



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

رساله دکتری

برنامه‌ریزی تولید معادن روباز در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت

دانشجو: محمد مهدی طاهر نژاد

اساتید راهنما:

دکتر رضا خالوکاکائی

دکتر محمد عطائی

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

بهمن ماه ۱۳۹۶

شماره: ۹۴۹۹۲۰۱۵
تاریخ: ۹۴/۱۲/۶
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای محمد مهدی طاهر نژاد دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن به شماره دانشجویی ۹۱۳۴۵۹۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۱ در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۱۲ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: برنامه ریزی تولید معدن روباز در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت دفاع و با اخذ نمره ۱۸.۷۵ به درجه **بسیار خوب** نائل گردید.

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر رونا خالوگانی	استاد راهنما	استاد	
۲	دکتر محمد عطایی	استاد راهنما	استاد	
۳	دکتر فرهنگ سرشکی	داور داخلی	دانشیار	
۴	دکتر سید رحمان ترابی	داور خارجی	استاد	
۵	دکتر حسین میرزائی نصیرآباد	داور خارجی	استادیار	
۵	دکتر امین روشندل گاهو	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموزشی آقای محمد مهدی طاهر نژاد بعمل آید.

نام و نام خانوادگی دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به همسر مهربانم

به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود.

تشکر و قدردانی

در آغاز لازم می‌دانم از استاتید گرانقدرم جناب آقای پروفیسور رضا خالوکاکائی و جناب آقای پروفیسور محمد عطائی که با راهنمایی‌های ارزنده‌شان مرا در انجام این رساله همراهی نمودند تشکر و قدردانی به عمل آورم. همچنین نهایت سپاس و قدردانی را نسبت به تمام عزیزانی که در انجام این رساله با راهنمایی و مساعدت‌های با ارزش خود، مرا یاری نمودند از جمله جناب آقای دکتر امین‌اله موسوی، سرکار خانم دکتر ولی‌وند، جناب آقای مهندس طالش حسینی ابراز می‌نمایم.

محمد مهدی طاهرنژاد

بهمن ماه ۱۳۹۶

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این رساله نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

بهمن ماه ۱۳۹۶

چکیده

برنامه‌ریزی تولید یکی از مهمترین مراحل استخراج معدن است که نه تنها وسیله‌ای برای سرمایه‌گذاران برای فهم جریان نقدینگی مورد انتظار پروژه است، بلکه تصمیمات استراتژیک حاصل از حل مساله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز در عمر پروژه نیز نتیجه‌بخش خواهد بود. روش‌های قطعی برنامه‌ریزی تولید معدن، پارامترهای ورودی که مهمترین آن‌ها عیار و قیمت هستند را قطعی در نظر می‌گیرند. این در حالی است که عدم توجه به عدم قطعیت موجود، نتایج نامطلوبی را در دستیابی به برنامه‌ای صحیح و بهینه در پی خواهد داشت. در این رساله رویکرد جدیدی برای برنامه‌ریزی تولید معدن در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت، بر اساس تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی که یکی از روش‌های توانمند در توصیف عدم قطعیت است ارائه شده است. پیش‌بینی قیمت و تخمین‌های عیاری در پروژه‌های معدنی همواره با عدم قطعیت همراه بوده و خواهد بود. برای دقیق‌تر شدن پیش‌بینی قیمت و تخمین‌های عیاری حجم زیادی از اطلاعات مورد نیاز است. تامین این حجم اطلاعات نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی بوده و در اکثر پروژه‌های معدنی امکان آن وجود ندارد. تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی بر این موضوع تاکید دارد که تصمیمات تحت شرایط سخت عدم قطعیت، نباید به اطلاعات اضافی نسبت به اطلاعات قابل دسترس برای تصمیم‌گیرنده نیاز داشته باشد. در واقع این روش به برنامه‌ریزان کمک می‌کند که بتوانند با اطلاعات کم تصمیم‌های مناسبی بگیرند. در رویکرد ارائه شده در این رساله، بر اساس تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی برای هر یک از پارامترهای غیر قطعی عیار و قیمت، یک شعاع عدم قطعیت تعریف شده و با هدف تامین حداقل الزامات فنی و اقتصادی پروژه، حداکثر شعاع عدم قطعیت‌های مذکور شناسایی و بر اساس آن برنامه‌ریزی تولید انجام می‌شود. با استفاده از اطلاعات یک معدن روباز سنگ آهن، نتایج استفاده از رویکرد ارائه شده مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفت. برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت، روش دو جمله‌ای و برای مدل‌سازی عدم قطعیت عیار، روش شبیه‌سازی گوسی متوالی استفاده شدند. برنامه‌ریزی انجام شده با رویکرد پیشنهادی در برابر عدم قطعیت عیار و قیمت مصون ماند. اختلاف بین مقدار NPV واقعی و NPV به

دست آمده از رویکرد پیشنهادی حدود ۸ درصد و اختلاف بین NPV واقعی و NPV به دست آمده از روش قطعی حدود ۳۱ درصد به دست آمد. این موضوع بیانگر این است که در شرایط نامساعد اقتصادی و نوسان قیمت‌ها، رویکرد پیشنهادی نتایج نزدیک‌تر به واقعیت را تولید خواهد کرد و برنامه‌ریزی انجام شده در شرایط عدم قطعیت، از اطمینان بیشتری برخوردار خواهد بود. نتایج نشان می‌دهند رویکرد ارائه شده می‌تواند نتایج قابل قبول با درجه اطمینان و استواری بالاتری را نسبت به روش‌های قطعی ایجاد کند.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تولید معدن روباز، عدم قطعیت قیمت، عدم قطعیت عیار، تئوری

تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی

مقالات مستخرج از رساله

- **Analyzing the effect of ore grade uncertainty in open pit mine planning; an implementation of SGS in iron ore mines**, International Journal of Mining and Geo-Engineering, Accepted 01 Dec 2017.
- **A practical approach for open pit mine planning under severe uncertainties using information gap decision theory**, Journal of mining and environment, Published 19 Dec 2017.
- **A risk-averse production phase design for open pit mines under ore grade uncertainty**. Submitted.
- بررسی نقش عدم قطعیت مدل زمین‌شناسی در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز، سی و پنجمین همایش ملی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، اسفند ۱۳۹۵.
- مدل‌سازی و بررسی تاثیر عدم قطعیت قیمت و عیار در برنامه‌ریزی تولید معادن، همایش بین‌المللی افق‌های نوین در علوم پایه و فنی و مهندسی، اسفند ۱۳۹۵.
- تعیین فازهای استخراجی معادن روباز در شرایط عدم قطعیت قیمت با استفاده از تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی، مجله علمی پژوهشی مهندسی معدن، (تحت داوری).

فهرست مطالب

۱- کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۱-۲- برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز	۱
۱-۳- طرح موضوع و بیان مسأله	۲
۱-۴- اهمیت و ضرورت انجام رساله	۳
۱-۵- اهداف انجام رساله	۵
۱-۶- متغیرها، محدودیت‌ها و فرضیات تحقیق	۶
۱-۷- سازمان‌دهی رساله	۷
۲- مبانی نظری و سابقه علمی موضوع	۹
۲-۱- مقدمه	۹
۲-۲- فرآیند برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز	۹
۲-۳- تخمین عیار بلوک‌ها به روش قطعی	۱۳
۲-۴- سابقه برنامه‌ریزی تولید با فرض قطعیت پارامترها و ضعف روش‌های قطعی	۱۶
۲-۵- سابقه برنامه‌ریزی تولید معدن با توجه به عدم قطعیت	۲۶
۲-۵-۱- برنامه‌ریزی تولید با عدم قطعیت عیار	۲۶
۲-۵-۲- سابقه برنامه‌ریزی تولید با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت	۳۰
۲-۶- جمع‌بندی مطالعات پیشین و بررسی نقاط ضعف و قوت آن‌ها	۶۶
۳- برنامه‌ریزی تولید در شرایط عدم قطعیت	۶۹
۳-۱- مقدمه	۶۹
۳-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت و عیار	۶۹
۳-۲-۱- مدل‌سازی عدم قطعیت عیار	۷۰
۳-۲-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت	۷۳
۳-۳- اصول و مبانی تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی	۷۵
۳-۳-۱- مدل سیستم در روش <i>IGDT</i>	۷۸
۳-۳-۲- مدل عدم قطعیت	۷۹
۳-۳-۳- استراتژی ریسک‌جو در تئوری شکاف اطلاعاتی	۸۰
۳-۳-۴- استراتژی ریسک‌گریز و تابع مقاومت	۸۱

۸۳	برنامه‌ریزی تولید معدن بر اساس IGDT.....	۴-۳
۸۳	مدل عدم قطعیت قیمت.....	۳-۴-۱
۸۴	مدل عدم قطعیت عیار.....	۳-۴-۲
۸۴	محاسبه ارزش خالص فعلی مبنا (NPV0).....	۳-۴-۳
۸۶	تعیین ضریب انحراف δ	۳-۴-۴
۸۷	تابع مقاومت در برنامه‌ریزی تولید معدن.....	۳-۴-۵
۸۹	حل مدل ارائه شده و تعیین شعاع عدم قطعیت پارامترها.....	۳-۴-۶
۹۲	تعیین مقادیر قیمت و عیار بر اساس مدل پیشنهادی.....	۳-۴-۷
۹۲	ارزش اقتصادی بلوک‌ها در شرایط عدم قطعیت.....	۳-۴-۸
۹۳	تعیین فازها و زمان‌بندی استخراج بلوک‌ها.....	۳-۴-۹
۹۴	جمع‌بندی فصل.....	۳-۵
۹۵	تجزیه و تحلیل و بیان نتایج	۴-۴
۹۵	مقدمه.....	۴-۱
۹۵	معرفی معدن مورد مطالعه.....	۴-۲
۹۷	جمع‌آوری، بررسی آماری و تهیه بانک اطلاعاتی داده‌ها.....	۴-۳
۱۰۵	تحلیل ساختار فضایی داده‌ها.....	۴-۴
۱۰۸	اعتبار سنجی مدل واریوگرام و تعیین پارامترهای بهینه تخمین.....	۴-۵
۱۱۱	مدل‌سازی سه بعدی فضای تخمین.....	۴-۶
۱۱۳	تخمین عیار بلوک‌ها.....	۴-۷
۱۱۵	تعیین وزن مخصوص بلوک‌ها.....	۴-۸
۱۱۵	تعیین NPV0.....	۴-۹
۱۱۷	تعیین NPVc.....	۴-۱۰
۱۲۰	ایجاد تحقق‌های متعدد عیاری.....	۴-۱۱
۱۲۱	ارزیابی مدل عیاری به دست آمده از روش شبیه‌سازی.....	۴-۱۱-۱
۱۲۴	مقایسه مدل‌های عیاری حاصل از کریجینگ و شبیه‌سازی.....	۴-۱۱-۲
۱۲۷	تعیین قیمت با استفاده از درخت دو جمله‌ای.....	۴-۱۲
۱۳۰	تعیین حداکثر شعاع عدم قطعیت عیار و قیمت.....	۴-۱۳
۱۳۳	برنامه‌ریزی تولید ریسک‌گریز.....	۴-۱۴
۱۳۷	ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج.....	۴-۱۵

- ۱۳۸.....۱-۱۵-۴ - محاسبه NPV با داده‌های واقعی
- ۱۳۸.....۲-۱۵-۴ - مقایسه NPV در سناریوهای مختلف
- ۱۳۹.....۱۶-۴ - جمع‌بندی فصل

- ۱۴۱..... ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات
- ۱۴۱..... ۱-۵ - مقدمه
- ۱۴۲..... ۲-۵ - نتیجه‌گیری
- ۱۴۴..... ۳-۵ - پیشنهادات

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- ساختار رساله..... ۸
- شکل ۱-۲- نمای شماتیک از برنامه‌ریزی تولید یک معدن روباز با استفاده از پوش‌بک‌ها..... ۱۳
- شکل ۲-۲- شرایط متفاوت برای عدم قطعیت و ریسک..... ۲۰
- شکل ۳-۲- سطح اعتبار تصمیم‌گیری به عنوان تابعی از درجه عدم قطعیت موجود..... ۲۰
- شکل ۴-۲- نمودار گسترش عدم قطعیت..... ۲۲
- شکل ۵-۲- نوسانات قیمت مس طی ۱۵ سال اخیر..... ۲۵
- شکل ۶-۲- تغییرات قیمت طلا در طی ده سال اخیر..... ۲۵
- شکل ۷-۲- تغییرات قیمت سنگ آهن در طی ۱۵ سال اخیر..... ۲۵
- شکل ۸-۲- نرخ تغییرات قیمت سنگ آهن در ۲۰ سال گذشته..... ۲۶
- شکل ۹-۲- نمای تک مدل بلوکی و دسته‌ای از مدل‌های احتمالی کانسار..... ۲۸
- شکل ۱۰-۲- محدوده بزرگتر پیت در روش تصادفی در مقایسه با روش قطعی..... ۲۹
- شکل ۱۱-۲- تغییرات در طراحی پوش‌بک‌ها در تحقق‌های مختلف عیار..... ۲۹
- شکل ۱۲-۲- نمودار کلی رفتار NPV در محدوده‌های مختلف..... ۴۰
- شکل ۱۳-۲- نمای شماتیک ساختار یک گراف در یک تحقق..... ۵۱
- شکل ۱۴-۲- نمای شماتیک ساختار گراف در تحقق چندگانه..... ۵۱
- شکل ۱۵-۲- ساختار گراف در تحقق‌های چندگانه..... ۵۳
- شکل ۱۶-۲- ساختار شماتیک گراف ادغام شده در تحقق‌های چندگانه..... ۵۴
- شکل ۱۷-۲- ساختار گراف با ارزش تنزیل یافته بلوک‌ها..... ۵۵
- شکل ۱۸-۲- نمای شماتیک درخت سناریوی قیمت چند مرحله‌ای..... ۶۰
- شکل ۱۹-۲- مرحله یک: ترسیم هیستوگرام قیمت و توزیع احتمال آن..... ۶۱
- شکل ۲۰-۲- مرحله دو: نمونه‌گیری مکعبی لاتین از توزیع تجمعی احتمال..... ۶۱
- شکل ۲۱-۲- مرحله سوم: تولید مدل‌های بلوکی و برنامه‌ریزی تولید مربوطه..... ۶۱

- شکل ۲-۲۲- مرحله چهارم: تعیین برنامه استخراج نهایی ۶۲
- شکل ۲-۲۳- مرحله پنجم: ترسیم توزیع ارزش خالص فعلی ۶۲
- شکل ۳-۱- مراحل برنامه‌ریزی تولید با رویکرد پیشنهادی رساله ۷۰
- شکل ۳-۲- نمای شماتیک درخت دوجمله‌ای در سه دوره زمانی ۷۴
- شکل ۳-۳- نمایش شعاع عدم قطعیت برای پارامتر غیر قطعی ۷۶
- شکل ۳-۴- نمای تصویری از مدل عدم قطعیت در روش IGDT ۷۹
- شکل ۳-۵- مراحل حل مساله چند هدفه با روش ϵ -constraint ۹۱
- شکل ۴-۱- مراحل انجام مطالعه موردی با رویکرد پیشنهادی ۹۶
- شکل ۴-۲- موقعیت فضایی نمونه‌های جمع‌آوری شده از گمانه‌ها ۹۸
- شکل ۴-۳- موقعیت مکانی و پراکندگی گمانه‌های اکتشافی ۹۹
- شکل ۴-۴- نمودار توزیع فراوانی و نمودار احتمال عیار داده‌های حفاری ۱۰۰
- شکل ۴-۵- بررسی وجود مقادیر خارج از ردیف با استفاده از روش ترسیمی ۱۰۲
- شکل ۴-۶- نمودار پراکندگی عیار آهن به عنوان تابعی از راستای x ۱۰۳
- شکل ۴-۷- نمودار پراکندگی عیار آهن به عنوان تابعی از راستای y ۱۰۳
- شکل ۴-۸- نمودار پراکندگی عیار آهن به عنوان تابعی از راستای z ۱۰۴
- شکل ۴-۹- نمودار توزیع فراوانی داده‌های نرمال شده ۱۰۴
- شکل ۴-۱۰- نمودار واریوگرام‌های جهتی و غیر جهتی و مدل‌های برازش شده بر آن‌ها ۱۰۷
- شکل ۴-۱۱- ارتباط بین مقادیر واقعی و تخمینی در آزمون اعتبارسنجی متقابل ۱۰۹
- شکل ۴-۱۲- نمودار توزیع فراوانی اختلاف مقادیر واقعی و تخمینی در اعتبارسنجی متقابل ۱۰۹
- شکل ۴-۱۳- نمای سه بعدی از مدل بلوکی کانسار در معدن مورد مطالعه ۱۱۰
- شکل ۴-۱۴- نمای سه بعدی مقاطع ترسیمی برای مدل‌سازی هندسی فضای کانسار ۱۱۲
- شکل ۴-۱۵- پلان افقی مدل هندسی کانسار ۱۱۳
- شکل ۴-۱۶- نمودار توزیع فراوانی عیار آهن مدل بلوکی حاصل از تخمین کریجینگ ۱۱۴
- شکل ۴-۱۷- یک نمای سه بعدی از مدل بلوکی عیاری با استفاده از روش کریجینگ ۱۱۴

- شکل ۴-۱۸- نمودار رابطه وزن مخصوص نسبت به عیار..... ۱۱۵
- شکل ۴-۱۹- تغییرات تابع هدف نسبت به مقادیر درجه تحمل کاهش..... ۱۱۸
- شکل ۴-۲۰- نمودار تغییرات هزینه مقاوم سازی بر حسب تغییرات ضریب انحراف..... ۱۲۰
- شکل ۴-۲۱- نمودار توزیع فراوانی عیار داده‌های اولیه و چند تحقق تولید شده..... ۱۲۲
- شکل ۴-۲۲- مقایسه پارامترهای آماری نمونه‌های اولیه و مدل‌های شبیه‌سازی شده..... ۱۲۳
- شکل ۴-۲۳- مقایسه واریوگرام تجربی حاصل از نمونه‌های اولیه و تحقق‌های عیاری منتخب..... ۱۲۳
- شکل ۴-۲۴- چهار تحقق از مدل‌های هم احتمال عیاری به دست آمده..... ۱۲۴
- شکل ۴-۲۵- نمودار Q-Q عیار مدل تخمینی و چند تحقق شبیه‌سازی منتخب..... ۱۲۵
- شکل ۴-۲۶- مقایسه نمودار عیار-تناژ حاصل از کریجینگ و تحقق‌های حاصل از شبیه‌سازی..... ۱۲۷
- شکل ۴-۲۷- نمودار درخت دو جمله‌ای قیمت سنگ آهن در ۱۰ دوره زمانی..... ۱۲۸
- شکل ۴-۲۸- تعیین شعاع عدم قطعیت قیمت (α) در حالت $\delta=30\%$ و $\beta=13\%$ ۱۳۲
- شکل ۴-۲۹- تعیین شعاع عدم قطعیت قیمت (α) در حالت $\delta=30\%$ و $\beta=16\%$ ۱۳۲
- شکل ۴-۳۰- تعیین شعاع عدم قطعیت قیمت (α) در حالت $\delta=30\%$ و $\beta=19\%$ ۱۳۳
- شکل ۴-۳۱- تعیین شعاع عدم قطعیت قیمت (α) در حالت $\delta=30\%$ و $\beta=22\%$ ۱۳۳
- شکل ۴-۳۲- یک مقطع از محدوده نهایی در راستای شمالی- جنوبی..... ۱۳۴
- شکل ۴-۳۳- نمای سه بعدی محدوده نهایی معدن..... ۱۳۴
- شکل ۴-۳۴- یک مقطع عمودی از پوشش‌بک‌های استخراجی..... ۱۳۵
- شکل ۴-۳۵- هزینه استخراج در دوره‌های زمانی مختلف..... ۱۳۷
- شکل ۴-۳۶- نسبت باطله‌برداری در دوره‌های زمانی مختلف..... ۱۳۷

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- مهمترین کارهای انجام شده در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز..... ۶۴
- جدول ۱-۴- پارامترهای آماری مربوط به عیار آهن داده‌های آهن‌دار اولیه..... ۱۰۰
- جدول ۲-۴- پارامترهای آماری مربوط به عیار آهن داده‌های نرمال شده..... ۱۰۵
- جدول ۳-۴- پارامترهای به دست آمده از مدل‌های واریوگرام برازش شده..... ۱۰۸
- جدول ۴-۴- انتخاب پارامترهای بهینه تخمین..... ۱۱۱
- جدول ۵-۴- پارامترهای آماری مربوط به عیار آهن داده‌های تخمین زده شده..... ۱۱۴
- جدول ۶-۴- پارامترهای فنی و اقتصادی استفاده شده در تهیه مدل بلوکی اقتصادی کانسار..... ۱۱۶
- جدول ۷-۴- نتایج حاصل از تعیین محدوده نهایی با فرض قطعیت پارامترها..... ۱۱۷
- جدول ۸-۴- تغییرات مقادیر NPV نسبت به مقادیر درجه تحمل کاهش (δ)..... ۱۱۸
- جدول ۹-۴- قیمت سنگ آهن طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲..... ۱۲۹
- جدول ۱۰-۴- قیمت در هر دوره با استفاده از روش درخت دوجمله‌ای..... ۱۲۹
- جدول ۱۱-۴- مقادیر آماری عیار حاصل از روش شبیه‌سازی زمین‌آماری برای تعدادی از بلوک‌ها..... ۱۳۱
- جدول ۱۲-۴- پارامترهای مورد استفاده در برنامه‌ریزی پوش‌بک‌های استخراجی..... ۱۳۵
- جدول ۱۳-۴- مشخصات فنی و اقتصادی پوش‌بک‌های استخراجی..... ۱۳۵
- جدول ۱۴-۴- پارامترهای مورد استفاده در برنامه‌ریزی تولید..... ۱۳۶
- جدول ۱۵-۴- بخشی از برنامه زمان‌بندی استخراج بلوک‌ها..... ۱۳۶
- جدول ۱۶-۴- قیمت سنگ آهن طی سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷..... ۱۳۸
- جدول ۱۷-۴- مقایسه سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی..... ۱۳۹

فهرست اختصارات

BEV	Block Economic Value
DRI	Downside Risk Indicator
GBM	Geometric Brownian Motion
IGDT	Information Gap Decision Theory
IRR	Internal Rate of Return
MARR	Minimum Attractive Rate of Return
MRP	Mean Reverting Process
NPV	Net Present Value
UPI	Upside Potential Indicator
VSI	Value Statistics Indicator

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

در این فصل به بیان مفاهیم و کلیاتی در خصوص فرآیند برنامه‌ریزی تولید معادن روباز پرداخته خواهد شد. در آغاز به مرور اجمالی مساله مورد بحث رساله پرداخته پس از آن به طرح موضوع، هدف از انجام رساله و ضرورت انجام آن پرداخته و در نهایت ساختار رساله شرح داده می‌شود.

۱-۲- برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز

مساله برنامه‌ریزی تولید معادن روباز را می‌توان به صورت تعیین ترتیب استخراج بلوک‌ها تعریف کرد، به طوری که سود تنزیل یافته کل معدن با توجه به محدودیت‌های موجود، بیشینه شود. به عبارت دیگر ارزش خالص فعلی جریان‌های نقدینگی با توجه به محدودیت‌های تحمیل شده بر سیستم معدن‌کاری بیشینه باشد. از آنجا که استخراج مواد موجود در محدوده نهایی در واحد زمان امکان‌پذیر نیست، لذا با برنامه‌ریزی برای استخراج و فازبندی بلوک‌های موجود در محدوده نهایی، طوری عمل می‌شود که با توجه به محدودیت‌های موجود و رعایت آن‌ها بیشترین ارزش خالص فعلی عاید معدن شود. برنامه‌ریزی تولید معدن یک پروسه بهینه‌سازی است که ترتیب استخراج بلوک‌های ذخیره را با وجود اهداف قطعی از جمله بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی را مشخص می‌کند. بدین ترتیب به طور خلاصه برنامه‌ریزی تولید معدن روباز شامل تصمیم‌گیری اینکه کدام بلوک در چه زمانی باید استخراج شود و به کجا ارسال شود است.

۱-۳- طرح موضوع و بیان مسأله

مسئله برنامه‌ریزی تولید معدن جزء پیچیده‌ترین مسائل مهندسی بوده که حل و به دست آوردن جواب بهینه آن به سادگی امکان‌پذیر نیست (Khan & Niemann-Delius, 2014). در روش‌های قطعی، عیار هر بلوک قطعی در نظر گرفته شده و محاسبات و برنامه‌ریزی بر مبنای آن انجام می‌شود. این در حالی است که تغییرپذیری عیاری و عدم قطعیت در مورد توزیع فضایی ماده معدنی و کیفیت باعث انحراف از اهداف تولید و در اکثر موارد موجب ناکارآمدی برنامه‌ریزی‌های انجام شده می‌شود (Benndorf & Dimitrakopoulos, 2013). همچنین در روش‌های قطعی حل مسئله برنامه‌ریزی تولید بدون توجه به عدم قطعیت قیمت ماده معدنی انجام می‌شود. در واقع این روش‌ها قیمت مشخصی را برای ماده معدنی در بلندمدت در نظر می‌گیرند. این در حالی است که عدم قطعیت قیمت کاملاً بدیهی بوده و برنامه‌ریزی معدن به تغییرات قیمت بسیار وابسته است (Espinoza, et al., 2013).

پروژه‌های معدنی، به عنوان پروژه‌هایی با ریسک بالا و نامطمئن شناخته می‌شوند و دلیل آن اساساً طبیعت بی‌ثبات قیمت و بی‌ثباتی ذاتی شرایط زمین‌شناسی است. از آنجایی که ریسک در پروژه‌ی معدنی نمی‌تواند نادیده انگاشته شود، بهترین کاری که می‌توان انجام داد به حداقل رساندن آن است. عدم قطعیت در پروژه‌های معدنی ناشی از طبیعت متغیرها و هزینه‌ی به دست آوردن اطلاعات درباره‌ی آنها است. این اطلاعات می‌تواند از منابع مختلف از جمله قیمت‌های بازار و توزیع عیار و شرایط زمین به دست آید. اگر پروژه‌های معدنی به شیوه‌ای توسعه یابند که انعطاف‌پذیری را برای روبارویی با عدم قطعیت‌ها افزایش دهند، صنعت معدن کاری جذاب‌تر خواهد شد.

صنعت مواد معدنی در دهه‌ی گذشته تقاضای بی‌سابقه‌ای را برای محصولات خود تجربه کرد که موجب افت و خیز در فعالیت‌های توسعه‌ای شد. اگرچه پیش‌بینی نشده بود که بحران اقتصاد جهانی موجب کاهش سریع در فعالیت‌های توسعه‌ای خواهد شد. اگر این اطلاعات پیش از وقوع رخدادها موجود بودند، مسیر انتخاب شده به طور کلی متفاوت می‌بود. لذا توانایی طراحی عملیات با توان روبرو شدن با تغییرات سریع می‌تواند موجب بازگشت بهتر سرمایه به سرمایه‌گذاران شود (Groeneveld & Topal,

(2011). با انجام تحلیل حساسیت مشخص شده است که قیمت ماده معدنی، حساس‌ترین عاملی است که دارای اثری مثبت بر روی ارزش اقتصادی بلوک و برنامه‌ریزی تولید بوده و عیار نیز دومین عامل مهم است (Akbari, et al., 2008). علاوه بر این دلیل تمرکز بر قیمت در بین عوامل اقتصادی این است که قیمت هم عامل اصلی جریان‌های نقدینگی بوده و هم معمولاً در مقایسه با سایر عوامل اقتصادی که جریان نقدینگی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، دارای درجه بالاتری از عدم قطعیت است. همچنین قیمت یک عدم قطعیت بیرونی است و برای یک شرکت معدنی اجتناب از آن و یا تغییر آن دشوار خواهد بود (Evatt, et al., 2012). با توجه به موارد ذکر شده در این رساله مساله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز با در نظر گرفتن همزمان عدم قطعیت عیار و عدم قطعیت قیمت مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در واقع لحاظ کردن عدم قطعیت‌های مذکور در برنامه‌ریزی تولید و انجام برنامه‌ریزی تولید به گونه‌ای که توان رویارویی با درجه بالایی از عدم قطعیت در پارامترهای مذکور را داشته باشد، در این رساله مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۴ - اهمیت و ضرورت انجام رساله

تعیین فازهای استخراجی و زمان‌بندی استخراج در توجیه اقتصادی پروژه‌های معدنی به عنوان یک عامل کلیدی نقش مهمی را ایفا می‌کند. برنامه‌ریزی تولید توزیع جریان نقدینگی را معین می‌کند و در نتیجه به طور مستقیم در ارزش خالص فعلی و توجیه اقتصادی پروژه تاثیر می‌گذارد. برنامه‌ریزی تولید وسیله‌ای برای سرمایه‌گذاران برای فهم جریان نقدینگی مورد انتظار پروژه است و تصمیم‌های استراتژیک حاصل از حل مساله برنامه‌ریزی تولید در عمر پروژه معدنی تاثیرگذار است (Lamghari, et al., 2013; Espinoza, et al., 2013). معدنکاری فعالیتی است که در مقایسه با سایر صنایع، سرمایه‌گذاری متفاوتی را نیاز دارد. سرمایه‌گذاری در پروژه‌های معدنی در مقایسه با سرمایه‌گذاری در دیگر صنایع با توجه به میزان بسیار بالای حجم سرمایه‌گذاری و دوره‌های آماده‌سازی طولانی مدت، منحصر به فرد است. بازگشت سرمایه در پروژه‌های معدنی با ریسک بالایی همراه است که دلیل آن

وجود عدم قطعیت در عیار و تناژ ماده معدنی در کانسار و همچنین عدم قطعیت قیمت ماده معدنی است که برنامه‌ریزی تولید انجام شده را با عدم قطعیت مواجه می‌کند (Costalima & Suslick, 2006). فرض اساسی در برنامه‌ریزی ریاضی این است که مقدار داده‌های ورودی دقیقاً معلوم است. بنابراین در صورتیکه پارامترهای مساله بهینه‌سازی مقادیری غیر از مقدار اسمی بگیرند، ممکن است برخی محدودیت‌ها رعایت نشوند و جواب بهینه‌ای که با استفاده از داده‌های اسمی به دست آمده دیگر بهینه و یا حتی شدنی هم نباشد. با توجه به این‌که عدم قطعیت مشخصه‌ای ذاتی از هر طرح است لذا باید در طی فرآیند برنامه‌ریزی به عنوان یکی از معیارهای مهم مورد توجه قرار گیرد. به علاوه اگر به زمان نیز به عنوان یک عامل مهم نگریسته شود، برنامه‌ریزی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها باعث از دست رفتن زمان نیز خواهد شد. امروزه بررسی و تحلیل عدم قطعیت‌ها در هر پروژه‌ای امری ضروری محسوب می‌شود، به طوری که بدون در نظرگیری و تحلیل این عدم قطعیت‌ها، وقوع حالات نامطلوبی که رخداد آن‌ها اهداف پروژه را به چالش می‌کشاند، دور از انتظار نیست. مهندسی معدن همواره درگیر پارامترهای غیرقطعی وابسته به زمین و اقتصاد بوده، هست و خواهد بود. این پارامترها با توجه به ذات ناشناخته و غیر قابل پیش‌بینی خصوصیات زمین و اقتصاد همواره جزء مهمترین دغدغه‌ها در رشته مهندسی معدن است. تهی شدن ذخایر سهل الوصول، افزایش روزافزون هزینه‌های اکتشاف، تغییرات و نوسانات شدید قیمت‌ها همه دست به دست هم داده تا نقش عدم قطعیت‌ها در استخراج ذخایر معدنی روز به روز پررنگ‌تر شود و لذا برنامه‌ریزی‌هایی که برای استخراج معادن بدون توجه کافی به وجود این عدم قطعیت‌ها صورت بگیرد با ناکامی مواجه شود. شوک‌های بزرگ در عرضه و تقاضا، حساسیت زیاد قیمت در تغییر عرضه و تقاضا، افزایش استفاده از مواد به عنوان کالای سرمایه‌ای و عدم قطعیت جهانی به عنوان مثال رشد اقتصادی چین احتمال تکرار نوسانات قیمت را بالا برده است. با توجه به عدم قطعیت جهانی که به نظر می‌رسد وجود داشته باشد، قیمت‌ها همچنان به هرگونه اطلاعات جدید در خصوص عرضه و تقاضا حساس خواهند بود. از آنجا که روش‌های برنامه‌ریزی تولید قطعی، عدم قطعیت‌های وابسته به کانسار و ریسک‌های ناشی از آن را مدنظر قرار نمی‌دهند، در اکثر مواقع، رسیدن به نتایجی

حتی نزدیک به پیش‌بینی‌های صورت گرفته، دور از دسترس است. همچنین برنامه‌ریزان توان مواجه شدن با عدم قطعیت قیمت ماده معدنی با نوسانات شدید قیمت‌ها که در سال‌های اخیر مشاهده شده را ندارند. به دلیل وجود عدم قطعیت‌های مختلف، از جمله قیمت و همچنین میزان عیار منابع معدنی، دارندگان این واحدها برای ادامه حیات در بازار با چالش‌های فراوانی روبرو خواهند بود. بنابراین، استراتژی این واحدها باید به گونه‌ای باشد که به منظور بهینه کردن درآمد و از بین بردن تغییرات نامطلوب سود به علت وجود نوسانات اساسی بتوانند در برابر این منابع عدم قطعیت، مقاومت داشته باشند. با توجه به موارد ذکر شده بررسی و تحقیقات بیشتر در زمینه برنامه‌ریزی تولید معادن در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت ضروری به نظر می‌رسد که در این رساله به آن پرداخته شده است.

۱-۵- اهداف انجام رساله

گسترش مرزهای دانش در حیطه برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز در علم مهندسی معدن هدف اصلی این رساله است. دستیابی به این هدف با ارائه راهکاری برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز که به طور همزمان عدم قطعیت عیار و عدم قطعیت قیمت ماده معدنی را در برنامه‌ریزی تولید لحاظ کند انجام خواهد شد. در این رساله روش‌های برنامه‌ریزی تولید معادن روباز که تاکنون ارائه شده است مرور شده تا نقاط ضعف و کاستی آن‌ها در برخورد با عدم قطعیت عیار و قیمت که از مهمترین و تاثیرگذارترین عدم قطعیت‌ها در برنامه‌ریزی تولید می‌باشند شناسایی شده و راهکاری مناسب برای این موضوع ارائه شده است. برای دستیابی به این هدف بر روی موارد زیر تحقیق شده و اطلاعات مفیدی نیز بدست آمده است:

- مرور روش‌هایی که تاکنون برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز ارائه شده‌اند.
- شناسایی محدودیت‌هایی که در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز وجود دارد.
- بررسی روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت عیار
- بررسی روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت

- بررسی امکان استفاده از روش‌های جدید در راستای تکمیل و پوشش نقاط ضعف روش‌هایی که تاکنون ارائه شده‌اند.
- انتخاب روش مناسب برای لحاظ کردن عدم قطعیت عیار
- انتخاب روش مناسب برای لحاظ کردن عدم قطعیت قیمت
- ارائه رویکردی برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با در نظر گرفتن همزمان عدم قطعیت عیار و قیمت ماده معدنی.

لذا به طور خلاصه هدف انجام این رساله را اینگونه می‌توان بیان کرد: ارائه رویکردی کاربردی برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز که به طور همزمان عدم قطعیت عیار و قیمت ماده معدنی را در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز لحاظ کند به طوری که محدودیت‌های عملیاتی پوشش داده شوند. شایان ذکر است عملکرد رویکرد ارائه شده و اعتبارسنجی آن با انجام مطالعه موردی در یک معدن سنگ آهن روباز انجام خواهد شد.

۱-۶- متغیرها، محدودیت‌ها و فرضیات تحقیق

در این تحقیق دو پارامتر اصلی مورد مطالعه عیار ماده معدنی و قیمت آن است. با توجه به وجود عدم قطعیت در هر دو پارامتر مذکور، هیچ‌گاه امکان شناخت و پیش‌بینی کاملاً دقیق آن‌ها وجود نخواهد داشت. لازم به ذکر است راهکار ارائه شده در این رساله بر خلاف روش‌های گذشته می‌تواند عدم قطعیت این دو پارامتر را در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز به طور همزمان لحاظ کند. بدیهی است با توجه به ذات عدم قطعیت، ارائه یک برنامه بهینه برای استخراج معدن در شرایط عدم قطعیت قابل تضمین نیست، لیکن مشکلاتی که به دلیل نادیده گرفتن عدم قطعیت‌های مذکور در روش‌های قطعی وجود داشته در رویکرد پیشنهادی این رساله کاهش خواهد یافت. در نظر گرفتن عدم قطعیت می‌تواند به توزیع مناسب تولید و جریان نقدینگی، افزایش NPV، کاهش ریسک، کاهش زمان برگشت سرمایه، یافتن پتانسیل‌های بالای ذخیره، افزایش انعطاف‌پذیری مدیریت و اخذ تصمیم‌های مناسب منجر شود.

۱-۷ - سازمان دهی رساله

این رساله مشتمل بر پنج فصل است. در این فصول مواردی به شرح ذیل مورد بررسی قرار می‌گیرند:
فصل اول - کلیات: در این فصل در ابتدا فرآیند برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اهمیت و ضرورت انجام تحقیق حاضر و اهداف انجام آن نیز در این فصل بررسی شده است.

فصل دوم - مبانی نظری و سابقه علمی موضوع: در این فصل تعاریف و مفاهیم مربوط به برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز شرح داده شده و همچنین سابقه برنامه‌ریزی تولید معادن روباز و تحقیقاتی که در زمینه عدم قطعیت عیار و قیمت در برنامه‌ریزی تولید معادن انجام شده با دید انتقادی مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل سوم - روش تحقیق: در این فصل با توجه به نتایج بررسی سابقه موضوع، رویکرد جدیدی برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت ارائه شده است.
فصل چهارم - تجزیه و تحلیل و بیان نتایج تحقیق: این فصل به بررسی و اجرای رویکرد ارائه شده در یک معدن روباز و تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از کاربرد رویکرد اختصاص یافته است. اعتبارسنجی رویکرد پیشنهادی نیز در این فصل ارائه شده است.

فصل پنجم - نتیجه‌گیری و پیشنهادات: در فصل آخر رساله همان طور که از عنوان این فصل برمی‌آید نتایج قابل توجه حاصل از این تحقیق و پیشنهاداتی که در طی روند پروژه مورد توجه بوده‌اند، ارائه شده است.

شکل ۱-۱ به طور خلاصه ساختار رساله را نشان می‌دهد.

فصل اول - کلیات: معرفی برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز و اهمیت آن در معدن‌کاری

تعاریف، اهداف و ضرورت انجام تحقیق



فصل دوم - سابقه تحقیق:

بررسی سابقه تحقیقات انجام شده در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز و نقد آن‌ها



فصل سوم - روش انجام تحقیق:

ارائه رویکرد پیشنهادی برای برنامه‌ریزی تولید در شرایط عدم قطعیت



فصل چهارم - تجزیه و تحلیل و بیان نتایج تحقیق:

اجرای رویکرد پیشنهادی در یک معدن واقعی و تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از تحقیق



فصل پنجم - نتیجه‌گیری و پیشنهادات:

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

شکل ۱-۱ - ساختار رساله

فصل دوم

مبانی نظری و سابقه علمی موضوع

۱-۲- مقدمه

در این فصل مبانی نظری موضوع بیان شده و کارهای انجام شده توسط محققان مختلف در خصوص برنامه‌ریزی تولید در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت با دید تحلیلی و انتقادی بررسی شده‌اند.

۲-۲- فرآیند برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز

برنامه‌ریزی تولید معدن روباز شامل تصمیم در مورد این که کدام بلوک در چه زمانی باید استخراج شود و به کجا ارسال شود است. طبیعی است که برای استخراج یک کانسار، حالات و ترتیب‌های مختلفی ممکن است وجود داشته باشد که از بین حالات مذکور باید ترتیبی اتخاذ شود که اهداف برنامه‌ریزی تولید را پوشش دهد (Osanloo, et al., 2008). با توجه به این که معدنکاری یک صنعت بسیار پر ریسک است، برنامه‌ریزی تولید به عنوان یک فرآیند کلیدی برای بهبود کارایی و سوددهی پروژه‌های معدنی به حساب می‌آید (Kumral, 2010).

در اکثر مطالعات انجام شده، هدف از برنامه‌ریزی تولید معدن مشخص کردن ترتیب استخراج بلوک‌ها به منظور بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی پروژه بوده است (Boland, et al., 2008; Alvarez, et al., 2010; Consuegra & Dimitracopoulos, 2010; Chicoisne, et al., 2012; Choudhury & Dimitrakopoulos, 2002). علاوه بر این (Chatterjee, 2014; Minnecker, et al., 2014; Dimitrakopoulos, et al., 2002). شرکت‌های معدنی تلاش می‌کنند با تصمیم‌گیری‌های استراتژیک که سال‌ها یا حتی دهه‌ها زمان می‌برد

تا اجرا شود، نرخ بازگشت سرمایه را برای سهام‌داران پیشینه کنند (Groeneveld & Topal, 2011).

فرآیند برنامه‌ریزی تولید معدن، یک فرآیند بهینه‌سازی چند متغیره بوده و نیازمند حل همزمان است و این مساله به راحتی قابل حل نیست. با وجود تلاش‌های مستمر، هنوز مساله برنامه‌ریزی تولید معدن با در نظر گرفتن همه جوانب به صورت همزمان، یک مساله حل نشده باقی مانده است. به طور روشن، برنامه‌ریزی یک فعالیت مستمر در طول عمر معدن است. برنامه‌ریزی‌ها برای کاربرد در دوره یا فواصل زمانی مختلف، صورت می‌گیرد. فرآیند برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای ورودی پیچیده‌تر خواهد شد.

در برنامه‌ریزی معادن روباز عوامل زیادی موثر هستند که از جمله آن عوامل زمین‌شناسی، عوامل اقتصادی و عوامل فنی می‌باشند. مهمترین محدودیت‌های درگیر در مساله برنامه‌ریزی تولید شامل ظرفیت کارخانه فرآوری، عیار مواد ورودی به کارخانه فرآوری، حجم مواد استخراج شده در هر دوره، محدودیت‌های مربوط به انباشتگاه مواد معدنی و محدودیت‌های هندسی (شیب دیواره، حداقل عرض کاری و غیره) می‌باشند (عطائی و حسینی، ۱۳۹۰). برای انجام برنامه‌ریزی تولید به روش قطعی، یک مدل بلوکی اقتصادی مورد نیاز است که با استفاده از داده‌های اقتصادی و مدل بلوکی زمین‌شناسی به دست می‌آید. هدف اصلی در برنامه‌ریزی بلندمدت، تهیه نقشه‌های پیشروی برای کل بلوک‌های موجود در محدوده نهایی معدن است، اما از آنجا که تعداد این بلوک‌های خیلی زیاد است، نمی‌توان همه آن‌ها را با هم برای ارائه یک برنامه‌ریزی مناسب در نظر گرفت. برای حل این مشکل، بعد از طراحی محدوده نهایی، تعدادی پوش‌بک^۱ طراحی می‌شوند. در واقع بر اساس مدل بلوکی اقتصادی، طراحی پوش‌بک‌های استخراجی معدن انجام شده و در هر پوش‌بک ترتیب استخراج بلوک‌ها مشخص می‌شود. طبیعی است که برای استخراج یک کانسار، حالات و ترتیب‌های مختلفی ممکن است وجود داشته باشد که از بین حالات مذکور ترتیبی اتخاذ می‌شود که اهداف برنامه‌ریزی تولید را تامین کند. اهداف برنامه‌ریزی تولید بلندمدت عبارتند از (Osanloo, et al., 2008):

¹ Pushback

❖ بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی پروژه

❖ کمینه‌سازی ریسک دستیابی به اهداف تولیدی

بدیهی است این اهداف تا حدودی با یکدیگر متناقض‌اند. محدودیت‌های برنامه‌ریزی تولید بلندمدت به شرح زیر است:

❖ حداقل و حداکثر تناژی از کانسنگ که در هر بازه زمانی باید تولید شود

❖ حداقل و حداکثر کنسانتره‌ای که باید در هر بازه زمانی تولید شود

❖ حداقل تناژ باطله‌ای که باید در هر دوره زمانی استخراج شود تا در دوره‌های زمانی بعد کانسنگ برای استخراج به مقدار کافی در دسترس باشد.

❖ حداکثر تعداد پله‌هایی که در هر بازه زمانی، استخراج از آن‌ها صورت می‌گیرد

❖ بالاترین و پایین‌ترین پله‌ای که در هر بازه زمانی، استخراج از آن‌ها صورت می‌گیرد

❖ حداقل و حداکثر پارامترهای کیفی مربوط به محصول نهایی تولیدی

❖ محدودیت زاویه شیب

❖ محدودیت‌های مربوط به دیوهای کانسنگ

❖ حداقل عرض کف پیت

مراحل عمومی طراحی و برنامه‌ریزی تولید برای یک معدن روباز به شرح زیر خلاصه می‌شود (Chicoisne, et al., 2012; Consuegra & Dimitracopoulos, 2010):

الف: تهیه مدل بلوکی^۱ سه بعدی از کانسار

ب: تعیین محدوده نهایی معدن^۲

ج: طراحی پوش‌بک‌ها

د: برنامه‌ریزی ترتیب استخراج بلوک‌ها

^۱ Block model

^۲ Final pit limit

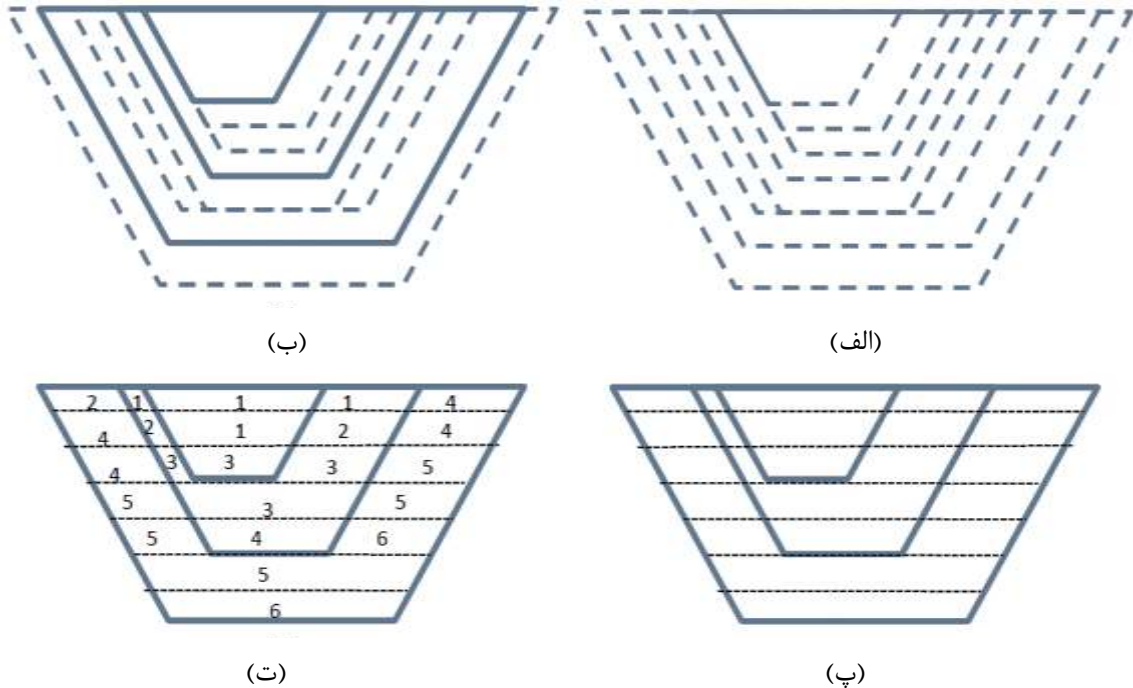
برنامه‌ریزی تولید معدن بر اساس ارزش اقتصادی بلوک‌های کانسار انجام می‌شود و عدم قطعیت عیار بلوک‌ها و قیمت ماده معدنی تاثیر زیادی در محاسبه ارزش اقتصادی بلوک‌ها دارد. ارزش یک بلوک اقتصادی از طریق معادله‌ی (۱-۲) قابل محاسبه است (Akbari, et al., 2008):

$$BEV = [(M.R.P) - (T_0.C_p)] - (T.C_m) \quad (1-2)$$

که در آن، T تناژ سنگ در بلوک، T_0 تناژ کانسنگ در بلوک، M مقدار فلز در بلوک، P قیمت فلز، R سهم فلز قابل بازیابی، C_m هزینه‌ی معدنکاری در هر تن، و C_p هزینه‌ی فرآوری به ازای هر تن است. در میان این چند فاکتور، T، T_0 و M به عنوان فاکتورهای زمین‌شناسی وابسته به منطق زمین‌شناسی مدل‌سازی بلوک ذخیره، تقسیم‌بندی می‌شوند. R مولفه‌ی تکنولوژیکی است و P، C_m و C_p فاکتورهای اقتصادی هستند.

در روش‌های قطعی، محدوده نهایی با هدف بیشینه‌سازی جریان نقدینگی (تنزیل نیافته) انتخاب می‌شود. هدف اصلی در برنامه‌ریزی بلندمدت، تهیه نقشه‌های پیشروی برای کل بلوک‌های موجود در محدوده نهایی معدن است، اما از آنجا که تعداد این بلوک‌های خیلی زیاد است، نمی‌توان همه آن‌ها را با هم برای ارائه یک برنامه‌ریزی مناسب در نظر گرفت. برای حل این مشکل، بعد از طراحی محدوده نهایی، تعدادی پوش‌بک طراحی می‌شوند. شکل ۱-۲ نمای شماتیک از برنامه‌ریزی تولید یک معدن روباز با استفاده از پوش‌بک‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل در بخش (الف) پیت‌های لانه‌ای^۱ ایجاد شده‌اند. در تصویر (ب) پوش‌بک‌ها با تجمیع و انتخاب دسته‌ای از پیت‌های لانه‌ای ساخته شده‌اند. در بخش (پ) فازهای پله‌ای ساخته شده و در بخش (ت) ترتیب زمانی استخراج فازهای پله‌ای نشان داده شده است.

¹Nested pits



شکل ۲-۱- نمای شماتیک از برنامه‌ریزی تولید یک معدن روباز با استفاده از پوشش‌بک‌ها (Chicoisne, et al., 2012)

۲-۳- تخمین عیار بلوک‌ها به روش قطعی

برای تخمین عیار هر یک از بلوک‌های مدل و تهیه مدل بلوکی زمین‌شناسی، از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد که مهمترین آن‌ها روش نزدیک‌ترین نقاط، روش‌های عکس فاصله و روش‌های زمین‌آماري است. در روش نزدیک‌ترین نقاط عیار نزدیک‌ترین نقطه معلوم به بلوک مورد نظر اختصاص داده می‌شود. در این روش عیار یک نقطه فقط با توجه به نزدیک‌ترین عیار و نه هیچ چیز دیگری تعیین می‌شود. اما بهتر است در تخمین عیار هر بلوک، تاثیر عیار تمام نقاط مجاور لحاظ شود. بدیهی است چنانچه فاصله نزدیک‌ترین نقطه تا مرکز بلوک بیش از شعاع تاثیر باشد، هیچ مقداری به آن بلوک اختصاص داده نخواهد شد. در روش‌های عکس فاصله تاثیر عیارهای اطراف به نسبت عکس فاصله مرکز بلوک تا آن عیارها تغییر می‌کند. توان دو برای تعداد زیادی از انواع مختلف ذخایر مناسب می‌باشد و به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این صورت به روش عکس مجذور فاصله گفته می‌شود (عطایی و حسینی، ۱۳۹۰).

یکی دیگر از روش‌های تخمین عیار بلوک‌ها، استفاده از روش‌های زمین‌آماري است که علاوه بر

تخمین مقدار پارامتر در هر نقطه از فضای مورد نظر با کمترین خطای ممکن، میزان عدم قطعیت یا خطای تخمین را نیز محاسبه می‌کند. زمین‌آمار براساس ساده‌ترین تعریف، در واقع یک روش درونیایی است که معیار مورد استفاده در آن برای درونیایی یا تخمین، کمینه شدن مقدار واریانس تخمین است. تخمین زمین‌آمار یکی از دقیق‌ترین روش‌های تخمین است چرا که عوامل زیادی نظیر فاصله نقاط، ناهمسانگردی، تغییرپذیری فضایی را مورد بررسی قرار می‌دهد. امروزه زمین‌آمار به طور گسترده‌ای در مشخص کردن توزیع فضایی عیار در کانسارها به کار برده می‌شود و تکنیک زمین‌آمار کریجینگ با استفاده از داده‌های موجود و همبستگی فضایی بین آن‌ها که توسط تابع کوواریانس و یا واریوگرام توصیف می‌شود، برای پیش‌بینی عیار در هر نقطه از کانسار به کار برده می‌شود.

از مهمترین ویژگی‌های کریجینگ آن است که به ازای هر تخمینی خطای مرتبط با آن را می‌توان محاسبه و برای هر مقدار تخمین زده شده می‌توان دامنه اطمینان آن تخمین را محاسبه کرد. روش کریجینگ مشروط بر اینکه داده‌ها توزیع نرمال داشته باشند، کمترین واریانس تخمین را تنظیم کرده و ناریب بودن آن را تضمین می‌کند. بسته به معلوم یا نامعلوم بودن میانگین کمیت مورد بررسی در فضای مورد تخمین دو نوع کریجینگ را می‌توان به کار برد. اگر میانگین کمیت مورد تخمین در کل فضا نامعلوم باشد، از کریجینگ معمولی استفاده می‌شود و در صورتی که میانگین کمیت مورد بررسی در کل فضای تخمین معلوم باشد، روش کریجینگ ساده به کار گرفته می‌شود (Peng, et al., 2014). بر حسب این‌که تخمین زمین‌آمار در چه شرایطی از نظر ساختار داده‌ها، وجود یا عدم وجود روند، درجه ناهمگنی، پیوستگی و هدف تخمین، صورت می‌گیرد، با حفظ اصول کریجینگ روش‌هایی توسعه یافته است. به عنوان مثال در شرایط وجود روند از کریجینگ عام، در شرایطی که هموارسازی تخمین‌گرهای شاخص و اریب شدگی شرطی آن‌ها موجب محدودیت‌هایی در کارایی آن‌ها شود و در شرایط نرمال نبودن توزیع داده‌ها از کریجینگ غیرخطی مانند لاگ کریجینگ و در شرایطی که هدف بررسی و تخمین همزمان دو یا چند متغیر باشد از کوکریجینگ استفاده می‌شود. در صورت نامنظم بودن کانی‌سازی، روش کریجینگ شاخص در بررسی ذخایر معدنی بیشترین کاربرد را دارد. در این روش

بر اساس یک عیار حد مشخص، کلیه داده‌های موجود به صفر (کمتر از عیار حد) و یک (بالتر از عیار حد) تبدیل و سپس بر اساس داده‌های تبدیل شده به صفر و یک، کلیه مراحل کریجینگ انجام می‌شود. نتایج حاصل می‌تواند معرف توزیع احتمال پیدایش ماده معدنی با عیار معین (عیار حد) باشد. از این روش برای تعیین ذخیره کنسار با عیار بالاتر از حد مورد نظر همراه با احتمال پیدایش آن می‌توان استفاده کرد. کریجینگ را می‌توان بهترین تخمین‌گر ناریب دانست که منظور از ناریب بودن تخمین‌گر کریجینگ آن است که مجموع اوزان مربوط به هر نقطه تخمین برابر با یک است (حسنی پاک و خالصی، ۱۳۸۲). در روش کریجینگ هدف به حداقل رساندن خطای تخمین است. برای به دست آوردن عیار نقطه مجهول، تأثیر نقاط اطراف آن به صورت معادله‌ی (۲-۲) است:

$$g = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot g_i \quad (2-2)$$

که در آن g عیار در حال برآورد، g_i عیارهای معلوم و λ_i ضرایب وزنی هستند. در بخش قبل برای تخمین عیار بلوک به روش‌های عکس فاصله نیز از چنین رابطه‌ای استفاده می‌شد. هر چند نحوه محاسبه ضرایب در روش زمین‌آماري با روش‌های عکس فاصله متفاوت است ولی محدودیت‌های آن‌ها مشابه هستند. به عبارت دیگر مقدار ضرایب وزنی همیشه بین صفر و یک تغییر می‌کنند و مجموع ضرایب وزنی همیشه برابر یک است.

کریجینگ یک روش تخمین است که بر منطق میانگین متحرک وزن دار استوار می‌باشد. در این روش واریانس تخمین (خطای تخمین) حداقل مقدار ممکن می‌باشد. کریجینگ یک تخمین‌گر خطی است که به صورت رابطه (۳-۲) تعریف می‌شود.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3-2)$$

که در آن Z^* ، مقدار کمیت تخمینی در یک نقطه یا در یک بلوک، $Z(x_i)$ مقدار کمیت نمونه λ_i و ضریب وزنی است که به نمونه λ_i نسبت داده می‌شود. شرط استفاده از این تخمین‌گر خطی آن است که متغیر Z دارای توزیع نرمال باشد. در غیر این صورت باید از کریجینگ غیرخطی استفاده کرد و یا

این که با استفاده از توابع تبدیل، توزیع متغیر مورد نظر را به نرمال تبدیل کرد. واریانس تخمین به صورت رابطه (۴-۲) تعریف می‌شود:

$$\sigma^2_E = \left[(Z_v - Z_v^*)^2 \right] = E[Z_v^2] - 2E[Z_v Z_v^*] + E[Z_v^{*2}] \quad (4-2)$$

که در آن:

$$E[Z_v^2] = \bar{C}(v, v) + m^2 \quad (5-2)$$

$$E[Z_v Z_v^*] = \sum \lambda_i \bar{C}(v, v_i) + m^2 \quad (6-2)$$

$$E[Z_v^{*2}] = \sum \sum \lambda_i \lambda_j \bar{C}(v_i, v_j) + m^2 \quad (7-2)$$

با جایگذاری روابط فوق در رابطه واریانس تخمین، رابطه (۸-۲) به دست می‌آید:

$$\sigma^2_E = \bar{C}(v, v) - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{C}(v, v_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \bar{C}(v_i, v_j) \quad (8-2)$$

برای این که واریانس تخمین حداقل شود، لازم است تابع σ^2_E حداقل شود. در کریجینگ، می‌توان واریانس تخمین در هر نقطه و یا برای هر بلوک را به طور مجزا محاسبه کرد. به این ترتیب نه فقط می‌توان مقدار متوسط خطاها را محاسبه کرد، بلکه می‌توان توزیع خطاها را نیز در کل محدوده مورد بررسی به دست آورد و قسمت‌هایی که در آن جا میزان خطا بالاست و برای کاهش آن نیاز به داده‌های بیشتری است، مشخص کرد. داده‌های مورد استفاده توسط کریجینگ معمولی باید شرط پایایی عدم وجود روند و مجهول بودن مقدار میانگین را داشته باشند، تا بتوان از این روش به عنوان تخمینگر عیاری کانسار استفاده کرد.

۴-۲- سابقه برنامه‌ریزی تولید با فرض قطعیت پارامترها و ضعف روش‌های قطعی

اولین تلاش‌های مدون برای برنامه‌ریزی تولید معادن توسط لرج و گروسمن^۱ در سال ۱۹۶۵ با ارائه یک الگوریتم بهینه‌سازی استخراج معدن بر اساس مفهوم تحلیل پارامتری انجام شد. این روش بر مبنای

^۱ Lerchs and Grossman

طراحی مجموعه‌ای از پیت‌ها با تغییر تدریجی یک یا چند پارامتر استوار شده است. آن‌ها معتقد بودند که شناسایی محدوده نهایی پیت به تنهایی برای بهینه‌سازی معدن کافی نیست، بلکه باید ترتیب استخراج مطلوب که منجر به استخراج پیت نهایی می‌شود، را تعیین کرد. بنابراین آن‌ها پیشنهاد کردند که مراحل استخراج یک پیت را می‌توان با استفاده از پیت‌های لانه‌ای مدل کرد. در این روش برای بهینه کردن مجموع جریان نقدینگی با توجه به حجم کل استخراج و کاستن مقداری از ارزش بلوک‌ها به عنوان پارامتر انتخاب شده است که این کار با کاهش قیمت فلز و یا افزایش هزینه استخراج امکان‌پذیر است. مشروط بر آنکه بین نواحی کانسنگ و باطله در کانسار، وابستگی خیلی زیادی وجود نداشته باشد و ارزش اقتصادی بلوک‌ها نسبت به هم به اندازه کافی، متغیر باشند (Osanloo, et al., 2008).

از لحاظ تئوری و با صرف‌نظر از محدودیت‌های استخراجی، روش تحلیل پارامتری، برنامه تولید بهینه را می‌دهد. ولی در عمل به خاطر وجود برخی از محدودیت‌های استخراجی از جمله حداقل عرض کف، عیار مواد ورودی به کارخانه فرآوری و غیره، روش تحلیل پارامتری فقط برای فازبندی و برنامه‌ریزی بلندمدت معادن روباز به کار می‌رود.

در سال ۱۹۶۸ جانسون^۱ روشی برای تعیین محدوده نهایی بهینه معدن با استفاده از الگوریتم جریان شبکه ارائه داد. همچنین در سال ۱۹۶۹ با استفاده از برنامه‌ریزی خطی^۲ به بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید در معدن اقدام کرد. گرشون^۳ در سال ۱۹۸۳ میلادی الگوریتمی برای برنامه‌ریزی بلندمدت ارائه کرد که در این روش برای هر بلوک شاخص مطلوبیت در نظر گرفته شده و بلوک‌ها بر اساس شاخص به دست آمده استخراج می‌شوند. دود^۴ و انور^۵ در سال ۱۹۹۲ برنامه‌ریزی تولید معدن روباز را با روش برنامه‌ریزی پویا فرموله کردند. تولوینسکی^۶ و آندروود^۷ در سال ۱۹۹۲ یک روش ترکیبی

¹ Johnson

² Linear Programming (LP)

³ Gershon

⁴ Dowd

⁵ Onur

⁶ Tolwinski

⁷ Underwood

از برنامه‌ریزی پوبا و بهینه‌سازی تصادفی، هوش مصنوعی و قوانین فرا ابتکاری را برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز ارائه کردند. همچنین در سال ۱۹۹۲ ونگ و سویم^۱ الگوریتمی ارائه کردند که بر اساس محتوای فلز بلوک‌ها ترتیب استخراج را مشخص می‌کند. الولی^۲ در سال ۱۹۹۵ از تکنیک هوش مصنوعی برای برنامه‌ریزی برای تولید استفاده کرد (عطائی و حسینی، ۱۳۹۰). کاستا^۳ و هیل^۴ در سال ۲۰۰۳ برنامه‌ریزی تولید بلندمدت معدن روباز را با کمک روش شاخه و برش انجام دادند (Caccetta & Hill, 2003). برخی دیگر از محققان نیز برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید معدن از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری استفاده کرده‌اند (Kumral & Dowd, 2004; Boland, et al., 2009; Souza, et al., 2010; Cullenbine, et al., 2011; Kumral, 2013; Jelvez, et al., 2016) همچنین در سال‌های اخیر تلاش‌های متعدد دیگری توسط محققان در زمینه بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید معادن روباز صورت گرفته که البته عدم قطعیت‌های موجود را در نظر نگرفته‌اند (Ramazan, 2007; Bley, et al., 2010; Epstein, et al., 2012; Chicoisne, et al., 2012; Lamghari & Dimitrakopoulos, 2012; Nanjari & Golosinski, 2013; Khan & Niemann-Delius, 2014; Liu & Kozan, 2016; Samavati, et al., 2016)

عدم قطعیت به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن نه تنها مجموعه رویدادهای ممکن نامعلوم است، بلکه احتمال رویدادهای معلوم نیز نامشخص است. به عبارت دیگر نه مجموعه رویدادهای ممکن شناخته شده است و نه احتمال وقوع آن‌ها. واژه ریسک زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که نه تنها مجموعه رویدادهای ممکن قابل ارزیابی است بلکه احتمال وقوع هر یک از آن‌ها نیز معلوم است، فقط مشخص نیست که دقیقاً کدام یک از رویدادها رخ می‌دهد. بنابراین تصمیم‌گیری در فضای وجود ریسک آسان‌تر از فضایی است که عدم قطعیت در آن وجود دارد (حسنی پاک و خالصی، ۱۳۸۲). در هر جامعه مدرن مهندسان و مدیران فنی مسئول برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت و بهره برداری از ساده‌ترین تا

¹ Wang and Sevim

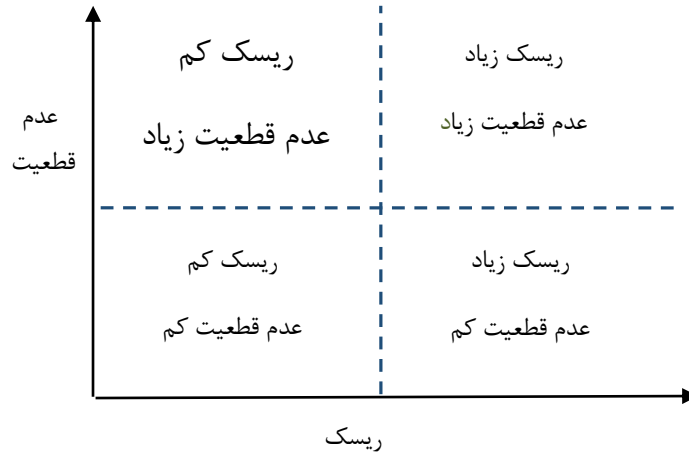
² Eleveli

³ Caccetta

⁴ Hill

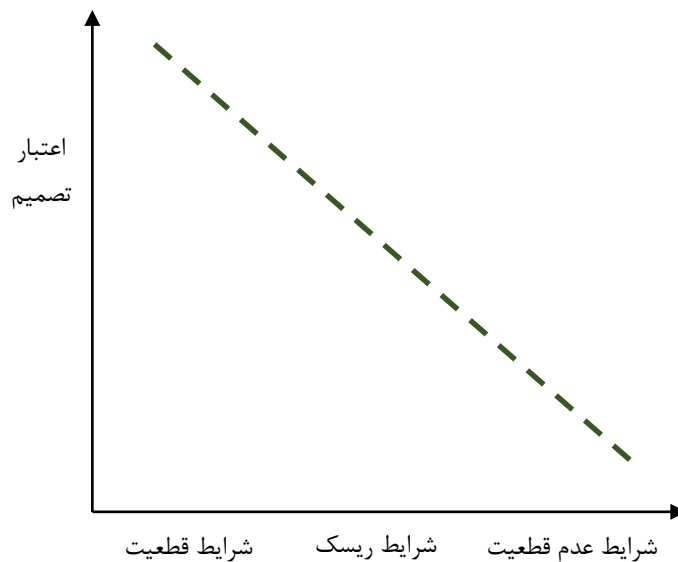
پیچیده‌ترین محصول، طرح یا سیستم هستند. نقص در طرح‌ها، محصولات و سیستم‌ها موجب وقوع اختلال در سطوح مختلفی می‌شود و از این رو انتظار می‌رود که طرح‌ها، محصولات و سیستم‌ها پایا و اطمینان بخش باشند. اهمیت عدم قطعیت از این بابت است که ریسک‌های مرتبط با یک پروژه از عدم قطعیت‌های موجود در آن پروژه ناشی می‌شود. همچنین عدم قطعیت یک مشخصه ذاتی از هر طرح است و لذا یکی از پارامترهای طراحی محسوب می‌شود که همواره باید در طی فرآیند طراحی به عنوان یکی از معیارهای مهم مورد توجه قرار گیرد. در هر علم و هر حوزه عدم قطعیت همان ابهامات موجود در آن فضا را در بر می‌گیرد و لذا تعاریف دچار تنوع می‌شوند. اما عدم قطعیت به عنوان یک مفهوم عمومی اصطلاحی است که عدم اطمینان انسان را در مورد برخی اشخاص یا اشیا منعکس می‌کند و بازه‌ی باز میان اطمینان کامل و عدم اطمینان محض را در بر می‌گیرد. عدم قطعیت می‌تواند توصیف کننده‌ی کیفیت دانش انسان در رابطه با یک مورد خاص باشد. باید توجه داشت که میزان ابهام به طور مستقیم به محیط موجود بستگی دارد و لذا می‌توان گفت عدم قطعیت عبارت است از عدم اطمینان در رابطه با یک مسأله‌ی خاص در محیط پیرامون آن مسأله. تاکید بر وجود واژه‌ی محیط به این دلیل است که در حقیقت این محیط است که میزان عدم اطمینان را تعیین می‌کند. اگر عمل تصمیم‌گیری به عنوان یک سیستم در نظر گرفته شود که هدف آن تعیین بهترین گزینه و اجزای آن شامل تصمیم‌گیران، گزینه‌های موجود و محدودیت‌های مستقیم بوده و محیط سیستم، طبیعت (کلیه‌ی نیروهای خارجی) باشد، آن‌گاه این محیط سیستم است که تعیین کننده‌ی عدم قطعیت است، به طوری که هرچه محیط گسترده‌تر و شناخته‌تر باشد، تاثیرات محیطی نمایان‌تر بوده و عدم قطعیت کاهش می‌یابد. در فرآیند برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری، ابتدا باید عدم قطعیت‌ها شناسایی شده و پیامدهای آن و همچنین احتمال پیشامد آن پیامدها سنجیده و اندازه‌گیری شود. به طور کلی دو گروه عمده برای ارزیابی عدم قطعیت شامل تحلیلی و شبیه‌سازی مطرح است. در روش تحلیل از مدل ریاضی و بیان مسأله در قالب فرمول‌ها و راه‌حل‌های ریاضی استفاده می‌شود. در حالی که در روش شبیه‌سازی برآورد شاخص‌های عدم قطعیت بر مبنای شبیه‌سازی فرآیند واقعی و مطالعه رفتار متغیر و اتفاقی یک سیستم صورت می‌گیرد و لذا

مشمول بر یک سری آزمایش‌های واقعی می‌شود (بیلینتون و آلن، ۱۳۷۹). شکل ۲-۲ شرایط متفاوت برای عدم قطعیت و ریسک را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲- شرایط متفاوت برای عدم قطعیت و ریسک (بیلینتون و آلن، ۱۳۷۹)

فضاهای بینابینی وجود دارند که ترکیبی از عدم قطعیت و ریسک در آن‌ها وجود دارند. گذر از فضای عدم قطعیت به فضای ریسک مستلزم دانستن کلیه حالات و یا رویدادهای ممکن به همراه احتمال وقوع هر یک از آن‌ها است. شکل ۳-۲ نشان دهنده ارتباط تصمیم با درجه عدم قطعیت است.



شکل ۳-۲- سطح اعتبار تصمیم‌گیری به عنوان تابعی از درجه عدم قطعیت موجود (بیلینتون و آلن، ۱۳۷۹)

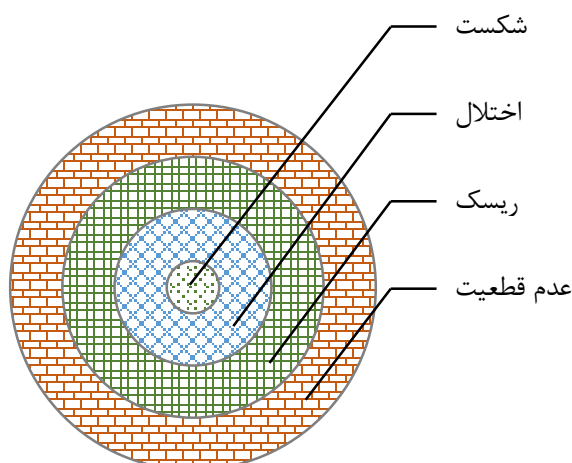
همان‌طور که از تعاریف عدم قطعیت بر می‌آید، نبود آگاهی سرچشمه‌ی اصلی حضور یافتن در چنین

وضعیتی است. زمانی که قرار است یک تصمیم اتخاذ شود، عدم قطعیت در این است که تصمیم‌گیر نمی‌داند کدام موقعیت طبیعی رخ می‌دهد. اصولاً تنها دلیل ایجاد عدم اطمینان در رابطه با یک مورد خاص نبود آگاهی کافی در آن زمینه است. این عدم آگاهی می‌تواند انواع گوناگونی داشته باشد، اما می‌توان به‌طور کلی اکثر آن‌ها را در دو دسته‌ی تغییرپذیری طبیعی^۱ و عدم قطعیت دانش^۲ جای داد. تغییرپذیری طبیعی پیچیدگی ارزش‌ها و آرمان‌های سازمانی و اجتماعی بشر، نشان‌دهنده‌ی تغییرپذیری طبیعی است. تغییرپذیری طبیعی به مشاهدات تصادفی در طبیعت بر می‌گردد. رویدادهایی که از منبع نقص تغذیه می‌شوند معمولاً در یک ابهام کامل به سر می‌برند و لذا چیزی به جز استدلال‌ها و نتیجه‌گیری‌های بشری که ریشه در عقل و احساس انسان دارد نمی‌تواند در زمینه‌ی کاهش عدم قطعیت آن‌ها کمک کند. آن‌جا که فقدان دانش انسان در مورد جهان مادی تایید می‌شود، پای عدم قطعیت دانش در میان است. عدم قطعیت دانش به وضعیت دانش در مورد یک سیستم فیزیکی و توانایی بشر به منظور اندازه‌گیری و مدل کردن آن باز می‌گردد (خرم، ۱۳۹۲).

فضای عدم قطعیت را می‌توان با توجه به هدف تحلیل‌گر، گسترش یا کاهش داد. در شکل ۲-۴ لایه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که هر یک با توجه به هدف تحلیل‌گر و همچنین وقوع یا عدم وقوع پدیده، مورد توجه قرار می‌گیرند. در مرحله‌ی اول یعنی قبل از وقوع پدیده عدم قطعیت مورد توجه است زیرا هیچ اطلاعاتی از پدیده و نحوه‌ی وقوع آن و نتایج آتی وجود ندارد. ریسک از عدم قطعیت آغاز می‌شود و پس از وقوع پدیده مساله وارد دنیای ریسک می‌شود. اختلال (اثر آشفتگی) نتیجه ریسک است و پس از به دست آمدن نتایج اولیه قابل مطالعه است. انحراف (شکست) نیز ناشی از اثرات آشفتگی است (بیلینتون و آلن، ۱۳۷۹).

¹ Natural Variability

² Knowledge Uncertainty



شکل ۲-۴- نمودار گسترش عدم قطعیت (بیلینتون و آلن، ۱۳۷۹)

همانطور که پیشتر نیز بیان شد، مهندسی معدن همواره درگیر پارامترهای غیرقطعی وابسته به زمین و اقتصاد بوده، هست و خواهد بود. این پارامترها با توجه به ذات ناشناخته و غیر قابل پیش‌بینی بودن خصوصیات آن‌ها همواره جزء مهمترین دغدغه‌ها در رشته مهندسی معدن است. فرض معلوم بودن دقیق ورودی‌ها، اثر عدم قطعیت پارامترها را بر کیفیت و شدنی بودن مساله در نظر نمی‌گیرد. بنابراین در صورتیکه پارامترهای مساله بهینه‌سازی مقادیری غیر از مقدار اسمی بگیرند، ممکن است برخی محدودیت‌ها رعایت نشوند و جواب بهینه‌ای که با استفاده از داده‌های اسمی به دست آمده دیگر بهینه و یا حتی شدنی هم نباشد.

تخمین ناصحیح ذخیره یکی از مهمترین نتایج وجود عدم قطعیت در معادن است. برنامه‌ریزی بلند، میان و کوتاه‌مدت در یک عملیات معدنکاری همگی به تخمین‌های دقیق بستگی دارند؛ برای مثال تخمین نادرست ممکن است در دراز مدت باعث بهینه‌سازی نادرست پیت شود، در میان‌مدت باعث نادرست بودن جریان نقدینگی شود و در کوتاه‌مدت باعث طبقه‌بندی غلط مواد به عنوان باطله و ماده معدنی به وسیله کنترل عیار نادرست شود (Godoy & Dimitrakopoulos, 2011). همانطور که در بخش قبل شرح داده شده، تاکنون روش‌های متعددی برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز ارائه شده است که پارامترهای ورودی را قطعی در نظر گرفته و به حل مساله برنامه‌ریزی استخراج بلوک‌ها

پرداخته‌اند. روش‌های برنامه‌ریزی تولید قطعی، عدم قطعیت‌ها و ریسک‌های ناشی از آن را مد نظر قرار نمی‌دهند و در نتیجه در اکثر مواقع رسیدن به نتایجی حتی نزدیک به پیش‌بینی‌های صورت گرفته دور از دسترس است. نتایج تحقیقات متعدد انجام شده نشان داده که بسیاری از معادن نتوانسته‌اند به اهداف تولیدی خود دست یابند که علت اصلی آن وجود عدم قطعیت در عیار و قیمت ماده معدنی بوده است (Asad & Dimitrakopoulos, 2013). اجرا بر پایه‌ی برنامه‌ریزی‌های قطعی ممکن است موجب اتلاف قابل توجه NPV و استفاده نامناسب از ظرفیت شود. به عبارت دیگر، زمانی که مقادیر داده‌ها با مقادیر مورد انتظار متفاوت هستند، برخی محدودیت‌ها ممکن است نقض شوند و راه‌حل ممکن است دیگر بهینه نباشد (Kumral, 2010).

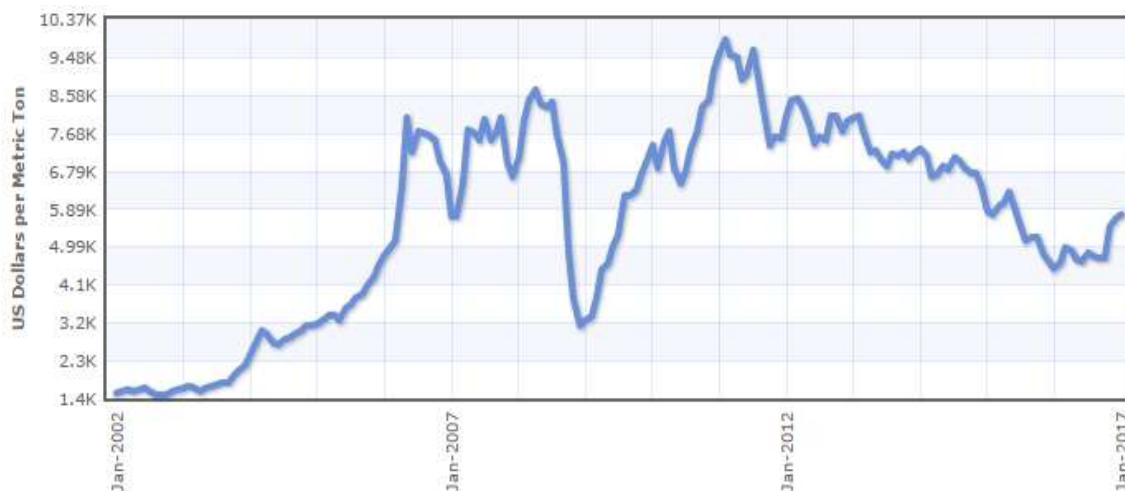
اساس و مبناى برنامه‌ریزی تولید در معادن، اطلاعات حاصل از تخمین ذخیره معدن است. فرآیند تخمین ذخیره بر اساس مقادیر نمونه‌های گرفته شده از کانسار صورت می‌پذیرد. وزن هر نمونه در قیاس با وزن منطقه‌ای که نمونه معرف آن است بسیار ناچیز است. به همین نسبت وزن کل نمونه‌ها در مقایسه با وزن کانسار عدد بسیار کوچکی است. اطلاعات به دست آمده از این حجم ناچیز می‌بایست به کل محدوده کانسار تعمیم داده شود. تعمیم اطلاعات از یک حجم کوچک به یک حجم بزرگ همواره با عدم قطعیت همراه خواهد بود. تخمین ذخیره بر این اساس یکی از مهمترین منابع ایجاد عدم قطعیت در معادن است. در صنعت معدنکاری، موقعیت، پیچیده‌تر از سناریوی ساده‌ای است که در اکثر مقالات کنونی فرض شده است. برای نمونه، بر خلاف پیشرفت‌های اخیر در اکتشاف و فناوری‌های تخمین کانسنگ، مقدار کلی واحدهای فلزی درون یک کانسار، هرگز با قطعیت، قابل شناسایی نیست (Dimitrakopoulos & Abdel Sabour, 2007).

محدودیت مهم دیگر در روش‌های قطعی برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید معدن روباز، ناتوانی در نظریه‌ی عدم قطعیت قیمت ماده معدنی است. این در حالی است که با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت، برنامه‌ریزی معدن نسبت به تغییر قیمت حساسیت زیادی داشته و با تغییرات کوچک قیمت، تغییرات اساسی در نتایج را نتیجه می‌دهد (Akbari, et al., 2008; Elkington & Durham,

(2016; Baek, et al., 2016; Mokhtarian & Sattarvand, 2013; Espinoza, et al., 2011). با انجام

تحلیل حساسیت این گونه نتیجه‌گیری شده است که قیمت محصول حساس‌ترین عامل و عیار دومین عامل مهم بر روی ارزش اقتصادی بلوک می‌باشند. در حالی که در سال‌های اخیر، بیشتر مطالعاتی که بر روی موضوع عدم قطعیت در طرح‌ریزی معدنی انجام شده است تمرکز اصلی‌شان بر روی عدم قطعیت عیار بوده است (Akbari, et al., 2008). طبق تجربه قیمت‌ها به دلیل بحران‌های اقتصادی به طور ناگهانی سقوط می‌کنند. این موضوع بر حیات پروژه‌های معدنی تاثیر بسزایی دارد و ممکن است بعضی از شرکت‌ها را تا مرز ورشکستگی بکشاند. این سقوط قیمت‌ها عدم قطعیت و ریسک موجود در پروژه‌های معدنی را تائید می‌کند (Li & Knights, 2009).

در سال‌های اخیر قیمت اکثر فلزات با تغییرات شدید همراه بوده است. برای نمونه طبق شکل ۲-۵ قیمت مس از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۰۵، دو برابر شد (از ۱۸۱۹ دلار بر تن تا ۳۶۷۹ دلار بر تن) و دوباره از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۶، ۱/۸ برابر (از ۳۶۷۹ دلار بر تن تا ۶۷۵۸ دلار بر تن) شد، این به معنای ۳۶۰ درصد رشد در طول سه سال است. شکل ۲-۶ نوسان قیمت طلا در طی ده سال اخیر را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲-۷ نمودار قیمت سنگ آهن و شکل ۲-۸ نرخ تغییرات آن را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها نیز افزایش شدت تغییرات قیمت در سال‌های اخیر در مقایسه با تغییرات قیمت در سال‌های قبل قابل مشاهده است. با توجه به وجود چنین نوساناتی می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط متغیر اقتصادی، ارتباط قیمت‌های آینده با قیمت‌های فعلی کم‌رنگ شده و برنامه‌ریزی‌ها نباید تنها بر اساس تاریخچه قیمت‌ها انجام شود (Azadeh, et al., 2012).



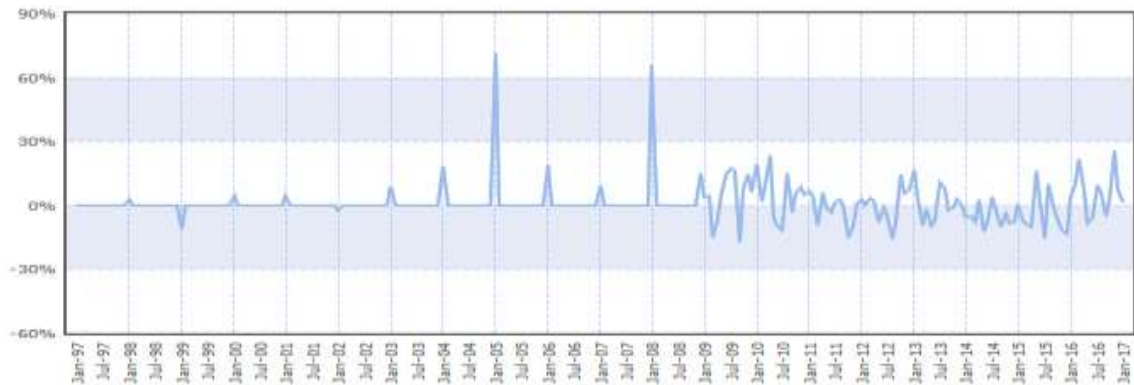
شکل ۲-۵- نوسانات قیمت مس طی ۱۵ سال اخیر (Mundi commodity price index, 2017)



شکل ۲-۶- تغییرات قیمت طلا در طی ده سال اخیر (Gold Price, 2017)



شکل ۲-۷- تغییرات قیمت سنگ آهن در طی ۱۵ سال اخیر (Mundi commodity price index, 2017)



شکل ۲-۸- نرخ تغییرات قیمت سنگ آهن در ۲۰ سال گذشته (Mundi commodity price index, 2017)

۲-۵- سابقه برنامه‌ریزی تولید معدن با توجه به عدم قطعیت

از سه دهه گذشته تلاش‌های متعددی برای وارد کردن عدم قطعیت در برنامه‌ریزی تولید معدن انجام شده است. در ادامه کارهای انجام شده در رابطه با برنامه‌ریزی تولید معدن در شرایط عدم قطعیت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۵-۱- برنامه‌ریزی تولید با عدم قطعیت عیار

از آنجا که در صنعت معدن، نسبت حجم نمونه‌های برداشت شده به حجم محیط مورد مطالعه بسیار کوچک است، داده‌های موجود نمی‌توانند اطلاعات کاملی از وضعیت کانسار ارائه نمایند. بنابراین مقادیر واقعی به دست آمده در حین استخراج و بهره‌برداری از معدن لزوماً با مقادیر محاسبه و مدل‌سازی شده یکسان نیستند. عدم قطعیت پارامترهای عیاری ممکن است باعث خطا در شناسایی بلوک در زمان استخراج شود، مثلاً بلوک به طور اشتباه به عنوان ماده معدنی شناخته شود در حالی که در واقع باطله است و بالعکس (Asad & Dimitrakopoulos, 2013). عملکرد بر اساس روش‌های قطعی منجر به معرفی مدل‌های عیاری هموار شده از کانسار می‌شود و از آن پس کاربرد روش‌های شبیه‌سازی زمین‌آماري در ساخت مدل‌های عیاری کانسار رواج یافت. گودی^۱ و دیمیتراکوپولوس روش جدیدی را

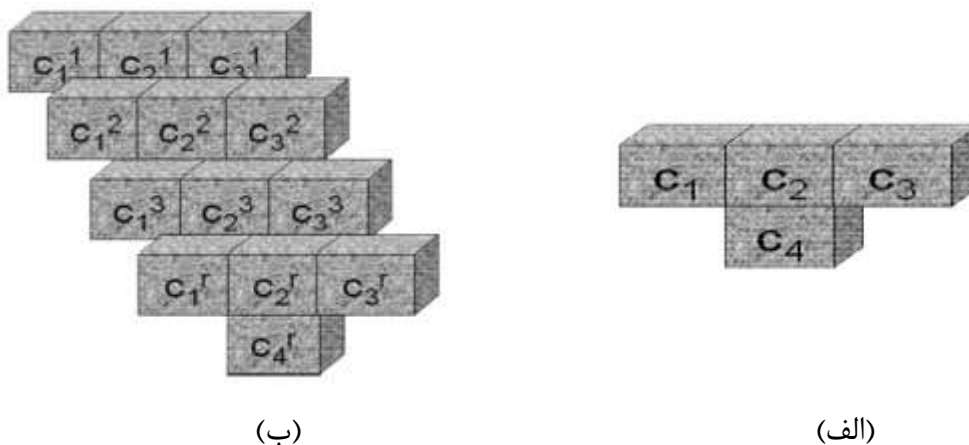
^۱ Godoy

با هدف بهینه‌سازی ارزش خالص فعلی ارائه دادند. این روش با در نظر گرفتن عدم قطعیت عیاری با به تأخیر انداختن برداشت بلوک‌هایی که عدم قطعیت زیادی را شامل می‌شوند ریسک عدم دستیابی به نتایج پیش بینی شده کمینه می‌شود (Godoy & Dimitrakopoulos, 2004). همچنین دیمیتراکوپولوس و رمضان مدلی را ارائه دادند که در این مدل به هر بلوک، احتمالی نسبت داده می‌شود که نشانگر درجه تمایل آن بلوک به استخراج در دوره زمانی داده شده و یا به عبارتی شانس را نشان می‌دهد که با استفاده از مدل‌های بلوکی تصادفی ذخیره قابل محاسبه است. به این ترتیب تابع هدف بلوک‌هایی با بیشترین احتمال را برای دوره اول انتخاب کرده و بلوک‌های با احتمال کمتر برای دوره‌های بعدی انتخاب می‌شوند و بدین ترتیب تابع هدف به صورت غیر مستقیم با انتخاب یک برنامه‌ریزی تولید مطلوب NPV را بهینه می‌کند (Dimitrakopoulos & Ramazan, 2004). منابد¹ و فرویلند² یک مدل برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید با در نظر گرفتن عدم قطعیت عیار را ارائه دادند که در آن تغییرپذیری عیار توسط مدل‌های بلوکی تصادفی نشان داده شده است (Menabde & Froyland, 2004). غلام نژاد و همکاران با استفاده از مدل‌های احتمالی عدم قطعیت عیار را در ارزش اقتصادی بلوک وارد کردند (Golamnejad, et al., 2006). دیمیتراکوپولوس و همکاران رویکردی را ارائه کردند که بر خلاف روش‌های بهینه‌سازی، پتانسیل‌های بالادستی ذخیره را نیز در نظر می‌گیرد و سعی در کمینه‌سازی ریسک‌های پایین دستی موجود دارد. این رویکرد تلفیقی از مدل‌های شبیه‌سازی شده کانسار برای تعریف عدم قطعیت عیاری و استفاده از الگوریتم لرچ و گروسمن برای طراحی پیت نهایی است (Dimitrakopoulos, et al., 2007). گودی و دیمیتراکوپولوس روشی را که شامل مراحل کمی‌سازی عدم قطعیت و ارزیابی ریسک در بهینه‌سازی طراحی پیت است را تشریح کردند. سناریوهای شبیه‌سازی شده چندگانه توزیع عیار در کانسار در یک روش بهینه‌سازی پیت وارد کرده تا توزیعی از خروجی‌های ممکن به عنوان شاخص‌های کلیدی پروژه به دست آیند. سپس برای انجام تصمیمات برنامه‌ریزی معدن

¹ Menabde

² Froyland

این شاخص‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند (Godoy & Dimitrakopoulos, 2011). دیمیتراکوپولوس روش شبیه‌سازی متوالی را برای شبیه‌سازی خصوصیات ذخیره در شرایط عدم قطعیت عیار استفاده کرده است. شکل ۹-۲ نمای شماتیک روش قطعی که یک مدل عیاری را در نظر می‌گیرد و همچنین نمای شماتیک دسته‌ای از مدل‌های هم احتمال کانسار به دست آمده با استفاده از روش شبیه‌سازی متوالی را نشان می‌دهند (Dimitrakopoulos, 2011).



شکل ۹-۲- نمای تک مدل بلوکی (الف) و دسته‌ای از مدل‌های احتمالی کانسار (ب) (Dimitrakopoulos, 2011)

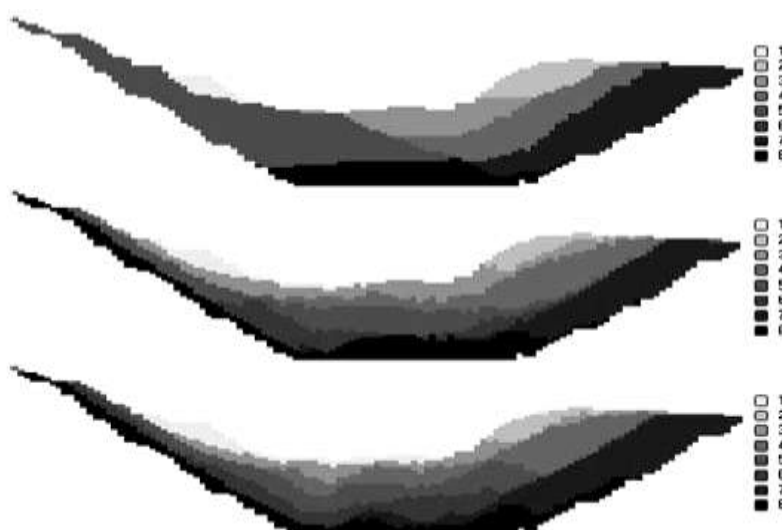
نتایج حاصل از طراحی پیت نشان دهنده بزرگتر بودن محدوده پیت در روش تصادفی نسبت به روش قطعی است که در شکل ۱۰-۲ به صورت یک مقطع از پیت نشان داده شده است (Dimitrakopoulos, 2011). گودفلو^۱ و دیمیتراکوپولوس نیز در یک روش مشابه با در نظر گرفتن عدم قطعیت عیار، تحقق‌های متعددی از طراحی پوش بک‌ها را به دست آوردند که در شکل ۱۱-۲ نمای شماتیک مقایسه‌ای از یک مقطع از پیت‌های به دست آمده با در نظر گرفتن عدم قطعیت عیار نشان داده شده است (Goodfellow & Dimitrakopoulos, 2012). مونتیل^۲ و دیمیتراکوپولوس نیز با استفاده از روش شبیه‌سازی عدم قطعیت عیاری را در برنامه‌ریزی تولید معدن وارد کردند (Montiel & Dimitrakopoulos, 2013). دو مطالعه اخیر در کلیات روش و معدن مورد مطالعه، مشترک می‌باشند.

¹ Goodfellow

² Montiel



شکل ۲-۱۰ - محدوده بزرگتر پیت در روش تصادفی (تصویر سمت راست) در مقایسه با روش قطعی (تصویر سمت چپ) (Dimitrakopoulos, 2011).



شکل ۲-۱۱ - تغییرات در طراحی پوشش‌بک‌ها در تحقق‌های مختلف عیار (Goodfellow & Dimitrakopoulos, 2012)

غلام‌نژاد و موسوی یک مدل دودویی برنامه‌ریزی عدد صحیح که عدم قطعیت زمین‌شناسی را برای برنامه‌ریزی تولید بلندمدت در نظر گرفته است را ارائه کردند. در این روش با استفاده از کریجینگ عدم قطعیت زمین‌شناسی را کمی‌سازی کرده و عدم قطعیت عیار را در برنامه‌ریزی تولید معدن لحاظ کردند. آن‌ها یک شاخص احتمال^۱ را برای تعیین احتمال ماده معدنی یا باطله بودن هر بلوک معرفی کردند (Gholamnejad & Moosavi, 2012). رمضان و دیمیتراکوپولوس یک مدل تصادفی که زمان‌بندی تولید سالانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تامین مواد معدنی استخراج شده از ذخیره را بهینه می‌کند ارائه کردند. مدل پیشنهادی می‌تواند مدل‌های چندگانه شبیه‌سازی شده ماده معدنی را بدون

^۱ Probability index

میانگین‌گیری عیار استفاده کند. در روش ذکر شده بخش‌هایی از ذخیره که ریسک کمتری دارند زودتر استخراج شده و استخراج بخش‌های با ریسک بالا به تعویق انداخته می‌شود (Ramazan & Dimitrakopoulos, 2013). بندورف^۱ و دیمیتراکوپولوس از دسته‌ای از سناریوهای هم احتمال عیاری برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی معدن با وجود عدم قطعیت عیار استفاده کردند (Benndorf & Dimitrakopoulos, 2013). لیت^۲ و دیمیتراکوپولوس نیز با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی شده عیاری برنامه‌ریزی تولید معدن در شرایط عدم قطعیت ماده معدنی را ارائه دادند (Leite & Dimitrakopoulos, 2014).

۲-۵-۲ - سابقه برنامه‌ریزی تولید با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت

از آنجایی که قیمت کالا در بازار به شدت نوسان می‌کند و به فاکتورهای اقتصادی و سیاسی بستگی دارد، پیش‌بینی قیمت در آینده برپایه‌ی داده‌های پیشین، بسیار دشوار است (Kumral, 2010). ویتل^۳ پس از لرج و گروسمن، الگوریتمی را بنیان نهاد که مجموعه‌ای از پیت‌های تودرتو در آن تولید شدند که هر پیت برای مجموعه‌ای متفاوت از نرخ‌های اقتصادی بهینه است. هدف اولیه‌ی او ارائه‌ی یک طرح تولیدی بود که در آن پیت تودرتو توسعه‌ی تدریجی معدن را مطابق با رشد اقتصادی و افزایش قیمت نشان دهد، اما در عمل هر پیت تودرتو می‌توانست بیانگر معدن روباز در یک شرایط اقتصادی خاص باشد (Akbari, et al., 2008).

کاستالیماس^۴ و ساسلیک^۵ مدلی را برای ارزیابی نرخ بازگشت پروژه‌های معدنی با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت ماده معدنی پیشنهاد دادند. سرمایه‌گذاری را در یک پروژه‌ی معدنی در نظر گرفته که ارزش کنونی آن (V) به مولفه‌های جریان نقدینگی به قرار زیر بستگی دارد (Costalima & Suslick,

¹ Benndorf

² Leite

³ Whittle

⁴ Costa Lima

⁵ Suslick

(2006):

K: نرخ تولید سالیانه؛

T: عمر عملیاتی پروژه؛

I: ارزش کنونی سرمایه‌گذاری؛

G: دریافتی دولت (شامل مالیات ثبت شرکت، سایر حقوق و امتیازات، مالیات پروژه و غیره)

P: قیمت به ازای هر اونس؛

C: هزینه‌ی عملیاتی به ازای هر اونس؛

V: ارزش کنونی جریان نقدینگی آینده‌ی پروژه؛

μ : نرخ ریسک کاهش بهای جریان نقدینگی؛

r: نرخ سود بدون ریسک؛

δV : نرخ سود جریان نقدینگی پروژه؛

α_P, α_C : نرخ افزایش قیمت و هزینه‌ی عملیات؛

$\sigma_P, \sigma_C, \sigma_V$: به ترتیب میزان بی‌ثباتی P، C و V؛

β : حساسیت نرخ بازگشت پروژه به نوسان نرخ بازگشت کل بازار؛

gC: عیار حد اقتصادی معدن.

اولین فرضیه این است که تغییر P و C، مطابق با معادلات دیفرانسیلی تصادفی (۲-۹) و (۲-۱۰) باشد:

$$dP = \alpha_P P dt + \sigma_P P dz_P \quad (۲-۹)$$

$$dC = \alpha_C C dt + \sigma_C C dz_C \quad (۲-۱۰)$$

که در آن dz_P و dz_C ، نرخ افزایش براونی به ترتیب برای P و C هستند.

برای یک پروژه‌ی معدنی محدود، با داشتن یک نرخ تولید ثابت، ارزش فعلی مورد انتظار از جریان

نقدینگی آینده‌ی عملیات به شرح رابطه (۲-۱۱) قابل محاسبه است.

$$E[V] = K(1 - G)g_c \left[\frac{P}{(\mu - a_p)} (1 - e^{-(\mu - a_p)T}) - \frac{C}{(\mu - a_c)} (1 - e^{-(\mu - a_c)T}) \right] \quad (11-2)$$

اگر مقدار کنونی سرمایه‌گذاری I باشد، NPV پروژه‌ی برابر خواهد بود با:

$$E[NPV] = V - I \quad (12-2)$$

تحت یک سناریوی قطعی، اگر $NPV > 0$ باشد، بهترین تصمیم، سرمایه‌گذاری است و اگر $NPV < 0$ باشد، بهترین تصمیم، عدم سرمایه‌گذاری است؛ و اگر $NPV = 0$ باشد، تصمیم می‌تواند سرمایه‌گذاری کردن و یا عدم سرمایه‌گذاری باشد (Costalima & Suslick, 2006).

در سال‌های اخیر کارهای زیادی در زمینه کاربرد روش اختیارات حقیقی^۱ در طرح‌های معدنی انجام شده است. از مزایای این دیدگاه، در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری مدیریتی در ارزش پروژه‌ها است. در طرح‌های آماده‌سازی معدنی گاهی مدت زمان واگذاری ذخیره به بهره‌برداران به گونه‌ای است که بهره‌بردار این اختیار را پیدا می‌کند تا چند سال عملیات آماده‌سازی معدن را به تعویق بیندازد. این نوع اختیار در فرهنگ نظریه اختیارات حقیقی دارای ارزش است و به نام اختیار صبر و یا درنگ در سرمایه‌گذاری موسوم است (فانی پاکدل و همکاران، ۱۳۹۱). استفاده از روش اختیارات حقیقی در خصوص ارزشیابی پروژه‌های معدنی در شرایط عدم قطعیت قیمت نتایج مناسبی به همراه داشته است و در اکثر موارد افزایش NPV را به همراه داشته است (Aminul Haque, et al., 2016; Guj, 2016).
دیمیتراکوپولوس و عبدل صبور^۲ به بررسی کارایی روش اختیارات حقیقی در ارزش‌گذاری برنامه‌ریزی‌های معدن در شرایط عدم قطعیت پرداختند. از متداول‌ترین مدل‌های تصادفی استفاده شده برای رسیدن به درک بیشتر از متغیرهای اقتصادی غیرقطعی مدل GBM^۳ است که می‌تواند به صورت رابطه (۱۳-۲) ارائه شود (Dimitrakopolos & Abdel Sabour, 2007):

^۱ Real options

^۲ Abdel-sabour

^۳ Geometric Brownian Motion

$$\frac{dS}{S} = \alpha dt + \sigma dz \quad (13-2)$$

که در آن، S قیمت فلز، α روند مورد انتظار، σ انحراف استاندارد، dz افزایش در فرآیند وینر استاندارد و dt افزایش زمان است. چنین مدلی معمولاً برای توصیف بی‌ثباتی قیمت‌های غیر قابل بازگشت مانند قیمت سهام و قیمت‌های برخی از فلزات گرانبها مانند طلا به کار گرفته می‌شود. از دیگر مدل‌های تصادفی متداول MRP¹ است که می‌تواند برای مدل‌سازی بی‌ثباتی متغیرهای قابل بازگشت مانند نرخ‌های تبادلات خارجی و قیمت فلزات پایه مورد استفاده قرار بگیرد. یک مدل متداول آن به شرح رابطه (14-2) است:

$$\frac{dS}{S} = k(\mu - \ln S)dt + \sigma dz \quad (14-2)$$

که در آن k سرعت بازگشت در حالتی است که لگاریتم یک قیمت به لگاریتم قیمت طولانی مدت و تعادلی μ باز گردد. بر اساس مدل‌های تصادفی مانند آن‌هایی که در روابط (13-2) و (14-2) ارائه شده‌اند، تحقق‌های متعددی از متغیرهای غیرقطعی می‌تواند ایجاد شود. همچنین این محققان برای عدم قطعیت زمین‌شناسی از روش شبیه‌سازی شرطی استفاده کردند. پس از شبیه‌سازی M شناسایی از قیمت فلز و B مدل کانسار، فرآیند بهینه‌سازی برای تمامی M مسیر شبیه‌سازی شده در هر دوره‌ی زمانی $t = 1, 2, 3, \dots, T-1$ ، با داشتن خاصیت بازگشتی، اجرا می‌شود. فرض کنید دو وضعیت معدنی برای طراح معدن در دسترس است: وضعیت i و وضعیت j . در دوره‌ی t بین 0 و T ، طراح معدن وضعیت بهینه‌ای را که ارزش مورد انتظار معدن را تحت شرایط مسیر نمونه‌ی $m \in M$ و مدل کانسار $b \in B$ ، به بیشترین مقدار ممکن می‌رساند، انتخاب می‌کند. فرض کنید V_i نشان دهنده‌ی ارزش مورد انتظار معدن برای وضعیت i و V_j ارزش مورد انتظار برای وضعیت j باشد. هر دوی V_i و V_j توابع متغیرهای غیرقطعی هستند بنابراین خواهیم داشت:

$$E(V_{i,j} : m, t, b) = f(S1_{m,t}, S2_{m,t}, \dots, R_{m,t}, G_{b,t}) \quad (15-2)$$

¹ Mean Reverting Process

که در آن S_1, S_2, \dots نشان‌دهنده‌ی قیمت‌های فلزات $1, 2, \dots$ هستند؛ R نرخ تبادلات خارجی است و G نشان‌دهنده‌ی ویژگی‌های کانسار (تناژ و عیار) است که به وسیله‌ی مدل b کانسار، شبیه‌سازی شده است. برای تخمین وضعیت بهینه‌ی معدن، تابع تشکیل شده از هر دوی V_i و V_j در زمان t باید شناسایی شوند. پس از تخمین پارامترهای هر تابع، فرآیند بهینه‌سازی به صورت زیر اجرا می‌شود:

تغییر وضعیت معدن از i به j بهینه است اگر:

$$E(V_i : m, t, b) < E(V_j : m, t, b) - C_{ij} \quad (16-2)$$

که در آن C_{ij} هزینه‌ی تغییر از وضعیت i به وضعیت j در زمان t است. وضعیت معدن باید از j به i تغییر کند اگر:

$$E(V_j : m, t, b) < E(V_i : m, t, b) - C_{ji} \quad (17-2)$$

که در آن C_{ji} هزینه‌ی تغییر وضعیت معدن از j به i در زمان t است.

در غیر اینصورت، اگر:

$$E(V_i : m, t, b) > E(V_j : m, t, b) - C_{ij} \quad (18-2)$$

یا

$$E(V_j : m, t, b) > E(V_i : m, t, b) - C_{ji} \quad (19-2)$$

وضعیت معدن باید بدون تغییر باقی بماند. فرآیند بهینه‌سازی برای تمامی مدل‌های کانسار و تمامی شبیه‌سازی‌های مربوط به قیمت فلز در طی دوره‌های زمانی اجرا شده و سپس جریان نقدینگی برای تمامی مسیرها تنزیل یافته و تحقق‌های متعددی از ارزش معدن تولید می‌شود. در مراحل بعد، نتایج بررسی شده و بر اساس تحقق‌های به دست آمده بهترین گزینه انتخاب می‌شود (Dimitrakopoulos & Abdel Sabour, 2007).

عبدل صبور و همکاران (Abdel Sabour, et al., 2008) در ادامه کار دیمیتراکوپولوس و عبدل صبور (Dimitrakopoulos & Abdel Sabour, 2007) از روش امتیازدهی و رتبه‌بندی متفاوتی برای انتخاب بهترین طرح معدن در شرایط عدم قطعیت استفاده کردند. در این مطالعه نیز عدم قطعیت

زمین‌شناسی با استفاده از شبیه‌سازی چندین تحقق کانسار بر اساس داده‌های گمانه‌های اکتشافی و عدم قطعیت قیمت با مدل تصادفی بر اساس داده‌های تاریخی قیمت‌ها کمی سازی شده است. انتخاب مدل مناسب برای عدم قطعیت قیمت با توجه به رفتار داده‌های قدیمی انجام شده است. برای قیمت‌هایی که سطح معادل پایداری در بلند مدت از خود نشان نمی‌دهند مانند قیمت فلزات گرانبها، از مدل حرکت برون‌ی و در خصوص متغیرهای اقتصادی که تمایل به بازگشت به سطح میانگین بلندمدت خود داشته باشند از مدل بازگشت به میانگین استفاده شده است. روش رتبه‌بندی پیشنهادی بر اساس اطلاعات موجود بر اساس پتانسیل بالادستی، ریسک پایین دستی انجام شده است. شاخص پتانسیل بالادستی^۱ (UPI) توان طرح‌ها برای تولید سود بیشتر از مورد انتظار در شرایط مساعد را اندازه می‌گیرد. UPI طرح معدن m در دوره سال t بر اساس رابطه (۲۰-۲) قابل محاسبه است:

$$UPI_{m,t} = 100 \frac{DCF_{m,t}^+ p_{m,t}^+ - \sum_{m=1}^M DCF_{m,t}^+ p_{m,t}^+ / M}{\left(\sum_{m=1}^M EV_m / M \right)} \quad (20-2)$$

که در آن EV_m ارزش مورد انتظار طرح m، DCF^+ جریان نقدینگی مثبت سالانه و p^+ احتمال آنکه جریان نقدینگی مذکور مثبت بماند می‌باشند. UPI طرح m به ازای تمام سال‌های استخراج معدن محاسبه شده و مجموع آن به عنوان UPI کلی طرح m در نظر گرفته می‌شود.

در شرایط عدم قطعیت، این احتمال وجود دارد که جریان نقدینگی واقعی در سال‌های آتی منفی شود، در حالی که در زمان برنامه‌ریزی انتظار می‌رفت مثبت بماند. شاخص ریسک پایین دستی^۲ (DRI) احتمال مذکور را در دوره عمر معدن در نظر می‌گیرد و به صورت رابطه (۲۱-۲) قابل محاسبه است:

$$DRI_{m,t} = 100 \frac{DCF_{m,t}^- p_{m,t}^- - \sum_{m=1}^M DCF_{m,t}^- p_{m,t}^- / M}{\sum_{m=1}^M EV_m / M} \quad (21-2)$$

که در آن DCF^- جریان نقدینگی منفی مورد انتظار و احتمال مربوطه (p^-) برای طرح m در دوره سال

¹ Upside Potential Indicator

² Downside Risk Indicator

t می‌باشند. مشابه شاخص پتانسیل بالادستی، DRI طرح m نیز به ازای تمام سال‌های استخراج معدن محاسبه شده و مجموع آن به عنوان DRI کلی طرح m در نظر گرفته می‌شود. ارزش مورد انتظار هر طرح طبق رابطه (۲۲-۲) محاسبه می‌شود:

$$EVI_m = 100 \frac{EV_m - \sum_{m=1}^M EV_m/M}{\sum_{m=1}^M EV_m/M} \quad (22-2)$$

شاخص حد بالایی و پایینی به ترتیب بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$ULI_m = 100 \frac{UL_m - \sum_{m=1}^M UL_m/M}{\sum_{m=1}^M EV_m/M} \quad (23-2)$$

$$LLI_m = 100 \frac{LL_m - \sum_{m=1}^M LL_m/M}{\sum_{m=1}^M EV_m/M} \quad (24-2)$$

مقدار شاخص ارزش (VSI)^۱ برای هر طرح با استفاده از رابطه (۲۵-۲) محاسبه می‌شود:

$$VSI_m = EVI_m + ULI_m + LLI_m \quad (25-2)$$

پس از محاسبه شاخص فوق برای هر طرح، رتبه‌بندی طرح‌ها انجام شده و طرحی که بالاترین امتیاز را به دست آورد انتخاب می‌شود (Abdel Sabour, et al., 2008).

اکبری و همکاران نیز با استفاده از روش اختیارات حقیقی بهینه‌سازی معدن روباز را با لحاظ کردن عدم قطعیت قیمت ماده معدنی انجام دادند. روش آن‌ها در دو حالت انجام شدن یا نشدن کار و حداکثرسازی NPV به عنوان تابع هدف کاربرد دارد. طبق نظر آن‌ها برنامه‌ریزان باید اختیارات استراتژیک یعنی اختیار زمان و قیمت مناسب برای شروع پروژه را برای مدیریت عدم قطعیت‌ها به کار گیرند. آن‌ها برای استفاده از روش اختیارات حقیقی در ابتدا به مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت با کمک

^۱ Value Statistics Indicator

روش درخت دو جمله‌ای پرداختند (Akbari, et al., 2008). مدل درخت دو جمله‌ای برای اولین بار برای تخمین عدم قطعیت قیمت سهام ارائه شد. این روش یکی از مشهورترین روش‌ها برای بررسی رفتار تغییرات قیمت سهام به صورت ناپیوسته است. انعطاف‌پذیری، صحت و سرعت در محاسبه از جمله مزایای این روش است. ساختار درخت دو جمله‌ای از شاخه‌ها و گره‌های مختلف ساخته شده است. این ساختار تمامی مسیرهای ممکن را برای بررسی تغییرات مجاز قیمت سهام در طول عمر پروژه مدل می‌کند (Dehghani, et al., 2014).

اکبری و همکاران ارزش فعلی پروژه را با روش درخت دو جمله‌ای به دست آورده‌اند. در هر دوره این سوال وجود دارد که آیا پروژه باید سریع شروع شود یا بهتر است صبر شود و اختیار باقی بماند. اگر ارزش اختیار نگه داشتن پروژه از ارزش فعلی پروژه بیشتر شد پروژه نگه داشته می‌شود، اگر نشد همان مرز خواهد بود. به منظور ایجاد درخت دو جمله‌ای، پارامترهایی که در زیر به آن‌ها اشاره شده، مورد نیاز هستند (Akbari, et al., 2008):

Δt - مرحله‌ی زمانی داده‌ی^۱ قیمت (برای داده‌ی قیمت سالیانه $\Delta t = 1$)

T_0 - زمان در دسترس اختیار

P_s - قیمت لحظه‌ای محصول در آغاز زمان در دسترس اختیار

ncy - سود خالص حاصل از جریان نقدینگی

σ - بی‌ثباتی مشاهده شده در تغییرات قیمت

r - نرخ سود بدون ریسک

برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت از طریق یک درخت دو جمله‌ای، نرخ بالارونده (U) و نرخ پایین رونده (D) و احتمال بالا رفتن (P) و یا پایین رفتن قیمت (Q) به ترتیب به صورت روابط (۲-۲۶) تا (۲-۲۹) محاسبه شده است.

$$U = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (2-26)$$

^۱ Data

$$D = \frac{1}{U} \quad (27-2)$$

$$P = \frac{e^{(r-ncy)\Delta t} - D}{U - D} \quad (28-2)$$

$$Q = 1 - P \quad (29-2)$$

بر اساس اطلاعات فوق‌الذکر و اطلاعات فنی-اقتصادی، محدوده‌ی بهینه‌ی اجرای پروژه به دست خواهد آمد. به منظور استفاده از اختیارات حقیقی برای یافتن محدوده نهایی معدن با در نظر داشتن عدم قطعیت قیمت، در ابتدا لازم است که یک روش برای مدیریت وجود نوسانات قیمتی، انتخاب شود. برای انجام این کار قیمت‌های درون محدوده‌های بی‌ثبات را به فواصل معینی تقسیم، سپس برخی از راه‌های توسعه را برای هر یک از تقسیمات در نظر گرفته و مفهوم کیفیت راه را برای آن‌ها تعریف کرده است. فرآیند مدل‌سازی از تعریف NPV مطابق با قیمت، به صورت رابطه (۳۰-۲) آغاز می‌شود:

$$NPV_j = DCF_j - CC_j \quad (30-2)$$

که در آن NPV_j ، مقدار ارزش خالص فعلی است در زمانی که توسعه‌ی آن از طریق گزینه‌ی J امکانپذیر است، CC_j هزینه‌های کلی گزینه‌ی J و DCF_j جریان نقدینگی تنزیل یافته‌ی پروژه از طریق گزینه‌ی J است که جریان نقدینگی آن با استفاده از معادله‌ی (۳۱-۲) نشان داده می‌شود.

$$CF_j = \{ [R \times SL \times RL \times f(P - S - r - F)\bar{g}_j] - (b + c) - OSR_j \times a \} T_j \quad (31-2)$$

که در آن CF_j جریان نقدینگی به دست آمده از معدن در زمانی است که با استفاده از گزینه‌ی J توسعه یافته است، r بازبازی پرعیارسازی، SL بازبازی فرآیند ذوب، RL بازبازی تصفیه، f فاکتور مالی، P قیمت فلز به ازای هر تن، S هزینه‌ی ذوب به ازای ذوب هر تن فلز، R هزینه‌ی تصفیه به ازای هر تن فلز، F هزینه‌ی حمل بار از کارخانه‌ی پرعیارسازی تا کارخانه‌ی ذوب و تصفیه، b هزینه‌ی معدنکاری به ازای هر تن، c هزینه‌ی پرعیارسازی به ازای هر تن کانسنگ، a باطله‌برداری به ازای هر تن است. \bar{g}_j عیار متوسط کانسنگ قرار گرفته در محدوده‌های ارزیابی شده‌ی معدن در زمانی است که توسط گزینه‌ی J توسعه یافته، همچنین OSR_j ، نسبت باطله‌برداری کلی معدن روباز در زمانی است که توسط گزینه‌ی J

توسعه یافته و T_j تناژ کانسنگ قرار گرفته در محدوده‌های ارزیابی شده‌ی معدن در زمانی است که توسط گزینه‌ی Z توسعه یافته است. برای ساده‌تر کردن مدل، کیفیت کانسار به صورت رابطه (۳۲-۲) تعریف شده است.

$$q_j = R \times SL \times RL \times f \quad (32-2)$$

و FTC می‌تواند به عنوان هزینه‌های عملیاتی به صورت رابطه (۳۳-۲) تعریف شود.

$$FTC = S + r + F \quad (33-2)$$

و OC_j به عنوان هزینه‌ی عملیاتی، زمانی که با استفاده از گزینه‌ی Z توسعه یافته باشد، به صورت رابطه (۳۴-۲) تعریف می‌شود.

$$OC_j = b + c + OSR_j \times a \quad (34-2)$$

سپس DCF_j می‌تواند با استفاده از رابطه (۳۵-۲) محاسبه شود.

$$DCF_j = \sum_{n=1}^{n_j} \left[\left((q_i (P - FTC) \bar{g}_i - OC_j) \frac{T_j}{n_j} \times \left(\frac{1}{(1+i)^n} \right) \right) \right] \quad (35-2)$$

که در آن n_j عمر معدن در زمانی است که به وسیله‌ی گزینه‌ی Z توسعه یافته است. NPV معدن از طریق گزینه‌ی Z می‌تواند به صورت رابطه (۳۶-۲) محاسبه شود.

$$NPV_j = \left\{ \sum_{n=1}^{n_j} \left[\left((q_j \bar{g}_j \frac{T_j}{n_j} (P - FTC) - \frac{T_j}{n_j} OC_j) \times \left(\frac{1}{(1+i)^n} \right) \right) \right] \right\} - CC_j \quad (36-2)$$

اگر مفهوم کیفیت راه (کیفیت گزینه) برابر با رابطه (۳۷-۲) باشد.

$$Q_j = q_j \bar{g}_j \frac{T_j}{n_j} \quad (37-2)$$

NPV گزینه‌ی Z می‌تواند از طریق روابط (۳۸-۲) تا (۴۱-۲) محاسبه شود.

$$NPV_j = \left(Q_j (P - FTC) - OC_j \frac{T_j}{n_j} \right) \left(\frac{(1+i)^{n_j} - 1}{i(1+i)^{n_j}} \right) - CC_j \quad (38-2)$$

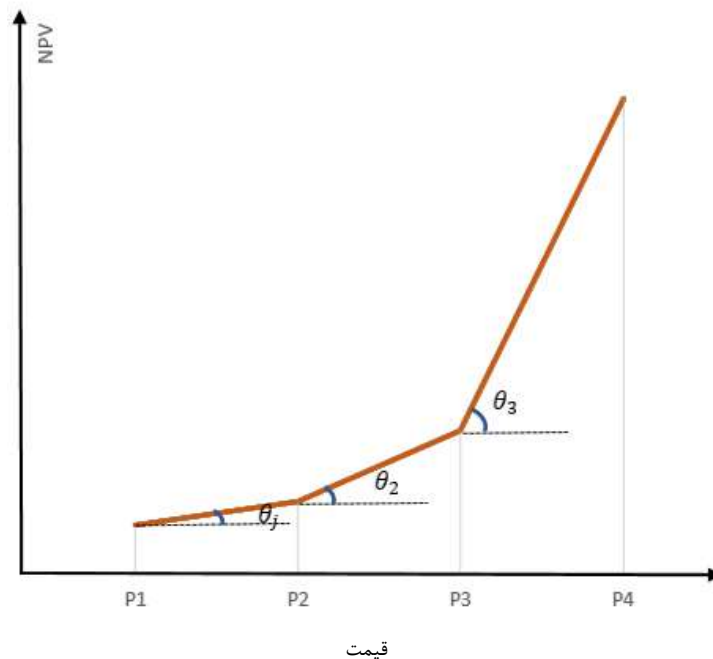
$$NPV_j = \left(Q_j (P - FTC) \left(\frac{(1+i)^{n_j} - 1}{i(1+i)^{n_j}} \right) \right) - \left(OC_j \frac{T_j}{n_j} \left(\frac{(1+i)^{n_j} - 1}{i(1+i)^{n_j}} \right) \right) - CC_j \quad (39-2)$$

$$NPV_j = Q_j P \left(\frac{(1+i)^{n_j} - 1}{i(1+i)^{n_j}} \right) \quad (۴۰-۲)$$

$$- \left[\left(Q_j FTC \left(\frac{(1+i)^{n_j} - 1}{i(1+i)^{n_j}} \right) \right) + \left(OC_j \frac{T_j}{n_j} \left(\frac{(1+i)^{n_j} - 1}{i(1+i)^{n_j}} \right) \right) + CC_j \right]$$

$$G = Q_j \left(\frac{(1+i)^{n_j} - 1}{i(1+i)^{n_j}} \right) \quad (۴۱-۲)$$

رابطه (۴۰-۲) بیان می‌کند که NPV گزینه‌ی j به P به عنوان یک متغیر مستقل و G به عنوان گرادینان (شیب) بستگی دارد. گزینه‌ی j باید به عنوان یک محدوده قیمت در نظر گرفته شود که در آن NPV_j بتواند وابسته به قیمت توسعه یابد. در این محدوده، Q_j و n_j متغیرهایی هستند که شیب NPV را تخمین می‌زنند که در شکل ۲-۱۲ به وسیله‌ی θ نشان داده شده است. باید توجه داشت بر اثر تغییرات قیمت، گزینه‌ی توسعه جدید نباید فوراً تغییر کند بلکه باید کمی پس از ناپدید شدن شیب قبلی تغییر کند. این محدوده‌ها هستند که طراح معدن را در یک موقعیت عدم قطعیت راهنمایی می‌کنند. با داشتن این محدوده‌ها طراح می‌تواند تصمیم بگیرد که چه زمانی و تحت چه شرایطی از نظر قیمت می‌تواند پروژه را آغاز کند و با چه روش یا گزینه‌ای باید معدن را توسعه دهد.



شکل ۲-۱۲- نمودار کلی رفتار NPV در محدوده‌های مختلف (Akbari, et al., 2008)

اندازه ذخایر فلزی برخلاف ذخایر نفت و گاز، در برابر نوسانات قیمتی ثابت نیست و با تغییر قیمت عیار حد اقتصادی نیز تغییر می‌کند، بنابراین در ابتدا این مشکل باید مدیریت شود. روش اشاره شده می‌تواند مشکل داشتن ذخایر بی‌ثبات در برابر نوسانات قیمت را کاهش داده و پیش زمینه‌ای به منظور توسعه‌ی روش‌های مدیریت عدم قطعیت از طریق یافتن محدوده‌های عملیاتی فراهم آورد. لذا برای کنترل مشکل ناپایداری ذخیره در برابر نوسانات قیمت، راه‌های اجرایی یا در حقیقت گزینه‌های متنوع ایجاد شده‌اند. با استفاده از مراحل زمانی ناپیوسته در فرآیند مدل‌سازی عدم قطعیت، پله‌های مبهمی از محدوده‌های عملیاتی به دست می‌آید که در برخی موارد نمی‌تواند دقیقاً آستانه‌ی مورد قبول قیمت برای سرمایه‌گذاری را نشان دهد، بنابراین محاسبات باید بر پایه‌ی زمان پیوسته انجام شود. این کار با در نظر گرفتن راهبردهای اجرایی بیشتر، به عنوان گزینه‌های اضافی برای توسعه‌ی پروژه انجام شده است. با استفاده از نمودارها طراحان معدن می‌توانند محدوده نهایی معدن را در زمان‌های مختلف و با قیمت‌های مختلف را تعیین کنند (Akbari, et al., 2008).

لی^۱ و نایتس^۲ از روش اختیارات حقیقی در برنامه‌ریزی معدن استفاده کردند. مدل بازگشت به میانگین^۳ را برای شبیه‌سازی قیمت سوخت مصرفی به کار برده و عدم قطعیت اقتصادی را در تصمیمات استراتژیک در برنامه‌ریزی معدن لحاظ کردند (Li & Knights, 2009). برای شبیه‌سازی قیمت سوخت، فرآیند عکس میانه به صورت رابطه (۲-۴۲) مدل‌سازی شده است:

$$dS = \eta(\mu - \ln S)Sdt + \sigma Sdz \quad (۲-۴۲)$$

که در آن S قیمت کالا؛ η سرعت بازگشت؛ μ لگاریتم قیمت تعادل؛ σ انحراف معیار؛ dz افزایش یک فرآیند وینر است که برابر با $\varepsilon_t dt$ می‌باشد. به طور خلاصه مراحل اجرای روش پیشنهاد شده به شرح زیر است (Li & Knights, 2009):

۱- تخمین قیمت سوخت با استفاده از مدل عکس میانه برای هر بازه‌ی زمانی؛

¹ LI

² Knights

³ mean-reverting model

- ۲- به دست آوردن مدل قیمت سوخت در هر بازه‌ی زمانی؛
- ۳- اگر قیمت سوخت به مقدار بیشتر از سطح بحرانی افزایش یابد و برای یک دوره‌ی طولانی ادامه داشته باشد، به کارگیری طرح اول برای اعزام کامیون انجام خواهد شد؛
- ۴- اگر قیمت سوخت به مقدار کمتر از سطح بحرانی بالایی کاهش یابد، طرح اعزام کامیون به حالت طبیعی باز خواهد گشت؛
- ۵- اگر قیمت سوخت به مقدار کمتر از سطح بحرانی پایینی کاهش یابد، طرح دوم اعزام کامیون باید استفاده شود. یعنی جابجایی مواد به محل دپوهای در حال پر شدن به منظور برقراری تعادل ظرفیت‌ها تا زمانی که تعادل حاصل شود؛
- ۶- زمانی که تعادل حاصل شد، یا قیمت سوخت به مقدار بیشتر از سطح بحرانی رسید، طرح اعزام کامیون به حالت طبیعی باز خواهد گشت؛
- ۷- همچنانکه قیمت سوخت نوسان می‌کند، فرآیندهای ۳ تا ۷ تکرار می‌شوند.
- کومرال یک روش بهینه‌سازی تصادفی استوار را برای برنامه‌ریزی تولید معدن به کار برده که نسبت به تغییرات داده‌های ورودی حساس نباشد. هدف بهینه‌سازی تصادفی استوار تنها بهینه‌سازی تابع هدف نیست، بلکه به دنبال یک حل استوار نیز است. روش به دنبال یک حالت بینابینی بهینگی و امکان‌شدنی است. مساله برنامه‌ریزی تولید معدن می‌تواند با استفاده از علائم زیر فرمول‌بندی شود: T تعداد دوره‌ها، N تعداد بلوک‌ها، V_{ij} درصد ارزش بلوک j در دوره‌ی i ، n نرخ کاهش بها، d_j حجم کانه در بلوک j ، A ظرفیت فرآوری، v_j حجم باطله در بلوک j و C ظرفیت معدنکاری است (Kumral, 2010).

$$\text{Max} \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N V_{ij}(m) * x_{ij} \quad (43-2)$$

$$m = \begin{cases} 1 & \text{اگر عیار بلوک} \leq \text{حد عیار اقتصادی} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (44-2)$$

$$V_{ij}(1) = \left(\begin{array}{l} \text{عیار بلوک } z * \text{تناژ کانسنگ بلوک } z * \text{بازیابی} * \text{هزینه‌های فروش} - \text{قیمت} \\ - \left[\text{تناژ بلوک } z * \text{هزینه‌ی فرآوری} + \text{هزینه‌ی معدنکاری} \right] \\ * (1+n)^{-i} \end{array} \right) \quad (45-2)$$

$$V_{ij}(0) = - \left(\text{تناژ بلوک } z * \text{هزینه‌ی معدنکاری} \right) * ((1+n)^{-i}) \quad (46-2)$$

$$x_{ij} \begin{cases} 1 & \text{اگر بلوک در دوره } i \text{ تولید داشته است} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (47-2)$$

محدودیت‌ها به شرح زیر بررسی می‌شوند:

محدودیت دسترسی: به منظور دسترسی به یک بلوک برای استخراج، بلوک‌های بالاسری نیز یا باید زودتر یا در همان دوره استخراج شوند.

$$\sum_{i=1}^T x_{ki} \geq \sum_{i=1}^T x_{ji} \quad \text{به ازای بلوک‌هایی که بالای بلوک } j \text{ قرار دارند} \quad (48-2)$$

ظرفیت معدن: با توجه به تجهیزات انتخاب شده، قدرت مالی شرکت، نرخ باطله‌برداری، مشخصات کانسار و میزان تقاضا انتخاب می‌شود.

$$\sum_{j=1}^N (d_j + v_j)x_{ij} - C \leq 0 \quad i = 1, \dots, T \quad (49-2)$$

ظرفیت فرآوری: در عملیات معدنکاری، ماده معدنی و باطله با توجه به محدودیت دسترسی، استخراج می‌شوند. سنگ باطله به محل انباشت باطله فرستاده می‌شوند و ماده معدنی به کارخانه فرآوری فرستاده می‌شود. مقدار ماده معدنی باید تقاضای ظرفیت فرآوری را برآورده کند.

$$\sum_{j=1}^N d_j x_{ij} - A \leq 0 \quad i = 1, \dots, T \quad (50-2)$$

محدودیت کنترل تعداد دفعات استخراج یک بلوک: این محدودیت، اطمینان حاصل می‌کند که یک بلوک، تنها یک بار استخراج می‌شود.

$$\sum_{i=1}^T x_{ij} \leq 1 \quad j = 1, \dots, N \quad (51-2)$$

بسته به محدودیت‌های بازار و ویژگی‌های تجهیزات، برخی محدودیت‌های دیگر مانند محدودیت مربوط به اختلاط می‌توانند افزوده شوند. پارامترهای اقتصادی مانند قیمت به مجموعه‌ای از رخدادهای ناشناخته‌ی آینده بستگی دارند و می‌توانند به وسیله‌ی فرآیندهای تصادفی مدل‌سازی شوند. از سوی دیگر، عیار بلوک‌ها به وسیله‌ی شبیه‌سازی شرطی با استفاده از داده‌های به دست آمده از گمانه‌ها قابل تعیین است. با شناسایی این متغیرهای غیرقطعی، سناریوهای احتمالی تولید می‌شوند. هر سناریو منجر به نرخ تولید و NPV متفاوت حاصل از انجام عملیات معدنکاری می‌شود. عدم قطعیت داده‌ها ممکن است زمانی که مدل‌های ارزیابی به کار گرفته می‌شوند، موجب بروز مشکلاتی در کیفیت، بهینگی و انعطاف‌پذیری شوند. بنابراین لازم است تا یک راه‌حل تولید شود که در برابر عدم قطعیت داده‌ها ایمن بوده و به عبارت دیگر، راه‌حل باید استوار باشد. هدف بهینه‌سازی استوار نه تنها بیشینه/کمینه کردن توابع هدف بلکه به دست آوردن یک راه‌حل استوار است. به عبارت دیگر، بهینه‌سازی استوار تلاش می‌کند تا یک راه‌حل را تولید کند، که به نوسان داده‌های ورودی حساس نباشد. تفاوت‌های مهمی بین برنامه‌ریزی تصادفی و بهینه‌سازی استوار وجود دارد. در برنامه‌ریزی تصادفی، یک تصمیم گرفته می‌شود و سپس یک تحلیل حساسیت برای ایجاد اصلاحات لازم اجرا می‌شود. برخلاف برنامه‌ریزی تصادفی، بهینه‌سازی استوار یک پیشنهاد منفعل است که به عدم قطعیت اجازه می‌دهد تا مورد قبول واقع شده، درک و ارزیابی شود. تغییرپذیری به صورت نوسانات ارزش اقتصادی بلوک از مقدار مورد انتظار بیان می‌شود. این روش با افزودن بخش‌هایی به تابع هدف قابل انجام است. فرض کنید $\|o\|$ ، میانگین 0 باشد، S تعداد کلی سناریوها، P_s احتمال سناریوی s است. در تحقیق انجام شده، عیار بلوک، قیمت ماده معدنی و هزینه‌های معدنکاری و فرآوری برای تولید احتمالات استفاده می‌شوند. λ وزن لازم برای سنجش ریسک بین NPV مورد انتظار و سناریوهاست، w_i و z_i ، به ترتیب وزن‌های جریمه‌ای به دلیل انحراف ظرفیت‌های معدنکاری و فرآوری برای دوره‌ی i است. برنامه‌ریزی تولید معدن به شیوه استوار به

صورت زیر ارائه شده است:

$$\begin{aligned}
 & \text{Max} \sum_{s=1}^S P_s \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N V_{sij}(m) * x_{ij} \\
 & - \lambda \sum_{s=1}^S P_s \left\| \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N V_{sij}(m) * x_{ij} - \left(\sum_{s=1}^S P_s \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N V_{sij}(m) * x_{ij} \right) \right\| \\
 & - \sum_{s=1}^S P_s \sum_{i=1}^T \omega_i \left\| \sum_{j=1}^N (d_{sj} + V_{sj}) x_{ij} - C \right\| \\
 & - \sum_{s=1}^S P_s \sum_{i=1}^T \psi_i \left\| \sum_{j=1}^N d_{sj} x_{ij} - A \right\|
 \end{aligned} \tag{۵۲-۲}$$

به شرط این که:

$$\sum_{i=1}^T x_{ki} \geq \sum_{i=1}^T x_{ji} \quad k \text{ به ازای بلوک‌های بالاسری بلوک } k \tag{۵۳-۲}$$

$$\sum_{i=1}^T x_{ij} \leq 1 \quad j = 1, \dots, N \tag{۵۴-۲}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad i = 1, \dots, T \text{ و } j = 1, \dots, N \tag{۵۵-۲}$$

$$\lambda, W_i, \psi_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, T \tag{۵۶-۲}$$

بخش اول تابع هدف که در رابطه (۵۲-۲) نشان داده شده مقدار مورد انتظار NPV است. بخش دوم، هزینه‌ی برآورد ریسک NPV است. اگر NPV در سناریوها دارای نوسان شدید باشند، مقدار این مورد افزایش می‌یابد. بخش سوم تابع هدف انحراف بین ظرفیت معدنکاری و نرخ استخراج را نشان می‌دهد. بخش چهارم هزینه انحراف از ظرفیت فرآوری است. دو بخش آخر تابع هدف به بهینه‌سازی تصادفی استوار اشاره دارد (Kumral, 2010).

عبدل صبور و دیمیتراکوپولوس سیستمی برای انتخاب طرح بهینه معدن، تحت شرایط عدم قطعیت ارائه کردند (Abdel Sabour & Dimitrakopoulos, 2011). در این مطالعه طرح‌های مختلف معدن بر پایه‌ی شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. سیستم انتخاب طراحی معدن که در این کار

پیشنهاد شده است، چندین منبع عدم قطعیت را با انعطاف‌پذیر کردن عملیات لحاظ کرده است که محدوده نهایی معدن با استفاده از اطلاعات جدید، قابل اصلاح است. سیستم پیشنهادی شامل سه مرحله‌ی اساسی تعریف عدم قطعیت، ارزیابی طرح‌ها و رتبه‌بندی طرح‌ها است. برای تعریف عدم قطعیت زمین‌شناسی، شبیه‌سازی شرطی کانسار بر اساس داده‌های گمانه‌های اکتشافی انجام شده است. عدم قطعیت قیمت با استفاده از مدل‌سازی تصادفی و برپایه‌ی تاریخچه‌ی رفتار بازار سنجیده شده است. مدل‌های تصادفی بر پایه مدل حرکت براونی (GBM) در رابطه (۵۷-۲) و مدل عکس میانه (MRP) در رابطه (۵۸-۲) آورده شده است.

$$\frac{dP}{P} = \alpha dt + \sigma dz \quad (57-2)$$

$$\frac{dP}{P} k(\mu - \ln P)dt + dz \quad (58-2)$$

که در آن P قیمت، α رویه‌ی مورد انتظار، σ انحراف معیار، dz افزایش در یک فرآیند وینر استاندارد و dt افزایش زمان است. در رابطه (۵۸-۲)، μ لگاریتم سطح تعادل طولانی مدت قیمت فلز و k سرعت بازگشت است. مزیت مدل‌های ساده‌ی ارائه شده در روابط (۵۷-۲) و (۵۸-۲) در مقایسه با مدل‌های پیچیده‌تر این است که پارامترهای مدل می‌توانند به راحتی با استفاده از داده‌های تاریخی موجود تخمین زده شوند.

برای ارزش‌گذاری طرح‌های معدن مدل ارزش‌گذاری اقتصادی برپایه‌ی ارزش‌گذاری اختیارات حقیقی و با استفاده از روش مونت کارلو استفاده شده است. فرض می‌شود که M طرح مختلف و ممکن برای معدن وجود دارد. برای متغیرهای اقتصادی N تحقق با استفاده از مدل‌های تصادفی تولید شده است. تصمیم این‌که آیا محدوده‌های تعریف شده پیت حفظ و یا اصلاح شود، بر اساس مقدار ارزش مورد انتظار (CV)، بر طبق روابط زیر بررسی می‌شود:

محدوده‌های نهایی پیت که از پیش تعریف شده‌اند، حفظ شود اگر:

$$E(CV : n, t) > 0 \quad (59-2)$$

محدوده‌های نهایی پیت که از پیش تعریف شده‌اند، اصلاح شوند اگر:

$$E(CV : n, t) \leq 0 \quad (۶۰-۲)$$

طبق روابط (۲-۵۹) و (۲-۶۰) اگر مقدار کنونی مورد انتظار در زمان t و مسیر نمونه‌ی Ω مثبت باشد، تصمیم بهینه حفظ محدوده‌های نهایی پیت تا زمان تصمیم‌گیری بعدی خواهد بود. در غیر این صورت، اگر مقدار کنونی مورد انتظار منفی است، طرح اصلی باید اصلاح شود. این فرآیند از طریق N مسیر شبیه‌سازی شده در هر دوره اجرا می‌شود و جریان‌های نقدینگی مربوطه به دست آمده‌اند. این اطلاعات برای رتبه‌بندی طراحی‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از تخمین امتیازها برای هر طرح، رتبه‌بندی کلی به دست می‌آید و بر اساس آن طرح‌ها با بیشترین امتیاز شناسایی می‌شوند (Abdel Sabour & Dimitrakopoulos, 2011).

گروونولد^۱ و توپال^۲ در تحقیقی با عنوان طراحی انعطاف‌پذیر معدن روباز در شرایط عدم قطعیت سعی کردند عدم قطعیت پارامترهای اقتصادی را در طراحی معدن وارد نمایند. آن‌ها از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید ورودی‌های غیرقطعی به مدل استفاده کردند. با انجام شبیه‌سازی و اجرای چندین باره‌ی مدل یک پایگاه داده از طراحی‌های بهینه برای "یک وضعیت مشخص" تولید کردند. با تغییر در ظرفیت استخراج معدن، ظرفیت پیش‌فراوری، ظرفیت فراوری (ظرفیت سنگ‌شکن‌ها یا ظرفیت نوار نقاله‌ها) گزینه‌های متعدد تولید شده و این مجموعه‌ی داده برای انتخاب بهترین الگوی بازگشت سرمایه استفاده شده است (Groeneveld & Topal, 2011).

ایوات^۳ و همکاران روشی برای تخمین ذخیره معدن با لحاظ کردن عدم قطعیت قیمت ماده معدنی پیشنهاد کردند. آن‌ها تمرکز بر قیمت در مطالعه خود را به این دلیل توضیح داده‌اند که قیمت هم عامل اصلی جریان‌های نقدینگی است و هم معمولاً در مقایسه با سایر عوامل اقتصادی که جریان نقدینگی را تحت تاثیر قرار می‌دهند دارای درجه بالاتر عدم قطعیت است. همچنین به این دلیل است

¹ Groeneveld

² Topal

³ Evatt

که قیمت، یک عدم قطعیت بیرونی است و برای یک شرکت معدنکاری اجتناب از آن یا تغییر آن دشوار خواهد بود. بدیهی است تخمین ذخیره صحیح زیربنای برنامه‌ریزی تولید صحیح است. آن‌ها برای در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت در تخمین ذخیره از فرضیه‌ی متداول در مطالعات مالی، با در نظر گرفتن رفتار قیمت S_t که به شکل کلی زیر تعریف می‌شوند استفاده کردند (Evatt, et al., 2012):

$$dS_t = a(S_t, t)dt + b(S_t, t)dB \quad (۶۱-۲)$$

که در آن a تغییر تدریجی قیمت، b بی‌ثباتی قیمت و B یک فرآیند وینر است.

دهقانی و عطایی پور عدم قطعیت قیمت و هزینه عملیاتی را در ارزیابی ارزش پروژه معدنی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از روش درخت دوجمله‌ای برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت استفاده کردند. ارزش اقتصادی بلوک در دوره‌های مختلف را به دست آورده و بر اساس آن ارزش خالص فعلی را محاسبه و نتایج به دست آمده را با روش DCF سنتی مقایسه کردند. مطالعه موردی انجام شده مقدار NPV پروژه با استفاده از روش درخت دو جمله‌ای را نسبت به روش قطعی بالاتر نشان داده است. (Dehghani & Ataee-pour, 2012).

اسد و دیمیتراکوپولوس از الگوریتم حداکثر جریان پارامتری برای طراحی بهینه معدن روباز در شرایط عدم قطعیت بازار و ذخیره استفاده کردند. آن‌ها یک شیوه جدید ارائه داده‌اند که عدم قطعیت مقدار فلز و قیمت را توأم در نظر گرفته و ارزش تنزیل یافته وابسته به زمان بلوک‌های استخراجی در زمان طراحی فازهای بهینه و محدوده نهایی بهینه را (با رعایت کردن محدودیت‌های ظرفیت تولید) ترکیب کرده‌اند. آن‌ها در تحقیق خود ساختار گراف که چهارچوب تصادفی ارائه می‌دهد را پیشنهاد داده و با استفاده از یک الگوریتم حداکثر جریان پارامتری آن را حل کردند. برنامه‌ریزی تولید بلندمدت شامل دو بخش اصلی طراحی فازهای بهینه استخراجی و زمان‌بندی استخراج بلوک‌های داخل فازهای طراحی شده در هر فاز است. اسد و همکاران تنها بخش اول که طراحی فازهای بهینه و محدوده نهایی است را انجام دادند. الگوریتم حداقل برش^۱ تعداد بلوک‌های باطله در پیت معدن را حداقل کرده و همزمان تعداد

^۱ Minimum cut algorithm

بلوک‌های ماده معدنی را بیشینه می‌کند. برای محاسبه تغییر قیمت از روش بازگشت به میانگین استفاده

کرده که رابطه آن به شرح رابطه (۶۲-۲) است (Asad & Dimitrakopoulos, 2013):

$$dP = n(P^* - P)dt + \sigma\omega\sqrt{dt} \quad (۶۲-۲)$$

که در آن پارامترها به شرح زیر تعریف شده‌اند:

dP : تغییر قیمت در یک دوره

n : سرعت برگشت قیمت به تراز تعادل بعد از یک شوک در بازار

P* : قیمت تعادل بلند مدت

P : قیمت فعلی یا اولیه

dt : دوره زمان

σ : انحراف معیار قیمت

ω : عدد تصادفی

سپس ارزش اقتصادی تنزیل نیافته بلوک‌ها را برای هر تحقق عیاری و قیمتی محاسبه و برای هر بلوک

متوسط ارزش تنزیل نیافته را به دست آوردند. ارزش تنزیل نیافته بلوک i در هر دوره با رابطه (۶۳-۲)

قابل محاسبه است:

$$ubV_{\pi\gamma i} = (P_{\pi} - r)Q_i g_{\gamma i} y - mQ_i - pQ_i \quad (۶۳-۲)$$

ارزش متوسط تنزیل نیافته بلوک i برای هر دوره با استفاده از رابطه (۶۴-۲) محاسبه می‌شود:

$$bV_{\gamma i} = \frac{\sum_{\pi=1}^{\Pi} ubV_{\pi\gamma i}}{\Pi} \quad (۶۴-۲)$$

به گونه‌ای که اگر $bV_{\gamma i}$ کوچکتر یا مساوی صفر باشد (بلوک i بلوک باطله باشد) مقدار آن برابر با منفی

mQ_i خواهد بود. ارزش تنزیل یافته بلوک i از رابطه (۶۵-۲) قابل محاسبه است:

$$dbV_{\gamma ti} = \frac{bV_{\gamma i}}{(1 + d)^t} \quad (۶۵-۲)$$

در روابط فوق پارامترها به شرح زیر می‌باشند:

i : اندیس بلوک

t : اندیس دوره

γ : اندیس تحقق عیار

π : اندیس تحقق قیمت

$ubV_{\pi\gamma i}$: ارزش تنزیل نیافته بلوک i در تحقق عیار γ و تحقق قیمت π

$bV_{\gamma i}$: ارزش متوسط بلوک i در دوره t و تحقق عیار γ

$dbV_{\gamma i}$: ارزش تنزیل یافته بلوک i در دوره t و تحقق عیار γ

Q_i : تناژ بلوک i

$g_{\gamma i}$: عیار بلوک i در تحقق γ

P : قیمت فعلی یا اولیه

y : بازیابی کلی

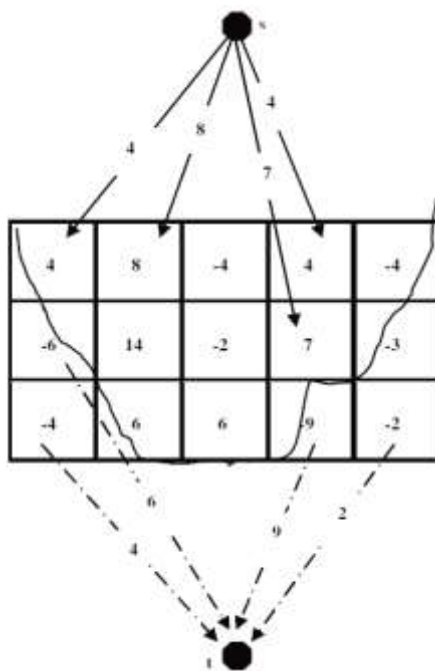
m : هزینه معدنکاری بر تن استخراجی

p : هزینه فرآوری بر تن ماده معدنی

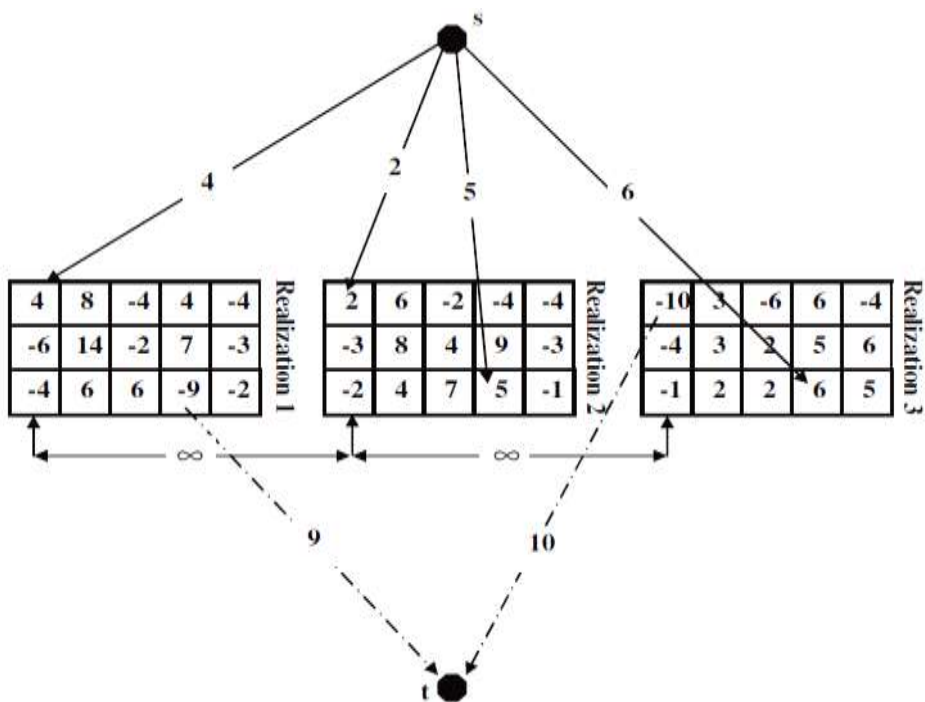
r : هزینه تغلیظ بر تن فلز

d : نرخ تنزیل

با محاسبه ارزش اقتصادی تنزیل یافته هر بلوک در هر تحقق و هر دوره زمانی، تعداد داده‌های ورودی (ارزش اقتصادی بلوک‌ها) برابر با حاصل ضرب تعداد بلوک‌ها در تعداد تحقق عیاری در تعداد دوره زمانی شده و ساختار گراف شامل تحقق چندگانه ارزش بلوک‌ها بر اساس آن تهیه می‌شوند. در شکل ۲-۱۳ نمای شماتیک ساختار یک گراف در یک تحقق شامل ۱۵ بلوک نشان داده شده است. محدوده نهایی که در شکل مشخص شده از الگوریتم حداقل برش به دست آمده است. شکل ۲-۱۴ نمای شماتیک ساختار گراف در تحقق چندگانه را نشان می‌دهد (Asad & Dimitrakopoulos, 2013).



شکل ۲-۱۳- نمای شماتیک ساختار یک گراف در یک تحقق (Asad & Dimitrakopoulos, 2013).



شکل ۲-۱۴- نمای شماتیک ساختار گراف در تحقق چندگانه (Asad & Dimitrakopoulos, 2013).

در یک چهارچوب تصادفی تعداد گره‌ها و کمان‌ها بیشتر از تعداد آن‌ها در چهارچوب قطعی است. لذا الگوریتم حداکثر جریان حجم بیشتری از داده‌ها را باید مورد پردازش قرار دهد. در تحقیق مذکور برای

استفاده از الگوریتم حداکثر جریان، تابع هدف و محدودیت‌ها به شکل روابط زیر استفاده شده است:

$$\text{Maximize: } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T c_{it} x_{it} \quad (66-2)$$

$$\text{Subject to: } x_{it} - x_{i't} \leq 0, \quad (67-2)$$

$$i' \in \xi_i \text{ for } t \leq T, \text{ and } i \in V \forall t.$$

$$\sum_{i=1}^I Q_i x_{it} \leq b_t, \forall t. \quad (68-2)$$

$$x_{it} \in \{0, 1\}, i \in V \forall t, \text{ and } \sum_{i=1}^I x_{it} \leq 1, \forall i. \quad (69-2)$$

که در آن پارامترها به شرح زیر می‌باشند:

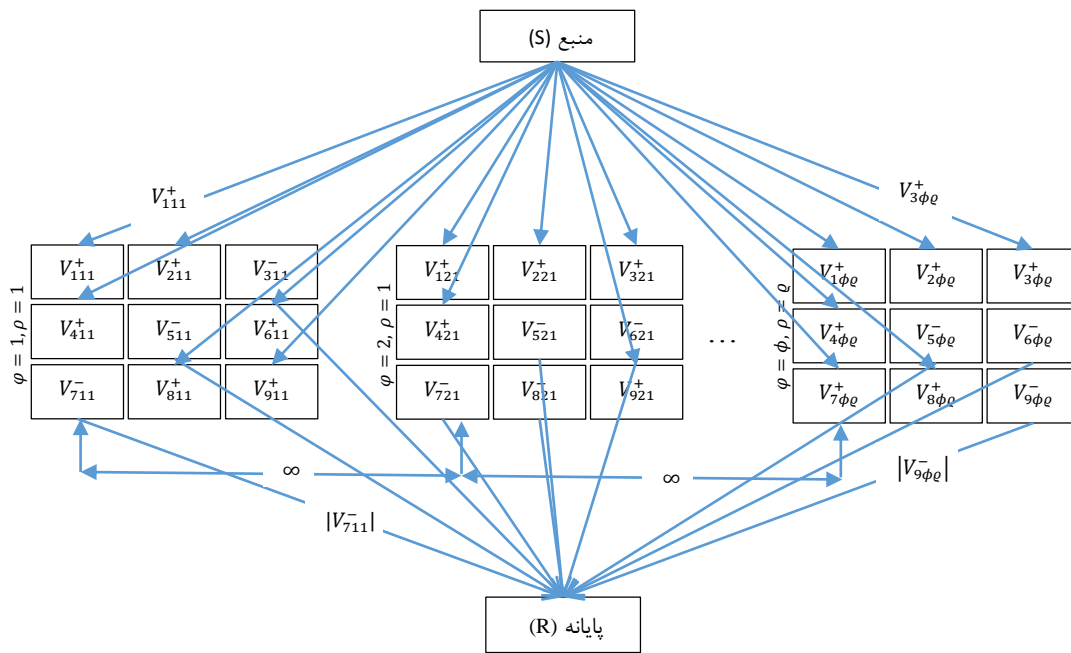
b_t : ظرفیت تولید معدن در دوره t بر حسب تن

x_{it} : متغیر باینری نشان دهنده گره i در دوره t

Q_i : مقدار مواد موجود در بلوک i

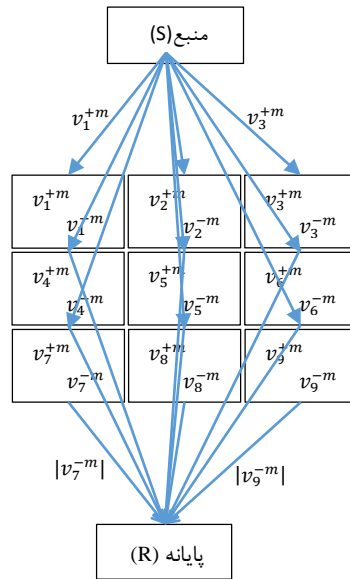
c_{it} : ارزش بلوک i در دوره t

در شکل ۱۵-۲ یک نمای دو بعدی از ساختار گراف با وجود سناریوهای متعدد از ارزش اقتصادی بلوک‌ها نشان داده شده است. برای هر یک از دوره‌های زمانی، ساختار گراف مطابق با نمودار شکل ۱۵-۲ ساخته می‌شود. در این ساختار چنانچه $v_{i\varphi}$ بزرگتر از صفر باشد، گره مربوطه به منبع و در غیر این صورت به پایانه وصل می‌شود. در این حالت ظرفیت کمان‌هایی که به منبع متصل شده‌اند برابر با $v_{i\varphi}$ و ظرفیت کمان‌هایی که به پایانه متصل شده‌اند برابر با قدر مطلق $v_{i\varphi}$ است. یک بلوک ممکن است در یک تحقق به عنوان ماده معدنی و در یک تحقق دیگر به عنوان باطله شناخته شود. برای اطمینان از این که یک بلوک در تمام سناریوها در یک طرف برش قرار بگیرد، از کمان‌های دو جهته با ظرفیت بینهایت برای اتصال بلوک‌های همسان در سناریوهای مختلف استفاده شده است (Asad & Dimitrakopoulos, 2013).



شکل ۲-۱۵- ساختار گراف در تحقیق‌های چندگانه (Asad & Dimitrakopoulos, 2013)

در ساختار گراف، کمان‌های دو جهته امکان ادغام کردن گره‌ها در یک گره را به وجود می‌آورند. در این صورت هر گره می‌تواند نشان دهنده یک بلوک خاص در تحقیق‌های مختلف باشد. گره‌های ادغام شده نیاز به کمان‌های دو جهته را از بین برده و این موضوع باعث می‌شود تعداد گره‌ها به طور چشمگیری کاهش یافته و در نتیجه مساله از حالت قبل بسیار ساده‌تر شود. در این حالت صرف نظر از تعداد تحقیق‌های عیار و قیمت، تعداد گره‌ها ثابت می‌ماند. ظرفیت کمان‌های جدید از مجموع ظرفیت کمان‌ها در تمام سناریوها محاسبه می‌شوند. اگر یک بلوک در یک تحقیق به عنوان ماده معدنی و در یک تحقیق دیگر به عنوان باطله شناسایی شود، در این صورت ظرفیت کمان‌ها از منبع به گره بر اساس مجموع ظرفیت‌های کمان‌های متصل شده از منبع به گره و ظرفیت کمان‌ها از گره به پایانه بر اساس مجموع ظرفیت کمان‌ها از گره به پایانه در تحقیق‌های مختلف قابل محاسبه خواهد بود. ساختار گراف ساده شده در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است. این نوع گراف ادغام شده برای هر یک از دوره‌های زمانی باید تهیه شود. لذا تعداد این گراف‌ها معادل تعداد دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی تولید خواهد بود.

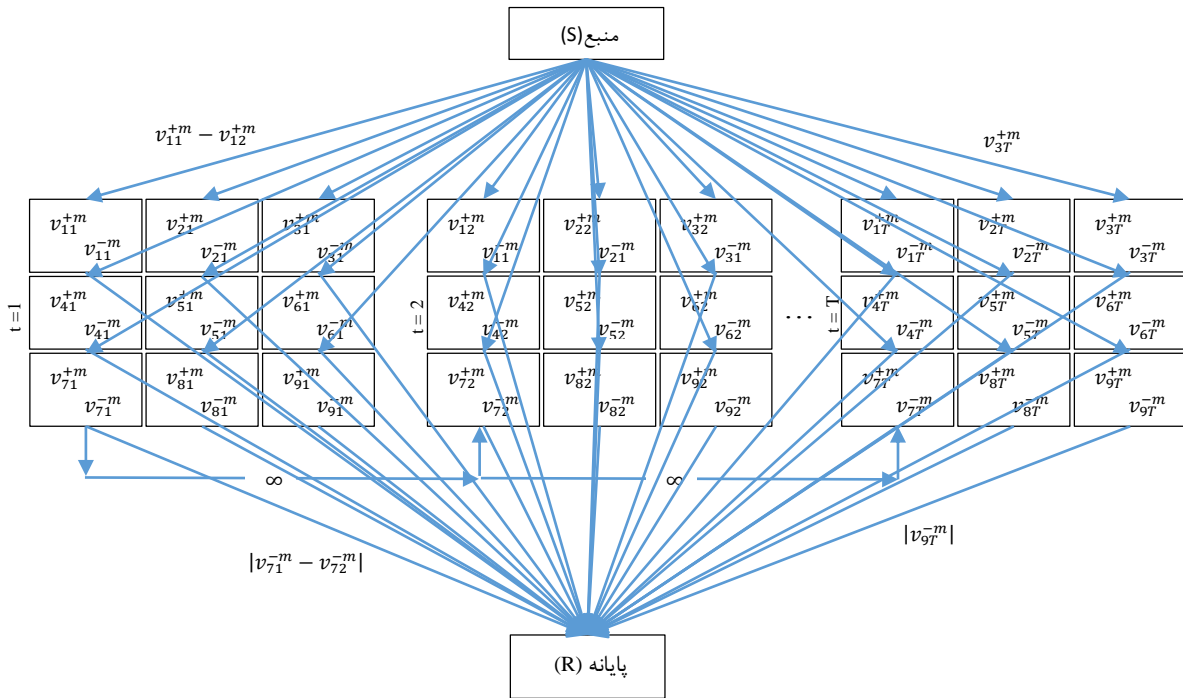


شکل ۲-۱۶- ساختار شماتیک گراف ادغام شده در تحقیق‌های چندگانه (Asad & Dimitrakopoulos, 2013)

برای محاسبه ارزش خالص فعلی استخراج معدن، ارزش اقتصادی تنزیل یافته بلوک‌ها باید محاسبه شوند. در واقع ارزش اقتصادی بلوک‌ها در زمان برنامه‌ریزی ملاک محاسبه ارزش خالص فعلی پروژه می‌باشند. ارزش تنزیل یافته هر بلوک در T دوره زمانی طبق رابطه (۲-۷۰) قابل محاسبه است:

$$v_{it} = \begin{cases} v_{it}^{+m} = \frac{v_i^{+m}}{(1+d)^t}; & \text{if } v_{it} > 0 \\ v_{it}^{-m} = \frac{v_i^{-m}}{(1+d)^t}; & \text{if } v_{it} \leq 0 \end{cases} \quad (2-70)$$

با محاسبه ارزش تنزیل یافته بلوک‌ها برای هر دوره زمانی در ساختار گراف مربوطه، و ترکیب ساختارهای ایجاد شده، ساختار نهایی گراف به شرح شکل ۲-۱۷ قابل بیان است. با حل این گراف با استفاده از الگوریتم حداکثر جریان، محدوده نهایی و فازهای استخراجی معدن شناسایی می‌شوند.



شکل ۲-۱۷- ساختار گراف با ارزش تنزیل یافته بلوک‌ها (Asad & Dimitrakopoulos, 2013)

روش لرچ و گروسمن تنها می‌تواند مدل تخمینی میانگینی کانسار را در نظر بگیرد و به دلیل حساس بودن به توزیع ماده معدنی و باطله در بلوک‌ها در داده‌های ورودی از استواری برخوردار نیست (Chatterjee, et al., 2016). مدل جریان شبکه برای تعیین محدوده نهایی بهینه معدنکاری روباز، بر پایه‌ی تئوری حداکثر جریان شبکه و حداقل میزان برداشت، بنا شده است. در این روش شبکه‌ای با پایانه‌های ورودی و خروجی ساخته می‌شود. هر گره نماینده یک بلوک بوده که بسته به مثبت یا منفی بودن ارزش خود به ترتیب به پایانه ورودی و خروجی متصل می‌شوند. بلوک‌های ماده معدنی نیز با توجه به زاویه شیب معدن به گونه‌ای به بلوک‌های باطله فوقانی خود متصل می‌شوند که هر کدام نماینده یک مخروط قابل اجرا باشند. در تحلیل جریان شبکه، مدل بلوکی کانسار با یک شبکه نشان داده می‌شود که مرکب از اجزای زیر است (عطایی و حسینی، ۱۳۹۰):

- یک گره منبع و یک گره پایانه.
- یک گره برای هر بلوک در مدل.
- اتصالات یا کمان‌ها با ظرفیت‌های معادل ارزش بلوک‌های متناظر که هر یک از بلوک‌های دارای

ارزش مثبت را به گره منبع متصل می‌کند.

▪ اتصالات با ظرفیت‌های معادل ارزش بلوک‌های متناظر که هریک از بلوک‌های دارای ارزش صفر

یا منفی را به گره پایانه متصل می‌کند.

▪ اتصالاتی با ظرفیت بی‌نهایت که بلوک‌های مثبت را به بلوک‌های صفر یا منفی وصل می‌کنند

تا دسترسی به آن‌ها امکان پذیر شود.

هدف از تحلیل، بیشینه کردن مقدار جریان از گره منبع به گره پایانه است. جریان بین دو گره از رابطه

(۷۱-۲) محاسبه می‌شود:

$$c_{it} = |dbV(i, t) - dbV(i, t + 1)| \quad (۷۱-۲)$$

هریک از اتصالات چنان جهتی دارد که همه جریان به سوی گره پایانه باشد. هنگامی که تحلیل کامل

می‌شود، اتصالاتی که از منبع آغاز شده‌اند و ظرفیت اضافی دارند نماینده‌ی بلوک‌های مثبتی هستند که

می‌توان آن‌ها را همراه با سود استخراج کرد. رابطه ریاضی آن به شرح زیر است (Hochbaum, 2003):

$$\text{Maximize: } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T c_{it} x_{it} \quad (۷۲-۲)$$

Subject to:

$$x_{it} - x_{i't} \leq 0, i' \in \varepsilon_i \text{ for } t \leq T, \text{ and } i \in V \forall t \quad (۷۳-۲)$$

$$\sum_{i=1}^I Q_i x_{it} \leq b_t, \quad \forall t. \quad (۷۴-۲)$$

$$x_{it} \in \{0,1\}, i \in V \forall t, \text{ and } \sum_{t=i}^T x_{it} \leq 1, \forall i \quad (۷۵-۲)$$

که در آن Q_i مقدار مواد موجود در بلوک i ، b_t ظرفیت تولید پیت در دوره t و x_{it} متغیر باینری نشان

دهنده گره i در دوره t می‌باشند. x_{it} یک متغیر باینری است که چنانچه گره i در محدوده برداشت قرار

گیرد مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. تابع فوق می‌تواند محدوده نهایی معدن را

تعیین کند. برای تعیین پوشش‌های استخراجی از روش پارامتری استفاده می‌شود که تابع هدف در

حالت پارامتری به شکل زیر تعریف می‌شود (Asad & Dimitrakopoulos, 2013):

$$\text{Maximize: } Z(\lambda) = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [[c_{it} - \lambda_t Q_i] x_{it}] + \sum_{t=i}^T \lambda_t b_t \quad (76-2)$$

Subject to:

$$x_{it} - x_{i't} \leq 0, i' \in \varepsilon_i \text{ for } t \leq T, \text{ and } i \in V \forall t \quad (77-2)$$

$$x_{it} \in \{0,1\}, i \in V \forall t, \text{ and } \sum_{t=i}^T x_{it} \leq 1, \forall i \quad (78-2)$$

که در روابط فوق λ ضریب لاگرانژی، x_{it} یک عدد باینری، b دسترس پذیری منبع است. برای تعیین فازهای استخراجی معدن الگوریتم حداکثر جریان پارامتری به شرح زیر اجرا می‌شود:

۱- تشکیل ساختار گراف با کمان‌هایی به ظرفیت بینهایت

۲- تخصیص مقدار اولیه صفر به λ در تکرار τ

۳- بروزرسانی ارزش تنزیل یافته بلوک i به شکل رابطه زیر:

$$dbV_{it} = [dbV_{it} - \lambda_t Q_i] \quad (79-2)$$

۴- تعیین ارزش گره به صورت زیر:

$$c_{it}(\lambda) = |dbV(i, t) - dbV(i, t + 1)| \quad \text{if } t < T \quad (80-2)$$

$$c_{it}(\lambda) = |dbV(i, t)| \quad \text{if } t = T \quad (81-2)$$

۵- بروزرسانی گراف با اضافه کردن کمان از منبع به گره اگر $c_{it}(\lambda) > 0$ و از گره به پایانه اگر $c_{it}(\lambda) \leq 0$.

۶- حل این گراف با استفاده از الگوریتم حداکثر جریان برچسب‌گذاری. اگر $\tau = 1$ بردار حل $x_{it}(\lambda_\tau^t)$ محدوده نهایی است. در غیر این صورت، بردار یک فاز است.

۷- اگر میزان مواد در داخل پیت یا فاز کمتر یا مساوی ظرفیت تولید پیت است، توقف تکرار و در غیر این صورت برو به مرحله بعد.

۸- قرار دادن $\tau = T + 1$ و ارزیابی مقادیر جدید λ . برو به مرحله ۳.

مهمترین ضعف روش به کار برده شده توسط اسد و دیمیتراکوپولوس که بر مبنای روش‌های سری‌های زمانی است، وابسته بودن کامل قیمت به تاریخچه قیمت‌های گذشته است.

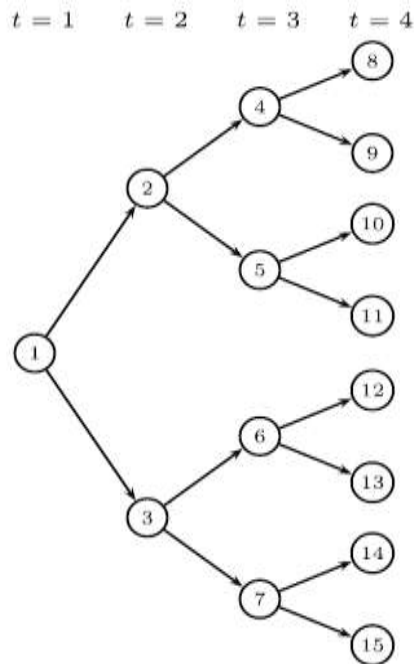
اسپینوزا و همکاران چهارچوب ریاضی را برای کمی‌سازی حساسیت قیمت در برنامه‌ریزی تولید و تحلیل تاثیر آن در مسائل واقعی برنامه‌ریزی معدن ارائه کردند. آن‌ها یک روش بهینه‌سازی استوار برای تعیین این‌که آیا روش‌های برنامه‌ریزی معدن می‌توانند به طور صریح تغییرپذیری قیمت را در نظر بگیرند به طوری که جواب‌های تولید شده حساسیت کمتری داشته باشند ارائه داده و نتایج به دست آمده با این روش را با نتایج به دست آمده با استفاده از روش‌های قطعی مقایسه کردند. بهینه‌سازی استوار ارائه شده ابزاری را در رابطه با تغییرپذیری قیمت ارائه می‌دهد. در واقع روش ارائه شده تلاش می‌کند حداکثر سود با بدترین احتمال از قیمت‌های ممکن را به جای حداکثر سود از قیمت مورد انتظار شناسایی کند. به طور تجربی مشاهده شده که بهینه‌سازی استوار عمر کوتاه‌تری از معدن را در مقایسه با روش غیر استوار ارائه می‌دهد که دلیل آن استفاده از عیار‌حدهای بالاتر (مخصوصاً در دوره‌های ابتدایی) است. همچنین محدوده نهایی کوچک تر از معدن را نتیجه می‌دهند. با بالا بردن درجه عدم قطعیت، این تاثیر تشدید می‌یابد. آن‌ها در تحلیل خود به این نتیجه رسیدند که راه حل بهینه پایدار وجود ندارد (Espinoza, et al., 2013).

عظیمی و همکاران عدم قطعیت قیمت و عیار را در انتخاب عیار حد بهینه در نظر گرفته‌اند. روش بازگشت به میانگین برای عدم قطعیت قیمت و روش شبیه‌سازی زمین‌آماری را برای لحاظ کردن عدم قطعیت عیاری به کار برده‌اند (Azimi, et al., 2013). آلونسوا‌یوسو و همکاران در مقاله‌ای عدم قطعیت قیمت فلز را در برنامه‌ریزی میان‌مدت یک معدن زیرزمینی مس در نظر گرفته‌اند. عدم قطعیت را با درخت چند مرحله‌ای سناریو نشان داده و سپس مدل تصادفی منتج را به مدل قطعی تبدیل کردند. بدین صورت که ابتدا مدل تصادفی که سود مورد نظر را در همه سناریوها پیشینه می‌کند (محیط بدون ریسک) معرفی کرده، سپس چند روش برای مدیریت ریسک معرفی کرده است. شکل ۲-۱۸ نمای شماتیک درخت سناریو استفاده شده را نشان می‌دهد. در این مطالعه افق زمانی ۵ ساله که در دسته‌بندی

میان مدت قرار می‌گیرد و برای تصمیمات تجاری در مورد فروش مناسب است در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت در سناریوهایی که قیمت احتمالی برای هر دوره را تعریف می‌کند منعکس شده است. برای تعیین مقدار فلز در هر دوره و بلوک‌هایی که باید استخراج شوند یک مدل قطعی تعریف شده است (Alonso-Ayuso, et al., 2014). از نقطه ضعف‌های کار آلونسوآیوسو و همکاران می‌توان به قطعی در نظر گرفتن عیار ماده معدنی در بلوک‌ها اشاره کرد. لازم به ذکر است روش پیشنهادی برای معدن زیرزمینی مس بوده و پارامترهای معادن روباز را در نظر نگرفته است.

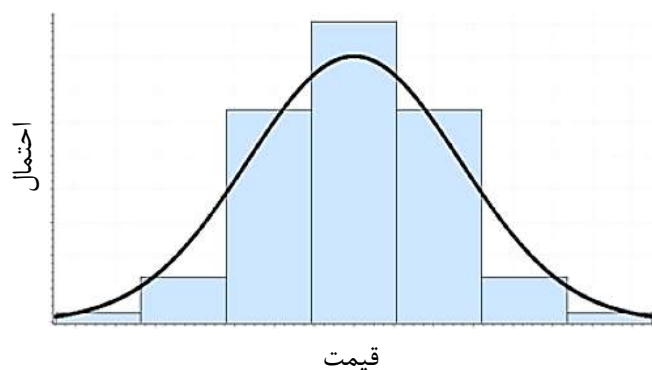
دهقانی و همکاران روش درخت دو جمله‌ای چند بعدی را برای لحاظ کردن همزمان عدم قطعیت قیمت و عدم قطعیت هزینه در ارزشیابی پروژه‌های معدنی پیشنهاد کرده‌اند (Dehghani, et al., 2014). بایک^۱ و همکاران برای نشان دادن کمی عدم قطعیت در بهینه‌سازی معدن روباز که به علت تغییر در قیمت مواد معدنی وجود دارد مطالعه‌ای را انجام دادند. آن‌ها با استفاده از روش مونت کارلو چندین قیمت بر اساس قیمت‌های گذشته تولید کرده و بر اساس آن قیمت‌ها بهینه‌سازی را انجام دادند. هدف این مطالعه تولید مدل احتمالی برای کمی‌سازی عدم قطعیت بر اساس تغییرات قیمت بوده که با محاسبات تکراری به دست آمده است (Baek, et al., 2016).

^۱ Baek

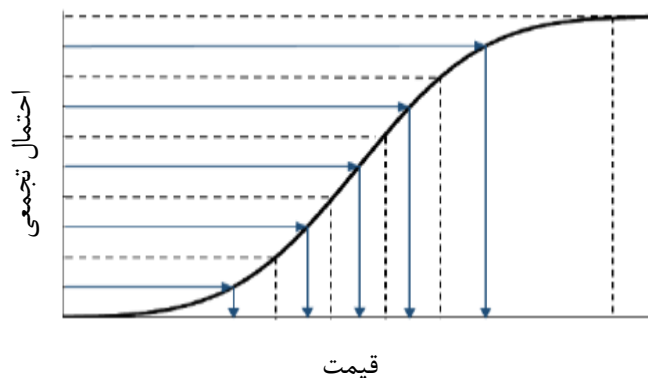


شکل ۲-۱۸- نمای شماتیک درخت سناریوی قیمت چند مرحله‌ای (Baek, et al., 2016)

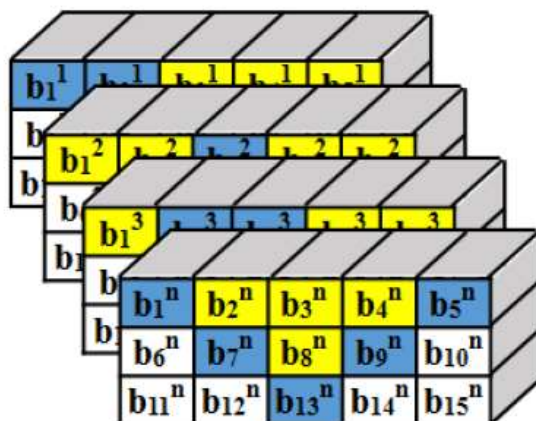
مختاریان اصل و ستاروند عدم قطعیت قیمت در برنامه‌ریزی تولید معدن روباز را با استفاده از روش نمونه‌گیری مکعب لاتین لحاظ کردند (Mokhtarian & Sattarvand, 2016). در این روش در ابتدا هیستوگرام قیمت‌های گذشته را ترسیم و تابع احتمال منطبق بر هیستوگرام به دست آمده است. بر خلاف روش مونت کارلو در این روش نمونه‌گیری در جاهایی که چگالی جمعیت بیشتر است انجام می‌شود. بر مبنای n نمونه انتخاب شده قیمت و مدل بلوکی زمین‌شناسی ذخیره، n مدل بلوکی اقتصادی ساخته و برنامه‌ریزی تولید برای هر یک از مدل‌های اقتصادی مذکور انجام دادند. سپس با ترسیم هیستوگرام NPV از برنامه‌ریزی‌های انجام شده و به دست آوردن تابع توزیع آن‌ها، NPV با احتمال بالاتر را شناسایی کردند. مراحل انجام این روش در شکل ۲-۱۹ تا شکل ۲-۲۳ به صورت شماتیک نشان داده شده است. روش استفاده شده مشابه روش تعیین قیمت با روش مونت کارلو در شرایط عدم قطعیت قیمت است. با این تفاوت که ضعف روش مونت کارلو را پوشش داده است.



شکل ۲-۱۹- مرحله یک: ترسیم هیستوگرام قیمت و توزیع احتمال آن (Mokhtarian & Sattarvand, 2016)



شکل ۲-۲۰- مرحله دو: نمونه‌گیری مکعبی لاتین از توزیع تجمعی احتمال (Mokhtarian & Sattarvand, 2016)



شکل ۲-۲۱- مرحله سوم: تولید مدل‌های بلوکی و برنامه‌ریزی تولید مربوطه (Mokhtarian & Sattarvand, 2016)

$b_1^{x\%}$	$b_2^{x\%}$	$b_3^{x\%}$	$b_4^{x\%}$	$b_5^{x\%}$
b_6	$b_7^{x\%}$	$b_8^{x\%}$	$b_9^{x\%}$	b_{10}
b_{11}	b_{12}	$b_{13}^{x\%}$	b_{14}	b_{15}

شکل ۲-۲۲- مرحله چهارم: تعیین برنامه استخراج نهایی (Mokhtarian & Sattarvand, 2016)



شکل ۲-۲۳- مرحله پنجم: ترسیم توزیع ارزش خالص فعلی (Mokhtarian & Sattarvand, 2016)

چاتی‌رجی^۱ و همکاران عدم قطعیت قیمت را در تعیین فازهای استخراجی و محدوده نهایی معدن لحاظ کردند (Chatterjee, et al., 2016). مراحل انجام کار آن‌ها شامل فرموله کردن ریاضی مساله تعیین فازهای استخراجی و محدوده نهایی معدن، تولید سناریوهای قیمتی، تعیین ساختار گراف در چهارچوب تصادفی، حل چهارچوب تصادفی ارائه شده و در نهایت استفاده از روش پیشنهادی در یک معدن سنگ آهن است. روش ارائه شده شباهت زیادی به روش پیشنهادی اسد و دیمیتراکوپولوس (Asad & Dimitrakopoulos, 2013) داشته با این تفاوت که عدم قطعیت عیاری را لحاظ نکرده و روش مدل‌سازی قیمت متفاوتی را استفاده کرده است. در ادامه مراحل انجام روش پیشنهادی تشریح شده است. روابط (۸۲-۲) تا (۸۵-۲) فرموله‌سازی چهارچوب تصادفی طراحی فازهای استخراجی در شرایط وجود عدم قطعیت قیمت را بیان می‌کند.

$$\max \sum_{\gamma \in \Gamma} \sum_{b \in B} v_{\gamma b} x_b \quad (82-2)$$

$$x_b - x_{b'} \leq 0, \quad b' \in \xi_b, b \in B. \quad (83-2)$$

^۱ Chatterjee

$$\sum_{b \in B} a_{k\gamma b} x_b \leq H_k, \forall k \in K \text{ and } \gamma \in \Gamma. \quad (۸۴-۲)$$

$$x_b \in \{0, 1\}, b \in B. \quad (۸۵-۲)$$

که در روابط فوق $u_{\gamma b}$ ارزش اقتصادی بلوک b در سناریوی قیمتی γ است. متغیر x_b برابر با ۱ خواهد بود اگر بلوک b داخل محدوده استخراجی قرار بگیرد و در غیر این صورت مقدار آن برابر با صفر خواهد بود. ε_b مجموعه ای از بلوک‌های بالای بلوک b هستند. $a_{k\gamma b}$ مقدار ماده معدنی k در بلوک b در سناریوی قیمتی γ و H_k ظرفیت استخراجی ماده معدنی k هستند. همچنین B, Γ و K به ترتیب تعداد بلوک‌های استخراجی، تعداد سناریوهای قیمتی و تعداد محدودیت ظرفیت‌های استخراجی هستند. به طور خلاصه تابع هدف (۸۲-۲) ارزش اقتصادی عملیات معدنکاری را با توجه به محدودیت اولویت استخراج بلوک‌ها (۸۳-۲) و محدودیت ظرفیت استخراج (۸۴-۲) بیشینه می‌کند. نادیده گرفتن محدودیت ظرفیت استخراج باعث دستیابی به محدوده نهایی معدن می‌شود. ارزش اقتصادی بلوک b در سناریوی قیمتی γ از رابطه (۸۶-۲) قابل محاسبه است:

$$v_{\gamma b} = [(P_{\gamma} - r) g_b y - m - c] Q_b \quad (۸۶-۲)$$

که در این رابطه P_{γ} قیمت در سناریوی γ ، r هزینه‌های فروش، g_b عیار ماده معدنی در بلوک b ، y بازیابی متالورژیکی، m هزینه معدنکاری، c هزینه فرآوری و Q_b مقدار مواد موجود در بلوک b هستند. برای مدل‌سازی قیمت از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی استفاده شده است. برای پیش‌بینی قیمت، مدل گوسی قیمت $P_{\gamma t}$ در سناریوی γ و دوره t را تولید می‌کند. اگر μ_t مقدار میانگین باشد، قیمت برای دوره t با رابطه (۸۷-۲) به دست می‌آید:

$$P_t = \mu_t + z_t \quad (۸۷-۲)$$

مقدار z_t فرآیند گوسی در محدوده زمانی با نمونه‌گیری تصادفی از تابع احتمال شرطی گوسی از داده‌های گذشته به دست می‌آید. واریانس و میانگین از الگوریتم کریجینگ ساده و نمونه تصادفی از توزیع گوسی در مراحل زمانی ناشناخته به دست می‌آیند. با انجام مراحل ذکر شده z_t برای هر سناریوی قیمتی و هر

دوره زمانی t به دست می‌آید. پس از تولید تحقق‌های متعدد ارزش اقتصادی بلوک‌ها، با استفاده از ساختار چندگانه گراف که در روش پیشنهادی اسد و دیمیتراکوپولوس (Asad & Dimitrakopoulos, 2013) شرح داده شد، محدوده نهایی و فازهای استخراجی به دست آمده است (Chatterjee, et al., 2016). در جدول ۱-۲ خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در خصوص برنامه‌ریزی تولید معادن روباز و وضعیت لحاظ کردن عدم قطعیت عیار و قیمت که در این فصل مورد بررسی قرار گرفته‌اند آمده است.

جدول ۱-۲- مهمترین کارهای انجام شده در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز

مرجع	لحاظ کردن عدم قطعیت		سال	ارائه دهنده
	عدم قطعیت قیمت	عدم قطعیت عیار		
(Dimitrakopoulos, 2003)	-	-	۲۰۰۳	دیمیتراکوپولوس
(Caccetta & Hill, 2003)	-	-	۲۰۰۳	کاستا و هیل
(Dimitrakopoulos, & Ramazan, 2004)	-	مدل‌های بلوکی تصادفی ذخیره	۲۰۰۴	دیمیتراکوپولوس و رمضان
(Godoy & Dimitrakopoulos, 2004)	-	تحقق‌های عیاری متعدد	۲۰۰۴	گودوی و دیمیتراکوپولوس
(Menabde & Froyland, 2004)	-	مدل‌های بلوکی تصادفی	۲۰۰۴	منابد و فرویلند
(Dimitrakopoulos, et al., 2007)	اختیارات حقیقی	-	۲۰۰۷	دیمیتراکوپولوس و همکاران
(Akbari, et al., 2008)	روش اختیارات حقیقی برای شروع پروژه	-	۲۰۰۸	اکبری و همکاران
(Abdel Sabour, et al., 2008)	مدل تصادفی بر اساس داده‌های تاریخی قیمت‌ها	شبیه‌سازی چندین تحقق کانسار	۲۰۰۸	عبدل صبور و همکاران
(Li & Knights, 2009)	شبیه‌سازی قیمت سوخت مصرفی	-	۲۰۰۹	لی و نایت
(Kumral, 2010)	بهینه‌سازی تصادفی استوار	-	۲۰۱۰	کومرال

جدول ۱-۲- مهمترین کارهای انجام شده در زمینه برنامه‌ریزی تولید معدن روباز (ادامه)

مرجع	لحاظ کردن عدم قطعیت		سال	ارائه دهنده
	عدم قطعیت قیمت	عدم قطعیت عیار		
(Dimitrakopoulos, 2011)	-	روش شبیه‌سازی متوالی	۲۰۱۱	دیمیتراکوپولوس
(Abdel Sabour & Dimitrakopoulos, 2011)	از مدل‌سازی تصادفی و برپایه‌ی تاریخچه‌ی رفتار بازار	شبیه‌سازی شرطی کانسار	۲۰۱۱	عبدل صبور و دیمیتراکوپولوس
(Groeneveld & Topal, 2011)	شبیه‌سازی مونت‌کارلو	-	۲۰۱۱	گرونولد و توپال
(Godoy & Dimitrakopoulos, 2011)	-	سناریوهای شبیه‌سازی شده چندگانه توزیع عیار	۲۰۱۱	گودوی و دیمیتراکوپولوس
(Dimitrakopoulos, 2012)	-	سناریوهای شبیه‌سازی شده چندگانه توزیع عیار	۲۰۱۲	دیمیتراکوپولوس
(Lamghari & Dimitrakopoulos, 2012)	-	مدل‌های چندگانه شبیه‌سازی	۲۰۱۲	لمقری و دیمیتراکوپولوس
(Gholamnejad & Moosavi, 2012)	-	استفاده از کریجینگ عدم قطعیت زمین‌شناسی را کمی‌سازی کرده	۲۰۱۲	غلام نژاد و موسوی
(Goodfellow & Dimitrakopoulos, 2012)	-	روش شبیه‌سازی متوالی	۲۰۱۲	گوفلو و دیمیتراکوپولوس
(Asad & Dimitrakopoulos, 2013)	روش بازگشت به میانگین	تحقق‌های عیاری متعدد	۲۰۱۳	اسد و دیمیتراکوپولوس
(Benndorf & Dimitrakopoulos, 2013)	-	سناریوهای هم احتمال عیاری	۲۰۱۳	بندروف و دیمیتراکوپولوس
(Ramazan & Dimitrakopoulos, 2013)	-	مدل‌های چندگانه شبیه‌سازی شده ماده معدنی	۲۰۱۳	رمضان و دیمیتراکوپولوس
((Lamghari, et al., 2013)	-	با روش برنامه‌ریزی تصادفی	۲۰۱۳	لمقری و همکاران
(Montiel & Dimitrakopoulos, 2013)	-	روش شبیه‌سازی	۲۰۱۳	مونتیل و دیمیتراکوپولوس

جدول ۲-۱- مهمترین کارهای انجام شده در زمینه برنامه‌ریزی تولید معدن روباز (ادامه)

مرجع	لحاظ کردن عدم قطعیت		سال	ارائه دهنده
	عدم قطعیت قیمت	عدم قطعیت عیار		
(Alonso-Ayuso, et al., 2014)	درخت چند مرحله‌ای سناریو	-	۲۰۱۴	آلونسو آیوسو و همکاران
(Leite & Dimitrakopoulos, 2014)\	-	مدل‌های شبیه‌سازی شده عیاری	۲۰۱۴	لیت و دیمیتراکوپولوس
(Chatterjee, et al., 2016)	تولید سناریوهای قیمتی	-	۲۰۱۶	چاتیرجی و همکاران
(Baek, et al., 2016)	روش مونت کارلو	-	۲۰۱۶	بائک و همکاران
(Mokhtarian & Sattarvand, 2016)	استفاده از روش نمونه‌گیری مکعب لاتین	-	۲۰۱۶	مختاریان اصل و همکاران

۲-۶- جمع‌بندی مطالعات پیشین و بررسی نقاط ضعف و قوت آن‌ها

با مطالعه سوابق تحقیقات انجام شده در خصوص موضوع رساله مشاهده شد در سال‌های اخیر تلاش‌های متعددی برای لحاظ کردن عدم قطعیت عیار و قیمت در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز صورت پذیرفته است. با این وجود کماکان کاستی‌هایی در حل این مساله وجود دارد که رفع آن‌ها می‌تواند منجر به ارائه روش‌هایی با قابلیت کاربردی بیشتر و دستیابی به نتایج قابل اطمینان‌تر همراه باشد. در بسیاری از برنامه‌ریزی‌های انجام شده در گذشته، عواملی همچون قیمت و عیار ماده معدنی قطعی در نظر گرفته شده‌اند، در حالی که در واقعیت چنین نیست. در روش‌های قطعی برنامه‌ریزی تولید معدن، عدم اطمینان از برآورده شدن محدودیت‌های تولیدی در فضای عدم قطعیت وجود دارد.

در اکثر تحقیقات انجام شده که عدم قطعیت را در برنامه‌ریزی تولید لحاظ کرده‌اند، تمرکز بر

عدم قطعیت عیار بوده است. به نظر می‌رسد با توجه به این که عدم قطعیت عیار از کمبود اطلاعات به دلیل هزینه بالای کسب آن به وجود می‌آید، این عدم قطعیت همواره در پروژه‌های معدنی وجود داشته باشد. کاهش ذخایر نزدیک به سطح در کره زمین و افزایش عمق ذخایر در حال اکتشاف، مهر تاییدی بر این موضوع است. هزینه کسب اطلاعات بیشتر در راستای کاهش عدم قطعیت عیاری رو به افزایش بوده و به ناچار باید از حداقل اطلاعات به دست آمده از اکتشاف، تخمین مناسبی را از ذخیره ماده معدنی به دست آورد. در اکثر کارهای انجام شده در خصوص عدم قطعیت عیار، با وجود این که به جای یک تحقق، از تحقق‌های چندگانه حاصل از شبیه‌سازی استفاده شده است، لیکن اکثر آن‌ها در تکرار انجام مراحل قطعی برنامه‌ریزی معدن بر روی تحقق‌های ایجاد شده مشترک می‌باشند. عیار ماده معدنی ذخیره معدن در طول عمر معدن تغییر نمی‌کند، در واقع عمر معدن در برابر دوره‌های زمین‌شناسی که تغییرات کانی‌سازی و در نتیجه تغییر عیار اتفاق می‌افتد بسیار کوتاه است. بر خلاف عیار ماده معدنی در ذخیره، قیمت ماده معدنی در هر لحظه از زمان با تغییر و نوسان همراه است. با این وصف مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت با توجه به ذات متغیر آن و وابستگی زیاد آن به زمان، با پیچیدگی بیشتری همراه است. در خصوص عدم قطعیت قیمت تلاش‌های صورت گرفته نشان دهنده عدم درک عمیق از عدم قطعیت شدید قیمت مواد معدنی در سال‌های اخیر بوده است. روش‌های به کار گرفته شده برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت و وارد کردن آن در برنامه‌ریزی تولید معادن پاسبخگوی نوسانات شدید قیمتی در سال‌های اخیر نمی‌باشند. در اکثریت قریب به اتفاق تحقیقات انجام گرفته، مدل‌سازی قیمت با روش‌هایی صورت گرفته که قیمت آینده را بر اساس احتمال به دست آمده از بررسی تاریخچه قیمت‌ها پیش‌بینی کرده‌اند. این در حالی است که با توجه به نوسانات شدید قیمت‌ها خصوصاً در سال‌های اخیر، در خصوص رفتار قیمت نمی‌توان به این سادگی تصمیم‌گیری کرد. همچنین لازم به ذکر است در اکثر مطالعات انجام شده عدم قطعیت عیار و قیمت به طور همزمان و مناسب در برنامه‌ریزی تولید معادن وارد نشده‌اند. این در حالی است که هر دوی عدم قطعیت عیار و عدم قطعیت قیمت تاثیرگذاری بالایی بر برنامه‌ریزی تولید داشته و باید به طور همزمان لحاظ شوند. به طور مثال چنانچه ارزش اقتصادی

بلوک‌ها تنها با در نظر گرفتن عدم قطعیت عیاری در برنامه‌ریزی تولید لحاظ شود، تغییر قیمت به تنهایی می‌تواند به اندازه‌ای در ارزش اقتصادی بلوک‌ها تاثیرگذار باشد که موجب ابطال نتایج به دست آمده شود.

با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان به این موضوع پی برد که راه حل بهینه پایدار وجود ندارد و بسیاری از روش‌های ارائه شده در زمینه برنامه‌ریزی تولید از نظر عملیاتی بودن دچار ضعف هستند و در زمان حاضر نمی‌توان راه حل بهینه پایدار را به طور دقیق و صحیح مشخص کرد. لذا ارائه رویکردی قابل اطمینان و کاربردی در شرایط واقعی برای برنامه‌ریزی تولید از اهداف اصلی این رساله است. در یک جمع‌بندی می‌توان به این مهم دست یافت که روش‌های ارائه شده تاکنون نتوانسته‌اند موارد ذکر شده را به طور قابل قبولی پوشش دهند. لذا در فصل بعد رویکرد کاربردی برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز که بتواند به طور همزمان عدم قطعیت عیار ماده معدنی و عدم قطعیت بالای قیمت ماده معدنی را در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز لحاظ کند ارائه می‌شود.

فصل سوم

برنامه‌ریزی تولید در شرایط عدم قطعیت

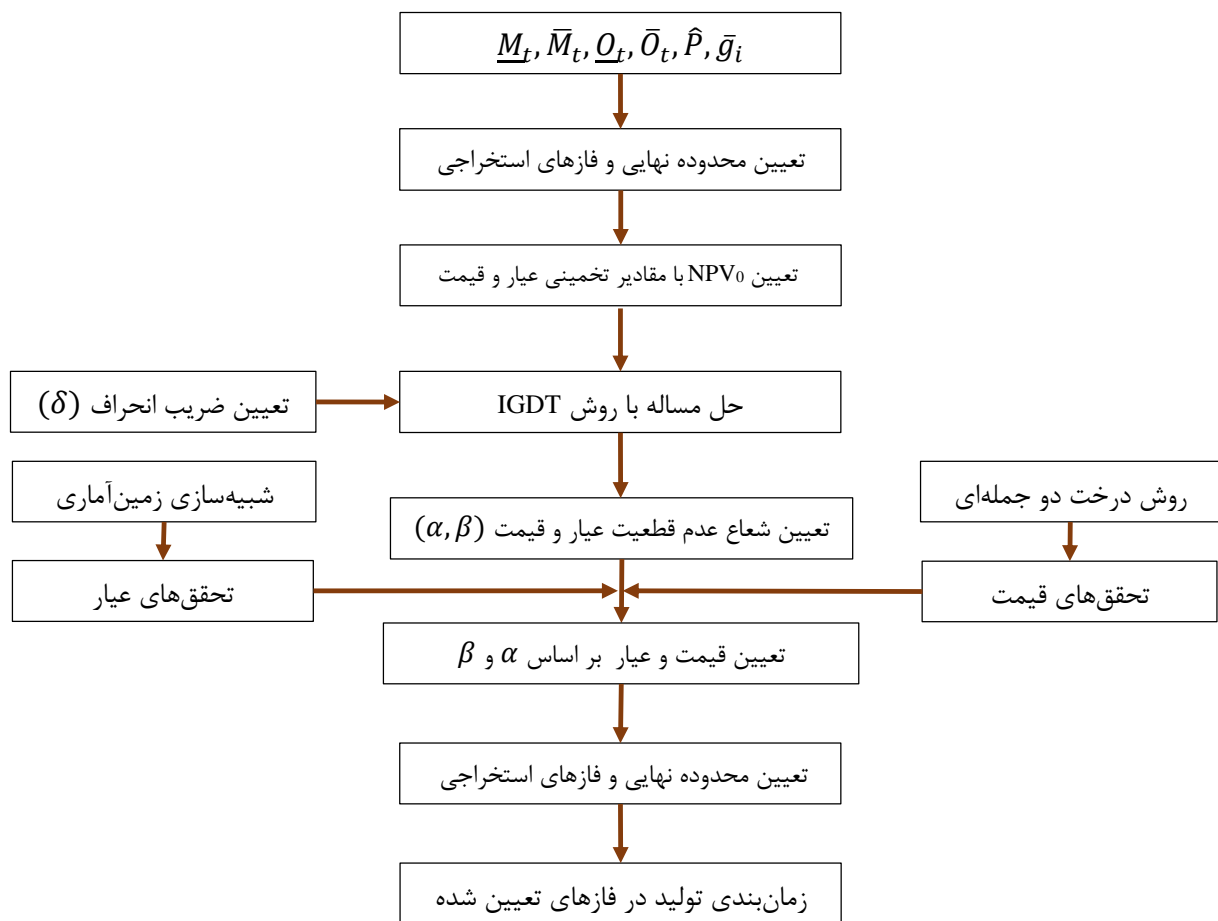
۳-۱- مقدمه

در فصل قبل کلیات برنامه‌ریزی تولید معادن روباز و روش‌های ارائه شده تاکنون، مورد بررسی قرار گرفتند. در این فصل رویکرد پیشنهادی این رساله برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز در شرایط عدم قطعیت تشریح می‌شود. در ابتدا روش مدل‌سازی عدم قطعیت پارامترهای غیر قطعی مورد بحث این رساله (قیمت و عیار ماده معدنی) انجام شده و در ادامه رویکرد جدیدی برای برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مذکور با استفاده از تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی^۱ (IGDT) ارائه می‌شود. شکل ۳-۱ مراحل رویکرد ارائه شده در این رساله را نشان می‌دهد که در ادامه به شرح آن پرداخته می‌شود. در این فلوچارت، \underline{M}_t و \bar{M}_t به ترتیب بیانگر حد پایین و بالای ظرفیت معدنکاری و \underline{O}_t و \bar{O}_t به ترتیب بیانگر حد پایین و بالای ظرفیت فرآوری هستند. همچنین \hat{P} قیمت پیش‌بینی شده و \bar{g}_i مقدار متوسط عیار بلوک i هستند.

۳-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت و عیار

برای ارائه رویکرد مناسب برای برنامه‌ریزی در شرایط عدم قطعیت، ابتدا باید عدم قطعیت موجود در پارامترهای غیر قطعی را مدل‌سازی و یا به عبارتی عدم قطعیت را کمی‌سازی کرد. در این بخش روش مدل‌سازی عدم قطعیت عیار و قیمت شرح داده شده است.

¹ Information Gap Decision Theory



شکل ۳-۱- مراحل برنامه‌ریزی تولید با رویکرد پیشنهادی رساله

۳-۲-۱- مدل‌سازی عدم قطعیت عیار

برای طراحی و برنامه‌ریزی تولید برای یک معدن روباز در ابتدا مدل بلوکی سه بعدی زمین‌شناسی از کانسار با در نظر گرفتن عدم قطعیت عیار مورد نیاز است. مبنای کاربرد نرم‌افزارهای کامپیوتری برای برآورد عیار و تناژ و برنامه‌ریزی تولید استخراج، مدل بلوکی سه‌بعدی کانسار می‌باشد. در حالت کلی، روند ساخت یک مدل بلوکی زمین‌شناسی در اکثر نرم‌افزارهای معدنی شامل آماده‌سازی اطلاعات ورودی، پردازش اطلاعات، تهیه مقاطع زمین‌شناسی، ساخت مدل ماده معدنی با استفاده از مقاطع رسم شده، بلوک‌بندی مدل و تخصیص مشخصات عیاری به هر بلوک است. در روش‌های قطعی، بعد از بلوک‌بندی با استفاده از یکی از روش‌های تخمین به هر بلوک عیار یا عیارهای مربوطه تخصیص داده

می‌شود. به منظور مدل‌سازی کانسار باید پس از جمع‌آوری و پردازش اطلاعات لازم، با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری سطح زمین و توده معدنی را مدل‌سازی کرد. روش مدل‌سازی بر اساس ملاحظات زمین‌شناسی، روش‌های اکتشاف یا نمونه‌برداری، قابلیت استفاده، حجم و اعتبار داده‌ها، اهداف ارزیابی و تخمین، دقت و صحت مدل‌سازی و شیوه کانی‌سازی انتخاب می‌شود. هدف از تهیه مدل زمین‌شناسی آن است که بر اساس آن بتوان پیش‌پیش کارهای معدنی، مشخصات و طبیعت کانسار را پیش‌بینی کرد. اگر هدف از تخمین، دستیابی به مقادیر متوسط بر جای یک متغیر باشد، کریجینگ روش مفیدی خواهد بود. ولی اگر هدف تخمین، ارزیابی شدت تغییرپذیری یک متغیر باشد روش کریجینگ دارای معایبی است که کاربرد آن را در این موارد، با سوال روبرو می‌کند. اثر هموارکنندگی کریجینگ تمایل دارد از طریق افزایش عیار مناطق کم عیار و کاهش عیار مناطق پرعیار از واریانس بین آن‌ها بکاهد. در برنامه‌ریزی تولید که هدف مشخص کردن ترتیب استخراج بلوک‌ها بر اساس پارامترهایی از جمله عیار بلوک است، هموارسازی حاصل از کریجینگ در انجام برنامه‌ریزی درست اختلال ایجاد خواهد کرد (Rezaee, et al., 2011; Monjezi, et al., 2013). مهمترین ویژگی منفی روش کریجینگ نیز اثر هموارکنندگی آن است که تمایل دارد از طریق افزایش عیار مناطق کم عیار و کاهش عیار مناطق پرعیار از واریانس بین آن‌ها بکاهد. روش تخمین نمی‌تواند اطلاعات کاملی از طیف مقادیر ممکن در جامعه مورد بررسی را نشان دهد. برخلاف روش‌های تخمین، روش‌های شبیه‌سازی زمین‌آماري به عنوان الگوریتمی برای تعدیل اثر هموارسازی چنین روش‌هایی در نظر گرفته شده‌اند. روش‌های شبیه‌سازی ایزاری برای دستیابی به طیفی از مقادیر هستند. یکی از مهمترین مزایای روش شبیه‌سازی زمین‌آماري، اطلاع از عدم قطعیت تخمین صورت گرفته است. شبیه‌سازی زمین‌آماري، امروزه تبدیل به یک ابزار بسیار قدرتمند در مطالعات زمین‌آماري و تعیین عدم قطعیت‌ها شده است. در این روش تخمین بر اساس توالی‌های مشخص شده در چندین تکرار، چندین تحقق از وضعیت‌های مختلف داده‌ها در منطقه، تخمین زده خواهد شد (Asad & Dimitrakopoulos, 2013).

مهمترین خاصیت شبیه‌سازی زمین‌آماري این است که به جای تولید بهترین تخمین، مجموعه‌ای

از مدل‌ها را تولید می‌کند که دامنه‌ای از حالت‌های ممکن را شامل می‌شوند. در شبیه‌سازی شرطی مقدار داده‌های شبیه‌سازی شده در نقاط معلوم با مقدار واقعی آن‌ها برابر خواهند بود. در شبیه‌سازی یک کانسار، با توجه به این که تعداد داده‌های اولیه محدود است، لذا سعی می‌شود که از الگوریتم‌های متوالی (پی در پی) استفاده شود تا بتوان از نتایج شبیه‌سازی بلوک‌های قبلی به عنوان داده‌های معلوم در تخمین بلوک جدید استفاده کرد. به طور کل از معمول‌ترین الگوریتم‌های شبیه‌سازی که در علوم زمین استفاده می‌شود، شبیه‌سازی گوسی متوالی است که براساس نوع خروجی و ماهیت متغیر ورودی، تصمیم‌گیری در مورد انتخاب روش شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. (Asghari, et al., 2009) شبیه‌سازی گوسی برای محیط‌هایی که در آن پیوستگی متغیر نسبت به طبقه‌بندی آن از اهمیت بیشتری برخوردار است، به کار می‌رود. مدل شبیه‌سازی ایجاد شده به شرح و توصیف روند تغییرات پارامتر در منطقه، تغییرات مقدار میانگین و کوواریانس داده (در صورت شبیه‌سازی بیش از یک متغیر) می‌پردازد. از آنجایی که عیار متغیری پیوسته است، لذا از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی که یکی از روش‌های معمول شبیه‌سازی متغیرهای پیوسته است و تا کنون نتایج قابل قبولی در پروژه‌های مشابه داشته است، برای تعیین توزیع فضایی پارامترهای عیار استفاده شده است. لذا در این تحقیق نیز از مدل‌های عیاری هم احتمال که با روش شبیه‌سازی زمین‌آماری به دست آمده‌اند استفاده شده است. بدین ترتیب با استفاده از چند مدل عیاری بر خلاف روش‌های قطعی که تنها یک مدل عیاری را مورد استفاده قرار می‌دهند، عدم قطعیت عیار در برنامه‌ریزی تولید لحاظ خواهد شد. مراحل انجام روش شبیه‌سازی گوسی متوالی به این شرح است (Remy, et al., 2009):

- ۱- محاسبه هیستوگرام داده‌های اولیه و تبدیل این داده‌ها به استاندارد نرمال
- ۲- رسم واریوگرام با استفاده از داده‌های نرمال استاندارد شده
- ۳- انتخاب یک مسیر (شبکه) تصادفی برای شبیه‌سازی
- ۴- تخمین داده‌ها بر روی شبکه انداخته شده با استفاده از یکی از روش‌های کریجینگ و رسم هیستوگرام با داشتن میانگین و واریانس تخمین در هر نقطه

۵- بیرون کشیدن یک عدد تصادفی از هیستوگرام رسم شده

۶- قرار دادن در نقطه انتخاب شده

۷- تکرار مراحل قبل تا این که کلیه شبکه دارای مقدار شود

۸- برای انجام شبیه‌سازی دیگر، کلیه مراحل قبل دوباره تکرار می‌شوند

۹- تبدیل معکوس داده‌ها به حالت قبل

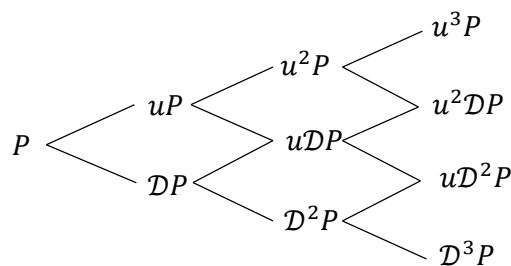
۱۰- اعتبار سنجی نتایج

با استفاده از روش شبیه‌سازی ذکر شده، تحقق‌های متعدد عیاری کانسار ایجاد شده و از این تحقق‌ها برای مدل‌سازی عدم قطعیت عیار در بخش‌های آتی استفاده خواهد شد. برای برآورد عدم قطعیت هر بلوک، از شاخص ضریب تغییرات که نسبت انحراف معیار را به میانگین نشان می‌دهد می‌توان استفاده کرد. ضریب تغییرات بالاتر نشان دهنده دقت پایین‌تر و میزان ریسک بالاتر است. لذا با در نظر گرفتن ضریب تغییرات امکان تعیین مناطق با ریسک بالا و نیز تعیین نقاط بهینه حفاری نیز به وجود می‌آید.

۳-۲-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت

مدل‌سازی قیمت در مقایسه با عیار، با توجه به ذات متغیر آن و وابسته بودن تغییرات آن به زمان، با پیچیدگی بیشتری همراه است. با توجه به تغییرات اقتصادی در سال‌های اخیر که موجب افزایش عدم قطعیت در قیمت ماده معدنی شده، استفاده از روش‌های قطعی (در نظر گرفتن قیمت مشخص برای ماده معدنی)، برنامه‌ریزی‌های انجام شده را محکوم به شکست می‌کند. اصولاً پیش‌بینی عنصری کلیدی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی است. سیستم‌های مدیریتی برای طراحی و کنترل عملگرهای تشکیلاتی خود نیاز به پیش‌بینی دارند. به طور کلی می‌توان گفت پیش‌بینی برآورد پیشامدهای آینده است و هدف از پیش‌بینی کاهش ریسک در یک تصمیم‌گیری است. پیش‌بینی‌ها معمولاً صحیح نبوده و دارای مقداری خطا هستند. این میزان خطا با داشتن اطلاعات بیشتر در مورد سیستم کاهش می‌یابد. با افزایش هزینه

پیش‌بینی می‌توان مقدار ریسک را کاهش داد. با توجه به این‌که همیشه پیش‌بینی با مقداری خطا همراه است، قادر به حذف کامل ریسک نبوده و بنابراین فرآیند تصمیم‌گیری مستلزم مقداری عدم یقین ناشی از پیش‌بینی خواهد بود. در سال‌های اخیر در خصوص پیش‌بینی قیمت فلزات مطالعات زیادی انجام شده است (Pierdzioch, et al., 2013; Kriechbaumer, et al., 2014; Issler, et al., 2014; He, et al., 2015). لذا در این رساله برای رعایت اختصار و تمرکز بیشتر بر روی مبحث عدم قطعیت، از بحث درباره روش‌های پیش‌بینی قیمت، صرف نظر شده و از روش درخت دو جمله‌ای برای مدل‌سازی قیمت استفاده شده است. مدل درخت دو جمله‌ای برای اولین بار توسط آقای کاکس^۱ و همکارانش برای تخمین عدم قطعیت قیمت سهام ارائه شد (Cox, et al., 1979). این روش یکی از مشهورترین روش‌ها برای بررسی رفتار تغییرات قیمت سهام می‌باشد. مدل درخت دو جمله‌ای دارای مزایای متعددی نسبت به سایر مدل‌های ارزش‌گذاری است. انعطاف‌پذیری، صحت و سرعت در محاسبه از جمله مزایای این روش می‌باشد (Dehghani, et al., 2014). درخت دو جمله‌ای ساختاری شامل گره و شاخه‌هایی است که این ساختار مسیرهای ممکن را برای بررسی تغییرات مجاز قیمت در طول عمر پروژه را نشان می‌دهد. هر گره بیانگر قیمت ممکن در یک نقطه زمانی مشخص است. شکل ۲-۳ نمای شماتیک درخت دو جمله‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳- نمای شماتیک درخت دو جمله‌ای در سه دوره زمانی

در درخت دو جمله‌ای ارزش هر گره بر اساس روابط زیر به دست می‌آید (Cox, et al., 1979):

^۱ Cox

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (1-3)$$

$$D = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} = \frac{1}{u} \quad (2-3)$$

$$p_r = \frac{(1 + rf) - D}{u - D} \quad (3-3)$$

که در روابط فوق u نرخ افزایش ارزش هر گره، D نرخ کاهش ارزش هر گره، p_r احتمال وقوع شاخه بالارونده، rf نرخ بدون ریسک و σ نوسان پذیری قیمت است. قیمت در دوره t (P_t) بر اساس قیمت‌های به دست آمده در هر گره در نمودار دوجمله‌ای مربوطه، از رابطه (۴-۳) قابل محاسبه خواهد بود:

$$P_t = \frac{\sum_{k=2}^K P_k \cdot p_r + \sum_{k=1}^{K-1} P_k (1 - p_r)}{K - 1} \quad (4-3)$$

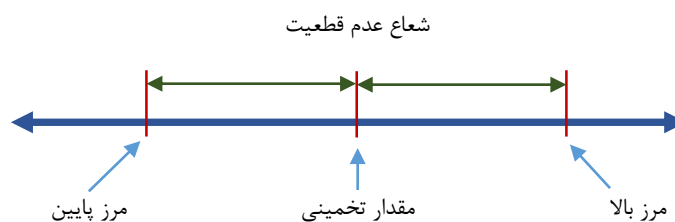
که در رابطه فوق k بیانگر شماره گره می باشد.

۳-۳- اصول و مبانی تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی

روش IGDT یکی از روش‌های توانمند در توصیف عدم قطعیت است. این روش بر این موضوع تاکید دارد که تصمیمات تحت شرایط سخت عدم قطعیت، نباید به اطلاعات اضافی نسبت به اطلاعات قابل دسترس برای تصمیم‌گیرنده نیاز داشته باشد. در واقع این روش به برنامه‌ریزان کمک می‌کند که بتوانند با اطلاعات خیلی کم تصمیم‌های مناسبی بگیرند (Hayes, et al., 2013). روش مذکور نیازمند تابع چگالی احتمال یا تابع عضویت فازی نیست و بر اختلاف مابین اطلاعات معلوم و این که چه چیزی می‌تواند معلوم شود، متمرکز است. این روش، روشی برای ارزیابی و مقایسه راهبردهای مختلف در صورت وجود عدم قطعیت در پارامترهای موثر بر تصمیم‌گیری است و به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند تا اولویت‌های خودش را ارزش‌گذاری کرده، ریسک موجود در آن را ارزیابی و فرصت‌های لازم برای تصمیم‌گیری و استفاده از شرایط ریسک را بررسی کرده و سپس اقدام به تصمیم‌گیری کند (Mazidi, et al., 2016). در ادامه تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی شرح داده شده است.

رویه مدل‌سازی با استفاده از روش IGDT به طور اساسی با روش‌های معمولی مدل‌سازی متفاوت

است. روش IGDT به دنبال چهارچوبی برای تصمیم‌گیری مستدل در شرایط عدم قطعیت شدید است. این روش از این جهت متفاوت است که روشی غیراحتمالاتی را برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت پیشنهاد می‌کند. این روش وقتی مناسب است که اطلاعات به گونه‌ای باشد که نتوان در خصوص توزیع احتمالاتی مناسب تصمیمی گرفت یا حتی مرز بالا و پایین مقادیر ممکن پارامتر را به درستی تعیین کرد (Ben-Haim, 1999). روش مذکور بعضاً به عنوان روش تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت نامحدود تعیین شده است. این روش به جستجوی تصمیماتی می‌پردازد که در برابر عدم قطعیت مقاوم هستند. این روش همچنین به تحلیل‌گر اجازه مقایسه‌ی تصمیمات مختلف و تعیین نقاطی در بازه عدم قطعیت که در آن تصمیمات باید تغییر کند تا الزامات بحرانی برآورده گردد را می‌دهد (Ben-Haim, 2006). با استفاده از این روش و تعریف یک مدل مقاوم، اطمینان حاصل می‌شود که ارزش مورد نظر حاصل از انجام پروژه از مقدار تعیین شده کمتر نشود. ویژگی آشکار مدل‌سازی براساس IGDT آن است که این روش هیچ فرض خاصی را در مورد طبیعت عدم قطعیت در نظر نمی‌گیرد. در روش IGDT، پارامتر عدم قطعیت یا شعاع عدم قطعیت (شکل ۳-۳) از ابتدا نامشخص بوده و آن را از سایر روش‌های تصمیم‌گیری نظیر بهینه‌سازی مقاوم^۱ متمایز می‌کند. تفاوت و مزیت دیگر این روش، چگونگی بیان توابع بهینه‌سازی است. این روش، تصمیم‌گیرنده را قادر می‌سازد تا استراتژی‌های مختلف در حوالی جواب بهینه بدون ریسک را ارزیابی کند (Kazemi, et al., 2014; Nojavan, et al., 2016).



شکل ۳-۳- نمایش شعاع عدم قطعیت برای پارامتر غیر قطعی (Mazidi, et al., 2016)

در مدل‌سازی عدم قطعیت با استفاده از نظریه احتمالاتی، معمولاً ابتدا یک نوع تابع توزیع احتمالاتی

^۱ Robust optimization

در نظر گرفته می‌شود و سپس پارامترهای مورد نیاز تخمین زده می‌شود، در حالی که در IGDT به طبیعت عدم قطعیت توجه نمی‌شود و تنها به اختلاف مابین آنچه که معلوم است و آنچه که می‌تواند مشخص شود متمرکز است و یا در واقع بر روی اختلاف مابین مقدار واقعی و پیش‌بینی شده پارامتر غیرقطعی متمرکز است. برخلاف روش‌هایی مانند مونت کارلو و برنامه‌ریزی تصادفی، این روش نیازی به تابع چگالی احتمال پارامترهای غیرقطعی مساله ندارد و برای تصمیم‌گیری‌های مقاوم در برابر عدم قطعیت‌های شدید استفاده می‌شود. همچنین برخلاف روش بهینه‌سازی مقاوم، این روش نیازی به تعیین حداکثر شعاع عدم قطعیت برای پارامترهای غیرقطعی نداشته و از این نظر انعطاف‌پذیری بیشتری دارد. در واقع روش IGDT به دنبال تعیین حداکثر شعاع عدم قطعیت مجاز برای پارامترهای غیرقطعی مساله است، به گونه‌ای که تابع هدف مساله در محدوده مجاز تعیین شده توسط تصمیم‌گیر باقی بماند (ربیعی و همکاران، ۱۳۹۳). در این روش انتخاب پارامتر عدم قطعیت بر اساس حداکثرسازی سود نیست. در IGDT قانون تصمیم‌گیری براساس بهینه کردن مقدار خطا از مقدار تخمینی پارامتر غیرقطعی است. نتایج حاصل از این روش به مقدار در نظر گرفته شده برای تابع هدف بستگی دارد. این روش بر روی تامین تابع هدف اصلی تاکید دارد نه بر روی بهینه‌سازی آن. به بیان دیگر در یک محیط رقابتی، برنده شدن و در بازی ماندن از اهمیت بیشتری برخوردار است (Ben-Haim, 2005).

روش IGDT براساس مدل‌های کمی بوده و ارزیابی بر پایه اعداد را فراهم می‌کند. ارزیابی کمی به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند تا انتخاب‌های خود را ارزیابی، استراتژی‌های خود را تحلیل کرده و اولویت‌های خودش را در حضور عدم قطعیت‌ها وارد کرده و تابع هدف مورد نظر را ارزیابی کند. برخلاف روش‌های قطعی تصمیم‌گیری، IGDT از توزیع احتمالاتی استفاده نمی‌کند. این روش انحراف از مقدار پیش‌بینی شده را اندازه می‌گیرد و احتمال بروز یک خروجی را بیان نمی‌کند. به این ترتیب IGDT به دلیل استفاده نکردن از توزیع احتمال، به فرضیات مربوط به احتمال وقوع نتایج حساس نیست. IGDT بر اساس اجزای زیر بنا شده است (Hayes, et al., 2013):

۱- یک فضای تصمیم^۱ Q که شامل تعدادی گزینه تصمیم‌گیری یا انتخاب ($q \in Q$) پیش روی مدیران است.

۲- یک فضای عدم قطعیت^۲ S که شامل همه اجزای غیر قطعی مساله است.

۳- یک تابع دستاورد^۳ R به عنوان مدل سیستم که میزان موفقیت تصمیم را اندازه می‌گیرد.

۴- یک مدل غیر پارامتری $U(\alpha, \hat{u})$ برای مقادیر غیر قطعی u در تابع دستاورد، که با پارامتر غیر منفی α که بر اساس اختلاف بین مقدار تخمینی اولیه \hat{u} و دیگر مقادیر ممکن، عدم قطعیت را اندازه‌گیری می‌کند.

IGDT از ساختار ذکر شده برای شناسایی تصمیم‌ها بر اساس فرصت یا مقاومت استفاده می‌کند. مدل‌های عدم قطعیت با استفاده از IGDT، در مطالعاتی نظیر تئوری کنترل مهندسی، مطالعات زیست محیطی، تحلیل‌های مربوط به مهندسی برق، قابلیت اطمینان مکانیکی، مدیریت منابع آبی و غیره نیز استفاده شده است (Zare, et al., 2010; Korteling, et al., 2012; Matroso, et al., 2013; Nojavan, et al., 2013; Kazemi, et al., 2014; Khojasteh & Jadid, 2015).

۳-۳-۱ مدل سیستم در روش IGDT

مسائل بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت عموماً به صورت زیر بیان می‌شوند (Rabiee, et al., 2015):

$$f = \max_X (f(X, \gamma)) \quad (۵-۳)$$

$$H_i(X, \gamma) \leq 0, \quad \forall i \in \varphi_I \quad (۶-۳)$$

$$G_j(X, \gamma) = 0, \quad \forall j \in \varphi_J \quad (۷-۳)$$

$$\gamma \in U \quad (۸-۳)$$

که در روابط فوق، γ پارامتر غیرقطعی ورودی است. همچنین U مجموعه عدم قطعیت‌ها در رفتار پارامتر

^۱ Decision space

^۲ Uncertainty space

^۳ Reward function

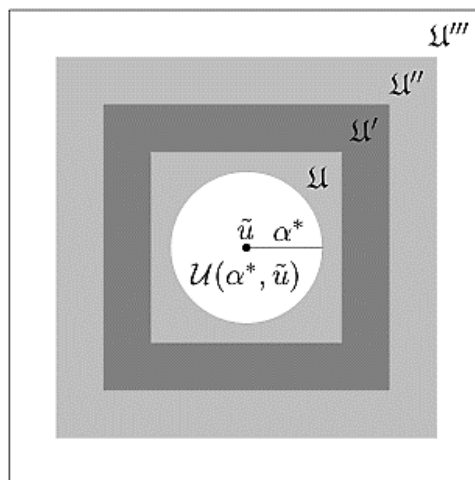
غیرقطعی ورودی را توصیف می‌کند. پارامتر X مجموعه متغیرهای تصمیم‌گیری مساله است. تابع هدف (۵-۳) در حالت کلی هم به متغیر تصمیم‌گیری و هم به پارامتر غیرقطعی ورودی وابسته است.

۳-۳-۲ مدل عدم قطعیت

در روش IGDT توصیف ریاضی مدل عدم قطعیت به صورت زیر قابل بیان است (Hayes, et al., 2013):

$$U = U(\alpha, \bar{\gamma}) = \left\{ \gamma; \frac{|\gamma - \bar{\gamma}|}{\bar{\gamma}} \leq \alpha \right\}, \quad \alpha \geq 0 \quad (9-3)$$

در این رابطه U بیانگر مدل عدم قطعیت، $\bar{\gamma}$ مقدار پیش‌بینی شده پارامتر غیرقطعی و α مقدار حداکثر انحراف ممکن پارامتر غیرقطعی از مقدار پیش‌بینی شده خود است که به آن شعاع عدم قطعیت یا پارامتر عدم قطعیت نیز اطلاق می‌شود. شکل ۳-۴ نمای شماتیک از مدل عدم قطعیت در روش IGDT را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، IGDT عدم قطعیت را توسط شعاع عدم قطعیت α به صورت زیرمجموعه‌هایی $U(\alpha, \hat{u})$ حول نقطه تخمینی \hat{u} پارامتر غیر قطعی نشان می‌دهد. در وضعیتی که عدم قطعیت وجود نداشته باشد، تخمین صحیح است. در حالتی که عدم قطعیت افزایش پیدا می‌کند، زیرمجموعه‌ها گسترش پیدا می‌کنند و عدم قطعیت را به صورت فاصله بین نقطه تخمینی و محدوده عدم قطعیت نشان می‌دهند.



شکل ۳-۴- نمای تصویری از مدل عدم قطعیت در روش IGDT (Sniedovich, 2007)

شکاف اطلاعاتی بر اساس یک مقدار تخمین زده شده و انحراف‌های به وجود آمده از آن قابل بیان است. در روش‌هایی مانند روش‌های احتمالاتی، تمام خروجی‌های ممکن را در نظر می‌گیرند و به آن‌ها احتمال تخصیص می‌دهند. در روش IGDT خروجی‌های ممکن با در نظر گرفتن محدودیت‌های مورد نظر لحاظ می‌شوند. یک استراتژی متداول با در نظر گرفتن روابط (۵-۳) تا (۸-۳) و با فرض این که پارامتر غیرقطعی هیچ انحرافی از مقدار پیش‌بینی شده خود نداشته باشد، به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$f_b = \max_X(f(X, \bar{\gamma})) \quad (۱۰-۳)$$

$$H_i(X, \bar{\gamma}) \leq 0, \quad \forall i \in \varphi_I \quad (۱۱-۳)$$

$$G_j(X, \bar{\gamma}) = 0, \quad \forall j \in \varphi_J \quad (۱۲-۳)$$

با استفاده از خروجی به دست آمده از روابط (۱۰-۳) تا (۱۲-۳) مقدار پایه تابع هدف به دست می‌آید. به بیان دیگر، مقدار تابع هدف با فرض این که پارامتر غیرقطعی دقیقاً برابر مقدار پیش‌بینی شده (یا مقدار تخمین زده شده) خود باشد به دست می‌آید. چنانچه پارامتر غیرقطعی از مقدار پیش‌بینی شده خود متفاوت باشد، تصمیم‌گیرندگان با دو استراتژی ریسک‌گریز^۱ و یا ریسک‌جو^۲ مواجه هستند (ریبئی و همکاران، ۱۳۹۵).

۳-۳-۳- استراتژی ریسک‌جو در تئوری شکاف اطلاعاتی

عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی همواره سبب بدتر شدن تابع هدف نمی‌شود. در استراتژی ریسک‌جو، تحقق واقعی پارامترهای غیرقطعی نه تنها اثر نامطلوبی بر روی مقدار تابع هدف ندارد، بلکه مقدار واقعی پارامتر غیرقطعی باعث افزایش تابع هدف از مقدار پایه خود می‌شود. در واقع در این استراتژی، تصمیم‌گیرنده به دنبال دستیابی به تابع هدفی بیشتر از مقدار پایه، بر اثر تغییرات مثبت پارامتر غیرقطعی است (Nojavan, et al., 2016). این استراتژی اغلب توسط تصمیم‌گیرندگان خوش‌بین انتخاب می‌شود.

^۱ Risk Averse

^۲ Risk seeker

در این روش، متغیرهای تصمیم‌گیری به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که با انحراف کمی از پیش‌بینی پارامترهای غیرقطعی (با حداقل شعاع عدم قطعیت) می‌توانند اتفاق بیفتند.

با توجه به این که در این رساله هدف تعیین و کمینه کردن اثر نامطلوب عدم قطعیت در پارامتر ورودی بوده و ارائه رهیافتی مقاوم برای حل مساله با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها مورد نظر است، لذا از بحث بیشتر درباره روش ریسک‌جو برای رعایت اختصار و تمرکز بیشتر بر روی روش ریسک‌گریز، در این رساله صرف نظر می‌شود.

۳-۳-۴ - استراتژی ریسک‌گریز و تابع مقاومت

این استراتژی مربوط به حالتی است که عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی اثر نامطلوبی بر روی تابع هدف مساله داشته باشد. لذا این استراتژی به دنبال این است که به ازای یک مقدار مشخص و از پیش تعیین شده برای بدتر شدن تابع هدف از مقدار پایه خود، حداکثر مقدار شعاع عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی را بیابد. این به این معنی است که مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری به گونه‌ای تعیین می‌شوند که حداکثر شعاع عدم قطعیت ممکن برای پارامترهای غیرقطعی به ازای یک مقدار مشخصی از تابع هدف به دست آید. تابع مقاومت عملکرد ریسک‌گریزی دارد و عموماً توسط تصمیم‌گیرندگان محافظه‌کار استفاده می‌شود. مجموعه متغیرهای تصمیم‌گیری باید به گونه‌ای به دست آید که تابع هدف واقعی (f) در برابر انحراف پارامتر غیرقطعی γ نسبت به مقدار پیش‌بینی شده $\bar{\gamma}$ به صورت بهینه محاسبه شود. زمانی که تابع هدف در برابر حداکثر شعاع عدم قطعیت ایمن‌سازی شود، تصمیم‌گیری مقاوم به دست می‌آید. به بیان دیگر، تصمیم‌گیرنده مطمئن خواهد بود که به ازای تغییرات پارامتر غیرقطعی در محدوده شعاع عدم قطعیت به دست آمده، مقدار تابع هدف از حد مجازی که برای تعیین شعاع عدم قطعیت پارامتر غیرقطعی در نظر گرفته شده است، کمتر نخواهد شد. روابط ریاضی توصیف کننده این استراتژی به صورت زیر تعریف می‌شوند (ربیعی و همکاران، ۱۳۹۳):

$$\vartheta_C = \max_{X,a} \alpha \quad (13-3)$$

$$H_i(X, \bar{\gamma}) \leq 0, \quad \forall i \in \varphi_I \quad (14-3)$$

$$G_j(X, \bar{\gamma}) = 0, \quad \forall j \in \varphi_J \quad (15-3)$$

$$f(X, \gamma) \geq \Delta_C \quad (16-3)$$

$$\Delta_C = f_b(X, \gamma) - \delta |f_b(X, \gamma)|, \quad \gamma \in U \quad (17-3)$$

$$\frac{|\gamma - \bar{\gamma}|}{\bar{\gamma}} \leq \alpha \quad (18-3)$$

$$0 \leq \delta \leq 1 \quad (19-3)$$

در روابط فوق Δ_C مقدار بحرانی تابع هدف (یا حداکثر مقدار مجاز کاهش تابع هدف نسبت به مقدار پایه) است که غالباً توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود. مطابق رابطه (۱۷-۳)، این مقدار به صورت تابعی از مقدار پایه تابع هدف تعریف می‌شود. ϑ_C که همان حداکثر شعاع عدم قطعیت پارامتر غیرقطعی مساله است، یک متغیر مثبت است. پارامتر δ نیز همان درجه تحمل کاهش تابع هدف نسبت به مقدار پایه به دلیل عدم قطعیت‌های نامطلوب تعریف شده است که توسط تصمیم‌گیرنده مشخص می‌شود. در مدل ارائه شده در روابط (۱۳-۳) تا (۱۹-۳) حداکثر شعاع عدم قطعیت ϑ_C به گونه‌ای تعیین می‌شود که به ازای تغییرات پارامتر غیرقطعی γ مطابق رابطه (۱۸-۳)، مقدار تابع هدف از محدوده مجاز تعیین شده در رابطه (۱۶-۳) کمتر نشود. تابع مقاومت در استراتژی ریسک‌گریز به ارزش‌های بالاتر از مقدار پیش‌بینی شده مربوط بوده و بزرگترین مقدار پارامتر غیرقطعی را بیان می‌کند که به ازای آن ارزش به دست آمده کمتر از یک مقدار مشخص نیست. عدم قطعیت مورد نظر معمولاً بر اساس مقدار پیش‌بینی شده آن پارامتر غیرقطعی بیان می‌شود. این تابع درجه مقاومت تصمیم‌گیری را در برابر تغییرات پارامترهای غیرقطعی بیان کرده و معیاری برای اندازه‌گیری امنیت تصمیم‌گیری است. باید توجه داشت که مقادیر بزرگ این تابع مطلوب بوده و بنابراین به صورت یک تابع بیشینه‌سازی بیان خواهد شد. این تابع به صورت ریاضی به صورت رابطه (۲۰-۳) بیان می‌شود (Ben-Haim, 2006).

$$\hat{\alpha}(q, r_c) = \max \left\{ \alpha: r_c \leq \min_{u \in U(\alpha, \bar{u})} R(q, u) \right\} \quad (20-3)$$

برای مقادیر بزرگ شعاع عدم قطعیت $\hat{\alpha}(q, r_c)$ ، تابع هدف در برابر عدم قطعیت‌ها حساسیت کمتری خواهد داشت و بالعکس.

۳-۴- برنامه‌ریزی تولید معدن بر اساس IGDT

با توجه به مطالب ذکر شده در بخش‌های قبل، عوامل زیادی موجب بروز عدم قطعیت در قیمت و عیار ماده معدنی می‌شوند. به عنوان مثال تغییرات قیمت به عوامل شناخته یا ناشناخته‌ی زیادی بستگی دارد و هر یک از این عوامل تاثیرگذار ممکن است در آینده رفتار متفاوتی نسبت به پیش‌بینی‌ها از خود نشان دهند. در نتیجه تصمیم‌گیرنده برای پیش‌بینی صحیح قیمت نیاز به اطلاعات زیادی خواهد داشت که در دنیای واقعی دسترسی به تمام اطلاعات برای یک تصمیم‌گیرنده تقریباً امکان‌پذیر نیست. همچنین کاهش عدم قطعیت عیاری کانسار نیز نیازمند صرف هزینه و زمان برای کسب اطلاعات بیشتر است که سرمایه‌گذاران تمایل دارند تا حد ممکن از آن اجتناب کنند. در این بخش برنامه‌ریزی تولید معدن روباز در شرایط عدم قطعیت قیمت و عیار بر اساس IGDT که در فلوچارت شکل ۳-۱ نشان داده شد شرح داده می‌شود.

۳-۴-۱- مدل عدم قطعیت قیمت

روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی قیمت تاکنون ارائه شده است که برخی از آن‌ها در فصل قبل مورد بررسی قرار گرفت. لازم به یادآوری است در این رساله برای رویارویی با تغییرات و نوسانات قیمت، با پذیرفتن احتمال بروز مدل رفتاری جدید از قیمت در آینده، روش IGDT برای شناسایی مقادیر مناسب قیمت برای لحاظ کردن در برنامه‌ریزی تولید پیشنهاد می‌شود. مدل عدم قطعیت قیمت در مساله برنامه‌ریزی تولید معادن روباز به شرح رابطه (۳-۲۱) پیشنهاد می‌شود:

$$U(\alpha, \hat{p}_t) = \left\{ \alpha : \frac{|p_t - \hat{p}_t|}{p_t} \leq \alpha \right\}, \alpha \geq 0, \forall t \quad (21-3)$$

که در آن p_t و \hat{p}_t به ترتیب مقدار پیش‌بینی شده و مقدار واقعی قیمت در دوره t است. مقادیر پیش‌بینی شده قیمت می‌تواند با استفاده از هر یک از روش‌های پیش‌بینی تعیین شود. لازم به ذکر است بررسی تغییرات قیمت و پیش‌بینی آن نیازمند انجام تحلیل‌های پیچیده بنیادی^۱ و فنی^۲ بوده که از حیثه بحث این رساله خارج است. همچنین روش‌های متعددی برای مدل‌سازی قیمت وجود دارد که در بخش قبل برخی از کاربردهای آن‌ها شرح داده شد. در این رساله استفاده از روش درخت دو جمله‌ای برای تخمین قیمت پیشنهاد شد.

۳-۴-۲ - مدل عدم قطعیت عیار

با توجه به این‌که در این رساله برای عبور از عدم قطعیت عیار بلوک‌ها از روش تولید تحقق‌های متعدد عیاری استفاده شده است، لذا برای هر بلوک عیارهای متعددی وجود خواهد داشت. مجموعه عیارهای به دست آمده برای هر بلوک، شامل یک جامعه آماری با میانگین و انحراف معیار خاص خود خواهد بود که بر این اساس مدل عدم قطعیت برای عیار به شرح رابطه (۲۲-۳) قابل بیان است:

$$U(\beta, \bar{g}_i) = \left\{ \beta : |g_i - \bar{g}_i| \leq \beta \sigma_{g_i} \right\}, \beta \geq 0, \forall i \quad (22-3)$$

که در آن \bar{g}_i و σ_{g_i} به ترتیب مقدار متوسط عیار و انحراف معیار عیار در بلوک i است که بر اساس تحقق‌های عیاری برای هر بلوک قابل محاسبه است. β شعاع عدم قطعیت قیمت و U بیانگر مدل عدم قطعیت پارامتر غیر قطعی عیار بلوک i هستند.

۳-۴-۳ - محاسبه ارزش خالص فعلی مبنا (NPV_0)

در برنامه‌ریزی تولید در حالت قطعی، تمام پارامترهای موثر در تعیین ارزش اقتصادی بلوک‌ها به صورت

^۱ Fundamental

^۲ Technical

قطعی و با یک عدد مشخص در نظر گرفته می‌شوند. برای به دست آوردن مقدار بهینه NPV، تابع هدف به یک تابع حداکثرسازی با محدودیت‌های استخراج و فرآوری تبدیل می‌شود. اگر \hat{V}_i مقدار پیش‌بینی شده یا تخمینی ارزش اقتصادی بلوک i باشد، در این صورت مقدار تابع هدف که همان ارزش خالص فعلی استخراج پیت معدن با N بلوک در T دوره زمانی بر اساس مقادیر تخمینی (NPV_0) است، به شرح رابطه (۲۳-۳) قابل بیان است.

$$NPV_0 = \max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{\hat{V}_i}{(1+d)^t} \cdot x_{it} \quad (23-3)$$

که در این رابطه x_{it} نشان دهنده وضعیت استخراج بلوک i می‌باشد. در صورتی که بلوک i در دوره زمانی t استخراج شود، x_{it} برابر با یک و در غیر این صورت برابر با صفر خواهد بود. با توجه به این که هر بلوک تنها برای یک بار می‌تواند استخراج شود، لذا محدودیت استخراج به شرح رابطه (۲۴-۳) باید در نظر گرفته شود.

$$\sum_{t=1}^T x_{it} \leq 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (24-3)$$

بر اساس رابطه (۲۵-۳) بلوک i زمانی می‌تواند استخراج شود که بلوک j ماقبل آن (بر اساس محدودیت شیب) استخراج شده باشد.

$$x_{it} - \sum_{t=1}^T x_{jt} \leq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T \quad (25-3)$$

همچنین محدودیت‌های معدنکاری و فرآوری نیز طبق روابط (۲۶-۳) تا (۲۹-۳) باید در نظر گرفته شوند.

$$\sum_{i=1}^I Q_i x_{it} \geq \underline{M}_t, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (26-3)$$

$$\sum_{i=1}^I Q_i x_{it} \leq \bar{M}_t, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (27-3)$$

$$\sum_{i=1}^I o_i Q_i \times x_{it} \geq \underline{O}_t, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (28-3)$$

$$\sum_{i=1}^I o_i Q_i \times x_{it} \leq \bar{O}_t, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (29-3)$$

که در روابط ذکر شده، \underline{M}_t و \overline{M}_t به ترتیب بیانگر حد پایین و بالای ظرفیت معدنکاری و \underline{O}_t و \overline{O}_t به ترتیب بیانگر حد پایین و بالای ظرفیت فرآوری هستند. مقدار o_i برابر با یک خواهد بود اگر بلوک i ماده معدنی شناخته شود و در غیر این صورت به آن مقدار صفر تعلق می‌گیرد.

۳-۴-۴- تعیین ضریب انحراف δ

در برنامه‌ریزی تولید معدن در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت با استفاده از تئوری شکاف اطلاعاتی، تابع هدف مشابه روش‌های قطعی برنامه‌ریزی تولید معدن حداکثر سازی ارزش خالص فعلی پروژه تعریف می‌شود. در بررسی اقتصادی اکثر پروژه‌ها ارزش خالص فعلی و نرخ بازده داخلی^۱ (IRR) معیارهای اصلی برای تصمیم‌گیری هستند. طبق تعریف IRR معادل نرخ سودی است که سرمایه‌گذار می‌تواند با سرمایه‌گذاری در یک پروژه به دست آورد. شاخص IRR از جمله پرکاربردترین شاخص‌های مالی است که می‌توان با استفاده از آن توجیه‌پذیری مالی طرح را در مقایسه با شرایط معمول سرمایه‌گذاری در یک صنعت خاص از جمله معدن‌کاری به دست آورد. محاسبه شاخص IRR برای یک پروژه در ارتباط تنگاتنگ با فرمول محاسبه شاخص NPV است. لذا شاخص IRR نرخ تنزیلی است که به ازاء آن نرخ تنزیل، شاخص NPV طرح معادل صفر شود. فرمول محاسبه شاخص IRR به صورت زیر است:

$$i^* = IRR \quad \text{if } NPV(i^*) = 0 \quad (30-3)$$

به منظور بررسی توجیه‌پذیری پروژه بر اساس شاخص IRR، بایستی یک استاندارد شاخص مالی به نام حداقل نرخ بازگشت جذب‌کننده^۲ (MARR) از جانب سرمایه‌گذار برای شاخص IRR تعیین شود. این استاندارد شاخص مالی بایستی به نحوی تعیین شود که بتوان به توسط آن سرمایه‌گذاری در طرح که همراه با ریسک است را با سرمایه‌گذاری در یک طرح بدون ریسک نظیر سپرده‌گذاری در بانک، بصورت کاملاً معقولانه‌ای مقایسه کرد. به طور معمول برای تعیین نرخ MARR مشابه نرخ تنزیل، حداکثر نرخ

¹ Internal Rate of Return

² Minimum Attractive Rate of Return

سود سپرده‌های بلند مدت بانکی و یا اوراق قرضه را به اضافه چند درصد ریسک سرمایه‌گذاری لحاظ می‌نمایند. در بررسی مالی پروژه‌ها نرخ تنزیل و شاخص MARR در حالت کلی معادل یکدیگر بوده و به صورت تقریباً مشابه تعیین می‌گردند. لازم به ذکر است تعیین شاخص MARR مستلزم بررسی دقیق پروژه از دیدگاه‌های مختلف نظیر زمان، مکان و نوع صنعت است.

در رویکرد ارائه شده در این رساله ارزش خالص فعلی بحرانی به عنوان یک معیار ورودی برای برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است. در واقع با تعیین ضریب انحراف δ ، مقدار انحراف از NPV تعیین و مقدار NPV بحرانی قابل تعیین خواهد بود. به این ترتیب حداقل مقدار NPV که توسط سرمایه‌گذار قابل قبول است تعیین کننده برنامه‌ریزی تولید معدن قرار خواهد گرفت. NPV بحرانی می‌تواند بر اساس شاخص MARR نیز تعیین شود که در این صورت برنامه‌ریزی بر اساس مقدار MARR ورودی انجام خواهد شد.

۳-۴-۵- تابع مقاومت در برنامه‌ریزی تولید معدن

مدل‌سازی عدم قطعیت در روش IGDT با استفاده از اطلاعات اولیه موجود در خصوص پارامترهای غیر قطعی انجام می‌شود. مدل عدم قطعیت، شکاف بین مقادیر شناخته و ناشناخته را نشان می‌دهد. مدل عدم قطعیت شکاف بین مقادیر شناخته و ناشناخته به عنوان تابعی از پارامترهای شناخته شده همچون مقدار پیش‌بینی شده پارامتر غیرقطعی را نشان می‌دهد. مدل تصادفی طراحی شده مبتنی بر روش IGDT، یک تابع هدف مینیمم مطلوب را به عنوان ورودی در نظر می‌گیرد و با یک رویکرد ریسک‌گریزانه، با ماکزیمم کردن بازه‌ی تغییرات پارامترهای تصادفی حول مقادیر پیش‌بینی شده در جهت نامطلوب، حداکثر خطای قابل قبول در پیش‌بینی این پارامترهای تصادفی را به عنوان خروجی فراهم می‌کند. در مورد مساله‌ی برنامه‌ریزی تولید، فرض می‌شود که یک پیش‌بینی از پارامترهای تصادفی در دسترس است. روش IGDT جوابی را به دست می‌دهد که تضمین می‌کند، مقدار تابع هدف در بدترین حالت، از یک مقدار مشخص شده (مقدار بحرانی)، بیشتر خواهد بود، به شرطی که پارامترهای غیرقطعی

واقعی، در بازه‌ی عدم قطعیت مشخص شده، با مرکزیت پارامترهای پیش‌بینی شده، قرار گیرد. در مساله برنامه‌ریزی تولید معدن، تابع مقاومت به شرح روابط (۳۱-۳) تا (۳۴-۳) به صورت مساله بهینه‌سازی چند هدفه^۱ (MOOP) قابل تعریف است.

$$\hat{\alpha}(NPV_c) = \max \alpha \quad (۳۱-۳)$$

$$\hat{\beta}(NPV_c) = \max \beta \quad (۳۲-۳)$$

Subject to:

$$\min_{\alpha, \beta} NPV \geq NPV_c \quad (۳۳-۳)$$

$$NPV_c = (1 - \delta) \cdot NPV_0 \quad (۳۴-۳)$$

$$\begin{aligned} & \min_{\alpha, \beta} NPV \\ & = \left\{ \max \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \frac{(\hat{P}_t(1 - \alpha) - r)Q_i \bar{g}_i (1 - \beta)y - mQ_i - pQ_i}{(1+d)^t} \cdot x_{it} \right\} \end{aligned} \quad (۳۵-۳)$$

St.

$$\frac{P_t - \hat{P}_t}{P_t} \leq \alpha, \alpha \geq 0, \forall t \quad (۳۶-۳)$$

$$\frac{P_t - \hat{P}_t}{P_t} \geq -\alpha, \alpha \geq 0, \forall t \quad (۳۷-۳)$$

$$\frac{g_i - \bar{g}_i}{\sigma_{g_i}} \leq \beta, \beta \geq 0, \forall i \quad (۳۸-۳)$$

$$\frac{g_i - \bar{g}_i}{\sigma_{g_i}} \geq -\beta, \beta \geq 0, \forall i \quad (۳۹-۳)$$

$$\{(۲۴-۳) - (۲۹-۳)\} \quad (۴۰-۳)$$

که در روابط فوق NPV_c بیانگر ارزش خالص فعلی بحرانی، NPV_0 بیانگر ارزش خالص فعلی تخمینی و δ ضریب انحراف NPV نسبت به مقدار تخمینی است. روابط (۳۱-۳) و (۳۲-۳) توابع هدف MOOP را نشان می‌دهند که با محدودیت ذکر شده در رابطه (۳۳-۳) باید جواب‌ها تعیین شوند. این محدودیت

^۱ Multi-objective optimization problem

خود با حل یک مساله بهینه‌سازی دیگر که در روابط (۳-۳۵) تا (۳-۴۰) آمده است باید تعیین شود. روابط (۳-۲۴) تا (۳-۲۹) نیز محدودیت‌های مساله هستند که برای جلوگیری از تکرار، فقط شماره آن‌ها در رابطه (۳-۴۰) نشان داده شده است. در روابط فوق مقادیر احتمالی قیمت در دوره‌های مختلف با روش درخت دوجمله‌ای و با توجه به شعاع عدم قطعیت به دست آمده از روش IGDT قابل شناسایی هستند. بنابراین همچنین حالت‌های مختلف از توزیع عیاری کانسار یا عبارت دیگر مقادیر پیش‌بینی شده عیار نیز با روش شبیه‌سازی زمین‌آماري و شعاع عدم قطعیت مربوط به عیار قابل محاسبه هستند.

۳-۴-۶- حل مدل ارائه شده و تعیین شعاع عدم قطعیت پارامترها

مساله MOOP یک راه حل برای بهینه‌سازی همزمان همه توابع هدف ندارد. در عوض مفهوم بهینگی پارتو^۱ در MOOP معرفی شده است. جواب‌های بهینه پارتو نمی‌توانند یک تابع هدف را بهبود دهند، مگر با ضعیف کردن عملکرد حداقل یکی دیگر از توابع هدف. در چنین شرایطی، تصمیم‌گیرنده باید بهترین جواب تعاملی را از بین جواب‌های بهینه پارتو انتخاب کند (Mavrotas, 2009). روش ϵ -constraint تقویت شده برای بهینه‌سازی مساله چند هدفه قابل استفاده است (Mazidi, et al., 2016). بر اساس این روش، شعاع عدم قطعیت قیمت (α) به عنوان تابع هدف اصلی حداکثرسازی می‌شود. شعاع عدم قطعیت عیار (β) به Int بازه مساوی در (Int+1) نقطه تقسیم می‌شود. در این حالت (Int+1) مساله برای دستیابی به جواب‌های بهینه پارتو باید بهینه‌سازی شود. مساله بهینه‌سازی چند هدفه ذکر شده در روابط (۳-۳۱) تا (۳-۴۰) بر اساس روش ϵ -constraint تقویت شده به شرح روابط (۳-۴۱) تا (۳-۴۴) قابل بیان است.

$$\text{Max} \left(\alpha + \varepsilon \times \left(\frac{S_{\beta}}{R_{\beta}} \right) \right) \quad (۳-۴۱)$$

Subject to:

¹ Pareto optimality

$$\beta - S_{\beta} = L_{\beta} \quad S_{\beta} \geq 0 \quad (42-3)$$

$$L_{\beta} = \beta^{max} - (R_{\beta}/Int) \times b \quad b = 0, 2, \dots, int \quad (43-3)$$

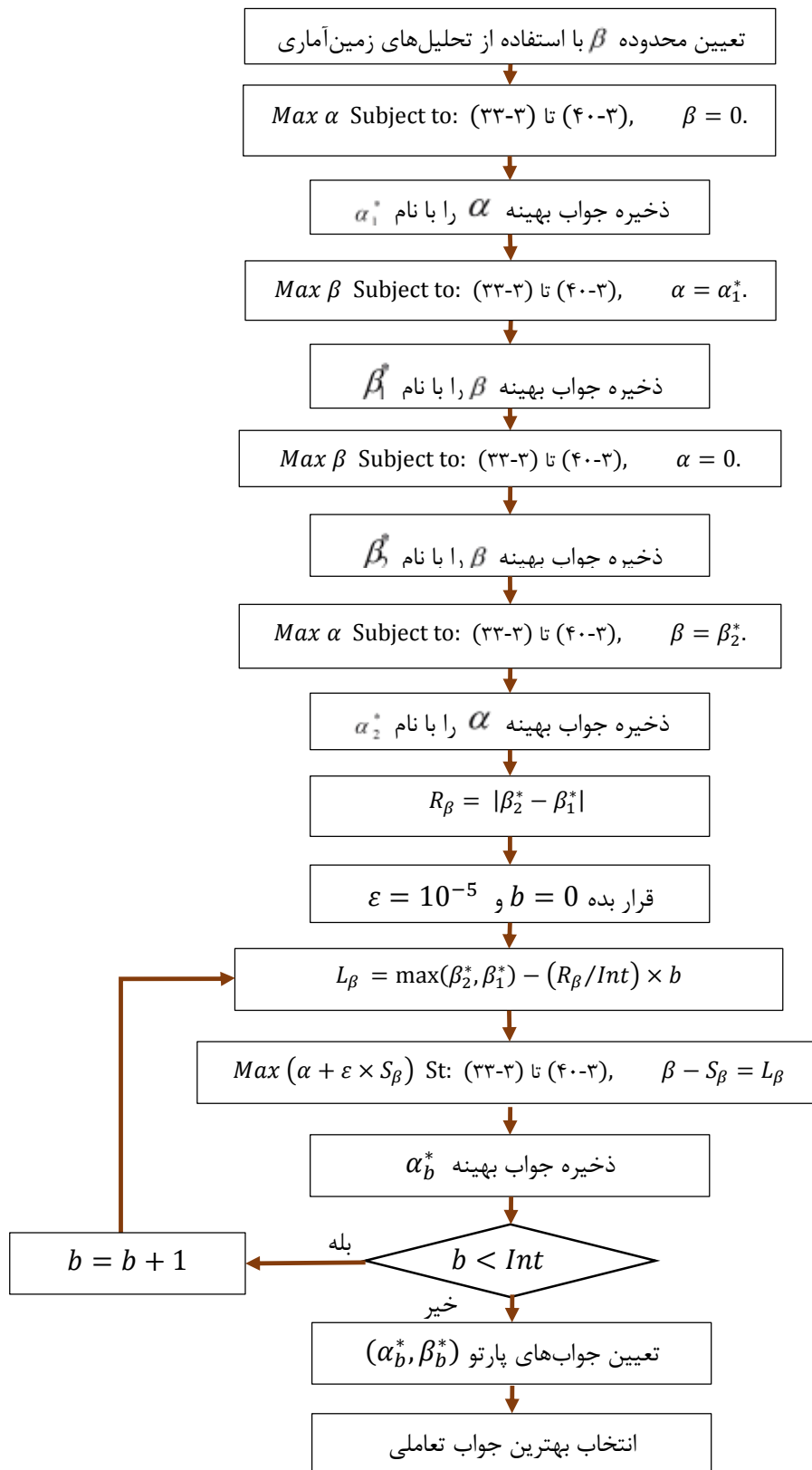
$$(31-3) - (40-3) \quad (44-3)$$

که در روابط فوق، ε یک عدد کوچک معمولاً بین 10^{-3} و 10^{-6} است. S_{β} یک متغیر کمکی، β^{max} و β^{min} به ترتیب حداکثر و حداقل شعاع عدم قطعیت عیار هستند. همچنین محدوده β با R_{β} نشان داده شده که با رابطه (45-3) قابل محاسبه است.

$$R_{\beta} = \beta^{max} - \beta^{min} \quad (45-3)$$

جواب‌های بهینه پارتو با تغییر دادن مقدار b و حل مساله بهینه‌سازی یک هدفه (3-41) تا (3-44) به دست می‌آید. هدف مدل مقاوم در IGDT، حداکثر کردن افق پارامترهای عدم قطعیت به منظور برآورده شدن حداقل مقدار مورد نظر برای تابع هدف است.

با توجه به این‌که در پروژه‌های معدنی، قطعیت عیار با کیفیت کار اکتشافی انجام شده رابطه مستقیم دارد، لذا می‌توان حدود بازه‌های شعاع عدم قطعیت عیار در هر پروژه را با انجام بررسی‌های زمین‌آماري و برآورد واریانس و خطای تخمین به دست آورد و مقادیر جواب برای پارامتر β را محدود کرد. انجام این کار حل مساله بهینه‌سازی چند هدفه را ساده‌تر خواهد کرد. فلوچارت حل مساله بهینه‌سازی چند هدفه ذکر شده در روابط (3-31) تا (3-40) بر اساس روش ε -constraint تقویت شده در شکل 3-5 نشان داده شده است. با انجام مراحل ذکر شده در فلوچارت می‌توان حداکثر شعاع عدم قطعیت پارامترهای غیر قطعی عیار و قیمت را تعیین کرد.



شکل ۳-۵- مراحل حل مساله چند هدفه با روش ϵ -constraint

۳-۴-۷- تعیین مقادیر قیمت و عیار بر اساس مدل پیشنهادی

با توجه به استراتژی ریسک‌گریز که در این رساله بر آن تأکید شده است، مقادیر شعاع عدم قطعیت در جهت کاهش ریسک در برنامه‌ریزی تولید معدن مورد توجه قرار دارند. به این ترتیب عیار هر بلوک برای محاسبه ارزش اقتصادی بلوک و انجام برنامه‌ریزی تولید به شرح رابطه (۳-۴۶) و قیمت در هر دوره با استفاده از رابطه (۳-۴۷) قابل محاسبه خواهد بود:

$$g_i^* = \bar{g}_i(1 - \beta) \quad (۳-۴۶)$$

$$P_t^* = \hat{P}_t(1 - \alpha) \quad (۳-۴۷)$$

که g_i^* عیار بلوک i و P_t^* قیمت در دوره t تعیین شده بر پایه مدل ارائه شده هستند. با استفاده از روابط فوق، مقدار قیمت و عیار با در نظر گرفتن شعاع عدم قطعیت آن‌ها تعیین می‌شوند. در واقع این مقادیر بیانگر مقدار قیمت و عیار در حالت ریسک‌گریز هستند. با تعیین مقادیر عیار و قیمت برای هر بلوک که عدم قطعیت نیز در آن‌ها لحاظ شده، برنامه‌ریزی تولید معدن در حالت ریسک‌گریز انجام می‌شود.

۳-۴-۸- ارزش اقتصادی بلوک‌ها در شرایط عدم قطعیت

با تغییر پارامترهای قطعی به غیرقطعی (تحقق‌های متعدد)، در رابطه ویتل (Whittle, 1988)، ارزش تنزیل نیافته بلوک i در دوره t به ازای هر تحقق عیاری φ و هر تحقق قیمتی ρ از رابطه (۳-۴۸) قابل محاسبه است.

$$V_{i\varphi\rho} = (P_{\rho t} - r)Q_i g_{\varphi i} \gamma - mQ_i - cQ_i \quad (۳-۴۸)$$

به گونه‌ای که اگر $V_{i\varphi\rho}$ کوچکتر یا مساوی صفر باشد (بلوک i بلوک باطله باشد) مقدار آن برابر با منفی mQ_i خواهد بود. برای هر تحقق محاسباتی ارزش بلوک i طبق رابطه (۳-۴۹) به دست می‌آید:

$$V_{i\varphi\rho} = \begin{cases} V_{i\varphi\rho} & \text{if } V_{i\varphi\rho} > 0 \\ -mQ_i & \text{if } V_{i\varphi\rho} \leq 0 \end{cases} \quad (۳-۴۹)$$

ارزش تنزیل یافته بلوک i در دوره t به ازای هر تحقق عیاری φ و هر تحقق قیمتی ρ از رابطه (۳-۵۰)

قابل محاسبه خواهد بود:

$$dV_{i\varphi\rho} = \frac{V_{i\varphi\rho t}}{(1+d)^t} \quad (50-3)$$

در روابط فوق پارامترها به شرح زیر تعریف می‌شوند:

- i : اندیس بلوک
- t : اندیس دوره
- φ : اندیس تحقق عیار
- ρ : اندیس تحقق قیمت
- Q_i : تناژ بلوک i
- y : بازیابی کلی
- $g_{\varphi i}$: عیار بلوک i در تحقق φ
- $P_{\rho t}$: تحقق قیمت در دوره t
- r : هزینه تغلیظ بر تن فلز
- m : هزینه معدنکاری بر تن استخراجی
- c : هزینه فرآوری بر تن ماده معدنی
- d : نرخ تنزیل

۳-۴-۹- تعیین فازها و زمان‌بندی استخراج بلوک‌ها

هدف از طراحی فازهای استخراجی تهیه راهنمایی برای زمان‌بندی استخراج مواد از پیت در طول عمر معدن است (Goodfellow & Dimitrakopoulos, 2012). مهمترین موضوعی که در طراحی فازهای استخراجی انجام می‌شود، تعیین تعداد فازها، موقعیت مکانی هر فاز در محدوده نهایی پیت و مقادیر ماده معدنی و باطله جهت استخراج است. در برخی موارد با توجه به پیچیده بودن بهینه‌سازی همزمان مراحل تعیین فازها، در ابتدا محدوده نهایی معدن با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی از جمله موقعیت قرارگیری ماده معدنی تعیین می‌شود (Gu, et al., 2010). از آنجا که پیاده‌سازی مدل‌های ریاضی پیشرفته روی کل مواد موجود در محدوده نهایی، خیلی مشکل و بعضاً غیر ممکن است، برای انجام برنامه‌ریزی تولید بلندمدت، محدوده نهایی معدن به چندین پیت رشد‌یابنده یا لانه‌ای تقسیم می‌شود و سپس این پیت‌ها از لحاظ برخی پارامترهای فنی مانند طراحی جاده‌های حمل و نقل، حداقل عرض

کف پیت، حداقل عرض پوش‌بک‌ها و پارامترهای مکانیک سنگی مورد ملاحظه قرار گرفته و تبدیل به پوش‌بک می‌گردند. سپس روی هر یک از پوش‌بک‌ها برنامه‌ریزی تولید انجام می‌گیرد تا برنامه‌ریزی تولید تفضیلی معدن حاصل شود. نرخ بهره، عیار و میزان باطله‌برداری، در میزان ارزش خالص فعلی حاصل از برنامه‌ریزی تولید پوش‌بک‌ها موثرند. با تعیین فازهای استخراجی، زمان‌بندی استخراج بلوک‌ها در هر فاز باید انجام شود. برای انجام آن می‌توان از روش‌های موجود از جمله برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی استخراج بلوک‌ها را با استفاده از عیار و قیمت تعیین شده با روش IGDT انجام داد.

۳-۵- جمع‌بندی فصل

در این فصل برنامه‌ریزی تولید معدن روباز در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از روش شبیه‌سازی زمین‌آماری برای مدل‌سازی عدم قطعیت عیار و روش درخت دو جمله‌ای برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت پیشنهاد شدند. سپس بر اساس تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی حداکثر شعاع عدم قطعیت عیار و قیمت با توجه به مقدار ارزش خالص فعلی مورد نظر شناسایی شدند. با در نظر گرفتن شعاع‌های ذکر شده، مقادیر عیار و قیمت برای انجام برنامه‌ریزی استخراج به صورت مقاوم تعیین و بر اساس آن فازهای استخراجی تعیین شدند. رویکرد پیشنهادی مقدار حداقل ارزش خالص فعلی پروژه را به عنوان ورودی و یک برنامه استخراجی مقاوم در برابر عدم قطعیت‌ها را ارائه می‌دهد. با تعیین فازهای استخراجی، امکان برنامه‌ریزی و زمان‌بندی استخراج بلوک‌ها در هر یک از فازهای استخراجی وجود خواهد داشت. انتظار می‌رود رویکرد پیشنهادی امکان ارائه برنامه‌ریزی مقاوم در برابر عدم قطعیت قیمت و عیار را ضمن برآورده کردن ارزش خالص فعلی تضمین شده را به وجود آورد. در فصل بعد به بررسی قابلیت کاربردی و نقاط قوت و ضعف رویکرد پیشنهادی پرداخته خواهد شد.

فصل چهارم

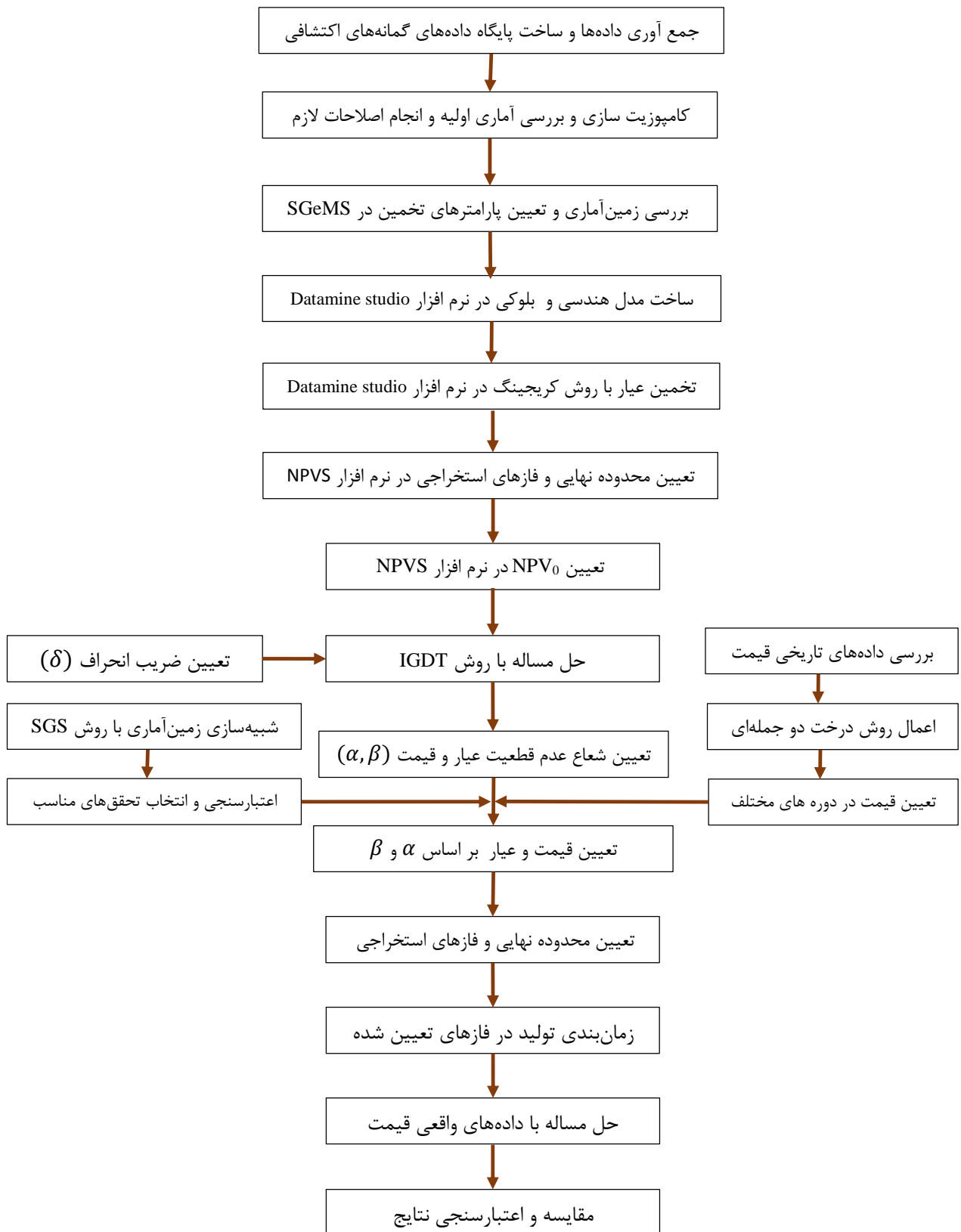
تجزیه و تحلیل و بیان نتایج

۴-۱- مقدمه

برای اعتبارسنجی و بررسی کارایی رویکرد ارائه شده در فرآیند برنامه‌ریزی تولید معادن روباز، از اطلاعات اکتشافی یک معدن سنگ آهن روباز و داده‌های تاریخی قیمت استفاده شد و برنامه‌ریزی تولید برای این معدن انجام شد. نتایج با داده‌های قیمت بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ مورد مقایسه قرار گرفت. در این فصل مراحل انجام شده و نتایج به دست آمده شرح داده شده است. شکل ۴-۱ مراحل انجام مطالعه موردی با رویکرد پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۴-۲- معرفی معدن مورد مطالعه

برای بررسی رویکرد پیشنهادی، برنامه‌ریزی تولید در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت در معدن سنگ آهن رضوان انجام شد. این معدن در ۵۰ کیلومتری شمال شهر بندرعباس مرکز استان هرمزگان، در جنوب ایران واقع شده است. آب و هوای منطقه کویری و خشک بوده و دارای تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های معتدل است. به علت اختلاف ارتفاع قابل توجه معدن، دمای هوای محدوده معدن کمتر از شهرهای اطراف است. متوسط بارندگی سالانه از ۱۰۰ میلی‌متر تجاوز نمی‌کند، با این وجود در اکثر مواقع بارندگی به صورت بارش باران‌های سیل‌آسا رخ می‌دهد. در منطقه بارش برف و جریان آب دائمی وجود ندارد. در این معدن تعداد ۱۵۹ حلقه گمانه به متراژ کلی ۸۳۴۰ متر حفر شده که از این حفاری‌ها تعداد ۴۱۷۰ نمونه به دست آمده است. همچنین در مجموع ۱۲ عدد ترانشه در این محدوده اکتشافی



شکل ۴-۱- مراحل انجام مطالعه موردی با رویکرد پیشنهادی

حفر شده است که در انتخاب محل حفر گمانه‌های اکتشافی راهنما بوده‌اند. انجام حفاری گمانه‌های اکتشافی، جمع‌آوری نمونه‌ها، ارسال به آزمایشگاه و دریافت نتایج آنالیزها حدود ۱۸ ماه به طول انجامید. با توجه به توپوگرافی نسبتاً سخت در محدوده معدن، جاده‌های دسترسی زیادی برای انجام حفاری اکتشافی احداث شده که مجموع طول جاده‌های دسترسی در محدوده معدن تاکنون ۷۲۹۰ متر بوده است. از نظر وسعت، کانسار در جهت جنوب به شمال به طول حدود ۱۲۰۰ متر و در جهت شرق به غرب در حدود ۶۰۰ متر کشیده شده است.

۳-۴- جمع‌آوری، بررسی آماری و تهیه بانک اطلاعاتی داده‌ها

برنامه‌ریزی‌های بلندمدت، میان مدت و کوتاه مدت در یک عملیات معدنکاری، همگی به ارزیابی‌های صحیح منابع و ذخایر کانسار وابسته هستند. اشتباه در ارزیابی منابع و ذخایر می‌تواند سبب اتلاف منابع معدنی و ضرر هنگفت مالی در استخراج یک معدن شود. از مهمترین مراحل ارزیابی ذخیره که برنامه‌ریزی تولید معدن بر اساس آن انجام می‌شود، مرحله جمع‌آوری و اعتبارسنجی داده‌ها است. این مرحله نیازمند صرف زمان و دقت زیاد برای جلوگیری از بروز خطا است. داده‌های لازم عبارتند از:

۱- مختصات دهانه گمانه‌ها، تونل‌های اکتشافی و ترانشه‌های حفر شده

۲- شیب و آزیموت گمانه‌ها و تونل‌های اکتشافی

۳- نتایج عیارسنجی و آنالیزهای انجام شده

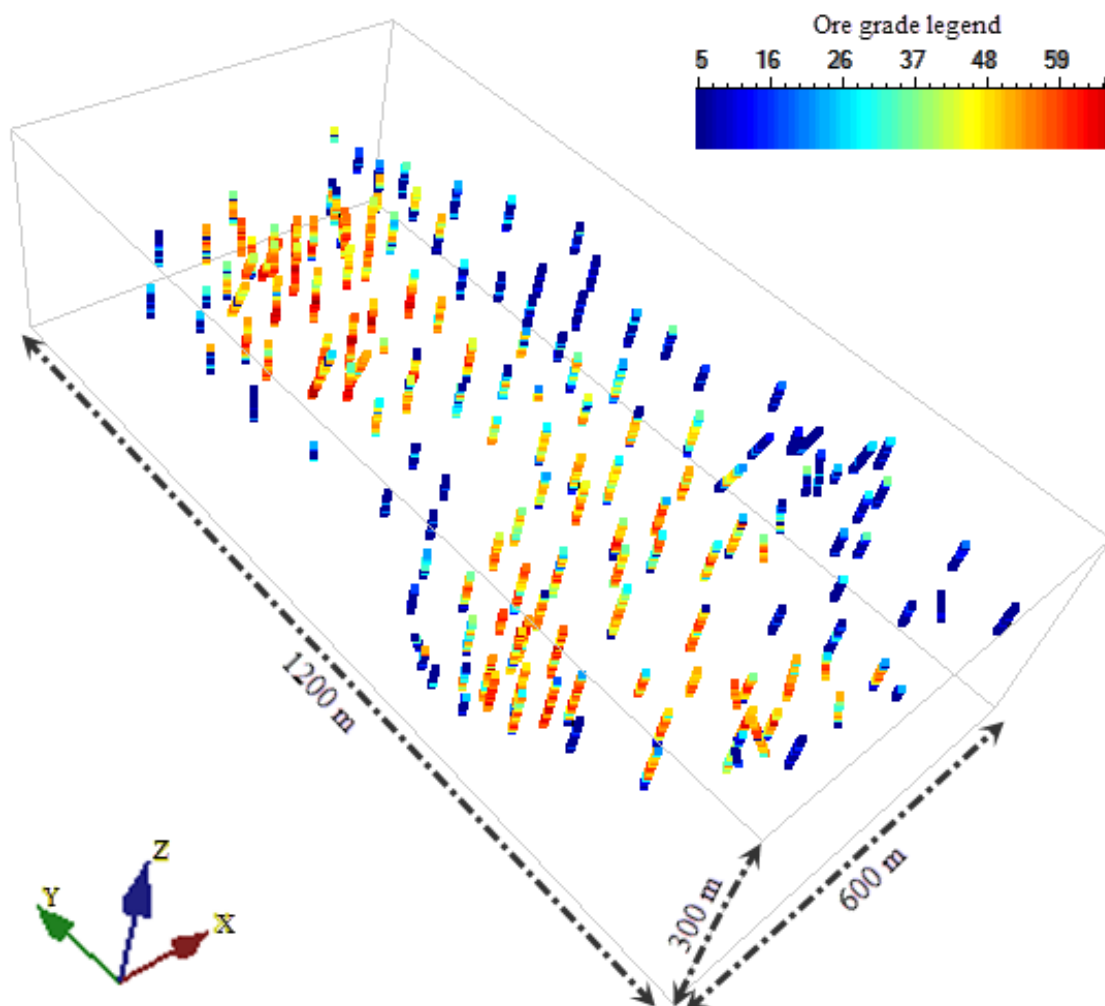
۴- اطلاعات سنگ‌شناسی در طول کارهای اکتشافی انجام شده در صورت وجود

۵- اطلاعات توپوگرافی منطقه مورد نظر

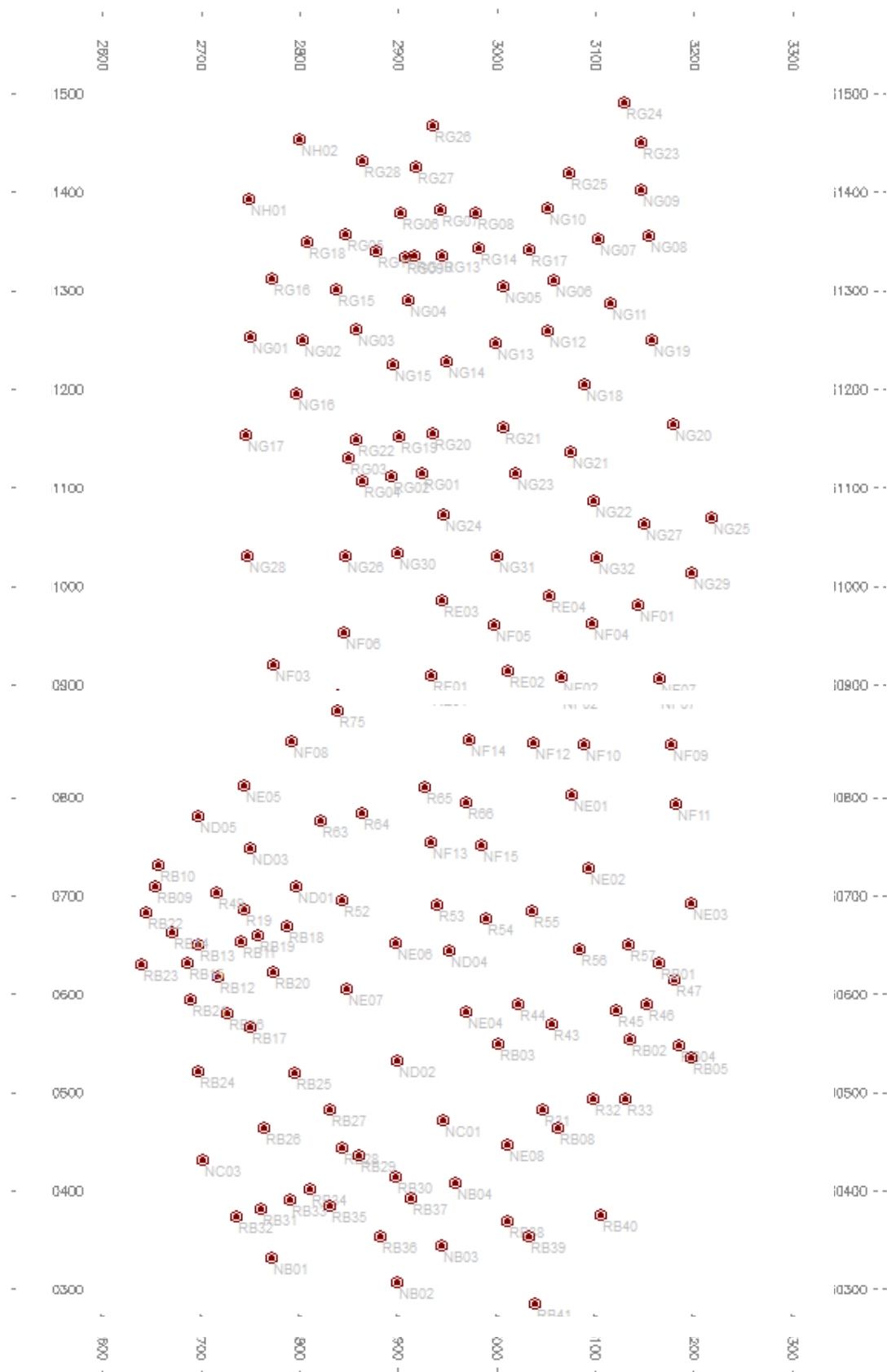
۶- نقشه زمین‌شناسی منطقه در صورت وجود

اطلاعات مربوط به مختصات دهانه گمانه‌های اکتشافی شامل شماره گمانه و مختصات x ، y و z دهانه گمانه است. اطلاعات مربوط به شیب و آزیموت گمانه‌های اکتشافی شامل شماره گمانه، شیب، آزیموت و فاصله آن از دهانه گمانه است که با استفاده از کمپاس برداشت شد. اطلاعات مربوط به عیارسنجی با

ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه و دریافت نتایج آنالیز نمونه‌ها در پایگاه داده مربوطه ثبت شد. اطلاعات نقاط توپوگرافی شامل مختصات نقاط تشکیل دهنده سطح در راستای x ، y و z است. نقاط توپوگرافی و همچنین مختصات دهانه گمانه‌ها با استفاده دوربین نقشه‌برداری Leica TS02 برداشت شد. شکل ۲-۴ موقعیت نمونه‌های به دست آمده از گمانه‌ها در فضای سه بعدی را که با استفاده از نرم‌افزار SGeMS ترسیم شده را نشان می‌دهد. شکل ۳-۴ نشان دهنده موقعیت مکانی گمانه‌های حفر شده در محدوده معدن است که در نرم‌افزار Datamine Studio به نمایش در آمده است.



شکل ۲-۴- موقعیت فضایی نمونه‌های جمع‌آوری شده از گمانه‌ها



شکل ۳-۴- موقعیت مکانی و پراکندگی گمانه‌های اکتشافی

قبل از انجام مطالعات زمین‌آماری لازم است داده‌های موجود بررسی شوند تا در صورت نیاز اصلاحات مورد نیاز انجام شود (Olea, 2006). بررسی‌های مورد نیاز شامل موارد زیر است:

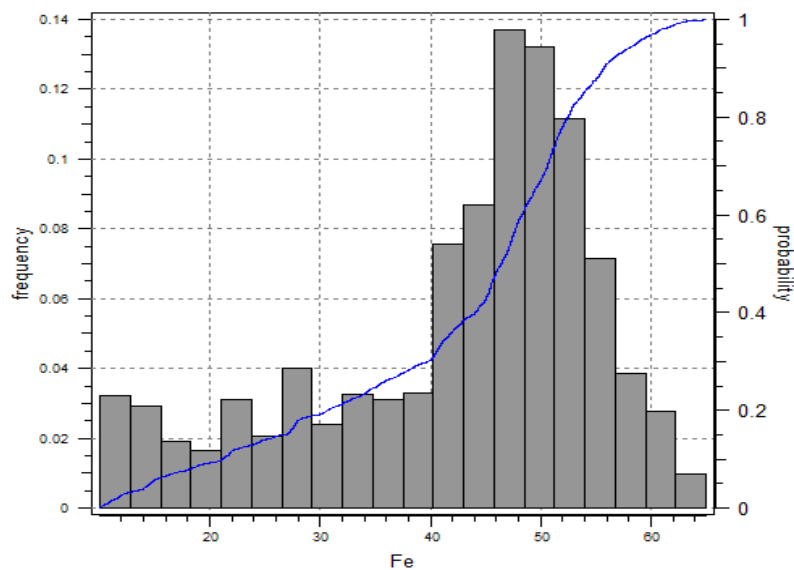
- رسم نمودار توزیع فراوانی داده‌ها

- بررسی داده‌های خارج از ردیف

- بررسی وجود یا عدم وجود روند در کانسار

- تبدیل داده‌ها به تابع توزیع نرمال استاندارد

نمودار توزیع فراوانی و نمودار احتمال متغیر عیار آهن به دست آمده از حفاری در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. نمودار بیانگر تک مدی بودن توزیع داده‌های اولیه و تمرکز در عیارهای بالا است. همچنین پارامترهای مربوط به توزیع آماری متغیر عیار آهن در جدول ۴-۱ آورده شده است.



شکل ۴-۴- نمودار توزیع فراوانی و نمودار احتمال عیار داده‌های حفاری

جدول ۴-۱- پارامترهای آماری مربوط به عیار آهن داده‌های آهن‌دار اولیه

تعداد داده‌ها	میانگین (%)	انحراف معیار (%)	میان‌ه (%)	کمترین مقدار (%)	بیشترین مقدار (%)
۲۹۶۴	۴۴/۴	۱۲/۹۹	۴۶/۴۴	۱۵/۱۳	۶۴/۹۸

در بررسی آماری و زمین آماری نمونه‌ها، داشتن نمونه‌هایی با حجم برابر که پایه‌ی نمونه^۱ نامیده می‌شود، ضروری است. کامپوزیت سازی فرآیندی است که در آن داده‌های حاصل از اندازه‌گیری روی نمونه‌هایی با طول‌های متفاوت را با توجه به بازه‌های مورد نیاز برای مدل سازی، با روش میانگین‌گیری وزنی تبدیل به داده‌هایی با طول‌های یکسان و مورد استفاده در محاسبات زمین آماری می‌کند. پارامترهای آماری نمونه‌های کامپوزیت شده باید به پارامترهای آماری داده‌های خام نزدیک باشد که با یکسان در نظر گرفتن طول کامپوزیت با طول نمونه‌ها می‌توان به آن دست یافت. در نرم‌افزار Datamine studio چندین روش برای کامپوزیت سازی از پیش تعریف شده است که می‌توان با توجه به شرایط، روش مناسب را انتخاب کرد. در معدن مورد مطالعه، قطر همه گمانه‌ها برابر بوده و همچنین نمونه‌برداری از گمانه‌ها به طور منظم به ازای هر دو متر انجام شده است در واقع نمونه‌ها از پایه یکسان برخوردارند. لذا نمونه‌ها بدون کامپوزیت سازی در تخمین ذخیره مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است با توجه این‌که حفاری گمانه‌ها با هدف شناسایی محدوده، شکل و توزیع عیاری کانسار انجام می‌شود، لذا حفاری در بخش‌های خارجی محدوده کانسار نیز برای شناسایی گسترش کانسار انجام شده و برخی گمانه‌ها به طور کامل در محدوده باطله قرار گرفته‌اند. لذا برای جلوگیری از ایجاد روند در داده‌ها و همچنین حفظ همگنی محدوده کانسار، از اطلاعات به دست آمده از گمانه‌های اطراف کانسار که در باطله قرار گرفته‌اند چشم‌پوشی شد و تنها از داده‌های گمانه‌های حفر شده در محدوده کانی‌سازی استفاده شده است. همچنین با توجه به این‌که گمانه‌ها در یک شبکه منظم حفاری نشده‌اند، از روش خوشه‌زدایی^۲ برای جلوگیری از ایجاد خطا در تخمین استفاده شده است.

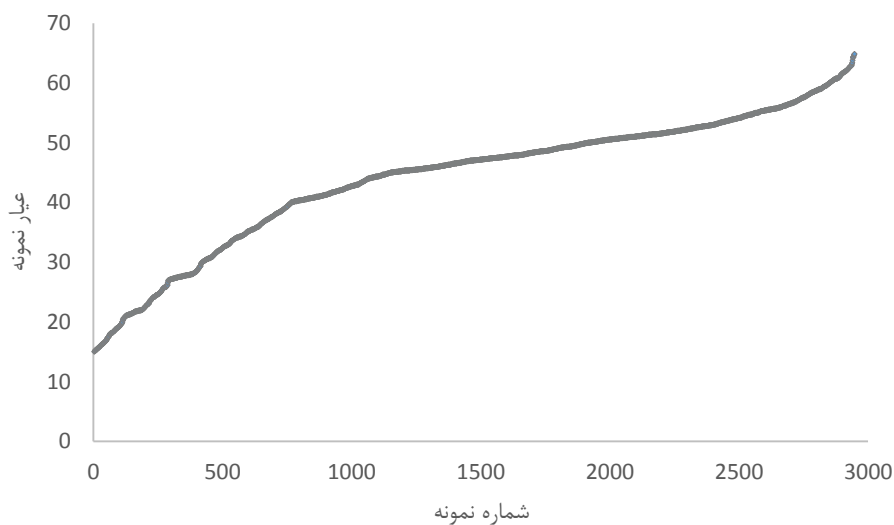
شناسایی مقادیر خارج از ردیف و تصمیم‌گیری در مورد نحوه برخورد با آن‌ها، پیش از انجام عملیات تخمین و شبیه‌سازی ضروری است. مقادیر خارج از ردیف مقادیری هستند که به طور معنی داری نسبت به سایر مقادیر اختلاف دارند. این مقادیر گاهی به دلیل وجود خطای تجربی مانند خطای

^۱ Support of the sample

^۲ Declustering

آنالیز در داده‌ها وارد می‌شوند ولی گاهی هم به دلیل ناهمبستگی‌های موجود در جامعه داده‌های اکتشافی بروز می‌کند. وجود مقادیر ناهنجار برای هر یک از متغیرها حتی پس از کامپوزیت‌سازی، می‌تواند موجب بروز خطا در تخمین عیار بلوک‌های اطراف داده ناهنجار شود. از آنجا که حذف داده ممکن است موجب ایجاد فقدان داده در نقاط خاص شود و در نتیجه در فرایند تخمین اخلاص ایجاد کند، ترجیحاً داده‌ای حذف نمی‌شود بلکه با مقادیر مناسب جایگزین می‌شوند (حسنی پاک و خالصی، ۱۳۸۲).

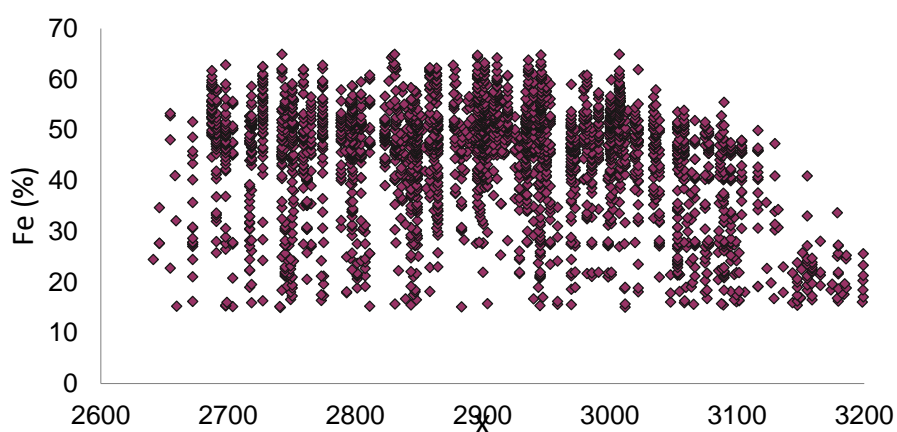
در این تحقیق برای تشخیص وجود مقادیر خارج از ردیف از روش ترسیمی استفاده شد. در این روش ابتدا درصد فراوانی تجمعی داده‌ها محاسبه می‌شود و سپس نمودار عیار بر حسب درصد فراوانی تجمعی رسم می‌شود (شکل ۴-۵). با انجام این آزمون مشاهده شد که مقدار خارج از ردیف در داده‌های مورد بررسی وجود ندارد.



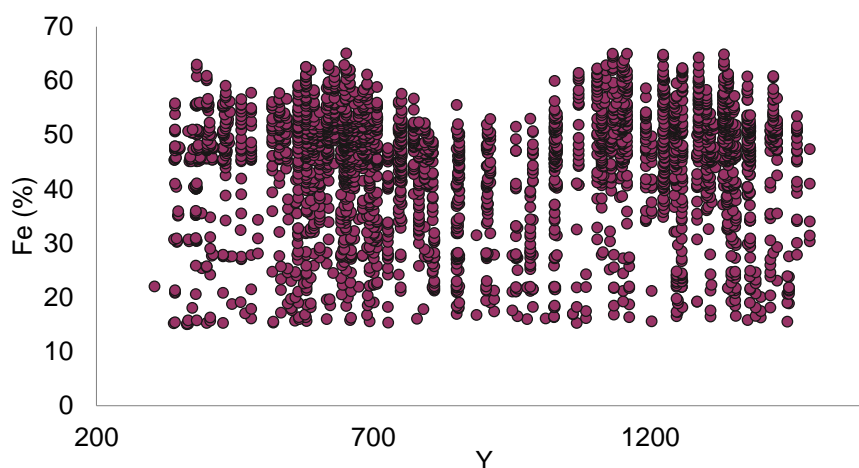
شکل ۴-۵- بررسی وجود مقادیر خارج از ردیف با استفاده از روش ترسیمی

برقراری شروط پایایی به منظور استفاده از روش‌های زمین‌آماري و به خصوص شبیه‌سازی زمین‌آماري الزامی است. برای بررسی وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها، معمولاً پراکندگی عیار در جهات مختلف بررسی می‌شود تا وجود وابستگی عیار به مختصات مشخص شود. در معدن مورد مطالعه با ترسیم نمودار پراکندگی متغیر عیار آهن به عنوان تابعی از مختصات وجود یا عدم وجود روند بارز در تغییرات متغیر

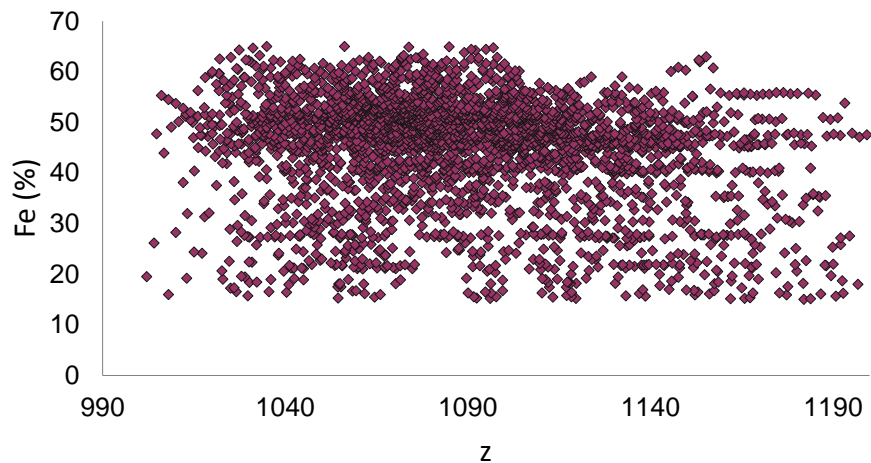
عیار بررسی شد. نمودارهای شکل ۴-۶ تا شکل ۴-۸ به ترتیب نمودار پراکندگی متغیر عیار آهن را نسبت به تغییرات مختصات در راستای x ، y و z را نشان می‌دهند. چنانچه مشاهده می‌شود، متغیر مورد بررسی تغییرات سیستماتیک به عنوان روند بارز از خود نشان نمی‌دهد، لذا می‌توان از روش کریجینگ معمولی برای تخمین و شبیه‌سازی در فضای کانسار استفاده کرد.



شکل ۴-۶- نمودار پراکندگی عیار آهن به عنوان تابعی از راستای x

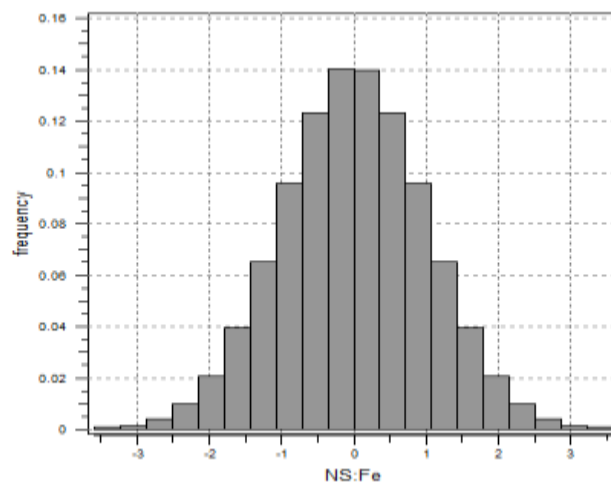


شکل ۴-۷- نمودار پراکندگی عیار آهن به عنوان تابعی از راستای y



شکل ۴-۸- نمودار پراکندگی عیار آهن به عنوان تابعی از راستای z

در استفاده از کریجینگ معمولی و شبیه‌سازی گوسی متوالی به داده‌هایی با توزیع نرمال نیاز است. اگر تابع نرمال نباشد ممکن است موجب بروز خطای سیستماتیک در تخمین شود. به نحوی که بخش کم عیار تابع توزیع، پرعیارتر و بخش پرعیار آن کم عیارتر تخمین زده می‌شود. اغلب می‌توان داده‌های اکتشافی را با تبدیل مناسب نرمال در نظر گرفت. در این مطالعه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SGeMS به نرمال تبدیل شدند. در شکل ۴-۹ نمودار توزیع فراوانی داده‌های نرمال شده نشان داده شده است. پارامترهای مربوط به توزیع آماری داده‌های نرمال شده متغیر عیار آهن در جدول ۴-۲ آورده شده است. لازم به ذکر است که انجام تبدیل معکوس پس از خاتمه عملیات تخمین و شبیه‌سازی ضروری است.



شکل ۴-۹- نمودار توزیع فراوانی داده‌های نرمال شده

جدول ۴-۲- پارامترهای آماری مربوط به عیار آهن داده‌های نرمال شده

تعداد	میانگین (%)	انحراف معیار (%)	میانۀ (%)	کمترین مقدار (%)	بیشترین مقدار (%)
۲۹۶۴	۰	۰/۹۹	۰	-۳/۴۱	۳/۴۱

۴-۴- تحلیل ساختار فضایی داده‌ها

پس از شناسایی شکل هندسی و بلوک‌بندی کانسار، به هر یک از بلوک‌ها مشخصات خاص آن بلوک تخصیص داده می‌شود. مهمترین مشخصه یک بلوک عیار ماده معدنی در آن بلوک است. روش‌های مختلفی برای تخصیص عیار به بلوک‌ها وجود دارد که در این رساله برای بررسی عدم قطعیت عیار، دو روش تخمین کریجینگ و روش شبیه‌سازی گوسی متوالی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

اولین قدم در عملیات زمین‌آماري شامل شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی کمیت مورد نظر به وسیله واریوگرام است که توسط آن پیوستگی، همگنی و ناهمگنی کمیت مورد نظر بررسی می‌شود. برای انجام تخمین‌های زمین‌آماري به روش کریجینگ به تحلیل ساختار فضایی داده‌ها نیاز است که در واریوگرافی آن‌ها منعکس می‌شود. اکثر الگوریتم‌های تخمین یا شبیه‌سازی زمین‌آماري نیز به یک مدل واریوگرام تحلیلی نیاز دارند. شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر ناحیه‌ای مورد بررسی برای تخمین و شبیه‌سازی زمین‌آماري ذخایر معدنی با استفاده از واریوگرام انجام می‌شود. واریوگرام می‌تواند رابطه بین فاصله نمونه‌ها و میزان همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده متغیر ناحیه‌ای را بررسی کند. تخمین زمین‌آماري به روش کریجینگ به مشخصات مدل واریوگرامی برازش شده وابسته است. در واقع واریوگرام، میانگین مربعات تفاضل دو مقدار را به عنوان تابعی از نمو فاصله بین آن‌ها می‌دهد و ابزاری است که در قالب تجزیه و تحلیل آماری قرار دارد و توسط آن می‌توان تغییرپذیری ساختار فضایی را به سادگی تعیین کرد. با استفاده از واریوگرام به آسانی می‌توان به وجود ناهمسانگردی در محیط پی برد. این کار با محاسبه و رسم واریوگرام در امتدادهای مختلف امکان‌پذیر است. در صورت وجود ناهمسانگردی شعاع تاثیر و یا سقف واریوگرام در جهات مختلف یکسان نخواهد بود. همچنین واریانس

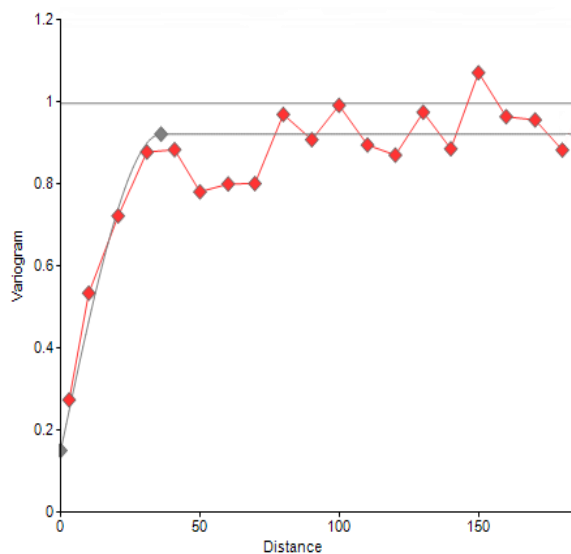
تخمین (خطای تخمین) با استفاده از واریوگرام قابل محاسبه می‌باشد. واریوگرام تجربی با استفاده از رابطه (۱-۴) قابل محاسبه است (Remy, et al., 2009).

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

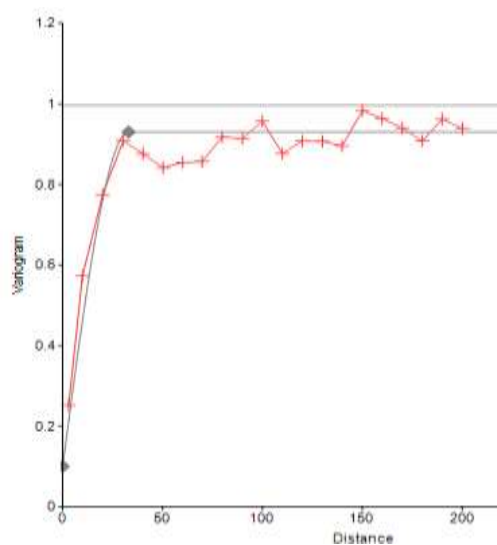
که در آن $2\gamma(h)$ مقدار واریوگرام برای فاصله h ، $N(h)$ تعداد جفت نمونه‌ها با فاصله h و $Z(u)$ مقدار کمیت مورد نظر در موقعیت مکانی u هستند. پس از محاسبه مقادیر واریوگرامی تجربی، یک مدل به نتایج محاسبات انطباق داده خواهد شد. مدل‌های مختلفی در زمین‌آمار استفاده می‌شود که معروف‌ترین آن‌ها مدل کروی است.

در مطالعه حاضر برای تعیین ساختار منطقه واریوگرام غیرجهتی با استفاده از نرم‌افزار Datamine studio 3 رسم شد (شکل ۴-۱۰ الف)). برای تشخیص بررسی ساختار فضایی و ناهمسانگردی کانسار، واریوگرام‌های جهتی در آزیموت‌های ۰ تا ۱۳۵ درجه به فاصله ۴۵ درجه و همچنین در جهت قائم نیز بررسی شد. شکل ۴-۱۰ ب تا ج) نمودار واریوگرام تجربی افقی و قائم و مدل‌های برازش داده شده بر آن‌ها را نشان می‌دهد.

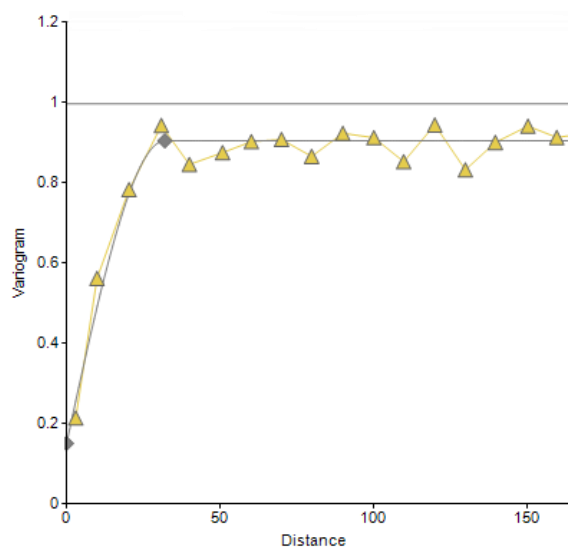
با توجه به دامنه تاثیر متفاوت در جهات مختلف و یکسان بودن آستانه در واریوگرام‌های مختلف مشخص شد که کانسار دارای ناهمسانگردی هندسی بوده و ناهمسانگردی ناحیه‌ای ندارد. نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه که حدود ۰/۲ به دست آمده بیانگر وجود ساختار فضایی مناسب برای استفاده از روش‌های زمین‌آمار است. جدول ۴-۳ پارامترهای به دست آمده از مدل‌های برازش شده به واریوگرام‌های جهتی که ناهمسانگردی منطقه را به بهترین وجه منعکس می‌کنند، نشان می‌دهد.



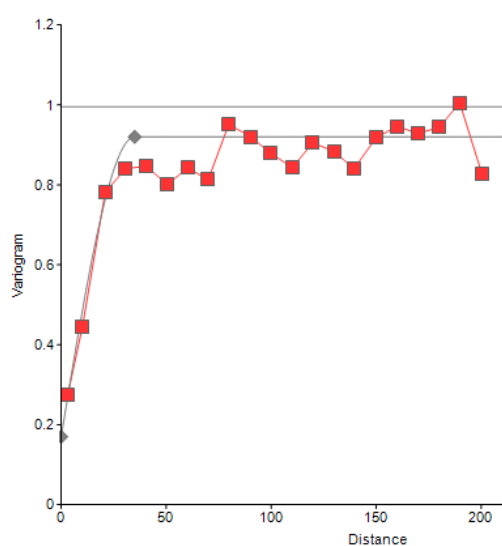
(ب)- واریوگرام افقی در راستای آزیموت صفر درجه



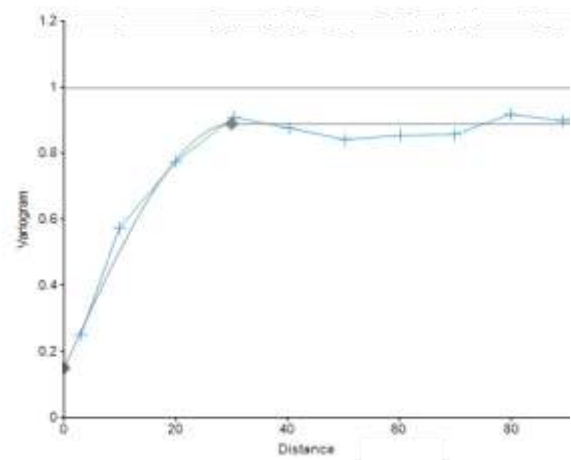
(الف)- واریوگرام غیر جهتی



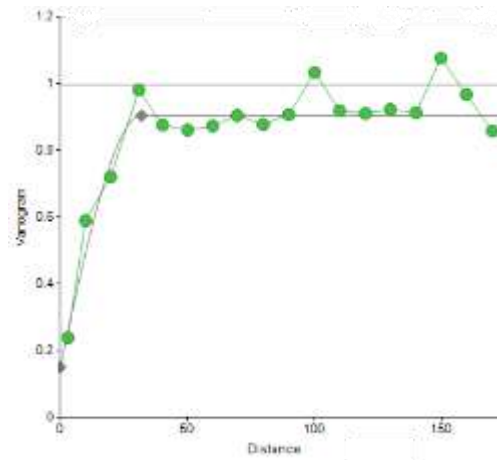
(ت)- واریوگرام افقی در راستای آزیموت ۹۰ درجه



(پ)- واریوگرام افقی در راستای آزیموت ۴۵ درجه



(ج)- واریوگرام تجربی قائم



(ث)- واریوگرام افقی در راستای آزیموت ۱۳۵ درجه

شکل ۴-۱۰- نمودار واریوگرام‌های جهتی و غیر جهتی و مدل‌های برازش شده بر آنها

جدول ۴-۳- پارامترهای به دست آمده از مدل‌های واریوگرام برازش شده

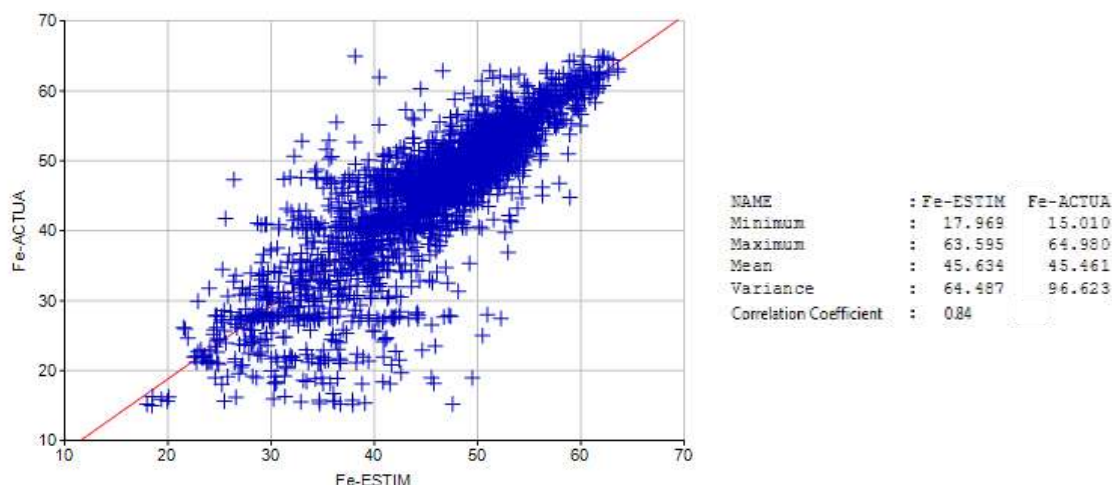
متغیر	نوع واریوگرام	نوع ساختار	اثر قطعه‌ای (C ₀)	آستانه (C+C ₀)	آزیموت (درجه)	شیب (درجه)	دامنه تاثیر (متر)
Fe	غیر جهتی	کروی	۰/۱۵	۰/۸۱	-	-	۳۵
					۰	۰	۳۸
	جهتی	کروی	۰/۱۵	۰/۷۵	۴۵	۰	۳۵
					۹۰	۰	۳۳
					۱۳۵	۰	۳۵
					-	۹۰	۳۰

۴-۵- اعتبار سنجی مدل واریوگرام و تعیین پارامترهای بهینه تخمین

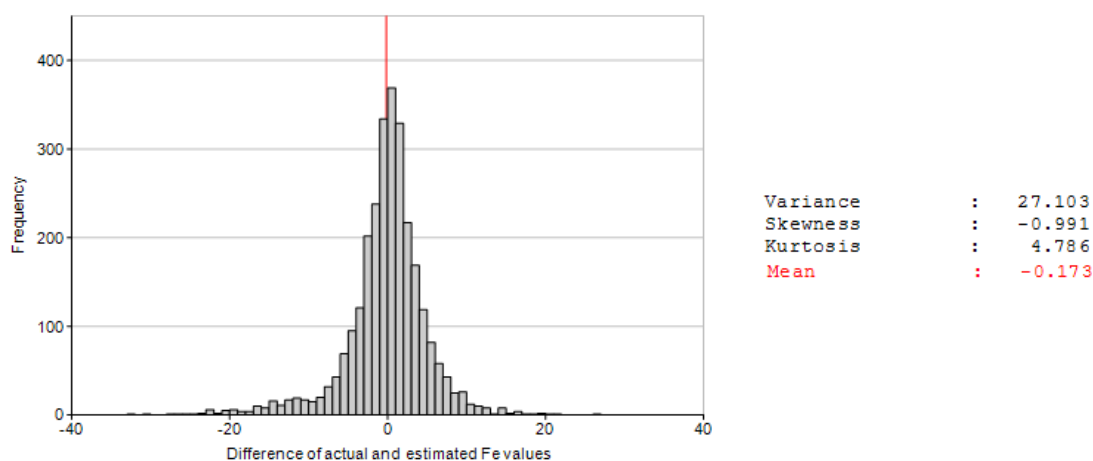
برای انجام یک تخمین زمین‌آماری لازم است پارامترهای تخمین با توجه به توزیع داده‌ها، ساختار فضایی و استراتژی تخمین تعیین شود. پارامترهایی نظیر مدل‌های واریوگرام، شعاع جستجو، ضریب ریز بلوک سازی^۱، حداقل و حداکثر تعداد نقاط شرکت کننده در تخمین پارامترهای اصلی هستند که تخمین عیاری کانسار بر اساس آن‌ها صورت می‌گیرد. در برآوردهای کریجینگ به دلیل وابستگی زیاد دقت نتایج به مدل تعیین شده، باید اعتبار آن بررسی شود. در این مطالعه به منظور اعتبارسنجی مدل برازش شده به واریوگرام‌ها، از آزمون اعتبارسنجی متقابل^۲ استفاده شد. در این روش اعتبارسنجی، تک تک نمونه‌ها به ترتیب از داده‌ها حذف شده و مقدار عیار هر یک با توجه به مقادیر سایر داده‌ها تخمین زده می‌شود. شکل ۴-۱۱ نتایج این آزمون را با برقراری خط رگرسیونی بین مقادیر نمونه‌گیری شده و تخمینی با ضریب همبستگی بالا نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴-۱۲ نمودار توزیع فراوانی اختلاف مقادیر واقعی و مقادیر تخمینی در آزمون اعتبارسنجی متقابل را نشان می‌دهد که میانگین آن به صفر نزدیک بوده و مقدار واریانس کمی دارد. بنابراین، می‌توان با اطمینان از متغیرهای واریوگرام در تخمین کریجینگ استفاده کرد.

^۱ Discretization

^۲ Cross Validation



شکل ۴-۱۱- ارتباط بین مقادیر واقعی و تخمینی در آزمون اعتبار سنجی متقابل



شکل ۴-۱۲- نمودار توزیع فراوانی اختلاف مقادیر واقعی و مقادیر تخمینی در آزمون اعتبارسنجی متقابل

برای مشخص کردن توزیع عیار در مدل هندسی کانسار، این مدل به تعدادی بلوک تقسیم‌بندی می‌شود. تعداد بلوک‌ها در مدل بلوکی کانسار به اندازه مدل هندسی کانسار و ابعاد بلوک‌ها بستگی دارد. ابعاد بلوک‌ها به فاصله گمانه‌های اکتشافی، زمین‌شناسی ماده معدنی و ابعاد واحد معدن کاری انتخابی وابسته است. انتخاب ابعاد بلوک‌ها از تصمیمات مهمی است که در ارتباط با ساخت مدل بلوکی کانسار باید گرفته شود. قواعدی که در انتخاب اندازه بلوک باید مد نظر قرار گیرد عبارتند از:

۱- برای کاهش تعداد بلوک‌های یک کانسار و در نتیجه کاهش حجم داده‌های محاسباتی، بزرگترین

اندازه ممکن برای بلوک‌ها استفاده شود.

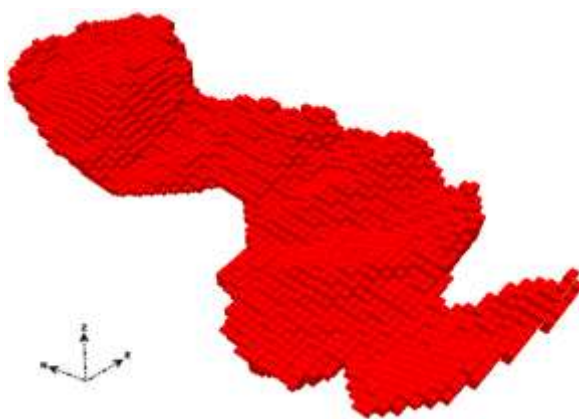
۲- اندازه بلوک‌ها معمولاً ۵۰ درصد تا ۲۰ درصد میانگین فاصله گمانه‌ها انتخاب شود. به عنوان یک قاعده‌ی سر انگشتی، حداقل اندازه‌ی ابعاد یک بلوک نباید از یک چهارم فاصله‌ی متوسط گمانه‌های اکتشافی کمتر باشد.

۳- برای جلوگیری از حذف عوارض کوچک زمین‌شناسی، اندازه بلوک‌ها باید نصف حداقل عوارض زمین‌شناسی باشد.

۴- اندازه بلوک می‌تواند به روش معدنکاری وابسته باشد. معمولاً ارتفاع بلوک‌ها مساوی ارتفاع پله‌های معدن در نظر گرفته می‌شود.

۵- ابعادی که کمترین واریانس تخمین را ایجاد کند می‌تواند به عنوان ابعاد مناسب برای بلوک‌ها انتخاب شود.

برای تعیین ابعاد طولی و عرضی بلوک‌ها، می‌توان از معیار واریانس تخمین برای انتخاب ابعاد مناسب استفاده کرد. ریزبلوک‌ها نیز باید با اندازه نمونه‌های کامپوزیت شده و همچنین اندازه بلوک‌ها متناسب باشد. در شکل ۴-۱۳ یک نمای سه بعدی از مدل بلوکی ساخته شده از کانسار نشان داده شده است. برای انتخاب پارامترهای بهینه تخمین، در حالت‌های مختلف واریانس تخمین مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۴-۴ ذکر شده است. بر اساس جدول، گزینه A8 به عنوان پارامترهای بهینه تخمین انتخاب شد. لازم به ذکر است شعاع تاثیر در بیضوی جستجو، برابر با دامنه تاثیر واریوگرام‌های جهتی در جهت‌های آنیزوتروپی در نظر گرفته شد.



شکل ۴-۱۳- نمای سه بعدی از مدل بلوکی کانسار در معدن مورد مطالعه

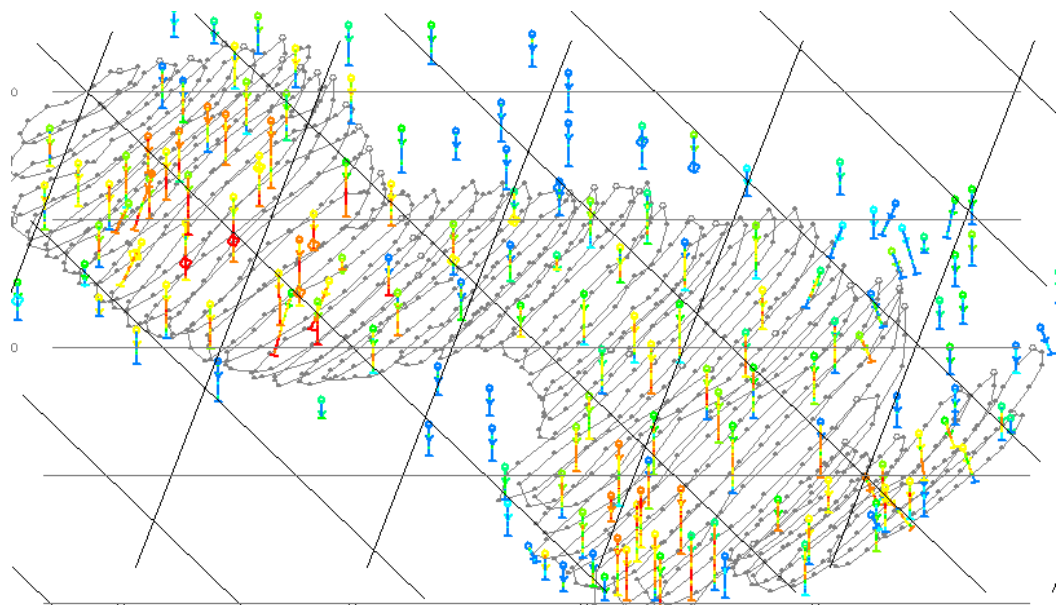
جدول ۴-۴- انتخاب پارامترهای بهینه تخمین

A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	راستا	پارامتر
۵	۵	۲	۲	۵	۲	۵	۵	۲	-	حداقل نقاط شرکت کننده در تخمین
۴۰	۴۸	۴۰	۴۰	۳۰	۴۸	۴۰	۴۸	۴۰	-	حداکثر نقاط شرکت کننده در تخمین
۲۰	۲۰	۲۰	۱۵	۱۵	۱۵	۱۰	۱۰	۱۰	W-E	ابعاد بلوکها
۲۰	۲۰	۲۰	۱۵	۱۵	۱۵	۱۰	۱۰	۱۰	N-S	
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	قائم	
۵	۴	۴	۵	۳	۵	۲	۵	۵	W-E	ضریب ریزبلوک سازی
۵	۴	۴	۵	۳	۵	۲	۵	۵	N-S	
۲	۲	۲	۲	۲	۵	۲	۵	۵	قائم	
۰/۴۵۳	۰/۴۲۶	۰/۴۷۷	۰/۵۵۲	۰/۵۵۸	۰/۵۳۶	۰/۶۳۴	۰/۶۰۱	۰/۶۰۹	-	متوسط واریانس تخمین (٪)

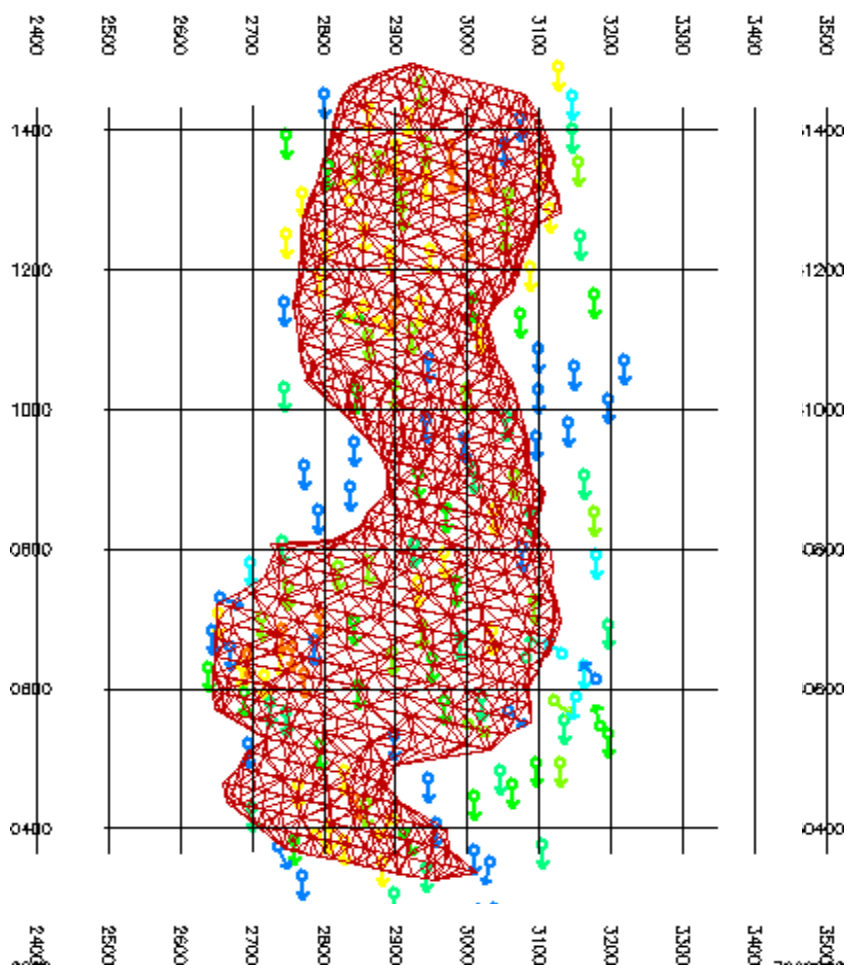
۴-۶- مدل سازی سه بعدی فضای تخمین

با توجه به این که داده‌های عیاری فقط در داخل محدوده گمانه موجود است و بیرون این محدوده داده‌ای وجود ندارد، لذا در قسمت‌های داخلی کانسار عمل درونیابی انجام می‌شود، در حالی که در اطراف کانسار عمل برونابی انجام می‌شود. با توجه به عدم توانایی اکثر روش‌های تخمین برای برونابی در ارائه نتایج مناسب، باید محدوده برونابی را به نحوی محدود کرد. همچنین روش تخمین زمین‌آماری همواره با نوعی میانگین‌گیری همراه است به طوری که در تخمین فضای کم عیار به دلیل میانگین‌گیری با فضای پرعیارتر مقداری بالاتر از مقدار واقعی تخمین می‌خورد و بالعکس فضای پرعیار در اثر میانگین‌گیری با مقادیر کم عیار ممکن است کمتر از مقدار واقعی تخمین بخورد. البته در بسیاری از موارد نتیجه کار قابل قبول است، ولی در مواردی که در داخل محدوده کانسار باطله ای رونددار مشاهده شود، می‌توان

باطله مورد نظر را از فضای تخمین حذف کرد تا در اثر میانگین‌گیری در خلال تخمین زمین‌آماری قسمت‌هایی از چینین فضاها باطله‌ای به عنوان کانسنگ معرفی نشود. از طرف دیگر عدم حذف چینین فضاها می‌تواند باعث تبدیل فضای کانسنگ به باطله شود. این محدود کردن فضای تخمین باعث می‌شود خطرات ناشی از میانگین‌گیری به حداقل برسد. در عوض در قسمت‌هایی که کانسنگ و باطله هر دو موجود باشند و نتوان تصمیم گرفت که روند کانسنگ و باطله چگونه است تصمیم‌گیری به عهده نتایج حاصل از تخمین گذاشته می‌شود. برای تهیه مدل زمین‌شناسی باید مختصات نقاط نمونه‌برداری شده به همراه نتایج عیارسنجی آن‌ها مشخص باشد تا بتوان آن‌ها را به سایر نقاط کانسار تعمیم داد. این کار با وارد کردن مختصات دهانه چال‌ها و نیز محل قرارگیری نمونه در چال انجام می‌شود که بر اساس آن موقعیت قرارگیری هر نمونه با اطلاعات داده شده محاسبه می‌شود. در این تحقیق مدل هندسی ماده معدنی با استفاده از مقاطع عرضی ساخته شده است. شکل ۴-۱۴ یک نمای سه بعدی از مقاطع ترسیمی برای مدل‌سازی هندسی فضای کانسار را نشان می‌دهد. در شکل ۴-۱۵ پلان افقی از مدل هندسی کانسار نشان داده شده است.



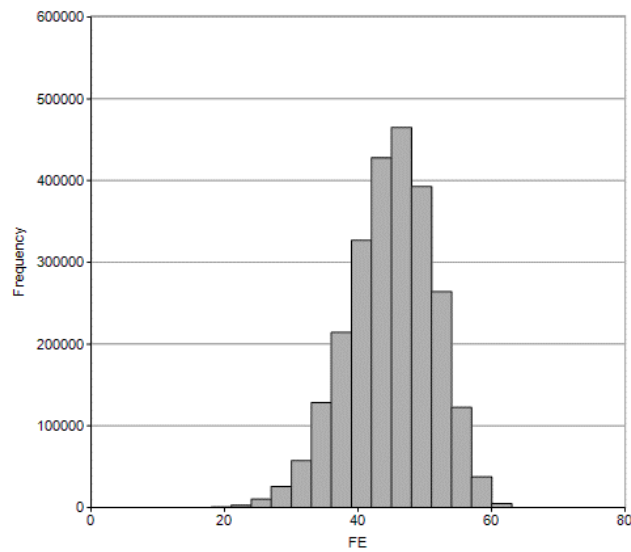
شکل ۴-۱۴- نمای سه بعدی مقاطع ترسیمی برای مدل‌سازی هندسی فضای کانسار



شکل ۴-۱۵- پلان افقی مدل هندسی کانسار

۴-۷- تخمین عیار بلوک‌ها

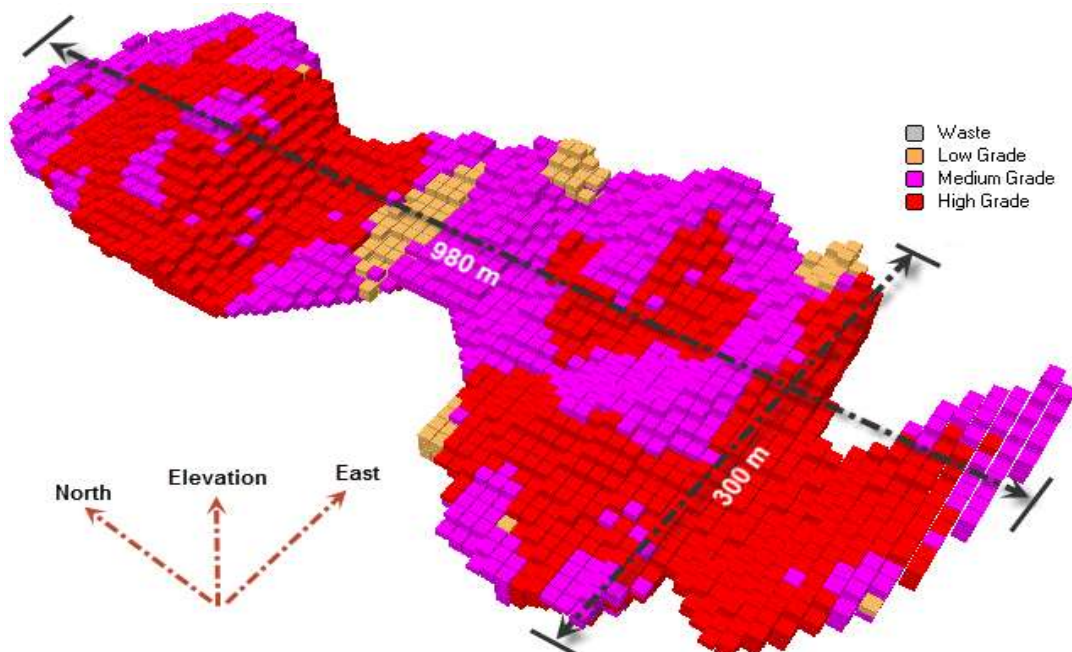
پس از بهینه‌سازی پارامترهای مورد نیاز برای تخمین، تخمین عیار بلوک‌های کانسار به روش کریجینگ معمولی با استفاده از نرم‌افزار Datamine Studio انجام شد. نمودار توزیع فراوانی و نمودار احتمال عیار آهن تخمین زده شده به ترتیب در شکل ۴-۱۶ و پارامترهای مربوط به آن در جدول ۴-۵ آورده شده است. شکل ۴-۱۷ یک نمای سه بعدی تک مدل بلوکی زمین‌شناسی تولید شده با روش کریجینگ را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تخمین نسبت به داده‌های اولیه از انحراف معیار کمتری برخوردار هستند، که این مساله هموارسازی کریجینگ را تأیید می‌کند.



شکل ۴-۱۶- نمودار توزیع فراوانی عیار آهن مدل بلوکی حاصل از تخمین کریجینگ

جدول ۴-۵- پارامترهای آماری مربوط به عیار آهن داده‌های تخمین زده شده

تعداد داده‌ها	میانگین (%)	انحراف معیار (%)	کمینه (%)	بیشینه (%)
۸۸۳۷	۴۶/۰۶	۵/۸	۲۲/۶۳	۶۱/۶۴

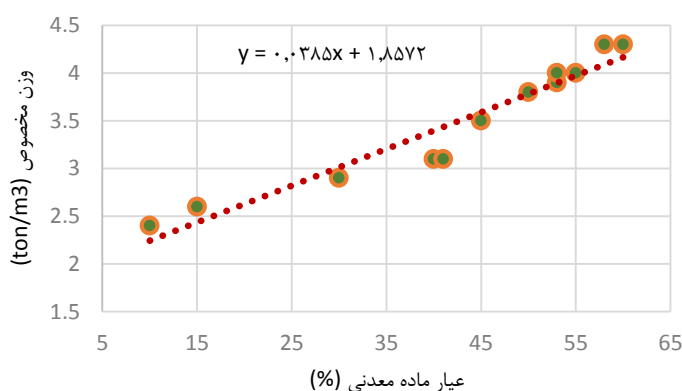


شکل ۴-۱۷- یک نمای سه بعدی از مدل بلوکی عیاری با استفاده از روش کریجینگ

۸-۴- تعیین وزن مخصوص بلوک‌ها

به منظور ارزیابی تناژ هر بلوک تخمین زده شده نیاز به وزن مخصوص و حجم بلوک است. یکی از راه‌های محاسبه وزن مخصوص نمونه‌ها در فرآیند ارزیابی ذخیره استفاده از منحنی عیار- وزن مخصوص است. در مطالعه انجام شده برای تعیین رابطه وزن مخصوص و عیار تعدادی نمونه از تیپ‌های مختلف ماده معدنی برداشت شد و وزن مخصوص و مشخصات عیاری آن‌ها مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. با رسم نمودار عیار- وزن مخصوص طبق شکل ۴-۱۸، فرمول محاسبه وزن مخصوص بر اساس عیار نمونه طبق رابطه (۴-۲) به دست آمد:

$$\text{Density} = 0.0385 * Fe + 1.8572 \quad (4-2)$$



شکل ۴-۱۸- نمودار رابطه وزن مخصوص نسبت به عیار

۹-۴- تعیین NPV_0

برای انجام برنامه‌ریزی تولید معدن، علاوه بر تهیه مدل هندسی و مدل بلوکی ماده معدنی، مدل بلوکی باطله محیط کانسار نیز باید ساخته شود. بلوک‌های محیط دربرگیرنده کانسار برای ایجاد شیب مجاز دیواره‌های معدن و تعیین نسبت باطله‌برداری و هزینه‌های مربوطه باید شناسایی شده و به مدل بلوکی کانسار الحاق شود. در واقع برنامه‌ریزی تولید بر اساس بلوک‌های باطله و ماده معدنی موجود در مدل بلوکی کامل معدن انجام می‌شود. مدل بلوکی حاصل از تلفیق مدل ماده معدنی و باطله شامل ۱۸۹،۴۴۳ بلوک تهیه شد. با اعمال پارامترهای اقتصادی در مدل بلوکی ذکر شده، مدل بلوکی اقتصادی تولید

می‌شود. در این مدل به هر بلوک با استفاده از مدل بلوکی زمین‌شناسی و با در نظر گرفتن هزینه و درآمد، ارزش اقتصادی بلوک‌ها^۱ (BEV) محاسبه شده آن اختصاص داده می‌شود. برای هر بلوک یک ارزش خالص تعیین می‌شود که این ارزش، مجموع ارزش مواد درون آن است که پس از محاسبه، ارزش بلوک‌های کانسنگ مثبت، باطله منفی و هوا صفر خواهد بود. ارزش اقتصادی بلوک بر روی عوامل مهمی چون ترتیب معدن‌کاری، محدوده نهایی و در نهایت ارزش خالص فعلی معدن تأثیر گذار است. در روش‌های معمول برای محاسبه BEV، همواره تأکید بر ثابت فرض کردن پارامترهایی چون عیار، هزینه‌های عملیاتی، قیمت ماده معدنی و ... بوده است، این در حالی است که عدم قطعیت پارامترها کاملاً بدیهی بوده و فرض ثابت آن منجر به بروز خطا در فرآیند محاسبه BEV می‌شود (Dehghani & Atae-pour, 2012). مدل بلوکی اقتصادی کانسار با تلفیق پارامترهای اقتصادی و فنی با مدل بلوکی عیاری به دست آمده از روش تخمین کریجینگ با استفاده از نرم‌افزار NPV Scheduler تهیه شد. پارامترهای فنی و اقتصادی برای تهیه مدل بلوکی اقتصادی کانسار به شرح جدول ۴-۶ در نظر گرفته شد.

جدول ۴-۶- پارامترهای فنی و اقتصادی استفاده شده در تهیه مدل بلوکی اقتصادی کانسار

ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	تولید سالیانه	۳ میلیون	تن
۲	شیب نهایی معدن	۴۵	درجه
۳	قیمت فروش محصول با عیار ۶۲٪	۱۰۸	دلار بر تن
۴	هزینه استخراج ماده معدنی	۶	دلار بر مترمکعب
۵	هزینه استخراج باطله	۴	دلار بر مترمکعب
۶	هزینه خردایش و دانه‌بندی	۱	دلار بر تن کانسنگ
۷	هزینه حمل و فروش	۲۰	دلار بر تن کانسنگ
۸	بازیابی استخراج	۹۵	درصد
۹	بازیابی فرآوری اولیه	۹۵	درصد
۱۰	نرخ تنزیل سالیانه	۱۵	درصد
۱۱	روزهای کاری سال	۳۶۵	روز
۱۲	ترقیق	۵	درصد

^۱ Block Economic Value

با توجه به این که در حال حاضر محصول تولیدی معدن صادر می شود و قیمت محصول بر اساس قیمت های جهانی تعیین می شود، لذا در این مطالعه نیز قیمت های جهانی سنگ آهن بر حسب دلار بر تن برای تهیه مدل بلوکی اقتصادی کانسار در نظر گرفته شده است. محدوده نهایی بهینه معدن با استفاده از نرم افزار NPV Scheduler و با روش لرچ و گروسمن به دست آمد. در جدول ۴-۷ نتایج آماري به دست آمده از محدوده نهایی معدن آمده است.

جدول ۴-۷- نتایج حاصل از تعیین محدوده نهایی با فرض قطعیت پارامترها

ردیف	شرح	مقدار	واحد
۱	تعداد کل بلوک های مدل بلوکی	۱۸۹,۴۴۳	عدد
۲	تعداد بلوک ها در محدوده نهایی بهینه	۱۰,۸۰۴	عدد
۳	ماده معدنی قابل استخراج در محدوده نهایی	۷۱,۷۲۱,۳۷۸	تن
۴	باطله موجود در محدوده نهایی	۱۱,۱۱۵,۰۰۰	تن
۵	درآمد حاصل از استخراج پیت	۲,۱۰۳,۷۲۴,۳۸۸	دلار
۶	سود حاصل از استخراج پیت	۱,۹۳۴,۹۴۶,۳۱۳	دلار
۷	مجموع هزینه استخراج پیت	۹۷,۲۳۶,۰۰۰	دلار
۸	مجموع هزینه فرآوری محصول	۷۱,۵۴۲,۰۷۵	دلار
۹	ارزش خالص فعلی پیت نهایی	۳۹۴,۲۱۵,۱۱۰	دلار
۱۰	عیار متوسط محصول	۴۶/۴۳	درصد

در حالت خطای صفر پیش بینی ها، با فرض این که هیچ خطایی در پیش بینی پارامترهای تصادفی وجود نداشته باشد (حالت ریسک خنثی)، مقدار ارزش خالص فعلی در این حالت، حداکثر مقدار ممکن است که در صورت انجام دقیق پیش بینی ها از استخراج معدن می تواند به دست آید.

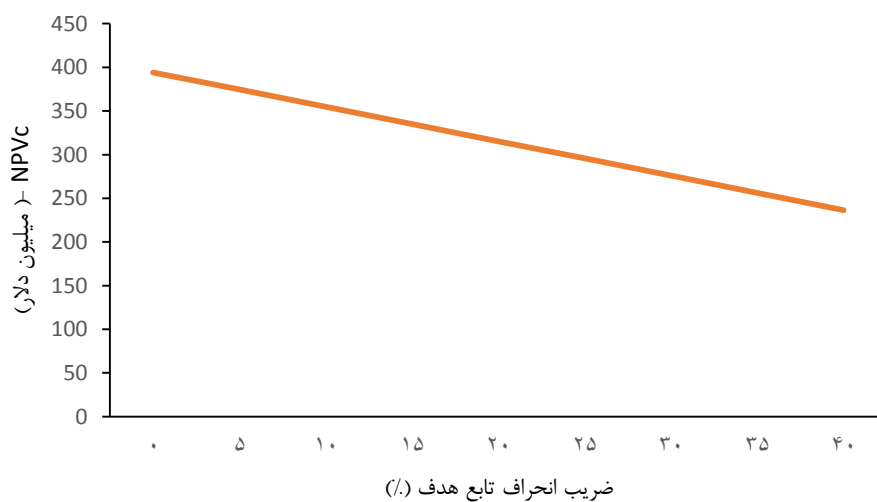
۴-۱۰- تعیین NPV_c

جدول ۴-۸ رابطه بین پارامتر δ که درجه تحمل کاهش تابع هدف نسبت به مقدار پایه به دلیل عدم قطعیت های نامطلوب است و مقدار ارزش خالص فعلی بحرانی (NPV_c) در حالت های مختلف را نشان

می‌دهد (با استفاده از رابطه (۳-۲۴)). در شکل ۴-۱۹ تغییرات ارزش خالص فعلی بحرانی پروژه نسبت به تغییر ضریب انحراف آن نشان داده شده است.

جدول ۴-۸- تغییرات مقادیر NPV نسبت به مقادیر درجه تحمل کاهش (δ)

مقدار NPV_c (دلار)	درجه تحمل کاهش تابع هدف نسبت به مقدار پایه (درصد)
۳۹۴،۲۱۵،۱۱۰	۰
۳۷۴،۵۰۴،۳۵۵	۵
۳۵۴،۷۹۳،۵۹۹	۱۰
۳۳۵،۰۸۲،۸۴۴	۱۵
۳۱۵،۳۷۲،۰۸۸	۲۰
۲۹۵،۶۶۱،۳۳۳	۲۵
۲۷۵،۹۵۰،۵۷۷	۳۰
۲۵۶،۲۳۹،۸۲۲	۳۵
۲۳۶،۵۲۹،۰۶۶	۴۰



شکل ۴-۱۹- تغییرات تابع هدف نسبت به مقادیر درجه تحمل کاهش

با افزایش ضریب انحراف تابع هدف، یا به عبارت دیگر، با افزایش مقاوم سازی برنامه‌ریزی تولید معدن، مقادیر شعاع عدم قطعیت قابل قبول پارامترها افزایش پیدا می‌کند. از سوی دیگر با افزایش مقاوم سازی

و یا ریسک گریزی، میزان ارزش خالص فعلی پروژه کاهش می‌یابد. لذا می‌توان پارامتر ضریب انحراف تابع هدف را معادل با یک معیار ریسک گریزی در نظر گرفت. به این صورت که با افزایش ضریب انحراف، میزان مقاومت برنامه‌ریزی تولید معدن در برابر تغییرات نامطلوب پارامترهای تصادفی افزایش و در نتیجه میزان ریسک ناشی از آن کاهش می‌یابد.

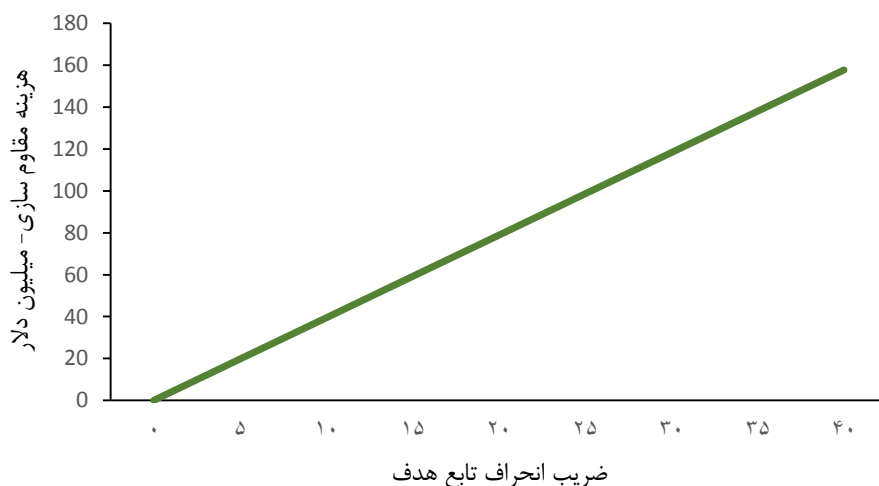
با توجه به مطالب ذکر شده در فصل قبل، برای استفاده از روش IGDT در برنامه‌ریزی تولید معدن، باید یک مقدار پایه به عنوان ارزش خالص فعلی در نظر گرفته شود. در معدن مورد مطالعه، مقدار پایه NPV بر اساس مقدار به دست آمده در حالت فرض قطعیت پارامترها که در بخش قبل شرح داده شد ۳۹۴،۲۱۵،۱۱۰ دلار به دست آمد. با در نظر گرفتن درجه تحمل کاهش تابع هدف نسبت به مقدار پایه به میزان ۳۰ درصد مقدار بحرانی ارزش خالص فعلی برابر با ۵۷۷،۹۵۰،۲۷۵ دلار خواهد بود. شعاع عدم قطعیت α و β به گونه‌ای تعیین می‌شوند که به ازای تغییرات پارامترهای غیرقطعی قیمت و عیار، مقدار تابع هدف از مقدار بحرانی تعیین شده کمتر نشود. با افزایش مقدار ضریب انحراف (δ) ، مقدار NPV بحرانی (NPV_c) کاهش می‌یابد. در نتیجه پروژه معدنی متحمل یک هزینه فرصت^۱ می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش δ ، مقدار ارزش خالص فعلی معدن کمتر از مقدار ارزش خالص فعلی آن در حالتی که در تخمین و پیش‌بینی پارامترهای غیرقطعی خطایی وجود نداشته باشد (NPV_0) می‌شود. این بدین معنی است که مقاوم سازی برنامه‌ریزی تولید معدن، در صورت دقیق بودن پیش‌بینی‌های پارامترهای تصادفی، نه تنها سودمند نیست، بلکه ضررهایی را متوجه بهره‌بردار معدن می‌سازد. اگر NPV_δ را به عنوان ارزش خالص فعلی معدن ناشی از مقادیر پیشنهادی متناظر با δ و مقادیر پارامترهای تصادفی بدون خطای پیش‌بینی، در نظر گرفته شوند، آنگاه اختلاف بین NPV_0 و NPV_δ بیانگر هزینه فرصت ناشی از مقاوم سازی است که از رابطه (۳-۴) قابل محاسبه است.

$$OC = NPV_0 - NPV_\delta \quad (3-4)$$

که در این رابطه OC بیانگر هزینه فرصت است. نمودار شکل ۴-۲۰ تغییرات هزینه مقاوم سازی،

^۱ Opportunity cost

برحسب تغییرات ضریب انحراف δ را نشان می‌دهد. بر اساس نمودار، با افزایش ضریب انحراف تابع هدف، هزینه مقاوم سازی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۲۰- نمودار تغییرات هزینه مقاوم سازی بر حسب تغییرات ضریب انحراف

۴-۱۱- ایجاد تحقق‌های متعدد عیاری

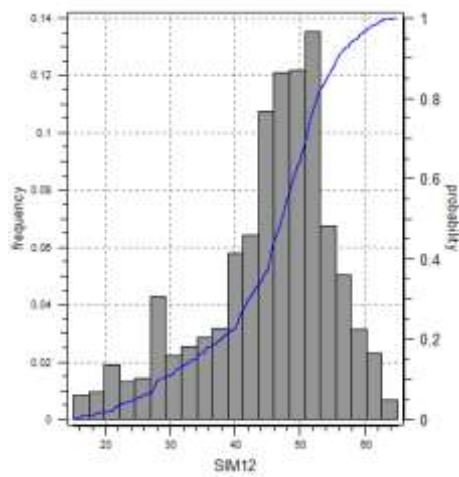
در حالت خطای غیر صفر پیش‌بینی‌ها، توزیع عیار در محیط کانسار باید تعیین شود. لذا با توجه این‌که عیار متغیری پیوسته است، بر اساس مطالب ذکر شده در فصل قبل از روش شبیه‌سازی متوالی گوسی، که یکی از روش‌های معمول شبیه‌سازی متغیرهای پیوسته است و تاکنون نتایج قابل قبولی در پروژه‌های مشابه داشته است برای تعیین توزیع فضایی پارامترهای عیار استفاده شده است.

در این روش تعداد شبیه‌سازی‌ها باید به اندازه کافی بزرگ بوده به گونه‌ای که اطلاعات آماری به دست آمده قابل تحلیل باشد و به طور همزمان به اندازه‌ای کوچک باشد که استفاده از حجم اطلاعات تولید شده از تحقق‌های حاصله امکان‌پذیر باشد (Rocha & Yamamoto, 2000; Remy, et al., 2009). در این مطالعه ۴۴ بار شبیه‌سازی انجام شد که پس از اعتبارسنجی تعداد ۳۰ تحقق برتر از نظر پارامترهای آماری، هیستوگرام و واریوگرام شباهت قابل قبولی با نمونه‌های اولیه داشتند، شناسایی و انتخاب شدند که در ادامه شرح داده شده است.

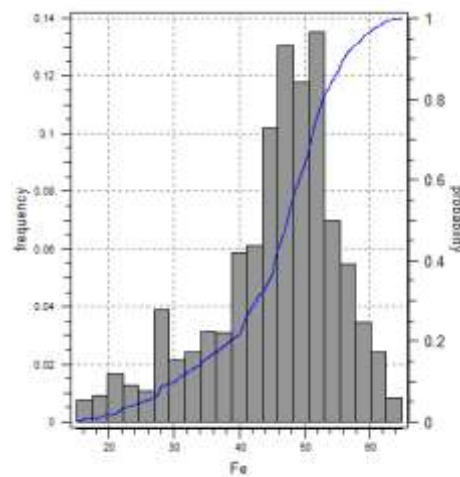
۴-۱۱-۱- ارزیابی مدل عیاری به دست آمده از روش شبیه‌سازی

هر تحقق تولید شده برای این که به عنوان تحقق معتبر حاصل از شبیه‌سازی شناخته شود، باید دارای پارامترهای آماری تقریباً یکسان با نمونه اولیه باشد. در واقع توزیع فراوانی متغیر شبیه‌سازی شده باید با توزیع فراوانی متغیر عیار در نمونه اولیه همخوانی داشته باشد. همچنین پارامترهای زمین‌آماری نیز دارای شباهت باشند که در واقع واریوگرام حاصل از مدل شبیه‌سازی شده، شباهت معینی با واریوگرام نمونه‌های اولیه داشته باشد. نمودار توزیع فراوانی در نمونه اولیه و ۵ تحقق تولید شده به عنوان نمونه نیز در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. مابقی نمودارهای توزیع فراوانی در پیوست رساله آمده است. مقایسه صورت گرفته بین پارامترهای آماری تحقق‌های حاصل از شبیه‌سازی و نمونه اولیه در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است. از این اعتبارسنجی مشخص شده است شباهت آماری بین نمونه اولیه و تحقق‌های حاصل از شبیه‌سازی وجود دارد.

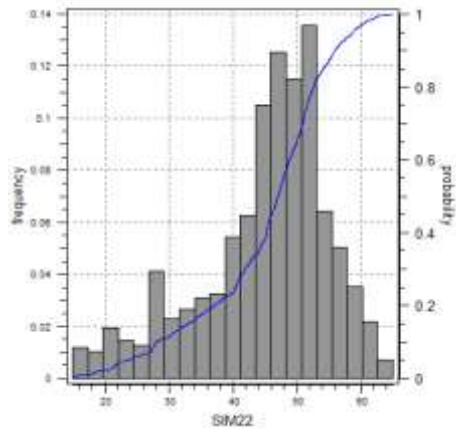
مقایسه بین واریوگرام تجربی نمونه‌های اولیه و تحقق‌های تولید شده در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است. گزینه‌ها از نظر مقدار متوسط، واریانس، کشیدگی، چولگی و نمودار واریوگرام نسبت به داده‌های اولیه مورد بررسی قرار گرفتند. با انجام مقایسه گزینه‌هایی که شباهت بیشتری با داده‌های اولیه داشتند از بین کل تحقق‌های تولید شده شناسایی و در نهایت ۳۰ مدل از بین ۴۴ تحقق عیاری تولید شده انتخاب شدند. در شکل ۴-۲۴ چهار تحقق از مدل بلوکی عیاری که با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی به دست آمده است به عنوان نمونه نشان داده شده است.



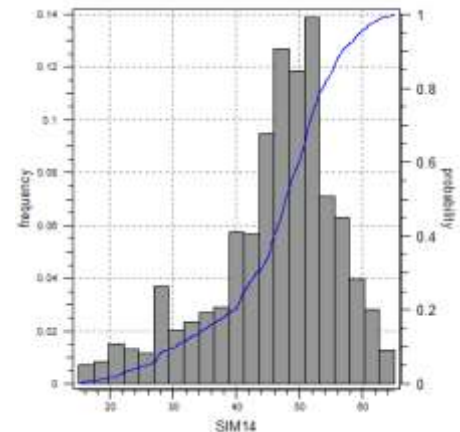
(ب)



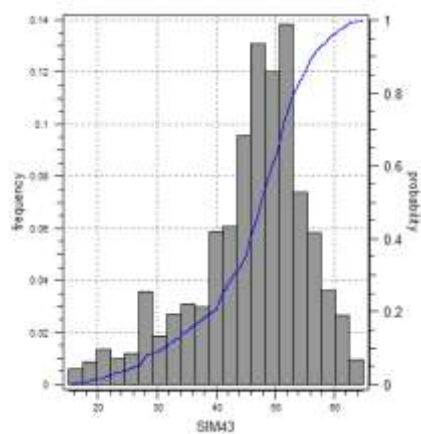
(الف)



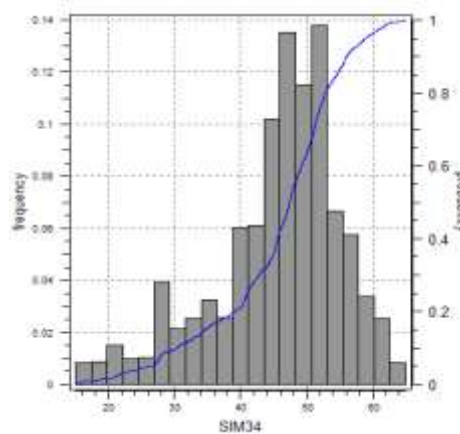
(ت)



(پ)

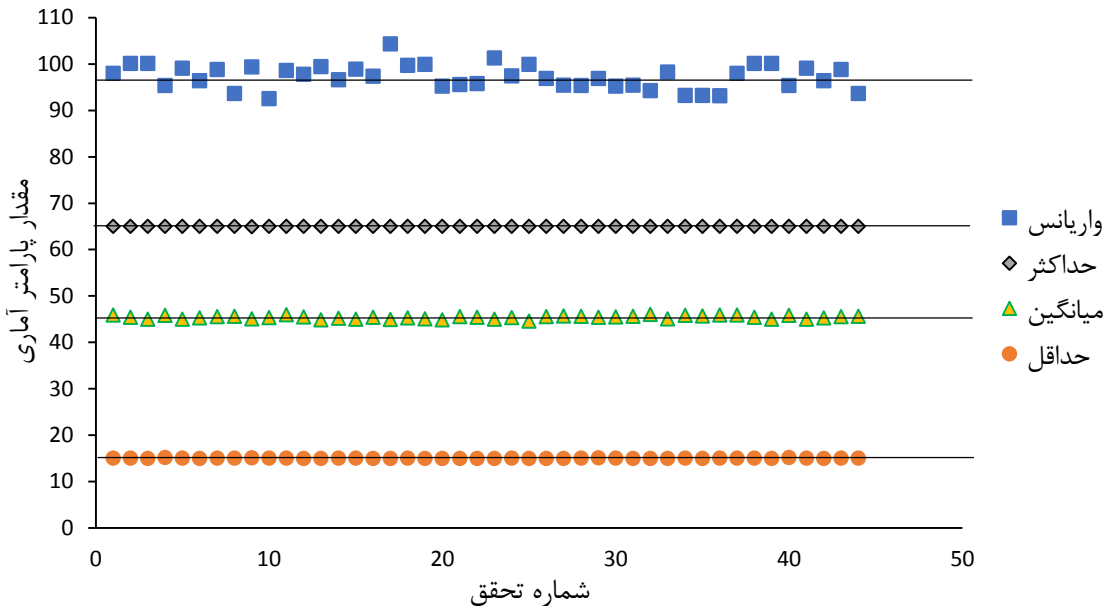


(ج)

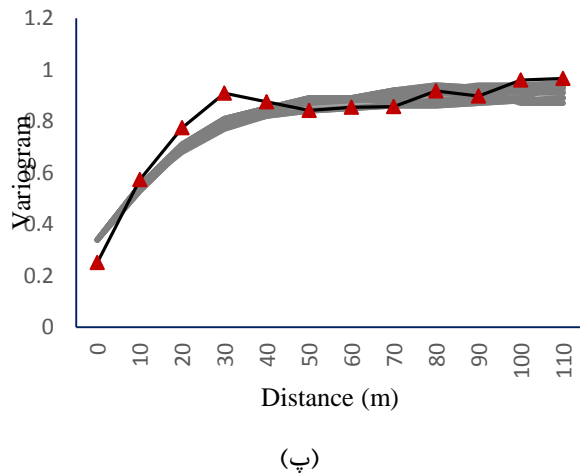
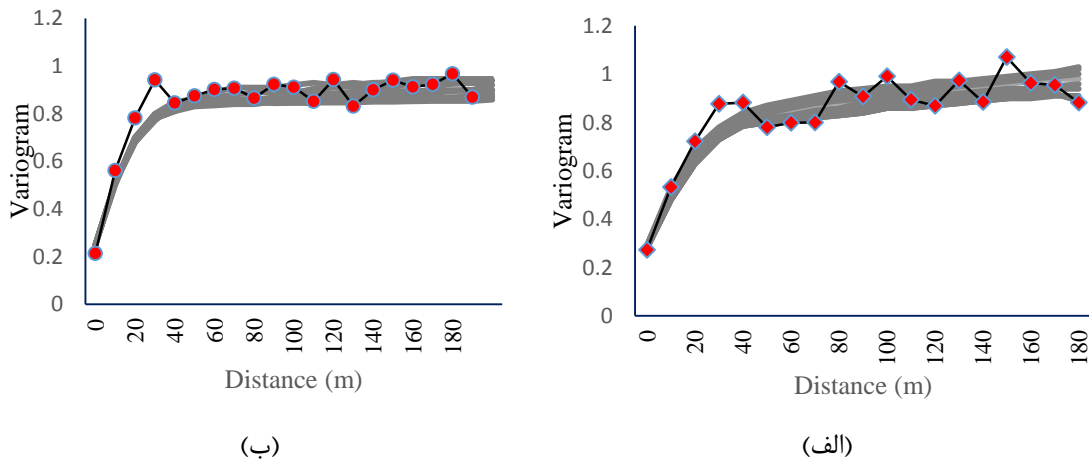


(ث)

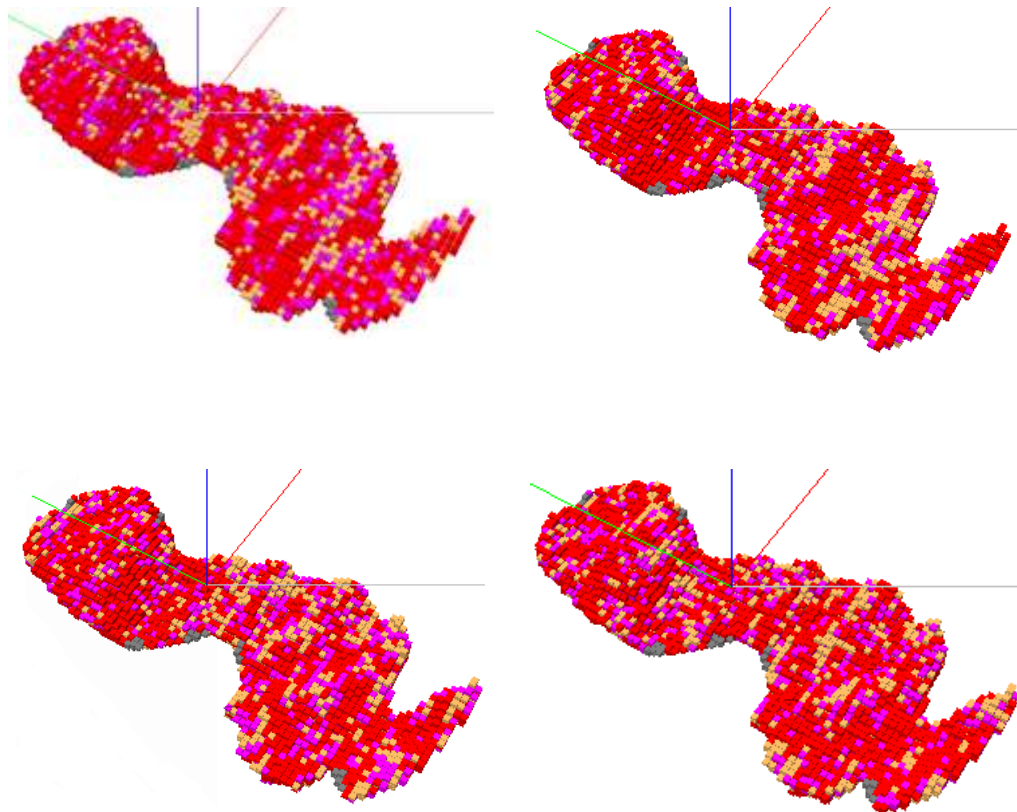
شکل ۴-۲۱- نمودار توزیع فراوانی عیار داده‌های اولیه (الف) و چند تحقق تولید شده (ب، پ، ت، ث، ج)



شکل ۴-۲۲- مقایسه پارامترهای آماری نمونه‌های اولیه (خطوط افقی) و مدل‌های شبیه‌سازی شده



شکل ۴-۲۳- مقایسه واریوگرام تجربی حاصل از نمونه‌های اولیه (نمودارهای نشان‌دار) و تحقق‌های عیاری منتخب ((الف) واریوگرام افقی در آزیموت صفر درجه، (ب) واریوگرام افقی در آزیموت ۹۰ درجه و (پ) واریوگرام قائم

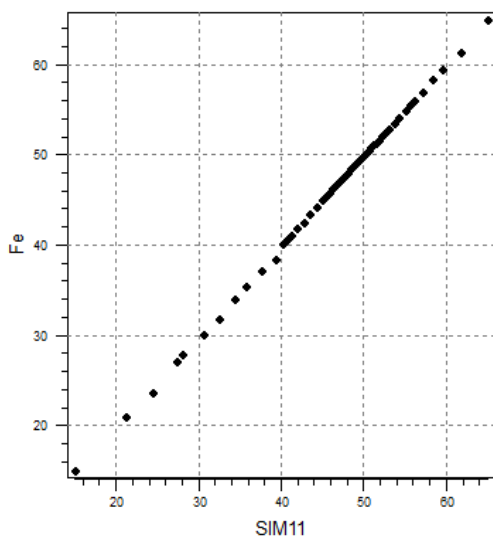


شکل ۴-۲۴- چهار تحقق از مدل‌های هم احتمال عیاری به دست آمده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی

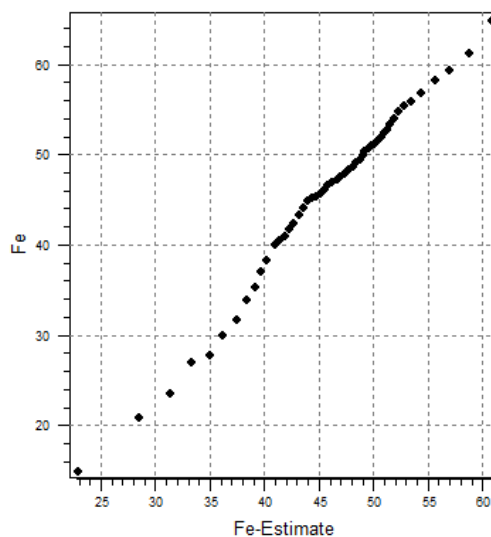
۴-۱۱-۲- مقایسه مدل‌های عیاری حاصل از کریجینگ و شبیه‌سازی

نمودار Q-Q بهترین ابزار گرافیکی برای مقایسه دو توزیع است. در واقع در حالتی که همه نقاط در نمودار مقدار- مقدار روی خط ۴۵ درجه قرار گیرند، بیانگر این است که دو توزیع یکسان هستند (Deustech & Journel, 1992). شکل ۴-۲۵ نمودار Q-Q مدل تخمینی و ۵ تحقق منتخب حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های اولیه را نشان می‌دهد. همانطور که در بخش الف شکل نشان داده شده است، تطبیق خوبی بین توزیع عیارهای تخمینی و توزیع عیار داده‌های اولیه وجود ندارد و نسبت به خط ۴۵ درجه انحراف مشاهده می‌شود. طبق نمودار مذکور در عیارهای پایین‌تر از میانگین عیار داده‌های اولیه، مقدار تخمین زده شده بزرگتر از مقدار اولیه (بیش تخمینی) و در عیارهای بالاتر از میانگین عیار داده‌های

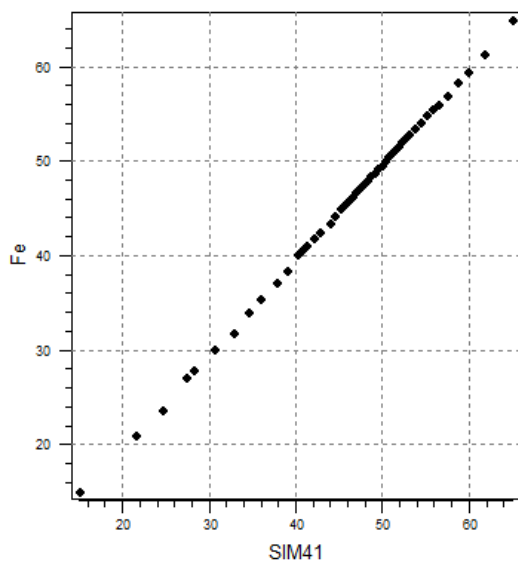
اولیه مقدار تخمین زده شده پایین تر از مقدار اولیه (کم تخمینی)، تخمین زده شده است. در صورتی که در مورد عیارهای شبیه سازی شده (بخش ب تا ج) انطباق خوبی بین مقادیر حاصل از شبیه سازی و داده های اولیه وجود دارد.



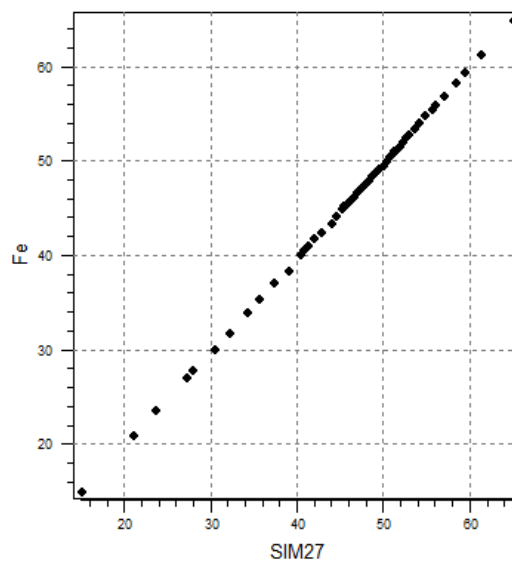
(ب)



(الف)



(ت)



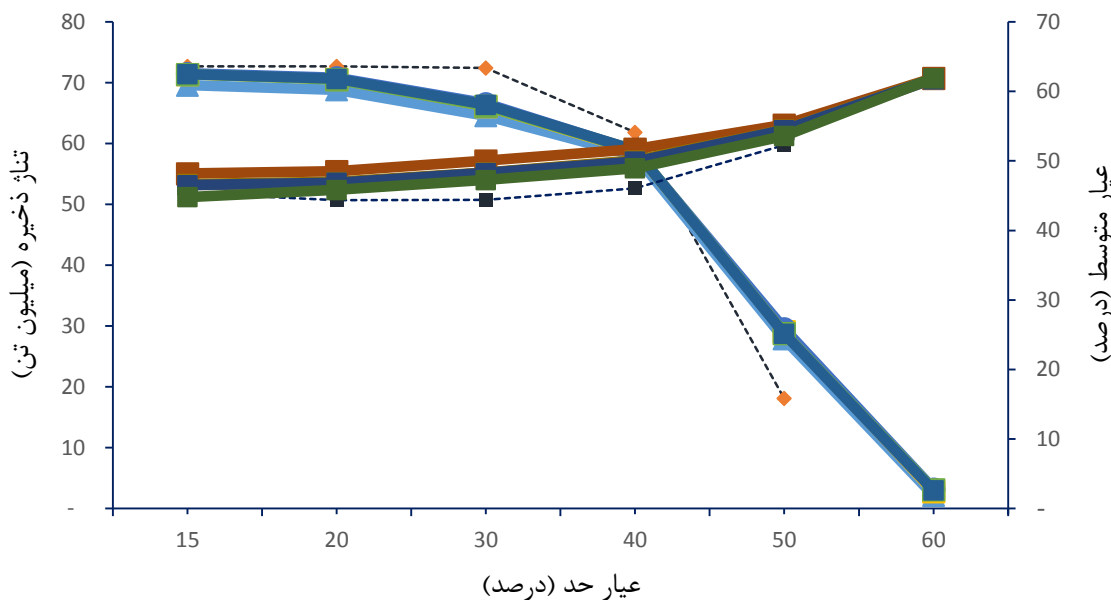
(پ)

شکل ۴-۲۵- نمودار $Q-Q$ عیار مدل تخمینی (الف) و چند تحقق شبیه سازی منتخب (ب، پ، ت)

با تعیین محدوده نهایی معدن برای هر یک از تحقق‌های عیاری، نتایج مختلفی حاصل به دست آمد که تایید کننده تاثیر عدم قطعیت عیار بلوک‌های کانسار در نتایج برنامه‌ریزی تولید معدن است.

منحنی‌های عیار - تناژ یکی از ابزارهایی هستند که برنامه‌ریزان معادن را قادر به تعیین پارامترهای صحیح‌تر برای برنامه‌ریزی‌های معدنی می‌کنند. در این منحنی‌ها مقدار، عیار متوسط و تناژ بر حسب عیار حد رسم می‌شود. از آنجایی که در شبیه‌سازی، تحقق‌های متعددی از کانسار ایجاد می‌شود. لذا می‌توان بر اساس هر تحقق به یک منحنی عیار - تناژ دست یافت و در نهایت با انطباق تمامی منحنی‌ها بر روی یک نمودار به ریسک موجود در تعیین تناژ ذخیره بر اساس عیار حد تعیین شده پی برد. تعیین ریسک همراه با تخمین تناژ امکان برنامه‌ریزی‌های دقیق را برای مهندسين معدن فراهم می‌کند. منحنی عیار-تناژ تحقق‌های حاصل از شبیه‌سازی در هر عیار حد به جای معرفی عددی قطعی به عنوان تناژ و عیار متوسط، بازه‌ای از مقادیر را معرفی می‌کند که بر حسب کوچکی و بزرگی این بازه، می‌توان به ریسک موجود در فرآیند تعیین تناژ و عیار متوسط، در یک عیار حد خاص پی برد. با مقایسه منحنی‌های عیار-تناژ مربوط به فرآیند تخمین و شبیه‌سازی، می‌توان تاثیر عدم قطعیت موجود در مدل تخمینی را در میزان ذخیره و عیار متوسط مشاهده کرد. شکل ۴-۲۶ منحنی‌های عیار-تناژ حاصل از تخمین و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، نمودار تناژ مدل تخمینی و مدل‌های شبیه‌سازی شده، در نقطه‌ای تقریباً برابر با متوسط عیار نمونه‌ها تلاقی دارند، که این مساله بیانگر بیش تخمینی در عیارهای پایین‌تر از عیار متوسط و کم تخمینی در عیارهای بالاتر از عیار متوسط نمونه‌ها است. نمودار عیار مدل تخمینی در کل پایین‌تر از نمودار عیار مدل شبیه‌سازی قرار گرفته است. به عبارت دیگر می‌توان عیار متوسط بالاتری را نسبت به آنچه مدل تخمینی معرفی می‌کند، انتظار داشت. در این نمودار مشاهده می‌شود در عیار حد پایین‌تر از متوسط عیار کلی نمونه‌ها و در واقع نقطه تلاقی نمودار تناژ ذخیره تخمین و شبیه‌سازی، در مقایسه مدل تخمینی با مدل‌های شبیه‌سازی شده می‌توان تناژ پایین‌تر و عیار متوسط بالاتر را از کانسار مورد مطالعه انتظار داشت، که در چنین حالتی نمی‌توان اظهار نظر خاصی داشت. در این حالت بر حسب فاصله‌ای که مقادیر تخمینی و شبیه‌سازی دارند، تاثیر عدم

قطعیت عیار نیز بیشتر می‌شود. در عیار حد بالاتر از متوسط عیار کلی نمونه‌ها، در مقایسه مدل تخمینی با مدل‌های شبیه‌سازی شده می‌توان تناژ و عیار متوسط بالاتری را، نسبت به مقادیر تعیین شده توسط مدل حاصل از تخمین، از کانسار مورد مطالعه انتظار داشت، که در چنین حالتی می‌توان گفت، مدل تخمینی کاملاً بدبینانه تعیین شده است.



شکل ۴-۲۶- مقایسه نمودار عیار-تناژ حاصل از کریجینگ (خط چین) و تحقق‌های حاصل از شبیه‌سازی

۴-۱۲- تعیین قیمت با استفاده از درخت دوجمله‌ای

برای ارزیابی رویکرد پیشنهادی، سال ۲۰۱۲ به عنوان سال مبنا در نظر گرفته شد و برنامه‌ریزی برای سال‌های ۲۰۱۲ تا سال ۲۰۱۷ انجام شد. ۱۰ دوره زمانی ۶ ماهه برای قیمت در نظر گرفته شد که در نتیجه دوره برنامه‌ریزی تولید برابر با ۵ سال انجام شد. با توجه به اینکه سنگ آهن استخراج شده از معدن به کشور چین ارسال و فروخته می‌شود، برای استفاده از روش درخت دوجمله‌ای، از داده‌های تاریخی قیمت سنگ آهن به صورت CFR^۱ کشور چین طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ استفاده شد.

^۱ Cost and Freight

جدول ۹-۴ قیمت ماهانه سنگ آهن (CFR^۱ کشور چین با عیار ۶۲ درصد) طی ۱۵ سال اخیر را نشان می‌دهد. مقدار نرخ افزایش ارزش هر گره برابر با ۱/۰۴، نرخ کاهش ارزش هر گره برابر با ۰/۹۶ به دست آمد. با استفاده از روش درخت دو جمله‌ای نمودار قیمت در دوره‌های زمانی مختلف به دست آمده (با استفاده از روابط (۲۶-۲) تا (۲۹-۲)) که در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است. با استفاده از این نمودار، مقادیر قابل انتظار قیمت \bar{P}_t در دوره‌های زمانی مختلف محاسبه می‌شود. قیمت سنگ آهن در سال مینا، برابر با ۱۰۸ دلار بر تن بوده که محاسبات بر اساس آن انجام شده است.

دوره	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
	۱۰۸	۱۱۹	۱۳۲	۱۴۶	۱۶۱	۱۷۸	۱۹۷	۲۱۷	۲۴۰	۲۶۶	۲۹۴
		۹۸	۱۰۸	۱۱۹	۱۳۲	۱۴۶	۱۶۱	۱۷۸	۱۹۷	۲۱۷	۲۴۰
			۸۸	۹۸	۱۰۸	۱۱۹	۱۳۲	۱۴۶	۱۶۱	۱۷۸	۱۹۷
				۸۰	۸۸	۹۸	۱۰۸	۱۱۹	۱۳۲	۱۴۶	۱۶۱
					۷۲	۸۰	۸۸	۹۸	۱۰۸	۱۱۹	۱۳۲
						۶۶	۷۲	۸۰	۸۸	۹۸	۱۰۸
							۵۹	۶۶	۷۲	۸۰	۸۸
								۵۴	۵۹	۶۶	۷۲
									۴۹	۵۴	۵۹
										۴۴	۴۹
											۴۰

شکل ۴-۲۷- نمودار درخت دو جمله‌ای قیمت سنگ آهن در ۱۰ دوره زمانی

با استفاده از رابطه (۳-۴)، قیمت در هر دوره زمانی بر اساس قیمت‌های به دست آمده از نمودار دو جمله‌ای محاسبه شد که در جدول ۴-۱۰ آمده است. قیمت متوسط به دست آمده از روش درخت دو جمله‌ای برابر با ۱۱۰ دلار بر تن است.

^۱ Cost and Freight

فصل چهارم: تجزیه و تحلیل و بیان نتایج

جدول ۹-۴- قیمت سنگ آهن طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ (Mundi commodity price index, 2017)

Month	Price (\$/ton)	Month	Price (\$/ton)	Month	Price (\$/ton)
Jan-02	12.68	Aug-05	28.11	Mar-09	64.07
Feb-02	12.68	Sep-05	28.11	Apr-09	59.78
Mar-02	12.68	Oct-05	28.11	May-09	62.69
Apr-02	12.68	Nov-05	28.11	Jun-09	71.66
May-02	12.68	Dec-05	28.11	Jul-09	83.95
Jun-02	12.68	Jan-06	33.45	Aug-09	97.67
Jul-02	12.68	Feb-06	33.45	Sep-09	80.71
Aug-02	12.68	Mar-06	33.45	Oct-09	86.79
Sep-02	12.68	Apr-06	33.45	Nov-09	99.26
Oct-02	12.68	May-06	33.45	Dec-09	105.25
Nov-02	12.68	Jun-06	33.45	Jan-10	125.91
Dec-02	12.68	Jul-06	33.45	Feb-10	127.62
Jan-03	13.82	Aug-06	33.45	Mar-10	139.77
Feb-03	13.82	Sep-06	33.45	Apr-10	172.47
Mar-03	13.82	Oct-06	33.45	May-10	161.35
Apr-03	13.82	Nov-06	33.45	Jun-10	143.63
May-03	13.82	Dec-06	33.45	Jul-10	126.36
Jun-03	13.82	Jan-07	36.63	Aug-10	145.34
Jul-03	13.82	Feb-07	36.63	Sep-10	140.63
Aug-03	13.82	Mar-07	36.63	Oct-10	148.48
Sep-03	13.82	Apr-07	36.63	Nov-10	160.55
Oct-03	13.82	May-07	36.63	Dec-10	168.53
Nov-03	13.82	Jun-07	36.63	Jan-11	179.63
Dec-03	13.82	Jul-07	36.63	Feb-11	187.18
Jan-04	16.39	Aug-07	36.63	Mar-11	169.36
Feb-04	16.39	Sep-07	36.63	Apr-11	179.26
Mar-04	16.39	Oct-07	36.63	May-11	177.1
Apr-04	16.39	Nov-07	36.63	Jun-11	170.88
May-04	16.39	Dec-07	36.63	Jul-11	172.98
Jun-04	16.39	Jan-08	60.8	Aug-11	177.45
Jul-04	16.39	Feb-08	60.8	Sep-11	177.23
Aug-04	16.39	Mar-08	60.8	Oct-11	150.43
Sep-04	16.39	Apr-08	60.8	Nov-11	135.54
Oct-04	16.39	May-08	60.8	Dec-11	136.46
Nov-04	16.39	Jun-08	60.8	Jan-12	140.35
Dec-04	16.39	Jul-08	60.8	Feb-12	140.4
Jan-05	28.11	Aug-08	60.8	Mar-12	144.66
Feb-05	28.11	Sep-08	60.8	Apr-12	147.65
Mar-05	28.11	Oct-08	60.8	May-12	136.27
Apr-05	28.11	Nov-08	60.8	Jun-12	134.62
May-05	28.11	Dec-08	69.98	Jul-12	127.94

جدول ۱۰-۴- قیمت در هر دوره با استفاده از روش درخت دوجمله‌ای

دوره زمانی	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
قیمت (دلار بر تن)	۱۰۸	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۲	۱۱۳	۱۰۰	۱۰۴	۱۰۷	۱۱۰	۱۱۴	۱۱۸

۴-۱۳- تعیین حداکثر شعاع عدم قطعیت عیار و قیمت

در این بخش برای حل مساله دو هدفه تعریف شده برای معدن مورد مطالعه، با تحلیل آماری ۳۰ مدل عیاری شبیه‌سازی شده (با استفاده از نرم‌افزار Datamine studio)، بازه شعاع عدم قطعیت عیار (R_β) بر اساس پارامترهای آماری عیار بلوک‌ها قابل تعیین است. مقادیر \bar{g}_i و σ_{g_i} برای بلوک‌های کانسار محاسبه شد. در جدول ۴-۱۱ پارامترهای آماری برای تعدادی از بلوک‌های کانسار که از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی به دست آمده اند درج شده است. مقادیر بازه تغییرات عیار در این جدول به خوبی عدم قطعیت موجود در عیار بلوک‌ها را تایید می‌کند. بر اساس انحراف معیار عیار بلوک‌های شبیه‌سازی شده که پراکندگی عیار را نشان می‌دهد، با توجه به روابط (۳-۴۱) تا (۳-۴۴)، مقادیر β^{max} و β^{min} و R_β به ترتیب برابر با ۲۲ و ۱۳ و ۹ درصد به دست آمدند. با تقسیم R_β به سه بازه مساوی، مقادیر ۱۳، ۱۶، ۱۹ و ۲۲ درصد برای β به دست می‌آید که مقادیر α بر اساس این مقادیر محاسبه می‌شود.

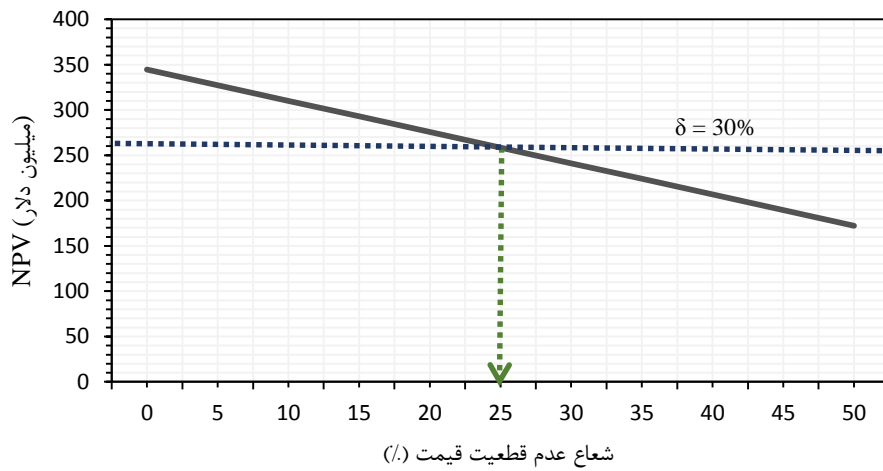
با در نظر گرفتن درجه تحمل کاهش تابع هدف نسبت به مقدار پایه به میزان ۳۰ درصد مقدار بحرانی ارزش خالص فعلی برابر با ۵۷۷،۹۵۰،۲۷۵ دلار خواهد بود. نمودارهای شکل ۴-۲۸ تا شکل ۴-۳۱ شعاع عدم قطعیت قیمت (α) در حالت $\delta=30\%$ و چهار حالت تعیین شده شعاع عدم قطعیت عیار (β) را نشان می‌دهند. چهار حالت برای (α, β) به شرح (۲۵، ۱۳)، (۲۱، ۱۶)، (۱۸، ۱۹) و (۱۵، ۲۲) به دست می‌آید. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، روش IGDT تصمیم گیرنده را قادر می‌سازد تا استراتژی‌های مختلف در حوالی جواب بهینه بدون ریسک را ارزیابی کند. در تمام حالت‌های ذکر شده مقدار ارزش خالص فعلی پروژه، از مقدار بحرانی تعیین شده بیشتر خواهد بود. بر اساس تحلیل‌ها و پیش‌بینی‌های اقتصادی و فنی می‌توان هر یک از حالت‌ها را انتخاب و بر اساس آن برنامه‌ریزی تولید معدن را انجام داد. در شرایطی که شرایط اقتصادی با تغییرات زیاد همراه باشد و تحلیل‌گران اقتصادی ریسک وجود خطا در تحلیل‌ها و پیش‌بینی‌های قیمت را بالا بدانند، بهتر است از حالتی که شعاع عدم قطعیت قیمت آن بالاتر است را مبنای محاسبات قرار داد.

فصل چهارم: تجزیه و تحلیل و بیان نتایج

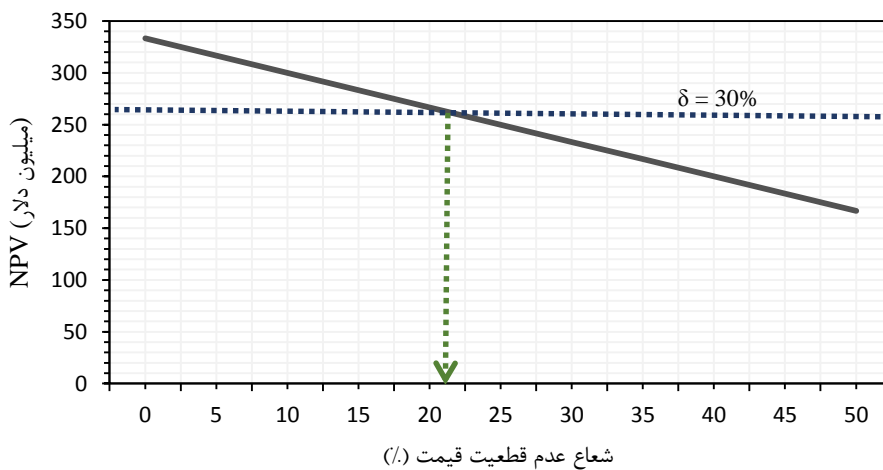
جدول ۴-۱۱- مقادیر آماری عیار حاصل از روش شبیه‌سازی زمین‌آماری برای تعدادی از بلوک‌های کانسار

شماره شناسایی بلوک	مقدار متوسط عیار (%)	انحراف استاندارد (%)	حداکثر (%)	حداقل (%)	بازه تغییرات (%)
۱۴۰۶۱۸	۴۵/۹۸	۹/۹۲	۶۲/۳۵	۲۷/۵۳	۳۴/۸۲
۱۴۰۶۱۹	۴۵/۲۱	۱۱/۲۶	۶۳/۲۵	۱۵/۸۶	۴۷/۳۹
۱۴۰۶۷۲	۴۶/۹۵	۷/۸۶	۶۲/۷۲	۲۹/۳	۳۳/۴۲
۱۴۰۷۲۵	۴۶/۶۴	۹/۳۴	۶۲/۸۶	۲۲/۲۲	۴۰/۶۴
۱۴۰۷۷۶	۴۹/۷۲	۶/۵۳	۶۰/۳۵	۳۵/۴۳	۲۴/۹۲
۱۴۰۷۷۷	۵۰/۹۶	۶/۸۴	۶۴/۵۱	۴۰/۴۷	۲۴/۴
۱۴۰۷۷۸	۵۳/۳	۶/۱	۶۴/۳۶	۴۵/۱۱	۱۹/۲۵
۱۴۰۸۲۷	۵۱/۱۱	۷/۶۶	۶۲/۳۱	۳۵/۵۶	۲۶/۷۵
۱۴۰۸۲۸	۵۳/۴۱	۵/۳	۶۲/۶۴	۴۵/۱۹	۱۷/۴۵
۱۴۰۸۲۹	۵۲/۸۷	۴/۳۸	۶۱/۶۸	۴۶/۷۹	۱۴/۸۹
۱۴۰۸۳۰	۵۲/۶۳	۶/۲۶	۶۲/۴۱	۴۰/۱۵	۲۲/۲۶
۱۴۰۸۷۹	۴۶/۸۲	۱۰/۱۳	۵۷/۶۵	۲۱/۸۵	۳۵/۸
۱۴۰۸۸۰	۴۳/۴۲	۸/۶۲	۵۸/۶۸	۲۱/۵۲	۳۷/۱۶
۱۴۰۸۸۱	۴۴/۵۴	۸/۳	۵۴/۶۲	۲۱/۷۶	۳۲/۸۶
۱۴۰۸۸۲	۴۳/	۹/۴۱	۵۳/۴۳	۱۷/۵۹	۳۵/۸۴
۱۴۰۸۸۳	۳۹/۱۲	۸/۵۸	۵۰/۳۲	۲۲/۸	۲۸/۲۴
۱۴۰۹۳۵	۳۲/۶۷	۹/۴	۵۱/۴	۱۸/۹۷	۳۲/۷
۱۴۰۹۳۶	۲۹/۴۴	۱۰/۹۵	۴۸/۶۲	۱۵/۱	۳۳/۶۱
۱۴۰۹۸۸	۳۸/۴۲	۱۰/۸	۶۱/۳۳	۲۱/۲۲	۴۰/۱۱
۱۴۶۲۴۲	۴۴/۶۲	۱۰/۸۲	۵۹/۶۷	۲۱/۱۲	۳۸/۵۵
۱۴۶۲۴۳	۴۱/۳	۱۲/۳۷	۵۹/۴۷	۲۰/۷۳	۳۸/۷۴
۱۴۶۲۹۵	۴۵/۶۴	۸/۵۱	۶۰/۷۸	۲۱/۲	۳۹/۵۸
۱۴۶۶۵۸	۴۶/۸۳	۸/۵۸	۶۲/۸۱	۲۴/۶	۳۸/۷۵
۱۴۶۶۵۹	۴۷/۵۸	۷/۹۵	۶۰/۷۱	۱۵/۳۶	۴۵/۳۵
۱۴۶۶۶۰	۴۵/۹۴	۷/۶۴	۵۷/۱۷	۲۶/۷۹	۳۰/۳۸

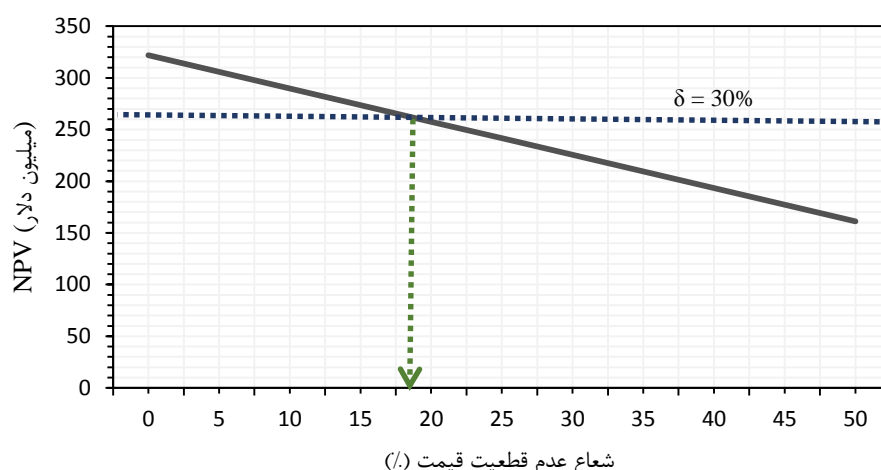
در معدن مورد مطالعه، حجم و کیفیت عملیات اکتشافی از دید کارشناسی مناسب و کافی برآورد شده است. همچنین شرایط اقتصادی دنیا در سال‌های اخیر با شرایط پیچیده‌ای همراه بوده که موجب ایجاد نوسانات شدید در قیمت‌ها شده و پیش‌بینی قیمت‌ها را با سختی روبرو کرده است. با توجه به موارد ذکر شده برای معدن مورد مطالعه حالت اول یعنی $\alpha = 25$ و $\beta = 13$ انتخاب شد.



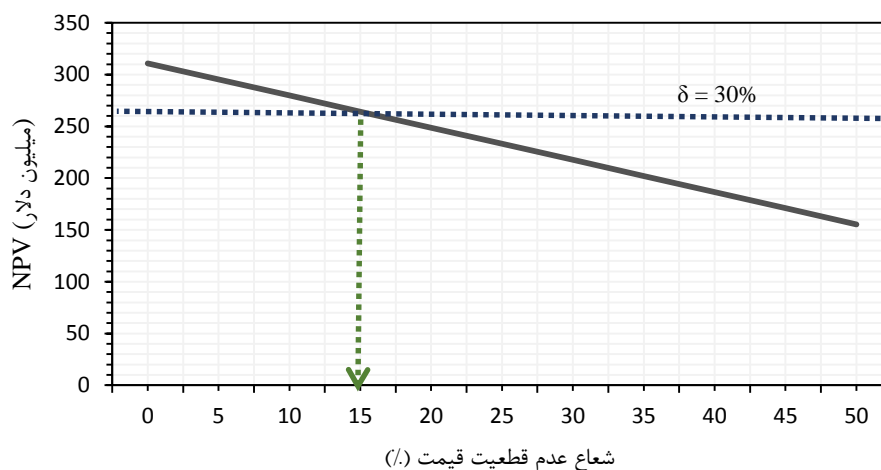
شکل ۴-۲۸- تعیین شعاع عدم قطعیت قیمت (α) در حالت $\delta=30\%$ و $\beta=13\%$



شکل ۴-۲۹- تعیین شعاع عدم قطعیت قیمت (α) در حالت $\delta=30\%$ و $\beta=16\%$



شکل ۳۰-۴- تعیین شعاع عدم قطعیت قیمت (α) در حالت $\delta=30\%$ و $\beta=19\%$



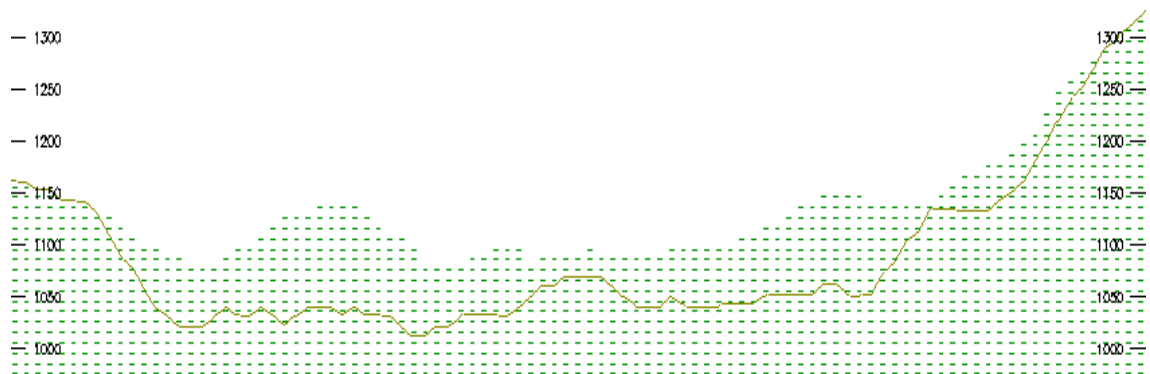
شکل ۳۱-۴- تعیین شعاع عدم قطعیت قیمت (α) در حالت $\delta=30\%$ و $\beta=22\%$

۱۴-۴- برنامه‌ریزی تولید ریسک‌گریز

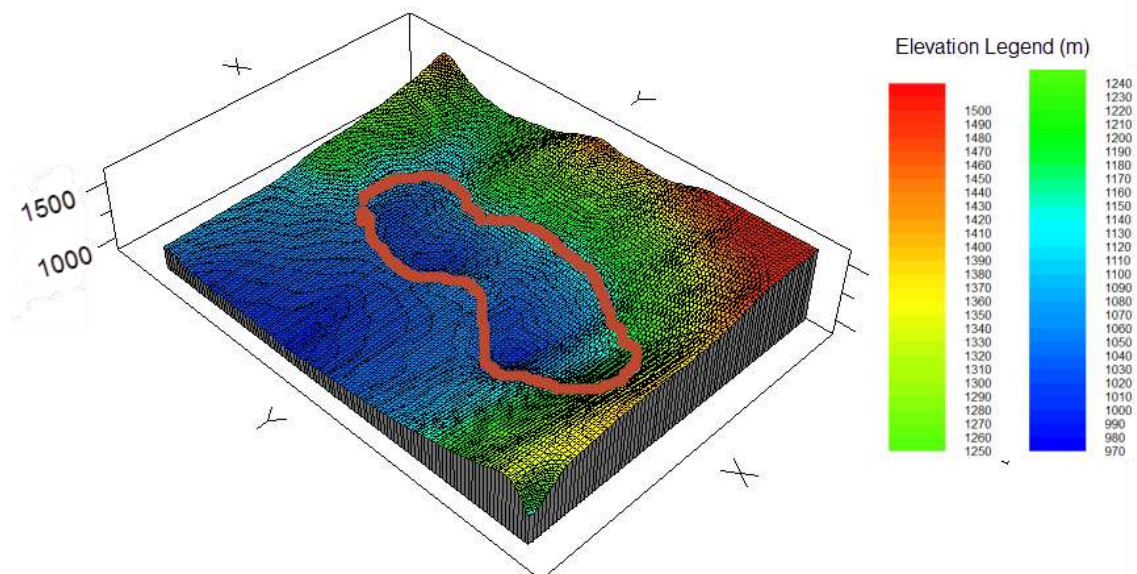
در این بخش برنامه‌ریزی تولید بر مبنای تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی با استراتژی ریسک‌گریز برای معدن مورد مطالعه انجام می‌شود. عیار بلوک‌ها با اعمال رابطه (۳-۴۶) بر میانگین عیار هر بلوک در تحقق‌های عیاری به دست آمده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی به دست آمد. همچنین با اعمال رابطه (۳-۴۷) بر قیمت‌های ذکر شده در جدول ۴-۱۰ و میانگین‌گیری از آن‌ها، قیمت

برابر با ۸۲/۵ دلار بر تن برای استفاده در برنامه‌ریزی تولید ریسک‌گریز به دست آمد. بر اساس اطلاعات ذکر شده در جدول ۴-۶ با استفاده از نرم‌افزار NPV Scheduler محدوده نهایی بهینه معدن با روش لرچ و گروسمن به دست آمد.

شکل ۴-۳۲ یک مقطع عمودی از محدوده نهایی معدن و شکل ۴-۳۳ نمای سه بعدی آن را نشان می‌دهد. پوشش‌بک‌های استخراجی بر اساس پارامترهای ذکر شده در جدول ۴-۱۲ و با استفاده از نرم‌افزار NPV Scheduler تعیین شدند. شکل ۴-۳۴ یک مقطع عمودی از پوشش‌بک‌های استخراجی و جدول ۴-۱۳ مشخصات فنی و اقتصادی آن‌ها را نشان می‌دهد.



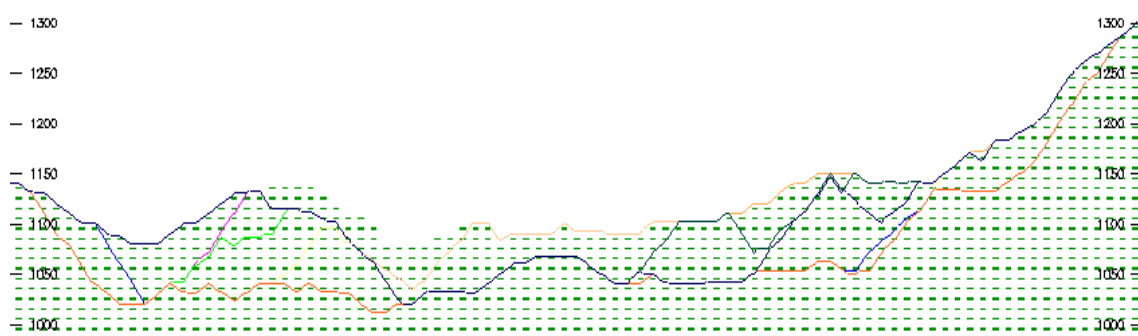
شکل ۴-۳۲- یک مقطع از محدوده نهایی در راستای شمالی- جنوبی (E-900)



شکل ۴-۳۳- نمای سه بعدی محدوده نهایی معدن

جدول ۴-۱۲- پارامترهای مورد استفاده در برنامه‌ریزی پوشش‌بک‌های استخراجی

ردیف	شرح	مقدار	واحد
۱	حداقل فضای کاری	۳۰	متر
۲	حداکثر تعداد بلوک باقیمانده در پوشش‌بک	۲۰۰	عدد
۳	حداکثر تناژ ماده معدنی در پوشش‌بک	۱۵	میلیون تن
۴	حداکثر تعداد پوشش‌بک‌ها	۲۰	عدد



شکل ۴-۳۴- یک مقطع عمودی از پوشش‌بک‌های استخراجی

جدول ۴-۱۳- مشخصات فنی و اقتصادی پوشش‌بک‌های استخراجی

شماره پوشش‌بک	مجموع باطله استخراجی (هزار تن)	ماده معدنی استخراجی (هزار تن)	هزینه استخراج (هزار دلار)	هزینه فراآوری (هزار دلار)	درآمد (هزار دلار)	سود (هزار دلار)	NPV (هزار دلار)	عیار (Fe)
۱	۳۰۴	۱۸،۵۷۷	۲۰،۰۰۷	۱۸،۵۳۱	۴۴۲،۳۸۹	۴۰۳،۸۵۲	۲۷۳،۲۸۴	۴۵
۲	۱،۰۰۷	۱۵،۱۱۷	۱۸،۲۶۱	۱۵،۰۷۹	۳۲۷،۷۱۱	۲۹۴،۳۷۱	۹۲،۵۷۳	۴۱
۳	۲،۹۴۸	۲۸،۹۸۲	۳۷،۵۳۹	۲۸،۹۱۰	۵۹۴،۷۹۴	۵۲۸،۳۴۵	۶۰،۳۲۸	۳۹
۴	۶،۷۶۷	۹،۰۳۷	۲۱،۲۷۶	۹،۰۱۵	۱۷۷،۵۷۹	۱۴۷،۲۸۸	۴،۹۹۰	۳۷

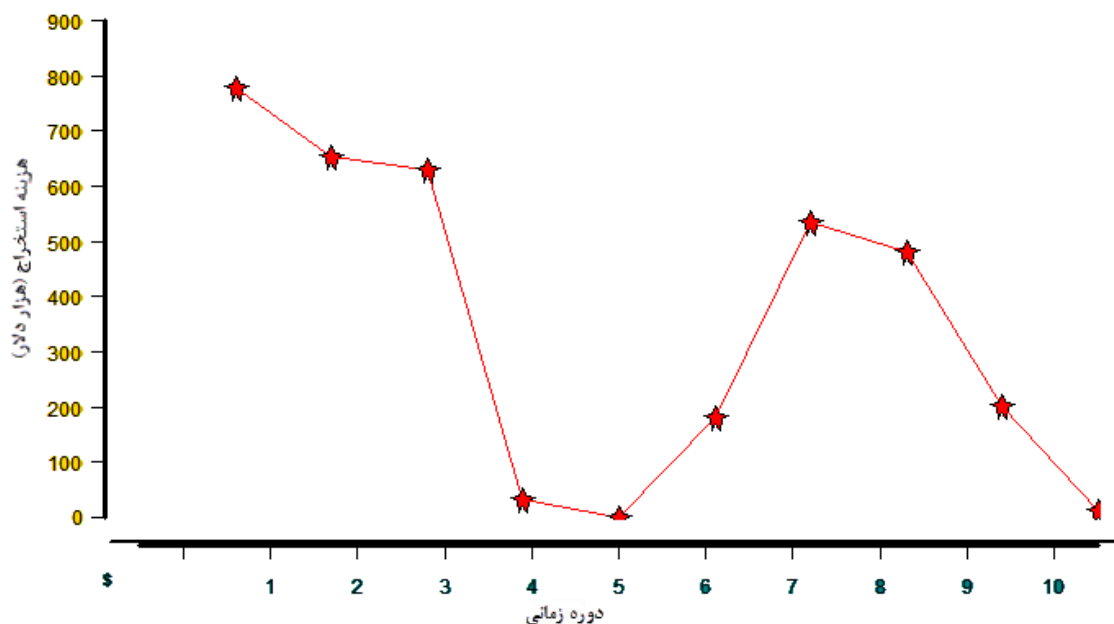
برنامه‌ریزی تولید برای ۵ سال بر اساس پارامترهای جدول ۴-۱۴ و با استفاده از نرم‌افزار NPV Scheduler برای پوشش‌بک شماره ۱ انجام شد. جدول ۴-۱۵ بخشی از برنامه زمان‌بندی استخراج برای ۲۲۲۳ بلوک موجود در پوشش‌بک شماره ۱ را نشان می‌دهد. شکل ۴-۳۵ هزینه استخراج و شکل ۴-۳۶ نسبت باطله‌برداری در دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی را نشان می‌دهند.

جدول ۴-۱۴- پارامترهای مورد استفاده در برنامه‌ریزی تولید

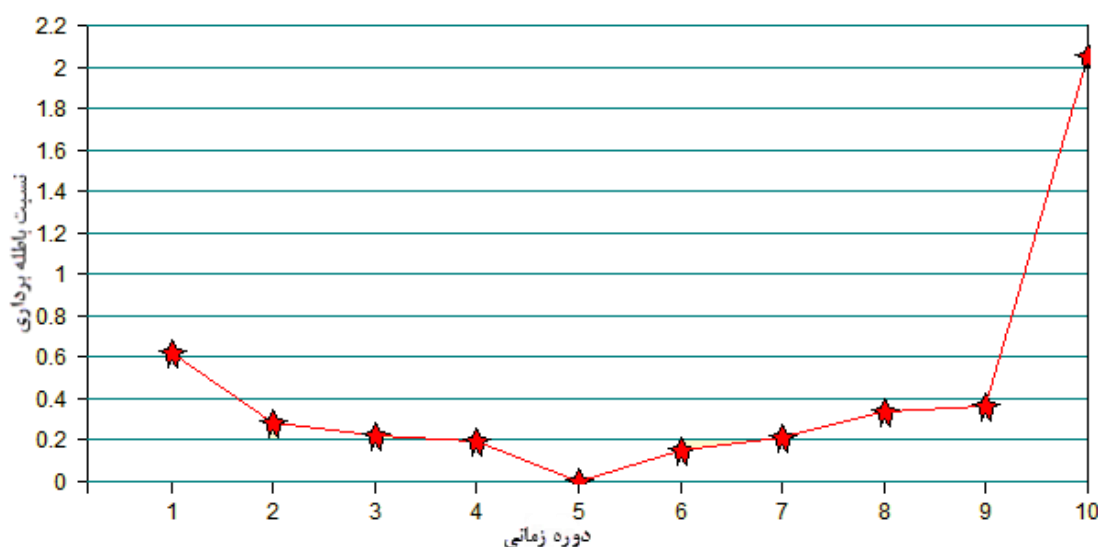
ردیف	شرح	مقدار	واحد
۱	حداقل تناژ استخراج سالانه ماده معدنی	۲	میلیون تن
۲	حداکثر تناژ استخراج سالانه ماده معدنی	۴	میلیون تن
۳	تناژ هدف برای استخراج سالانه ماده معدنی	۳	میلیون تن
۴	روزهای کاری در سال	۳۶۵	روز

جدول ۴-۱۵- بخشی از برنامه زمان‌بندی استخراج بلوک‌ها

شماره پوشش‌یک	ترتیب استخراج	هزینه استخراج (دلار)	هزینه فرآوری (دلار)	ارزش بلوک (دلار)	شناسه بلوک (IJK)
۱	۱	۱۳۵۰۰	۸۹۹۰,۳۵۴	۲۱۷۷۷۱,۳	۱۹۷۰۱۰
۱	۲	۱۳۵۰۰	۸۹۵۵,۶۴۲	۲۱۵۲۰۳	۱۹۰۹۶۷
۱	۳	۱۳۵۰۰	۸۹۱۶,۲۳۹	۲۱۲۳۰۳,۵	۱۹۶۹۵۶
۱	۴	۱۳۵۰۰	۸۸۱۶,۳۲۷	۲۰۵۰۲۷	۲۰۲۹۴۵
۱	۵	۱۳۵۰۰	۸۸۷۵,۱۷۴	۲۰۹۲۹۹,۶	۱۹۶۸۵۰
۱	۶	۱۳۵۰۰	۸۸۷۵,۱۷۴	۲۰۹۲۹۹,۶	۱۹۰۸۶۰
۱	۷	۱۳۵۰۰	۸۸۷۵,۱۷۴	۲۰۹۲۹۹,۶	۱۹۶۸۴۹
۱	۸	۱۳۵۰۰	۸۸۷۵,۱۷۴	۲۰۹۲۹۹,۶	۱۹۰۸۰۷
۱	۹	۱۳۵۰۰	۸۸۸۵,۹۶۳	۲۱۰۰۸۷	۱۹۰۷۵۵
۱	۱۰	۱۳۵۰۰	۹۰۰۲,۷۱۹	۲۱۸۶۸۹,۴	۱۹۰۷۵۴
۱	۱۱	۱۳۵۰۰	۸۸۷۵,۱۷۴	۲۰۹۲۹۹,۶	۱۹۰۸۰۶
۱	۱۲	۱۳۵۰۰	۸۸۷۵,۱۷۴	۲۰۹۲۹۹,۶	۱۹۶۹۰۳
۱	۱۳	۱۳۵۰۰	۸۹۱۶,۲۳۹	۲۱۲۳۰۳,۵	۱۹۰۹۱۴
۱	۱۴	۱۳۵۰۰	۸۸۷۵,۱۷۴	۲۰۹۲۹۹,۶	۱۹۶۹۰۲
۱	۱۵	۱۳۵۰۰	۸۸۷۷,۰۹۳	۲۰۹۴۳۹,۵	۱۴۰۸۳۰
۱	۱۶	۱۳۵۰۰	۸۸۷۰,۵۶۷	۲۰۸۹۶۳,۸	۱۸۳۲۳۲
۱	۱۷	۱۳۵۰۰	۸۸۳۴,۹۱۹	۲۰۶۳۷۲,۸	۲۶۹۵۱۹
۱	۱۸	۱۳۵۰۰	۸۸۳۴,۹۱۹	۲۰۶۳۷۲,۸	۲۵۷۴۸۸
۱	۱۹	۱۳۵۰۰	۸۸۳۴,۹۱۹	۲۰۶۳۷۲,۸	۲۵۷۴۳۴
۱	۲۰	۱۳۵۰۰	۸۸۳۴,۹۱۹	۲۰۶۳۷۲,۸	۲۶۳۴۷۷
۱	۲۱	۱۳۵۰۰	۸۸۳۴,۹۱۹	۲۰۶۳۷۲,۸	۲۶۳۵۳۱
۱	۲۲	۱۳۵۰۰	۸۸۳۴,۹۱۹	۲۰۶۳۷۲,۸	۲۵۷۵۴۲
۱	۲۳	۱۳۵۰۰	۸۸۲۳,۷۰۴	۲۰۵۵۶۰,۵	۱۸۹۲۲۲



شکل ۴-۳۵- هزینه استخراج در دوره‌های زمانی مختلف



شکل ۴-۳۶- نسبت باطله برداری در دوره‌های زمانی مختلف

۴-۱۵- ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج

در این قسمت برای ارزیابی رویکرد ارائه شده، نتایج حاصل از برنامه‌ریزی با رویکرد پیشنهادی، با نتایج حاصل از برنامه‌ریزی با روش قطعی و برنامه‌ریزی با داده‌های واقعی انجام شد. در ادامه مراحل ارزیابی شرح داده شده است.

۴-۱۵-۱- محاسبه NPV با داده‌های واقعی

داده‌های واقعی قیمت بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ در جدول ۴-۱۶ آمده است. متوسط قیمت واقعی سنگ آهن در این دوره برابر با ۸۷ دلار بر تن بوده است. با توجه با این که روش شبیه‌سازی زمین‌آماری نتایج نزدیک‌تر به واقعیت را تولید می‌کند، لذا از مدل بلوکی عیاری به دست آمده از این روش برای محاسبه NPV پروژه در حالت واقعی استفاده شد. در این حالت با استفاده از اطلاعات جدول ۴-۶ و در نظر گرفتن قیمت برابر با ۸۷ دلار بر تن، تعیین محدوده نهایی با روش لرچ و گروسمن در نرم‌افزار NPV Scheduler انجام شد و مقدار NPV برابر با ۳۰۱،۶۸۴،۰۶۲ دلار به دست آمد.

جدول ۴-۱۶- قیمت سنگ آهن طی سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ (Mundi commodity price index, 2017)

Month	Price (\$/ton)	Month	Price (\$/ton)	Month	Price (\$/ton)
Aug-12	107.8	May-14	100.56	Feb-16	46.83
Sep-12	99.47	Jun-14	92.85	Mar-16	56.2
Oct-12	113.95	Jul-14	96.26	Apr-16	60.92
Nov-12	120.35	Aug-14	94.14	May-16	55.13
Dec-12	128.87	Sep-14	84.52	Jun-16	51.98
Jan-13	150.49	Oct-14	81.3	Jul-16	57.26
Feb-13	154.64	Nov-14	74.43	Aug-16	60.89
Mar-13	139.87	Dec-14	68.67	Sep-16	57.79
Apr-13	137.39	Jan-15	69.07	Oct-16	59.09
May-13	124.01	Feb-15	63.8	Nov-16	73.1
Jun-13	114.82	Mar-15	58.18	Dec-16	80.02
Jul-13	127.19	Apr-15	52.11	Jan-17	80.41
Aug-13	137.06	May-15	60.43	Feb-17	89.44
Sep-13	134.19	Jun-15	61.84	Mar-17	87.65
Oct-13	132.57	Jul-15	52.17	Apr-17	70.22
Nov-13	136.32	Aug-15	57.33	May-17	62.43
Dec-13	135.79	Sep-15	56.98	Jun-17	57.48
Jan-14	128.12	Oct-15	53.66	Jul-17	67.74
Feb-14	121.37	Nov-15	47.19	Aug-17	76.07
Mar-14	111.83	Dec-15	40.88	Sep-17	71.53
Apr-14	114.58	Jan-16	41.88	Oct-17	61.66

۴-۱۵-۲- مقایسه NPV در سناریوهای مختلف

جدول ۴-۱۷ مقادیر NPV به دست آمده از سه سناریو موجود را بیان می‌کند. مشاهده می‌شود، در

صورت اعمال نکردن عدم قطعیت، مقدار NPV به دست آمده نسبت به واقعیت به طور قابل توجهی بالاتر بوده و در نتیجه موجب بروز خطا در تصمیم‌گیری‌ها خواهد شد. همانطور که انتظار می‌رود، مقدار NPV به دست آمده با داده‌های واقعی از مقدار NPV بحرانی بیشتر بوده و برنامه‌ریزی انجام شده با رویکرد پیشنهادی همچنان در برابر عدم قطعیت عیار و قیمت مصون مانده است. اختلاف بین مقدار NPV واقعی و NPV به دست آمده از رویکرد پیشنهادی حدود ۸ درصد و اختلاف بین NPV واقعی و NPV به دست آمده از روش قطعی حدود ۳۱ درصد است. این موضوع بیانگر این است که در شرایط نامساعد اقتصادی و نزولی بودن قیمت‌ها، رویکرد پیشنهادی نتایج نزدیک‌تر به واقعیت را تولید خواهد کرد و برنامه‌ریزی انجام شده در شرایط عدم قطعیت، از اطمینان بیشتری برخوردار خواهد بود.

جدول ۴-۱۷- مقایسه سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی

سناریو	روش در نظر گرفتن عیار	روش در نظر گرفتن قیمت	NPV (دلار)	اختلاف با واقعیت (درصد)
بدون اعمال عدم قطعیت	تعیین عیار بلوک‌ها با استفاده از تک مدل تخمینی از روش کریجینگ	قیمت موجود در زمان برنامه‌ریزی	۳۹۴,۲۱۵,۱۱۰	۳۱
رویکرد پیشنهادی رساله	تعیین عیار بلوک‌ها عیار با روش شبیه‌سازی و لحاظ کردن شعاع عدم قطعیت عیار	تخمین قیمت با روش درخت دوجمله‌ای و لحاظ کردن شعاع عدم قطعیت آن	۲۷۸,۱۹۰,۴۲۹	۸
با داده‌های واقعی	تعیین عیار بلوک‌ها عیار با روش شبیه‌سازی	قیمت‌های واقعی در دوره زمانی برنامه‌ریزی	۳۰۱,۶۸۴,۰۶۲	۰

۴-۱۶- جمع‌بندی فصل

در این فصل به بررسی قابلیت کاربردی و اعتبارسنجی رویکرد ارائه شده برای برنامه‌ریزی تولید معدن در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت، از اطلاعات یک معدن روباز سنگ آهن و داده‌های تاریخی قیمت استفاده شد. ارزش خالص فعلی معدن مذکور با مدل‌های یاد شده تحت عدم قطعیت محاسبه شد و با

مقادیر حاصل از داده‌های تخمینی و واقعی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از حل مساله در سه سناریوی ذکر شده نشان داد که در صورت استفاده از رویکرد پیشنهادی، برنامه‌ریزی مقاوم و قابل اطمینانی به دست خواهد آمد. با بررسی و تحلیل نتایج حاصل از به کار گیری رویکرد پیشنهادی این رساله مشخص شد حل مساله با رویکرد پیشنهادی اختلاف کمتر با واقعیت داشته و این نشان دهنده تاثیر قابل قبول استفاده از رویکرد پیشنهادی در پروژه‌های معدنی است. رویکرد ارائه شده نتایجی با اعتبار و استواری بالاتری نسبت به روش‌های قطعی را ایجاد می‌کند و می‌تواند در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز مورد استفاده قرار گیرد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

قیمت و عیار از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در برنامه‌ریزی تولید معدن می‌باشند، به طوری که برنامه‌ریزی‌های معدن به تغییرات این پارامترها حساسیت بالا نشان می‌دهند. علی‌رغم به کارگیری فنون استفاده شده برای رسیدن به درک بیشتر درباره‌ی آینده، این حقیقت همچنان باقی می‌ماند که آینده، نامعلوم و غیرقطعی است. در واقع با گذشت زمان و پیشرفت پروژه، تقریباً همیشه بین آنچه در زمان انجام برنامه‌ریزی پیش‌بینی شده بود و آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد تفاوت‌هایی وجود خواهد داشت که این تفاوت‌ها باعث از دست رفتن بهینگی برنامه‌ریزی‌های انجام شده می‌شوند. برنامه‌ریزی‌هایی که بدون توجه به عدم قطعیت قیمت ورودی انجام میشوند، فقط در لحظه برنامه‌ریزی بهینه هستند. لذا با تغییر قیمت در طول عمر پروژه، بهینه بودن آن از بین می‌رود. همچنین با توجه به این که عیار تعیین شده برای بلوک‌های کنسار تا زمان استخراج کامل ذخیره معدن قطعی نیست، لذا بهینگی برنامه‌ریزی بر اساس مدل بلوکی عیاری تهیه شده نیز هیچگاه قطعی نخواهد بود. عدم قطعیت کیفیت و کمیت ذخایر معدنی با توجه به افزایش هزینه‌ها و افزایش عمق ذخایر همواره وجود داشته و با احتمال زیاد با توجه به افزایش عمق ذخایر باقیمانده، رو به افزایش خواهد بود. در این رساله یک رویکرد کاربردی جدید مبتنی بر نظریه تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی (IGDT) ارائه شده است که امکان برنامه‌ریزی تولید

ریسک‌گریز را برای معادن روباز در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت فراهم می‌کند. در این فصل از رساله ابتدا به بررسی نتایج به دست آمده از رویکرد ارائه شده پرداخته و پس از آن پیشنهادهای برای انجام مطالعات تکمیلی در تحقیقات آتی ارائه شده است.

۵-۲- نتیجه‌گیری

در رویکرد ارائه شده در این رساله، بر اساس تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی، برای هر یک از پارامترهای غیر قطعی عیار و قیمت، یک شعاع عدم قطعیت تعریف شده و با هدف تامین حداقل الزامات فنی و اقتصادی پروژه، حداکثر شعاع عدم قطعیت‌های مذکور شناسایی و بر اساس آن برنامه‌ریزی تولید انجام می‌شود. مدل طراحی شده، یک تابع مقاومت را به منظور ایمن‌سازی برنامه‌ریزی تولید معادن روباز و همچنین کاهش میزان ریسک ناشی از تغییرات نامطلوب پارامترهای غیر قطعی عیار و قیمت، به کار می‌برد. همچنین، این مدل، مقادیر حداکثر خطاهای نسبی قابل قبول در فرآیند پیش‌بینی پارامترهای تصادفی را، متناظر با هر مقدار NPV از پیش تعیین شده محاسبه می‌کند. با بررسی و تحلیل نتایج حاصل از به کارگیری رویکرد پیشنهادی مشخص شد حل مساله با رویکرد پیشنهادی اختلاف کمتر با واقعیت داشته و این نشان دهنده تاثیر قابل قبول استفاده از این روش در برنامه‌ریزی تولید معادن روباز در شرایط عدم قطعیت عیار و قیمت است. قابلیت‌های رویکرد پیشنهادی به شرح زیر قابل بیان می‌باشند:

- ۱- رویکرد ارائه شده، دستیابی پروژه معدنی به یک ارزش خالص فعلی مشخص و یا مقادیر بزرگتر از آن را در شرایط عدم قطعیت عیار و نوسانات قیمت تضمین کرده و یک برنامه‌ریزی تولید مناسب را در شرایط مذکور ارائه می‌دهد.
- ۲- مصونیت برنامه‌ریزی انجام شده در برابر تغییرات قیمت و خطاهای موجود در مدل بلوکی عیاری کانسار از ویژگی‌های اصلی رویکرد پیشنهادی است.
- ۳- در رویکرد پیشنهاد شده بر اساس توقعات مالی که از پروژه استخراج معدن وجود دارد

برنامه‌ریزی تولید معدن انجام می‌شود. در واقع سرمایه‌گذاران بر اساس تئوری شکاف اطلاعاتی می‌توانند مرز ریسک خود را بر اساس NPV مورد نظر مشخص کرده و با اطمینان بالاتری در پروژه معدنی سرمایه‌گذاری کنند.

۴- چهارچوب ارائه شده در رویکرد پیشنهادی می‌تواند تحقق‌های چندگانه از مدل بلوکی عیاری کانسار را به جای مدل تک مدل بلوکی مورد استفاده قرار دهد.

۵- در روش برنامه‌ریزی تولید معدن که در این رساله پیشنهاد شد، عدم قطعیت قیمت و عیار به طور همزمان در ارزش اقتصادی بلوک و در نتیجه در برنامه‌ریزی تولید لحاظ می‌شوند. بسیاری از مطالعات انجام شده در گذشته تنها عدم قطعیت یکی از این دو پارامتر مهم را در نظر گرفته‌اند. این در حالی است که تغییر هر کدام از پارامترهای عیار یا قیمت می‌تواند تغییرات زیادی در مقدار ارزش بلوک ایجاد کند، لذا در نظر نگرفتن همزمان عدم قطعیت آن‌ها منجر به ایجاد نتایج غیر قابل اطمینان خواهد شد.

۶- با توجه به این‌که به دلیل وجود همیشگی عدم قطعیت در پارامترهای ورودی ارائه برنامه‌ریزی بهینه پایدار وجود ندارد، لذا واقعیت‌گرایی و کارآمدی رویکرد پیشنهادی این رساله نسبت به روش‌های بهینه‌سازی که در گذشته برای استخراج معدن انجام می‌شده بالاتر بوده و اعتبار طرح‌های ارائه شده نیز به همان نسبت بالاتر خواهد بود. در این حالت دید منفی که نسبت به طرح‌های مهندسی و علمی در محیط صنعت وجود دارد (که ریشه اصلی آن عدم توجه کافی به عدم قطعیت‌های موجود بوده است) می‌تواند به مرور خنثی شده و موجب جذب فعالان بخش صنعت به طرح‌های علمی و مهندسی شود.

۷- رویکرد ارائه شده در این رساله نسبت به روش‌هایی که تغییرات قیمت در زمان آینده را تنها بر اساس احتمالات موجود بر پایه تاریخچه قیمت در نظر می‌گیرند (مانند روش‌های مونت کارلو و اختیارات حقیقی)، شعاع عدم قطعیت قیمت را نیز بررسی کرده و تلاش می‌کند شعاع مذکور را تا حداکثر مقدار مجاز در برنامه‌ریزی تولید معدن لحاظ کند.

۸- رویکرد پیشنهادی به اطلاعات اضافی نظیر تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی نیازی ندارد. برخلاف روش برنامه‌ریزی تصادفی، در روش پیشنهادی متغیرهای خروجی به سناریوهای احتمالی ورودی وابستگی کمی دارند.

۹- در رویکرد پیشنهادی رساله ارزش خالص فعلی مورد نظر به عنوان یک پارامتر ورودی در نظر گرفته می‌شود. در روش‌های گذشته ارزش خالص فعلی با ارائه برنامه‌ریزی تولید بهینه معدن مشخص می‌شد. لازم به ذکر است در روش‌های قطعی به دلیل عدم در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای ورودی از جمله قیمت و عیار، مقدار ارزش خالص فعلی به دست آمده نیز با عدم قطعیت جدی همراه است.

۱۰- با توجه به این‌که مفاهیمی مانند ارزش و سود پروژه برای معدن‌دار و برنامه‌ریزان معدنی ملموس‌تر از مفاهیمی مانند مرز عدم قطعیت قیمت و عیار است، رویکرد پیشنهادی بر مبنای IGDT، یک روش ساده و قابل فهم برای معدن‌داران و برنامه‌ریزان است. در رویکرد پیشنهادی تعیین پارامترهای غیر قطعی به صورت از پیش تعریف شده نیاز نبوده و هدف تضمین ارزش و سودآوری پروژه به اندازه مورد نظر است.

۱۱- رویکرد ارائه شده یک روش کاربردی با پیچیدگی کم که فهم و استفاده از آن آسان بوده و در مقایسه با بسیاری از روش‌های غیرقطعی برنامه‌ریزی تولید، به اطلاعات اولیه کمتر (از جمله توابع توزیع احتمال و توابع عضویت فازی) نیاز دارد.

۵-۳- پیشنهادات

پیشنهاداتی بر اساس مطالعات انجام شده و تجربه به دست آمده از رویکرد جدید ارائه شده در این رساله به شرح زیر قابل ارائه می‌باشند:

۱- عدم قطعیت در پارامترهای فنی معدن‌کاری مانند پایداری شیب و ظرفیت استخراج در برنامه‌ریزی تولید بررسی شوند.

- ۲- پارامترهای دیگر از جمله تقاضای بازار، هزینه‌های عملیاتی، نرخ تنزیل و... نیز بر اساس رویکرد ارائه شده بررسی شوند.
- ۳- عدم قطعیت در پارامترهای اقتصادی شامل هزینه عملیاتی و سرمایه‌گذاری به دلیل حساسیت کمتر برنامه‌ریزی تولید به آن‌ها در این مطالعه بررسی نشده‌اند. بدیهی است با حل مساله عدم قطعیت عیار و قیمت بررسی این عدم قطعیت‌ها نیز در بهبود هر چه بیشتر برنامه‌ریزی‌ها تاثیرگذار خواهد بود.
- ۴- با توجه به عدم قطعیت قیمت و تاثیرگذاری زیاد آن در برنامه‌ریزی تولید معدن، موضوع پیش‌بینی قیمت موضوعی بسیار با ارزش و قابل مطالعه در کارهای آینده خواهد بود.
- ۵- با توجه به موارد ذکر شده در این رساله ارزش روش‌های دقیق و کم هزینه برای کاهش عدم قطعیت در کیفیت و کمیت ذخیره معادن بیش از پیش مشخص شده و پیشنهاد می‌شود در این زمینه مطالعات گسترده‌ای صورت گیرد.
- ۶- در این مطالعه یک رویکرد ریسک‌گریز برای برنامه‌ریزی تولید معدن ارائه شد. به عنوان کارهای آتی می‌توان مدل‌سازی انجام شده در این رساله را با یک استراتژی مبتنی بر ریسک‌پذیری نیز انجام داد که در این صورت می‌توان از تغییرات مطلوب پارامترهای تصادفی بیشترین بهره را به دست آورد و به این ترتیب سودهای بیشتر برای پروژه معدنی قابل انتظار خواهد بود.
- ۷- پیشنهاد می‌شود اعتبار رویکرد پیشنهادی در معادن دیگر نیز بررسی شود

منابع فارسی

- بیلینتون ر و آلن ر، (۱۳۷۹) "قابلیت اطمینان سیستم‌های مهندسی" مترجم رضائیان م، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران.
- حسنی پاک ع ا و خالصی م ر (۱۳۸۲) "مدیریت خطا و ریسک در اکتشاف" چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.
- خرم ا (۱۳۹۲) "مدل سازی رفتار دینامیک بلندمدت بازار برق با در نظر گرفتن عدم قطعیت های تاثیرگذار" رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- ربیعی ع، هوشمند ا و نیکخواه س (۱۳۹۵) "استفاده از تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی برای حل مسئله پخش بهینه توان مقید به پایداری ولتاژ در حضور مزارع بادی" مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۴۶(۴)، ۱۰۹-۱۲۲.
- عطائی م و حسینی س ع (۱۳۹۰) "طراحی محدوده و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز" انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، تهران.
- فانی پاکدل م، بصیری م، صیادی ا و قدوسی ح (۱۳۹۱) "ارزشیابی پروژه های آماده سازی معدنی از دیدگاه نظریه ی اختیارات حقیقی" نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، ۱۵-۳۰.

منابع لاتین

- Abdel Sabour, S., & Dimitrakopoulos, R. (2011). Incorporating geological and market uncertainties and operational flexibility into open pit mine design. *Journal of Mining Science*, 47(2), 191-201.
- Abdel Sabour, S., Dimitrakopoulos, R., & Kumral, M. (2008). Mine design selection under uncertainty. *Mining Technology*, 117(2), 53-64. doi:10.1179/174328608x343065
- Akbari, A., Osanloo, M., & Shirazi, M. (2008). Determination of ultimate pit limits in open mines using real option approach. *IUST Int. J. Eng. Sci*, 23-38.
- Alonso-Ayuso, A., Carvallo, F., Escudero, L., Guignard, M., Pi, J., Puranmalka, R., & Weintraub, A. (2014). Medium range optimization of copper extraction planning under uncertainty in future copper prices. *European Journal of Operational Research*, 233(3), 711-726.
- Alvarez, F., Amaya, J., Griewank, A., & Strogies, N. (2010). A continuous framework for open pit mine planning. *Mathematical Methods of Operations Research*, 73(1), 29-54. doi:10.1007/s00186-010-0332-3
- Aminul Haque, M., Topal, E., & Lilford, E. (2016). Estimation of Mining Project Values Through Real Option Valuation Using a Combination of Hedging Strategy and a Mean Reversion Commodity Price. *Natural Resources Research*, 1-13. doi:10.1007/s11053-016-9294-3

- Asad, M., & Dimitrakopoulos, R. (2013). Implementing a parametric maximum flow algorithm for optimal open pit mine design under uncertain supply and demand. *Journal of the Operational Research Society*, 185-197.
- 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.
- Azadeh, ., A., Moghaddam, M., Khakzad, M., & Ebrahimipour, V. (2012). A flexible neural network-fuzzy mathematical programming algorithm for improvement of oil price estimation and forecasting. *Computers & Industrial Engineering*, 62(2), 421-430. doi:10.1016/j.cie.2011.06.019
- Azimi, Y., Osanloo, M., & Esfahanipour, A. (2013). An uncertainty based multi-criteria ranking system for open pit mining cut-off grade strategy selection. *Resources Policy*, 38(2), 212-223.
- Baek, J., Choi, Y., & Park, H.-s. (2016). Uncertainty Representation Method for Open Pit Optimization Results Due to Variation in Mineral Prices. *Minerals*, 6-17.
- Ben-Haim, Y. (1999). Design certification with information gap uncertainty. *Structural Safety*, 21, 269-289. Retrieved October 4, 2017, from https://en.wikipedia.org/wiki/Info-gap_decision_theory
- Ben-Haim, Y. (2005). Value at risk with info-gap uncertainty. *Journal of risk Finance*, 388-403.
- Ben-Haim, Y. (2006). Info-gap decision theory: decision undersevere uncertainty. 2nd edition, London, England, Academic press.
- Benndorf, J., & Dimitrakopoulos, R. (2013). Stochastic Long-Term Production Scheduling of Iron Ore Deposits Integrating Joint Multi-Element Geological Uncertainty. *Journal of Mining Science*, 49(1), 68-81.
- Bley, A., Boland, N., Fricke, C., & Froyland, G. (2010). A strengthened formulation and cutting planes for the open pit mine production scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 37(9), 1641-1647. doi:10.1016/j.cor.2009.12.008
- Boland, N., Dumitrescu, I., Froyland, G., & Gleixner, A. (2009). LP-based disaggregation approaches to solving the open pit mining production scheduling problem with block processing selectivity. *Computers & Operations Research*, 36(4), 1064-1089. doi:10.1016/j.cor.2007.12.006
- Boland, N., Dumitrescu, I., & Froylandz, G. (2008). A Multistage Stochastic Programming Approach to Open Pit Mine Production Scheduling with Uncertain Geology. Available online: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2008/10/2123.html, (accessed on 22 June 2016).
- Caccetta, L., & Hill, S. (2003). An Application of Branch and Cut to Open Pit mine scheduling. *Journal of Global Optimization*, 27, 349-365.
- Chatterjee, S., Sethi, M., & Asad, M. (2016). Production phase and ultimate pit limit design under commodity price uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 248(2), 658-667. doi:10.1016/j.ejor.2015.07.012

- Chicoisne, R., Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., & Rubio, E. (2012). A New Algorithm for the Open-Pit Mine production scheduling problem. *Journal of Operations Research*, 60(3), 517-528. doi:10.1287/opre.1120.1050
- Choudhury, S., & Chatterjee, S. (2014). Pit optimisation and life of mine scheduling for a tenement in the Central African Copperbelt. *Int. J. of Mining, Reclamation and Environment*, 28(3), 200-213. doi:10.1080/17480930.2013.811802
- Consuegra, F., & Dimitracopoulos, R. (2010). Algorithmic approach to pushback design based on stochastic programming: method, application and comparisons. *Mining Technology*, 119(2), 88-101.
- Costalima, G., & Suslick, S. (2006). Estimating the volatility of mining projects considering price and operating cost uncertainties. *Resources Policy*, 86-94.
- Cox, J. C., Ross, S. A., & Rubinstein, M. (1979). Option pricing: a simplified approach. *Journal of Financial Economics*, 7, 229-263.
- Cullenbine, C., Wood, R., & Newman, A. (2011). A sliding time window heuristic for open pit mine block sequencing. *Optimization Letters*, 5(3), 365-377. doi:10.1007/s11590-011-0306-2
- Dehghani, H., & Ataee-pour, M. (2012). Determination of the effect of operating cost uncertainty on mining project evaluation. *Resources Policy*, 109–117.
- Dehghani, H., Ataee-pour, M., & Esfahanipour, A. (2014). Evaluation of the mining projects under economic uncertainties using multidimensional binomial tree. *Resources Policy*, 124-133.
- Deustech, C. V., & Journel, A. G. (1992). GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. *New York, Oxford University Press*.
- Dimitrakopoulos, R., & Abdel Sabour, S. (2007). Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options can the real options make a difference. *Resources Policy*, 116-125.
- Dimitrakopoulos, R. (2011). Stochastic optimization for strategic mine planning: A decade of developments. *Journal of Mining Science*, 47(2), 138–150.
- Dimitrakopoulos, R., & Ramazan, S. (2004). Uncertainty-based production scheduling in open pit mining. *transactions Society for Mining Metallurgy and Exploration*, 106-112.
- Dimitrakopoulos, R., Farrelly, C., & Godoy, M. (2002). Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design. *Trans. Instn Min. Metall*, 82-88.
- Dimitrakopoulos, R., Martinez, L., & Ramazan, S. (2007). A maximum upside minimum downside approach to the traditional optimization of open pit mine design. *Journal of Mining Science*, 43(1), 73-82.
- Elkington, T., & Durham, R. (2011). Integrated open pit pushback selection and production capacity optimization. *Journal of Mining Science*, 47(2), 177-190.
- Epstein, R., Goic, M., Weintraub, A., Catalán, J., Santibáñez, P., Urrutia, R., . . . Caro, F. (2012). Optimizing Long-Term Production Plans in Underground and Open-Pit Copper Mines. *Operations Research*, 60(1), 4-17. doi:10.1287/opre.1110.1003

- Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., Muñoz, G., & Queyranne, M. (2013). Open pit mine scheduling under uncertainty, A robust approach. *Proceedings of APCOM 2013*, 433–444.
- Evatt, G., Soltan, M., & Johnson, P. (2012). Mineral reserves under price uncertainty. *Resources Policy*, 37(3), 340-345. doi:10.1016/j.resourpol.2012.03.004
- Gholamnejad, J., & Moosavi, E. (2012). A new mathematical programming model for long-term production scheduling considering geological uncertainty. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 12(1), 77-81.
- Godoy, M., & Dimitrakopoulos, R. (2004). Managing risk and waste mining in long-term production scheduling of open-pit mines. *transactions*, 43-50.
- Godoy, M., & Dimitrakopoulos, R. (2011). A risk quantification framework for strategic mine planning: Method and application. *Journal of Mining Science*, 47(2), 235-246.
- Golamnejad, J., Osanloo, M., & Karimi, B. (2006). A chance-constrained programming approach for open pit long-term production scheduling in stochastic environments. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall*, 105–114.
- Gold Price. (2017, March 01). *Gold Price*. Retrieved from Gold Price: [www.http://goldprice.org/spot-gold.html](http://goldprice.org/spot-gold.html)
- Goodfellow, R., & Dimitrakopoulos, R. (2012). Algorithmic integration of geological uncertainty in pushback designs for complex multiprocess open pit mines. *Mining Technology*, 1-12.
- Groeneveld, B., & Topal, E. (2011). Flexible open-pit mine design under uncertainty. *Journal of Mining Science*, 47(2), 212-226.
- Gu, X. w., Wang, Q., & Ge, S. (2010). Dynamic phase-mining optimization in open-pit metal mines. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(10), 1974-1980. doi:10.1016/s1003-6326(09)60404-0
- Guj, P. (2016). A practical methodology to optimise marginal mineral deposits using switching real options. *Ore Geology Reviews*, 336-345. doi:10.1016/j.oregeorev.2016.04.016
- Hayes, K. R., Barry, S. C., Hosack, G. R., Peters, G. W., & Freckleton, R. (2013). Severe uncertainty and info-gap decision theory. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(7), 601-611. doi:10.1111/2041-210x.12046
- He, K., Lu, X., Zou, Y., & Keung Lai, K. (2015). Forecasting metal prices with a curvelet based multiscale methodology. *Resources Policy*, 45, 144-150. doi:10.1016/j.resourpol.2015.03.011
- Hochbaum, D. (2003). Efficient algorithms for the inverse spanning tree problem. *Operations Research*, 51(5), 785–797.
- Issler, J. V., Rodrigues, C., & Burjack, R. (2014). Using common features to understand the behavior of metal-commodity prices and forecast them at different horizons. *Journal of International Money and Finance*, 42, 310-335. doi:10.1016/j.jimonfin.2013.08.017
- Jelvez, E., Morales, N., Nancel-Penard, P., Peypouquet, J., & Reyes, P. (2016). Aggregation heuristic for the open-pit block scheduling problem. *European*

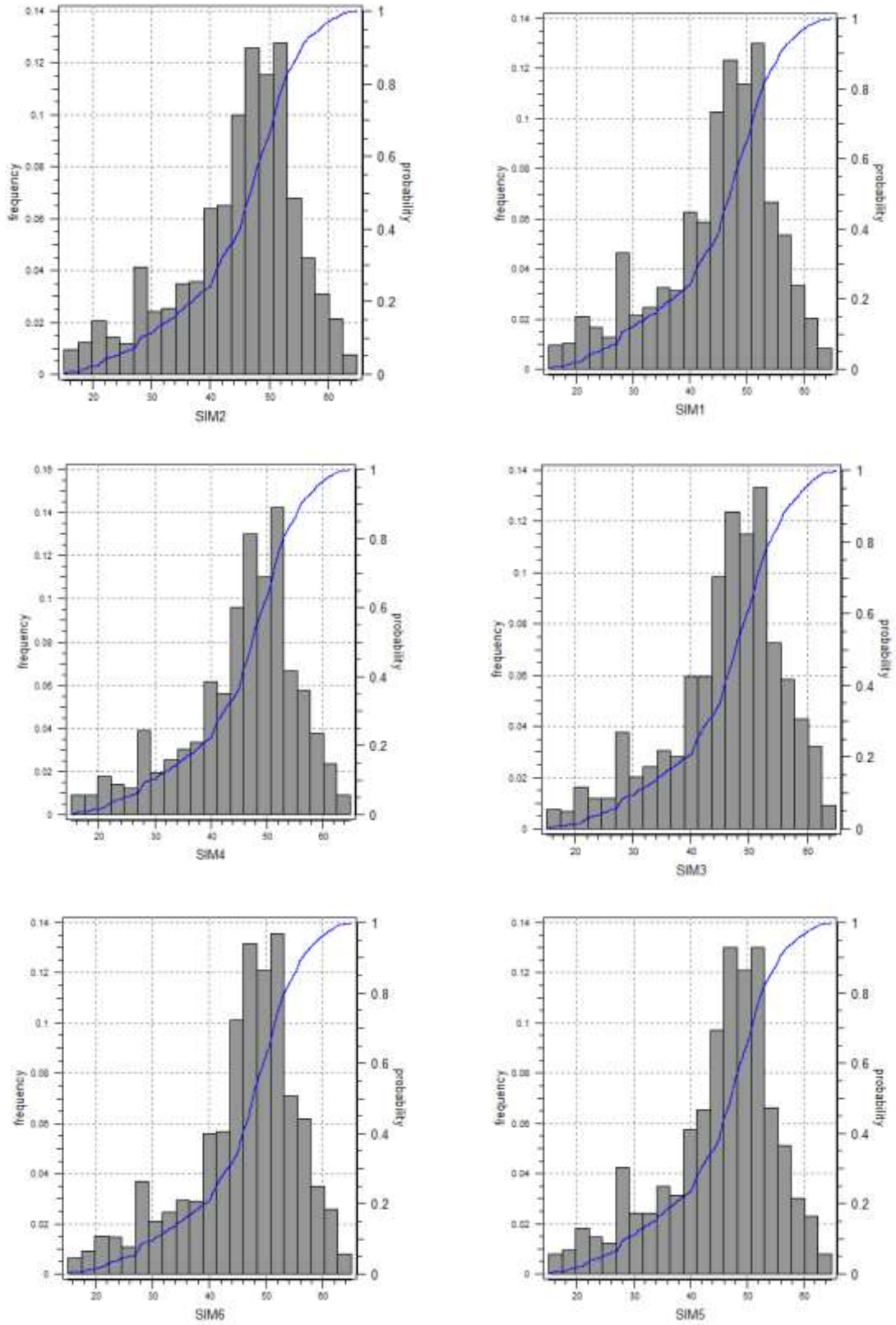
Journal of Operational Research, 249(3), 1169-1177.
doi:10.1016/j.ejor.2015.10.044

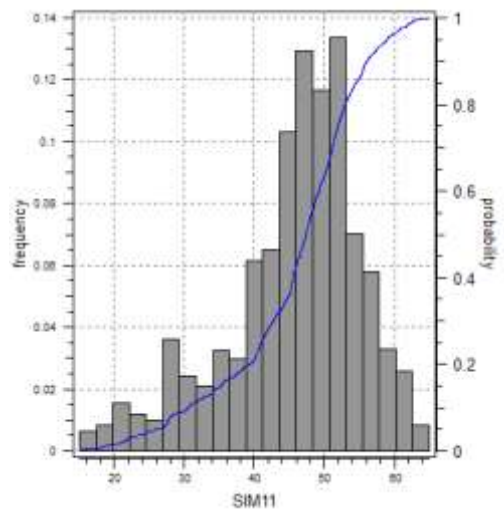
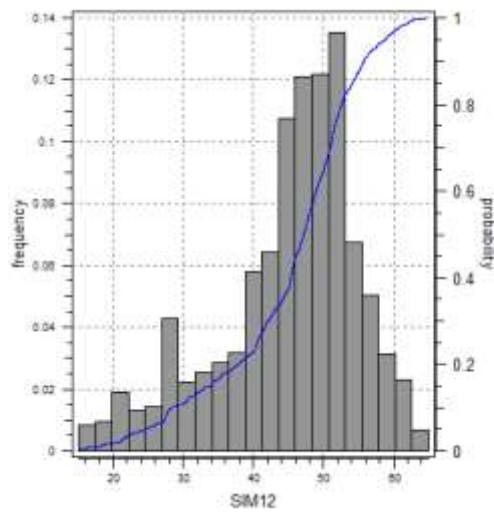
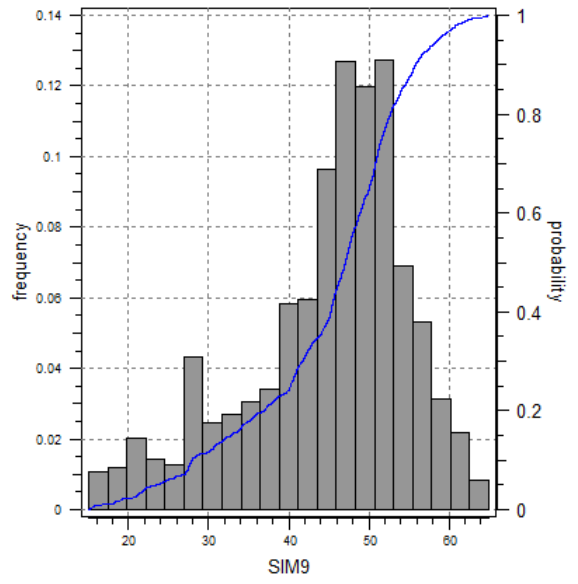
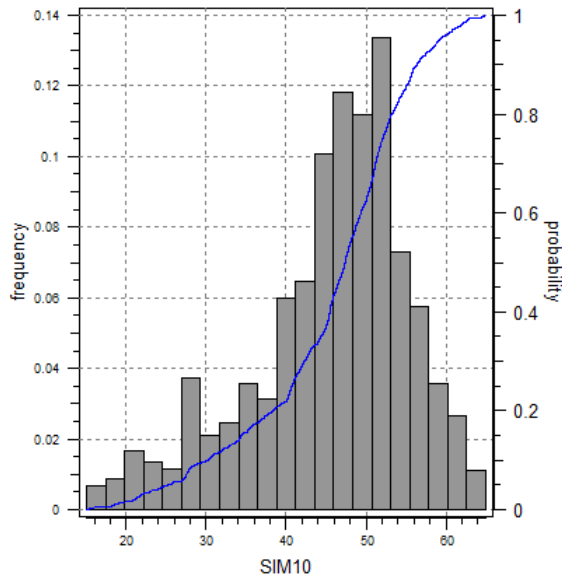
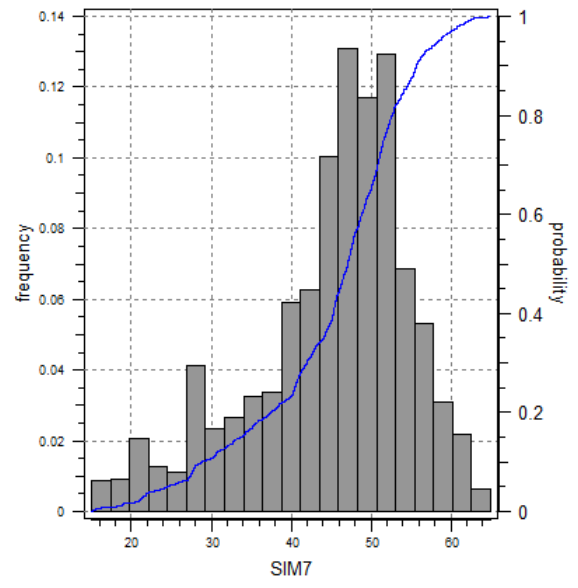
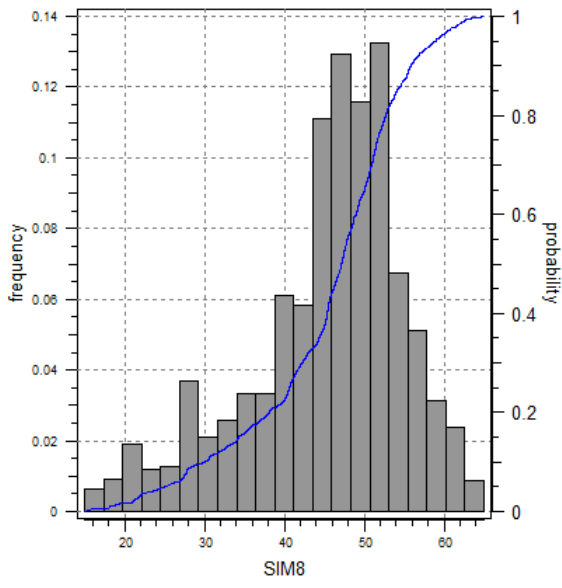
- Kazemi, M., Mohammadi-Ivatloo, B., & Ehsan, M. (2014). Risk-based bidding of large electric utilities using Information Gap Decision Theory considering demand response. *Electric Power Systems Research*, 114, 86-92. doi:10.1016/j.epsr.2014.04.016
- Khan, A., & Niemann-Delius, C. (2014). Production Scheduling of Open Pit Mines Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Advances in Operations Research*, 1-9. doi:10.1155/2014/208502
- Khojasteh, M., & Jadid, S. (2015). Decision-making framework for supplying electricity from distributed generation-owning retailers to price-sensitive customers. *Utilities Policy*, 37, 1-12. doi:10.1016/j.jup.2015.03.002
- Korteling, B., Dessai, S., & Kapelan, Z. (2012). Using Information-Gap Decision Theory for Water Resources Planning Under Severe Uncertainty. *Water Resources Management*, 27(4), 1149-1172. doi:10.1007/s11269-012-0164-4
- Kriechbaumer, T., Angus, A., Parsons, D., & Rivas Casado, M. (2014). An improved wavelet-ARIMA approach for forecasting metal prices. *Resources Policy*, 39, 32-41. doi:10.1016/j.resourpol.2013.10.005
- Kumral, M. (2010). Robust stochastic mine production scheduling. *Engineering Optimization*, 42(6), 567-579. doi:10.1080/03052150903353336
- Kumral, M. (2013). Multi-period mine planning with multi-process routes. *Int. J. of Mining Science and Technology*, 23(3), 317-321. doi:10.1016/j.ijmst.2013.05.001
- Kumral, M., & Dowd, P. (2004). A simulated annealing approach to mine production scheduling. *Journal of the Operational Research Society*, 56(8), 922-930. doi:10.1057/palgrave.jors.2601902
- Lamghari, A., & Dimitrakopoulos, R. (2012). A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 222(3), 642-652.
- Lamghari, A., Dimitrakopoulos, R., & Ferland, J. (2013). A variable neighbourhood descent algorithm for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty. *Journal of the Operational Research Society*, 1-10.
- Leite, A., & Dimitrakopoulos, R. (2014). Stochastic optimization of mine production scheduling with uncertain ore/metal/waste supply. *Int. J. of Mining Science and Technology*, 24(6), 755-762. doi:10.1016/j.ijmst.2014.10.004
- Li, S., & Knights, P. (2009). Integration of real options into short-term mine planning and production scheduling. *Mining Science and Technology*, 19(1), 674-678.
- Liu, S. Q., & Kozan, E. (2016). New graph-based algorithms to efficiently solve large scale open pit mining optimisation problems. *Expert Systems with Applications*, 43, 59-65. doi:10.1016/j.eswa.2015.08.044
- Matrosova, E. S., Woods, A. M., & Harou, J. J. (2013). Robust Decision Making and Info-Gap Decision Theory for water resource system planning. *Journal of Hydrology*, 494, 43-58. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.03.006

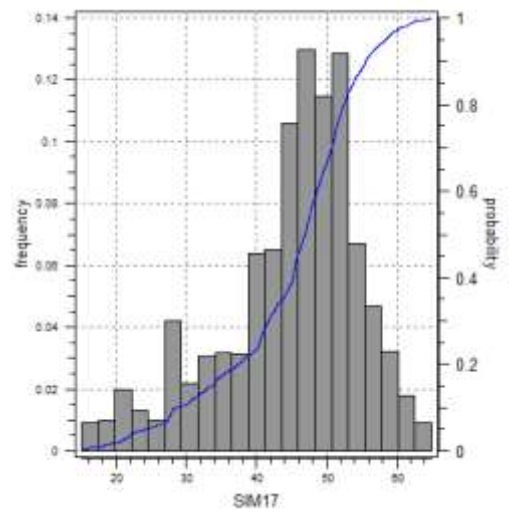
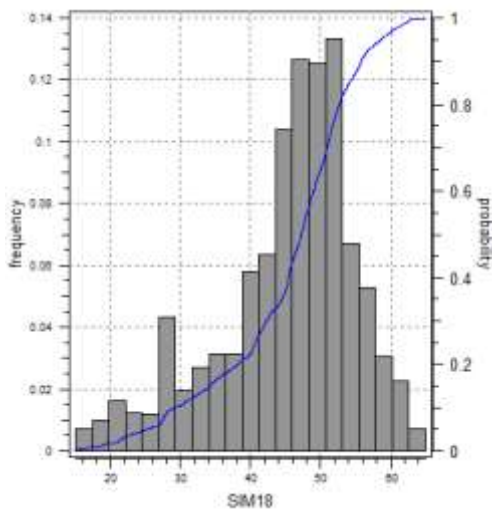
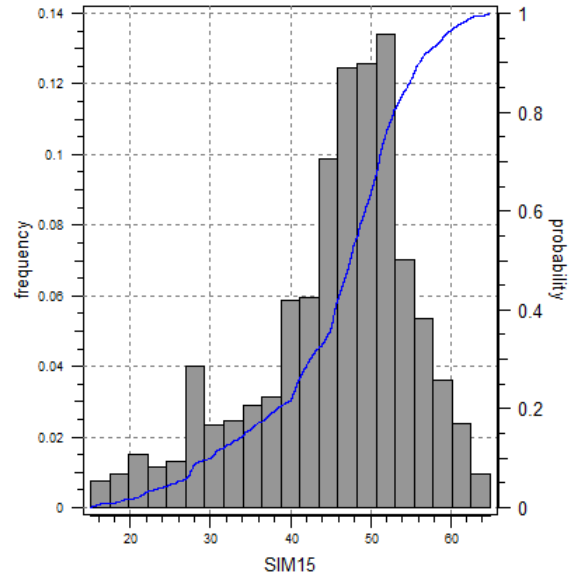
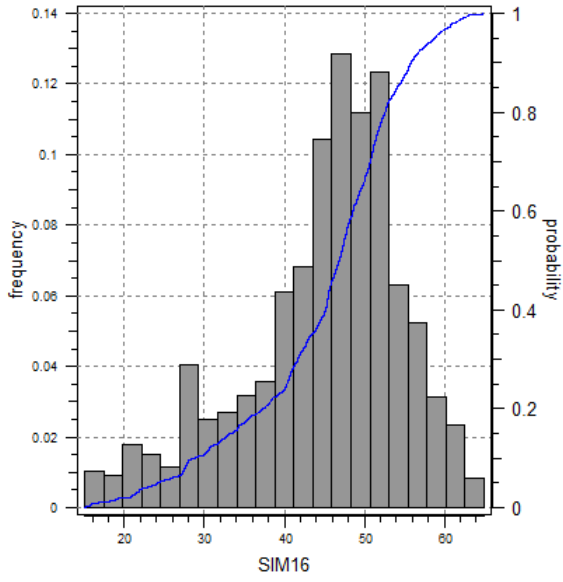
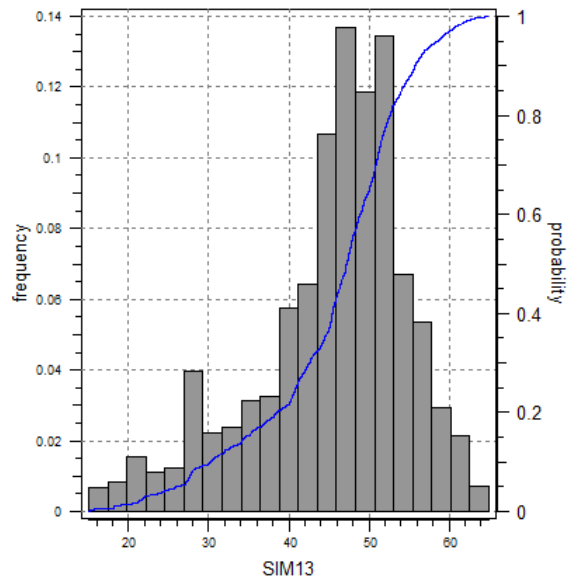
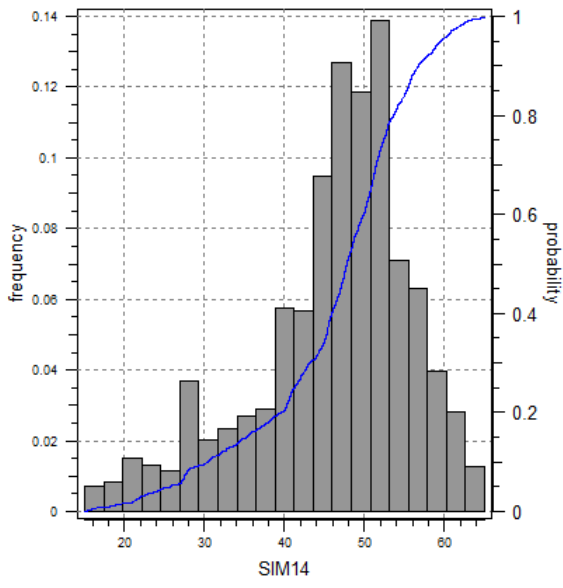
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455-465. doi:10.1016/j.amc.2009.03.037
- Mazidi, M., Monsef, H., & Siano, P. (2016). Design of a risk-averse decision making tool for smart distribution network operators under severe uncertainties: An IGDT-inspired augment ϵ -constraint based multi-objective approach. *Energy*, 214-235.
- Menabde, M., & Froyland, G. (2004). Mining schedule optimisation for conditionally simulated orebodies. *proceeding of the international symposium on ore body modelling and strategic mine planing*, 347-352.
- Minnecker, C., Benndorf, J., & Lohstrater, O.-M. (2014). Optimizing of Long-Term Mine Planning in Large Lignite Deposits. *Mine Planning and Equipment Selection*, 113-124.
- Mokhtarian, M., & Sattarvand, j. (2016). Commodity price uncertainty propagation in open-pit mine production planning by Latin hypercube sampling method. *Journal of Mining & Environment*, 7(2), 215-227.
- Monjezi, M., Rajabalizadeh Kashani, M., & Ataei, M. (2013). A comparative study between sequential Gaussian simulation and kriging method grade modeling in open-pit mining. *Arab J Geosci*, 6, 123–128. doi:10.1007/s12517-011-0293-8
- Montiel, L., & Dimitrakopoulos, R. (2013). Stochastic Mine Production Scheduling with Multiple Processes Application at Escondida Norte, Chile. *Journal of Mining Science*, 49(9), 583–597.
- Mundi commodity price index. (2017, September 01). *indexmundi*. Retrieved from Index mundi: <http://www.indexmundi.com/commodities>
- Nanjari, E., & Golosinski, T. (2013). Optimising open pit mine scheduling taking into consideration time value of money and mining restrictions. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 27(3), 156-165. doi:10.1080/09658416.2012.655166
- Nojavan, S., Ghesmati, H., & Zare, K. (2016). Robust optimal offering strategy of large consumer using IGDT considering demand response programs. *Electric Power Systems Research*, 130, 46-58. doi:10.1016/j.epsr.2015.08.017
- Nojavan, S., Zare, K., & Feyzi, M. R. (2013). Optimal bidding strategy of generation station in power market using information gap decision theory (IGDT). *Electric Power Systems Research*, 96, 56-63. doi:10.1016/j.epsr.2012.10.006
- Olea, A. O. (2006). A six-step practical approach to semivariogram modeling. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 20, 307–318. doi:10.1007/s00477-005-0026-1
- Osanloo, M., Gholamnejad, J., & Karimi, B. (2008). Long-term open pit mine production planning: a review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 22(1), 3-35. doi:10.1080/17480930601118947
- Peng, X., Wanga, K., & Li, Q. (2014). A new power mapping method based on ordinary kriging and determination of optimal detector location strategy. *Annals of Nuclear Energy*, 68, 118–123.

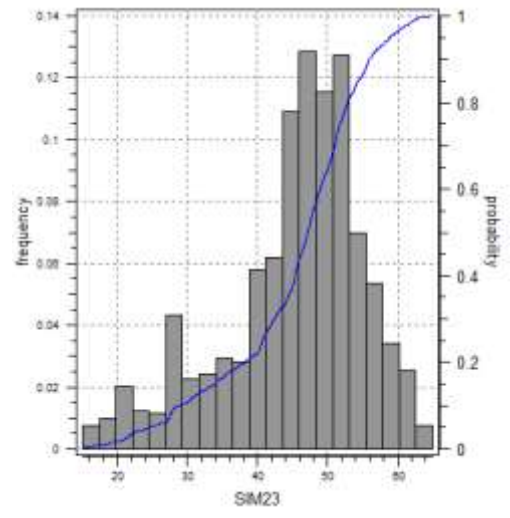
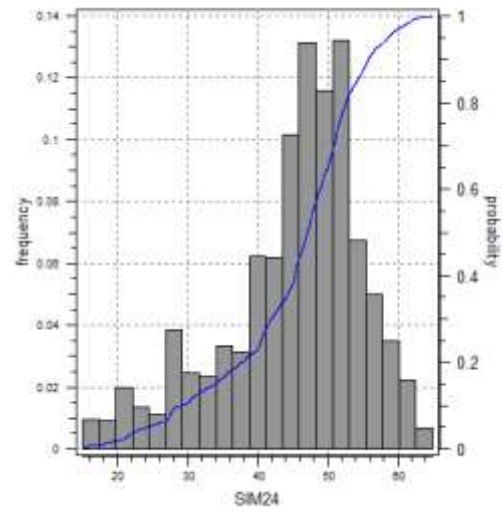
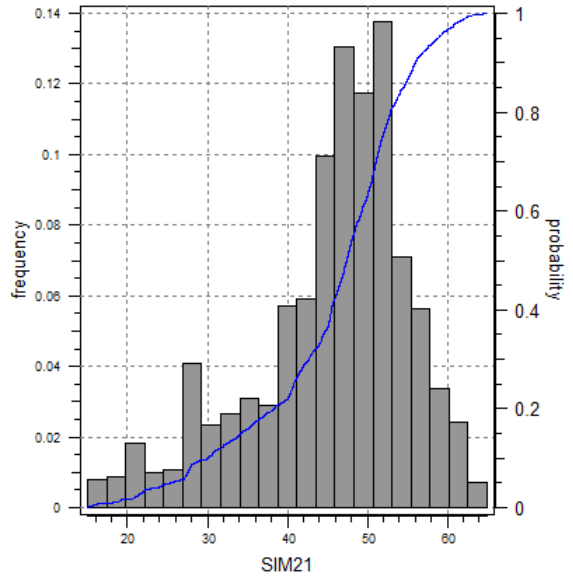
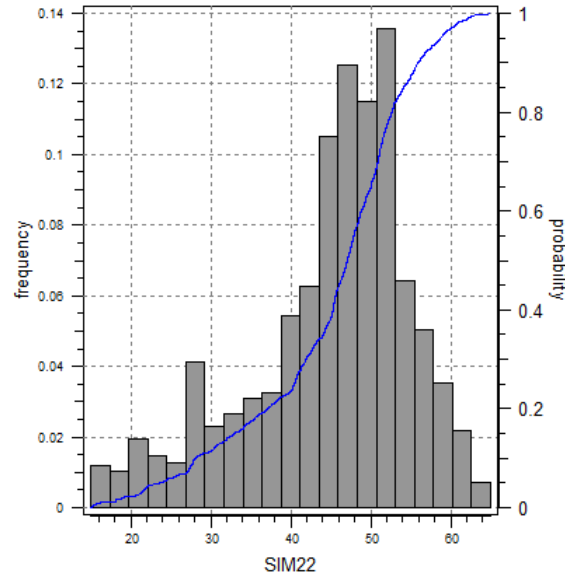
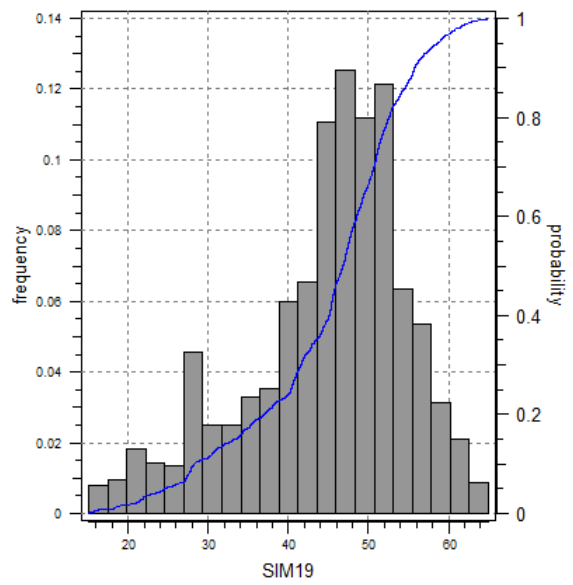
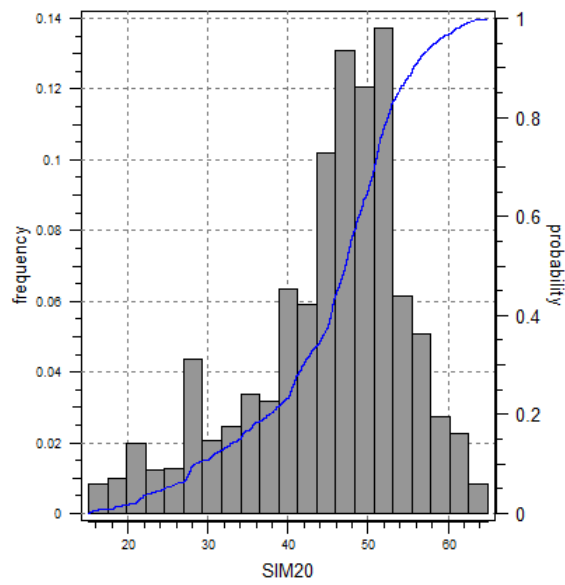
- Pierdzioch, C., Rülke, J. C., & Stadtmann, G. (2013). Forecasting metal prices: Do forecasters herd? *Journal of Banking & Finance*, 37(1), 150-158. doi:10.1016/j.jbankfin.2012.08.016
- Rabiee, A., Soroudi, A., & Keane, A. (2015). Information gap decision theory based OPF with HVDC connected wind farms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(6), 3396-3406.
- Ramazan, S. (2007). The new Fundamental Tree Algorithm for production scheduling of open pit mines. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 1153-1166. doi:10.1016/j.ejor.2005.12.035
- Ramazan, S., & Dimitrakopoulos, R. (2013). Production scheduling with uncertain supply: a new solution to the open pit mining problem. *Optimization and Engineering*, 14(2), 361-380. doi:10.1007/s11081-012-9186-2
- Remy, N., Boucher, A., & Wu, J. (2009). Applied Geostatistics with SGeMS, A User's Guide. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom*, 264 pp.
- Rezaee, H., Asghari, O., & Yamamoto, J. (2011). On the reduction of the ordinary kriging smoothing effect. *Journal of Mining & Environment*, 2(2), 102-117.
- Rocha, M. M., & Yamamoto, J. K. (2000). Comparison Between Kriging Variance and Interpolation Variance as Uncertainty Measurements in the Capanema Iron Mine, State of Minas Gerais—Brazil. *Natural Resources Research*, 9(3), 223-235.
- Samavati, M., Essam, D., Nehring, M., & Sarker, R. (2016). A local branching heuristic for the open pit mine production scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 1-11. doi:10.1016/j.ejor.2016.07.004
- Sniedovich, M. (2007). The Art and Science of Modeling Decision-Making under severe uncertainty. *Decision Making in Manufacturing and Services*, 1(1), 111-136.
- Souza, M., Coelho, I., Ribas, S., Santos, H., & Merschmann, L. (2010). A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. *European Journal of Operational Research*, 207(2), 1041-1051. doi:10.1016/j.ejor.2010.05.031
- Whittle, J. (1988). Beyond optimization in open pit design. *Proceedings of the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industries Industries, Quebec: Canada (Balkema, Rotterdam)*, 331-337.
- Zare, K., Moghaddam, M. P., & Sheikh El Eslami, M. K. (2010). Demand bidding construction for a large consumer through a hybrid IGDT-probability methodology. *Energy*, 35(7), 2999-3007. doi:10.1016/j.energy.2010.03.036

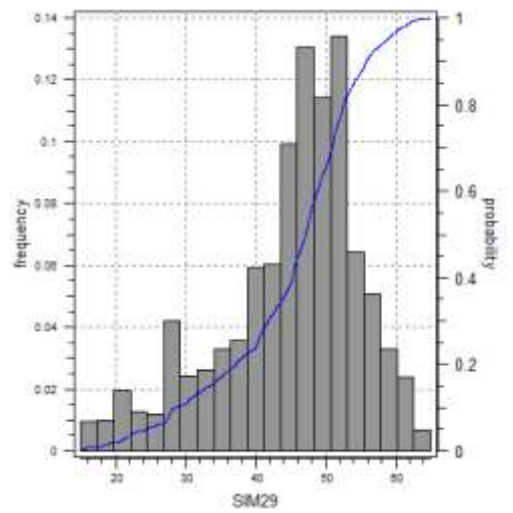
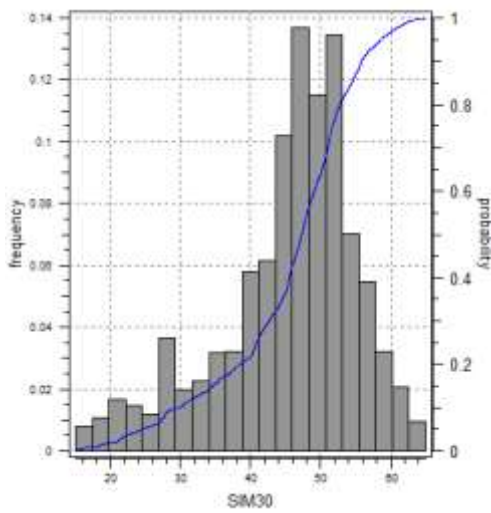
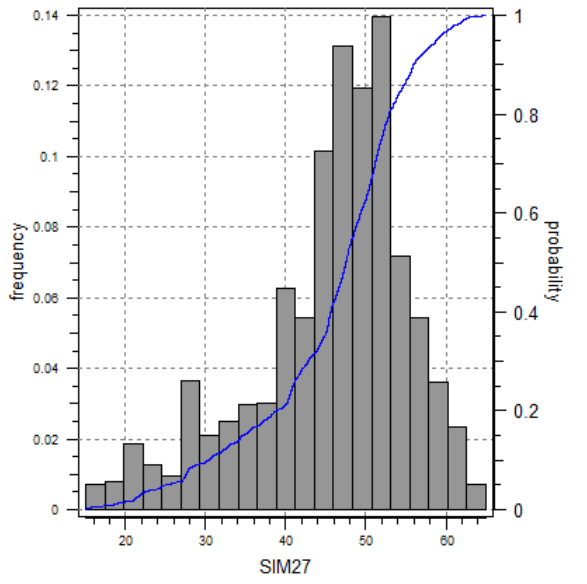
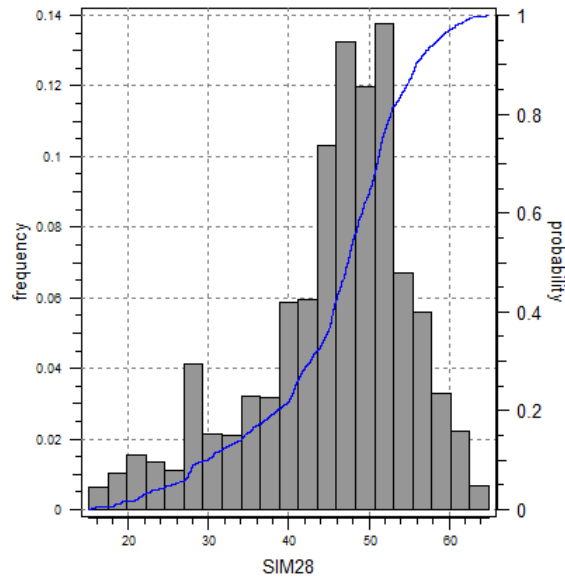
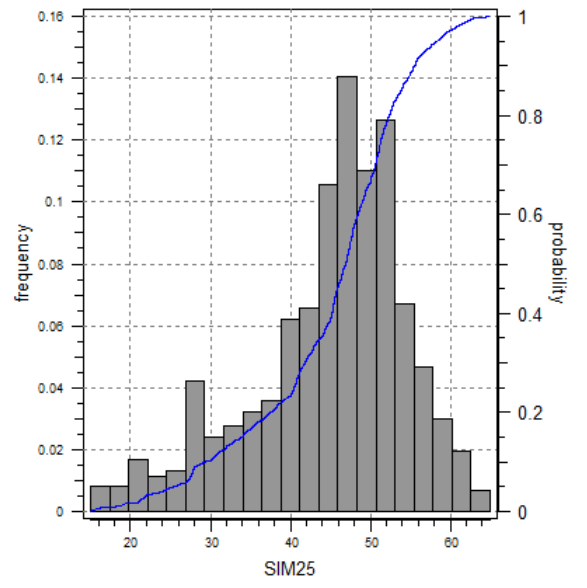
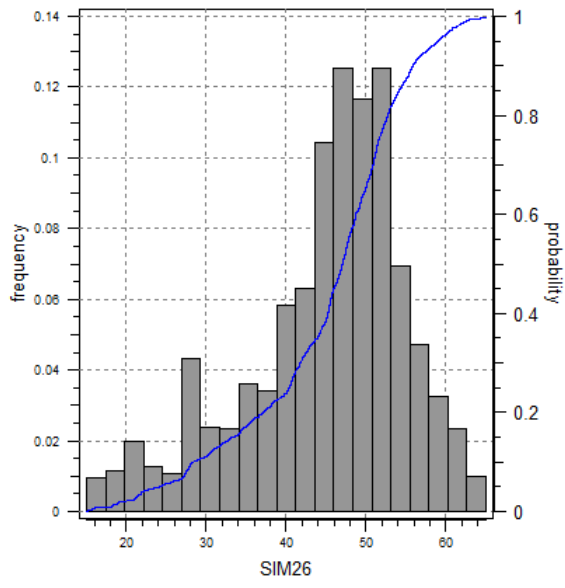
پیوست: نمودار توزیع فراوانی عیار در تحقق‌های حاصل از شبیه‌سازی زمین‌آماري

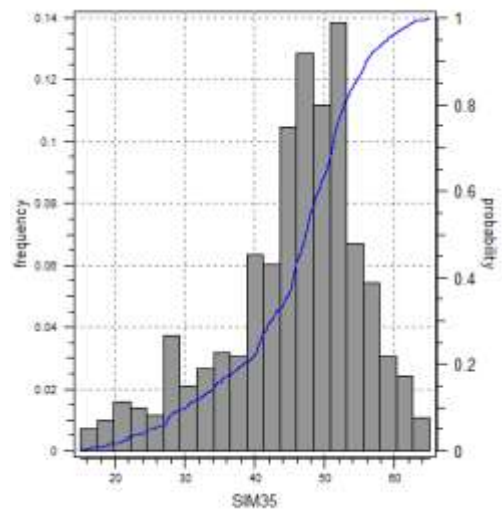
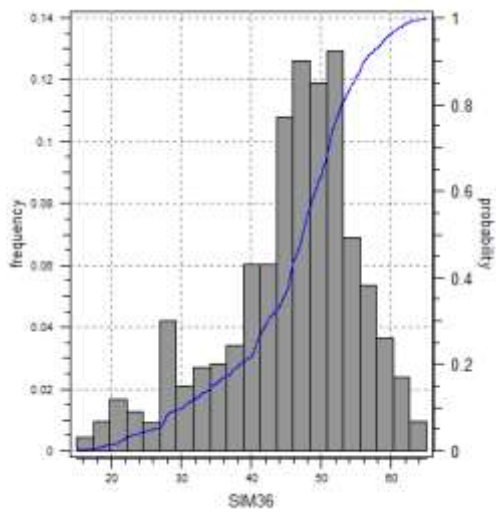
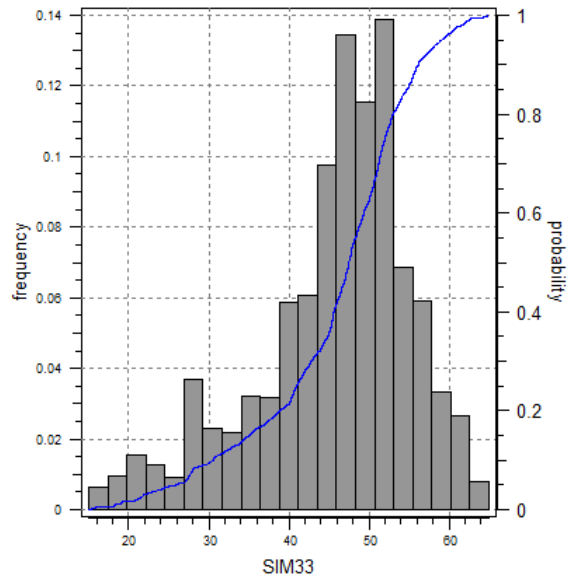
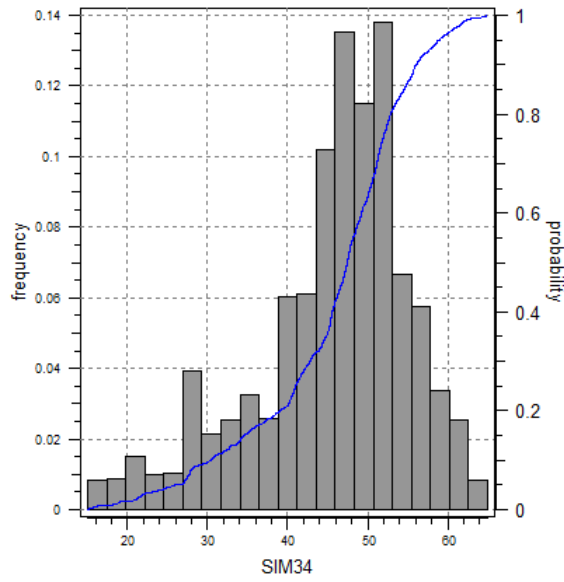
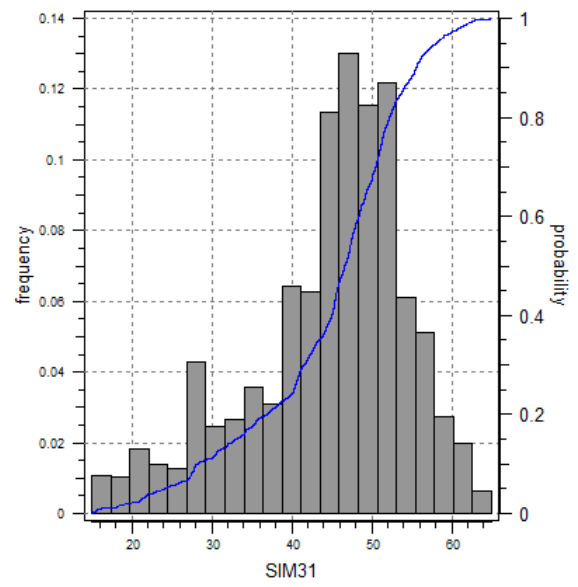
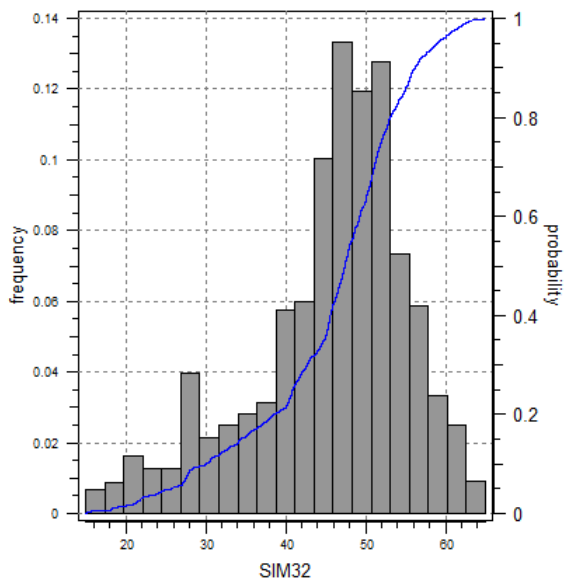


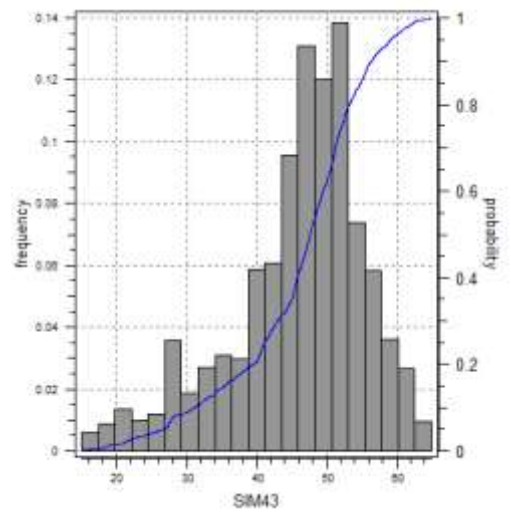
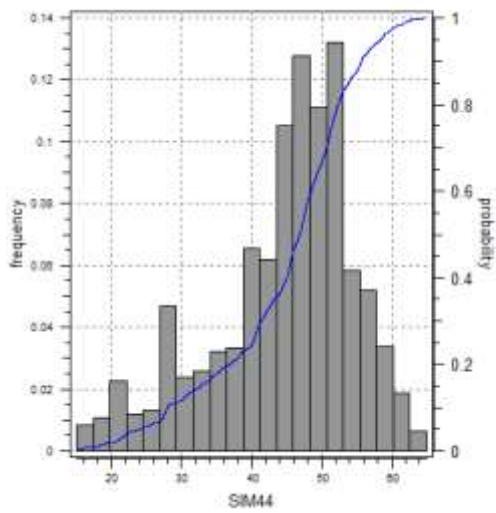
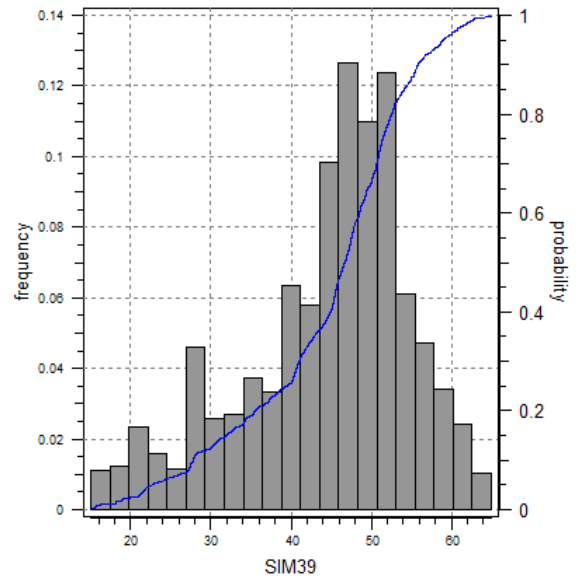
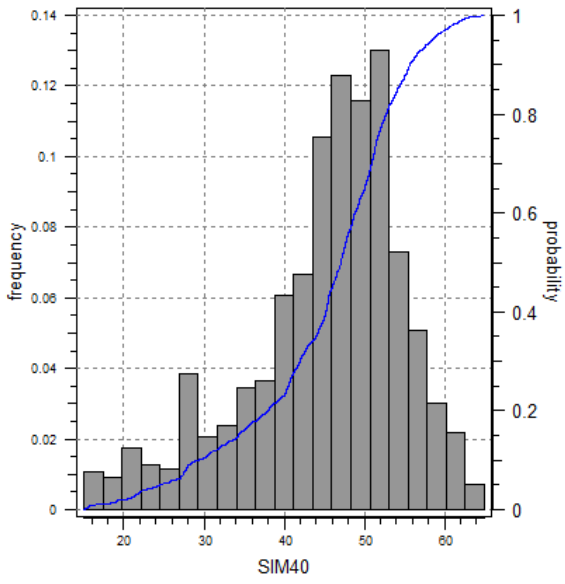
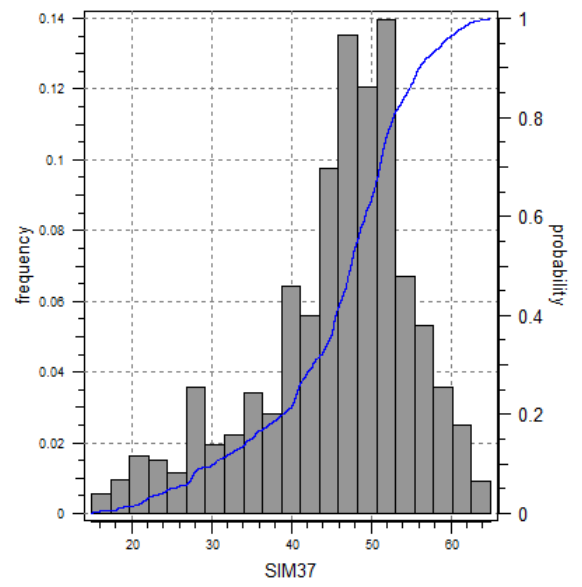
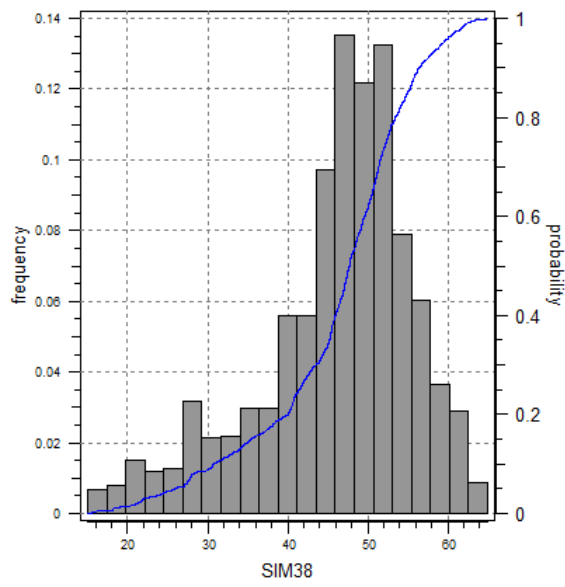












Abstract

Production planning is one of the most important subjects in mining operation, which will not only be a means for investors to understand the expected liquidity of the project, but also strategic decisions from open pit mine production planning may have important influence in the project lifetime. The deterministic methods for mine production planning, assume all the input parameters (such as ore grade and price) constantly. However, the lack of attention to the existing uncertainty will lead to undesirable results in achieving the correct and optimal program. In this thesis, a new approach to the planning of mining production under conditions of ore grade and price uncertainty is proposed based on the information gap-based decision-making theory. The prediction of prices and estimates for ore grade in mining projects, has always been and will be uncertain. To provide more precise price prediction and estimates, a large amount of information is needed, which requires a lot of time and cost to provide this volume of information and it is not possible in most mining projects. The information gap decision theory based on the information gap emphasizes that decisions under strict conditions of uncertainty should not require additional information about the information available to the decision maker. In fact, this method helps planners to make good decisions with low data. In the approach presented in this thesis, an uncertainty radius is defined based on the theory for each of the uncertain parameters (ore grade the price). To minimize the technical and economic requirements of the project, the maximum radius of the uncertainties is identified. And on that basis, production planning is carried out. With the use of the information of an open ore mine, the results of using the proposed approach were examined and validated. To simulate the price uncertainty, utilizing the bimonthly tree method and to simulate the uncertainty of the grade, utilizing the simulation model was proposed. Planning performed with the proposed approach was protected against the uncertainty of the ore grade and price. The difference between the actual NPV value and the NPV obtained from the proposed approach was about 8%, and the difference between the actual NPV and the NPV obtained by the deterministic method was about 31%. This suggests that in an unfavorable economic situation and lower prices, the proposed approach would produce closer results to reality, and planning would be more reliable in uncertainty conditions. The results show that the proposed approach can produce acceptable results with higher degrees of certainty and stability than deterministic methods.

Keywords: Open-pit mine planning, Price uncertainty, Ore grade uncertainty, Information gap decision theory.



*Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
Master of Science in mining Exploitation Engineering*

Open pit mines planning under price and grade uncertainty

M.M. Tahernejad

Supervisors:

Dr R. Khalou kakaie

Dr M. Ataei

February 2018