بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فني و مهندسي

گروه مهندسي معدن

پایان‌نامه تحصیلی جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی معدن گرایش استخراج

تعیین سیاست کامل عیارهای حد بهینه در معدن مس سونگون

استاد راهنما:

دکتر بیژن ملکی

استاد راهنما:

دکتر فرشاد رشیدی نژاد

استاد مشاور:

مهندس مهرداد حیدری

مؤلف:

وحید اکبری‌فر

دی ماه ۱۳۸۸

تقدیم به پدر و مادرم .....

چکیده

بهینه‌سازی پیت نقش تعیین کننده‌ای در ارزش فعلی خالص معدن دارد. طراحی بلند مدت معدن روباز یک فرایند پویاست که بایستی هر از چند گاهی با تغییر پارامترهای فنی- اقتصادی بازنگری شود. بهینه‌سازی عیارهای حد خود یک برنامه‌ریزی تولید بلند مدت است که باعث افزایش ارزش فعلی خالص می‌شود. ذخیره مس سونگون از نوع پورفیری است و در شمال غربی ایران واقع است. به خاطر مدل زمین‌شناسی به روز شده و افزایش شدید قیمت در سال‌های اخیر بهینه‌سازی محدودهٔ نهایی پیت و برنامه‌ریزی تولید بلند مدت امری اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین طراحی بلند مدت معدن مس سونگون با استفاده از نرم‌افزار NPVSchduler+MFO انجام گردید. پارامترهای فنی و اقتصادی و مدل بلوکی کانسار سونگون وارد نرم‌افزار NPVS+MFO شد. عملیات تولید مدل بلوکی اقتصادی، بهینه‌سازی محدوده نهایی، تولید پوش‌بک و برنامه‌ریزی تولید سالیانه و بهینه‌سازی عیارهای حد در نرم‌افزار NPVS+MFO انجام شد و سه سناریوی طراحی اجرا شد.

اولین سناریوی طراحی تحلیل محدودیت‌های فیزیکی مختلف در محدودهٔ نهایی پیت است. این محدودیت‌ها، دره سونگون، محوطه سنگ شکن و ناحیه نیمه صنعتی است. تحلیل محدوده نهایی با استفاده از داده‌های فنی اقتصادی مشابه و محدودیت فیزیکی متفاوت برای مقایسه انجام شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که محوطه سنگ شکن هیچگونه تاثیری در محدوده نهایی ندارد و ناحیه نیمه صنعتی بیشترین تاثیر را بر اندازه و ارزش فعلی خالص محدوده نهایی دارد.

در دومین سناریوی طراحی، بهینه‌سازی پیت و برنامه‌ریزی تولید سالیانه معدن بر اساس شرایط فعلی انجام شد. پیت بهینه تعیین شده، با ۲۵۷ میلیون تن ماده معدنی در ۳ پوش‌بک معدن را با نرخ تولید سالیانه ۷ میلیون تن برای ۵ سال اول و ۱٤ میلیون تن در سال‌های بعدی برای ۲۳ سال تامین می‌کند.

در آخرین سناریوی طراحی بهینه‌سازی عیارهای حد در حالت قیمت و هزینه‌های ثابت و قیمت و هزینه‌های متغیر (به منظور بررسی تاثیر قیمت روی ارزش فعلی خالص و عیار حد بهینه) انجام شد. با انجام این بهینه‌سازی عمر معدن نسبت به سناریوی قبلی ۳ سال کاهش یافت و ارزش فعلی خالص به میزان ۱۲ میلیون دلار افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی عیارهای حد، ارزش فعلی خالص، معدن مس سونگون، برنامه‌ریزی تولید سالیانه، نرم‌افزار NPVScheduler+MFO

تشکر و قدرداني

سپاس بی‌کران خداوند بی‌همتا را سزاست که دل‌ها را به نور علم و ایمان منور ساخت و درود بی‌پایان پروردگار بر پیامبر گرامی اسلام (ص) و خاندان پاک و مطهرش که بشریت را به سوی رستگاری رهنمون شدند.

بر خود لازم می‌دانم که از راهنمایی‌های سازنده استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر ملکی و جناب آقای دکتر رشیدی نژاد و استاد مشاور ارجمند جناب آقای مهندس حیدری سپاسگزاری نمایم و همچنین از آقای مهندس محمودی به خاطر کمک‌های دوستانهٔ ایشان در یادگیری نرم‌افزار کمال تشکر را دارم.

در پایان از همه اعضای خانواده‌ام به خاطر تمام مهربانی‌ها، فداکاری‌ها و حمایت‌هایشان خاضعانه سپاسگزاری نموده و از خداوند متعال کامیابی و توفیقات روز افزون همهٔ عزیزان را خواستارم.

وحید اکبری‌فر

دی ۸۸

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی معادن روباز ۱

۱-۱- بهینه‌سازی در صنعت معدنکاری ۱
1-1-1- مقدمه 1
1-1-2- تعیین محدودهٔ نهایی 2
1-1-3- مفهوم معدنکاری توسعه‌ای و پوش‌بک‌ها 7
1-1-4- برنامه‌ریزی تولید 9
۱-۲- بهینه‌سازی عیارهای حد ۱۲
1-2-1- مقدمه 12
1-2-2- انواع تعاریف عیار حد 15
۱-۲-۲-۱- عیار حد بین کانسنگ و باطله ۱۸
۱-۲-۲-۲- عیار حد برای مواد معدنی که در کف پیت روباز قرار دارد ۱۹
۱-۲-۲-۳- عیار حد برای انتخاب بین فرایندها ۱۹
۱-۲-۲-٤- عیار حد بین باطله و انباشتگاه مواد کم عیار ۲۰
۱-۲-۲-٥- عیار حد با بازیابی‌های متغیر ۲۲
1-2-3- عوامل مؤثر در عیار حد 22
۱-۳- تاریخچهٔ بهینه‌سازی عیارهای حد ۲٥

فصل دوم تعیین عیارهای حد بهینه با روش لین ۳٤

۲-۱- مقدمه ۳٤
۲-۲- ارزش فعلی ۳٤
۲-۳- مدل‌های اقتصادی ۳۸
۲-٤- عیار حد اقتصادی ۳۹
۲-٥- عیار حد متعادل کننده ٤۱
۲-٦- انتخاب عیار حد بهینهٔ موثر ٤٤
۲-۷- سیاست عیار حد ٤۸
۲-۸- انباشت کردن ٤۹
۲-۹- الگوریتم بهینهسازی عیارهای حد ٥۱
2-9-1- محاسبهٔ عیار حد بهینه برای یک سال 51
2-9-2- مراحل الگوریتم جهت تعیین سیاست عیارهای حد بهینه 55
۲-۱۰- مورد مطالعاتی انجام شده در معدن مس سونگون ٥۷
۲-۱۱- کاستی‌های مدل لین ٥۷
۲-۱۲- الگوریتم رایج تعیین عیارهای حد بهینه ٥۸

فصل سوم آشنایی با معدن مس سونگون ٦۱

۳-۱- وضعیت مس در ایران ٦۱
۳-۲- معدن مس سونگون ٦۱
۳-۳- موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی ناحیه مس سونگون ٦۲

۳-٤- راه‌هاي دسترسي به كانسار مس سونگون ٦٣
۳-٥- ويژگي‌هاي جغرافيايي ناحيه اهر ٦٤
۳-٦- تاريخچه فعاليت‌هاي معدني و اكتشافي ٦٤
۳-۷- اهداف طرح ٦٦
۳-۸- مختصري از مطالعات انجام شده ٦٧
3-8-1- زمين شناسي 67
۳-۸-۲- عمليات اكتشافي ٦٧
3-8-3- مطالعات امكان‌سنجي مقدماتي 68
3-8-4- مطالعات امكان‌سنجي 68
۳-۹- طرح‌هاي اجرا شده در مجتمع مس سونگون ٦٩
3-9-1- طرح نهايي استخراج 69
3-9-2- مكان‌هاي انباشت باطله 70
3-9-3- پروژه كارخانه پرعيارسازي 70

فصل چهارم كليات نرم‌افزار و اطلاعات فنی – اقتصادی ۷۱

٤-۱- مقدمه ۷۱
٤-۲- آشنايی با نرم‌افزار NPVSCHEDULER+MFO ۷۱
٤-۳- روش استخراج ۷٥
٤-٤- مدل بلوکی کانسار مس سونگون ۷٥
٤-٥- ساختن بلوک معدنی ۷٦
4-5-1- انتخاب ابعاد بلوک 76
4-5-2- کدهای تطبیقی بلوک و کامپوزیت 76
٤-٦- مدل توپوگرافی محدودهٔ معدن ۷٦
٤-۷- مشخصات هندسی پیت ۷۷
٤-۸- محدودیت فیزیکی موجود در گسترش حد نهایی معدن ۷۸
٤-۹- تولید سالیانه معدن ۷۸
٤-۱۰- وزن مخصوص ۷۹
٤-۱۱- درصد بازیابی مس ۷۹
4-11-1- بازیابی و اختلاط در مرحلهٔ استخراج 79
4-11-2- بازیابی در مرحلهٔ تغلیظ، ذوب و پالایش 79
٤-۱۲- قیمت‌ها و هزینه‌ها ۸۰
4-12-1- هزینهٔ پایه معدنکاری 80
4-12-2- ضریب تصحیح هزینه‌های معدنکاری 81
4-12-3- هزینه‌های فراوری 81
4-12-4- ضریب تصحیح هزینه‌های فراوری 81
4-12-5- قیمت 81
٤-۱۳- نرخ تنزیل سالیانه ۸۱

فصل پنجم برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معدن مس سونگون..... ۸٤

٥-۱- مقدمه ۸٤
٥-۲- محدوده نهايي معدن تحت شرايط محدوديت‌هاي مختلف مرزي ۸٤

٥-٣- حد نهايي بهينه معدن بر اساس شرايط فعلي معدن ٨٦
5-3-1- پیت‌های لانه‌ای 87
..... 91
5-3-2- تعيين تناژ و تعداد بهينه پوش‌بک‌هاي استخراجي 91
٥-٤- برنامه‌ريزي توليد ساليانه ٩٨
٥-٥- بهینه‌سازی عیارهای حد معدن مس سونگون برای افزایش NPV..... ١٠٠
5-5-1- مقدمه 100
5-5-2- مدول MFO..... 102
5-5-3- عیارهای حد بهینه در حالت قیمت و هزینه‌های ثابت 104
٥-٥-٣-١- چگونگی اجرایی بودن طرح و ارائه طرح اجرایی برنامه‌ریزی استخراج ١٠٨
٥-٥-٣-٢- مزایا و معایب استفاده از بهینه‌سازی عیارهای حد..... ١١٠
٥-٥-٣-٣- بررسی ارزش فعلی خالص با محدودیت نرخ معدنکاری سالیانه ١١١
5-5-4- عیارهای حد بهینه در حالت قیمت و هزینه‌های متغیر (تعدیل یافته) 111
٥-٦- تحليل حساسيت ١١٥
٥-٧- نتيجه گيري و بحث..... ١١٨

فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ١٢٠

٦-١- نتايج ١٢٠
٦-٢- پيشنهادات..... ١٢٢

منابع و مراجع..... ١٢٣

فهرست تصاویر

شکل ۱-۱: چرخشی بودن بهینه‌سازی محدودهٔ معدن و برنامه‌ریزی تولید ٤
شکل ۱-۲: پیت‌های لانه‌ای ٥
شکل ۱-۳: مراحل برنامه‌ریزی سنتی با تحلیل چرخه‌ای ۱۱
شکل ۱-٤: اندازهٔ نسبی پیت به عنوان تابعی از ترازهای گوناگون هزینه ۲۳
شکل ۲-۱: نمونه‌ای از منحنی توزیع تجمعی عیار ٤۲
شکل ۲-۲: تغییرات مقدار کانی قابل استحصال از واحد جسم کانی دار نسبت به تغییرات عیار ٤۳
شکل ۲-۳: تغییرات مقدار کانی قابل استحصال از واحد کانسنگ نسبت به تغییرات عیار ٤٤
شکل ۲-٤: منحنی نمایش افزایش ارزش خالص فعلی نسبت به عیار حد در حالتی که تنها یک مولفهٔ محدود کننده M وجود دارد: بهینهٔ محدود کنندهٔ اقتصادی ٤٥
شکل ۲-٥: منحنی نمایش تغییرات ارزش فعلی نسبت به عیار حد در حالتی که دو مولفهٔ محدود کنندهٔ M و H وجود دارد: بهینهٔ متعادل کننده ٤٦
شکل ۲-٦: منحنی نمایش تغییرات ارزش فعلی نسبت به عیار حد در حالتی که سه مولفهٔ محدود کننده وجود دارد: زوج ماکزیمم‌های جداگانه ٤۷
شکل ۲-۷: نمایش الگوریتم تعیین عیارهای حد بهینه ٥۹
شکل ۳-۱: راه‌های دسترسی به معدن مس سونگون ٦۳
شکل ۳-۲: وضعیت قرارگیری معدن مس سونگون نسبت به کشورهای همسایه ایران ٦٥
شکل ٤-۱: گام‌های اساسی برنامه‌ریزی بلند مدت معدن در نرم‌افزار ۷۲
شکل ٤-۲: مراحل بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تولید توسط نرم‌افزار ۷٤
شکل ٥-۱: نمایی از مدل بلوکی محدوده نهایی و محدودیت‌های فیزیکی در ارتفاع ۲۰۰۰ متری ۸٥
شکل ٥-۲: نمودار تفکیکی ارزش فعلی خالص پیت‌های لانه‌ای توسعه‌ای ۹۱
شکل ٥-۳: نمودار تجمعی ارزش فعلی خالص پیت‌های لانه‌ای توسعه‌ای ۹۲
شکل ٥-٤: مقدار ماده معدنی، باطله و کل تناژ سنگ به تفکیک پوش‌بک‌ها ۹٥
شکل ٥-٥: ارزش فعلی خالص به تفکیک پوش‌بک‌ها ۹٦
شکل ٥-٦: پوش‌بک شماره یک و توپوگرافی معدن ۹۷
شکل ٥-۷: پوش‌بک شماره دو و توپوگرافی معدن ۹۷

شکل ۵-۸: پوش‌بک شماره سه و توپوگرافی معدن..... ۹۸
شکل ۵-۹: نمودار سود و ارزش فعلی خالص در طول عمر معدن..... ۱۰۱
شکل ۵-۱۰: نمودار نسبت باطله‌برداری در طول عمر معدن..... ۱۰۱
شکل ۵-۱۱: مقایسهٔ ارزش فعلی خالص تجمعی در دو حالت بهینه‌سازی عیارهای حد و برنامه‌ریزی تولید سالیانه..... ۱۰۶
شکل ۵-۱۲: مقایسهٔ نرخ معدنکاری در دو حالت بهینه‌سازی عیارهای حد و برنامه‌ریزی تولید سالیانه..... ۱۰۶
شکل ۵-۱۳: عیارهای حد بهینه و اقتصادی در طول عمر معدن..... ۱۰۷
شکل ۵-۱٤: ارزش فعلی خالص و سود تجمعی در طول عمر معدن..... ۱۰۷
شکل ۵-۱۵: عیارهای حد بهینه در طول عمر معدن..... ۱۱۳
شکل ۵-۱٦: عیارهای حد بهینه در طول عمر معدن..... ۱۱۳
شکل ۵-۱۷: عیارهای حد بهینه در طول عمر معدن..... ۱۱٤
شکل ۵-۱۸: عیارهای حد بهینه در طول عمر معدن..... ۱۱٤
شکل ۵-۱۹: تحلیل حساسیت عیار حد اقتصادی نسبت به تغییرات قیت مس، نرخ تنزیل سالیانه و هزینه معدنکاری- فرآوری..... ۱۱۷
شکل ۵-۲۰: تحلیل حساسیت ارزش فعلی خالص محدودهٔ نهایی نسبت به تغییرات قیمت مس، نرخ تنزیل سالیانه و هزینه معدنکاری- فرآوری..... ۱۱۸

فهرست جداول

جدول ۳-۱: گزینه‌های پیشنهادی در مطالعات امکان سنجی..... ٦٩
جدول ۳-۲: پارامترهای فنی طراحی در معدن مس سونگون..... ۷۰
جدول ٤-۱: شیب کلی معدن..... ۷۸
جدول ٤-۲: هزینه‌های معدنکاری و پارامترهای اقتصادی در معدن مس سونگون..... ۸۳
جدول ٥-۱: تحلیل محدوده نهایی با اعمال محدودیت‌های فیزیکی مختلف برای پیت نهایی..... ۸٦
جدول ٥-۲: نتایج محدوه نهایی..... ۸۷
جدول ٥-۳: گزارش تجمعی فازها..... ۸۹
جدول ٥-٤: سناریوهای مختلف طراحی پوش‌بک‌ها..... ۹٤
جدول ٥-٥: خلاصه مشخصات پوش‌بک‌های تولید شده به صورت تفکیکی و تجمعی..... ۹٥
جدول ٥-٦: خلاصه گزارش برنامه‌ریزی سالیانه تولید..... ۱۰۰
جدول ٥-۷: خلاصهٔ گزارش تفکیکی بهینه‌سازی عیارهای حد در طول عمر معدن..... ۱۰٥
جدول ٥-۸: طرح اجرایی ارائه شده توسط نرم‌افزار بعد از بهینه‌سازی عیارهای حد..... ۱۰۹
جدول ٥-۹: تحلیل حساسیت ارزش فعلی خالص محدودهٔ نهایی به هزینه معدنکاری و فرآوری..... ۱۱٦
جدول ٥-۱۰: تحلیل حساسیت ارزش فعلی خالص محدودهٔ نهایی به قیمت مس..... ۱۱٦
جدول ٥-۱۱: تحلیل حساسیت ارزش فعلی خالص محدوده نهایی به نرخ تنزیل سالیانه..... ۱۱۷

فصل اول

مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی معادن روباز

۱-۱- بهینه‌سازی در صنعت معدنکاری

۱-۱-۱- مقدمه

معدنکاری بر خلاف عقیده پیشینیان موضوع پیچیده‌ای است که با پیچیدگی‌های تغییرات عیار در کانسار یا ذخیرهٔ مادهٔ معدنی آغاز می‌شود، با پرسش‌هایی درباره اینکه چطور، از کجا و در چه زمانی باید مواد را استخراج کرد ادامه یافته و با دشواری‌هایی که بیشتر در کنترل فرایند پیچیده استخراج به وجود می‌آید پایان می‌یابد. با گسترش سامانه‌های رایانه‌ای در همه این زمینه‌ها از مشکلات روش‌های دستی تا حد قابل ملاحظه‌ای کاسته شده است. ولی تاکنون این سامانه‌ها نتوانسته‌اند تصمیم‌گیری درباره مدیریت منابع معدنی را آسان نمایند. در واقع این سامانه‌ها با داشتن توانایی تجزیه و تحلیل‌های با ریزه کاری‌های بیشتر و همچنین گسترش دامنه بررسی‌ها در برنامه‌ریزی، سبب پیچیده‌تر شدن فرآیند تصمیم‌گیری شده‌اند.

یکی از تأثیرهای مهم این گسترش در صنعت معدنکاری امکان به کارگیری شگردهای گوناگون بهینه‌سازی است. به مدد این شگردها پذیرش اینکه ارزش کنونی معیار غالب در بررسی ارزش اقتصادی پروژه‌ها باشد، کم و بیش در همه جا پذیرفته شده است. معیار ارزش خالص فعلی[۱] نخستین بار برای گزینش بهترین گزینه برای سرمایه‌گذاری‌ها به کار رفته است، بدینسان که در ارزیابی هر پروژه‌ای، نخست باید ارزش خالص فعلی آن مثبت باشد، دوم اینکه باید از هزینهٔ سرمایه شرکت کمتر نباشد. پس از آن به این واقعیت مهم پی برده شد که این معیار نه تنها معیار مناسبی برای مقایسه برتری یک پروژه بوده، بلکه به عنوان یک اصل راهبردی در فرآیند برنامه‌ریزی هم عمل کرده است. هر تغییری در برنامه که باعث می‌شد ارزش خالص فعلی بهبود یابد یک مزیت به حساب می‌آمد به گونه‌ای که این بهبود وضعیت‌ها تجمعی بودند. پی بردن به این واقعیت درهایی را گشود که باعث شد شگردهای ریاضی بی‌شماری معطوف مسأله بیشینه‌سازی شوند که مسأله شایعی در علوم فیزیک و مهندسی به شمار می‌رود. از

---

[۱]- Net Present Value

آن زمان واژه بهینه‌سازی برای تعریف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی در بطن هر برنامه‌ریزی جا افتاد و با جا افتادن این واژه در صنعت معدنکاری این پرسش که" آیا این پروژه‌ها بهینه شده‌اند یا خیر؟ "به طور معمول مطرح می‌شود. این واژه در مدیریت منابع معدنی نقش ویژه‌ای دارد زیرا هر ذخیره ماده معدنی محدود است. برخی از کانسارها وسعت کمی دارند و طی چند ماه استخراج می‌شوند و برخی دیگر وسیع هستند و منابع بی‌پایانی از کانسنگ به نظر می‌آیند، ولی حقیقت این است که این معادن هم محدودند و دیر یا زود استخراج آنها به پایان خواهد رسید [۱].

۱-۱-۲- تعیین محدودهٔ نهایی

یک معدن روباز، پیت یا حفره بزرگی است که به منظور استخراج ماده معدنی در سطح زمین ایجاد می‌شود به گونه‌ای که در دوران عمر معدن همهٔ عملیات معدنکاری در فضای باز انجام می‌شود. هدف اصلی در هر عملیات معدنکاری این است که استخراج کانسنگ با کمترین هزینهٔ ممکن انجام شود به طوری که تا حد امکان بتوان سود حاصله را بیشینه نمود. گزینش پارامترهای فیزیکی طراحی و برنامه-ریزی برای استخراج مادهٔ معدنی و سنگ باطله نیاز به تصمیم‌گیری مهندسی پیچیده‌ای داشته و از نظر اقتصادی اهمیت بسزایی دارد. بنابراین می‌توان گفت بنیاد برنامه‌ریزی برای هر عملیات معدنکاری بر اقتصاد استوار است که به جنبه‌های زمین‌شناسی، فنی و محیط زیستی محدود می‌شود.

به منظور برنامه‌ریزی برای هر معدن روباز باید ترتیب استخراج ماده معدنی و سنگ باطله مشخص گردد. هدف اصلی برنامه‌ریزی مشخص نمودن یک ترتیب استخراج است به گونه‌ای که ارزش خالص فعلی را در دوران عمر اقتصادی کانسار بیشینه نماید. در طرح بهینه موارد زیر باید مشخص گردند:

- حد نهایی اقتصادی معدن که اندازه نهایی و شکل پیت را تعیین می‌نماید.
- برنامه استخراج که ذخیره ماده معدنی تعیین شده با حد نهایی اقتصادی معدن را از درون پیت به بیرون هدایت نماید و هدف مالی گزینش شده در دوران عمر معدن را بیشینه نماید.

بیشتر وقت‌ها زمانی که صحبت از بهینه‌سازی در معدن روباز به میان می‌آید منظور تعیین محدودهٔ نهایی بهینه معدن[۱] است که طبق تعریف به محدوده‌ای اطلاق می‌شود که اگر همین امروز همه ماده معدنی و باطله با در نظر گرفتن ملاحظات فنی (با شیب نهایی پایدار) از درون پیت طراحی شده استخراج شود،

[۱]- Optimum ultimate pit limit

بالاترین سود ممکنه را به دست دهد. بنیاد بهینه‌سازی محدوده نهایی معادن روباز بر اجرای یک الگوریتم به وسیله رایانه استوار می‌باشد و برای این منظور نخست باید کانسار را بلوک‌بندی نمود (مدل بلوکی پایه همه روش‌های رایانه‌ای است). برای تعیین محدوده نهایی بهینه معدن باید کارهای زیر را انجام داد:

- بلوک‌بندی کانسار
- برپایی فهرست یا پرونده داده‌ها برای هر یک از بلوک‌ها (حاوی کلیه داده‌های زمین‌شناسی)
- تعیین ارزش اقتصادی بلوک‌ها
- به کارگیری دست کم یکی از الگوریتم‌های گوناگون طراحی بهینه معادن روباز

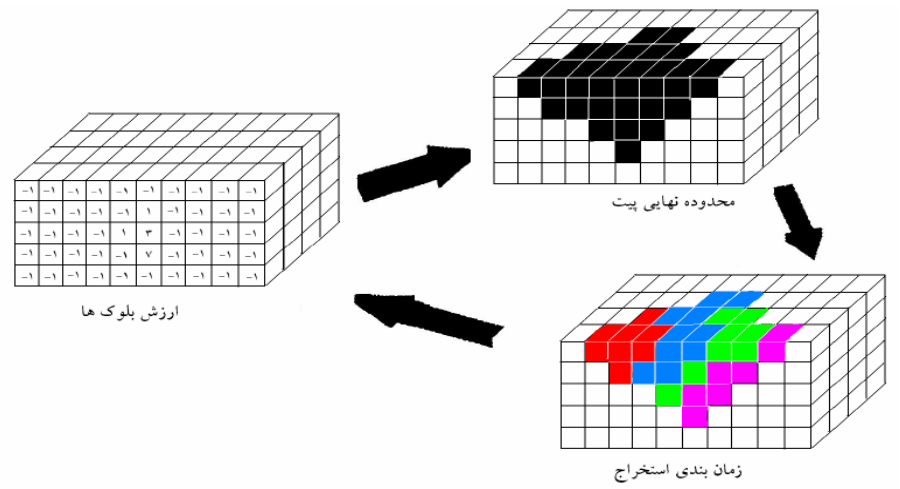
به منظور انجام محاسبات مورد نظر باید به هر بلوک یک ارزش اقتصادی نسبت داده شود. البته باید توجه داشت که ارزش نسبت داده شده بدون توجه به ترتیب استخراج هر بلوک بوده و تنها بستگی به موقعیت فضایی هر بلوک دارد. برخی از شگردهای بهینه‌سازی امروزی توانایی برپایی محدوده‌ای با بالاترین ارزش اقتصادی را دارند و برخی دیگر محدوده‌های نزدیک به بهینه (نیمه بهینه)[1] را مشخص می‌کنند. چنانچه ارزش اقتصادی بلوک‌ها اشتباه باشد طرح بهینه معدن هم نادرست خواهد بود. یکی از عوامل مؤثر در دقت تعیین ارزش اقتصادی بلوک‌ها تعیین دقیق عیار حد است و بدون آن‌امکان محاسبه دقیق ذخیره قابل استخراج وجود ندارد [۱].

نکتهٔ مهم دیگر در بحث تعیین محدودهٔ نهایی معدن این است که برای محاسبهٔ ارزش اقتصادی بلوک‌ها، مخصوصاً اگر ارزش زمانی پول اهمیت زیادی داشته باشد، مشخص شدن پیت بهینه ضروری است. اما از طرف دیگر برای مشخص شدن پیت بهینه، به داشتن ارزش اقتصادی بلوک‌ها نیاز است، لذا به دست آوردن پیت بهینه و یا تعیین محدودهٔ نهایی و بهینهٔ معدن یک آنالیز چرخشی است. شکل ۱-۱ مسئلهٔ چرخشی بهینه‌سازی محدودهٔ نهایی را نشان می‌دهد [۱].

به عبارت دیگر در بهینه‌سازی محدودهٔ معدن روباز یکسری پارامترها دخیل هستند که تحت تأثیر یکدیگر قرار می‌گیرند، یعنی بدون دانستن عیار حد، ذخیرهٔ نهایی معدن قابل محاسبه نیست، بدون دانستن ذخیرهٔ نهایی، حد نهایی معدن قابل محاسبه نیست، بدون دانستن حد و تناژ نهایی، برنامه‌ریزی تولید غیر ممکن است و بدون برنامه‌ریزی، شناخت ظرفیت مورد نیاز و هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های سرمایه‌ای، عیار حد و ذخیرهٔ نهایی قابل محاسبه نمی‌باشد.

---

[1]- Sub-optimal



شکل ۱-۱- چرخشی بودن بهینه‌سازی محدودهٔ معدن و برنامه‌ریزی تولید [۲]

به همین دلیل باید محدودهٔ پیت را بر اساس ماکزیمم کردن سود و در نظر گرفتن کلیهٔ محدودیت‌ها مثل مینیمم عرض کف پیت و شیب نهایی معدن به دست آورد. پس از آنکه محدودهٔ نهایی (اندازه و شکل ذخیرهٔ معدنی) بر اساس محدودیت‌های فنی، اقتصادی و فیزیکی مشخص شد، مجدداً با توجه به بیشینه کردن ارزش خالص فعلی، برنامه‌ریزی تولید مشخص می‌شود.

روش‌های بهینه‌سازی پیت را می‌توان به دو دستهٔ روش‌های با مبنای ریاضی (تئوری گراف، برنامه-ریزی خطی، برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی شبکه) و روش‌های ابتکاری (مانند روش‌های مخروط شناور که این الگوریتم‌ها در بعضی حالات قادر به تعیین جواب بهینه نهایی نیستند) تقسیم نمود.

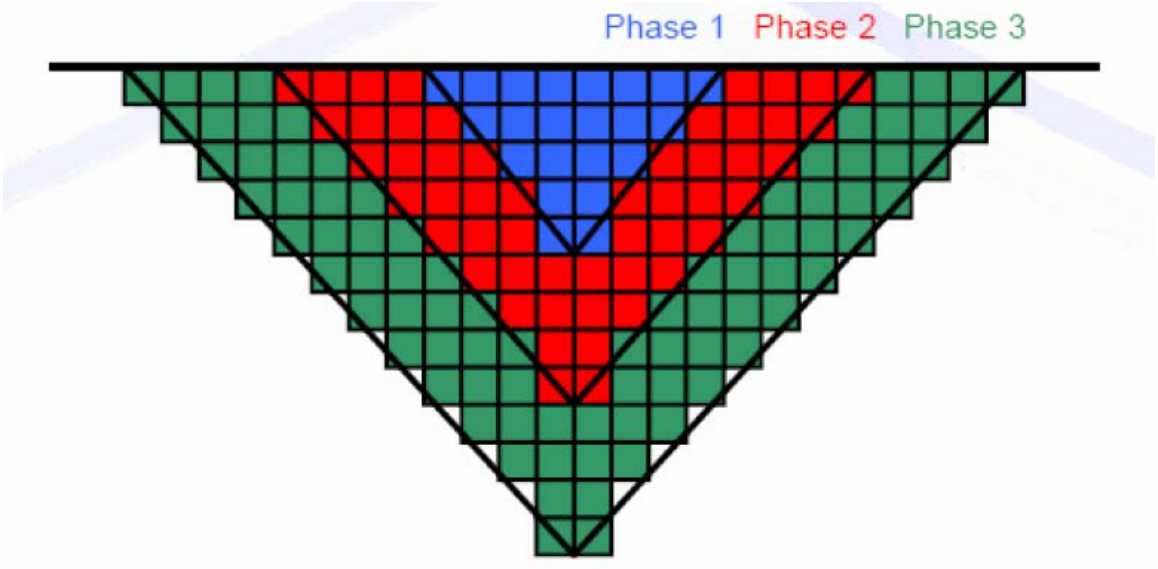
هر کدام از این روش‌ها به نوبهٔ خود دارای معایب و مزایایی هستند. ولی از بین این روش‌ها الگوریتم سه بعدی لرچ و گرسمن[۱] که بر اساس نظریهٔ گراف‌ها استوار است، در بین تمام بسته‌های نرم-افزاری به منظور تعیین محدودهٔ نهایی پیت قابل اطمینان شناخته شده است و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است.

محدودهٔ نهایی معدن حالت شناور دارد و با تغییر پارامترهای اقتصادی در طول زمان تغییر می‌کند. بر اساس پیشنهاد لرچ و گروسمن (۱۹٦۵) بهتر است چندین محدودهٔ نهایی بهینه تولید شده و از پرداختن به یک پیت اجتناب شود.

[۱]- Learch and Grossmann

به منظور استخراج، پیت محدودهٔ نهایی به یکسری پیت‌های لانه‌ای[1] (تو در تو) تقسیم می‌شود بگونه‌ای که اولین پیت بالاترین سود به ازای استخراج هر بلوک موجود در آن را دارد. بتدریج که استخراج تا پیت نهایی ادامه پیدا می‌کند از سود حاصل از استخراج هر بلوک در پیت‌های تولید شده کاسته می‌شود تا اینکه بلوک‌های موجود در بزرگترین پیت (پیت نهایی) کمترین سود حاصل از استخراج را دارند.

در الگوریتم‌های بهینه‌سازی، با استفاده از یک مدل بلوکی اقتصادی، پیت بهینه تولید می‌شود. در شکل ۱-۲ پیت‌های لانه‌ای نشان داده شده‌اند (هر پیت لانه‌ای یک فاز نامیده می‌شود). اولین پیت تولید شده کوچکترین پیت ممکن است که در اثر کمترین قیمت یا بیشترین هزینه تولید شده است. تمام بلوک‌های موجود در پیت لانه‌ای با ارزش هستند و ممکن است دارای ارزش مثبت، منفی و یا صفر باشند. با افزایش قیمت محصول یا کاهش هزینه‌ها، ارزش هر بلوک افزایش یافته یا بدون تغییر باقی می‌ماند. بنابراین تمام بلوک‌های محدودهٔ فاز یک همچنان با ارزش باقی می‌مانند [۳].



شکل ۱-۲- پیت‌های لانه‌ای [۳]

با اعمال مجدد الگوریتم بهینه‌سازی برای مدل بلوکی جدید، پیت ۲ تولید خواهد شد. تمام بلوک‌های محدودهٔ ۱ همچنان در پیت جدید نیز قرار خواهند گرفت، علاوه بر آن تعدادی بلوک باطله که در اطراف

[1]- Nested Pits

مرزهای پیت ۱ بودند، اکنون دارای ارزش مثبت شده و درون محدودهٔ جدید قرار می‌گیرند. همچنین بلوک‌های مثبت قبلی به دلیل افزایش ارزش قادر به تحمل باطله‌برداری بزرگتر شده و با برداشت بلوک-های باطلهٔ بیشتر، بلوک‌های کانسنگ بیشتری آزاد خواهد شد.

با تکرار عملیات بهینه‌سازی برای مدل‌های مختلف، طیف وسیعی از پوسته‌های پیت تولید می‌شود که حالت لانه‌ای داشته و هر کدام برای پارامترهای مالی مربوط بهینه خواهد بود. این پیت‌ها را می‌توان با تغییر سایر پارامترهای موثر در ارزش بلوک یا هندسهٔ پیت تولید کرد [٤].

در نرم‌افزار NPV Scheduler با تغییر منظم قیمت فروش محصول، هزینهٔ معدنکاری و یا ارزش خالص بلوک، طیف پوستهٔ لانه‌ای (که فاز LG نامیده می‌شود) به دست می‌آید.

کاربرد پوسته‌های لانه‌ای در این نرم‌افزار عبارت‌اند از:

- شناسایی محل مناسب باز کردن معدن (پوسته‌های کوچک اولیه)
- انتخاب پوش‌بک‌ها و تعیین استخراج بخش‌های مختلف پیت (پوسته‌های میانی)
- تحلیل حساسیت و انتخاب پیت بهینه (پوسته‌های نزدیک به پوستهٔ پایه)
- تحلیل امکان توسعهٔ پیت در آینده (پوسته‌های بزرگتر از پوستهٔ پایه)

در مطالعات بهینه‌سازی معادن حد نهایی معدن محدوده‌ای است که ارائه کنندهٔ بیشترین جریان نقدینگی[۱] باشد. بدیهی است که جریان نقدینگی صرفاً از تفاضل درآمدها و هزینه‌های عملیاتی حاصل می‌شود و ارزش زمانی پول در آن نقشی ندارد. به همین دلیل نمی‌توان چنین محدوده‌ای را به عنوان حد نهایی بهینهٔ استخراج انگاشت و برای این منظور باید با لحاظ کردن توالی استخراج[۲] معدن و ارزش زمانی پول حد نهایی بهینهٔ معدن را مشخص نمود. بدیهی است همواره حد بهینهٔ معدن از حد نهایی کوچکتر است.

اصول به کار گرفته شده برای تحلیل هر مرحله در همهٔ این روش‌های مذکور شبیه به هم می‌باشد. محدودهٔ پیت نهایی، پیشروی‌ها و عیارهای حد بر پایهٔ اولین تحلیل سربسری بدون هیچ ملاحظه‌ای به ارزش زمانی پول طراحی و تحلیل می‌شوند، اگر هدف سرمایه‌گذاری بیشینه کردن ارزش خالص فعلی

۱- Cash Flow

۲- Extraction Sequence

باشد، این واقعی نیست که معتقد باشیم برنامه‌ها و زمان‌بندی‌های به دست آمده بر اساس تحلیل سربسری، بالاترین ارزش خالص فعلی را برای پروژه خواهد داد.

برای حل این مشکل، جریان نقدینگی هر فاز (اختلاف پیت بعدی با قبلی) با لحاظ کردن ارزش فعلی محاسبه می‌شود و در گزارش نتایج آنها جهت مقایسه آورده می‌شود. کاربر با دید مهندسی فازهای استخراجی را مقایسه کرده و بهترین فاز را انتخاب می‌کند. به این معنا که فازهای بعدی دارای ارزش قابل توجه نبوده یا حتی دارای ارزش خالص فعلی منفی هستند. آخرین فاز که دارای ارزش خالص فعلی مثبت و مناسب و نسبت باطله‌برداری کمتر باشد، به عنوان پیت بهینه در نظر گرفته می‌شود.

۱-۱-۳- مفهوم معدنکاری توسعه‌ای و پوش‌بک‌ها

هدف اصلی در برنامه‌ریزی بلند مدت تهیهٔ نقشه‌های سالانه پیشروی برای کل عمر معدن است، اما از آنجا که تعداد بلوک‌های موجود در محدودهٔ نهایی خیلی زیاد است، نمی‌توان همهٔ آنها را با هم برای ارائهٔ یک برنامه‌ریزی سالانه مناسب در نظر گرفت. برای حل این مشکل بعد از طراحی محدودهٔ نهایی معدن، باید پوش‌بک‌ها[۱] (برش‌های پسرو) طراحی شوند. پوش‌بک‌ها عبارت‌اند از برش‌های حد واسطی که استخراج متوالی آنها منجر به استخراج پیت نهایی می‌شود [۵]. به عبارت دیگر طراحی و برنامه‌ریزی برای معادن روباز بر پایهٔ پوش‌بک‌ها انجام می‌شود (مانند پیت‌های گسترشی یا توسعه‌ای[۲]). پوش‌بک‌ها در واقع محدوده نهایی معدن را به شماری پیت کوچک‌تر تقسیم می‌کنند به گونه‌ای که کانسنگ موجود در نخستین پیت (مرکزی) بالاترین ارزش را به دست می‌دهد. پس از طراحی پوش‌بک‌ها و جایابی جاده باربری روی آنها پوش‌بک‌ها به عنوان راهنمایی برای برنامه‌ریزی تولید سالانه معدن به کار می‌روند. پوش‌بک یک فاز گسترش در معدن است که می‌تواند در عمل گسترش پیدا کند و پله پله معدنکاری شود. تعقیب ترتیب استخراج پوش‌بک‌ها، معدنکاری توسعه‌ای نامیده می‌شود [۷].

به طور تئوری هر پوش‌بک باید به طور مستقل قابل معدنکاری بوده و در روند استخراج آن نیازی به دست‌کاری پوش‌بک‌های مجاور نباشد. طراحی این پوش‌بک‌ها اغلب به گونه‌ای است که مقدار ارزش خالص فعلی بیشینه شده و تعدادی نیاز فنی و اقتصادی تامین گردد.

در طراحی بلند مدت معدن روباز بعد از تعیین محدودهٔ نهایی، توالی استخراج یا پیشروی‌ها تعیین می‌شود تا به عنوان راهنمایی طی فرایند زمان‌بندی استخراج استفاده شوند. توالی پیشروی‌های (پوش‌بک-

---

[۱]- Push backs (Cut backs , Stages or Phases)

[۲]- Incremental Pits

های) ایجاد شده طی فرایند برنامه‌ریزی برای تعیین برنامهٔ استخراج سالانهٔ کانسنگ و تولید باطله استفاده می‌گردد. همینطور طراحی ترتیب پیشروی‌ها نقش کلیدی در تعیین جریان‌های نقدینگی دوره‌های تولید دارند. تعداد زیادی ترتیب پوش‌بک‌های گوناگون قابل جایگزین ممکن است وجود داشته باشند که به سمت محدودهٔ نهایی پیت گسترش پیدا می‌کنند. هر ترکیب و ترتیب پوش‌بک‌ها یک سلسله جریان‌های نقدینگی مختلف ایجاد می‌کند که در نهایت موجب ایجاد یک ارزش خالص فعلی برای پروژه می‌گردد.

ترتیب استخراج با روش‌های مختلفی به دست می‌آید که ماتیسون[۱] (۱۹۸۲) روش نسبت سود میانگین (APR)[۲] را بکار برده است. بدین صورت که با مرور عیار مقاطع، توزیع عیار کانسنگ، میانگین وضعیت توپوگرافی و نسبت سود میانگین سیاست کلی گسترش منطقی پیت حاصل می‌شود [۲].

یکی از پر استفاده‌ترین الگوریتم‌ها در طراحی پیشروی‌ها نرم‌افزار چهار بعدی ویتل[۳] (ویتل ۱۹۸۸) است. ویتل تعداد متغیرهای اقتصادی موثر بر ارزش بلوک‌های کانه و فضای پیت را به یک فاکتور کلی – هزینه فلزی معدنکاری[۴] و یک فاکتور جزئی – نسبت هزینه[۵] در مدل چهار بعدی‌اش کاهش داد [۸].

جهت طراحی پیشروی‌ها به صورت فوق از یک پارامتر اقتصادی (معمولاً قیمت فلز) برای یافتن سری پیت‌هایی که بالاترین ارزش تنزیل نیافته[۶] را برای اندازه پیت در نظر گرفته شده دارند، استفاده می‌شود.

دو راهبرد برای معدنکاری حجم معین مواد در یک سال وجود دارد:

اولین راهبرد ممکن است استخراج مواد به صورتی باشد که کانسنگ با بالاترین عیار طی زمان‌بندی معدنکاری شود.

دومین راهبرد ممکن است به گونه‌ای باشد که موادی که عیار مناسب دارند و به حداقل مقدار باطله‌برداری نیاز دارند، طی زمان‌بندی تعیین شده معدنکاری شوند، راهبرد دوم باعث ایجاد جریان‌های نقدی مثبت بالاتر طی زمان‌بندی می‌شود [۹].

۱- Mathieson

۲- Average Profit Ratio

۳- Whittle Four-X

۴- Mining Cost of Metal

۵- Cost Ratio

۶- Undiscounted