تحلیل احتمالاتی ارزش اقتصادی بلوک استخراجی در معادن روباز با در نظر گرفتن تأثیر عدم قطعیت قیمت ماده معدنی و هزینه‌های عملیاتی

مسعود زارع نقدهی[۱]، حسام دهقانی*[۲]، رؤیا نادری‌پور[۳]

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان

۲- - استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان

(دریافت: تیر ۱۳۹۴، پذیرش: تیر ۱۳۹۶)

چکیده

داده‌های ورودی در فرآیند بهینه‌سازی محدوده نهایی پیت روباز، مجموعه‌ای از بلوک‌ها است که هر یک از آن‌ها دارای یک ارزش اقتصادی خالص بوده و طراح با انتخاب بلوک‌های مناسب از میان بلوک‌های ذکرشده اقدام به بهینه‌سازی طراحی و بیشینه‌سازی ارزش خالص معدنکاری می‌نماید. ارزش خالص اقتصادی تخصیص داده‌شده به هر بلوک با استفاده از اطلاعاتی چون قیمت ماده معدنی، هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های ذوب و پالایش و هزینه‌های فرآوری و غیره محاسبه می‌گردد. روند تغییرات قیمت فلزات و همچنین هزینه‌های معدنکاری در سال‌های مختلف نشان می‌دهد که قطعی فرض کردن این پارامترها موجب بروز خطا در روند محاسبه ارزش اقتصادی بلوک‌های معدنی می‌شود. در روش‌های معمول برای محاسبه ارزش اقتصادی بلوک، همواره تأکید بر ثابت فرض کردن پارامترهایی چون عیار، هزینه‌های عملیاتی، قیمت ماده معدنی و ... بوده است. این در حالی است که عدم قطعیت پارامترهایی چون قیمت کاملاً بدیهی بوده و ثابت فرض کردن آن‌ها منجر به بروز خطا در فرآیند محاسبه ارزش اقتصادی بلوک می‌شود. در تحقیق حاضر سعی شده است که ابتدا به بررسی نقش عدم قطعیت اقتصادی پرداخته‌شده و سپس با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو ارزش اقتصادی بلوک با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های قیمت ماده معدنی و هزینه‌های عملیاتی محاسبه شود. برای نیل به این هدف از داده‌های اقتصادی معدن مس گرسبرگ اندونزی استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو توانایی بالایی در تخمین عدم قطعیت‌های اقتصادی پروژه‌های معدنی داشته و ارزش اقتصادی بلوک محاسبه شده از این روش با خطای کمتری نسبت به سایر روش‌ها به مقدار واقعی نزدیک‌تر است. همچنین ملاحظه شد که ارزش فعلی خالص به دست آمده از روش مونت‌کارلو از روش‌های معمول بیشتر بوده و به واقعیت نزدیک‌تر است.

کلید واژه‌ها

عدم قطعیت اقتصادی، ارزش اقتصادی بلوک، ارزش فعلی خالص، شبیه‌سازی مونت‌کارلو

* عهده دار مکاتبات: *dehghani@hut.ac.ir*

۱- مقدمه

هدف از برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز، تعریف یک محدوده مناسب برای پیت، تعیین عمر بهینه معدن و تعیین حداکثر ارزش اقتصادی بلوک‌های پیت با توجه به برخی محدودیت‌های فنی و عملیاتی است. ورودی‌های اصلی در این فرآیند مجموعه‌ای از بلوک‌های با ارزش خالص اقتصادی به نمایندگی از سایر بلوک‌ها است. در نهایت برای تخمین ارزش اقتصادی بلوک، انتخاب بلوک‌های بهینه بر اساس ارزش کلی پیت که دارای حداکثر ارزش تحت محدودیت‌های فنی داده شده است، انجام می‌گیرد [۱-۳].

معمولاً بر اساس بازیابی فرآیند تولید، قیمت فلز و هزینه‌های اجرایی و عملیاتی صورت گرفته، ارزش اقتصادی معینی به هر بلوک تخصیص داده می‌شود. بسیاری از محققان به مطالعه چگونگی محاسبه ارزش اقتصادی بلوک[1] (*BEV*) پرداخته‌اند [۱-۴]. رابطه (۱) یکی از مشهورترین روابط مورد استفاده جهت تعیین *BEV* است که توسط ویتل[2] ارائه شده است [۱، ۲]. رابطه یاد شده برای حالتی که عیار بلوک بیشتر از عیار حد باشد به کار برده می‌شود و در صورتی که عیار بلوک کمتر از عیار حد باشد، بلوک باطله بوده و *BEV* از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$BEV = T_o GRP - T_o C_s - T_o C_p - TC_m \qquad (۱)$$

$$BEV = -TC_m \qquad (۲)$$

که در آن *BEV* ارزش اقتصادی بلوک برحسب دلار، R بازیابی کلی، G عیار ماده معدنی در بلوک که واحد آن تن بر واحد است، P قیمت ماده معدنی برحسب دلار، C_P هزینه فرآوری برحسب تن بر دلار، T وزن کل سنگ در بلوک (ماده معدنی و باطله) برحسب تن، C_m هزینه‌های معدنکاری برحسب تن بر دلار، T_O تناژ ماده معدنی موجود در بلوک برحسب تن و C_S هزینه ذوب و پالایش است.

برای برآورد ارزش بلوک با استفاده از روابط ارائه شده موجود، لحاظ نمودن فرضیه‌های زیر الزامی است [۱-۳]:

فرض اول: عیار کانی یا فلز محتوی هر بلوک با قطعیت مشخص شده باشد.

فرض دوم: متغیرهای اقتصادی نظیر قیمت فلز، هزینه استخراج و هزینه فرآوری با قطعیت مشخص شده باشند.

فرض سوم: ارزش اقتصادی همه بلوک‌ها در زمان طراحی محاسبه شده و احتمال هیچ تجدید نظری در آینده وجود ندارد.

با توجه به ماهیت تغییرپذیر پارامترهای مطرح شده در بالا، این فرضیات باعث می‌شوند که نتایج حاصل به واقعیت نزدیک نباشند. با توجه به اینکه هدف از انجام این تحقیق تعیین ارزش اقتصادی بلوک با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های اقتصادی است، بنابراین نقش عدم قطعیت عیار که اثر قابل توجهی بر برنامه‌ریزی تولید معدن و *BEV* دارد، در نظر گرفته نشده است [۴،۵]. روند تغییرات قیمت فلزات و همچنین هزینه‌های معدنکاری در سال‌های مختلف نشان می‌دهد که قطعی فرض کردن این پارامترها نادرست بوده و درنتیجه فرضیه دوم موجب بروز خطا در روند محاسبه *BEV* می‌شود.

بسیاری از محققان در مورد عدم قطعیت اقتصادی مطالعاتی انجام داده‌اند، اما هرگز تأثیر هم‌زمان عدم قطعیت قیمت فلز، عیار، بازیابی و هزینه‌ها مورد مطالعه قرار نگرفته است [۵-۱۶]. برخی از محققان نیز بر روی هر دو عامل زمین‌شناسی و عدم قطعیت بازار تمرکز کرده‌اند [۱۷-۲۸]، اما هزینه‌های عملیاتی به عنوان یک پارامتر قطعی در نظر گرفته شده است. دهقانی و عطایی‌پور در سال ۲۰۱۲ با استفاده از روش درخت دوجمله‌ای ارزش اقتصادی بلوک را با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت فلز و هزینه عملیاتی بلوک محاسبه نمودند [۲۹]. در تحقیق مذکور، عدم قطعیت پارامترهایی همچون هزینه فرآوری، هزینه ذوب و پالایش و بازیابی که تأثیر قابل توجهی در تعیین اقتصادی بودن ارزش اقتصادی بلوک معدنی دارند در نظر گرفته نشده است. بنابراین به منظور تعیین ارزش اقتصادی واقعی بلوک، لازم است عدم قطعیت کلیه پارامترهای اقتصادی در نظر گرفته شود.

ارزش اقتصادی بلوک دارای یک ماهیت استاتیکی است. این در حالی است که ارزش اقتصادی بلوک ماهیت پویا دارد، زیرا قیمت فلز و هزینه‌های عملیاتی در طول زمان متغیر هستند. بنابراین ارزش هر بلوک باید با توجه به زمان استخراج از معدن و با استفاده از یک روش پویا تعیین شود.

در مقاله حاضر، در ابتدا با استفاده از روش کلاسیک، *BEV* و *NPV* پروژه بر اساس قطعی بودن کلیه پارامترهای قیمت فلز، هزینه استخراج، هزینه فرآوری، هزینه ذوب و

پالایش و بازیابی تعیین شده و سپس با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و با فرض غیرقطعی بودن کلیه پارامترهای یاد شده، مقادیر BEV و NPV پروژه محاسبه می‌گردد. همچنین دو بلوک از بلوک‌های استخراجی به عنوان نمونه در این تحقیق انتخاب شده و محاسبات BEV بر اساس این دو بلوک تحلیل گردیده است.

۲- ضرورت به‌کارگیری شبیه‌سازی مونت‌کارلو

شبیه‌سازی مونت‌کارلو یکی از کاراترین روش‌های مورد استفاده برای تحلیل مسائل پیچیده است. این شبیه‌سازی نه‌تنها در پروسه‌های تصادفی بلکه در مسائل قطعی نیز کاربرد دارد. در شبیه‌سازی مونت‌کارلو اولین قدم تعیین پارامترها و مقادیر غیرقطعی است. سپس برای هر پارامتر یک توزیع احتمالی متناسب با آن انتخاب می‌شود و در گام بعدی، برای هر توزیع یک مقدار تصادفی به‌دست می‌آید که با تکرار این فرآیند محتمل‌ترین پاسخ به‌صورت توزیعی با یک مقدار حداقل و حداکثر به دست می‌آید. به کمک این مقادیر می‌توان منحنی احتمال تجمعی را به‌دست آورد [۳۰]. به منظور انجام فرآیند شبیه‌سازی با استفاده از روش مونت‌کارلو در این تحقیق از نرم‌افزار *@Risk* نسخه ۶/۱ استفاده شده است. برای این منظور، مهندسان و طراحان از پارامترهای موجود برای محاسبه ارزش اقتصادی بلوک در آینده استفاده می‌کنند [۳۱]. پیدا کردن حد نهایی پیت اصلی‌ترین دلیل این بررسی است. پس از تعیین ارزش هر بلوک، به منظور به حداکثر رساندن ارزش فعلی خالص پروژه، با توجه به محدودیت‌های فنی مراحل کار استخراج از معدن تعیین می‌شود. رومن[1] در سال ۱۹۷۴ روشی را ارائه کرد که می‌توان با استفاده از آن ترتیب استخراج بلوک‌ها را با هدف بیشینه کردن NPV به دست آورد [۳۲]. پس از تعیین ترتیب استخراج بلوک‌ها، ارزش فعلی خالص با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید. با توجه به ارزش فعلی خالص پروژه، مدیران می‌توانند درباره اجرا کردن یا تعلیق پروژه تصمیم‌گیری نمایند.

$$NPV = -IC + \sum_{n=1}^{N} \frac{BEV_n}{(1+i)^n} \qquad (۳)$$

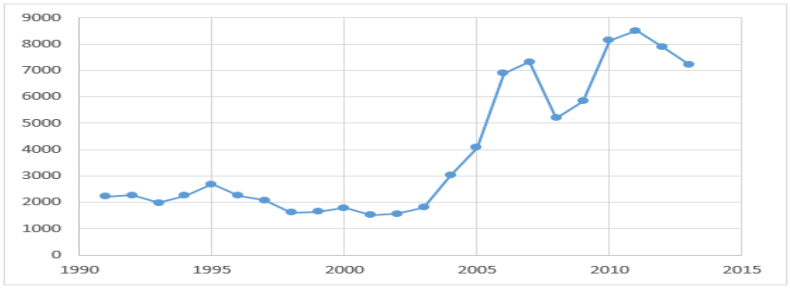
که در آن NPV ارزش فعلی خالص، BEV ارزش اقتصادی بلوک، n دوره زمانی، i نرخ تنزیل و IC هزینه سرمایه‌گذاری اولیه است.

ارزش فعلی خالص بلوک‌ها بر اساس اطلاعات موجود محاسبه می‌شود، در حالی‌که این بلوک‌ها در سال‌های آینده استخراج خواهند شد. در روش مرسوم، قطعی فرض کردن مقادیر قیمت فلز، هزینه عملیاتی، هزینه فرآوری و هزینه ذوب و پالایش، به دلیل اینکه این مقادیر نسبت به گذشته تغییر کرده‌اند، موجب به وجود آمدن خطاهای چشمگیری خواهد شد. درنتیجه، محاسبه BEV بر اساس این پارامترهای ثابت صحیح به نظر نمی‌رسد. برای مثال شکل ۱ (الف - د) تغییرات هر یک از پارامترهای قیمت فلز، هزینه عملیاتی، هزینه ذوب و پالایش و هزینه فرآوری را برای ۲۳ سال گذشته در معدن مس گرسبرگ[2] اندونزی نشان می‌دهد.

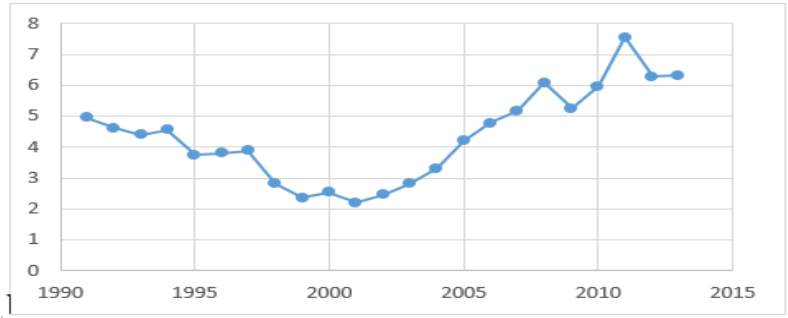
در این روش، در صورتی که پیت در سال ۲۰۰۹ طراحی شده باشد، ارزش اقتصادی بلوک و ارزش فعلی خالص آن بر اساس قیمت ۵۸۴۲/۲۵ دلار در هر تن محاسبه شده است. این در حالی است که این قیمت در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ به ترتیب ۸۱۳۵/۰۵۷ و ۸۵۰۹/۸۴۳ دلار در هر تن تغییر کرده است. همچنین با توجه به عیار حد در نظر گرفته شده مقدار کمتری از ماده معدنی قابل برداشت است و این بدین معنی است که بخش زیادی از ماده معدنی به صورت باطله در نظر گرفته می‌شود، در حالی که بر اساس واقعیت، محدوده قابل برداشت بسیار بزرگ‌تر از محدوده به دست آمده است. بنابراین شواهد نشان دهنده این حقیقت هستند که نتایج حاصل از این روش بسیار محافظه‌کارانه و دور از واقعیت و بر اساس قیمت و عیار ثابت به دست آمده است. به منظور رفع نواقص یاد شده باید روشی اعمال شود که بتواند عدم قطعیت کلیه پارامترهای مورد استفاده در محاسبه BEV را در سال‌های آینده در نظر بگیرد. برای این منظور، شش سناریو تعریف می‌شود: در سناریوی اول تا پنجم مقدار BEV به روش کلاسیک محاسبه می‌شود و در سناریوی ششم این مقدار با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مذکور محاسبه شده و سپس اثر آن بر ارزش اقتصادی بلوک و ارزش فعلی خالص بیان می‌شود. در روش پیشنهادی تغییرات پارامترها با استفاده از تجزیه و تحلیل مقدماتی و داده‌های تاریخی تعیین و محاسبه می‌شود.

۳- مطالعه موردی

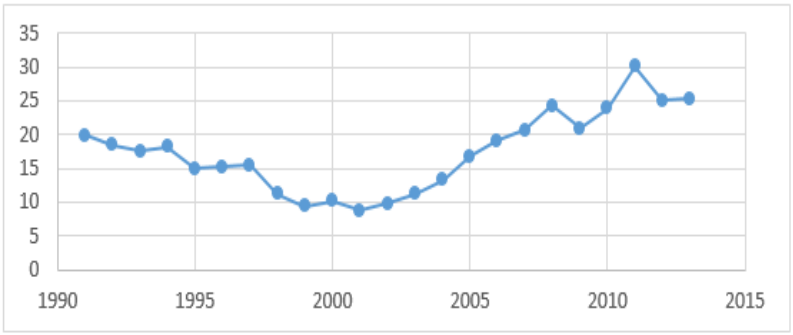
در این بخش BEV و NPV پروژه معدن مس گرسبرگ با اسـتفاده از رابطه ویتل و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در ۶ سناریوی مختلف محاسبه می‌شود.



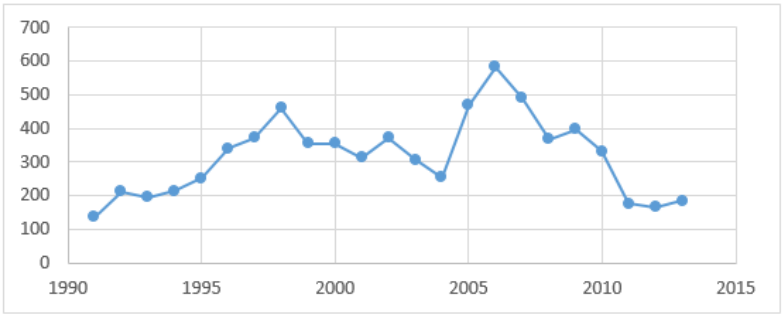
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شـکل ۱: نمودارهای پارامترهای اقتصادی قیمت فلز (الف)، هزینه عملیاتی (ب)، هزینه فرآوری (ج)، و هزینه ذوب و پالایش (د) در معدن گرسبرگ (۱۹۹۱-۲۰۱۳)

گرسبرگ یکی از بزرگ‌ترین ذخایر طلا و مس در جهان است که در کشور اندونزی قرار دارد. معدن گرسبرگ دارای کانسـار مس- طلای پورفیری اسـت که سـنگ میزبان آن شامل کالکوپیریت، مگنتیت و اسکارن است. ذخیره محاسبه شـده این کانسـار ۲/۴ میلیارد تن و شامل کانی‌های مس با

عیار ٪۱/۱۳، طلا ۱/۰۶ گرم بر تن و نقره ۳/۸۵ گرم بر تن است. این کانسار با استفاده از روش روباز استخراج می‌شود.

در مدل فرضی ۱۶ بلوک موجود است. به هر بلوک یک عیار متوسط تخصیص داده شده است. عیارحد کل مدل بلوکی ۰/۵ است. به منظور تطابق با واقعیت مدل بلوکی فرضی، عیارها به صورت مقداری بالاتر و پایین‌تر و همچنین نزدیک به عیار حد در نمونه واقعی در نظر گرفته شده است. داده‌های مربوط به قیمت، بازیابی و هزینه‌های عملیاتی این معدن به دست آمده و مدل بلوکی عیار مس آن به صورت فرضی در شکل (۲) نمایش داده شده است.

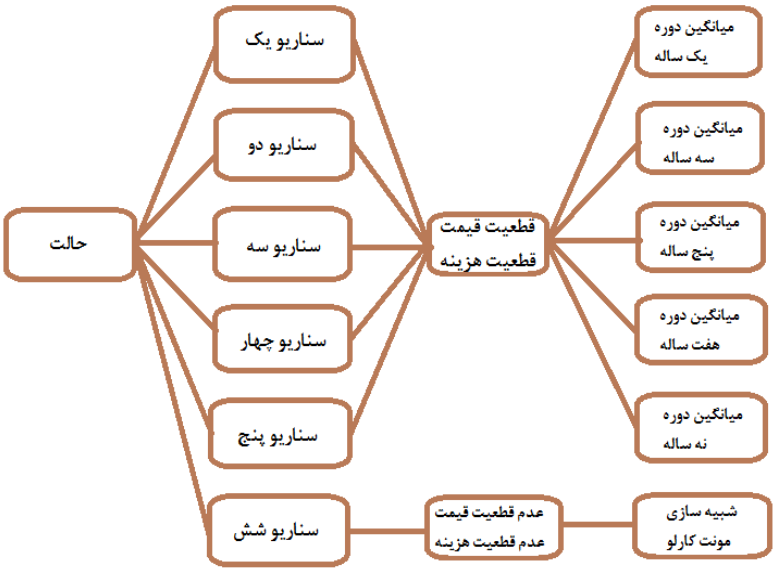
۰/۱	۰/۵	۰/۸	۰/۶	۰/۷	۰/۱	۰/۱
	۰/۵	۰/۷	۰/۶	۰/۸	۰/۶	
		۰/۶	۰/۸	۰/۷		
			۱			

شکل ۲: مدل عیاری مفروض

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، مقطع مورد نظر حاوی ۱۶ بلوک استخراجی است. فرض بر این است که هر بلوک در یک دوره زمانی (مثلاً یک سال) استخراج گردد. بنابراین مدت زمان لازم برای استخراج این مقطع برابر با ۱۶ سال خواهد بود. میزان نرخ تنزیل (بهره) به میزان ۷ درصد، عیار حد ۰/۵ درصد و تناژ بلوک ۱۵۰۰ تن فرض شده است.

۳-۱- محاسبه مقدار *BEV* و *NPV* به روش کلاسیک

به منظور محاسبه مقادیر *BEV* و *NPV* به طور کلی شش سناریو تعریف شده است که در سناریوهای اول تا پنجم مقدار این پارامترهای خروجی به روش کلاسیک محاسبه شده و در سناریوی ششم این مقادیر با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای قیمت فلز و هزینه‌های عملیاتی محاسبه شده و سپس اثر آن بر ارزش اقتصادی بلوک و ارزش فعلی خالص بیان می‌گردد. در شکل (۳) نمایی شماتیک از فرضیات پیشنهادی برای محاسبات مذکور نمایش داده شده است. در این بخش محاسبات مربوط به پنج سناریوی اول ارائه می‌شود.



شکل ۳: نمایش شماتیک فرضیات سناریوهای پیشنهادی برای محاسبات

۳-۱-۱- محاسبه ارزش اقتصادی بلوک (BEV)

در این بخش با استفاده از رابطه (۱) ارزش اقتصادی هر بلوک برای هریک از سناریوهای فرضی ۱ تا ۵ به روش کلاسیک محاسبه شد. در این روش پارامترهای اقتصادی به‌صورت ثابت و برابر میانگین دوره‌های تعریف شده برای هر یک از سناریوها محاسبه می‌شود. جدول (۱) پارامترهای لازم جهت محاسبه *BEV* را برای هر سناریو نشان می‌دهد.

شکل (۴) مدل‌های بلوکی اقتصادی مربوط به مدل بلوکی عیاری شکل (۲) را برای سناریوهای مختلف نمایش می‌دهد.

فرض بر این است که کل حجم بلوک‌ها ماده معدنی و یا باطله هستند. به عنوان مثال بلوکی که عیار آن ۰/۱ است را با عدد ۱۳ و بلوکی که مقدار عیار آن ۰/۷ است را با عدد ۳ شماره‌گذاری نموده و مقدار *BEV* برای این بلوک‌ها محاسبه شده است. آن‌چنان‌که در سناریو (۱) دیده می‌شود،

عیـار مس در بلوک ۱۳ برابر ۰/۱ اســـت. این بلوک، بلوک بـاطلـه اســـت، چرا کـه عیـار آن کمتر از عیار حد اســـت (۰/۱<۰/۵). بنابراین BEV بر اساس رابطه (۲) برابر خواهد بود با:

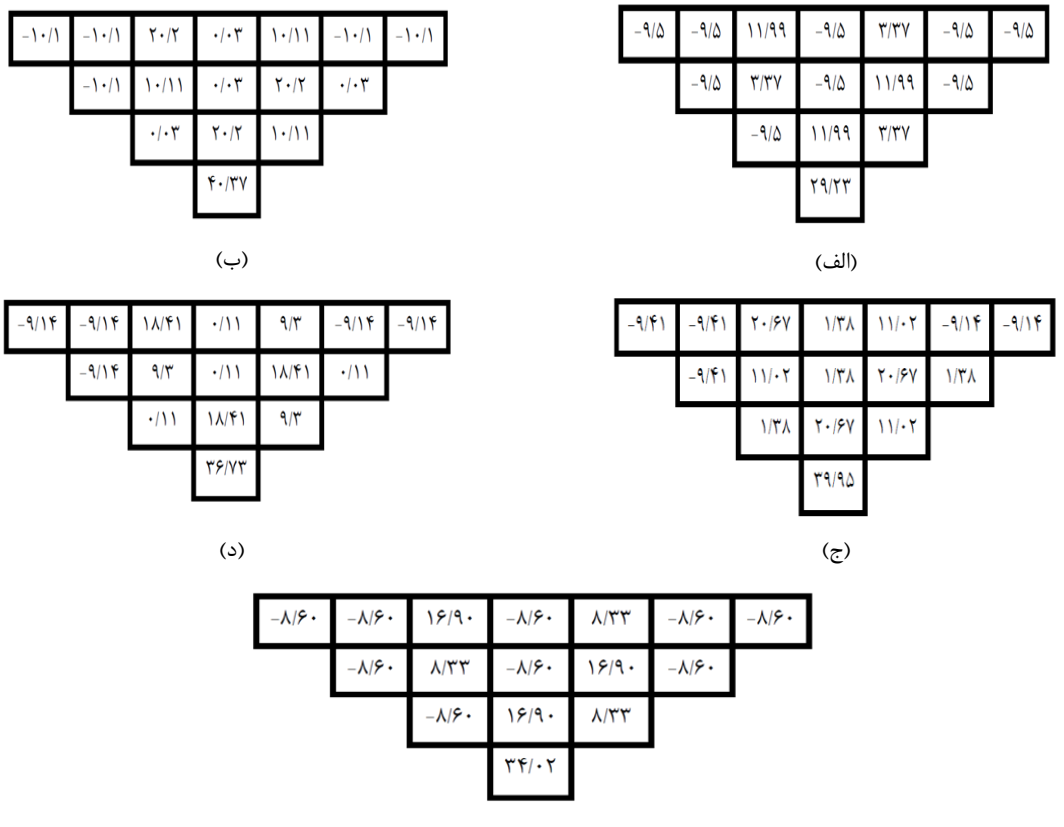
$$BEV_{13} = -3.9397M\$$$

عیار مس بلوک ۳ برابر ۰/۷ است. این بلوک ماده معدنی است، زیرا عیار آن بالاتر از عیار حد است (۰/۵<۰/۷). BEV بر اساس رابطه (۱) برابر خواهد بود با:

$$BEV_3 = 2.75M\$$$

جدول ۱: پارامترهای ورودی فرضی اقتصادی برای سناریوهای مختلف

عنوان	بازیابی کلی (درصد)	قیمت فلز (دلار بر تن)	هزینه کلی (دلار بر تن)	هزینه عملیاتی (دلار بر تن)	هزینه فرآوری (دلار بر تن)	هزینه ذوب و پالایش (دلار بر تن)
سناریو (۱): میانگین دوره یک‌ساله	۸۷/۵۵۶	۷۲۳۱/۱۶۲	۳۱/۴۶۷	۶/۳۳۱	۲۵/۳۱۷	۱۸۴/۲۶۲
سناریو (۲): میانگین دوره سه‌ساله	۸۷/۴۹۹	۷۸۷۷/۸۵۰	۳۳/۵۹۹	۶/۷۲۰	۲۶/۸۷۹	۱۷۵/۸۸۴
سناریو (۳): میانگین دوره پنج‌ساله	۸۸/۵۴۱۶	۷۵۲۲/۱۷۲	۳۱/۳۸۰	۶/۲۷۶	۲۵/۱۰۲	۲۵۱/۲۷۶
سناریو (۴): میانگین دوره هفت‌ساله	۸۹/۰۴۵	۷۱۶۱/۸۷۷	۳۰/۴۶۰	۶/۰۹۲	۲۴/۳۶۴	۳۰۲/۲۲۰
سناریو (۵): میانگین دوره نه‌ساله	۸۸/۷۳۷	۶۷۹۰/۲۳۸	۲۸/۶۸۰	۵/۷۳۵	۲۲/۹۴۲	۳۵۱/۹۵۶



شکل ۴: مدل اقتصادی بلوک‌های مفروض سناریوهای ۱ تا ۵: (الف) میانگین دوره یک‌ساله، (ب) میانگین دوره سه‌ساله، (ج) میانگین دوره پنج‌ساله، (د) میانگین دوره هفت‌ساله، (ه): میانگین دوره نه‌ساله

۳-۱-۲- محاسبه ارزش فعلی خالص (*NPV*)

بر اساس روش ارائه شده توسط رومن [۳۲] مراحل استخراج بهینه به دست می‌آید که شکل (۵) مراحل معدنکاری بلوک‌های مفروض برای سناریو ۱ تا ۵ را نشان می‌دهد.

۱۳	۷	۱	۲	۳	۴	۱۰
	۱۴	۸	۶	۵	۱۱	
		۱۵	۹	۱۲		
			۱۶			

شکل ۵: مراحل معدنکاری بلوک‌های مفروض

ارزش فعلی خالص پروژه با توجه به ارزش اقتصادی بلوک، مراحل استخراج و با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌شود و نتایج به دست آمده برای سناریوهای مختلف در جدول (۲) دیده می‌شود. برای مثال *NPV* سناریو (۱) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$NPV = -IC + \sum_{n=1}^{N} \frac{BEV_n}{(1+i)^n} = -\frac{5}{8077M\$}$$

جدول ۲: مقادیر NPV محاسبه شده برای سناریوهای مختلف

عنوان	NPV محاسبه شده برحسب میلیون دلار
سناریو (۱): میانگین دوره یک‌ساله	-۵/۸۰۷۷
سناریو (۲): میانگین دوره سه‌ساله	۴۷/۷۰۹
سناریو (۳): میانگین دوره پنج‌ساله	۵۷/۰۲۷
سناریو (۴): میانگین دوره هفت‌ساله	۴۵/۴۷۹
سناریو (۵): میانگین دوره نه‌ساله	۲۰/۲۳۱

۳-۱-۳- مقایسه سناریوهای محاسباتی مختلف توسط روش کلاسیک

ارزش فعلی خالص بلوک‌ها بر اساس اطلاعات موجود محاسبه می‌شود، درحالی‌که این بلوک‌ها در سال‌های آینده استخراج خواهند شد. در روش مرسوم، قطعی فرض کردن مقادیر قیمت فلز، هزینه عملیاتی، هزینه فرآوری، هزینه ذوب و پالایش، بازیابی و در نتیجه محاسبه *BEV* بر اساس این پارامترهای ثابت، محاسبات را با خطاهای فراوانی روبرو خواهد کرد، زیرا این مقادیر نسبت به گذشته تغییر کرده‌اند. برای مثال بر اساس آن‌چه در سناریوهای مختلف دیده شد، با در نظرگرفتن میانگین دوره‌های متفاوت، مقادیر محاسبه شده برای *BEV* و ارزش فعلی خالص بسیار متفاوت خواهد بود، آن‌چنان که در دوره یک‌ساله میزان ارزش فعلی خالص مقداری منفی خواهد بود (این بدان معنی که ادامه فعالیت استخراج از این سال به بعد مقرون به‌صرفه و اقتصادی نخواهد بود)، در حالی‌که بر اساس میانگین دوره‌های ۳، ۵، ۷، ۹ ساله این مقدار مثبت بوده و ادامه فعالیت معدن ممکن است. شکل ۶ (الف، ب) به ترتیب مقادیر *BEV* و *NPV* را برای سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده مقایسه می‌کند.

۳-۲- محاسبه BEV و NPV در شرایط عدم قطعیت پارامترهای اقتصادی (سناریو (۶))

در این سناریو ارزش اقتصادی بلوک و ارزش فعلی خالص پروژه در شرایط عدم قطعیت قیمت فلز، هزینه عملیاتی استخراج، هزینه ذوب و پالایش و همینطور هزینه فرآوری با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو تخمین زده شده است. برای این منظور از نسخه ۶/۱ نرم‌افزار *@Risk* استفاده گردید. برای رسیدن به هدف یادشده ابتدا توزیع مقادیر پارامترهای مذکور بر اساس داده‌های تاریخی تخمین زده شده و سپس به عنوان ورودی (*Input*) وارد نرم‌افزار *@Risk* گردیده و شبیه‌سازی انجام شده است. مقادیر به دست آمده شبیه‌سازی شده از توزیع پارامترها در رابطه (۱) و (۲) قرار گرفته و مقادیر ارزش اقتصادی بلوک (*BEV*) و ارزش فعلی خالص (*NPV*) به عنوان خروجی (*Output*) محاسبه شد.

۳-۲-۱- محاسبه ارزش اقتصادی بلوک (*BEV*)

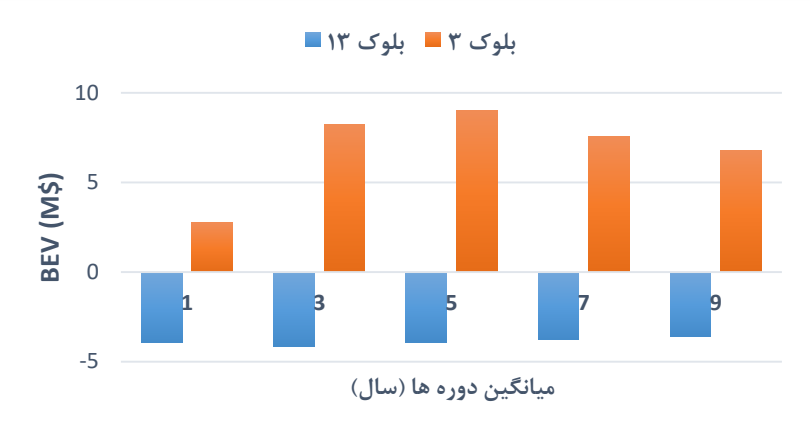
همان‌گونه که توضیح داده شد، برای محاسبه مقدار *BEV* تحت شرایط عدم قطعیت اقتصادی در ابتدا در نرم‌افزار *@Risk* مقادیر مدل‌سازی شده برای هر یک از پارامترهای غیرقطعی محاسبه و سپس با جایگذاری در معادلات (۱) و (۲) مقادیر*BEV* به دست می‌آید. در جداول (۳) و (۴) توزیع‌ها و مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای غیرقطعی توسط نرم‌افزار *@Risk* آورده شده است.

در جدول (۵) مقادیر که برای *BEV* در روش کلاسیک محاسبه شده است با میزان درصدی که این مقادیر در روش مونت‌کارلو می‌توانند رخ دهند، آورده شده است.

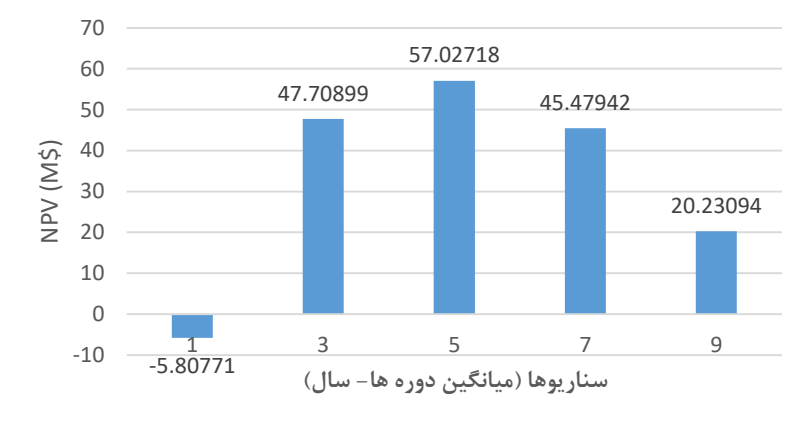
۳-۲-۲- محاسبه ارزش فعلی خالص (*NPV*)

با داشتن توابع توزیع مربوطه به هر یک از پارامترهای اقتصادی، ارزش اقتصادی بلوک توسط روابط (۱)، (۲) و

سپس ارزش فعلی خالص توسط رابطه (۳) با استفاده از روش مونت‌کارلو به میزان ۶۵/۲۴ میلیون دلار محاسبه گردید. در جدول (۶) درصدهای با اهمیت احتمال رخداد روش مونت‌کارلو نشان داده شده است. همچنین در جدول (۷) درصد احتمال رخداد برای مقادیری که با استفاده از روش کلاسیک محاسبه شده‌اند، آورده شده است.



الف: مقادیر مختلف BEV برای دو بلوک ۳ و ۱۳



ب: مقادیر مختلف NPV برای میانگین دوره‌های مختلف

شکل ۶: مقایسه مقادیر پارامترهای اقتصادی خروجی حاصل از سناریوهای زمانی مختلف

جدول ۳: پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته شده و توزیع‌های مربوط به آن‌ها

متغیر	خصوصیات توزیع	پارامتر شاخص مربوط به توزیع	نوع توزیع
بازیابی	Min=۰/۸۷۳۸۵۲ M. Likely=۰/۸۷۳۸۵۲ Max=۰/۹۲۱۸۹۵	۰/۸۹	Triangular
قیمت	a = ۷۹۴۲/۶۷۸۹ b = ۶۶۳/۰۹۶۱	۷۵۶۰	Extreme Value Min
هزینه‌های استخراج	a = ۵/۹۲۱۸۶ b = ۰/۶۲۷۸۳	۶/۲۸۴	Extreme Value
هزینه‌های فرآوری	α = ۳۱/۱۱۶۴ β = ۲/۱۰۳۲	۳۱/۱۲	Logistic
هزینه‌های ذوب و پالایش	a = ۲۰۷/۲۶۳ b = ۶۸/۳۵۹	۲۴۶/۷	Extreme Value

جدول ۴: نتایج *BEV* پروژه گرسبرگ به دست آمده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو. در قالب درصدهای با اهمیت احتمال رخداد

درصدهای با اهمیت	مقدار BEV برای بلوک ۱۳	مقدار BEV برای بلوک ۳
٪۵	-۱۱/۶۸۸۶	-۹/۷۷۴
٪۵۰	-۹/۲۲۹۹	۱۳/۷۲۴۱
٪۹۵	-۷/۸۵۵۵	۲۶/۵۹۲
٪۹۹	-۷/۴۹۵۶	۳۳/۰۴۶

جدول ۵: نتایج *BEV* پروژه گرسبرگ بدست آمده از روش کلاسیک در قالب درصدهای احتمال رخداد در روش مونت‌کارلو

درصد احتمال رخداد	مقدار BEV برای بلوک ۱۳	درصد احتمال رخداد	مقدار BEV برای بلوک ۳
٪۴۴	-۹/۴۹۴	٪۱۸	۳/۳۶۶۴
٪۲۵	-۱۰/۰۷۹۷	٪۴۰	۱۰/۱۱۱۰۸
٪۴۴	-۹/۴۱۳۲۵	٪۴۵	۱۱/۰۲۳۱۷
٪۵۶	-۹/۱۳۶۶	٪۳۵	۹/۲۶۱۹۷۳
٪۷۴	-۸/۶۰۳۰۷	٪۳۰	۸/۳۲۷۸۰۸

جدول ۶: نتایج *NPV* پروژه گرسبرگ به دست آمده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو در قالب درصدهای احتمال رخداد با اهمیت

درصدهای با اهمیت	مقدار NPV (میلیون دلار)
٪۵	-۵۴/۵۸
٪۵۰	۶۸/۹۳
٪۹۵	۱۷۹/۷۴
٪۹۹	۲۲۷/۶۵

جدول ۷- نتایج *NPV* پروژه گرسبرگ به دست آمده از روش کلاسیک در قالب درصدهای با اهمیت احتمال رخداد در روش مونت‌کارلو

درصد احتمال رخداد	مقدار NPV (میلیون دلار)
٪۱۷/۵	-۵/۸۰۷۷
٪۳۷/۵	۴۷/۷۰۹
٪۴۲/۵	۵۷/۰۲۷۲
٪۳۷	۴۵/۴۷۹۴
٪۳۲	۲۰/۲۳۰۹

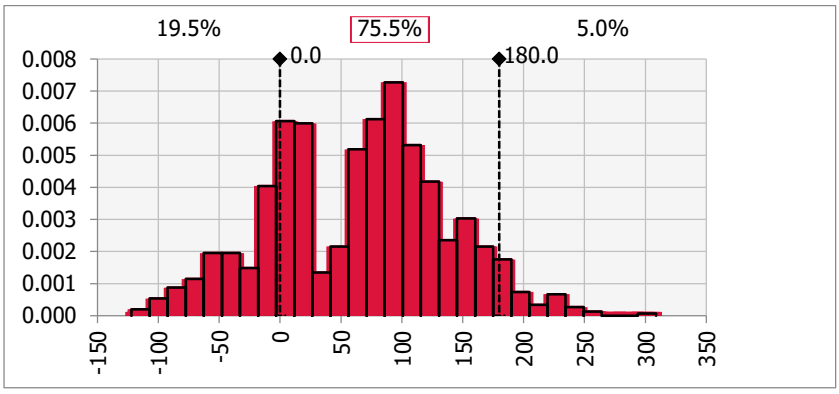
مشکل عدم قطعیت در پارامترهای مربوط به آینده، با محاسبه روند تغییرات این پارامترها با استفاده از اطلاعات گذشته و حال و به دست آوردن توابع توزیع متغیرهای مورد پیش‌بینی و انجام شبیه‌سازی تحت شرایط ریسک تا حدود زیادی مرتفع خواهد شد. همان‌گونه که در اینجا مشاهده می‌شود، با توجه به نمودار توزیع فراوانی به دست آمده *NPV* در شکل (۷)، مقدار حاصله با حدود درصد ۸۰/۵ در مقادیر مثبت قرار می‌گیرد و می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که با این درصد احتمال اینکه مقدار *NPV* در مقادیر مثبت قرار گیرد، وجود دارد که این درصد اطمینان بالایی محسوب می‌شود.

در مورد معدن گرسبرگ با توجه به خروجی شبیه‌سازی و هیستوگرام توزیع ارزش فعلی خالص (شکل ۸) ملاحظه می‌شود که با در نظر گرفتن حداقل نرخ بهره جذب کننده ۷ درصد، مقدار ارزش فعلی خالص سرمایه‌گذاری دارای مقدار توزیع شاخص ۶۴/۶۸ میلیون دلار بوده و در سطح اطمینان ۷۵/۵ درصد مقدار آن بین مقادیر ۰ و ۱۸۱/۳ قرار می‌گیرد.

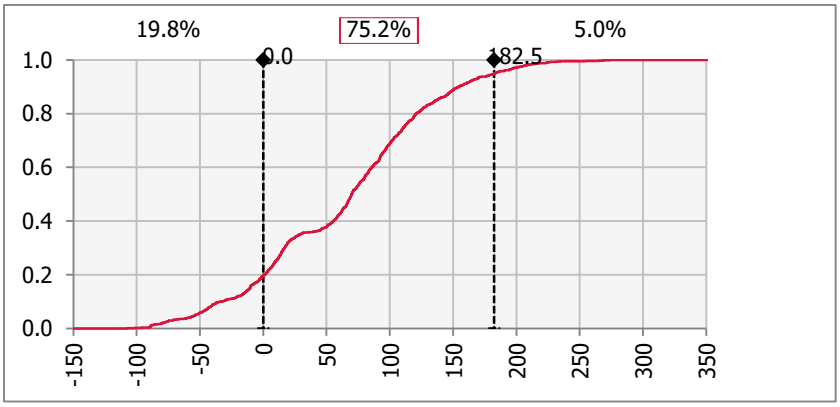
در کل با توجه به تمامی نتایج حاصل از نمودارها و جداول، غیرقطعی فرض کردن مقادیر پارامترهای اقتصادی عملی دور از واقعیت نبوده و سبب خواهد شد که محاسبات صورت گرفته و نتایج حاصله، و همچنین تصمیم‌گیری‌های مدیریتی درباره چگونگی فعالیت معدن در سال‌های آینده از درصد خطایی پایین‌تر و نزدیک‌تر به شرایط واقعی موجود برخوردار باشد.

۴- آنالیز حساسیت پارامترهای اقتصادی

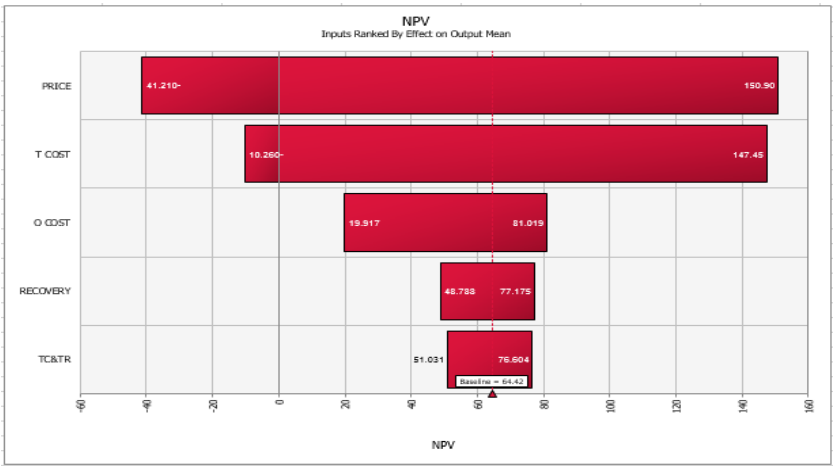
همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، حساس‌ترین پارامتر که تغییرات زیادی نسبت به *NPV* از خود نشان می‌دهد، قیمت فلز است. این بدان معناست که با تغییری جزئی در قیمت ماده معدنی، میزان تغییرات *NPV* قابل توجه خواهد بود.



شکل ۷: نمودار توزیع فراوانی *NPV* معدن مس گرسبرگ حاصل از شبیه‌سازی



شکل ۸: نمودار تجمعی *NPV* معدن مس گرسبرگ حاصل از شبیه‌سازی



شکل ۹: آنالیز حساسیت پارامترهای اقتصادی معدن گرسبرگ نسبت به *NPV*

پارامتر حساس بعدی هزینه‌های فرآوری است. هزینه‌های استخراج در میان پارامترهای حساس، رتبه سوم را داراست. پس در کل می‌توان این‌گونه بیان داشت که پارامترهای اقتصادی قیمت و هزینه‌های عملیاتی پارامترهایی هستند که از میزان تغییرات بالایی برخوردار بوده و قطعی فرض کردن آن‌ها اشتباه است.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی کارآیی روش مونت‌کارلو در تعیین ارزش اقتصادی بلوک پرداخته شد، به این صورت که در ابتدا با قطعی فرض کردن پارامترهای اقتصادی مقادیر BEV و NPV محاسبه گردیده و سپس با توجه به نتایج حاصله که همراه با خطاهای قابل توجهی بود، به بررسی هر دو مقادیر BEV و NPV با شبیه‌سازی مونت‌کارلو و به دست آوردن نتایج و درصدهای احتمال قابل قبول پرداخته شد. از آنجا که هدف در طراحی معادن روباز یافتن محدوده نهایی بهینه در نتیجه برنامه‌ریزی تولید بهینه است، بر اساس آنچه مورد بررسی قرار گرفت، اتخاذ تصمیمات مدیریتی جهت ادامه یا عدم ادامه فعالیت پروژه مشکل است. با توجه به مطالعات و مقایسه‌های صورت گرفته، قطعی فرض کردن پارامترهای اقتصادی جهت محاسبه ارزش اقتصادی بلوک فرضیه درستی نبوده و باعث ایجاد خطا در انجام محاسبات می‌گردد. دلیل این امر تأثیر بالقوه تورم و رکود اقتصادی در نتایج حاصل از محاسبات است. همان‌گونه که مشاهده گردید، حدود ٪۱۹/۵ از مقادیر محاسبه شده در بازه منفی قرار داشته و حدود ٪۸۰/۵ آن در مقادیر مثبت واقع است. با توجه به این واقعیت می‌توان بیان کرد که با سطح اطمینان ٪۸۰ استخراج معدن طی ۱۶ سال آینده امکان‌پذیر است. در نهایت، با عنایت به NPV های محاسبه شده برای دوره‌های زمانی مختلف و همچنین درصدهای احتمال رخداد با اهمیت محاسبه شده، در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی سبب می‌شود که نتایج حاصل از پیش‌بینی شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر باشد.

مراجع

[1] Whittle, J. (1988). Beyond optimization in open pit design, in Proceedings Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industries, pp 331-337.

[2] Whittle, J. (1999). A decade of open pit mine planning and optimization: The craft of turning algorithms into packages, In Proceedings of APCOM '99 Computer Applications in the Minerals Industries 28th International Symposium, pp 15-24.

[3] Ataee-pour, M. (2005). A Linear model for determination of block economic values, the 19th International Mining Congress and Fair of Turkey, pp. 289-294.

[4] Dimitrakopoulos, R., Farrelly, C.T. and Godoy, M. (2002). Moving forward from traditional optimization – Grade uncertainty and risk effects in open pit design, Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Mining Technology 111, pp. A82-A88.

[5] Brennan, M.J. and Schwartz, E.S. (1985a). Evaluating natural resource investments, Journal of Business 58(2), pp. 135-157.

[6] Brennan, M.J. and Schwartz, E.S. (1985b). A New approach to evaluating natural resource investments, Midland Corporate Finance Journal 3, pp. 37-47.

[7] Trigeorgis, L. (1993). The nature of option interactions and the valuation of investments with multiple real options, Journal of Financial and Quantitative Analysis 28, pp. 1–20.

[8] Moyen, N., Slade, M. and Uppal, R. (1996). Valuing risk and flexibility a comparison of methods, Resources Policy 22, pp. 63–74.

[9] Kelly, S. (1998). A binomial lattice approach for valuing a mining property IPO, Quarterly Review of Economic Finance 38, pp. 693–709.

[10] Moel, A. and Tufano, P. (2002). When are real options exercised? An empirical study of mine closings, Review of Financial Studies 15, pp. 35–64.

[11] Monkhouse, P.H.L. and Yeates, G. (2005). Beyond naive optimisation. Orebody Model-ling and Strategic Mine Planning 14. In: Dimitrakopoulos, R. (Ed.). The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, pp. 3–8.

[12] Abdel Sabour, S.A. and Poulin, R. (2006). Valuing real capital investments using the least-squares Monte Carlo method, The Engineering Economist 51, pp. 141–160.

[13] Camus, J.P. (2002). Management of mineral resources – creatingvalue in the mining business, Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc, Littleton, pp. 107.

[14] Akbari, A., Osanloo, M. and Shirazi, M. (2008). Determination of ultimate pit Limits in Open-pit mines using Real Option approach, IUST International Journal of Engineering Science 19, pp. 23-38.

[15] Akbari, A., Osanloo, M. and Shirazi, M. (2009). Reserve estimation of an open pit mine underprice uncertainty by real option approach, Mining Science and Technology 19, pp. 0709–0717.

[16] Jaszczuk, M. and Kania, J. (2008). Coal production costs components and coal price as crucial

factors in the designation of coal output, Archives of Mining Sciences 53, pp. 183-214.

[17] Dimitrakopoulos, R.G. and Sabry, A.S. (2007). Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference?, Resources Policy 32, pp. 116–125.

[18] Henry, E., Marcotte, D. and Samis, M. (2004). Valuing a mine as a portfolio of European call options - The effect of geological uncertainty and implications for strategic planning, In: Leuangthong, O. and Deutsch, C.V. (eds.), Geostatistics, Banff: Canada, pp. 501-510.

[19] Li, S. and Knights, P. (2009). Integration of real options into short - term mine planning and production scheduling, Mining Science and Technology 9, pp. 674–678.

[20] Movagharnejad, K., Mehdizadeh, B., Banihashemi, M. and Sheikhi Kordkheili, M. (2011). Forecasting the differences between various commercial oil prices in the Persian Gulf region by neural network, Energy 36, pp. 3979-3984.

[21]Evatt, G.W., Soltan, M.O. and Johnson, P.V. (2012). Mineral reserves underprice uncertainty, Resources Policy 37, pp. 340-345.

[22] Erdem, O., Güyagüler, T. and Demirel, N. (2012). Uncertainty assessment for the evaluation of net present value: a mining industry perspective, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 405-412.

[23] Azimi, Y., Osanloo, M. and Esfahanipour, A. (2013). An uncertainty based multi-criteria ranking system for open pit mining cut-off grade strategy selection, Resources Policy 38, pp. 212–223.

[24] Godarzi, A.A., Madadi Amiri, R., Talaei, A. and Jamasb, T. (2014). Predicting oil price movements: A dynamic Artificial Neural Network approach, Energy Policy 68, pp. 371–382.

[25] Curry, J.A., Ismay, M.J.L. and Jameson, G.J. (2014). Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding, Minerals Engineering 56, pp. 70–80.

[26] Dehghani, H., Ataee-pour, M. and Esfahanipour, A. (2014). Evaluation of the mining projects under economic uncertainties using multidimensional binomial tree, Resources Policy 39, pp. 124-133.

[27] Dehghani, H and Shirkavand, R. Evaluation of mining projects under the impact of economic uncertainty by using the time series. The 5th Conference of mining engineering. 22-24 meher. 1393.

[28] Dehghani, H., Joderi shokri, B. and Goodarzi moazzami rad, H. coal price forecast using the method of two-tree and such. The second National Congress of coal, Iran, 5-7 Shahrivar. 1393.

[29] Dehghani, H. and Ataee-pour, M. (2011). Determination of the effect of operating cost uncertainty on mining project evaluation, Resources Policy 37, pp. 109–117.

[30] Palisade Corporation. (2011). @Risk: A hands-on tutorial, Experts Corner

[31] Raii, R and Saidi, A. (1389). The basics of financial engineering and risk management. Publications of the Ministry of culture and Islamic guidance, pp 372.

[32] Roman, R. (1974). The role of time value of money in determining an open pit mining sequence and pit limits. In: Johnson, T. and Gentry, D. (edS.), 12th APCOM, Colorado School of Mines, Golden, CO, pp. 72–85.

1- Block Economic Value
2- Whittle
3- Roman
4- Grasberg