

## تأثیر ظرفیت معدن کاری، فرآوری، و بازاریابی بر روی رابطه قیمت - عیار حد بهینه در معادن روباز

احمد جعفر نژاد<sup>۱</sup>، علی اصغر خدایاری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشگاه تهران، دانشکده مدیریت، jafarnjd@ut.ac.ir

۲- دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن، khodaiar@ut.ac.ir

(دریافت ۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۹، پذیرش ۲۹ خرداد ۱۳۹۰)

### چکیده

وقتی در یک معدن روباز طراحی شده هدف از بهینه سازی عیار حد بیشینه سازی ارزش فعلی باشد، قیمت تأثیر تعیین کننده ای بر روی عیار حد بهینه کارخانه دارد. در این مقاله با فرض هدف پیش گفته، رابطه بین عیار حد بهینه و قیمت در ظرفیت های مختلف معدن کاری، فرآوری، و بازاریابی مورد بررسی قرار گرفت. برای نشان دادن چگونگی این رابطه از یک معدن فرضی استفاده گردید. برای پیدا کردن عیار حد بهینه در حالت های مختلف یک مدل پژوهش عملیاتی غیرخطی صورت بندی شده، و سپس برای حل مدل از برنامه Solver در نرم افزار Excel استفاده شد. نتایج حاصل از پژوهش نشان می دهد که منحنی تغییرات عیار حد بهینه نسبت به قیمت، وقتی هدف بیشینه سازی ارزش فعلی است، بسته به ظرفیت عملیات ها ممکن است نزولی، صعودی یا ثابت باشد. منحنی تغییرات بیشینه مقدار ارزش خالص فعلی نسبت به قیمت همواره صعودی است

### کلمات کلیدی

عیار حد بهینه، معدن روباز، رابطه قیمت - عیار حد بهینه

## ۱- مقدمه

یکی از بحرانی‌ترین پارامترها در عملیات معدن‌کاری، عیارحد است. تیلور عیارحد را به‌عنوان هر عیاری که به‌هر دلیل خاص برای تفکیک دو نوع فعالیت بر روی مواد (مثل معدن‌کاری یا عدم معدن‌کاری، ارسال به کارخانه یا عدم ارسال به کارخانه، ...) مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعریف کرده است [۱] و [۲].

در جای دیگری عیارحد به‌عنوان عیاری که بین کانسنگ و باطله تمایز ایجاد می‌کند، تعریف شده است [۳]. بخشی از مواد درون ذخیره که دارای عیار بالاتر از عیارحد هستند، کانسنگ در نظر گرفته شده و به کارخانه فرآوری ارسال می‌گردند، و بقیه مواد که عیار آن‌ها کم‌تر از عیارحد است، به انباشتگاه باطله فرستاده می‌شوند [۳] و [۴]. هرچند، این ابهام وجود دارد که موادی که امروز به‌عنوان باطله طبقه‌بندی می‌گردند، ممکن است در آینده قابلیت اقتصادی پیدا کرده و قابل ارسال به کارخانه فرآوری باشند [۵].

در عمل برای اهداف مختلف عملیاتی عیارهای حد متفاوتی تعریف می‌گردد [۶]. یکی از این عیارها که تعیین آن از جمله اولین تصمیماتی است که باید پس از تعیین محدوده نهایی معدن روباز<sup>۱</sup> در چارچوب برنامه‌ریزی تولید، گرفته شود، عیارحد کارخانه است. عیارحد کارخانه را به‌عنوان عیاری که در یک کاواک طراحی شده مفروض برای تفکیک کانسنگ<sup>۲</sup> و باطله<sup>۳</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعریف کرده‌اند.

عیارحد پایه‌ای را برای تعیین تناژ کانسنگ و باطله فراهم آورده و به این ترتیب مستقیماً بر گردش نقدینگی عملیات معدنی تأثیر می‌گذارد. عیارحد بالاتر موجب افزایش عیار متوسط کانسنگ ورودی به کارخانه شده و در نتیجه موجب تحقق ارزش خالص بیش‌تری از واحد کانسنگ می‌گردد [۷].

برخی از پژوهشگران برای تعریف کانسنگ، معیار عیارحد سربه‌سری<sup>۴</sup> را، به‌عنوان ماده‌ای که قادر به پرداخت هزینه‌های معدن‌کاری و فرآوری خود می‌باشد، مورد استفاده قرار داده‌اند. هرچند، این ملاک به عیارحد بهینه منجر نمی‌شود [۸].

از آنجایی که عیارحد می‌تواند به‌طور مستقیم بر هدف موردنظر از عملیات تأثیر بگذارد، لذا تلاش برای انتخاب عیارحد بهینه از اهمیت بالایی برخوردار است. عیارحد بهینه تحت تأثیر تمام جنبه‌های فنی معدن‌کاری از قبیل ظرفیت معدن‌کاری، ظرفیت کارخانه، شکل هندسی کانسار و زمین‌شناسی آن قرار دارد [۹].

عیارحد، وقتی که هدف از بهینه‌سازی آن بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی یا نقدینگی باشد، شدیداً تحت تأثیر تغییرات قیمت قرار دارد، و یکی از موضوعات مورد ابتلای مدیریت شرکت‌های معدنی تعیین چگونگی تغییر عیارحد در پاسخ به تغییرات قیمت می‌باشد [۱۰] و [۱۱].

نوسانات قیمت در بازار فلزات امری متعارف است. در رابطه با برخی فلزات، به‌خصوص طلا و نقره، مدارک تجربی وجود دارد که شرکت‌ها در صورت افزایش قیمت فلز، عیار متوسط کانسنگ استخراجی، و گاهی میزان تولید فلز، را کاهش می‌دهند [۱۲].

شواهد نشان می‌دهد، بسیاری از عملیات‌های معدن‌کاری قرن بیستم در طول زمان کاهش همزمان قیمت و عیار متوسط کانسنگ معدن‌کاری شده را تجربه کرده‌اند، که نشان از همبستگی مثبت بین قیمت و عیارحد دارد. در حالی که در برخی دیگر از موارد افزایش (کاهش) قیمت با کاهش (افزایش) عیار متوسط کانسنگ استخراجی همراه شده است، که به معنی وجود همبستگی منفی بین قیمت و عیارحد می‌باشد [۱۳].

با ثابت باقی ماندن عیارحد در طول زمان امکان بیشینه شدن واقعی ارزش خالص فعلی غیرممکن است [۱]. نیازمندی‌های عملی برای بیشینه‌سازی واقعی ارزش فعلی شدیداً وابسته به این شرط است که اولاً مواد ارسال نشده به کارخانه به‌دلیل اقتصادی نبودن را بتوان در آینده بازیابی کرده و تحت فرآوری قرار داد، و ثانیاً این امکان وجود داشته باشد که مواد با عیار کم‌تر از عیارحد فعلی، ولی با قابلیت سودآوری محتمل در سال‌های آینده، را بتوان با هدف بهره‌برداری در سال‌های آتی، به‌طوری که در فضای روباز فاسد نشود، انباشت کرد [۱۴].

تحت شرایط فوق عیارحد در صورت بالا رفتن قیمت باید افزایش و در صورت پایین آمدن آن کاهش یابد [۱۴].

بهینه‌سازی عیارحد می‌تواند با اهداف متفاوتی صورت پذیرد. هدفی که تاکنون بیشتر مورد توجه قرار گرفته، بیشینه‌سازی سود یا ارزش خالص فعلی بوده است. یکی از معمول‌ترین روش‌های تعیین عیارحد بهینه کارخانه، با هدف بیشینه‌سازی سود یا ارزش خالص فعلی الگوریتم Lane<sup>۵</sup> است، که اولین بار در سال ۱۹۶۴ توسط Lane طی مقاله‌ای، که بعدها به یک مقاله کلاسیک تحت عنوان "انتخاب عیارحد

$Q_h$ : تناژ کل کانسنگ درون محدوده نهایی که با کاهش عیارحد افزایش و با افزایش آن کاهش می‌یابد، و در نتیجه تابعی اکیداً نزولی از عیارحد ( $g$ ) است:

$$Q_h = f_Q(g) \quad (2)$$

$Q_k$ : تناژ کل محصول تولیدی، که تابع میزان کانسنگ عیار متوسط آن ( $\bar{g}$ ) است. با کاهش عیارحد میزان کانسنگ ارسالی به کارخانه، و در نتیجه میزان محصول تولیدی افزایش و با افزایش آن هم کانسنگ و هم محصول تولیدی کاهش می‌یابد. در نتیجه این کمیت تابعی اکیداً نزولی از عیارحد می‌باشد:

$$Q_k = y \bar{g} Q_h = y f_g(g) f_Q(g) \quad (3)$$

در رابطه فوق  $y$  بازاریابی فرآوری می‌باشد.

$T$ : عمر معدن.

$m$ : هزینه معدن‌کاری هر تن ماده معدنی.

$h$ : هزینه فرآوری هر تن کانسنگ.

$k$ : هزینه ذوب، تصفیه و فروش هر تن فلز.

$p$ : قیمت فروش هر تن فلز.

$f$ : هزینه ثابت سالانه.

در این مقاله برای سهولت بررسی به‌جای استفاده از روش فوق، که به عیارهای حد بهینه متعدد در سال‌های مختلف منجر می‌شود، بیشینه‌سازی ارزش فعلی با فرض ثابت باقی‌ماندن عیارحد بهینه در طول عمر عملیات، مورد مطالعه قرار گرفته است. این فرض اگرچه ارزش فعلی بیشینه واقعی را به‌دست نمی‌دهد و مقدار تابع هدف آن اندکی کم‌تر از تابع هدف مدل سنتی است، ولی با وارد کردن عنصر زمان در مدل، نقش ارزش زمانی تحقق نقدینگی را در رابطه بین عیارحد بهینه و قیمت به‌خوبی بازنمایی می‌کند، ضمن این‌که با توجه به ثابت باقی‌ماندن عیارحد بهینه در طول عملیات تحلیل آن ساده‌تر است. برای این منظور در این تحقیق تابع زیر به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است:

$$V = \frac{C_F}{T} \cdot \frac{(1+d)^T - 1}{d(1+d)^T} \quad (2)$$

در رابطه فوق داریم:

$C_F$ : جمع کل نقدینگی حاصل از عملیات در طول عمر معدن‌کاری، که از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۱۶] و [۱۷]:

$$C_F = (p-k)Q_k - mQ_m - hQ_h - fT \quad (3)$$

$d$ : نرخ بهره.

بهینه" تبدیل شد، ارایه گردید [۱۵]. این الگوریتم اکنون نیز بیشترین کاربرد را در تعیین عیارحد بهینه معدن روباز دارد. همان‌طوری که گفته شد، در صورتی که بهینه‌سازی عیارحد با هدف بیشینه‌سازی نقدینگی یا ارزش خالص فعلی صورت پذیرد، قیمت تأثیر اساسی بر روی این عیار دارد. در این مقاله تأثیر تغییر ظرفیت مؤلفه‌های عملیاتی (معدن‌کاری، فرآوری، و بازاریابی) بر رابطه بین عیارحد و قیمت با هدف بیشینه‌سازی ارزش فعلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- تعریف مسئله

همان‌طوری که گفته شد مسئله مورد بحث در این مقاله بررسی تأثیر ظرفیت مؤلفه‌های معدن‌کاری، فرآوری، و بازاریابی بر رابطه بین عیارحد بهینه و قیمت می‌باشد. هدف بهینه‌سازی عیارحد در این بررسی بیشینه‌سازی ارزش فعلی در نظر گرفته شده است.

هدف قرار دادن بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی به مفهوم وارد کردن ارزش زمانی پول در محاسبات می‌باشد.

در مدل‌های متعارف بیشینه‌سازی ارزش فعلی، از مفهوم هزینه فرصت استفاده می‌شود. هزینه فرصت عبارت از فرصت از دست رفته در اثر عقب افتادن تحقق درآمد بوده، و تابعی از ارزش فعلی درآمدهای تحقق نیافته ناشی از مواد معدن‌کاری نشده است. هزینه‌های فرصت بالاتر به عیارهای حد بهینه بالاتر منجر می‌گردد [۱۷].

هرچه مقدار مواد معدن‌کاری نشده و در نتیجه ارزش فعلی بالقوه آن‌ها بیش‌تر باشد، مقدار هزینه فرصت نیز بالاتر خواهد بود. بنابراین، در ابتدای شروع عملیات که هیچ درآمدی تحقق نیافته است، مقدار هزینه فرصت بیشینه بوده و در طول عمر عملیات با کاهش مواد باقی‌مانده در کاواک، این هزینه کم‌تر می‌شود. با کاهش هزینه فرصت عیارحد بهینه نیز کاهش می‌یابد [۱۷]. به‌عبارت دیگر بیشینه‌سازی واقعی ارزش فعلی متضمن تغییر عیارحد بهینه در طول عمر معدن می‌باشد. در مدل‌های متعارف بیشینه‌سازی ارزش فعلی تابع هدف مدل به‌صورت زیر است [۱۷]:

$$V = (p-k)Q_k - mQ_m - hQ_h - (F+f)T \quad (1)$$

نمادهای به‌کار رفته در رابطه فوق عبارت‌اند از:

$F$ : هزینه فرصت.

$Q_m$ : تناژ کل مواد موجود در محدوده نهایی، که مقدار ثابتی است.

ظرفیت معدن کاری ( $M$ )	۵۰ میلیون تن در سال
ظرفیت فرآوری ( $H$ )	۱۵ میلیون تن در سال
ظرفیت بازاریابی یا حداکثر تقاضای موجود برای محصول ( $K$ )	۱۰۰ هزار تن در سال
نرخ تنزیل ( $\delta$ )	۱۰ درصد

شکل ۱ صورت کلی مدل برنامه‌ریزی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

متغیرهای تصمیم این مدل عبارت از عیار حد ( $g$ )، عیار متوسط ( $\bar{g}$ )، عمر عملیات ( $T$ )، مقدار کانسنگ ( $Q_h$ ) و مقدار محصول ( $Q_k$ ) هستند. در این مدل روابط (I)، (II) و (III) محدودیت‌های مربوط به ظرفیت‌های معدن کاری، کارخانه فرآوری، و بازاریابی را بازنمایی می‌کنند. روابط (IV)، (V)، (VI) و (VII) همان معادلات (۲)، (۳)، (۴) و (۵) هستند که قبلاً به آن‌ها اشاره شد. اگر در تابع هدف و سه محدودیت اول به‌جای متغیرهای ( $Q_h$ )، ( $Q_k$ ) و ( $C_F$ ) مقادیر معادل آن‌ها از روابط (IV)، (V)، (VI) و (VII) را قرار دهیم، متغیرهای تصمیم به دو متغیر ( $g$ ) و ( $T$ ) تقلیل خواهد یافت.

جدول ۳: جدول عیار - تناژ معدن

عیار حد (درصد)	تناژ کانسنگ (میلیون تن)	عیار متوسط (درصد)
۰/۰	۱۰۰۰/۰۰	۰/۳۵
۰/۱	۶۰۴/۶۸	۰/۵۴
۰/۲	۵۶۶/۷۲	۰/۵۷
۰/۳	۵۰۹/۱۲	۰/۶۱
۰/۴	۴۳۱/۸۸	۰/۶۶
۰/۵	۳۳۵/۰۰	۰/۷۲
۰/۶	۲۱۸/۴۸	۰/۷۹
۰/۷	۱۱۹/۵۹	۰/۹۲
۰/۸	۶۸/۲۰	۱/۰۵
۰/۹	۳۹/۸۵	۱/۱۹
۱/۰	۲۴/۸۷	۱/۳۳

در مدل شکل ۱ به‌جز توابع  $f_g(g)$  و  $f_Q(g)$  بقیه عبارت‌ها معلوم یا تعریف شده هستند. برای مشخص کردن ضابطه دو تابع فوق می‌توان از اطلاعات جدول ۳ و برقراری رابطه همبستگی مناسب بین  $g$  و  $Q_h$ ، برای تعریف  $f_Q(g)$  و برقراری رابطه همبستگی بین  $g$  و  $T$ ، برای تعریف  $f_g(g)$  استفاده کرد. در معدن مورد بررسی در

در این‌جا برای تحلیل رابطه عیار حد بهینه و قیمت از یک معدن فرضی استفاده شده است.

### ۳- مسئله موردی

مشخصات مواد موجود در درون یک معدن فرضی در جدول ۱ و اطلاعات مربوط به پارامترهای اقتصادی و ظرفیت‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳ اطلاعات عیار - تناژ معدن را، که با استفاده از جدول ۱ محاسبه شده است، نشان می‌دهد.

برای بررسی رابطه بین عیار حد بهینه و قیمت ابتدا عیار حد بهینه با هدف بیشینه‌سازی ارزش فعلی، در قیمت‌ها و ظرفیت‌های عملیاتی مختلف و با فرض ثابت باقی ماندن پارامترهای فنی و اقتصادی در طول عمر معدن محاسبه شده است.

برای محاسبه عیار حد بهینه در حالت‌های مختلف یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی صورت‌بندی گردیده و این مدل با فرض قیمت‌ها و ظرفیت‌های مختلف به کمک برنامه Solver در نرم‌افزار صفحه‌گسترده Excel حل شده است.

جدول ۱: مشخصات مواد درون کاواک معدن فرضی

معدن ۱		محدوده عیاری
تناژ (میلیون تن)	عیار متوسط (درصد)	(درصد)
۰/۰۵	۳۹۵/۳۲	<۰/۱
۰/۱۷	۳۷/۹۶	۰/۱-۰/۲
۰/۲۴	۵۷/۶۰	۰/۲-۰/۳
۰/۳۳	۷۷/۲۴	۰/۳-۰/۴
۰/۴۴	۹۶/۸۸	۰/۴-۰/۵
۰/۵۸	۱۱۶/۵۲	۰/۵-۰/۶
۰/۶۴	۹۸/۸۹	۰/۶-۰/۷
۰/۷۵	۵۱/۳۹	۰/۷-۰/۸
۰/۸۵	۲۸/۳۵	۰/۸-۰/۹
۰/۹۵	۱۴/۹۸	۰/۹-۱
۱/۳۳	۲۴/۸۷	>۱

جدول ۲: اطلاعات اقتصادی و عملیاتی معدن فرضی

بازایی فرآوری ( $v$ )	۸۵ درصد
هزینه معدن کاری ( $m$ )	۱/۲ دلار بر تن سنگ
هزینه فرآوری ( $h$ )	۳ دلار بر تن کانسنگ
هزینه ذوب، تصفیه و فروش ( $k$ )	۷۵۰ دلار بر تن محصول
هزینه ثابت ( $f$ )	۷ میلیون دلار در سال
قیمت محصول ( $p$ )	۳۰۰۰ دلار بر تن محصول

هرکدام از ظرفیت‌های معدن‌کاری ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۵۰ میلیون تن در سال با قیمت‌های بین ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دلار، و ثابت فرض شدن سایر پارامترها (هزینه‌ها، بازیابی، و...)، حل شد. نتایج حاصل از حل این مدل‌ها برای قیمت‌های مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است. شکل ۳ نمودار تغییرات عیارحد بهینه را نسبت به قیمت در ظرفیت‌های مختلف معدن‌کاری نشان می‌دهد.

وقتی هدف از بهینه‌سازی عیار بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی است، فرآیند بهینه‌سازی تحت تأثیر دو نیروی مختلف جهت قرار می‌گیرد. در اثر افزایش قیمت، از یک طرف ارزش خالص مواد کم‌عیارتر بالاتر رفته و رابطه سنتی بین عیارحد و قیمت، عیارحد بهینه را به سمت مقادیر پایین‌تر حرکت می‌دهد، و از طرف دیگر هزینه فرصت افزایش یافته و عیارحد بهینه را به سمت مقادیر بالاتر می‌راند. برآیند این دو نیروی مؤثر، جهت حرکت عیارحد بهینه را در فرآیند بهینه‌سازی تعیین می‌کند. در نتیجه در این حالت با افزایش قیمت، عیارحد بهینه ممکن است کاهش یا افزایش یابد.

چنانچه در جدول ۴ و شکل ۳ دیده می‌شود در معدن مورد بررسی در محدوده قیمت ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دلار، منحنی تغییرات عیارحد بهینه نسبت به قیمت در ظرفیت‌های معدن‌کاری زیر حدود ۳۰ میلیون تن نزولی بوده و در ظرفیت‌های بالاتر از ۳۵ میلیون تن صعودی بوده و در محدوده ظرفیت معدن‌کاری حدود ۳۰ تا حدود ۳۵ میلیون تن ثابت است. ضمن این‌که نمودارها وقتی نزولی هستند دارای آستانه پایین و وقتی صعودی هستند دارای آستانه بالا می‌باشند.

شکل ۴ نیز نمودار تغییرات ارزش فعلی را نسبت به قیمت در ظرفیت‌های معدن‌کاری مختلف نشان می‌دهد. همان‌طوری که دیده می‌شود، این نمودار در تمام حالت‌ها صعودی است.

### ۳-۲- تأثیر ظرفیت کارخانه بر رابطه قیمت-عیارحد

برای بررسی تأثیر ظرفیت کارخانه بر رابطه قیمت-عیارحد بهینه کارخانه، مدل شکل ۲ در محیط نرم‌افزار Excel صورت‌بندی شده و به کمک برنامه Solver برای هرکدام از ظرفیت‌های کارخانه ۱۵، ۱۸، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلیون تن در سال با قیمت‌های بین ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دلار، و ثابت فرض شدن سایر پارامترها، حل شد. نتایج حاصل از حل این مدل‌ها برای قیمت‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. شکل ۵ نمودار تغییرات عیارحد بهینه را نسبت به قیمت در ظرفیت‌های مختلف کارخانه نشان می‌دهد.

فاصله ۰/۱ تا ۰/۶ درصد عیارها، که عیارحد در این فاصله قرار دارد، بین متغیرهای مربوطه روابط زیر برقرار است:

$$Q_h = -982g^2 - 85g + 623 \quad (4)$$

$$\bar{g} = 0.61g^2 + 0.07g + 0.53$$

با جایگزین کردن مقادیر پارامترها و معادلات فوق در مدل شکل ۱، مدل نهایی بهینه‌سازی عیارحد کارخانه در این معدن به صورت شکل ۲ درخواهد آمد. در این مدل‌ها پارامتر قیمت است، و مدل به‌ازای ظرفیت‌ها و مقادیر مختلف قیمت حل می‌شود.

$$\max V = \frac{C_F}{T} \times \frac{(1+\delta)^T - 1}{\delta(1+\delta)^T}$$

$$s.t. \quad T \geq \frac{Q_m}{M} \quad (I)$$

$$T \geq \frac{Q_h}{H} \quad (II)$$

$$T \geq \frac{Q_k}{K} \quad (III)$$

$$Q_h = f_Q(g) \quad (IV)$$

$$\bar{g} = f_g(g) \quad (V)$$

$$Q_k = y\bar{g}Q_h \quad (VI)$$

$$C_F = (p-k)Q_k - mQ_m - hQ_h - fT \quad (VII)$$

$$g, \bar{g}, T, Q_h, Q_k \geq 0$$

شکل ۱: مدل کلی محاسبه عیارحد بهینه

$$\max V = \frac{C_F}{T} \times \frac{(1+\delta)^T - 1}{\delta(1+\delta)^T}$$

$$s.t. \quad T \geq \frac{1000}{M}$$

$$T \geq \frac{Q_h}{H}$$

$$T \geq \frac{Q_k}{K}$$

$$Q_h = -982g^2 - 85g + 623$$

$$\bar{g} = 0.61g^2 + 0.07g + 0.53$$

$$Q_k = 0.0085\bar{g}Q_h$$

$$C_F = (p-750)Q_k - 1000 - 3Q_h - 7000T$$

$$g, \bar{g}, Q_h, Q_k \geq 0$$

شکل ۲: مدل محاسبه عیارحد بهینه معدن مورد بررسی

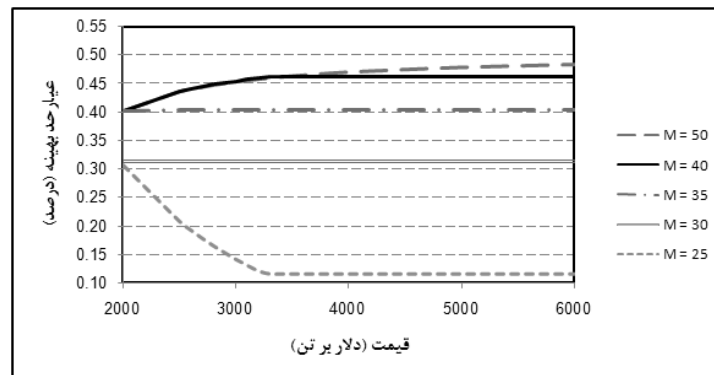
### ۳-۱- تأثیر ظرفیت معدن‌کاری بر رابطه قیمت-عیارحد

برای بررسی تأثیر ظرفیت معدن‌کاری بر رابطه قیمت-عیارحد بهینه کارخانه، مدل شکل ۲ در محیط نرم‌افزار Excel صورت‌بندی شده و به کمک برنامه Solver برای

جدول ۴: نتایج محاسبه عیار حد بهینه دو معدن به ازای قیمت‌های مختلف با هدف پیشینه‌سازی نقدینگی

ظرفیت معدن کاری (میلیون تن در سال)										قیمت (دلار بر تن)
۵۰		۴۰		۳۵		۳۰		۲۵		
NPV	عیار	NPV	عیار	NPV	عیار	NPV	عیار	NPV	عیار	
۱۰۱/۱۴	۰/۴۰	۱۰۰/۹۸	۰/۴۰	۱۰۰/۹۸	۰/۴۰	۱۰۱/۱۴	۰/۳۱	۶۶/۰۱	۰/۳۱	۲۰۰۰
۴۹۵/۹۶	۰/۴۴	۴۹۵/۷۱	۰/۴۴	۴۹۲/۶۸	۰/۴۰	۴۹۵/۹۶	۰/۳۱	۳۹۳/۹۴	۰/۲۱	۲۵۰۰
۸۹۴/۴۹	۰/۴۵	۸۹۴/۱۴	۰/۴۵	۸۸۴/۳۸	۰/۴۰	۸۳۸/۴۱	۰/۳۱	۷۳۰/۹۲	۰/۱۴	۳۰۰۰
۱۲۹۴/۶۷	۰/۴۶	۱۲۹۴/۲۰	۰/۴۶	۱۲۷۶/۰۸	۰/۴۰	۱۲۱۲/۱۲	۰/۳۱	۱۰۷۱/۱۵	۰/۱۲	۳۵۰۰
۱۶۹۵/۷۴	۰/۴۷	۱۶۹۴/۵۴	۰/۴۶	۱۶۶۷/۷۸	۰/۴۰	۱۵۸۵/۸۳	۰/۳۱	۱۴۱۱/۷۱	۰/۱۲	۴۰۰۰
۲۴۹۸/۵۶	۰/۴۸	۲۴۹۵/۲۴	۰/۴۶	۲۴۵۱/۱۸	۰/۴۰	۲۳۳۳/۲۶	۰/۳۱	۲۰۹۲/۸۱	۰/۱۲	۵۰۰۰
۳۳۰۲/۸۵	۰/۴۸	۳۲۹۵/۹۳	۰/۴۶	۳۲۳۴/۵۸	۰/۴۰	۳۰۸۰/۶۸	۰/۳۱	۲۷۷۳/۹۲	۰/۱۲	۶۰۰۰

در این جدول منظور از عیار، عیار حد بهینه برحسب درصد بوده، و مقادیر NPV برحسب میلیون دلار می‌باشد.



شکل ۳ نمودار تغییرات عیار حد بهینه نسبت به قیمت در ظرفیت‌های معدن کاری مختلف



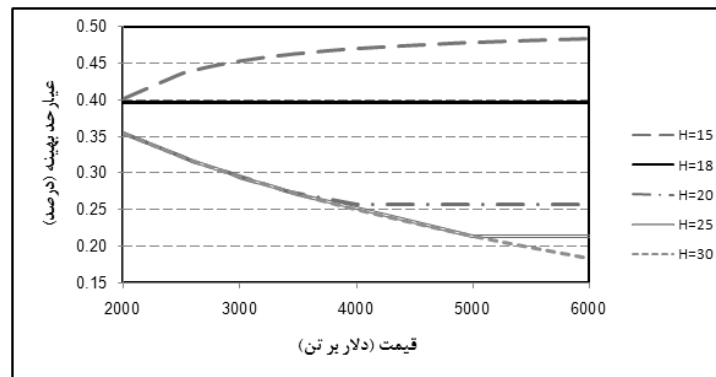
شکل ۴ نمودار تغییرات ارزش فعلی نسبت به قیمت در ظرفیت‌های معدن کاری مختلف

نمودارها وقتی نزولی هستند دارای آستانه پایین و وقتی صعودی هستند دارای آستانه بالا می‌باشند. شکل ۶ نیز نمودار تغییرات ارزش فعلی را نسبت به قیمت در ظرفیت‌های کارخانه مختلف نشان می‌دهد. همان‌طوری که دیده می‌شود، این نمودار در تمام حالت‌ها صعودی است.

چنانچه در جدول ۵ و شکل ۵ دیده می‌شود در معدن مورد بررسی در محدوده قیمت ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دلار، منحنی تغییرات عیارحد بهینه نسبت به قیمت در ظرفیت‌های کارخانه زیر حدود ۱۸ میلیون تن صعودی بوده و در ظرفیت‌های بالاتر از ۲۰ میلیون تن نزولی بوده و در محدوده ظرفیت کارخانه دو مقدار فوق ثابت است. ضمن این‌که

جدول ۵ تأثیر تغییر ظرفیت کارخانه بر رابطه عیارحد- قیمت

ظرفیت کارخانه (میلیون تن در سال)										قیمت (دلار بر تن)
۳۰		۲۵		۲۰		۱۸		۱۵		
عیار	NPV	عیار	NPV	عیار	NPV	عیار	NPV	عیار	NPV	
۰/۳۵	۱۳۱/۶۲	۰/۳۵	۱۳۱/۶۲	۰/۳۵	۱۳۱/۶۲	۰/۴۰	۱۲۸/۹۵	۰/۴۰	۱۰۱/۱۴	۲۰۰۰
۰/۳۲	۵۸۷/۷۵	۰/۳۲	۵۸۷/۷۵	۰/۳۲	۵۸۷/۷۵	۰/۴۰	۵۷۸/۹۵	۰/۴۴	۴۹۵/۹۶	۲۵۰۰
۰/۳۰	۱۰۴۶/۱۰	۰/۳۰	۱۰۴۶/۱۰	۰/۳۰	۱۰۴۶/۱۰	۰/۴۰	۱۰۲۸/۹۵	۰/۴۵	۸۹۴/۴۹	۳۰۰۰
۰/۲۷	۱۵۰۵/۹۸	۰/۲۷	۱۵۰۵/۹۸	۰/۲۷	۱۵۰۵/۹۸	۰/۴۰	۱۴۷۸/۹۴	۰/۴۶	۱۲۹۴/۶۷	۳۵۰۰
۰/۲۵	۱۹۶۶/۹۸	۰/۲۵	۱۹۶۶/۹۷	۰/۲۶	۱۹۲۸/۹۴	۰/۴۰	۱۹۲۸/۹۴	۰/۴۷	۱۶۹۵/۷۴	۴۰۰۰
۰/۲۱	۲۸۹۱/۳۴	۰/۲۱	۲۸۹۱/۳۴	۰/۲۶	۲۸۲۸/۹۴	۰/۴۰	۲۸۲۸/۹۴	۰/۴۸	۲۴۹۸/۵۶	۵۰۰۰
۰/۱۸	۳۸۱۷/۸۳	۰/۲۱	۳۸۱۶/۹۲	۰/۲۶	۳۸۱۱/۶۶	۰/۴۰	۳۷۲۸/۹۳	۰/۴۸	۳۳۰۲/۸۵	۶۰۰۰



شکل ۵ نمودار تغییرات عیارحد نسبت به قیمت در ظرفیت‌های کارخانه مختلف



شکل ۶ نمودار تغییرات ارزش فعلی نسبت به قیمت در ظرفیت‌های کارخانه مختلف

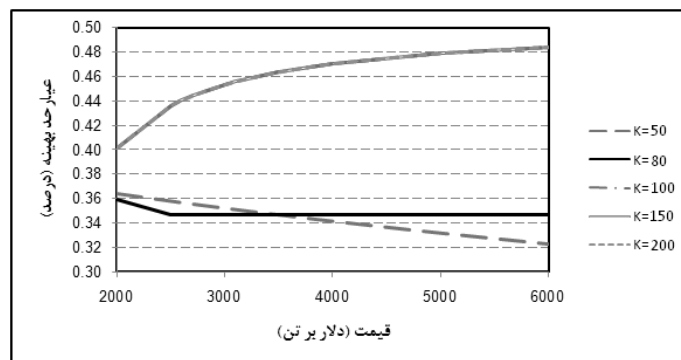
### ۳-۳- تأثیر ظرفیت بازاریابی بر رابطه قیمت - عیار حد

برای بررسی تأثیر ظرفیت بازاریابی بر رابطه قیمت - عیار حد بهینه کارخانه، مدل شکل ۲ در محیط نرم افزار Excel صورت بندی شده و به کمک برنامه Solver برای هر کدام از ظرفیت های بازاریابی ۵۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ هزار تن در سال با قیمت های بین ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دلار، و ثابت فرض شدن سایر پارامترها حل شد. نتایج حاصل از حل این مدل ها برای قیمت های مختلف در جدول ۶ نشان داده شده است. شکل ۷ نمودار تغییرات عیار حد بهینه را نسبت به قیمت در ظرفیت های مختلف بازاریابی نشان می دهد.

چنانچه در جدول ۶ و شکل ۷ دیده می شود در معدن مورد بررسی در محدوده قیمت ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دلار، منحنی تغییرات عیار حد بهینه نسبت به قیمت در ظرفیت های بازاریابی زیر حدود ۸۵ هزار تن نزولی، در ظرفیت های بالاتر از ۱۰۰ هزار تن صعودی بوده و در محدوده ظرفیت بازاریابی بین حدود ۸۵ و ۹۵ هزار تن ثابت است. ضمن این که نمودارها در ظرفیت های بالای ۱۰۰ هزار تن تقریباً برهم منطبق بوده و وقتی نزولی هستند دارای آستانه پایین و وقتی صعودی هستند دارای آستانه بالا می باشند.

جدول ۶ تأثیر تغییر ظرفیت بازاریابی بر رابطه عیار حد - قیمت

ظرفیت بازاریابی (هزار تن در سال)										قیمت (دلار بر تن)
۲۰۰		۱۵۰		۱۰۰		۸۰		۵۰		
عیار	NPV	عیار	NPV	عیار	NPV	عیار	NPV	عیار	NPV	
۰/۴۰	۱۰۰/۹۸	۰/۴۰	۱۰۰/۹۸	۰/۴۰	۱۰۱/۱۴	۰/۳۶	۹۶/۷۵	۰/۳۶	۳۷/۱۳	۲۰۰۰
۰/۴۴	۴۹۵/۷۱	۰/۴۴	۴۹۵/۷۱	۰/۴۴	۴۹۵/۹۶	۰/۳۵	۴۷۷/۱۰	۰/۳۵	۲۸۵/۰۲	۲۵۰۰
۰/۴۵	۸۹۴/۱۴	۰/۴۵	۸۹۴/۱۴	۰/۴۵	۸۹۴/۴۹	۰/۳۵	۸۵۷/۶۱	۰/۳۵	۵۳۲/۹۶	۳۰۰۰
۰/۴۶	۱۲۹۴/۲۴	۰/۴۶	۱۲۹۴/۲۴	۰/۴۶	۱۲۹۴/۶۷	۰/۳۵	۱۲۳۸/۱۳	۰/۳۵	۷۸۰/۹۵	۳۵۰۰
۰/۴۷	۱۶۹۵/۲۲	۰/۴۷	۱۶۹۵/۲۲	۰/۴۷	۱۶۹۵/۷۴	۰/۳۵	۱۶۹۵/۲۲	۰/۳۴	۱۰۲۸/۹۸	۴۰۰۰
۰/۴۸	۲۴۹۸/۵۶	۰/۴۸	۲۴۹۸/۵۶	۰/۴۸	۲۴۹۸/۵۶	۰/۳۵	۲۳۷۹/۶۸	۰/۳۳	۱۵۲۵/۱۶	۵۰۰۰
۰/۴۸	۳۳۰۲/۸۵	۰/۴۸	۳۳۰۲/۸۵	۰/۴۸	۳۳۰۲/۸۵	۰/۳۵	۳۱۴۰/۷۱	۰/۳۲	۲۰۲۱/۴۷	۶۰۰۰

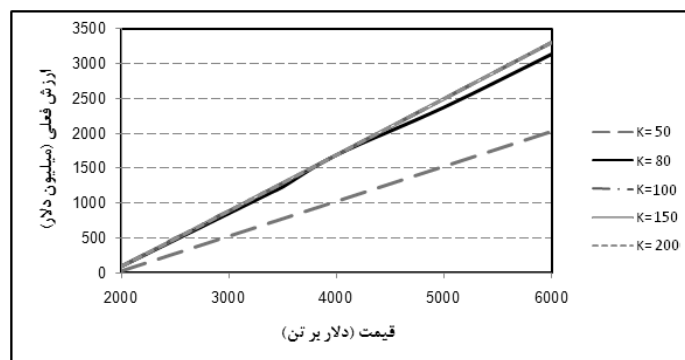


شکل ۷ نمودار تغییرات عیار حد نسبت به قیمت در ظرفیت های بازاریابی مختلف

دیده می شود، این نمودار در تمام حالتها صعودی است.

شکل ۸ نیز نمودار تغییرات ارزش فعلی را نسبت به قیمت در ظرفیت های کارخانه مختلف نشان می دهد. همان طوری که





شکل ۸ نمودار تغییرات ارزش فعلی نسبت به قیمت در ظرفیت‌های بازاریابی مختلف

فرصت می‌شود. تغییر هزینه فرصت نیز بر یکی از دو مؤلفه نیروی مؤثر بر راستای حرکت عیار حد اثر و ممکن است جهت تغییرات عیار حد نسبت به قیمت را تغییر دهد. بنابراین، روند تغییرات عیار حد- قیمت که در یک معدن با مجموعه معینی از ظرفیت‌ها صعودی است، ممکن است با تغییر برخی ظرفیت‌ها به نزولی تبدیل یافته یا حتی ثابت شود.

۳- در معدن بررسی شده در این مقاله، با افزایش ظرفیت معدن کاری منحنی تغییرات عیار حد بهینه نسبت به قیمت از نزولی بودن به سمت صعودی بودن تغییر جهت می‌دهد. تأثیر افزایش ظرفیت کارخانه فرآوری بر رابطه قیمت- عیار حد بهینه برعکس فوق است، یعنی با افزایش این ظرفیت منحنی تغییرات عیار حد بهینه نسبت به قیمت از صعودی بودن به سمت نزولی بودن تغییر جهت می‌دهد. تأثیر افزایش ظرفیت بازاریابی بر رابطه پیش‌گفته نیز مشابه تأثیر افزایش ظرفیت معدن کاری است.

۴- بررسی نشان داد که نمودار تغییرات ارزش فعلی نسبت به قیمت در همه ظرفیت‌های معدن کاری، فرآوری، و بازاریابی صعودی بوده و افزایش قیمت همواره به افزایش ارزش فعلی منجر می‌گردد.

#### منابع

- 1-Taylor, H.K., 1972. *General background theory of cut-off grades*, Institution of Mining and Metallurgy Transactions, A160-179.
- 2-Taylor, H.K., 1985. *Cut-off grades—some further reflections*. Institution of Mining and Metallurgy Transactions, A204-216.

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

وقتی که هدف از بهینه‌سازی عیار حد در یک معدن طراحی شده بیشینه‌سازی ارزش فعلی است، قیمت تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر روی عیار حد بهینه دارد. در این مقاله تأثیر تغییرات ظرفیت مؤلفه‌های معدن کاری، فرآوری، و بازاریابی بر رابطه بین عیار حد بهینه و قیمت، وقتی هدف بیشینه‌سازی ارزش فعلی است، مورد بررسی قرار گرفت. برای نشان دادن چگونگی این رابطه از یک معدن فرضی استفاده شد. برای پیدا کردن عیار حد بهینه در حالت‌های مختلف یک مدل پژوهش عملیاتی غیرخطی صورت‌بندی گردید. سپس برای حل مدل از برنامه‌ساز *Solver* در نرم‌افزار *Excel* استفاده شد.

در جمع‌بندی این پژوهش می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱- اگر هدف از بهینه‌سازی عیار، بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی عملیات باشد، فرآیند بهینه‌سازی تحت تأثیر دو نیروی مختلف‌الجهت قرار می‌گیرد. در اثر افزایش قیمت، از یک طرف ارزش مواد کم‌عیارتر بالاتر رفته و رابطه سنتی بین عیار حد و قیمت عیار حد بهینه را به سمت مقادیر پایین‌تر حرکت می‌دهد، و از طرف دیگر هزینه فرصت افزایش یافته و عیار حد بهینه را به سمت مقادیر بالاتر می‌راند. برآیند این دو نیروی مؤثر، جهت حرکت عیار حد بهینه را در فرآیند بهینه‌سازی تعیین می‌کند. در نتیجه در این حالت عیار حد بهینه با افزایش قیمت ممکن است کاهش یا افزایش یافته، یا گاهی بدون تغییر باقی بماند.

۲- وقتی هدف از بهینه‌سازی عیار حد بیشینه‌سازی ارزش فعلی است، افزایش یا کاهش هرکدام از ظرفیت‌ها فرصت‌های خلق نقدینگی توسط عملیات را تحت تأثیر قرار داده و با ایجاد تغییر در ارزش فعلی مواد باقی‌مانده در معدن موجب تغییر هزینه

- 11- Shinkuma, Takayoshi, 2000. *A generalization of the Cairns- Krautkraemer model and the optimality of the mining rule*, Resource and Energy Economics 26: 147-160.
- 12- Farrow, Scott, Krautkraemer, Jeffery A., 1989. *Extraction at the Intensive Margin (Metal Supply and Grade Selection in Response to Anticipated and Unanticipated Price Changes)*, Resources and Energy (North- Holand) 11: 1- 21.
- 13- Slade, Margarete, 1988. *Grade Selection under Uncertainty: Least Cost Last and Other Anomalies*, Journal of Environmental Economics And Management 15: 189- 205.
- 14- Ren, Yi, Sturgul, J. R., 1999. *Economic Significance of Sub- Cutoff Grades in Open Pits Operating with Concentrator Bottleneck*, Mineral Resources Engineering, Imperial College Press, Vol. 8, No. 2: 195-203.
- 15- Lane, K.F., 1964. *Choosing the optimum cut-off grade*. Quarterly of the Colorado School of Mines 59 (4), 811-829.
- 16- Hustrulid, W., Kuchta, M., 1995. *Open Pit Mine Planning & Design*, A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- 17- Lane, K.F., 1988. *The Economic Definition of Ore cutoff grades in Theory and Practice*, London: Mining Journal Books
- 3- Dagdelen, K., 1992. *Cutoff grade optimization*, Proceedings of the 23rd International Symposium on Application of Computers and Operations Research in Minerals Industries, pp. 157-165.
- 4- Dagdelen, K., 1993. *An NPV optimization algorithm for open pit mine design*, Proceedings of the 24th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in Minerals Industries, pp. 257-263.
- 5- Asad, M.W.A., 2005. *Cutoff Grade optimization algorithm with stockpiling option for open pit mining operations of two economic minerals*, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, Vol. 19, No. 3:176 – 187.
- 6- Bradley, Paul G., 1980. *Modeling mining: Open pit copper production in British Columbia*, RESOURCES POLICY March 1980: 44-59.
- ۷- Asad, M.W.A., 2007. *Optimum cut- off grade policy for open pit mining operations through net present value algorithm considering metal price and cost escalation*, Engineering Computations: International Journal for Computer- Aided Engineering and Software Vol. 24 No. 7: 723- 736
- 8- Osanloo, M., Ataei, M., 2003. *Using equivalent grade factors to find the optimum cut- off grades of multiple metal deposits*, Mineral Engineering, 16, pp. 771- 776.
- 9- Cairns, Robert D., Shinkuma, Takayoshi, 2004. *The choice of the cut- off grade in mining*, Resources Policy 29, pp. 75-81.
- 10- Shinkuma, Takayoshi, Nishiyama, Takashi, 2000. *The grade selection rule of the metal mines; an empirical study on copper mines*, Resources Policy 26: 31- 38.

#### پی نوشت

- 
- <sup>1</sup>- ultimate pit limits  
<sup>2</sup>- Ore  
<sup>3</sup>- Waste  
<sup>4</sup>- Break- even Cut- off grade  
<sup>5</sup>- K.F. Lane  
<sup>6</sup>- Opportunity Cost