(پژوهشی)

طراحی محتمل‌ترین محدوده نهایی معادن روباز در فضای عدم قطعیت قیمت محصول نهایی معدن

جواد غلام نژاد*[1]، الهام لطفی[1]، مهدی نجفی[1]، محمدصادق زمانی[2]

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: مهر ۱۴۰۰، پذیرش: فروردین ۱۴۰۱)

چکیده

طراحی و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز در شرایط عدم قطعیت قیمت محصول نهایی یکی از چالش‌های مهم در حوزه معدنکاری است به‌طوری‌که طراحی و برنامه‌ریزی در معدن بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت، منجر به ارزیابی‌های اشتباه، برنامه‌ای غیرواقعی و غیرعملیاتی در شرایط نوسانات بازار شده و درنتیجه، ریسک سرمایه‌گذاری افزایش می‌یابد. تعیین محدوده نهایی برای مشخص نمودن میزان ذخیره قابل‌استخراج و جانمایی تأسیسات سطحی است. برای حل این مسئله از الگوریتم‌های ابتکاری، فر ابتکاری و روش‌های دقیق ریاضی استفاده‌شده است؛ اما این روش‌ها کمتر توانسته‌اند منجر به ارائه پیتی شوند که در فضای عدم قطعیت قیمت محصول نهایی معدن، باثبات‌ترین پیت باشد. در این مقاله الگوریتم ریاضی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو و الگوریتم لرچ و گراسمن ارائه شد که قادر است بر اساس تاریخچه قیمت فلز در گذشته و تخمین تابع توزیع آن، ارزش قابل‌انتظار بلوک‌ها و احتمال استخراج هر بلوک را محاسبه کرده و محتمل‌ترین پیت نهایی را برای معدن به دست آورد. این پیت می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت معدن و همچنین معیاری برای جانمایی تأسیسات سطحی باشد. مدل ارائه‌شده روی یک معدن مس پورفیری اجرا شد و نتایج نشان داد که تعداد بلوک‌هایی که احتمال استخراج آنها ۱۰۰ درصد است، نسبت به کل بلوک‌های موجود در مدل، کم است که این نشانگر حساسیت بالای پیت نسبت به عدم قطعیت قیمت است.

کلمات کلیدی

محدوده نهایی معدن، عدم قطعیت قیمت فلز، ارزش قابل‌انتظار بلوک، شبیه‌سازی مونت‌کارلو

*عهده‌دار مکاتبات: j.gholamnejad@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

پروژه‌های معدنی یکی از پر ریسک‌ترین و درعین‌حال سودآورترین زمینه‌های سرمایه‌گذاری در دنیا محسوب می‌شوند. منشأ عمده‌ی این ریسک‌ها مرتبط با نوسانات قیمت محصول در معدن [۲,۱] و هزینه‌های تولید است [۴,۳]. طراحی در معادن روباز، شامل تعیین محدوده بهینه نهایی و برنامه‌ریزی تولید، یک مسئله بزرگ‌مقیاس است که به دلیل بزرگی ابعاد مسئله و پیچیدگی حل آن در مقیاس واقعی، قابل‌حل نیست و در عمل به مسائل کوچک‌تری تقسیم شده و هر یک از این زیر مسئله‌ها با روش‌های خاصی حل می‌شوند.

اولین و مهم‌ترین مرحله در طراحی معادن روباز، تعیین محدوده بهینه نهایی برای دستیابی به باارزش‌ترین پیت است. این طراحی بر روی مدل بلوکی اقتصادی سه‌بعدی متشکل از میلیون‌ها بلوک انجام می‌شود که در آن هر بلوک دارای یک ارزش پولی، تحت عنوان ارزش اقتصادی بلوک است.

ارزش اقتصادی بلوک‌ها با استفاده از پارامترهایی نظیر عیار، تناژ، قیمت محصول، راندمان‌ها، هزینه‌های عملیاتی و نرخ ارز، محاسبه می‌شود که این پارامترها مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در فرآیند طراحی و برنامه‌ریزی معدن روباز هستند. چشم‌پوشی از ماهیت غیرقطعی این پارامترها، منجر به طراحی و ارزیابی‌های اشتباه و متعاقباً دستیابی به برنامه‌ای نادرست، غیرعملیاتی و غیر بهینه خواهد شد [۶,۵]؛ زیرا همواره این احتمال وجود دارد که مقادیر عیار، تناژ، قیمت محصول، نرخ ارز و هزینه‌های عملیاتی در نظر گرفته‌شده در زمان برنامه‌ریزی، متفاوت از مقادیر واقعی در زمان تولید باشد و بدین ترتیب ارزش اقتصادی تخمینی برای بلوک‌ها که ورودی اصلی برای تمام محاسبات طراحی و برنامه‌ریزی‌های بعدی است، دیگر قابل‌اطمینان نباشد.

عدم قطعیت‌های عیار و قیمت محصول، دو عامل عمده ریسک در سودآوری عملیات معدنی، هستند [۶]. نتایج تحلیل حساسیت‌ها نیز حاکی از آن است که قیمت محصول، اولین و مهم‌ترین پارامتر غیرقطعی تأثیرگذار در ارزش اقتصادی بلوک‌ها و ارزش خالص فعلی پروژه، نسبت به سایر پارامترهای غیرقطعی ازجمله عیار، تناژ، هزینه‌های عملیاتی و پارامترهای تکنولوژیکی است [۷–۹]. این نتیجه دور از انتظار هم نیست؛ زیرا قیمت محصول، تأثیر مستقیم بر درآمد عملیاتی معدن دارد و تابع عوامل بیرونی همچون مسائل سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و تکنولوژیکی (PEST[1]) و خارج از کنترل سرمایه‌گذاران و متولیان معدن است [۷].

بنابراین احتمال اینکه محدوده نهایی به‌دست‌آمده با یک قیمت معلوم و مشخص در اثر تغییرات قیمت محصول در طول عمر معدن، از حالت بهینه خارج شود، وجود دارد. همچنان که کاهش قیمت محصول نهایی، می‌تواند منجر به کاهش مقدار ذخیره قابل‌استخراج، کوچک‌تر شدن محدوده نهایی و کاهش طول عمر معدن شود؛ شرایط بالعکس نیز با افزایش قیمت، وجود دارد [۶].

همه رویکردهایی که از الگوریتم‌های مختلف برای حل مسئله بهینه‌سازی محدوده نهایی، استفاده کرده‌اند یا با هدف سهولت و ساده‌سازی، از عدم قطعیت قیمت صرف‌نظر کرده‌اند و یا تأثیر عدم قطعیت قیمت بر شکل پیت بهینه را بررسی نموده‌اند؛ بدون آنکه بتوانند پیت منحصربه‌فردی را که محتمل‌ترین پیت ممکن باشد، به‌دست آورند تا مبنای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت قرار گیرد.

در این مقاله، ابتدا تاریخچه الگوریتم‌های طراحی محدوده نهایی، بررسی می‌شود. سپس با استفاده از قیمت‌های فلز در گذشته و همچنین روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تولید سناریوهای قیمت، محتمل‌ترین پیت در شرایط عدم قطعیت قیمت، به دست آورده می‌شود.

۲- پیشینه الگوریتم‌های تعیین محدوده نهایی پیت

در این بخش، تاریخچه الگوریتم‌های طراحی محدوده نهایی به تفکیک الگوریتم‌های قطعی و الگوریتم‌های مبتنی بر عدم قطعیت، تشریح می‌شوند.

۲-۱- الگوریتم‌های تعیین محدوده نهایی بهینه در شرایط قطعیت قیمت محصول نهایی

در این رویکرد از روش‌های دقیق ریاضی، الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری و برنامه‌ریزی پویا برای حل مسئله‌ی تعیین محدوده نهایی استفاده‌شده است.

۲-۱-۱- الگوریتم‌های دقیق ریاضی

این الگوریتم‌ها مبتنی بر منطق ریاضی هستند و همواره محدوده نهایی بهینه را در حالت سه‌بعدی به دست می‌دهند و برای بهینه بودن جواب آنها اثبات ریاضی وجود دارد.

از پیشگامان در زمینه‌ی استفاده از روش‌های ریاضی، روش مبتنی بر نظریه گراف لرچ و گراسمان در سال ۱۹۶۵ میلادی است [۱۰].

جانسون در سال ۱۹۶۸ استفاده از جریان شبکه را برای تعیین محدوده نهایی معدن پیشنهاد داد [۱۱] اما پیکارد بود که در سال ۱۹۷۶ آن را مستند ساخت [۱۲]. جیانینی در سال ۱۹۹۰ برای حل مسئله طراحی معدن روباز از الگوریتم حداکثر جریان-حداقل برش استفاده کرد [۱۳]. استفاده از الگوریتم حمل‌ونقل توسط هاتاگوسول و کامرون در سال ۱۹۹۲ را از دیگر رویکردهای دقیق ریاضی برای حل مسئله برنامه‌ریزی خطی محدوده نهایی، می‌توان نام برد [۱۴]. آندروود و تلوینسکی در سال ۱۹۹۸ تئوری گراف و برنامه‌ریزی ریاضی را برای حل مسئله محدوده نهایی، ترکیب و برای حل مسئله از یک رویکرد سیمپلکس دوگان استفاده نمودند [۱۵]. هاچبیوم و چن در سال ۲۰۰۰ یک الگوریتم ارسال-برچسب[۲] توسعه دادند؛ ازآنجاکه این الگوریتم، یک الگوریتم چندجمله‌ای است، می‌تواند راه‌حل بهینه را برای مسئله به دست آورد [۱۶].

۲-۱-۲- الگوریتم‌های ابتکاری و الگوریتم‌های فرا ابتکاری

در مقابل الگوریتم‌های دقیق ریاضی، اگرچه روش‌های مبتنی بر منطق جستجو، دستیابی به جواب بهینه واقعی را تضمین نمی‌کنند؛ ولی راه‌حل تقریبی با دقت مناسبی را در زمانی قابل‌قبول ارائه می‌دهند. به دلیل سرعت بالای حل مسئله در الگوریتم‌های ابتکاری و انعطاف‌پذیری آنها، تاکنون برای بهینه‌سازی محدوده نهایی، بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند.

مخروط شناور، یکی از الگوریتم‌های ابتکاری ارائه‌شده توسط پانا در سال ۱۹۶۵ است [۱۷]. برلانگا و همکاران در سال ۱۹۸۸، یک فرمول بازگشتی ابتکاری برای کاربرد مخروط شناور در طراحی محدوده نهایی، پیشنهاد دادند [۱۸]. یامتومی و همکاران در سال ۱۹۹۵ نیز یک طرح بهبودیافته برای الگوریتم مخروط شناور ارائه دادند [۱۹]. برای رفع ضعف الگوریتم مخروط شناور در حصول جواب بهینه، در سال ۱۹۹۹ رایت نسخه‌ای اصلاح‌شده از مخروط شناور به نام مخروط شناور II را ارائه کرد [۲۰].

از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده‌شده در طراحی محدوده نهایی بهینه، می‌توان به الگوریتم کروبوف در سال ۱۹۷۴ [۲۱] و کروبوف اصلاح‌شده در سال ۱۹۹۳ و توسط داود و اونور [۲۲] اشاره کرد. دنبای و شفیلد در سال ۱۹۹۴ از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک برای حل مسئله طراحی و زمان‌بندی تولید به‌صورت هم‌زمان استفاده کردند [۲۳]. فریمپونگ و آچریکو در سال ۱۹۹۷ الگوریتمی را برای بهینه‌سازی محدوده نهایی در حضور عدم قطعیت عیار پیشنهاد دادند؛ آنها برای کلاس‌بندی بلوک‌ها از شبکه عصبی استفاده کردند [۲۴]. عسکری نسب و اواه- اوفی در سال ۲۰۰۹ [۲۵] و صیادی و همکاران در سال ۲۰۱۱ برای طراحی محدوده نهایی بهینه از هوش مصنوعی بهره بردند [۲۶].

۲-۱-۳- برنامه‌ریزی پویا

استفاده از برنامه‌ریزی پویا برای طراحی محدوده نهایی بهینه، اولین بار توسط لرچ و گراسمن در سال ۱۹۶۵ و برای یک مدل دوبعدی انجام شد و اگرچه در مدل دوبعدی، محدوده بهینه را به دست می‌آورد، اما ترکیب مقاطع دوبعدی برای ایجاد پیت سه‌بعدی به اصلاحاتی نیاز داشت که منجر به انحراف از جواب بهینه می‌شود [۲۷].

رومن در سال ۱۹۷۶، الگوریتم برنامه‌ریزی پویا را برای طراحی هم‌زمان پیت بهینه و زمان‌بندی تولید معدن روباز ارائه داد [۲۸]. کونیسبرگ در سال ۱۹۸۲ یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا برای یافتن محدوده نهایی بهینه در یک مدل سه‌بعدی را پیشنهاد داد [۲۹]. کاستا و جیانینی در سال ۱۹۸۸ یک روش برنامه‌ریزی پویا برای پیاده‌سازی الگوریتم لرچ و گراسمن ارائه دادند [۳۰]. ارارسلان و جلبی در سال ۲۰۰۱، الگوریتم برنامه‌ریزی پویا را برای بهینه‌سازی محدوده نهایی و توالی استخراج بلوک‌ها به‌طور هم‌زمان پیشنهاد کردند [۳۱]. باوجود تضمین بهینگی محدوده نهایی با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی پویا و تخمین‌های واقعی این نوع مدل‌ها برای هزینه استخراج، هنوز هم این الگوریتم‌ها برای مدل‌هایی با اندازه بزرگ و در مقیاس واقعی، غیرقابل اجرا هستند.

۲-۲- مطالعات بهینه‌سازی محدوده نهایی پیت تحت عدم قطعیت قیمت محصول

بحث حساسیت محدوده نهایی معادن روباز نسبت به قیمت محصول نهایی، اولین بار در سال ۱۹۶۵ و الگوریتم تولید پیت‌های لانه‌ای لرچ و گراسمن و باهدف تحلیل

حساسیت محدوده نهایی نسبت به تغییرات قیمت محصول نهایی مطرح شد [۳۲].

این الگوریتم بعدها در سال ۱۹۸۸ توسط ویتل برای تولید یک سری پیت‌های لانه‌ای در نرم‌افزاری به همین نام استفاده شد [۳۳]. به‌رغم پشتوانه‌ی ریاضی قوی این الگوریتم برای طراحی پیت‌های بهینه در معدن، دامنه‌ی مفروض برای تغییرات فاکتورهای اقتصادی ازجمله قیمت محصول، با نوسانات قابل‌توجه فعلی، هم‌خوانی و سازگاری ندارد [۳۴].

برنان و شوارتز در سال ۱۹۸۵ از تکنیک اختیارات حقیقی با بررسی اختیار ورود به عملیات معدنکاری و خروج موقت و یا دائمی از آن برای یک مدل معدن فرضی، وارد حوزه‌ی معدن کردند [۳۵].

کارایی روش اختیارات حقیقی برای امکان انعطاف‌پذیری مدیریتی و تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت، باعث شد که استفاده از انواع تکنیک‌های اختیارات حقیقی، به‌سرعت توسعه پیدا کرده و برای ارزشیابی اقتصادی، طراحی محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید پروژه‌های معدنی، به کار گرفته شود.

ازجمله محققانی که به‌منظور مدیریت منعطف در شرایط عدم قطعیت قیمت، از اختیارات حقیقی استفاده کردند، می‌توان به پژوهش‌های موئل و توفانو در سال ۲۰۰۲ [۳۶]؛ مک-کارتی و مانخاوس در سال ۲۰۰۳ [۳۷]؛ سیمیس و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۳۸]؛ عبدالصبور و پاوولین در سال ۲۰۰۶ [۳]؛ عبدالصبور و وود در سال ۲۰۰۹ [۳۹]؛ عبدالصبور و پاوولین در سال ۲۰۱۰ [۴۰]؛ دهقانی و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۴۱]؛ امینی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۴۲]؛ اوات و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۴۳] و اکبری و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۴۴] اشاره کرد که باهدف ارزشیابی اقتصادی پروژه‌های معدنی انجام شد و همه بر بهبود ارزش خالص فعلی حداقل ۱۰ الی ۳۰ درصدی پروژه نسبت به روش‌های قدیمی، توافق نظر داشتند.

دیمیتراکوپولوس و عبدالصبور در سال ۲۰۰۷ برای ارزشیابی و انتخاب بهترین طراحی برای دو معدن مس و طلا تحت عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی، قیمت و نرخ ارز، با فرض انعطاف مدیریتی و اختیار ورود و خروج منعطف از روش اختیارات حقیقی استفاده کردند [۵].

عبدالصبور و همکاران در سال ۲۰۰۸ برای ارزشیابی اقتصادی طراحی‌های مختلف محدوده نهایی، یک مدل رتبه‌بندی بر پایه اختیارات حقیقی ارائه دادند [۴۵].

اکبری و همکاران در سال ۲۰۰۸ برای تعیین محدوده نهایی در شرایط عدم قطعیت قیمت، از روش اختیارات حقیقی با اختیار صبر و مشاهده برای تعیین محدوده نهایی در زمان‌ها و قیمت‌های مختلف استفاده کردند [۷].

اکبری و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از یک روش ابتکاری بر پایه احتمالات به ارزیابی ریسک در طراحی محدوده نهایی تحت عدم قطعیت قیمت و برای سه سطح کمترین، میانگین و بیشترین مقدار قیمت پرداختند [۴۶].

میگر و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از روش اختیارات حقیقی و الگوریتم برش حداقل پارامتری در یک چارچوب تصادفی، یک برنامه بهینه‌سازی دومرحله‌ای را برای طراحی محدوده نهایی و پوش‌بک‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی، قیمت و نرخ ارز، ارائه دادند [۴۷].

عبدالصبور و دیمیتراکوپولوس نیز در سال ۲۰۱۱ برای انعطاف‌پذیری مدیریتی در تصمیم به حفظ یا تجدیدنظر در محدوده نهایی در فواصل زمانی منظم در شرایط عدم قطعیت عیار، قیمت و نرخ ارز، مشابه عبدالصبور و همکاران از روش اختیارات حقیقی استفاده کردند [۴۸].

اسد و دیمیتراکوپولوس در سال ۲۰۱۳ یک الگوریتم بهینه‌سازی سه مرحله‌ای برای طراحی محدوده نهایی و پوش‌بک‌ها تحت عدم قطعیت زمین‌شناسی و قیمت، ارائه دادند. [۴۹].

کاستلو و دیمیتراکوپولوس در سال ۲۰۱۴ عدم قطعیت زمین‌شناسی و قیمت را با استفاده از روش اختیارات حقیقی در تعیین محدوده نهایی با هم ادغام کردند. [۶].

داچ و همکاران در سال ۲۰۱۵ از شبیه‌سازی زمین‌آماری و تجزیه‌وتحلیل پارامتری برای مدل‌سازی تأثیر تغییرات زمین‌شناسی و قیمت بر روی محدوده نهایی و اقتصاد کلی پروژه، استفاده کردند [۵۰].

چاتارجی و همکاران در سال ۲۰۱۶ برای طراحی محدوده نهایی و فازهای تولید، از روش پارامتری سازی و از یک چارچوب تصادفی مشابه اسد و دیمیتراکوپولوس بهره بردند [۵۱].

جیون بیک و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از الگوریتم مخروط شناور و یک روش ابتکاری، محدوده نهایی بهینه را با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت و با سطح اعتماد مشخص، تعیین کردند. [۵۲].

در ادامه، ضمن تشریح الگوریتم ریاضی برای طراحی محدوده نهایی پیت، مدلی ارائه خواهد شد که بتواند محدوده نهایی بهینه را در شرایط عدم قطعیت قیمت به دست دهد.

۳- مدل ریاضی تعیین محدوده نهایی

رابطه‌ی ریاضی تعیین محدوده نهایی پیت به‌صورت زیر است [۱۶]:

$$\begin{aligned} &Max\ Z = \sum_{i=1}^{N} c_i x_i \\ &Subject to: \quad x_i \le x_j \ \ i = 1,2,\ldots, N;\ j \in \Gamma_i \\ &\qquad\qquad x_i \in \{0,1\} \end{aligned} \qquad (۱)$$

که در آن:

c_i: ارزش اقتصادی بلوک i ام است و از رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$c_i = T_i \times \{g_i \times Y \times (s - c_s) - c_e - (R_e \times c_p)\} \qquad (۲)$$

x_i: متغیر تصمیم که برابر با یک است، اگر بلوک i ام استخراج شود و در غیر این صورت، برابر صفر خواهد بود.

N: تعداد کل بلوک‌های موجود در مدل.

Γ_i: مجموعه بلوک‌هایی که قبل از استخراج بلوک i ام باید برداشت شده باشد (محدودیت زاویه شیب).

T_i: تناژ سنگ موجود در بلوک i ام.

g_i: عیار بلوک i ام.

Y: راندمان کلی عملیات.

R_e: راندمات عملیات استخراج.

s: قیمت هر تن فلز.

c_s: هزینه ذوب، تصفیه و فروش هر تن فلز.

c_e: هزینه استخراج هر تن سنگ.

c_p: هزینه فرآوری هر تن کانسنگ.

رابطه (۲) ارزش اقتصادی یک بلوک کانسنگ را نشان می‌دهد. اگر بلوک باطله باشد ارزش آن برابر $-T_i \times c_e$ خواهد بود.

تابع هدف در این مسئله، بیشینه‌سازی سود و محدودیت آن همان محدودیت زاویه شیب است.

همان‌طور که از رابطه (۱) مشخص است، به علت طبیعت تصادفی قیمت ماده معدنی (s) پارامتر c_i نیز یک متغیر تصادفی بوده و درنتیجه مقدار تابع هدف نیز یک متغیر تصادفی خواهد بود. متغیر تصادفی مثل Z (تابع هدف) دارای یک مقدار قابل‌انتظار (E(Z)) و واریانس (Var(Z)) است.

اکنون چندین نوع تابع هدف جدید می‌توان تعریف کرد که استفاده از هر کدام، منجر به جواب متفاوتی نسبت به بقیه می‌شود [۵۳]. این توابع عبارت‌اند از:

- بیشینه‌سازی مقدار قابل‌انتظار تابع هدف.
- کمینه‌سازی مقدار واریانس (یا انحراف استاندارد) تابع هدف.
- بیشینه‌سازی احتمال برآورده شدن انتظارات.

در این مقاله از تابع اول، یعنی بیشینه‌سازی مقدار قابل‌انتظار استفاده می‌شود؛ به این دلیل که با انتخاب این تابع، شکل تابع هدف به‌صورت خطی باقی خواهد ماند و نیازی به استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی نیست. پس تابع هدف به این صورت نوشته می‌شود:

$$Max\ \mathrm{E}(Z) = \sum_{i=1}^{N} E(c_i) \times x_i \qquad (۳)$$

که در آن $E(c_i)$ ارزش قابل‌انتظار بلوک i ام است.

برای محاسبه ارزش قابل‌انتظار هر بلوک از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده می‌شود که در بخش بعدی تشریح خواهد شد.

۴- مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت محصول

به‌منظور کمی سازی و سپس مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت محصول نهایی، ابتدا باید با استفاده از روش‌های احتمالاتی، تابع توزیع حاکم بر قیمت فلز (محصول نهایی معدن) را به‌دست آورد.

در مرحله بعد با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو از تابع توزیع به‌دست‌آمده، نمونه‌گیری تصادفی انجام می‌شود. هرکدام از نمونه‌های تصادفی (قیمت‌های شبیه‌سازی شده)، یک تحقق از قیمت ماده معدنی است. درنهایت، ارزش متوسط تنزیل نیافته هر بلوک با استفاده از رابطه (۴) به‌دست می‌آید [۴۹]:

$$E(c_i) = \frac{\sum_{r=1}^{R} C_i^r}{R} \qquad (۴)$$

$$c_i^r = T_i \times \{g_i \times Y \times (s^r - c_s) - c_e - (R_e \times c_p)\} \quad (۵)$$

c_i^r: ارزش خالص بلوک i ام اگر قیمت r ام برای محصول نهایی تحقق یابد.

r: شاخص مربوط به قیمت شبیه‌سازی شده.

R: تعداد کل قیمت‌های شبیه‌سازی شده.

s^r: تحقق r ام از قیمت شبیه‌سازی شده.

بقیه پارامترها نیز در بخش ۳ معرفی شده است.

حال برای در نظر گرفتن عیار حد استخراجی، ارزش خالص متوسط بلوک i ام به‌صورت رابطه (۶) تعدیل می‌شود:

$$c_i^r = \begin{cases} c_i^r & if \quad c_i^r \geq 0 \\ -T_i \times c_e & if \quad c_i^r < 0 \end{cases} \quad (۶)$$

همان‌طور که از روابط (۵) و (۶) مشخص است، افزایش قیمت محصول نهایی می‌تواند بلوکی را که قبلاً باطله بوده به‌عنوان کانسنگ طبقه‌بندی کند.

۵- پیاده‌سازی مدل

برای پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در این مقاله یکی از معادن مس ایران به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. ابعاد مدل بلوکی زمین‌شناسی این معدن ۱۵×۱۵×۱۵ متر است. جدول ۱ پارامترهای فنی و اقتصادی را برای ساخت مدل بلوکی اقتصادی نشان می‌دهد.

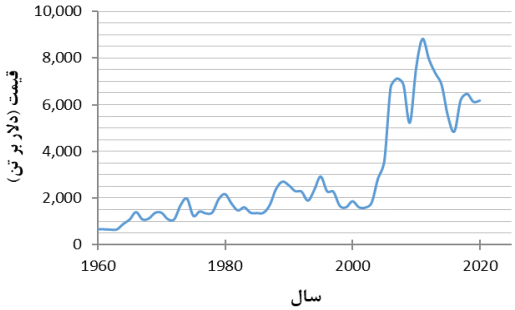
جدول ۱: مشخصات مدل بلوکی معدن موردمطالعه

پارامتر	مقدار
راندمان استخراج	۹۰ درصد
راندمان فرآوری	۸۷ درصد
راندمان ذوب و تصفیه	۹۷ درصد
هزینه معدنکاری (دلار بر تن باطله)	۱٫۵
هزینه معدنکاری (دلار بر تن ماده معدنی)	۲
هزینه ذوب و تصفیه (دلار بر تن فلز)	۴۱۰
درصد ترقیق	۵
قیمت مبنا برای هر تن مس (دلار)	۶۸۶۰
زاویه شیب سرتاسری (درجه)	۴۰

برای به‌دست آوردن نمونه تصادفی از قیمت فلز مس مراحل زیر انجام می‌شود:

۵-۱- جمع‌آوری داده‌های تاریخی از قیمت فلز

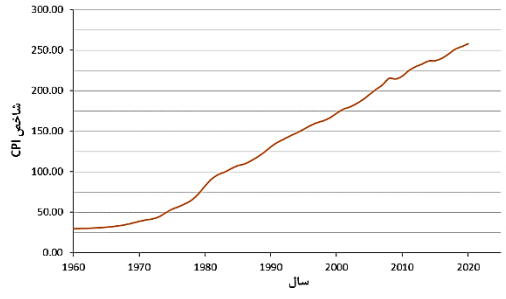
بدین منظور داده‌های مربوط به قیمت فلز مس در بازار در یک بازه زمانی طولانی جمع‌آوری شده است. شکل ۱ نمودار تغییرات قیمت فلزات مس را در بازه زمانی سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰ میلادی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تغییرات قیمت فلز مس (سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰ میلادی)

۵-۲- تعدیل قیمت‌ها با توجه به تورم

داده‌های جمع‌آوری شده در مرحله قبل قیمت اسمی مس را در سال‌های مختلف نشان می‌دهد، حال آن‌که واضح است که ارزش خرید یک دلار در سال ۱۹۶۰ با ارزش خرید آن در سال ۲۰۲۰ متفاوت است. برای یکسان‌سازی این ارزش‌ها در یک سال مبنا مثلاً سال ۲۰۲۰ از شاخص‌های قیمت (Price Index) استفاده می‌شود. شاخص‌های به‌کار رفته در این نوع مطالعات، شاخص قیمت مصرف‌کننده CPI (Consumer Price Index) است. این شاخص بیانگر ارزش یک سبد از اقلامی خریداری شده توسط مصرف‌کننده است. شکل ۲ مقدار این شاخص را از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰ میلادی در آمریکا نشان می‌دهد.



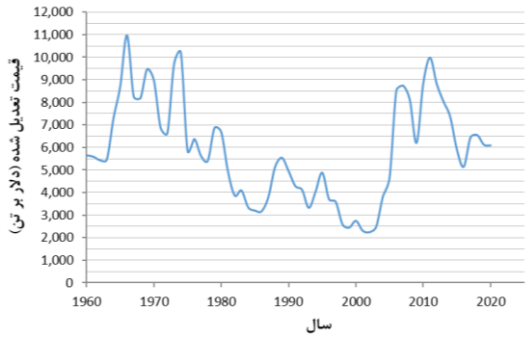
شکل ۲: نمودار تغییرات شاخص CPI (۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰ میلادی)

ارزش واقعی (RV^3) هر قلم کالا در سال مبنای j ام با توجه به ارزش اسمی (NV^4) آن در سال q، از رابطه (۷) به دست می‌آید:

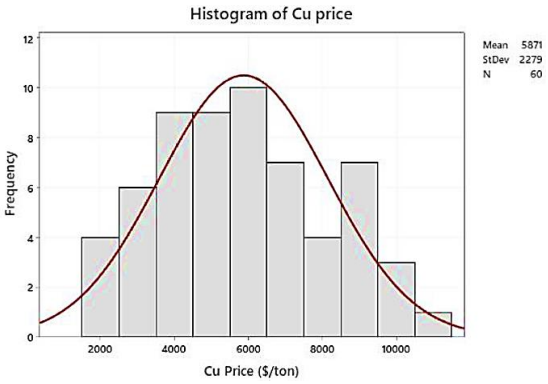
$$RV(j) = NV(q) \times \frac{\text{مقدار } I \text{ در سال } j \text{ ام}}{\text{مقدار } CPI \text{ در سال } q \text{ ام}} \quad (۷)$$

شکل ۳ روند قیمت به‌روز شده هر تن فلز مس را در سال مبنای ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. هیستوگرام قیمت به‌روز

در شکل ۴ و پارامترهای آماری آن در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۳: قیمت‌های تعدیل‌یافته فلز مس (بر مبنای سال ۲۰۲۰)



شکل ۴: هیستوگرام قیمت تعدیل‌یافته شده فلز مس

جدول ۲: پارامترهای آماری قیمت تعدیل‌یافته مس

پارامتر	مقدار
حداقل	۲۲۴۵
حداکثر	۱۰۹۷۱
میانگین	۵۸۷۱
انحراف استاندارد	۲۲۷۹
میانه	۵۶۰۷
Q_1	۳۹۱۲
Q_3	۷۸۶۸

۵-۳- شبیه‌سازی قیمت مس

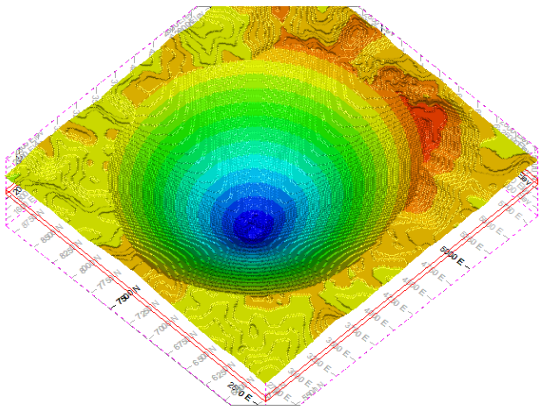
با استفاده از قیمت‌های تعدیل‌یافته در مرحله قبلی ضمن بررسی‌های آماری، تابع توزیع تجمعی قیمت مس به دست آورده شده و سپس ۱۰۰ سناریوی قیمت با استفاده از روش مونت‌کارلو، شبیه‌سازی می‌شود. این قیمت‌ها در واقع مقادیر محتمل قیمت مس برای تعیین محدوده نهایی پیت هستند.

۵-۴- محاسبه ارزش قابل‌انتظار هر بلوک

در این بخش با استفاده از قیمت‌های شبیه‌سازی شده برای فلز مس و همچنین رابطه‌های (۴)، (۵) و (۶) ابتدا ۱۰۰ ارزش برای هر بلوک به‌دست آورده شده و سپس ارزش قابل‌انتظار هر بلوک محاسبه می‌شود. بدین منظور از مدل بلوکی زمین‌شناسی در نرم‌افزار SURPAC خروجی اکسل تهیه و ارزش قابل‌انتظار بلوک‌ها محاسبه شد. سپس ارزش محاسبه‌شده، با استفاده از نرم‌افزار SURPAC وارد مدل بلوکی شده و مدل بلوکی نهایی به‌منظور طراحی محدوده نهایی وارد نرم‌افزار NPVScheduler شد.

۵-۵-تعیین پیت بهینه منفرد

در این مرحله با استفاده از نرم‌افزار NPVScheduler و به‌کارگیری الگوریتم لرچ و گراسمن سه‌بعدی، پیت بهینه به دست آمد. این پیت در واقع محتمل‌ترین پیت ممکن است. شکل ۵ نمایی از پیت به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد. این پیت دارای ۷۰۵ میلیون تن ماده معدنی با نسبت باطله‌برداری ۸:۱ است.



شکل ۵: نمایی از پیت بهینه به‌دست‌آمده

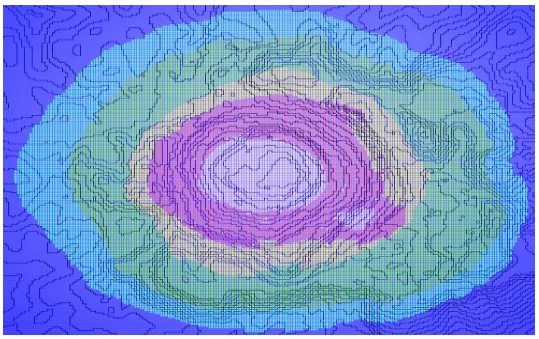
۶- تعیین مدل احتمالاتی پیت نهایی

در این مرحله با استفاده از ۱۰۰ قیمت شبیه‌سازی شده، مدل احتمالاتی پیت بهینه به‌دست آورده می‌شود. روش کار به این صورت است که ابتدا پیت بهینه متناظر با هر یک از قیمت‌های شبیه‌سازی شده به‌دست آورده می‌شود (۱۰۰ پیت).

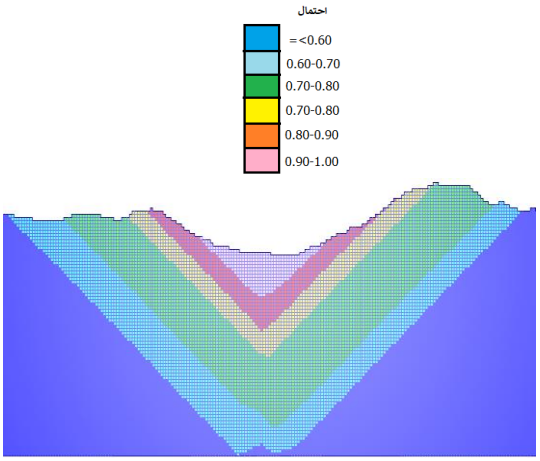
بعضی از بلوک‌ها در همه مدل‌ها داخل پیت بهینه قرار می‌گیرند، پس احتمال استخراج آنها ۱۰۰ درصد است. بعضی از بلوک‌ها نیز در هیچ‌کدام از مدل‌ها در محدوده پیت نهایی قرار نمی‌گیرند، پس احتمال استخراج آنها صفر است. مابقی بلوک‌ها در تعدادی از مدل‌ها در محدوده پیت

نهایی قرار می‌گیرند و در بقیه، خیر. پس احتمال استخراج آنها برابر است با تعداد مدل‌هایی که آن بلوک در محدوده نهایی پیت قرار گرفته به کل مدل‌ها که در اینجا عدد ۱۰۰ است. به‌عنوان مثال اگر از ۱۰۰ عدد پیت ساخته‌شده، بلوکی در ۷۰ مدل در محدوده نهایی پیت قرار گرفت، احتمال استخراج آن ۷۰ درصد است. با توجه به احتمال استخراج بلوک‌ها، بلوک‌هایی با بیشترین احتمال وقوع، به‌عنوان بلوک‌های واقع در محدوده نهایی، انتخاب می‌شوند.

شکل ۶ نمایی از مقطع و شکل ۷ پلان مدل احتمالاتی پیت نهایی را نشان می‌دهد.



شکل ۶: نمایی از پلان مدل احتمالاتی پیت نهایی



شکل ۷: نمایی از مقطع مدل احتمالاتی پیت نهایی

همان‌طور که از این مدل مشخص است، محدوده نهایی پیت در این معدن با عدم قطعیت بالایی همراه است و وابستگی زیادی به قیمت مس دارد به‌طوری‌که با افزایش قیمت این محدوده در این معدن به میزان قابل‌توجهی جابجا می‌شود. فقط بخش کوچکی از بلوک‌های موجود در این مدل بلوکی دارای احتمال استخراج ۱۰۰ درصد است. این نکته می‌تواند در جایابی تأسیسات سطحی و همچنین حفاری‌های تکمیلی موردتوجه قرار گیرد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوریتم ریاضی برای یافتن محتمل‌ترین پیت در شرایط عدم قطعیت قیمت محصول نهایی ارائه شد. بدین‌صورت که در ابتدا با بررسی تاریخچه قیمت و شاخص‌های اقتصادی، تابع توزیع قیمت محصول نهایی به‌دست آورده شد. سپس با استفاده از این تابع توزیع و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، قیمت‌های محتمل شبیه‌سازی گردید.

با استفاده از این قیمت‌ها و با به‌کارگیری رابطه محاسبه ارزش اقتصادی بلوک‌ها، ارزش قابل‌انتظار بلوک‌ها به‌دست آورده شد. در محاسبه این ارزش وابستگی عیار حد به قیمت محصول نیز لحاظ گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار NPVScheduler پیتی منفرد که محتمل‌ترین پیت نام دارد، به دست آورده شد. پیت حاصل نسبت به تغییرات قیمت در آینده حساسیت کمتری داشته و می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت و همچنین جایابی تأسیسات سطحی قرار گیرد. همچنین در این مرحله با استفاده از ۱۰۰ قیمت شبیه‌سازی شده و طراحی پیت نهایی روی مدل بلوکی به ازای این ۱۰۰ قیمت، احتمال استخراج هر بلوک نیز محاسبه شد که می‌توان از آن در جایابی حفاری‌های تکمیلی استفاده نمود. محاسبات نشان داد که فقط بخش کوچکی از این معدن دارای احتمال استخراج صد درصد است.

مراجع

[1] Abdel Sabour, S.A. & Poulin R, Sabour, S. A. and Poulin R., 2006. “Valuing real capital investments using the least-squares Monte Carlo method,” .The Engineering Economist , No 51, PP:pp.141–160.

[2] Haque MA, Topal E, Lilford E., 2014. “A numerical study for a mining project using real options valuation under commodity price uncertainty” .Resources Policy, 39:pp.115–123.

[3] Maybee B, Dunn P, Dessureault S, Robinson D., 2009. “Impact of development strategies on the value of underground mining projects” .International Journal of Mining and Mineral Engineering, 1:pp.219–231.

[4] Tapia Cortez CA, Saydam S, Coulton J, Sammut C., 2018. “Alternative techniques for forecasting mineral commodity prices” .International Journal of Mining Science and Technology, 28:pp.309–322.

[5] Dimitrakopoulos RG, Abdel Sabour SA., 2007. “Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference?” .Resources Policy, 32:pp.116–125.

[6] Del Castillo F, Dimitrakopoulos R., 2014. “Joint effect of commodity price and geological uncertainty over the life of mine and ultimate pit limit” .Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, 123:pp.207–219.

[7] Akbari A, Osanloo M, Shirazi M., 2008. “Determination of Ultimate Pit Limits in Open Mines Using Real Option Approach” .IUST International Journal of Engineering …, 19:pp.23–38.

[8] Franco-Sepulveda G, Campuzano C, Pineda C., 2017. “NPV risk simulation of an open pit gold mine project under the O’Hara cost model by using GAs” .International Journal of Mining Science and Technology, 27:pp.557–565.

[9] Zare Naghadehi M, Dehghani H, Naderipour R., 2017. “The Probabilistic Analysis of Block Economic Value (BEV) in Open-Pit Mines Considering the Effect of Uncertainties in Metal Price and Operational Costs” .Journal of Aalytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 7:pp.15–26.

[10] Lerchs, H., Grossmann L., 1965. “Optimum Design of Open-Pit Mines. CIM Bulletin,” .CIMBulletin,pp.47-54.

[11] Johnson, T.B., 1968. “Optimum open pit mine production scheduling. PhD thesis, Berkeley University.” .

[12] Picard JC., 1976. “MAXIMAL CLOSURE OF A GRAPH AND APPLICATIONS TO COMBINATORIAL PROBLEMS.” .Management Science, 22:pp.1268–1272.

[13] Giannini LL., 1990. “Optimum design of open pit mines. PhD Dissertation,” .Curtin University of Technology, Perth.

[14] Huttagosol P, Cameron R., 1992. “A computer design of ultimate pit limit by using transportation algorithm” .Proceedings of 23rd APCOM symp, Tucson, Arizona,pp.443–460.

[15] Underwood R, Tolwinski B., 1998. “A mathematical programming viewpoint for solving the ultimate pit problem” .European Journal of Operational Research, 107:pp.96–107.

[16] Hochbaum DS, Chen A., 2000. “Performance analysis and best implementations of old and new algorithms for the open-pit mining problem” .Operations Research, 48:pp.894–914.

[17] Pana MT., 1965. “The simulation approach to open-pit design,” .5th APCOM, Tucson, Arizona USA, ZZI-ZZ24.

[18] Berlanga JM, Cardona R, Ibarra MA., 1989. “Recursive formulae for the floating cone algorithm” .International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 3:pp.141–150.

[19] Yamatomi J, Mogi G, Akaike A YU., 1995. “Selective Dimensional, extraction dynamic cone algorithm for three open pit designs.” .25th APCOM,pp.267–274.

[20] Wright EA., 1999. “MOVING CONE II-A simple algorithm for optimum pit limits design” .Proceedings of the 28th Symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM),(Colorado USA),pp.367–374.

[21] David, M., Dowd, P. A., and Korobov S., 1974. “pit optimization using discounted economic block values”.” .Mining Technology, 118(1):pp.1-12.

[22] Dowd, P.A., Onur AH., 1993. “Open pit optimization – Part 1: Optimal open pit design.” .IMM Transactions, vol.102:pp.A95-A104.

[23] Denby B, Schofield D., 1994. “Open-pit design and scheduling by use of genetic algorithms” .Transactions - Institution of Mining & Metallurgy, Section A, 103:pp.A21– A26.

[24] Frimpong S, Achireko PK., 1997. “The MCS/MFNN algorithm for open pit optimization” .International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 11:pp.45–52.

[25] Askari-Nasab H, Awuah-Offei K., 2009. “Open pit optimisation using discounted economic block values” .Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, 118:pp.1–12.

[26] Sayadi AR, Fathianpour N, Mousavi AA., 2011. “Open pit optimization in 3d using a new artificial neural network” .Archives of Mining Sciences, 56:pp.389–403.

[27] Mousavi Nogholi AA., 2015. “Optimisation of open pit mine block sequencing. PhD thesis, Queensland University of Technology.” .

[28] Roman RJ., 1974. “The role of time value of money in Pit, determining an open-pit mining sequence and limits,” .12th APCOM, Color. Sch. Mines Golden, Color. C72-C85.

[29] Koenigsberg E., 1982. “Optimum Contours of an Open Pit Mine: an Application of Dynamic Programming.” .Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry,pp.274–287.

[30] Caccetta L, Giannini LM., 1988. “An application of discrete mathematics in the design of an open pit mine” .Discrete Applied Mathematics, 21:pp.1–19.

[31] Erarslan, K. and Celebi N., 2001. “A simulative model for optimum open pit design.” .CIM Bull, 49:pp.56-68.

[32] Elkington, T., & Durham R., 2011. “Integrated open pit pushback selection and production capacity optimization.” .Journal of Mining Science, 47(2),:pp.177-190.

[33] Whittle J., 1988. “Beyond optimization in open pit design,” .1st CAMI,

[34] K. D., 2000. “Open pit optimization—strategies for improving economics of mining projects through mine planning” .Application Computers for Mining Industry,pp.117–121.

[35] Brennan, M.J., Schwartz ES., “Evaluating natural resource investments.” .J Bus, 58 (2),:pp.135–157.

[36] Moel, A. and Tufano P., 2002. “When are real options exercised? An empirical study of mine closing,” .Rev Financ Stud, 15, (1),:pp.35–64.

[37] McCarthy, J. and Monkhouse P., 2003. “To open or not to open - or what to do with a closed copper mine,” .J Appl Corporate Finance, 15,:pp.56–66.

[38] Samis, M., Davis, G., Laughton, D. and Poulin R., 2006. “Valuing Real, uncertain asset cash flows when there are no options: a options approach,” .Resour Policy, 30, (4),:pp.285–298.

[39] Sabour, S. A. and Wood G., 2009. “Modelling financial risk in open pit Decision-making, mine projects: implications for strategic” .J South Afr Inst Min Metall, 109,:pp.169–175.

[40] Sabour SA, Poulins R., 2010. “Mine expansion decisions under uncertainty” .International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 24:pp.340–349.

[41] Dehghani, H.,& Ataee-pour M., 2012. “‘Determination of the effect of operating cost uncertainty on mining project evaluation. Resources Policy’” .Resources Policy, 37(1),:pp.109-117.

[42] Amini, M., Alijani, F., and Mozaffari z., 2015. “Economic evaluation of mining projects under conditions of uncertainty for prices and operating costs” .International Journal of Innovation and Applied Studies, Vol.10:pp.881–890.

[43] Evatt, G.W.; Soltan, M.O.; Johnson PV., 2012. “Mineral reserves under price uncertainty.” .Resour Policy, 37:pp.340–345.

[44] Akbari, A.D., Osanloo, M., Shirazi MA., 2016. “Minable reserve estimation while determining ultimate pit limits (UPL) under price uncertainty by real option approach (ROA)” .Archives of Mining Sciences, 54(2):pp.321–339.

[45] Sabour, S. A., Dimitrakopoulos R and KM., 2008. “Mine design selection under uncertainty,” .Trans IMM A: Min Technol, 117:pp.53–64.

[46] Akbari, A. D., Osanloo, M., and Shirazi MA., 2008. “Ultimate pit limit (UPL) Uncertainty., determination through minimizing risk costs associated with price” .Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 24:pp.157–170.

[47] Meagher C, Sabour S a A, Dimitrakopoulos R., 2009. “Pushback Design of Open Pit Mines Under Geological and Market Uncertainties” .Orebody Modelling and Strategic Mine Planning, 17:pp.16–18.

[48] Abdel Sabour, A., Dimitrakopoulos R., 2011. “Incorporating geological and Mine, market uncertainties and operational flexibility into open-pit mine design” .Journal of Mining Science, 47(2):pp.:191–201.

[49] Asad MWA, Dimitrakopoulos R., 2013. “Implementing a parametric maximum flow algorithm for optimal open pit mine design under uncertain supply and demand” .Journal of the Operational Research Society, 64:pp.185–197.

[50] Deutsch M, González E, Williams M., 2015. “Using simulation to quantify uncertainty in ultimate pit limits and inform infrastructure placement” .2015 SME Annu. Conf. Expo C. 117th Natl. West. Min. Conf. - Min. Navig. Glob. Waters

[51] Chatterjee S, Sethi MR, Asad MWA., 2016. “Production phase and ultimate pit limit design under commodity price uncertainty” .European Journal of Operational Research, 248:pp.658–667.

[52] Baek J, Choi Y, Park H., 2016. “Uncertainty Representation Method for Open Pit Optimization Results Due to Variation in Mineral Prices” .Minerals, 6:pp.1–17.

[53] Charnes A, Cooper WW., 1963. “Deterministic Equivalents for Optimizing and Satisficing under Chance Constraints” .Operations Research, 11:pp.18–39.

[۱] Political, Economical, Social, and Technological

[۲] push-relabel algorithm

[۳] Real Value

[٤] Nominal Value