

کمینه‌سازی انحراف از عیارهای حد در برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معادن روباز با هدف کنترل انباشتگاه باطله

احسان موسوی^{۱*}، رضا شیرین‌آبادی^۲

۱- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن، تهران، ایران. Se_Moosavi@azad.ac.ir
۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن، تهران، ایران. r_shirinabadi@azad.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۲/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۳

چکیده

هدف اساسی برنامه‌ریزی تولید بلند مدت، اتخاذ تدابیری جهت اجرای عیارهای حد استخراجی و برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت است. روش‌های ارائه شده حاکی از عدم توجه به تنظیم دقیق عیار استخراجی در بازه‌های زمانی مختلف است. لزوم بهینه‌سازی عیارهای حد استخراجی در برنامه‌ریزی تولید بلند مدت، مدیریت صحیح کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری بلحاظ کیفیت مطلوب است. از سویی دیگر، انتخاب مطلوب و بهینه عیارهای حد در معادن روباز، موجبات کنترل انباشتگاه مواد معدنی و نیز جلوگیری از عواقب ناشی از پساب‌های مواد معدنی را بسبب مسائل محیط‌زیست، منتج خواهد شد. در این مقاله، مدل برنامه‌ریزی خطی جهت تعیین توالی استخراج بلوک‌ها با توجه به کنترل عیارهای حد استخراجی ارائه شده است. هدف از مدل ارائه شده، کمینه‌سازی انحراف عیارهای استخراجی در دوره‌های برنامه‌ریزی است. این مهم سبب می‌شود که عیارهای استخراجی در هر دوره زمانی بر اساس عیار مورد پذیرش کارخانه مورد تنظیم دقیق قرار گیرند. به منظور اعتبارسنجی از مدل پیشنهادی، معدن آهن چادرملو به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهد عیارهای حد استخراجی بدست آمده از مدل پیشنهادی، متوسط عیار مورد پذیرش کارخانه فرآوری را در هر دوره برنامه‌ریزی با دقت بالایی مورد لحاظ قرار داده است.

واژگان کلیدی: عیارهای حد، کمینه‌سازی، معادن روباز، برنامه‌ریزی تولید بلند مدت، محیط‌زیست.

مقدمه

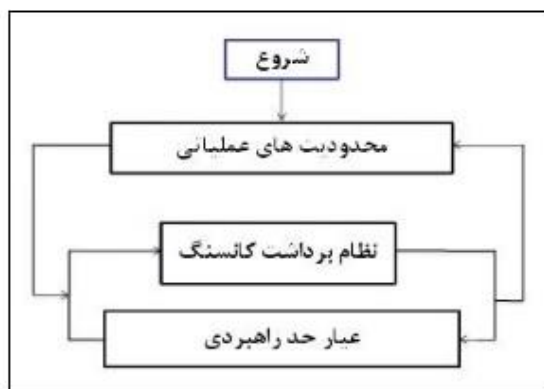
انرژی محسوب و بالتبع آلودگی محیط‌زیست را در پی خواهند داشت (ابراهیم‌آبادی، ۱۳۹۴). از سال ۱۹۶۸ میلادی روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی به طور فراگیر وارد مقوله برنامه‌ریزی تولید در معادن شد. در اکثر الگوریتم‌های ارائه شده در این روش‌ها از تکنیک‌های برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی عدد صحیح و برنامه‌ریزی پویا استفاده شده است. جانسون (۱۹۶۹)، مدل برنامه‌ریزی خطی را بسط و گسترش داد. ایشان با کاربرد اصول دانتزیگ و ولف، مسئله پیچیده فوق را به یک مسئله اصلی و تعدادی مسئله فرعی تبدیل نمود. ویلیامز (۱۹۷۴) ابتدا سکانس استخراج بلوک‌ها را برای هر بازه زمانی به طور جداگانه تعیین کرد، سپس برنامه‌های تک دوره‌ای انفرادی با استفاده

یکی از ارکان اصلی برنامه‌ریزی معدن، برنامه‌ریزی تولید بلند مدت است که یک امر بسیار مهم در تحقیقات نظری استخراج معادن روباز می‌باشد و توزیع جریان نقدینگی را در سراسر عمر معدن مشخص می‌نماید. در برنامه‌ریزی تولید بلند مدت اتخاذ هر تدبیری در برنامه که سبب شود ارزش خالص فعلی بهبود یابد یک مزیت به حساب می‌آید. بی-تردید بهینه‌سازی عیارهای حد می‌تواند تغییرات وسیع در نظام برداشت بلوک‌های کانسنگ و بالتبع سود خالص را به دنبال داشته باشد. بنابراین، انتخاب عیارهای حد بهینه و مقصد صحیح ارسال مواد معدنی، اثرات سوء زیست‌محیطی را به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. چرا که، در سراسر دنیا فعالیت‌های معدنکاری از جمله بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان

عملیاتی در مدل‌های برنامه‌ریزی تولید، عدم اجرایی بودن مدل را منتج خواهد شد. ستاروند و نیمان-دلیوس (۲۰۱۳) الگوریتم فراابتکاری جدیدی بر اساس بهینه‌سازی کلونی مورچگان ارائه کردند. تجزیه و تحلیل‌ها نشان داده که الگوریتم مذکور قادر به بهبود ارزش برنامه زمان‌بندی استخراج اولیه تولیدی توسط الگوریتم لرج و گروسمن تا حدود ۳۴ درصد در یک زمان محاسباتی معقول است. از مزایای قابل توجه مدل، امکان متغیر بودن زوایای شیب در مدل ارائه شده و نیز امکان حل مسائل بزرگ مقیاس می‌باشد. مدل ارائه شده، پشتوانه ریاضی قابل قبول برای رسیدن به جواب نزدیک به بهینه را دارا نمی‌باشد؛ چرا که بهینه بودن مذکور به شدت وابسته به پارامترهایی مانند تعداد مورچه‌ها، نرخ تبخیر و فرومون به جامانده در هر تکرار است. دیمیتراکوپولوس و جیوبالی (۲۰۱۳) رویکرد جدیدی برای برنامه‌ریزی تولید تصادفی چند مرحله‌ای معادن روباز ارائه و در یک معدن طلا مورد آزمایش قرار دادند. مطابق با مشخصات مدل ارائه شده، مدل مذکور برای کانسارهای کوچک قابل پیاده‌سازی است و از پیچیدگی بالایی جهت مدل‌سازی استفاده شده است که این مهم زمان‌بر است. سلیمانی شیشوان و ستاروند (۲۰۱۴) یک روش تقریب فوق ابتکاری جدید بر اساس بهینه‌سازی کلونی مورچگان برای حل مسائل برنامه‌ریزی تولید معدن روباز ارائه کردند. روش پیشنهادی یک روش بهینه‌سازی سه بعدی است که قابلیت در نظر گرفتن هر نوع تابع هدف، محدودیت غیر خطی و محدودیت‌های فنی موجود را داراست. از مزیت‌های مدل ارائه شده، پیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی و کاهش زمان محاسبات است؛ اما، مدل بلحاظ حساسیت پارامترها که منتج به عدم بهینگی می‌شود، رنج می‌برد. گودفیلو و دیمیتراکوپولوس (۲۰۱۶) یک مدل بهینه‌سازی سراسری تصادفی دو مرحله‌ای جدید برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز ارائه کردند. سه ترکیب از الگوریتم‌های فراابتکاری، از جمله تبرید شبیه‌سازی شده، بهینه‌سازی ذرات تجمعی و تکاملی تفاضلی، برای ارزیابی عملکرد فرایند حل، آزمایش شده است. کاهش ریسک و پیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی

از روش برنامه‌ریزی پویا با هم ترکیب می‌شوند. گرشان (۱۹۸۳) روش برنامه‌ریزی خطی را همراه با مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید معادن مطرح نمود. داگلدن و جانسون (۱۹۸۶) با استفاده از روش آزادسازی لاگرانژی، مسئله بزرگ برنامه‌ریزی عدد صحیح را تجزیه و حل نمود. الولی (۱۹۹۵) با استفاده از تکنیک‌های تحقیق در عملیات و هوش مصنوعی راه حلی برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید و تعیین محدوده نهایی پیت به طور همزمان ارائه داد. آکایک و داگلدن (۱۹۹۹) مدلی را ارائه دادند که بر اساس روش آزادسازی چهار بعدی شبکه صورت می‌گرفت. جانسون و همکاران (۲۰۰۲) روشی را بر اساس مفهوم درخت پایه برای کاهش تعداد متغیرهای صفر و یک در برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه داد. رمضان و دیمیتراکوپولوس (۲۰۰۴) مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مرکب را برای برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معادن ارائه دادند. متعاقب آن رمضان (۲۰۰۷) با ارائه مقاله‌ای سعی در کوچک‌سازی مدل برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز کرد. چیکویزن و همکاران (۲۰۰۹) یک روش جدید بر اساس برنامه‌ریزی خطی برای حل مسأله همزمان برنامه‌ریزی تولید و محدوده نهایی معدن ارائه کردند. جی یو و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از برنامه‌ریزی پویا مدلی برای برنامه‌ریزی تولید ارائه دادند که ترتیب استخراج بلوک‌ها بهینه می‌شود. لامهاری و دیمیتراکوپولوس (۲۰۱۲) مسائل مربوط به برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز را با رویکرد استفاده از راهکارهای فراابتکاری مورد مطالعه قرار دادند. برای گسترش دامنه جستجو و تولید راهکارهای اولیه که با روش جستجوی ممنوع، بهینه شده‌اند؛ از دو استراتژی مختلف استفاده شده است. اولین استراتژی استفاده از حافظه بلندمدت از تاریخچه جستجو و دومی براساس روش جستجوی همسایگی متغیر می‌باشد. نتایج عددی بر روی مدل‌های بزرگ مقیاس واقعی نشان دادند که این روش راهکاری موثر با رویکرد تولید راه‌حل‌های خوب در زمان محاسباتی نسبتاً کوتاه است. اما، مدل ارائه شده محدودیت‌های عملیاتی در معادن روباز رادر نظر نگرفته است. در واقع، عدم لحاظ کردن محدودیت‌های

از مزایای مدل نامبردگان به شمار می‌رود. از سویی، محدودیت‌های عملیاتی که کارایی، اجراء مدل و بهینگی جواب نهایی را زیر سؤال برده است، لحاظ نشده است. محمدی و همکاران (۲۰۱۷) با بکارگیری الگوریتم رقابت استعماری، بهینه‌سازی همزمان عیارهای حد و برنامه‌ریزی تولید را با کمک تئوری لین ارائه کردند. نامبردگان با تعریف تابع هدف بر اساس پارامتر جدید و استفاده از الگوریتم رقابت استعماری عیارهای حد بهینه را برای سال‌های متوالی معدن تخمین زدند. غیرخطی بودن مدل ارائه شده و در نظر نگرفتن محدودیت فیزیکی از عمده معایب الگوریتم پیشنهادی شمرده می‌شود. برخی از مهم‌ترین تحقیقات معتبر انجام شده در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- مراحل دسترسی به استخراج بهینه

از این رو، بهینه‌سازی عیار حد بسیار مهم می‌باشد چرا که:
 - بهینه‌سازی عیار می‌تواند در برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت و بلند مدت تأثیرگذار باشد.
 - بهینه‌سازی عیار حد برای انتخاب مقاصد ارسال مواد منتج به بهینه‌سازی سود اقتصادی در دسترس است.
 - بهینه‌سازی عیارهای حد، کاهش اثرات سوء محیط‌زیست را به سبب کنترل انباشت مواد معدنی، باطله و پساب حاصله میسر می‌سازد.

مدل برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی

به منظور تدوین مدل پیشنهادی، مدل صفر و یک برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت مبنای محاسبات قرار می‌گیرد. چنانچه بیشتر اشاره گردید مدل سنتی صفر و یک با اهداف بهینه‌سازی ارزش خالص فعلی برای برنامه‌ریزی تولید بلند مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد که برای کنترل و تنظیم دقیق عیارهای حد استخراجی از کارایی بالایی برخوردار نمی‌باشد. مدل پیشنهادی شامل تابع هدفی است که با توجه به

روش‌های ارائه شده بیشتر با هدف بهینه‌سازی ارزش خالص فعلی فرموله شده‌اند و حاکی از عدم توجه به تنظیم دقیق عیار استخراجی در بازه‌های زمانی مختلف است. این تحقیق با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی، توالی استخراجی بلوک‌ها را با توجه به کنترل عیارهای حد استخراجی مشخص می‌کند. در واقع مدل پیشنهادی، عیارهای استخراجی در هر دوره زمانی را بر اساس عیار مورد پذیرش کارخانه مورد تنظیم دقیق قرار می‌دهد. تنظیم دقیق عیارهای حد بهینه در معادن روباز، موجبات کنترل انباشت مواد معدنی و باطله را فراهم می‌کند. از سویی، اثرات ناشی از انباشت مواد معدنی و باطله را بسبب محیط‌زیست کاهش می‌دهد. برای حل و اعتبارسنجی مدل به دست آمده، معدن سنگ آهن چادرمولو به عنوان مورد مطالعاتی مناسب، در نظر گرفته شده است.

انجام شده در جدول (۱) نشان داده شده است. روش‌های ارائه شده بیشتر با هدف بهینه‌سازی ارزش خالص فعلی فرموله شده‌اند و حاکی از عدم توجه به تنظیم دقیق عیار استخراجی در بازه‌های زمانی مختلف است. این تحقیق با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی، توالی استخراجی بلوک‌ها را با توجه به کنترل عیارهای حد استخراجی مشخص می‌کند. در واقع مدل پیشنهادی، عیارهای استخراجی در هر دوره زمانی را بر اساس عیار مورد پذیرش کارخانه مورد تنظیم دقیق قرار می‌دهد. تنظیم دقیق عیارهای حد بهینه در معادن روباز، موجبات کنترل انباشت مواد معدنی و باطله را فراهم می‌کند. از سویی، اثرات ناشی از انباشت مواد معدنی و باطله را بسبب محیط‌زیست کاهش می‌دهد. برای حل و اعتبارسنجی مدل به دست آمده، معدن سنگ آهن چادرمولو به عنوان مورد مطالعاتی مناسب، در نظر گرفته شده است.

ضرورت بهینه‌سازی عیارهای حد در برنامه‌ریزی تولید

بلند مدت

عیار حد، عیاری است که برای جدا کردن دو نوع فعالیت بکار می‌رود (میراحمدی، ۱۳۹۴). به عنوان مثال مواد معدنکاری شوند یا در جای خود رها شوند؟ مواد به کارخانه تغلیظ برود یا به خاکریز باطله ارسال شوند؟ (تیلور، ۱۹۸۵). به عبارت دیگر عیار حد مقصد مواد ارسالی را تعیین می‌کند

t : شاخص مربوط به بازه‌ای که برنامه‌ریزی در آن انجام می‌شود ($t=1,2,\dots,T$).

T : تعداد کل بازه‌های برنامه‌ریزی تولید.

n : شاخص مربوط به شمارنده هر بلوک ($n=1,2,\dots,N$).
 N : تعداد کل بلوک‌های موجود در مدل، شامل کانسنگ و باطله.

d : نرخ تنزیل

b_n^t : متغیر تصمیم صفر و یک (دودویی) که چنانچه بلوک n م در پریود t استخراج شود برابر یک در نظر گرفته می‌شود و در غیر این صورت، برابر صفر است.

$\bar{\alpha}_n$: عیار متوسط بلوک n م.

U_α^t : حد بالای عیار متوسط مواد ارسالی به کارخانه فرآوری در بازه زمانی t .

L_α^t : حد پایین عیار متوسط مواد ارسالی به کارخانه فرآوری در بازه زمانی t .

Q_n^o : تناژ کانسنگ موجود در بلوک n م.

Q_n^w : تناژ باطله موجود در بلوک n م.

U_o^t : حداکثر ظرفیت کارخانه فرآوری در بازه زمانی t .

L_o^t : حداقل ظرفیت کارخانه فرآوری در بازه زمانی t .

$U_{w\&o}^t$: حداکثر تناژی از کانسنگ و باطله که می‌بایست در بازه زمانی t استخراج شود.

$L_{w\&o}^t$: حداقل تناژی از کانسنگ و باطله که می‌بایست در بازه زمانی t استخراج شود.

k : اندیس مربوط به هر بلوک که در هر بازه زمانی t م برای استخراج در نظر گرفته می‌شود.

Y : تعداد کل بلوک‌هایی که بر روی بلوک k قرار دارند.

y : اندیس مربوط به Y بلوکی که بر روی بلوک k قرار گرفته اند.

اجرای مدل برنامه‌ریزی تولید پیشنهادی در معدن سنگ آهن چادرملو

کانسار آهن چادرملو در استان یزد و در فاصله ۱۸۰ کیلومتری شرق-شمال شرق یزد و ۶۵ کیلومتری شمال شهرستان بافق و ۵۰ کیلومتری شمال معدن چغارت قرار دارد. شکل (۲) موقعیت معدن چادرملو را نشان می‌دهد.

کمینه‌سازی انحراف عیارهای حد استخراجی، عیار مطلوب مورد پذیرش کارخانه را منتج می‌شود. همچنین مدل پیشنهادی شامل محدودیت‌هایی است که با توجه به اهداف عملیاتی موجود توسعه داده شده است.

$$\text{Minimize } \sum_t \sum_n \frac{(U_\alpha^t - \bar{\alpha}_{ijk}) \cdot Q_n^o \cdot b_n^t}{(1+d)^t} \quad (1)$$

S.t.

$$\sum_{n=1}^N (\bar{\alpha}_n - L_\alpha^t) \cdot Q_n^o \cdot b_n^t \geq 0 \quad \text{for all } t \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T b_n^t = 1 \quad \text{for all } t \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N (Q_n^o \cdot b_n^t) \leq U_o^t \quad \text{for all } t \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^N (Q_n^o \cdot b_n^t) \geq L_o^t \quad \text{for all } t \quad (5)$$

$$\sum_{n=1}^N (Q_n^o + Q_n^w) \cdot b_n^t \leq U_{w\&o}^t \quad \text{for all } t \quad (6)$$

$$\sum_{n=1}^N (Q_n^o + Q_n^w) \cdot b_n^t \geq L_{w\&o}^t \quad \text{for all } t \quad (7)$$

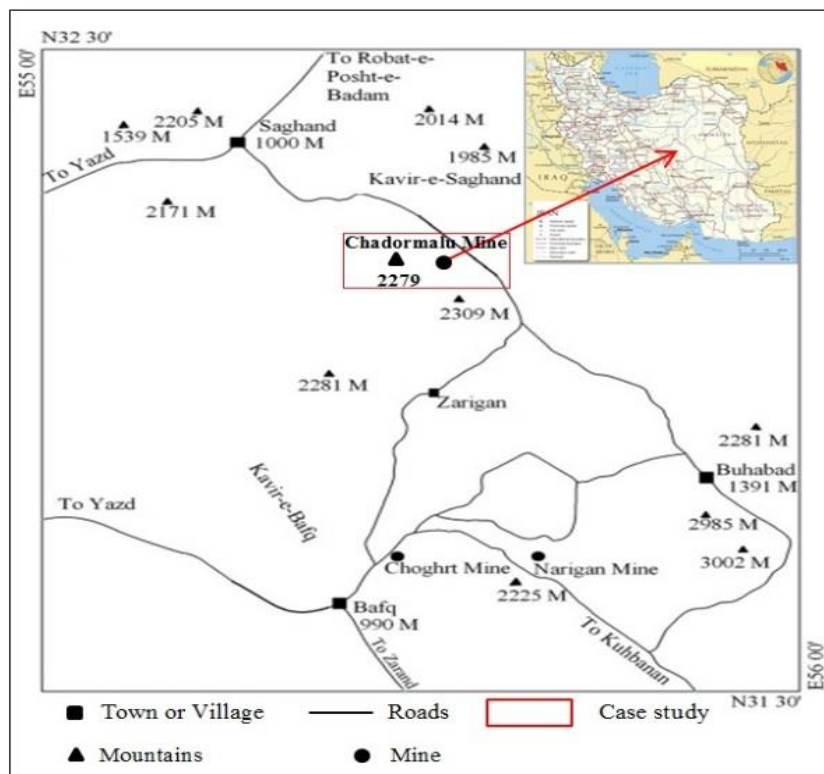
$$Y \cdot b_k^t - \sum_{y=1}^Y \sum_{r=1}^t b_y^r \leq 0 \quad \text{for all } t, k \quad (8\text{-الف})$$

$$b_k^t - \sum_{r=1}^t b_y^r \leq 0 \quad \text{for all } t, k \text{ and } y \quad (9\text{-ب})$$

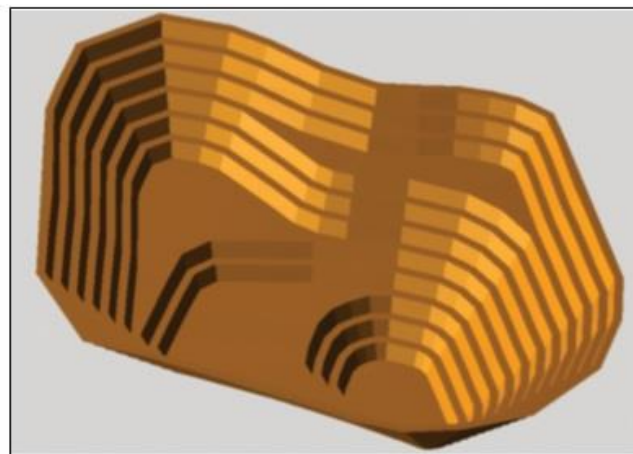
محدودیت (۲) مدل را ملزم می‌کند که عیار عنصر موجود در کانسنگ فرستاده شده به کارخانه فرآوری، کمتر از حد مشخص شده نباشد. محدودیت (۳) مدل را تحمیل می‌کند که هر بلوک فقط یک بار استخراج شود. محدودیت‌های (۴) و (۵) اطمینان می‌دهد که تناژ کلی کانسنگ فرستاده شده به کارخانه بایستی در حد مشخصی باشد. محدودیت‌های (۶) و (۷) مدل را مراقبت می‌کند که مقدار کلی مواد استخراج شده اعم از باطله و مواد معدنی با توجه به ظرفیت‌های دسترس ماشین‌آلات در هر بازه زمانی باشد. محدودیت‌های (۸-الف) و (۸-ب) قیود زاویه شیب بر اساس یک یا y محدودیت برای هر بلوک در هر بازه زمانی می‌باشند. که:

جدول ۱ - برخی از مرور ادبیات در تخمین عبارهای حد بهینه در برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معادن روباز

منابع	مشخصات مدل	تابع هدف: - پیشینه‌سازی سود - کمینه‌سازی انحراف از معیار	متغیر تصمیم‌گیری: - عیار حد	روش جستجوی حل بهینه: - ابتکاری (الگوریتم لین) - برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط - برنامه‌ریزی غیرخطی - برنامه‌ریزی تصادفی و پویا	مشخصات کانسار: - تک فلزی - چند فلزی	توزیع کانسار: - قطعی - غیرقطعی
تاسمون (۲۰۱۴)		✓	✓		✓	✓
گاما (۲۰۱۳)		✓	✓		✓	✓
موتاکین (۲۰۱۶)		✓	✓		✓	✓
موسوی (۲۰۱۶)		✓	✓		✓	✓
قلی‌نژاد (۲۰۱۶)		✓	✓		✓	✓
پیرنی (۲۰۱۵)		✓	✓	✓	✓	✓
جاسون (۲۰۱۱)		✓	✓		✓	✓
لی (۲۰۱۶)		✓	✓	✓	✓	✓
عطایی (۲۰۱۳)		✓	✓	✓	✓	✓
ستین (۲۰۱۳)		✓	✓	✓	✓	✓
کینگ (۲۰۱۶)		✓	✓	✓	✓	✓
اسد (۲۰۱۳)		✓	✓	✓	✓	✓
عظیمی (۲۰۱۳)		✓	✓	✓	✓	✓
نزهی (۲۰۱۵)		✓	✓	✓	✓	✓
غلام‌نژاد (۲۰۰۸)		✓	✓	✓	✓	✓
اصانلو (۲۰۰۸)		✓	✓	✓	✓	✓
عبداللهی (۲۰۱۲)		✓	✓	✓	✓	✓
این مطالعه		✓	✓	✓	✓	✓



شکل ۲- موقعیت کانسار چادرملو



شکل ۳- نمای ۳ بعدی از پیشروی دوم معدن سنگ آهن چادرملو (غلام‌نژاد و موسوی، ۲۰۱۲)

جدول ۲- مشخصات پیشروی‌ها

مقدار	مشخصات	مقدار	مشخصات
۷۳/۸	تناژ کانسنگ (میلیون تن)	۲۵ × ۲۵ × ۱۲/۵	ابعاد بلوک (متر)
۸۰/۲	تناژ باطله (میلیون تن)	۱۷۵۴	تعداد بلوک‌های کانسنگ
۵۶/۲	میانگین عیار (درصد)	۳۱۰۰	تعداد بلوک‌های باطله

بلوک مزبور، دوره زمانی اول یا سه ساله عمر معدن است و عدد صفر نشانگر این است که بلوک مزبور برای استخراج در هیچ یک از چهار دوره زمانی از عمر معدن برای استخراج در نظر گرفته نشده است و بهره برداری از آن به سال‌های آتی موکول می‌شود. بنابراین مدل پیشنهادی در این مقاله دارای خصوصیات زیر است:

-تابع هدف به گونه‌ای تدوین شده است که تعیین توالی استخراج بلوک‌ها همزمان با تنظیم دقیق عیارهای حد استخراجی صورت گیرد.

-با توجه به این که مدل، انحراف از عیار مورد پذیرش کارخانه را کمینه می‌کند؛ لذا امکان ارسال کانسنگ با کیفیت بالاتری را در سال‌های نخست به کارخانه فراهم می‌کند.

-مدل به جهت کنترل خوراک عیار ارسالی به کارخانه موجبات کاهش اثرات زیست‌محیطی را منتج خواهد شد.

جدول ۳- مشخصات مدل برنامه‌ریزی تولید در معدن چادرملو

تعداد	مشخصات مدل
۱۹۴۱۶	تعداد متغیرهای صفر و یک
۴۸۵۴	تعداد محدودیت‌های ذخیره
۴	تعداد محدودیت‌های عیار آهن
۸	تعداد محدودیت‌های تناژ کانسنگ
۸	تعداد محدودیت‌های تناژ کل استخراجی
۱۹۴۱۶	تعداد محدودیت‌های زاویه شیب
۴۸۵۴	تعداد محدودیت‌های صفر و یک

جدول ۴ - عیارهای حد راهبردی در ۴ بازه زمانی

عیار متوسط (gave)	عیار حد استخراجی (gc)	بازه زمانی
۵۵/۰۵	۵۳/۸۸	۱
۵۴/۹۸	۵۲/۰۸	۲
۵۴/۶۵	۴۲/۲۶	۳
۵۳/۸۵	۳۲/۱۸	۴

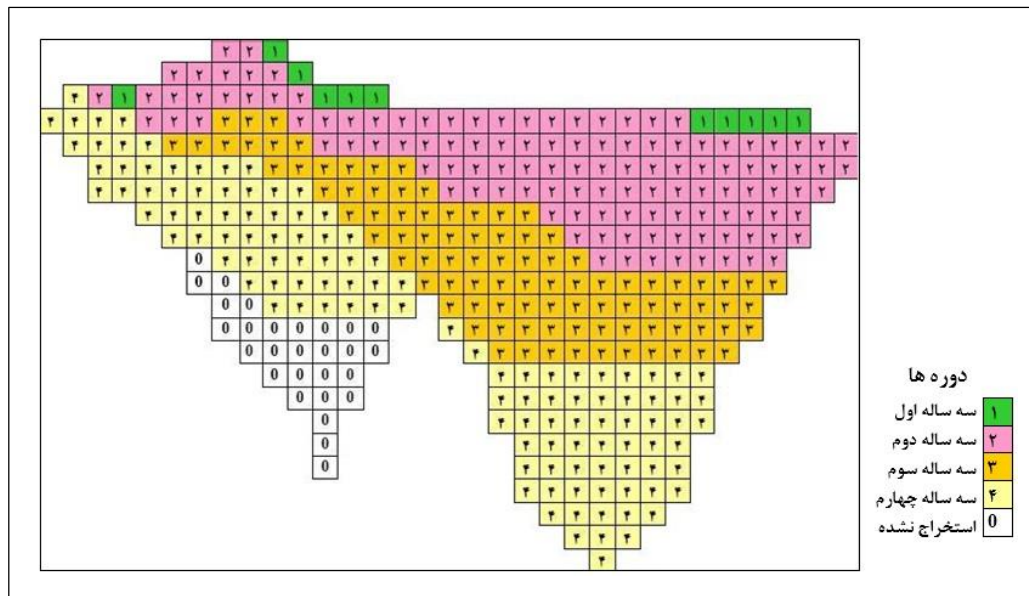
معدن سنگ آهن چادرملو یکی از معادن سطحی بزرگ ایران است که به روش پلکانی معکوس، استخراج می‌شود. برای معدن مذکور ۴ پیشروی طراحی شده که در این مقاله، مدل ریاضی توسعه داده شده برای اهداف برنامه‌ریزی مطابق شکل (۳) در پیشروی دوم اجرا شده است. مشخصات این پیشروی ها در جدول (۲) نشان داده شده است. جهت حل مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله، دو گام در نظر گرفته شده است:

گام اول: گام نخست تهیه یک فایل ورودی از مسئله است. این فایل توسط نرم‌افزار Excel تهیه شد. اطلاعات اولیه شامل: مشخصات شمارنده هر بلوک، عیار و مقدار تناژ ماده معدنی هر بلوک، متغیرهای تصمیم مربوط به نوع بلوک و محدودیت مورد نظر در مدل پیشنهادی می‌باشد.

گام دوم: حل مدل، با استفاده از نرم‌افزار Premium Solver Platform v11 (نرم‌افزار Solver، ۲۰۱۲) می‌باشد. متغیرهای تصمیم، تابع هدف و محدودیت‌های مورد نظر در محیط نرم‌افزار تعریف شده است. برای اجرا و حل مدل ریاضی پیشنهادی از الگوریتم شاخه و برش استفاده شده است. مشخصات مدل برنامه‌ریزی تولید در معدن چادرملو در جدول (۳) نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده از حل مدل

با اجرا و پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در معدن سنگ آهن چادرملو، نتایج حاصله شامل عیارهای حد استخراجی و نیز عیار متوسط در هر بازه زمانی مطابق با جدول (۴) نشان داده شده است. عیارهای حد راهبردی بدست آمده از مدل در هر بازه زمانی بطور همزمان با توالی استخراج بلوک‌های کانسنگ بهینه شده است. همچنین، به منظور برآورده شدن محدودیت شیب، مقطعی از زمان‌بندی حاصله از مدل پیشنهادی در شکل (۴) قابل مشاهده است. اعداد نوشته شده در هر بلوک، نشان‌دهنده زمان استخراج آن می‌باشد؛ به عنوان مثال عدد ۱ نمایانگر این است که زمان استخراج



شکل ۴- زمان‌بندی به دست‌آمده از مدل پیشنهادی برای استخراج بلوک‌های کانسنگ و باطله

نتیجه‌گیری

و کاهش اثرات سوء از انباشت باطله به سبب پساب تولیدی میسر خواهد شد.

منابع

- ابراهیم‌آبادی، آ.، (۱۳۹۴)، "مدیریت اثرات سوء زیست-محیطی ناشی از معدن‌کاری با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی (مطالعه موردی: منطقه معدنی چادرملو)"، فصلنامه زمین‌شناسی محیط‌زیست، شماره ۳۲، ص ۶۷.
- میراحمدی، ح. ر.، بانگیان تبریزی، ا. ح.، (۱۳۹۴)، "طبقه‌بندی و تفکیک باطله‌های معدنی در معدن سنگ آهن چادرملو با هدف کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی"، فصلنامه زمین‌شناسی محیط‌زیست، شماره ۳۳، ص ۲.

- Abdollahisharif, J., Bakhtavar, E., Anemangely, M., (2012), "Optimal cut-off grade determination based on variable capacities in open-pit mining", Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 112 (12), pp 1065-1069.

- Akaike, A., Dagdelen, K., (1999), "A strategic production scheduling method for an open pit mine", Proceeding of the 28th Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, pp 729-738.

- Asad, M. W.A., Dimitrakopoulos, R., (2013), "A heuristic approach to stochastic cutoff grade optimization for open pit mining complexes with

لزوم بهینه‌سازی عیارهای حد استخراجی در برنامه‌ریزی تولید بلند مدت، مدیریت صحیح کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری بلحاظ کیفیت مطلوب است. در حال حاضر با توجه به رو به پایان بودن ذخایر پرعیار، ذخایر کم عیارتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. مواد معدنی کم عیار برای ورود به بازار مصرف نیاز به عملیات تغلیظ و پرعیارسازی دارند. این عملیات موجبات اثرات سوء زیست‌محیطی را به صورت چشمگیر افزایش می‌دهند.

این مقاله با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی انحراف عیارهای حد استخراجی را از عیار مورد پذیرش کارخانه، کمینه می‌کند. به بیان دیگر، مدل پیشنهادی برنامه‌ای را ارائه می‌کند که ضمن تعیین توالی استخراج بلوک‌های کانسنگ، عیارهای حد استخراجی را با توجه به عیار مورد پذیرش کارخانه بهینه می‌کند. این مهم سبب می‌شود که نظام برداشت کانسنگ از محدوده نهایی و عیارهای حد راهبردی همزمان با همدیگر بهینه شوند. همچنین، انتخاب عیارهای حد بهینه سبب کاهش اثرات محیط‌زیست به دلیل کنترل انباشت مواد معدنی، باطله و نیز پساب‌های حاصل می‌شود. نتایج حاصل از مدل ارائه شده بر روی معدن آهن چادرملو نشان داد که نیاز کارخانه در هر بازه زمانی با بالاترین کیفیت تضمین شده است. در واقع عیارهای حد بدست‌آمده از این مدل، متوسط عیار بالاتری را سبب می‌شود. بنابراین، کنترل

- **Goodfellow, R., Dimitrakopoulos, R.,** (2016), "Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty", *Applied Soft Computing* 40, pp 292–304.
- **Gu, X-W., Wang, Q., Ge, S.,** (2010), "Dynamic phase-mining optimization in open-pit metal mines", *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*, 20, pp 1974-1980.
- **Hustrulid, W., Kuchta, M.,** (1995), "Open pit mine planning and design", 1 -Fundamentals, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- **Johnson, T.B.,** (1969), "Optimum Production Scheduling", 8th proceeding international symposium on computers and operations research, Salt Lake City, Utah, pp 539-562.
- **Johnson, T. B., Dagdelen, K., Ramazan, S.,** (2002), "Open pit mine scheduling based on fundamental tree algorithm", *Proceeding of the 30th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*, (SME: Littleton), pp 147-159.
- **Johnson, P.V., Evatt, G.W., Duck, P.W., Howell, S.D.,** (2011), "The determination of a dynamic cut-off grade for the mining industry", *Electrical Engineering and Applied Computing*, 90, pp 291–403.
- **Lamghari, A., Dimitrakopoulos, R.,** (2012), "A diversified Tabu search approach for the open pit mine production scheduling problem with metal uncertainty", *European Journal of Operational Research*, 222(3), pp 642-652.
- **Li, S., Yang, C.,** (2012), "An optimum algorithm for cut-off grade calculation using multistage stochastic programming", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 45 (1), pp 117-122.
- **Mohammadi, S., Kakaei, R., Ataie, M., Pourzamani, E.,** (2017), "Determination of the optimum cut-off grades and production scheduling in multi-product open pit mines using imperialist competitive algorithm (ICA)", *Resources Policy*, 51, pp 39–48.
- **Moosavi, E., Gholamnejad, J., Ataee-pour, M., Khorram, E.,** (2014), "Optimal extraction sequence modeling for open pit mining operation considering the dynamic cutoff grade", *Mineral Resources Management*, 30 (2), pp 173–186.
- **Muttaqin, B. I. A., Rosyidi, C. N.,** (2016), "Open Pit Mining Profit Maximization Considering Selling Stage and Waste Rehabilitation Cost", in *Proceeding of the International Joint Conference of 2nd Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (ICIMECE) and Annual Conference on Industrial and System Engineering (ACISE)*, Surakarta.
- **Narrei, S., Osanloo, M.,** (2015), "Optimum cut-off grade's calculation in open pit mines with regard to reducing the undesirable environmental impacts", *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29 (3), pp 226–242.
- multiple processing streams", *Journal of Resources Policy*, 38 (4), pp 591–597.
- **Ataie, M., Osanloo, M.,** (2003), "Determination of optimum cutoff grades of multiple metal deposits by using the golden section search method", *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 103 (8), pp 493–499.
- **Azimi, Y., Osanloo, M., Esfahanipour, A.,** (2013), "An uncertainty based multi-criteria ranking system for open pit mining cutoff grade strategy selection", *Journal of Resources Policy*, 38 (2), pp 212–223.
- **Cetin E., Dowd, P.S.,** (2013), "Multi-mineral cut-off grade optimization by grid search", *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 113 (8), no. 8, pp 659–665.
- **Chicoisne, R., Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., Rubio, E.,** (2009), "A new algorithm for the open-pit mine scheduling problem", Working paper, Universidad Adolfo Ibañez and Universidad de Chile, Santiago, pp 1-21.
- **Dagdelen, K., Johnson, T.B.,** (1986), "Optimum Open Pit Mine Production Scheduling by Lagrangian Parametrization", *proceeding of the 19th international symposium on the application of computers and operations research in the mineral industry*, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, April, Chapter 13, pp 127-142.
- **Dimitrakopoulos, R., Jewbali, A.,** (2013), "Joint stochastic optimization of short-and long-term mine production planning: Method and application in a large operating goldmine", *IMM Transactions, Mining Technology*, 122(2), pp 110–123.
- **Elevli, B.,** (1995), "Open pit mine design and extraction sequencing by use of OR and AI concept", *International Journal of Surface Mining, reclamation and environmental*, 9, pp 149-153.
- **Gama, C.D.,** (2013), "Easy profit maximization method for open-pit mining, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*", 5 (5), pp 350–353.
- **Gershon, M. E.,** (1983), "An Open Optimal mine production scheduling: evaluation of large scale mathematical programming approaches", *International journal of mining engineering*, pp 315-329.
- **Gholamnejad, J.,** (2008), "Determination of the optimum cutoff grade considering environmental cost", *International Journal of Environmental Application and Science*, 3 (3), pp 186–194.
- **Gholamnejad, J., Moosavi, E.,** (2012), "A new mathematical programming model for long-term production scheduling considering geological uncertainty", *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(2), pp 77–81.
- **Gholinejad, M., Moosavi, E.,** (2016), "Optimal mill cut-off grade modeling in the mineral deposits via MIP: Haftcheshmeh copper deposit", *Journal of Mining Science*, 52 (4), pp 732–739.

production planning”, Archives of Mining Sciences, 58(1), pp 107-118.

- **Soleymani Shishvan, M., Sattarvand, J.**, (2014), “Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization”, European Journal of Operational Research, 240(3), pp 825- 836.

- **Taylor, H.K.**, (1985), “Cut-off grades—some further reflections”, Institution of Mining and Metallurgy Transactions, pp 204-216.

- **Thompson, M., Barr, D.**, (2014), “Cut-off grade: a real options analysis”, Resources Policy, 42(2), pp 83-92.

- **Williams, C.E.**, (1974), “Computerized year- by-year open pit mine scheduling”, Society of Mining Engineers, AIME, Transactions, pp 256.

- **Yasrebi, A.B., Wetherlt, A., Foster, P., Kennedy, G., Ahangaran, D., Afzal, P., Asadi, A.**, (2015), “Determination of optimised cut-off grade utilizing non-linear programming”, Arabian Journal of Geosciences, 8 (10), pp 8963– 8967.

- **Osanloo, M., Rashidinejad, F., Rezai, B.**, (2008), “Incorporating environmental issues into optimum cut-off grades modelling at porphyry copper deposits”, Journal of Resources Policy, 33 (4), pp 1– 13.

- **Premium Solver Platform Version 11**, (2012), “User Guide By Frontline Systems”, Inc.

- **Qing-hua, G.U., Chun-ni, B., Fa-ben, L., Abrand, J.**, (2014), “The optimization and application of cut-off grades of multiple metal open-pit mines based on equivalent grade”, Metallurgical and Mining Industry, 6 (6), pp 83–91.

- **Ramazan, S.**, (2007), “The new fundamental tree algorithm for production scheduling of open pit mines”, European Journal of Operational Research, Australia, 177, pp 1153–1166.

- **Ramazan, S., Dimitrakopoulos, R.**, (2004), “Recent application of operations researches in open pit mining”, SME Transactions, 316, pp 73-78.

- **Sattarvand, J., Niemann-Delius, C.**, (2013), “A new metaheuristic algorithm for long term open-pit

Minimization of the deviation from the cut-off grades in long-term production scheduling of open pit mines with the goal of controlling waste stockpile

Ehsan Moosavi¹, Reza Shirinabadi²

1,2-Assistant Professor, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Department of Mining Engineering, Tehran, Iran

Absrtact

The basic objective of long-term production planning to takes measures for implementing to extractive cut-off grades and short-term production planning. Proposed methods show from not mentioning to exact regulation the extractive cut-off grade at various periods. In long-term production planning optimization, the extractive cut-off grades necessity is the correct management of the ore sending to plant processing. On the other hand, the optimal choice of cut-off grades in open pit mines will lead to the control of mineral stockpiles and to prevent the consequences of mineral wastewater due to environmental issues. In this paper, exhibit linear programming model in order to sequence of mining blocks estimation from mentioning to control the extractive cut-off grades. The purpose of the proposed model, minimization the deviation extractive grades in planning terms. Which this major be careful the case setting the extractive grades in each time period based on an accepted grade of plant. In order to the validity of result modeling, Chadormalou Iron Mine was chosen as the case study. The result shows the obtained extractive cut-off grades from proposed model generates the high accuracy of the average grade of the processing plant in each planning period. Also, all available operational constraints have been satisfied.

Keywords: Cut-off grades, minimization, open pit mines, long-term production scheduling, environment.