





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج مواد معدنی

برنامه ریزی در معادن روباز با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمین شناسی و مالی
(مطالعه موردی: معدن سنگ آهن شهرک)

نگارنده: صفدر سلیمانی

اساتید راهنما :

دکتر محمد عطائی

دکتر رضا خالو کاکایی

شهریور ۹۶

شماره: ۹۹۹۲۰۵۸
تاریخ: ۹۹/۱۰/۳

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای صفدر سلیمانی با شماره دانشجویی ۹۱۰۳۹۱۴ رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان برنامه ریزی در معادن روباز با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمین شناسی و مالی (مطالعه موردی: معدن سنگ آهن شهرک) که در تاریخ ۱۳۹۶/۰۶/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۹۶/۱۰/۵۰) ☒ مردود ☐
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

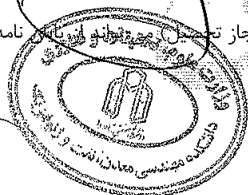
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد عطایی	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	رضا خالوکاکی	استاد	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر اصغر عزیزی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر رامین رفیعی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر کیومرث سیف پناهی شعبانی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: علیرضا عرب امیری ۹۹/۱۰/۳

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: مهندسی معدن نفت و زئوفیزیک

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) مجاز است که نام خود دفاع نماید (دفاع

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم به خانواده عزیزم؛

مهربان فرشتگانی که لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن،
جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای
زندگیم، مدیون حضور سبز آنهاست...

تشکر و قدردانی

امروز که به همت پروردگار بی همتا
و به مدد دعای پدر و مادر عزیزتر از جانم
و لطف و راهنمایی استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر محمد عطایی

و

جناب آقای رضا خالوکاکائی
برگی دیگر از دفتر بزرگ علم و دانش را ورق زدم
خاضعانه دست بوس تمام کسانی ام
که باعث دلگرمی من بودند.

تعهد نامه

این جانب صفدر سلیمانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن - استخراج مواد معدنی دانشکده مهندسی معدن ، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه برنامه ریزی در معادن رو باز با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمین شناسی و مالی (مطالعه موردی : معدن سنگ آهن شهرک) تحت راهنمایی آقای دکتر محمد عطایی و آقای رضا خالوکاکایی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

هدف اصلی برنامه‌ریزی تولید، تعیین برنامه استخراجی کانسنگ و باطله در یک دوره زمانی مشخص است، به گونه‌ای که ارزش آن بیشینه شود. در این پایان‌نامه با در نظر گرفتن تأثیر عدم قطعیت زمین‌شناسی و عدم قطعیت اقتصادی برنامه‌ریزی تولید در معدن سنگ آهن شهرک مورد بررسی قرار گرفته شده است.

بدین منظور پس از مدل‌سازی با استفاده از روش کریجینگ، تضمین عیار صورت گرفته است و در ادامه با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی، ۳۰ تحقق هم احتمال با کانسار برای کمی سازی عدم قطعیت ماده معدنی تولید شده است. از سوی دیگر، با استفاده از مفهوم رویکرد اختیارات واقعی از روش درخت دوجمله‌ای برای در نظر گرفتن تأثیر عدم قطعیت قیمت ماده معدنی در برنامه‌ریزی تولید به کار گرفته شده است. لذا در این تحقیق با توجه به ۳۰ داده شبیه‌سازی شده عدم قطعیت عیار در محدوده نهایی مورد بررسی قرار گرفته است، که نتایج به دست آمده ارزش فعلی خالص در روش کریجینگ ۰/۶ کمتر از میانگین ۳۰ شبیه‌سازی شده، به دست آمده است.

همچنین در شرایط عدم قطعیت اقتصادی ارزش فعلی خالص برای مدل کریجینگ محاسبه شده و نتایج حاصل نشان دهنده ثابت بودن محدوده نهایی در قیمت‌های بالاتر از ۳۰ دلار در این معدن می‌باشد. در نهایت برای تأثیر عدم قطعیت عیار و قیمت به دست آمده تقسیم محدوده نهایی به ۴ پوش بک ارزش فعلی خالص در هر فاز مشخص شد و نشان داده شد که تغییرات ارزش فعلی خالص در فازهای استخراجی در مدل کریجینگ با میانگین ۳۰ مدل شبیه‌سازی شده تقریباً ثابت بوده است. با در نظر گرفتن عدم قطعیت، قیمت و عیار در محدوده نهایی و برنامه‌ریزی ملاحظه می‌شود. ارزش فعلی در مدل کریجینگ در قیمت‌های پیش بینی شده حاصل از درخت دوجمله‌ای کمتر از میانگین مدل شبیه‌سازی شده است.

کلید واژه: عدم قطعیت، شبیه سازی گوسی، اختیار حقیقی، برنامه ریزی تولید

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات تحقیق.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- بیان مسئله.....	۴
۱-۳- ضرورت انجام تحقیق.....	۵
۱-۴- اهداف تحقیق.....	۶
۱-۵- ساختار پایان نامه.....	۷
فصل دوم: مفاهیم و پیشینه‌ی تحقیق.....	۹
۲-۱- مقدمه.....	۱۰
۲-۲- برنامه‌ریزی تولید.....	۱۰
۲-۳- تأثیر عدم قطعیت‌ها موجود در تعیین برنامه‌ریزی تولید.....	۱۱
۲-۴- عدم قطعیت زمین‌شناسی.....	۱۵
۲-۴-۱- مقدمه بر زمین‌آمار.....	۱۵
۲-۴-۲- بررسی سابقه علمی موضوع.....	۲۲
۲-۵- عدم قطعیت اقتصادی.....	۲۳
۲-۵-۱- پیش‌بینی قیمت فلز.....	۲۳
۲-۵-۲- ارزیابی اقتصادی در فضای عدم قطعیت.....	۲۴
۲-۵-۳- بررسی سابقه علمی موضوع.....	۳۰
۲-۶- جمع‌بندی.....	۳۲
فصل سوم: شبیه‌سازی زمین‌آمار، مدل‌سازی و برنامه‌ریزی.....	۳۳
۳-۱- مقدمه.....	۳۴
۳-۲- موقعیت جغرافیایی.....	۳۴
۳-۳- تعیین توزیع فضایی و ارزیابی ذخیره کانسار.....	۳۶

۳۸	۴-۳- بررسی آماری داده‌ها.....
۳۸	۴-۳-۱- رسم نمودار توزیع فراوانی داده‌های اولیه یا خام.....
۳۹	۴-۳-۲- بررسی روش‌های آماری آزمون مقادیر خارج از ردیف.....
۴۱	۴-۳-۳- بررسی وجود روند در داده‌ها.....
۴۳	۴-۳-۴- نرمال‌سازی داده‌ها.....
۴۳	۴-۳-۵- تعیین ساختار فضایی داده‌ها.....
۴۷	۴-۳-۶- تهیه مدل بلوکی و تخمین عیار.....
۴۸	۴-۳-۷- اعتبار سنجی تخمین عیار.....
۴۸	۴-۳-۸- عملیات شبیه‌سازی زمین‌آماري.....
۵۳	۴-۳-۹- تعیین مدل بلوکی عیاری مربوط به هر شبیه‌سازی.....
۵۵	۴-۳-۱۰- عدم قطعیت اقتصادی (اختیار حقیقی).....
۶۱	۴-۳-۱۱- جمع‌بندی.....
۶۳	فصل چهارم: ترکیب عدم قطعیت زمین‌شناسی و مالی در برنامه‌ریزی تولید.....
۶۴	۴-۱- مقدمه.....
۶۴	۴-۲- محدوده نهایی معدنکاری روباز.....
۶۶	۴-۳- بررسی تأثیر عدم قطعیت عیار تعیین محدوده نهایی.....
۶۹	۴-۴- تأثیر عدم قطعیت قیمت ماده معدنی بر محدوده نهایی.....
۷۱	۴-۵- تأثیر عدم قطعیت زمین‌شناسی و مالی بر محدوده نهایی.....
۷۴	۴-۶- تأثیر عدم قطعیت زمین‌شناسی و مالی بر برنامه‌ریزی تولید.....
۸۲	۴-۷- جمع‌بندی.....
۸۳	فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات.....
۸۴	۵-۱- مقدمه.....
۸۴	۵-۲- بحث و نتیجه‌گیری.....
۸۶	۵-۳- پیشنهادات.....
۸۷	منابع.....

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- نتایج تحلیل حساسیت BESR..... ۱۳
- شکل ۲-۲- نتایج تحلیل حساسیت ارزش اقتصادی بلوک..... ۱۴
- شکل ۳-۲- نتایج تحلیل حساسیت عیار حد..... ۱۴
- شکل ۴-۲- نمونه واریوگرام تئوری..... ۱۷
- شکل ۵-۲- نمونه‌ای بیضی ناهمسانگردی..... ۱۸
- شکل ۶-۲- الگوریتم شبیه‌سازی گوسی متوالی..... ۲۱
- شکل ۷-۲- نمودار برازش شده بر داده‌های قیمت سنگ آهن از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷..... ۲۴
- شکل ۸-۲- مدل دوجمله‌ای شرایط فعالیت اقتصادی برای یک دوره..... ۲۹
- شکل ۱-۳- موقعیت جغرافیایی معدن شهرک نسبت به شهرهای بیجار و حسن آباد یاسوکند..... ۳۴
- شکل ۲-۳- موقعیت گمانه‌ها در معدن سنگ آهن شهرک (الف) فضای دوبعدی و (ب) فضای سه‌بعدی..... ۳۵
- شکل ۳-۳- روند مدل‌سازی کانسار..... ۳۷
- شکل ۴-۳- نمونه از مقطع قائم ترسیم شده در معدن سنگ آهن شهرک..... ۳۷
- شکل ۵-۳- نمایی از فضای تخمین تهیه شده برای تخمین مدل بلوکی..... ۳۸
- شکل ۶-۳- نمودار توزیع فراوانی و احتمال عیار آهن داده اولیه (الف) نمودار توزیع فراوانی (ب) نمودار احتمال..... ۳۹
- شکل ۷-۳- حد آستانه مقادیر خارج از ردیف (g) به عنوان تابعی از تعداد نمونه (n) و سطح اعتماد (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰)..... ۴۱
- شکل ۸-۳- بررسی روند احتمالی عیار Fe در راستای (الف) X (ب) Y (ج) Z..... ۴۲
- شکل ۹-۳- نمودار توزیع فراوانی و احتمال نرمال شده داده‌ها (الف) نمودار توزیع فراوانی (ب) نمودار احتمال..... ۴۳
- شکل ۱۰-۳- واریوگرام در جهت کوچک‌ترین شعاع تأثیر..... ۴۵
- شکل ۱۱-۳- واریوگرام در راستای شعاع میانی تأثیر..... ۴۵
- شکل ۱۲-۳- واریوگرام در جهت کوچک‌ترین شعاع تأثیر..... ۴۶
- شکل ۱۳-۳- بیضی ناهمسانگردی حاصل از واریوگرام غیر جهتی در معدن سنگ آهن شهرک..... ۴۶
- شکل ۱۴-۳- مدل بلوکی معدن سنگ آهن شهرک به وسیله روش کریجینگ..... ۴۷
- شکل ۱۵-۳- آزمون اعتبار سنجی بین عیار واقعی و تخمینی در معدن شهرک..... ۴۸
- شکل ۱۶-۳- تصویر سه‌بعدی از تحقق شبیه‌سازی شده..... ۵۰

شکل ۳-۱۷- نمودار توزیع فراوانی عیار آهن داده‌های اصلی و ۵ مدل شبیه‌سازی شده منتخب ۵۲

شکل ۳-۱۸- تفاوت مدل بلوکی داده اصلی و ۵ منتخب حاصل از شبیه‌سازی ۵۴

شکل ۴-۱- گام اساسی برنامه‌ریزی تولید در برنامه NPV Scheduler ۶۶

شکل ۴-۲- مقایسه ارزش خالص فعلی حاصل از روش کریجینگ (نوار تیره) و ۳۰ تحقق منتخب از روش شبیه‌سازی گوسی ۶۷

شکل ۴-۳- مقایسه تناژ ماده معدنی حاصل از روش کریجینگ (نوار تیره) و ۳۰ تحقق منتخب از روش شبیه‌سازی گوسی ۶۷

شکل ۴-۴- مقایسه تناژ باطله حاصل از روش کریجینگ (نوار تیره) و ۳۰ تحقق منتخب از روش شبیه‌سازی گوسی ۶۸

شکل ۴-۵- مقایسه متوسط عیار حاصل از روش کریجینگ (نوار تیره) و ۳۰ تحقق منتخب از روش شبیه‌سازی گوسی ۶۸

شکل ۴-۶- ارزش فعلی خالص برای قیمت‌های به‌دست آمده از درخت دوجمله‌ای در مدل کریجینگ ۷۰

شکل ۴-۷- تناژ ماده معدنی و باطله برای قیمت حاصل از درخت دوجمله‌ای در مدل کریجینگ ۷۰

شکل ۴-۸- مقایسه ارزش خالص فعلی حاصل از مدل کریجینگ، میانگین، بیشینه و کمینه ۳۰ شبیه‌سازی انجام شده ، فاصله اطمینان ۹۵ درصد ۷۲

شکل ۴-۹- مقایسه تناژ ماده معدنی حاصل از مدل کریجینگ، میانگین، بیشینه و کمینه ۳۰ شبیه‌سازی انجام شده ، فاصله اطمینان ۹۵ درصد ۷۳

شکل ۴-۱۰- مقایسه تناژ باطله حاصل از مدل کریجینگ، میانگین، بیشینه و کمینه ۳۰ شبیه‌سازی انجام شده ، فاصله اطمینان ۹۵ درصد ۷۳

شکل ۴-۱۱- مقایسه ارزش خالص فعلی حاصل از مدل کریجینگ، ۳۰ شبیه‌سازی انجام شده و فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای فاز اول استخراجی ۷۵

شکل ۴-۱۲- مقایسه ارزش خالص فعلی حاصل از مدل کریجینگ، ۳۰ شبیه‌سازی انجام شده و فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای فاز دوم استخراجی ۷۵

شکل ۴-۱۳- مقایسه ارزش خالص فعلی حاصل از مدل کریجینگ، ۳۰ شبیه‌سازی انجام شده و فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای فاز سوم استخراجی ۷۶

شکل ۴-۱۴- مقایسه ارزش خالص فعلی حاصل از مدل کریجینگ، ۳۰ شبیه‌سازی انجام شده و فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای فاز چهارم استخراجی ۷۶

شکل ۴-۱۵- میزان تغییرات ارزش فعلی خالص مدل کریجینگ نسبت به ارزش فعلی میانگین ۳۰ مدل شبیه‌سازی شد ۷۷

شکل ۴-۱۶- مقاطع شمال- جنوبی از پوش بک‌های استفاده‌شده از مدل کریجینگ (الف) و ۳ مدل منتخب
شییه‌سازی‌شده برای قیمت ۶۰ دلار.....۸۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- فرضیات اولیه در تحلیل حساسیت ۱۳
- جدول ۱-۳- پارامترهای زمین‌آماري حاصل از مدل پردازش شده واریوگرام جهتي ۴۴
- جدول ۲-۳- جدول مقایسه پارامترهای آماری ۵ مدل شبیه‌سازی شده منتخب ۵۱
- جدول ۳-۳- داده قیمت ۱۰۰ ماه اخیر قیمت سنگ آهن ۵۶
- جدول ۳-۴- مدل دوجمله‌ای عدم قطعیت قیمت سنگ آهن در فاصله اوت ۲۰۱۷ تا اوت ۲۰۲۰ ۵۸
- جدول ۳-۵- NPV های محاسبه شده بر مبنای مدل درخت دوجمله‌ای قیمت آهن از اوت ۲۰۱۷ تا اوت ۲۰۲۰
(برحسب میلیون دلار) ۶۰
- جدول ۱-۴- خلاصه از نتایج حاصل از عدم قطعیت عبار در محدوده نهایی ۶۹
- جدول ۲-۴- نتایج اقتصادی حاصل از عدم قطعیت عیار و قیمت در محدوده نهایی ۷۲
- جدول ۳-۴- ارزش فعلی خالص مدل کریجینگ و میانگین ۳۰ مدل شبیه سازی شده برای فاز اول استخراج ۷۸
- جدول ۴-۴- ارزش فعلی خالص مدل کریجینگ و میانگین ۳۰ مدل شبیه سازی شده برای فاز دوم استخراج ۷۹
- جدول ۵-۴- ارزش فعلی خالص مدل کریجینگ و میانگین ۳۰ مدل شبیه سازی شده برای فاز سوم استخراج ۸۰
- جدول ۶-۴- ارزش فعلی خالص مدل کریجینگ و میانگین ۳۰ مدل شبیه سازی شده برای فاز چهارم استخراج ۸۱

فصل اول

کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

هدف کلی و نهایی در یک برنامه‌ریزی در تولید در معادن سطحی را می‌توان بهینه کردن طراحی و تولید ثابت در عمر معدن تعریف کرد (عبدالصبور^۱ و دیمیتراکاپوس^۲، ۲۰۱۱)

روند کلی در برنامه‌ریزی روباز و بهره‌برداری از کانسار به این صورت است که پس از شناسایی و اکتشاف کانسار به این صورت است که پس از شناسایی و اکتشاف کانسار و با توجه به گمانه‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی کانسار را به بلوک‌های منظم تقسیم‌بندی شده. به مجموعه این بلوک‌ها مدل بلوکی گویند. در مرحله بعد برای هر یک از بلوک‌ها با یکی از روش‌های تخمین باید عیار تخصیص داده شود. روش‌های مختلفی برای تخمین وجود دارد که یکی از مهم‌ترین روش‌های روش زمین‌آمار^۳ است که علاوه بر اینکه عیار بلوک‌ها را تخمین می‌زند به دنبال کاهش خطای تخمین نیز هست. در نتیجه استفاده از این روش سبب کاهش نوسانات عیاری یا کاهش دامنه تغییرات می‌شود.

با اتمام مراحل شناسایی و اکتشاف کانسار و ایجاد مدل بلوکی عیاری و سپس مدل بلوکی اقتصادی محدوده‌ای با عنوان محدوده نهایی برای کانسار تعیین می‌شود که فعالیت استخراجی در این محدوده اقتصادی خواهد بود. در واقع محدوده نهایی بهینه معدن (OUPL^۴) به "محدوده اطلاق می‌شود که اگر همین امروز همه ماده معدنی و باطله با در نظر گرفتن ملاحظات فنی از درون پیت طراحی شده استخراج شود، بالاترین سود ممکنه را به دست دهد".

ساخت پوش بک^۵ یا فازهای استخراجی در تعریف جریان نقدینگی و برنامه‌ریزی تولید نقش کلیدی بازی می‌کند. پوش بک‌ها از تقسیم‌بندی محدوده نهایی به پیت‌های کوچک‌تر که دارای بالاترین ارزش

۱- Abdel Sabour

۲- Dimitrakopoulos

۳- Geostatistical

۴- Optimum Ultimate Pit Limit

۵- Push back

اقتصادی هستند ساخته می‌شود. پس از ساخت محدوده نهایی و پوش بک‌ها برنامه‌ریزی تولید با استفاده از پوش بک‌ها انجام می‌شود.

به‌طور کلی، برنامه‌ریزی تولید یک معدن روباز می‌تواند این‌گونه تعریف شود: تعیین سکانس استخراج بلوک‌ها از معدن برای رسیدن به بالاترین ارزش خالص فعلی، با توجه به عدم قطعیت‌ها موجود.

این عدم قطعیت‌ها را مطابق زیر طبقه‌بندی می‌شود:

- عدم قطعیت در مدل کانسار و تغییرپذیری عیار
- عدم قطعیت در خصوصیات فنی معدنکاری شامل، محدودیت‌های شیب، ظرفیت‌های استخراج و غیره.

• عدم قطعیت در پارامترهای اقتصادی شامل، هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی و قیمت محصولات

در این تحقیق با بررسی و ترکیب دو عدم قطعیت زمین‌شناسی و عدم قطعیت مالی در برنامه‌ریزی تولید مورد بررسی قرار گرفته است. روش مورد استفاده در این تحقیق برای عدم قطعیت زمین‌شناسی روش شبیه‌سازی زمین‌آماري^۱ و برای عدم قطعیت مالی روش اختیار حقیقی^۲ است.

شبیه‌سازی زمین‌آماري به‌جای بهترین تخمین مجموعه‌ای از مدل‌های ممکن را تولید می‌کند و لذا دامنه‌ای از حالت‌های ممکن را می‌تواند به نمایش بگذارد. این تکنیک می‌تواند برای هر بلوک تعدادی از حالت ممکن از توزیع عیار را بازسازی کند.

روش اختیار حقیقی یکی از روش‌های مورد توجه برای ارزش‌گذاری پروژه‌ها در شرایط عدم قطعیت اقتصادی است. این روش که در حدود سه دهه در ارزیابی پروژه‌های سرمایه‌گذاری پذیرفته شده است و

۱- Geostatistical Simulation

۲- Real Option

دارای انعطاف‌پذیری بالای نسبت به سایر روش‌های است. بنابراین در این تحقیق تأثیر عدم قطعیت مربوط به عیار و قیمت ماده معدنی در برنامه‌ریزی تولید مورد بحث و بررسی قرار داده می‌شود. در این فصل کلیاتی از مسئله‌ی مورد بررسی و هدف از انجام مطالعه و همچنین ضرورت انجام این پایان‌نامه پرداخته شده است. همچنین مختصری در مورد ساختار پایان‌نامه توضیح داده شده است.

۱-۲- بیان مسئله

برنامه‌ریزی تولید یکی از چالش‌های همیشگی طراحان و برنامه‌ریزان در معادن روباز است. برنامه‌ریزی تولید معادن روباز عبارت است از تعیین ترتیب استخراج بلوک‌های واقع در محدوده نهایی به‌طوری‌که ارزش خالص فعلی جریان نقدینگی با توجه به عدم قطعیت‌ها و محدودیت‌های وارد بر سیستم معدنکاری، حداکثر شود. در طراحی برنامه‌ریزی تولید معمولاً پارامترهایی متغیر و تأثیرگذاری مانند عیار ماده معدنی، قیمت فروش محصول، هزینه استخراجی، باطله برداری و فرآوری ماده معدنی و ... وابسته است. با توجه به این‌که پروژه‌های معدنی حجم سرمایه‌گذاری بالایی را طلب می‌کنند در نتیجه با اعمال تغییرات بر روی هر یک از عوامل بالا، ریسک‌هایی بر برنامه‌ریزی تولید وارد می‌شود. این‌گونه ریسک‌ها باعث به وجود آمدن عدم قطعیت‌ها می‌شود. ریسک‌های در یک پروژه ممکن است ناشی از دو عامل فنی (معدنکاری و زمین‌شناسی) و مالی باشد. منبع اصلی ریسک‌های فنی در عدم قطعیت عیار، تناژ، زمین‌شناسی و منشأ اصلی ریسک‌های مالی در عدم قطعیت نرخ ارز، قیمت فلز، هزینه‌ها و... تقسیم‌بندی کرد.

در این تحقیق سعی خواهد شد عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی و مالی کمی شده و با توجه به آن‌ها برنامه تولید معادن روباز ارائه شود. بدیهی است با کمی نمودن این عدم قطعیت‌ها ریسک‌های طراحی کاهش خواهد یافت و برنامه‌ریزی دقیق‌تری انجام خواهد شد.

۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

تمام معادن باهدف سودآوری احداث می‌شوند ولی تمام آن‌ها در این راستا موفق نیستند چراکه شناسایی ریسک‌های وارد بر پروژه برآورد نشده است و یا اشتباه برآورد شده است. دغدغه اصلی طراحان شناسایی عدم قطعیت موجود در برنامه است که این عدم قطعیت‌ها باعث به وجود آمدن ریسک‌ها می‌شود. برای مدیریت ریسک‌ها در معدن باید آن‌ها را به‌خوبی شناخت و در نهایت با کمّی کردن عدم قطعیت‌ها می‌توان ریسک‌های موجود در برنامه را کاهش داد و این ریسک‌ها را به فرصت تبدیل نمود.

در معدن ریسک‌های به سه عامل مهم تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱. ریسک‌های زمین‌شناسی

۲. ریسک‌های مالی و اقتصادی

۳. ریسک‌های فنی و محیطی

دلیل اصلی ریسک‌های زمین‌شناسی ناآگاهی و عدم قطعیت شکل ذخیره، عیار، تناژ و ... در درون زمین می‌باشد و دلیل اصلی ریسک‌های مالی و اقتصادی را می‌توان به عدم قطعیت در قیمت فلز، هزینه‌های جاری، قیمت ارز و ... دانست. در سال‌های اخیر شگردهایی برای مدل‌سازی و کمّی سازی عدم قطعیت زمین‌شناسی و مالی ارائه شده است.

در روش‌های سنتی برای عدم قطعیت زمین‌شناسی به‌طور ناخواسته بخشی از ماده معدنی به‌جای باطله و بخشی از باطله به‌جای ماده معدنی مدل‌سازی می‌شود. این مدل با واقعیت کانسار متفاوت است و باعث عدم قطعیت و ریسک بالا در پروژه می‌شود. در مطالعاتی که توسط بانک جهانی انجام‌شده تخمین نادرست ماده معدنی زیان‌های بسیار شدیدی مالی در معادن آمریکا و کانادا به پروژه تحمیل کرده است (Vallee, 2000). حال اهمیت روشی زمین‌آمار برای ساخت مدل بلوکی عیاری دقیق‌تر و همچنین روش

شبیه‌سازی زمین‌آمار برای ایجاد مدل بلوکی عیاری مختلف در مورد تصمیم‌گیری در پروژه با توجه به موارد فوق پی برد.

با توجه به حجم بالای سرمایه‌گذاری در معادن برآورد ارزش پروژه‌ها و میزان دقت تخمین آن در ارزیابی طرح‌های معدنی اهمیت زیادی دارد. روش‌های ارزیابی به دو دسته سنتی و روش‌های جدید تقسیم می‌شود. در مطالعه که رایان^۱ در سال ۲۰۰۲ نشان داد که شرکت‌های مورد مطالعه اکثر از روش‌های سنتی در ارزیابی‌هایی سرمایه‌گذاری خود استفاده می‌کنند. یکی از معایب روش‌های سنتی ارزش پروژه‌ها را کمتر از میزان واقعی تخمین می‌زند و در پاسخ به عدم قطعیت حاکم بر آن و یا به عبارت دیگر انعطاف‌پذیری واقعی پروژه و ارزش اضافی که بر پروژه ایجاد می‌کند را در نظر گرفته نمی‌شود. حدود سه دهه است که ارزشیابی مالی پروژه‌ها از دیدگاه نظریه‌ی جدیدی به نام نظریه اختیار حقیقی نیز بررسی شده است. این نظریه قادر است ضعف‌های روش سنتی را پوشش دهد و قادر است ارزش پروژه را دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت تخمین بزنند (محمود رضا فانی پاکدل و همکاران، ۱۳۹۰).

در سطح کشور به عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های معدنی به‌صورت هم‌زمان کمتر پرداخته شده است؛ و اصولاً پژوهشگران فقط به یکی از عدم قطعیت‌ها در پروژه را بررسی کرده‌اند و به سایر عدم قطعیت‌ها توجه نداشته‌اند. همچنین به دلیل نوسانات موجود در قیمت مواد معدنی و ارز در سال‌های اخیر، توجه به عدم قطعیت مالی امری ضروری می‌باشد. در این مطالعه به بررسی عدم قطعیت زمین‌شناسی و مالی و ادغام این دو عدم قطعیت به‌منظور کاهش ریسک در برنامه‌ریزی تولید شده است.

۴-۱- اهداف تحقیق

در ارزیابی‌های معدنی که به‌صورت سنتی انجام می‌شود همواره برنامه‌ریزی‌های تولید به دلیل عدم قطعیت‌های موجود غیرقابل اطمینان هستند. مهم‌ترین عدم قطعیت موجود در پروژه معدنی را می‌توان

۱- Ryan

عدم قطعیت زمین‌شناسی و عدم قطعیت اقتصادی نام برد. لذا هدف از انجام این تحقیق تعیین برنامه‌ریزی مناسب در شرایط عدم قطعیت زمین‌شناسی و عدم قطعیت اقتصادی است. بدین منظور از روش شبیه‌سازی آماری برای کمی‌سازی عدم قطعیت زمین‌شناسی و از روش اختیار حقیقی برای عدم قطعیت اقتصادی استفاده می‌شود. لذا از اطلاعات معدن سنگ‌آهن شهرک که در استان کردستان واقع شده است به‌عنوان مطالعه موردی برای اهداف بالا استفاده شده است.

از این رو در دو مرحله این اهداف پیش‌بینی می‌شود:

در مرحله اول عدم قطعیت عیار با استفاده روش زمین‌آماري تغییرات ذاتی ذخیره معدنی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در مرحله دوم باید با استفاده از روش ارزیابی اقتصادی و شبیه‌سازی چهارچوبی برای عدم قطعیت قیمت ماده معدنی تعیین شود. پس از شبیه‌سازی عدم قطعیت عیار و قیمت ماده معدنی، برنامه‌ریزی تولید مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه حاوی پنج فصل است که به‌اختصار توضیح داده می‌شود

فصل اول: با عنوان "کلیات" شامل بیان مسئله، به بررسی ضرورت و اهمیت انجام تحقیق و درنهایت اهداف تحقیق بیان شده است

فصل دوم: با عنوان "مفاهیم و پیشینه‌ی تحقیق" ضمن بررسی پیشینه تحقیق به بیان مفاهیم کلی مبانی روش شبیه‌سازی زمین‌آماري و شبیه‌سازی اقتصادی در برنامه‌ریزی تولید پرداخته شده است.

فصل سوم: با عنوان "شبیه‌سازی زمین‌آماري، مدل‌سازی و برنامه‌ریزی" دارای سه بخش اساسی است. بخش اول به معرفی معدن و موقعیت مکانی آن پرداخته شده است، بخش دوم به تعیین توزیع فضایی سنگ‌آهن و شبیه‌سازی زمین‌آماري برای مدل بلوکی شهرک پرداخته شده است و درنهایت در بخش سوم به عدم قطعیت اقتصادی به روش اختیار حقیقی و درخت دوجمله‌ای پرداخته شده است

فصل چهارم: با عنوان " ترکیب عدم قطعیت زمین‌شناسی و مالی در برنامه‌ریزی تولید" در این بخش ابتدا عدم قطعیت زمین‌شناسی بر محدوده نهایی موردبررسی قرارگرفته و در بخش بعد عدم قطعیت قیمت ماده معدنی بر محدوده نهایی نشان داده‌شده است. در مرحله آخر عدم قطعیت زمین‌شناسی و عدم قطعیت مالی بر برنامه‌ریزی تولید و تولید پوش بک‌ها که دارای بالاترین ارزش فعلی دارد مشخص شده است.

فصل پنجم: با عنوان " نتایج و پیشنهادات" به نتایج کلی از این تحقیق و پیشنهادات برای مطالعات بعدی ارائه شده است.

فصل دوم:

مفاهیم و روش‌های تحقیق

۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا تأثیر قیمت فروش و عیار ماده معدنی به عنوان تأثیرگذارترین عامل در برنامه ریزی تولید مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش بعد ابتدا به تشریح مفاهیم زمین آماری و شبیه سازی گوسی متوالی^۱ پرداخته می شود. در ادامه مطالعات صورت گرفته در زمینه عدم قطعیت عیار در پروژه های معدنی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش آخر عدم قطعیت قیمت ماده روش درخت دوجمله ای مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت مطالعات صورت گرفته در روش اختیار حقیقی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲- برنامه ریزی تولید

طراحی محدوده نهایی در معادن روباز، موضوعی است پیچیده که مستلزم انجام محاسبات زیاد می باشد. تعیین مناسب محدوده نهایی تأثیر مستقیم بر زمان بندی تولید و در نهایتاً بر برنامه ریزی تولید دارد (Ozkan & Ercelebi, 2007).

روش های بهینه سازی پیت را می توان به دو دسته زیر تقسیم بندی کرد:

۱- روش های ریاضی: تئوری گراف^۲، برنامه ریزی پویا، برنامه ریزی خطی، ...

۲- روش های ابتکاری: روش مخلوط شناور^۳، الگوریتم ژنتیک^۴ و ...

که الگوریتم های ابتکاری قادر به تعیین جواب بهینه در بعضی از حالات نیستند. (KHalokakaie, Dowd & Fowell, 2000)

۱- Sequential Gaussian Simulation

۲- Graph Theory Algorithm

۳- Floating cone

۴- Genetic Algorithm

در حالت کلی تمامی روش‌هایی که تاکنون برای تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید ارائه شده‌اند هدف خود را پیدا کردن محدوده‌ای قرار داده‌اند که در چهارچوب آن برنامه‌ریزی مفروض به حداکثر NPV ممکن دست یابد؛ اما غالباً با ساده‌انگاری از کنار عدم قطعیت که در پارامترهای مفروض آن‌ها برای تعیین این محدوده وجود داشته است گذشته‌اند و مسئله را برای مفروضات ثابتی حل کرده‌اند.

۲-۳- تأثیر عدم قطعیت‌ها موجود در تعیین برنامه‌ریزی تولید

در تعیین محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید چهار پارامتر تأثیرگذار لازم است محاسبه شود این پارامترها عبارت‌اند از:

۱- محاسبه نسبت باطله برداری سربه‌سری^۱ (BESR)

۲- محاسبه عیار حد^۲

۳- محاسبه ارزش اقتصادی بلوک

۴- محاسبه پایداری شیب

برای تعیین اهمیت عوامل تعیین‌کننده در برنامه‌ریزی تولید نسبت به تحلیل حساسیت بر این سه (نسبت باطله برداری سربه‌سری، عیار حد و ارزش بلوک‌ها) پارامترها انجام می‌شود. که در آن دو پارامتر یعنی نسبت باطله برداری سربه‌سری و ارزش اقتصادی بلوک‌ها مستقیماً هم وابسته به قیمت محصول و هم عیار هستند و سه پارامتر دیگر یعنی نسبت باطله برداری سربه‌سری، عیار حد و ارزش بلوک‌ها در ارتباط مستقیم با قیمت محصول نهایی هستند. لذا با توجه به روابط و فرضیات که در جدول (۲-۱) آورده شده است نسبت به تحلیل حساسیت بر سه پارامتر نسبت باطله برداری، عیار حد و ارزش بلوک‌ها انجام می‌شود

۱- Break-Even Stripping Ratio

۲- Cut-Off Grade

برای نسبت باطله برداری سربه‌سری از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$BESR = \frac{Rg(P-c_2)-(b-c_1)}{a} \quad (۱-۲)$$

که در آن:

BESR – نسبت باطله برداری سربه‌سری

R – ضریب بازیابی کلی فراوری از خردایش تا تولید محصول نهایی پالایش شده

g – عیار ماده معدنی (کسر اعشاری)

P – قیمت فروش محصول نهایی

C₂ – هزینه ذوب و پالایش کنستانتره

b – هزینه استخراج

C₁ – هزینه فراوری ماده معدنی از خردایش تا کنسانتره

a – هزینه باطله برداری

معادله عیار حد برای تفکیک ماده معدنی از باطله می‌باشد برابر است با:

$$g_c = \frac{(b+C_1)}{R(P-C_2)} \quad (۲-۲)$$

که:

g_c – عیار حد

و در نهایت ارزش اقتصادی بلوک‌ها برای ماده معدنی صرف‌نظر از تناژ آن‌ها برابر است با:

$$BEV_{ORE} = T[Rg(P - c_2) - (b - c_1)] \quad (۳-۲)$$

که در آن:

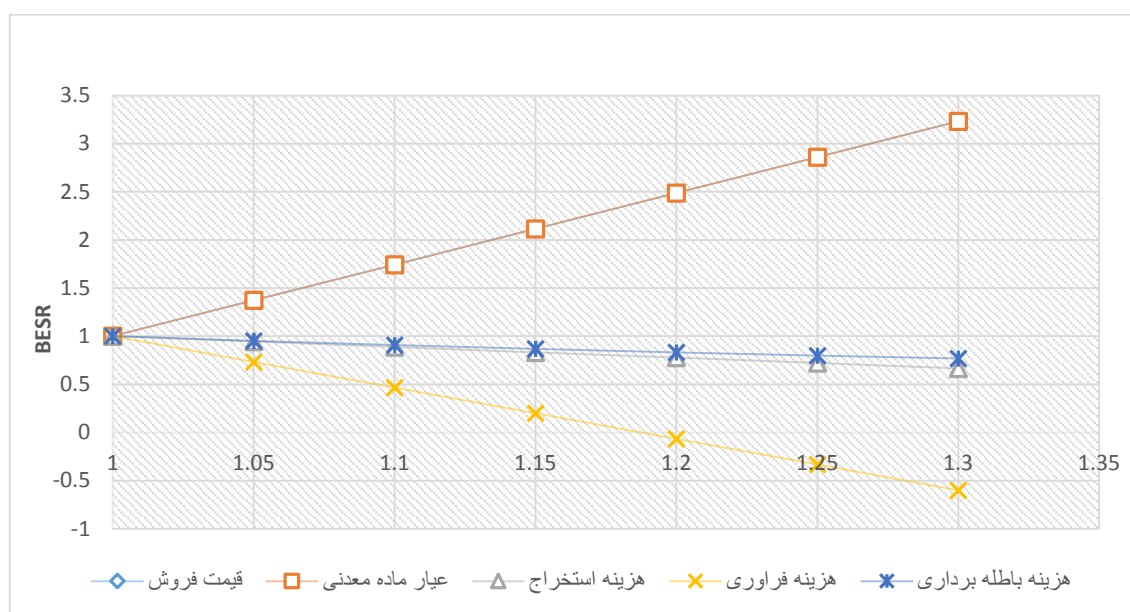
BEV_{ORE} - ارزش بلوک هر ماده معدنی

T - تناژ هر بلوک

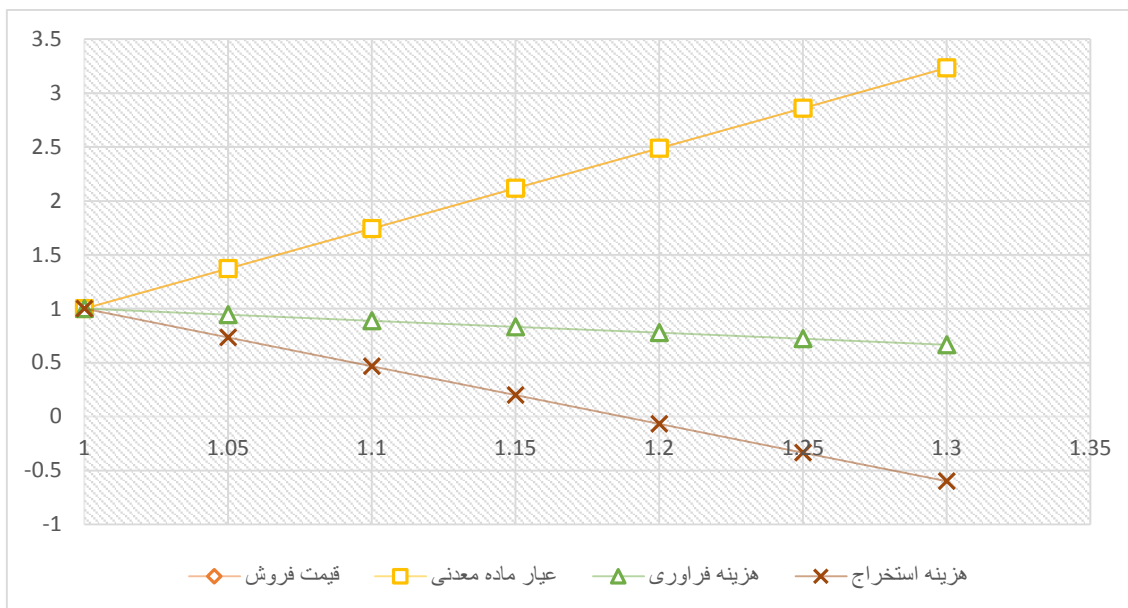
ضریب بازیابی با توجه نوع فلز ثابت فرض می‌شود. شکل (۱-۲) تا (۳-۲) نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در روابط با توجه فرضیات مسئله که در جدول (۱-۲) نشان داده شده است.

جدول ۱-۲- فرضیات اولیه در تحلیل حساسیت

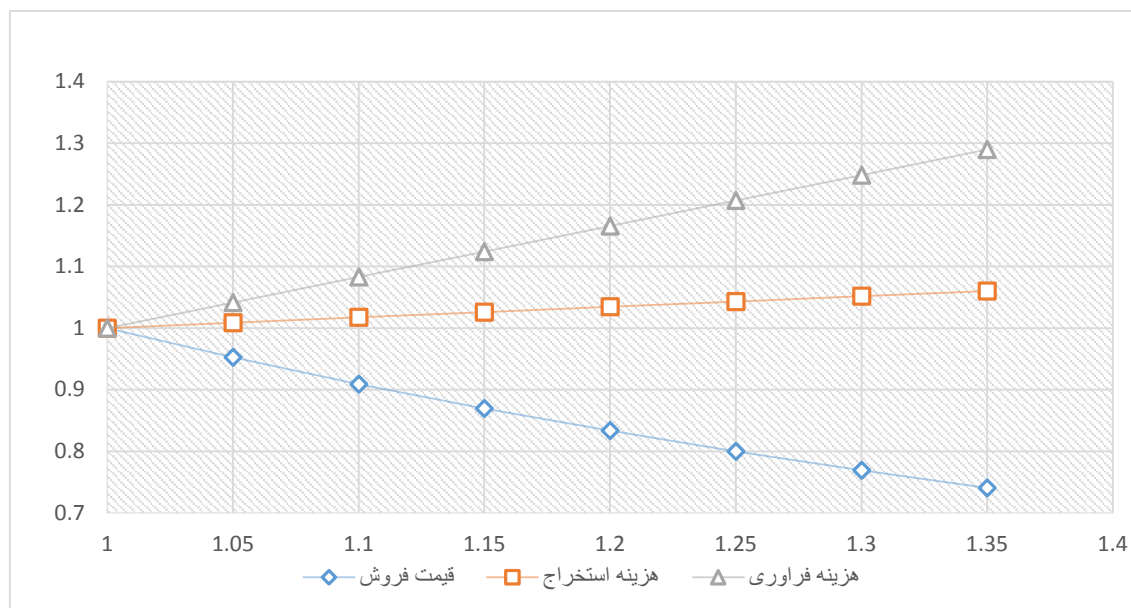
g_c (Percent)	BESR	C_2 \$/tonne	C_1 \$/tonne	a \$/tonne	b \$/tonne	P \$/tonne	g (Percent)	R
۰/۲۱۶	۱:۱/۵	۰	\$۱۲	\$۱/۵	\$۲/۵	\$۶۷	۰/۲۵	۱



شکل ۱-۲- نتایج تحلیل حساسیت BESR



شکل ۲-۲- نتایج تحلیل حساسیت ارزش اقتصادی بلوک



شکل ۳-۲- نتایج تحلیل حساسیت عیار حد

تحلیل حساسیت در اشکال (۱-۲) و (۲-۲) نشان می‌دهد که از عوامل مؤثر بر BEV_{ORE} و $BESR$ ، قیمت محصول نهایی (P) و عیار (g) از بیشترین حساسیت برخوردار هستند؛ و در عوامل مؤثر بر عیار حد که در شکل (۳-۲) نشان داده شده قیمت محصول نهایی از حساسیت کاهنده بیشتری نسبت به سایر عوامل برخوردار است. نهایتاً از تحلیل‌های حساسیت که در شکل‌های (۱-۲)، (۲-۲) و (۳-۲)

می‌توان نتیجه گرفت که عیار و قیمت محصول نهایی حساس‌ترین عامل تأثیرگذار بر تعیین محدوده نهایی و در نتیجه برنامه‌ریزی تولید است.

۲-۴- عدم قطعیت زمین‌شناسی

۲-۴-۱- مقدمه بر زمین‌آمار

تخمین ذخیره همواره با متغیرهای ناحیه‌ای (متغیرهای که مقدار آن‌ها به مختصات مکانی وابسته است) سروکار دارد. یکی از روش‌های قدرتمند تخمین ذخیره، روش زمین‌آمار است که اگر عیار کانسار ساختار فضایی قوی داشته باشد. این روش می‌تواند بسیار سودمند واقع شود. روش‌های سنتی که مبتنی بر آمار کلاسیک می‌باشند فرض را بر این می‌گذارند که هر نمونه از نظر آماری مستقل از نمونه‌های دیگر است. این نوع استقلال به‌ندرت در داده‌های حاصل از برداشت نمونه‌های معدنی یافت می‌شود.

زمین‌آمار، نوعی آمار است که در آن بستگی فضایی مقادیر در نظر گرفته می‌شود و از این‌رو متغیرهای ناحیه‌ای در آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. زمین‌آمار در مفهوم اروپایی خود به شاخه‌ای از علم آمار گفته می‌شود که مبتنی بر تئوری متغیر ناحیه‌ای است که توسط ماترون پایه‌گذاری شده و به اصطلاح با داده‌ها یا متغیرهای فضایی سروکار دارد و از این‌رو مترادف با آمار فضایی است. زمین‌آمار به مفهوم آمریکایی خود به کاربرد تمامی روش‌های آمار که در علوم زمین مورد استفاده هستند، از جمله آمار کلاسیک و آمار فضایی اطلاق می‌شود. این تعریف از زمین‌آمار مفهومی به مراتب کلی‌تر و وسیع‌تر از مفهوم نظیر آن در کشورهای اروپایی را در بر دارد (مدنی، ۱۳۷۳).

اهداف زمین‌آمار به‌طور کلی به عبارتند از:

- اجرای عملیات آماری شامل جمع‌آوری، سازماندهی، خلاصه‌سازی، نمایش، آنالیز داده‌ها و در نهایت تصمیم‌گیری در محیط‌های زمین‌ساختاری
- فراهم آوردن ابزار مناسب برای برون‌یابی و درون‌یابی خاص

- ارائه الگوریتمی جهت مدل سازی های عددی-زمین شناسی و مدل های عدم قطعیت در داده ها

در زمین آمار چند مفهوم کلیدی وجود دارد که مهم ترین آن ها عبارتند از:

۱- واریوگرام^۱:

سرعت تغییرات مقادیر حول میانگین آن با واریوگرام نشان داده می شود. بدین معنا که داده های نزدیک تر به هم نسبت به داده های دورتر بیشتر شباهت دارند. در واقع واریوگرام نمایانگر میانگین مربعات تفاضل دو متغیر ناحیه ای با فاصله h می باشد. مقدار واریوگرام از رابطه زیر به دست می آید:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (4-2)$$

که در آن:

$\gamma(h)$: مقدار واریوگرام در فاصله h

$N(h)$: تعداد جفت نمونه هایی که به فاصله h از یکدیگر قرار دارند

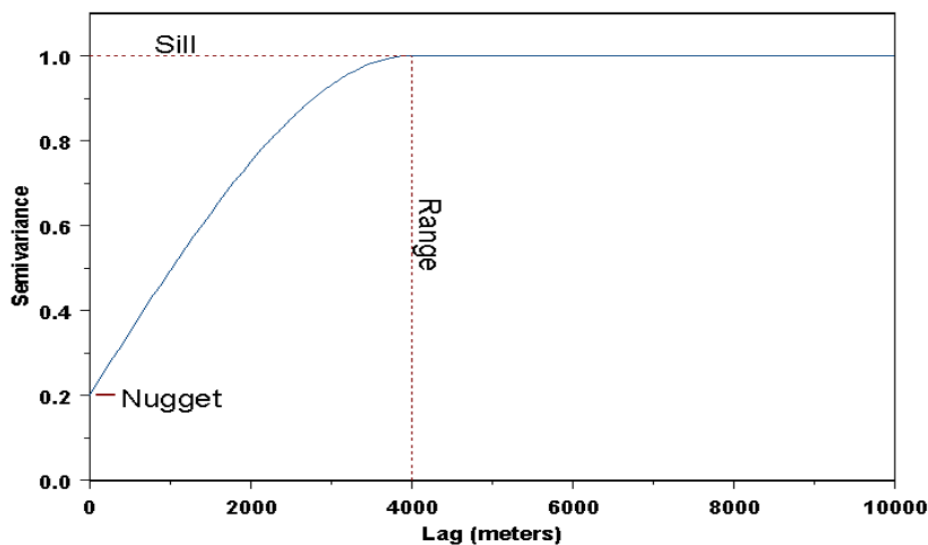
$z(x_i) - z(x_i + h)$: متغیرهای ناحیه ای با فاصله h را نشان می دهد

h : در اصطلاح گام یا لاگ^۲ که معمولاً در شبکه های منظم طول لاگ برابر فاصله شبکه خواهد بود

در شکل (۴-۲) نمونه یک واریوگرام تئوری نشان داده شده است.

۱- Variogram

۲- Lag



شکل ۲-۴- نمونه واریوگرام تئوری (Geoff Bohling, 2015)

۲- بیضی ناهمسانگردی^۱

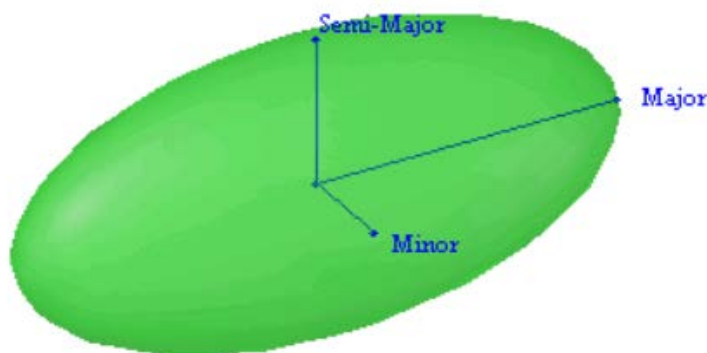
بیضی ناهمسانگردی نشان‌دهنده این است که کانسار در چه جهتی بیشترین و کمترین گسترش را دارد. تشکیل بیضوی یکی از پارامترها مهم در مدل‌سازی متغیر مورد ارزیابی می‌باشد. برای ترسیم بیضی ناهمسانگردی با ترسیم واریوگرام‌های گوناگون در شیب و جهت مختلف بیشترین و کمترین شعاع تأثیر به دست می‌آید. بیشترین شعاع تأثیر در بیضوی ناهمسانگردی در جهت محور اصلی^۲ تعریف می‌شود. در تخمین‌های سه‌بعدی بیشترین گسترش، در جهت محور اصلی است. هم‌چنین جهتی وجود دارد که در آن شعاع تأثیر کمینه^۳ است. این جهت محور کمینه برای بیضی ناهمسانگردی را تعریف می‌کند. در این جهت کمترین گسترش و داده‌ها برای تخمین استفاده می‌شود. محور شبه اصلی^۴ عمود بر دو محور مذکور، به‌عنوان محور سوم بیضی ناهمسانگردی تعریف می‌شد. در یک بیضی ناهمسانگردی، این سه محور عمود بر هم تلقی می‌شوند. در شکل (۲-۵) نمایی از بیضی ناهمسانگردی را می‌توان مشاهده نمود.

۱- Anisotropy Ellipsoid

۲- Major

۳- Minor

۴- Semi-Major



شکل ۵-۲- نمونه‌ای بیضی ناهمسانگردی (Tutorial Surpac, 2007)

۳- واریانس تخمین

واریانس تخمین و توانایی سطح اطمینان در یک تخمین ذخیره یکی از مهم‌ترین نقطه قوت‌های زمین‌آمار است. واریانس تخمین نشانگر خطای بین عیار حقیقی و عیار تخمینی یک قطعه است. مقدار واریانس تخمین به عوامل همچون ویژگی کانی سازی کانسار، واریانس نمونه‌ها شبکه نمونه‌برداری و روش تخمین بستگی دارد (مدنی، ۱۳۷۳).

۴- کریجینگ^۱

کریجینگ یک روش تخمین است که بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار می‌باشد. از مهم‌ترین ویژگی‌های کریجینگ آن است که به ازای هر تخمینی خطای مرتبط با آن را می‌توان محاسبه کرد؛ بنابراین برای هر مقدار تخمین زده شده می‌توان دامنه‌ی اطمینان آن را محاسبه کرد. کریجینگ به دلیل داشتن دو شرط لازم و کافی یعنی میانگین خطای تخمین صفر و حداقل واریانس تخمین به‌عنوان "بهترین تخمینگر خطی نااریب" نامیده می‌شود (حسنی پاک، ۱۳۸۹).

^۱ - Kriging

۵- شبیه‌سازی زمین‌آماري

هدف از یک تخمین مناسب ارائه تخمین با حداقل خطای ممکن است که چنین تخمینی را کریجینگ با تضمین به حداقل رساندن خطا انجام می‌دهد. اگر هدف تخمین دستیابی به مقدار میانگین بر جای یک متغیر باشد کریجینگ روش مفیدی خواهد بود اما اگر هدف تخمین ارزیابی شدت تغییرپذیری یک متغیر باشد کریجینگ معایبی دارد. دستیابی به حداقل واریانس تخمین عیار منجر به هموارسازی مقادیر عیار تخمین زده شده می‌شود. نتیجه‌ی چنین هموارسازی این است که عیار بلوک‌های تخمینی واریانس کمتری نسبت به بلوک‌های واقعی خواهند داشت. هرچند ابعاد بلوک‌ها کوچک‌تر شود هموارسازی غیرواقعی بلوک بیشتر می‌شود لذا می‌بایست پاسخ به این مسئله را در مباحث شبیه‌سازی زمین‌آمار جستجو کرد (حسنی‌پاک و خالصی، ۱۳۸۲).

از مهم‌ترین خاصیت‌های روش شبیه‌سازی زمین‌آماري این است که علاوه بر توانایی برآورد توزیع فضایی متغیر ناحیه‌ای، مجموعه‌ای از تحقق‌های هم احتمال با کانسار را تولید می‌نماید.

الگوریتم شبیه‌سازی تصادفی بسیاری برای غلبه بر این مشکلات پیشنهاد شده است و در میان آن‌ها شبیه‌سازی شرطی نوع خاصی از شبیه‌سازی زمین‌آماري است که ضمن تولید تحقق‌ها، هیستوگرام و واریوگرام داده‌های اولیه را بازسازی نموده و همچنین داده‌های معلوم را با همان مقادیرشان در فضا حفظ می‌کند. در این حالت شبیه‌سازی شرطی^۱ انجام می‌شود. که مقادیر داده‌ها در نقاط نمونه‌برداری شده تغییر نکند. در شبیه‌سازی شرطی رویکردهای متعددی در فرآیند شبیه‌سازی تولید مورد استفاده قرار می‌گیرند. در میان آن‌ها، روش شبیه‌سازی گوسی متوالی به‌عنوان روش سریع، ساده و انعطاف‌پذیر در بازسازی تابع توزیع تجمعی شرطی به‌صورت گسترده استفاده می‌شود (Monjezi et al, 2011; Soltani et al, 2014).

۱- Conditional Simulation

۶- شبیه‌سازی گاوسی متوالی

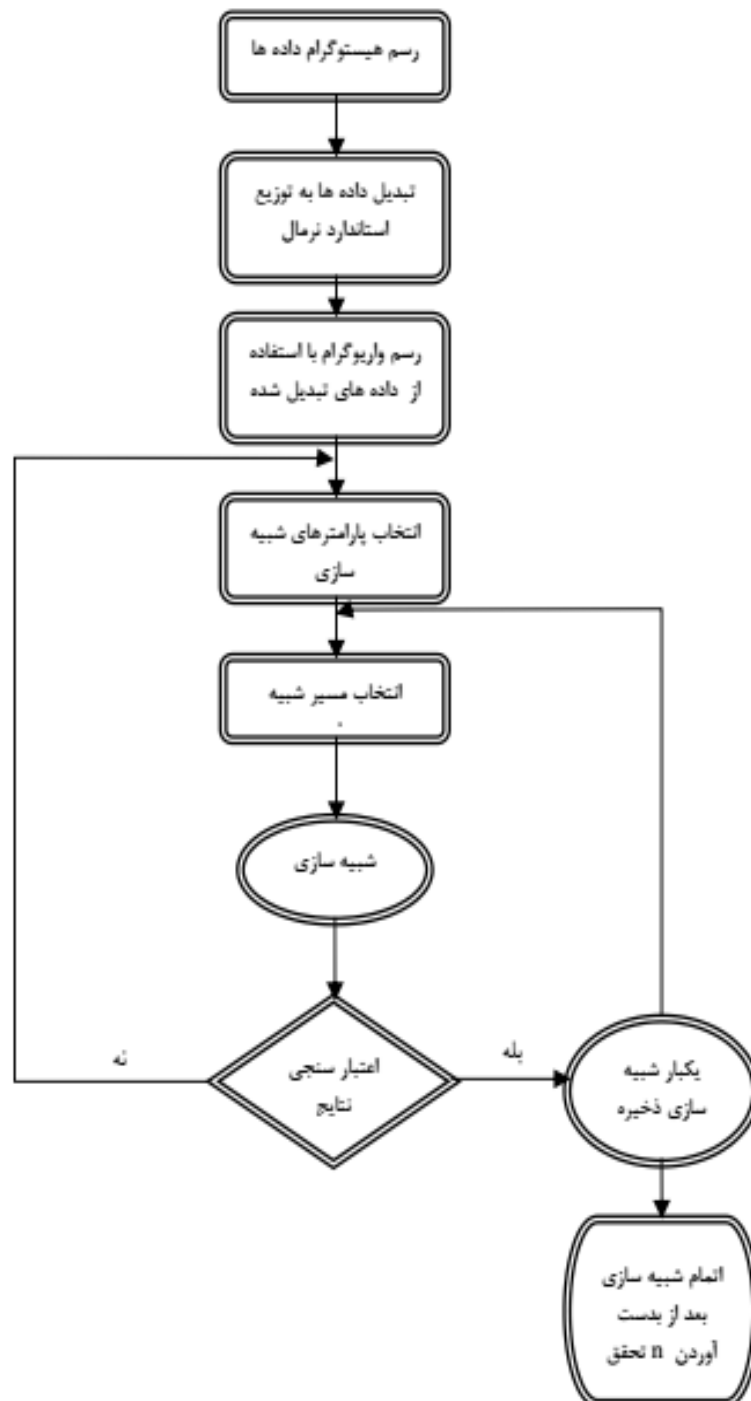
شبیه‌سازی گاوسی متوالی عبارت است یک الگوریتم که یک مسیر تصادفی که از تمام نقاط شبکه بگذرد تعریف می‌شود. کریجینگ ساده بر روی نقاطی که روی این مسیر قرار می‌گیرند کمک می‌کند تا یک توزیع محلی ایجاد شود. سپس از این توزیع یک مقدار بیرون کشیده می‌شود و به مجموعه‌ی نقاط موجود در شبکه اضافه می‌شود. این عملیات دوباره تکرار می‌شود تا تمام نقاط موجود بر روی این مسیر شبیه‌سازی شوند. (حسنی پاک و خالصی، ۱۳۸۲)

مراحل اساسی الگوریتم شبیه‌سازی گاوسی متوالی به شرح زیر است: (Abichequer et al, 2011) و خالو کاکایی، ۱۳۹۱)

- ۱- به دست آوردن هیستوگرام داده‌های اولیه و تبدیل این داده‌ها به استاندارد نرمال
- ۲- انجام واریوگرافی با داده‌های نرمال
- ۳- تعیین شبکه بر روی محدوده‌ی موردنظر برای شبیه‌سازی
- ۴- انتخاب تصادفی یک گره از شبکه به منظور شبیه‌سازی
- ۵- تخمین گره انتخابی به روش کریجینگ با استفاده از داده‌های اصلی و مقادیر گره قبلی که شبیه‌سازی شده‌اند
- ۶- ساخت یک توزیع نرمال با میانگین و واریانس محاسبه‌شده از مرحله قبل
- ۷- انتخاب تصادفی از توزیع مذکور و قرار دادن آن در این گره از شبکه
- ۸- انتخاب گره‌ی دیگر از شبکه به صورت تصادفی تا جایی که تمام گره‌های شبکه به صورت تصادفی انتخاب شوند
- ۹- ادامه فرایند از مرحله ۴
- ۱۰- تبدیل معکوس داده‌ها به حالت قبل
- ۱۱- انجام مجدد مراحل قبل به منظور شبیه‌سازی دیگر

۱۲-تمام شبیه‌سازی پس از تعداد تحقیق موردنظر

در شکل (۶-۲) الگوریتم شبیه‌سازی متوالی گوسی نشان داده شده است.



شکل ۶-۲- الگوریتم شبیه‌سازی گوسی متوالی (سعید، ۱۳۸۳)

۲-۴-۲- بررسی سابقه علمی موضوع

مطالعات کاراسکو و همکاران^۱ (۲۰۰۴) در معادن مس شمال شیلی نشان داد که برآثر ارزیابی‌های اشتباه مقادیر قابل‌توجهی از ماده معدنی به دیوهای باطله و بخش‌هایی از باطله به کارخانه فرآوری ارسال شده است. مطالعات بانک جهانی نیز در سال (۲۰۰۷) در معادن آمریکا نشان می‌دهد که مشکلات ناشی از تخمین نادرست در ۷۳ درصد از پروژه‌های معدنی باعث زیانی در حدود ۱۱۰۶ میلیون دلار شده است. سعید در سال ۱۳۸۳ در یک مطالعه در ایران مرکزی به‌وسیله ۱۰۰ عدد شبیه‌سازی صورت پذیرفته نشان داد که ذخیره متوسط کانسار به میزان ۱۰/۷ میلیون تن با عیار ۲ درصد تخمین زده شده است. همچنین به‌وسیله نقشه‌های عیار-تناژ تغییرات تناژ ماده با عیار ۲ درصد از ۱۰/۳۷ تا ۱۲/۰۶ میلیون تن تعیین شده است.

در سال ۲۰۰۷ دیمتراکپولوس و همکاران^۲ عدم قطعیت زمین‌شناسی در برنامه‌ریزی تولید مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی دو محدوده مجزا زغال به روش‌های شبیه‌سازی شرطی مورد بررسی قرار داده شده است.

غلام نژاد و اصانلو نیز در سال ۲۰۰۷ در مطالعه‌ای عدم قطعیت عیار ماده معدنی را در طراحی پوش بک‌ها مورد بررسی قرار دادند و شاخصی به‌عنوان ریسک هر پیت لانه‌ای معرفی نمودند.

در سال ۱۳۸۸ در مطالعه‌ای موسوی و همکاران برای عدم قطعیت عیار در کانسار فسفات اسفوردی با روش شبیه‌سازی شرطی برای عدم قطعیت عیار بلوک‌ها استفاده شد که نتیجه در محاسبه ذخیره و مدل‌سازی استفاده شد.

۱- Carasco et al

۲- Dimitrakopulos et al

گودی^۱ و دیمتراکپولوس در سال ۲۰۰۴ نیز عدم قطعیت زمین‌شناسی یکی از علت‌های اصلی در برآورده نشدن انتظارات پروژه‌ها است و اهمیت کمی سازی عدم قطعیت زمین‌شناسی را در کاهش انحراف از اهداف تولید و افزایش یافتن پروژه نشان دادند.

گودی و همکاران در سال ۲۰۰۹ رویکردی از روش‌هایی برای ریسک در بهینه‌سازی کاواک ارائه کرد و توانست تحلیل ریسک روی عدم قطعیت عیار برای جنبه‌های مختلف ارائه کند.

در سال ۲۰۰۹ اصغری و همکاران به مقایسه میزان ذخیره در معدن چغارت بین روش حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی و کریجینگ معمولی پرداختند که در نهایت میزان حاصل از شبیه‌سازی ۱۰۸ میلیون تن و میزان ذخیره از کریجینگ ۱۱۲ میلیون تن برآورد شده است.

در سال ۲۰۱۱ کوشاوند و عسکری نسب با استفاده از دو الگوریتم شبیه‌سازی روش شاخص متوالی^۲ (SIS) و روش گوسی متوالی توانستند ریسک زمین‌شناسی را تا حدی کاهش دهند.

در سال‌های ۲۰۱۱ در مطالعه‌ای منجزی^۳ و همکاران با روش کریجینگ و شبیه‌سازی در مس سونگون توانستند ارزش خالص فعلی به میزان ۴۰ درصد افزایش دهند.

۲-۵- عدم قطعیت اقتصادی

۲-۵-۱- پیش‌بینی قیمت فلز

روش مرسوم پیش‌بینی قیمت ماده معدنی با توجه به قیمت‌های گذشته می‌باشد. در پروژه‌های که عمر متوسط پروژه ۱۰ تا ۲۰ سال می‌باشد این پیش‌بینی چندان قابل اتکا نیست زیرا اگر بخواهیم از ضریب

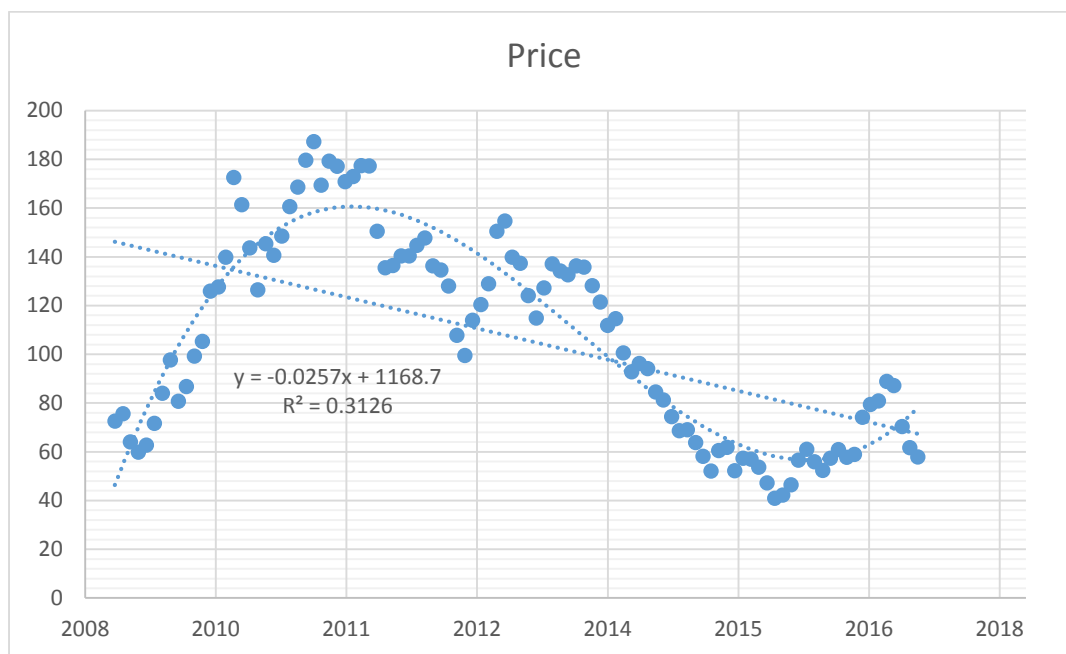
۱- Godoy

۲-Sequential Indicator Simulation

۳-Monjezi

همبستگی مطلوبی برخوردار باشند باید از تعداد داده‌های کمتری در پیش‌بینی قیمت استفاده نماییم که در نتیجه قادر به پیش‌بینی قیمت طی دوره‌های بلندمدت نخواهد بود.

کلیه قیمت‌ها سنگ‌آهن از سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۱۷ در شکل (۷-۲) دیده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود معادله برازش شده در شکل (۷-۲) دارای ضریب همبستگی بسیار پایینی است؛ که این به خاطر افت ناگهانی قیمت سنگ‌آهن در سال ۲۰۱۱ تا سال ۲۰۱۵ است.



شکل ۷-۲- نمودار برازش شده بر داده‌های قیمت سنگ‌آهن از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ (indexmundi.com)

معادلات برازش شده در شکل (۷-۲) و تغییرات شدید قیمت خصوصاً در سال‌های اخیر از روش‌های ابتدایی پیش‌بینی قیمت عاجز شده است و دارای عدم قطعیت بسیار بالایی است.

۲-۵-۲- ارزیابی اقتصادی در فضای عدم قطعیت

به‌طور کلی روش ارزیابی پروژه‌ها به دو روش سنتی و روش جدید تقسیم‌بندی می‌شود. روش جدول جریان تنزیل شده که یکی از متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ارزیابی پروژه‌ها است که

شاخص‌های مالی متفاوتی از جمله ارزش خالص فعلی، نرخ بازگشت سرمایه^۱ و... ارائه می‌کند. این روش در رده روش‌های سنتی تقسیم‌بندی شده است (فانی پاکدل و همکاران، ۱۳۸۹).

روش DCF با این که روشی پرکاربرد است ولی معایبی دارد که به شرح زیر است:

۱- روش DCF روش انعطاف‌پذیری نیست و نمی‌تواند ریسک‌های موجود در پروژه را پیش‌بینی کند

۲- در روش DCF معمولاً انواع درآمد و هزینه‌ها را ثابت و با ریسک مشابه فرض می‌کنند که این باعث عدم قطعیت زیادی در پروژه می‌شود.

ضعف‌های روش DCF موجب ارائه رویکرد جدیدی در تصمیم‌گیری‌های مالی و اقتصادی با نام انتخاب حقیقی شده است. این رویکرد مبتنی بر تصمیم‌گیری در شرایط نامطمئن و پیچیده می‌باشد که در آن تعیین انتظارات از تغییرات آتی با در نظر گرفتن عدم اطمینان‌های موجود نقش اساسی ایفا می‌نماید. بیش‌ترین کاربرد انتخاب حقیقی در زمینه تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری و یا ارزش‌گذاری در زمینه فعالیت‌هایی است خطرپذیری بالایی برخوردارند (Dimitrakopoulos & Abdel Sabour, 2011).

دو ویژگی مهم روش اختیار حقیقی را می‌توان انعطاف‌پذیری پروژه و برای ارزش آتی از روش بدون ریسک استفاده می‌کند. با توجه به اینکه روش اختیار حقیقی نسبت به روش‌های سنتی دارد ولی هنوز مدیران و شرکت‌های تمایلی از استفاده از این روش نشان نمی‌دهند. البته روش DCF تا زمانی که اتفاقات آتی تفاوت زیادی با انتظارات نداشته باشد با اغماض و تقریب قابل قبولی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. ولی مشکل زمانی پدید می‌آید که محیط فعالیت دارای عدم قطعیت بالا و به همین دلیل از پیچیدگی زیادی برخوردار باشد (فانی پاکدل و همکاران، ۱۳۸۹).

^۱ - Invest Return Rate

انتخاب حقیقی به مفهوم داشتن حق انتخاب یک ارزش حال حاضر حاصل از یک جریان نقدینگی از
طریقه سرمایه‌گذاری هنگام دسترسی به موقعیت مناسب است این حق انتخاب تنها وقتی دارای ارزش
است که نتایج مورد توقع سرمایه‌گذاری عدم قطعیت وجود داشته باشد هرچند این عدم قطعیت بیشتر
باشد ارزش داشتن این حق در سرمایه‌گذاری بیشتر می‌شود.

اگر بخواهیم اختیار حقیقی را به‌طور ساده و شهودی تعریف نماییم می‌توان گفت که اختیار واقعی
مانند نقشه راهی است که در جاهای مختلف آن نشانه‌ها و راهنماهایی تعبیه شده که مسیرها و
انتخاب‌های موجود را در اختیار قرار می‌دهد و بدین ترتیب نه تنها امکان تصمیم‌گیری مناسب وجود
دارد بلکه این ساختار به افزایش آگاهی و همچنین یادگیری بهتر فرد کمک می‌نماید

روش اختیار واقعی رویکردی سیستماتیک است که در آن با استفاده از نظریه فاینانس^۱، تحلیل
اقتصادی، تحقیق در عملیات (علم مدیریت)، نظریه تصمیم، علم آمار، مدل‌سازی اقتصادسنجی
همچنین نظریه اختیار، در فضای تصمیم‌گیری پویا و همچنین محیط‌های تجاری نامطمئن و در قالب
تصمیم‌گیری استراتژیک سرمایه‌گذاری، ارزش‌گذاری سرمایه‌گذاری و نیز هزینه‌یابی طرح‌ها و پروژه‌های
اقتصادی، دارایی‌ها اعم از فیزیکی و مالی قیمت‌گذاری می‌شود. (Mun, 2006)

نقش اختیار واقعی در موارد زیر بسیار حیاتی و مهم است:

- تصمیم‌گیری در خصوص سرمایه‌گذاری در فعالیت‌ها و طرح‌هایی که با عدم اطمینان بالایی
برخورد دارند.
- ارزش‌گذاری تصمیمات استراتژیک که در قالب تحلیل توجیه‌پذیری مالی ارائه می‌شوند
- دسته‌بندی و اولویت‌گذاری هر یک از تصمیمات مزبور بر اساس شاخص‌های کمی و کیفی
- بهینه‌سازی تصمیمات استراتژیک سرمایه‌گذاری با توجه مسیرهای مختلف تصمیم‌گیری

- تعیین زمان مناسب برای ورود و یا خروج از سرمایه‌گذاری

مدیریت فرصت‌ها و موقعیت فعلی و توسعه فرصت‌های تصمیم‌گیری استراتژیک آتی یکی از تفاوت‌های عمده ای که روش اختیار واقعی را از روش های سنتی ارزیابی در سرمایه‌گذاری متمایز می‌نماید. این است که در روش سنتی تمام تصمیمات و ارزیابی‌ها از جمله تنزیل جریان نقد آتی در ابتدا صورت می‌پذیرد و پس از ورود دیگر هیچ‌گونه امکان تغییری در طی زمان وجود ندارد لیکن در روش اختیار واقعی مسیرهای مختلفی برای تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شود که انعطاف‌پذیری کافی را برای تصمیم‌گیری‌های مدیریت در محیط‌های نامطمئن فراهم می‌آورد. از سوی دیگر بر اساس دیدگاه خبرگان و تحلیل گران، اختیار واقعی نگرش جدیدی را برای بررسی و ارزیابی پروژه‌ها در اختیار می‌گذارد که در روش‌های سنتی مانند تنزیل وجوه نقد وجود ندارد.

نکته‌ای که نباید از نظر دور داشت این است که یکی از فرض اصلی روش اختیار واقعی این است که مدیریت بنگاه فردی منطقی است و از صلاحیت کافی در زمینه تصمیمات مربوط برخوردار است و در این خصوص صرفه و صلاح سهامداران را در نظر گرفته و حداکثر تلاش را در زمینه حداکثر سازی ثروت ایشان مصروف می‌دارد و نکته دیگر اینکه اختیار قابل اجراست (Mun, 2006).

روش تخمین ارزش اختیار حقیقی به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شود: (Gamba, 2003)

۱- حل معادلات مشتقات جزئی^۱

۲- روش درخت دوجمله‌ای^۲

۳- روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی

^۱ - Partial Differential Equation (PDE)

^۲ - Binomial Tree

انتخاب یکی از این روش‌ها به ماهیت مسئله بستگی دارد که بر اساس تعداد متغیرها و چندبعدی بودن مسئله می‌توان روش مناسب تخمین ارزش را استفاده کرد.

روش مشتقات جزئی اولین بار توسط برنان و شوارتز^۱ برای ارزشیابی اختیار حقیقی استفاده و بعد در معادلات ارزش معدن مورد استفاده قرار گرفت. در این روش با روش‌های عددی و تقسیم‌بندی به شبکه‌های مشخص و تغییرات حدی معادلات دیفرانسیل ارزش اختیار تخمین زده می‌شود.

روش درخت دوجمله‌ای اولین بار توسط کاکس^۲ ارائه شد و کلی^۳ آن را در ارزشیابی پروژه‌های معدنی به کاربرد برده است. روش درخت دوجمله‌ای در ارزشیابی پروژه‌ها کاربرد فراوانی دارد ولی با افزایش متغیرها این روش غیرکارا می‌شود و باید از روش‌های دیگر استفاده کرد.

روش شبیه‌سازی در سال‌های اخیر با توجه به دقت و کارایی روش مورد توجه محققین و پژوهشگران قرار گرفته است. این روش بسیار انعطاف‌پذیر بوده و می‌توان مسائل با چند متغیر را به راحتی حل نماید. این روش با شبیه‌سازی قیمت در طول یک مدت مشخص آنچه بر سیستم رخ می‌دهد را مشخص کرده و عملیات جهت بیشینه کردن سود را به صورت پیشرو انجام می‌دهد.

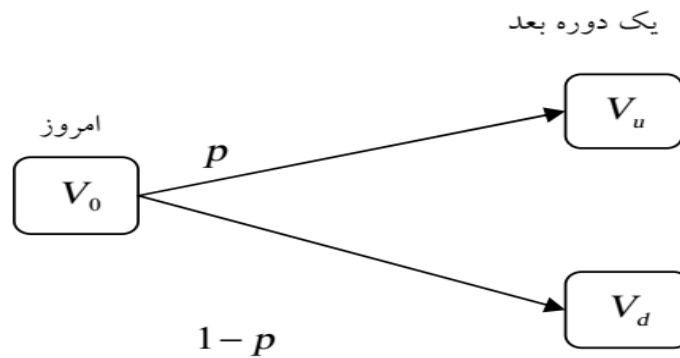
به منظور تحلیل هر چه بهتر اختیار واقعی و نیز قیمت‌گذاری آن از چارچوب قیمت‌گذاری اختیار که مبتنی بر مدل درخت دوجمله‌ای استفاده شده است. در درخت دو جمله هر نقطه تصمیم‌گیری که دربرگیرنده یک وضعیت مشخص است با یک گره نشان داده می‌شود و مسیرهایی که این گره‌ها را به هم متصل می‌نمایند نشان‌دهنده حالات ممکن است که وضعیت می‌توانند به وقوع بپیوندند. لیکن با توجه به اینکه مدل دوجمله‌ای مبتنی بر دو حالت کلی است لذا فرض می‌شود که وضعیت فعالیت‌های اقتصادی بالقوه می‌تواند بهتر و یا بدتر شود. بر این اساس احتمال بهتر شدن وضعیت و یا

۱- Bernnan & Schwartz

۲- Cox

۳- Kelly

به عبارت افزایش ارزش موردنظر برای یک دوره آتی p و احتمال بدتر شدن آن یا کاهش ارزش مزبور را $1-p$ در نظر می‌گیریم (محمودی، اصائلو، اصفهانی پور ۲۰۱۳).



شکل ۲-۸- مدل دوجمله‌ای شرایط فعالیت اقتصادی برای یک دوره

تعیین احتمال تغییر حائز نقش اساسی در ارتباط با ارزش‌گذاری اختیار و به‌طور کلی ارزش‌گذاری دارایی‌ها است. این احتمال در تحلیل اختیار واقعی بر اساس ارزش‌گذاری ریسک-خنثی^۱ محاسبه می‌گردد. بر این اساس ارزش‌گذاری ریسک-خنثی به نحوی صورت می‌پذیرد که اثر تغییرات آتی خنثی شود. برای این منظور فرض می‌نماییم که برای هر یک واحد دارایی دو حالت به ترتیب زیر وجود داشته باشد:

۱. اگر حالت افزایش (گام بالا) رخ دهد، ارزش دارایی u , $u < 1$ می‌شود.

۲. اگر حالت کاهش (گام پایین) رخ دهد، ارزش دارایی d , $d < 1$ می‌شود.

در این صورت احتمال ریسک-خنثی که آن را با P و Q نمایش می‌دهیم مقداری است که رابطه (۲-۱) و (۲-۲) برقرار می‌نماید:

۱- Risk-neutral Pricing

$$\text{Up step Probability}(P) = \frac{e^{r\Delta t} - d}{u - d} \quad (1-2)$$

$$\text{Down step Probability}(Q) = 1 - P \quad (2-2)$$

که در آن r نرخ بهره یا سود بدون ریسک (پیوسته) و Δt مدت دوره برحسب واحد زمان است.

ضریب گام‌های افزایش (u) و کاهش (d) به طریق زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{Up step} = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (3-2)$$

$$\text{Down step} = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (4-2)$$

که در آن σ فراریت مشاهده شده در محصول نهایی که از تقسیم انحراف معیار داده‌های قیمت پیش از وقوع قیمت لحظه‌ای برای شروع انتخاب بر میانگین همان داده‌ها به دست می‌آید.

۲-۵-۳- بررسی سابقه علمی موضوع

ریشه اصلی روش اختیار حقیقی به سال ۱۹۳۰ وقتی که سقوط قیمت نفت زیان‌های فراوانی را تولیدکنندگان تحمیل کرد این روش تا سال ۱۹۵۰ به کار گرفته شد ولی به مرور زمان به کنار رفت. تا در سال ۱۹۷۷ یکبار دیگر توسط مایرز^۱ برای ارزش‌گذاری اقتصادی پروژه ارائه شد. آقای برنان و شواتزر^۲ در سال ۱۹۸۵ از این نظریه در پروژه‌های معدنی استفاده کردند. آن‌ها توانستند توسط روش‌های عددی و حل معادلات دیفرانسیل مدلی برای روش انتخاب حقیقی ارائه دهند.

از مهم‌ترین تحقیق‌هایی که در زمینه اختیار حقیقی ارائه شده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- Maiez

۲- Brennan & Schwartz

اسلید^۱ در سال ۲۰۰۱ اطلاعات ۲۱ معدن مس در کانادا برای ارزیابی انعطاف‌پذیری مدیریتی را در معدن مورد بررسی قرار داد و در ادامه با روش اختیار حقیقی مسئله تغییرات سرمایه‌گذاری را در معدن بررسی کرد.

دیاس^۲ در سال ۲۰۰۴ عدم قطعیت قیمت ماده معدنی را در طراحی یک معدن روباز مورد بررسی قرارداد. در سال ۲۰۰۶ کوستالیمما و همکاران^۳ برای تصمیم‌گیری در مورد سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از منابع طبیعی با استفاده از مدل‌سازی با روش گزینه واقعی را مورد بررسی قراردادند.

توپال^۴ در سال ۲۰۰۸ با مقایسه در ارزیابی در معدن طلا روش جریان نقدی تنزیل شده، آنالیز درخت تصمیم‌گیری، حداقل مربعات مونت کارلو^۵ و رویکرد اختیار واقعی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسید که روش رویکرد اختیارات واقعی ارزش پروژه را بسیار بالاتر از دیگر روش‌ها برآورد می‌کند. شفیی و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از رویکرد اختیارات حقیقی و با استفاده از رویکردی جدید تمام هزینه‌ها را به‌عنوان تابعی از نرخ تولید در رویکرد اختیارات حقیقی اضافه کردند که این امر باعث افزایش ارزش اقتصادی معدن شد.

در سال ۲۰۱۲ دهقانی و عطایی پور با در نظر گرفتن عدم قطعیت اقتصادی به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در فرایند ارزیابی پروژه به ارزیابی اقتصادی در معدن مس Cayeli پرداختند. آن‌ها برای محاسبه ارزش خالص فعلی از رویکرد درخت دوجمله‌ای استفاده کردند. در ادامه عدم قطعیت قیمت فلز و هزینه عملیاتی را به‌عنوان پارامترهای اقتصادی مورد ارزیابی قراردادند. در ادامه در سال ۲۰۱۴ در مقاله‌ای یک مدل جدید با عنوان روش هرمی بر مبنای روش اختیارات حقیقی و برای برطرف کردن

۱- Slade

۲- Diass

۳- Costama et al

۴- Topal

۵- Least Squares Monte-Carlo

ناکارآمدی درخت دوجمله‌ای ارائه شد. در ادامه با استفاده از نتایج تحقیق نشان داد که با در نظر گرفتن عدم قطعیت اقتصادی به روش هرمی، مقدار ارزش پروژه بیشتر و قابل اعتمادتر است.

در سال ۲۰۰۷ در مقاله دیمترایکپلس و عبدلصبور قابلیت استفاده از روش جدید گزینه واقعی را در معادن روباز به چالش کشیدند. آن‌ها از روش حداقل مربعات مونت کارلو انعطاف‌پذیر پروژه را بررسی کرده که نتایج خوبی با توجه به نوع پیچیدگی مسئله به دست آوردند. همچنین برای اولین بار در سال ۲۰۱۲ با ترکیب عدم قطعیت زمین‌شناسی و بازار و محدودیت‌های عملیاتی در طراحی در معادن روباز توانستند به یک برنامه مطلوب‌تر از روش‌های قبلی به دست آورند.

۲-۶- جمع‌بندی

در این فصل عدم قطعیت زمین‌شناسی و عدم قطعیت اقتصادی به‌عنوان مهم‌ترین عامل در برنامه‌ریزی تولید مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه روش زمین‌آمار، شبیه‌سازی زمین‌آمار و پیشینه تحقیق در عدم قطعیت زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش بعدی روش درخت دوجمله‌ای و پیشینه این روش در پروژه‌های معدنی مورد بررسی قرار گرفته است. روش‌های کمی عدم قطعیت‌ها در ارزیابی‌ها یک کانسار منجر به تخمین واقعی‌تر می‌شود.

فصل سوم:

شیء سازی زمین آماری، مدل سازی و برنامه ریزی

۳-۱- مقدمه

در این فصل روش تحقیق استفاده شده در این پایان‌نامه ارائه شده است و دارای سه بخش اصلی است. در بخش اول به معرفی معدن و موقعیت مکانی آن پرداخته شده است. بخش دوم به وسیله اطلاعات گمانه‌ها ساختار فضایی کانسار ترسیم می‌شود. در ادامه با استفاده از روش زمین‌آمار واریوگرام‌های در جهت مختلف ترسیم می‌شود و بهترین واریوگرام جهت تخمین ذخیره توسط روش کریجینگ انتخاب می‌شود و در نهایت از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی جهت عملیات شبیه‌سازی کانسار استفاده شده است. در بخش سوم به بررسی عدم قطعیت قیمت با استفاده از روش اختیار حقیقی و روش درخت دوجمله‌ای پرداخته شده است.

۳-۲- موقعیت جغرافیایی

معدن سنگ‌آهن شهرک در ۵۶ کیلومتری شمال تا شمال باختر بیجار و ۲۴ کیلومتری شمال باختر حسن‌آباد یاسوکند (فاصله هوایی) در استان کردستان واقع شده است. در شکل (۳-۱) موقعیت جغرافیایی این معدن نشان داده شده است. این کانسار در منطقه کوهستانی واقع شده و ارتفاع آن از سطح دریا حدوداً ۲۳۵۰ متر می‌باشد.



شکل ۳-۱- موقعیت جغرافیایی معدن شهرک نسبت به شهرهای بیجار و حسن‌آباد یاسوکند

35

۳-۳- تعیین توزیع فضایی و ارزیابی ذخیره کانسار

برای مدل سازی نرم افزارهای زیادی موجود است که غالباً آن ها انحصاری بوده و در اختیار شرکت ها بزرگ معدنی یا دانشگاه ها و مراکز تحقیقاتی خاص است. یکی از نرم افزار موجود Surpac است که به دلیل در دسترس بودن این نرم افزار و داشتن ماژول های فراوان کاربردی و سازگاری با نرم افزار NPV Scheduler از آن برای مدل سازی سنگ آهن شهرک استفاده شده است. روند کلی مدل سازی سه بعدی زمین شناسی و مدل بلوکی و عیار مدل بلوکی در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.

برای مدل سازی در نرم افزار Surpac به چهار فایل اصلی نیاز است این فایل ها نیاز است

۱. مختصات دهانه گمانه ها^۱

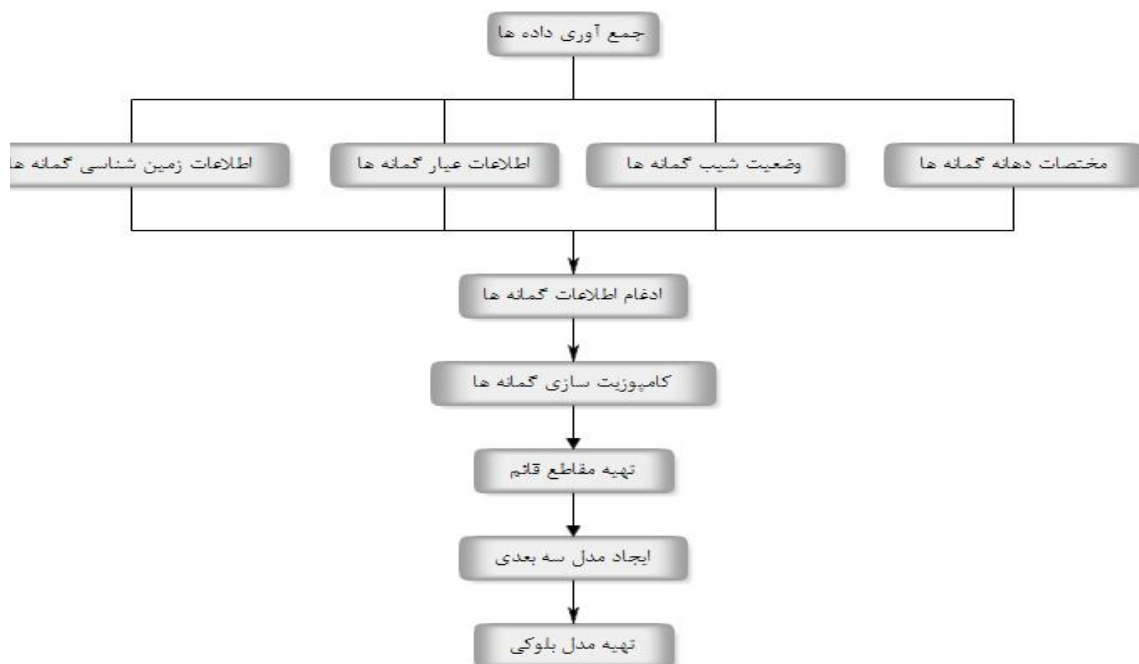
۲. وضعیت حفاری گمانه ها^۲

۳. اطلاعات عیاری گمانه ها^۳

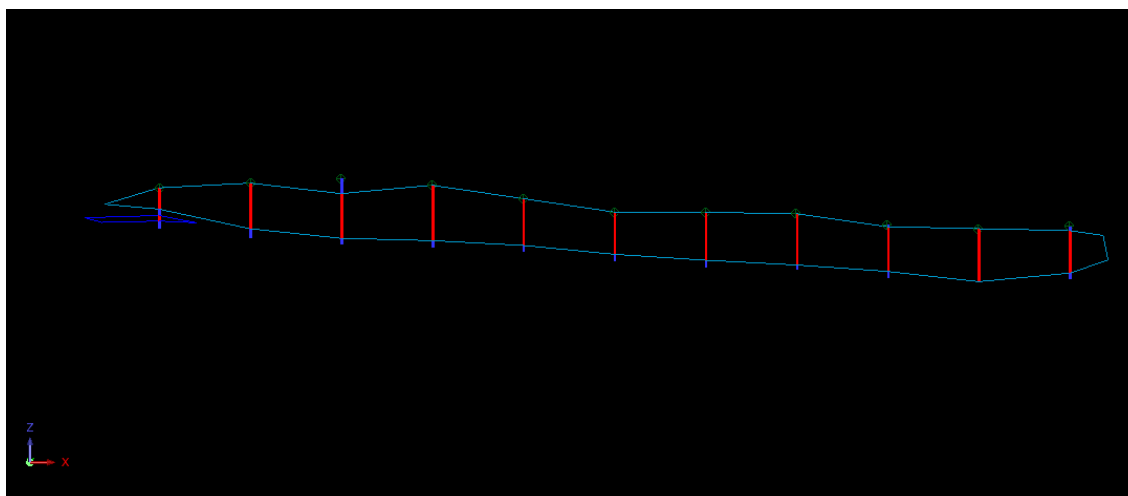
۴. اطلاعات زمین شناسی گمانه ها^۴

پس از وارد کردن این اطلاعات به نرم افزار و ادغام آن ها با یکدیگر فایل گمانه ایجاد می شود که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. با توجه به گزارش معدن ارتفاع پله معدنی به عنوان ارتفاع بلوک و برابر ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. برای تعیین هندسی فضای تخمین از اطلاعات زمین شناسی، زمین ساختی و داده های عیاری گمانه ها به منظور ایجاد مقاطع قائم استفاده می شود. سپس با به کارگیری از مقاطع قائم و اتصال آن ها به یکدیگر نسبت به ساخت مدل سه بعدی ماده معدنی اقدام می شود. شکل (۳-۴) و (۳-۵) به ترتیب نمونه از مقاطع قائم و مدل بلوکی سه بعدی نشان داده شده است.

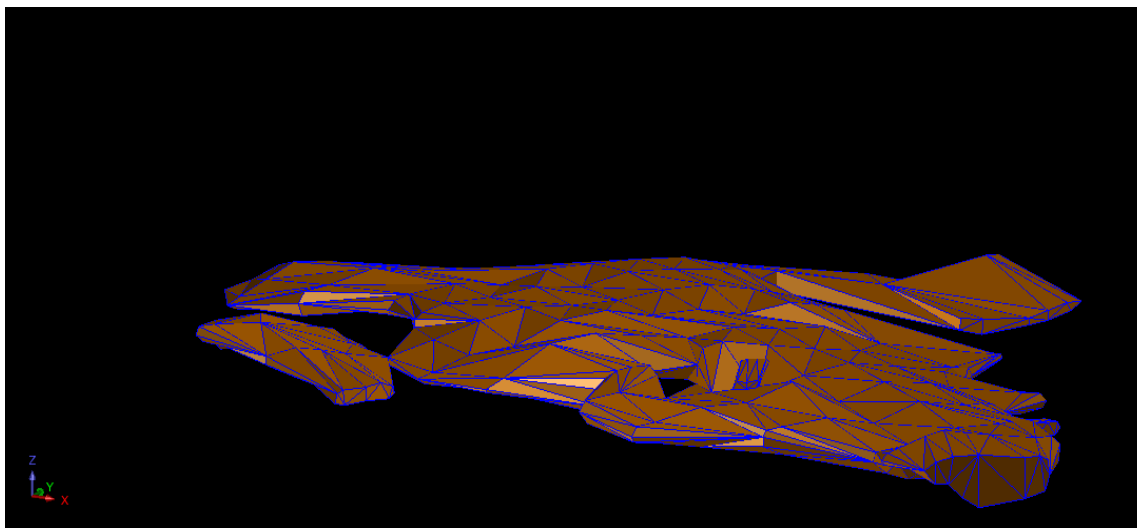
۱- Collar
۲- Survey
۳- Assay
۴- Geology



شکل ۳-۳- روند مدل سازی کانسار



شکل ۳-۴- نمونه از مقطع قائم ترسیم شده در معدن سنگ آهن شهرک



شکل ۳-۵- نمایشی از فضای تخمین تهیه شده برای تخمین مدل بلوکی

۳-۴- بررسی آماری داده‌ها

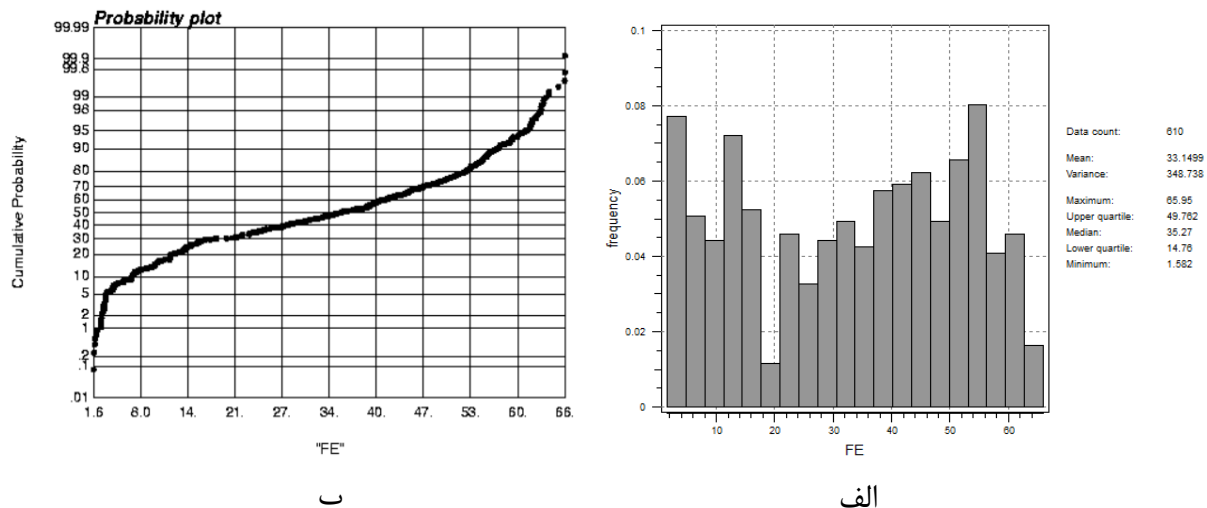
اولین قدم در بررسی‌های کمی، مطالعات آماری پایه و استخراج خصوصیات آماری مربوط به داده‌ها است. روند کلی مطالعات آماری به صورت زیر است.

- رسم نمودار توزیع فراوانی داده‌های اولیه یا خام
- بررسی داده‌های خارج از ردیف
- بررسی وجود یا عدم وجود روند در کانسار مورد مطالعه
- تبدیل داده‌ها به تابع توزیع نرمال استاندارد

۳-۴-۱- رسم نمودار توزیع فراوانی داده‌های اولیه یا خام

یکی از کاربردهای نمودار توزیع فراوانی تشخیص نوع توزیع داده‌های اولیه است. شکل (۳-۶-الف) و شکل (۳-۶-ب) به ترتیب توزیع فراوانی و نمودار احتمال داده‌های اولیه‌ی عیار آهن کانسار سنگ آهن شهرک را نشان می‌دهد. این شکل نشان‌دهنده دومدی یا دونمایی بودن داده‌ها اولیه را نشان می‌دهد. بنابراین برای تخمین و شبیه‌سازی داده‌ها به توزیع نرمال تبدیل می‌شود و با توزیع نرمال مدل‌سازی

خواهد شد. همان‌طور که در شکل (۳-۶) ملاحظه می‌شود، برای تعداد ۶۱۰ نمونه که در پروژه استفاده شده میانگین ۳۳/۱۵۰، واریانس ۳۴۸/۷۳۸ و ماکزیمم عیار آهن برابر ۶۵/۹۵ می‌باشد.



شکل ۳-۶- نمودار توزیع فراوانی و احتمال عیار آهن داده اولیه (الف) نمودار توزیع فراوانی (ب) نمودار احتمال

۳-۴-۲- بررسی روش‌های آماری آزمون مقادیر خارج از ردیف

در مباحث آماری به مقادیری که به‌طور معنی‌داری نسبت به سایر مقادیر اختلاف دارند، مقادیر خارج از ردیف گویند. این مقادیر گاهی به دلیل وجود خطاهای تجربی، مانند خطای آنالیز، در داده‌ها وارد می‌شوند، ولی گاهی هم به دلیل ناهمگنی‌های موجود در جامعه داده‌های اکتشافی ایجاد می‌شوند. پرواضح است که چنین توزیع‌های را نمی‌توان توزیع نرمال در نظر گرفت. جهت نرمال کردن داده‌ها اولین قدم برطرف کردن مشکل وجود مقادیر خارج از ردیف می‌باشد. به این منظور سه راه وجود دارد.

۱. حذف مقادیر خارج از ردیف از میان داده‌های آماری، سپس نرمال کردن داده‌ها و مشخص

نمودن حد زمینه و ناهنجاری و درنهایت برگرداندن این داده‌ها به جامعه آماری.

۲. جایگزینی مقادیر خارج از ردیف به‌وسیله آزمون مقادیر خارج از ردیف که توسط دورفل^۱ ارائه

شده است

۳. ساده‌ترین روش نیز جایگزینی مقادیر خارج از ردیف توسط ماکزیمم مقادیر کمتر از مقادیر

خارج از ردیف می‌باشد.

در این تحقیق برای حذف داده‌های خارج از ردیف از روش نموداری دورفل استفاده شده است. مطابق شکل (۷-۳) دورفل نموداری برای تعیین حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف تهیه کرده است. این نمودار برای دو سطح معنی‌دار پنج درصد و یک درصد تهیه شده است (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰).

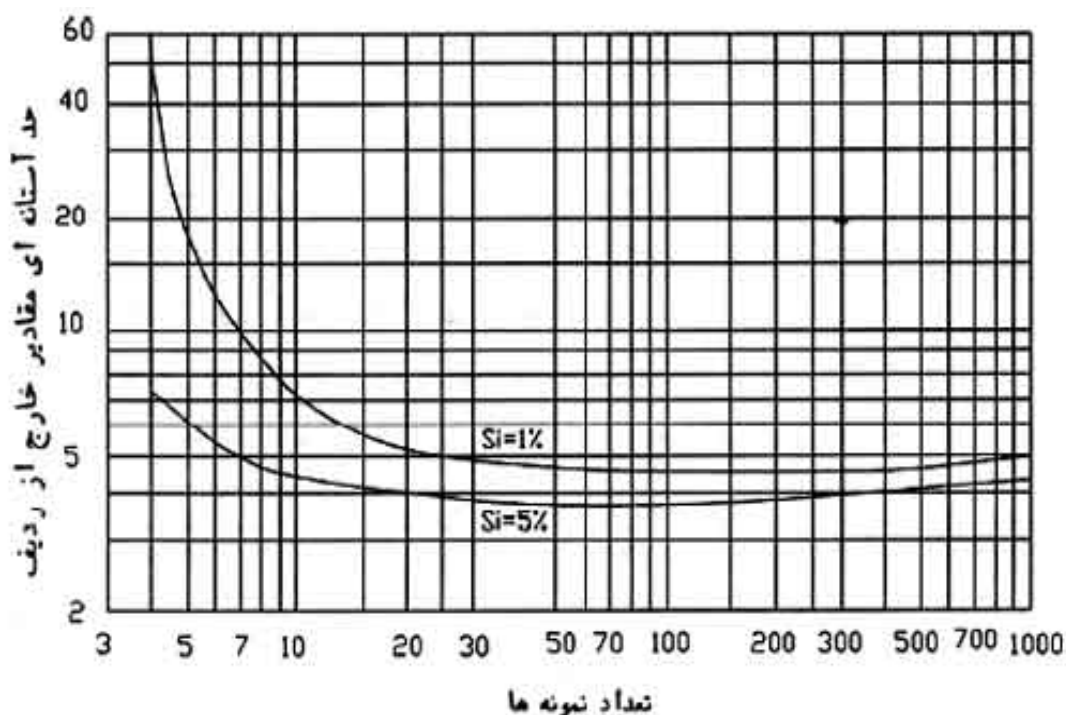
برای انجام آزمون مقادیر خارج از ردیف، ابتدا داده‌ها را به‌صورت صعودی مرتب نموده و میانگین و انحراف معیار داده‌ها بدون در نظر گرفتن بزرگ‌ترین مقدار داده‌ها محاسبه می‌شود. سپس بزرگ‌ترین مقدار داده‌ها (X_A) در صورتی که در رابطه زیر صدق کند، یک مقدار خارج از ردیف در نظر گرفته می‌شود.

$$X_A \geq \bar{X} + S. g \quad (۱-۳)$$

که در آن g حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف است که از نمودار دورفل به دست می‌آید. این کار تا آنجا انجام می‌گیرد که این رابطه دیگر صادق نباشد. بنابراین آخرین مقدار محاسبه شده به جای تمامی مقادیر خارج از ردیف جایگزین می‌گردد (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰).

میانگین و انحراف معیار و ماکزیمم مقدار عیار آهن در این تحقیق به ترتیب برابر $۳۳/۱۵۰$ ، $۱۸/۶۷$ و $۶۵/۹۵$ است و مقدار g با توجه به ۶۱۰ داده و با توجه به شکل (۷-۳) برای سطح معنی‌دار ۵ درصد برابر $۴/۱$ و برای سطح معنی‌دار ۱ درصد معادل $۴/۷$ به دست می‌آید.

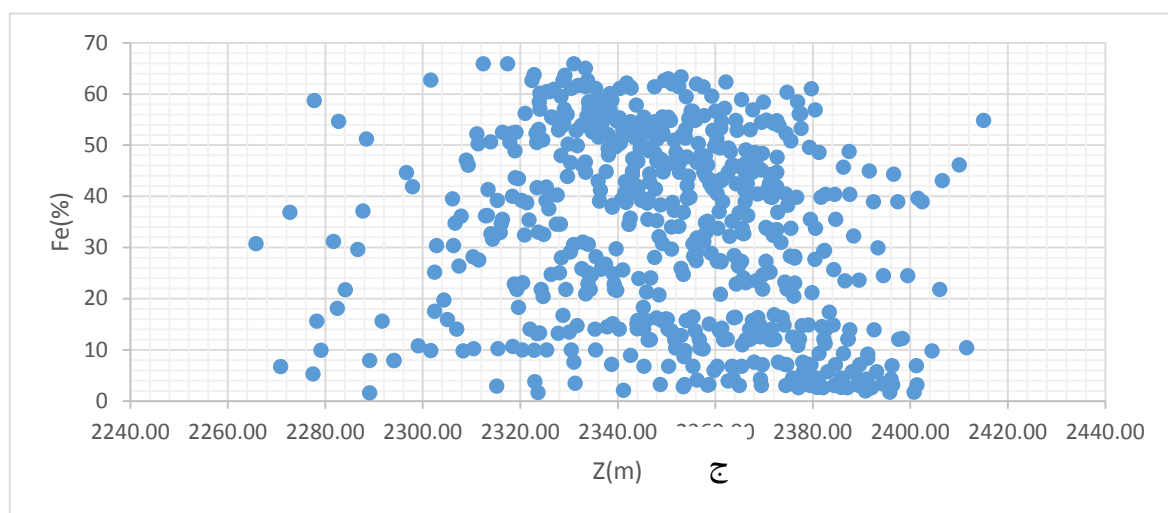
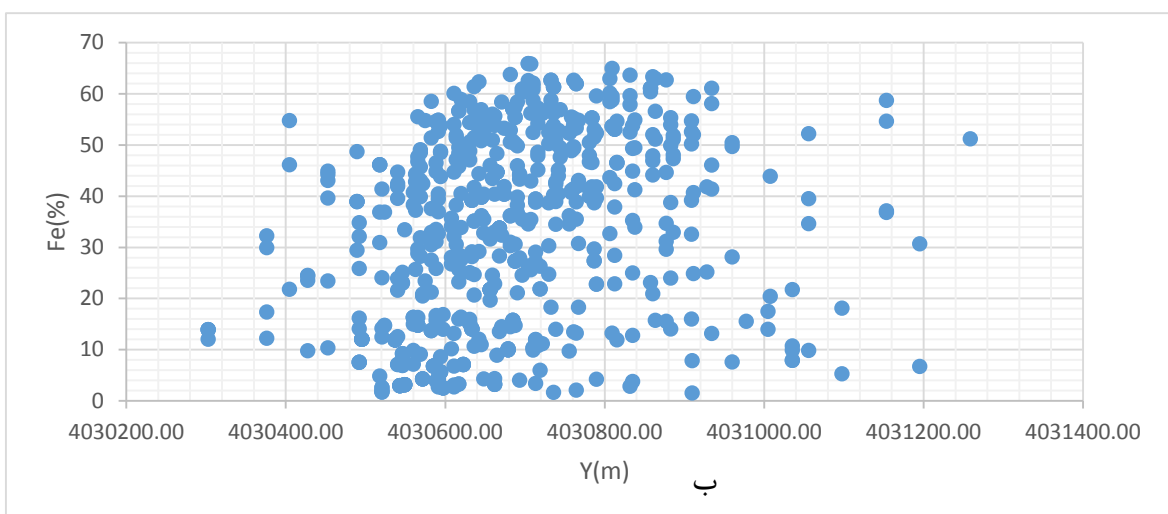
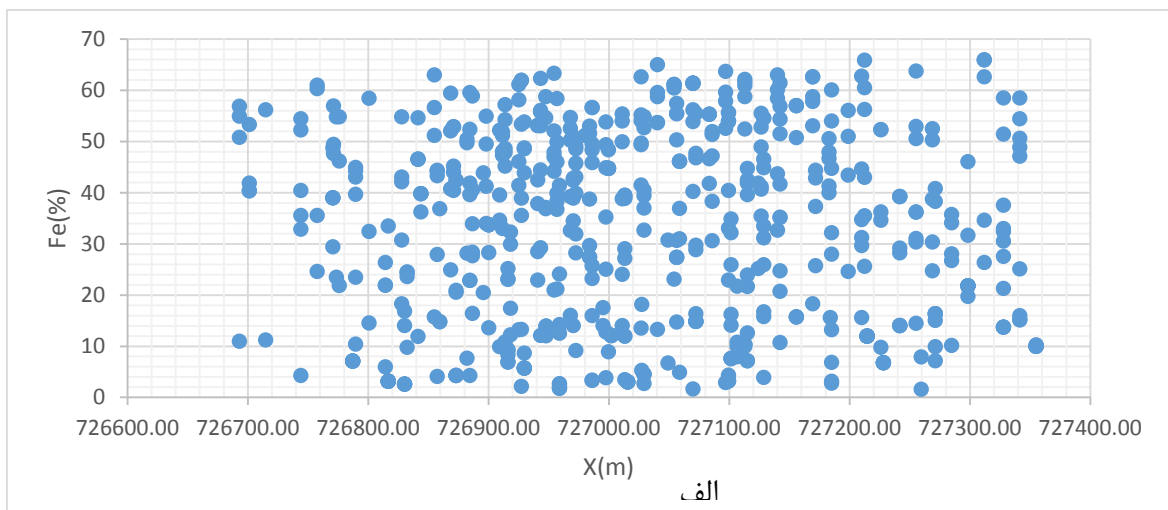
با توجه به معادله (۱-۳) و اطلاعات فوق مشاهده می‌شود مقادیر خارج از ردیف در معادله (۱-۳) موجود نمی‌باشد.



شکل ۳-۷- حد آستانه مقادیر خارج از ردیف (g) به عنوان تابعی از تعداد نمونه (n) و سطح اعتماد (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰)

۳-۴-۳- بررسی وجود روند در داده‌ها

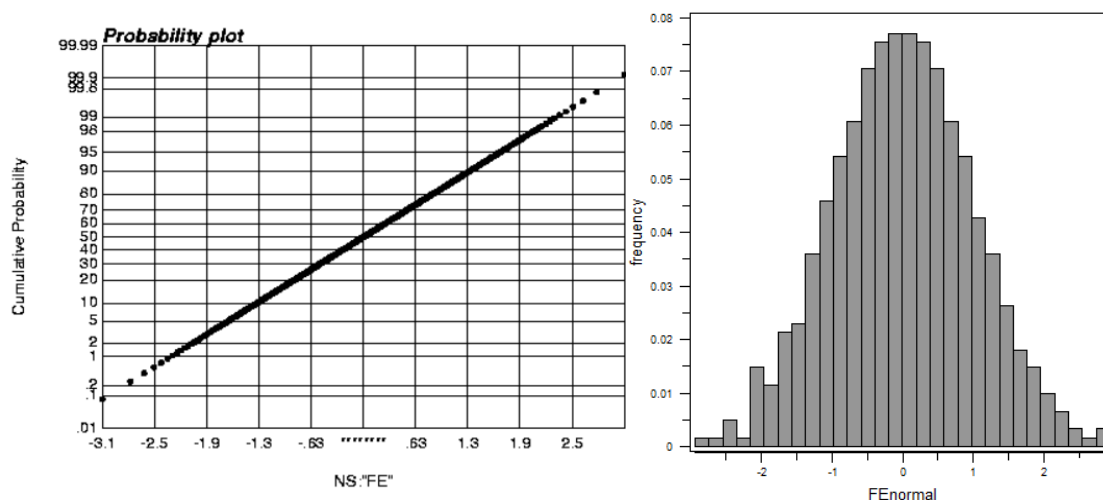
به منظور شناخت روند احتمالی در ذخیره یکی از ساده‌ترین روش‌ها، رسم نمودار پراکندگی عیار در هر راستا ترسیم شده اگر روند بارز در تغییرات عیار آهن مشاهده شود به جای کریجینگ معمولی باید از روش‌های دیگر زمین‌آمار در شبیه‌سازی استفاده شود. شکل (۳-۸) نمودار پراکندگی جامعه Fe مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳-۸) مشاهده می‌شود روند بارزی در عیار آهن مشاهده نمی‌شود بنابراین در شبیه‌سازی از روش کریجینگ معمولی استفاده می‌شود.



شکل ۳-۸- بررسی روند احتمالی عیار Fe در راستای X (الف) Y (ب) Z (ج)

۳-۴-۴- نرمال سازی داده‌ها

در اکثر روش‌های زمین‌آماري داشتن نمونه با حجم برابر بسيار اهميت دارد. لذا استفاده از توزيع نرمال در داده‌ها امری ضروری است. اگر داده‌ها دارای توزيع نرمال باشند، میانگین جامعه نمونه، تخمین معتبرتری از میانگین جامعه کل به دست می‌دهد. همچنین بسیاری از روش‌های آماری برای بیان سطح اعتماد و آزمون خود فرض نرمال بودن داده‌ها را به عنوان شرط اولیه در نظر می‌گیرند (Davis, 2002). در این تحقیق برای نرم‌سازی داده‌ها از نرم‌افزار SGeMS استفاده شده است که در شکل (۳-۹) نمودار توزيع فراوانی و نمودار احتمال داده‌های نرمال شده نشان داده شده است. نکته قابل توجه این است که پس از تخمین و شبیه‌سازی داده‌ها نرمال شده باید معکوس شوند.



شکل ۳-۹- نمودار توزيع فراوانی و احتمال نرمال شده داده‌ها (الف) نمودار توزيع فراوانی (ب) نمودار احتمال

۳-۵- تعیین ساختار فضایی داده‌ها

به منظور ارزیابی ذخیره به روش کریجینگ لازم است ساختار فضایی توزيع متغیرها مشخص گردد. هدف از تعیین ساختار فضایی متغیرها، بررسی تغییرپذیری مقادیر اندازه‌گیری شده هر متغیر با توجه به موقعیت محل نمونه‌های برداشت شده در فضای سه بعدی است. بدین ترتیب قانونمندی تغییرات مقدار اندازه‌گیری

شده در جهات و امتدادهای مختلف تعیین شده و به وسیله اعمال قانونمندی به دست آمده در تخمین سایر نقاط محیط نمونه برداری، می توان دقیق ترین تخمین ممکن را برای هر متغیر در هر نقطه به دست آورد.

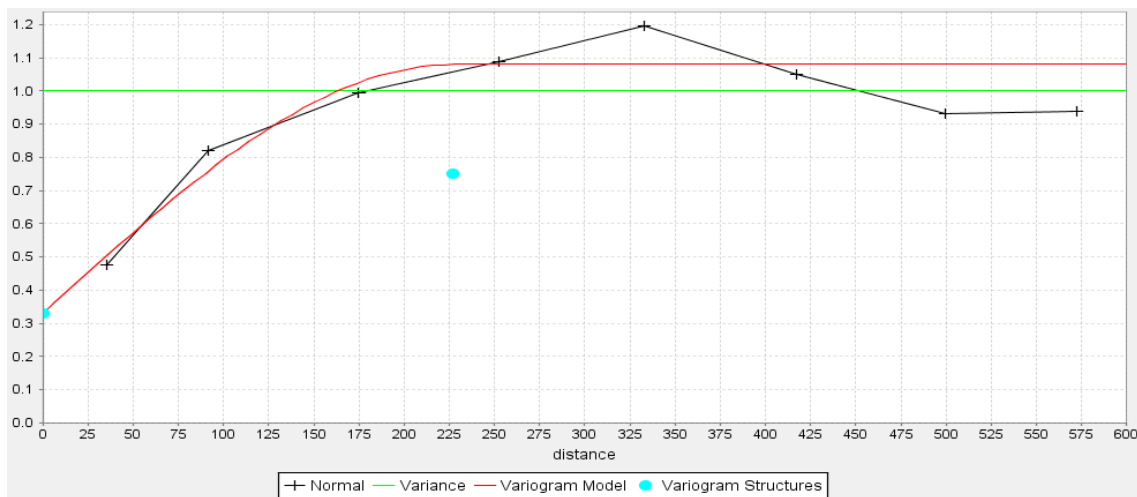
روش های مختلفی برای تعیین ساختار فضایی در محیط نمونه وجود دارد که متداول ترین این روش ها ترسیم واریوگرام در جهات و بررسی پارامترهای واریوگرام ترسیم شده در این جهات است. بدین منظور تعداد زیادی واریوگرام در جهات مختلف برای هر متغیر ترسیم گردد تا بتوان ساختار فضایی مورد بررسی را در فضایی مورد نظر تعیین نموده و بیضوی ناهمسانگردی توزیع مقادیر اندازه گیری شده برای متغیر مورد بررسی را در فضایی سه بعدی تعیین نمود. این روش نیاز صرف وقت جهت تحصیل نتایج دقیق دارد.

در این تحقیق برای ترسیم واریوگرام ها در جهات های مختلف در معدن سنگ آهن شهرک از نرم افزار Surpac استفاده شده است. برای بررسی ناهمسانگردی و ساختار فضایی در این کانسار، واریوگرام در آزیموت های ۰ تا ۳۶۰ درجه با درجه آزادی ۱۵ درجه و در شیب های مختلف رسم شده است. در نهایت از میان واریوگرام ترسیم شده، بهترین واریوگرام در جهت بزرگ ترین و کوچک ترین و همچنین شعاع تأثیر میانی انتخاب شده است. در جدول (۳-۱) مشخصات واریوگرام ها در راستای قائم برای بزرگ ترین شعاع، شعاع میانی و کوچک ترین شعاع تأثیر نشان داده شده است.

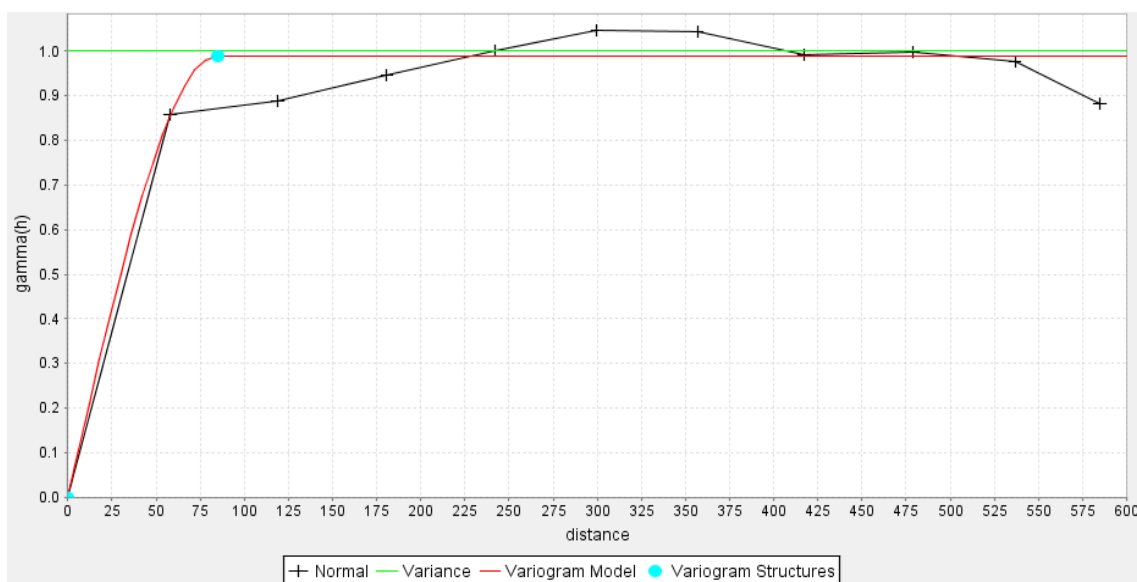
جدول ۳-۱- پارامترهای زمین آماری حاصل از مدل پردازش شده واریوگرام جهتی

	واریوگرام		مدل پردازش شده	اثر قطعه ای	جدول ساختار	
	آزیموت	شیب			سقف	شعاع تأثیر
بزرگ ترین شعاع تأثیر	۰	۰	کروی	۰/۳۳	۰/۷۵	۲۲۷
شعاع تأثیر میانی	۹۰	۰	کروی	۰	۰/۹۹	۸۵
کوچک ترین شعاع تأثیر	۹۰	۹۰	کروی	۰/۰۶	۱/۰۱	۲۵

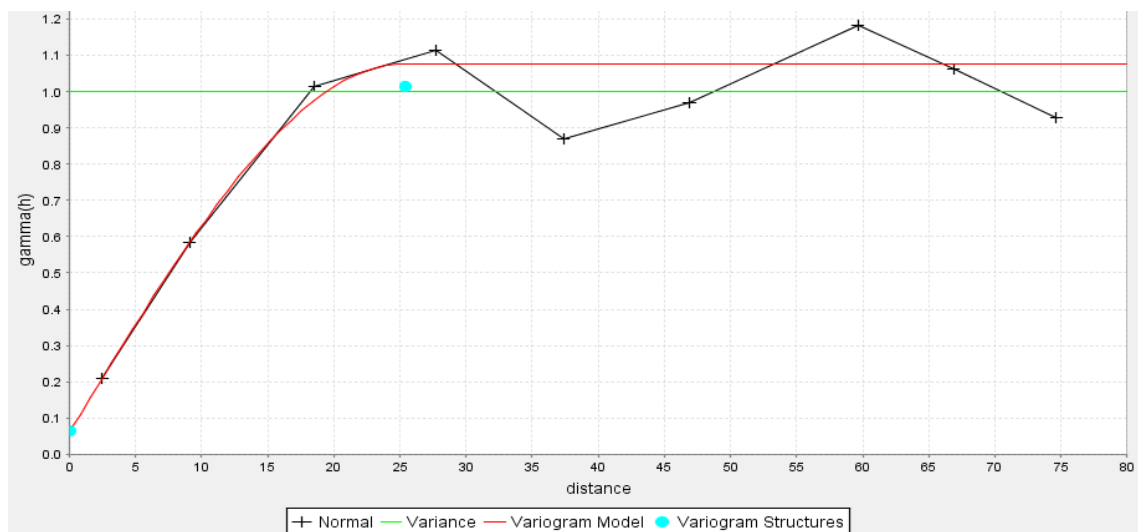
با توجه به مدل‌های برازش شده به واریوگرام‌های و یکسان نبودن شعاع تأثیر در جهات مختلف، این نتیجه حاصل که کانسار در معدن سنگ‌آهن شهرک دارای ناهمگنی است. واریوگرام داده‌ها در راستای بزرگ‌ترین، میانی و کوچک‌ترین شعاع تأثیر و به ترتیب در شکل (۳-۱۰)، (۳-۱۱) و (۳-۱۲) به همراه مدل پردازش شده نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰- واریوگرام در جهت بزرگ‌ترین شعاع تأثیر

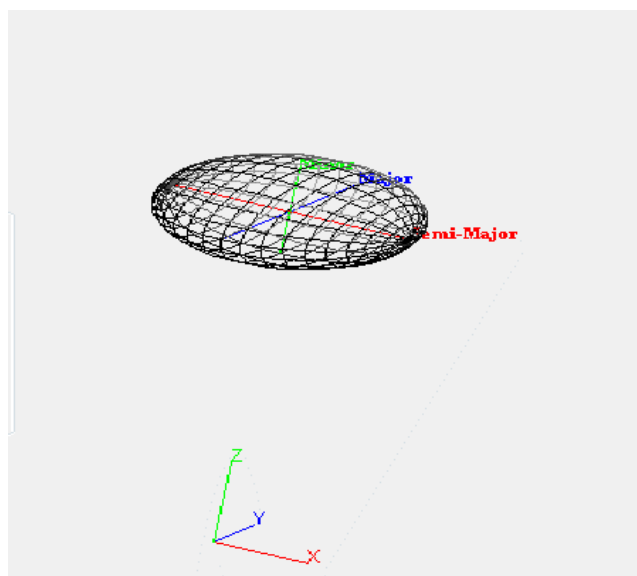


شکل ۳-۱۱- واریوگرام در راستای شعاع میانی تأثیر



شکل ۳-۱۲- واریوگرام در جهت کوچک‌ترین شعاع تأثیر

یکی از قابلیت‌های نرم‌افزار Surpac ترسیم بیضوی ناهمسانگردی با استفاده از واریوگرام‌های جهتی و با استفاده از بزرگ‌ترین شعاع تأثیر است. در شکل (۳-۱۴) بیضوی ناهمسانگردی به‌دست‌آمده از واریوگرام-های جهتی در معدن سنگ آهن شهرک نشان داده شده است.



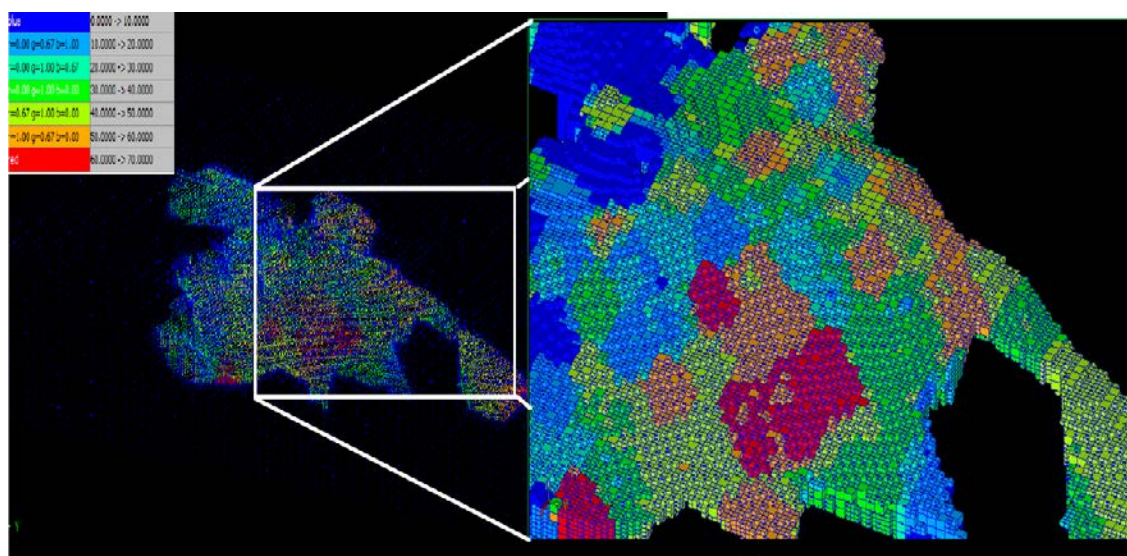
شکل ۳-۱۳- بیضی ناهمسانگردی حاصل از واریوگرام غیر جهتی در معدن سنگ آهن شهرک

۳-۶- تهیه مدل بلوکی و تخمین عیار

این مرحله یکی از اساسی‌ترین مراحل انجام طراحی است زیرا در این مرحله بر اساس داده‌های اولیه، یک مدل بلوکی طراحی می‌گردد که بعداً با استفاده از نرم‌افزارهای بهینه‌ساز و شبیه‌سازی، از این مدل بلوکی استفاده می‌شود و در نهایت که توجیه‌پذیری طرح معدن را شامل می‌شود.

در این مرحله به‌منظور انجام تخمین ذخیره و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Surpac مدل بلوکی باید ایجاد شود. برای تخمین عیار بلوک مدل موارد زیر لحاظ شده است:

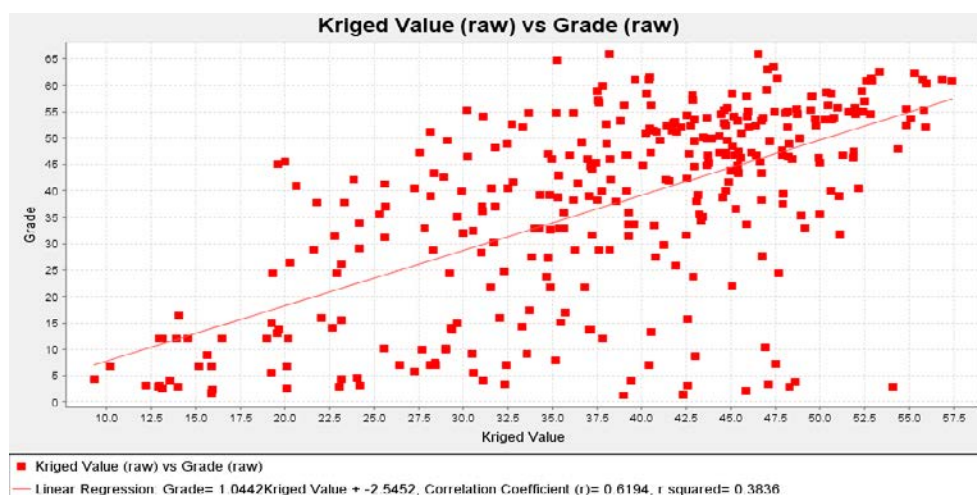
- حداکثر شعاع جستجو برابر ۲۲۷ متر
- حداکثر شعاع جستجو در جهت قائم برابر ۱۵ متر
- حداکثر تعداد نقاط شرکت‌کننده در تخمین برابر ۱۵
- حداقل نقاط شرکت‌کننده در تخمین برابر ۵
- ابعاد بلوک تخمینی برابر $10 \times 10 \times 10$
- روش بکار رفته در تخمین کریجینگ معمولی



شکل ۳-۱۴- مدل بلوکی معدن سنگ آهن شهرک به وسیله روش کریجینگ

۷-۳- اعتبار سنجی تخمین عیار

هدف از تخمین ذخیره پی بردن به ویژگی‌های زمین‌شناسی و هندسی کانسار و محاسبه محتوای ذخیره در یک کانسار با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده در ناحیه نمونه‌برداری است. کریجینگ به عنوان مفیدترین روش برآورد زمین‌آماري از سه دهه گذشته برای توصیف تغییرات مکانی و پیش‌بینی عیار کانسنگ به کار رفته می‌شود. به منظور اعتبار سنجی عیار تخمینی نسبت به عیار واقعی که به وسیله روش کریجینگ به دست آمده است، توسط نرم‌افزار Surpac اعتبار سنجی صورت گرفته است. در شکل (۳-۱۵) نتایج حاصل از اعتبار سنجی نشان داده شده است. با توجه به این نمودار نتایج واریوگرام در مدل کریجینگ دارای اعتبار کافی است.

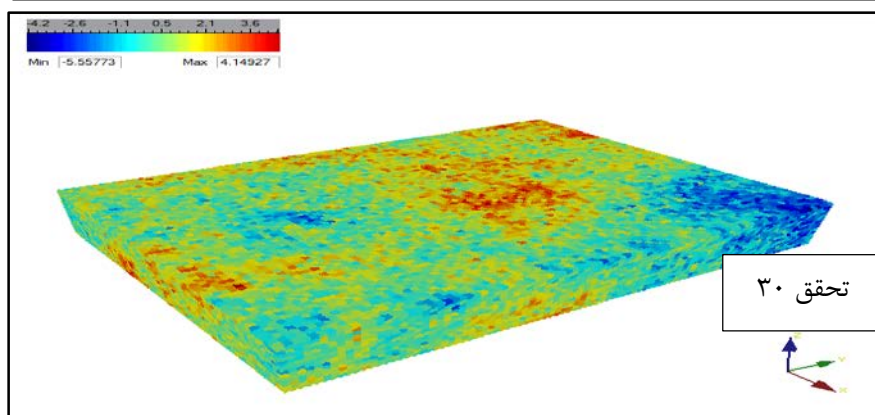
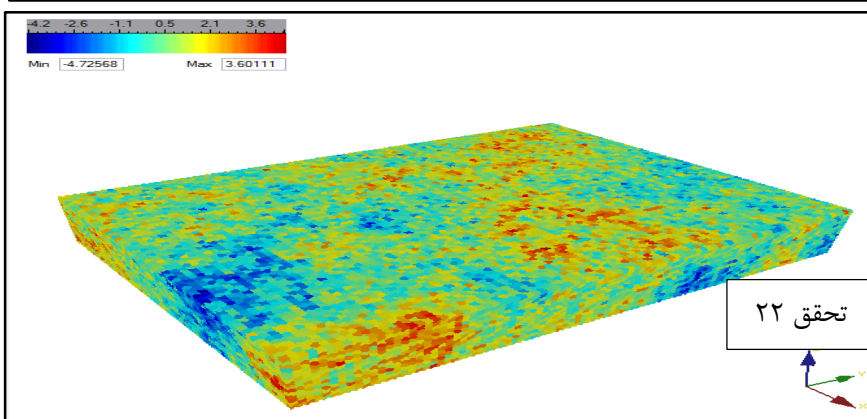
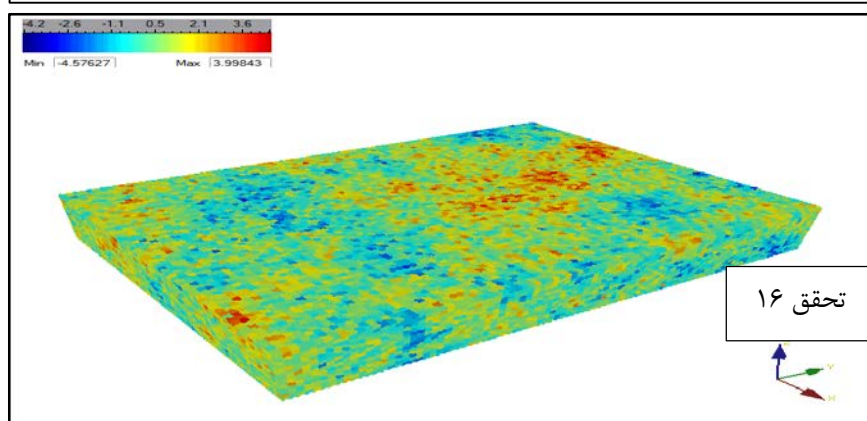
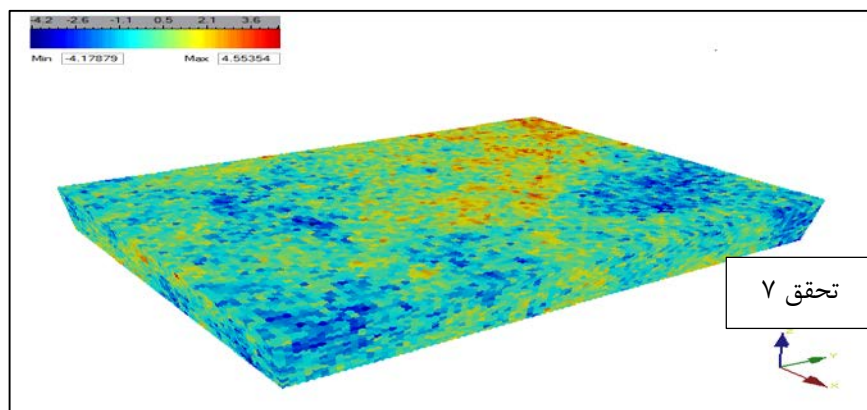


شکل ۳-۱۵- آزمون اعتبار سنجی بین عیار واقعی و تخمینی در معدن شهرک

۸-۳- عملیات شبیه‌سازی زمین‌آماري

از آنجاکه در صنعت معدن نسبت نمونه‌های برداشت شده در محیط مورد مطالعه بسیار کوچک می‌باشد لذا در اختیار داشتن حالت‌های مختلف از کانسار به جای یک تصویر میانگین کمک شایانی در مدل‌سازی کانسار و همچنین در بهینه‌سازی برنامه‌ریزی‌های معدنی می‌نماید (سعید، ۱۳۸۳).

با توجه به کاربرد گسترده‌ی روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی در صنعت معدن، در این تحقیق نیز از این روش، با به‌کارگیری از نرم‌افزار SGeMS و اطلاعات به دست آمده از روش زمین‌آماری در نرم‌افزار Surpac استفاده شده است. برای انجام عملیات شبیه‌سازی به‌وسیله داده‌های نرمال شده و به‌وسیله نتایج حاصل از واریوگرافی که در مرحله قبل حاصل شده است اقدام به شبیه‌سازی می‌شود. در نهایت عملیات شبیه‌سازی زمین‌آماري باهدف ایجاد ۳۰ تحقق، برای کانسار مورد مطالعه صورت گرفته است. در شکل (۳-۱۶) نمونه از تحقق‌های ایجاد شده به تصویر کشیده شده است.



شکل ۳-۱۶- تصویر سه‌بعدی از تحقق شبیه‌سازی شده

هر تحقق تولید شده برای اینکه به عنوان تحقق معتبر از شبیه سازی شناخته شود باید دو شرط زیر را داشته باشد:

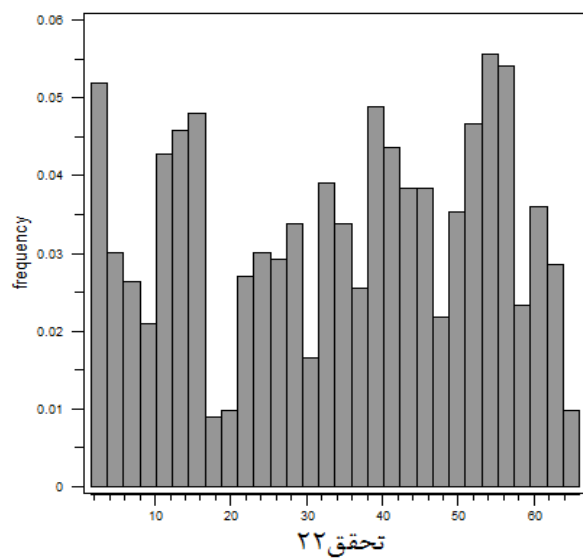
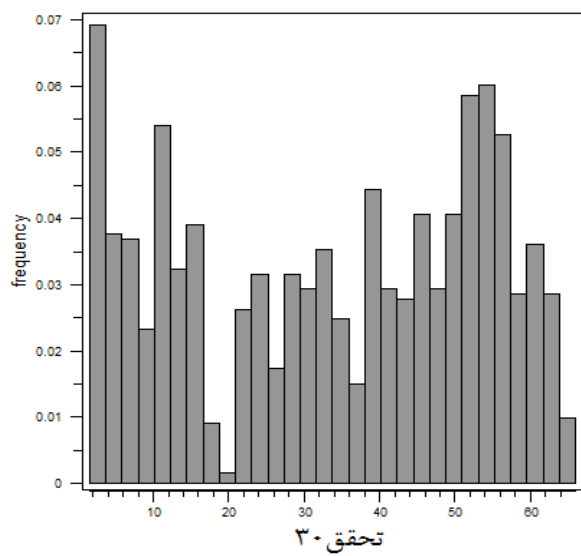
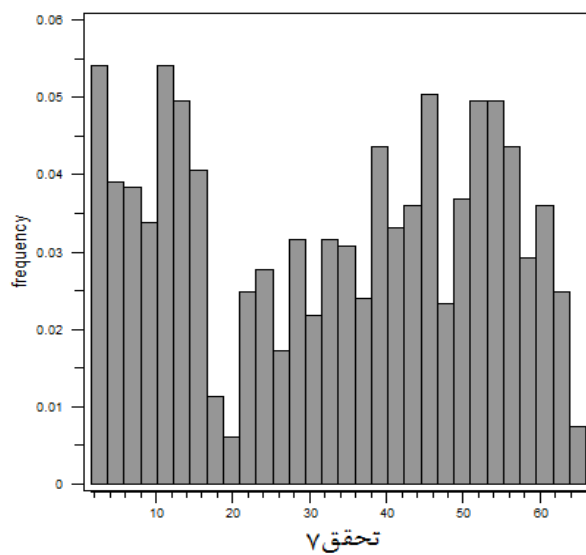
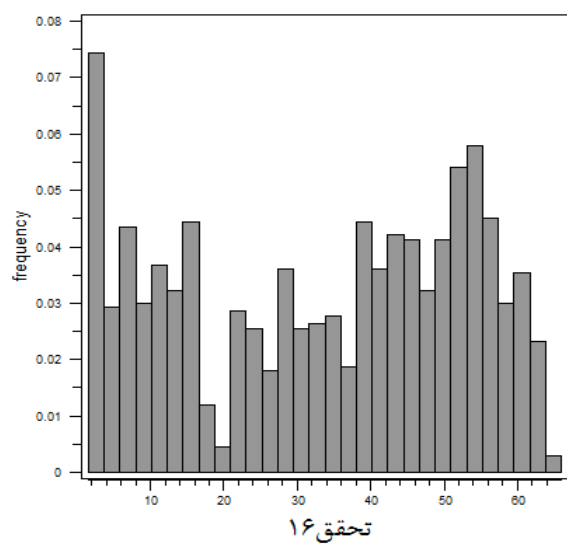
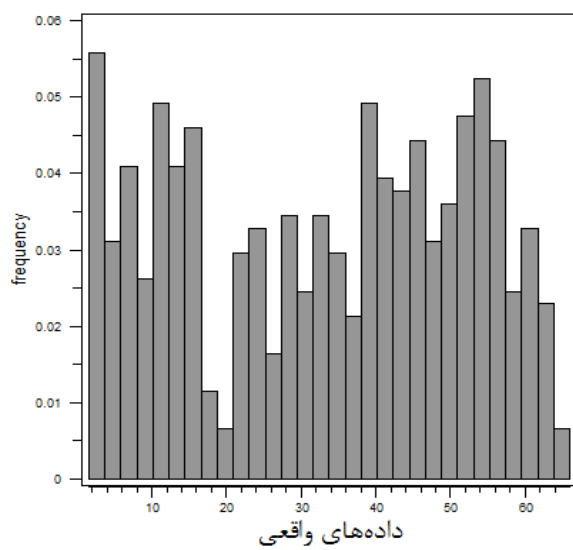
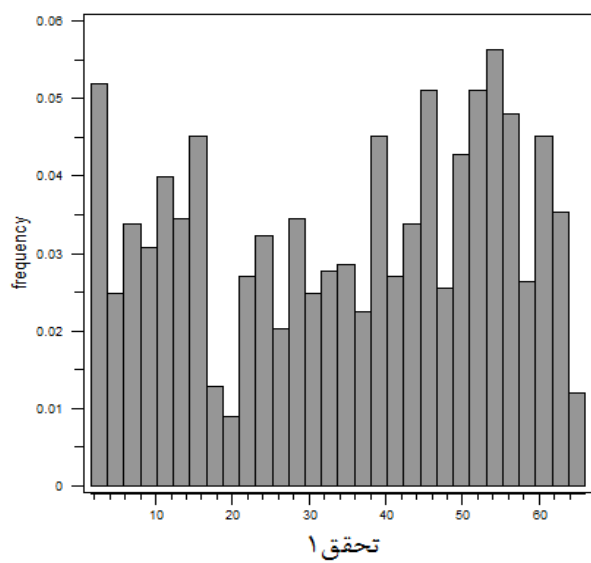
۱- توزیع فراوانی متغیر شبیه سازی شده با توزیع فراوانی متغیر عیار در نمونه اولیه همخوانی داشته باشد. در واقع از نظر آماری دارای پارامترهای یکسان با نمونه اولیه باشد.

۲- واریوگرام حاصل از مدل شبیه سازی شده، شباهت قابل قبولی با واریوگرام نمونه اولیه داشته باشد که این مسئله نشان دهنده شباهت های زمین آماری داده ها و مدل های شبیه سازی شده است.

پس از انجام ۱۰۰۰ مدل شبیه سازی و انجام دو آزمون اعتباری سنجی بالا ۳۰ مدل عیاری معتبر به دست آمد. در شکل (۳-۱۷) اعتبار سنجی برای پارامترهای آماری و ۵ منتخب از ۳۰ شبیه سازی انجام شده نشان داده شده است. همین طور در جدول (۳-۲) پارامترهای آماری مربوط به این ۵ منتخب و داده های واقعی به طور خلاصه نشان داده شده است.

جدول ۳-۲- جدول مقایسه پارامترهای آماری ۵ مدل شبیه سازی شده منتخب

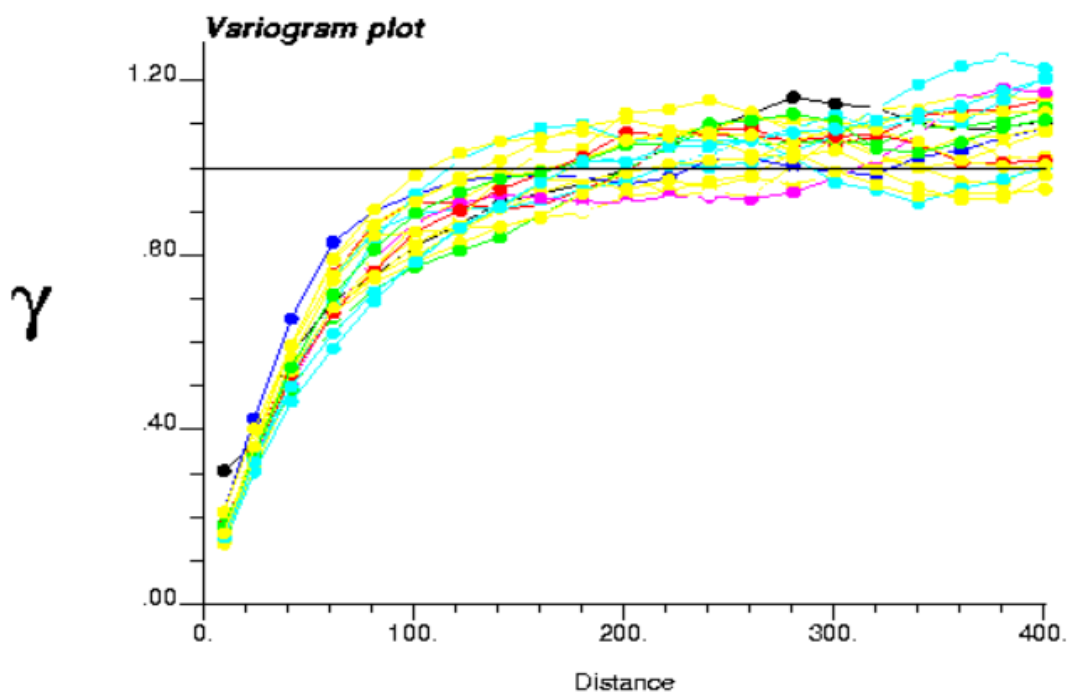
عنوان	کمینه	میانگین	واریانس	انحراف معیار	میانه	بیشینه
داده های واقعی	۱/۵۸۲	۳۳/۱۵	۳۴۸/۷۴	۱۸/۶۷۵	۳۵/۲۷	۶۵/۹۵
تحقق ۱	۱/۵۸۲	۳۴/۹۴	۳۶۱/۲۱۶	۱۹/۰۰۵	۳۷/۸۳	۶۵/۹۵
تحقق ۷	۱/۵۸۲	۳۲/۹۴	۳۶۵/۳۱۱	۱۹/۱۱۳	۳۵/۴۷	۶۵/۹۵
تحقق ۱۶	۱/۵۸۲	۳۳/۳۸۹	۳۶۵/۹۴	۱۹/۱۳	۳۶/۸۵	۶۵/۹۵
تحقق ۲۲	۱/۵۸۲	۳۴/۲۲۶	۳۴۳/۲۱۳	۱۸/۵۲۶	۳۶/۲۵۵	۶۵/۹۵
تحقق ۳۰	۱/۵۸۲	۳۳/۸۳۱	۳۷۸/۹۶	۱۹/۴۶۷	۳۶/۱۶۳	۶۵/۹۵



شکل ۳-۱۷- نمودار توزیع فراوانی عیار آهن داده‌های اصلی و ۵ مدل شبیه‌سازی شده منتخب

همان‌طور که قبلاً گفته شده شبیه‌سازی قابل قبول است که علاوه بر شرط یک شرط دوم که همان واریوگرام داده‌های اصلی با واریوگرام داده‌های شبیه‌سازی شده شباهت قابل قبولی داشته باشد.

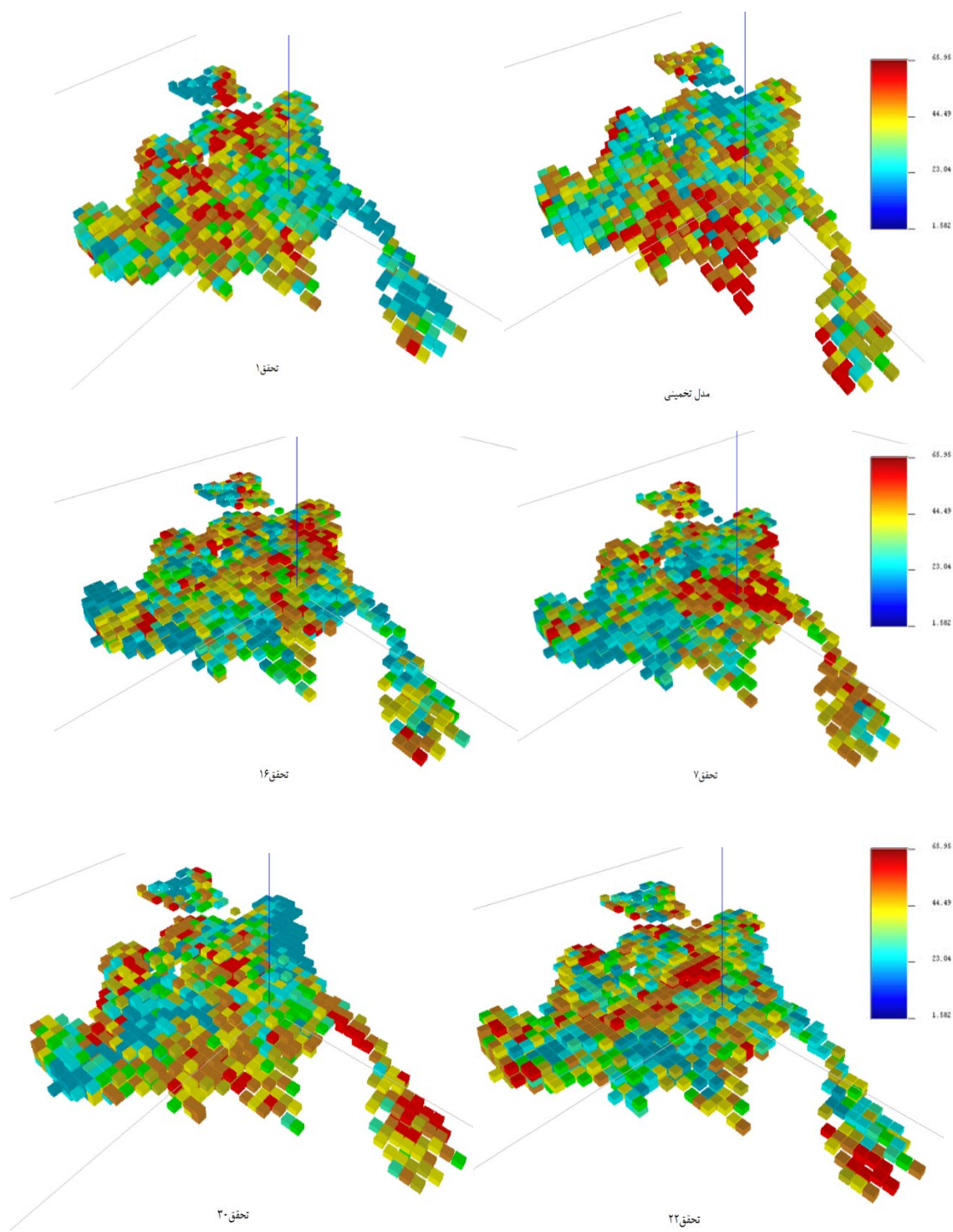
شکل (۳-۱۸) واریوگرام داده‌های اصلی و ۳۰ واریوگرام حاصل از شبیه‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۳-۱ واریوگرام غیر جهتی به‌دست‌آمده از داده‌های اولیه (نقاط مشکی) و ۳۰ تحقق هم احتمال با کانسار (نقاط رنگی)

۳-۹- تعیین مدل بلوکی عیاری مربوط به هر شبیه‌سازی

پس از اینکه اعتبار تحقق‌های حاصل از شبیه‌سازی زمین‌آماري مورد تائید قرار گرفت. باید هر تحقق به یک مدل بلوکی هم شکل جهت برنامه‌ریزی تولید و تهیه محدوده نهایی تبدیل شود. در شکل (۳-۱۹) مدل بلوکی ۵ منتخب حاصل از شبیه‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۸- تفاوت مدل بلوکی داده اصلی و ۵ منتخب حاصل از شبیه‌سازی

۳-۱۰- عدم قطعیت اقتصادی (اختیار حقیقی)

همان‌گونه که قبل گفته شد نحوه نگرش انتخاب حقیقی یک روش مدرن برای ارزیابی اقتصادی پروژه تحت شرایط عدم قطعیت می‌باشد که بر انعطاف‌پذیری مدیریتی تأکید می‌کند. برای بیشینه کردن ارزش فعلی خالص محدودیت به شرح زیر داریم:

۱- انتخاب مدیریتی (انتخاب گسترش سرمایه‌گذاری، انتخاب زمان،...)

۲- انتخاب عدم قطعیت بازار (قیمت، تقاضا،...)

۳- عدم قطعیت فنی (نحوه ماده معدنی، کیفیت ارزیابی،...)

هدف اصلی این بخش انتخاب بهترین محدوده نهایی تحت عدم قطعیت بازار و بیشینه کردن ارزش فعلی خالص به‌طوری‌که خطر سرمایه‌گذاری را کاهش دهد و تصمیمی اخذ شود که تغییرات قیمت پروژه را پیش‌بینی ننماید. برای ارزیابی هر چه دقیق‌تر تحت شرایط عدم قطعیت قیمت محصول به مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت محصول نیاز است. بدین منظور از روش درخت دوجمله‌ای در این مطالعه استفاده شده است. به‌منظور استفاده از روش درخت دوجمله‌ای نیاز به اطلاعات قیمت سنگ‌آهن در گذشته داریم. بدیهی است که تعداد این داده‌ها باید به‌طوری باشد که از نظر آماری معرف باشد.

در این پایان‌نامه نیز عدم قطعیت قیمت بر مبنای داده‌های قیمت ماهانه سنگ‌آهن با عیار ۶۷ از مارس ۲۰۰۹ تا ژوئن ۲۰۱۷ مدل‌سازی شده است. اطلاعات قیمت مربوط به قیمت سنگ‌آهن در جدول (۳-۳) آورده شده است.

جدول ۳-۳- داده قیمت ۱۰۰ ماه اخیر قیمت سنگ آهن

زمان	قیمت	زمان	قیمت
مارس-۲۰۰۹	64/07	مه-۲۰۱۳	124/01
آوریل-۲۰۰۹	59/78	ژوئن-۲۰۱۳	114/82
مه-۲۰۰۹	62/69	ژوئیه-۲۰۱۳	127/19
ژوئن-۲۰۰۹	71/66	اوت-۲۰۱۳	137/06
ژوئیه-۲۰۰۹	83/95	سپتامبر-۲۰۱۳	134/19
اوت-۲۰۰۹	97/67	اکتبر-۲۰۱۳	132/57
سپتامبر-۲۰۰۹	80/71	نوامبر-۲۰۱۳	136/32
اکتبر-۲۰۰۹	86/79	دسامبر-۲۰۱۳	135/79
نوامبر-۲۰۰۹	99/26	ژانویه-۲۰۱۴	128/12
دسامبر-۲۰۰۹	105/25	فوریه-۲۰۱۴	121/37
ژانویه-۲۰۱۰	125/91	مارس-۲۰۱۴	111/83
فوریه-۲۰۱۰	127/62	آوریل-۲۰۱۴	114/58
مارس-۲۰۱۰	139/77	مه-۲۰۱۴	100/56
آوریل-۲۰۱۰	172/47	ژوئن-۲۰۱۴	92/85
مه-۲۰۱۰	161/35	ژوئیه-۲۰۱۴	96/26
ژوئن-۲۰۱۰	143/63	اوت-۲۰۱۴	94/14
ژوئیه-۲۰۱۰	126/36	سپتامبر-۲۰۱۴	84/52
اوت-۲۰۱۰	145/34	اکتبر-۲۰۱۴	81/3
سپتامبر-۲۰۱۰	140/63	نوامبر-۲۰۱۴	74/43
اکتبر-۲۰۱۰	148/48	دسامبر-۲۰۱۴	68/67
نوامبر-۲۰۱۰	160/55	ژانویه-۲۰۱۵	69/07
دسامبر-۲۰۱۰	168/53	فوریه-۲۰۱۵	63/8
ژانویه-۲۰۱۱	179/63	مارس-۲۰۱۵	58/18
فوریه-۲۰۱۱	187/18	آوریل-۲۰۱۵	52/11
مارس-۲۰۱۱	169/36	مه-۲۰۱۵	60/43
آوریل-۲۰۱۱	179/26	ژوئن-۲۰۱۵	61/84
مه-۲۰۱۱	177/1	ژوئیه-۲۰۱۵	52/17
ژوئن-۲۰۱۱	170/88	اوت-۲۰۱۵	57/33
ژوئیه-۲۰۱۱	172/98	سپتامبر-۲۰۱۵	56/98
اوت-۲۰۱۱	177/45	اکتبر-۲۰۱۵	53/66
سپتامبر-۲۰۱۱	177/23	نوامبر-۲۰۱۵	47/19
اکتبر-۲۰۱۱	150/43	دسامبر-۲۰۱۵	40/88
نوامبر-۲۰۱۱	135/54	ژانویه-۲۰۱۶	42/2
دسامبر-۲۰۱۱	136/46	فوریه-۲۰۱۶	46/49
ژانویه-۲۰۱۲	140/35	مارس-۲۰۱۶	56/54
فوریه-۲۰۱۲	140/4	آوریل-۲۰۱۶	60/97
مارس-۲۰۱۲	144/66	مه-۲۰۱۶	55/89
آوریل-۲۰۱۲	147/65	ژوئن-۲۰۱۶	52/34
مه-۲۰۱۲	136/27	ژوئیه-۲۰۱۶	57/31
ژوئن-۲۰۱۲	134/62	اوت-۲۰۱۶	60/87
ژوئیه-۲۰۱۲	127/94	سپتامبر-۲۰۱۶	57/66
اوت-۲۰۱۲	107/8	اکتبر-۲۰۱۶	58/95
سپتامبر-۲۰۱۲	99/47	نوامبر-۲۰۱۶	74/14
اکتبر-۲۰۱۲	113/95	دسامبر-۲۰۱۶	79/43
نوامبر-۲۰۱۲	120/35	ژانویه-۲۰۱۷	80/82
دسامبر-۲۰۱۲	128/87	فوریه-۲۰۱۷	88/8
ژانویه-۲۰۱۳	150/49	مارس-۲۰۱۷	87/2
فوریه-۲۰۱۳	154/64	آوریل-۲۰۱۷	70/4
مارس-۲۰۱۳	139/87	مه-۲۰۱۷	61/63
آوریل-۲۰۱۳	137/39	ژوئن-۲۰۱۷	57/86

میانگین و انحراف معیار بر مبنای داده‌های جدول (۳-۳) برابر است با:

$$\mu = \frac{1074/44}{100} = 107/444$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{100} \times 172369} = 41/5174$$

جهت محاسبه شبیه‌سازی درخت دو جمله ابتدا باید فراریت قیمت به دست آورده شود همان‌طور که گفته شد فراریت از تقسیم انحراف معیار به میانگین داده‌های موجود به دست می‌آید.

$$\sigma = \frac{41/5174}{107/444} = 0/38641$$

همچنین نرخ بهره ۱۰٪ منظور شده و قیمت لحظه‌ای آهن در اوت ۲۰۱۷ برابر \$۶۰ بوده است.

برای مدل‌سازی عدم قطعیت به‌وسیله درخت دوجمله‌ای نیاز به محاسبه گام بالا و پایین درخت دوجمله‌ای می‌باشد. این ضرایب در حقیقت میزان افزایش و یا کاهش قیمت محتمل با توجه به فراریت قیمت را نشان می‌دهد. در این پایان‌نامه عدم قطعیت قیمت بر مبنای داده فصلی (هر سه ماه) مدل شده است در نتیجه پله زمانی برابر سه دوازدهم حالت سالانه ($\Delta t = 3 \div 12 = 0/25$) خواهند بود. معادله گام بالا و پایین همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد طبق رابطه زیر به دست می‌آید

$$Up \text{ step } (u) = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} = e^{0/38641\sqrt{0/25}} = 1/101$$

$$Down \text{ step } (D) = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} = \frac{1}{1/101} = 0/908$$

درخت دوجمله‌ای حاصل از گام بالا و پایین که از معادلات بالا به دست آمده در جدول (۳-۵) نشان داده شده است. در این جدول قیمت از اوت ۲۰۱۷ تا اوت ۲۰۲۰ به صورت بازه سه ماهه نشان داده شده است.

جدول ۳-۴- مدل دوجمله‌ای عدم قطعیت قیمت سنگ آهن در فاصله اوت ۲۰۱۷ تا اوت ۲۰۲۰

Aug-17	Nov-17	Feb-18	May-18	Aug-18	Nov-18	Feb-19	May-19	Aug-19	Nov-19	Feb-20	May-20	Aug-20
												\$191/25
											\$173/64	
										\$157/65		\$157/65
								\$129/95		\$129/95		\$129/95
						\$117/99		\$117/99		\$117/99		\$117/99
					\$107/12		\$107/12		\$107/12		\$107/12	\$107/12
				\$97/26		\$97/26		\$97/26		\$97/26		\$97/26
			\$88/30		\$88/30		\$88/30		\$88/30		\$88/30	\$88/30
		\$80/17		\$80/17		\$80/17		\$80/17		\$80/17		\$80/17
		\$72/79		\$72/79		\$72/79		\$72/79		\$72/79		\$72/79
	\$ 66/09		\$66/09		\$66/09		\$66/09		\$66/09		\$66/09	
\$ 60/00		\$60/00		\$60/00		\$60/00		\$60/00		\$60/00		\$60/00
	\$ 54/48		\$54/48		\$54/48		\$54/48		\$54/48		\$54/48	
		\$49/46		\$49/46		\$49/46		\$49/46		\$49/46		\$49/46
		\$44/90		\$44/90		\$44/90		\$44/90		\$44/90		\$44/90
			\$40/77		\$40/77		\$40/77		\$40/77		\$40/77	\$40/77
				\$37/02		\$37/02		\$37/02		\$37/02		\$37/02
					\$33/61		\$33/61		\$33/61		\$33/61	\$33/61
						\$30/51		\$30/51		\$30/51		\$30/51
							\$27/70		\$27/70		\$27/70	\$27/70
								\$25/15		\$25/15		\$25/15
									\$22/84		\$22/84	\$22/84
										\$20/73		\$20/73
												\$18/82

در مرحله بعد برای تمامی داده‌های قیمت موجود در درخت دوجمله‌ای (داده‌های جدول ۳-۵) و با استفاده از نرم‌افزار NPV Scheduler ارزش فعلی خالص محاسبه می‌شود نتایج این محاسبات در جدول (۳-۶) ملاحظه می‌شود. در این مرحله مشاهده می‌شود که در آخرین ستون جدول (۳-۶) مشاهده می‌شود که ارزش فعلی خالص پروژه به صفر می‌رسد، این نقطه مرز سرمایه‌گذاری یا اجرای پروژه را مشخص می‌کند

جدول ۳-۵- NPV های محاسبه شده بر مبنای مدل درخت دوجمله‌ای قیمت آهن از اوت ۲۰۱۷ تا اوت ۲۰۲۰ (برحسب میلیون دلار)

Aug-17	Nov-17	Feb-18	May-18	Aug-18	Nov-18	Feb-19	May-19	Aug-19	Nov-19	Feb-20	May-20	Aug-20
												5003/97
											4485/09	
										4013/98		4013/98
									3586/25		3586/25	
								3197/9		3197/9		3197/9
							2845/3		2845/3		2845/3	
						2525/2		2525/2		2525/2		2525/2
					2234/55		2234/55		2234/55		2234/55	
				1970/68		1970/68		1970/68		1970/68		1970/68
			1731/1		1731/1		1731/1		1731/1		1731/1	
		1513/58		1513/58		1513/58		1513/58		1513/58		1513/58
	1316/09		1316/09		1316/09		1316/09		1316/09		1316/09	
1136/79		1136/79		1136/79		1136/79		1136/79		1136/79		1136/79
	974		974		974		974		974		974	
		826/2		826/2		826/2		826/2		826/2		826/2
			677/28		677/28		677/28		677/28		677/28	
				570/17		570/17		570/17		570/17		570/17
					459/56		459/56		459/56		459/56	
						359/76		359/76		359/76		359/76
							269/58		269/58		269/58	
								189/91		189/91		189/91
									119/72		119/72	
										68/39		68/39
											23/63	
												0

آنچه در بالا ملاحظه شد نحوه استفاده از نحوه نگرش انتخاب حقیقی برای ارزیابی دینامیک تحت شرایط عدم قطعیت قیمت و ارائه مبنای برای تصمیم‌گیری است.

۳-۱۱- جمع‌بندی

همان‌طور که در فصل دو اشاره شد عیار و قیمت ماده معدنی از حساس‌ترین عوامل تعیین‌کننده در برنامه‌ریزی تولید است. لذا تا با به‌کارگیری روش مناسب عدم قطعیت‌های موجود شناسایی شده. در این فصل در دو بخش ابتدا عدم قطعیت زمین‌شناسی و سپس عدم قطعیت اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت است.

در بخش اول به بررسی عدم قطعیت عیار در معدن سنگ‌آهن شهرک پرداخته شده است که پس از ترسیم واریوگرام‌های در جهت‌های مختلف و انتخاب بهترین واریوگرام و در نهایت ترسیم بیضی ناهمسانگردی صورت گرفته است. در نهایت برای تخمین ذخیره از روش گریجینگ که بهترین برآوردگر خطی نااریب شناخته شده است. در نهایت برای بررسی عدم قطعیت عیار و هموارسازی عیار از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی استفاده شده است. در نهایت ۳۰ تحقق منتخب هم احتمال با کانسار به‌عنوان مدل‌های شبیه‌سازی انتخاب شده است.

در بخش دوم به عدم قطعیت قیمت ماده پرداخته شده است. در این بخش به‌وسیله درخت دو جمله و با استفاده از اطلاعات داده‌های تاریخی ۱۰۰ ماه اخیر قیمت سنگ‌آهن، قیمت محتمل در سه سال آینده محاسبه شده است. و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار NPV Scheduler برای تمام قیمت‌های محاسبه شده NPV محاسبه می‌شود.

فصل چهارم:

ترکیب عدم قطعیت زمین شناسی و مالی در برنامه ریزی تولید

۴-۱- مقدمه

در این فصل، ضمن بررسی مسئله ضمن بررسی کلی پیچیدگی مسئله برنامه‌ریزی تولید پرداخته شده است. بر اساس این فرایند به‌عنوان اولین مرحله محدوده نهایی مشخص شده و پس با استفاده از پوش بک‌های به‌دست‌آمده حاصل از عدم قطعیت‌های عیار و قیمت ماده معدنی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت مدل‌های پوش بک برای هر قیمت و هر مدل مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج و پوش بک‌های در برنامه‌ریزی معدن شهرک استفاده شده است.

۴-۲- محدوده نهایی معدنکاری روباز

در واقع هدف از طراحی و برنامه‌ریزی در معادن، دستیابی به برنامه‌ریزی تولید است. برنامه‌ریزی تولید یک معدن بیانگر نحوه استخراج ذخیره در طول عمر معدن و بر مبنای رعایت محدودیت‌های فنی و عملیاتی است. به‌نحوی که مقدار نقدینگی در طول عمر معدن و ارزش خالص فعلی حاصل از آن بیشینه شود. برای رسیدن به این هدف باید به سه سؤال اساسی به‌طور هم‌زمان پاسخ داده شود:

۱- آیا یک بلوک استخراج می‌شود یا خیر؟

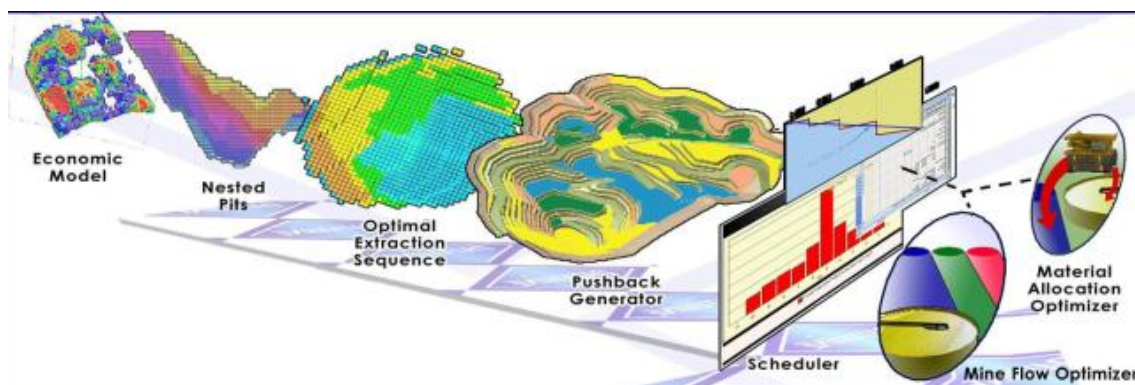
۲- در صورت استخراج این بلوک در چه زمانی استخراج می‌شود؟

۳- مقصد ارسال بلوک استخراج‌شده کجاست؟

پاسخ‌گویی هم‌زمان به این سه سؤال امکان‌پذیر نیست، از این‌رو طی یک فرایند تکراری به این سه سؤال پاسخ داده می‌شود. بدین‌صورت که پس از تهیه و ساخت مدل بلوکی اقتصادی ذخیره، محدوده نهایی باهدف بیشینه‌سازی سود تعیین می‌شوند. در ادامه با انجام برنامه‌ریزی تولید، زمان استخراج هر یک از بلوک‌های ماده معدنی در داخل محدوده نهایی باهدف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی مشخص می‌شود. با توجه به مطالب فوق تعیین محدوده نهایی یک بخش اساسی در طراحی معادن روباز به شمار می‌رود.

طبق تعریف، ذخیره معدنی که با روش روباز استخراج می‌شود از نظر اقتصادی دارای یک محدوده است که در آن محدوده استخراج با روش روباز امکان پذیرش و خارج از آن محدوده استخراج با روش روباز از نظر اقتصادی میسر نیست. به این محدوده که در آن استخراج با روش روباز از توجیه فنی و اقتصادی برخوردار است، محدوده نهایی معدن گفته می‌شود. محدوده نهایی محدوده‌ای است که اگر با رعایت محدودیت‌های فنی و عملیاتی همین امروز تمام بلوک‌های کانسنگ و باطله موجود در داخل این محدوده استخراج می‌شوند، بیشترین سود را در بر خواهد داشت. از این محدوده علاوه بر انجام برنامه‌ریزی تولید، در تعیین محل انباشت باطله، تعیین محل احداث تأسیسات و کارخانه فراوری و همچنین برای تعیین مسیرهای دسترسی استفاده می‌شود.

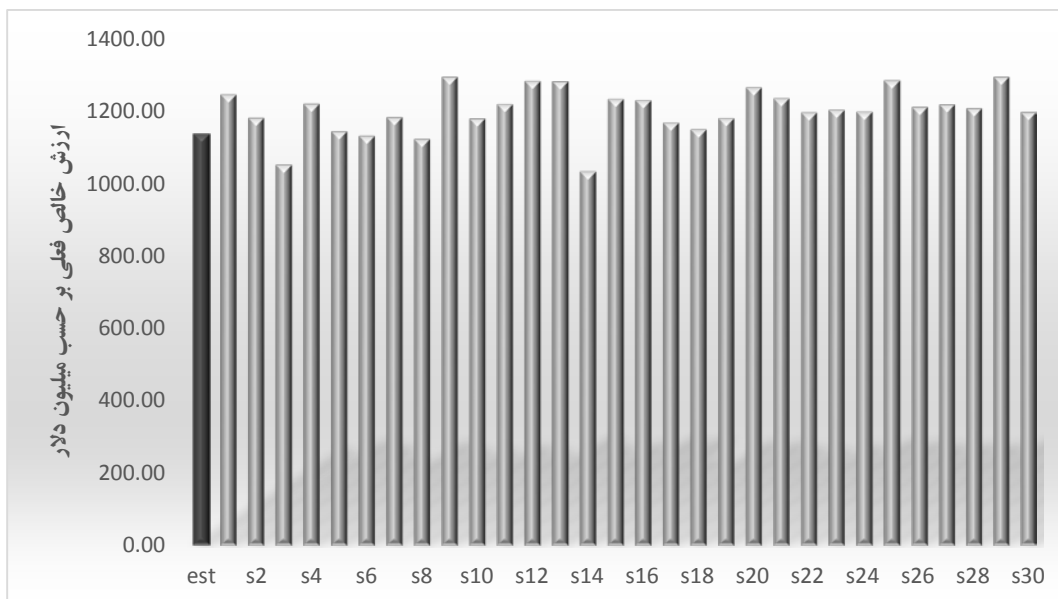
در حالت‌های کلی روش‌های بهینه‌سازی محدوده نهایی را می‌توان به روش‌های با مبنای ریاضی و روش‌های ابتکاری تقسیم‌بندی نمود. باین حال، از میان این روش‌ها تنها الگوریتم سه‌بعدی لرج و گرسمن در بین تمام بسته‌های نرم‌افزاری به‌منظور تعیین محدوده نهایی معادن روباز قابل اطمینان شناخته شده و همچنین به‌طور گسترده و در نرم‌افزار NPVscheduler مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق، به‌منظور تعیین محدوده نهایی و انجام برنامه‌ریزی تولید از نرم‌افزار NPVscheduler استفاده شده است. از این نرم‌افزار برای تهیه مدل اقتصادی، بهینه‌سازی محدوده نهایی، تعیین فازهای استخراجی و توالی بهینه فازها و برنامه‌ریزی تولید استفاده می‌شود. مراحل طی شده برای تعیین محدوده نهایی بهینه و برنامه‌ریزی تولید توسط نرم‌افزار NPVscheduler در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



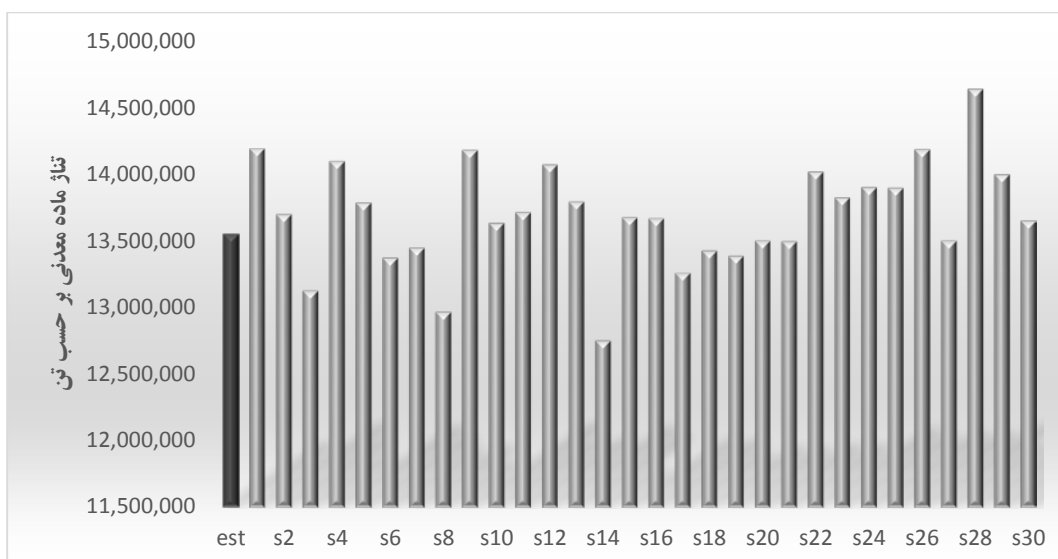
شکل ۴-۱- گام اساسی برنامه‌ریزی تولید در برنامه NPV Scheduler

۴-۳- بررسی تأثیر عدم قطعیت عیار تعیین محدوده نهایی

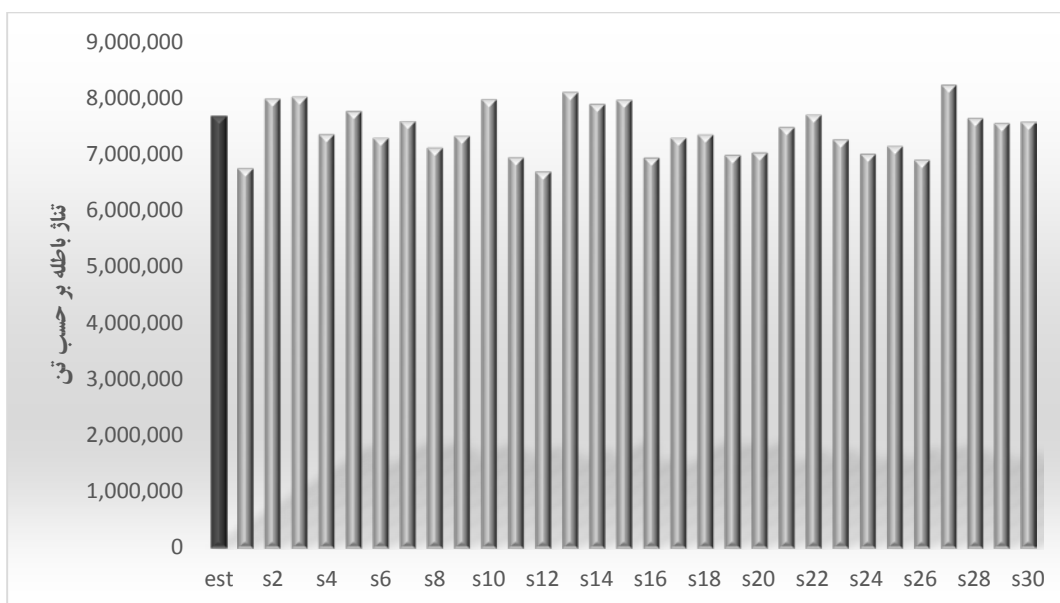
با استفاده از این پارامترهای اقتصادی و مدل‌های عیاری حاصله از مدل کریجینگ و مدل‌های شبیه‌سازی‌شده، مدل بلوکی اقتصادی هر یک از این مدل‌ها تشکیل شده است. سپس، با استفاده از الگوریتم لرچ-گرسمن محدوده نهایی هر یک از مدل‌های اقتصادی تعیین شده است. برای مقایسه مدل کریجینگ با مدل‌های شبیه‌سازی شده نمودار پارامترهایی از قبیل ارزش خالص فعلی، عیار متوسط، ذخیره قابل معدنکاری و مقدار باطله موجود در پیت روباز، در شکل‌های (۴-۲ تا ۴-۵) نشان داده است. علاوه بر این، جزئیات این نتایج در جدول (۴-۱) به‌منظور مقایسه روش کریجینگ و شبیه‌سازی نشان داده شده است. از جدول (۴-۱) می‌توان نتیجه گرفت ارزش فعلی خالص در روش کریجینگ ۰/۶ کمتر از میانگین روش‌های شبیه‌سازی شده تخمین زده شد. همچنین میزان عیار و مقدار ماده معدنی استخراج‌شده در مدل کریجینگ به ترتیب به میزان ۰/۲ و ۰/۱ کمتر از میانگین شبیه‌سازی‌های انجام‌شده محاسبه شده است اما مقدار باطله موجود در مدل کریجینگ از میانگین مدل‌های شبیه‌سازی شده به میزان ۰/۳ بیشتر تخمین زده شده است.



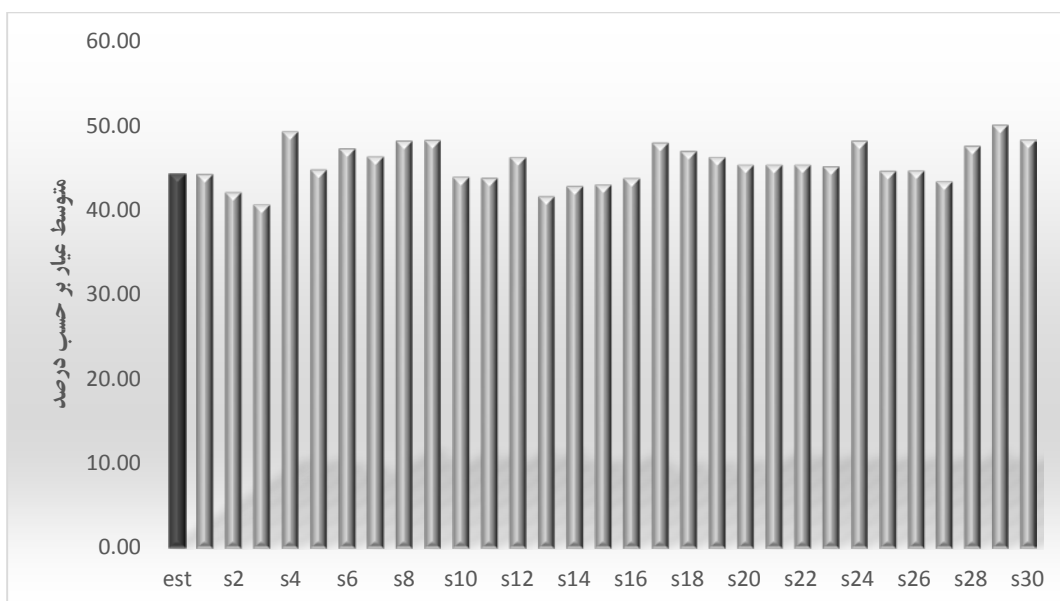
شکل ۴-۲- مقایسه ارزش خالص فعلی حاصل از روش کریجینگ (نوار تیره) و ۳۰ تحقق منتخب از روش شبیه‌سازی گوسی



شکل ۴-۳- مقایسه تناژ ماده معدنی حاصل از روش کریجینگ (نوار تیره) و ۳۰ تحقق منتخب از روش شبیه‌سازی گوسی



شکل ۴-۴- مقایسه تناژ باطله حاصل از روش کریجینگ (نوار تیره) و ۳۰ تحقق منتخب از روش شبیه‌سازی گوسی



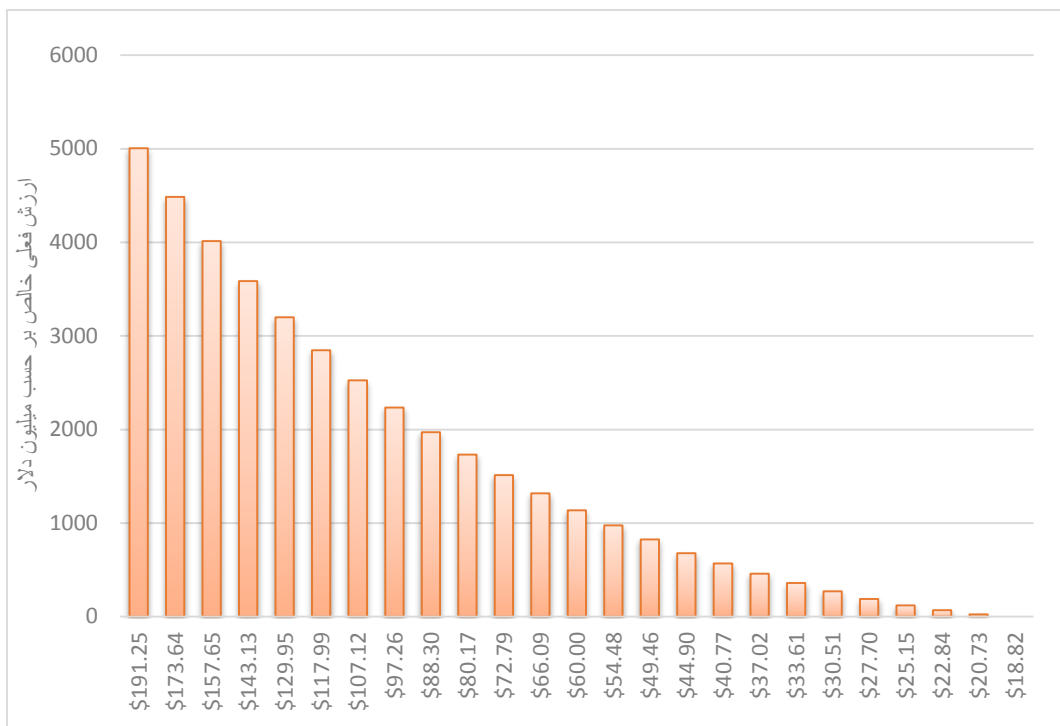
شکل ۴-۵- مقایسه متوسط عیار حاصل از روش کریجینگ (نوار تیره) و ۳۰ تحقق منتخب از روش شبیه‌سازی گوسی

جدول ۴-۱- خلاصه از نتایج حاصل از عدم قطعیت عیار در محدوده نهایی

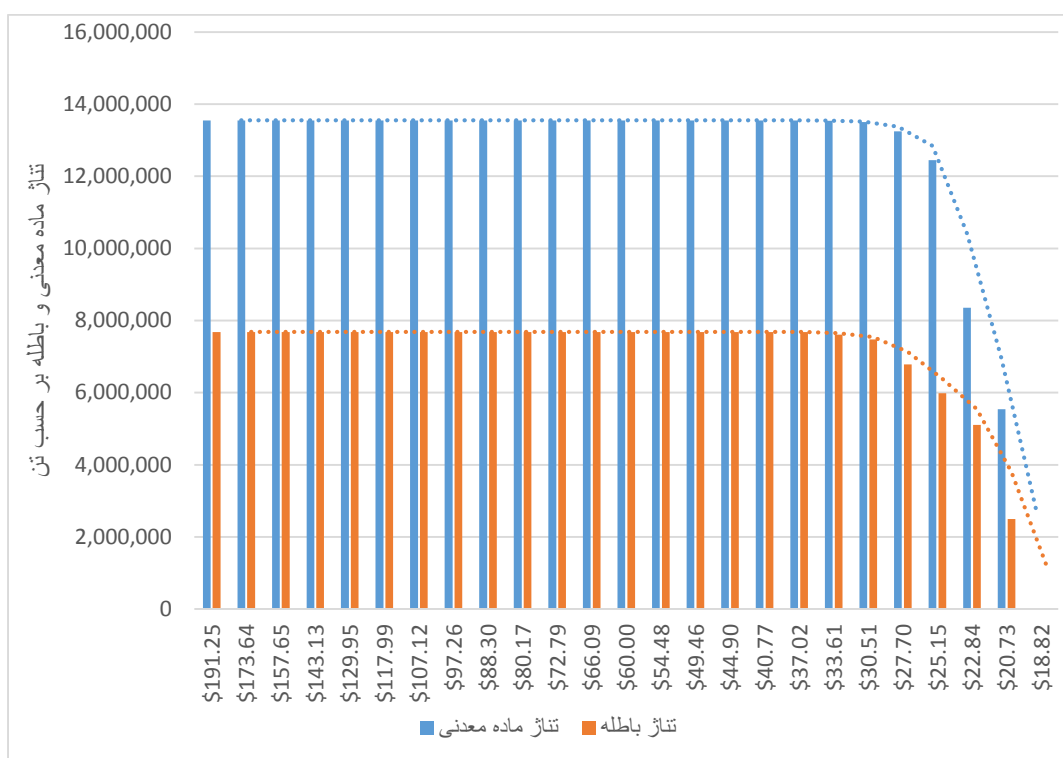
پارامترهای آماری حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی شده	مدل کریجینگ				پارامتر روش
	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	
ارزش خالص فعلی (میلیون دلار)	۱۱۳۶/۹۸	۱۲۰۰/۹۸	۱۰۳۲/۳۹	۱۲۹۴/۴۲	۶۳/۸۸
ذخیره ماده معدنی (میلیون تن)	۱۳/۵۴۸	۱۳/۶۷	۱۲/۷۶	۱۴/۶۴	۰/۳۹۸
میزان باطله (میلیون تن)	۷/۶۸۲	۷/۴۲۶	۶/۶۹۴	۸/۲۳۰	۰/۴۳۲
متوسط عیار ذخیره (درصد)	۴۴/۳۰	۴۵/۵۴	۴۰/۶۶	۵۰/۱۲	۲/۳۸

۴-۴- تأثیر عدم قطعیت قیمت ماده معدنی بر محدوده نهایی

برای تأثیر عدم قطعیت قیمت ماده معدنی بر محدوده نهایی از قیمت‌های پیش‌بینی شده در فصل قبل که از درخت دو جمله به دست آمده استفاده می‌شود. در شکل (۴-۶) ارزش فعلی خالص برای مدل کریجینگ در قیمت‌های مختلف پیش‌بینی شده از درخت دوجمله‌ای نشان داده شده است. همچنین مقدار تناژ ماده معدنی و باطله در شکل (۴-۷) نشان داده شده است. به دلیل نوع شکل ماده معدنی و باطله برداری ناچیز در این معدن تغییرات تناژ ماده معدنی و باطله در قیمت زیر ۳۵ دلار مشاهده می‌شود و در قیمت‌های بالاتر از ۳۵ دلار محدوده نهایی این مقادیر ثابت می‌باشند. لذا در ادامه از داده‌های زیر قیمت ۳۵ دلار برای بررسی عدم قطعیت زمین‌شناسی و برنامه‌ریزی تولید استفاده شده است.



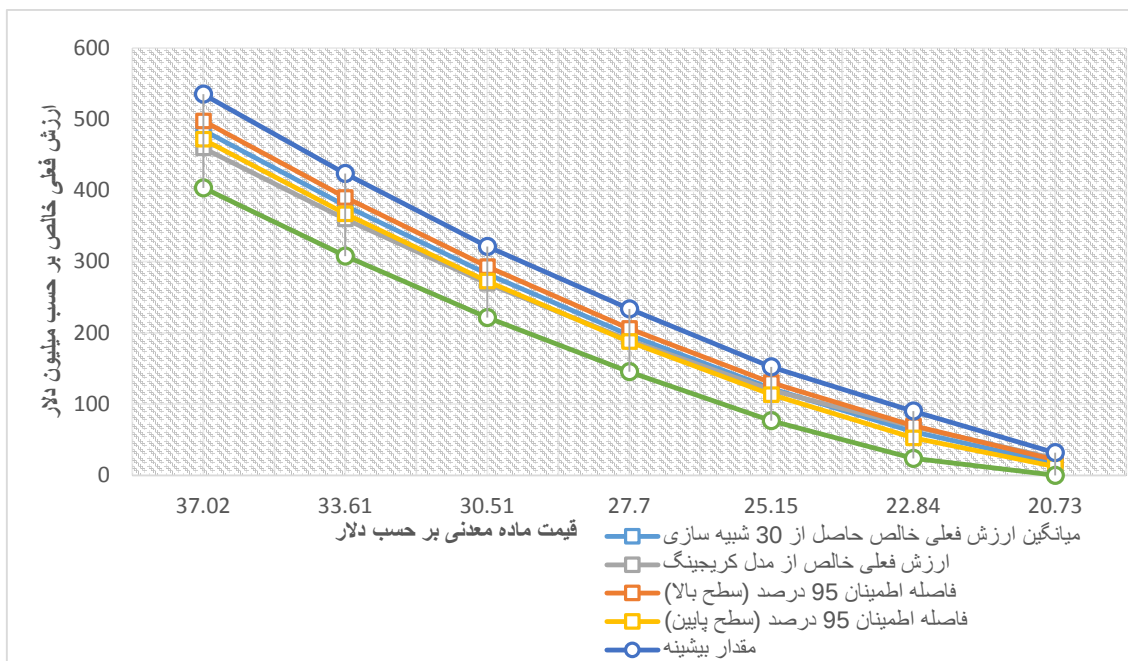
شکل ۴-۶- ارزش فعلی خالص برای قیمت‌های به‌دست‌آمده از درخت دوجمله‌ای در مدل کریجینگ



شکل ۴-۷- تنایز ماده معدنی و باطله برای قیمت حاصل از درخت دوجمله‌ای در مدل کریجینگ

۴-۵- تأثیر عدم قطعیت زمین‌شناسی و مالی بر محدوده نهایی

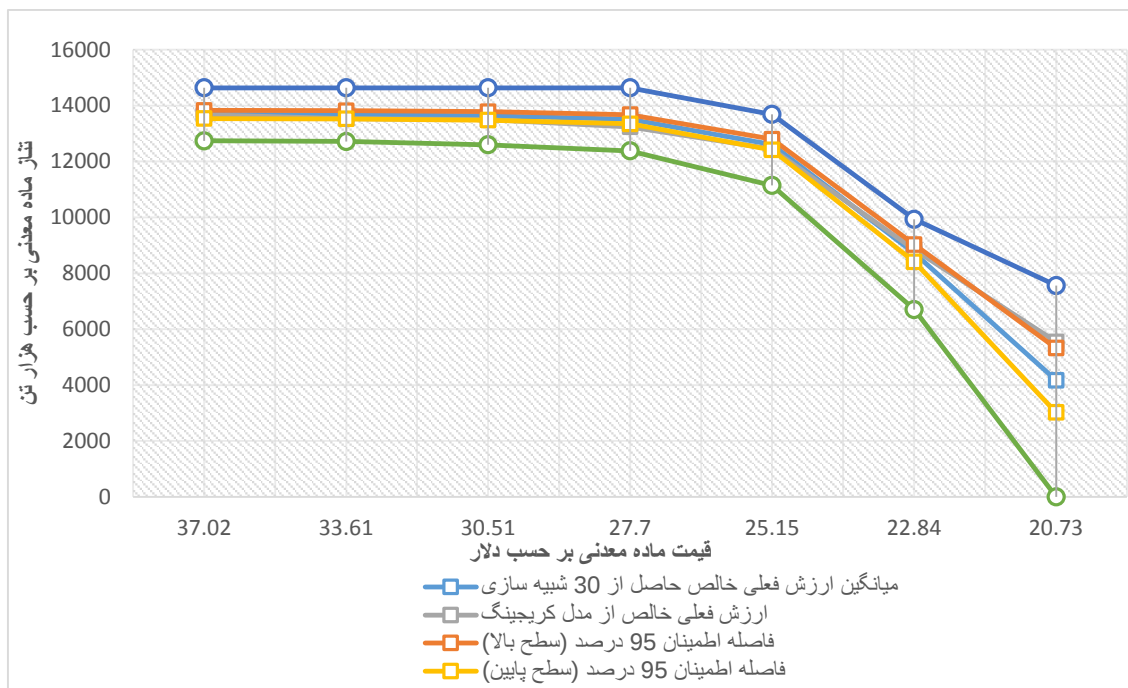
قیمت ماده معدنی و عیار تأثیرگذارترین عوامل بر برنامه‌ریزی تولید هستند و نادیده گرفتن هر یک از این عدم قطعیت‌ها باعث ریسک در پروژه‌های معدنی شود. در این تحقیق برای دستیابی به هدف پروژه، از اطلاعات قیمت‌های پیش‌بینی شده از روش اختیار حقیقی برای عدم قطعیت اقتصادی و استفاده از مدل کریجینگ و ۳۰ شبیه‌سازی انجام شده برای عدم قطعیت زمین‌شناسی در محدوده نهایی در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد در این بخش برای بررسی تأثیر عدم قطعیت قیمت و عیار بر محدوده نهایی از قیمت‌های زیر ۴۰ دلار استفاده می‌شود. در شکل (۴-۸) و جدول (۴-۲) خلاصه از نتایج اقتصادی مدل کریجینگ و ۳۰ مدل شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ارزش فعلی خالص در مدل کریجینگ تا قیمت ۲۵ دلار کمتر از میانگین مدل‌های شبیه‌سازی شده است. اینکه ارزش فعلی خالص در مدل کریجینگ بیشتر است به دلیل هموارسازی در روش شبیه‌سازی در بعضی از مدل‌ها باعث کوچک‌تر شدن محدوده نهایی می‌شود. همچنین تناژ ماده معدنی و باطله به ترتیب در شکل (۴-۹) و (۴-۱۰) برای مدل کریجینگ و ۳۰ مدل شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴-۹) و (۴-۱۰) مشاهده می‌شود تغییرات مقدار تناژ ماده معدنی در مدل کریجینگ نسبت به میانگین ۳۰ مدل شبیه‌سازی شده مقدار کمتر تخمین زده می‌شود و برای مقدار تناژ باطله مقدار بیشتری تخمین زده می‌شود.



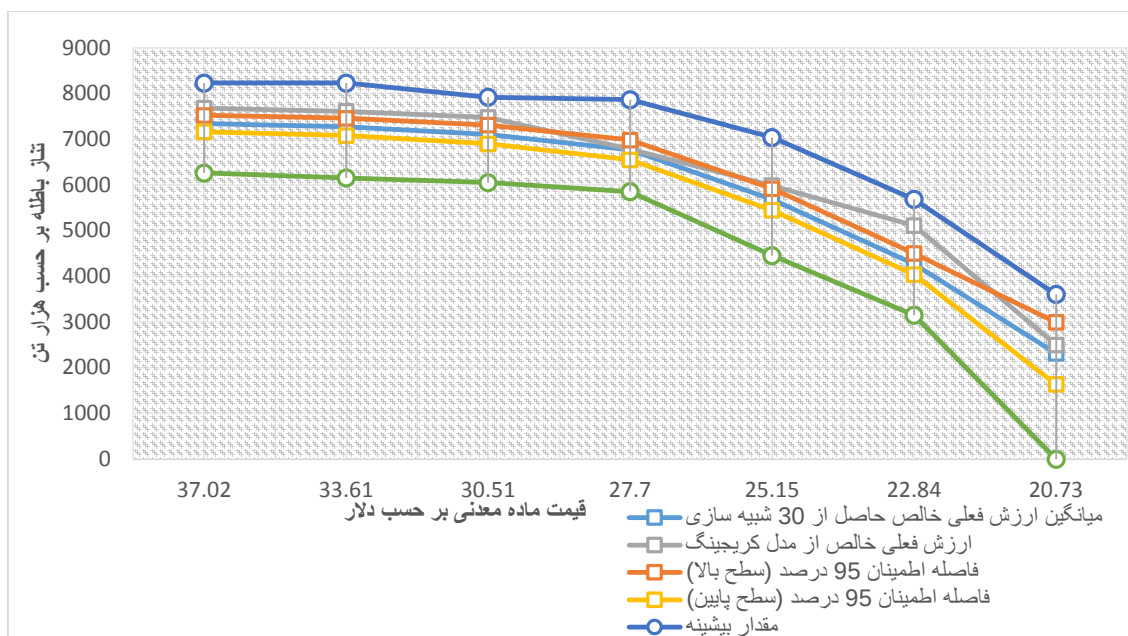
شکل ۴-۸- مقایسه ارزش فعلی خالص حاصل از مدل کریجینگ، میانگین، بیشینه و کمینه ۳۰ شبیه‌سازی انجام‌شده، فاصله اطمینان ۹۵ درصد

جدول ۴-۲- نتایج اقتصادی حاصل از عدم قطعیت عیار و قیمت در محدوده نهایی

ارزش فعلی خالص (قیمت بر حسب میلیون دلار)					کریجینگ	قیمت بر حسب دلار
کمترین مقدار	بیشتر مقدار	سطح اطمینان ۹۵ درصد		میانگین حاصل از ۳۰ شبیه‌سازی		
		سطح بالا	سطح پایین			
۴۰۳ / ۷۵	۵۳۵ / ۱۷	۴۹۷/۵۸	۴۷۱/۷۳	۴۸۴/۶۶	۴۵۹/۵۶	۳۷
۳۰۷ / ۸۷	۴۲۳ / ۶	۳۹۰/۲	۳۶۷/۳۱	۳۷۸/۷۵	۳۵۹/۷۶	۳۳/۶
۲۲۱ / ۵۲	۳۲۱ / ۳۴	۲۹۳	۲۷۲/۷	۲۸۲/۸۵	۲۶۹/۵۸	۳۰/۵
۱۴۵ / ۴۶	۲۳۳ / ۷۶	۲۰۶/۰۷	۱۸۷/۷۳	۱۹۶/۹	۱۸۹/۹۱	۲۷/۷
۷۶ / ۶۹	۱۵۲ / ۲	۱۳۰/۱۵	۱۱۳/۳۶	۱۲۱/۷۶	۱۱۹/۷۲	۲۵/۲
۲۳ / ۸۳	۹۰ / ۰۴	۶۹/۶۱	۵۲/۵۹	۶۱/۱	۶۸/۳۹	۲۲/۸
۰	۷ / ۳۱	۲۱/۵۱	۱۲/۲۵	۱۶/۸۸	۲۳/۶۳	۲۰/۷



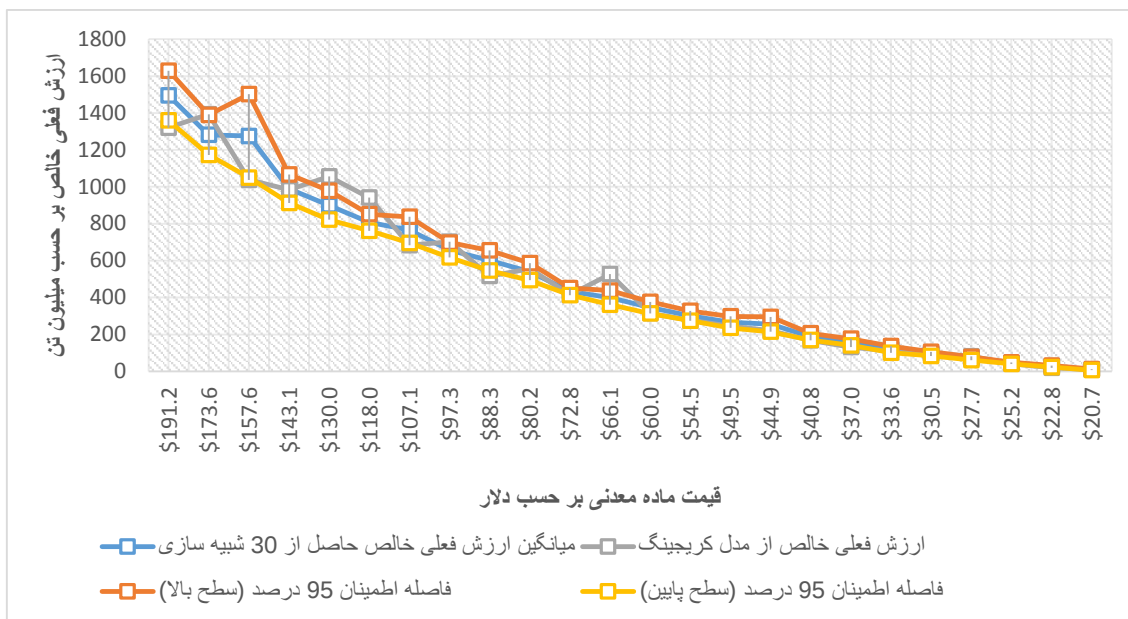
شکل ۴-۹- مقایسه تناژ ماده معدنی حاصل از مدل کریجینگ، میانگین، بیشینه و کمینه ۳۰ شبیه سازی انجام شده ، فاصله اطمینان ۹۵ درصد



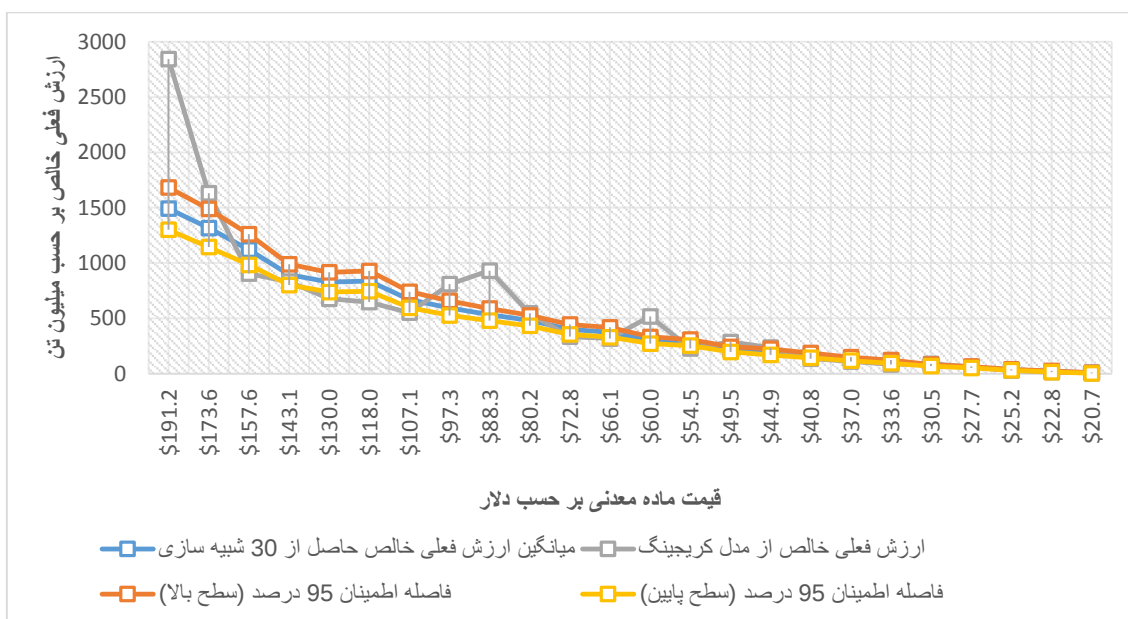
شکل ۴-۱۰- مقایسه تناژ باطله حاصل از مدل کریجینگ، میانگین، بیشینه و کمینه ۳۰ شبیه سازی انجام شده ، فاصله اطمینان ۹۵ درصد

۴-۶- تأثیر عدم قطعیت زمین‌شناسی و مالی بر برنامه‌ریزی تولید

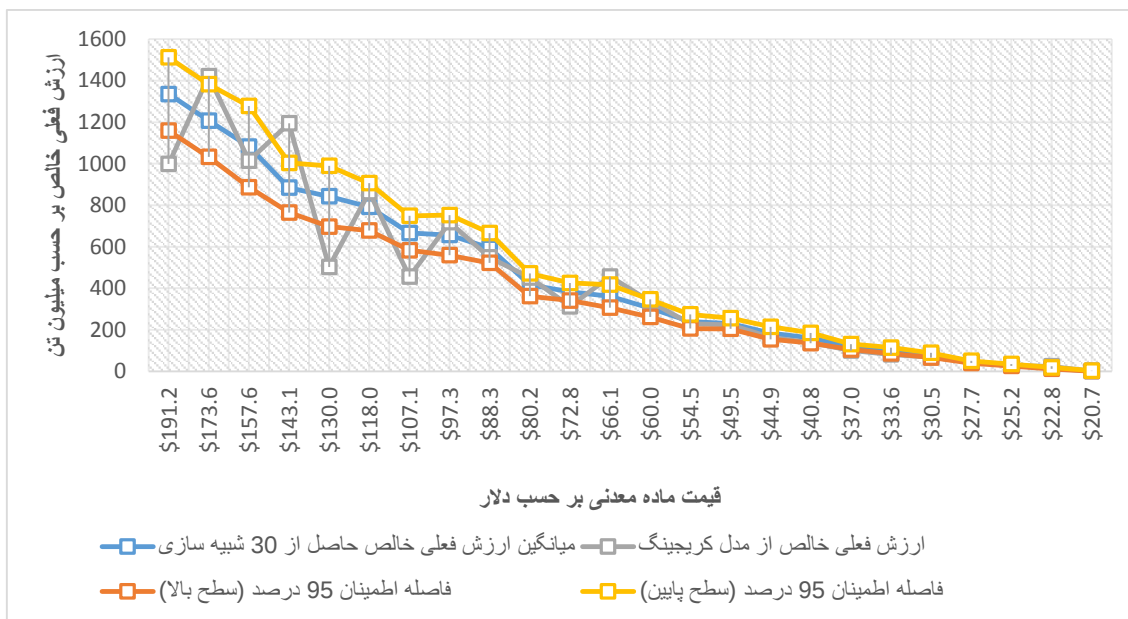
تصمیم‌گیری درباره اینکه در یک دوره کدام بلوک استخراج شوند و پس از آن چه عملیاتی روی آن انجام می‌گیرد، نه تنها مقدار جریان نقدینگی در آن دوره را مشخص می‌کند همچنین در برنامه‌ریزی تولید در دوره‌های بعد نیز مؤثر است. هدف از تشکیل پوش بک‌ها نیز تقسیم محدوده نهایی به پیت‌های کوچک‌تر جهت برنامه‌ریزی تولید است. لذا در این مرحله جهت برنامه‌ریزی تولید به کمک نرم‌افزار NPV Scheduler محدوده نهایی ایجاد و با تقسیم هر محدوده به ۴ پیت کوچک‌تر ارزش فعلی خالص هر محدوده مشخص می‌شود. در ادامه برای مدل کریجینگ و ۳۰ مدل شبیه‌سازی شده و با استفاده از قیمت‌های پیش بینی شده ماده معدنی توسط درخت دوجمله‌ای محدوده نهایی ایجاد می‌شود و هر محدوده جهت برنامه‌ریزی تولید به ۴ فاز استخراجی تقسیم‌بندی می‌شود. در نهایت ارزش فعلی فازها استخراجی با هم مقایسه می‌شود. این تعداد محدوده باعث انعطاف‌پذیری پروژه و تصمیم‌گیری مناسب‌تری می‌شود. نتایج حاصل از ارزش فعلی خالص مدل کریجینگ و ۳۰ مدل شبیه‌سازی شده برای هر فاز استخراجی در شکل‌های (۴-۱۱) تا (۴-۱۴) نشان داده شده است.



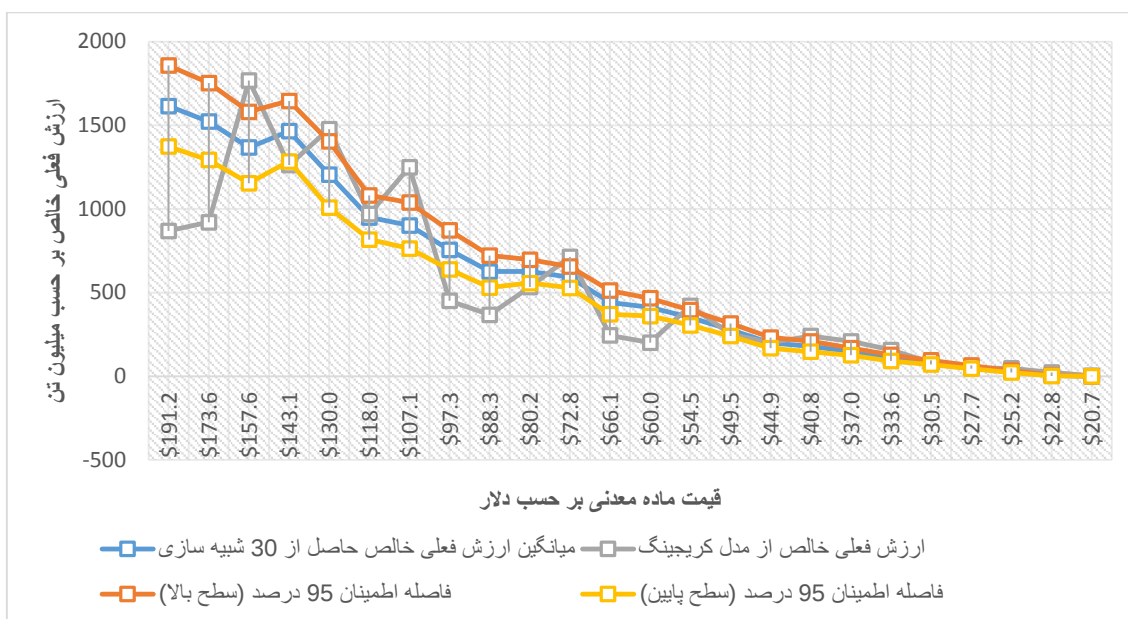
شکل ۴-۱۱- مقایسه ارزش خالص فعلی حاصل از مدل کریجینگ، ۳۰ شبیه سازی انجام شده و فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای فاز اول استخراجی



شکل ۴-۱۲- مقایسه ارزش خالص فعلی حاصل از مدل کریجینگ، ۳۰ شبیه سازی انجام شده و فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای فاز دوم استخراجی

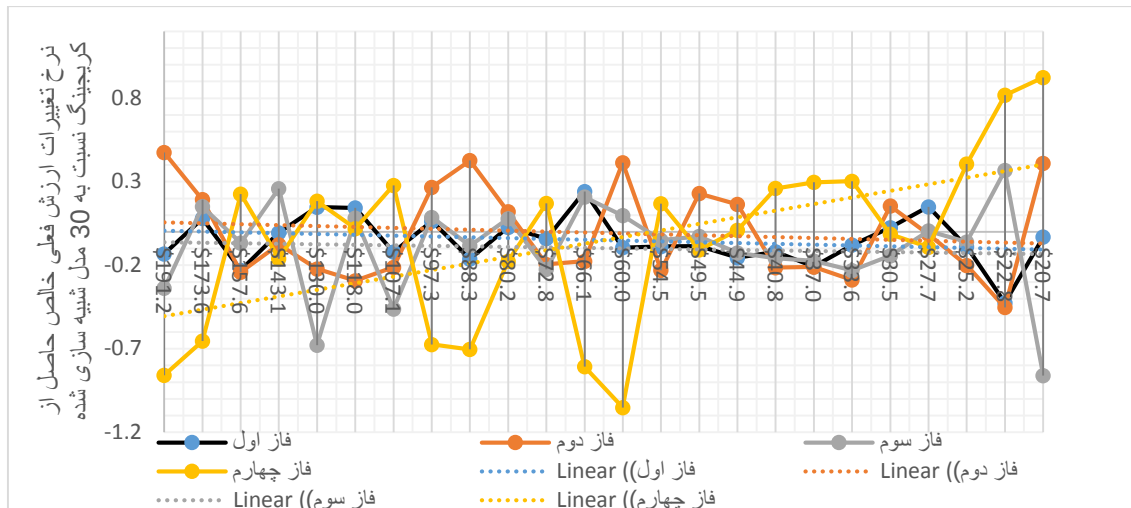


شکل ۴-۱۳- مقایسه ارزش خالص فعلی حاصل از مدل کریجینگ، ۳۰ شبیه سازی انجام شده و فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای فاز سوم استخراجی



شکل ۴-۱۴- مقایسه ارزش خالص فعلی حاصل از مدل کریجینگ، ۳۰ شبیه سازی انجام شده و فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای فاز چهارم استخراجی

نرخ تغییرات ارزش فعلی خالص حاصل از مدل کریجینگ و میانگین حاصل از ۳۰ شبیه‌سازی در شکل (۱۳-۴) به‌طور خلاصه نشان داده شده است. از این شکل (۴-۱۳) می‌توان نتیجه گرفت به‌طور متوسط نرخ تغییرات در فازهای ۱ تا ۳ تقریباً ثابت بوده و این نرخ تغییرت برای فاز ۴ تقریباً بیشتر می‌باشد.



شکل ۴-۱۵- میزان تغییرات ارزش فعلی خالص مدل کریجینگ نسبت به ارزش فعلی میانگین ۳۰ مدل شبیه‌سازی

شد

در جدول (۴-۳) تا (۴-۶) مقادیر ارزش فعلی خالص حاصل از مدل کریجینگ و ۳۰ مدل شبیه‌سازی شده برای فازهای استخراجی و در قیمت‌های مختلف پیش بینی شده از درخت دوجمله‌ای نشان داده شده است. در هر جدول مقدار ارزش فعلی حاصل از کریجینگ، میانگین، بیشینه، کمینه و انحراف معیار ۳۰ مدل شبیه‌سازی شده و همچنین فاصله اطمینان ۹۵ درصدی داده‌ها وجود دارد.

جدول ۳-۴- ارزش فعلی خالص مدل کریجینگ و میانگین ۳۰ مدل شبیه سازی شده برای فاز اول استخراج

بازه تعیین شده برای مدل های شبیه سازی شده			ارزش فعلی خالص برحسب میلیون دلار				قیمت ماده معدنی برحسب دلار
انحراف معیار	بیشینه	کمینه	احتمال ۹۵ درصد		میانگین ۳۰ شبیه سازی انجام شده	مدل کریجینگ	
			سطح بالا	سطح پایین			
۳۶۱/۱۵	۲۷۳۶/۸	۱۰۸۸/۰۲	۱۶۲۹/۷۰	۱۳۵۹/۹۸	۱۴۹۴/۸۴	۱۳۲۰/۶	۱۹۱/۲
۲۹۰/۲۷	۲۳۶۳/۴۳	۹۳۶/۷۵	۱۳۸۹/۸۸	۱۱۷۳/۱۱	۱۲۸۱/۴۹	۱۳۹۳/۱۱	۱۷۳/۶
۶۰۴/۷	۴۲۱۴/۸۸	۸۹۸/۳۴	۱۵۰۱/۶۲	۱۰۵۰/۰۱	۱۲۷۵/۸۲	۱۰۳۷/۹۷	۱۵۷/۶
۲۰۶/۶۱	۱۶۸۴/۷۵	۷۶۶/۷۴	۱۰۶۷/۱۳	۹۱۲/۸۳	۹۸۹/۹۸	۹۸۴/۹	۱۴۳/۱
۲۱۰/۱۵	۱۸۴۳/۳۵	۷۳۰/۲۶	۹۷۸/۵۳	۸۲۱/۵۸	۹۰۰/۰۵	۱۰۵۵/۹	۱۳۰
۱۱۸/۹۶	۱۱۳۰/۳۱	۶۴۴/۰۸	۸۵۰/۸۹	۷۶۲/۰۶	۸۰۶/۴۷	۹۴۱/۳۱	۱۱۸
۱۸۹/۹	۱۳۹۲/۹	۵۳۷/۷۷	۸۳۷/۲۹	۶۹۵/۴۸	۷۶۶/۳۹	۶۸۳/۶۲	۱۰۷/۱
۱۰۸/۲۹	۱۰۰۳/۸۴	۵۰۴/۲۱	۶۹۷/۵۷	۶۱۶/۷۰	۶۵۷/۱۳	۷۰۱/۸۸	۹۷/۳
۱۴۵/۸۳	۹۶۹/۴	۴۳۳/۹۸	۶۵۵/۰۷	۵۴۶/۱۷	۶۰۰/۶۲	۵۱۶/۵۹	۸۸/۳
۱۲۴/۹۴	۸۷۷/۲۴	۳۹۱/۵	۵۸۶/۷۱	۴۹۳/۴۰	۵۴۰/۰۵	۵۵۵/۳۹	۸۰/۲
۵۱/۳۳	۶۰۵/۲۱	۳۳۸/۴۳	۴۵۱/۴۹	۴۱۳/۱۶	۴۳۲/۳۳	۴۱۵/۵	۷۲/۸
۱۰۲/۰۴	۷۲۸/۲۴	۲۹۹/۹۴	۴۳۷/۲۵	۳۶۱/۰۴	۳۹۹/۱۵	۵۲۶/۷۵	۶۶/۱
۸۴/۴۸	۶۲۷/۸۳	۲۵۰/۳	۳۷۶/۷۶	۳۱۳/۶۶	۳۴۵/۲۱	۳۱۵/۳۲	۶۰
۷۰/۸۲	۴۹۹/۲۲	۲۱۶/۷۸	۳۲۶/۹۰	۲۷۴/۰۱	۳۰۰/۴۵	۲۷۶/۲۵	۵۴/۵
۸۳/۵۸	۵۱۳/۶۸	۱۷۹/۰۱	۲۹۷/۴۴	۲۳۵/۰۲	۲۶۶/۲۳	۲۴۵/۳۱	۴۹/۵
۱۰۷/۶۲	۶۹۲/۵۲	۱۴۵/۷۲	۲۹۵/۰۱	۲۱۴/۶۴	۲۵۴/۸۲	۲۲۰/۷۱	۴۴/۹
۴۸/۹۶	۳۶۵/۲۵	۱۴۲/۷۷	۲۰۵/۳۹	۱۶۸/۸۳	۱۸۷/۱۱	۱۶۷/۱۱	۴۰/۸
۴۸/۰۹	۳۱۴/۸۹	۱۰۳/۴۸	۱۷۶/۲۲	۱۴۰/۳۱	۱۵۸/۲۶	۱۳۰/۹۶	۳۷
۴۷/۶	۲۸۳/۹۸	۰/۷۱	۱۳۶/۵۱	۱۰۰/۹۶	۱۱۸/۷۴	۱۱۰/۰۳	۳۳/۶
۳۰/۸۷	۲۱۵/۸۵	۵۷/۵۹	۱۰۶/۲۰	۸۳/۱۴	۹۴/۶۷	۹۷/۱۳	۳۰/۵
۲۲/۲۸	۱۵۲/۴۱	۳۹/۰۴	۷۷/۶۹	۶۱/۰۵	۶۹/۳۷	۸۱/۵۹	۲۷/۷
۱۱/۲۱	۶۳/۶۲	۲۲/۴۴	۴۸/۳۵	۳۹/۹۸	۴۴/۱۷	۴۰/۵۸	۲۵/۲
۱۱/۵۴	۵۶/۱۷	۹/۰۹	۳۱/۳۱	۲۲/۶۹	۲۷	۱۸/۹۵	۲۲/۸
۸/۰۳	۳۱/۳	۰	۱۲/۳۱	۶/۳۱	۹/۳۱	۹/۰۳	۲۰/۷

جدول ۴-۴- ارزش فعلی خالص مدل کریجینگ و میانگین ۳۰ مدل شبیه‌سازی شده برای فاز دوم استخراج

بازه تعیین‌شده برای مدل‌های شبیه‌سازی‌شده			ارزش فعلی خالص برحسب میلیون دلار				قیمت ماده معدنی برحسب دلار
انحراف معیار	بیشینه	کمینه	احتمال ۹۵ درصد		میانگین ۳۰ شبیه‌سازی انجام‌شده	مدل کریجینگ	
			سطح بالا	سطح پایین			
۵۱۰/۶۸	۲۷۷۳/۴۸	۸۸۰/۵۳	۱۶۸۳/۱۲	۱۳۰۱/۸۳	۱۴۹۲/۴۸	۲۸۴۲/۲۶	۱۹۱/۲
۴۶۰/۸۴	۲۳۷۵/۷۱	۸۵۱/۷۰	۱۴۸۹/۰۳	۱۱۴۴/۸۶	۱۳۱۶/۹۵	۱۶۳۱/۰۶	۱۷۳/۶
۳۶۸/۱۵	۲۴۶۷/۰۷	۷۳۴/۱۵	۱۲۵۹/۹۸	۹۸۵/۰۳	۱۱۲۲/۵۱	۹۰۴/۸۰	۱۵۷/۶
۲۵۱/۲۱	۱۶۳۴/۲۴	۶۱۱/۱۸	۹۹۰/۳۱	۸۰۲/۷۱	۸۹۶/۵۱	۸۳۲/۷۵	۱۴۳/۱
۲۳۷/۴۸	۱۵۲۰/۴۹	۴۶۰/۷۰	۹۱۶/۶۴	۷۳۹/۲۹	۸۲۷/۹۶	۶۷۷/۷۰	۱۳۰
۲۴۶/۰۲	۱۲۷۱/۳۲	۵۲۷/۱۵	۹۲۹/۰۴	۷۴۵/۳۱	۸۳۷/۱۸	۶۴۷/۴۰	۱۱۸
۱۹۲/۴۴	۱۲۵۱/۹۰	۴۶۸/۸۸	۷۴۱/۲۲	۵۹۷/۵۰	۶۶۹/۳۶	۵۵۲/۱۲	۱۰۷/۱
۱۷۷/۰۷	۱۳۰۷/۶۵	۳۷۲/۸۲	۶۵۹/۵۶	۵۲۷/۳۲	۵۹۳/۴۴	۸۰۹/۷۳	۹۷/۳
۱۴۶/۶۴	۹۰۳/۱۰	۳۷۰/۹۹	۵۸۹/۰۲	۴۷۹/۵۰	۵۳۴/۲۶	۹۳۲/۰۰	۸۸/۳
۱۲۵/۶۶	۸۲۱/۷۲	۳۱۰/۲۸	۵۲۷/۷۷	۴۳۳/۹۲	۴۸۰/۸۵	۵۴۶/۲۶	۸۰/۲
۱۲۰/۰۸	۸۵۰/۱۸	۲۸۲/۴۷	۴۴۵/۱۰	۳۵۵/۴۲	۴۰۰/۲۶	۳۳۵/۰۱	۷۲/۸
۱۱۶/۸۷	۶۹۹/۵۲	۲۵۵/۱۵	۴۱۸/۷۳	۳۳۱/۴۵	۳۷۵/۰۹	۳۱۹/۱۱	۶۶/۱
۸۲/۳۹	۵۷۰/۵۴	۱۸۲/۴۶	۳۳۴/۴۱	۲۷۲/۸۸	۳۰۳/۶۵	۵۱۸/۴۶	۶۰
۷۲/۹۳	۴۳۰/۱۲	۱۹۸/۳۴	۳۰۸/۷۸	۲۵۴/۳۲	۲۸۱/۵۵	۲۲۸/۷۳	۵۴/۵
۶۳/۲۶	۴۴۷/۵۲	۱۳۲/۸۲	۲۴۴/۷۳	۱۹۷/۴۸	۲۲۱/۱۰	۲۸۷/۱۱	۴۹/۵
۷۲/۹۹	۴۳۲/۸۰	۱۱۲/۲۹	۲۲۵/۳۴	۱۷۰/۸۳	۱۹۸/۰۹	۲۳۶/۹۳	۴۴/۹
۵۷/۷۲	۳۳۰/۴۱	۱۰۸/۵۰	۱۸۷/۶۲	۱۴۴/۵۱	۱۶۶/۰۷	۱۳۶/۷۹	۴۰/۸
۴۲/۷۷	۲۴۱/۶۳	۷۲/۰۳	۱۵۰/۴۵	۱۱۸/۵۱	۱۳۴/۴۸	۱۱۱/۰۸	۳۷
۳۹/۵۷	۲۳۷/۷۷	۷۰/۳۵	۱۲۴/۲۳	۹۴/۶۷	۱۰۹/۴۵	۸۴/۹۹	۳۳/۶
۲۱/۰۳	۱۵۴/۲۸	۵۲/۴۳	۸۴/۱۴	۶۸/۴۳	۷۶/۲۹	۹۰/۲۵	۳۰/۵
۱۸/۷۷	۱۰۹/۷۲	۴۰/۹۰	۶۶/۸۸	۵۲/۸۶	۵۹/۸۷	۵۹/۰۷	۲۷/۷
۱۱/۶۸	۶۳/۲۹	۱۲/۶۵	۴۰/۸۴	۳۲/۱۲	۳۶/۴۸	۳۰/۳۷	۲۵/۲
۱۲/۵۹	۵۶/۴۷	۶/۵۳	۲۵/۵۸	۱۶/۱۸	۲۰/۸۸	۱۴/۳۷	۲۲/۸
۶/۳۳	۱۸/۳۶	۰/۰۰	۹/۲۲	۴/۵۰	۶/۸۶	۱۱/۶۴	۲۰/۷

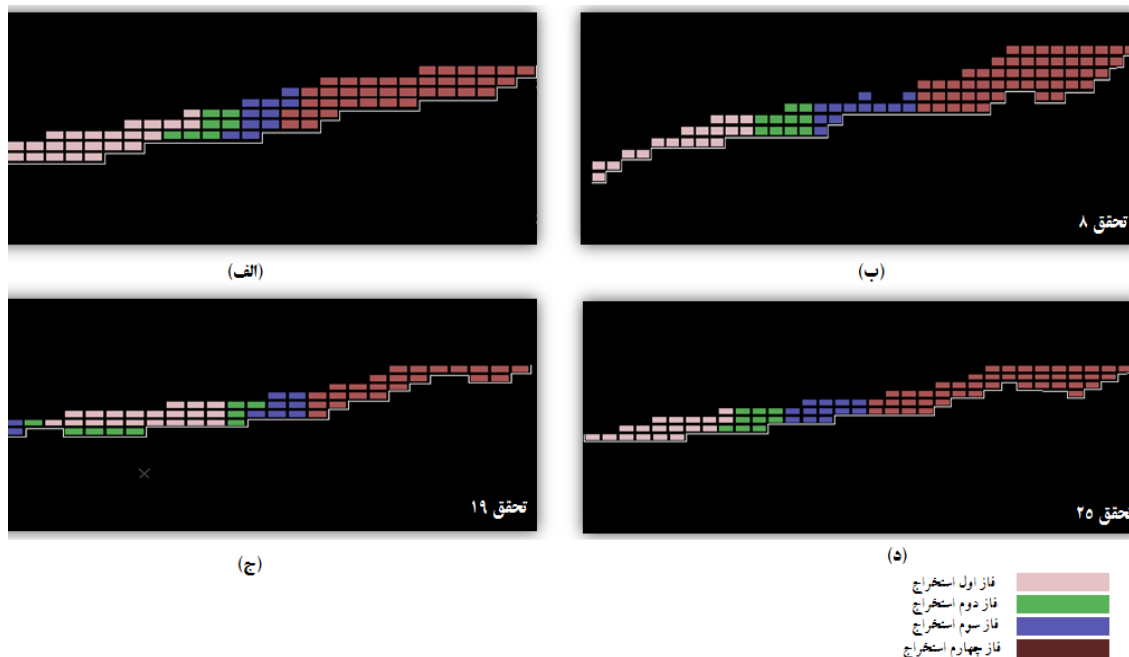
جدول ۴-۵- ارزش فعلی خالص مدل کریجینگ و میانگین ۳۰ مدل شبیه‌سازی شده برای فاز سوم استخراج

بازه تعیین شده برای مدل های شبیه سازی شده			ارزش فعلی خالص برحسب میلیون دلار				قیمت ماده معدنی برحسب دلار
انحراف معیار	بیشینه	کمینه	احتمال ۹۵ درصد		میانگین ۳۰ شبیه سازی انجام شده	مدل کریجینگ	
			سطح بالا	سطح پایین			
۴۷۳/۰.۷	۲۹۰.۶/۱۱	۷۸۴/۸۲	۱۵۱۲/۷۲	۱۱۵۹/۴۳	۱۳۳۶/۰.۷	۹۹۸/۸۶	۱۹۱/۲
۴۶۸/۹۴	۲۵۰۰/۸۲	۴۹۲/۸۰	۱۳۸۲/۹۷	۱۰۳۲/۷۶	۱۲۰۷/۸۷	۱۴۲۲/۴۴	۱۷۳/۶
۵۲۳/۹۲	۲۳۸۴/۹۱	۵۰۶/۰۰	۱۲۷۸/۱۴	۸۸۶/۸۶	۱۰۸۲/۵۰	۱۰۱۵/۱۲	۱۵۷/۶
۳۲۱/۰.۹	۱۸۵۷/۳۲	۴۴۵/۸۷	۱۰۰۴/۴۷	۷۶۴/۶۷	۸۸۴/۵۷	۱۱۹۴/۶۲	۱۴۳/۱
۳۹۱/۱۵	۲۱۰۸/۹۷	۴۳۷/۴۷	۹۸۹/۰.۹	۶۹۶/۹۸	۸۴۳/۰.۳	۵۰۲/۴۹	۱۳۰
۳۰۵/۹۹	۱۸۵۹/۴۹	۴۰۵/۹۵	۹۰۶/۲۵	۶۷۷/۷۴	۷۹۱/۹۹	۸۶۳/۵۱	۱۱۸
۲۲۲/۴۰	۱۱۴۷/۳۴	۳۹۵/۸۶	۷۴۹/۲۳	۵۸۳/۱۴	۶۶۶/۱۹	۴۵۵/۷۶	۱۰۷/۱
۲۵۸/۳۴	۱۴۱۷/۷۰	۳۰۰/۳۹	۷۵۲/۴۱	۵۵۹/۴۸	۶۵۵/۹۵	۷۱۸/۰.۸	۹۷/۳
۱۹۲/۹۲	۱۰۰۵/۹۱	۲۹۷/۹۴	۶۶۶/۰.۳	۵۲۱/۹۶	۵۹۳/۹۹	۵۴۸/۶۲	۸۸/۳
۱۴۶/۹۱	۸۷۴/۰.۴	۲۵۸/۶۳	۴۷۱/۰.۸	۳۶۱/۳۶	۴۱۶/۲۲	۴۵۱/۹۲	۸۰/۲
۱۱۳/۲۱	۶۳۱/۹۸	۲۰۰/۹۹	۴۲۵/۷۶	۳۴۱/۲۱	۳۸۳/۴۹	۳۱۳/۱۱	۷۲/۸
۱۴۹/۰.۶	۷۴۲/۸۱	۱۹۲/۲۶	۴۱۷/۲۴	۳۰۵/۹۱	۳۶۱/۵۷	۴۵۶/۵۰	۶۶/۱
۱۱۳/۶۸	۶۴۵/۱۶	۱۷۶/۵۹	۳۴۶/۲۴	۲۶۱/۳۵	۳۰۳/۸۰	۳۳۶/۳۷	۶۰
۹۰/۲۸	۴۷۷/۳۹	۱۳۲/۶۰	۲۷۳/۴۴	۲۰۶/۰.۲	۲۳۹/۷۳	۲۲۸/۴۲	۵۴/۵
۶۹/۱۹	۳۹۶/۲۵	۱۳۲/۲۸	۲۵۶/۱۱	۲۰۴/۴۴	۲۳۰/۲۸	۲۲۴/۱۱	۴۹/۵
۸۱/۲۱	۴۶۲/۰.۴	۱۰۳/۴۹	۲۱۴/۷۸	۱۵۴/۱۳	۱۸۴/۴۵	۱۶۳/۸۶	۴۴/۹
۶۶/۱۵	۳۸۷/۳۴	۷۹/۵۱	۱۸۴/۷۹	۱۳۵/۳۹	۱۶۰/۰.۹	۱۳۸/۲۰	۴۰/۸
۳۴/۸۰	۱۷۷/۴۵	۶۳/۱۸	۱۳۱/۱۳	۱۰۵/۱۴	۱۱۸/۱۴	۱۰۰/۶۳	۳۷
۳۸/۸۵	۲۳۱/۰.۰	۴۴/۶۳	۱۱۴/۵۳	۸۵/۵۲	۱۰۰/۰.۲	۸۱/۲۰	۳۳/۶
۳۰/۰.۳	۱۵۵/۰.۵	۳۴/۷۶	۸۸/۳۹	۶۵/۹۶	۷۷/۱۸	۶۷/۵۲	۳۰/۵
۱۴/۸۵	۷۷/۵۲	۲۱/۶۲	۵۰/۴۴	۳۹/۳۵	۴۴/۸۹	۴۵/۱۳	۲۷/۷
۱۲/۵۳	۶۳/۹۶	۱۳/۶۵	۳۴/۹۵	۲۵/۶۰	۳۰/۲۸	۲۸/۵۴	۲۵/۲
۱۰/۱۵	۳۸/۷۶	۰/۸۳	۱۸/۸۵	۱۱/۲۶	۱۵/۰.۶	۲۳/۸۰	۲۲/۸
۲/۴۳	۹/۱۰	۰/۰۰	۲/۷۵	۰/۹۳	۱/۸۴	۰/۹۹	۲۰/۷

جدول ۴-۶- ارزش فعلی خالص مدل کریجینگ و میانگین ۳۰ مدل شبیه‌سازی شده برای فاز چهارم استخراج

ارزش فعلی خالص برحسب میلیون دلار		بازه تعیین شده برای مدل های شبیه سازی شده		قیمت ماده معدنی برحسب دلار
مدل کریجینگ	میانگین ۳۰ شبیه سازی انجام شده	احتمال ۹۵ درصد		
		سطح پایین	سطح بالا	
۸۶۹/۳۹	۱۶۱۵/۴۰	۱۳۷۳/۳	۱۸۵۷/۵۰	۱۹۱/۲
۹۲۰/۸۲	۱۵۲۲/۹۸	۱۲۹۲/۷۸	۱۷۵۳/۱۸	۱۷۳/۶
۱۷۶۸/۹۶	۱۳۶۷/۷۲	۱۱۵۴/۰۳	۱۵۸۱/۴۲	۱۵۷/۶
۱۲۶۲/۲۵	۱۴۶۵/۴۹	۱۲۸۴/۷۹	۱۶۴۶/۱۹	۱۴۳/۱
۱۴۷۷/۴۳	۱۲۰۵/۹۹	۱۰۰۸/۴	۱۴۰۳/۵۸	۱۳۰
۹۶۹/۲۴	۹۴۹/۸۱	۸۱۷/۷۳	۱۰۸۱/۸۹	۱۱۸
۱۲۴۹/۴۸	۹۰۱/۳۷	۷۶۳/۹۶	۱۰۳۸/۷۹	۱۰۷/۱
۴۵۱/۳۴	۷۵۵/۴۵	۶۳۸/۶۵	۸۷۲/۲۶	۹۷/۳
۳۶۷/۴۴	۶۲۶/۲۲	۵۳۰/۸۲	۷۲۱/۶۳	۸۸/۳
۵۳۳/۰۹	۶۲۶/۹۵	۵۵۶/۹۳	۶۹۶/۹۷	۸۰/۲
۷۱۴/۵۰	۵۹۲/۱۵	۵۲۸/۸۵	۶۵۵/۴۵	۷۲/۸
۲۴۴/۰۰	۴۴۱/۰۹	۳۷۰/۲۳	۵۱۱/۹۶	۶۶/۱
۲۰۱/۳۲	۴۱۳/۰۳	۳۵۹/۷۶	۴۶۶/۲۹	۶۰
۴۲۱/۳۱	۳۵۰/۰۴	۳۰۴/۴	۳۹۵/۶۹	۵۴/۵
۲۵۱/۰۹	۲۷۸/۲۸	۲۴۰/۵۷	۳۱۵/۹۹	۴۹/۵
۲۰۱/۹۷	۱۹۹/۹۳	۱۶۸/۰۶	۲۳۱/۸۰	۴۴/۹
۲۴۰/۳۱	۱۷۷/۸۴	۱۴۶/۸۴	۲۰۸/۸۳	۴۰/۸
۲۰۹/۱۸	۱۴۷/۲۱	۱۲۵/۶۵	۱۶۸/۷۸	۳۷
۱۵۷/۰۹	۱۰۹/۵۲	۹۱/۱۵	۱۲۷/۹۰	۳۳/۶
۸۱/۶۵	۸۲/۷۸	۷۰/۶	۹۴/۹۶	۳۰/۵
۵۰/۲۱	۵۴/۷۹	۴۴/۸۹	۶۴/۶۸	۲۷/۷
۴۷/۵۱	۲۸/۲۵	۲۲/۴	۳۴/۱۰	۲۵/۲
۲۳/۱۰	۴/۲۱	۲/۰۷	۶/۳۶	۲۲/۸
۳/۴۴	۰/۲۶	-۰/۰۳	۰/۵۵	۲۰/۷

در ادامه در شکل (۴-۱۶) نمونه از مقطع شمال- جنوب پیت‌های طراحی شده از مدل کریجینگ و سه مدل تصادفی شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. جهت برنامه‌ریزی تولید هر کدام از این محدوده‌های به ۴ پوش بک تقسیم‌بندی شده است.



شکل ۴-۱۶- مقاطع شمال- جنوبی از پوش بک‌های استفاده‌شده از مدل کریجینگ (الف) و ۳ مدل منتخب شبیه‌سازی‌شده برای قیمت ۶۰ دلار

۷-۴- جمع‌بندی

مسئله برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز همواره دغدغه مهندسان و طراحان بوده است و همواره عدم قطعیت‌های موجود باعث شده که طرح‌های ارائه‌شده از اطمینان کافی برخوردار نباشد. در این فصل در سه مرحله عدم قطعیت زمین‌شناسی و عیار مورد بررسی قرار گرفته است. الف) ابتدا عدم قطعیت عیار بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت ماده معدنی بر محدوده نهایی با توجه به مدل کریجینگ و مدل شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفته شده است. ب) در مرحله دوم عدم قطعیت قیمت ماده معدنی بر محدوده نهایی در مدل کریجینگ و بدون استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفته است. ج) در بخش سوم عدم قطعیت عیار و قیمت ماده معدنی در محدوده‌های نهایی حاصل از مدل کریجینگ و میانگین ۳۰ مدل شبیه‌سازی شده جهت عدم قطعیت عیار و با در نظر گرفتن قیمت مختلف پیش‌بینی شده با استفاده از درخت دوجمله‌ای مورد تحلیل قرار گرفته است. و در ادامه تأثیر عدم قطعیت عیار و قیمت بر برنامه‌ریزی تولید توسط تولید ۴ پوش بک برای هر محدوده نهایی روش کریجینگ و ۳۰ مدل شبیه‌سازی‌شده مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل پنجم

نتایج و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

یکی از پیچیده‌ترین مسائل در مهندسی معدن تعیین یک برنامه‌ریزی تولید بهینه طی عمر معدن می‌باشد. هدف معادن روباز تعیین محدوده نهایی و هدف از برنامه‌ریزی تولید بهینه کردن ارزش فعلی خالص در این محدوده می‌باشد. عدم قطعیت‌های عیار و قیمت ماده معدنی از مهم‌ترین چالش‌های برنامه‌ریزی تولید می‌باشد که باید طراحان و برنامه ریزان در طراحی‌های خود این عدم قطعیت را مورد توجه قرار دهند.

در این تحقیق پس از جمع‌آوری اطلاعات به‌دست‌آمده از حفاری گمانه‌های اکتشافی اقدام به ساخت پیکره کانسار و تعیین فضای تخمین شده است. پس از ساخت مدل بلوکی با استفاده از روش زمین‌آمار و روش کریجینگ عیار در کانسار تخمین زده می‌شود. این مدل به‌تنهایی نمی‌تواند تغییرات عیار را در کانسار به‌درستی پیش‌بینی کند. لذا برای هموارسازی عیار در کانسار توسط روش شبیه‌سازی زمین‌آماري ۳۰ مدل هم احتمال با کانسار ایجاد می‌شود. در ادامه جهت پیش‌بینی قیمت ماده معدنی در معدن شهرک برای تهیه محدوده نهایی و برنامه‌ریزی تولید از روش اختیار حقیقی و درخت دوجمله‌ای استفاده شده است. درنهایت برای برنامه‌ریزی تولید، با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی شده و مدل کریجینگ محدوده نهایی برای کلیه قیمت‌های پیش‌بینی شده از روش درخت دوجمله‌ای تعیین شده و هر یک از این محدوده‌ها نهایی به ۴ پوش بک تقسیم‌بندی می‌شود و پارامترهای فنی و اقتصادی برای هر پوش بک و محدوده نهایی مشخص می‌شود.

۵-۲- بحث و نتیجه‌گیری

- در این تحقیق نشان می‌دهد که قیمت ماده معدنی و عیار ماده معدنی حساس‌ترین عامل در برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز و تعیین محدوده نهایی است.

- از شبیه‌سازی زمین‌آماري به‌عنوان ابزاری برای مدل‌سازی عدم قطعیت عیار استفاده‌شده است. در این تحقیق از روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی ۳۰ تحقق هم احتمال برای کانسار ایجادشده است
- عدم قطعیت‌های قیمت ماده معدنی شاخص‌ترین نمونه از عدم قطعیت اقتصادی در برنامه‌ریزی تولید است که لازم است طراحان به‌دقت تأثیر این عدم قطعیت به محدوده نهایی و محدوده نهایی موردبررسی قرار گیرد.
- میزان ارزش فعلی خاص، تناژ ماده معدنی و عیار متوسط در مدل کریجینگ به کمتر از میانگین مدل‌های شبیه‌سازی شده تخمین زده شد ولی در میزان مقدار باطله مدل کریجینگ نسبت بالاتری در برابر میانگین مدل‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این نشان‌دهنده این است مدل کریجینگ از میانگین مدل‌های شبیه‌سازی شده محدوده بزرگ‌تری را به خود اختصاص می‌دهد
- به دلیل اینکه میزان باطله برداری در این معدن ناچیز می‌باشد و تغییرات قیمت بالاتر از ۳۰ دلار تغییری در محدوده نهایی نداشته و میزان باطله برداری و ماده معدنی استخراج شده ثابت است و تغییرات ارزش فعلی خالص در این معدن صرفاً به خاطر تغییرات قیمت ماده معدنی است.
- از مقایسه ارزش فعلی خالص با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمین‌شناسی و قیمت ماده معدنی ملاحظه می‌شود ارزش فعلی خالص در مدل کریجینگ برای قیمت‌های بالاتر ۳۰ دلار کمتر از مدل کریجینگ است و همچنین با احتمال ۹۵ درصد نشان می‌دهد که میانگین ارزش فعلی خالص مدل کریجینگ بین ۴ تا ۸ درصد کمتر از شبیه‌سازی‌های انجام شده است.
- برای برنامه‌ریزی تولید در این تحقیق ۳۱×۲۴ محدوده نهایی ایجادشده و هرکدام از این محدوده‌ها به ۴ فاز استخراجی تقسیم‌بندی شده است. از مقایسه این فازها نشان می‌دهد که تغییرات ارزش فعلی مدل کریجینگ در مقایسه با ۳۰ شبیه‌سازی انجام شده در سه فاز اولیه

تقریباً ثابت بوده و در فاز چهارم به دلیل نوسانات عیار در بعضی از محدوده‌ها نهایی مدل‌های شبیه‌سازی شده است و به طور متوسط این تغییرات به‌طور واضحی بیشتر است.

۵-۳- پیشنهادات

- به‌منظور دقت بیشتر در هموارسازی عیار از تعداد بیشتر از شبیه‌سازی جهت برنامه‌ریزی تولید استفاده کرد.
- علاوه بر قیمت ماده معدنی هزینه‌های معدنکاری نیز از عوامل تأثیرگذار در ارزش‌گذاری پروژه‌های معدنی است. از این‌رو پیشنهاد می‌شود با استفاده از روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت در معدنکاری نیز مورد بررسی قرار گیرد.
- با توجه به اینکه تا کنون پایگاه داده‌ای قوی برای قیمت فلزات در داخل کشور نیست یا بسیار ضعیف است لذا پیشنهاد می‌شود با تقویت پایگاه داده داخلی باعث کاهش عدم قطعیت موجود در تبدیل قیمت فلز شود.
- استفاده از روش‌های زمین‌آمار با توجه به اینکه باعث ایجاد مجموعه‌ای از تحقق‌های هم احتمال با کانسار می‌شود باعث کاهش عدم قطعیت عیار و تصمیم‌گیری را در طراحی معدن آسان‌تر می‌کند. لذا استفاده از روش زمین‌آمار برای دستیابی به دامنه‌ای از جواب‌های ممکن توصیه می‌شود.

منابع

محمودی، علی؛ مرتضی اصائلو و اکبر اصفهانی پور، ۱۳۹۱، استفاده از تئوری اختیار واقعی برای تصمیم گیری جهت سرمایه گذاران در پروژه های معدنی با توجه به تغییرات قیمت، مطالعه موردی معدن مس سونگون، کنفرانس ملی حسابداری، مدیریت مالی و سرمایه گذاری، گرگان، دانشگاه جامع علمی کاربردی استان گلستان

زاهدی، آناهیتا؛ میثم یزدانی و فیروز علی نیا، ۱۳۹۵، مدل سازی عیار با استفاده از روش کریجینگ معمولی و شبیه سازی متوالی گوسی SGS، چهارمین کنفرانس بین المللی علوم و مهندسی، ایتالیا-رم، موسسه مدیران ایده پرداز پایتخت ویرا،

خواجeh زاده، اسدالله؛ مجتبی دهقانی جوزم و حامد حضرتقلی، ۱۳۹۵، تعیین محدوده نهایی و برنامه ریزی تولید با اعمال محدودیت های فیزیکی موجود در معدن مس میدوک، دهمین کنفرانس دانشجویی مهندس معدن، کاشان، دانشگاه کاشان،

طاهر نژاد، محمد مهدی؛ محمد عطایی و رضا خالو کاکایی، ۱۳۹۵، مدل سازی و بررسی تأثیر عدم قطعیت قیمت و عیار در برنامه ریزی تولید معادن، همایش بین المللی افق های نوین در علوم پایه و فنی و مهندسی، تهران، انجمن افق نوین علم و فناوری

منجری، مسعود و غلامحسن کاخا، ۱۳۹۴، برنامه ریزی تولید بلندمدت معادن روباز تحت عدم قطعیت عیار و قیمت ماده معدنی با استفاده از روش های ارزشیابی، کنفرانس بین المللی مهندسی معدن، فلزات و مواد، تهران، موسسه اطلاع رسانی نار کیش،

کر، حمید؛ فرهنگ سرشکی؛ رضا خالو کاکائی و محمد کنشلو، ۱۳۹۱، تعیین عدم قطعیت عیار و ریسک طراحی پیت معدن سنگ آهن دردوی، چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران، تهران، انجمن مهندسی معدن، دانشگاه تهران،

دهقانی جوزم، مجتبی؛ جواد غلام نژاد و فاطمه استبرق نیا بابکی، ۱۳۹۳، تعیین محدوده نهایی پیت و برنامه‌ریزی تولید بلندمدت در معدن مس میدوک، *کنفرانس ملی علوم معدنی*، ساری، سازمان نظام‌مهندسی معدن استان مازندران،

دهقانی، حسام و رحمان شیرکوند، ۱۳۹۳، ارزیابی پروژه‌های معدنی تحت تأثیر عدم قطعیت‌های اقتصادی با استفاده از سری‌های زمانی، *پنجمین کنفرانس مهندسی معدن*، تهران، انجمن مهندسی معدن ایران، سازمان نظام مهندسی معدن،

سعید، ساناز، ۱۳۸۳، تخمین ذخیره و تعیین ریسک همراه با تخمین فروش شبیه‌سازی زمین‌آماري متوالی گوسی، *کنفرانس مهندسی معدن ایران*، تهران، دانشگاه تربیت مدرس

میرزائی نصیرآباد، حسین و رضا خالوکاکائی، ۱۳۸۴، برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک، *دومین کنفرانس معادن روباز ایران*، کرمان، مجتمع مس سرچشمه

Armstrong M, Dowd PA (1994). *Geostatistical Simulations*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht

Whittle, (1999), A decade of open pit mine planning and optimisation the craft of turning algorithms into packages, in: APCOM'99 Computer Applications in the Minerals Industries 28th International Symposium, Colorado School of Mines, Golden.

M. David, (1988), *Handbook of Applied Advanced Geostatistical Ore Reserve Estimation*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

A. G. Journel, (1994), Modelling uncertainty: some conceptual thoughts, in: *Geostatistics for the Next Century*, R. Dimitrakopoulos (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

M. C. Godoy and R. Dimitrakopoulos, (2011), A risk analysis based framework for strategic mine planning and design Method and application, *Journal of Mining Science*, No. 2.

M. C. Godoy and R. Dimitrakopoulos, (2004), Managing risk and waste mining in long-term production scheduling, *SME Transactions*, 316.

H. Mustapha and R. Dimitrakopoulos, (2010), High-order stochastic simulations for complex non-Gaussian and non-linear geological patterns, *Mathematical Geosciences*, 42, No. 5.

C. Meagher, S. A. Abdel Sabour, and R. Dimitrakopoulos, (2010), Pushback design of open pit mines under geological and market uncertainties, *The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Spectrum Series No. 17*.

R. Dimitrakopoulos, H. Mustapha, and E. Gloaguen, (2010) High-order statistics of spatial random fields: Exploring spatial cumulants for modelling complex, non-Gaussian and non-linear phenomena, *Mathematical Geosciences*, 42, No. 1.

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.

R. Dimitrakopoulos, C. T. Farrelly, and M. Godoy, Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, 111 (2002).

S. A. Abdel Sabour and R. Dimitrakopoulos, (2011), Accounting for joint ore supply, metal price and exchange rate uncertainties in mine design, *Journal of Mining Science*, No. 2

M. Kent, R. Peattie, and V. Chamberlain, (2007), incorporating grade uncertainty in the decision to expand the main pit at the Navachab gold mine, Namibia, through the use of stochastic simulation, *The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Spectrum*

Dehghani H. Ataee Pour M., (2012). Determination of the effect of operating cost uncertainty on mining project evaluation, *Resources Policy* 37, 1, 10–11

Asghari O, Soltani F, Bakhshandeh Amnieh H (2009) The comparison between sequential gaussian simulation (SGS) of Choghart ore deposit and geostatistical estimation through ordinary kriging. *Aust J Basic Appl Sci* 3(1):330–341

Ramazan S, Dimitrakopoulos R (2007) Stochastic optimisation of long-term production scheduling for open pit mines with a new integer programming formulation. *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning, Spectrum Series 14*:359–365

Hartman, H. L. (1992). SME mining engineering handbook (vol. 2). S. G. Britton(Ed.). Denver: Society for mining, Metallurgy, and Exploration.

Monjezi M, MR Kashani, M Ataei.,(2013). A comparative study between sequential Gaussian simulation and Kriging method grade modeling in open-pit mining.; Arab J Geosci 6: 123_128

Abstract

Production planning is carried out in mines after the collection of information on geomechanics, hydrology and economics. The main purpose of production planning is to determine the timing of the application of ore extraction and waste in a given time period, in such a way as to maximize. In this thesis, considering the effect of geology uncertainty and economic uncertainty of production planning in the iron ore of the town, has been investigated. For this purpose, after the Kriging modeling, a guaranteed assurance has been made. Then, using a sequential Gaussian simulation method, 30 probabilities are realized with the ore for quantification of the uncertainty of the mineral material. On the other hand, using the concept of the real options approach, the binomial tree method has been used to consider the effect of the uncertainty price of mineral materials in production planning. Therefore, in this study, according to 30 simulated data, the uncertainty of the final grade has been studied. The obtained results show that the net present value in the Kriging method is less than the average of 30 simulated. Also, in the case of economic uncertainty, the net present value is calculated for the Kriging model and the results indicate that the final range is constant at prices higher than \$ 30 in the mine. Finally, for the effect of the uncertainty of the grade and the resulting price, the final limit divided by the four net values of the net present value in each phase was determined and it was shown that the changes in the net present value of the extracted fractions in the Kriging model with an average of approximately 30 simulated almost models have been constant. Considering uncertainty, price and grade are considered in the final range and planning. The current value in the Kriging model is simulated in the predicted prices derived from the binomial tree that is less than the average of the model.

Key words: uncertainty, Gaussian simulation, real options, production planning



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Mineral Exploitation

**Planning in Open Mines, Considering Geological and Financial
Uncertainty**

By: Safdar Soleymani

Supervisor(s):
Dr. Mohammad Ataei
Dr. Reza Khalokakaei

September ,2017