

بهینه‌سازی نرخ تولید معادن با استفاده از بیشینه‌سازی مشروط NPV

احمد رضا صیادی^{1*}، محمد عطایی²، امیر حسن‌زاده³

1- استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، sayadi@modares.ac.ir

2- استاد دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی شاهرود، ataei@sahroodut.ac.ir

3- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت 13 تیر 1389، پذیرش 19 تیر 1390)

چکیده

نرخ تولید از جمله مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر طراحی و ارزیابی اقتصادی پروژه‌های معدنی است. عوامل متعددی نظیر متغیرهای مرتبط با مشخصات کانسار، اقتصاد بازار، اقتصاد پروژه و مسائل فنی بر نرخ تولید مؤثر می‌باشند. یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای انتخاب نرخ تولید بهینه، روش مبتنی بر بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی است. این روش منجر به نرخ تولید بسیار بالا، دوره عمر کوتاه و یا غیر معمولی می‌شود که در عمل غیر قابل دستیابی و نامطلوب است. در این تحقیق مدلی برای تعیین نرخ تولید بهینه بر اساس بیشینه‌سازی مشروط ارزش خالص فعلی و با رعایت شرایط لازم ارائه شده است. این شرایط شامل حداقل دوره عمر پروژه، حداکثر تناژ روزانه معدن‌کاری (کانسنگ و باطله) و امکان تأمین مالی پروژه است. با استفاده از داده‌های یک معدن مس، آزمون مدل در قالب یک مثال فرضی انجام شده و نرخ تولید بهینه محاسبه شده است.

کلمات کلیدی

نرخ تولید، دوره عمر، بهینه‌سازی، ارزش خالص فعلی.

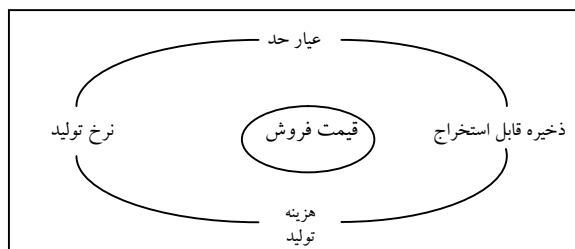
* نویسنده مسئول مکاتبات

1- مقدمه

جدول 1. عوامل مؤثر بر نرخ تولید

مشخصات فیزیکی	میزان ذخیره
کانسار	خصوصیات ژئومکانیکی
	عمق کانسار
عوامل اقتصادی	قیمت فروش محصولات
	بازار مصرف و تعادل عرضه و تقاضا
	عیار حد و عیار متوسط
	نرخ تنزیل
	حداقل نرخ بازگشت جذاب برای بازار سرمایه
	هزینه سرمایه و ساختار مالی
	هزینه سرمایه‌های و عملیاتی
	مالیات
مسائل فنی	دسترسی به زیر ساخت‌هایی مانند: انرژی،
	آب، نیروی انسانی و حمل و نقل
	روش استخراج و محدودیت‌های میزان تولید
	ابعاد و تعداد سینه کارهای استخراجی
	میزان عملیات آماده‌سازی برای رسیدن به
	تولید مورد نظر
	مدت زمان آماده سازی قبل از شروع به تولید
تجارب موجود	

قیمت تمام شده تابع نرخ تولید است به طوری که افزایش آن اغلب باعث کاهش قیمت تمام شده می‌شود. این کاهش می‌تواند منجر به کاهش عیار حد شود و در نتیجه منجر به افزایش میزان تناژ و افت عیار متوسط کانسار شود. علاوه بر این درآمد حاصل از هر تن ماده معدنی استخراجی نیز کاهش می‌یابد. در عمل، نرخ تولیدی که سود کلی را بیشینه کند از طریق سعی و خطا و مطالعات رفت و برگشتی تعیین می‌شود. هنگامی که نرخ تولید تعیین شد، طول عمر معدن نیز قابل محاسبه خواهد بود.



شکل 1. تأثیر عوامل مؤثر بر نرخ تولید

نرخ تولید یکی از عوامل مهم سودآوری پروژه است. انتخاب و تعیین اندازه کارگاه‌های استخراج، ماشین‌آلات معدن، کارخانه فرآوری و تعداد نیروی انسانی بر اساس میزان نرخ تولید صورت می‌گیرد. نرخ تولید، شرایط اقتصادی پروژه را به شدت کنترل می‌کند. هر چه نرخ تولید بزرگ‌تر باشد، میزان هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی و همچنین میزان درآمد بیش‌تر شده اما طول عمر معدن کوتاه خواهد شد. برعکس، با کوچک‌تر شدن نرخ تولید، سطح هزینه‌ها و درآمدها نیز کاهش یافته ولی دوره زمانی بهره‌برداری معدن طولانی خواهد شد. اگر نرخ تولید معدن در مقایسه با میزان ذخیره خیلی زیاد باشد، دوره زمان بهره‌برداری معدن برای بازگشت سرمایه‌گذاری اولیه خیلی کوتاه خواهد بود. همچنین فرصت کافی برای تصحیح و یا تجدید نظر در پروژه قبل از اتمام ذخیره وجود ندارد. علاوه بر این نرخ تولید بسیار زیاد به‌ویژه در شرایطی که زیر ساخت‌های منطقه مناسب نباشد، مستلزم میزان سرمایه‌گذاری زیادی است که ممکن است در توان صاحبان سرمایه نباشد. اگر نرخ تولید در مقایسه با تناژ ذخیره خیلی کوچک باشد، سود پروژه بسیار کم بوده و امکان پوشش سرمایه‌گذاری و نیز سودآوری لازم در سال‌های اولیه کم‌تر وجود دارد [1]. به‌طور معمول نرخ تولید قابل قبولی بین این دو حد وجود دارد که جریان نقدینگی منفی و مثبت را در راستای بیشینه‌کردن سودآوری پروژه، متعادل می‌کند. تحقیقات متعددی در خصوص عوامل مؤثر بر نرخ تولید معدن، چگونگی تعیین نرخ تولید معدن و همچنین بهینه‌سازی آن انجام شده است که مهم‌ترین آن‌ها منابع 2 الی 14 است. در این تحقیق ضمن تشریح عوامل مؤثر بر انتخاب نرخ تولید معدن، مدل جدیدی برای بهینه‌سازی نرخ تولید بر اساس بیشینه‌کردن مشروط ارزش خالص فعلی پروژه (NPV) ارائه شده است.

2- عوامل مؤثر بر نرخ تولید

عوامل متعددی بر میزان نرخ تولید معدن مؤثر هستند که می‌توان آن‌ها را به صورت جدول 1 خلاصه کرد. از میان این عوامل، پارامترهای میزان ذخیره، قیمت تمام شده تولید (هزینه واحد تولید)، قیمت فروش و عیار حد اهمیت بیشتری دارند. به جز عامل قیمت، سایر عوامل ذکر شده نیز خود تابع نرخ تولید بوده و تغییر می‌کنند (شکل 1).

3- روش‌های تعیین نرخ تولید

به‌طور کلی در انتخاب نرخ تولید معادن تاکنون روش‌های متعددی نظیر قواعد تجربی و روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده‌اند.

3-1- قواعد تجربی

این قواعد اغلب در ارتباط با مشخصات فیزیکی کانسار (تناژ و عمق) و یا ویژگی‌های اقتصادی پروژه (جریان نقدینگی، طول عمر پروژه، بازار مصرف و ...) می‌باشند. کلیه قواعد تجربی بر تجارب عملی مبتنی بوده و امکان تعارض و تناقض در آن‌ها وجود دارد. این قواعد می‌توانند دامنه مناسبی از گزینه‌های نرخ تولید را ارائه کنند. این روش‌ها در مراحل مطالعات پیش امکان‌سنجی کارایی قابل قبولی دارند.

3-1-1- قواعد تجربی مبتنی بر ویژگی‌های فیزیکی

در این زمینه در مراجع [3، 4، 15] روابطی جهت انتخاب نرخ تولید ارائه شده است. تیلور [3] با بررسی رابطه میزان ذخیره (R) و نرخ تولید مجموعه‌ای از معادن مشاهده کرد که طول عمر معدن با ریشه چهارم تناژ ذخیره و نرخ تولید با توان سه-چهارم ذخیره متناسب است. وی روابط زیر را برای تعیین نرخ تولید سالیانه، نرخ تولید روزانه و طول عمر معدن (سال) ارائه کرده است (با فرض 350 روز در سال):

$$(1) \quad \text{نرخ تولید سالانه} = 5 (R)^{0.75}$$

$$(2) \quad \text{نرخ تولید روزانه} = 0.014 (R)^{0.75}$$

$$(3) \quad \text{طول عمر معدن} = 0.2 (R)^{0.25}$$

Zwiagin با بررسی رابطه میزان ذخیره (R) و تولید مجموعه‌ای از معادن زیرزمینی ذغال‌سنگ مشاهده کرد که نرخ تولید با توان یک دوم ذخیره متناسب است [4]. وی رابطه زیر را برای تعیین نرخ تولید سالیانه معادن زیرزمینی ذغال سنگ ارائه کرده است:

$$(4) \quad \text{نرخ تولید سالانه} = 390 (R)^{0.5}$$

Tatman با بررسی 60 کانسار، یک رابطه تجربی برای تعیین نرخ تولید معادن زیرزمینی (در کانسارهای رگه‌ای باریک و پرشیب) بر اساس نرخ پیشروی عمودی سالانه ارائه کرد [10]. در این روش نرخ تولید سالانه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$(5) \quad \text{نرخ تولید} = \text{Rate factor} \times \text{Rate multiplier}$$

در این فرمول Rate factor، تناژ تولید در هر متر عمودی و Rate multiplier ضریبی تجربی است که با توجه به ضخامت رگه و ریسک طرح معدن تعیین می‌شود.

صیادی و همکاران یک پایگاه داده در خصوص معادن فلزی (آهن، مس، سرب-روی و طلا) در سطح جهانی تهیه و رابطه بین نرخ تولید و ذخیره قابل استخراج را بررسی نمودند [14]، [15]. نتایج اخذ شده نشان می‌دهد که نرخ تولید تابعی غیر خطی از تناژ ذخیره (R) بوده و این توان برای مواد معدنی مختلف در دامنه 0/57-0/74 تغییر می‌کند:

$$(6) \quad (R)^{0.738} = 0.252 \quad \text{نرخ تولید سالانه در معادن آهن}$$

$$(7) \quad (R)^{0.694} = 0.301 \quad \text{نرخ تولید سالانه در معادن مس}$$

$$(8) \quad (R)^{0.572} = 0.388 \quad \text{نرخ تولید سالانه در معادن سرب و$$

$$(9) \quad (R)^{0.709} = 0.276 \quad \text{نرخ تولید سالانه در معادن طلا}$$

قواعد دیگری نیز در خصوص معادن زیرزمینی و ذخایر رگه‌ای با پهنای کم ارائه شده که می‌توان به مواردی هم چون 1000 تن در روز به ازای هر 1000 اینچ از گسترش قائم کانسار، 500 تن در روز به ازای هر 1000 اینچ از گسترش قائم کانسار و یا 1 طبقه در سال بر اساس 100 تا 150 اینچ به ازای هر طبقه اشاره کرد [9].

3-1-2- قواعد تجربی مبتنی بر ویژگی‌های اقتصادی

جنبه‌ها و پارامترهای مختلف اقتصادی معادن استخراجی به نکات و قواعد تجربی متعددی در رابطه با انتخاب نرخ استخراج معادن منتهی شده است. برخی از این جنبه‌ها عبارتند از: بزرگی جریان نقدینگی، دوره بازگشت سرمایه، حداقل طول عمر معدن، حداقل ذخیره و تولید در معادن اقتصادی، رابطه طول عمر معدن و دوره زمانی سیکل قیمت فلزات، تقاضای بازار، منابع مالی در دسترس و غیره. در اینجا برخی از قواعد تجربی که بر اساس ویژگی‌های اقتصادی مشاهده شده در معادن به‌دست آمده‌اند و در منبع [9] جمع‌بندی شده، ذکر می‌شود:

1. جریان نقدینگی باید آن قدر بزرگ باشد که حداقل بتواند دو برابر هزینه سرمایه‌گذاری را بازگشت دهد (یک قاعده بانکی).
2. جریان نقدینگی، باید در یک دوره چند ساله (2 تا 3 ساله) هزینه سرمایه‌گذاری را بازگشت دهد (یک قاعده سرمایه‌گذاری، هر چند که نقطه نظرات متفاوت وجود دارد).

- بهینه‌سازی نرخ تولید به کمک بیشینه‌سازی نسبت ارزش فعلی جریان نقدینگی مثبت (PVOUT³) به ارزش فعلی جریان نقدینگی منفی (PVIN⁴) پروژه [2].

- تعیین نرخ تولید بهینه با استفاده از آنالیز حاشیه‌ای: در این روش نرخ تولید بهینه، نقطه‌ای است که ارزش خالص فعلی هزینه‌های حاشیه‌ای (PVMC⁵) و درآمدهای حاشیه‌ای (PVMR⁶) ناشی از افزایش تولید برابر باشد [12]. در حالی که معیار بهینه‌سازی استفاده شده توسط ولز در روش قبلی به ماکزیمم نسبت PVOUT/PVIN اشاره دارد، تحلیل حاشیه‌ای ارائه شده در این روش به اختلاف بین PVMC و PVMR معطوف است.

- روش **Option pricing**: این روش به عنوان یکی از روش‌های نوین ارزیابی اقتصادی در انتخاب نرخ تولید بهینه در معادن پیشنهاد شده است [6, 8, 16].

4- بهینه‌سازی نرخ تولید با استفاده از بیشینه‌سازی مشروط ارزش خالص فعلی

به نظر می‌رسد نرخ تولیدی که ارزش خالص فعلی را بیشینه می‌کند، نرخ تولید بهینه است ولی ارزش خالص فعلی بیشینه می‌تواند به نرخ تولید بسیار زیاد (دوره عمر خیلی کوتاه) و یا غیر معمولی در چارچوب پروژه‌های معدنی منجر شود.

در برخی منابع نظیر [3, 9, 17] نیز همین نظریه مطرح شده است. نرخ تولید بسیار بالا، غیر عملی و غیر مطلوب است زیرا طول عمر پروژه آن قدر کوتاه است که احتمال شکست اقتصادی را زیاد کرده و امکان مقابله با نوسانات کوتاه مدت قیمت را سلب می‌کند. علاوه بر این، دوره زمانی کوتاه، مزایای اجتماعی منطقه‌ای کمینه‌ای دارد. بنابراین نرخ تولیدی به عنوان بهینه می‌تواند قابل قبول باشد که از یک طرف یک حداقل عمر پروژه را تامین کند و از طرف دیگر دارای NPV بیشینه نیز باشد.

همچنین برای این که نرخ تولید بهینه قابلیت اجرایی داشته و در عمل قابل استفاده باشد، باید حداکثر قابلیت معدن‌کاری (کان‌سنگ و باطله)، توانایی تأمین مالی پروژه و تعداد روزهای کاری در سال را نیز تأمین کند. در این راستا نرخ تولید بهینه باید به صورت مشروط انتخاب شود. نرخ تولیدی به عنوان نرخ تولید بهینه محسوب می‌شود که ضمن رعایت محدودیت‌های زیر، ارزش خالص فعلی بیشینه را نیز داشته باشد.

- حداقل عمر معدن (Y)
- حداکثر تناژ معدن‌کاری شده در روز (e)

3. میزان حداقل تولید 100000 اونس برای معادن بزرگ طلا (و حداقل 1000000 اونس ذخیره طلا در کانسار) (یک قاعده بانکی).

4. یک دوره عمر حداقل 7 (یا 10 ساله) برای بهره‌برداری معدن. این دوره، زمان کافی برای توسعه و بهره‌برداری معدن را فراهم می‌کند.

5. طول عمر معدن باید متناسب با دوره قیمت فلزات تعیین شود. البته نظرات بسته به بزرگی دوره قیمت فلزات متفاوت است. بهتر است که زمان باقیمانده دوره قیمت در هنگام شروع تولید معدن در نظر گرفته شود.

6. تولید سالانه نباید از میزان تقاضای بازار تجاوز کند. به طور معمول این موضوع شامل فلزات گران‌بها و پایه نمی‌شود (در یک حد منطقی) ولی در خصوص کانی‌های صنعتی مطرح است.

7. میزان هزینه سرمایه‌گذاری نباید از منابع مالی مالکین معدن تجاوز کند. پروژه‌های متعددی وجود دارد که میزان نرخ تولید خود را براساس میزان سرمایه قابل دسترس خود تعیین کرده‌اند.

2-2- روش‌های تعیین نرخ تولید بهینه

از جمله روش‌های ارائه شده جهت بهینه‌سازی نرخ تولید می‌توان روش‌های زیر را بیان کرد:

- روش‌های مبتنی بر بیشینه‌کردن ارزش خالص فعلی (NPV¹): در این روش‌ها، نرخ تولیدی جستجو می‌شود که با انتخاب آن، ارزش خالص فعلی و یا نرخ بازگشت داخلی پروژه به حد بیشینه خود برسند [3, 6, 9].

- روش مبتنی بر تعیین دامنه بهینه نرخ تولید: در این روش دو کرانه بالایی و پایینی برای نرخ تولید مطلوب تعیین می‌شود [9]. در کرانه پایینی نرخ تولیدی مد نظر است که جریان نقدینگی حاصل از آن، حداقل بیش از دو برابر میزان هزینه سرمایه‌گذاری را بازگشت دهد. کرانه بالایی نرخ تولید متناظر با ارزش خالص فعلی بیشینه است.

- روش مبتنی بر بیشینه کردن ارزش خالص آینده (NFV²): این روش مشابه روش اول بوده ولی به جای NPV از معیار NFV استفاده می‌شود [5]. این روش بعدها توسط Hajdasinski نقد [7] و ثابت شد که برای بهینه‌سازی عمر معدن، معیار NPV اعتبار بیش‌تری نسبت به NFV دارد.

$$C = \begin{bmatrix} C_{1,1} & \mathbf{L} & C_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ C_{n,1} & \mathbf{L} & C_{n,m} \end{bmatrix} \quad C_{i,j} = \frac{R_i}{j} \quad j \leq 30$$

J : تعداد سال‌های عمر پروژه است.

گام 4- اعمال محدودیت‌ها برای بهینه سازی مشروط

گام 4-1- محدودیت حداقل طول عمر معدن

تعداد سال‌های عمر پروژه با توجه به مطالعات امکان‌سنجی و حداقل عمر معادن بین 4 تا 30 سال متغیر در نظر گرفته شده است.

به ازای هر R_i و C_{ij} ، طول عمر L_{ij} قابل محاسبه است.

$$L = \begin{bmatrix} L_{1,1} & \mathbf{L} & L_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ L_{n,1} & \mathbf{L} & L_{n,m} \end{bmatrix} \quad L_{ij} = \frac{R_i}{C_{ij}}$$

به منظور اعمال محدودیت حداقل عمر، مولفه‌های (L_{ij}) ماتریس L با مقدار ثابت Y ، مقایسه شده و ماتریس ارض‌کننده این محدودیت (L') به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$L' = \begin{bmatrix} L'_{1,1} & \mathbf{L} & L'_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ L'_{n,1} & \mathbf{L} & L'_{n,m} \end{bmatrix} \quad L'_{ij} = \begin{cases} 0 & L_{ij} < Y \\ 1 & L_{ij} \geq Y \end{cases}$$

و بدین ترتیب ماتریس ارضا شده نرخ تولید (C') با این محدودیت قابل محاسبه است.

$$C' = \begin{bmatrix} C'_{1,1} & \mathbf{L} & C'_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ C'_{n,1} & \mathbf{L} & C'_{n,m} \end{bmatrix} \quad C'_{ij} = C_{ij} \times L'_{ij}$$

گام 4-2- محدودیت حداکثر تناژ کانسنگ و باطله استخراج شده

با توجه به تعداد روزکاری در سال (d) می‌توان نرخ تولید روزانه (E_{ij}) به ازای هر نرخ تولید سالانه (C_{ij}) را محاسبه کرد.

$$E = \begin{bmatrix} E_{1,1} & \mathbf{L} & E_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ E_{n,1} & \mathbf{L} & E_{n,m} \end{bmatrix} \quad E_{ij} = \begin{cases} 0 & C' = 0 \\ \frac{C'_{ij}}{d} \times (t_i + 1) & C' \neq 0 \end{cases}$$

• حداکثر منابع مالی در دسترس (F_m)

• تعداد روز کاری در سال (d)

در این تحقیق سعی شده تأثیر متقابل عیار حد (g_c) ، میزان ذخیره (R) ، نرخ تولید (C) و هزینه‌های پروژه نیز در مدل اعمال شود. بدین منظور یک زوج عیار حد- نرخ تولید با هدف به‌دست آوردن بهترین نتایج اقتصادی (ارزش خالص فعلی بیشینه) جستجو می‌شود. این جستجو به شکل مرحله‌ای بوده و ضمن تعیین مجموعه گزینه‌های ممکن ذخیره - نرخ تولید، (جدول 2) قیود بهینه‌سازی به صورت تدریجی اعمال شده و نرخ تولید بهینه تعیین می‌شود. انتخاب نرخ تولید بهینه در قالب 7 مرحله به صورت زیر انجام می‌شود:

گام 1- انتخاب یک عیار حد اولیه (g_{c1}) و نمو آن تا یک عیار حد نهایی (g_{cn})

$$g_c = \begin{bmatrix} g_{c1} \\ g_{c2} \\ \mathbf{M} \\ g_{cn} \end{bmatrix}$$

گام 2- محاسبه ذخیره (R_i) و عیار متوسط (\bar{g}) به ازای هر عیار حد

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \mathbf{M} \\ R_n \end{bmatrix}, \quad R_i = f_1(g_{ci})$$

$$\bar{g} = \begin{bmatrix} \bar{g}_1 \\ \bar{g}_2 \\ \mathbf{M} \\ \bar{g}_n \end{bmatrix}, \quad \bar{g}_i = f_2(g_{ci}), \quad \left(\frac{W}{O}\right) = T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \mathbf{M} \\ t_n \end{bmatrix}$$

توابع f_1 و f_2 با توجه به مطالعات تعیین ذخیره و نمودار تناژ-عیار حد تعیین می‌شوند. در این مرحله با در نظر گرفتن روش استخراج می‌توان نسبت W/O و در نتیجه ذخیره قابل استخراج را محاسبه کرد.

گام 3- تعیین دامنه نرخ تولید

در این مرحله به ازای هر کدام از گزینه‌های ذخیره (R_i) ، مجموعه‌ای از نرخ تولیدهای ممکن C_1 تا C_n به صورت زیر تعیین می‌شود.

گام 5-1- محاسبه درآمد

درآمد به ازای هر تن کانسنگ (\bar{I}_{ij}) تابع عیار متوسط (\bar{g}_{ij})، میزان بازیابی در مراحل استخراج (r_1)، فرآوری (r_2) و ذوب (r_3)، قیمت فلز (P) و هزینه‌های ذوب و پالایش (F) و حمل و نقل (T) است.

$$\bar{I} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{1,1} & \mathbf{L} & \bar{I}_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ \bar{I}_{n,1} & \mathbf{L} & \bar{I}_{n,m} \end{bmatrix}$$

$$\bar{I} = \begin{cases} 0 & C'' = 0 \\ \bar{g}_1 \times r_1 \times r_2 \times r_3 \times P - T - F & C'' \neq 0 \end{cases}$$

درآمد سالیانه از حاصل ضرب نرخ تولید سالیانه (C_{ij}) در ارزش هر تن کانسنگ به دست می‌آید.

$$I = \bar{I} \times C'' = \begin{bmatrix} I_{1,1} & \mathbf{L} & I_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ I_{n,1} & \mathbf{L} & I_{n,m} \end{bmatrix} \quad I_{ij} = \bar{I}_{ij} \times C''_{ij}$$

گام 5-2- برآورد هزینه عملیاتی سالیانه

هزینه عملیاتی سالیانه (OC_{ij}) تابع نرخ تولید سالیانه (C_{ij}) است.

$$OC = \begin{bmatrix} OC_{1,1} & \mathbf{L} & OC_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ OC_{n,1} & \mathbf{L} & OC_{n,m} \end{bmatrix}$$

$$OC_{ij} = \begin{cases} 0 & C'' = 0 \\ f_2(C''_{n,m}) & C'' \neq 0 \end{cases}$$

گام 5-3- محاسبه NPV

ارزش خالص فعلی با توجه به درآمد سالیانه (I_{ij})، هزینه‌های سرمایه‌ای (Cc_{ij}) و عملیاتی، نرخ تنزیل (r) و طول عمر معدن (L_{ij}) محاسبه می‌شود.

$$NPV = \begin{bmatrix} NPV_{1,1} & \mathbf{L} & NPV_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ NPV_{n,1} & \mathbf{L} & NPV_{n,m} \end{bmatrix}$$

برای در نظر گرفتن محدودیت حداکثر تناژ معدن کاری شده در روز، ماتریس ارضا کننده (E') به صورت زیر به دست می‌آید.

$$E' = \begin{bmatrix} E'_{1,1} & \mathbf{L} & E'_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ E'_{n,1} & \mathbf{L} & E'_{n,m} \end{bmatrix} \quad E'_{ij} = \begin{cases} 0 & E_{ij} > e \\ 1 & E_{ij} \leq e \end{cases}$$

با استفاده از ماتریس E' ، ماتریس ارضاشده این محدودیت حاصل می‌شود.

$$C'' = \begin{bmatrix} C''_{1,1} & \mathbf{L} & C''_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ C''_{n,1} & \mathbf{L} & C''_{n,m} \end{bmatrix} \quad C''_{ij} = C'_{ij} \times E'_{ij}$$

گام 4-3- محدودیت حداکثر منابع مالی در دسترس

هزینه سرمایه‌ای (Cc_{ij}) تابع نرخ تولید (C_{ij}) بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Cc = \begin{bmatrix} Cc_{1,1} & \mathbf{L} & Cc_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ Cc_{n,1} & \mathbf{L} & Cc_{n,m} \end{bmatrix} \quad Cc_{ij} = \begin{cases} 0 & C''_{ij} = 0 \\ f_2(C''_{ij}) & C''_{ij} \neq 0 \end{cases}$$

برای اعمال محدودیت حداکثر منابع مالی در دسترس (F_m)، ماتریس ارضا کننده Cc' به صورت زیر به دست می‌آید.

$$Cc' = \begin{bmatrix} Cc'_{1,1} & \mathbf{L} & Cc'_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ Cc'_{n,1} & \mathbf{L} & Cc'_{n,m} \end{bmatrix} \quad Cc'_{ij} = \begin{cases} 0 & Cc_{ij} > F_m \\ 1 & Cc_{ij} \leq F_m \end{cases}$$

به کمک ماتریس Cc' ، ماتریس ارضاشده نرخ تولید توسط محدودیت دسترسی به منابع مالی، تعیین می‌شود.

$$C''' = \begin{bmatrix} C'''_{1,1} & \mathbf{L} & C'''_{1,m} \\ \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ C'''_{n,1} & \mathbf{L} & C'''_{n,m} \end{bmatrix} \quad C'''_{ij} = C''_{ij} \times Cc'_{ij}$$

گام 5- محاسبه شاخص‌های اقتصادی

میزان درآمد سالانه (I_{ij}) و هزینه‌های عملیاتی (OC_{ij}) برای هر گزینه تولید برآورد شده و با در نظر گرفتن نرخ تنزیل مناسب (r)، مقدار NPV محاسبه می‌شود.

مشخصات کانسار فرضی:

- تناژ ذخیره: تناژ کانسار تابعی از عیار حد بوده و بالغ بر 318 میلیون با فرض عیار حد 0/45 درصد (عیار متوسط 0/74 درصد) و 488 میلیون تن با فرض عیار حد 0.1 درصد (عیار متوسط 0/57 درصد) برآورد می شود.

محدودیت های در نظر گرفته شده شامل:

حداقل عمر: 9 سال

حداکثر ماده معدنی و باطله معدن کاری شده: 170 هزار تن در

روز

حداکثر منابع مالی در دسترس: 800 میلیون دلار آمریکا

تعداد روزهای کاری در سال: 300 روز

سایر اطلاعات:

نرخ تنزیل: 10%

قیمت مس: قیمت 6000 دلار آمریکا فرض شده ولی میزان آن

در مدل قابل تغییر بوده و تأثیر آن از طریق مطالعات تحلیل

حساسیت قابل بررسی است.

$$NPV_{ij} = \begin{cases} 0 & C''' = 0 \\ \sum_{k=0}^{L_{ij}} \left(\frac{I_{ij} - Oc_{ij}}{(1+r)^k} \right) - Cc_{ij} & C''' \neq 0 \end{cases}$$

گام 6- تعیین NPV پیشینه مشروط (NPV_m)

ارزش خالص فعلی پیشینه مشروط بر اساس ماتریس NPV به دست می آید.

$$NPV_m = \text{Max} (NPV_{ij})$$

گام 7- تعیین نرخ تولید بهینه

نرخ تولید بهینه (C_{ijop}), نرخ تولید متناظر با NPV

پیشینه مشروط است.

$$NPV_{ij} = NPV_m \Rightarrow C_{ijop} = C_{ij}$$

5- مثال فرضی

برای آزمون مدل از داده های یک معدن مس پورفیری استفاده

شده است و نرخ تولید بهینه نیز برای یک مثال فرضی

محاسبه شد. این میزان برابر 17 میلیون تن در سال به دست

آمده است.

جدول 2. گزینه های عیار حد - نرخ تولید

ارزش خالص فعلی یا نرخ بازگشت داخلی				مشخصات کانسار		
نرخ تولید				عیار متوسط	عیار حد	میزان کانسنگ
C _n	....	C ₂	C ₁	\bar{g}_1	g _{c1}	R ₁
NPV _{n,1}	....	NPV _{2,1}	NPV _{1,1}	\bar{g}_2	g _{c2}	R ₂
NPV _{n,2}	....	NPV _{2,2}	NPV _{1,2}	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
NPV _{n,n}	....	NPV _{2,n}	NPV _{1,n}	\bar{g}_n	g _{cn}	R _n

$$\bar{g}(\%) = \begin{bmatrix} 0.570 \\ 0.640 \\ 0.670 \\ 0.713 \\ 0.740 \end{bmatrix} \quad R(Mt) = \begin{bmatrix} 488 \\ 416 \\ 388 \\ 345 \\ 318 \end{bmatrix} \quad t = \begin{bmatrix} 1.35 \\ 1.49 \\ 1.63 \\ 1.67 \\ 1.72 \end{bmatrix} \quad g_c(\%) = \begin{bmatrix} 0.10 \\ 0.20 \\ 0.25 \\ 0.35 \\ 0.45 \end{bmatrix}$$

$$C(Mt/y) = \begin{bmatrix} 122 & 98 & \dots & 27 & 26 & 24 & \dots & 17 & 16 \\ 104 & 83 & \dots & 23 & 22 & 21 & \dots & 14 & 13 \\ 97 & 78 & \dots & 22 & 20 & 19 & \dots & 13 & 12 \\ 86 & 69 & \dots & 19 & 18 & 17 & \dots & 12 & 11 \\ 80 & 64 & \dots & 18 & 17 & 16 & \dots & 11 & 10 \end{bmatrix}$$

$$L(y) = \begin{bmatrix} 4 & 5 & \dots & 18 & 19 & 20 & \dots & 29 & 30 \\ 4 & 5 & \dots & 18 & 19 & 20 & \dots & 29 & 30 \\ 4 & 5 & \dots & 18 & 19 & 20 & \dots & 29 & 30 \\ 4 & 5 & \dots & 18 & 19 & 20 & \dots & 29 & 30 \\ 4 & 5 & \dots & 18 & 19 & 20 & \dots & 29 & 30 \end{bmatrix} \quad L' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C'(MT/y) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 27 & 26 & 24 & \dots & 17 & 16 \\ 0 & 0 & \dots & 23 & 22 & 21 & \dots & 14 & 13 \\ 0 & 0 & \dots & 22 & 20 & 19 & \dots & 13 & 12 \\ 0 & 0 & \dots & 19 & 18 & 17 & \dots & 12 & 11 \\ 0 & 0 & \dots & 18 & 17 & 16 & \dots & 11 & 10 \end{bmatrix}$$

$$E(Tt/d) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 298 & 204 & 204 & \dots & 157 & 133 \\ 0 & 0 & \dots & 266 & 183 & 183 & \dots & 141 & 125 \\ 0 & 0 & \dots & 263 & 175 & 175 & \dots & 140 & 123 \\ 0 & 0 & \dots & 214 & 151 & 151 & \dots & 116 & 98 \\ 0 & 0 & \dots & 218 & 154 & 154 & \dots & 118 & 100 \end{bmatrix} \quad E' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C''(Mt/y) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 17 & 16 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 14 & 13 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 13 & 12 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 18 & 17 & \dots & 12 & 11 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 17 & 16 & \dots & 11 & 10 \end{bmatrix}$$

$$Cc(M\$) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 810 & 686 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 643 & 612 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 624 & 593 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 760 & 740 & \dots & 593 & 542 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 734 & 711 & \dots & 557 & 510 \end{bmatrix} \quad Cc' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C''(Mt/y) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 16 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 14 & 13 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 13 & 12 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 18 & 17 & \dots & 12 & 11 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 17 & 16 & \dots & 11 & 10 \end{bmatrix}$$

$$\bar{I}(\$) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 20.8 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 23.4 & 23.4 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 24.4 & 24.4 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 26 & 26 & \dots & 26 & 26 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 27 & 27 & \dots & 27 & 27 \end{bmatrix} \quad I(M\$) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 333 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 327 & 304 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 318 & 294 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 468 & 442 & \dots & 312 & 286 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 459 & 432 & \dots & 297 & 270 \end{bmatrix}$$

$$OC(M\$) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 223 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 206 & 195 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 197 & 186 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 248 & 240 & \dots & 187 & 177 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 241 & 232 & \dots & 176 & 164 \end{bmatrix} \quad NPV(M\$) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 319 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 446 & 377 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 463 & 386 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 982 & 890 & \dots & 525 & 441 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 991 & 901 & \dots & 534 & 445 \end{bmatrix}$$

$$NPV_m = 991 \text{ MUS\$}$$

$$991 \text{ MUS \$} = NPV_{ij} \Rightarrow C_{ij_{op}} = 17 \text{ (Mt/y)}$$

6- نتیجه گیری

نرخ تولید بهینه منجر به نرخ تولید بسیار زیاد و در نتیجه دوره عمر کوتاه می شود. این نرخ تولید غیرعملی بوده و باعث ریسک شکست بالایی می شود. همچنین نرخ تولید زیاد به حجم سرمایه اولیه بسیار بالا، امکانات زیربنایی گسترده، نیاز دارد. همچنین دوره عمر بسیار کوتاه، خسارات زیست محیطی و فواید اجتماعی محدودی دارد.

- مدل ارائه شده در این تحقیق، مکملی بر روش های مبتنی بر پیشینه سازی ارزش خالص فعلی بوده و با اعمال محدودیت

- نرخ تولید یکی از مهم ترین مولفه های تأثیرگذار بر طراحی و در نتیجه سودآوری پروژه است که متأثر از عوامل متعددی نظیر عیار حد، میزان ذخیره، هزینه های تولید و قیمت فروش، است. این امر باعث می شود که فرآیند انتخاب نرخ تولید پیچیده شده و در قالب یک محاسبات رفت و برگشتی صورت گیرد.

- روش های متعددی برای انتخاب نرخ تولید ارائه شده است. روش مبتنی بر پیشینه سازی ارزش خالص فعلی برای تعیین

- [9] Smith, L.D; 1997; "A critical examination of methods and factors affecting the selection of an optimum production rate, CIM Bulletin, Vol. 90, PP 48-54.
- [10] Tatman, C. R.; 2001; "Production-rate selection for steeply dipping tabular deposits", Mining Engineering, Vol. 53, No. 10, PP: 62-64.
- [11] Crowson, P.; 2003; " Mine size and the structure of costs, resources policy", Vol 29, PP 15-36
- [12] Sabour, S. A.; 2002; Mine size optimization using marginal analysis", Resources policy, Vol. 28, Issue 3-4, PP 145-151.
- [13] Ding, B., *et al.*;2007; "Defining the production scale of an underground mine", The international journal of mineral resources engineering, Vol.12, No.1, PP 1-19.
- [14] صیادی ا.ر، عطایی م، حسن زاده، ا.؛ 1386؛ "طراحی و تهیه بانک اطلاعاتی جهت انتخاب نرخ تولید معادن فلزی؛ بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین.
- [15] صیادی ا.ر، عطایی م، حسن زاده، ا.؛ 1387؛ "ارائه روابط تجربی برای تعیین نرخ تولید معادن"؛ دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران.
- [16] Palm S.K., *et al*; 1986; "Option pricing: a new approach to mine valuation", CIM Bulletin, Vol. 79, PP 61-66.
- [17] Matheron G., and Formery P.; 1963;"Recherche d'optimum, dans la reconnaissance et la mise en exploitation des gisements miniers", Annales des Mines, avril, PP 23-42, mai PP 11-30.
- حداقل طول عمر، امکان تأمین مالی و تناژ کانسنگ و باطله تولیدی، مشکلات موجود را حل می کند.
مراجع
- [1] O'Hara, A. *et al*; 1992; "Cost and cost estimation", SME Mining engineering handbook, AIM, Ch. 6.3, PP 405-424.
- [2] Wells, H.M.; 1978; "Optimizing of mining engineering design in mineral valuation", Mining Engineering, Vol. 30, No.12, PP 1676-1684.
- [3] Taylor, H.K; 1986; "Rates of working of mines, a simple rule of thumb", trans. Inst. Of Mining and Metallurgy, Vol. 95, PP A203-A204.
- [4] Arioglou, E.; 1988; "Examination of empirical formulate for prediction of optimum mine output", Trans., Inst. of Mining and Metallurgy, Section A, Vol. 97, PP A54- A55.
- [5] Li, Z.; 1989; "A theoretical approach to determination of mine life and design capacity", International Journal of Surface mining, Vol. 3, PP 49-50.
- [6] Cavender, B.; 1992; "Determination of optimum lifetime of a mining project using discounted cash flow and option pricing techniques", Mining Eng., Vol. 44, PP 1263-1268.
- [7] Hajdasinski, M.; 1995; "Optimization mine life and design capacity", International Journal of Surface mining, Vol. 9. No. 1, PP 23-30.
- [8] Armstrong M. and Galli A.; 1997; "Option pricing: a new approach to valuing mining projects", CIM Bulletin, Vol. 90, PP 37-34.

پی نوشت

¹ Net Present Value (NPV)² Net Future Value (NFV)³ Present Value of Positive Cash flow (PVOU)⁴ Present Value of Negative Cash flow (PVIN)⁵ Present Value of Marginal Costs (PVMC)⁶ Present Value of Marginal Revenues (PVMR)