مقاله

طراحی محدوده نهایی بهینه معدن چادرملو

آرش کوچکی پیرکوهی
کارشناس ارشد استخراج معدن

علی پرهیزکار میاندهی
استادیار گروه استخراج، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان

چکیده

یکی از مهمترین مسائل در طراحی معادن به روش استخراج روباز، تعیین محدوده نهایی معدن است. منظور از محدوده نهایی محدوده‌ای است که اگر همین امروز کلیه بلوک‌های کانسنگ و باطله داخل آن استخراج شوند، بیشترین NPV را در بر خواهد داشت و شکل کاواک را در پایان عمر معدن نشان می‌دهد. از این محدوده برای تعیین پارامترهایی همچون میزان گسترش طولی، عرضی و عمقی معدن، محاسبه ذخیره قابل استخراج، محاسبه مقدار باطله‌برداری، تعیین عمر معدن، احداث مسیرهای دسترسی به مواد معدنی، تعیین محل انباشت باطله، محل تأسیسات سطحی و در نهایت برنامه‌ریزی تولید استفاده می‌شود.

در این تحقیق، طراحی محدوده نهایی معدن و تعیین میزان ذخیره استخراجی معدن سنگ آهن چادرملو با استفاده نرم‌افزارهای Datamine و NPV Scheduler تشریح شده است. در ابتدا اطلاعات حاصل از گمانه‌های اکتشافی وارد نرم‌افزار دیتاماین و پس از تفسیر پیکره ماده معدنی و تهیه مدل بلوکی زمین‌شناسی، مشخص شد که تناژ کلی مواد داخل کاواک برابر با ۱۱۹۰ میلیون تن است که از این مقدار، ۸۵۰ میلیون تن باطله و ۳۴۰ میلیون تن ماده معدنی است. در مرحله بعد مدل بلوکی تهیه شده وارد نرم‌افزار NPV Scheduler و پس از تهیه مدل بلوکی اقتصادی مشخص شد که مدل بلوکی شامل ۸۶۹ میلیون تن باطله و ۳۲۱ میلیون تن کانسنگ آهن با عیار متوسط ۵۱ درصد است. در نهایت با استفاده از مدل بلوکی اقتصادی و محدوده نهایی به‌دست‌آمده، کاواک معدن با مشخصات شیب نهایی، شیب پله، ارتفاع پله، عرض پله به ترتیب ۳۵ درجه، ۷۵ درجه، ۱۵ متر، ۴۰ متر و نسبت باطله‌برداری کل برابر ۶ طراحی شد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی معدن روباز، ارزش خالص فعلی، طراحی محدوده نهایی بهینه، معادن روباز، مدل بلوکی، معدن آهن چادرملو

مقدمه

روش‌های استخراج به طور کلی به دو دسته زیرزمینی و سطحی تقسیم می‌شوند. در روش استخراج روباز که متداول‌ترین روش برای استخراج سطحی است، آن‌قدر از سطح زمین باطله برداشت می‌شود که به ماده معدنی دستیابی حاصل شود. برای معدنکاری روباز طراحی‌های زیادی صورت می‌گیرد. طرح استخراجی یک معدن، به منظور مطالعات امکان‌سنجی، عملیاتی کردن طرح و تصمیم‌گیری در خصوص سرمایه‌گذاری

برای احداث یک واحد معدنی تهیه می‌شود.

تعیین محدوده نهایی معادن روباز، یکی از مهمترین مراحل طراحی است که باید در مراحل اولیه طراحی و در طول عمر معدن به کرات بازنگری و اصلاح شود. این امر از نقطه نظر نتایج اقتصادی معدن، بیشترین اهمیت را دارد زیرا محدوده نهایی معدن نه تنها نشانگر آن است که کدام قسمت از ذخیره معدن بایستی برای حداکثر شدن ارزش اقتصادی کاواک استخراج شود، بلکه همزمان با آن، محدودیت‌ها و شرایط جایابی تأسیسات دائمی معدن در خارج از محدوده کاواک نظیر سنگر مواد باطله، سنگ شکن‌ها، کارخانه فراوری و نظایر آنها نیز در نظر گرفته می‌شود.

محدوده نهایی معدن روباز نشان‌دهنده شکل معدن در پایان عمر آن است و استخراج ماده معدنی آن بیشترین سود را حاصل می‌کند لذا محدودیت شیب نیز باید لحاظ شود. در بهینه‌سازی محدوده معدن روباز یک سری عوامل تعیین کننده‌اند که تحت تأثیر یکدیگر قرار می‌گیرند، یعنی بدون دانستن عیار حد، ذخیره نهایی معدن قابل محاسبه نیست، بدون دانستن ذخیره نهایی، حد نهایی معدن قابل محاسبه نیست، بدون دانستن عیار حد و تناژ نهایی، برنامه‌ریزی تولید غیرممکن است و بدون برنامه‌ریزی، شناخت ظرفیت مورد نیاز هزینه‌های جاری و هزینه‌های سرمایه‌گذاری، عیار حد و ذخیره نهایی قابل محاسبه نیست.

در حالت کلی برای طراحی محدوده نهایی معدن روباز سه روش اصلی وجود دارد:

- روش‌های دستی
- روش‌های دستی - کامپیوتری
- روش‌های کامپیوتری

روش دستی بیشتر در معادن کوچک کاربرد دارد. در روش‌های دستی-کامپیوتری محدوده نهایی به وسیله کامپیوتر و با استفاده از اصول روش دستی تعیین می‌شود. در روش کامپیوتری محدوده نهایی به وسیله تکنیک‌های مختلفی از قبیل مدل‌های ریاضی، برنامه‌ریزی پویا، تئوری گراف، معادلات لاگرانژ، الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های عصبی و روش‌های ابتکاری تعیین می‌شود که هر یک مزایا و نواقصی دارند. عوامل زمین‌شناسی، اقتصادی، فنی و همچنین ماهیت مدل‌ها و روش‌های به‌کار رفته در توسعه مدل‌ها از جمله عواملی هستند که در تطبیق نتایج با شرایط واقعی مؤثرند.

مهمترین عوامل موثر در اقتصادی بودن معادن عیار، عمق، ضخامت روباره، مقدار ذخیره و تکنولوژی فرآوری است. برای محاسبه ذخیره قابل استخراج و به دنبال آن طراحی بهینه استخراج لازم است اطلاعات تفضیلی از خصوصیات ذخیره در دسترس باشد. این خصوصیات شامل توزیع فضایی کانسنگ پرعیار، کم عیار و باطله و همچنین نحوه تغییرپذیری ضخامت و عیار کانسنگ و روباره و همبستگی بین عیار فلز اصلی و محصولات فرعی (فلزات با ارزش) است.

مراحل طراحی یک معدن به شرح زیر خلاصه می‌شود:

الف: تهیه مدل بلوکی سه بعدی از کانسار

ب: تعیین محدوده نهایی معدن

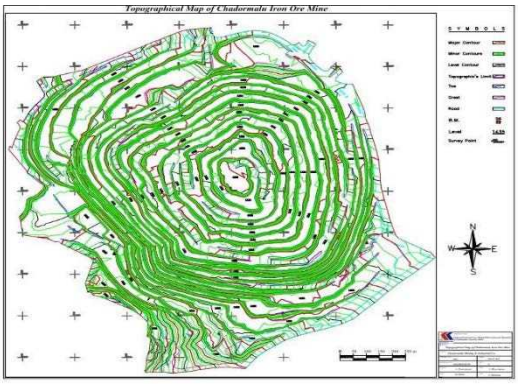
در این پروژه از نرم افزار Datamine Studio و NPV Scheduler و روش عکس مجذور فاصله به منظور تخمین عیار کانسار برای طراحی بهینه معدن سنگ‌آهن چادرملو استفاده شده است.

معرفی معدن سنگ آهن چادرملو

معدن سنگ آهن چادرملو بزرگ‌ترین کانسار آهن در ایران مرکزی است. نام این کانسار ریشه در زبان دری دارد و در اصل «چاه دره ملون» و ملون نوعی گربه وحشی بوده است. کانسار چادرملو در سال ۱۳۱۹ شناسایی شده و در حال حاضر بزرگ‌ترین تولید کننده سنگ آهن کشور و ذخیره آن ۴۰۰ میلیون تن و ذخیره قابل استخراج ۲۰۳ میلیون تن است.

شکل ۱- عکس هوایی از معدن چادرملو

با توجه بـه خصوصیـات فیـزیکی و زمین‌شناسی کـانسار، شرایط ژئومکانیکی، نرخ تولید و عوامل اقتصادی، روش استخراج گزینش شده بـرای معـدن سنگ آهن چـادرملو، استخراج به روش روبـاز است. در حال حاضـر با تـوجـه به پشت سر نهادن مراحل آماده‌سازی و تجهیـز، استخـراج از پله‌های ۱۵ متری معدن با استفاده از عملیات حفاری، انفجار، بارگیری و باربری انجام می‌شود. طرح کاواک معدن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- نقشه توپوگرافی کاواک معدن

۳- ساخت مـدل زمین‌شنـاسی بـا نرم‌افـزار DataMine

در حالت کلی روند ساخت مدل زمین‌شناسی با نرم‌افزار DataMine شامل پنج مرحله می‌باشد:

الف) آماده‌سازی اطلاعات ورودی

ب) پردازش اطلاعات

ج) تشکیل مقاطع[1]

د) تهیه مدل تورسیمی[2] از مقاطع

ه) بلوک‌بندی مدل[3]

۳-۱- اطلاعات ورودی

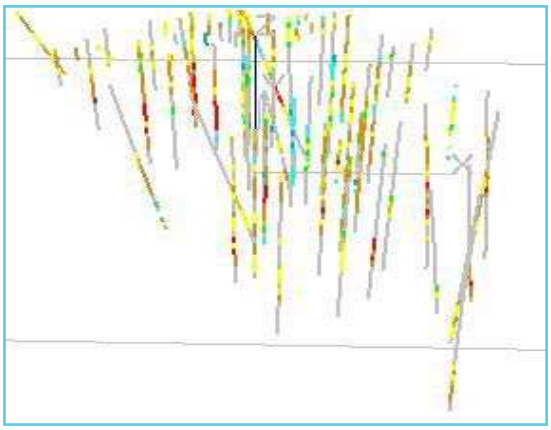
اسـاس کـار در نـرم‌افـزار استفـاده از اطـلاعات حاصل از برداشت‌های صحرایی است که این اطلاعات عبارتند از:

Collars : مختصات دهانه گمانه‌ها
Surveys : شیب و امتداد گمانه‌ها
Assay: مشخصات عیار گمانه‌ها
Geology : مشخصات سنگ‌شناسی گمانه‌ها
Topography: مشخصات توپوگرافی

در شـروع کار اطلاعـات اکتشـافی شامـل نمودار گمانه‌ها، مشخصات توپوگرافی و نقشه زمین‌شناسی سطحی به عنوان اطلاعات اولیه وارد نرم‌افزار می‌شود.

۳-۲- پردازش اطلاعات

ابتدا اطلاعات به نرم‌افزار منتقل شده، سپس با هم تجمیع[4] می‌شوند. در واقع کامپوزیت تمام اطلاعات اکتشافی را در بر می‌گیرد و معمولاً جهت دست یافتن به تناژ استخراجی مد نظر در برنامه‌ریزی تولید، طول کامپوزیت را برابر ارتفاع پله (۱۵ متر) در نظر می‌گیرند (شکل ۳).



شکل ۳- وضعیت گمانه‌ها به صورت سه بعدی

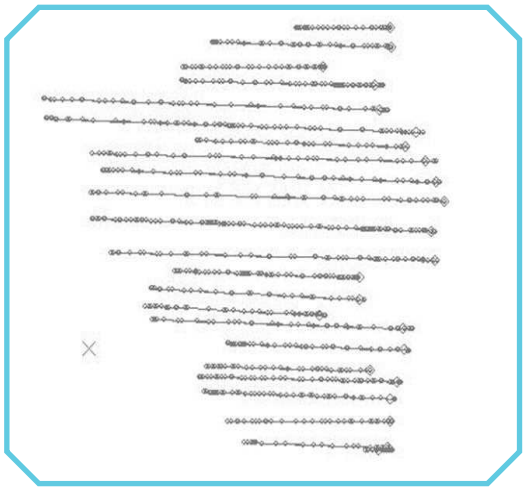
۳-۳- تشکیل مقاطع

برای ساخت مدل زمین‌شناسی کانسار لازم است در ابتدا مقاطع زمین‌شناسی در فواصل مشخصی ترسیم شوند. با توجه به مشخص بودن مرز بخش‌های مختلف مقاطع ترسیم می‌شوند. مقاطع در واقع خطوطی هستند که دور تا دور ماده معدنی در گمانه‌ها رسم می‌شوند و با قرار گرفتن همگی در کنار هم شکل سه بعدی کانسار را می‌توان تصور کرد. (شکل ۴).

۳-۴- تهیه مدل تورسیمی از مقاطع

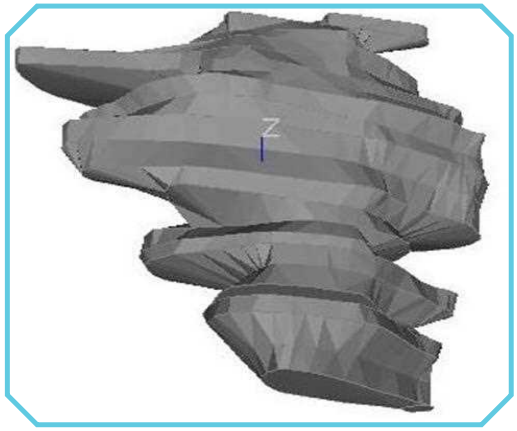
برای تشکیل پیکره ماده معدنی باید دو سمت استرینگ‌ها را به

1- String
2- Wireframe
3- Block Model
4- Composite



شکل ۴- مشاهده کامل مقاطع

هم اتصال داد تا حجم بسته بلوک ماده معدنی به دست آید. در واقع مدل تورسیمی نقاطی را که برای ایجاد استرینگ در هر مقطع استفاده کردیم به نقاط استرینگ بعدی وصل می‌کند تا یک حجم بسته تولید شود (شکل ۵). سپس با استفاده از توپوگرافی منطقه، مدل تورسیمی ماده معدنی و باطله با هم ادغام می‌شوند (شکل ۶).

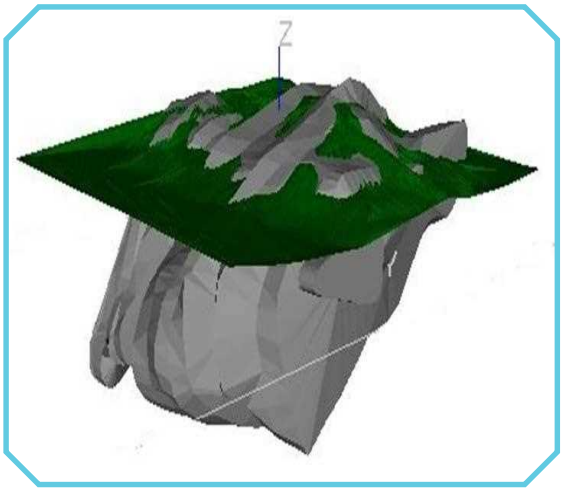


شکل ۵- شکل سه‌بعدی کانسار

۳-۵- بلوک‌بندی مدل

مدل بلوکی پایه و اساس اطلاعات کانسار برای طراحی معدن است. هدف از ساخت مدل بلوکی تقسیم کانسار به بلوک‌های کوچک و دادن مشخصاتی مثل عیار و وزن مخصوص برای هر یک از بلوک‌ها است.

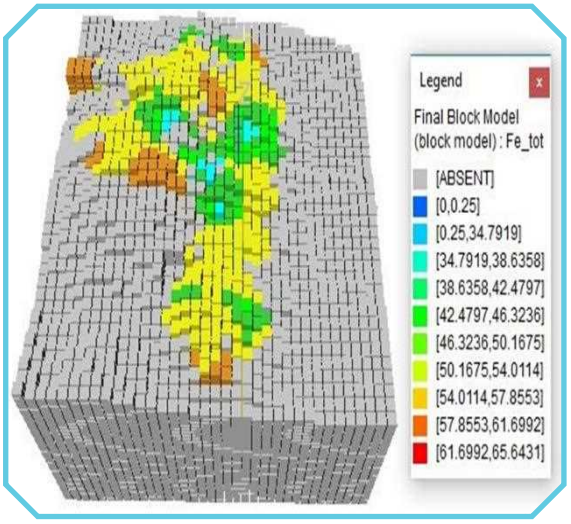
روش مورد استفاده برای تخمین عیار در این پژوهش، روش عکس فاصله است. در این روش عیار بلوک به عیار نقاطی که به



شکل ۶- ترکیب مدل تورسیمی ماده معدنی و باطله

مرکز بلوک نزدیک‌تر هستند شبیه‌تر است. در این روش با استفاده از عیار نقاط معلوم در اطراف بلوک، عیار بلوک مورد نظر تخمین زده می‌شود و نقاط بیرون از شعاع تأثیر نقشی در تخمین عیار ندارند.

با توجه به عیار حد (۲۵ درصد) و طیف عیاری مختلف، مدل بلوکی زمین‌شناسی کانسار به‌دست می‌آید (شکل ۶) که حاوی اطلاعاتی نظیر عیار ماده معدنی، عیار سایر مواد معدنی همراه، وزن مخصوص هر بلوک و نوع بلوک (باطله یا ماده معدنی) است.



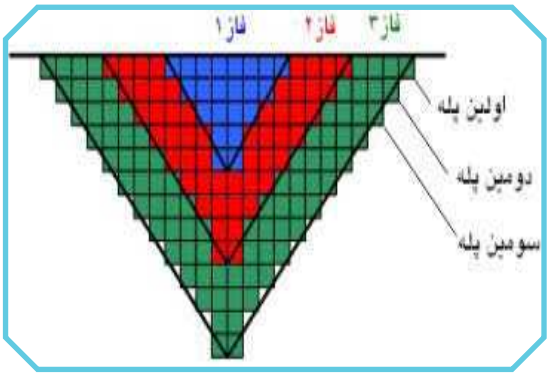
شکل ۷- مشاهده سه بعدی مدل بلوکی زمین‌شناسی

۴- معرفی نرم‌افزار NPV Scheduler

NPV Scheduler نـرم‌افـزاری قـوی بـرای بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تـولید معـادن است کـه در سال ۱۹۹۶ توسط تولوینسکی[5] و آندروود[6] ارائه شد. هدف اصلی این نرم‌افزار ایجاد پیت‌های رشدیابنده است.

از این نرم‌افزار می‌توان برای تهیه مدل اقتصادی، بهینه‌سازی محدوده نهایی، تعیین فازهای استخراجی و توالی بهینه فازها، برنامه‌ریزی تولید و بهینه‌سازی عیار حد استفاده کرد. نرم‌افزار قادر به بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید با اهداف متفاوت نظیر بیشینه کردن عمر معدن، ثبات و یکسان بودن خصوصیات محصول، کمینه کردن آلودگی‌ها، ثبات محصول ورودی به کارخانه و نظایر آنها است.

در الگوریتم‌های بهینه‌سازی، با استفاده از یک مدل بلوکی اقتصادی کاواک بهینه تولید می‌شود. در شکل (۸) کاواک‌های لانه‌ای نشان داده شده‌اند (هر کاواک لانه‌ای یک فاز نامیده می‌شود). تمام بلوک‌های موجود در کاواک لانه‌ای ممکن است ارزش مثبت، منفی و یا صفر داشته باشند.



شکل ۸- تعیین فازهای مختلف استخراج

در نرم‌افزار NPV Scheduler با تغییر منظم قیمت فروش محصول، هزینه معدنکاری و یـا ارزش خـالص بلوک، طیف پوسته‌هـای لانه‌ای (که فـاز LG نـامیده می‌شوند) به‌دست می‌آید.

۵- ساخت مدل بلـوکی اقتصادی بـا نرم افـزار NPV Scheduler

به‌طور کلی مدل اقتصادی، یک مدل بلوکی زمین‌شناسی است که حاوی اطلاعاتی در مورد ارزش هر بلوک است. این مدل با تعریف هزینه‌ها، قیمت فروش و سپس ارزش خالص هر بلوک در طول عمر معدن ساخته شده و هزینه ذاتی فرآوری هر بلوک ماده معدنی با توجه به نوع ماده معدنی و روش فرآوری ویژه آن بلوک محاسبه می‌گیرد. این مدل به عنوان نقطه شروع فرآیند نرم‌افزار است که بر اساس آن فازها طراحی شده و به منظور بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی، زمان‌بندی انجام می‌شود. مدل بلوکی اقتصادی کانسار بر مبنای مدل زمین‌شناسی ساخته می‌شود.

مراحل طی شده برای تعیین مدل بلوکی اقتصادی بدین ترتیب است:

۱- وارد کـردن مدل بلـوکـی زمین‌شناسـی و تخصیص ویژگی‌های مورد نیاز NPV

۲- وارد کـردن داده‌های اقتصـادی و تـولید مدل بلـوکی اقتصادی

۵-۱- وارد کردن مدل بلوکی زمین‌شناسی

مدل بلوکی زمین‌شناسی ساخته شده با نرم‌افزار دیتاماین وارد نرم‌افزار NPV Scheduler شده و نتایج زیر به‌دست آمد:

- کل تعداد بلوک‌ها : ۴۲,۳۳۳

- ۳۴۰ میلیون تن ماده معدنی، ۸۵۰ میلیون تن باطله و در مجموع ذخیره و باطله معدن چادرملو برابر با یک میلیارد و یکصد و نود تن است.

- حداقل، حداکثر و متوسط عیار ماده معدنی در مدل بلوکی زمین‌شناسی به ترتیب برابر با ۲۷، ۶۵ و ۵۱ درصد است.

۵-۲- تهیه مدل بلوکی اقتصادی

با توجه به پـارامترهای فنـی و اقتصـادی زیر مدل بلوکی اقتصادی ساخته شد.

5- Tolwinski
6- Underwood

جدول ۱- پارامترهای فنی و اقتصادی

اطلاعات مورد نیاز	مقدار	واحد
چگالی اولیه	۳/۶۵	
قیمت فروش	۴۵	
هزینه استخراج	۲/۷۵	
رقیق‌شدگی (تغلیظ)	۵	درصد
بازیابی	۹۵	درصد
نرخ تعدیل هزینه‌های استخراج ماده معدنی	۱/۶۵	-------
هزینه بازسازی	۰/۰۳	
هزینه کارخانه فرآوری	۱۴/۵۲	
حداقل عیار حد کارخانه فرآوری	۶۲	درصد
نرخ تعدیل هزینه‌های استخراج باطله	۱	-------
نرخ بهره	۱۵	درصد

از مدل بلوکی اقتصادی نتایج زیر حاصل می‌شود:

- تعداد بلوک‌های حاوی ماده معدنی برابر ۱۱,۴۳۳ و تعداد بلوک‌های باطله برابر ۳۰,۹۰۰ ؛
- ۸۶۹ میلیون تن باطله و ۳۲۱ میلیون تن ماده معدنی؛
- محدوده عیار ماده معدنی ۳۲/۷ تا ۶۵/۵ درصد ؛
- مقدار فلز پرعیار (آهن خالص) که به کارخانه تغلیظ فرستاده می‌شود برابر با ۱۷۳ میلیون تن؛
- کل درآمد حاصل برابر با ۷ میلیارد و ۴۰۰ میلیون دلار؛
- کل هزینه‌های فرآوری برابر با ۴ میلیارد و ۴۹۰ میلیون دلار؛
- کل هزینه‌های معدنکاری برابر با ۲ میلیارد و ۳۸۱ میلیون دلار؛
- سود کلی معدن برابر با ۵۳۵ میلیون دلار ؛
- نسبت باطله‌برداری کلی معدن :

$$OSR = \frac{V_{pit} - V_{ore}}{V_{ore}} \cong ۶$$

۶- طراحی کاواک با استفاده از نرم‌افزار دیتاماین

نرم‌افزار دیتاماین توانایی آن را دارد که با دریافت اطلاعات گمانه‌های اکتشافی و تجزیه تحلیل آنها و با توجه به توزیع عیار ماده معدنی موردنظر، محدوده نهایی بهینه را مشخص کند و طرح استخراجی مناسب با آن توده ماده معدنی را ارائه دهد.

طراحی کاواک فرآیندی تکراری شامل ملاحظه بسیاری از محدودیت‌ها، اجبارها و موضوعات مربوط به طراحی است. برای طراحی کاواک روش منحصربه‌فردی وجود ندارد و تمام مهندسین آن را با اختلاف اندکی انجام می‌دهند. طبیعتاً فرآیند طراحی از یک سری منابع زمین‌شناسی یا یک ذخیره کانسنگ با تعریف یک مدل بلوکی آغاز می‌شود. در این بخش از مدل بلوکی مراحل زیر به ترتیب انجام می‌شود:

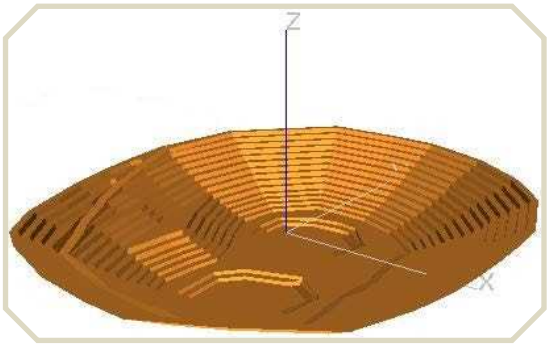
- تعیین کف کاواک با توجه به مدل بلوکی اقتصادی
- ایجاد یک مقطع افقی در محدوده نهایی کاواک
- اعمال یک رمپ با مشخصات موجود (شامل عرض، شیب و طول)
- وارد کردن شیب پله و تعیین لبه آن
- تعیین عرض پله‌های استخراجی و ایمنی

مشخصات کاواک طراحی شده در جدول(۲) آورده شده است.

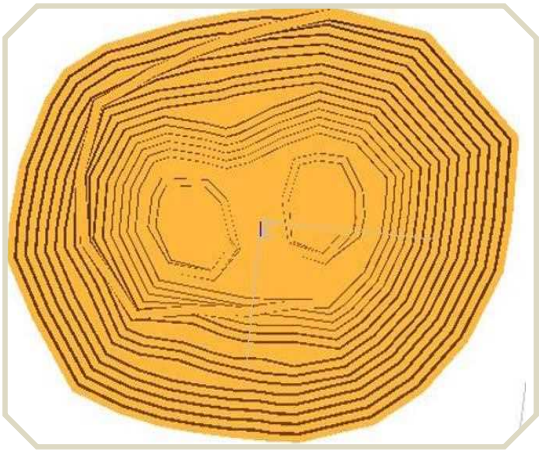
جدول ۲- اطلاعات به‌کار رفته در طراحی کاواک

عنوان	مقدار	واحد
عرض رمپ	۳۰	متر
شیب رمپ	۱۰	درصد
عرض پله	۴۰	متر
ارتفاع پله	۱۵	متر
پهنای کف کاواک	۲۰۰	متر
شیب پله	۷۵	درجه
شیب نهایی معدن	۳۵	درجه

در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایی از طراحی کاواک نهایی معدن چادرملو با استفاده از نرم‌افزار دیتاماین نشان داده شده است.



شکل ۹- نمای کاواک طراحی شده در حالت سه بعدی



شکل ۱۰- نمای بالای کاواک طراحی‌شده

۷-نتیجه‌گیری

برای تعیین محدوده نهایی معدن چادرملو با استفاده از روش‌های کامپیوتری، ابتدا با استفاده از اطلاعات حاصل از گمانه‌های اکتشافی، مدل زمین‌شناسی کانسار تعیین و سپس مدل بلوکی کانسار با استفاده از روش عکس مجذور فاصله برای اختصاص عیار به بلوک‌های استخراجی تهیه شد. تهیه مدل بلوکی کانسار با استفاده از اطلاعات توپوگرافی منطقه، دسته‌بندی و ورود اطلاعات مربوط به گمانه‌های اکتشافی و برآورد ذخیره معدنی انجام گرفت. از مدل بلوکی ایجاد شده، مدل بلوکی اقتصادی کانسار با استفاده از داده‌های متالوژیکی و اقتصادی به‌دست آمد و محدوده نهایی معدن تعیین شد. سپس در مرحله آخر کاواک نهایی معدن با استفاده از مدل بلوکی اقتصادی طراحی شد.

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- کل ذخیره داخل پیت ۱۱۹۰ میلیون تن؛ ۸۶۹ میلیون تن باطله، ۳۲۱ میلیون تن ماده‌معدنی در محدوده عیار ۳۲/۷ تا ۶۵/۵ درصد و مقدار فلز (آهن خالص) برابر با ۱۷۳ میلیون تن است.
- کل درآمد حاصل برابر با ۷ میلیارد و ۴۰۰ میلیون دلار
- کل هزینه‌های فرآوری برابر با ۴ میلیارد و ۴۹۰ میلیون دلار
- کل هزینه‌های معدنکاری (کانسنگ و باطله) برابر با ۲ میلیارد و ۳۸۱ میلیون دلار
- سود کلی معدن برابر با ۵۳۵ میلیون دلار
- نسبت باطله برداری کلی معدن برابر ۶.

۸- پیشنهادات

از آنجا که محدوده نهایی معدن در این تحقیق به‌دست آمد لذا می‌توان با استفاده از این محدوده و الگوریتم‌های مختلف برنامه‌ریزی تولید کوتاه مدت و بلند مدت را تهیه و نتایج را با هم مقایسه کرد.

امروزه برای طراحی معدن از نرم‌افزارهای مختلفی استفاده می‌شود. به همین منظور می‌توان از نرم‌افزار سورپک برای طراحی و از نرم‌افزار کامفار برای انجام محاسبات اقتصادی استفاده و نتایج را مقایسه کرد.

مدیریت ریسک و تحلیل آن از بخش‌های مهم در سرمایه‌گذاری‌های بزرگ مانند معدن سنگ آهن چادرملو است که باید مد نظر قرار گیرد. بنابراین پیشنهاد می‌شود بخشی از سود و ذخایر پر عیار برای دوره‌هایی که افت قیمت حادث می‌شود تخصیص و هزینه‌های غیر ضروری تقلیل یابد.

مراجع

[۱] هاسترولید، و.، و کوچتا، م. (۱۹۹۸). اصول طراحی و برنامه‌ریزی تولید معادن روباز، (ترجمه علی اصغر خدایاری و مهدی یاوری)، انتشارات: دانشگاه صنایع و معادن ایران.

[۲] عطایی، محمد.، حسینی، سیدمحمدعلی. (۱۳۹۰). طراحی محدوده و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز، انتشارات جهاد دانشگاهی (واحد صنعتی امیرکبیر)، تهران.

[۳] محمودی مغانلو، ع. (۱۳۸۸). تعیین محدوده نهایی بهینه و برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معدن مس سونگون با استفاده از نرم‌افزارهای NPVScheduler و Datamine ، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[۴] طرح اصلاحی بهره‌برداری معدن سنگ‌آهن چادرملو. (۱۳۹۴). شرکت معدنی و صنعتی چادرملو - شرکت مهندسی کانی‌کاوان شرق.

[۵] فرهادی، ع. (۱۳۹۲). تخمین ذخیره کانسار سنگ آهن دلکن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد دانشگاه صنعتی شاهرود.

[6] Bascetin, A., Nieto, A. (2007). Determination of optimal cut-off grade policy to optimize NPV using a new approach with optimization factor, The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 107, 87-94.

[7] Akbari, A. D., Osanloo, M., & Shirazi, M.A. (2008). Determination of Ultimate Pit Limits in Open Mines Using Real Option Approach, IUST, Vol. 19, No.5-1, Page 23-38.

[8] Lerchs, H., & Grossmann, F. (1965). Optimum Design of Open Pit Mines, CIM Bulletin 58, 47-54

[9] Darling, P. (2011), SME Mining Engineering Handbook, 3nd Edition, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. USA.

[10] Abbaspour, H. (2011). Optimum Ultimate Pit Limit (UPL) Design by Graph Theory, M.Sc. thesis in Technical University of Bergakademie Freiberg.