سومین کنفرانس معادن روباز ایران
۳۱-۲۹ اردیبهشت ماه ۱۳۹۴

بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید بلندمدت بر اساس عدم قطعیت عیار حد در معادن سنگ‌آهن روباز

مرتضی دلشاد سیس[۱]، عباس آقاجانی بزازی[۲]، احمد مهرابی[۳]

[۱] دانش آموخته ارشد گروه مهندسی معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران Morteza Delshadsis@yahoo.com

[۲] استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران a_aghajani_bazzazi@kashanu.ac.ir

[۱] دانش آموخته ارشد گروه مهندسی معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران ahmadmehrabi1987@yahoo.com

چکیده

برنامه‌ریزی بلندمدت معادن روباز ازجمله مسایل تاثیرگذار در سوددهی و مدیریت جریان‌های نقدینگی معدنی است. عدم قطعیت عیار یکی از مهم‌ترین عوامل در بروز اختلاف میان برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته با تولید واقعی معدن است. این مساله به‌ویژه در سال‌های آغازین معدنکاری تاثیر بیشتری دارد. در پژوهش حاضر برای مدیریت عدم قطعیت عیار در برنامه‌ریزی تولید بلندمدت از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح استفاده‌شده است. برای تعمیم عدم قطعیت در تابع هدف از امید ریاضی استفاده‌شده است. هدف از این مدل‌سازی بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت عیار است. برای این منظور از یک مدل بلوکی فرضی دوبعدی کانسار آهن که دارای ۱۳۵ بلوک (۷۸ بلوک ماده معدنی و ۵۷ بلوک باطله) استفاده‌شده است. تعداد پیت‌های لانه‌ای ۵ عدد انتخاب‌شده است که هر پیشروی شامل ۲۷ بلوک است. در مرحله بعد، برای حل مدل از نرم‌افزار Excel استفاده‌شده است، برای این منظور متغیرهای تصمیم، تابع هدف و تمام محدودیت‌ها درون محیط نرم‌افزار تعریف‌شده است. قبل از حل مدل ابتدا باید در مورد مقادیر محدودیت‌ها تصمیم‌گیری شود. به‌طور مثال حد بالای ظرفیت استخراج از تقسیم مقدار کل کانسنگ و باطله به تعداد دوره‌های زمانی به‌دست‌آمده است، در گام بعدی مدل توسط نرم‌افزار اجرا گردیده است که باعث افزایش ۵ درصدی ارزش خالص فعلی نسبت به عیار ثابت که برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت در نظر گرفته می‌شود، شده است.

واژه‌های کلیدی: ارزش خالص فعلی، امید ریاضی، برنامه‌ریزی تولید، عدم قطعیت، عیار حد

۱. مقدمه

پس از حل مساله طراحی محدوده نهایی و به دست آوردن محدوده بهینه، مساله برنامه‌ریزی تولید مطرح می‌شود. برنامه-ریزی تولید در معادن روباز عبارت است از تعیین ترتیب استخراج بلوک‌های واقع در محدوده نهایی، به‌طوری‌که ارزش خالص فعلی جریان‌های نقدینگی با توجه به محدودیت‌های موجود بیشینه شود (اصانلو، ۱۳۸۹).

ازآنجاکه استخراج مواد موجود در محدوده نهایی معدن در واحد زمان امکان‌پذیر نیست، لذا با برنامه‌ریزی برای استخراج و فازبندی بلوک‌های استخراجی موجود در محدوده نهایی معدن به‌گونه‌ای عمل می‌شود که با توجه به ارزش زمانی پول، بیشترین سود عاید معدن شود، بنابراین لازم است که قسمت‌های پر عیار در سال‌های اولیه و سپس قسمت‌های کم‌عیار همراه با باطله، در سال‌های آخر عمر معدن استخراج شوند (عطائی، ۱۳۹۰).

عدم قطعیت جزء جدایی‌ناپذیر اکتشاف و توسعه منابع معدنی است. پروژه‌های معدنی به دلیل طبیعت متغیر کانسار، با عدم قطعیت‌های فراوانی روبرو هستند (فضلی،۱۳۹۰). برنامه‌ریزی در پروژه‌های معدنی به دلیل حجم بالای سرمایه‌گذاری، طبیعت تغییرپذیر کانسار، دوره عمر طولانی آماده‌سازی و تولید، تاثیرپذیری از محیط و اثرگذاری فراوان بر محیط و نیز ماهیت داده‌ها در آن اغلب با عدم قطعیت‌های فراوانی همراه است. در حوزه مهندسی معدن، طراحی، اندازه‌گیری، طبقه‌بندی، برآورد و تفسیر با خطا همراه است. این عدم قطعیت‌ها از عوامل اصلی بروز ریسک در بخش‌های مختلف پروژه‌های معدنی هستند. مهم‌ترین عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های معدنی، عدم قطعیت‌ها در کیفیت و کمیت ماده معدنی (عیار و ذخیره) هستند (آصفی، ۱۳۹۱). در بین موارد ذکرشده در مورد عدم قطعیت در پروژه‌های معدنی (عدم قطعیت مدل کانسار و وابستگی آن به تغییرات عیار و نحوه‌ی توزیع مواد، عدم قطعیت در موارد اجرایی و عملی، عدم قطعیت در پارامترهای اقتصادی)، بررسی عدم قطعیت مدل کانسار و وابستگی آن به تغییرات عیار از اهمیت بیشتری برخوردار است زیرا تمام الگوریتم‌های طراحی بر روی مدل بلوکی کانسار انجام می‌گیرد، لذا تخمین آن اهمیت بسیاری دارد و با در نظر گرفتن آن می‌توان انواع فازبندی‌های ممکن و ترتیب استخراج بلوک‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

۲. مدل سازی

به‌منظور تدوین مساله برنامه‌ریزی تولید، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح با متغیر صفر و یک به‌عنوان مدل مبنا انتخاب‌شده است. این مدل توسط محققین مختلف در برنامه‌ریزی تولید به کار گرفته‌شده است. بدین ترتیب در ادامه ساختار ریاضی تابع هدف و محدودیت‌های مدل با توجه به اهداف عملیاتی تشریح گردیده است.

✓ *تابع هدف*

با توجه به اینکه هدف اصلی مدل‌سازی بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت است تابع هدف باید به نحوی تدوین شود که حداکثر ارزش خالص فعلی را در طول برنامه‌ریزی بلندمدت ایجاد کند. تابع هدف مطابق معادله ۱ ارایه شده است.

$$\text{Max } Z(NPV) = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i,j=1}^{I,J} E[V_{i,j}]\, X_{i,j}^{t} \qquad (۱)$$

که در آن: I, i: نشان‌دهنده شماره سطر بلوک مورد نظر؛ J, j: نشان‌دهنده شماره ستون بلوک مورد نظر؛ T,t: نشان‌دهنده تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی؛ $E[V_{i,j}]$: یک متغیر تصادفی (امید ریاضی) برای ارزش بلوک که به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$E[V_{i,j}] = \int V f_v(V) dv \qquad (۲)$$

که در آن $f_v(V)$ تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی V است. برای متغیرهای تصادفی گسسته بالا به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E[V_{i,j}] = \sum_{i=1}^{n} V_{i,j} P_v(V_{i,j}) = P_1 V_{1,1} + \cdots + P_n V_{1,1} \qquad (۳)$$

جمله بالا یعنی اینکه برای مثال اگر بلوک ۱ ارزش اقتصادی ۳۰ درصد آن ۱/۱و ۷۰ درصد آن دارای ارزش اقتصادی۱/۵ باشد آنگاه $E[V_{1,1}]$ بلوک ۱ برابر است با:

$$E[V_{1,1}] = ٪۳۰ \times ۱/۱ + ٪۷۰ \times ۱/۵ = ۱/۳۸$$

$X_{i,j}^t$: متغیر دوتایی که اگر بلوک مورد نظر استخراج شود یک و در غیر این صورت صفر می‌باشد.

✓ *محدودیت‌هایی مدل*

محدودیت‌های مدل برنامه‌ریزی تولید به شرح زیر است:

- محدودیت ظرفیت استخراج: میزان موادی که باید معدنکاری (هم ماده معدنی($O_{i,j}$) و هم باطله ($W_{i,j}$)) شوند، باید از حداکثر ظرفیت معدنکاری کمتر و از حداقل ظرفیت آن بیشتر باشد زیرا در غیر اینصورت معدنکاری توجیه اقتصادی ندارد. معادله‌های ۴ و ۵ اطمینان می‌دهند که مقدار کانسنگ و باطله در هر دوره از حداکثر ظرفیت تولید معدن (MC_{max}) کوچکتر بوده و از حد پایین آن (MC_{min}) بالاتر باشد (Ramezan, S., Dimitrakopoulos, R. 2004).

$$\sum_{i,j=1}^{I,J} (O_{i,j}^t + w_{i,j}^t) \times X_{i,j}^t \leq MC_{max} \qquad (۴)$$

$$\sum_{i,j=1}^{I,J} (O_{i,j}^t + w_{i,j}^t) \times X_{i,j}^t \geq MC_{min} \qquad (۵)$$

- محدودیت ظرفیت کارخانه فرآوری: معادله‌های ۶ و ۷ تضمین می‌کنند که تناژکانسنگ استخراجی در هر دوره کوچکتر یا مساوی حداکثر ظرفیت کارخانه فرآوری (PC_{max}) باشد و از حد پایین (PC_{min}) آن هم بیشتر باشد (Ramezan, S., Dimitrakopoulos, R, 2004).

$$\sum_{i,j=1}^{I,J} O_{i,j}^t \times X_{i,j}^t \leq PC_{max} \qquad (۶)$$

$$\sum_{i,j=1}^{I,J} O_{i,j}^t \times X_{i,j}^t \geq PC_{min} \qquad (۷)$$

- محدودیت ذخیره: به‌طورکلی مدل بلوکی کانسار شامل بسیاری از بلوک‌ها می‌باشد. معادله ۸ تضمین می‌کند که تمام بلوک‌های مدل، فقط یکبار در هر دوره استخراج شوند.

$$\forall i = 1,2,\ldots,I \text{ و } \forall j = 1,2,\ldots,J \text{ و } \forall t = 1,2,\ldots,T \quad \sum_{t=1}^{T} \sum_{i,j=1}^{I,J} X_{i,j}^t = 1 \qquad (۸)$$

- محدودیت هندسی (منظور رعایت شیب و ترتیب برداشت بلوک مورد نظر): شیب دیواره محدوده نهایی نباید در هیچ نقطه از ۱:۱ تجاوز نماید (یعنی، مثلا برای برداشت بلوک۲=i و ۳=j در حالت دوبعدی ابتدا باید سه بلوک بالایی آن در دوره مورد نظر یا دوره قبل برداشته شده باشد و سپس ۵ بلوک بعدی برداشته شود و بعد بلوک مورد نظر)؛ معادله‌های ۹ و ۱۰ اطمینان می‌بخشند که محدودیت‌هایی فوق رعایت شوند.

$$X_{i,j}^{t} - \sum_{r=1}^{t} y_r^t \leq 0 \, , y_r^t = \begin{vmatrix} X_{i-1,j-1}^{t} \\ X_{i-1,j}^{t} \\ X_{i-1,j+1}^{t} \end{vmatrix} \qquad (۹)$$

y_r^t: تعداد بلوک‌های بالا سری بلوک مورد نظر که باید با رعایت شیب در دوره مورد نظر برداشته شوند.

$$YX_{i,j}^{t} - \sum_{y} \sum_{r=1}^{t} X_y^r \leq 0 \text{ و } t = 1,2, \dots, T \qquad (۱۰)$$

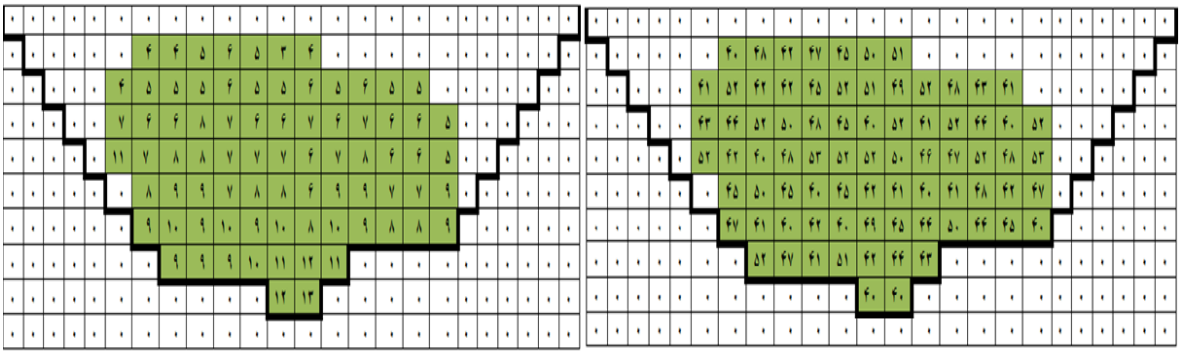
Y: تعداد بلوکی که باید قبل از برداشت بلوک مورد نظر برداشته شود مثلا برای برداشت بلوک i=۳ و j=۵ باید ۸ بلوک بالاسری آن با رعایت محدودیت‌ها هم در دوره مورد نظر و هم دوره‌های قبلی برداشته شده باشد.

۳. اجرای مدل ریاضی پیشنهادی برای معدن فرضی

در این پژوهش به‌منظور اجرای مدل تدوین‌شده بر روی یک کانسار فرضی آهن گام‌های اجرایی به شرح زیر انجام گردیده است:

- از آن‌جا که رویکرد پروژه حاضر یک رویکرد پژوهشی هست، بنابراین تصمیم بر آن شد تا در برآورد پارامترهای اقتصادی تنها به صحت‌سنجی منابع موجود و سپس استفاده از پارامترهای برآورد شده در این منابع اکتفا گردد. برای محاسبه ارزش اقتصادی بلوک‌ها قیمت فلز ۴۶ دلار بر تن، هزینه استخراج هر تن سنگ ۳/۵ دلار بر تن و هزینه فرآوری هر تن کانسنگ ۱۰ دلار بر تن، ضریب بازیابی ۹۵ درصد و وزن مخصوص کانسنگ و باطله به ترتیب ۳/۴۵ و ۲/۳ تن بر مترمکعب فرض شده است (شرکت سنگ‌آهن شرق ایران، ۱۳۸۹).
- با توجه به عیار متوسط بلوک‌ها و پارامترهای اقتصادی فوق‌الذکر و همچنین با به‌کارگیری روش لرچ و گروسمن[1] دوبعدی، محدوده نهایی معدن در این مقطع تعیین شده است که با خطوط پررنگ در شکل (۱) مشخص گردیده است. ابعاد بلوک‌ها ۱۰× ۲۵× ۲۵ متر در نظر گرفته شده است. این مدل بلوکی شامل ۷۸ بلوک کانسنگ و ۵۷ بلوک باطله و تناژ کل آن ۲/۵ میلیون تن می‌باشد. اعداد نوشته داخل بلوک‌ها عیار آن‌ها می‌باشد. همچنین شکل (۲) همان مقطع است که اعداد نوشته‌شده داخل بلوک انحراف استاندارد (جذر واریانس تخمین) آن‌ها است که از روش‌های آماری به‌دست‌آمده است.

[1] Lerch& Grossman

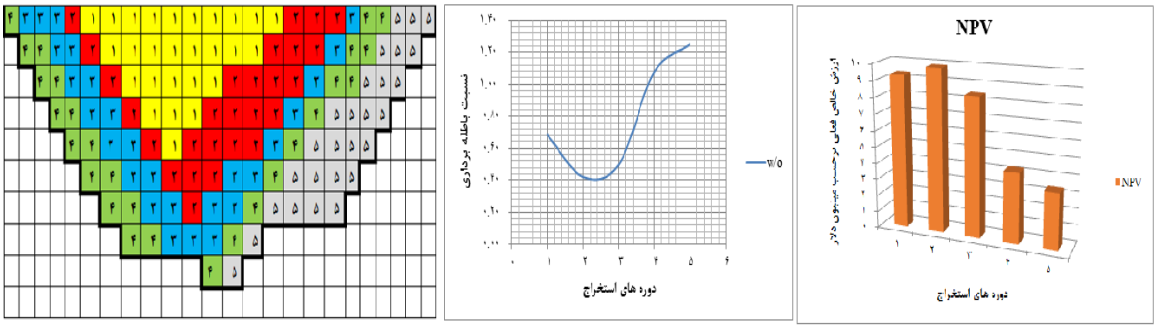


شکل ۱: محدوده نهایی دو بعدی فرضی کانسار آهن

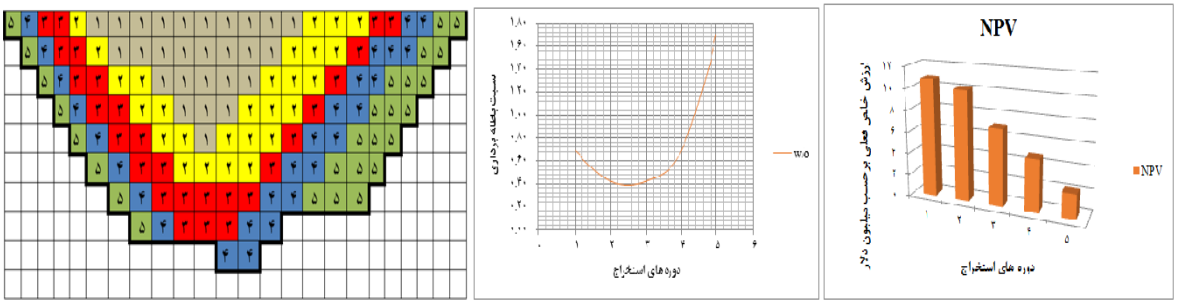
شکل ۲ : انحراف استاندارد عیار مدل بلوکی فرضی

۴. بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید با مدیریت عدم قطعیت در توزیع عیار و حل مدل

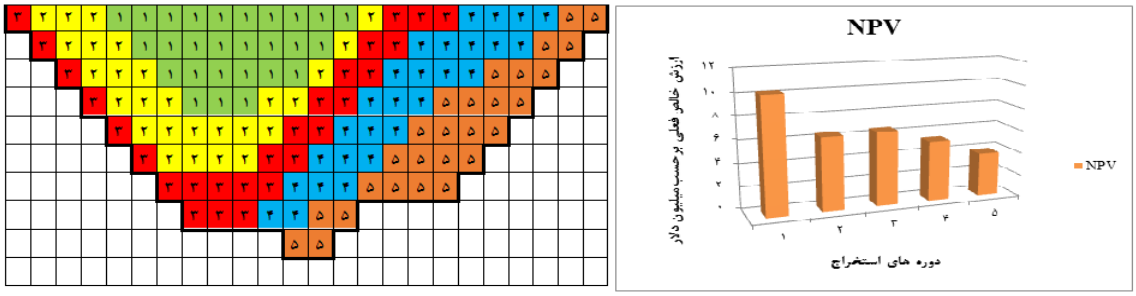
در مرحله بعد، برای حل مدل از نرم‌افزار Excel استفاده شده است، برای این منظور متغیرهای تصمیم، تابع هدف و تمام محدودیت‌ها درون محیط نرم‌افزار تعریف شده است. قبل از حل مدل ابتدا باید در مورد مقادیر محدودیت‌ها تصمیم‌گیری شود. برای انتخاب هر یک از این مقادیر اصول خاصی در نظر گرفته شده است، در گام بعدی مدل توسط نرم‌افزار اجرا گردیده است. برای اجرای مدل ریاضی از برنامه‌ریزی عدد صحیح صفر و یک استفاده شده است. مدل توسط نرم‌افزار در ۵ مرحله اجرا شده است، مرحله اول حد میانگین عیار هر بلوک (n=۰) که همان تعیین محدوده نهایی معدن است شکل(۳). در اجراهای بعدی تغییرات عیار در بازه‌های ۰/۵± کاملا به صورت تصادفی اعمال شده است که نتیجه یکی از تغییرات در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین مدل فرضی به ازای نسبت باطله‌برداری ثابت نیز حل شده است شکل (۵) که نتایج به شرح زیر است:



شکل۳: حل مدل فرضی بر اساس تغییرات $\Delta n = ۰$ و نمودار نسبت باطله‌برداری و نمودار ارزش خالص فعلی در دوره‌های مختلف استخراج در حالت $\Delta n = ۰$



شکل۴: حل مدل فرضی بر اساس تغییرات $\Delta n =$ ۰/۵ و نمودار نسبت باطله‌برداری و نمودار ارزش خالص فعلی در دوره‌های مختلف استخراج در حالت $\Delta n =$ ۰/۵



شکل۵: حل مدل فرضی بر اساس تغییرات $\Delta n =$ ۰ و نسبت باطله‌برداری تقریبا ثابت و همچنین نمودار ارزش خالص فعلی در دوره‌های مختلف استخراج در حالت $\Delta n =$ ۰ و نسبت باطله برداری تقریبا ثابت

۵. نتیجه‌گیری

مهم‌ترین دستاوردهای حاصل از پژوهش اخیر را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- با در نظر گرفتن عدم قطعیت و محدودیت‌های مدل (محدودیت ظرفیت معدنکاری، محدودیت ظرفیت کارخانه فرآوری، محدودیت شیب) ارزش خالص فعلی مدل فرضی نسبت به حالتی که در آن عیار بلوک‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود، تقریبا ۵ درصد و نسبت به حالت باطله‌برداری ثابت، تقریبا ۱۴ درصد افزایش یافته است.
- در مدل‌سازی ارایه شده، تابع هدف و محدودیت‌های معدنکاری به صورت نوآورانه‌ای پیشنهاد شده که به راحتی قابل پیاده‌سازی در برنامه Excel است که این نرم‌افزار قابل دسترس همگان می‌باشد.
- نتایج اجرای مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت نشان می‌دهد که با یک مدیریت صحیح عدم قطعیت می‌توان ارزش خالص فعلی را بیشینه کرد.
- در تحقیق حاضر به‌منظور مدل‌سازی عدم قطعیت عیار از یک متغیر تصادفی (امید ریاضی) استفاده‌شده است.

- با اینکه برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت عوامل بسیاری را باید در نظر داشت، می‌توان با در نظر گرفتن عیار که بیشترین تاثیر را در ارزش اقتصادی معدن دارد، بهترین برنامه‌ریزی را برای استخراج بلوک‌ها در نظر گرفت.

۶. مراجع

اصانلو، م. (۱۳۸۹). ***روش‌های استخراج معادن سطحی***. چاپ سوم، انتشارات دانشگاه امیر کبیر.

آصفی، م. (۱۳۹۱). طراحی راهبردی محدوده‌ی نهایی پیت بهینه در آنومالی غربی معادن سنگ‌آهن سنگان با احتساب عدم‌قطعیت Fe/FeO. **پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم وتحقیقات تهران**.

شرکت سنگ‌آهن شرق ایران. (۱۳۸۹). گزارش طراحی مفهومی کانسارهای باغک و دردوی.

عطائی، م.، حسینی، س. (۱۳۹۰). ***طراحی محدوده و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز***. چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.

فضلی، ا. (۱۳۹۰). تاثیر عدم قطعیت اقتصادی در فرآیند برنامه‌ریزی تولید معدن. **سمینار کارشناسی ارشد مهندسی معدن. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.**

Ramezan, S., Dimitrakopoulos, R. (2004). Traditional and New MIP Models for Production Scheduling With In-Situ Grade Variability. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment 2004**, **Vol. 18**, No. 2, pp. 85–98.

Optimizing Long-term production planning based on the uncertainty cut of grade open pit iron ore mines

Morteza Delshadsis[1], Abbas Aghajani Bazzazi[2], Ahmad Mehrabi[3]
[1]*Department of mining engineering, South Tehran branch, Islamic Azad Universtity, Tehran, Iran*
Mortezadelshadsis @yahoo.com
[2]*Department of mining engineering, University of Kashan, Kashan, Iran*
a_aghajani_bazzazi@kashanu.ac.ir
[3]*Department of mining engineering, South Tehran branch, Islamic Azad Universtity, Tehran, Iran*
ahmadmehrabi1987@yahoo.com

Abstract
Long-term production planning in open-pit mining is affecting the profitability and cash flows management. Uncertainty of the cut-of-grade is one of the major factors in conflict with the actual production and planning. It will be more effect in the first years of mine life. In the present study, integer programming is used for long term production planning with regard grade uncertainty. Expected value is applied in objective function for uncertainty generalization. Maximizing of the net present value with regard to grade uncertainty is the main objective of this modeling problem, so a two-dimensional block model with 135 iron ore blocks (78 blocks of ore and 57 blocks of waste) was used. Five nested-pits were selected which contain 27 blocks in each nested pits. Then, objective function and constraints were defined by decision variables and the model was solved by Excel software. Before solving the model, upper and lower bound of constraints should be defined, for example, the upper limit of the extraction capacity in each period is obtained by the total amount of ore and waste which is divided by the number of periods. Finally, the model is run by the Excel software that increasing 5 percent of the net present value in comparisons with long-term production planning with fixed cut-of-grade.

Key words: Net present value, production planning, uncertainty, cut-of-grade, expected value