۹] و بورت و همکاران [۳۰] بیان‌شده است. آن‌ها با در دست داشتن محل جابجایی بارکننده‌ها (که هر جابجایی بیانگر برداشت مواد از یک بلوک خاص در یک مقصد خاص است) که بر اساس طرح ساختارها صورت می‌گیرد، طیف وسیعی از رویکردها (شامل برنامه‌ریزی محدودیت‌ها، برنامه‌ریزی غیرخطی و نیز ترکیب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با روش‌های خودکارسازی طراحی) را برای ایجاد توالی حرکت بارکننده‌ها در نظر گرفتند. تابع هدف این محققان، کامل کردن فعالیت‌ها در کمترین زمان و رسیدن به بیشترین نرخ تغذیه سنگ‌شکن بود.

لیپه‌یوریکس و همکاران [۳۱] برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت معدن روباز از روش MIP استفاده کردند. برنامه‌ریزی آنان می‌توانست افق زمانی چندروزه تا چندین ماه را در نظر بگیرد. افق زمانی آن‌ها بستگی به این داشت که کدام بلوک‌ها و با چه ترتیبی از مدل زمین‌شناسی استخراج شود که بر همین اساس نیز حرکت شاول‌ها و در نتیجه ظرفیت تولید تجهیزات مشخص

برنامه‌ریزی تولید معدن روباز به کار گرفته‌شده‌اند. نظیر [۴]، [۱۵-۲۲]. با این وجود، این مدل‌ها نمی‌توانند بهینه بودن جواب ارائه‌شده را تضمین کنند [۲۳].

۲- بیان مسئله

در معدنی که تغییرپذیری بالای زمین‌شناسی در ذخیره آن‌ها وجود دارد، امکان شناخت کامل ذخیره با روش‌های معمول حفر گمانه‌های اکتشافی و مدل‌سازی وجود ندارد؛ بنابراین در این معدن، مدل بلوکی ذخیره به‌منظور برنامه‌ریزی تولید در دسترس نیست. از این رو تولید معدن بر مبنای مقدار مواد در دسترس و موادی که در حین استخراج شناسایی و کشف می‌شود، انجام می‌گیرد. در این شرایط برنامه‌ریزی تولید با مدل‌های کنونی که محدودیت ذخیره را در نظر می‌گیرند، امکان‌پذیر نیست. همچنین با توجه به نبود مدل بلوکی از ذخیره، امکان در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به مواد با روش‌های کنونی وجود ندارد.

معدن خاک نسوز و صنعتی از جمله معدنی هستند که معمولاً ذخیره آن‌ها به دلیل تغییرپذیری شدید زمین‌شناسی، امکان ساخت مدل بلوکی در آن‌ها با دشواری همراه است؛ بنابراین در این مطالعه سعی شده است برای رفع مشکلات و مسائل مربوط به برنامه‌ریزی تولید، مدلی برای برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت این نوع معدن توسعه داده شود.

۳- پیشینه پژوهش

در طراحی‌های برنامه‌ریزی بلندمدت برای معدن روباز، عمدتاً از متغیرهای عدد صحیح به‌منظور برقرار کردن محدودیت‌های تقدم بلوک‌ها استفاده می‌شود. این محدودیت‌ها باعث می‌شوند تا یک بلوک پیش از استخراج بلوک‌های رویی برداشته نشود [۲۴]. با این حال، محققانی نظیر چاندا و ویلکه [۲۵] با در نظر گرفتن تنها یک دوره زمانی (برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت) توانسته‌اند از این‌گونه محدودیت‌ها اجتناب کنند.

در مدل‌های مطرح‌شده توسط محققان از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) برای برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت معدن روباز استفاده‌شده است (نظیر [۲۶]، [۲۷]). در این موارد، عموماً دو نوع متغیر مورد استفاده قرار گرفته است. متغیرهای عدد صحیح (عمدتاً از نوع باینری) برای محدودیت‌های تقدم بلوک‌ها و متغیرهای

به صورت شناسایی مواد در دوره‌های زمانی آتی، نمی‌توان از تابع هدف بیشینه‌سازی سود یا ارزش خالص فعلی استفاده کرد؛ چرا که در این صورت، مدل به طور خودکار در دوره‌های زمانی آتی، مواد معدنی مورد اکتشاف را از نوعی در نظر خواهد گرفت که دارای بیشترین قیمت فروش باشند. به عبارت دیگر، مدل سعی در بیشینه کردن سود، با پیش‌بینی مواد دارای بیشترین ارزش خواهد داشت؛ بنابراین و بر اساس نیاز برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت، تابع هدف از نوع کمینه کردن هزینه‌ها فرض شده است. تابع هدف گفته شده در رابطه (۱) ارائه شده است.

این تابع هدف، از پنج بخش تشکیل شده است، بخش اول تابع هدف یعنی $(\sum_{t=1}^T x_k^t * CX)$ بیانگر هزینه استخراج x_k^t تن ماده معدنی باهدف فروش مستقیم در بازار است. بخش دوم تابع هدف $(\sum_{t=1}^T y_k^t * CY)$ بیانگر هزینه استخراج y_k^t تن ماده استخراجی باهدف انتقال به انباشتگاه است. بخش سوم تابع هدف $(\sum_{t=1}^T r_k^t * CR)$ بیان‌کننده هزینه برداشت r_k^t تن ماده معدنی از انباشتگاه باهدف فروش است. بخش چهارم تابع هدف $(\sum_{t=1}^T e_k^t * CE)$ بیانگر هزینه اکتشافات e_k^t تن ماده معدنی است. بخش آخر نیز هزینه ایجاد دسترسی و شیب است. در این بخش از تابع هدف، به ازای برداشت هر W تن از مواد استخراجی یک عملیات شیب‌سازی صورت خواهد گرفت. از این رو، معنای آخرین عبارت در تابع هدف به این صورت است که هرگاه میزان برداشت از تراز h (به هر منظوری، فروش یا انتقال به انباشتگاه) به W تن برسد، یک‌بار هزینه ایجاد شیب اعمال خواهد شد [علامت [] در آخرین عبارت تابع هدف، به معنی تابع جزء صحیح است]. به این صورت، تابع هدف خطی خواهد بود.

می‌شد. آن‌ها برای کاستن از زمان محاسبات، ۴ استراتژی مختلف را فرض کردند. تابع هدف آن‌ها کمینه کردن هزینه‌های عملیات نظیر حرکت شاول‌ها، چالزنی و آتشیاری بود. مرور کاملی بر روش‌های برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت معادن روباز را می‌توان در تحقیق بلام [۲۴] مشاهده نمود.

۴- مدل توسعه داده‌شده

در این بخش به ارائه مدل توسعه داده‌شده برای ذخایر معدنی با تغییر پذیری بالا زمین‌شناسی پرداخته شده است. به نظر می‌رسد تاکنون مدلی برای برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت این‌گونه ذخایر توسعه داده نشده است. عمده مدل‌ها به بررسی عدم قطعیت در ذخیره پرداخته و سعی کرده‌اند به نوعی با عدم قطعیت موجود مقابله کنند؛ اما در مدل توسعه داده‌شده با در نظر گرفتن محدودیت اکتشاف حین استخراج می‌توان به برنامه‌ریزی تولید این‌گونه معادن کمک کرد. در این مدل با استفاده از محدودیت اکتشاف حین استخراج، میزان مواد موردنیاز معدن، بر اساس تعهد فروش و ادامه فرایند استخراج به برنامه‌ریزان پیشنهاد می‌شود؛ بنابراین مدل با فرض شناسایی مواد به میزان پیشنهادی و در دسترس قرار گرفتن آن‌ها، در دوره‌های زمانی آتی حل می‌شود. همچنین محدودیت دسترسی به مواد به صورت هزینه در تابع هدف لحاظ شده است به این صورت که مدل برای برداشت مقدار مشخصی از مواد، یک هزینه دسترسی به مواد به تابع هدف مدل اضافه می‌کند متغیرها و پارامترهای مدل در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ ارائه شده‌اند.

۴-۱- تابع هدف

تابع هدف در این مدل به صورت کمینه‌سازی هزینه‌ها تعریف شده است. با توجه به وجود بخشی از تابع هدف

$$\text{Min } Z = \sum_{k=1}^K \left(\underbrace{\sum_{t=1}^T x_k^t \times CX}_{(1)} + \underbrace{\sum_{t=1}^T y_k^t \times CY}_{(2)} + \underbrace{\sum_{t=1}^T r_k^t \times CR}_{(3)} + \underbrace{\sum_{t=1}^T e_k^t \times CE}_{(4)} + \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H \left[\frac{(x_{k,h}^t + y_{k,h}^t)}{W} \right] \times \text{SlopeCost}_h \right) \quad (1)$$

۴-۲- محدودیت‌ها

روابط (۲) تا (۱۰) محدودیت‌های مدل هستند که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

جدول ۳- پارامترهای مدل توسعه داده‌شده

پارامترها	
CX	هزینه استخراج و انتقال هر تن ماده معدنی از معدن به‌منظور ارسال به مقاصد فروش
CY	هزینه استخراج و انتقال هر تن ماده استخراجی (ماده معدنی و باطله) از سینه‌کار به انباشتگاه و دامپ باطله
CR	هزینه برداشت و انتقال هر تن ماده معدنی از انباشتگاه به‌منظور ارسال به مقصد فروش
CE	هزینه کشف هر تن ماده در حین استخراج
W	میزان تناژی که به ازای استخراج آن یک هزینه دسترسی و ایجاد شیب به مواد استخراجی تعلق می‌گیرد
T_{\max}^t, T_{\min}^t	کمترین و بیشترین میزان تولید معدن در دوره زمانی t
$S_{k(\min)}^t$	حداقل میزان تولید از ماده معدنی نوع k به‌منظور ارسال به مقصد فروش
SC_k^t	حداکثر میزان انباشت ماده معدنی نوع k در دوره زمانی t
e_k^0	میزان مواد موجود از نوع k در ترازهای استخراجی معدن در ابتدای دوره
I_k^0	میزان تناژ موجودی انباشتگاه از نوع k در ابتدای دوره
$F_{k,h}^t$	حداکثر توان تولید ماده نوع k از تراز h در زمان t
$SlopeCost_h$	هزینه واحدی که به ازای برای برداشت W تن مواد برای ایجاد دسترسی و شیب در تراز h در تابع هدف اعمال می‌شود

$$T_{\min}^t \leq \sum_{k=1}^K (x_k^t + y_k^t) \leq T_{\max}^t \quad \forall t \quad (2)$$

$$x_{k,h}^t + y_{k,h}^t \leq F_{k,h}^t \quad \forall t, k, h \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H F_{k,h}^t = \sum_{k=1}^K (x_k^t + y_k^t) \quad \forall k \quad (4)$$

$$x_k^t + y_k^t \leq e_k^0 + \sum_{i=1}^t e_k^i - \sum_{i=1}^{t-1} (x_k^i + y_k^i) \quad \forall t, k \quad (5)$$

$$I_k^t = y_k^t + I_k^{t-1} - r_k^t \quad (6)$$

$$r_k^t \leq I_k^t \quad (7)$$

$$y_k^t \leq SC_k^t \quad \forall t \quad (8)$$

$$x_k^t + r_k^t \geq S_{k(\min)}^t \quad \forall t, k \quad (9)$$

$$x_k^t, y_k^t, r_k^t, e_k^t, x_{k,h}^t, y_{k,h}^t \geq 0 \quad (10)$$

جدول ۱- متغیرهای مدل توسعه داده‌شده

متغیرهای تصمیم‌گیری	
x_k^t	متغیر میزان برداشت هر تن از ماده معدنی نوع k در زمان t از سینه‌کار، به‌منظور ارسال به مقصد فروش (متغیر گسسته، عدد صحیح)
y_k^t	متغیر میزان برداشت هر تن از ماده استخراجی (ماده معدنی و باطله) نوع k در زمان t از سینه‌کار، به‌منظور انتقال به انباشتگاه ماده معدنی و دامپ باطله (متغیر گسسته، عدد صحیح)
r_k^t	متغیر میزان برداشت هر تن از ماده معدنی نوع k در زمان t از انباشتگاه به‌منظور ارسال به مقصد فروش (متغیر گسسته، عدد صحیح)
e_k^t	متغیر میزان ماده معدنی نوع k موردنیاز در دوره زمانی t که بایستی حین استخراج اکتشاف شود (متغیر گسسته، عدد صحیح)
$x_{k,h}^t$	میزان برداشت هر تن از ماده معدنی نوع k در زمان t از تراز h به‌منظور ارسال به مقصد فروش (متغیر گسسته، عدد صحیح)
$y_{k,h}^t$	میزان برداشت هر تن از ماده استخراجی نوع k در زمان t از تراز h به‌منظور انتقال به انباشتگاه (متغیر گسسته، عدد صحیح)

جدول ۲- شمارنده‌های مدل توسعه داده‌شده

شمارنده	
t	تعداد دوره‌های زمانی برای برنامه‌ریزی $t=1, \dots, T$
h	تعداد ترازها (پله‌های استخراجی) معدن $h=1, \dots, H$
k	تعداد انواع مواد استخراجی $k=1, \dots, K$

۴-۱- محدودیت معدنکاری

محدودیت کمینه و بیشینه توان تولید تجهیزات معدن در هر دوره زمانی در رابطه (۲) ارائه شده است. به این صورت که میزان تناژ مواد استخراجی به‌منظور انتقال به مقصد فروش و انباشتگاه برای تمامی مواد استخراجی باید بین کمینه و بیشینه توان تولید معدن باشد.

در رابطه (۳) محدودیت ایجاد تمرکز استخراج در ترازهای استخراجی آورده شده است. به این صورت که میزان مواد استخراجی در هر دوره زمانی به‌منظور انتقال به مقصد فروش و انباشت برای تمامی مواد استخراجی از هر تراز باید کوچکتر از بیشینه توان تولید هر ماده در آن تراز باشد.

میزان مشخص شده برای فروش آن ماده (S_k^t) باشد. این محدودیت با رابطه (۹) ایجاد شده است.

۴-۲-۵- محدودیت مثبت بودن متغیرهای تصمیم

به منظور مثبت شدن متغیرهای تصمیم، محدودیت‌هایی مانند رابطه (۱۰) به مدل افزوده شده است.

۵- معدن خاک نسوز استقلال آباده

معدن خاک نسوز استقلال آباده از نظر موقعیت جغرافیایی در شمال استان فارس و در فاصله ۱۰ کیلومتری شمال شرق شهر آباده واقع شده و دارای مختصات جغرافیایی "۲۸' ۱۴" ۳۱° عرض شمالی و "۵۸' ۴۱" ۵۲° طول شرقی و متعلق به زون ایران مرکزی است.

معدن استقلال یکی از بزرگ‌ترین معادن خاک نسوز پیروفیلیتی کائولن‌دار کشور است. رسوبات دونین زیرین و میانی در محدوده معدن وجود ندارد و در قسمت‌های شمالی و جنوبی، رسوبات دونین پسین گسترش دارند که بیشتر شیل ماسه‌ای است؛ بنابراین سنگ غالب در منطقه، از جنس شیل هیدرومیکای پیروفیلیتی کائولن‌دار بوده که مقدار کمی در آن‌ها زغال دیده می‌شود. علاوه بر شیل، ماسه‌سنگ کوارتزیتی، کوارتزیت، ماسه‌سنگ آهکی، آهک ماسه‌ای و آهک تخریبی نیز در محدوده وجود دارد. آهک خاکستری تیره‌رنگ متعلق به دوره کربونیفر، رسوبات دونین را به طور هم‌شیب می‌پوشاند [۳۲]. به طور کلی رسوبات دونین پسین شمال معدن از آهک، شیل، کوارتز آرنایت و سیل‌های نفوذی تشکیل شده است. یکی از مهم‌ترین واحدهای لیتولوژیکی مورد مطالعه آهک‌های خاکستری‌رنگ حاوی *Platyclymendis* است.

ماده معدنی از نظر زمین‌شناسی، از نوع سنگ‌های رسوبی نرم و رس دار به شمار می‌آید. بر اساس تخمین ذخیره انجام شده، در حال حاضر ذخیره قطعی ۱۵۰ میلیون تن ماده معدنی در این معدن وجود دارد.

۴-۶- حل مدل و اعتبارسنجی

برای حل مدل، سینه‌کاری از معدن به عرض ۱۰۰ متر، ارتفاع ۲۴ متر و پهنا ۶۰ متر مدل‌سازی شد. این مدل با توجه به اینکه ارتفاع هر تراز استخراجی برابر با ۶ متر است، دارای ۴ تراز استخراجی است.

میزان مواد استخراجی از معدن که به مقصد فروش یا انباشتگاه ارسال شده‌اند باید با مجموع تناژ موادی که از تمامی ترازها استخراج شده‌اند، برابر باشد (رابطه (۴)).

۴-۲-۲- محدودیت اکتشاف حین استخراج

محدودیت اکتشاف حین استخراج به این صورت است که مدل مقدار ماده مورد نیاز نوع k که باید هم‌زمان با عملیات در دوره زمانی t شناسایی و کشف شود (e_k^t) را پیشنهاد می‌دهد. این مقدار باعث می‌شود که مقدار ذخیره در دسترس مدل برای برداشت محدود شود. به این صورت که در رابطه (۵) میزان مواد استخراجی از نوع k که به مقصد فروش یا انباشتگاه ارسال می‌شود ($x_k^t + y_k^t$) در هر دوره زمانی باید کوچک‌تر از موجودی اولیه آن ماده (e_k^0) و مجموع میزانی که باید تا آن دوره زمانی (t) اکتشاف شود ($\sum_{t=1}^T e_k^t$) منهای میزان مواد استخراجی از آن ماده که به مقصد فروش یا انباشتگاه در دوره‌های زمانی قبلی ($t-1$) ارسال شده است ($\sum_{t=1}^{t-1} (x_k^t + y_k^t)$) باشد.

۴-۲-۳- محدودیت انباشتگاه‌ها

محدودیت‌های مربوط به انباشت مواد استخراجی را در مدل توسط رابطه‌های (۶)، (۷) و (۸) لحاظ می‌شود به این صورت که در رابطه (۶) موجودی هر انباشتگاه در دوره زمانی t به ازای هر نوع ماده معدنی (I_k^t)، برابر است با مجموع ورودی به انباشتگاه در آن دوره زمانی (y_k^t) و موجودی آن انباشتگاه در دوره زمانی $t-1$ (I_k^{t-1}) منهای میزان برداشت از انباشتگاه در دوره زمانی t (r_k^t) است. در هر دوره زمانی، میزان مواد معدنی نوع k برداشت شده از انباشتگاه (r_k^t) نباید بیشتر از ظرفیت آن انباشتگاه در آن دوره زمانی (I_k^t) باشد (رابطه (۷)). همچنین در رابطه (۸) محدودیت انباشت مقدار محدود از ماده k در هر دوره زمانی ارائه شده است. به عبارت دیگر، این محدودیت ناشی از ظرفیت نهایی هر انباشتگاه است.

توضیح این نکته لازم است که در مدل توسعه داده شده، عملیات ترکیب مواد معدنی^۳ انجام نمی‌شود و انباشتگاه‌ها برای رفع نوسانات تولید ایجاد شده‌اند.

۴-۲-۴- محدودیت تعهد فروش

میزان مواد معدنی نوع k ارسال شده از معدن و انباشتگاه به مقصد فروش در دوره زمانی t ، باید مساوی یا بیشتر از

است (مدل توسعه داده‌شده ۷۷۷ تن و مدل استاندارد ۷۵۰۵ تن). با توجه به نوآوری موجود در مدل توسعه داده‌شده، لازم است تا نحوه عملکرد پارامترها در مدل بررسی شوند. از این‌رو تحلیل حساسیتی بر روی هزینه‌های استخراج، هزینه‌های انتقال به انباشتگاه و هزینه‌های برداشت از انباشتگاه انجام شده است.

۷- تحلیل حساسیت پارامترها

با توجه به آنچه گفته شد، برای ارزیابی از نحوه اثر هر یک از پارامترها بر روی تابع هدف مدل توسعه داده‌شده، اجرای مدل با تغییر مجزای هر کدام از پارامترها در چندین مرتبه انجام شد. برای بررسی میزان حساسیت هزینه‌ها نسبت به هزینه استخراج هر تن ماده معدنی ابتدا همانند مدل توسعه داده‌شده برابر با ۳۸۰ هزار ریال در نظر گرفته شده است. مطابق با شکل ۱، با کم شدن این هزینه، تابع هدف نیز کاهش می‌یابد، از طرفی شیب افزایش تابع هدف برای هزینه استخراج هر تن مواد در هزینه‌های بیش از ۴۶۰ هزار ریال و بیشتر، بسیار شدید خواهد بود.

تأثیر تغییر هزینه‌های انتقال هر تن مواد استخراجی به انباشتگاه بر تابع هدف در شکل ۲ نشان داده شده است. در مدل توسعه داده‌شده، هزینه انتقال هر تن مواد استخراجی برابر با ۴۰ هزار ریال در نظر گرفته شده است. مطابق با شکل ۲، در صورتی که هزینه انتقال هر تن مواد استخراجی تا ۳۷ هزار ریال کاهش یابد، می‌توان شاهد کاهش نزدیک به ۱۳ درصدی در تابع هدف بود.

در این نمودار هم‌زمان با کاهش هزینه‌های انتقال هر تن از مواد استخراج شده به انباشتگاه، در دونقطه تابع هدف افزایش یافته است. این افزایش در تابع هدف علیرغم کاهش در هزینه‌های انتقال را می‌توان به این صورت تفسیر کرد که در نقاطی، با کاهش هزینه‌ها، میزان بسیار بیشتری از مواد به انباشتگاه منتقل می‌شود. این تغییر در روند حل مسئله، تغییری در میزان مواد فروخته شده حاصل نخواهد کرد، اما سعی می‌شود تا ظرفیت انباشتگاه‌ها تکمیل شود. در تحلیل حساسیت انجام شده، وضعیت تغییر تابع هدف نسبت به تغییر در هزینه‌های برداشت ماده معدنی از انباشتگاه نیز مورد بررسی قرار گرفت.

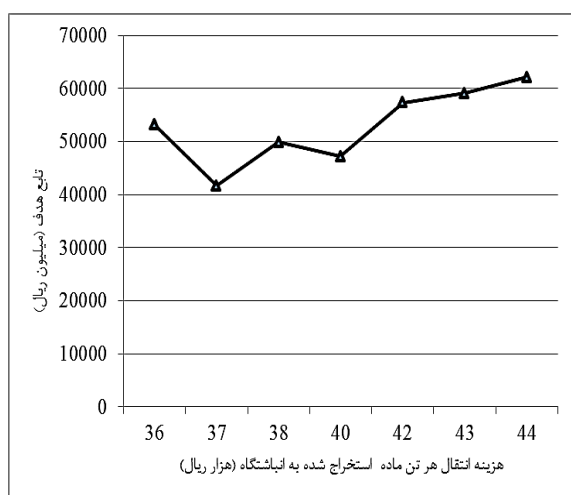
به منظور اعتبارسنجی مدل توسعه داده‌شده، از یک مدل استاندارد بلوکی [۳۳، ۳۴] استفاده شده است. مدل بلوکی استاندارد شامل بلوک‌های ۱۳/۳ تنی با ابعاد $۲/۵ \times ۲ \times ۱$ (۵ مترمکعب) است. همچنین عیار لایه‌های با وضعیت پیچیده با استفاده از نرم‌افزار سورپک به یک مدل بلوکی اقتصادی معادل (با در نظر گرفتن تعدادی فرض‌های ساده کننده) تبدیل شده است. برای حل این مدل‌ها، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.

- هزینه شناسایی و اکتشاف در تمامی ترازها ثابت در نظر گرفته شده است.
- هزینه انتقال مواد استخراج شده به انباشتگاه برای تمام مواد ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین هزینه برداشت هر نوع ماده معدنی از انباشتگاه نیز ثابت فرض شده است.
- عملیات ترکیب مواد در معدن انجام نمی‌شود و انباشتگاه‌ها صرفاً برای رفع نوسانات تولید ایجاد شده‌اند.
- برنامه‌ریزی صورت گرفته، برای معدن در حال کار بوده و سینه‌کارهای تولیدی فعلی را برنامه‌ریزی خواهد کرد.
- هر دو مدل برای ۸ دوره زمانی ($t=8$)، چهار نوع ماده (شامل باطله، sp700 با کمترین کیفیت، sp500 با کیفیت متوسط و sps ویژه با کیفیت بالا) و چهار تراز استخراجی حل شدند.
- توان تولید هفتگی برابر با ۱۲۰۰۰ تن یا معادل ۱۲۰ بلوک کوچک روزانه در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از هر یک از دو مدل در جدول ۴ آورده شده است.

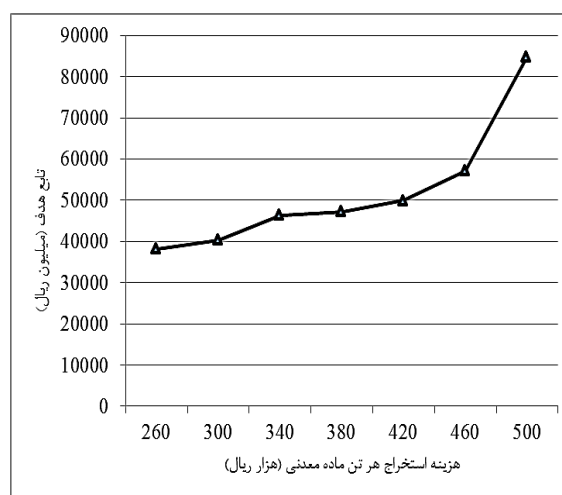
همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، هزینه‌های به‌دست‌آمده از مدل توسعه داده‌شده حدود ۴ درصد کمتر از هزینه‌های مدل استاندارد است. میزان برداشت از سینه‌کارها در مدل توسعه داده‌شده ۱۸/۵ درصد بیشتر از مدل استاندارد است (مدل توسعه داده‌شده ۱۰۱۳۳۰ تن و مدل استاندارد ۸۳۷۷۶ تن). همچنین میزان انتقال مواد به انباشتگاه در مدل توسعه داده‌شده ۱۷ درصد بیشتر از مدل استاندارد (مدل توسعه داده‌شده ۵۶۴۷۱ تن و مدل استاندارد ۴۶۹۹۹ تن)، اما میزان برداشت از انباشتگاه‌ها در مدل توسعه داده‌شده ۹۰ درصد کمتر از مدل استاندارد

جدول ۴- نتایج حاصل از حل مدل‌ها در نرم‌افزار CPLEX

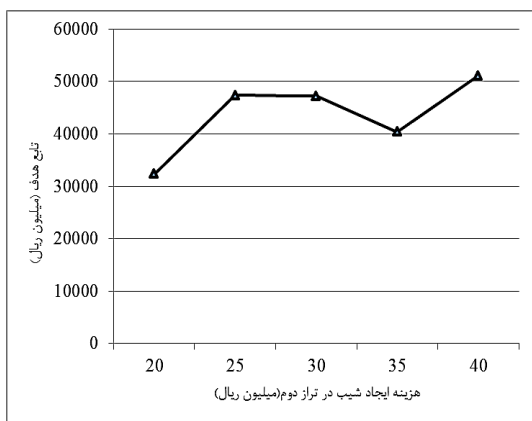
مدل توسعه داده‌شده														تابع هدف (ریال)	دوره‌های زمانی	
میزان اکتشاف (e) (تن)				برداشت از انباشتگاه (r) (تن)			انتقال به انباشتگاه (y) (تن)			برداشت مواد استخراجی از سینه‌کار به منظور انتقال به مقصد فروش و انباشتگاه (تن)						
sps	sp۵۰۰	sp۷۰۰	باطله	sps	sp۵۰۰	sp۷۰۰	sps	sp۵۰۰	sp۷۰۰	باطله	sps	sp۵۰۰	sp۷۰۰	باطله		
.	.	۴۴۹	.	.	.	.	۱۴	۱۷۵	۵۱۴۰	۱۴۲۰	۳۵۱۰	۳۳۹۰	۵۱۴۰	۱۴۲۰	-	۱
۱۸	.	۷۶۱	۴۱۹	.	.	.	۵۴۸	۲۵۲۶	۳۱۰۹	۱۵۶۰	۳۶۳۰	۴۷۲۰	۳۲۲۰	۱۵۶۰	-	۲
۲۷۱	۲۲۴۳	۱۵۰۸	.	.	.	.	۱۷۶	۳۸۵۱	۱۶۵۱	۳۳۰۱	۲۰۰۴	۵۲۱۸	۲۵۳۸	۳۳۰۱	-	۳
.	۴۲۶۳	۱۳۰۰	.	۲۱	.	.	۱۰۱۲	۱۰۱۲	۱۶۹۳	۳۰۵۴	۴۲۱۱	۲۰۱۲	۳۰۵۲	۳۰۵۴	-	۴
۱۷۹۹	۱۷۵۳	۴۲۷	.	۳۵	.	.	۱۰۱۰	۱۲۵۹	۲۷۹۵	۱۲۴۱	۶۲۱۴	۱۲۵۹	۳۲۷۶	۱۲۴۱	-	۵
۳۲۰۶	.	۳۲۱۴	۳۲۹۱	۲۰۸	.	.	۱۵۳۲	۱۹۷۵	۲۵۷۲	۱۵۴۲	۵۷۴۲	۲۸۹۶	۲۵۴۲	۱۵۴۲	-	۶
۱۱۸۷	.	.	.	.	۲۰۸	.	۱۰۷۶	۳۷۳	۵۰۹۳	۲۹۸۶	۳۶۹۲	۳۷۳	۶۵۸۷	۲۹۸۶	-	۷
.	.	.	.	۱۹۳	۱۱۲	.	۴۰۵۳	.	.	.	۱۲۰۰۰	.	.	.	-	۸
۶۴۸۱	۸۲۵۹	۷۶۵۹	۳۷۱۰	۴۵۷	۳۲۰	.	۹۴۲۱	۱۱۱۷۱	۲۲۰۵۳	۱۵۱۰۴	۴۰۰۰۳	۱۹۸۶۸	۲۶۳۵۵	۱۵۱۰۴	۴۷۱۹۰	مجموع میلیون
مدل استاندارد														۴۹۲۳۰	میلیون	
-	-	-	-	۲۹۱	۷۲۱۴	.	۲۹۳	۱۶۴۱۲	۱۷۲۴۳	۱۳۸۷۲	۳۴۸۵۹	۱۷۰۳۷	۱۸۰۰۸	۱۳۸۷۲	-	-



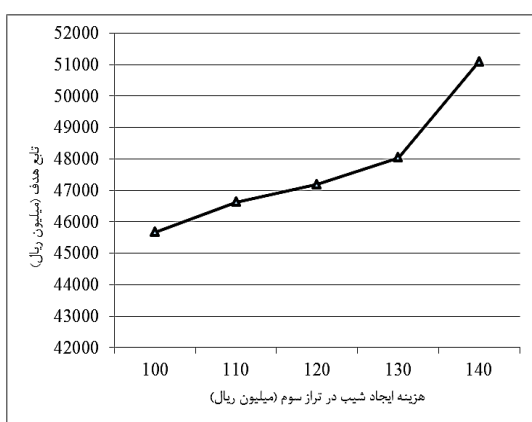
شکل ۲- بررسی تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات هزینه انتقال هر تن ماده به انباشتگاه



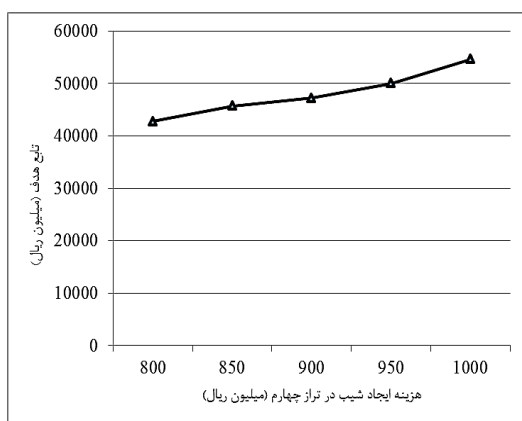
شکل ۱- بررسی تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات هزینه استخراج هر تن ماده معدنی



شکل ۳- بررسی تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات هزینه ایجاد شیب در تراز دوم معدن



شکل ۴- بررسی تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات هزینه ایجاد شیب در تراز سوم معدن



شکل ۵- بررسی تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات هزینه ایجاد شیب در تراز چهارم معدن

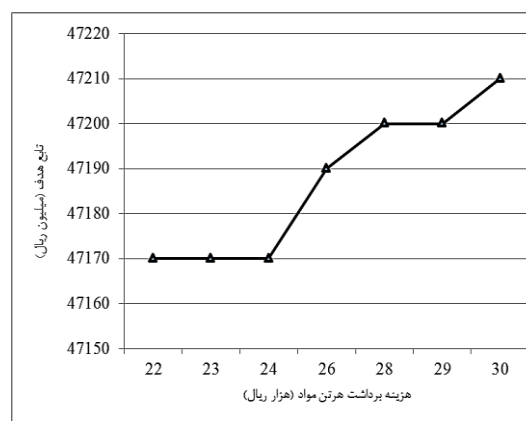
بر اساس شکل ۳، با افزایش دقت در تغییرات تابع هدف، مشاهده می‌شود که این پارامتر تأثیر به‌سزایی بر تابع هدف ندارد.

با توجه به اینکه در تابع هدف، هزینه‌های ایجاد شیب وجود دارد، تأثیر تغییرات این پارامتر در تراز استخراجی دوم بر تابع هدف مورد ارزیابی قرار گرفت. روند این تغییرات در شکل ۴ نشان داده شده است.

در مدل توسعه داده شده، هزینه ایجاد شیب در تراز استخراجی دوم به ازای برداشت هر بلوک برابر با ۳۰ میلیون ریال در نظر گرفته شده است.

بر اساس شکل ۴، با افزایش این هزینه به ۳۵ میلیون ریال و یا کاهش آن به ۲۰ میلیون ریال، از مقدار تابع هدف کاسته می‌شود. این کاهش با کاهش هزینه‌های ایجاد شیب امری طبیعی است؛ اما کاهش تابع هدف با افزایش هزینه‌های ایجاد شیب می‌تواند ناشی از تغییر رفتار مدل و اجبار مدل به عدم استخراج از تراز استخراجی پایین‌تر و برداشت از سینه کارهای فعلی باشد.

تغییرات تابع هدف نسبت به تغییر هزینه ایجاد شیب در ترازهای استخراجی سوم و چهارم به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده، افزایش هزینه شیب در ترازهای استخراجی سوم و چهارم منتج به افزایش تابع هدف می‌شود.



شکل ۶- بررسی تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات هزینه برداشت هر تن ماده معدنی از انباشتگاه

۸- نتایج

منطقی پیروی کرده و با افزایش این هزینه‌ها، هزینه‌های کلی معدن نیز افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که این معدن باید در تعدادی از هزینه‌های خود بازنگری کرده و نقطه بهینه را برای کاهش هزینه‌های کلی بیابد.

مراجع

- [1] Jelvez E., Morales N., Nancel-Penard P., Cornillier F., (2019). A new hybrid heuristic algorithm for the Precedence Constrained Production Scheduling Problem: A mining application, *Omega* (2019), (doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.03.004>)
- [2] Caccetta L., Hill S.P., An application of branch and cut to open pit mine scheduling, *J. Global Optim.* 27 (2) (2003) 349–365, (<http://dx.doi.org/10.1023/A:1024835022186>)
- [3] Dagdelen K., Johnson T.B., Optimum open pit mine production scheduling by Lagrangian parameterization, in: Paper Presented at the Proc. of the 19th APCOM, 1986.
- [4] Paithankar A., Chatterjee Sh. (2019). Open pit mine production schedule optimization using a hybrid of maximum-flow and genetic algorithms; *Applied Soft Computing*, Volume 81, August 2019, 105507 (<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105507>)
- [5] Mai N.L., Topal E., Erten O., Sommerville B., (2019). A new risk-based optimisation method for the iron ore production scheduling using stochastic integer programming; *Resources Policy* (2019), (<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.11.004>).
- [6] Ravenscroft, P.J. (1992) Risk analysis for mine scheduling by conditional simulation; *Traus Inst Miu Metall (Sect A Min ind) VIOL*, May-Aug 1992, PAIO4-AI08 (Abstract)
- [7] Dowd, P. A. and Onur, A. H., (1993) "Open pit optimization - part 1: optimal open pit design", *Trans. Instn Min. Metall. (Sect. A: Min. industry)*, No. 102, p.p. A95-A104.
- [8] Godoy, M., Dimitrakopoulos, R.G., (2004). Managing risk and waste mining in long-term production scheduling. *SME Trans.* 316.
- [9] Ramazan, S., Dimitrakopoulos, R.G., (2004). Traditional and new MIP models for production scheduling with in-situ grade variability. *Int. J. Min. Reclam. Environ.* 18 (2), 85–98.
- [10] Meagher, C., Abdel Sabour, S.A., Dimitrakopoulos, R.G., (2009). Pushback design of open pit mines under geological and market uncertainties. *Orebody Model. Strat. Mine Plan. Spectr. Ser. AusIMM* 2.
- [11] Dimitrakopoulos, R.G., Abdel Sabour, S.A., (2011). Incorporating geological and market uncertainties and operational flexibility into open pit mine design. *J. Min. Sci.* 47 (2), 191–201.
- [12] Gholamnejad, J., Moosavi, E., (2012). A new mathematical programming model for longterm

در پژوهش حاضر، برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت برای معادنی که با تغییرپذیری شدید در کانسار روبرو هستند مثل خاک نسوز توسعه داده شده است. از آنجایی که خاک نسوز به صورت معمول دارای لایه‌های به شدت به هم ریخته است، نمی‌توان به سادگی به صورت مدل بلوکی برای آن‌ها عملیات برنامه‌ریزی تولید را انجام داد. با توجه به اینکه مطالعه موردی این مطالعه معدن خاک نسوز استقلال آباه بوده است، در این مدل به منظور برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت از یک برنامه‌ریزی مبتنی بر برداشت مواد بر اساس تناژ به جای برداشت به صورت بلوکی استفاده شده است. تابع هدف بر اساس کمیته‌سازی هزینه‌ها تعریف شده است.

همچنین در مدل توسعه داده شده، برای اولین بار، محدودیت‌هایی برای اکتشاف مواد جدید به مدل افزوده شده و محدودیت دسترسی نیز بر اساس هزینه تعریف شده است. برای اجرای مدل، یکی از سینه کارهای در حال کار معدن در نظر گرفته شد. برای اعتبارسنجی پاسخ مدل، از یک مدل استاندارد برنامه‌ریزی تولید استفاده و لایه‌های مواد به صورت بلوک‌های فرضی در نظر گرفته شد. این مدل برای هشت دوره زمانی (هفته) توسط نرم‌افزار CPLEX حل شده است.

نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که مدل توسعه داده شده توانست نسبت به مدل استاندارد هزینه‌ها را ۴ درصد کاهش دهد. میزان برداشت از سینه کار ۱۸/۵ درصد و میزان انتقال مواد به انباشتگاه ۱۷ درصد نسبت به مدل استاندارد افزایش یافت؛ اما میزان برداشت مواد از انباشتگاه ۹۰ درصد نسبت به مدل استاندارد کاهش یافت. نتایج تحلیل حساسیت پارامترها نیز نشان می‌دهد که هزینه استخراج هر تن مواد هم‌اکنون در نقطه عطف نمودار قرار دارد. هزینه انتقال هر تن مواد به انباشتگاه دارای دونقطه کمینه است که هم‌اکنون تابع هدف در نقطه کمینه محلی قرار دارد و با کاهش این مقدار می‌توان به کمینه تابع هدف رسید. تابع هدف نسبت به هزینه برداشت از انباشتگاه حساسیتی را نشان نداد. هزینه‌های ایجاد شیب در پله‌های دوم معدن بهینه نیست و با اندکی بهینه‌سازی در این هزینه‌ها می‌توان هزینه‌های کلی معدن را کاهش داد. هزینه‌های ایجاد شیب در ترازهای سوم و چهارم نیز از روال

- [24] Blom M., Pearce A.R., Stuckey P.J., (2018) Short-Term Planning for Open Pit Mines: A Review; *International Journal of Mining Reclamation and Environment*; (DOI: 10.1080/17480930.2018.1448248)
- [25] Chanda, E. and F. Wilke (1992). An EPD model of open pit short term production scheduling optimization for stratiform orebodies. In APCOM, pp. 759-768.
- [26] Rehman S.U., and Asad M.W.A., (2010) A Mixed-Integer Linear Programming (MILP) Model for Short-Range Production Scheduling of Cement Quarry Operations. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, Vol. 27, No. 3 (2010) pp. 315–333. (World Scientific Publishing Co. & Operational Research Society of Singapore - DOI: 10.1142/S0217595910002727).
- [27] Dimitrakopoulos R., Jewbali A., (2013) Joint stochastic optimisation of short and long term mine production planning: method and application in a large operating gold mine. *Mining Technology*, Vol. 122, No. 2, pp. 110-123.
- [28] Upadhyay Sh.P., Askari-Nasab H., (2017) Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines; *International Journal of Mining Science and Technology xxx* (2017) xxx-xxx (<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.12.003>).
- [29] Lipovetzky, N., C. N. Burt, A. R. Pearce, and P. J. Stuckey (2014). Planning for mining operations with time and resource constraints. In ICAPS, pp. 404-412.
- [30] Burt, C. N., N. Lipovetzky, A. R. Pearce, and P. J. Stuckey (2015). Scheduling with fixed maintenance, shared resources and nonlinear feedrate constraints: A mine planning case study. In CPAIOR, pp. 91-107.
- [31] L'Heureux G., Gamache M., Soumis F., (2013) Mixed integer programming model for short term planning in open-pit mines; *Mining Technology*, Vol. 122, No 2, p. 101-109. (DOI 10.1179/1743286313Y.0000000037)
- [32] Bakhshai M.H., (1983). Detailed Exploration of Block 1 of Esteghlal Mine, Non-Metallic Material Co, 200 pages.
- [33] Azimi A., (2018). Open pit mine long term production scheduling optimization considering stockpile option; PhD. Thesis, Mining and Metallurgy Engineering Department. Yazd University.
- [34] Ramazan S., Dimitrakopoulos R., (2013) Production scheduling with uncertain supply: a new solution to the open pit mining problem. *Optim Eng*, 14:361-380 (<http://dx.doi.org/10.1007/s11081-012-9186-2>).
- production scheduling considering geological uncertainty. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall* 112, 77–81.
- [13] Montiel, L., Kawahata, K., Dimitrakopoulos, R.G., (2016). Globally optimising open-pit and underground mining operations under geological uncertainty. *Trans. Inst. Min. Metall.: Sec. A, Mining Technol.* 125 (1), 2–14.
- [14] Zhang, J., Dimitrakopoulos, R.G., (2018). Stochastic optimization for a mineral value chain with nonlinear recovery and forward contracts. *J. Oper. Res. Soc.* 69 (6), 864–875.
- [15] Clement, S., Vagenas, N., (1994). Use of genetic algorithms in a mining problem. *Int. J. Surf. Min. Reclam. Environ.* 8 (4), 131–136.
- [16] Pendharkar, P., Rodger, J., (2000). Nonlinear programming and genetic search application for production scheduling in coal mines. *Ann. Oper. Res.* 95 (1–4), 251–267.
- [17] Osanloo, M., Karimi, B., Gholamnejad, J., (2007). A chance-constrained programming approach for open pit long-term production scheduling in stochastic environments. *Trans. Inst. Min. Metall.: Sec. A, Mining Technol.* 116 (2), 58–66.
- [18] Sattarvand, J., Niemann-Delius, C., (2013). A new metaheuristic algorithm for long-term open-pit production planning. *Arch. Min. Sci.* 58 (1), 107–118.
- [19] Thomas, G.S., (1996). Optimization and scheduling of open pits via genetic algorithms and simulated annealing. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Mine Simulation*. Balkema Publisher, pp. 44–59.
- [20] Sauvageau, M., Kumral, M., (2018). Genetic algorithms for the optimisation of the Schwartz-Smith two-factor model: a case study on a copper deposit. *Int. J. Min. Reclam. Environ.* 32 (3), 163–181.
- [21] Leite, A., Dimitrakopoulos, R.G., (2007). Stochastic optimisation model for open pit mine planning: application and risk analysis at copper deposit. *Trans. Inst. Min. Metall.: Sec. A, Mining Technol.* 116 (3), 109–118.
- [22] Goodfellow R.C., Dimitrakopoulos R., (2016). Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty; *Applied Soft Computing* 40 (2016) 292–304, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2015.11.038>)
- [23] Groeneveld B. Topal E., Leenders B., (2019). Examining system configuration in an open pit mine design; *Resources Policy* 63 (2019) 101438, (<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101438>)

³ Blending¹ fortnightly² Build