

بهینه سازی تعداد پوش بک های معادن روباز با استفاده از تصمیم گیری چندمعیاره

عباس آقاجانی بزازی*
ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
a.aghajani.bazzazi@gmail.com

مرتضی اصانلو
ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
morteza.osanloo@gmail.com

محمد رضائی
آمریکا، دانشگاه کنتاکی
m.rezaee98@gmail.com

خلاصه مقاله

طراحی پوش بک ها و تعیین تعداد بهینه آن، در برنامه ریزی تولید و تعیین جریان نقدینگی سالانه معادن روباز نقشی کلیدی ایفا می نماید. از سال ۱۹۶۰ الگوریتم های زیادی برای طراحی پوش بک ها براساس تعاریف مختلف از بهترین کانسنگ ارائه شده است، اما تا کنون تعداد بهینه پوش بک ها مورد بررسی قرار نگرفته اند و غالباً طراحی پوش بک ها به صورت سعی و خطا انجام می گیرد. در این مقاله شانزده پارامتر موثر در طراحی و تعیین تعداد بهینه پوش بک ها در سه گروه پارامتر های اقتصادی، فنی، و طراحی ارایه می شود. سپس به دو روش تحلیلی و تصمیم گیری چند معیاره، تعداد بهینه پوش بک ها بر اساس کمینه سازی ریسک مرتبط با عدم قطعیت عیار، کمینه سازی نسبت باطله برداری پوش بک ها و بیشینه سازی میزان ارزش خالص فعلی (NPV)، مورد محاسبه قرار گرفته اند. بر اساس این تحقیق تعداد بهینه پوش بک ها سه تا شش عدد پیشنهاد می گردد که تعداد کمتر پوش بک ها (سه یا چهار) در مقایسه با تعداد بیشتر پوش بک ها (پنج یا شش)، با توجه به عدم قطعیت عیار دارای ریسک کمتر و احتمال دسترسی بیشتر به ارزش خالص فعلی محاسبه شده می باشند. این مدل در معدن سنگ آهن چادرمالو ایران مورد آزمایش قرار گرفته که نتایج نشان می دهد تعداد پوش بک بهینه در این معدن چهار می باشد.

Abstract

Abstract: Open pit mine production planning is usually based on underlying push backs. Therefore, calculation of the optimum number of push backs plays a key role in determining annual cash flow. Although several researcher have proposed push back design algorithms since 1960, none of them has studied on optimum number of push backs, and mostly push backs are designed on trial and error. In this approach, sixteen effective parameters on push back design and optimizing the number of push backs have been recognized. These parameters are categorized in three groups; (1) economical, (2) technical, and (3) design parameters. Furthermore, for selecting the most suitable algorithm to optimize the number of push backs, some more practical algorithms were implemented for push backs design with regard to a cross section of a copper deposit. In this research, the optimum number of push backs has been calculated by analytical and multiple attribute decision making (MADM) methods based on minimizing the risk associated with grade uncertainty, minimizing stripping ratio of push backs, and maximizing net present value. According to this study, optimum number of push backs has been suggested to be three up to six. Also results show that the lower numbers of push backs (3 or 4) have less discounted push back risk associated with grade uncertainty, and higher probability of achievement to the calculated net present value (NPV), and more smoothed stripping ratio than higher numbers (5 or 6). Based on this approach the optimum number of push backs of Chadormaloo iron mine of Iran is to be four.

کلمات کلیدی: پوش بک (Push back)، پیت لانه ای (nested pit)، شاخص ریسک تنزیل یافته پوش بک ها (DPRI)، نسبت باطله برداری تجمعی پوش بک ها (CSR)، ارزش خالص فعلی (NPV)، تصمیم گیری چند معیاره (MADM).

مقدمه

برای انجام برنامه ریزی تولید بلند مدت، محدوده نهایی معدن به چندین پیت رشد یابنده یا لانه ای تقسیم می شود و سپس این پیت ها از لحاظ برخی پارامترهای فنی مانند طراحی جاده های حمل و نقل، حداقل عرض کف پیت، حد اقل عرض پوش یک ها، مساله وقفه و پارامترهای مکانیک سنگی مورد ملاحظه قرار گرفته و تبدیل به پوش یک می گردند. سپس روی هر یک از پوش یک ها برنامه ریزی تولید انجام می گیرد تا برنامه ریزی تولید تفصیلی معدن حاصل گردد. در واقع می توان گفت که پوش یک ها ترتیب و توالی مکانی استخراج بلوک ها را تعیین می کنند و ترتیب و توالی زمانی استخراج بلوک ها در برنامه ریزی تولید تعیین می گردد. لذا بهینه سازی تعداد پوش یک ها در برنامه ریزی تولید نقش بسزایی دارد. ازسال ۱۹۶۰ تا کنون الگوریتم های زیادی برای طراحی پوش یک ها براساس تعاریف مختلف از بهترین کانستگ ارائه شده است. (Rezaee M, et.all, 2009) لرج و گراسمن (Lerchs and Grossman, 1960) از تکنیک پارامترسازی برای طراحی پوش یک ها استفاده کردند. گرشون در سال ۱۹۸۶، روشی را ارائه داد که در آن کیفیت کانستگ، موقعیت بلوک های کانستگ و نیز موقعیت بلوک های زیر بلوک های مطلوب برای طراحی پوش یک ها مورد ارزیابی قرار گرفتند (Dagdelen K., Gershon, 1986). داگدلن با فرانکوئیس بنگارکن (Francois-Bongarcon., 1982) و نیز بنگارکن و کوئیبال (Francois-Bongarcon., Guibal D. 1982) الگو هایی بر مبنای پارامترسازی ذخیره ارائه کردند. ونگ و سویم در سال ۱۹۹۵، یک الگوریتم طراحی پوش یک ارائه دادند که در آن بجای پارامترسازی اقتصادی به پارامتری کردن ذخیره پرداختند (Wang Q., Sevim H., 1995). بر اساس کمینه کردن میزان باطله برداری رمضان و داگدلن نیز الگوریتم دینامیک خود را برای طراحی پوش یک ها ارائه نمودند (Ramazan S., Dagdelen K., 1998). در سال ۲۰۰۷، اسانلو و غلام نژاد (Gjolamnejad and Osanloo, 2007) برای اولین بار عدم قطعیت عیار را در طراحی پوش یک ها بررسی نمودند و در آن مطالعه از روش پارامترسازی عیار ذخیره براساس واریانس استفاده کردند. علیرغم وجود این الگوریتم ها، تعداد بهینه پوش یک ها تا کنون مطالعه نگردیده است و طراحی با سعی و خطا صورت می گیرد، لذا در این تحقیق ابتدا سعی شده است تا عوامل تاثیرگذار در طراحی و تعیین تعداد بهینه پوش یک ها شناسایی و سپس مدلی جهت تعیین تعداد بهینه پوش یک ها ارائه شود و همچنین مدل پیشنهادی برای یکی از معادن سنگ آهن مورد بررسی قرار گیرد.

عوامل موثر در طراحی و تعیین تعداد بهینه پوش یک ها:

شانزده پارامتر موثر در طراحی و تعیین تعداد بهینه پوش یک ها در سه گروه پارامترهای اقتصادی، فنی، و طراحی به شرح جدول (۱) معرفی می گردند:

قیمت ماده معدنی: در الگوریتم ویتل قیمت ماده معدنی به عنوان مهمترین عامل در طراحی پوش یک در نسبت λ (میزان ماده معدنی که باید فروخته شود تا هزینه های استخراج یک تن پرداخت گردد) مورد ملاحظه قرار گرفته و با تغییر آن ارزش اقتصادی بلوک ها محاسبه گردیده و با الگوریتم لرج و گراسمن، پیت نهائی و پوش یک ها طراحی می گردند.

پارامترهای اقتصادی	پارامترهای اجرایی	پارامترهای طراحی
۱- قیمت ماده معدنی	۱- شیب پایدار	۱- نسبت باطله برداری
۲- هزینه های استخراج و هزینه های فرآوری	۲- ظرفیت استخراج	۲- ماکزیمم نمودن میزان استخراج فلز
۳- ارزش خالص فعلی (NPV)	۳- ظرفیت کارخانه فرآوری	۳- عیار حد و عیار حد پوش یک ها
۴- ارزش زمانی پول (i)	۴- ظرفیت کارخانه تغلیظ	۴- عدم قطعیت پروژه های معدنی
۵- زمان بازگشت سرمایه (Payback)	۵- حداقل عرض دسترسی - فاصله بین پیت ها یا ضخامت پوش یک ها	۵- شاخص ریسک تنزیل یافته پوش یک ها (DPRI)
	۶- مسئله وقفه	

جدول (۱)- پارامترهای موثر در طراحی و تعیین تعداد بهینه پوش یک ها

مقدار λ از رابطه (۱) به دست آمده و در آن P قیمت ماده معدنی و C_m هزینه های استخراج یک تن سنگ شامل هزینه های بالاسری می باشد.

$$\lambda = p / c_m \quad \text{رابطه (۱):}$$

هزینه های استخراج (Cm) و هزینه های فرآوری (Cp): این هزینه ها در طراحی پوش یک ها موثرند ولی از اهمیت کمتری نسبت به قیمت ماده معدنی برخوردارند زیرا مقادیرشان تغییر چندانی نمی کنند مگر اینکه روش فرآوری یا استخراج جدیدی ایجاد شود. ویتل نیز در الگوریتم خود متغیر C_p/C_m را تقریباً ثابت در نظر می گیرد.

ارزش خاص فعلی (NPV): تمامی مراحل طراحی، برنامه ریزی و بهینه سازی پروژه های معدنی، به منظور بیشینه نمودن ارزش خالص فعلی انجام می گیرد و یک عامل موثر در طراحی و بهینه سازی تعداد پوش یک ها و نیز نحوه ی استخراج آن ها، میزان ارزش خاص فعلی می باشد. البته ارزش خالص فعلی نه تنها در تئوری بلکه در عمل نیز باید بیشینه باشد. نرخ بهره، عیار و میزان باطله برداری، در میزان ارزش خالص فعلی حاصل از برنامه ریزی تولید پوش یک ها موثرند.

ارزش زمانی پول (i): این عامل از پارامترهای مهم و موثر در طراحی و بهینه سازی تعداد پوش یک ها می باشد، زیرا ارزش زمانی پول در ارزش خالص فعلی و ارزش خالص فعلی نیز در طراحی پوش یک موثر است. مطالعات نشان می دهد که در ارزش زمانی پول پایین الگوریتم رمضان و داگدلن و در ارزش زمانی پول بالا الگوریتم ویتل برتری دارد و منجر به ارزش خالص فعلی بیشتری می گردد، لذا ارزش زمانی پول و تغییرات آن بایستی مورد ملاحظه قرار گیرد.

زمان بازگشت سرمایه (Pay back): در سال های اولیه استخراج می بایست از هزینه های اضافی جلوگیری به عمل آید و دسترسی به ماده معدنی و نقدینگی، سریع تر صورت گیرد تا از ادامه پرداخت بهره پولی که برای راه اندازی معدن از منابع مالی قرض گرفته شده است جلوگیری گردد. رعایت این نکته در طراحی پوش یک ها بسیار حایز اهمیت می باشد. معمولاً پوش یک اولیه به گونه ای طراحی می شود که در مدت زمان ۵ الی ۶ سال قادر به جبران کل هزینه ها باشد.

- شیب پایدار و عوامل ژئومکانیکی: این عامل در طراحی پوش یک ها بسیار حایز اهمیت می باشد.
- ظرفیت استخراج: ظرفیت استخراج از دو دیدگاه بایستی مورد ملاحظه قرار گیرد: الف- حداکثر ظرفیت استخراج سالیانه یکی از محدودیت های اصلی در طراحی معدن می باشد. ب- طراحی پوش یک ها باید به گونه ای باشد که استخراج حداقل میزان کانسنگ مورد نیاز، در هر فاز رعایت شود.
- ظرفیت کارخانه فرآوری و تغلیظ: این ظرفیت ها همانگونه که توسط کنت لین (Lane) در محاسبه عیار حد مورد لحاظ قرار گرفته اند، می توانند عامل محدود کننده در بر نامه ریزی باشند و این ظرفیت ها باید در طراحی پوش یک ها لحاظ گردند. (Kenneth F., Lane, 1998)
- حداقل عرض دسترسی- فاصله بین پیت ها یا ضخامت پوش یک ها: این فاصله بسته به ابعاد ذخیره قابل استخراج و نیز ماشین آلات بین ۳۰ الی ۹۰ متر، متغیر است. در معادن کوچک این پهنا بین ۳۰ تا ۶۰ متر و در معادن بزرگ این پهنا بین ۶۰ تا ۹۰ متر خواهد بود. (Hustrulid, 1995)
- مسئله وقفه (Gap problem): وقفه عبارت است از فاصله زیاد بین دو پیت لانه ای متوالی، به عنوان مثال پوش یک اولیه نباید زیاد بزرگ باشد. این مشکل به خصوص در کانسارهایی که توزیع عیار در آنها یکنواخت است، مشکلی جدی می باشد. فاصله زیاد بین دو پیت لانه ای متوالی باعث ایجاد اختلال در برنامه ریزی تولید سالیانه شده و خاصیت مهم پیت های لانه ای را در تقسیم پیت نهایی به چندین پیت فرعی، از بین خواهد برد. افزایش تعداد پوش یک ها باعث حذف یا کاهش این مشکل خواهد شد. (Gholamnejad and Osanloo, 2007)
- نسبت باطله برداری پوش یک ها: همانگونه که در الگوریتم رمضان و داگدن نشان داده شده است، از عوامل مهم در طراحی پوش یک ها میزان نسبت باطله برداری است. کم کردن این میزان در سال های اولیه عمر معدن، سریع تر استخراج نمودن بلوک های کانسنگ و همچنین طراحی پوش یک ها بر اساس افزایش میزان نسبت باطله برداری از پوش یک اول به آخر، باعث افزایش چشمگیری در ارزش خالص فعلی می گردد.
- ماکزیم نمودن میزان استخراج فلز: ونگ و سویم برای طراحی پوش یک ها بجای پارامتری کردن پارامترهای اقتصادی، به پارامتری کردن ذخیره پرداختند و الگوریتم آنها بر پایه به دست آوردن ماکزیم پیت فلزی در مدل بلوکی بود. بر اساس این الگوریتم ماکزیم نمودن میزان استخراج فلز، پارامتری مهم در طراحی پوش یک ها می باشد.
- عیار حد و عیار حد پوش یک ها: عیار حد، نوع بلوک ها را از نظر کانسنگ یا باطله بودن تعیین می کند و نیز در اکثر تعاریف ارایه شده در مورد بهترین کانسنگ، داشتن عیار بالا وجه مشترک می باشد و این کانسنگ باید در سال های اولیه استخراج گردد. لذا توجه به عیار حد پوش یک ها از طریق افزودن هزینه ها در صورت عیار حد و یا کاهش قیمت در مخرج برای پوش یک های مختلف، در طراحی و بهینه سازی تعداد پوش یک ها اهمیت بسزایی دارد. مبنای کاهش قیمت ها یا افزایش هزینه ها جهت تعیین عیار های حد و سپس محدوده هر یک از پوش یک ها، مقدار درآمد مورد نیاز در هر پوش یک می باشد. عیار حد سر به سری معدن از رابطه (۲) به دست می آید:
- رابطه (۲):
$$g_c = \frac{b + c_1}{10(R - c_2)y}$$
- در این رابطه g_c : عیار حد سر به سری معدن، b : هزینه های مرتبط با استخراج یک تن کانسنگ یا ماده معدنی، C_1 : هزینه های تغلیظ یا پریارسازی یک تن ماده معدنی، R : قیمت محصول نهایی، C_2 : هزینه های ذوب، پالایش، حمل محصول

نهایی به بازار و بازاریابی، γ : میزان بازاریابی و ضریب ۱۰ در مخرج به منظور بیان عیار بر حسب درصد می باشد.

عدم قطعیت پروژه های معدنی: دیمیتراکوپولوس عدم قطعیت در پروژه های معدنی را به صورت زیر، طبقه بندی نمود: ۱- عدم قطعیت مدل کانسار و وابستگی آن به تغییرات عیار و نحوه توزیع مواد، ۲- عدم قطعیت در موارد عملی و اجرایی معدن کاری مانند محدودیت شیب و ظرفیت استخراج، ۳- عدم قطعیت در پارامترهای اقتصادی شامل هزینه عملیاتی و سرمایه گذاری و قیمت کالا (Dimitrakopoulos R, 1998). در بین موارد مذکور، بررسی عدم قطعیت مدل کانسار و وابستگی آن به تغییرات عیار از اهمیت بیشتری برخوردار است زیرا تمام الگوریتم های طراحی بر روی مدل بلوکی کانسار انجام می گیرد، لذا تخمین آن اهمیت بسیاری دارد و با در نظر گرفتن آن می توان انواع فزیندی های ممکن و ترتیب استخراج بلوک ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. اصائلو و غلام نژاد الگوریتمی برای طراحی پوش یک ها بر این اساس ارائه نموده اند. این عدم قطعیت ها باید در طراحی و تعیین تعداد پوش یک مد نظر قرار گیرد، در غیر این صورت نتیجه عملی با نتیجه مورد انتظار متفاوت خواهد بود، همانگونه که طبق گزارش والی (Valee) در سال های اولیه عملیات معدن کاری پس از شروع پروژه، ۶۰٪ معادن طراحی شده نرخ تولید کمتر از ۷۰٪ ظرفیت طراحی شده داشته اند. (Vallee M., 2000). بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت ها، هر چند ممکن است از لحاظ تئوری ارزش خالص فعلی بالایی محاسبه گردد ولی در عمل ارزش خالص فعلی حاصله کمتر خواهد بود.

شاخص ریسک تنزیل یافته پوش یک ها **Discounted Push back Risk** (indicator): این پارامتر توسط اصائلو و غلام نژاد معرفی گردید. در صورتیکه میانگین (μ) و واریانس (σ^2) عیار بلوک ها را داشته باشیم، این پارامتر می تواند در طراحی و مقایسه الگوریتم های متفاوت طراحی پوش یک و تعیین تعداد بهینه آنها بسیار موثر باشد، زیرا کاهش ریسک بخصوص در سال های اولیه دوره ی تولید از اهمیت بسزایی برخوردار است. برای مقایسه ی مقدار ریسک ناشی از عدم قطعیت عیار برای هر یک از الگوریتم های طراحی و تعداد مختلف پوش یک، ابتدا باید به هر پیت لانه ای یک عدد نسبت داده شود به طوری که این عدد منعکس کننده عدم قطعیت عیاری مربوط به مجموع بلوک های موجود در آن پیت باشد. از آنجا که انحراف استاندارد، یک شاخص خوب برای نشان دادن عدم قطعیت در عیار تخمین زده شده برای هر بلوک است، بدین منظور شاخصی به نام شاخص ریسک برای هر پیت لانه ای به صورت رابطه (۳) تعریف می شود:

$$RI_k = \sum_{i=1}^{n_k} Var(\tilde{g}_i) \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن: RI_k : شاخص ریسک برای پیت لانه ای k ام می باشد. k : تعداد کل پیت های لانه ای موجود در مدل، n_k : تعدد کل بلوک های موجود در k امین پیت لانه ای، \tilde{g}_i : عیار متوسط بلوک i ام، و Var واریانس تخمین عیار می باشد. اما از آنجا که ریسک، در سال های اول استخراج معدن (پیت های لانه ای اول) خیلی بحرانی تر از سال های بعدی است، پس باید ریسک موجود در هر پیت لانه ای، تنزیل یافته به طوری که مقدار این تنزیل به عمر هر پیت وابسته باشد. پس شاخص ریسک تنزیل یافته (DPRI) برای هر پیت لانه ای به صورت رابطه (۴) تعریف می شود:

$$DPRI = \sum_{k=1}^k \frac{RI_k}{(1+i_k)^{t_k}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن: t_k : عمر هر پیت لانه ای بر حسب سال و i_k : ارزش زمانی پول موثر برای k امین پیت لانه ای می باشد (غلام نژاد، ۱۳۸۵).

تعیین تعداد بهینه پوش بک ها:

برای مطالعه و تحقیق در مورد تعداد پوش بک های بهینه از یک مقطع دو بعدی کانسار مس فرضی استفاده شده است. شکل (۱) این مقطع دو بعدی کانسار مس را نشان می دهد. اعداد نوشته شده داخل بلوک ها عیار آنها می باشد. همچنین شکل (۲) همان مقطع است که اعداد نوشته شده داخل بلوک ها انحراف استاندارد (جنر واریانس تخمین) آنها است، که از روش کریجینگ بدست آمده است. برای محاسبه ارزش اقتصادی بلوک ها قیمت فلز ۱۱۰۰ دلار بر تن، هزینه استخراج هر تن سنگ ۵ دلار بر تن، هزینه فراوری هر تن کانسنگ ۲۰ دلار بر تن، ضریب بازیابی ۸۰ درصد و وزن مخصوص کانسنگ و باطله به ترتیب ۲٫۹ و ۲٫۳ تن بر متر مکعب فرض می شود (Gholamnejad and Osanloo, 2007). با توجه به عیار متوسط بلوک ها و پارامتر های اقتصادی فوق الذکر و همچنین با بکارگیری روش لرج وگراسمن دو بعدی، محدوده نهایی معدن در این مقطع تعیین می گردد که با خطوط پرننگ در شکل (۱) مشخص گردیده است. این مقطع کانسار دارای ۱۳۵ بلوک بوده و با توجه به ابعاد بلوک کانسارهای مس و اینکه ارتفاع پله در بیشتر معادن مس بین ۱۲٫۵ الی ۱۵ متر می باشد، ابعاد بلوک ها ۱۲٫۵*۲۵*۲۵ در نظر گرفته می شود. این مدل بلوکی شامل ۷۸ بلوک کانسنگ و ۵۷ بلوک باطله است و تناژ کل آن ۲۸۰۰۰۰ تن می باشد. برای دسترسی به هدف مورد نظر، یعنی بهینه سازی تعداد پوش بک ها، ابتدا با استفاده از الگوریتم های رمضان-داگدیلن، ویتل و اصائلو-غلام نژاد پوش بک های کانسار مذکور طراحی شدند. شکل (۳) نتیجه الگوریتم رمضان- داگدیلن را نشان می دهد. این الگوریتم در طراحی پوش بک ها برای این کانسار مناسب نمی باشد و هدف اصلی آن یعنی طراحی پوش بک های با افزایش نسبت W/O، تامین نمی گردد زیرا توزیع بلوک های کانسنگ در این کانسار- همان گونه که در شکل دیده می شود و الگوریتم های مختلف نیز تایید می نمایند- به گونه ای است که با افزایش عمق، نسبت W/O کاهش می یابد. لذا می توان نتیجه گرفت که این الگوریتم برای تمامی کانسارها عمومیت ندارد و می توان از آن به عنوان مکمل الگوریتم های دیگر مانند ویتل جهت افزایش NPV استفاده نمود. همچنین با استفاده از الگوریتم ویتل، با تغییر ضریب λ در فرمول ویتل از مقدار $P/Cm=1100/5=220$ که در قیمت ۱۱۰۰ دلار به دست می آید تا $\lambda=4$ حداکثر ۹ پوش بک برای این کانسار طراحی گردید. این پوش بک ها در مقادیر ۳۷-۲۳-۲۰-۱۲-۹-۸-۶-۵-۴ λ ایجاد می شود و از مقدار ۴ به قبل و ۲۷ به بعد، دیگر پوش بکی حاصل نمی گردد. پوش بک های بدست آمده از این الگوریتم در شکل (۴) قابل مشاهده است. یکی از مشکلات اساسی روش ویتل وجود مساله وقفه در پوش بک های طراحی شده می باشد. اگر به شکل (۴) رجوع شود ملاحظه می شود که اولین پیت لانه ای ایجاد شده توسط روش ویتل، شامل ۴۸ بلوک می باشد و خیلی بزرگ تر از پیت های لانه ای دیگر است.

در این تحقیق همچنین از الگوریتم غلام نژاد-اصائلو برای طراحی پوش بک ها استفاده گردید. در این روش ارزش اقتصادی بلوک ها به صورت زیر محاسبه میگردد. رابطه (۵):

$$Bev(i) = [TO_i \times (\bar{G}_i - n\sigma_i) \times R \times P] - (TO_i \times PC) - (TR_i \times MC)$$

که در آن TO_i : تناژ کانسنگ در بلوک i ام، \bar{G}_i : متوسط عیار بلوک i ام، P : قیمت یک تن ماده معدنی، R : درصد بازیابی، PC : هزینه فراوری یک تن ماده معدنی، TR_i : تناژ سنگ (اعم از کانسنگ و یا باطله) در بلوک، MC : هزینه استخراج به ازای یک تن، σ_i : انحراف معیار عیار بلوک i ام و n : یک ضریب است که با تغییر مقدار آن در هر مرحله، ارزش اقتصادی جدیدی برای هر بلوک به دست می آید و برای مقادیر آن طبق قضیه چبیشف (Chebyshev) داریم:

$$n \in \left[(0 \leq n \leq 1.96) \cap \left(n \leq \frac{G_i}{\sigma_i} \right) \right] \quad (۶):$$

و حد بالای n برابر $4/5$ می باشد. با استفاده از الگوریتم فوق می توان بعد از مثلاً ۱۰۰ گام، حداقل ۴۰ تا ۵۰ پیت لانه ای تولید کرد. کوچکترین پیت لانه ای، پیتی است که کانسنگ موجود در آن بالاترین ارزش را دارد. حال با ترکیب تعدادی پیت لانه ای به گونه ای که حداقل عرض و فضای کاری برای استخراج توسط ماشین آلات رعایت شده باشد، یک پوش بک به وجود می آید. مسلماً باید جاده باربری نیز روی هر پوش بک، مکانیابی و ترسیم شود.

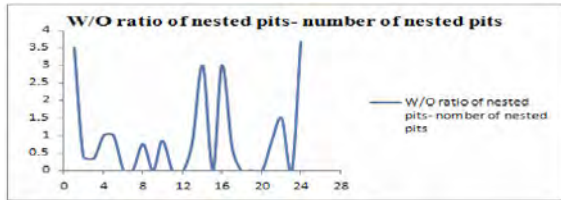
از آنجایی که الگوریتم های ویتل یا رمضان-داگدیلن، علاوه بر مشکلاتی که به آنها اشاره شد، یک مقدار مشخص و معین پوش بک تولید می کنند و انعطاف پذیری در آنها برای شخص تصمیم گیرنده در مورد تعیین تعداد بهینه پوش بک ها و نیز محدوده ی آنها مشاهده نمی گردد، لذا پایه و اساس تعیین تعداد پوش بک های بهینه، الگوریتم اصائلو و غلام نژاد قرار داده شد. علل دیگر استفاده از این الگوریتم این است که، اگر به پیت های لانه ای حاصل از این روش دقت شود، مشاهده می گردد که مساله وقفه در مورد اولین پیت لانه ای بدست آمده از روش پارامتر سازی عیار با استفاده از واریانس، کاهش یافته است. دلیل این امر این است که چون در روش پیشنهادی آنها، در هر مرحله به یک اندازه از ارزش همه ی بلوک ها کم نمی شود، پس حتی اگر توزیع عیار در کانسار یکنواخت باشد ارزش اقتصادی بلوک ها در هر مرحله با هم متفاوت خواهد بود. این الگوریتم همچنین قسمتی از کانسار را برای استخراج در سالهای اولیه انتخاب می کند که هم عیار آنجا بالا بوده و هم اعتماد بیشتری نسبت به عیار تخمین زده شده برای آن قسمت از کانسار وجود داشته باشد. بنابراین، بلوک های کم عیار و پر ریسک کانسار، برای استخراج در سال های آخر عمر معدن انتخاب می شوند. لذا طراحی پیت های پیشنهادی این الگوریتم، برنامه ریزی را برای تولید بلند مدت معدن ارائه می دهد که ریسک آن کمتر از نتایج سایر روش هاست. همچنین در الگوریتم پارامتر سازی عیار با استفاده از واریانس، احتمال نوسانات بیش از حد عیار کارخانه کاهش یافته و در نتیجه، احتمال تولید کنسارته با تناژ مورد انتظار، افزایش می یابد. بنابراین با برنامه ریزی تولید برای این پوش بک ها، معدن می تواند نسبت به برآورده شدن تعهدات خود در قبال تحویل کنسارته به کارخانه ذوب، مطمئن تر باشد. علاوه بر این، ثابت بودن عیار خوراک کارخانه تغلیظ باعث می شود که فرایند تغلیظ با حداکثر بازیابی صورت گیرد و به دنبال آن افت فلز به حداقل برسد.

در استفاده از این الگوریتم ابتدا مقادیر n در بازه صفر تا $4/5$ با تغییرات 0.1 تغییر دادیم و پس از انجام ۴۶ مرحله و بدست آوردن ۴۶ محدوده نهایی از طریق الگوریتم لرج و گروسمن، محدوده های نهایی دو به دو و بصورت زوجی مقایسه شدند.

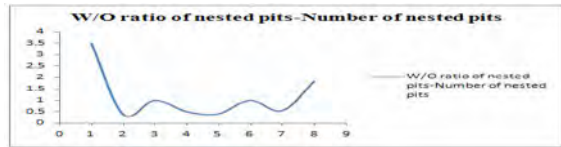
مراحل محاسبات و انجام این عملیات برای $n=0$ مانند مراحل تعیین محدوده نهایی می باشد. با مقایسه دو به دو این محدوده ها، ۲۴ پیت لانه ای حاصل گردید. سپس این عملیات به ترتیب برای مقادیر $\Delta n=0.1/2$ تا $\Delta n=2$ انجام گرفت، زیرا در $\Delta n=2$ ، سه پیت لانه ای حاصل می گردد که حداقل تعداد می باشد و پس از آن، تعداد کمتر از سه پیت لانه ای حاصل می گردد که برای برنامه ریزی تولید مناسب نمی باشد. برخی از این حالات نتیجه یکسانی از نظر تعداد پیت لانه ای داشتند ولی در عین حال محدوده این پیت های لانه ای که در تعداد برابر بودند، متفاوت بود. برای مقایسه نهایی از بین آن دسته پیت های لانه ای که تعداد یکسان داشتند، پیت های لانه ای که دارای میزان عدم قطعیت کمتر یا به عبارتی دیگر قطعیت بیشتر در عیار بودند، مبنای مقایسه قرار گرفتند.

یازده حالت مختلف ایجاد شده از این عملیات، دارای ۳-۴-۵-۶-۷-۸-۹-۱۰-۱۴-۱۷-۲۴ پیت لانه ای بودند. برای نمونه نتیجه عملیات طراحی تعداد پوش بک های مختلف با استفاده از این الگوریتم در حالت $\Delta n=1/3$ ، که تعداد ۵ پیت لانه ای ایجاد گردیده است، در شکل (۵) نمایش داده شده است. در مرحله بعد بایستی از بین تعداد گوناگون پوش بک ها، تعداد بهینه را به دست آورد.

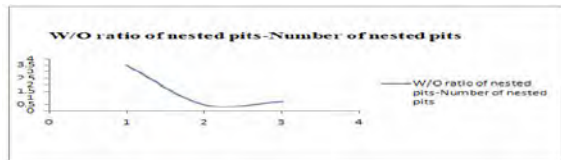
تعاریف زیر تا کنون برای بهترین کانسنگ ارایه گردیده اند:



نمودار (۱) - نسبت باطله برداری پیت‌های لانه‌ای حاصل از طراحی ۲۴ پیت لانه‌ای (۰/۱) -
 $(\Delta n = 1)$

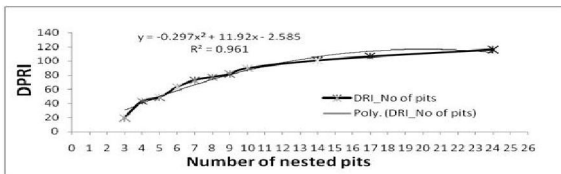


نمودار (۲) - نسبت باطله برداری پیت‌های لانه‌ای حاصل از طراحی ۱۷ پیت لانه‌ای (۰/۲) -
 $(\Delta n = 2)$

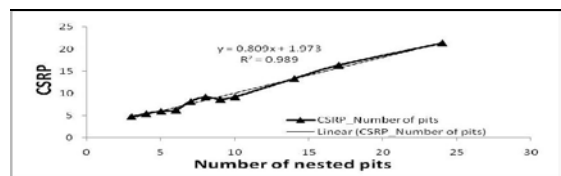


نمودار (۳) - نسبت باطله برداری پیت‌های لانه‌ای حاصل از طراحی ۱۴ پیت لانه‌ای
 $(\Delta n = 3)$

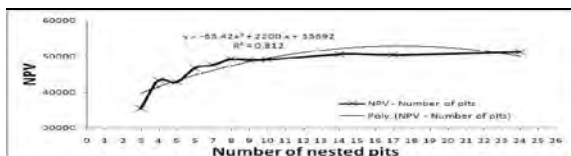
نمودارهای شاخص ریسک تنزیل یافته، نسبت W/O تجمعی پیت‌های لانه‌ای و ارزش خالص فعلی بر حسب تعداد پیت‌های لانه‌ای متفاوت در نمودارهای (۴) تا (۶) آمده است. همچنین نمودار ارزش خالص فعلی بر حسب شاخص ریسک تنزیل یافته پوشش بک‌ها در نمودار (۷) آمده است.



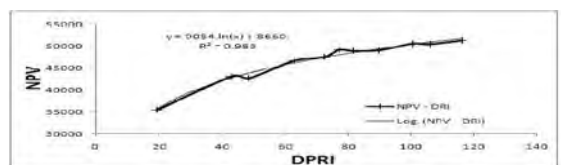
نمودار (۴) - شاخص ریسک تنزیل یافته بر حسب تعداد پیت‌های لانه‌ای



نمودار (۵) - نسبت W/O تجمعی بر حسب تعداد پیت‌های لانه‌ای



نمودار (۶) - نمودار ارزش خالص فعلی (\$) بر حسب تعداد پیت‌های لانه‌ای



نمودار (۷) - ارزش خالص فعلی (\$) بر حسب شاخص ریسک تنزیل یافته پوشش بک‌ها

ویتال: "بهترین کانسنگ، کانسنگی است با بالاترین عیار". رمضان و داگلدن تعریف زیر را برای بهترین کانسنگ ارائه دادند: "بهترین کانسنگ آن است که عیار بالا دارد و کمترین میزان باطله برداری را دارد". امانلو و غلام نژاد نیز بهترین کانسنگ را کانسنگی معرفی کردند که "عیار بالا و کمترین باطله برداری و کمترین عدم قطعیت عیار را داشته باشد". بر مبنای این تعریف، در این تحقیق تعداد بهینه پوشش بک به صورت زیر تعریف می‌گردد: "بهترین تعداد پوشش بک آن است که در آن ریسک ناشی از عدم قطعیت عیار کمینه، ارزش خالص فعلی پوشش بک‌ها بیشینه و میزان باطله برداری تجمعی پوشش بک‌ها کمینه باشد".

بنابراین برای مقایسه تعداد پیت‌های لانه‌ای مختلف، از میان ۱۶ پارامتر موثر در طراحی و بهینه‌سازی تعداد پوشش بک‌ها سه پارامتر زیر استفاده گردید:

(۱) شاخص ریسک تنزیل یافته پوشش بک‌ها (DPRI)

(۲) میزان W/O تجمعی پوشش بک‌ها (CSRП) (Cumulative Stripping Ratio of Push backs)

(۳) میزان ارزش خالص فعلی در هر طراحی (NPV)

برای محاسبه ارزش خالص فعلی حالات مختلف، برنامه‌ریزی تولید سالیانه برای پوشش بک‌ها انجام گرفت. در این برنامه ریزی تولید فرض شد که سالیانه ۵ بلوک (اعم از کانسنگ یا باطله) استخراج می‌گردد. میزان ارزش زمانی پول نیز ۱۲ درصد در نظر گرفته شد. همچنین برنامه ریزی تولیدی که مبنای مقایسه قرار گرفت در بدترین حالت انجام شد، یعنی با فرض اینکه در استخراج هر پوشش بک، با در نظر گرفتن محدودیت حداکثر شیب ۴۵ درجه، ابتدا تمامی بلوک‌های باطله و سپس بلوک‌های کانسنگ استخراج گردند و در شرایط یکسان برای استخراج بلوک‌های کانسنگ، آن بلوک کانسنگی سریع‌تر استخراج گردید که کمترین ارزش خالص فعلی را نتیجه دهد. مشخصات پیت‌های لانه‌ای و مقادیر شاخص ریسک تنزیل یافته و نسبت W/O تجمعی پیت‌های لانه‌ای و نیز ارزش خالص فعلی مربوط به الگوریتم پارامترسازی عیار با استفاده از واریانس در تعداد متفاوت پیت‌های لانه‌ای بدست آمده از این الگوریتم در جدول (۲) مشاهده می‌گردد:

مرحله	Δn	تعداد پیت	شاخص ریسک تنزیل یافته (DPRI)	نسبت باطله برداری تجمعی (CSRП)	ارزش خالص فعلی (\$) (NPV)
۱	۰/۱	۲۴	۱۱۶/۱۱	۲۱/۳۱	۵۱۲۳۶
۲	۰/۲	۱۷	۱۱۶/۰۰	۱۶/۳۱	۵۰۳۹۱
۳	۰/۳	۱۴	۱۰۰/۶۹	۱۳/۳۰	۵۰۵۴۰
۴	۰/۴	۱۰	۸۹/۸۰	۹/۱۷	۴۹۰۰۵
۵	۰/۵	۹	۸۱/۷۰	۸/۶۶	۴۸۸۹۵
۶	۰/۶	۸	۷۷/۲۷	۱۵/۹۰	۴۹۱۵۷
۷	۰/۷	۷	۷۲/۷۰	۸/۱۳	۴۷۵۵۸
۸	۰/۸	۶	۶۳/۰۰	۶/۲۰	۴۶۶۳۸
۹	۱/۰	۵	۴۸/۵۰	۵/۹۴	۴۲۶۹۳
۱۰	۱/۴	۴	۴۳/۰۰	۵/۳۹	۴۳۱۲۱
۱۱	۲/۰	۳	۱۹/۵۰	۴/۷۴	۳۵۴۳۰

جدول (۲) - مشخصات پیت‌های لانه‌ای و مقادیر شاخص ریسک تنزیل یافته، نسبت W/O تجمعی پیت‌های لانه‌ای و ارزش خالص فعلی مربوط به الگوریتم پارامترسازی عیار با استفاده از واریانس در تعداد متفاوت پیت‌های لانه‌ای

همچنین برای نمونه نسبت باطله برداری پیت‌های لانه‌ای حاصل از طراحی ۲۴، ۸ و ۳ پیت لانه‌ای در نمودارهای (۱) تا (۳) آمده است:

بسته به نوع ذخیره) و طراحی جاده های دسترسی و محدودیت های ژئومکانیکی بررسی گردیده و پوش بک ها طراحی می گردند.

با این اطلاعات و نمودار ها می توان تعداد پوش بک های بهینه را بدست آورد.

همانگونه که از این نمودار ها و اشکال بر می آید با کاهش تعداد پوش بک ها:

میزان درصد ریسک تنزیل یافته پوش بک ها به میزان قابل توجهی کاهش می یابد.

میزان W/O پوش بک ها به میزان قابل توجهی کاهش می یابد.

میزان NPV به طور کلی کاهش می یابد.

عدم یکنواختی میزان W/O برای پیت های مختلف کاهش می یابد و نمودار های W/O برای پیت های مختلف هموارتر می گردد و لذا برنامه ریزی جهت تولید و باطله برداری و انتخاب ماشین آلات بهتر صورت می گیرد.

هرچه تعداد پیت های لانه ای افزایش یابد، ابعاد آنها کوچکتر شده و نیز نیاز به جایجایی ماشین آلات در آنها بیشتر است. این جایجایی و اینکه با کاهش ابعاد پیت های لانه ای ملزم به انتخاب ماشین آلات کوچکتر هستیم، باعث کاهش میزان تولید سالیانه معدن می گردد.

با توجه به نمودار(۶) و رابطه بدست آمده بین ارزش خالص فعلی و تعداد پوش بک ها ($Y=X^2+2200.4X+33692$) از تعداد ۱۰ پوش بک به بالا، تغییر قابل توجهی در میزان NPV نخواهیم داشت، اما طبق نمودارهای (۴) و (۵)، رابطه شاخص ریسک تنزیل یافته بر حسب تعداد پیت های لانه ای $y = - (2.585 - 11.92x + 0.297x^2)$ و نیز نسبت W/O تجمعی پیت های لانه ای بر حسب تعداد پیت های لانه ای $(y = 0.809x + 1.973)$ نشان می دهند که از ۱۰ پیت لانه ای به بالا، میزان W/O تجمعی پوش بک ها و شاخص ریسک تنزیل یافته پوش بک ها به میزان زیادی افزایش می یابند. پس به عنوان یک تخمین اولیه می توان مطرح نمود که ۱۰ عدد مناسبی برای حداکثر میزان پوش بک ها می باشد زیرا پس از آن تغییر چندانی در NPV نداشته ولی DRRI و W/O تجمعی افزایش چشمگیری دارد.

اگر عدد ۱۰ را مبنای مقایسه قرار داده و درصد تغییرات DRRI و W/O تجمعی و NPV سایر اعداد را بر مبنای ۱۰ مقایسه کنیم، خواهیم دید تا عدد ۶، درصد کاهش NPV ناچیز (حداکثر ۴ درصد) ولی درصد کاهش DRRI و W/O تجمعی در حدود ۳۰٪ می باشد. لذا می توان در این مرحله گفت که حداکثر تعداد پوش بک های مناسب برای معادن ۶ عدد می باشد. لازم به ذکر است که این محاسبات بستگی به تناژ ندارند. لذا بازه مناسب برای تعداد پوش بک های بهینه معادن روبا ۳ تا ۶ عدد پیشنهاد می گردد و بسته به میزان ریسک پذیری و ریسک گریزی، شخص تصمیم گیرنده می تواند از این ۴ تعداد متفاوت مقدار پوش بک بهینه را انتخاب نماید. (جدول ۲)

نمودار NPV-DRRI که تابع لگاریتمی است یا DRRI-NPV که یک تابع نمایی است نیز نشان می دهد که بهتر است شخص تصمیم گیرنده مبنای اصلی تصمیم خود را میزان شاخص ریسک تنزیل یافته قرار دهد زیرا کاهش بسیار زیاد در شاخص ریسک تنها باعث کاهش مقدار کمی در NPV می گردد و همچنین احتمال دسترسی به NPV کمتر با ریسک پایین بسیار بالاتر از NPV بیشتر همراه با ریسک بالا است. این نتایج نیز تاییدی بر تعریف تعداد پوش بک بهینه ارائه شده در این تحقیق می باشد.

برای کانسار مفروض، در این بازه بهینه برای پوش بک ها، عدد ۳ دارای حداقل ریسک و حداقل نسبت باطله برداری تجمعی پوش بک ها بوده و NPV قابل قبولی می باشد. لذا تعداد بهینه ۳ عدد معرفی می گردد. حال این ۳ پیت لانه ای از لحاظ حداقل عرض لازم برای معدنکاری (۳۰ الی ۹۰ متر

تعیین تعداد بهینه پوش بک ها به کمک روش تصمیم گیری چند معیاره

برای ارزیابی نتایج روش تحلیلی، در این تحقیق برای اولویت بندی تعداد پیت های لانه ای مختلف از روش تصمیم گیری چند معیاره استفاده شده است. هوانگ و یون (Hwang, C.L., Yoon, K., 1981) روش TOPSIS را برای اولویت بندی گزینه ها بر اساس نزدیکی به گزینه ایده آل ارائه نمودند. در این روش m گزینه به وسیله n شاخص مورد ارزیابی قرار می گیرند. این تکنیک بر این مفهوم بنا شده است که گزینه انتخابی باید کمترین فاصله را با راه حل ایده آل مثبت (بهترین حالت ممکن، A_i^+) و بیشترین فاصله را با راه حل ایده آل منفی (بدترین حالت ممکن، A_i^-) داشته باشد. در این تحقیق ۱۱ گزینه ی تعداد مختلف پیت های لانه ای را به کمک ۳ معیار شاخص ریسک تنزیل یافته پوش بک ها (DPR1)، نسبت باطله برداری تجمعی پوش بک ها (CSR1) و ارزش خالص فعلی (NPV)، به روش TOPSIS اولویت بندی می گردند. از روش آنتروپی شانون برای وزن دهی معیارها استفاده گردید.

گزینه ایده آل مثبت و گزینه ایده آل منفی بر اساس تعریف بهترین تعداد پوش بک بدین صورت تعیین گشت: در گزینه ایده آل مثبت باید شاخص ریسک تنزیل یافته و نسبت تجمعی W/O پوش بک ها، کمترین و ارزش خالص فعلی باید بیشترین باشد و در گزینه ایده آل منفی باید شاخص ریسک تنزیل یافته و نسبت تجمعی W/O پوش بک ها، بیشترین و ارزش خالص فعلی باید کمترین باشد. اندازه فاصله گزینه ها از D_i^+ مثبت و فاصله گزینه ها از D_i^- منفی (جدول ۳) آمده است. نزدیکی نسبی گزینه ها به راه حل ایده آل (C_i) نیز در جدول (۴) آمده است.

با توجه به این نتایج و شاخص های در نظر گرفته شده، گزینه ۱۱ (۳ پیت لانه ای) مناسب ترین گزینه و گزینه ۱ (۲۴ پیت لانه ای) بدترین گزینه است. و اگر بخواهیم نتایج را به صورت بازه بیان نماییم از آنجا که در امتیازات و اولویت بندی TOPSIS یک جهش از A_8 به A_7 و نیز یک جهش از A_4 به A_3 داریم، لذا مناسب ترین بازه برای تعداد پوش بک های این کانسار ۳ تا ۶ عدد می باشد و نتایج TOPSIS تاییدی بر نتایج تحلیلی می باشد. نتایج TOPSIS همچنین نشان می دهد که ایده آل ترین گزینه برای تعداد پوش بک های کانسار مفروض بر اساس تعریف ارائه شده در این تحقیق سه عدد می باشد.

گزینه ها	D_i^+	D_i^-
$A_1(24NP^*)$	۰/۲۰۵	۰/۰۳۰
$A_2(17NP)$	۰/۱۷۶	۰/۰۴۴
$A_3(14NP)$	۰/۱۶۱	۰/۰۶۰
$A_4(10NP)$	۰/۱۳۶	۰/۰۸۷
$A_5(9NP)$	۰/۱۲۰	۰/۰۹۹
$A_6(8NP)$	۰/۱۱۲	۰/۱۰۳
$A_7(7NP)$	۰/۱۰۳	۰/۱۱۲
$A_8(6NP)$	۰/۰۸۳	۰/۱۳۲
$A_9(5NP)$	۰/۰۵۸	۰/۱۵۴
$A_{10}(4NP)$	۰/۰۴۷	۰/۱۶۶
$A_{11}(3NP)$	۰/۰۳۰	۰/۲۰۵

*Nested pits

$$Bev(i) = [TO_i \times (\bar{G}_i - n\sigma_i) \times R \times P] - (TO_i \times PC) - (TR_i \times MC)$$

به صورت ۰/۱ باشد.

ب) برای بدست آوردن بازه تغییرات $n(\Delta n)$ ، بازه هایی که به ازای آن ۳ الی ۶ پوش یک حاصل می شود همراه با n مربوطه محاسبه گردیده و برای حالتی که تعداد پیت های لانه ای یکسانی حاصل می گردد نتیجه ای برای مقایسه مبنا قرار گیرد که در n های رخ می دهد که به ازای آن عدم قطعیت عیار کمتر باشد و سپس پیت های لانه ای تولید شود.

ج) شاخص ریسک تنزیل یافته پوش یک ها و میزان ارزش خالص فعلی و نسبت باطله برداری تجمعی پوش یک ها محاسبه گردیده و شخص تصمیم گیرنده با توجه به مقادیر آنها از بین گزینه های مذکور تصمیم گیری نماید.

د) بر اساس پارامترهای اجرایی مانند حداقل عرض لازم برای عملیات استخراج (۳۰ الی ۹۰ متر بسته به نوع ذخیره) محدوده این پیت های لانه ای جهت طراحی پوش یک تصحیح گردند.

نتیجه گیری

در این پروژه ۱۶ عامل مؤثر در طراحی و بهینه سازی تعداد پوش یک ها شناسایی و روش پارامترسازی عیار بر اساس واریانس که توسط غلام نژاد و اصنانلو در سال ۲۰۰۷ ارائه شد، برای بهینه سازی تعداد پوش یک ها انتخاب شد. بر اساس تعریف ارائه شده برای تعداد بهینه پوش یک در این مطالعه، ۳ پارامتر شاخص ریسک تنزیل یافته پوش یک ها، میزان نسبت باطله برداری تجمعی پوش یک ها و ارزش خالص فعلی، از بین ۱۶ عامل برای مقایسه تعداد پوش یک های مختلف انتخاب گردید و نتایج زیر حاصل شد:

روش تحلیلی و نتایج TOPSIS نشان می دهد که تعداد بهینه پوش یک ها برای معادن ۳ تا ۶ عدد می باشد که این نتیجه مستقل از تناژ ذخیره می باشد. بر اساس روش ارائه شده در این تحقیق، ۴ حالت تعداد پوش یک ۳-۴ و ۵-۶ عدد برای تشخیص تصمیم گیرنده ارائه می گردد که بسته به ریسک پذیری و ریسک گریزی، نسبت باطله برداری تجمعی پوش یک ها و NPV مد نظر، گزینه مناسب را می تواند انتخاب کند.

این تحقیق نشان می دهد که تعداد پوش یک های کمتر، اگر چه NPV کمتری دارند ولی نمودار نسبت باطله برداری آنها در پیت های مختلف هموارتر و نیز میزان شاخص ریسک تنزیل یافته کمتری خواهند داشت. به عبارت دیگر، در این حالت قطعیت عیار بلوک ها بالاتر و احتمال دسترسی به NPV محاسبه شده بالاتر است. همچنین، پوش یک های کمتر برای برنامه ریزی تولید و مدیریت معدن مناسب ترند. افزون بر این، کاهش تعداد پوش یک ها باعث افزایش ابعاد آنها می گردد و لذا می توان از ماشین آلات بزرگتر استفاده نمود و میزان تولید معدن را افزایش داد.

همچنین طبق این تحقیق، تعداد بهینه پوش یک های معدن روباز آهن چادرملو ۴ عدد پیشنهاد می گردد.

سپاسگزاری

در پایان بر خود لازم می دانیم از سرکار خانم آسیه حکمت، دانشجوی دکترای دانشکده معدن دانشگاه امیرکبیر، و نیز مجتمع معدن آهن چادرملو برای دراختیار قرار دادن داده ها تشکر نماییم.

مراجع

Dagdalen K., Francois-Bongarcon., 1982, Towards the complete double parameterization of recovered reserves in open pit mining, The 17th International Symposium on the

جدول (۳) - اندازه فاصله گزینه ها از ایده آل ها

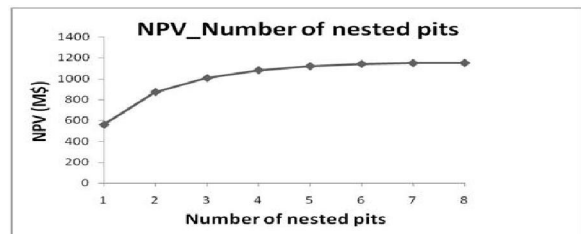
گزینه ها	C_i
$A_1(24NP^*)$	۰/۱۴۸
$A_2(17NP)$	۰/۲۷۴
$A_3(14NP)$	۰/۳۹۱
$A_4(10NP)$	۰/۵۵۲
$A_5(9NP)$	۰/۵۹۶
$A_6(8NP)$	۰/۶۰۱
$A_7(7NP)$	۰/۶۴۶
$A_8(6NP)$	۰/۷۳۲
$A_9(5NP)$	۰/۷۹۷
$A_{10}(4NP)$	۰/۸۳۳
$A_{11}(3NP)$	۰/۸۵۲

*Nested pits

جدول (۴) - نزدیکی نسبی گزینه ها به راه حل ایده آل

اعتبار سنجی نتایج روش تحلیلی و تصمیم گیری چند معیاره

نتایج این تحقیق برای معدن آهن چادرملو مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور پس از طراحی محدوده نهایی معدن و ساختن مدل بلوکی، تعداد مختلف پیت لانه ای طراحی گردید. همانگونه که نمودار (۸) ارزش خالص فعلی بر حسب تعداد پیت های لانه ای مختلف در این معدن را نشان می دهد، تا ۳ پیت لانه ای، NPV به مقدار زیادی افزایش می یابد و از ۳ تا ۶ پیت لانه ای این مقدار به تدریج افزایش یافته و از ۶ پیت لانه ای به بعد NPV تقریباً ثابت می باشد. با توجه به پارامتر ارزش خالص فعلی تعداد بهینه پوش یک ها سه الی شش عدد است. از آنجا که نسبت باطله برداری تجمعی پیت های لانه ای با افزایش تعداد پیت ها، دائماً افزایش می یابد در صورتی که واریانس عیار بلوکهای معدن نیز در دسترس باشد می توان نمودار شاخص ریسک تنزیل یافته پوش یک ها را نیز رسم نمود و تعداد بهینه را در بازه سه الی شش پوش یک انتخاب نمود. با اعمال حداقل عرض پوش یک ها، طراحی جاده های حمل و نقل و سایر محدودیت ها، مشاهده گردید که تعداد بهینه پوش یک ها برای این معدن ۴ می باشد.



نمودار (۸) - ارزش خالص فعلی بر حسب تعداد پیت های لانه ای مختلف در معدن آهن چادرملو

الگوریتم پیشنهادی برای بهینه سازی تعداد پوش یک ها

با توجه به بازه بهینه تعداد پوش یک ها از سه الی شش عدد، پیشنهاد می گردد که نکات ذیل در انتخاب تعداد پوش یک بهینه مورد توجه قرار گیرد:

الف) از آنجا که نحوه توزیع عیار کانسار در بسیاری از موارد مشخص نمی باشد، لذا بازه تغییرات n از صفر تا ۴/۵ انتخاب گردیده و تغییرات n در

Computers and Operation Research in the Minerals Industries, pp 15-18.

Ramazan S., Dagdelen K., 1998, A new push back design algorithm . Proceeding of the 17th International Symposium and equipment on Mine planning selection, Calgary, Canada, p.p 119-124.

Rezaee M, Osanloo M, and Aghajani Bazzazi A, 2009, The optimum number of open pit mine push backs, 18th International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection (MPES 2009), Banff, Alberta, Canada, pp.684-691.

Vallee M., 2000, Mineral Resource+ engineering, economic and legal feasibility=Ore reserve. CIM Bulletin, Vol. 90, pp. 53-61.

Wang Q., Sevim H., 1995, Alternative to parameterization in finding a series of maximum-metal pits for production planning. Mining Engineering, pp. 178-182.

Whittle J., 1998, Beyond optimization in open pit design, Proceedings of the first Canadian conference on computer applications in the mineral industry, pp.331-337.

William A. Hustrulid, Mark Kuchta, 1995, Open Pit Mine Planning And Design, A.A.Balkema, Rotterdam, pp. 361-366.

اصانلو، مرتضی، ۱۳۸۶، روش های استخراج معادن سطحی، دو جلدی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صفحه ۲۱۵-۲۳۲.

غلام نژاد، جواد، ۱۳۸۵، "برنامه ریزی تولید بلند مدت بهینه در معادن روباز با هدف کمینه سازی ریسک تغییرات عیار"، رساله دکترا، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صفحه ۸۶-۹۹.

Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, (Golden, co., USA). pp 288-296.

Dimitrakopoulos R, 1998, Conditional Simulation Algorithms for Modeling Ore body Uncertainty in Open Pit Optimization, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, Vol 12, pp.173-179.

Francois-Bongarcon., Guibal D. 1982, Algorithm for parameterizing reserves under different geometrical constraints. 17th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, (Golden, Co., USA). pp. 297-309.

Gershon M.E. 1987, An open pit production scheduler: algorithm and implementation. Mining Engineering, pp. 793-796.

Gholamnejad J, Osanloo M., 2007, Incorporation of ore grade uncertainty into the push back design process, Vol 107, pp. 178-185.

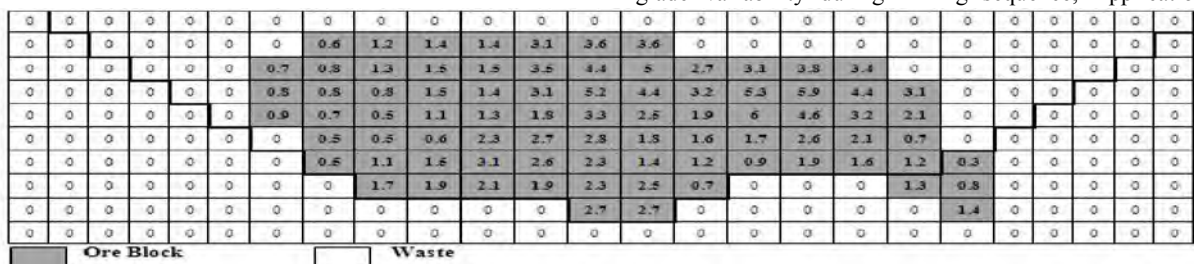
Hwang, C.L., Yoon, K., 1981, multiple attribute decision-making –methods and applications, a state-of-the-art survey, (Springer-Berlin Heidelberg: New York).

Kenneth F., Lane, 1998, Cut off grade in theory and practice Mining Journal Books limited, London.

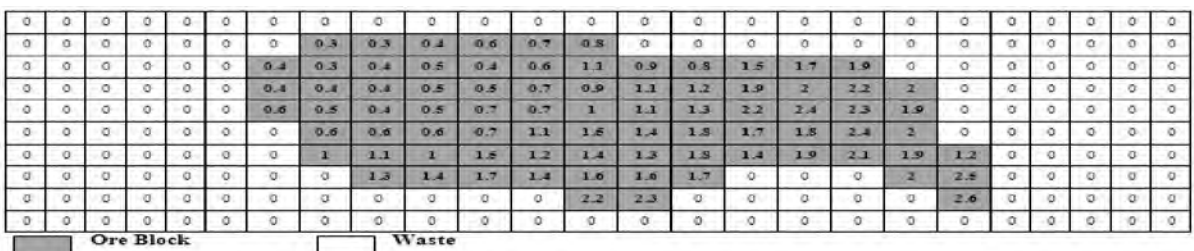
Lerchs H. and Grossman F. 1965, Optimum design of open-pit mines. Transaction CIM, Vol. 58, No.633, pp 47-54.

Osanloo M.,Gholamnejad J. and Karimi B., 2008, Long-term open pit mine production planning: a review of models and algorithms, International Journal of Mining, reclamation and Environment, Vol. 22, No. 1, pp. 3-35.

Peroni R, Costa J.F., and Kopee J., 2003, Considering in situ grade variability during mining sequence, Application of



شکل (۱) - نمای دو بعدی کانسار مس که اعداد معرف عیار بلوک ها هستند



شکل (۲) - نمای دو بعدی کانسار مس که اعداد معرف انحراف استاندارد عیار بلوک ها هستند

-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
-	-	-	-	-	-	-	1.2	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	1.1	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	1	1	1.8	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	1	1.6	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	0.8	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	1	1.4	2.3	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	-	-	-	1.3	1.8	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4	0.5	-	-	-	-	-	1.6	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

شکل (۳) - نسبت باطله برداری برای بلوک های کانسار(نتیجه الگوریتم رمضان - داگدلن)

شکل (۴) - پوش یک های طراحی شده با استفاده از الگوریتم ویتل

شکل (۵) - پیت های لانه ای به دست آمده از الگوریتم اصائلو- غلام نژاد به ازای $\Delta n=1/3$