فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست

سال دهم، شماره ۳۵، تابستان ۹۵

تعیین محدوده نهایی معدن روباز مس سرچشمه با استفاده از معیار ارزیابی عاری از ریسک برای دستیابی به توسعه پایدار

افشین اکبری[۱]، امید محمدی[۲]

۱- دپارتمان دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۲- کارشناس ارشد مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

چکیده

طبق بررسی‌های انجام شده در بحث معدن، مشاهده شد که عدم‌قطعیت محاسبات اقتصادی، ناکافی بودن اطلاعات اولیه، هزینه‌ی تکمیل اطلاعات و خطرپذیری در تصمیم‌گیری مدیران در مجموع دورنمایی از یک رفتار مدیریتی را آشکار می‌کند که در فرهنگ مطالعات ارزیابی طرح‌های معدنی به آن ریسک انجام طرح می‌گویند. این ریسک آثار زیست محیطی قابل توجهی به همراه دارد. از آن جمله برداشت باطله بیش از حد و گسترش بی مورد محدوده پیت نهایی در صورت مفروض داشتن قیمتی بالا ولی غیر واقعی در فرآیند برنامه ریزی معدن. از آنجا که تمام پروژه‌های معدنی، شرایطی همراه با عدم‌قطعیت دارند، بررسی و تحلیل ریسک در این پروژه‌ها ضروری است. یکی از مهمترین مسائل دارای عدم‌قطعیت، قیمت فلز بوده و در تعیین محدودهٔ نهایی معدن نیز عدم‌قطعیت قیمت مطرح می‌شود. در این تحقیق روشی برای تعیین محدودهٔ معدن روباز مس سرچشمه بر اساس مدیریت ریسک عدم‌قطعیت قیمت مس با استفاده از کمینه‌سازی هزینه‌ی ریسک، تحت شرایط عدم‌قطعیت به نام معیار ارزیابی عاری از ریسک ارائه شده است. فرآیند روش‌شناسی ارائه شده طی چهار مرحله که شامل تعریف مسئله، شناسایی مالی ریسک، مدلسازی و در نهایت ارزیابی است انجام می‌شود. مرحله‌ی تعریف مسئله، شامل شناخت کامل مسئلهٔ مورد ارزیابی است که در این تحقیق همان مسئلهٔ تعیین محدودهٔ نهایی معدن روباز می‌باشد. در مرحله‌ی شناسایی مالی ریسک، به علّت ضعف مدل‌های پیش‌بینی قیمت، با استفاده از تحلیل ترند، سه مدل پیش‌بینی قیمت بر مبنای سه نوع سری زمانی مختلف قیمت مس، شکل می‌گیرد و با توجه به آن، سه پروژهٔ محتمل با کمترین قیمت ممکن، بیشترین قیمت ممکن و قیمت بینابینی ممکن تعیین می‌شود. در گام مدلسازی نیز بر اساس سه پروژهٔ حاصل شده در قسمت قبل، هزینه‌ی ریسک با استفاده از روابط عدم نفع، زیان و مجموع هر دو عدم نفع و زیان، حاصل می‌شود. مرحله‌ی ارزیابی از دو قسمت تشکیل شده است، قسمت اوّل شامل یافتن احتمالات مورد نیاز مدل ارزیابی ریسک و قسمت دوّم انجام ارزیابی هزینه‌ی ریسک و محاسبهٔ معیار ارزیابی عاری از ریسک می‌باشد. سپس با تحلیل هزینه‌ی ریسک تحت شرایط عدم‌قطعیت و معیار ارزیابی عاری از ریسک، محدودهٔ نهایی معدن روباز تعیین می‌شود تا با برنامه ریزی برای توسعه این محدوده نهایی موجبات توسعه پایدار فراهم گردد.

واژگان کلیدی: محدودهٔ نهایی پیت، عدم‌قطعیت، مدیریت ریسک، قیمت محصول نهایی

مقدمه

در چند دهه گذشته، توزیع فضایی عیار کانسار مبتنی بر برآورد زمین‌آماری مدلسازی شده است. اشکال عمدهٔ تکنیکهای برآورد کنونی (زمین‌آماری و غیره)، این است که آنها قادر به ایجاد دوبارهٔ تنوع فضایی درجا، مانند استنباط از داده در دسترس، نیستند. نادیده گرفتن چنین منبع مهمی از ریسک و عدم‌قطعیت، ممکن است منجر به تولید طرحهای غیرواقعی گردد. هنگام سروکارداشتن با عدم‌قطعیت مربوط به توزیع فضایی ویژگی‌های تودهٔ معدنی و عدم‌قطعیت محلی آنها، مدل‌های مختلفی می‌تواند تولید شود. این مدل‌ها در واقع بر اساس اطلاعات در دسترس و ویژگی‌های آماری خود به: (الف) تولید مجدد تمام اطلاعات در دسترس و آمارهای آنها، (ب) نشان دادن مدل‌های توزیع فضایی واقعی عیارهای محتمل به طور مساوی، محدود می‌شوند. در دسترس بودن مدل‌های محتمل مختلف یک ذخیره به طور یکسان برای استخراج، برنامه‌ریزان معدن را برای ارزیابی حساسیت طراحی پیت و زمان‌بندی تولید طولانی مدت برای عدم‌قطعیت زمین‌شناسی قادر می‌سازد. این رویکرد توسط بسیاری از نویسندگان در طول ۲۰ سال گذشته پیشنهاد شده است {۲۱، ۸، ۱۷، ۳}. محدودهٔ نهایی معدن از دیدگاه‌های مختلف در طول زمان تعریف شده است. به گفتهٔ آرمسترانگ (۱۹۹۰)، محدودهٔ نهایی معدن، حداکثر مرزی است که تمامی مواد معدنی در آن معیارهایی را داشته باشند که شامل الف) بلوک مواد معدنی استخراج نخواهد شد مگر اینکه بتواند همهٔ هزینه‌های استخراج، فرآوری، و بازاریابی مادهٔ معدنی و باطله برداری روی بلوک‌ها را پرداخت کند؛ ب) برای حفاظت از منابع، هر بلوک دارای اولین معیار پیت را شامل خواهد شد. به گفتهٔ ویتل، پیت نهایی، پیتی است که بالاترین جریان نقدینگی تنزیل نیافتهٔ ممکن، بدون درنظر گرفتن دسترسی عملیاتی یا هدف برنامه‌ریزی را دارا باشد {۲۰}. در همین حال در بین تولد و مرگ یک معدن روباز، یکسری از پیت‌های متوسط وجود دارند، که برای توسعهٔ یک پیت، مقصد مواد دارای ارزش‌های مختلف در داخل پیت، باید با استفاده از معیارهای اقتصادی تخصیص داده شود. در حال حاضر یک تعریف معروف برای پیت نهایی وجود دارد، پیت نهایی پیتی است که بیشترین ارزش خالص کنونی را در مقایسه با سایر پیت‌های بالقوه دارد. به عنوان نتیجه، می‌توان اظهار داشت که تعیین پیت نهایی در هر دوره‌ای از زمان تابعی از امور مالی است اگر یک فرآیند مالی از قبل پیش‌بینی نشده باشد یا به عبارتی دیگر اگر برخی از فعالیت‌های مربوطه یا عوامل تعیین کننده از یک فرآیند مالی غیرقابل پیش‌بینی باشند، پس ارزیابی ریسک بخش جدایی ناپذیر از مطالعه و آنالیز خواهد بود. لرچ و گروسمن در سال ۱۹۶۵ تنها پس از ارائهٔ نظریهٔ گراف سه بعدی خود تشخیص دادند که داشتن یک شکل نهایی بهینه برای یک پیت بدون داشتن یک برنامه‌ریزی تولید خوب، استفادهٔ زیادی نخواهد داشت. به لحاظ تاریخی اولین و بهترین الگوریتم تعیین محدودهٔ نهایی معدن متعلق به لرچ و گروسمن است. آنها نظریهٔ گراف سه بعدی خود را به عنوان یک روش‌شناسی برای تعیین پیت نهایی توسط کامپیوتر و از طریق یک مدل بلوکی ذخیره ارائه نمودند که مدل بلوکی معدن را توسط یک گراف سنگین جهت‌دار که در آن هر رأس نشان دهندهٔ بلوک‌ها و هر کمان نشان دهندهٔ وابستگی بلوک‌ها از نظر استخراج است مدل کردند. جهت کمان‌ها از یک رأس به سایر رئوس، اولویت استخراج از بلوک دوم به بلوک اول را نشان

می‌دهد و وزن‌هایی از ارزش‌های اقتصادی بلوک‌ها در آن آمده است. آنها فرض کردند که مشکل تعیین محدودهٔ نهایی معدن معادل یافتن حداکثر وزن از گراف جهت‌دار وزنی فوق است. تئوری آنها بر اساس ارزش‌های اقتصادی بلوک‌ها ساخته شده است که بدون در نظر گرفتن عدم‌قطعیت قیمت محاسبه شده است. زائو و کیم برای بهبود الگوریتم لرچ و گروسمن با ملاحظهٔ فقط کمان‌هایی که در واسطه‌های مادهٔ معدنی–باطله تعریف شده‌اند، تلاش کردند. اما مجدداً الگوریتم خود را بدون در نظر گرفتن عدم‌قطعیت قیمت توسعه دادند. شبیه به زائو و کیم، یامتومی و همکاران در سال ۱۹۹۵ برای بهبود ایدهٔ قدیمی توسط اصلاح الگوریتم مخروط شناور سعی کردند، اما آنها نیز مجددا عدم‌قطعیت قیمت را نادیده گرفتند. جانسون در سال ۱۹٦۸ استفاده از آنالیز جریان شبکه را برای تعیین محدودهٔ نهایی معدن پیشنهاد داد ولی پیکارد (۱۹۷٦) بود که با این موضوع درگیر بود و آن را به خوبی مستندسازی کرد. مدل آنالیز جریان شبکه از یک گرهٔ منبع و یک گرهٔ ترمینال تشکیل شده است، که یک گره برای هر بلوک در مدل در نظر گرفته می شود و پیوندهایی با ظرفیت‌های برابر با ارزش‌های بلوک‌های مثبت، آنها را به گرهٔ منبع متصل می‌کند و از مشابه همان پیوندها برای پیوند هر بلوک غیر مثبت به گرهٔ ترمینال استفاده می‌شود، همچنین از پیوندهایی با ظرفیت‌های نامحدود برای اتصال بلوک‌های با ارزش مثبت به بلوک‌های با ارزش منفی یا صفر به منظور تسهیل در استخراج بلوک‌های با ارزش مثبت استفاده می‌شود. هدف از الگوریتم آنالیز جریان شبکه، به حداکثر رساندن مقدار جریان از گرهٔ منبع به گرهٔ ترمینال در مدل ذکر شده است. گزارش دیگری در مورد الگوریتم تعیین محدودهٔ نهایی معدن توسط کوربوف ارائه شده است. این الگوریتم با قرار دادن یک مخروط معکوس بر روی هر بلوک مثبت در معدن و تخصیص ارزش‌های مثبت در مقابل ارزش‌های منفی در داخل مخروط تا وقتی‌که هیچ ارزش منفی باقی نماند صورت می‌گیرد، بطوریکه بلوک‌های مثبت بتواند هزینه‌ی بلوک‌های منفی را پرداخت کند. به گفتهٔ دیوید و همکاران (۱۹۷٤)، الگوریتم کوربوف قادر به پردازش همپوشانی مخروط‌های صحیح و درست نیست، اما داون و اونار (۱۹۹۲) ادعا کردند که قادر به پیدا کردن راه حل بهینهٔ درست توسط الگوریتم کوربوف می‌باشند. به هر حال، الگوریتم کوربوف عدم‌قطعیت قیمت را مانند سایرین نادیده گرفته بود. به تدریج مفهوم تعیین پیت نهایی همگام با برنامه‌ریزی تولید در مقابل تعیین فقط یک محدوده نهایی با توجه به حداکثر رساندن ارزش خالص فعلی قوت گرفت {۵، ۱۰، ٦}. دلیل این امر عدم‌قطعیت نسبی قیمت فلز، در طول دهه‌های گذشته بوده است. بدیهی است درصورتی که قیمت فلز روند شناخته شده‌ای را دنبال کند، برخی پیش‌بینی‌ها برای حدود معدن در طول عمر معدن چندان دشوار نخواهد بود و در این شرایط همهٔ تلاش‌های برنامه‌ریز یک معدن بر تهیه برنامه‌ریزی تولید خوب درون حدود پیش‌بینی شدهٔ معدن روباز متمرکز خواهد شد. رویکردهای برنامه‌ریزی خطی نمونه‌های خوبی برای این دیدگاه هستند. برخی از روش‌شناسی‌های این نوع توسط گرشان (۱۹۸۲) و هوتاگسول و کامرون (۱۹۹۲) بدون در نظر گرفتن مشکل عدم‌قطعیت قیمت ارائه شده بود. همچنین بسیاری از تکنیک‌های هوش مصنوعی در روش‌شناسی این گروه که با تعیین محدودهٔ نهایی معدن و برنامه‌ریزی تولید بطور مشترک ارائه شده اند، قرار دارند. دنبی و اشفیلد (۱۹۹۵) از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند ولی موفق‌ترین روش این نوع، توسط تالوینسکی و آندروود

قبل از ۱۹۹۲ ارائه شد که بعدها توسط برخی از برنامه‌ریزان معدن در به کار گیری نرم‌افزار NPV Scheduler استفاده شده است. تالوینسکی و آندرروود مفاهیمی از هر دو بهینه‌سازی تصادفی و شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای تولید الگوریتم خود برای تخمین ارزیابی بهینه از یک معدن روباز ترکیب کردند. بطور کلی محدودیت بسیاری از تکنیک‌های هوش مصنوعی این است که نتایج آنها از یک اجرا به اجرای بعد قابل تولید مجدد نیستند و نقطه نظر این تحقیق این است که قیمت محصول نهایی به عنوان متغیر ثابت در نظر گرفته شده است. گرشان در سال ۱۹۸۷ روش اکتشافی خود را فقط برای برنامه‌ریزی تولید ارائه کرد اما ونگ و سویم (۱۹۹۲) برای تعیین حدود نهایی معدن و برنامه‌ریزی تولید بطور همزمان آن را اصلاح کردند. گرشان مفهوم وزن بلوک وابسته به موقعیت را مورد استفاده قرار داد. وزن وابسته به موقعیت برای یک بلوک با ایجاد یک مخروط رو به پایین از یک بلوک به لبهٔ محدودهٔ نهایی معدن از قبل تعیین شده و با توجه به ارزش همهٔ بلوک‌ها در آن مخروط نتیجه گرفته شده است. در نتیجه وزن بلوک وابسته به اندازه‌گیری شرایط مطلوب از جابجایی یک بلوک معین در زمان خاص آن تهیه می‌شود، که منعکس کنندهٔ کیفیت مادهٔ معدنی، موقعیت بلوک و کیفیت مادهٔ معدنی تحت بلوک است. وانگ و سویم، مفهوم مخروط رو به پایین گرشان را در روش خود مورد استفاده قرار دادند، اگرچه در رویکرد آنها لازم نیست پیت نهایی برای اولین بار تعیین شود. روش آنها با تعیین بزرگترین پیتی که هر دو ملزومات شیب و دستیابی به کل محتوی ذخیره را برآورد می‌سازد، آغاز می‌شود. سپس منظم کردن مخروط‌های مناسب توسط عیارهای متوسط آنها، و حذف به اندازهٔ کافی مخروط‌هایی با پایین‌ترین عیار برای برآورده کردن نیازهای توسعه‌ای معدن، انجام می‌شود. این روش تا آنجایی که هیچ بلوکی برای استخراج شدن باقی نمانده باشد تکرار می‌شود. در این روش، یکسری از پیت‌های رشد یابنده تولید خواهند شد. روش ذکر شده از برخی از نقص‌ها مانند مشکل هم‌پوشانی مخروط‌ها و ناتوانی در به حداکثر رساندن ارزش خالص فعلی در برخی موارد رنج می‌برد. در مجموع در این روش هم مشکل عدم‌قطعیت قیمت مانند سایر الگوریتم‌های مورد بحث، نادیده گرفته شده است. مطالعهٔ موردی که در این مقاله انجام گرفته شد، معدن مس سرچشمه می‌باشد. معدن مس سرچشمه یکی از بزرگترین معادن روباز مس دنیا و بزرگترین معدن روباز در خاورمیانه می‌باشد. این معدن در فاصلهٔ ۱۶۰ کیلومتری جنوب غربی کرمان، ۶۵ کیلومتری جنوب غربی رفسنجان و ۳۰ کیلومتری شمال پاریز قرار گرفته است. در حال حاضر استخراج روزانهٔ این معدن نزدیک به ۶۰ هزارتن ماده معدنی و ۵۰ هزار تن باطله و اکسید است و طبق طرح گسترش مقدار استخراج روزانه بایستی به ۸۰ هزارتن ماده معدنی و ۱۲۰ هزار تن باطله و اکسید برسد. این تحقیق طی چهار مرحله‌ی تعریف مسئله، شناسایی مالی ریسک، مدلسازی و ارزیابی انجام می‌شود. در طی انجام چهار مرحله‌ی ذکر شده، سه سری زمانی قیمت که سری‌های زمانی ماهیانه، فصلی و سالیانه برای مادهٔ معدنی هستند شکل گرفته و سه پروژهٔ محتمل با سه قیمت نقطه‌ای پیش‌بینی شده ایجاد می‌شود. سپس مدلسازی انجام شده و هزینه‌ی ریسک محاسبه می‌شود و به کمک این مدل ارزیابی ریسک، معیاری برای تصمیم‌گیری در خصوص تعیین محدودهٔ نهایی مناسب که دارای ریسک کمینه تحت شرایط عدم‌قطعیت قیمت می‌باشد، ارائه می‌شود که این تحقیق آن را معیار ارزیابی عاری از ریسک (RFVC)

می‌نامد. پس تعیین محدوده نهایی با کمینه‌سازی هزینه‌ی ریسک و بیشینه‌سازی معیار ارزیابی عاری از ریسک تحت شرایط عدم‌قطعیت قیمت محاسبه می‌شود. در این مقاله روش تحقیق شرح داده می‌شود سپس مدل بلوکی مس سرچشمه ایجاد شده و در ادامه الگوریتم طراحی محدودهٔ نهایی معدن روباز مس سرچشمه با توجه به کمینه‌سازی هزینه‌ی ریسک و بیشینه‌سازی معیار ارزیابی عاری از ریسک ارائه می‌شود، سپس نتایج مورد تحلیل و بحث قرار می‌گیرد. در انتها نیز نتیجه‌گیری‌ها ارائه شده و بر اساس آن محدودهٔ نهایی معدن مس سرچشمه با توجه به عدم‌قطعیت قیمت مس، تعیین می‌شود.

یافتن محدودهٔ نهایی معدن با عدم‌قطعیت

بهترین مادهٔ معدنی، ماده‌ای است که بالاترین عیار و کمترین میزان باطله برداری را دارا باشد که پیت مرکزی (نخستین پیت) دارای چنین شرایط و دارای بالاترین ارزش است که باعث بیشینه شدن ارزش پیت بهینه می‌شود. عیار حد روی عیار متوسط، تناژ مادهٔ معدنی قابل استخراج، محدودهٔ نهایی معدن و ترتیب عملیات استخراج مؤثر است {٤}. در هر مقطع یک پیت بهینه وجود دارد که برای آن در آن مقطع زمانی یک عیار حد بهینه وجود دارد که باعث بیشینه شدن ارزش کنونی خالص (NPV) می‌شود. هدف این مطالعه آشنا کردن مهندسان برنامه‌ریز معدن با یک سری از مراحلی که می‌توانند با استفاده از آن ضمن در نظر گرفتن اثرات عدم‌قطعیت قیمت، برنامه‌ریزی معدن را انجام دهند، می باشد. مهمترین عامل در طراحی معدن، قیمت فلز است که موجب عدم‌قطعیت می‌شود. محدودهٔ نهایی بهینهٔ معدن به محدوده‌ای گفته می‌شود که اگر همین امروز همهٔ مادهٔ معدنی و باطله با در نظر گرفتن ملاحظات فنی (شیب نهایی پایدار) از درون پیت طراحی شده استخراج شود، بالاترین سود حاصل شود. برای تعیین محدودهٔ نهایی بهینهٔ معدن ابتدا بایستی بلوک‌بندی کانسار و فهرست‌بندی هر یک از بلوک‌ها (حاوی کلیه داده‌های زمین شناسی) انجام شده و سپس ارزش اقتصادی بلوک‌ها محاسبه شده و در نهایت با به کارگیری دست کم یکی از الگوریتم‌های گوناگون طراحی بهینهٔ معادن روباز طراحی نهایی انجام شود. اگر ارزش بلوک‌ها بیشتر شود پیت بهینه بزرگتر شده و اگر شیب پایدار بیشتر شود پیت بهینه عمیق‌تر خواهد شد. پیت بهینه از محاسبهٔ ارزش بلوک‌ها ناشی می‌شود، خصوصاً وقتی که ارزش زمانی پول مطرح باشد، عکس این قضیه نیز صادق است بدین معنی که ارزش زمانی پول وابسته به یافتن پیت بهینه است. پیش‌بینی قیمت، دست کم برای سه نوع قیمت انجام می‌شود:

- پیش‌بینی قیمت متوسط: قیمت انتظاری؛
- پیش‌بینی قیمت بالا: پیش‌بینی نسبتاً خوش بینانه؛
- پیش‌بینی قیمت پایین: پیش‌بینی قیمت نسبتاً بد بینانه.

چگونگی ورود ریسک به مسئلهٔ تعیین محدودهٔ نهایی معدن

توسعهٔ سریع محدودهٔ نهایی یک معدن روباز همانند محدود کردن توسعهٔ مازاد آن از نظر عملی غیرممکن است و تنها با داشتن پیش‌بینی قبلی نسبت به روند تغییرات قیمت محصول نهایی است که می‌توان برای توسعهٔ آتی برنامه‌ریزی نمود. از طرف دیگر آثار بد توسعهٔ نامناسب معدن همواره سرنوشت یک پروژهٔ معدنی را تهدید می‌کند. یعنی توسعهٔ کمتر از حد لزوم باعث منافع از دست رفته می‌شود و توسعهٔ مازاد بر حد لزوم باعث زیان می‌شود. بنابراین انتخاب محدودهٔ نهایی باید با نگاه

به هر دو سوی این مسئله صورت گیرد. از سوی دیگر مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که از میان عوامل موثر بر تعیین محدودهٔ نهایی، قیمت محصول نهایی که در این جا مس می‌باشد، بیش از همه در این فرآیند دارای اهمیت هستند. امّا با توجه به ناپایایی سری‌های زمانی قیمت فلزات، پیش‌بینی رفتار آنها دشوار است و عملاً هرگونه پیش‌بینی درخصوص قیمت فلزات با درجه‌ای از عدم‌قطعیت همراه است که این عدم‌قطعیت عملاً به صورت توسعهٔ کمتر از حد لزوم معدن یا توسعهٔ مازاد بر حد لزوم معدن به فرآیند برنامه‌ریزی معدن و تعیین محدودهٔ نهایی تحمیل می‌شود. بنابراین در این بخش از این تحقیق با توجه به خطای انکار ناپذیر پیش‌بینی قیمت، تلاش می‌شود که به ریسک ناشی از این خطای پیش‌بینی توجه شود. به این منظور از الگوریتم ارائه شده توسط اکبری و همکاران (۲۰۰۸) استفاده می‌شود. در این الگوریتم پس از تعریف ریسک و هزینهٔ ریسک در فرآیند تعیین محدودهٔ نهایی، یک مدل احتمالاتی ارزیابی ریسک با نگاهی دو سویه به هر دو وجه مسئله، یعنی ریسک ناشی از توسعهٔ کمتر از حد لزوم معدن و ریسک ناشی از توسعهٔ مازاد بر حد لزوم معدن توسعه داده شده است. سپس به کمک این مدل ارزیابی ریسک معیاری برای تصمیم‌گیری در خصوص تعیین محدودهٔ نهایی مناسب که دارای ریسک کمینه تحت شرایط عدم‌قطعیت قیمت می‌باشد، ارائه شده است که معیار ارزیابی عاری از ریسک (RFVC) نامگذاری شده و در این تحقیق برای تعیین محدودهٔ نهایی معدن روباز به کار می‌رود. در واقع این تحقیق فرآیند تعیین محدودهٔ نهایی را فرآیندی می‌داند که ارزیابی ریسک جزء لاینفک آن است.

روند کلی ورود ریسک در مطالعات اقتصادی و فنی

هرگاه این فرض که رفتار متغیرها دارای قطعیت است متزلزل شود، ریسک وارد فرآیند ارزیابی و تصمیم‌گیری خواهد شد. تحلیل این ریسک وقتی میسر است که بتوان احتمال وقوع تغییرات متغیرهای دارای عدم‌قطعیت را در نظر گرفت. برای وارد کردن ریسک در یک مسئلهٔ مهندسی لازم است که تعریف مسئله، شناسایی مالی ریسک، مدلسازی و ارزیابی به ترتیب انجام شوند. اصولاً تحلیل و ارزیابی ریسک زمانی وارد فرآیند برنامه‌ریزی می‌شود که عامل یا عواملی موثر و دارای نقش در مسئله وجود داشته باشند که در آینده غیر قابل پیش‌بینی باشند و دارای تغییراتی نامعلوم باشند. تحت این شرایط است که یک مسئلهٔ درگیر با ریسک تعریف می‌شود و تمامی عوامل موثر بر آن شناسایی می‌شوند تا اثرگذاری عواملی که دارای تغییرات نامعلوم در آینده هستند یا در واقع دارای عدم‌قطعیت می‌باشند بر سایر عوامل مورد بررسی مشخص شوند و مکانیزم اثرگذاری آن‌ها در ایجاد ریسک شناخته شود. در مرحله‌ی بعد باید آثار مالی ریسک درگیر در مسئله از طریق عامل یا عوامل دارای عدم‌قطعیت و به کمک غیرقطعی فرض کردن آن در چارچوب دامنه‌ای از اتفاقات ممکنه کاملاً تبیین شود تا زمینهٔ مدلسازی فراهم شود. مدل مورد استفاده نه تنها در این فرآیند به تمامی آثار مستقیم عوامل دارای عدم‌قطعیت توجه می‌کند، بلکه به آثار غیرمستقیم این عوامل از طریق سایر پارامترهای مسئله نیز توجه می‌نماید. مدلسازی باید حالتی محافظه کارانه داشته باشد و کاملاً بدبینانه نسبت به آینده نگاه شود. معمولاً مدل‌های حاصله وابسته به احتمال وقوع پیشامدها هستند که پیچیدگی و دشواری مسئله در همین احتمالات نهفته است. شایان ذکر است که محدود کردن این مدل‌ها به شرایطی که دارای احتمالات گسسته هستند به حل آن‌ها

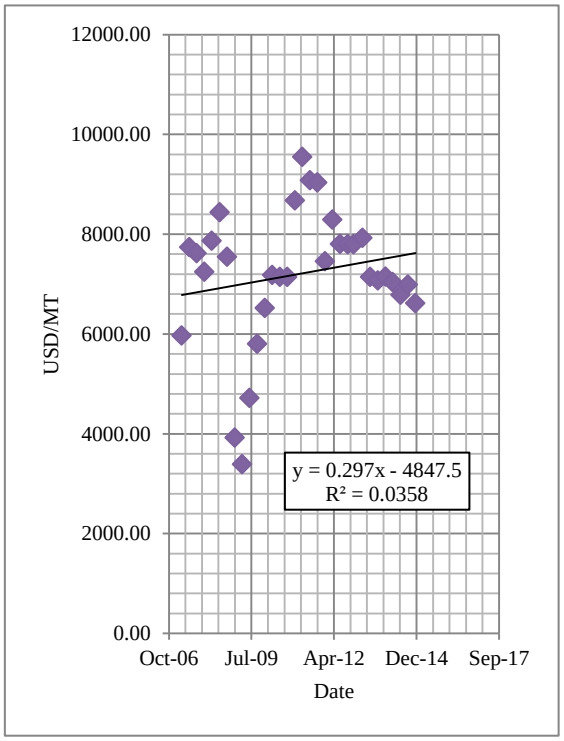
کمک می‌کند که در توسعهٔ RFVC نیز از همین روش استفاده شده است. نهایتاً در ارزیابی با هدف انتخاب شرایط و برنامه‌ای که از نظر ریسک در بهترین وضعیت باشد و کمترین مخاطرهٔ مالی را به همراه داشته باشد از مدل توسعهٔ داده شده استفاده می‌شود.

تعریف مسئله

این مرحله شامل بیان کامل مسئله، توسط مدل ارزیابی ریسک مورد استفاده در این تحقیق است. در این مرحله باید کلیهٔ متغیرهای درگیر با تعیین محدودهٔ نهایی شناسایی شوند و از میان آنها متغیرهایی که دچار عدم‌قطعیت هستند به دقت بررسی شوند تا مواردی که دارای حساسیت بیشتری هستند وارد فرآیند مدلسازی به منظور ارزیابی ریسک شوند ضمن تعریف دقیق مفهوم و مسئلهٔ تعیین محدودهٔ نهایی، پارامترهای درگیر در مسئله مورد تحلیل حساسیت قرار گرفته‌اند که نهایتاً قیمت به عنوان حساس‌ترین عامل در فرآیند تعیین محدودهٔ نهایی مورد شناسایی قرار گرفت و مدلسازی بر مبنای قیمت به عنوان مؤثرترین عامل در فرآیند تعیین محدودهٔ نهایی که بنا بر مشاهدات اخیر از عدم‌قطعیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است، انجام شده است. همچنین از آنجایی که نهایتاً چنین مسئله‌ای باید منتهی به ارزیابی شود، مسئله باید در همین مرحله بصورت جزئی‌تر و در چارچوب یک مثال عملی به دقت تعریف شود که در این مقاله مثال عملی معدن مس سرچشمه می باشد.

شناسایی مالی ریسک درگیر در مسئله

چیزی که قیمت را دارای عدم‌قطعیت می‌کند، ضعف مدل‌های پیش‌بینی قیمت است. قبل از نوسانات اخیر در قیمت فلزات، روش مرسوم پیش‌بینی قیمت فلزات



تحلیل ترند بود که در شرایط فعلی چنانچه ذیلاً ملاحظه خواهد گردید به هیچ وجه پاسخگو نمی‌باشد. شایان ذکر است که در حال حاضر تلاش‌هایی برای دستیابی به مدل‌های پیش‌بینی قیمت با روش‌های نوین در حال انجام است. اما به هر حال هر روش پیش‌بینی قیمت با مقداری از خطا همراه است، علاوه بر اینکه کارآیی آن هر چند که از طریق شاخص‌های آماری به اثبات برسد، نهایتاً در طول زمان است که کاملاً محک می‌خورد و قابلیت اعتماد آن افزایش می‌یابد. بنابراین مسئلهٔ عدم‌قطعیت قیمت محصول نهایی همواره جزء لاینفک مسئلهٔ برنامه‌ریزی معدن و تعیین محدودهٔ نهایی خواهد بود {۲}. در بررسی کارآیی پیش‌بینی قیمت فلزات به روش ترند، سه معادله حاصل از تحلیل ترند برای پیش‌بینی قیمت مس به عنوان مثال در اینجا درج شده‌اند. این سه مدل پیش‌بینی قیمت بر مبنای سه نوع سری زمانی مختلف قیمت مس که سری‌های زمانی ماهانه،

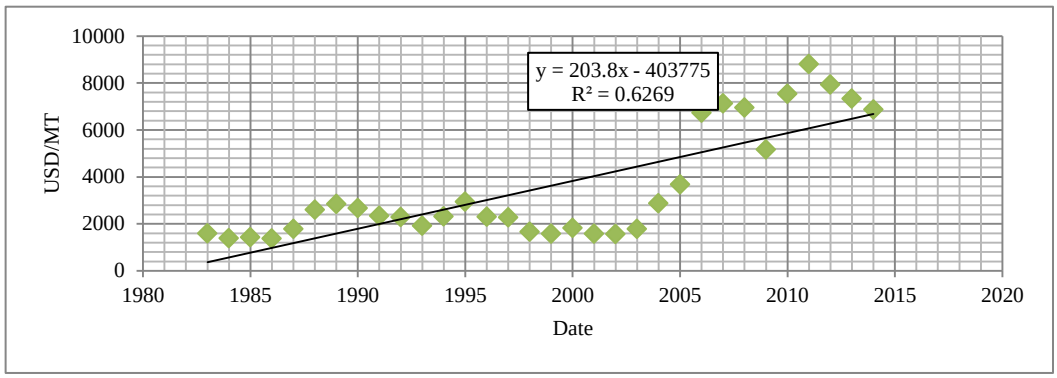
فصلی، و سالانه هستند شکل گرفته‌انـد. روابـط زیـر بـه ترتیب نشانگر آنها می‌باشد.

$$y = ۰/۲۹٤۷x - ٤۷٤۳/۵ \quad (۱)$$

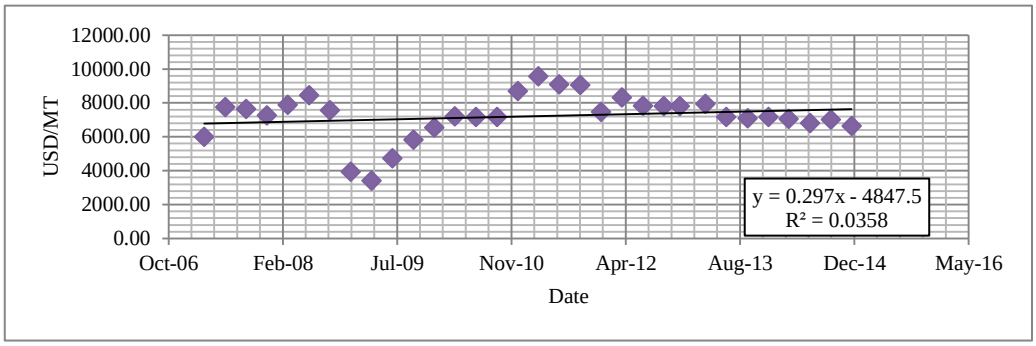
$$y = ۰/۲۹۷x - ٤۸٤۷/۵ \quad (۲)$$

$$y = ۲۰۳/۸x - ٤۰۳۷۷۵ \quad (۳)$$

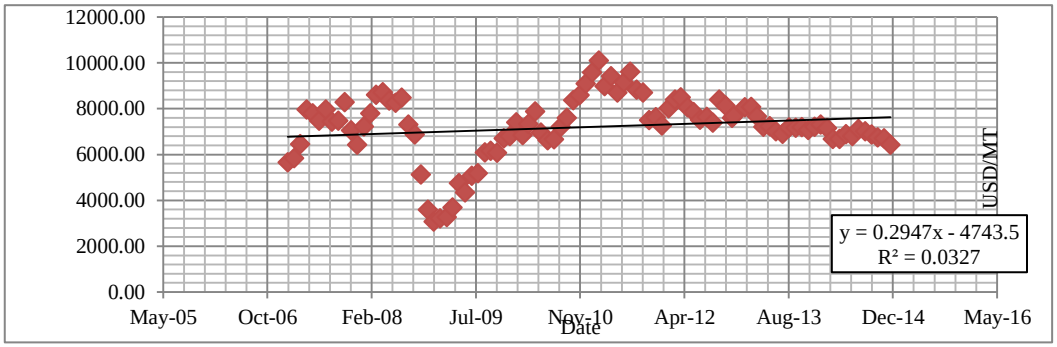
شکل‌های زیر نشان دهندهٔ رگرسیون‌های بدست آمده از قیمت‌های دسته‌بندی شدهٔ فوق می‌باشند.



شکل ۱: رگرسیون بدست آمده از قیمت سالانهٔ مس



شکل ۲: رگرسیون بدست آمده از قیمت فصلی مس



شکل ۲: رگرسیون بدست آمده از قیمت ماهانهٔ مس

همچنین، هزینهٔ سرمایه‌ای از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$CC = ۹۹٦٤۳٥\ t^{۰/٦} \qquad (٤)$$

بر مبنای این سه مدل پیش‌بینی، برنامه‌ریز معدنی که هدف آن شروع کار در میانهٔ سال ۲۰۱٤ می‌باشد با سه قیمت محتمل برای فلز مس در این تاریخ مواجه است. اولین مدل پیش‌بینی قیمت (رابطهٔ ۱)، قیمت مس را برای این تاریخ ۷۵۷۷ دلار آمریکا بر تن پیش‌بینی می‌کند. دومین مدل (رابطهٔ ۲) قیمت را در تاریخ مذکور ۷۵٦۹ دلار آمریکا بر تن و سومین مدل (رابطهٔ ۳) این قیمت را ٦٦۷۸ دلار آمریکا بر تن پیش‌بینی می‌کند. بنابراین قیمت مس در تاریخ مذکور می‌تواند بین ٦٦۷۸ تا ۷۵۷۷ دلار آمریکا بر تن باشد. با در نظر داشتن این شرایط، برنامه‌ریز معدنی در عمل با پروژه‌های مختلفی بر مبنای این بازهٔ وسیع قیمت‌های محتمل مواجه است. مواجهه با پروژه‌های متفاوت به دلیل قیمت‌های پیش‌بینی شدهٔ متفاوت و عیار حدهای مربوط به آنها است.

جدول ۱: سه پروژهٔ محتمل برای منبع معدنی با در نظر گرفتن سه نوع پیش‌بینی قیمت مس برای میانهٔ سال ۲۰۱٤

موارد	قیمت‌های پیش‌بینی شده	احتمالات	عیار حد	تناژ مادهٔ معدنی
A	۶,۶۷۸	P(A)	۰/۲۰۷۹	۵۰۵,۷۵۳,۵۰۰
B	۷,۵۶۹	P(B)	۰/۱۸۲۳	۵۱۷,۴۴۰,۰۰۰
C	۷,۵۷۷	P(C)	۰/۱۸۱۷	۵۱۷,۸۲۵,۸۷۵

جدول ۲: نتایج مالی پروژه براساس سه قیمت ممکن مختلف

موارد	احتمالات	هزینه‌های سرمایه‌ای (دلار بر تن کوچک)	هزینه‌های عملیاتی (دلار بر تن)	هزینه‌های ذوب و پالایش (دلار بر تن)	تولید سالیانه (میلیون تن)	ارزش خالص فعلی (دلار)
A	P(A)	۶۹۳,۴۶۰,۴۸۱	۱۱/۶۸۴۳	۴۳۴/۷	۲۲	۸,۷۸۷,۲۰۵,۰۴۶
B	P(B)	۶۸۵,۳۰۵,۶۸۴	۱۱/۶۸۴۳	۴۳۴/۷	۲۲	۱۰,۴۱۴,۲۸۵,۱۷۰
C	P(C)	۶۸۵,۶۱۲,۲۷۴	۱۱/۶۸۴۳	۴۳۴/۷	۲۲	۱۰,۴۴۹,۸۶۲,۵۴۹

مدلسازی

یک معدن روباز یک ساختار ساده و انعطاف‌پذیر نیست و نمی‌توان با هر تغییر قیمتی به سهولت آن را اصلاح نمود. اگر قیمت مفروض برنامه‌ریز معدن تخمینی کمتر از واقع باشد، پروژه با عدم نفع روبرو می‌شود زیرا معدن نمی‌تواند به سرعت و همگام با افزایش قیمت توسعه یابد. بدترین حالت از چنین شرایطی وقتی واقع خواهد شد که بیشترین قیمت ممکن تحت شرایطی اتفاق بیافتد که برنامه‌ریز معدن کمترین قیمت ممکن را مفروض داشته باشد. اگر موردA پیشامد کمترین قیمت ممکن باشد و مورد C پیشامد بیشترین قیمت ممکن باشد، عدم نفع ممکن را می توان با رابطهٔ ۵ نشان داد.

$$Loss\ benefit = P(C|A') \times (NPV_C - NPV_A) \quad (۵)$$

همچنین زیان ممکن تحت این شرایط توسط رابطهٔ زیر نشان داده شده است:

$$Loss = P(A|C') \times \{(Cost\ C - Cost\ A) - [(PV_C|p_A) - PV_A]\} \quad (٦)$$

اگر مورد A پیشامد کمترین قیمت ممکن باشد و مورد C پیشامد بیشترین قیمت ممکن باشد و مورد B پیشامد بینابینی قیمت ممکن باشد، هزینهٔ ریسک ممکن را تحت این شرایط که شامل هم عدم نفع و هم زیان است می توان با رابطهٔ ۷ نشان داد.

$$Loss + Loss\ benefit = P(C|B') \times (NPV_C - NPV_B) + P(A|B') \times \{(Cost\ B - Cost\ A) - [(PV_B|p_A) - PV_A]\} \quad (۷)$$

ارزیابی

پروسهٔ ارزیابی از دو بخش عمده تشکیل شده است:

- یافتن احتمالات مورد نیاز مدل ارزیابی ریسک؛
- انجام ارزیابی (محاسبهٔ هزینهٔ ریسک مرتبط با هر برنامه و محاسبهٔ معیار ارزیابی عاری از ریسک هر برنامه).

پس از آن برنامه‌ریز با کمک مشاهدهٔ رفتار RFVC در طول بازهٔ قیمت می‌تواند قیمتی را که بیشترین RFVC سبب شده است را برای برنامه‌ریزی معدن و تعیین محدوده‌هایی انتخاب کند.

۸-۱- یافتن احتمالات مورد نیاز مدل ارزیابی ریسک

از آنجایی که رفتار یک منبع از نظر RC و RFVC که به ازای قیمت‌های مختلف بدست می‌آید غیر قابل پیش‌بینی است، باید ارزیابی و محاسبهٔ معیار ارزیابی عاری از ریسک به ازای تمامی طول بازهٔ قیمت‌های محتمل محاسبه شود. بنابراین پیدا کردن احتمالات نیز شامل همین شرایط خواهد بود. در این مقاله بازهٔ قیمت در نظر گرفته شده با توجه به قیمت‌های نقطه‌ای پیش‌بینی شده بر مبنای سه سری زمانی مختلف قیمت مس، بازه‌ای از ٦٦٧٨ دلار تا ۷۵۷۸ دلار می‌باشد. پس بطور کلی برای کمترین قیمت ممکن (A)، حالت بینابینی قیمت (B) و بالاترین قیمت ممکن (C)، به ترتیب سه قیمت ٦٦٧٨ دلار (A)، ۷۵۵۸ دلار (B) و ۷۵۷۸ دلار (C) بدست آمده است. تعریف احتمال وقوع هر عضو یک چنین فضای نمونه‌ای غیرممکن خواهد بود یا به عبارت دیگر

احتمال وقوع هر رویداد نزدیک صفر خواهد بود. برای مدیریت این مسئله باید فضای نمونهٔ پیوسته را گسسته نمود. به منظور گسسته‌سازی از فضای نمونه، لازم است مجموعه‌هایی از داده‌های قیمت را به عنوان وقایع محتمل به جای تعداد نامحدودی از قیمت‌های نقطه‌ای ممکن در نظر گرفت. پس هر زیربازهٔ قیمتی ۲۰ دلاری به عنوان یک مجموعه در نظر گرفته می‌شود که این مجموعه یک پیشامد محتمل است.

بنابراین با توجه به بررسی انجام شده در مورد بازهٔ قیمت، بالاترین قیمت ۷۵۷۸ دلار و کمترین قیمت ٦٦٧٨ دلار در نظر گرفته شده است. فضای نمونه مفروض از ٤٥ عضو تشکیل شده است. $\div \left(\left(٧٥٧٨ - ٦٦٧٨\right)\right.$ $\left.= ٤٥\right) = ٢٠$. جدول زیر نشان دهندهٔ مفهوم نموداری بدست آمده از فضای نمونهٔ گسسته است:

جدول ۳: مفهوم نموداری بدست آمده از فضای نمونهٔ گسسته

۶۷۹۸	۶۷۷۸	۶۷۵۸	۶۷۳۸	۶۷۱۸	۶۶۹۸	۶۶۷۸
۶۹۳۸	۶۹۱۸	۶۸۹۸	۶۸۷۸	۶۸۵۸	۶۸۳۸	۶۸۱۸
۷۰۷۸	۷۰۵۸	۷۰۳۸	۷۰۱۸	۶۹۹۸	۶۹۷۸	۶۹۵۸
۷۲۱۸	۷۱۹۸	۷۱۷۸	۷۱۵۸	۷۱۳۸	۷۱۱۸	۷۰۹۸
۷۳۵۸	۷۳۳۸	۷۳۱۸	۷۲۹۸	۷۲۷۸	۷۲۵۸	۷۲۳۸
۷۴۹۸	۷۴۷۸	۷۴۵۸	۷۴۳۸	۷۴۱۸	۷۳۹۸	۷۳۷۸
			۷۵۷۸	۷۵۵۸	۷۵۳۸	۷۵۱۸

جدول٤: ضرائب وزنی نشان دهندهٔ احتمالات وقوع

۰/۲۰۴	۰/۲۰۴۷	۰/۲۰۵۳	۰/۲۰۶	۰/۲۰۶۶	۰/۲۰۷۳	۰/۲۰۷۹
۰/۱۹۹۶	۰/۲۰۰۲	۰/۲۰۰۹	۰/۲۰۱۵	۰/۲۰۲۱	۰/۲۰۲۷	۰/۲۰۳۴
۰/۱۹۵۴	۰/۱۹۶	۰/۱۹۶۶	۰/۱۹۷۲	۰/۱۹۷۸	۰/۱۹۸۴	۰/۱۹۹
۰/۱۹۱۴	۰/۱۹۲	۰/۱۹۲۵	۰/۱۹۳	۰/۱۹۳۷	۰/۱۹۴۳	۰/۱۹۴۸
۰/۱۸۷۵	۰/۱۸۸۱	۰/۱۸۸۶	۰/۱۸۹۲	۰/۱۸۹۷	۰/۱۹۰۳	۰/۱۹۰۸
۰/۱۸۳۸	۰/۱۸۴۳	۰/۱۸۴۸	۰/۱۸۵۴	۰/۱۸۵۹	۰/۱۸۶۴	۰/۱۸۷
			۰/۱۸۱۷	۰/۱۸۲۳	۰/۱۸۲۸	۰/۱۸۳۳

اعداد درج شده در جدول فوق نشان دسته‌های هر زیر بازه از قیمت‌ها می‌باشند. به منظور نسبت دادن یک احتمال وقوع به هر دسته یا به تعبیر دیگر هر مجموعه یا هر رویداد، در ابتدا باید یک فضای نمونهٔ همگن که در آن احتمال وقوع همهٔ رویدادها یکسان هستند، مفروض داشت. در مرحله‌ی بعدی ضریب همبستگی سه مدل پیش‌بینی قیمت نشان داده شده طی روابط ۱ تا ۳، به عنوان ضرایب وزنی برای احتمالات وقوع پیشامدهای مربوط به خود در نظر گرفته شده‌اند. ضرایب وزنی سایر قیمت‌های ممکن واقع شده در بین این سه قیمت نقطه‌ای از طریق درون‌یابی خطی بین سه ضریب وزنی نسبت داده شده به سه قیمت نقطه‌ای بدست می‌آیند. این ضرایب وزنی که معرف احتمالات وقوع خواهند بود در جدول نشان داده شده است.

با توجه به توضیحات و جدول فوق، احتمالات حدود پایینی، میانی و بالایی قیمت‌ها به ترتیب $P(A) = ۰/۲۰۷۹$، $P(B) = ۰/۱۸۲۳$ و $P(C) = ۰/۱۸۱۷$ بدست آمده است. همچنین این جدول، یک نظام احتمالاتی مقایسه‌ای برای فضای نمونه می‌باشد که برای استفاده از مدل ارزیابی ریسک توسعه داده شده و باید نرمال شود. نسخهٔ نرمالیزه شدهٔ استاندارد در جدول زیر درج شده است.

جدول ۵: نسخهٔ نرمالیزه شدهٔ استاندارد

۰/۸۹۲۵	۰/۹۰۴۹	۰/۹۱۷۷	۰/۹۲۷۹	۰/۹۳۸۲	۰/۹۴۶۳	۰/۹۵۴۵
۰/۷۶۴۲	۰/۷۸۵۲	۰/۸۰۷۸	۰/۸۲۶۴	۰/۸۴۶۱	۰/۸۶۲۱	۰/۸۷۷۰
۰/۵۶۷۵	۰/۵۹۸۷	۰/۶۲۵۵	۰/۶۵۱۷	۰/۶۸۰۸	۰/۷۰۵۴	۰/۷۲۹۱
۰/۳۶۶۹	۰/۳۹۳۶	۰/۴۲۰۷	۰/۴۵۲۲	۰/۴۸۰۱	۰/۵۰۸۰	۰/۵۳۹۸
۰/۱۹۴۹	۰/۲۱۴۸	۰/۲۳۸۹	۰/۲۶۱۱	۰/۲۸۴۳	۰/۳۱۲۱	۰/۳۳۷۲
۰/۰۸۵۳	۰/۰۹۶۸	۰/۱۰۹۳	۰/۱۲۵۱	۰/۱۴	۰/۱۵۶۲	۰/۱۷۶۲
			۰/۰۵۳۷	۰/۰۵۵۹	۰/۰۶۴۳	۰/۰۷۳۵

همچنین، نیاز به هزینه‌های عملیاتی معدن و کارخانه و همینطور هزینه‌های ذوب و پالایش است. جدول هر یک از هزینه‌های ذکر شده مطابق الگوی ارائه شده شرکت ملی صنایع مس ایران که قدری با الگوی استاندارد مهندسی هزینه متفاوت است ولی جمع کل ارقام آن قابل استناد می باشد در زیر آورده شده اند.

جدول ٦: هزینه‌های ذوب و پالایش

هزینه (دلار)	سال	هزینه (دلار)	سال
٣٩٤	٢٠٠٩	٣٥٠	٢٠٠٣
٤٠١/٨	٢٠١٠	٣٥٧	٢٠٠٤
٤٠٩/٨	٢٠١١	٣٦٤/١	٢٠٠٥
٤١٧/٩	٢٠١٢	٣٧١/٤	٢٠٠٦
٤٢٦/٢	٢٠١٣	٣٧٨/٨	٢٠٠٧
٤٣٤/٧	٢٠١٤	٣٨٦/٣	٢٠٠٨

همینطور عیار حد مادهٔ معدنی برای هر مورد در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ٧: عیارهای حد مادهٔ معدنی

٠/٢٠٤	٠/٢٠٤٧	٠/٢٠٥٣	٠/٢٠٦	٠/٢٠٦٦	٠/٢٠٧٣	٠/٢٠٧٩
٠/١٩٩٦	٠/٢٠٠٢	٠/٢٠٠٩	٠/٢٠١٥	٠/٢٠٢١	٠/٢٠٢٧	٠/٢٠٣٤
٠/١٩٥٤	٠/١٩٦	٠/١٩٦٦	٠/١٩٧٢	٠/١٩٧٨	٠/١٩٨٤	٠/١٩٩
٠/١٩١٤	٠/١٩٢	٠/١٩٢٥	٠/١٩٣	٠/١٩٣٧	٠/١٩٤٣	٠/١٩٤٨
٠/١٨٧٥	٠/١٨٨١	٠/١٨٨٦	٠/١٨٩٢	٠/١٨٩٧	٠/١٩٠٣	٠/١٩٠٨
٠/١٨٣٨	٠/١٨٤٣	٠/١٨٤٨	٠/١٨٥٤	٠/١٨٥٩	٠/١٨٦٤	٠/١٨٧
			٠/١٨١٧	٠/١٨٢٣	٠/١٨٢٨	٠/١٨٣٣

انجام ارزیابی

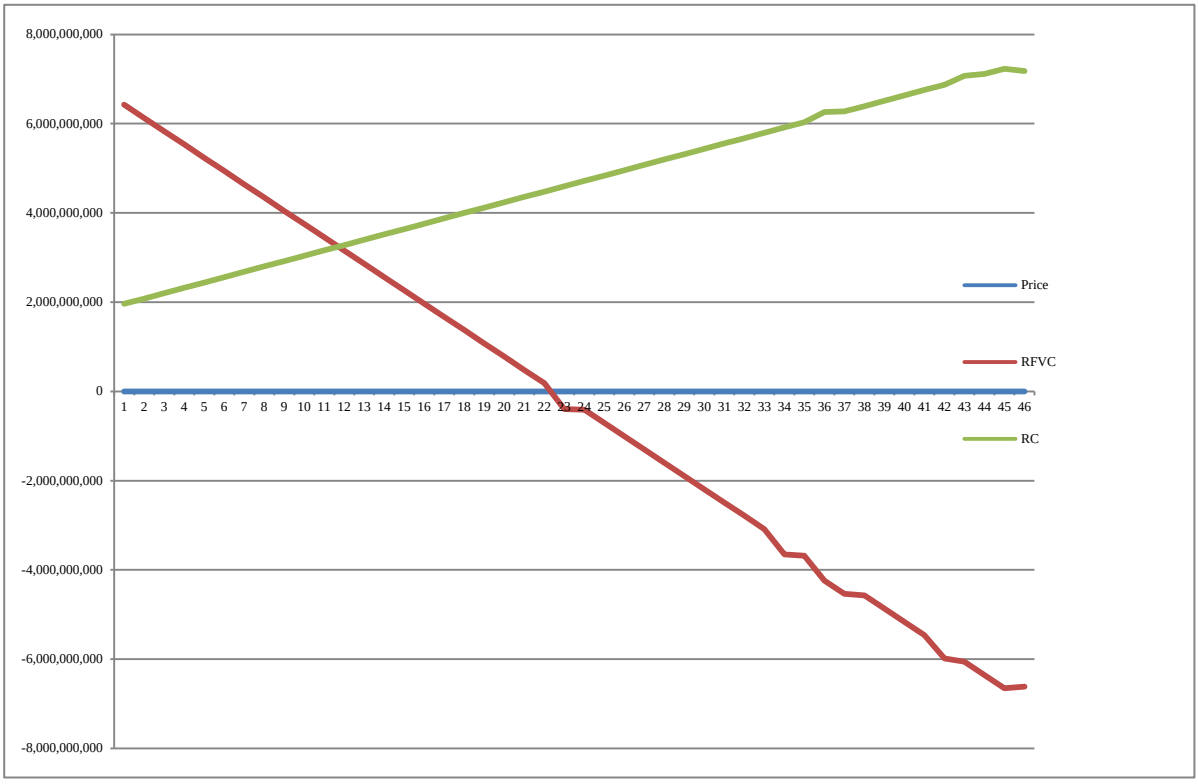
رابطهٔ ۵، ٦ و ۷ برای محاسبهٔ RFVC وRC مورد استفاده قرار می‌گیرد که نتایج این محاسبات در جدول زیر ارائـه شده است:

جدول ۸: نتایج محاسبه شدهٔ هزینه‌ی ریسک و معیار ارزیابی عاری از ریسک

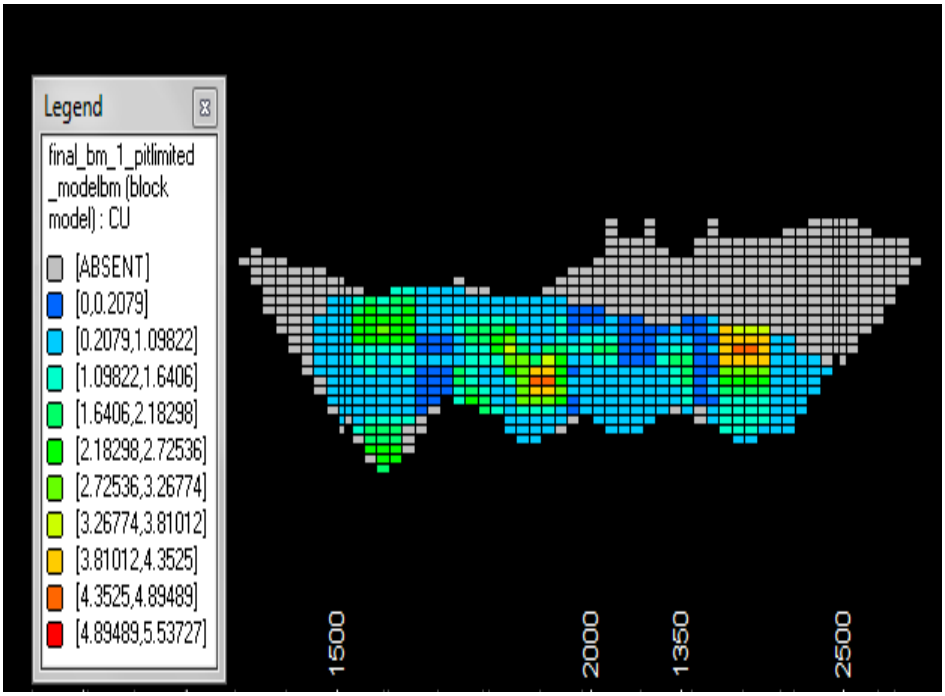
هزینهٔ ریسک	معیار ارزیابی عاری از ریسک	قیمت	موارد	هزینهٔ ریسک	معیار ارزیابی عاری از ریسک	قیمت	موارد
۴،۷۱۷،۳۲۴،۳۵۰	-۴۰۹،۹۴۳،۰۳۲	۷،۱۳۸	۲۴	۱،۹۶۲،۳۰۱،۶۳۹	۶،۴۲۵،۰۸۵،۵۷۷	۶،۶۷۸	۱
۴،۸۳۷،۱۰۷،۹۴۶	-۷۰۷،۱۱۸،۱۸۹	۷،۱۵۸	۲۵	۲،۰۸۲،۰۸۵،۲۳۵	۶،۱۲۷،۹۱۰،۴۲۱	۶،۶۹۸	۲
۴،۹۵۶،۸۹۱،۵۴۲	-۱،۰۰۴،۲۹۳،۳۴۶	۷،۱۷۸	۲۶	۲،۲۰۱،۸۶۸،۸۳۱	۵،۸۳۰،۷۳۵،۲۶۴	۶،۷۱۸	۳
۵،۰۷۶،۶۷۵،۱۳۸	-۱،۳۰۱،۴۶۸،۵۰۳	۷،۱۹۸	۲۷	۲،۳۲۱،۶۵۲،۴۲۷	۵،۵۳۳،۵۶۰،۱۰۷	۶،۷۳۸	۴
۵،۱۹۶،۴۵۸،۷۳۴	-۱،۵۹۸،۶۴۳،۶۶۰	۷،۲۱۸	۲۸	۲،۴۴۱،۴۳۶،۰۲۳	۵،۲۳۶،۳۸۴،۹۵۰	۶،۷۵۸	۵
۵،۳۱۶،۲۴۲،۳۳۱	-۱،۸۹۵،۸۱۸،۸۱۷	۷،۲۳۸	۲۹	۲،۵۶۱،۲۱۹،۶۱۹	۴،۹۳۹،۲۰۹،۷۹۳	۶،۷۷۸	۶
۵،۴۳۶،۰۲۵،۹۲۷	-۲،۱۹۲،۹۹۳،۹۷۴	۷،۲۵۸	۳۰	۲،۶۸۱،۰۰۳،۲۱۶	۴،۶۴۲،۰۳۴،۶۳۶	۶،۷۹۸	۷
۵،۵۵۵،۸۰۹،۵۲۳	-۲،۴۹۰،۱۶۹،۱۳۱	۷،۲۷۸	۳۱	۲،۸۰۰،۷۸۶،۸۱۲	۴،۳۴۴،۸۵۹،۴۷۹	۶،۸۱۸	۸
۵،۶۷۵،۵۹۳،۱۱۹	-۲،۷۸۷،۳۴۴،۲۸۸	۷،۲۹۸	۳۲	۲،۹۲۰،۵۷۰،۴۰۸	۴،۰۴۷،۶۸۴،۳۲۲	۶،۸۳۸	۹
۵،۷۹۵،۳۷۶،۷۱۵	-۳،۰۸۴،۵۱۹،۴۴۵	۷،۳۱۸	۳۳	۳،۰۴۰،۳۵۴،۰۰۴	۳،۷۵۰،۵۰۹،۱۶۵	۶،۸۵۸	۱۰
۵،۹۱۵،۱۶۰،۳۱۱	-۳،۶۵۴،۱۰۵،۱۶۲	۷،۳۳۸	۳۴	۳،۱۶۰،۱۳۷،۶۰۰	۳،۴۵۳،۳۳۴،۰۰۸	۶،۸۷۸	۱۱
۶،۰۳۴،۹۴۳،۹۰۷	-۳،۶۷۸،۸۶۹،۷۵۸	۷،۳۵۸	۳۵	۳،۲۷۹،۹۲۱،۱۹۶	۳،۱۵۶،۱۵۸،۸۵۱	۶،۸۹۸	۱۲
۶،۲۶۲،۵۳۲،۷۴۰	-۴،۲۴۳،۵۰۲،۵۵۷	۷،۳۷۸	۳۶	۳،۳۹۹،۷۰۴،۷۹۲	۲،۸۵۸،۹۸۳،۶۹۴	۶،۹۱۸	۱۳
۶،۲۷۴،۵۱۱،۱۰۰	-۴،۵۳۷،۳۷۵،۷۶۷	۷،۳۹۸	۳۷	۳،۵۱۹،۴۸۸،۳۸۹	۲،۵۶۱،۸۰۸،۵۳۷	۶،۹۳۸	۱۴
۶،۳۹۴،۲۹۴،۶۹۶	-۴،۵۷۰،۳۹۵،۲۲۹	۷،۴۱۸	۳۸	۳،۶۳۹،۲۷۱،۹۸۵	۲،۲۶۴،۶۳۳،۳۸۰	۶،۹۵۸	۱۵
۶،۵۱۴،۰۷۸،۲۹۲	-۴،۸۶۷،۵۷۰،۳۸۶	۷،۴۳۸	۳۹	۳،۷۵۹،۰۵۵،۵۸۱	۱،۹۶۷،۴۵۸،۲۲۳	۶،۹۷۸	۱۶
۶،۶۳۳،۸۶۱،۸۸۸	-۵،۱۶۴،۷۴۵،۵۴۳	۷،۴۵۸	۴۰	۳،۸۷۸،۸۳۹،۱۷۷	۱،۶۷۰،۲۸۳،۰۶۶	۶،۹۹۸	۱۷
۶،۷۵۳،۶۴۵،۴۸۴	-۵،۴۶۱،۹۲۰،۷۰۰	۷،۴۷۸	۴۱	۳،۹۹۸،۶۲۲،۷۷۳	۱،۳۷۳،۱۰۷،۹۱۰	۷،۰۱۸	۱۸
۶،۸۷۳،۴۲۹،۰۸۰	-۵،۹۸۱،۹۷۷،۲۲۵	۷،۴۹۸	۴۲	۴،۱۱۸،۴۰۶،۳۶۹	۱،۰۷۵،۹۳۲،۷۵۳	۷،۰۳۸	۱۹
۷،۰۷۳،۰۶۸،۴۰۷	-۶،۰۵۶،۲۷۱،۰۱۴	۷،۵۱۸	۴۳	۴،۲۳۸،۱۸۹،۹۶۵	۷۷۸،۷۵۷،۵۹۶	۷،۰۵۸	۲۰
۷،۱۱۲،۹۹۶،۲۷۳	-۶،۳۵۳،۴۴۶،۱۷۱	۷،۵۳۸	۴۴	۴،۳۵۷،۹۷۳،۵۶۲	۴۸۱،۵۸۲،۴۳۹	۷،۰۷۸	۲۱
۷،۲۳۲،۷۷۹،۸۶۹	-۶،۶۵۰،۶۲۱،۳۲۸	۷،۵۵۸	۴۵	۴،۴۷۷،۷۵۷،۱۵۸	۱۸۴،۴۰۷،۲۸۲	۷،۰۹۸	۲۲
۷،۱۷۸،۳۶۵،۵۳۵	-۶،۶۱۷،۲۰۷،۹۱۶	۷،۵۷۸	۴۶	۴،۵۹۷،۵۴۰،۷۵۴	-۳۹۷،۰۲۲،۳۷۳	۷،۱۱۸	۲۳

بر طبق جدول فوق، نتیجهٔ تغییر روند RC و RFVC به

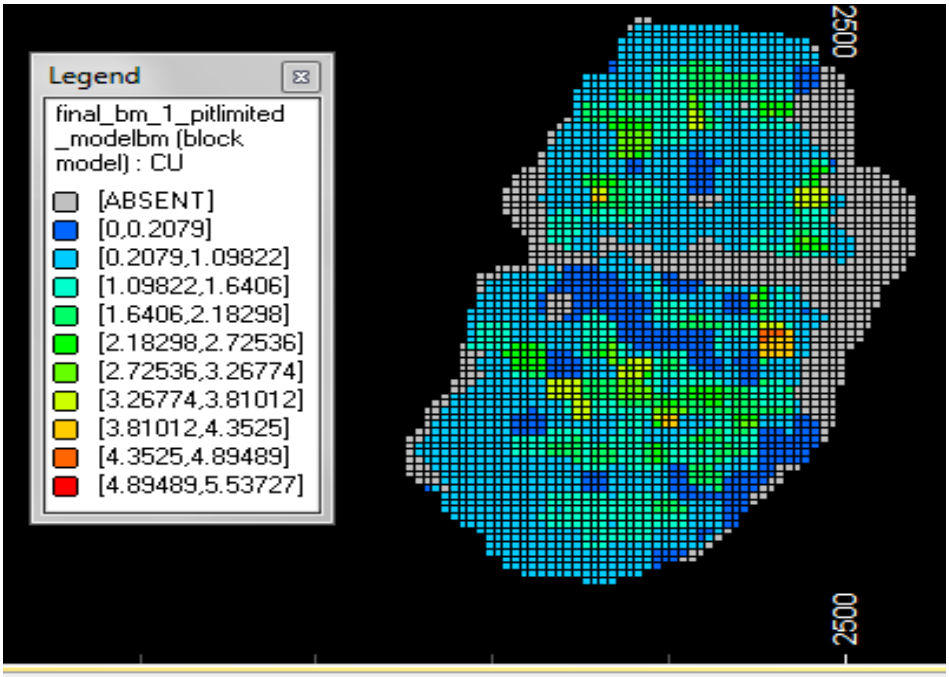
صورت زیر نشان داده شده است:



شکل ۳: روند هزینهٔ ریسک و معیار ارزیابی عاری از ریسک



شکل ٤: نمای بالا از محدودهٔ نهایی معدن



شکل ۵: نمای کنار از محدودهٔ نهایی معدن

نتیجه‌گیری

با توجه به نمودار فوق، روند صعودی هزینهٔ ریسک و روند نزولی RFVC در برابر رشد قیمت به این معنی است که برنامه‌ریزی باید بر حسب کمترین قیمت ممکن صورت گیرد. این قیمت همان قیمتی است که بر مبنای سری زمانی سالیانهٔ قیمت مس بدست آمده است. احتمالاً این تغییر روند نمودار به دلیل تأثیر افزایشی قیمت بر عیار حد و تناژ است، به طوری که موجب نزولی شدن عیار حد و صعودی شدن تناژ مادهٔ معدنی (مس) می‌شود. به هر حال رفتار عمومی این کمیّت‌ها برای منابع مختلف غیرقابل پیش‌بینی است، امّا در هر حال تأثیرگذاری قیمت به عنوان پارامتر چیره غیرقابل انکار است، مادامی که ضرایب احتمالاتی مربوطه اثر آن را ناچیز نکنند. بنابراین یکی از مهمترین عوامل در روند تغییرات نمودار فوق، ضرایب احتمالاتی می‌باشند. شایان ذکر است که نقطهٔ برخورد نمودارهای RFVC و هزینهٔ ریسک وقتی می‌تواند نشان دهندهٔ قیمت بهینهٔ طراحی باشد که روند RFVC روندی صعودی و روند RC در برابر آن روندی نزولی باشد، تحت این شرایط نقطهٔ تلاقی نشانگر بیشترین RFVC در برابر کمینه‌ترین مقدار ممکن هزینه‌ی ریسک خواهد بود امّا با توجه به گراف فوق، چون RFVC روندی کاهشی و RC روندی افزایشی دارد، کمترین قیمت که مربوط به سری زمانی سالیانه است به عنوان بهترین قیمت برای برنامه‌ریزی معدن نتیجه می‌شود. این روش‌شناسی تأثیر NPV و هر دو مورد عدم نفع و زیان برای محاسبهٔ RFVC را در نظر می‌گیرد. بنابراین از شکل ٤ می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر افزایشی عدم نفع و زیان بسته به قیمت در برابر افزایش NPV بیشتر است و اثر غالب می‌باشد. برنامهٔ منتخب برنامهٔ A خواهد بود که مادهٔ معدنی این برنامه ۵۰۵۷۵۳۵۰۰ تن با عیار حد ۰/۲۰۷۹ درصد می‌باشد و هزینهٔ سرمایه‌ای برای این برنامه ٦٩٣٤٦٠٤٨١ دلار آمریکا است. بنابراین محدودهٔ نهایی معدن در شکل‌های زیر ارائه شده است.

منابع

+ Akbari A.D., Osanloo M., Shirazi M.A., (2008) Ultimate Pit Limit (UPL) determination through minimizing risk costs associated with price uncertainty, WMC, Krakow.

- Akbari A.D., Osanloo M., Shirazi MA., (2009) Reserve estimation of an open pit mine under price uncertainty by real option approach, Mining scince and technology 19 (6).

- Adibi, N., Ataee-pour, M., Rahmanpour, M., (2015) Integration of sustainable development concepts in open pit mine design, Journal of Cleaner Production, In press.

- Asad, MWA., Dimitrakopoulos, R., Eldert, J., (2014) Stochastic production phase design for an open pit mining complex with multiple processing streams, Engineering optimization 48 (8), 1139-1152.

- Asad, MWA., Topal, E., (2011) Net present value maximization model for optimum cut-off grade policy of open pit mining operations, Journal of the Southern African Institute of mining and metallurgy 111 (11).

- Castillo, FD., Dimitrakopoulos, R., (2014) Joint effect of commodity price and geological uncertainty over the life of mine and ultimate pit limit, Mining Technology, Mining technology 123 (4),Doi: 10.1179/1743286314Y.0000000069.

- Denby B., Schofield D., 1995 – Inclusion of risk assessment in open pit design and scheduling. IMM Transactions, 104, A67–A71.

- Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., (2013) MineLib: a library of open pit mining problems, Annals of Operations Researchs 206 (1), DOI: 10.1007/s10479-012-1258-3.

- Gershon M.E., 1987 – Heuristic approaches for mine planning and production scheduling. Intentional journal of mining and geological engineering, 5, 1–13.

- Godoy, M., Dimitrakopoulos, R., (2004) Managing risk and waste mining in long term production scheduling of open pit mine. SME Transactions, 316, 43-50.

- Huttagosol P., C ame r o n R.E., 1992 – A computer design of ultimate pit limit by using transportation algorithm. 23rd APCOM, 443–460.

- Johnson, T.B., 1968, "Optimum Open-Pit Mine Production Scheduling", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, Operations Research Department.

- Lerchs, H. & Grossmann, L., (1965) Optimum design of open-pit mines. CIM Bulletin, 58, 47-54.

- Lerchs, H. & Grosmann, L., (1965) Optimum design of open pit mines. CIM Transaction, 68, 17-24.

- Picard, J.C., (1976) Maximum closure of a graph and applications to combinatorial problems. Management science, 22, 1268-1272.

- Ravenscroft, P J and Armstrong, M, 1990. Kriging of block models – The dangers re-emphasised, in Proceedings APCOM XXII, Berlin, 17 - 21 September, pp 577-587.

-Souza, FR., Melo, M., Pinto, CLL., (2014) A proposal to find the ultimate pit using Ford Fulkerson algrithm, Rem: Revista Escola de Minas 64 (4), doi: org/10.1590/0370-44672014670166.

- Tolwinski B., Underwood R., 1992 – An algorithm to estimate the optimal evolution of an open pit mine. 23rd APCOM, 399–409.

- Wang Q., Sevim H., 1992 – Enhance production planning in open pit mining through intelligent dynamic search. 23rd APCOM, 461–471.

- Whittle, J., (1989) The facts and facilities of open pit design. Whittle programming Pty Ltd.

- Yang, B., Luo, ZQ., Lu, G., Liu, XM., Lu, H., (2011) Dynamic and Comprehensive Optimization of Ultimate Pit Limit for Complex Multi-metal Open-

pit Mine, Mining and Metallurgical.Doi: 10.1007/s11771−010−0512−6.

- Zhao y, kim y C. A new optimum pit limit design algorithm Proceedings of the 23rd International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industry. Richardson: SPE of AIME, 1992: 423−434.

Ultimate pit limits determination of Sarcheshmeh Coppor Mine based on risk free valuation criterion for accsess to sustainable development

Afshin Akbari[1], Omid Mohammadi[2]

1- Mining Engineering dpt, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.
2- M.Sc. Mining Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.