

کمینه‌سازی انحراف از عیارهای حد بهینه در برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معادن روباز با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

احسان موسوی*^۱ و رضا شیرین‌آبادی^۲

۱- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن، تهران، ایران، Se.Moosavi@yahoo.com

چکیده

هدف اساسی برنامه‌ریزی تولید بلند مدت، اتخاذ تدابیری جهت اجرای عیارهای حد استخراجی و برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت است. از این رو، عیارهای حد استخراجی، مهمترین ابزار اجرای راهبردی و برنامه‌ای بلند مدت در معادن روباز بشمار می‌روند. 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. در این مقاله، مدل برنامه‌ریزی خطی جهت تعیین توالی استخراج بلوک‌ها با توجه به کنترل عیارهای حد استخراجی ارائه شده است. مدل برنامه‌ریزی تولید بلند مدت با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط فرموله 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. همچنین تمام محدودیت‌های عملیاتی موجود برآورده شده است.

واژگان کلیدی: عیارهای حد بهینه، کمینه‌سازی، معادن روباز، برنامه‌ریزی تولید بلند مدت، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط.

مقدمه

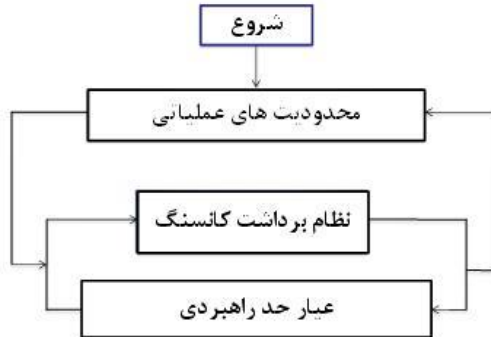
پیچیده‌ی فوق را به یک مسئله اصلی و تعدادی مسئله فرعی تبدیل نمود. (ویلیامز، ۱۹۷۴) ابتدا سکنس استخراج بلوک‌ها را برای هر بازه زمانی به طور جداگانه تعیین کرد، سپس برنامه‌های تک دوره‌ای انفرادی با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا با هم ترکیب می‌شوند. (گرشان، ۱۹۸۳) روش برنامه‌ریزی خطی را همراه با مدل‌های برنامه‌ریزی 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

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. لذا بی‌تردید بهینه‌سازی عیارهای حد می‌تواند تغییرات و سبب در نظام برداشت بلوک‌های کانسنگ و بالتبع سود خالص را به دنبال داشته باشد. 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

ر سیدن به جواب نزدیک به بهینه را دارا نمی‌باشد؛ چرا که بهینه بودن مذکور به شدت وابسته به پارامترهایی مانند تعداد مورچه‌ها، نرخ تبخیر و فرمون 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. این رویکرد، اطلاعات با مقیاس کوچک کانسنگ طلا را در قالب داده‌های کنترل عیار در نظر می‌گیرد. کانسنگ شبیه‌سازی شده مورد استفاده در برنامه‌ریزی تصادفی بلند مدت معمولاً بر اساس داده‌های اکتشاف پراکنده است. به بیان دیگر، زمانی که داده‌های کنترل عیار در برنامه‌ریزی تولید در دسترس نیستند، سعی شده اطلاعات با مقیاس کوچک بصورت تصادفی شبیه‌سازی شوند. 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 فوق‌ابتکاری 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، بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی و کاهش زمان محاسبات است؛ اما، مدل بلحاظ حساسیت پارامترها که منتج به عدم بهینگی می‌شود، رنج می‌برد. (گودفیو 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 بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی از مزایای مدل نامبردگان به شمار می‌رود. از سویی، محدودیت‌های عملیاتی که کارایی، اجراء مدل و بهینگی جواب نهایی را زیر سؤال

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. (جیو و همکاران، ۲۰۱۰) با استفاده از برنامه‌ریزی پویا مدلی برای برنامه‌ریزی تولید ارائه دادند که ترتیب استخراج بلوک‌ها بهینه می‌شود. (لامهاری و دیمیتراکوپولوس، ۲۰۱۲) مسائلی 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 بر اساس روش جستجوی همسایگی متغیر می‌باشد. نتایج عددی بر روی مدل‌های بزرگ مقیاس واقعی نشان دادند که این روش راهکاری موثر با رویکرد تولید راه حل‌های خوب در زمان محاسباتی نسبتاً کوتاه است. اما، مدل ارائه شده محدودیت‌های عملیاتی در معادن روباز را در نظر نگرفته است. در واقع، عدم لحاظ کردن محدودیت‌های 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 لرچ 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، پشته‌ریاضی قابل قبول برای

مطلب است که نظام برداشت کانسنگ از محدوده نهایی و عیار حد راهبردی، می‌بایست همزمان با همدیگر صورت پذیرد.



شکل ۱- مراحل دسترسی به استخراج بهینه

- لذا 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 بیشینه‌سازی سود اقتصادی در دسترس است.

مدل برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی

به منظور تدوین مدل پیشنهادی، مدل صفر و یک برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت مبنای محاسبات قرار می‌گیرد. چنانچه پیشتر اشاره گردید مدل سنتی صفر و یک با اهداف بیشینه‌سازی 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 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.

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

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.

روش‌های ارائه شده بیشتر با هدف بیشینه‌سازی 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 استخراج 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. برای حل و اعتبار سنجی مدل به دست آمده، معدن سنگ آهن چادرمو 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. 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 (هاسترویلد و کوچتا، ۱۹۹۵). بر اساس این تعریف می‌توان تصمیم گرفت که چه موادی باید در معدن استخراج و چه موادی نباید استخراج شود و اگر استخراج انجام گرفت مقصد ارسال مواد کجاست؟ بنابراین طراحان معدن باید عیارهای حد بهینه را مشخص کنند که در تعامل با برنامه‌ریزی تولید به برگشت سرمایه مطلوب منجر شود. شکل (۱) مؤید این

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

این مطالعه	عبداللهی	اصانو	غلام‌نژاد	نرغی	عظیمی	اسد	کینگ	ستین	عطایی	لی	جانسون	پیرمی	قلی‌نژاد	موسوی	موتاکین	گاما	تامسون	مراجع مشخصات مدل
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	تابع هدف: - بیشینه‌سازی سود - کمیته‌سازی انحراف از معیار
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	متغیر تصمیم- گیری: 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

d : نرخ تنزیل

b_n^t : متغیر تصمیم صفر و یک (دودویی) که چنانچه بلوک n م در پیوند 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 گرفته‌اند.

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. 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 پیشروی‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است.

S.t.

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

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

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

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

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

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

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

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

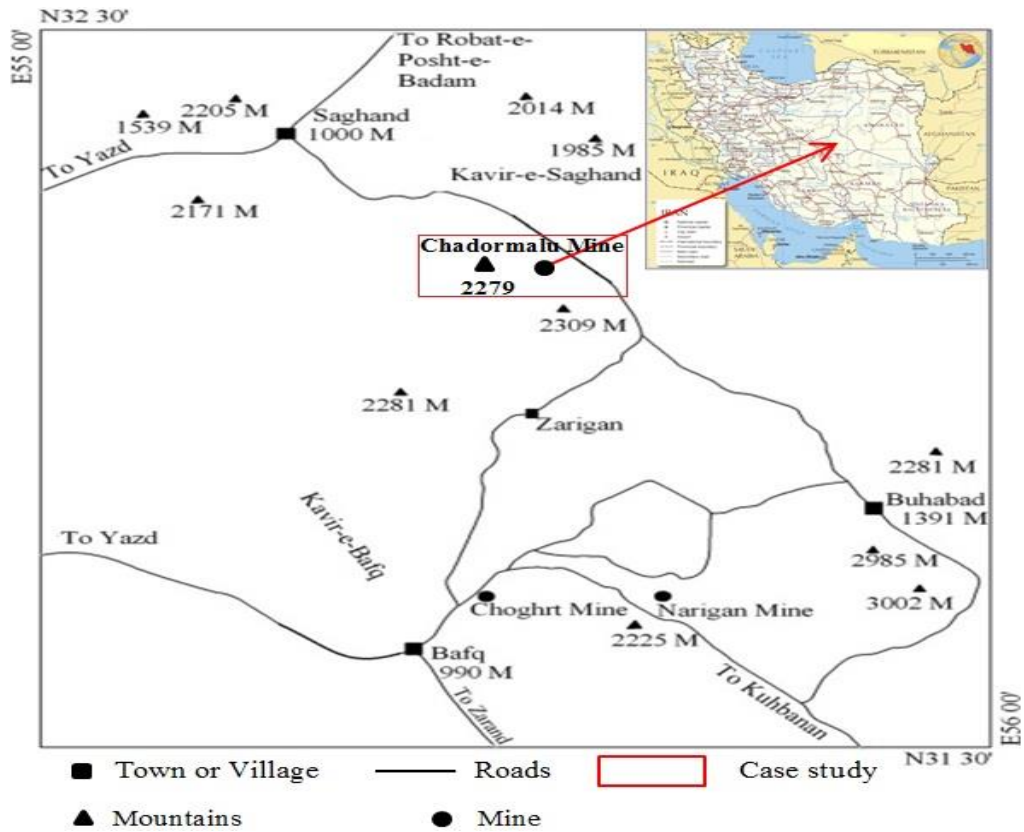
محدودیت (۲) مدل را ملزم می‌کند که عیار عنصر موجود در کانسنگ فرستاده شده به کارخانه فرآوری، کمتر از حد مشخص شده نباشد. محدودیت (۳) مدل را تحمیل می‌کند که هر بلوک فقط یک بار استخراج شود. محدودیت‌های (۴) و (۵) اطمینان می‌دهد که تناژ کلی کانسنگ فرستاده شده به کارخانه بایستی در حد مشخصی باشد. محدودیت‌های (۶) و (۷) مدل را مراقبت می‌کند که مقدار کلی مواد استخراج شده اعم از باطله و مواد معدنی با توجه به ظرفیت در 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.

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

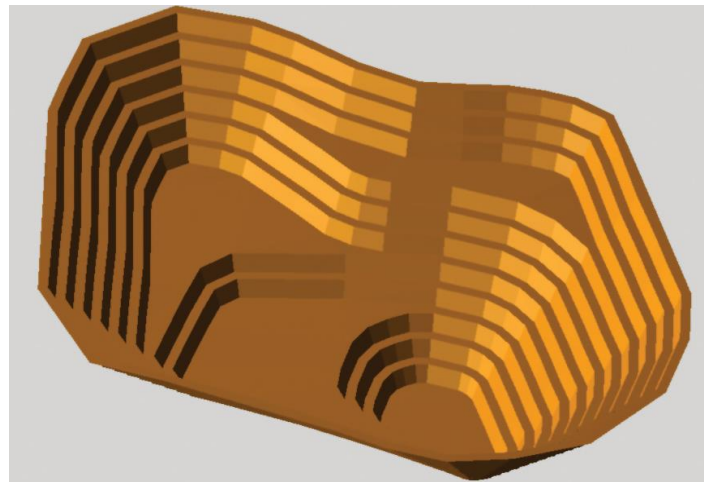
T : تعداد کل بازه‌های برنامه‌ریزی تولید.

n : شاخص مربوط به شماره نده هر بلوک ($n = 1,2,\dots,N$).

N : تعداد کل بلوک‌های موجود در مدل، شامل کانسنگ و باطله.



شکل ۲- موقعیت کانسار چادرملو



شکل ۳- نمایی 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

نتایج به دست آمده از حل مدل

با اجرا و پیاده سازی مدل پیشنهادی در معدن سنگ آهن چادرمولو، 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 بلوک های کانسنگ بهینه شده است. همچنین، به منظور برآورده شدن محدودیت شیب، مقطعی از زمان بندی حاصله از مدل پیشنهادی در شکل (۴) قابل مشاهده است. اعداد نوشته شده در هر بلوک، نشان دهنده زمان استخراج آن می باشد؛ به عنوان مثال عدد ۱ نمایانگر این است که زمان استخراج 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 سال های آتی موکول می شود.

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

جهت حل مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله، دو گام در نظر گرفته شده است:

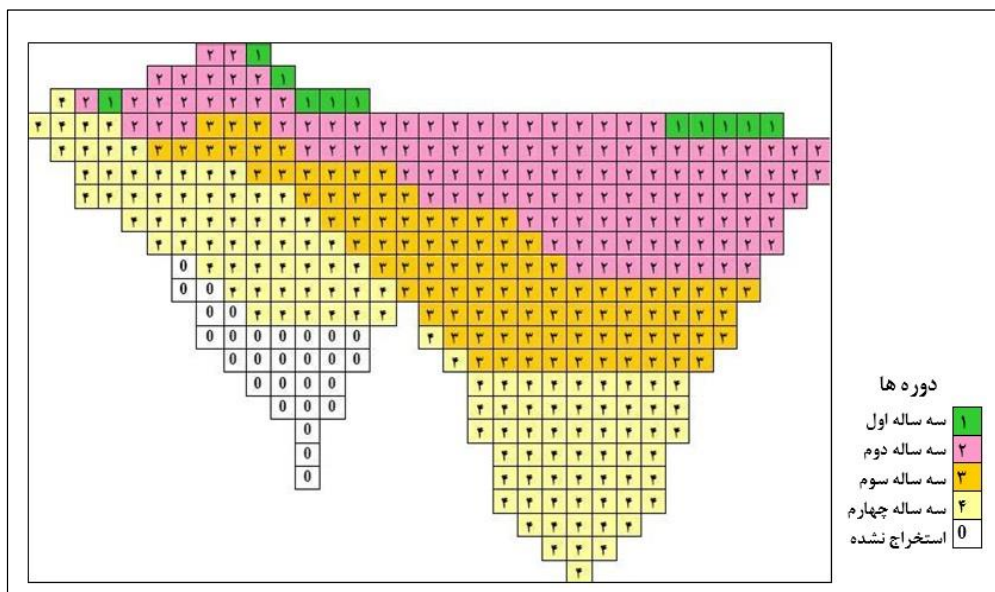
گام اول: گام نخست تهیه یک فایل ورودی از مسئله است. این فایل توسط نرم افزار Excel تهیه شد. اطلاعات اولیه شامل: مشخصات شمارنده هر بلوک، عیار و مقدار تناژ ماده معدنی هر بلوک، متغیرهای تصمیم مربوط به نوع بلوک و محدودیت مورد نظر در مدل پیشنهادی می باشد.

گام دوم: حل مدل، با استفاده از نرم افزار Premium Solver Platform v11 (نرم افزار Solver، ۲۰۱۲) می باشد. متغیرهای تصمیم، تابع هدف و محدودیت های مورد نظر در محیط نرم افزار تعریف شده است. برای اجرا و حل مدل ریاضی پیشنهادی از الگوریتم شاخه و برش استفاده شده است. مشخصات مدل برنامه ریزی تولید در معدن چادرمولو در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات مدل برنامه ریزی تولید در معدن

چادرمولو

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



شکل ۴- زمان بندی به دست آمده از مدل پیشنهادی برای استخراج بلوک های کانسنگ و باطله

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.

- **Goodfellow, R., Dimitrakopoulos, R.,** (2016), "Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty", *Applied Soft Computing* 40, pp 292-304.

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.

نتیجه‌گیری

لزوم بهینه‌سازی عیارهای حد استخراجی در برنامه‌ریزی تولید بلند مدت، مدیریت صحیح کانسنگ ارسالی به کارخانه فرآوری بلحاظ کیفیت مطلوب است. این مقاله با استفاده از مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط 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. 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 بدست آمده از این مدل، متوسط عیار بالاتری را سبب می‌شود.

منابع

- **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 multiple processing streams", *Journal of Resources Policy*, 38 (4), pp 591-597.

- **Ataei, M., Osanloo, M.,** (2003), "Determination of optimum cutoff grades of multiple metal deposits by using the golden section search method", *Journal of*

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.
- **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 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.
- **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., Ataei, 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*

Minimization of the deviation from the optimal cut-off grades in long-term production scheduling of open pit mines by using mixed integer programming

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. So, the most important tool to implement the strategic and long-term program in open pit mines is extractive cut-off grades. 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. In this paper, exhibit linear programming model in order to sequence of mining blocks estimation from mentioning to control the extractive cut-off grades. Long-term production planning model using mixed integer mathematical programming is formulated. 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: Optimal cut-off grades, minimization, open pit mines, long-term production scheduling, mixed integer programming.