

تعیین ارزش خالص فعلی پروژه‌های معدنی با استفاده همزمان شبیه‌سازی متوالی گوسی و درخت دوجمله‌ای

ولی صفری^۱؛ غلامحسن کاخا^۲؛ مسعود منجری^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس vali.safari@modares.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری دانشگاه تربیت مدرس G.Kakha@modares.ac.ir

۳- دانشیار دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس monjezi@modares.ac.ir

(دریافت ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۵، پذیرش ۴ دی ۱۳۹۵)

چکیده

در تعیین ارزش خالص فعلی پروژه‌های معدنی با حجم سرمایه‌گذاری بالا، عدم قطعیت عیار و قیمت ماده معدنی اهمیت زیادی دارد. در تحقیقات انجام شده قبلی، عدم قطعیت عیار یا عدم قطعیت قیمت ماده معدنی در تعیین ارزش خالص فعلی به طور جداگانه لحاظ شده‌اند و دو نوع عدم قطعیت به طور همزمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق ابتدا برای لحاظ کردن عدم قطعیت عیار، با استفاده از روش شبیه‌سازی متوالی گوسی تعداد بیست تحقق عیاری ایجاد و سپس برای هر مورد، برنامه‌ریزی تولید بلندمدت انجام شد. در مرحله بعد، سناریوهای تولید شده با استفاده از روش درخت دوجمله‌ای تحت عدم قطعیت قیمت ارزشیابی شد. بر اساس نتایج، حداکثر و حداقل ارزش خالص فعلی در شرایط عدم قطعیت همزمان عیار و قیمت به ترتیب ۱۲۶/۷ و ۲۴/۸ میلیون دلار به دست آمد. این در حالی است که حداکثر ارزش خالص فعلی پروژه در شرایط بدون عدم قطعیت ۴ میلیون دلار است.

کلمات کلیدی

ارزش خالص فعلی، عدم قطعیت عیار، عدم قطعیت قیمت، شبیه‌سازی متوالی گوسی، درخت دوجمله‌ای

۱- مقدمه

قیمت و عیار دو متغیر کلیدی در برنامه‌ریزی تولید بلندمدت معادن هستند. با توجه به این که پیش‌بینی دقیق قیمت برای سال‌های آتی کار بسیار دشواری است و عیار نیز متغیری غیرقطعی است که عدم قطعیت آن با افزایش مطالعات اکتشافی کاهش می‌یابد، بنابراین در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به این دو متغیر، در برنامه‌ریزی تولید می‌تواند به افزایش قابلیت اطمینان نتایج برنامه‌ریزی کمک کند. طبق گزارش‌های بانک جهانی عدم شناخت کافی از عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی بیش‌ترین تأثیر را در عدم سوددهی معادن در دهه‌ی ۱۹۹۰ داشته است [۱]. از سال ۱۹۶۰ تاکنون الگوریتم‌های زیادی برای برنامه‌ریزی تولید ارائه شده است که در آن‌ها کلیه عوامل مؤثر قطعی در نظر گرفته شده‌اند [۲-۷]. اسمیت^۱ برای نخستین بار در سال ۲۰۰۱ مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای طراحی پسران‌ها را در شرایط عدم قطعیت عیار با دو هدف همزمان بیشینه کردن NPV و کمینه کردن انحراف از اهداف تولید ارائه داد [۸]. گودوی^۲ و دیمیتراکوپولوس^۳ (۲۰۰۳) با ادغام عدم قطعیت ماده‌ی معدنی، مدیریت باطله و در نظر گرفتن شرایط اقتصادی و استخراجی، الگوریتمی را برای دستیابی به شرایط بهینه‌ی برنامه‌ریزی تولید بلندمدت و رسیدن به تولید نرخ‌های بهینه ارائه کردند [۹]. رمضان^۴ و دیمیتراکوپولوس یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را با لحاظ کردن عدم قطعیت عیار با هدف بیشینه کردن NPV پیشنهاد دادند [۱۰]. در سال ۲۰۰۷، اصانلو و غلام‌نژاد عدم قطعیت عیار را در طراحی پسران‌ها بررسی کردند و در آن مطالعه از روش پارامترسازی عیار ذخیره بر اساس پراش استفاده کردند [۱۱]. دیمیتراکوپولوس و رمضان در سال ۲۰۰۸، برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید تحت عدم قطعیت عیاری، مدلی بر مبنای برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح ارائه کردند [۱۲]. دیمیتراکوپولوس و همکاران در سال ۲۰۰۸ برای طراحی پسران‌ها تحت عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی و بازار از یک روش رتبه‌بندی استفاده کردند [۱۳]. آرمسترانگ^۵ و گالی^۶ در سال ۲۰۱۱، برای طراحی پسران‌ها یک مدل ابتکاری بر اساس شبیه‌سازی ارائه دادند [۱۴]. لامگاری^۷ و دیمیتراکوپولوس در سال ۲۰۱۲، برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت معادن روباز در شرایط عدم قطعیت عیار از الگوریتم جستجوی ممنوعه استفاده کردند [۱۵]. در سال ۲۰۱۳ توسط

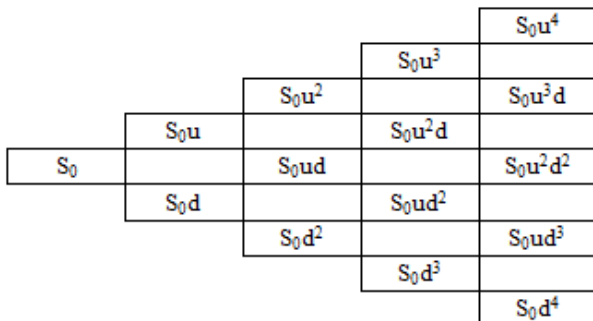
بندروف^۸ و دیمیتراکوپولوس مدل دیگری برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت در معادن سنگ‌آهن یانندی، در کشور استرالیا ارائه شد. در این تحقیق، با استفاده از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی و لحاظ کردن عدم قطعیت عیار، برنامه‌ریزی تولید بلندمدت معدن بهینه می‌شود [۱۶]. در سال ۲۰۱۴ کوشاوند و همکاران برای برنامه‌ریزی بلندمدت در حضور عدم قطعیت عیار و با در نظر گرفتن یک انباشتگاه یک مدل برنامه‌ریزی خطی ارائه دادند [۱۷]. همچنین تاکنون مطالعات زیادی به بررسی نقش عدم قطعیت قیمت ماده معدنی بر فرایند ارزیابی پروژه‌های معدنی پرداخته‌اند [۱۸-۲۱]. شفیع‌ی و همکارانش در سال ۲۰۰۹، ارزش اقتصادی پروژه استخراج روی را در یکی از معادن استرالیا تحت شرایط عدم قطعیت قیمت محاسبه کردند [۲۲]. در سال ۲۰۱۲، دهقانی و عطایی پور به بررسی تأثیر همزمان عدم قطعیت هزینه‌های عملیاتی و قیمت ماده معدنی با استفاده از درخت دوتایی پرداختند. نقطه ضعف مدل پیشنهادی ناکارآمدی درخت دوتایی در مسائلی با بیش از دو عدم قطعیت اقتصادی است [۲۳]. دهقانی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ ارزش پروژه‌های معدنی را با استفاده از مدل هرمی محاسبه کردند [۲۴]. با وجود کثرت مطالعات انجام شده در این بخش، کماکان کاستی‌هایی در حل این چنین مسائل وجود دارد که رفع آن‌ها می‌تواند به محاسبه ارزش خالص فعلی نزدیک به واقعیت برای پروژه منجر شود. چرا که همیشه با در نظر گرفتن عدم قطعیت نباید انتظار افزایش NPV را داشت و این لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها، به ارزش خالص فعلی برای پروژه که با شرایط حاکم بر آن تطابق بیشتری دارد منجر می‌شود. در مقاله‌ی حاضر سعی شده است اثرات عدم قطعیت عیار و قیمت ماده معدنی به‌طور همزمان بررسی شود.

۲- مدل کردن عدم قطعیت‌ها

۲-۱- مدل کردن عدم قطعیت عیار

در زمین‌آمار برای نمایش صحیح تغییرپذیری پارامترهای زمین‌شناسی مانند عیار، تخلخل، نفوذپذیری و غیره از شبیه‌سازی استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی‌های زمین‌آمار، علاوه بر حفظ پارامترهای آماری و ساختار فضایی، داده‌های اولیه‌ی مربوط به مقادیر معلوم نقاط نمونه‌برداری حفظ و به زیرمجموعه‌ای از داده‌های شبیه‌سازی شده تبدیل می‌شوند.

جهت تخمین عدم قطعیت قیمت سهام ارائه شد [۲۶]. این روش یکی از شناخته شده ترین روش‌ها برای بررسی رفتار تغییرات قیمت سهام به صورت ناپیوسته است. انعطاف پذیری، صحت و سرعت در محاسبات از جمله مزایای این روش است [۲۷]. ساختار درخت دوجمله‌ای حاوی مجموعه‌ای از شاخه‌ها و گره‌های مختلف است. این ساختار همه‌ی مسیرهای ممکن را برای بررسی تغییرات مجاز قیمت ماده‌ی معدنی در طول عمر پروژه مدل می‌کند. هر گره بیانگر قیمت ماده‌ی معدنی در زمان معین است. شکل (۱) نمایی از درخت دوجمله‌ای را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: نمای شماتیک یک درخت دوجمله‌ای

در این شکل هر ستون بیانگر یک افق زمانی (اغلب سال) است. اولین ستون سمت چپ زمان حال و ستون‌های بعدی به ترتیب سال‌های بعدی در آینده را بازنمایی می‌کنند. گره‌های واقع در هر ستون قیمت‌های ممکن را در سال مربوط نشان می‌دهد. هر شاخه یا مسیر در درخت ارزش گذاری دوجمله‌ای که از ستون اول آغاز و به ستون آخر ختم می‌شود، بیانگر مسیری ممکن برای نحوه‌ی تغییر قیمت در آینده است و هر حرکت از یک گره به گره‌ی بعدی روی یک شاخه احتمال و نرخ افزایش یا کاهش مربوط به خود را دارد. این احتمال در شاخه‌های بالارونده P_r و در شاخه‌های پایین‌رونده $1-P_r$ است. ارزش هر گره روی شاخه‌ی بالارو از حاصل ضرب ارزش گره‌ی ستون قبل در ضریب u ، و ارزش هر گره روی شاخه‌ی پایین‌رو از حاصل ضرب ارزش گره‌ی ستون قبل در ضریب d به دست می‌آید. به عنوان مثال اگر ارزش گره در ستون صفر شکل ۱ برابر S_0 باشد، ارزش گره‌ی متصل به شاخه‌ی بالارو $S_0 u$ و احتمال تحقق آن P_r ، و ارزش گره‌ی متصل به شاخه‌ی پایین‌رو $S_0 d$ و احتمال وقوع آن $1-P_r$ است. مقادیر u و d و احتمال P_r

شبیه‌سازی متوالی گوسی یکی از روش‌های معمول و انعطاف پذیر برای متغیرهای پیوسته است که امروزه بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تمام روش‌های گوسی فرض اصلی نرمال بودن داده‌های اولیه است، و همه‌ی داده‌ها باید به نرمال استاندارد تبدیل شوند.

الگوریتم اصلی شبیه‌سازی متوالی گوسی از مراحل زیر تشکیل می‌شود [۲۵]:

- رسم نمودار ستونی داده‌های اولیه و تبدیل این داده‌ها به نرمال استاندارد؛
- رسم پراش‌نما با استفاده از داده‌های نرمال اولیه؛
- انتخاب یک مسیر یا شبکه‌ی تصادفی برای شبیه‌سازی؛
- تخمین داده‌ها بر روی شبکه با استفاده از یکی از روش‌های کریجینگ، و رسم نمودار ستونی با داشتن میانگین و پراش تخمین در هر نقطه از شبکه؛
- انتخاب یک عدد از نمودار ستونی رسم شده به صورت تصادفی؛
- شرطی کردن داده‌ها؛
- تکرار مرحله‌ی قبل تا تکمیل اعداد همه‌ی نقاط شبکه؛
- برای انجام شبیه‌سازی‌های دیگر، مراحل قبل مجدداً تکرار می‌شوند؛
- تبدیل معکوس داده‌ها به حالت قبل؛
- اعتبارسنجی نتایج.

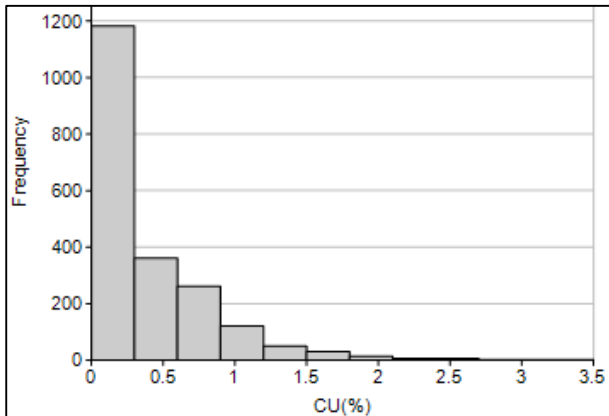
برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها شرایط زیر لازم است:

- ✓ توزیع فراوانی متغیر عیار در مدل شبیه‌سازی شده باید با توزیع فراوانی متغیر عیار در نمونه‌های موجود هم‌خوانی داشته باشد.
- ✓ نیم‌پراش‌نمای حاصل از مدل عیاری شبیه‌سازی شده، شباهت معینی با نیم‌پراش‌نمای حاصل از نمونه‌ها داشته باشد.

۲-۲-۲- مدل کردن عدم قطعیت قیمت

۲-۲-۱- روش درخت دوجمله‌ای

مدل درخت دوجمله‌ای اولین بار توسط کاکس^۹ و همکارانش



شکل ۲: توزیع فراوانی متغیر عیار مس داده‌های خام

جدول ۱: پارامترهای آماری مربوط به متغیر عیار مس داده‌های خام

متغیر	عیار مس
تعداد نمونه‌ها	۲۰۳۶
میانگین (درصد)	۰/۳۶۷
انحراف استاندارد (درصد)	۰/۴۵۲
کمینه مقدار (درصد)	۰/۰۰۱
بیشینه مقدار (درصد)	۳/۳۵۰
چولگی	۴/۷۹۱
کشیدگی	۱/۸۸۲

۳-۱- مدل‌سازی برنامه‌ریزی تولید بلندمدت

ابتدا با در نظر گرفتن بیشترین فراوانی از طول مغزه‌های گرفته‌شده، برای این که پارامترهای آماری داده‌های خام حفظ شوند، طول کامپوزیت برای ترکیب عیار ۲ متر در نظر گرفته شد. در نهایت پارامترهای آماری فایل کامپوزیت بعد از اصلاح داده‌های خارج از ردیف با استفاده از روش دورفل شده مطابق جدول ۲ استخراج شد. با بررسی روند در سه جهت اصلی، روندی در منطقه تشخیص داده نشد. نتایج بررسی نشان داد که توابع توزیع فراوانی مس نرمال نیستند. با توجه به نیاز روش به داده‌های نرمال اولیه، برای نرمال کردن داده‌ها از روش امتیازات نرمال در نرم‌افزار دی‌تامین ورژن ۲۱ استفاده شد.

برای تعیین ساختار منطقه، نیم‌پراش‌نمای غیرجهتی داده‌های نرمال شده‌ی منطقه با فاصله‌ی ۵۰ و رواداری ۲۵ متر رسم شد. شکل ۳ نیم‌پراش‌نمای غیرجهتی داده‌های نرمال شده را نشان می‌دهد. پارامترهای زمین‌آماری مدل برازش شده بر نیم‌پراش‌نماهای غیرجهتی داده‌های نرمال شده در جدول ۳ ارائه شده است.

از روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۳].

$$u = \exp(\sigma\sqrt{\delta_t}) \quad (1)$$

$$d = \frac{1}{u} = \exp(-\sigma\sqrt{\delta_t}) \quad (2)$$

$$P_r = \frac{e^{(r*\delta_t)} - d}{u - d} \quad (3)$$

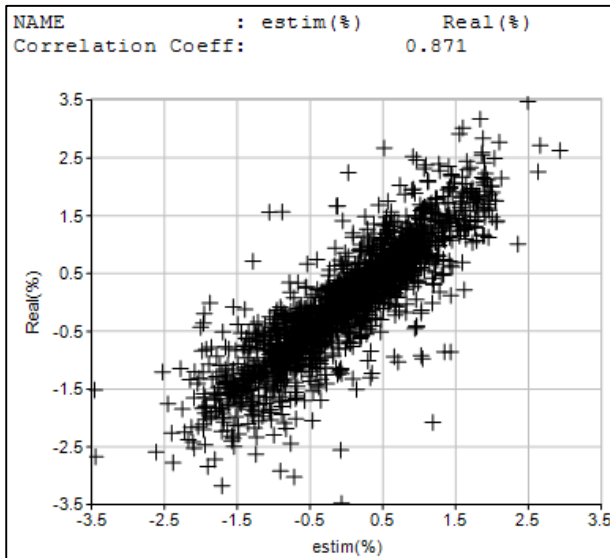
در روابط بالا، σ ناپایداری (نوسان‌پذیری)، u نرخ افزایش ارزش هر گره‌ی بالارو، d : نرخ کاهش ارزش هر گره‌ی پایین‌رو، δ_t طول افق زمانی (مثلاً سال)، r : نرخ تنزیل بدون ریسک است. پس از محاسبه‌ی ارزش اقتصادی بلوک‌ها برای هر دوره (سال) با استفاده از رابطه‌ی (۴)، ارزش محاسبه شده به سال مبنا (۲۰۰۲) تنزیل می‌یابد تا نهایتاً ارزش خالص فعلی پروژه برای شبیه‌سازی مورد نظر محاسبه شود.

$$DCF_{n,k} = BEV_{n,k} + \frac{P_r \times DCF_{n+1,k} + (1 - P_r) \times DCF_{n+1,k+1}}{(1 + r)} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، $DCF_{n,k}$ بیانگر ارزش اقتصادی تنزیل یافته در سال n و گره k ، $BEV_{n,k}$ ارزش اقتصادی بدون تنزیل مربوط به سال n و گره k ، P_r احتمال تحقق شاخه‌های افزایشی و $1 - P_r$ احتمال تحقق شاخه‌های کاهش‌ی است.

۳- مطالعه‌ی موردی

مطالعه‌ی موردی انتخاب شده یک معدن مس پورفیری در ایران است و برای انجام این تحقیق از اطلاعات مربوط به ۲۵ گمانه قائم با ۲۰۳۶ نمونه‌ی شامل عیار مس استفاده شده است. توزیع فراوانی و پارامترهای آماری داده‌ها به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۱ ارائه شده‌اند.



شکل ۴: نتایج اعتبارسنجی پارامترهای مدل خطی برازش شده

در این پژوهش، مدل هندسی کانسار در ۵ مقطع عرضی ساخته شد. شکل ۵ مدل هندسی کانسار را نشان می‌دهد. برای تخمین عیار بلوک‌ها لازم است یک مدل بلوکی پایه از منطقه تهیه شود. با توجه به محدوده‌ی گمانه‌های حفرشده در منطقه، مدل بلوکی توسط نرم‌افزار دیتامین تعیین شد. اطلاعات این مدل بلوکی در جدول ۴ ارائه شده است. مدل بلوکی کانسار در شکل ۶ دیده می‌شود. ابعاد بلوک‌ها در جهت X و Y یک‌چهارم فاصله‌ی بین گمانه‌ها، و در جهت Z معادل ارتفاع پله در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار دیتامین در داخل بلوک پایه برای بخش ماده‌ی معدنی و توپوگرافی نیز بلوک‌های جداگانه ساخته شد.

جدول ۴: پارامترهای تعریف شده برای ساخت مدل بلوکی

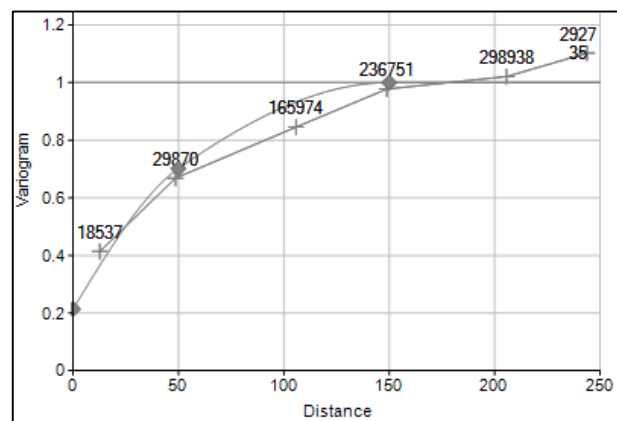
ریز بلوک‌ها	اندازه بلوک اصلی	پایان محدوده	آغاز محدوده	
۱۲,۵	۲۵	۹۵۱۰	۷۵۶۰	X
۱۲,۵	۲۵	۵۶۹۰	۳۸۴۰	Y
۶,۲۵	۱۲,۵	۲۴۰۵	۱۶۸۰	Z

جدول ۲: پارامترهای آماری متغیر عیار مس، مربوط به نمونه‌های کامپوزیت شده اصلاح شده

متغیر	عیار مس
تعداد نمونه‌ها	۱۹۸۴
میانگین (%)	۰/۳۶۸
انحراف استاندارد (%)	۰/۴۳۴
کمینه (%)	۰/۰۰۱
بیشینه (%)	۲/۰۰۰
چولگی	۲/۰۷۴
کشیدگی	۱/۵۰۹

جدول ۳: پارامترهای مدل خطی برازش شده

ساختر	مدل	اثر قطعه‌ای	سقف	دامنه
۱	کروی	۰,۲۱۴	۰/۲۰۷	۵۰
۲	کروی	۰,۰۰۰	۰/۵۷۵	۱۵۰

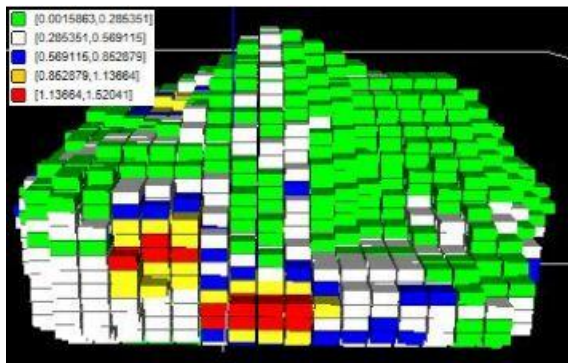


شکل ۳: نیم‌براشنمای تجربی غیرجهتی داده‌های نرمال شده و مدل برازش شده بر آن

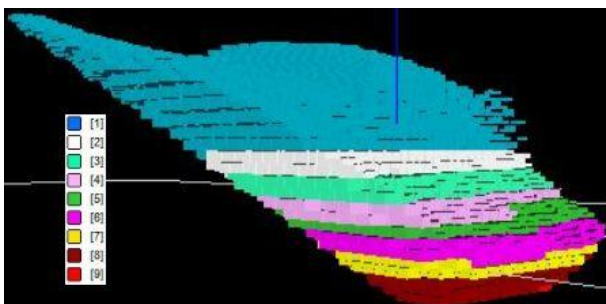
اعتبارسنجی انجام شده در نرم‌افزار دیتامین نشان می‌دهد که پارامترهای مدل خطی برازش شده تا ۸۷ درصد می‌تواند داده‌های واقعی را تخمین بزند که این مقدار با بهینه‌سازی ورودی اعتبارسنجی به دست آمد و قابل قبول است. شکل ۴ نتایج اعتبارسنجی پارامترهای مدل خطی برازش شده است.

جدول ۵: پارامترهای مورد استفاده در فرآیند تخمین

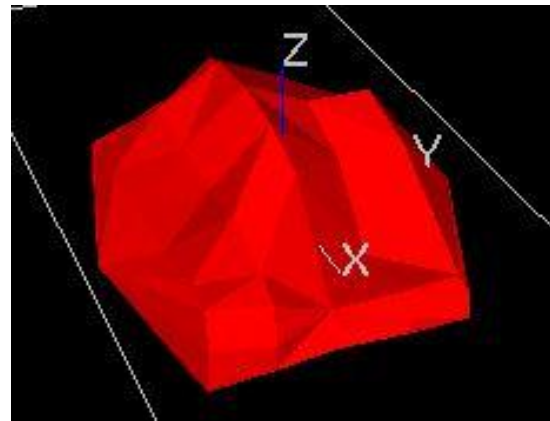
۲۵	حداکثر تعداد نقاط شرکت کننده در تخمین
۴	حداقل تعداد نقاط شرکت کننده در تخمین
۱۵۰	شعاع جستجو (در هر سه راستا)
۲۷	ضریب ریز بلوک سازی



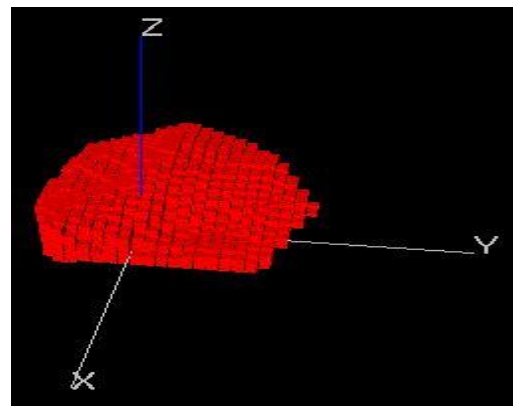
شکل ۷: مدل بلوکی تخمینی



شکل ۸: برنامه ریزی تولید بلندمدت مدل بلوکی تخمینی



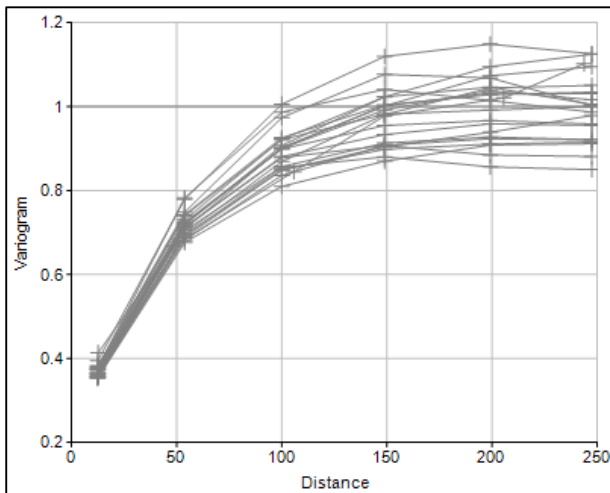
شکل ۵: مدل هندسی کانسار



شکل ۶: مدل بلوکی کانسار

پس از تهیه پارامترهای لازم برای تخمین عیاری کانسار و همچنین اعتبارسنجی پارامترهای انتخابی، تخمین کانسار به روش کریجینگ با استفاده از جداول ۳ و ۵ صورت گرفت. در نهایت با نرم افزار دیتامین داده ها به حالت اولیه باز گردانده شد. شکل ۷ مدل بلوکی برآورد شده را نشان می دهد. پس از اتمام تخمین بلوک ها، مدل بلوکی تخمینی وارد نرم افزار NPV Scheduler ورژن ۴ شد و با وارد کردن پارامترهای فنی و اقتصادی ابتدا ارزش اقتصادی بلوک و سپس محدوده نهایی، پس ران و در نهایت با هدف بیشینه سازی ارزش خالص فعلی با نرخ تولید ۳ میلیون تن ماده معدنی در سال برنامه ریزی تولید بلندمدت صورت گرفت. جدول ۶ پارامترهای ورودی مورد نیاز نرم افزار NPV Scheduler نشان می دهد [۲۸]. در نتیجه با استفاده از داده های اکتشافی و پارامترهای فنی اقتصادی ارزش خالص فعلی ۳۱۹۴ هزار دلار محاسبه شد. شکل ۸ برنامه ریزی تولید بلندمدت را برای مدل بلوکی تخمینی نشان می دهد.

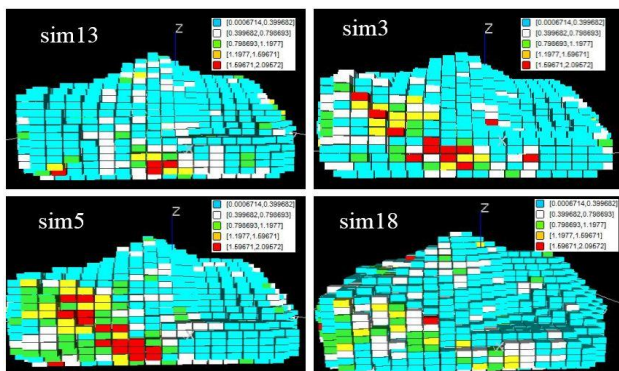
دارد، که نشان‌دهنده اعتبار کافی شبیه‌سازی‌ها است. شکل ۱۱ نتایج مدل بلوکی شبیه‌سازی‌شده‌ی شماره‌های ۳، ۵، ۱۳ و ۱۸ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: سمی واریوگرام‌های تجربی غیرجهتی تحقق‌های عیاری

جدول ۷: پارامترهای آماری ۴ نمونه از تحقق عیاری

متغیر	Sim1	Sim7	Sim13	Sim20
میانگین (درصد)	۰/۳۰۸	۰/۳۱۹	۰/۳۳۰	۰/۳۱۴
انحراف استاندارد (درصد)	۰/۳۸۲	۰/۳۷۰	۰/۳۷۵	۰/۳۶۹
کمینه (درصد)	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
بیشینه (درصد)	۱/۹۹۶	۱/۹۹۱	۱/۹۰۹	۱/۹۱۹
چولگی	۱/۵۱۶	۱/۴۰۹	۱/۳۴۱	۱/۴۲۴
کشدگی	۱/۹۵۲	۱/۷۵۷	۱/۴۳۳	۱/۶۸۷



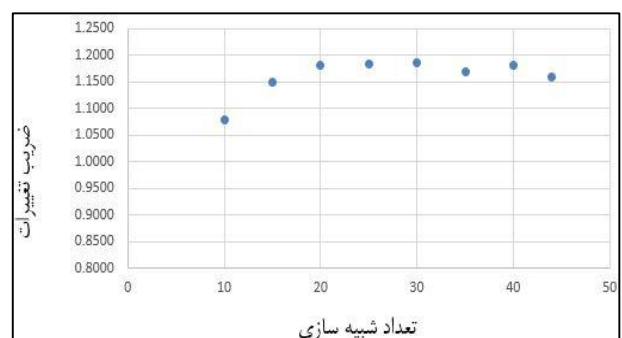
شکل ۱۱: نتایج مدل بلوکی شبیه‌سازی‌شده شماره ۳، ۵، ۱۳ و ۱۸

جدول ۶: داده‌های فنی و اقتصادی موردنیاز [۲۸].

شرح	مقدار	واحد
بازایی کل	۹۵	درصد
عیار حد	۰/۳۴۷	درصد
چگالی	۲/۵	گرم بر سانتی مترمکعب
قیمت مس در سال ۲۰۰۲	۱۶۷۵	دلار بر تن
هزینه استخراج	۱/۱	دلار بر تن
هزینه باطله برداری	۱	دلار بر تن
هزینه فرآوری	۳/۵	دلار بر تن
نرخ تنزیل	۱۵	درصد
نرخ تولید	۳۰۰۰۰۰	تن بر سال
هزینه ذوب، پالایش، حمل‌ونقل و بازاریابی	۶۰	دلار بر تن
اختلاط	۵	درصد
شیب در همه جهات	۳۷	درجه
تعداد روزهای کاری	۳۳۰	روز

۲-۳- مدل کردن عدم قطعیت عیاری

برای مشخص کردن تعداد شبیه‌سازی از ضریب تغییرات استفاده شد که در نتیجه تعداد ۲۰ شبیه‌سازی برای این تحقیق مشخص شد. نحوه‌ی مشخص کردن تعداد شبیه‌سازی‌ها در شکل ۹ مشخص شده است. نمونه‌های نرمال شده، مدل‌های خطی برازش شده بر نیم‌پراش‌نمای تجربی و مدل‌های بلوکی به‌دست‌آمده از مدل هندسی کانسار ورودی‌های موردنیاز برای شبیه‌سازی‌ها هستند. با استفاده از نرم‌افزار دیتامین تعداد ۲۰ شبیه‌سازی با احتمال یکسان تولید شد.



شکل ۹: نحوه‌ی مشخص کردن تعداد شبیه‌سازی‌ها

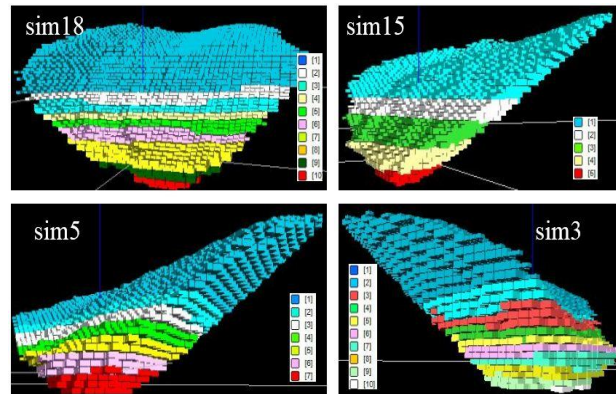
پارامترهای آماری ۴ نمونه از شبیه‌سازی‌ها در جدول ۷ و نتیجه‌ی نیم‌پراش‌نمای تجربی غیرجهتی شبیه‌سازی‌شده در شکل ۱۰ دیده می‌شود. این نتیجه با شکل ۳ انطباق خوبی

جدول ۸: محاسبه‌ی پارامترهای مربوط به درخت دوجمله‌ای

سال	قیمت مس (دلار بر تن)	$\ln(p_i/p_{i+1})$
۱۹۸۶	۱۲۶۶	-
۱۹۸۷	۱۷۸۱	۰/۲۶۵
۱۹۸۸	۲۶۰۰	۰/۳۷۸
۱۹۸۹	۲۸۴۷	۰/۰۹۰
۱۹۹۰	۲۶۶۲	-۰/۰۶۷
۱۹۹۱	۲۳۳۹	-۰/۱۲۹
۱۹۹۲	۲۲۸۵	-۰/۰۲۳
۱۹۹۳	۱۹۱۵	-۰/۱۷
۱۹۹۴	۲۳۰۶	۰/۱۸۵
۱۹۹۵	۲۹۳۲	۰/۲۴۰
۱۹۹۶	۲۲۹۴	-۰/۲۴۵
۱۹۹۷	۲۲۷۵	-۰/۰۰۷
۱۹۹۸	۱۶۵۴	-۰/۳۱۹
۱۹۹۹	۱۵۷۳	-۰/۰۵۰
۲۰۰۰	۱۸۱۵	۰/۱۴۲
۲۰۰۱	۱۵۸۱	-۰/۳۱۹
۲۰۰۲	۱۶۷۵	۰/۰۵۸
انحراف استاندارد		۰/۱۹۵
ناپایداری		۰/۱۹۵
نرخ افزایش هرگره		۱/۲۱۵
نرخ کاهش هرگره		۰/۸۲۳
احتمال خطرپذیری		۰/۸۳۴

با توجه به داده‌های جدول ۸ و قیمت مس در سال ۲۰۰۲ به عنوان قیمت پایه، می‌توان درخت دوجمله‌ای را برای قیمت مس در ده سال آینده به صورت شکل ۱۴ مدل کرد. از طرفی هدف از این تحقیق، محاسبه ارزش خالص فعلی پروژه تحت عدم قطعیت عیار و قیمت ماده معدنی نزدیک به واقعیت می‌باشد. در این راستا شاید در بعضی گره‌های درخت قیمت، قیمت‌های تخمینی با قیمت‌های واقعی تفاوت زیادی داشته باشد.

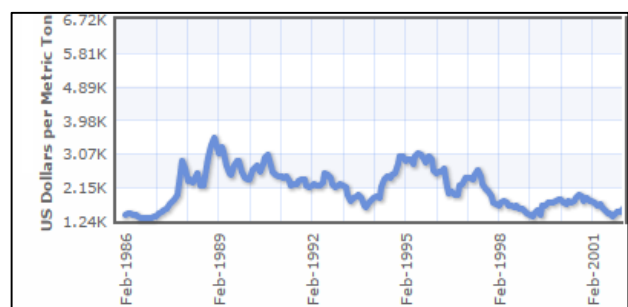
بعد از اتمام شبیه‌سازی‌ها مدل بلوکی ساخته شده وارد نرم‌افزار NPV Scheduler شد و پس از محاسبه‌ی ارزش اقتصادی بلوک، محدوده‌ی نهایی و پسران طراحی و در نهایت برنامه‌ریزی تولید بلندمدت با هدف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی با نرخ تولید ۳ میلیون تن ماده‌ی معدنی در سال انجام شد. شکل ۱۲ خروجی نرم‌افزار برای شبیه‌سازی شماره ۳، ۵، ۱۳ و ۱۸ برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: برنامه‌ریزی تولید بلندمدت برای شبیه‌سازی شماره ۳، ۵، ۱۳ و ۱۸

۳-۳- مدل کردن عدم قطعیت قیمت

برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت پس از جمع‌آوری داده‌های تاریخی قیمت مس، پارامترهای موردنیاز برای مدل کردن عدم قطعیت قیمت محاسبه شد. داده‌های تاریخی قیمت مس بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۲ در شکل ۱۳ دیده می‌شود.



شکل ۱۳: داده‌های تاریخی قیمت مس بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۲

همان‌طور که دیده می‌شود ارزش خالص فعلی سناریوی سه تحت عدم قطعیت برابر ۱۰۲/۲ میلیون دلار است. مراحل محاسبه‌ی ارزش خالص فعلی تحت عدم قطعیت برای همه‌ی سناریوها انجام و در نهایت سناریوها بر اساس ارزش خالص فعلی رتبه‌بندی می‌شوند. جدول ۹ نتیجه‌ی این رتبه‌بندی را نشان می‌دهد.

۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱
۱۶۷۵	۲۰۳۴.۴	۲۴۷۱	۳۰۰۱.۲	۳۶۵۰.۲	۴۴۲۷.۵	۵۳۷۷.۶	۶۵۲۱.۶	۷۹۳۲.۲	۹۶۳۵.۵
	۱۳۷۹.۱	۱۶۷۵	۲۰۳۴.۴	۲۴۷۱	۳۰۰۱.۲	۳۶۵۰.۲	۴۴۲۷.۵	۵۳۷۷.۶	۶۵۲۱.۶
		۱۱۳۵.۴	۱۳۷۹.۱	۱۶۷۵	۲۰۳۴.۴	۲۴۷۱	۳۰۰۱.۲	۳۶۵۰.۲	۴۴۲۷.۵
			۹۳۴.۸	۱۱۳۵.۴	۱۳۷۹.۱	۱۶۷۵	۲۰۳۴.۴	۲۴۷۱	۳۰۰۱.۲
				۷۶۹.۶	۹۳۴.۸	۱۱۳۵.۴	۱۳۷۹.۱	۱۶۷۵	۲۰۳۴.۴
					۶۳۲.۶	۷۶۹.۶	۹۳۴.۸	۱۱۳۵.۴	۱۳۷۹.۱
						۵۲۱.۷	۶۳۲.۶	۷۶۹.۶	۹۳۴.۸
							۴۲۹.۵	۵۲۱.۷	۶۳۲.۶
								۳۵۳.۶	۴۲۹.۵
									۲۹۱.۲

شکل ۱۴: درخت دوجمله‌ای قیمت مس بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱

جدول ۹: رتبه‌بندی سناریوهای تحت عدم قطعیت عیار ماده‌ی

معدنی و قیمت

رتبه	شماره سناریو	رتبه	ارزش سناریو (میلیون دلار)	شماره سناریو	ارزش سناریو (میلیون دلار)
۱	۳	۱۱	۳۸۸.۴	۱۹	۱۳۶.۶
۲	۱۸	۱۲	۲۴۶.۸	۱	۱۱۶.۵
۳	۸	۱۳	۱۹۷.۰	۳	۱۰۶.۳
۴	۱۲	۱۴	۱۹۳.۷	۱۱	۹۶.۲
۵	۹	۱۵	۱۸۸.۳	۱۳	۵۷.۹
۶	۴	۱۶	۱۸۳.۱	۶	۵۵.۸
۷	۵	۱۷	۱۵۶.۴	۱۰	۴۰.۷
۸	۱۵	۱۸	۱۵۴.۱	۱۷	۴۰.۳
۹	۱۶	۱۹	۱۳۳.۸	۲۰	۳۱.۱
۱۰	۷	۲۰	۱۲۸.۱	۱۴	۱۱.۷

با توجه به قیمت‌های محاسبه شده در درخت بالا، داده‌های اقتصادی جدول ۶ و با لحاظ کردن نرخ تنزیل ۱۵ درصد برای هزینه‌های عملیاتی به ازای هر سال، حال می‌توان درخت دوجمله‌ای ارزش اقتصادی را برای سناریوهای شبیه‌سازی مختلف محاسبه کرد. شکل ۱۵ ارزش اقتصادی سال‌های مختلف یکی از این سناریوها را نشان می‌دهد. درخت ارزش تنزیل یافته‌ی این سناریو نیز در شکل ۱۶ دیده می‌شود.

۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱
-۵۵/۳	۶/۷	۱۶/۷	۳۱/۲	۴۸/۵	۶۳/۹	۹۵/۴	۱۲۵/۷	۱۶۱/۳	۲۰۷/۵
	-۳/۷	۳/۷	۱۳/۹	۲۶/۴	۳۷/۳	۵۸/۶	۸۰/۱	۹۰/۸	۳/۱
		۳/۷	۲/۲	۱۱/۴	۱۹/۳	۳۳/۶	۴۹/۱	۵۶/۶	۱/۹
			-۵/۷	۱/۲	۷/۱	۱۶/۶	۲۸/۱	۳۳/۳	۱/۱
				-۵/۶	-۱/۲	۵/۲	۱۳/۸	۱۷/۶	-۱/۵۹
					-۶/۸	-۲/۵	۶/۲	۶/۹	-۱/۲۳
						-۷/۸	-۲/۳	-۱/۲	-۱/۰۱
							-۶/۷	-۵/۲	-۱/۱۷
								-۶/۷	-۱/۲۸
									-۱/۳۶

۴- نتیجه‌گیری

ارزیابی عدم قطعیت همراه با پارامترهای تأثیرگذار بر طراحی و برنامه‌ریزی تولید بلندمدت یک معدن امری ضروری است که در روش‌های تخمین کلاسیک مانند کریجینگ امکان‌پذیر نیست. شبیه‌سازی زمین‌آماري یکی از کارآمدترین روش‌ها برای تعیین ریسک همراه تخمین ذخیره است. این روش قادر است بهترین و بدترین حالت ممکن رخداد را در رابطه با عیار و تناژ ماده‌ی معدنی پیش‌بینی و مهندسان معدن را برای برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تر استخراجی راهنمایی کند. در کانسار بررسی شده در این پژوهش عدم قطعیت عیار با استفاده از روش شبیه‌سازی SGS و عدم قطعیت قیمت با استفاده از روش درخت دوجمله‌ای مدل شد. نتایج شبیه‌سازی برنامه‌ریزی تولید با لحاظ کردن عدم قطعیت عیار و قیمت، بهترین ارزش خالص فعلی پروژه را حدود ۱۲۶/۷ و بدترین آن را حدود ۲۴/۸ میلیون دلار نشان داد که با ارزش خالص فعلی ۴ میلیون دلاری بدون لحاظ کردن عدم قطعیت‌های مذکور تفاوت چشمگیری دارد. بدیهی است که در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

شکل ۱۵: درخت دوجمله‌ای ارزش اقتصادی بلوک‌ها مربوط به

سناریو ۳

۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱
۱۰۲/۲	۱۹۷/۳	۲۳۶/۸	۲۷۱/۹	۲۹۶/۱	۳۰۳/۸	۳۹۳/۷	۴۶۲/۳	۵۴۲/۱	۶۱۷/۵
	۹۹/۹	۱۲۹/۸	۱۵۷/۸	۱۷۸/۶	۱۸۸/۲	۱۸۵/۷	۱۵۶/۲	۹۳/۳	۳/۱
		۶۵/۷	۸۰/۱	۹۸/۴	۱۰۸/۹	۱۱۱/۴	۹۶/۲	۵۸/۱	۱/۹
			۲۷/۳	۴۶/۱	۵۵/۲	۶۱/۱	۵۵/۶	۳۶/۲	۱/۱
				۷/۲	۱۸/۸	۲۶/۸	۲۸/۰	۱۸/۱	۰/۵۶
					-۵/۸	۳/۷	۹/۳	۷/۱	۰/۲۳
						-۱/۹	-۲/۳	-۰/۳	-۱/۰۱
							-۱/۸	-۵/۳	-۱/۱۷
								-۸/۷	-۱/۲۸
									-۱/۳۶

شکل ۱۶: درخت دوجمله‌ای تنزیل یافته برای سناریو ۳

(عیار و قیمت) می‌تواند به نتایج واقعی پروژه‌ها نزدیک باشد
بنابراین می‌تواند به طراحان معدن در برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تر
استخراجی راهنمایی کند.

منابع

- International Journal of Surface Mining, 18(2), pp.85-98.
- [11]. 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), pp. 178-185.
- [12]. Dimitrakopoulos, R., Ramazan, S., 2008, "Stochastic integer programming for optimizing long term production schedules of open pit mines", methods, application and value of stochastic solutions, Mining Technology, 117(4), pp. 155-160.
- [13]. Dimitrakopoulos, R.G., Abdel Sabour, S.A., & Kumral, M., 2008, "Mine design selection under uncertainty", Mining Technology, 117(2), pp. 53-64.
- [14]. Armstrong, M., Galli, A., 2011, "A New Approach to Flexible Open Pit Optimization", In E. Y. Baafi, R. J. Kininmonth, & I. Porter (Eds.), 35th APCOM symposium, Wollongong: AusIMM, pp. 253 – 263.
- [15]. Lamghari, A., Dimitrakopoulos, R., 2012, "A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty", European Journal of Operational Research, 222(3), pp.642-652.
- [16]. Benndorf, J., Dimitrakopoulos, R., 2013, "Stochastic long-term production scheduling of iron ore deposits: integrating joint multi-element geological uncertainty", Journal of Mining Science, Vol, 49., No, 1., pp. 79-94.
- [17]. Koushavand, B., Askari-Nasab, H., Deutsch, C., 2014, "A linear programming model for long-term mine planning in the presence of grade uncertainty and a stockpile", International Journal of Mining Science and Technology 24, pp.451–459.
- [18]. Brennan, M. J. and Schwartz, E. S. Evaluating, 1985, "Natural Resource Investments", Journal of Business 58(2):135-157.
- [19]. Abdel Sabour, S A and Poulin, R., 2010, "Mine expansion decisions under uncertainty",
- [1]. Morales, N., 2003, "Robust models for simultaneous open pit and underground mines", PhD diss, INRIA.
- [2]. Lerchs, H., Grossman F., 1965, "Optimum design of open-pit mines". Transaction CIM, Vol. 58, No.633, pp. 47-54.
- [3]. Gershon, M.E., 1987, "An open pit production scheduler: algorithm and implementation", Mining Engineering, (Littleton, Colo.), (United States), 39(8). pp. 793-796.
- [4]. Dagdelen, K., Francois-Bongarcon, D., 1982, "Towards the complete double parameterization of recovered reserves in open pit mining", In Proceedings of 17th international APCOM symposium pp. 288-296.
- [5]. Francois-Bongarcon, D., Guibal, D., 1982, "Algorithm for parameterizing reserves under different geometrical constraints", 17th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, (Golden, Co., USA). pp. 297-309.
- [6]. Wang, Q., Sevim, H., 1995, "Alternative to parameterization in finding a series of maximum-metal pits for production planning", Mining Engineering, pp. 178-182.
- [7]. Ramazan, S., Dagdelen, K., 1998, "A new push back design algorithm", Proceeding of the 17th International Symposium and equipment on Mine planning selection, Calgary, Canada, pp. 119-124.
- [8]. Smith, M.L., 2001, "Integrating conditional simulation and stochastic programming: an application in production scheduling", In Xie (Eds.), Computer applications in the minerals industries, Swet & Zeitlinger, pp. 203-208.
- [9]. Gody, M., Dimitrakopoulos, R., 2003, "Managing risk and waste mining in long-term production scheduling of open pit mine", In SME Annual Meeting & Exhibition, (pp. 24-26).
- [10]. Ramazan, S., Dimitrakopoulos, R., 2004, "Traditional and new MIP models for production scheduling with in-situ grade variability",

International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 24:340–349.

[20]. Evatt, G W, Soltan, M O, Johnson, P V. 2012, “*Mineral reserves under price uncertainty*”, Resources Policy, 37:340-345.

[21]. Akbari, A, Osanloo, M and Shirazi, M., 2009, “*Reserve estimation of an open pit mine under price uncertainty by real option approach*”, Mining Science and Technology, 19:0709–0717.

[22]. Shafiee, S., Topal, E., Nehring, M., 2009, “*Adjusted real option valuation to maximize mining project value – a case study using century mine*”. In :Project Evaluation Conference, pp.125–134.

[23]. Dehghani. H, Atae-pour. M, 2011, “*Determination of the effect of operating cost uncertainty on mining project evaluation*”, Resources Policy 37(2012)109–117.

[24]. Dehghani. H , Atae-pour. M, Esfahanipour. A, 2014, “*Evaluation of the mining projects under economic uncertainties using multidimensional binomial tree*”, Resources Policy 39(2014)124-133.

[25]. Vann, J., Bertoli, O., Jackson, S., 2002, “*An overview of geostatistical simulation for quantifying risk*”, In Proceedings of Geostatistical Association of Australasia Symposium "Quantifying Risk and Error (Vol. 1, p. 1).

[26]. Cox, J.C., Ross, S.A., 1976, “*the valuation of options for alternative stochastic processes*”, Journal of financial economics, 3(1-2), pp.145-166.

[27]. Cox, J.C., Ross, S.A., Rubinstein, M., 1979, “*Option pricing: A simplified approach*”, Journal of financial Economics, 7(3), pp.229-263.

[28]. Osanloo, M., Ataei, M., 2003, “*Using equivalent grade factors to find the optimum cut-off grades of multiple metal deposits*”, Minerals Engineering, 16(8), pp.771-776.

^۱ Smith

^۲ Gody

^۳ Dimitrakopoulos

^۴ Ramazan

^۵ Armstrong

^۶ Galli

^۷ Lamghari

^۸ Benndorf

^۹ Cox