مقایسه بهینه‌سازی پیشروی‌ها بر اساس کمینه‌کردن نسبت باطله به ماده معدنی ($\frac{w}{o}$) و بیشینه‌کردن NPV

نجات فلاح[۱]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن, دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Email: nejat_fallah@hotmail.com

چکیده

به منظور استخراج پیت, محدوده نهایی به یکسری پیت‌های لانه‌ای (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.

این روش در همه شرایط ممکن است کارآیی لازم را نداشته باشد زیرا طراحی با ارزش‌ترین پیت‌ها الزاما باطله‌برداری مورد نیاز جهت رسیدن به بلوک‌هایی با بهترین عیار را موجب نمی‌شوند. بعبارتی دیگر روش ویتل[۲] بهینه‌بودن پیشروی‌ها را در صورتیکه به باطله‌برداری اولیه نیاز باشد، تضمین نمی‌کند. داگدلن[۳] و رمضان[۴] بیان داشته‌اند که ممکن است بهترین بلوک کانه, بلوکی باشد که علاوه بر داشتن عیار بالا به حداقل باطله‌برداری نیز نیاز داشته باشد.

در مقاطع کم‌عیار و نیازمند باطله‌برداری, NPV حاصل از عملیات معدنکاری به روش کمینه‌کردن نسبتw/o بیشتر از روش ویتل است اما در مقاطع پرعیار و بدون باطله‌برداری روش ویتل NPV بالاتری خواهد داد. به منظور بدست آوردنNPV بیشینه, پیشروی‌هایی با نسبت باطله‌برداری کمینه باید همراه با پیشروی‌های طراحی شده قبلی جهت گسترش زمانبندی‌ها استفاده شوند.

واژه‌های کلیدی : معدن روباز، برنامه‌ریزی تولید، سکانس استخراج، فاز، پیشروی

Keywords: open pit mine, production planning, extraction sequence, phase,push back

---

[۱]- کرج, میدان آزادگان, شهرک اوج, کوچه بوعلی دهم, قطعه ۱۱۱۷, طبقه دوم, کد پستی ۳۱۴۹۸-۸۸۵۹۳

2-Whittle, Jeff, B.Sc., M.A.C.S., Manager of Whittle Consulting Ltd, Australia.

3-Dagdelen, Kadri, Ph.D, Mining Engineering Department, Clorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.

4- Ramazan, Salih, Ph.D,University of Queensland, Australia.

مقدمه

در طراحی بلندمدت معدن روباز بعد از تعین محدوده نهایی، سکانس استخراج(Extraction Sequence) یا پیشروی‌ها(push back) ایجاد می‌شوند تا بعنوان راهنمائی طی فرآیند زمانبندی استفاده شوند. سکانس پیشروی‌های ایجادشده طی فرآیند برنامه‌ریزی برای تعیین برنامه استخراج سالانه کانه و تولید باطله استفاده می‌گردند. همینطور طراحی سکانس پیشروی‌ها نقش کلیدی در تعین جریانهای نقدی دوره‌ای تولید شده ازمعدن روباز دارند. تعداد زیادی سکانس پیشروی گوناگون قابل جایگزین با هم ممکن است وجود داشته باشند که به سمت محدوده نهایی پیت گسترش پیدا می‌کنند. هر سکانس پیشروی‌ها یک سلسله جریان نقدی دوره‌ای متفاوتی را نتیجه می‌دهد که برای یک پروژه ارزش‌های خالص فعلی (NPV) مختلف حاصل می‌گردد.

ترتیب استخراج با روش‌های مختلفی بدست می‌آید که ماتیسون(Mathieson, 1982) روش نسبت سود میانگین (Average Profit Ratio) را بکار برده بدین صورت که با مرور عیار مقاطع, توزیع عیار کانسنگ, وضعیت توپوگرافی و APR سیاست کلی گسترش منطقی پیت حاصل می‌شود.

به طور سنتی یک سری پیت‌ها با استفاده از الگوریتم محدوده نهایی بکار گرفته شده در مدل بلوکی اقتصادی، ایجاد می‌شوند. در این روش یک سری پیت با اندازه‌های مختلف توسط تولید یک مدل اقتصادی با قیمتهای متفاوت محصول، عیارحد و هزینه‌های استخراج و فرآوری بدست می‌آیند(Dagdelen&Francois-Bongarcon, 1982).

یکی از پراستفاده‌ترین الگوریتم‌ها در طراحی پیشروی‌ها, نرم‌افزار چهاربعدی ویتل (Whittle, 1988) است. ویتل تعداد متغیرهای اقتصادی موثر بر ارزش بلوک‌های کانه و فضای پیت را به یک فاکتور کلی - هزینه فلزی معدنکاری (Mining Cost of Metal)- و یک فاکتور جزئی - نسبت هزینه (Cost Ratio) - در مدل چهار بعدی‌اش کاهش داد.

جهت طراحی پیشروی‌ها به صورت فوق از یک پارامتر اقتصادی(معمولا قیمت فلز) برای یافتن سری پیت-هایی که بالاترین ارزش تنزیل‌نیافته (Undiscounted) را برای اندازه پیت در نظر گرفته شده دارند, استفاده می‌شود.

واضح است که اگر بلوکهای کانه طی سالهای اولیه بتواند معدنکاری شود, NPV بیشتری بدست خواهد آمد. فرض کنید حجم معینی مواد جهت معدنکاری در یک سال وجود دارد. دو راهبرد (Strategy) جایگزین ممکن است دنبال شود:

اولین راهبرد ممکن است استخراج مواد بصورتی باشد که کانه با بالاترین عیار طی زمانبندی معدنکاری شود.

دومین راهبرد ممکن است بگونه‌ای باشد که موادی که عیار مناسب دارند و به حداقل مقدار باطله‌برداری نیاز

دارند، طی زمانبندی تعیین شده معدنکاری شوند. راهبرد دوم نائل به ایجاد جریان‌های نقدی مثبت بالاتر طی زمانبندی می‌شود (Dagdelen&Ramazan, 1998).

الگوریتم کمینه‌کردن نسبت باطله به ماده معدنی, پیشروی‌هایی را که هر کدام از آنها حداقل باطله‌برداری را از میان پیشروی‌های ممکن هم‌اندازه دارند، پیدا می‌کند. این الگوریتم توسط رمضان گسترش داده شده است. این روش زودتر از هر روش دیگری به بلوک‌های کانه می‌رسد.

سکانس استخراج

در برنامه‌ریزی رایج معدن زمانی که شکل نهایی معدن طراحی شد, مرحله بعدی این است که چگونه معدن باید گسترش داده شود تا یک ترتیب استخراج یا زمانبندی تولید مناسب ایجاد شود.

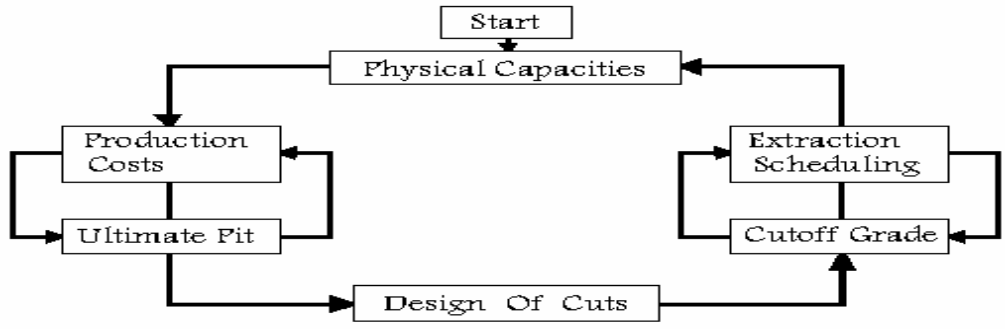
روش فعلی برنامه‌ریزی معدن روباز سنگ سخت با مدل بلوکی زمین‌شناسی شروع می‌شود و مستلزم تعیین موارد ۱) آیا یک بلوک معین در مدل باید معدنکاری بشود یا نه ؟ ؛ ۲) اگر باید معدنکاری بشود، چه زمانی باید معدنکاری شود؟؛ ۳) زمانی که معدنکاری شد چگونه باید فرآوری شود ؟ است. جواب‌دادن به هر یک از این سؤال‌ها هنگامی که با مدل بلوکی کلی ترکیب می‌شود، برنامه سالانه سطحی پیت و جریان‌های نقدی که به صورت سالانه از عملیات معدنکاری طی عمر معدن بدست خواهند آمد را تعریف می‌کند[۱].

بسته به اینکه چگونه برای هر بلوک تصمیم گرفته شود، تعداد زیادی راه‌حل‌های مختلف برای مساله زمانبندی می‌تواند وجود داشته باشد. تصمیم - یعنی که کدام بلوک‌ها باید در سال معین معدنکاری شوند و چگونه باید فرآوری شوند (یعنی باطله، اجرای فروشویی معدن (Run of Mine Leach)، فروشویی کانه شکسته(Crushed Ore Leach) یا فرآوری کانه (Mill Ore) و ...) - نه فقط جریان‌های نقدی را برای آن سال تعریف می‌کند بلکه همچنین زمانبندی‌های سالهای آینده را متاثر می‌کند. تصمیمی که امروز گرفته می‌شود به کاری که می‌تواند در آینده انجام شود, اشاره بلندمدت دارد و همه این تصمیم‌ها در تعریف اقتصاد کلی یک پروژه معین به یکدیگر پیوست می‌شود.

هدف فرآیند برنامه‌ریزی معدن روباز, معمولا پیداکردن زمانبندی‌های سالانه بهینه‌ای است که بالاترین NPV را در حالی که به تولید گوناگون، مخلوط‌کردن، ترتیب‌بندی (Sequencing) و محدودیت‌های شیب پیت می‌رسد, خواهند داد.

به طور سنتی، مساله زمانبندی توصیف‌شده بالا با تقسیم‌کردن مشکل به زیر مشکل‌هایی مشابه آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است, حل می‌شود. مرحله حل با فرض ظرفیت‌های تولید اولیه در سیستم معدنکاری شروع می‌شود و هزینه‌های مربوط و قیمت‌های محصول تخمین زده می‌شود. وقتی که پارامترهای اقتصادی شناخته شدند، تحلیل محدوده پیت نهایی معدن برای تعیین اینکه کدام قسمت کانسار می‌تواند به طور اقتصادی معدنکاری شود, انجام می‌شود. در محدوده پیت نهایی، پیشروی‌ها پیشاپیش طراحی می‌شوند

بگونه‌ای که کانسار به پیت‌های لانه‌ای از کوچکترین پیت با بالاترین ارزش در هر تن کانه تا بزرگترین پیت با کمترین ارزش در هر تن کانه، تقسیم می‌شود. این پیشروی‌ها با اقدام جاده باربری طراحی می‌شوند و به عنوان راهنمایی طی زمانبندی تولید سالانه از پله های مختلف عمل می‌کنند. راهبرد عیارحد به عنوان متمایزکننده کانه از باطله تعریف می‌شود و پیشاپیش تعیین می‌کند چگونه بلوک‌های جداگانه باید فرآوری شوند. این مراحل در یک چرخه دایره‌وار تکرار می‌شوند همانگونه که بهبودهای(Improvement) پیش‌رونده با رجوع به کفایت ظرفیت‌های تولید و هزینه‌های تخمین زده‌شده ساخته می‌شوند[۱].



شکل ۱- مراحل برنامه‌ریزی سنتی با تحلیل چرخه‌ای [۱]

کوچکترین پیت با کمترین قیمت محصول ایجاد می‌شود و این بدین خاطر است که بلوک‌های واقع در این پیت عیار نسبتا بالایی (نه الزاما بالاترین) دارند و به باطله‌برداری کمتری احتیاج دارند و لذا در مجموع بلوک-های واقع در این پیت بالاترین ارزش میانگین را دارند. از آنجایی که کوچکترین پیت بالاترین ارزش میانگین به ازای همه بلوک‌های کانه و باطله را شامل می‌شود، تولید با معدنکاری کوچکترین پیت به سمت تولید در پیت‌های بزرگتر زمانبندی می‌شود. معدنکاری افزایشی از کوچکترین پیت به سمت پیت‌های بزرگتر به عنوان معدنکاری پیشروی شناخته شده است و مواردی وجود دارد که تولید در بیشتر از یک پیشروی به طور همزمان، زمانبندی می‌شود. وقتی که پیت‌های لانه‌ای تولید شدند، جاده‌های باربری صاف‌شده (Smooth) اضافه می‌شوند و آنها به عنوان برنامه‌های کاربردی پیشروی‌ها که زمانبندی‌های سالانه را ایجاد می‌کنند، استفاده می‌شود[۱].

همانطور که قبلا گفته شد پیت‌های لانه‌ای, پیت با بیشترین سود به ازای قیمت‌های مختلف محصول هستند و لذا در ایجاد پیت‌های لانه‌ای ارزش زمانی پول(تنزیل ارزش پول در اثر گذشت زمان) لحاظ نمی‌شود. پیت‌های لانه‌ای با فرض ارزش تنزیل‌نیافته بلوک‌ها تولید می‌شوند. پیشروی‌هایی که NPV پروژه را بیشینه می‌کنند، می‌توانند به طور عمده از پیشروی‌های پیدا شده توسط استفاده از رویه‌های موجود متفاوت باشند.

برنیب (Bernabe, 2001) بیان کرده است که تولید پیت‌های لانه‌ای با پارامتری‌کردن یک فاکتور به تنهایی نظیر قیمت فلز یا هزینه‌های تولید یا عیارهای فلز, هنگامی که بیش از یک نوع فرآیند برای انواع کانه در کانسار نیاز می‌باشد، به سمت نتایج «زیر بهینه» هدایت خواهد شد[۱].

زمانبندی‌های سالانه بلندمدت (Long term yearly schedule)

وقتی که پیشروی‌ها تولید شدند و جاده‌های باربری و حداقل عرض مورد نیاز طراحی شدند، سپس مرحله بعدی طرح‌کردن نقشه‌های پیشرفت سالانه درون پیشروی‌ها با تقسیم پیشروی‌های پیشین به افزایش‌های کوچکتر است. نقشه‌های پیشرفت سالانه معمولا با دادن نیازهای تناژ کانه و باطله سالانه برای انواع مواد مختلف به طراح، تولید می‌شوند. تمایز کانه و باطله معمولا بر اساس عیارهای حد سربسری انجام می‌شود. در ساده‌ترین مورد، زمانبندی‌های سالانه با معدنکاری از پله بالایی کوچکترین پیشروی به سمت پله پایینی همان پیشروی شروع می‌شود. وقتی که پیشروی مذکور تهی شد، سپس معدنکاری از پله بالایی پیشروی بعدی شروع می‌شود و ادامه پیدا می‌کند تا آن نیز تهی شود[۱].

در خیلی از موارد، این روش بهترین زمانبندی سالانه که NPV جریان‌های نقدی را بیشینه می‌کند را نتیجه نمی‌دهد. برای برطرف‌کردن آن، جدیدترین زمانبندی‌کننده‌ها در بسته‌های نرم‌افزاری برنامه‌ریزی معدن طوری طراحی شده‌اند تا با چندین پیشروی به طور همزمان کار کنند و فعالیت معدنکاری می‌تواند در ۳ یا ۴ پیشروی به صورت همزمان، زمانبندی شود.

مفهوم بکار گرفته شده در تعیین زمانبندی سالانه در همه بسته‌های نرم‌افزاری زمانبندی تجاری قابل دسترس، این فرض است که پیشروی‌های طراحی‌شده قبلی فرآیند زمانبندی را به نتایجی در توزیع جریان-های نقدی که بالاترین NPV را خواهند داد, راهنمایی خواهند کرد. البته این مورد برای خیلی از معادن روباز صادق نیست ، مخصوصا برای معادنی که نسبت باطله برداری به طور عمده از یک ناحیه به ناحیه دیگر تغییر می‌کند, همینطور برای معادن روبازی که احتیاج به مخلوط کردن انواع مواد مختلف دارند[۱].

ویژگی‌های پیشروی

یک پیشروی باید نیازهای دسترسی را برآورده کند که معنی‌اش این است که مرزهای یک پیشروی معین و قبلی‌اش باید توسط یک فاصله ویژه - عرض معدنکاری (Mining width) - جدا شود مگر این مرزها با محدوده پیت بهینه قطع شوند. یک پیشروی باید همچنین حداقل اندازه مورد نیاز (Minimum Size Requirment) را رضایت‌بخش کند طوری که اندازه پیشروی بر حسب ویژگیهای بلوکی کاربر اندازه‌گیری

می‌شود، برای مثال: تناژ کانسنگ. هر دو عرض معدنکاری و حداقل اندازه پیشروی پارامترهای تعریف‌شده توسط کاربر هستند[۲].

بهینه‌سازی پیشروی

روشهای فوق طبق اصول و تعاریف ذکر شده, تحلیلهای محدوده پیت نهایی و طراحی پیشروی‌ها را انجام می‌دهند و طرح و زمانبندی‌های سالانه معدن را تعیین می‌کنند. این روشها به طور منظم توسط مهندسین معدنکاری در تولید برنامه‌ریزی‌ها و زمانبندی‌هایی که ممکن هستند، استفاده می‌شوند بدون سؤال که آیا این بهترین کاری است که می‌توان در بدست‌آوردن بالاترین بازگشت ممکن روی سرمایه سرمایه‌گذاری شده، انجام داد[۱].

اصل بکار گرفته شده برای تحلیل هر مرحله در همه این روشهای مذکور شبیه به هم می‌باشد. محدوده پیت نهایی، پیشروی‌ها و عیارهای حد بر پایه اولین تحلیل سربسری بدون هیچ ملاحظه‌ای به ارزش زمانی پول طراحی وتحلیل می‌شوند. پیامدهای جدی با این روش دنبال‌شده عمومی وجود دارد، اگر هدف این اقدام مهم (سرمایه گذاری) بیشینه‌کردن NPV پروژه معین می‌باشد. این واقعی نیست که معتقد باشیم برنامه‌ها و زمانبندی‌های به دست آمده بر اساس تحلیل سربسری، بالاترین NPV ممکن را برای پروژه معین, خواهد داد.

در اینجا بحث خواهد شد که چرا روش‌های مطمئن برنامه‌ریزی معدن، استخراج زیربهینه منابع را نتیجه می‌دهد زمانی که NPV به عنوان معیار ارزیابی استفاده شده است و حدس‌ها و راه‌حل‌های جایگزینی برای غلبه بر پیامدهای برنامه‌ریزی روباز جاری و روش‌های زمانبندی و تمرین‌ها، ارائه می‌شود[۱].

تصمیمی که چه قسمتی باید درون محدوده پیت نهایی معدنکاری شود، وابسته به زمان است و راه‌حل صحیح احتیاج است تا به مسوول دانشی بدهد که چه زمانی باید بلوک معین معدنکاری بشود و چه مدت زمانی نیاز به باطله‌برداری دارد. در تحلیلهای محدوده پیت که NPV را بیشینه می‌کنند، نیاز است که ارزش زمانی پول به مسوول داده شود و اینکه کدام بلوک‌ها باید استخراج شوند و کدام بلوک‌ها باید طی عمر پروژه استخراج نشده باقی بمانند. محدوده پیت که سودهای تنزیل‌نیافته را برای پروژه معین بیشینه کند، NPV پروژه را بیشینه نخواهد کرد.

برای غلبه بر این موضوع، حدس زده می‌شود که باید در ابتدا طراحی پیت کامل اولیه و زمانبندی سالانه انجام شود. سپس مدل بلوکی اقتصادی جدید باید با استفاده از درآمدها و هزینه‌های وابسته به زمان، ساخته شود با دانستن اینکه چه زمانی بلوک معین معدنکاری خواهد شد و چگونه آن فرآوری خواهد شد. با استفاده از این مدل بلوکی اقتصادی جدید، محدوده پیت نهایی دوباره باید تعیین شود تا تاثیر ارزش زمانی پول را روی محدوده پیت نهایی منعکس کند. این تجربه شده است که این پیت جدید همیشه در دوره‌هایی که

شامل تناژ کانه و باطله است کوچکتر از قبلی‌اش است و برای جریان‌های نقدی تولید شده از آن, NPV بالاتر را می‌دهد. این امر بعلت حقیقتی است که تاثیر تنزیل روی محاسبه ارزش اقتصادی بلوک, متمایل به کاهش ارزش بلوک کانه‌ای که در سال‌های بعد استخراج می‌شود, است در حالیکه هزینه‌های باطله‌برداری برای رسیدن به این بلوک‌ها، زودتر صرف شده است. متناظرا، بلوک‌های کانه‌ای که از لحاظ ارزش خیلی حاشیه‌ای (لب مرز) هستند از پیت نهایی بیرون می‌افتند[۱].

تولید پیشروی توسط پیت‌های لانه‌ای

امروزه در طراحی معادن روباز به منظور برنامه‌ریزی تولید از روش معدنکاری پیشروی استفاده می‌شود. الگوریتم‌های متعددی در این رابطه ارائه شده است. یکی از متداولترین الگوریتم‌های تولید پیشروی, استفاده از پیت‌های لانه‌ای با تنوع‌دادن به قیمت محصول، هزینه‌ها و یا عیارحد به طور تدریجی از ارزش کم به زیاد است. ویتل تعداد متغیرهای اقتصادی موثر بر ارزش بلوک‌های کانه و فضای پیت را به یک فاکتور کلی و یک فاکتور جزئی در مدل چهاربعدی‌اش کاهش داد. دو متغیر جدید با تقسیم معادله ارزش بلوک‌ها بر C_m بدست می‌آید[۳]:

$$=G * R*(P/ C_m) - (C_P / C_m) \qquad (۱)$$

V/ C_m

P/C_m (هزینه فلزی معدنکاری) مقدار محصولی است که باید برای پرداخت هزینه معدنکاری یک تن مواد (باطله) فروخته شود. این متغیر فقط اصلی است زیرا C_P/C_m (نسبت هزینه) عمدتا زیاد تغیر نمی‌کند مگر تغیر عمده در یکی از اجزاء هزینه وجود داشته شود یا روش فرآوری یا معدنکاری جدید معرفی شود (ویتل, ۱۹۸۸). یک مجموعه از پیت‌های لانه‌ای با شروع هزینه فلزی معدنکاری از صفر و با افزایش‌های ۰/۰۱ (بسته به دقت مورد نظر) تا زمانی که کوچکترین پوسته پیت تولیدشده به دست آید, ایجاد خواهد شد. با هزینه فلزی معدنکاری معادل صفر, قیمت محصول نامعین بوده و منجر به استخراج تمام کانه موجود (واقع در پیت نهایی) می‌گردد[۴].

البته در اینجا هزینه فلزی معدنکاری عکس هزینه فلزی معدنکاری ویتل در نظر گرفته‌شده است که در نتیجه محاسبات تاثیری ندارد فقط C_m/P طبق نظر ویتل حساستر است. معادله ۱ می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$G*R*\lambda- \qquad (۲)$$

$\theta = V'$ که V': ارزش تولید شده در هزینه واحد معدنکاری, θ= CRATIO -1 , λ= MCOSTM .

با استفاده از روش لرچ-گروسمن (LG) پیت‌های لانه‌ای برای مقادیر مختلف تولید می‌شوند (لرچ-گروسمن, ۱۹۶۵) بدینصورت که بعد از تولید کوچکترین پوسته پیت با افزایش‌های منظم می‌توان پوسته‌های پیت را بدست آورد. برای هر مقدار λ ممکن، پیشروی‌ها برای θ ٪۲۰ ± مورد انتظار تولید می‌شوند[۳].

این رویه می‌تواند تعدادی پیت به ترتیب افزایش در اندازه و کاهش میانگین ارزش در تن کانه پیت درون پیت نهایی ایجاد کند. بعبارتی کوچکترین پیت با کمترین قیمت بدست می‌آید و بالاترین ارزش میانگین برای هر تن پیت را دارد و بزرگترین پیت بیشترین قیمت و کمترین ارزش میانگین برای هر تن پیت را دارد و منطبق بر پیت نهایی است. ارزش متوسط پیشروی‌ها به طور باقاعده کاهش می‌یابند اما نسبت باطله-برداری‌شان تصادفی است. ترتیب استخراج بگونه‌ای است که عملیات از طرف کوچکترین پیت به سمت پیت نهایی ادامه پیدا می کند[۱].

این روش توسط ویتل(ویتل, ۱۹۸۸) ارائه شد و بعنوان روش پذیرفته‌شده برای اکثر مهندسین معدنکاری است. بعد از تعیین پوسته‌های پیت به ازای قیمت‌های مختلف پیشروی‌ها می‌توانند ایجاد شوند.

تولید پیشروی

در برنامه FXAN نرم افزار FOUR-X می‌توان با ویژه ساختن پیشروی‌ها یک زمانبندی تولید کرد. تعداد پله‌های هر پیشروی به تعریف بعدی تاخیر(Lag) منتهی می‌شود. این موضوع به ویژه زمانی که اختلاف زیادی بین زمانبندی بهترین و بدترین مورد وجود دارد, مهم است.

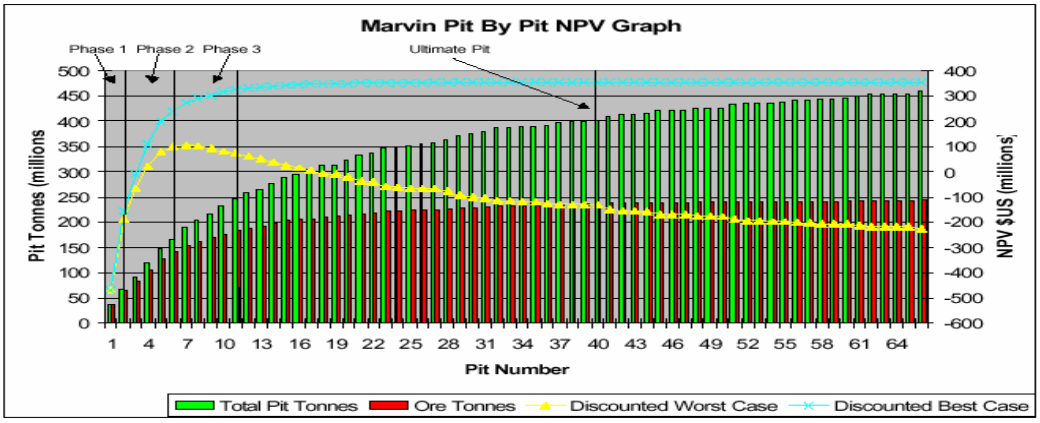
Specified_schedules	2 6 11 40	پیشروی
Lag	4	

منطق انتخاب پیشروی‌ها برای هر مورد خاص متفاوت است. در این مورد پیشروی‌ها با معیار ۲۰۰ میلیون تن کانه به نسبت مساوی تعیین شده‌اند[۵].

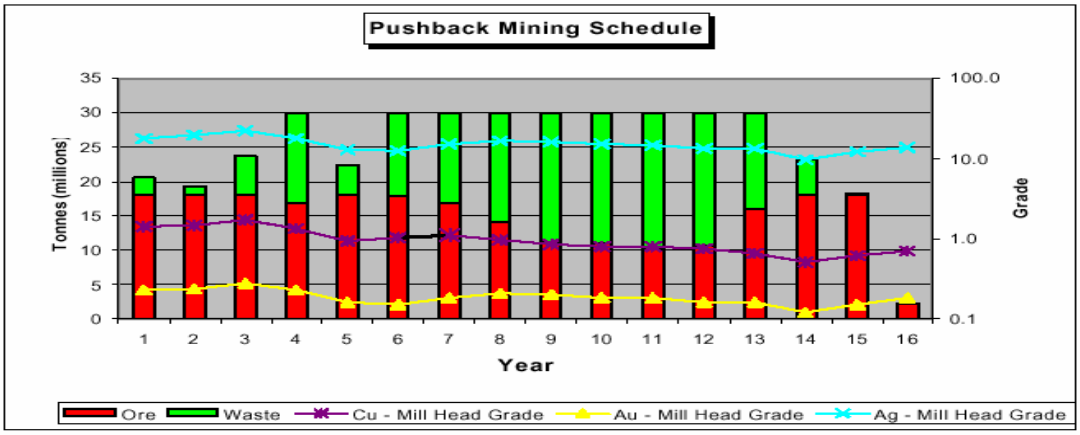
در عمل, یک نمودار NPV در مقابل محتویات پیت و تناژ کانه در تعیین مکانی که پیشروی‌های منطقی پوسته‌های پیت وجود دارند, مفید است(شکل۲). با انتخاب مرز فازها به گونه‌ایکه تناژ کانه مربوط به پوسته پیت بعدی بیشینه گردد, NPV به سمت حداکثر میل می‌کند(هانسون, ۱۹۹۷).

در این مثال, پوسته‌های پیت ۲, ۶, ۱۱ و ۴۰ کانسار را به پیشروی‌هایی با کانه تقریبا یکسان تقسیم می‌کنند. نتیجه تنظیم خوراک کارخانه در شکل ۳ نشان داده شده است.

پیشروی‌ها بر اساس زمانبندی معدنکاری نمایش داده شده در شکل ۳ نشان می‌دهند که کارخانه در مراحل اولیه و نهایی عمر معدن در/یا نزدیک به ظرفیت‌اش کار می‌کند. عیارهای میانگین خوراک کارخانه در طول عمر معدن کاهش پیدا می‌کند. گرچه زمانبندی در میانه عمر معدن با ظرفیت معدنکاری محدود شده است.



شکل ۲- منحنی NPV پیت به پیت[۵]



شکل ۳- زمانبندی معدنکاری پیشروی[۵]

خلاصه جریان نقدی کل و NPV زمانبندی پیشروی‌های مذکور در جدول ۱ آورده شده است. با مقایسه نرخ بازگشت داخلی (Internal Rate of Return) سناریو پیشروی بهترین و بدترین مورد, بهبود عمده نسبت به

بدترین زمانبندی دیده می‌شود اما بهترین زمانبندی هنوز می‌تواند بازگشت سرمایه بیشتری را تولید می‌کند و با تلاش اضافی در برنامه‌ریزی معدن می‌توان به سودهای بیشتر رسید[۵].

جدول ۱- زمانبندی پیشروی با معدنکاری به ترتیب پیت‌های ۲, ۶, ۱۱ و ۴۰ [۵]

Totals Rock		399597286	0.70	-319677829	-104447528
MILL	PRIM	210556800		-631670400	-199365934
CU	203621904		0.97	3230868665	1226963797
AU	38812824		0.18	187271876	65493619
AG	3122644824		14.83	351297543	122405935
MILL	TRAN	6136000		-19635200	-13704638
CU	4068480		0.66	60968209	44419461
AU	1859312		0.30	8074062	5947796
AG	194667616		31.73	14600071	10731929
MILL	OX	18432000		-55296000	-44717240
CU	8402880		0.46	103699940	84828029
AU	5650368		0.31	16357816	13471054
AG	253199040		13.74	22787915	18803452
Rejected		14923200			
CU	1739080		0.12		
AU	536296		0.04		
AG	56198176		3.77		
Total capital expenditure				1000000000	1000000000
Internal rate of return %		23.50			
Total number of periods		15.13		1969646668	230829729

روش کمینه‌کردن نسبت باطله به ماده معدنی

در طراحی معدن روباز، زمانبندی معمولا بر اساس پیشروی‌های تولیدشده است. چندین الگوریتم مختلف طراحی پیشروی در صنعت معدنکاری از سال ۱۹۶۰ گسترش یافته‌اند. اکثر الگوریتم‌های طراحی پیشروی از یک پارامتر اقتصادی (مثلا قیمت فلز) برای یافتن سری پیت‌هایی که بالاترین ارزش تنزیل‌نیافته را برای اندازه پیت در نظر گرفته شده دارند, استفاده می‌کنند.

گرچه باارزش‌ترین پیت‌ها ممکن است جایی که فاز کانه با بالاترین عیار(Highest grade ore) وجود دارد، نشان داده شوند، اما ممکن است همیشه جایی را که «بهترین کانه » بعدی ممکن برای زمانبندی که ارزش خالص فعلی (NPV) را بیشینه کند, مشخص نشود. «بهترین کانه » ممکن است به عنوان کانه‌ای که بالاترین عیار و کمترین مقدار باطله‌برداری را دارد، تعریف بشود. سری پیت‌هایی با ارزش تنزیل‌نیافته بیشینه که برای زمانبندی معدن روباز استفاده می‌شوند همیشه زمانبندی جریان‌های نقدی را نخواهند داد که NPV را ماکزیمم کند. این به این دلیل است که طراحی باارزش‌ترین پیت‌ها الزاما باطله‌برداری مورد نیاز جهت رسیدن به بلوک‌هایی با بالاترین عیار را موجب نمی‌شود. الگوریتم طراحی پیشروی جهت گسترش پیشروی‌هایی که نسبت باطله به ماده معدنی در آنها کمینه خواهد بود, توسط رمضان(Ramazan) بطور کامل ارائه و تشریح شده است. این الگوریتم، سری پیشروی‌ها را بر اساس معیار کمینه‌کردن نسبت باطله به ماده معدنی پیدا می‌کند. دلیل گسترش الگوریتم جدید بجای استفاده از روش رایج ویتل برای تولید پیشروی این

است که روش ویتل بهینه‌بودن پیشروی‌ها را در صورتیکه به باطله‌برداری اولیه نیاز باشد، تضمین نمی‌کند. واضح است که زمانبندی بدست آمده با این الگوریتم سریعتر از هر روش رایج دیگری به بلوک‌های کانه خواهد رسید. ارزش متوسط بلوک‌ها در پیشروی‌های تولید شده تصادفی می‌باشند. از آنجاییکه این روش نسبتا پیچیده است و روش ساده‌تری تقریبا مشابه روش ویتل با همان کارآیی (الگوریتم اصلاح شده ویتل) توسط رمضان ارائه شده است لذا این روش در این مقاله توضیح داده نمی‌شود و روش مذکور در ادامه توضیح داده خواهد شد(در مرجع شماره ۳ روش رمضان به طور کامل توضیح داده شده است).

پیشروی‌هایی با نسبت باطله به ماده معدنی کمینه ممکن است همراه با پیشروی‌های طراحی شده قبلی جهت گسترش زمانبندی‌هایی که ارزش خالص فعلی بالاتری را برای پروژه معدنکاری روباز معین نتیجه می‌دهند، استفاده گردند.

طراحی پیشروی با حداقل نسبت باطله به ماده معدنی با استفاده از الگوریتم اصلاح شده ویتل

پیشروی‌هایی با حداقل نسبت باطله به ماده معدنی می‌تواند همچنین با استفاده از روش ویتل بدست آیند. اگر ارزش عیار یکسان (برابر با عیار بیشینه در مدل بلوکی) به همه بلوک‌های کانه اختصاص داده شود, پیشروی‌های تولید شده با روش ویتل نتایج مشابه روش حداقل نسبت باطله به ماده معدنی خواهد داد[۳].

البته اگر بجای عیار بیشینه هر عیاری را مابین عیار بیشینه و کمینه و برابر با این دو عیار ($g_{\min.} \le g \le g_{\max.}$) بجای عیار بلوک‌های کانه قرار دهیم نتیجه با روش فوق یکسان خواهد بود با این فرق که پیشروی‌ها در λ های متفاوت بدست می‌آیند[۶].

طراحی پیشروی در مقاطع واقعی معدن مس سرچشمه

به منظور بکارگیری روش‌های مذکور و بررسی دقیق جزئیات دو روش مذکور و نقاط قوت و ضعف آنها و مقایسه‌شان, روی دو مقطع مس سرچشمه فازها (پیت نهایی به ازای مقادیر مختلف قیمت) و سپس پیشروی‌ها با هدف معین تعیین شده‌اند.

مقاطع به صورتی انتخاب شدند که در یک مقطع مقداری باطله نزدیک سطح وجود داشت و عیارهایش کم تا متوسط بودند و در مقطع دیگر عیارها بالا بودند و هیچگونه باطله‌ای نزدیک سطح وجود نداشت. همچنین در مقطع مذکور بلوک‌های کانه تا کف مقطع ادامه داشتند[۷].

برای محاسبه عیارحد و ارزش بلوک‌ها برای قیمت‌های مختلف از داده‌های زیر استفاده شد:

هزینه استخراج هر تن ماده معدنی	۸۶۰۰ ریال
هزینه فرآوری هر تن ماده معدنی	۱۱۸۰۰ ریال

هزینه ذوب هر تن کنسانتره	۲۱۱۸۰۰ ریال
هزینه پالایش و تولید محصول نهایی	۲۵۶۸۰۰ ریال
درصد بازیابی واحد تغلیظ	۹۸ درصد
درصد بازیابی واحد ذوب	۹۵ درصد
درصد بازیابی واحد تصفیه	۹۹ درصد
عیار کنسانتره مس	۳۲ درصد
عیار مس بلیستر	۹۹/۶ درصد
قیمت هر کیلوگرم مس	۹۷۰۰ ریال

روابط ۳ و ۴ بترتیب مربوط به درآمد و هزینه هستند[۷]:

$$\mathrm{Re}venue = 10 \times g \times R_{con.} \times R_{smelt} \times R_{refine} \times P \qquad (۳)$$

$$Cost = C_{\min e} + C_{mill} + \frac{R_{con.} \times g}{G_{con.}} \times \frac{R_{con.} \times R_{smelt} \times g}{G_{anode}} \times C_{refine} \qquad (۴)$$

با توجه به رابطه درآمد و هزینه و مساوی قراردادن این دو رابطه داریم :

Revenue = Cost $\longrightarrow$ g = 0.254

از آنجایی که تناژ بلوک‌ها یکسان فرض شده و برابر ۲۴۵۰۰ تن می‌باشد هزینه باطله‌برداری هر بلوک باطله یا ارزش اقتصادی آن ۲۱۰۳۵۹۰۰۰ ریال است.

WBEV= - 8585 * 24500 =-210359000 (۵)

OBEV =Revenue - Cost (۶)

ارزش اقتصادی بلوک‌ها در قیمت‌های مختلف نیز توسط رابطه هزینه قابل محاسبه است. بعلت اینکه عیارها در بازه داده شده بودند از عیار متوسط هر بازه استفاده شد. برای عیارهای بیش از ۱ نیز عیار ۱/۱۲۵ درصد در نظر گرفته شد.

برای محاسبه اولین (کوچکترین) پیت باید قیمتی را پیدا کرد که ارزش بلوک با بالاترین عیار برابر ۱ ریال شود. در این حالت همه بلوک‌های با عیار پایین‌تر باطله محسوب می‌شوند. با اجرای الگوریتم لرچ-گروسمن کوچکترین پیت به دست خواهد آمد. اگر پیتی تشکیل نشد باید مرتبا قیمت را افزایش داد تا اولین پیت

تشکیل گردد. برای ایجاد پیت دوم ویتل از تغییرات قیمت به اندازه معین استفاده می‌کند ولی در این حالت ممکن است چند پیت با هم تولید و نشان داده شوند.

قیمت‌ها باید آنقدر افزایش پیدا کند تا پیت حاصل به محدوده پیت نهایی برسد. این پیت‌ها کاملا بر اساس توزیع عیار کانسار به وجود می‌آیند و میزان کانه و باطله در آنها تصادفی است. در روش ویتل پیت‌ها از بالاترین ارزش میانگین بلوک‌ها به سمت کمترین مرتب می‌شوند ولی نسبت باطله به ماده معدنی‌شان متغیر است. در روش کمینه‌کردن نسبت w/o پیت‌ها از کمترین باطله‌برداری (که صفر است اگر کانه تا سطح زمین گسترش پیدا کرده باشد) به سمت باطله‌برداری بیشتر ایجاد می‌شوند.

برای ایجاد پیشروی با توجه به نیاز سالانه کارخانه به ۱۴ میلیون تن کانه, ماهانه ۱۱۶۶۶۶۷ تن کانه باید تولید گردد که تعداد بلوک‌های کانه مورد نیاز ۴۸ عدد خواهد شد[۸]. بعبارتی معیار مورد استفاده برای تولید پیشروی‌ها تولید ماهانه ۱۱۷۶۰۰۰ تن کانسنگ می‌باشد. پیشروی‌ها در هر روش با توجه به پوسته‌های تولید شده و ترتیب آنها در آن روش بدست آمدند. با نرخ بهره سالانه ۲۰٪ سود ماهانه طبق رابطه ۷ خواهد شد :

$$(1+i)^t = 1+ i_e \longrightarrow (1+i)^{12} = 1+ 0.20 \longrightarrow i = 1.531\ \% \qquad (۷)$$

جداول ۲ و ۳ بترتیب ارزش‌های ریالی تنزیل‌نیافته(Undiscounted Rial Value) و NPV حاصل از تولید پیشروی‌ها در مقاطع به هر دو روش را نشان می‌دهند.

همانطوریکه از جداول ۲ و ۳ پیداست روش کمینه‌کردن نسبت باطله به ماده معدنی در مقطع کم‌عیار و با مقداری باطله‌برداری (مقطع اول) ۴۰۹ میلیون ریال (۰/۲۶ درصد)NPV بیشتر در نرخ تنزیل۲۰٪ و ۰/۲ درصد بیشتر در نرخ تنزیل ۱۵٪ بدست آورده است. که این همان خصوصیت و ویژگی این روش است که توسط رمضان و داگدلن تحقیق شده است.

البته قابل ذکر است که NPV روش رمضان در مقطع دوم (پر عیار و بدون باطله‌برداری)نیز اختلاف زیادی با روش ویتل ندارد. در این مقطع NPV در نرخ تنزیل ۲۰٪ به میزان ۰/۰۳۸ درصد و در نرخ تنزیل ۱۵٪ فقط ۰/۰۲۸ درصد بیشتر از روش رمضان است.

جدول ۲- ارزشهای ریالی تنزیل‌یافته و ارزش خالص فعلی در مقطع اول(به میلیون ریال) [۶]

ماه	بیشینه کردن NPV		کمینه کردن W/O	
	URV	NPV	URV	NPV
۱	۲۴۲۲۸	۲۳۸۶۳	۱۴۰۲۱	۱۳۸۱۰
۲	۷۱۰۰	۶۸۸۸	۱۸۸۰۳	۱۸۲۴۰
۳\	۱۲۶۸۸	۱۲۱۲۲	۱۷۵۹۷	۱۷۱۵۷
۴	۲۱۳۲۶	۲۰۰۶۸	۲۵۳۴۷	۲۳۸۵۲
۵	۲۹۰۶۴	۲۶۹۳۸	۲۶۴۷۸	۲۴۵۴۱
۶	۲۴۳۰۸	۲۲۱۹۰	۱۹۸۹۳	۱۸۱۶۰
۷	۱۷۷۹۰	۱۵۹۹۵	۱۸۴۲۱	۱۶۵۶۲
۸	۱۱۹۰۳	۱۰۵۴۱	۱۱۹۰۳	۱۰۵۴۱
۹	۱۲۵۳۴	۱۰۹۳۲	۸۳۲۹	۷۲۶۴
۱۰	۶۲۲۳	۵۳۴۶	۶۰۱۲	۵۱۶۵
جمع	۱۶۷۱۶۴	۱۵۴۸۸۳	۱۶۶۸۰۴	۱۵۵۲۹۲

جدول ۳- ارزشهای ریالی تنزیل‌یافته و ارزش خالص فعلی در مقطع دوم(به میلیون ریال) [۶]

ماه	بیشینه کردن NPV		کمینه کردن W/O	
	URV	NPV	URV	NPV
۱	۸۲۲۶۸	۸۱۰۲۸	۸۲۲۶۸	۸۱۰۲۸
۲	۸۲۲۶۸	۷۹۸۰۶	۸۲۲۶۸	۷۹۸۰۶
۳	۸۲۲۶۸	۷۸۶۰۲	۸۲۲۶۸	۷۸۶۰۲
۴	۸۲۲۶۸	۷۷۴۱۷	۸۲۲۶۸	۷۷۴۱۷
۵	۸۲۲۶۸	۷۶۲۵۰	۸۲۲۶۸	۷۶۲۵۰
۶	۸۲۲۶۸	۷۵۱۰۰	۸۲۲۶۸	۷۵۱۰۰
۷	۷۹۳۱۶	۷۱۳۱۳	۷۸۸۲۴	۷۰۸۷۱
۸	۷۵۸۷۱	۶۷۱۸۸	۷۶۳۶۳	۶۷۶۲۴
۹	۷۶۵۸۷	۶۶۷۹۱	۷۴۸۸۷	۶۵۳۱۶
۱۰	۷۰۷۴۹	۶۰۷۷۷	۶۸۴۹۱	۵۸۸۵۶
۱۱	۷۰۳۹۲	۵۹۵۵۸	۵۶۶۸۲	۴۷۹۵۸
۱۲	۶۲۱۷۰	۵۱۸۰۸	۵۷۲۴۵	۴۷۷۰۴
۱۳	۵۹۹۲۰	۴۹۱۸۰	۶۸۵۶۲	۵۶۲۷۴
۱۴	۵۶۹۶۸	۴۶۰۵۲	۶۹۵۴۶	۵۶۲۲۱
۱۵	۵۵۰۰۰	۴۳۷۹۱	۵۹۰۰۳	۴۶۹۷۶
۱۶	۵۴۲۹۷	۴۲۵۸۰	۵۲۹۶۰	۴۱۵۳۱
۱۷	۵۴۱۵۴	۴۱۸۲۷	۴۶۷۰۶	۳۶۰۷۵
۱۸	۴۷۷۵۸	۳۶۳۳۰	۴۸۷۴۶	۳۷۰۸۲
۱۹	۴۴۳۱۸	۳۳۲۰۵	۵۵۴۲۰	۴۱۵۲۴
۲۰	۴۴۸۷۷	۳۳۱۱۸	۴۷۵۵۲	۳۵۰۹۱
۲۱	۳۹۸۲۲	۲۸۹۴۴	۴۰۳۱۴	۲۹۳۰۱
۲۲	۳۶۶۵۵	۲۶۲۴۰	۳۵۴۶۵	۲۵۳۸۸
۲۳	۳۹۸۸۵	۲۸۱۲۲	۳۴۴۸۵	۲۴۳۱۵
۲۴	۳۵۳۸۵	۲۴۵۷۳	۳۲۸۶۲	۲۲۸۲۱
جمع	۱۴۹۷۷۲۲	۱۲۷۹۶۰۰	۱۴۹۷۷۲۲	۱۲۷۹۱۱۳

نتیجه‌گیری

الگوریتم ارائه‌شده، پیشروی‌هایی را که پیشرفت پیت از نواحی با حداقل باطله‌برداری کانسار به سمت نـواحی با نسبت باطله‌برداری بالا را نشان می‌دهند، ایجاد خواهد کرد.

طی تمرین زمانبندی تولید، فقط دانستن اینکه کجا پیت‌هایی با بالاترین ارزش افزایشی هستند مهم نیست. بلکه همچنین دانستن اینکه کجا حداقل باطله‌برداری مواد لازم است نیز مهم است. بیشینه ارزش خالص فعلی پروژه داده شده می‌تواند بدست آید اگر مهندس برنامه‌ریز پیشروی‌های تولید شده با این دو روش مختلف را طی تمرین زمانبندی با یکدیگر در نظر بگیرد.

منابع

[1]-Dagdelen, K., 2001," Open Pit Optimization – Strategies for Improving Economics of Mining Projects Through Mine Planning", Internet Search, 4P.

[2]-Tolwinski, B., 1998, "Scheduling Production for Open Pit Mines", 27th APCOM Proceedings - London, UK, pp. 651-662.

[3]-Ramazan, S., Dagdelen, K., 1998,"A New Push back Design Algorithm in Open Pit Mining", Mine Planning and Equipment Selection, Balkema, Rotterdam,pp. 119-124.

[4]-Whittle, J., 1988,"Beyond Optimization in Open Pit Design",The First Conference on Computer Application in the Mineral Industry(CAMI), Quebec, pp.331-337.

[5]-Van Brunt, B., H., 1998,"Multi-Metal Open Pit Mine Planing Using Whittle FOUR-X Software", The Maptek Vulcan User's Conference Vina del Mar, Chile,15 P.

[۶]- فلاح, نجات, (۱۳۸۲), تعیین سکانس بهینه پیشروی‌ها بر اساس کمینه‌کردن نسبت w/o", سمینار کارشناسی ارشد, دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[۷]- اصانلو مرتضی، عطایی محمد ،۱۳۷۹ ، تعیین حد نهایی معدن مس سرچشمه به روش دو بعدی لرچ-گروسمن، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، طرح پژوهشی مستقل.

[8]-Ellis,R., 1991,"Sarcheshmeh", Mining Magazine, October, pp. 192-196.