

مقاله پژوهشی

کاهش ریسک ناشی از عدم قطعیت عیار در برنامه‌ریزی تولید معدن مس رگه‌ای

حسین حمدا فرامرزی^۱، رضا شکورشهابی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، hhhf1361@gmail.com
 ۲. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، shahabi@eng.ikiu.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۱ - پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴)

چکیده

پیاده‌سازی رویکردهای شبیه‌سازی حالات مختلف عدم قطعیت پارامترهای کلیدی، در برنامه‌ریزی تولید معدن، ضمن افزایش دقت خروجی‌های مرحله طراحی، موجب حداکثرسازی ارزش خالص فعلی طرح نهایی استخراجی با درجه اطمینان بالا می‌شود. رویکرد "حداکثر پتانسیل بالادست و حداقل ریسک پایین‌دست" از جمله ابزارهای محاسباتی کاهش ریسک عدم قطعیت عیاری در برنامه‌ریزی تولید معدن است. بر مبنای این رویکرد، در طرح انتخاب‌شده نهایی، دستیابی به معیارهای اقتصادی کلیدی معدن با هرگونه توزیع عیاری ذخیره محقق شود و هم‌زمان با کاهش ریسک عدم تحقق معیارهای ارزیابی طرح، پتانسیل‌های بالادست ذخیره از جمله احتمال بیشتر بودن ذخیره از میزان پیش‌بینی‌شده، رعایت شود. در این تحقیق با توجه به حساسیت بالای میزان ذخیره استخراجی معدن رگه‌ای به پارامترهای مدل‌سازی و نیز توجه اقتصادی به فاکتورهای فنی و اقتصادی تولید، تغییراتی در معیارهای ارزیابی روش یاد شده برای ذخیره مس رگه‌ای تکنار، ابتدا ۱۰ مدل مختلف توزیع عیاری ذخیره با ابزار شبیه‌سازی گوسی در نرم‌افزار دیتامین ساخته شد و با ایجاد کاواک‌های لانه‌ای برای هر مدل عیاری به کمک الگوریتم لرج - گروسمن و بهینه‌سازی محدوده‌های نهایی استخراجی در نرم‌افزار ویتل به عنوان رویه‌های کاواک ایجاد شد. سپس با قرارگیری هر توزیع عیار شبیه‌سازی‌شده درون رویه کاواک‌های دیگر به عنوان سناریوهای مختلف محدوده و توزیع عیار معدن، محاسبه پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست در طرح‌های واجد شرایط بر اساس دو معیار فنی و اقتصادی تامین ۹۵ هزار تن بار ورودی سالیانه با احتمال تحقق ۸۰ درصد و همچنین توانایی بازگشت سرمایه ۳/۱ میلیارد تومان هزینه توسعه فاز دوم خط فرآوری انجام گرفت و طرح ۲ به عنوان طرح اولویت‌دار انتخاب شد. ذخیره قابل‌استخراج معدن برابر ۷۱ هزار تن با عیار متوسط ۰/۵۲ درصد مس برآورد شد که در مقایسه با ۳۷۵ هزار تن پیش‌بینی‌شده در طرح پیشین بر مبنای ذخیره توده‌ای این معدن بسیار کمتر است.

کلمات کلیدی

برنامه‌ریزی تولید معدن، پتانسیل بالادست - ریسک پایین‌دست، ریسک عدم قطعیت عیاری، مس تکنار.

۱- مقدمه

راونسکرافت^۱ در سال ۱۹۹۲ برای اولین بار با روش شبیه‌سازی شرطی^۲ زمین‌آماری و ایجاد چندین شبیه‌سازی مختلف از توزیع عیار یک ذخیره و اجرای برنامه‌ریزی تولید بر روی آن‌ها، به بررسی عدم قطعیت عیار در برنامه‌ریزی تولید پرداخت. این روش قادر به تعیین جواب بهینه قطعی برای برنامه‌ریزی تولید در حالت عدم قطعیت نیست و همچنین تکرار شبیه‌سازی‌ها زمان‌بر است [۵، ۶].

داود^۳ در سال ۱۹۹۴، ساختاری برای ارزیابی ریسک در معدنکاری روباز ارائه کرد و برخی متغیرهای دیگر (از قبیل قیمت محصول، هزینه‌های معدنکاری، هزینه‌های فرآوری، سرمایه‌گذاری‌های مورد نیاز و عیار) را با یک تابع توزیع از پیش تعریف شده، به صورت تصادفی در نظر گرفت. تعداد M شبیه‌سازی از ماده معدنی و N ترکیب مختلف از سایر ورودی‌ها که از تابع توزیع متناظر انتخاب شده‌اند، با هم ترکیب شد تا مدل بلوکی اقتصادی ساخته شود. مساله با روش برنامه‌ریزی پویا^۴ (DP) حل شد و تابع توزیع ارزش خالص فعلی، نرخ بازگشت داخلی و دوره بازگشت سرمایه برای تعیین احتمال تحقق خروجی‌ها ارزیابی می‌شود. از نقاط ضعف این روش می‌توان به عدم ارائه معیاری برای قبول یا رد پروژه و دشوار بودن به‌کارگیری شبیه‌سازی‌های تکرار شده به عنوان ورودی فرآیند برنامه‌ریزی تولید اشاره کرد [۶، ۷].

دنبی^۵ و شوفیلد^۶ در سال ۱۹۹۵ الگوریتمی بر مبنای واریانس عیار در طراحی معادن سطحی و برنامه‌ریزی تولید با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه با هدف ماکزیمم‌سازی ارزش خالص فعلی و حداقل‌سازی ریسک ارائه کردند و نسبت به حل مدل و یافتن جواب بهینه با ژنتیک الگوریتم پرداختند. این مدل ماکزیمم NPV را در مقابل محدوده ریسکی که برای طراح قابل قبول است به دست می‌آورد تا طرح‌های جذاب و با سطح ریسک قابل قبول توسط طراح انتخاب شود. در این الگوریتم بلوک‌های پر ریسک در ترتیب استخراج دیرتری قرار می‌گیرد. بنابراین فاکتور ریسک برابر مجموع عدم قطعیت تنزیل‌یافته بلوک‌ها در طرح استخراجی است و نیازی به تکرار شبیه‌سازی برای ورودی برنامه‌ریزی تولید نیست. این مدل حداکثر ارزش فعلی را در برابر حد ریسک قابل قبول طراح نمایش می‌دهد. از جمله معایب این روش می‌توان عدم اعمال ریسک‌های

سرمایه‌گذاری در پروژه‌های معدنی با توجه به ماهیت خاص ناشی از عواملی از قبیل احتمال برگشت‌ناپذیری هزینه‌های شناسایی و اکتشاف منابع و باطله‌برداری ذخیره به دلیل وجود عدم قطعیت‌های مختلف در مولفه‌های فنی و زمین‌شناسی ذخیره معدنی و قیمت محصولات، با ریسک‌های مختلفی مواجه است [۱]. این عدم قطعیت‌ها از مرحله اکتشاف با تخمین میزان ذخیره و توزیع عیار کانسار آغاز می‌شود و با برآورد چگالی ذخیره برجا و پیش‌بینی قیمت فروش محصول تا آخر عمر معدن ادامه می‌یابد که تغییرات هر فاکتور، تاثیر بسزایی بر سوددهی بهره‌برداری ذخیره معدنی دارد. در پروژه‌های معدنی منابع عدم قطعیت‌های موجود از ماهیت متغیر یا از هزینه بالای شناخت آن ناشی می‌شوند و نسبت به سایر پروژه‌های تولیدی بیشتر است. این منابع معمولاً به ماهیت نامطمئن ذخیره مرتبط می‌شوند و یا متأثر از عوامل بیرونی مانند تجارت و تقاضای بازارند. منابع اصلی عدم قطعیت در پروژه‌های معدنی را می‌توان به سه دسته اصلی زمین‌شناسی، اقتصادی و فنی تقسیم‌بندی کرد. دیمیتراکوپلوس و همکاران عدم قطعیت در پروژه‌های معدنی را به صورت زیر، طبقه‌بندی کردند [۲]:

- عدم قطعیت مدل کانسار و وابستگی آن به تغییرات عیار نحوه توزیع مواد.
- عدم قطعیت در موارد عملی و اجرایی معدنکاری مانند محدودیت شیب و ظرفیت استخراج.
- عدم قطعیت در مولفه‌های اقتصادی شامل هزینه عملیاتی و سرمایه‌گذاری و قیمت کالا.

عیار ماده معدنی از مهم‌ترین مولفه‌های مدل زمین‌شناسی کانسار است که افزایش مطالعات اکتشافی با صرف هزینه و وقت زیاد، می‌تواند باعث کاهش ریسک عدم قطعیت آن شود. عیار ماده معدنی نقش عمده‌ای در ایجاد تفاوت‌های بالا بین جواب تئوری و نتیجه واقعی به ویژه در تعیین کاواک نهایی و برنامه‌ریزی تولید دارد؛ بنابراین اعمال مستقیم تاثیر عدم قطعیت عیار در روند برنامه‌ریزی تولید می‌تواند منجر به برنامه‌ریزی شود که حداکثر NPV پروژه را با درجه اطمینان محقق کند [۳]. بارمیستر در بازه زمانی ۱۹۸۳ تا ۱۹۸۷، به بررسی ۳۵ معدن طلا که به تازگی فعالیت خود را آغاز کرده بودند، پرداخت و در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که ۷۰ درصد این معادن در سال‌های ابتدایی فعالیت خود به دلیل در نظر نگرفتن عدم قطعیت عیار در مطالعات به اهداف از پیش تعیین شده خود دست نیافته‌اند [۴].

1- Ravenscroft
2- Conditional Simulation
3- Dowd
4- Dynamic Programming
5- Denby
6- Schofield

زمین‌شناسی و عدم تضمین جواب بهینه اشاره کرد [۸].

طرح‌های برتر اعمال می‌کند. این روش بهترین طرح را با کمترین ریسک و بیشترین سود ارایه کرد [۲].

اصانلو و غلام‌نژاد در سال ۲۰۰۷ الگوریتمی را برای توسعه کاواک‌های تو در تو با لحاظ کردن تابع توزیع احتمال عیار بلوک‌ها و انتخاب پوش‌بک‌ها در حالت عدم قطعیت عیاری بلوک‌ها با هدف بیشینه ارزش خالص فعلی و کمترین واریانس ممکن ارایه کردند. این الگوریتم قادر بود تابع هدف اقتصادی بهتری نسبت به مدل‌های قبلی همراه با کاهش ریسک عدم تحقق ارایه کند [۱۴].

در سال ۲۰۱۶ دیمیتراکوپولوس و گودفلو رویکرد عمومی بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید مجموعه‌های معدنی را با در نظر گرفتن ریسک ارایه کردند که باعث افزایش حداکثری NPV می‌شود و با ایجاد مدل‌های مختلف شبیه‌سازی شده تاثیر موثری بر کاهش عدم اطمینان در فرآیند بهینه‌سازی دارد [۱۵].

مطالعات انجام شده بیانگر آن است که در بیشتر موارد لحاظ کردن عدم قطعیت عیار، علاوه بر افزایش دقت تخمین‌ها و کاستن از میزان ریسک عدم تحقق اهداف پروژه، موجب افزایش محسوس نرخ ارزش خالص فعلی پروژه‌ها شده است [۱۱]. از طرفی بیشتر مطالعات پیشین بر اساس رویکرد عدم قطعیت عیاری، بر روی ذخایر بزرگ انجام شده است. این در حالی است که به علت کمبود ذخایر فلزات پایه، ارزش فعلی ذخایر معادن فلزی رگه‌ای که در مقایسه با ذخایر بزرگ اهمیت کمتری داشته‌اند، به مرور در حال افزایش است. در این تحقیق تلاش شد تا رویکرد عدم قطعیت بر روی ذخایر رگه‌ای که در مقایسه با ذخایر بزرگ دارای عدم قطعیت و ریسک‌پذیری بیشتر مولفه‌های عیاری‌اند به کار گرفته شود که پیش از این در ذخایر رگه‌ای پیاده‌سازی نشده است. به‌کارگیری روش‌های برنامه‌ریزی تولید با لحاظ کردن عدم قطعیت عیاری در معادن فلزی رگه‌ای کوچک‌مقیاس، باعث کاهش ریسک ناشی از خطا در تخمین ذخیره و برنامه‌ریزی تولید خواهد شد.

در ذخیره مس رگه‌ای تکنار، بر اساس مدل‌سازی و طراحی انجام شده، تناژ کانسنگ قابل استخراج اعلام شده حدود ۳۷۶ هزار تن با عیار متوسط مس ۰/۵۹ درصد و نسبت باطله‌برداری کلی ۱: ۴/۷ تعیین شده بود که پس از شروع عملیات استخراج، تناژ و عیار کانسنگ استخراج شده با تناژ و عیار اعلام شده در طرح همخوانی نداشت. به عنوان نمونه دو بلوک استخراجی که برای آتشیاری حفاری و نمونه‌گیری شده در شکل شماره ۱ و ۲ به نمایش گذاشته شده است. چال‌ها با شبکه ۲ متر در ۲/۸ متر و به عمق ۵ متر حفاری شده‌اند و از هر چال یک نمونه تهیه و

دیمیتراکوپولوس^۱ در سال ۱۹۹۸ الگوی مدل‌سازی بر اساس کاهش ریسک عدم قطعیت عیاری ناشی از مولفه‌های زمین‌شناسی با تلفیق روش شبیه‌سازی شرطی و زمین‌آمار را ارایه داد که مدل‌های هم احتمال از ذخیره با در نظر گرفتن مولفه‌های به دست آمده را در اختیار قرار می‌داد [۱۰،۹].

رمضان و دیمیتراکوپولوس در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۴ با برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و تابع هدف شامل بیشینه‌سازی احتمال قرارگیری بلوک برنامه‌ریزی شده در دوره پیش‌بینی شده با شبیه‌سازی و نیز حداقل‌سازی جابه‌جایی ماشین‌آلات بزرگ در معدن ارایه دادند. نتایج مدل جدید برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط توانست نقاط ضعف روش‌های سنتی را برطرف و برنامه‌های استخراج معدن را با احتمال بیشتری محقق کند [۱۱].

در سال ۲۰۰۴ ویتل^۲ مدلی ارایه کرد که از اشتراک حد نهایی مدل‌های ایجاد شده با شبیه‌سازی شرطی را به وسیله روش لرچ و گروسمن به دست آمده و کاواک نهایی واقعی یا بالاترین احتمال وقوع انتخاب می‌شود. این روش باعث کاهش ریسک و افزایش توزیع سود پروژه شد [۱۲].

در سال ۲۰۰۷ لیت^۳ و دیمیتراکوپولوس مدلی ارایه دادند که می‌توانست به صورت یک روند سری که به ترتیب، مشخص کردن مولفه‌های مورد نظر در معدنکاری، آزمایش تاثیر ابعاد این مولفه‌ها و در نهایت به تصویر کشیدن مقادیر مولفه‌های ممکن است به بهینه‌سازی مدل‌سازی در معادن روباز بر اساس عدم قطعیت عیار بپردازد و اهمیت کمی‌سازی عدم قطعیت زمین‌شناسی را در کاهش انحراف از اهداف تولید و افزایش ارزش خالص فعلی پروژه نشان دادند. مدل ارایه شده باعث افزایش ۲۶ درصدی در NPV پروژه و کاهش ریسک عدم تحقق هدف‌گذاری انجام شده، شد [۱۳].

رویگرد پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست^۴ در سال ۲۰۰۷ به عنوان متداول‌ترین روش کاهش ریسک عدم قطعیت عیاری در برنامه‌ریزی تولید توسط آقای دیمیتراکوپولوس و همکاران ارایه شد. این روش، هم‌زمان با حداقل کردن ریسک پایین‌دست، شاخص‌های کلیدی پروژه مانند جریان‌های نقدی دوره‌ای و تناژ ماده معدنی و فلز قابل استحصال را در انتخاب

1- Dimitrakopoulos

2- Whittle

3- Leite

4- Maximum Upside /Minimum Downside

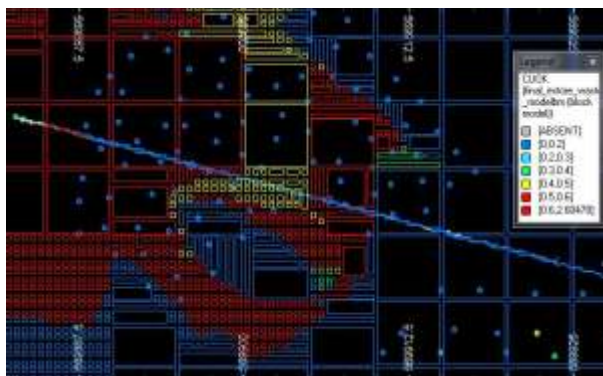
مدل‌های هم‌احتمال، مدلهایی‌اند که با رعایت پارامترهای تخمین مشابه شرایط متفاوتی را که احتمال رخداد آن‌ها برابر است، شبیه‌سازی می‌کنند. نرم‌افزارهای معدنی از جمله دیتامین^۲ و سورپک^۳ و این شبیه‌سازی را بر اساس نتایج روش تخمین کریجینگ برای ایجاد مدل‌های هم‌احتمال به کار می‌گیرند تا امکان ارزیابی تاثیر متغیرهای موثر بر مدل‌سازی، در قالب تعریف حالات مختلف توزیع عیاری قابل تحقق فراهم شود. در ادامه برای پیاده‌سازی رویکرد حداکثر پتانسیل بالادست و حداقل ریسک پایین‌دست، محدوده‌های نهایی بهینه هر یک از مدل‌های توزیع عیاری شبیه‌سازی به دست می‌آید و بر مبنای هر یک از این کاواک‌ها، رویه‌های مجزا تعریف می‌شود. مدل‌های توزیع عیاری شبیه‌سازی‌شده ذخیره معدنی یک به یک در داخل هر یک از رویه قرار داده می‌شود و تناژ ماده معدنی و باطله هر یک از مدل‌ها مورد سنجش قرار می‌گیرد. برای محاسبه مقادیر ورودی روش حداکثر پتانسیل بالادست و حداقل ریسک پایین‌دست، مولفه‌های اقتصادی هر توزیع با هر رویه مورد سنجش قرار می‌گیرد و احتمال هر یک از مدل‌ها برای تحقق بار ورودی ۹۵ هزار تن سالیانه بررسی می‌شود. سپس با حذف طرح‌های دارای احتمال تحقق زیر ۸۰ درصد، محاسبه پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست در طرح‌های باقی‌مانده بر اساس تامین ۹۵ هزار تن بار ورودی مورد نیاز کارخانه فرآوری با احتمال تحقق ۸۰ درصد و توانایی بازگشت سرمایه ۳/۱ میلیارد تومان هزینه توسعه فاز دوم خط فرآوری انجام گرفت و طرح اولویت‌دار انتخاب شد. در نهایت بر مبنای طرح انتخابی، طراحی کاواک استخراجی نهایی با کمترین ریسک عدم تحقق سودآوری در عین حفظ معیارهای فنی و تامین بار ورودی کارخانه انجام گرفت.

۲- روش‌شناسی

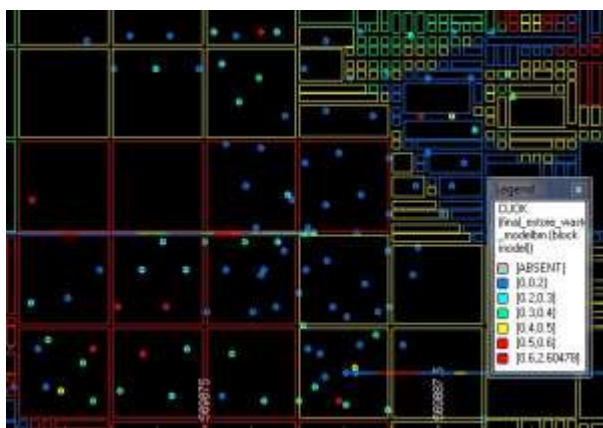
۲-۱- عدم قطعیت عیار در برنامه‌ریزی تولید معادن

هدف کلی در برنامه‌ریزی تولید معادن سطحی، تعیین ترتیب استخراج بلوک‌های واقع در محدوده نهایی معدن به صورتی است که ارزش خالص فعلی جریان نقدینگی با توجه به محدودیت‌های اعمال شده بر سیستم معدنکاری، حداکثر باشد. برنامه‌ریزی تولید می‌تواند بر اساس نوع و تعداد بلوک‌ها، بازه زمانی برنامه‌ریزی، نوع و تعداد توابع هدف و محدودیت‌ها به دو نوع اصلی برنامه‌ریزی بلندمدت و کوتاه‌مدت تقسیم شود [۱۶]. روش معمول برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با مدل‌سازی کانسنگ بر اساس داده‌های گمانه‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی و

آنالیز شده است. عدم هم‌خوانی عیار چال‌ها و مدل بلوکی تخمین زده شده در شکل‌های ۱ و ۲ مشهود است.



شکل ۱- بلوک اول حفاری استخراجی و مدل بلوکی.



شکل ۲- بلوک دوم حفاری استخراجی و مدل بلوکی.

مهم‌ترین علت این موضوع، تردید در شناخت صحیح نوع کانسار بود که تیپ سولفید توده‌ای^۱ تشخیص داده شده بود و متعاقب آن فرآیند تخمین و ارزیابی و طراحی استخراجی بر اساس شرایط این‌گونه کانسارها اجرا شده بود. به دلیل موارد یاد شده، ضرورت داشت تا مدل ذخیره معدنی، مورد بازنگری قرار گیرد و برنامه‌ریزی تولید و طراحی کاواک استخراجی مجدد بر مبنای عدم قطعیت عیاری انجام شود.

روند کلی تحقیق به این صورت است که ابتدا با بررسی داده‌های اکتشافی و استخراجی موجود، تخمین ذخیره مدل کانسار بر اساس اطلاعات موجود انجام گرفت. در مرحله بعد پس از صحت‌سنجی مدل ایجاد شده، اقدام به شبیه‌سازی مدل‌های جدید بر اساس پارامترهای تخمین زده شده از مدل‌سازی، شد. دلیل استفاده از شبیه‌سازی گوسی بر این اساس است که منجر به تهیه مدل‌های هم‌احتمالی می‌شود و امکان ارزیابی تاثیر متغیرهای دخیل در مدل‌سازی را فراهم می‌آورند.

2- Datamine
3- Surpac

1- Massive Sulfide

۲-۲- شبیه‌سازی گوسی

شبیه‌سازی گوسی^۱، به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های شبیه‌سازی در مدل‌هایی است که دارای متغیرهای پیوسته‌اند و تاکنون جواب‌های قابل قبولی در پروژه‌های مربوط به شبیه‌سازی پارامترهای مخازن نفتی از قبیل تخلخل تراوایی و نیز توزیع عیار در محیط کانسار داشته است. از طرفی این شبیه‌سازی با استفاده از متغیرهای موثر در فرآیند مدل‌سازی قادر است به ارایه مدل‌های هم احتمالی که بیشترین همگرایی با مدل اصلی را دارند، بپردازد. شبیه‌سازی پی‌درپی شاخص در تعیین مرز کانسنگ و باطله با استفاده از کریجینگ شاخص کاربرد دارد و در مواردی که متغیرهای ورودی ناپیوسته باشند به کار می‌رود. همچنین شبیه‌سازی آنیلینگ نیاز به تصویر ابتدایی کانسار داشته و با استفاده از واریوگرامتری اقدام به تصحیح آن می‌کند. مزیت استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی^۲ در این است که علاوه بر استفاده از داده‌های واقعی، از داده‌های شبیه‌سازی شده در مراحل قبل برای تخمین بعدی به کار گرفته می‌شود. از طرفی مقدار عیار نقاط معلوم (گمانه‌های حفاری) در پایان شبیه‌سازی تغییری نکرده و عیار واقعی ثبت شده گمانه‌های حفاری، در موقعیت خود در کانسار باقی می‌مانند. با توجه به این که در روش گوسی متوالی، داده‌های اولیه باید نرمال باشند، بنابراین برای استفاده از این روش باید توزیع داده‌ها به نرمال استاندارد تبدیل شود. مدل خروجی شامل حالت‌های مختلف بر اساس روش جی‌اس‌لیب^۳ که برای شبیه‌سازی کاربرد دارد، تهیه می‌شود. مهم‌ترین مولفه در استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی، انتخاب شعاع مناسب جستجو است زیرا انتخاب شعاع جستجوی کوچک، منجر به شرطی‌سازی ضعیف داده‌ها و ایجاد مدل دور از واقعیت می‌شود [۱۷-۲۰].

۲-۳- رویکرد پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست

با توجه به عدم اطمینان نسبت به نحوه توزیع عیار حقیقی مدل بلوکی ذخیره و احتمال تحقق توزیع‌های خوش‌بینانه‌تر و بدبینانه‌تر، رویکرد پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست بر این اصل استوار است که طرح نهایی استخراجی معدن مشتمل بر محدوده و ترتیب استخراج باید به گونه‌ای باشد که در صورت تحقق هرگونه توزیع عیاری ذخیره معدنی، مولفه‌های اقتصادی طرح ضمن حفظ شرایط فنی، رعایت شود. مزیت این رویکرد نسبت به روش‌های طراحی قبلی این است که هم به ریسک ناشی از نرسیدن به پارامترهای استراتژیک معدن به عنوان حداقل پایین‌دست^۴ توجه می‌شود و هم

با فرض قطعیت اطلاعات موجود انجام می‌گیرد زیرا در این رویکردها، امکان کمی‌سازی عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی وجود ندارد اما به دلیل هزینه بالای مراحل اکتشاف و اطلاعات محدود به دست آمده از حفاری‌ها، اطلاعات زمین‌شناسی و محتوای فلز در یک کانسار معدنی بسیار نامشخص است. از طرفی، روش‌های معمول ارزیابی منابع کانسنگ مبتنی بر تخمین مقادیر ثابت از قبیل عیار و تناژ، بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت مرتبط با این تخمین‌ها است. در هر ذخیره معدنی مهم‌ترین نوع ریسک سرمایه‌گذاری مربوط به عدم قطعیت عیاری در مدل زمین‌شناسی تخمین زده شده برای ذخیره مورد نظر است. تخمین عیاری کمتر و یا بیشتر، موجب کوچک شدن محدوده نهایی تعیین شده و یا هدررفت سرمایه‌گذاری شود. عدم قطعیت مربوط به پارامترهای ورودی می‌تواند اختلاف بین مقدار NPV محاسبه شده و مقدار محقق شده آن را افزایش دهد و فعالیت‌های معدنی را با مسایل مهمی از جمله ریسک نرسیدن به اهداف تولید و NPV برآورد شده مواجه می‌سازد.

از میان روش‌های تخمین، کریجینگ مفیدترین روش برآورد زمین‌آماري و بهترین برآوردگر خطی ناریب است که از سه دهه گذشته برای توصیف تغییرات مکانی و پیش‌بینی عیار کانسنگ به کار گرفته می‌شود. در این روش دو شرط لازم و کافی یعنی میانگین خطای تخمین برابر صفر و حداقل واریانس تخمین اعمال می‌شود. در نتیجه این هموارسازی، عیار بلوک‌های تخمینی، دارای پراش کمتری نسبت به عیارهای واقعی است. بر این اساس، در اغلب مطالعات انجام شده، از روش شبیه‌سازی زمین‌آماري به عنوان ابزاری برای کمی کردن میزان ریسک و عدم قطعیت همراه با عیار در طراحی و بهینه‌سازی معادن استفاده شده است. شبیه‌سازی زمین‌آماري، امکان ارزیابی دقیق‌تر ریسک ناشی از عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی در مدل‌سازی کانسار را فراهم می‌کند و امکان برنامه‌ریزی تولید دقیق‌تر و واقعی‌تری را میسر می‌سازد [۱۷ و ۱۸]. شبیه‌سازی مدل عیاری ذخیره با پیشامدهای مختلف و طراحی کاواک نهایی بر اساس سناریوهای مختلف شبیه‌سازی، باعث کاهش ریسک عدم قطعیت عیاری در مدل‌های تهیه شده و در نتیجه افزایش اطمینان سرمایه‌گذار از بازگشت سرمایه می‌شود. شبیه‌سازی شرطی برخلاف روش‌های رایج تخمین زمین‌آماري که با نوعی هموارسازی مواجه‌اند، ابزاری برای کمی کردن میزان ریسک عیاری را فراهم می‌آورد تا نتیجه‌ای نزدیک به واقعیت در محاسبه ارزش خالص فعلی پروژه‌های معدنی طراحی و اجرا شود [۱۹].

1- Gaussian Simulation

2- Sequential Gaussian Simulation (SGS)

3- GSLIB

4- Minimum downside

ارزش خالص فعلی، میزان ماده معدنی قابل استخراج و لحاظ کردن محدودیت‌های کاواک، ترتیب استخراج و همچنین تولید سالیانه انجام می‌گیرد و در نهایت طرحی که علاوه بر لحاظ محدودیت‌های پروژه، از لحاظ مولفه کلیدی انتخاب شده نیز شرایط بهتری نسبت به دیگر طرح‌ها داشته باشد، انتخاب می‌شود. به صورت خلاصه طرح استخراجی مورد نظر باید شرایط زیر را داشته باشد [۲ و ۲۱]:

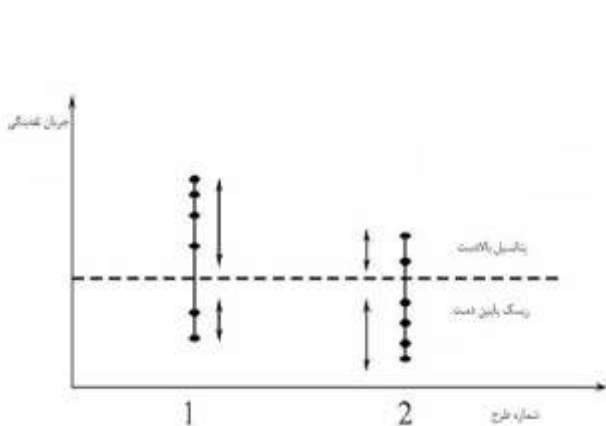
- در صورت امکان هیچ کدام از n شبیه‌سازی پس از استخراج به وسیله طرح مورد نظر، مولفه کلیدی طرح (مانند ارزش خالص فعلی) را منفی نکند.
- میانگین مولفه مورد بررسی نسبت به سایر طرح‌ها بالاتر باشد.
- واریانس مقادیر حاصل از مولفه مورد بررسی تا حد امکان نسبت به سایر طرح‌ها کوچک باشد.

مراحل اجرای این رویکرد در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۵ نمونه‌ای از مقایسه دو طرح با این رویکرد برای مدل عیاری فرضی نشان داده شده است. در این نمودار جریان نقدینگی تنزیل یافته با یک حداقل نرخ جذب‌کننده به عنوان مولفه اصلی یا کلیدی ایجاد شده است.

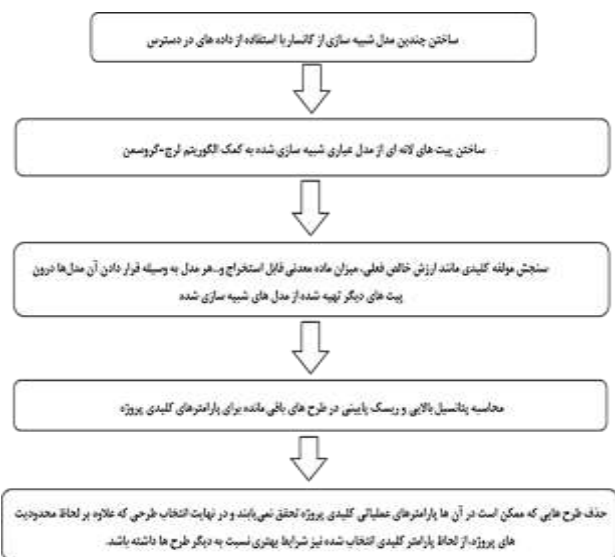
پتانسیل‌های بالادست ذخیره^۱ (از جمله احتمال بیشتر بودن ذخیره از میزان پیش‌بینی شده، احتمال بیشتر بودن عیار متوسط و سایر پارامترها) اعمال می‌شود. بدین منظور در این رویکرد طبق شکل ۳، ابتدا چندین مدل‌سازی مختلف از ذخیره در قالب شبیه‌سازی گوسی توزیع عیار ماده معدنی ایجاد می‌شود که حالت‌های خوش‌بینانه و بدبینانه در آن‌ها در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد ایجاد کاواک‌های لانه‌ای از هر مدل عیاری شبیه‌سازی شده به کمک الگوریتم لرج-گروسمن در قالب طرح‌های محتمل استخراجی انجام می‌گیرد، سپس سنجش مولفه کلیدی مانند ارزش خالص فعلی، میزان ماده معدنی قابل استخراج در هر مدل به وسیله قرار دادن مدل‌های توزیع عیاری یاد شده درون روبه کاواک‌های دیگر تعیین شده از سایر مدل‌های شبیه‌سازی شده انجام می‌گیرد، در نتیجه برای هر طرح استخراجی دسته‌ای از جواب‌های قابل تحقق به دست می‌آید که هر کدام از آن‌ها مربوط به جاگذاری مدل‌های مختلف توزیع عیاری شبیه‌سازی شده در روبه مربوط به آن طرح است. برای تعیین ریسک عیار در هر طرح، محاسبه پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست هر طرح قابل قبول با استفاده از توزیع مقادیر ممکن برای هر مولفه کلیدی پروژه از قبیل



شکل ۳- فازهای کلی رویکرد کاهش ریسک عدم قطعیت عیاری بر مبنای روش پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست.



شکل ۵- پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست برای دو طرح فرضی استخراجی کاواک یک کانسار [۲۱].



شکل ۴- الگوریتم روش پتانسیل بالادست و ریسک پایین [۲].

1- Maximum upside

به تعیین مناسب‌ترین طرح استخراجی با کمترین میزان ریسک شود. حال با معلوم بودن مدل بلوکی عیاری انتخاب شده، محاسبه مدل بلوکی اقتصادی، طراحی نهایی و برنامه‌ریزی تولید بر مبنای مولفه‌های فنی و اقتصادی از جمله شیب نهایی معدن، عرض معدنکاری، قیمت محصول، هزینه‌های معدنکاری، هزینه‌های فرآوری، ضریب بازیابی ماده معدنی قابل محاسبه است. محاسبه ارزش اقتصادی هر بلوک در مرحله بهینه‌سازی کاواک و نیز مرحله آخر بر اساس رابطه ۳ انجام می‌گیرد:

$$BEV_b = M_b(P - C_s)r - C_m - C_p \quad (3)$$

که در آن:

BEV_b : ارزش اقتصادی بلوک (دلار بر تن).

M_b : مقدار فلز موجود در بلوک (تن).

P : قیمت محصول (دلار بر تن کانسنگ).

r : بازیابی (درصد).

C_p , C_m و C_s : به ترتیب هزینه فرآوری (دلار بر تن کانسنگ)، هزینه معدنکاری (دلار بر تن خاک) و هزینه ذوب ماده معدنی (دلار بر تن کانسنگ) به ازای هر تن بار ورودی.

۳- پیاده‌سازی مدل کاهش ریسک عدم قطعیت عیاری معدن تکنار

با توجه به توضیحات بخش ۲ روند تحقیق مطابق شکل ۶ است. بدین صورت که ابتدا مدل‌سازی ذخیره رگه‌ای تکنار و شبیه‌سازی مدل‌های بلوکی ماده معدنی محتمل انجام می‌شود و پس از ایجاد مدل‌های بلوکی اقتصادی، تعیین محدوده نهایی و ایجاد رویه‌های آن‌ها، قرارگیری مدل‌های توزیع عیاری در داخل رویه‌های تعریف شده، انجام می‌گیرد. در ادامه در قالب سناریوهای مختلف تحقیق، محاسبه احتمال تحقق و مقادیر شاخص‌های بالادست و پایین‌دست انجام می‌شود و انتخاب طرح برتر انجام می‌گیرد. طراحی مجدد کاواک و برنامه‌ریزی تولید بر مبنای طرح برتر انجام می‌شود.

بدین ترتیب جریان نقدینگی تنزیل یافته مورد انتظار که بالاتر از مقدار تعیین شده حداقل نرخ جذب‌کننده باشد، به عنوان پتانسیل بالادست تعیین می‌شود. همچنین جریان نقدینگی تنزیل یافته مورد انتظار که پایین‌تر از مقدار تعیین شده است معادل ریسک پایین‌دست تعریف می‌شود. پتانسیل‌های بالادست طرح ۱ بالاتر از طرح ۲ و ریسک‌های پایین‌دست طرح ۱ پایین‌تر از ریسک‌های پایین‌دست طرح ۲ است. بنابراین طرح ۱ نسبت به طرح ۲ برتری دارد. با وجود اینکه در طرح ۱ نیز تحقق‌هایی وجود دارند که ارزش خالص فعلی معدن در آن‌ها منفی می‌شود اما احتمال این رخداد به مراتب کمتر از طرح استخراجی شماره ۲ است. برتری این روش نسبت به دیگر روش‌هایی که از شبیه‌سازی در طراحی معدن استفاده می‌کنند این است که هم‌زمان به پتانسیل بالقوه موجود در ذخیره از نظر توزیع عیاری و میزان ذخیره و همچنین اجتناب از انتخاب طرح‌های استخراجی است که در آن‌ها احتمال دست نیافتن به ذخیره برآورد شده وجود دارد، است [۲، ۲۱]. در این رویکرد، پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست برای هر طرح استخراجی به‌وسیله روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شود:

$$UPI = (V_{ij} - C_t) P_j \text{ if } V_{ij} > C_t \quad (1)$$

$$DR_i = (C_t - V_{ij}) P_j \text{ if } V_{ij} < C_t \quad (2)$$

که در این روابط:

UPI : پتانسیل بالادست.

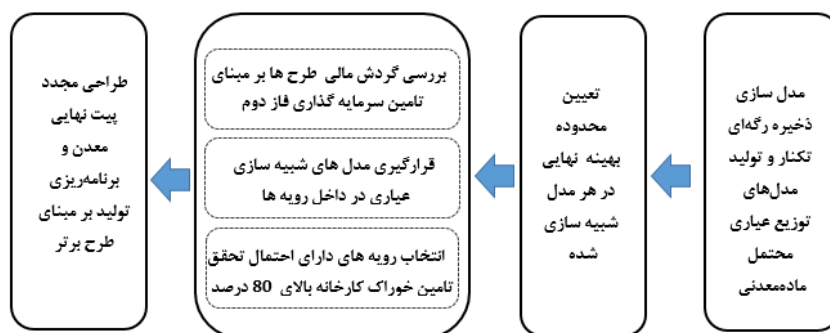
DR_i : ریسک پایین‌دست طرح استخراجی i .

C_t : هزینه سرمایه‌ای پروژه.

V_{ij} : ارزش اقتصادی تنزیل‌شده شبیه‌سازی j تحت طرح استخراجی i .

P_j : درصد احتمال شبیه‌سازی j [۲، ۲۱].

پس از تعیین طرح برتر، در مرحله آخر برای اعمال ملاحظات فنی معدن، مجدد طراحی کاواک جدید بر اساس محدوده نهایی که به صورت نرم‌افزاری تعیین شده است انجام می‌گیرد. بنابراین تعیین محدوده نهایی بر روی مدل انتخابی انجام می‌گیرد که منجر



شکل ۶- فلوچارت تحقیق

۳-۱- مدل‌سازی ذخیره رگه‌ای تکنار و تولید مدل‌های شبیه‌سازی شده توزیع عیاری ماده معدنی

پس از اتمام عملیات اکتشاف و به منظور تایید وجود یک ذخیره، تعیین توزیع فضایی و هندسی کانسنگ یا به عبارتی مدل‌سازی کانسار لازم است.

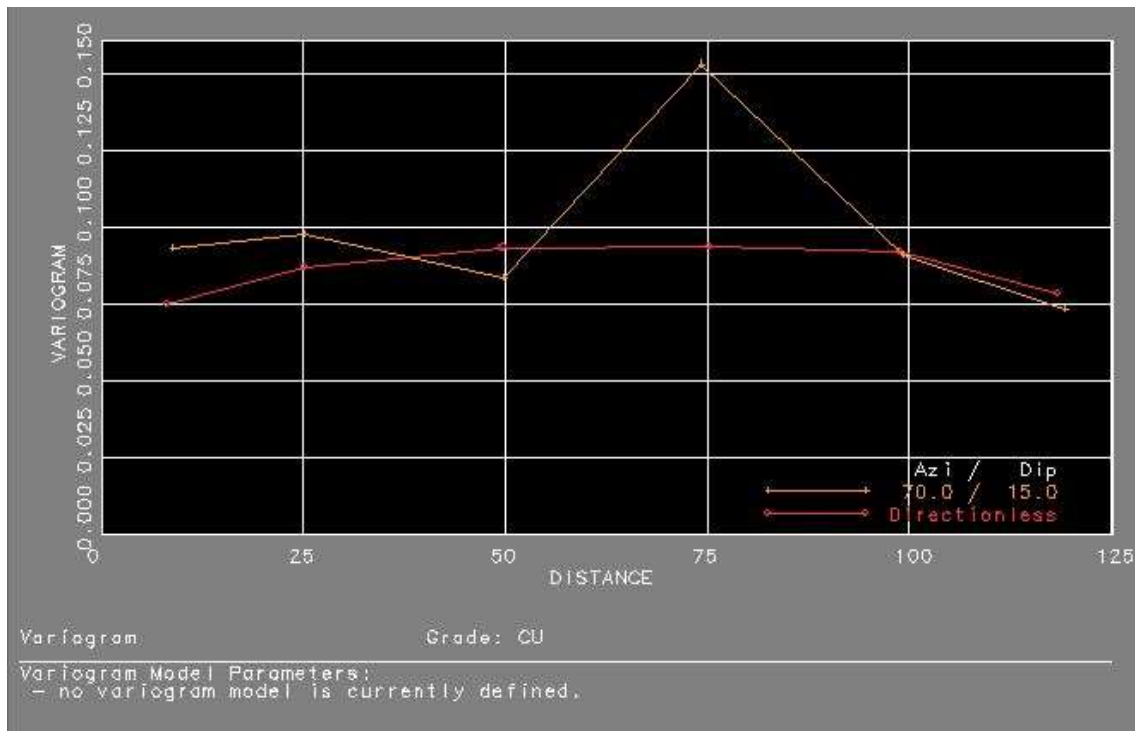
رگه کانی‌سازی مورد بررسی دارای طول عمومی حدود ۴۰۰ متر است. عرض رخنمون کانه‌دار حدود ۲ تا ۳/۵ متر است که با زاویه ۴۵ درجه به سمت شرق به زیر لایه‌های ماسه‌سنگ توفی و هم امتداد با آن‌ها ادامه دارد. پاراژنر کانی‌سازی در این رگه عمدتاً شامل کالکوپیریت و پیریت است. مجموع اطلاعات مورد استفاده در این کانسار شامل ۱۷۷ عدد گمانه پودری به متر اژ کلی ۴۸۳۹ و ۱۸ عدد گمانه مغزه‌گیری به متر اژ ۱۴۵۷ است که حداکثر عمق گمانه‌های پودری ۴۰ متر و حداکثر عمق گمانه‌های مغزه‌گیری معادل ۱۰۹ متر است [۲۲]. همچنین داده‌های ۵۳۷ چال حفاری استخراجی با عمق تقریبی ۵ متر نیز در مدل‌سازی اعمال شده است. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار دیتامین ویرایش ۳/۲۱ انجام گرفت. در کانسار مورد بررسی پراکندگی عیاری در زون کانه‌زایی به شدت متغیر و از عیار ۰/۱ درصد تا ۸/۰۵ درصد است، از طرفی با توجه به عرض کم کاری و حجم کم تولید مورد نیاز و نیز عرض کم و تغییرات عیار در رگه‌های ماده معدنی تغییراتی در فرآیند معمول مدل‌سازی نرم‌افزاری ذخایر معدنی اعمال شد.

برای به حداقل رساندن رقیق‌شدگی ناشی از عملیات استخراج کانسار مورد مطالعه، ابعاد بلوک به صورت ضریبی از ارتفاع پله در جهت X برابر ۱/۲۵ متر و ۵ متر در جهت Y که جهت گسترش رگه است، لحاظ شد. همچنین ابعاد ریز بلوک‌ها برای پوشش بهتر رگه برابر ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در ذخایر رگه‌ای با توجه به ابعاد کمتر کانسار در بعضی ابعاد، این طول تحت تاثیر ابعاد کانسار بوده و طول‌ها باید به صورتی انتخاب شوند که طول از دست رفته نمونه‌ها به حداقل برسد. در این کانسار با توجه به عرض کم رگه طول یکسان‌سازی برابر ۱ متر در نظر گرفته شد. برای پالایش مقادیر خارج از رده عیار ۱/۵ درصد مس به عنوان حد بالای عیار مس در کانسار تعیین شد و مقادیر بالاتر از این عیار برابر ۱/۵ درصد در نظر گرفته شد. در این کانسار با توجه به امتداد شمالی جنوبی و شیب شرقی رگه اقدام به رسم واریوگرام از جهت شمال و با رشد ۱۵ درجه‌ای برای امتداد و رشد ۱۰ درجه‌ای زوایا در شیب شد. مناسب‌ترین واریوگرام انتخاب شده برای امتداد ۷۰ درجه از شمال و زاویه ۷۵ درجه است. سپس با رسم هیستوگرام، تحلیل عیارهای بالاتر از

۰/۱ درصد انجام شد و با رسم واریوگرام شعاع تاثیر و ناهمسانگردی محاسبه و برابر ۱۵ متر در آزیموت ۷۰ و شیب ۱۵ درجه تعیین شد [۲۲]. در کانسارهای رگه‌ای با توجه به محدودیت در یک یا دو بعد لازم است که حجم جستجو با توجه به ابعاد گسترش کانسار محدود شود. علت این امر عدم شرکت نمونه‌های دارای اهمیت کمتر در عملیات تخمین است. اتفاقی که معمولاً در کانسارهای رگه‌ای رخ می‌دهد این است که در حجم جستجوی مشخص شده نمونه‌ای برای تخمین وجود ندارد، بدین منظور از حجم‌های جستجوی دوم و سوم استفاده خواهد شد که دارای ابعاد بزرگ‌تری نسبت به حجم جستجوی ابتدایی‌اند. پارامترهای حجم جستجوی لحاظ شده برای این کانسار برابر ۲۵ متر در راستای محور X و Y و با توجه به عرض رگه ۰/۵ متر در راستای محور Z ها در نظر گرفته شد. جهش چرخش محور حجم جستجو برابر ۴۵ درجه در راستای محور Z در نظر گرفته شده که شیب کلی رگه مورد نظر است. برای حجم جستجوی اول حداقل تعداد نمونه برابر ۲ و حداکثر ۴ نمونه تعیین شد. تعداد نمونه‌ها در هر هشتک نیز حداقل برابر ۱ و حداکثر برابر ۴ در نظر گرفته شد. بررسی‌های زمین‌شناسی، ژنز کانسار گرمایی^۱ تشخیص داده شد و از روش تخمین کریجینگ معمولی^۲ برای تخمین عیار استفاده شد و در نهایت ۹۴۹ هزار تن ماده معدنی با عیار متوسط ۰/۶۲ درصد برآورد شد [۲۲].

برای تولید مدل‌های بلوکی زمین‌شناسی محتمل، ۱۰ مدل مختلف بر مبنای شبیه‌سازی گوسی با به کارگیری اطلاعات به‌دست آمده از مرحله تخمین و ارزیابی مدل اصلی کانسار و تعیین مولفه‌های بهینه تخمین انجام گرفت. روش شبیه‌سازی مورد استفاده در این مرحله شبیه‌سازی گوسی است که شرط ثابت بودن محل نمونه‌های معلوم برای تخمین نمونه‌های مجهول را رعایت کند. نکته مهم، نیاز به نرمال‌سازی داده‌ها برای عملیات شبیه‌سازی است. بنابراین علاوه بر شرایط نرمال‌سازی شبیه‌سازی، واریوگرام مورد استفاده نیز مطابق شکل ۷ باید نرمال شود. شبیه‌سازی گوسی با استفاده از ابزار شبیه‌سازی متوالی گوسی (SGS) در نرم‌افزار دیتامین انجام گرفت. داده‌های ورودی گمانه‌ها و پروتوتایپ در مدل وارد شد. شعاع جستجو پس از نرمال‌سازی برابر ۵۰ متر برآورد شد. شیب و امتداد تخمین به ترتیب برابر ۱۵ و ۷۰ درجه که از تخمین مدل اصلی به دست‌آمده بود، در نظر گرفته شد. حداقل تعداد نمونه شرکت‌کننده در عملیات تخمین هر بلوک برابر ۲ و حداکثر برابر ۴ لحاظ و تعداد ۱۰ شبیه‌سازی مختلف انجام شد.

1- Hydro thermal
2- Ordinary kriging



شکل ۷- خروجی واریوگرام نرمال شده کانسار مس تکنار.

عیاری به وسیله این رویه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، به گونه‌ای که تناژ ماده معدنی واقع شده هر مدل درون هر رویه به صورت جداگانه اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت برای هر رویه، ۱۰ تناژ ذخیره قابل معدنکاری از ۱۰ شبیه‌سازی و ۱ مدل اصلی طبق جدول ۲ حاصل می‌شود. از میان این رویه‌ها، رویه‌ای که بیشترین احتمال تحقق را دارد، انتخاب می‌شود. بدین منظور معیار تامین ۹۵ هزار تن ماده معدنی که برابر بار ورودی مورد نیاز یک سال کارخانه فرآوری با ظرفیت ۳۰۰ تن در روز و با در نظر گرفتن ۳۲۰ روز کاری است، منظور شد. بدین ترتیب طرح‌هایی که بیش از ۸۰ درصد احتمال تامین ۹۵ هزار تن بار ورودی سالانه مورد نیاز کارخانه را دارا بودند، انتخاب شد. مطابق جدول ۲ رویه‌های ۲ و ۶ با احتمال تحقق ۹۱ درصد و رویه ۵ با احتمال تحقق ۸۲ درصد به عنوان طرح‌های واجد شرایط انتخاب شدند. برای انتخاب رویه دارای کمترین ریسک، از بین سه رویه ۲، ۵ و ۶ اقدام به تعیین گردش مالی تنزلی یافته^۱ هر رویه با استفاده از مولفه‌های اقتصادی بیان‌شده در جدول ۳ شد که نتایج آن در جدول ۴ بیان شده است. در ادامه برای پیاده‌سازی رویکرد حداکثر پتانسیل بالادست و حداقل ریسک پایین‌دست، شاخص تعیین‌کننده دوم که میزان سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای تامین نقدینگی افزایش ظرفیت کارخانه فرآوری است در نظر گرفته

۲-۳- ایجاد مدل‌های بلوکی اقتصادی و تعیین محدوده نهایی

پس از انجام شبیه‌سازی و ایجاد مدل‌های عیاری، ارزش‌گذاری بلوک‌ها و تشکیل کاواک نهایی بهینه برای پیاده‌سازی رویکرد پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست، انجام گرفت. برای این منظور از نرم‌افزار ویتل نسخه ۴.۵.۱ استفاده شد. مولفه‌های فنی و اقتصادی مورد استفاده، بر اساس اطلاعات و هزینه‌های به دست آمده از دیگر معادن این مجتمع مطابق جدول ۱ گردآوری شد. با استفاده از داده‌های فنی و اقتصادی از هر مدل حاصل از عملیات شبیه‌سازی، یک محدوده بهینه نهایی و در مجموع ۱۰ محدوده بهینه نهایی که دارای ارزش خالص فعلی مثبت بودند، تهیه شد. در ادامه خروجی هر محدوده نهایی تشکیل شده مجدد وارد نرم‌افزار دیتامین شده و رویه‌های جداگانه با توجه به محدوده و مرزهای کاواک ساخته شد.

۳-۳- پیاده‌سازی رویکرد پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست

مبنای رویکرد پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست بر اساس مقایسه خروجی‌های کاواک‌های بهینه حاصل شده از فرآیند شبیه‌سازی به ازای توزیع‌ها و رویه‌های مختلف است. هر یک از ۱۰ کاواک بهینه نهایی حاصل شده از ۱۰ شبیه‌سازی در مرحله قبل به صورت جداگانه وارد نرم‌افزار دیتامین شده و تبدیل به رویه شد، سپس مدل‌های شبیه‌سازی شده توزیع

1- Discounted Cash Flow (DCF)

شد و طرح‌های انتخاب شده با احتمال تحقق بالای ۸۰ درصد به وسیله این مولفه مورد سنجش قرار گیرند. بدین منظور از روابط ۱ و ۲ استفاده می‌شود:

$$UP_i = \sum (V_{ij} - C_t) P_j, \text{ if } V_{ij} > C_t \quad (1)$$

$$DR_i = \sum (C_t - V_{ij}) P_j, \text{ if } V_{ij} < C_t \quad (2)$$

که در این روابط:
Ct: مولفه کلیدی.
Vij: گردش مالی تنزیل یافته مدل‌های واقع در هر طرح.
Pj: احتمال وقوع آن طرح [۲ و ۱].

جدول ۱- مولفه‌های ورودی نرم‌افزار ویتل.

شرح	مؤلفه	شرح	مؤلفه
دلار	واحد پولی ^۱	۸۵	ضریب بازبایی کارخانه (درصد)
۵۰	شیب کلی معدن (درجه)	۱۳۵۰	قیمت فروش کنسانتره مس (دلار)
۰/۶۵	هزینه واحد معدنکاری (دلار بر تن)	۵/۲	هزینه فرآوری هر تن ماده معدنی (دلار)
۹۵	بازبایی معدن ^۲ (درصد)	۳۰۰	ظرفیت سالانه معدنکاری (هزار تن)
۹۰	بازبایی پس از ترقیق ^۳ (درصد)	۹۹	ظرفیت‌سالانه کارخانه فرآوری (هزار تن)

جدول ۳- مولفه‌های اقتصادی تعیین عیار حد بر اساس هزینه‌های جاری واحد معدنی.

مقدار	شاخص	مقدار	شاخص
۰/۶۵	هزینه استخراج ماده معدنی (دلار بر تن)	۸۵	بازبایی کارخانه (درصد)
۰/۶۷	حقوق دولتی ماده معدنی (دلار بر تن)	۲۵	عیار کنسانتره (درصد)
۰/۶۷	هزینه استخراج باطله (دلار بر تن)	۵۸۷۰	قیمت جهانی محصول ^۴ نهایی (دلار بر تن)
۵/۲	هزینه فرآوری (دلار بر تن)	۲۵	درصد هزینه ذوب و پالایش ^۵ (درصد)

جدول ۴- گردش مالی تنزیل یافته رویه‌های ده‌گانه برای مدل‌ها (میلیارد تومان).

شماره رویه	مدل اصلی	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵	مدل ۶	مدل ۷	مدل ۸	مدل ۹	مدل ۱۰
۱	۳,۴۵۷	-	۳,۲۷۰	۳,۵۱۲	۳,۶۵۰	۳,۳۹۱	۳,۲۶۲	۳,۳۵۰	۳,۶۵۲	۳,۷۶۴	۳,۴۶۳
۲	۴,۱۴۳	۳,۳۴۰	-	۳,۸۵۲	۳,۹۲۱	۳,۸۰۳	۴,۲۸۴	۳,۸۰۴	۴,۶۳۱	۳,۵۷۲	۴,۸۷۱
۳	۳,۱۶۳	۳,۳۲۴	۳,۱۶۸	-	۳,۵۹۲	۳,۳۳۲	۳,۵۴۴	۴,۰۱۶	۳,۴۵۸	۴,۱۴۰	۴,۴۶۲
۴	۳,۱۷۳	۳,۶۳۲	۳,۱۹۷	۳,۵۹۵	-	۳,۴۴۷	۳,۷۸۹	۳,۳۵۶	۳,۹۵۷	۳,۲۰۰	۳,۷۴۹
۵	۳,۶۹۱	۴,۲۵۲	۳,۴۶۸	۳,۸۰۷	۳,۸۸۲	-	۳,۶۶۳	۳,۸۲۵	۳,۸۳۲	۳,۰۷۲	۴,۱۲۲
۶	۴,۵۴۸	۴,۰۱۶	۴,۴۳۵	۳,۸۷۱	۳,۶۵۷	۴,۰۲۸	-	۳,۵۲۷	۴,۸۰۸	۳,۳۲۴	۴,۵۴۷
۷	۳,۶۴۶	۳,۷۶۴	۳,۵۶۹	۳,۴۲۷	۴,۱۸۲	۳,۹۲۳	۳,۶۵۵	-	۳,۲۵۰	۴,۰۳۶	۳,۰۸۲
۸	۳,۹۱۷	۳,۷۹۵	۳,۴۰۶	۴,۰۰۷	۳,۲۰۲	۴,۱۲۸	۳,۱۰۵	۳,۵۱۸	-	۳,۹۸۹	۳,۱۶۰
۹	۳,۴۶۶	۳,۴۸۶	۳,۳۸۹	۴,۲۴۶	۳,۲۳۳	۴,۰۹۰	۳,۰۷۳	۳,۸۸۵	۳,۳۷۱	-	۳,۲۶۸
۱۰	۲,۸۹۱	۳,۳۴۰	۳,۱۱۵	۳,۶۴۲	۳,۰۳۳	۳,۸۷۶	۲,۷۹۴	۳,۶۰۱	۲,۹۹۲	۳,۶۹۵	-

1- Currency

2- Mining Recovery Fraction

3- Mining Dilution Fraction

4- LME

5- TC/RC

نظر گرفته شد که نتایج در جدول ۶ و نمودار توزیع تجمعی عیاری و منحنی عیار- تناژ مطابق شکل‌های ۸ و ۹ بیان شده است. در شکل ۱۰ نیز نمای کاواک طراحی شده معدن نمایش داده شده است.

جدول ۵- مقادیر پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست.

DR	UP	شماره رویه
-۰/۴۹	۰/۵۵	رویه ۱
۰/۱۴	۳/۱۱	رویه ۲
-۰/۶۹	۱/۶۵	رویه ۳
-۰/۲۹	۰/۳۱	رویه ۴
-۲/۲۳	۲/۲۸	رویه ۵
-۰/۰۱	۲/۹۷	رویه ۶
-۰/۷۴	۲/۲۷	رویه ۷
-۰/۸۷	۲/۱۹	رویه ۸
-۰/۳۱	۱/۳۳	رویه ۹
۰/۰۰	۰/۰۰	رویه ۱۰

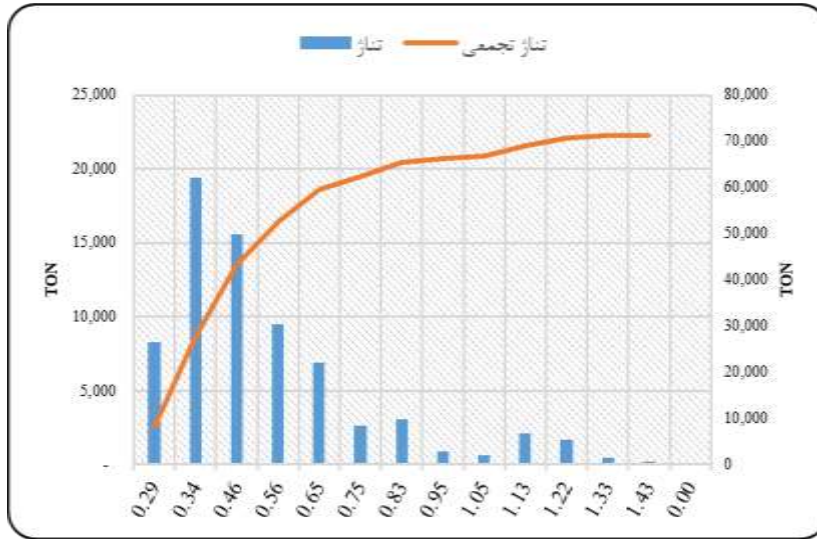
با توجه به این که مقدار سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای فاز افزایش ظرفیت کارخانه معادل ۳/۱ میلیارد تومان است بنابراین در جدول ۵، مقادیر UP و DR هر یک از رویه‌ها محاسبه شده است. با توجه به مقادیر جدول ۶ بالاترین مقدار پتانسیل بالادست مربوط به رویه ۲ است. این رویه کمترین مقدار ریسک در میان رویه‌های ۱۰ گانه را نیز به خود اختصاص داده بود. بدین ترتیب این رویه برای طراحی کاواک نهایی انتخاب شد.

۴-۳- طراحی مجدد کاواک و برنامه‌ریزی تولید بر مبنای طرح برتر

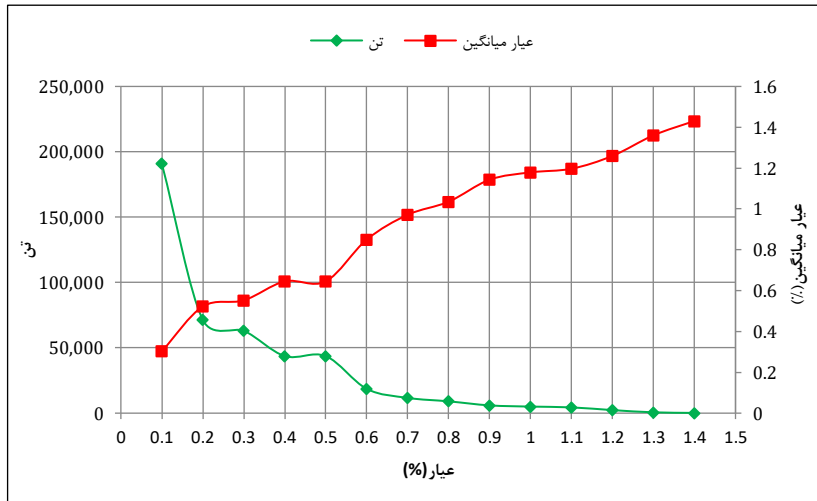
پس از انتخاب طرح برتر، کاواک نهایی معدن بر مبنای مولفه‌های فنی طراحی استخراجی طراحی شد. بدین منظور ظرفیت تولید بر اساس ۳۲۰ روز کاری و ۱۰ ساعت کاری در روز و مشخصات هندسی طراحی شیب رخساره پله ۷۵ درجه، ارتفاع پله ۵ متر، شیب و عرض رمپ‌ها به ترتیب ۱۰ درصد و ۱۰ متر لحاظ شد. عرض پله ایمنی با توجه به آذرین بودن دیواره و احتمال بسیار پایین ریزش برابر ۲ متر در هر پله در

جدول ۶- تناژ کاواک استخراجی طراحی شده ذخیره تکنار.

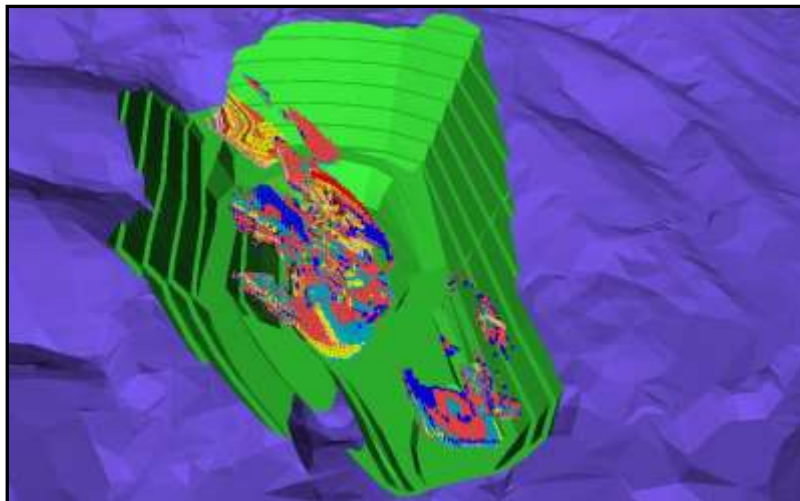
جنس سنگ	بازه عیاری	حجم (مترمکعب)	تناژ	میانگین عیار	مجموع تناژ
باطله	۰	۱۷۳,۵۳۱	۴۳۳,۸۲۸	۰	۱,۰۲۶,۰۷۳
	۰ - ۰/۱	۱۸۹,۱۰۴	۴۷۲,۷۶۱	۰/۰۰۲	
	۰/۱ - ۰/۲۸	۴۷,۷۹۴	۱۱۹,۴۸۴	۰/۱۷۲	
ماده معدنی	۰/۲۸ - ۰/۳	۹۴۸,۲/۰۴	۸,۲۵۵	۰/۲۹	۷۱,۳۲۹
	۰/۳ - ۰/۴	۶,۹۳۲	۱۹,۴۱۰	۰/۳۴۴	
	۰/۴ - ۰/۵	۵,۵۵۷	۱۵,۵۶۰	۰/۴۵۶	
	۰/۵ - ۰/۶	۳,۳۹۸	۹,۵۱۳	۰/۵۵۵	
	۰/۶ - ۰/۷	۲,۴۷۳	۶,۹۲۵	۰/۶۴۵	
	۰/۷ - ۰/۸	۹۴۰	۲,۶۳۱	۰/۷۵۲	
	۰/۸ - ۰/۹	۱,۱۰۸	۳,۱۰۳	۰/۸۲۹	
	۰/۹ - ۱/۰	۳۲۹	۹۲۰	۰/۹۴۸	
	۱/۰ - ۱/۱	۲۱۹	۶۱۴	۱/۰۵۱	
	۱/۱ - ۱/۲	۷۴۳	۲,۰۸۰	۱/۱۲۷	
	۱/۲ - ۱/۳	۶۰۲	۱,۶۸۴	۱/۲۲۲	
	۱/۳ - ۱/۴	۱۶۴	۴۵۹	۱/۳۳۴	
	۱/۴ - ۱/۵	۶۳	۱۷۵	۱/۴۳۱	
	۱/۵ - ۱/۶	-	-	۰	
مجموع	۴۳۵,۹۰۴	۱,۰۹۷,۴۰۲	W/O	۱۴/۴	



شکل ۸- نمودار تجمع‌ی کاواک استخراجی.



شکل ۹- نمودار عیار - تناژ ماده معدنی قابل استخراج از کاواک نهایی.



شکل ۱۰- کاواک نهایی باز طراحی شده معدن مس تکنار (دید در جهت شمال).

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق کاربردی، تلاش شد تا رویکرد کاهش ریسک عدم قطعیت با استفاده از روش پتانسیل بالادست و ریسک پایین‌دست که پیش از این بر روی ذخایر بزرگ به کار گرفته شده بود، بر روی ذخایر رگه‌ای که در مقایسه با ذخایر بزرگ دارای عدم قطعیت و ریسک‌پذیری بیشتری‌اند به کار گرفته شود. این رویکرد پیش از این در ذخایر رگه‌ای به کار گرفته نشده است. پس از بازنگری در مدل‌سازی کانسار بر مبنای ویژگی‌های کانسارهای رگه‌ای از پارامترهای به دست‌آمده از مدل‌سازی برای عملیات شبیه‌سازی استفاده شد. با توجه به اعتبارسنجی مدل با داده‌های حاصل از چال‌های آتشیاری حفاری‌شده، شبیه‌سازی انجام گرفته، حداکثر تطابق را با شرایط رگه‌ای کانسار دارد. همچنین مدل‌های شبیه‌سازی به صورت جداگانه برای بخش غربی و شرقی تهیه شد که علت آن گسستگی ساختاری این بخش از یکدیگر بود که شرایط متفاوتی با یکدیگر را دارا بودند. در ادامه بهترین طرح با بیشترین احتمال رخداد و کمترین ریسک ناشی از عدم تحقق انتخاب شد که ذخیره قابل استخراج برابر ۷۱ هزار تن با عیار متوسط ۰/۵۲ درصد مس و دارای نسبت باطله‌برداری ۱۴/۴ شد. در صورتی‌که در طرح پیشین تهیه شده، تناژ قابل استخراج برابر ۳۷۵ هزار تن با عیار متوسط ۰/۵۹ درصد مس که دارای نسبت باطله‌برداری ۶/۷ بود. همچنین طرح پیشین برای بخش غربی و شمالی ذخیره زیادی را در نظر گرفته بود که بر مبنای خروجی این تحقیق مشخص شد. تحقق این امر خارج از واقعیت بوده و این بخش‌های ذخیره دارای توجیه اقتصادی نبوده و باید از چرخه عملیات خارج گردند. با توجه به اینکه مجتمع تکنار این معدن را به عنوان منبع اصلی تامین بار ورودی فاز توسعه کارخانه در نظر گرفته است، بنابراین پیشنهاد می‌شود تا این معدن به عنوان ذخیره کوتاه‌مدت در نظر گرفته شود و برای تامین بار ورودی بلندمدت بر دیگر پتانسیل‌های معدنی موجود در این محدوده و یا انجام اکتشافات جدید تکیه شود.

منابع

- Dimitrakopoulos, R., Farrelly, C. Godoy, M; 2002; "Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design", Mining Technology, 111(1); 82-88.
- Burmeister, B. *From resource to reality: A critical review of the achievements of new Australian gold mining projects during (1983-1987)*, Macquarie University (1998) .
- Ravenscroft, P., 1992, "Risk analysis for mine scheduling by conditional simulation", Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A. Mining Industry, 101.
- Osanloo. M, Gholamnejad.J, Karimi.B, 2008, "Long-term open pit mine production planning: a review of models and algorithms", International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 22(1) 3-35.
- Dowd, P.A, 1994, " Risk assessment in reserve estimation and open-pit planning", in Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section A: Mining Industry), 103.
- Denby, B., and D. Schofield. 1995, "Inclusion of risk assessment in open-pit design and scheduling." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. Vol. 5. No. 32
- Dimitrakopoulos.R, 1998, "Conditional simulation algorithms for modelling orebody uncertainty in open pit optimisation", International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 12(4) 173-179.
- Godoy, M., Dimitrakopoulos, R., 2004, "Managing risk and waste mining in long-term production scheduling of open-pit mines", SME transactions, 316(3).
- Ramazan, S. Dimitrakopoulos, R, 2004, "Traditional and new MIP models for production scheduling with in-situ grade variability", International Journal of Surface Mining, 18(2) 85-98.
- Whittle, D. Bozorgebrahimi, A, 2004, "Hybrid Pits: Linking Conditional Simulation and Lerchs-Grossman through Set Theory", Orebody Modelling and Strategic Mine Planning, 14, 1-4.
- Leite, A. Dimitrakopoulos, R, 2007, "Stochastic optimisation model for open pit mine planning: application and risk analysis at copper deposit", Mining Technology,
- Dimitrakopoulos, R. and Ramazan, S., 2004. "Uncertainty based production scheduling in open pit mining". SME transactions, 316.
- Dimtrakopoulos, R., Martinez, L., Ramazan, S., 2007, "A maximum upside/minimum downside approach to the traditional optimization of open pit mine design", Journal of Mining Science, 43(1), 73-82.

- on orebody modelling and strategic mine Planning: uncertainty and risk management, pp. 347-352
19. Dimitrakopoulos, R., 2011, "Stochastic optimization for strategic mine planning: a decade of developments", Journal of Mining Science, 47(2) 138-150.
20. Deutsch, C. Journel, A, 1992," *GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide*", New York: Oxford Univ, in Press.
۲۱. مر، فرید ؛ ۱۳۹۳؛ «کاهش ریسک ناشی از عدم قطعیت عیاری در برنامه‌ریزی بلندمدت معدن فسفات اسفوردی» پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
۲۲. حمدا فرامرزی، حسین؛ شکورشاهی، رضا ؛ ۱۳۹۷؛ «بررسی تاثیر فاکتورهای هندسی ذخایر بر پارامترهای مدل‌سازی نرم‌افزاری با تاکید بر کانسارهای رگه‌ای» یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۲۳، ص ۱۴۰-۱۵۲.
- 116(3), 109-118.
14. Gholamnejad, J, Osanloo, M, 2007, "Incorporation of ore grade uncertainty into the push back design process", Journal of the South African Institute of Mining & Metallurgy, 107(3), 177.
15. Goodfellow, R., Dimitrakopoulos, R, 2016, "Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty", Applied Soft Computing, 40(2), 292-304.
۱۶. عطائی، محمد؛ حسینی، سیدمهدی؛ ۱۳۹۰؛ «طراحی محدوده و برنامه‌ریزی تولید در معادن سطحی» انتشارات جهاد دانشگاهی امیرکبیر.
۱۷. صیادی، احمدرضا؛ فتحیان‌پور، نادر؛ موسوی، امین ا...؛ ۱۳۹۱؛ « کاربرد شبیه‌سازی گوسی متوالی شرطی در تعیین عدم قطعیت عیار بلوک های تخمینی در معدن فسفات اسفوردی» روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۳، ۴۴-۵۲.
18. Menabde, M. Froyland, G., Stone, P., Yeates, G, 2004, "Mining schedule optimisation for conditionally simulated orebodies". In Proceedings of the international symposium