

# تعیین عیار حد معادن سنگ آهن با در نظر گرفتن هزینه‌های توسعه پایدار

مجتبی جهانی<sup>۱</sup>، مجید عطایی پور<sup>۲\*</sup>، زینب جهانبانی<sup>۳</sup>

۱. کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲. دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، [map60@aut.ac.ir](mailto:map60@aut.ac.ir)

۳. کاندیدای دکترا مهندسی استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، [jahanbani1990@gmail.com](mailto:jahanbani1990@gmail.com)

## چکیده

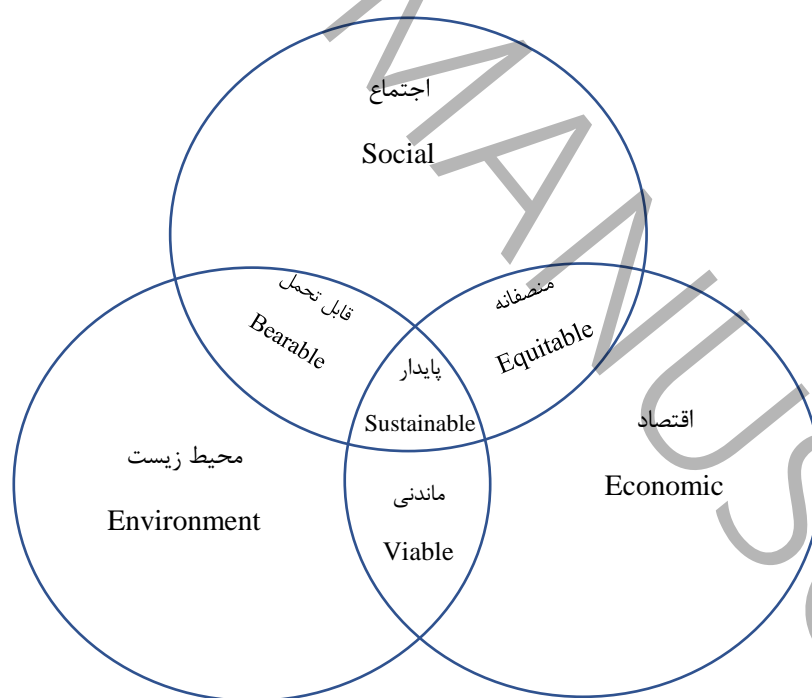
عیار حد یکی از فاکتورهای مهم در طراحی و برنامه‌ریزی تولید معدن روباز است. در نظر گرفتن شاخص‌های توسعه پایدار در محاسبه عیار حد باعث طراحی پایدار معدن می‌شود و بزرگترین فرصت برای کاهش اثرات نامطلوب فعالیت‌های معدنکاری است. تا چندی پیش در محاسبه‌ی عیار حد صرفاً شاخص‌های اقتصادی در نظر گرفته می‌شدند. در پژوهش‌های اخیر شاخص‌های زیست محیطی نیز دخالت داده شد، اما پژوهشی که عوامل اجتماعی را نیز در نظر گرفته باشد گزارش نشده است. از این رو در مطالعه حاضر، مدل جدیدی برای محاسبه عیار حد ارائه شد که هر سه معیار توسعه پایدار در آن لحاظ شده است. برای انجام تحقیق، هزینه‌های مرتبط با توسعه پایدار در فرمول عیار حد سربه‌سری وارد و با داشتن اطلاعات مربوط به معدن سنگ آهن چغارت، روش پیشنهادی اعتبارسنجی شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که هزینه‌های توسعه پایدار لحاظ شده در تخمین عیار حد معدن سنگ آهن چغارت تنها ۵ درصد از کل هزینه‌ها را تشکیل می‌دهد و نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان می‌دهد این هزینه‌ها کم‌ترین تأثیر را در تعیین عیار حد دارند. نتایج همچنین نشان می‌دهند که تأثیر هزینه‌های توسعه پایدار در معدن چغارت باعث افزایش ۵/۵ درصدی عیار حد شده است و ممکن است تأثیر چندانی در نتایج ناشی از آن نداشته باشد. بنابراین، نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در تحقیق حاضر نشان می‌دهد که با به‌کارگیری این روش نه تنها تغییر زیادی در عیار حد حاصل نشده است، بلکه برخی از مشکلات زیست محیطی و اجتماعی پروژه نیز با لحاظ کردن هزینه‌های توسعه پایدار و صرف کمترین درصد هزینه، مرتفع خواهد شد.

## کلمات کلیدی

عیار حد، توسعه پایدار، محیط زیست، اجتماع، معدن سنگ آهن چغارت

عیار حد<sup>۱</sup> یکی از پارامترهای مهم در طراحی و برنامه‌ریزی تولید معادن روباز است. از جمله حد نهایی معدن، نسبت باطله‌برداری و همچنین چشم‌انداز آینده تولید معدن تحت تأثیر عیار حد قرار دارند. در طول سالیان مختلف تعاریف متفاوتی برای عیار حد ارائه شده است. ولی این تعاریف تغییرات چندانی نکرده‌اند و در نهایت، همه این تعاریف در پی ارائه حد یا مرزی برای تفکیک یا تشخیص کانسنگ و باطله بوده‌اند. به‌طور کلی عیار حد به مقدار فلز یا محصول با ارزشی اطلاق می‌شود که در واحد وزن مواد باید وجود داشته باشد تا به کارخانه تغلیظ فرستاده شود. در سال‌های اخیر بیشترین تلاش در راستای توسعه مدل و روابطی انجام گرفته است که به موجب آن روابط می‌توان عیار حد بهینه را با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی محاسبه کرد. در این روابط علاوه بر لحاظ کردن عوامل اقتصادی، شرایطی چون ظرفیت تولید مواد معدنی، ظرفیت کارخانه تغلیظ، ظرفیت کارخانه ذوب، پالایش و ارزش زمانی پول نیز در نظر گرفته شده‌اند.

مدیریت منابع معدنی و بهره‌برداری بهینه از آن‌ها علاوه بر توجه به مسائل اقتصادی مستلزم این است که مبتنی بر اصول توسعه پایدار<sup>۲</sup> باشد. مهم‌ترین اصل در رسیدن به توسعه پایدار از طریق گسترش بخش معدن و صنایع معدنی، توجه همزمان به سه اصل اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی بخش معدن (شکل ۱) است [۱]. اگر چه کشورها در ابتدای مسیر توسعه به‌واسطه تکیه بر منابع طبیعی و معدنی خود و استخراج آن‌ها توانستند گام‌های ابتدایی توسعه را بردارند، ولی در اثر بی‌توجهی به مسائل زیست محیطی و تبعات اجتماعی و نگاه صرفاً اقتصادی به موضوع، مشکلاتی ایجاد شد که به تدریج توجه به این مسائل در کنار جنبه‌های اقتصادی این فعالیت‌ها، موجب شد موضوع و مفهوم توسعه پایدار مطرح شود.



شکل ۱. ارتباط اجزای توسعه پایدار [۱]

Figure 1: The relationship between the components of sustainable development

<sup>1</sup>Cutoff Grade

<sup>2</sup> Sustainable Development

همانطور که گفته شد، عیارحد یکی از فاکتورهای مهم در طراحی و برنامه‌ریزی تولید معادن روباز است. در نظر گرفتن شاخص‌های توسعه پایدار در محاسبه عیارحد باعث طراحی پایدار معدن می‌شود و بزرگترین فرصت برای کاهش اثرات نامطلوب فعالیت‌های معدنکاری است. تا چندی پیش در محاسبه‌ی عیارحد صرفاً شاخص‌های اقتصادی در نظر گرفته می‌شدند. در پژوهش‌های اخیر شاخص‌های زیست محیطی نیز دخالت داده شد، اما پژوهشی که عوامل اجتماعی را نیز در نظر گرفته باشد گزارش نشده است. از این رو در پژوهش حاضر، مدلی جدید برای محاسبه عیار حد ارائه شده است که علاوه بر معیار اقتصاد و محیط زیست، معیار اجتماع نیز در آن لحاظ شده است.

## ۲- پیشینه تحقیق

عیار حد برای تشخیص کانسنگ از باطله به کار برده می‌شود و در عمر معدن و قابلیت سوددهی عملیات معدنکاری تاثیر زیادی دارد. تاکنون مطالعات و تعاریف متفاوتی برای عیار حد ارائه شده است. مهم‌ترین مرجع در این زمینه، مقاله‌ای با عنوان "انتخاب عیارحد" است که در سال ۱۹۶۴ ارائه شد [۲]. این تحقیق امروزه در تعیین عیارحد بهینه، محدوده نهایی پیت، نظام برداشت بلوک‌ها و در برنامه‌ریزی برای تولید ماده معدنی مورد توجه پژوهشگران در حوزه معدن است. در اولین پژوهشی که در سال ۱۹۹۸ انجام شد، هزینه‌های مربوط به بستن و بازسازی<sup>۱</sup> معدن (در نظر گرفتن شاخص‌های توسعه پایدار در محاسبه عیارحد) در روابط تعیین عیارحد پویا و نرخ تولید معدن وارد شد. برای این منظور دو حالت مختلف برای وارد کردن هزینه‌های بازسازی فرض شده است و نتایج حاصل از آنها با شرایط بدون در نظر گرفتن این هزینه تحت مقایسه قرار گرفته است. در حالت اول هزینه‌های بستن و بازسازی در پایان عمر معدن و در حالت دوم این هزینه‌ها به صورت هزینه سالیانه و تابعی از تناژ استخراج شده وارد مساله می‌شوند. در حالت اول عمر معدن افزایش می‌یابد و عیار حد استخراجی در سال‌های پایانی عمر معدن کاهش می‌یابد. در حالت دوم عیار حد استخراجی افزایش و عمر معدن کاهش می‌یابد [۳]. پس از آن در سال ۲۰۰۴، هزینه‌های بازسازی بطور مستقیم با هزینه استخراج جمع زده شده و وارد الگوریتم لین برای محاسبه عیار حد شد و این نتیجه حاصل شد که در نظر نگرفتن هزینه‌های بازسازی و بستن معدن در محاسبه عیار حد در دوران عمر معدن باعث بروز اشتباهاتی در محاسبه سودآوری پروژه‌ها می‌شود [۴]. در پژوهش بعد که در سال ۲۰۰۷ انجام شد هزینه‌های مربوط به بازسازی باطله‌ها در مدل‌سازی عیارهای حد استخراجی مد نظر قرار گرفتند. نتایج این کار نشان داد در نظر گرفتن این هزینه در تعیین عیارهای حد استخراجی باعث می‌شود که باطله کمتری به دامپ ارسال شود و لذا عیارهای حد بدست آمده از این مدل کمتر از حالتی است که این هزینه‌ها مد نظر نیستند. ارسال باطله کمتر به دامپ باعث کاهش هزینه‌های مربوط به اصلاح باطله‌ها خواهد شد [۵]. در ادامه در سال ۲۰۰۸ با انجام تصحیحاتی در مدل لین عیار حد استخراجی در یک معدن مس فرضی تعیین شد. در این مدل فرض شده است که معدن دارای دو دامپ باطله و دو سد باطله است و باطله‌های غیرآلاینده و باطله‌های اسیدزا به صورت جدا از هم دامپ می‌شوند. هدف از این کار کاهش مساله اسیدزایی باطله‌ها و مدیریت آن در طول عمر معدن است [۶، ۷]. پس از آن در سال ۲۰۰۹ پژوهشی مشابه انجام شد که با انجام تصحیحاتی در مدل لین، و اضافه کردن هزینه‌های بازسازی، عیار حد استخراجی معدن روباز مورد مطالعه قرار گرفت [۸]. در پی تحقیقات قبلی در سال ۲۰۱۱، هزینه‌های بازسازی و درآمدهای ناشی از آن وارد مدل لین شده و عیارهای حد استخراجی به دست آمدند. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن درآمدهای ناشی از بازسازی معدن، ارزش فعلی خالص معدن افزایش خواهد یافت [۹]. محققان در مطالعه‌ای دیگر (سال ۲۰۱۵)، مدلی را برای تعیین عیارحد در معدن روباز ارائه کردند. در این مدل علاوه بر لحاظ کردن هزینه‌های مرتبط با مدیریت و بازسازی دامپ‌های باطله، سد باطله و پیت در مدل لین،

<sup>۱</sup> Reclamation

درآمدهای احتمالی حاصل از بازسازی نیز در نظر گرفته شد. در نهایت، مدل توسعه‌یافته با داده‌های جمع‌آوری شده از معدن سنگ آهن گل‌گهر اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که استفاده از مدل پیشنهادی پیشرفت مهمی در یک پروژه معدنی محسوب می‌شود [۱۰]. در مطالعاتی که در سال ۲۰۱۸ انجام شد، محققان از یک مدل کامپیوتری در نرم‌افزار متلب برای بهینه‌سازی عیارحد با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی استفاده کردند (در این مطالعه تنها به معیارهای اقتصادی پروژه توجه شده است) [۱۱]. در ادامه در سال ۲۰۱۹، مدلی برای تعیین میزان عیارحد بهینه و جایابی یک پروژه معدنی توسعه داده شد. مدل بهینه‌سازی عیارحد در این تحقیق، با استفاده از یک رویکرد تحلیلی با در نظر گرفتن درآمد و هزینه‌های مختلف از جمله درآمد ناشی از مواد باطله حاوی ماده معدنی و هزینه بازسازی، توسعه یافت [۱۲]. پژوهشگران در سال ۲۰۲۱، مدلی را برای بهینه‌سازی عیارحد با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی ارائه کردند. در این تحقیق، از فاکتورهای زیست محیطی مانند بازسازی و ارزش‌گذاری مجدد باطله‌های معدنی استفاده شد [۱۳]. در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۲، بهینه‌سازی عیارحد با در نظر گرفتن عدم قطعیت تخمین عیار انجام شد [۱۴]. در مقاله‌ای مروری که در سال ۲۰۲۳ انجام شد، پژوهشگران تکنیک‌ها، پیشرفت‌ها، محدودیت‌ها، مشکلات و مسیرهای تحقیقاتی بالقوه در آینده در زمینه بهینه‌سازی عیارحد برای برنامه‌ریزی معادن سطحی را ارائه کردند. محققان نشان دادند که در ملاحظات اقتصادی، هدف به حداکثر رساندن میزان بازگشت سرمایه است، در حالیکه پایداری فنی - اقتصادی به سمت حداکثر کردن بازیابی منابع معدنی تمایل دارد [۱۵].

همانگونه که دیده شد در رابطه با عیارحد و توسعه پایدار، در پژوهش‌های انجام شده به بازسازی باطله‌های معدن توجه زیادی شده است. تا چندی پیش در طراحی معدن و به طور خاص محاسبه عیارحد، صرفاً شاخص‌های اقتصادی در نظر گرفته می‌شدند. در پژوهش‌های اخیر شاخص‌های زیست محیطی و به طور مشخص هزینه‌های بازسازی در محاسبه عیار حد دخالت داده شده‌اند، اما پژوهشی که عوامل اجتماعی را نیز در نظر گرفته باشد گزارش نشده است. در تحقیق حاضر تاثیر هزینه‌های ناشی از هر سه اصل توسعه پایدار در محاسبه عیار حد بررسی و تحلیل شده است. در این مقاله، ابتدا مدل موجود عیارحد به عنوان مدل پایه مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با وارد کردن هزینه‌های توسعه پایدار به آن، مدل جدیدی بر اساس هزینه‌های توسعه پایدار ارائه می‌شود که در آن علاوه بر هزینه‌های مربوط به بازسازی انباشتگاه و کاواک معادن، هزینه‌های مربوط به کاهش تبعات اجتماعی معدنکاری نیز در نظر گرفته می‌شود. عیارحد معدن چغارت بر اساس مدل اولیه که بر اساس قیمت فلز است و مدلی که هزینه‌های توسعه‌ی پایدار در آن منظور شده است تعیین و با هم مقایسه می‌شوند.

### ۳- تأثیرات معدنکاری روباز معادن سنگ آهن

مراحل مختلف معدنکاری سنگ آهن و فرآوری کانسنگ حاصل از استخراج موجب تأثیرات بی‌شماری می‌شود. بزرگی و میزان اهمیت این تأثیرات بر محیط‌زیست و اکولوژی به بزرگی و مقیاس فعالیت معدنکاری در رابطه با توپوگرافی و شرایط آب و هوایی منطقه، شرایط ذخیره ماده معدنی، روش معدنکاری، ظرفیت معدن، فعالیت‌های کشاورزی منطقه و منابع جنگلی بستگی دارد. در ادامه به برخی تأثیرات مهم معدنکاری در این رابطه اشاره می‌شود.

تولید باطله‌های جامد یکی از معضلات زیست محیطی معدنکاری است که حجم انبوه این مواد مدیریت صحیح و دفن ایمن را می‌طلبد. با توجه به اهمیت مسائل زیست محیطی و تولید میزان زیادی باطله اعم از سنگ باطله و باطله کارخانه فرآوری به ازای استخراج هر تن کانسنگ، توجه بیش از پیش به امر مدیریت باطله‌ها در معادن سنگ آهن ضروری است [۱۶].

در چند دهه اخیر با توجه به بالارفتن حساسیت نسبت به آلودگی‌های زیست محیطی و همچنین محافظت از محیط‌زیست در کشورهای توسعه یافته، قوانین محکم و سختی برای کاهش تأثیرات منفی استخراج معادن وضع شده است. با این وجود استمرار استخراج معادن سطحی

در یک منطقه بدون اتخاذ تدابیر اصلاحی، بازگشت منطقه را به حالت اولیه غیر ممکن خواهد ساخت. هدف از روش‌های نوین بازسازی معادن به حداقل رساندن میزان صدمات حاصل از استخراج معادن می‌باشد. عملیات بازسازی از عملیات طراحی، برنامه‌ریزی و استخراج معدن قابل تفکیک نیست، بلکه جزئی از عملیات معدنکاری است که از ابتدا و به هنگام طراحی و برنامه‌ریزی شروع و تا آخرین مرحله از استخراج ادامه پیدا می‌کند و به هیچ وجه بازسازی در پایان عملیات معدنکاری آغاز نمی‌شود [۱۷، ۱۸].

ایجاد گرد و غبار یکی از آلودگی‌های اساسی معدن به شمار می‌آید که بخش عمده‌ای از غبارهای معدنی، حاصل فرآیندهای هوازدگی، فرسایش و فعالیت‌های انسانی در حین کار می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد، افرادی که برای طولانی مدت در معرض تنفس غبارهای معدنی قرار می‌گیرند، مبتلا به تومورهای بدخیم، سرطان ریه و دیگر بیماری‌های تنفسی می‌شوند. از این رو رعایت قوانین و اصول زیست‌محیطی برای کاهش خطرات زیست‌محیطی ناشی از غبار کانی‌ها الزامی است. حفاری، انفجار، ماشین‌آلات استخراج، حفاری و حمل‌ونقل، خردایش و جدایش مغناطیسی از پتانسیل‌های ایجاد گرد و غبار در روش روباز و در نتیجه آلودگی هوا می‌باشند [۱۸].

آلودگی‌های ناشی از پساب‌های معدن، زهاب‌های اسیدی و آزاد شدن عناصری چون آرسنیک، جیوه، کادمیوم، سرب، روی و غیره، به آب‌های زیرزمینی و سطحی یکی دیگر از مشکلات مهم زیست‌محیطی همراه با معدنکاری است. انسان‌ها موضوع اصلی هرگونه توسعه‌ای هستند و برخورداری از سلامت و توانایی‌های جسمی و روحی جز حقوق انسان‌ها در انطباق با طبیعت است. از لحاظ تاریخی، استخراج یکی از خطرناک‌ترین محیط‌های کاری در بسیاری از کشورها در سراسر جهان است [۱۹]. برای رعایت سلامت معدنکاران باید بیماری‌ها و حوادث ناشی از معدنکاری را کاهش داد. یکی از راهکارهای کاهش حوادث ناشی از معدنکاری این است که از عامل به وجود آورنده آن جلوگیری شود. بنابراین، اگر علل حادثه شناخته شود، روش‌های حفاظت و پیشگیری را می‌توان برای حذف آن‌ها طراحی و اعمال کرد، و در این راه احتمال بازگشت حادثه بسیار کم خواهد بود [۲۰، ۲۱]. عوامل ایجاد حوادث عبارتند از [۲۱]:

۱ - رویدادهای محیطی: وقایع یا شرایط ناشی از محل حادثه (به عنوان مثال، نور کم، کف مرطوب یا شرایط تنگ محیط کاری).

۲ - حوادث تجهیزات: حوادث ناشی از شکستگی و یا نقص در عملکرد ماشین‌آلات یا ابزار

۳ - حوادث پزشکی: حوادث ناشی از وضعیت سلامت شخص (به عنوان مثال، حمله قلبی یا دیابتی یا مبتلا به صرع)

۴ - حوادث رفتاری: حادثه‌ای که به‌طور مستقیم از خطای انسان ناشی می‌شود (به عنوان مثال، لمس کردن یک شی باردار الکتریکی)

بیشتر حوادث و سوانح را نمی‌توان تنها به شرایط کاری نامطلوب نسبت داد، به عنوان مثال، مطالعه‌ای که توسط اداره معادن ایالات متحده انجام شد نشان داد که خطای انسانی عامل اصلی حدود ۸۵ درصد حوادث و سوانح معدن می‌باشد [۲۱]. به این ترتیب، خطاهای انسانی نقش اصلی را در ایجاد حوادث معدن دارند و برای بالا بردن ایمنی و کاهش حوادث، انجام اقداماتی نظیر بهبود آموزش و اطلاعات کارگران؛ بازرسی‌های کافی از تجهیزات کار، تجهیزات حفاظت شخصی، نظارت کافی توسط سرپرستان، معاینات دوره‌ای پرسنل، انتخاب تجهیزات کار بهتر برای وظیفه مناسب و ایجاد قوانین و رویه‌های ماندگار و کارآمد برای کار امن، ضروری خواهد بود.

#### ۴- مدل‌سازی عیار حد

عیار حد، عیاری است که برای جدا کردن باطله و کانسنگ در یک ذخیره معدنی به کار گرفته می‌شود. به این ترتیب که موادی که عیار آن‌ها کم‌تر از عیار حد باشد، به عنوان باطله طبقه‌بندی شده و موادی که عیار آن بیش‌تر از عیار حد است، جزء طبقه کانسنگ قرار می‌گیرند. اهمیت عیار حد در عملیات معدنکاری از آن جهت است که این معیار نقش اساسی در طراحی و برنامه‌ریزی معادن روباز ایفا می‌کند.

علت آن که از عیار حد به عنوان یک عامل مهم در طراحی یاد می‌شود، تعداد پارامترهای وابسته به آن است. تغییرات عیار حد بر روی عیار متوسط، تناژ ماده معدنی و محدوده نهایی معدن تأثیر می‌گذارد و در نتیجه پارامترهایی مانند هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه‌های جایگزینی ماشین‌آلات، بازیابی و هزینه‌های عملیاتی را دست‌خوش تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان گفت عیار حد تابعی از متغیرهای هزینه و قیمت فروش محصول معدنی است و از آن جا که هر دو متغیر به نوبه‌ی خود به زمان و مکان مربوط می‌شوند، لذا با گذشت زمان عیار حد یک معدن و یا بخشی از آن، می‌تواند تغییر کند. همچنین بروز هر نوع تغییراتی در عرضه و تقاضای یک محصول معدنی باعث نوساناتی در عیار حد خواهد شد.

#### ۴-۱- مدل عیار حد اقتصادی

میزان سود، از تفاضل درآمد و هزینه به دست می‌آید (رابطه ۱) [۲۲]:

$$P = I - TC \quad (1)$$

در این رابطه:

$P$  - سود

$I$  - کل درآمد حاصل از فروش محصول نهایی

$TC$  - کل هزینه تولید محصول نهایی

درآمد حاصل از فروش محصول نهایی از حاصل ضرب مقدار محصول نهایی در قیمت واحد محصول به دست می‌آید (رابطه ۲).

$$I = Q * p \quad (2)$$

$Q$  - مقدار محصول نهایی

$p$  - قیمت واحد محصول نهایی

هزینه تولید محصول نهایی از حاصل ضرب مقدار محصول نهایی در هزینه تمام شده تولید واحد محصول به دست می‌آید (رابطه ۳).

$$TC = Q * c \quad (3)$$

$c$  - هزینه تولید واحد محصول

عیار حد، عیاری است که باعث شود درآمد با هزینه‌ها برابر و در نتیجه سود صفر شود (رابطه ۴).

$$I = TC \quad (4)$$

در این مدل درآمد بر حسب قیمت فلز می‌باشد. فرمول کلی جهت محاسبه عیار حد به شرح زیر به دست می‌آید:

$$I = g_{ore} * y * P_m \quad (5)$$

$$TC = C_{min} + C_{con} + C_s \quad (6)$$

در نقطه سربه‌سری (عیار حد) مقدار درآمد برابر با هزینه است (رابطه ۷):

$$10 * g_{ore} * y * (P_m - S) = C_{min} + C_{con} \quad (7)$$

و عیار کانسنگ همان عیار حد خواهد بود (رابطه ۸):

$$g_{ore} = g_c \quad (8)$$

در نتیجه می‌توان عیار حد را از رابطه ۹ به دست آورد، که فرمول کلی جهت محاسبه عیار حد سربه‌سری است.

$$g_c = \frac{C_{min} + C_{con}}{10 * y * (P_m - S)} \quad (9)$$

پارامترهای مورد استفاده عبارت است از:

$g_{ore}$  - عیار کانسنگ بر حسب درصد

$g_c$  - عیار حد کانسنگ بر حسب درصد

$y$  - مقدار بازیابی نهایی که از حاصل ضرب مقادیر بازیابی در مراحل فرآوری، ذوب و پالایش به دست می‌آید.

$P_m$  - قیمت فلز (واحد پول به ازای هر کیلوگرم)

$C_{min}$  - هزینه استخراج (واحد پول به ازای هر تن کانسنگ)

$C_{con}$  - هزینه تغلیظ (واحد پول به ازای هر تن کانسنگ)

$C_s$  - هزینه ذوب و پالایش (واحد پول به ازای هر تن کانسنگ)

$TC$  - کل هزینه استخراج، تغلیظ، ذوب و پالایش (واحد پول به ازای هر تن کانسنگ)

$S$  - هزینه ذوب و پالایش و فروش (واحد پول به ازای هر کیلوگرم)

#### ۴-۲- مدل عیار حد با تأثیر دادن هزینه‌ها و درآمدهای توسعه پایدار

همان‌طور که بیان شد برای وارد کردن اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی در انتخاب عیار حد، لازم است معایب و مزایای اجتماعی و محیط‌زیستی در قالب یک مدل اقتصادی ارائه شوند. در این راستا هزینه‌ها و درآمدهای مربوط به فعالیت‌های مرتبط با کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و اجتماعی معادن باید به عنوان هزینه‌ها و درآمدهای توسعه پایدار به مدل‌های عیار حد معدن اضافه شود. در ادامه، هزینه‌ها و درآمدهای موردنظر آورده شده است.

جنبه زیست‌محیطی:

- هزینه و درآمد ناشی از بازسازی معدن
- هزینه و درآمد ناشی از بازیابی مواد باطله
- هزینه کاهش آلودگی هوا
- هزینه کاهش آلودگی آب

جنبه اجتماعی:

- هزینه آموزش پرسنل، خانواده هایشان و مردم محلی

مدل جدید با اضافه کردن هزینه‌ها و درآمدها به مدل پایه ایجاد می‌شود. هزینه‌ها شامل تمام هزینه موارد بالا و درآمدها شامل درآمد حاصل از بازسازی باطله و کاواک و بازیابی مواد باطله می‌باشد. حتی در صورتی که بازسازی معدن مزایای بازاری نداشته باشد؛ مزایای غیر بازاری آن از قبیل بهبود چشم‌انداز منطقه نیز قابلیت ارزش‌گذاری و وارد شدن در رابطه را دارد.

$$I_{sd} = I_{recl} + I_{reco} \quad (10)$$

$$C_{sd} = C_{recl} + C_{reco} + C_{ap} + C_{wp} + C_e \quad (11)$$

$C_{sd}$  - هزینه سالانه توسعه پایدار

$I_{sd}$  - درآمد سالانه توسعه پایدار

$I_{recl}$  - درآمد سالانه ناشی از بازسازی

$I_{reco}$  - درآمد سالانه ناشی از بازیابی

$C_{recl}$  - هزینه سالانه بازسازی

$C_{reco}$  - هزینه سالانه بازیابی مواد موجود در باطله‌ی معدن

$C_{ap}$  - هزینه سالانه کاهش آلودگی هوا

$C_{wp}$  - هزینه سالانه کاهش آلودگی آب

$C_e$  - هزینه سالانه آموزش

مدل جدید بر اساس قیمت فلز:

$$I = g_{ore} * y * P_m + \left(\frac{I_{sd}}{T_{min}}\right) \quad (12)$$

$$TC = C_{min} + C_{con} + C_s + \left(\frac{C_{sd}}{T_{min}}\right) \quad (13)$$

$$10 * g_{ore} * y * (P_m - S) + \left(\frac{I_{sd}}{T_{min}}\right) = C_{min} + C_{con} + \left(\frac{C_{sd}}{T_{min}}\right) \quad (14)$$

<sup>1</sup> Sustainable development costs

<sup>2</sup> Income for sustainable development

<sup>3</sup> Income of Reclamation

<sup>4</sup> Income of Recovery

<sup>5</sup> Reclamation costs

<sup>6</sup> Cost Recovery

<sup>7</sup> Costs of reducing air pollution

<sup>8</sup> Costs of reducing water pollution

<sup>9</sup> Cost of Education



$$10 * g_{ore} * y * (P_m - S) = C_{min} + C_{con} + \left( \frac{C_{sd} - I_{sd}}{T_{min}} \right) \quad (15)$$

$$g_c = \frac{C_{min} + C_{con} + \left( \frac{C_{sd} - I_{sd}}{T_{min}} \right)}{10 * y * (P_m - S)} \quad (16)$$

$T_{min}$  - میزان کانسنگ استخراجی در هر سال

### ۵- اجرای مدل پیشنهادی در معدن سنگ آهن چغارت و تحلیل نتایج

معدن سنگ آهن چغارت یکی از بزرگ‌ترین معادن سنگ آهن ایران است که در ۱۲ کیلومتری شهر بافق و ۱۲۴ کیلومتری شهرستان یزد واقع شده و دارای ۱۷۷ میلیون تن ذخیره قابل استخراج است. استخراج کانسنگ از معدن توسط شرکت پیمانکار شهداد یزد به روش روباز انجام می‌شود. کارشناسان شرکت سنگ آهن بر عملیات استخراج نظارت دارند. عملیات بهره‌برداری از معدن از سال ۱۳۵۰ آغاز شده و تا پایان سال ۱۳۸۴ حدود ۹۷ میلیون تن سنگ آهن از معدن استخراج شده است. مشخصات طرح استخراجی معدن چغارت در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. پارامترهای اقتصادی معدن سنگ آهن چغارت [۲۳]

Table 1: Economic parameters of Choghart Iron Ore mine

واحد	مقدار	شرح
(میلیون تن)	4.1	استخراج سالانه کانسنگ
(میلیون تن)	10	باطله سالانه تولیدی
(میلیون تن)	1.629	تولید سالانه کانسنگ دانه‌بندی
(میلیون تن)	1.326	تولید سالانه کانه‌آراسته
(هزار ریال)	79	هزینه استخراج هر تن کانسنگ
(هزار ریال)	376	هزینه تولید هر تن محصول دانه‌بندی
(هزار ریال)	613	هزینه فرآوری هر تن کانه آراسته
درصد	77.8	بازیابی کلی معدن
درصد	61	متوسط عیار محصول فروختنی

ماده معدنی تولید شده به دو صورت دانه‌بندی و کانه‌آراسته است که خصوصیات این نوع محصول در زیر آمده است که هر دو محصول مورد نیاز شرکت ذوب آهن می باشد.

- **دانه‌بندی:** که ابعاد آن ۶ تا ۳۰ میلی‌متر می‌باشد که مواد زیر ۶ میلی‌متر آن می‌تواند تا حدود ۵/۵ درصد از کل وزن نیز برسد و مقدار ۳۰ میلی‌متر آن نیز می‌تواند تا حدود ۱۰ درصد از کل وزن برسد. عیار آهن حدود ۵۷ درصد و عیار فسفر آن ۰/۱۵ درصد می باشد.

- کانه آراسته : که ابعاد آن ۵ تا ۶ میلی متر می باشد و عیار آهن آن ۶۶ درصد و عیار فسفر آن ۰/۱۹ درصد است. درصد گوگرد به علت اینکه ناچیز است اندازه گیری نمی شود [۲۳].

این معدن محصول نهایی خود را با متوسط عیار ۶۱ درصد به ذوب آهن اصفهان می فرستد. داده های مربوط به بخش ذوب در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. داده های ذوب [۲۴]

Table 2: Melting data

شرح	مقدار	واحد
هزینه تمام شده ذوب و فروش یک تن محصول نهایی	12	(میلیون ریال)
قیمت فروش محصول نهایی	450	(دلار بر تن)
بازیابی مرحله ذوب	97	درصد

#### ۵-۱- هزینه های توسعه پایدار محاسبه شده در معدن چغارت

هزینه های توسعه پایدار در معدن سنگ آهن چغارت شامل هزینه کاهش آلودگی آب، هزینه کاهش آلودگی هوا، هزینه ناشی از بازسازی و بازیابی مواد باطله معدن و هزینه آموزش است. در ادامه به توضیح هر یک از این موارد ذکر شده پرداخته می شود.

#### الف- آلودگی آب در معدن

با توجه به شرایط موجود در شهر آهن شهر و پایین بودن سطح آب های زیرزمینی و نیاز به آب در بخش فرآوری معدن، تصفیه خانه علاوه بر رفع معضل دفع فاضلاب، آب مورد نیاز این بخش از معدنکاری را نیز فراهم می کند. همانطوری که گفته شده است، محصول فروختنی معدن دو نوع دانه بندی و کنسانتره است. در سایت خردایش محصول دانه بندی ماده معدنی فقط دانه بندی می شود و هیچ فرآوری دیگری بر روی محصول دانه بندی شده صورت نمی گیرد و به تبع آن هیچ زهاب اسیدی در واحد خردایش به وجود نمی آید. در محصول کانه آراسته، طبق مطالعات انجام شده تا زمانی که به دلیل شرایط گرم و خشک منطقه آب به سرعت بخار می شود، خطری برای محیط زیست به وجود نخواهد آمد و آب موجود در سدهای باطله به میزان ۳۵ تا ۴۰ درصد بازیابی می شود و در چرخه تولید مورد استفاده مجدد قرار می گیرد.

هزینه سالانه بهسازی و ترمیم تأسیسات تصفیه فاضلاب موجود در آهن شهر ۲۵۰ میلیون ریال است و ۵۰ میلیارد ریال جهت طرح اجرای سیستم فاضلاب شهری و بهداشتی هزینه شده است. با انجام این هزینه ها حق بهره برداری از آب تصفیه خانه به مدت ۳۵ سال به معدن واگذار می شود [۲۳].

#### ب- آلودگی هوا در معدن

در معدن هزینه صرف شده برای جلوگیری از ایجاد گرد و خاک (آبپاشی سینه کار)، آبپاشی جاده ها، کنترل آلودگی هوا نظیر تعمیر غبارگیرهای کارخانه فرآوری و سایت خردایش ۱۰ میلیارد ریال است. علاوه بر این، کارگران این بخش نیز ملزم به استفاده از وسایل ایمنی از جمله ماسک می باشند [۲۳].

## پ- آلودگی خاک، مدیریت باطله و احیای آن

باطله‌های معدن شامل موارد زیر است:

- خاک روباره که در ترمیم جاده‌های معدن و پاک‌سازی محوطه کارگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد و در قسمتی از این روباره درختکاری انجام شده است. بخشی از این روباره شامل آهن پلاستی با عیار ۱۳ تا ۱۶ درصد است که بازیابی آن توسط شرکت پرسال شروع شده است.
- باطله ناشی از واحد خردایش که مذاکره با شرکت دیگری برای بازیابی آن در حال انجام می‌باشد.
- باطله کارخانه فرآوری که برای جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست در ۵ سد باطله ریخته شده است و عیار آهن آن بین ۲۰ تا ۲۵ درصد است.

به علت وجود عناصر کمیاب وانادیوم، تیتان، توریوم، اورانیوم و غیره در معدن چغارت و گسترش کاواک نهایی هیچ نوع بازسازی برای آن در نظر گرفته نشده است ولی برای جبران آثار زیست‌محیطی ناشی از معدنکاری، ۳۲۸ هکتار درختکاری صورت گرفته است. این درختان که بیش‌تر آن‌ها نخل و گز می‌باشد در پارک و شهرک آهن‌شهر، معدن چغارت، بلوار آهن و اداره جدید چغارت ایجاد شده‌اند. هزینه سالانه‌ی توسعه و نگهداری فضای سبز ۳۰ میلیارد ریال است [۲۳].

هزینه‌های سالانه صرف شده جهت مدیریت پسماند ۲۰۰۰ میلیون ریال است که شامل جمع‌آوری، نگهداری و فروش روغن سوخته؛ ضایعات کارگاهی؛ ضایعات آهن‌آلات و لاستیک‌های فرسوده می‌باشد [۲۳].

## ت- هزینه‌های آموزش

در این مقاله هزینه‌های اجتماعی در واقع هزینه‌هایی را شامل می‌شود که بالاتر از حد تعیین شده در دستورالعمل است و هزینه‌هایی است که در راستای بالا بردن سطح دانش و مهارت کارکنان، خانواده‌هایشان و مردم محلی می‌شود. به این ترتیب معدن با اختصاص دادن بخشی از درآمد خود به چنین مواردی می‌تواند در راستای کاهش ناهنجاری‌های اجتماعی، ارتقای فرهنگی و علمی و مهارت‌آموزی جامعه ای که در آن واقع شده است، گام مهمی بردارد. بر این اساس رقم این هزینه‌ها حدود ۳،۳۱۰ میلیون ریال تخمین زده می‌شود [۲۳]. مجموع هزینه‌های سالانه توسعه پایدار معادل ۹۵،۵۶۰ میلیون ریال است (جدول ۳).

جدول ۳. هزینه‌های توسعه پایدار معدن چغارت در سال [۲۳]

Table 3: Costs of sustainable development of Choghart mine per year

ردیف	شرح	مقدار	واحد
۱	هزینه کاهش آلودگی آب	50,250	(میلیون ریال)
۲	هزینه کاهش آلودگی هوا در معدن	10,000	(میلیون ریال)
۳	هزینه ناشی از آلودگی خاک، مدیریت باطله و احیای آن	32,000	(میلیون ریال)
۴	هزینه‌های آموزش	3,310	(میلیون ریال)
	مجموع هزینه‌ها	95,560	(میلیون ریال)

$$C_{sd} = C_{recl} + C_{reco} + C_{ap} + C_{wp} + C_e = 95560 \text{ میلیون ریال}$$

## ۲-۵- محاسبه عیار حد معدن چغارت

برای محاسبه و مقایسه عیارهای به دست آمده دو حالت در نظر گرفته شده برای یکسان سازی واحدها تمام هزینه‌ها و درآمدها بر حسب دلار (ریال  $1\$ = 32000$ ) تعیین شد.

### حالت اول (عیار حد اقتصادی):

همانطوری که بیان شد در این معدن دو نوع محصول بدست می‌آید که هزینه فرآوری هر یک متفاوت است و در نهایت با ادغام این محصولات، محصول نهایی با عیار ۶۱ درصد به ذوب آهن اصفهان تحویل داده می‌شود. متوسط هزینه فرآوری هر تن محصول نهایی با عیار ۶۱ درصد بر اساس میانگین وزنی از دو محصول دانه‌بندی و کانه‌آراسته به صورت رابطه ۱۷ به دست می‌آید.

$$C_{con} = \frac{(T_{cn} * C_{cn} * (1/CF)) + (T_{Grading} * C_{Grading})}{(T_{cn} * (1/CF)) + T_{Grading}} \quad (17)$$

$C_{Grading}$  - هزینه تولید هر تن محصول دانه‌بندی

$C_{cn}$  - هزینه تولید هر تن محصول کانه‌آراسته

$T_{Grading}$  - تناژ محصول دانه‌بندی

$T_{cn}$  - تناژ ورودی محصول کانه‌آراسته (تناژ کانسنگ استخراجی که به منظور تولید محصول کانه‌آراسته به کارخانه فرآوری فرستاده

می‌شود).

$CF$  - با عنوان نسبت پرعیارشوندگی یاد می‌شود که برابر نسبت وزن خوراک به وزن کانه‌آراسته تولید شده از آن خوراک می‌باشد.

$C_{cn} * (1/CF)$  - هزینه تولید محصول کانه‌آراسته از هر تن کانسنگ

$$C_{con} = \frac{(2471000 * 613000 * (\frac{1326000}{2471000})) + (376000 * 1629000)}{4100000} = 348000 \quad (18)$$

$$C_{con} = 348000 \text{ ریال بر تن}$$

برای یکسان سازی واحدها قیمت فروش محصول نهایی به ریال تبدیل می‌شود:

$$P_m (\text{تن/ریال}) = 32000 * 450 = 14400000$$

بازیابی نهایی از ضرب بازیابی تمام مراحل استخراج، فرآوری (در معدن) و ذوب بدست می‌آید:

$$y = y_{con} * y_s \quad (19)$$

$y_{con}$  - بازیابی مرحله استخراج و فرآوری

$y_s$  - بازیابی مرحله ذوب

$$y = 0.778 * 0.97 = 0.754$$

در نهایت عیار حد معدن بر اساس رابطه‌ی (۹) و جدول‌های ۱ و ۲ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$g_c = \frac{C_{min} + C_{con}}{y(P_m - S)} = \frac{79 + 348}{0.754 * (14400 - 12000)}$$

$$g_c = 23.6 \text{ درصد}$$

حالت دوم) عیار حد با تأثیر هزینه‌های توسعه پایدار

عیار حد معدن بر اساس رابطه‌ی (۱۶) و جدول‌های ۱ و ۲ و ۳ به صورت زیر به دست می‌آید:

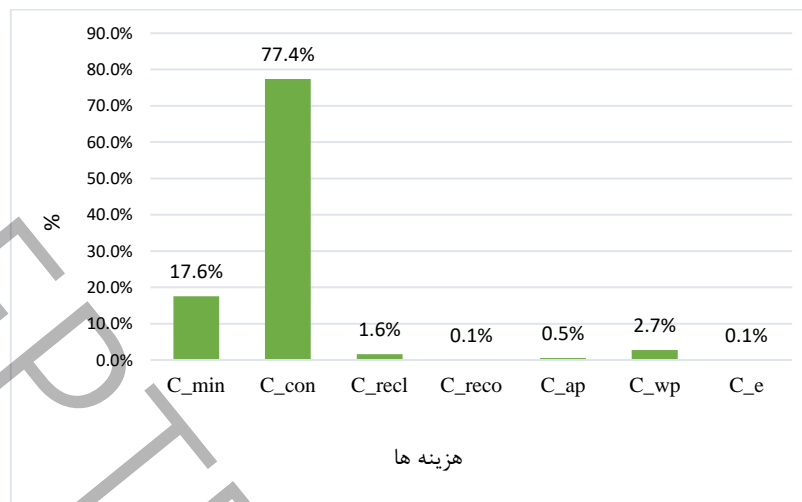
$$g_c = \frac{C_{min} + C_{con} + \left(\frac{C_{sd} - I_{sd}}{T_{min}}\right)}{y(P_m - S)} = \frac{79 + 348 + \left(\frac{95560000}{4100000}\right)}{0.754 * (14400 - 12000)}$$

$$g_c = 24.9$$

همانطور که مشاهده می‌شود عیار حد به میزان ۵/۵ درصد نسبت به عیار حد بدون معیارهای توسعه پایدار افزایش می‌یابد که باعث کاهش تناژ استخراجی می‌شود. کوچکتر شدن ذخیره قابل استخراج به معنای طول عمر کمتر معدن و کاهش مطلوبیت آن از نظر اقتصادی است. هر چند این کاهش تنها در نتیجه ۵/۵ درصد افزایش عیار حد با مدل قبلی به دست می‌آید و ممکن است تأثیر چندانی در نتایج ناشی از آن نداشته باشد.

### ۳-۵- تحلیل حساسیت

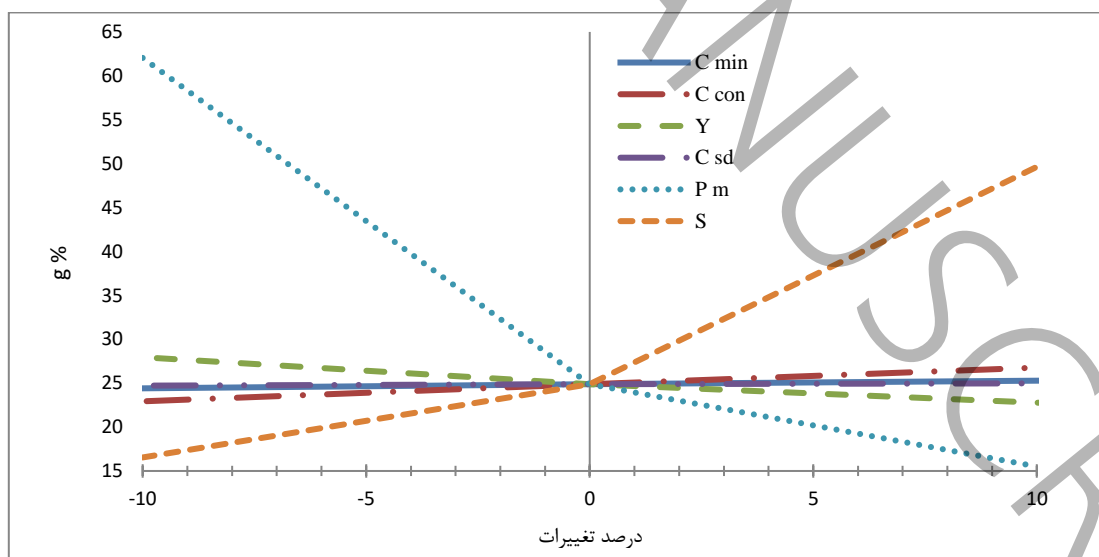
در نمودار شکل ۲ سهم هر کدام از هزینه‌های توسعه پایدار و هزینه‌های مؤثر بر عیار حد مشخص شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، هزینه‌های توسعه پایدار تنها حدود ۵ درصد از کل هزینه‌های مؤثر بر عیار حد معدن چغارت را تشکیل می‌دهد.



شکل ۲. سهم هزینه‌های توسعه پایدار و سایر هزینه‌ها در عیار حد معدن چغارت

**Figure 2: The share of sustainable development costs and other costs in the cutoff grade amount of Choghart mine**

نمودار تحلیل حساسیت برای عیار حد در شکل ۳ رسم شده است. هر پارامتر را با ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها تغییر داده و تأثیر آن را در عیار حد بررسی می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود، بیش‌ترین حساسیت عیار حد مربوط به پارامترهای قیمت محصول نهایی و هزینه ذوب و فروش است و کم‌ترین حساسیت مربوط به هزینه استخراج و توسعه پایدار است. براساس نمودار حساسیت عیار حد، حساسیت پارامتر هزینه‌های توسعه پایدار از پارامتر هزینه استخراج هم کم‌تر است. به عبارت دیگر، هزینه‌های توسعه پایدار کم‌ترین تأثیر را در عیار حد معدن چغارت دارد.



شکل ۳. تحلیل حساسیت عیار حد نسبت به هزینه‌ها

**Figure 3: Sensitivity analysis of the cutoff grade to the costs**

بنابراین، نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در تحقیق حاضر نشان می‌دهد که با به‌کارگیری این روش نه تنها تغییر زیادی در عیار حد حاصل نشده است، بلکه برخی از مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی پروژه با لحاظ کردن این هزینه‌ها مرتفع می‌شود. در ادامه، برخی از مزایای توسعه پایدار در معدنکاری که با اجرای روش پیشنهادی و با صرف کمترین درصد هزینه حاصل می‌شود، ارائه شده است. این مزایا عبارت هستند از:

- اشتغال‌زایی برای ۳۶۰ نفر.
- ایجاد پوشش گیاهی دائمی، نمای هماهنگ با منطقه و جلوگیری از فرسایش خاک بخصوص در سطوح شیب‌دار دامپ باطله.
- دامپ‌های پایدار با کمترین آثار منفی زیست‌محیطی.
- استفاده از باطله‌های معدنکاری شده که باعث کاهش باطله وارد شده به محیط زیست می‌شود.
- ایجاد درآمد بیشتر برای دولت از پرداخت مالیات.
- کاهش آلودگی آب و استفاده مجدد از آب تصفیه شده برای تولید کنسانتره.
- کاهش هزینه‌های درمانی به علت کاهش آلودگی هوا و کاهش بیماری‌های ناشی از آلودگی هوا برای پرسنل و جامعه نزدیک به معدن.
- کاهش حوادث در معدن در اثر آموزش نکات ایمنی به صورت دوره‌ای و افزایش بازدهی در اثر آموزش صحیح حرفه معدنکاری.

## ۶- نتیجه‌گیری

تعیین عیار حد بهینه در معادن روباز کاری پیچیده است و تأثیر قابل توجهی در میزان سودآوری یک پروژه، مقدار باطله تولیدی و محدوده نهایی کاواک دارد. از آنجایی که فعالیت‌های معدنکاری باعث تولید باطله، آلودگی آب و هوا و بیماری‌ها و حوادث ناشی از آن می‌شود، بنابراین مدیریت منابع معدنی و بهره‌برداری بهینه از آن‌ها مستلزم آن است که علاوه بر توجه به مسائل اقتصادی، نگاهی ویژه و گامی موثر در جهت کاهش این مشکلات داشته باشد. در این راستا، طراحی معدن باید مبتنی بر اصول توسعه پایدار باشد، به طوری که طراحی معدن بدون در نظر گرفتن معیارهای توسعه پایدار، یک طراحی نادرست خواهد بود. عیار حد یکی از فاکتورهای مهم در طراحی و برنامه‌ریزی تولید معادن روباز است. در نظر گرفتن شاخص‌های توسعه پایدار در محاسبه عیار حد باعث طراحی پایدار معدن می‌شود و بزرگترین فرصت برای کاهش اثرات نامطلوب فعالیت‌های معدنکاری است. تا چندی پیش در محاسبه عیار حد صرفاً شاخص‌های اقتصادی در نظر گرفته می‌شدند. در پژوهش‌های اخیر شاخص‌های زیست‌محیطی نیز دخالت داده شد، اما پژوهشی که عوامل اجتماعی را نیز در نظر گرفته باشد گزارش نشده است. از این رو در پژوهش حاضر، مدلی جدید برای محاسبه عیار حد ارائه شده است که علاوه بر معیار اقتصاد و محیط زیست، معیار اجتماع نیز در آن لحاظ شده است. برای انجام تحقیق، هزینه‌های مرتبط با توسعه پایدار در فرمول عیار حد سرب‌سری وارد و با داشتن اطلاعات مربوط به معدن سنگ آهن چغارت، روش پیشنهادی اعتبارسنجی شد. نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد که هزینه‌های توسعه پایدار لحاظ شده در تخمین عیار حد معدن سنگ آهن چغارت تنها ۵ درصد از کل هزینه‌ها را تشکیل می‌دهد. نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان می‌دهد این هزینه‌ها کم‌ترین تأثیر را در تعیین عیار حد داشته و عیار حد معدن نسبت به قیمت محصول نهایی و هزینه‌های توسعه پایدار به ترتیب بیشترین و کم‌ترین حساسیت را دارد. نتایج حاصل از تحقیق همچنین نشان می‌دهند که تأثیر هزینه‌های توسعه پایدار در معدن چغارت باعث افزایش ۵/۵ درصدی عیار حد از ۲۳/۶ به ۲۴/۹ شده است و ممکن است تأثیر چندانی در نتایج ناشی از آن نداشته باشد. بنابراین، نتایج حاصل از

پایاده‌سازی مدل پیشنهادی در تحقیق حاضر نشان می‌دهد که با به‌کارگیری این روش نه تنها تغییر زیادی در عیار حد حاصل نشده است، بلکه برخی از مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی پروژه نیز با لحاظ کردن هزینه‌های توسعه پایدار و صرف کمترین درصد هزینه، مرتفع خواهد شد.

## ۷- مراجع

- [1] P.M. James, The miner and sustainable development, *Mining Engineering*, 51 (1999).
- [2] K.F. Lane, Choosing the optimum cut-off grade Q, *Colorado Sch. Min.*, 59 (1964) pp. 811-829.
- [3] B. King, Impact of rehabilitation and closure costs on production rate and cut-off grade strategy, in: *APCOM'98* (London, 19-23 April 1998), 1998, pp. 617-629.
- [4] G. Ramirez-Rodriguez, T. Rozgonyi, Evaluating the impact of environmental considerations in open pit mine design and planning, in: *Proceedings of the eighth international symposium on environmental issues and waste management in energy and mineral production*, 2004, pp. 125-131.
- [5] J. Gholamnejad, Incorporation of rehabilitation cost into the optimum cut-off grade determination, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 109(2) (2009) 89-94.
- [6] M. Osanloo, F. Rashidinejad, B. Rezai, Incorporating environmental issues into optimum cut-off grades modeling at porphyry copper deposits, *Resources Policy*, 33(4) (2008) 222-229.
- [7] F. Rashidinejad, M. Osanloo, B. Rezai, An environmental oriented model for optimum cut-off grades in open pit mining projects to minimize acid mine drainage, *International Journal of Environmental Science & Technology*, 5 (2008) 183-194.
- [8] A. BAŞÇETİN, S. TÜYLÜ, A. Nieto, The Study of Relationships Between Economical And Environmental Parameters For Sustainable Resources Management.
- [9] S. Narrei, M. Osanloo, Optimum cut-off grade in open pit mines with considering post-mining land-use revenues, in: *proceedings of 20th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES 2011)*, 2011, pp. 233-247.
- [10] S. Narrei, M. Osanloo, Optimum cut-off grade's calculation in open pit mines with regard to reducing the undesirable environmental impacts, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(3) (2015) 226-242.
- [11] M.R. Ahmadi, Cutoff grade optimization based on maximizing net present value using a computer model, *Journal of Sustainable Mining*, 17(2) (2018) 68-75.
- [12] B.I.A. Muttaqin, C.N. Rosyidi, E. Pujiyanto, A Sequential Optimization Model of Cut-off Grade and Project/Location Selection in Open Pit Mining, *Industrial Engineering & Management Systems*, 18(3) (2019) 369-382.
- [13] R. Novitasari, C. Rosyidi, A. Aisyati, A Cut-off Grade Optimization Model in Multi Product Open Pit Mining Considering Reclamation and Valuable Waste Materials, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2021, pp. 012019.
- [14] C. Birch, Optimizing cut-off grade considering grade estimation uncertainty-A case study of Witwatersrand gold-producing areas, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 122(7) (2022) 337-346.
- [15] P. Biswas, R.K. Sinha, P. Sen, A review of state-of-the-art techniques for the determination of the optimum cut-off grade of a metalliferous deposit with a bibliometric mapping in a surface mine planning context, *Resources Policy*, 83 (2023) 103543.
- [16] S.-h. Zhang, X. Xue, X. Liu, P. Duan, H. Yang, T. Jiang, D. Wang, R. Liu, Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources, *Journal of mining Science*, 42 (2006) 403-408.
- [17] M. Osanloo, *Mine Reclamation*, Second ed., Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran, 2008.
- [18] R.-A. Ostovar, *Mine Blasting*, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran, 2004.
- [19] M.a.M. Malek, S., Investigation of Occupational Accident Patterns in Iranian Miners, *Journal of Occupational Medicine*, 3(1) (2011) 28-33.
- [20] J.M. Patterson, S.A. Shappell, Operator error and system deficiencies: analysis of 508 mining incidents and accidents from Queensland, Australia using HFACS, *Accident Analysis & Prevention*, 42(4) (2010) 1379-1385.
- [21] L. Sanmiquel, M. Freijo, J. Edo, J.M. Rossell, Analysis of work related accidents in the Spanish mining sector from 1982-2006, *Journal of safety research*, 41(1) (2010) 1-7.
- [22] M. Osanloo, *Open Pit Mine Extraction*, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran, 2010.
- [23] I.M.P.a.S. Company, 2014.
- [24] E.s. company, 2014.



# Cut-Off Grade Determination of Iron Ore Mines Considering Sustainable Development Costs

Mojtaba Jahani<sup>a</sup>, Majid Ataee-pour<sup>b\*</sup>, Zeinab Jahanbani<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Master of Science, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Associate Professor, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, [map60@aut.ac.ir](mailto:map60@aut.ac.ir)

<sup>c</sup> Ph. D Candidate, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, [jahanbani1990@gmail.com](mailto:jahanbani1990@gmail.com)

## ABSTRACT

Cutoff grade is one of the most important factors in production mine planning and design of open pit mines. Considering the indicators of sustainable development in the calculation of Cutoff grade leads to the sustainable design of the mine and is the biggest opportunity to reduce the adverse effects of mining activities. Until recently, only economic indicators were considered in the calculation of the cutoff grade. In recent studies, environmental indicators have also been implicated, but research that considers social factors has not been reported. Therefore, in the present study, a new model has been developed to calculate the cutoff grade, which includes all three criteria of sustainable development. To carry out the study, the costs related to sustainable development were entered into the break-even cutoff grade formula and the proposed model was validated with the information related to Choghart Iron Ore Mine. The results show that the sustained development costs included in the estimation of the Choghart Iron Ore Mine account for only 5% of the total costs, and the results of the sensitivity analysis show that these costs have the least impact on the determination of cutoff grade. The findings also show that the impact of sustainable development costs in Choghart Mine has increased the percentage of the cutoff grade by 5.5% and may not have much effect on the results. Therefore, the results of the implementation of the proposed model in this research show that by using this method, a big change has not been achieved in the percentage of the cutoff grade. Also, some of the environmental and social problems of the project, taking into account the sustainable development costs, and spending the lowest percentage of the cost will be decreased.

## KEYWORDS

Cutoff Grade, Sustainable Development, Environment, Social, Choghart Iron Ore Mine