





دانشکده معدن، نفت، ژئوفیزیک

گروه استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی ریک طراحی معادن روباز توسط شبیه سازی زمین آماری، مطالعه موردی: معدن سنگ آهن درودی

دانشجو

حمید کریمی

استاد راهنما

دکتر فرهاد سرشکی

دکتر رضا خالوکا کانی

استاد مشاور

دکتر محمد کشتو

مهندس علیرضا شوالی

بهمن ۹۰

تقدیم به

پدر، مادر، برادر و خواهر عزیزتر از جانم که در تمام مراحل زندگییم دعاهایشان بدرقه‌ی
راهم بوده است.

تشکر و قدردانی

حال که توفیق ختم این پایان نامه را یافتم، خدا را سپاسگزارم که در تمام مراحل زندگی همواره استعانت از او چراغ راه و گرمابخش دل من بوده و امید است در آینده نیز چنین باشد.

از اساتید راهنمای ارجمندم آقایان دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر رضا خالوکاکائی نهایت سپاس و تشکر را دارم. همچنین از زحمات مشاوران خود جناب دکتر محمد کنشلو و مهندس علیرضا شیوایی تشکر و قدردانی می کنم.

به درستی که اگر انصاف رعایت شود، باید از جناب آقای دکتر Marcelo Godoy رئیس و مالک شرکت Golder Associates شیلی و جناب آقای دکتر Xavier Emery استاد دانشگاه شیلی به سبب تمامی کمک ها، راهنمایی ها و تشویق هایشان تشکر و سپاسگزاری کنم. از خدا برای آنها آرزوی سلامتی و موفقیت هرچه تمام تر را دارم. همچنین از آقایان دکتر Manu Schnetzler مشاور نرم افزار WinGslib، دکتر علی حسینی مهندس شرکت کاوشگران و مهندس جمالی اسفهلان مهندس شرکت اکتشاف امکا به سپاس راهنمایی های ارزنده و تأثیر گذارشان کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از جناب آقای مهندس حسن دزیانی و سرکار خانم مهندس مریم صحافزاده مهندسین شرکت مهندسین مشاور کاوشگران نیز بابت همکاری و زحمات بی دریغشان در پیش برد این تحقیق، تشکر و قدردانی می نمایم.

همچنین از مهندس علی اصغر لطفی آزاد، کمال الدین سقر و مسلم امید باد که واقعاً در مراحل مختلف اجرایی و تألیف این تحقیق با ایده ها و نظرات کارشناسانه ی خودشان یار و کمک حال بنده بودند کمال تشکر و سپاس را دارم و از خداوند منان موفقیت در تمام مراحل زندگی را برای آنها آرزو مندم.

اساتید و دوستان گران قدر بسیار زیادی مرا در انجام این تحقیق یاری رسان بودند که شاید به عدد
نتوان تمامی آنها را در این مختصر گنجانید. با این حال دست تک تک آنها را به گرمی می‌فشارم و از
خداوند برای آنان آرزوی توفیق روزافزون دارم.

تعهد نامه

اینجانب حمید کر دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی ریسک طراحی معادن روباز توسط شبیه سازی زمین آماری ، مطالعه موردی : معدن سنگ آهن دردوی تحت راهنمایی آقایان دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر رضا خالوکاکائی متعهد می شوم .

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

با توجه به روند رو به کاهش ذخایر معدنی پر عیار سطحی به نظر می‌رسد که راه‌کار پیش روی صنعت معدن‌کاری روی آوردن به روش‌های استخراج زیرزمینی و پی‌جویی و اکتشاف منابع و ذخایر کشف نشده باشد، ولی راه‌کار دیگر را می‌توان در مدیریت و بهره‌برداری بهینه از پتانسیل‌های موجود و در حال استخراج جستجو نمود. گرچه در عمل پیچیده به نظر می‌رسد ولی به عنوان مثال فرآیند ارزیابی ذخایر معدنی می‌تواند به صورت ترکیب راهبرد مدیریتی با یک درک حیاتی و برآورد عدم قطعیت و ریسک حاصل از منابع فنی، مالی و محیطی در نظر گرفته شود. یک منبع بحرانی ریسک فنی در تناژ و عیار ماده معدنی مورد انتظار است. توانایی در مدل‌سازی و اعمال این ریسک در برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی اهمیت زیادی دارد و رویکرد آگاهانه‌تری را برای ارزیابی یا مدیریت یک طرح یا دارایی فراهم می‌سازد. در سال‌های اخیر، شگردهای فنی امکان مدل‌سازی مستقیم ریسک فنی و زمین‌شناسی را فراهم نموده‌اند. در این مطالعه با هدف بررسی حساسیت ریسک طراحی معادن روباز به تغییرات ذاتی عیار ماده معدنی، کانسار سنگ آهن دردوی (یکی از کانسارهای سنگان) با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی شرطی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور ساخت مدل زمین‌شناسی کانسار، بررسی زمین‌آماري و تخمین و شبیه‌سازی، بهینه‌سازی مدل‌های تخمینی و شبیه‌سازی شده به ترتیب با نرم‌افزارهای DATAMINE، WinGslib و NPV Scheduler صورت گرفته است. نتایج به دست آمده نشان از کمتر بودن نتایج مدل تخمینی نسبت به مقادیر مورد انتظار تحقق‌های شبیه‌سازی شده در مقادیر کل سنگ محتوای فازهای افزایشی، فلز قابل بازیابی، ارزش خالص و ارزش خالص فعلی به ترتیب به میزان ۶۱/۸۹، ۱۱/۱۹، ۲/۸۳ و ۶۰/۵۷ درصد دارد. اما مقدار ماده معدنی مدل تخمینی نسبت به مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها به میزان تقریبی ۵/۴ درصد بیش تخمینی داشته است. ارزش خالص فعلی کلی پیت‌های نهایی برای مدل تخمینی ۲۳۲ میلیون دلار و مقدار مورد انتظار تحقق‌ها نیز ۳۸۳ میلیون دلار بوده است. میانگین عیار

سنگ آهن برای مدل تخمینی نسبت به ارزش مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها به میزان ۱۴/۰۵ درصد کاهش داشته است که نشان از هموارسازی مفرط مدل تخمینی دارد. بررسی همزمان گسترش محدوده‌های نهایی نیز نواحی بالقوه‌ی ریسک حداکثر نسبت به عدم قطعیت عیار را در دیواره‌های معدن به ویژه در دیواره‌ی جنوب شرقی پیت نشان داده‌اند. شبیه‌سازی‌ها در عمق نیز گستردگی قابل توجه‌ای نشان داده‌اند که بیشتر به کمبود اطلاعات برمی‌گردد و می‌تواند اهداف اضافه حفاری باشد. هزینه‌ی تولید بر فلز قابل بازیابی نیز با وجود بیش تخمینی واضح مدل تخمینی در فازهای اولیه و میانی، در محدوده‌ی نهایی نشان از کم تخمینی ۲/۳۷ درصدی مدل تخمینی (۵۱/۷۶ دلار بر تن) نسبت به مقدار مورد انتظار (۵۳/۲۲ دلار بر تن) تحقق‌های شبیه‌سازی شده داشته است.

کلمات کلیدی: عدم قطعیت عیار - تحلیل ریسک - شبیه‌سازی شرطی - شبیه‌سازی گاوسی پی

در پی - معادن روباز - سنگ آهن - معدن دردوی

فهرست مطالب

عنوان شماره صفحه

فصل اول.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- بیان مسأله.....	۲
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۳
۴-۱- اهداف تحقیق.....	۵
۵-۱- معرفی معدن سنگ آهن دردوی.....	۵
۱-۵-۱- خصوصیات کانی‌شناسی ذخیره.....	۶
۲-۵-۱- منطقه دردوی.....	۶
۳-۵-۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی معدن دردوی.....	۶
۶-۱- ساختار پایان نامه.....	۸
فصل دوم.....	۱۰
۱-۲- مقدمه.....	۱۱
۲-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت درباره‌ی متغیر پاسخ.....	۱۲
۳-۲- مفاهیم زمین‌آماري.....	۱۳
۱-۳-۲- مدل واریوگرام.....	۱۳
۲-۳-۲- اهمیت واریوگرام در زمین‌آمار.....	۱۴

۱۵.....	۳-۳-۲- ساختارهای تو در تو.....
۱۶.....	۴-۳-۲- نیاز به یک مدل واریوگرام سه بعدی.....
۱۷.....	۵-۳-۲- اعتبار سنجی.....
۱۹.....	۶-۳-۲- محدودیت‌های اعتبارسنجی.....
۲۰.....	۷-۳-۲- مفهوم و اهداف شبیه‌سازی.....
۲۱.....	۸-۳-۲- تفاوت کریجینگ و شبیه‌سازی.....
۲۲.....	۹-۳-۲- روش‌های مختلف شبیه‌سازی زمین‌آماري.....
۲۳.....	۱۰-۳-۲- شبیه‌سازی‌های شرطی و غیر شرطی.....
۲۳.....	۱۱-۳-۲- شرطی سازی و شبیه‌سازی شرطی به روش مقادیر باقیمانده.....
۲۴.....	۱۲-۳-۲- شبیه‌سازی‌های شرطی پی در پی.....
۲۶.....	۱۳-۳-۲- شبیه‌سازی گاوسی پی در پی.....
۲۷.....	۴-۲- نرم‌افزار WinGslib.....
۲۸.....	۵-۲- نرم‌افزار DataMine.....
۳۰.....	۶-۲- نرم‌افزار زمان‌بندی و برنامه‌ریزی تولید NPV Scheduler.....
۳۱.....	۷-۲- مفاهیم کلی بهینه‌سازی پیت.....
۳۲.....	۱-۷-۲- پیت نهایی.....
۳۲.....	۲-۷-۲- مراحل LG و تجزیه و تحلیل حساسیت.....
۳۳.....	۳-۷-۲- روش تنزیل بالا به پایین.....
۳۳.....	۴-۷-۲- استفاده از شکل پیت حاضر.....

۳۳	۸-۲- نتیجه‌گیری
۳۹	فصل سوم
۴۰	۱-۳- مقدمه
۴۰	۲-۳- بررسی سابقه‌ی علمی موضوع
۴۲	۳-۳- نکات عملی تخمین کریجینگ و اعتبارسنجی
۴۳	۱-۳-۳- انتخاب پارامتر فاصله
۴۵	۲-۳-۳- مدل‌سازی ناهمسانگردی
۴۷	۳-۳-۳- مدل‌سازی ناهمسانگردی با استفاده از روش مؤلفه‌های اصلی
۴۹	۴-۳-۳- زوایای چرخش
۵۰	۵-۳-۳- روابط قرار دادی برای زوایای چرخش در GSLIB
۵۳	۶-۳-۳- راه‌کار شعاع جستجو
۵۴	۷-۳-۳- حداکثر و حداقل تعداد داده‌ها برای تخمین
۵۵	۸-۳-۳- ریز بلوک‌سازی
۵۵	۹-۳-۳- نمودار پراکندگی
۵۶	۱۰-۳-۳- رگرسیون خطی
۵۷	۴-۳- نتیجه‌گیری
۵۹	فصل چهارم
۶۰	۱-۴- مقدمه
۶۰	۲-۴- مدل‌سازی کانسار دردوی با استفاده از نرم‌افزار DataMine

۶۴	۳-۴- ارزیابی و تخمین ذخیره
۶۵	۱-۳-۴- داده‌های اولیه
۶۶	۲-۳-۴- تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی
۶۹	۴-۴- تجزیه و تحلیل فضایی
۷۰	۱-۴-۴- محاسبه‌ی واریوگرام تجربی
۷۱	۲-۴-۴- تعیین راستای اصلی ناپیوستگی
۷۶	۳-۴-۴- محاسبه‌ی واریوگرام‌های جهتی
۷۶	۴-۴-۴- برازش مدل واریوگرام
۷۸	۵-۴- بررسی اعتبار و تخمین کریجینگ
۸۰	۱-۵-۴- بررسی اعتبار
۸۴	۲-۵-۴- تخمین به روش کریجینگ
۸۶	۶-۴- شبیه‌سازی
۸۷	۱-۶-۴- شبیه‌سازی گاوسی پی‌درپی
۸۸	۲-۶-۴- نمودارهای Q-Q و بررسی بازسازی هیستوگرام داده‌های اولیه
۹۰	۳-۶-۴- محاسبه و رسم واریوگرام تحقق‌های شبیه‌سازی شده
۹۳	۴-۶-۴- فرآیندهای پس از شبیه‌سازی
۹۴	۷-۴- نتیجه‌گیری
۹۶	فصل پنجم
۹۷	۱-۵- مقدمه

۹۷.....	۲-۵- کار با نرم افزار بهینه سازی NPV Scheduler
۹۹.....	۳-۵- پارامترهای مورد استفاده در فرآیند بهینه سازی
۱۰۰.....	۴-۵- فرق فاز با سکانس و پیت نهایی با پیت بهینه
۱۰۱.....	۵-۵- انتخاب پیت نهایی بهینه
۱۰۴.....	۶-۵- بررسی عدم قطعیت برای یک شکل پیت نهایی معین
۱۱۳.....	۷-۵- شناسایی توان حداکثر و حداقل ریسک شکل پیت نهایی
۱۲۴.....	۸-۵- تعیین عدم قطعیت در تناژ و عیار خوراک آسیا
۱۲۶.....	۹-۵- تعیین کمیت عدم قطعیت هزینه ی تولید
۱۲۷.....	۱۰-۵- نتیجه گیری
۱۲۹.....	فصل ششم
۱۳۰.....	۱-۶- نتایج
۱۳۲.....	۲-۶- پیشنهادات
۱۳۶.....	منابع فارسی
۱۳۶.....	منابع لاتین

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل	شماره صفحه
شکل (۱-۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (بدون مقیاس).....	۷
شکل (۱-۲) نمایش شماتیک چهارچوب کاری پیشنهاد شده.....	۱۳
شکل (۲-۲) تفاوت کریجینگ و شبیه‌سازی با وجود حدود اطمینان	۲۲
شکل (۳-۲) شبیه‌سازی عیارهای طلا در یک کانسار: (a) کانسار و داده‌ها؛ (b) یک موقعیت (نقطه) برای شبیه‌سازی؛ (c) lcpd تخمین زده شده در موقعیت (b)؛ (d) بیرون کشیدن تصادفی از lcpd؛ (e) افزودن مقدار شبیه‌سازی شده به داده‌ها؛ و (f) تکرار مراحل قبلی در یک موقعیت جدید.	۲۵
شکل (۱-۳) تصویر یک فاصله‌ی گام در دو راستا، (الف) راستای افقی h، نوسان فاصله‌ی افقی، نوسان زاویه‌ی افقی، (الف) عرض باند، نوسان زاویه‌ی قائم و عرض باند قائم	۴۵
شکل (۲-۳) تصویر دو بعدی از سه مرحله‌ی چرخش زوایا	۵۱
شکل (۳-۳) نمودار پراکندگی مقادیر U در مقابل مقادیر V	۵۶
شکل (۱-۴) روند کلی مدل‌سازی، تخمین و شبیه‌سازی سه بعدی تا مرحله‌ی بهینه‌سازی	۶۱
شکل (۲-۴) مدل زمین‌شناسی ایجاد شده در نرم‌افزار DataMine برای کانسار دردوی	۶۳
شکل (۳-۴) مقطع مربوط به بخش گسسته‌ی پیکره‌ی ماده معدنی	۶۳
شکل (۴-۴) اختلاف امتداد راستاهای دو قسمت مجزای پیکره‌ی ماده معدنی در یک نمای سه بعدی از کل استرینگ‌های ایجاد شده برای تشکیل پیکره‌ی ماده معدنی (دید از قسمت پائین پیکره‌ی ماده معدنی)	۶۴
شکل (۵-۴) نمای کلی از روند بررسی ها و فرآیندهای زمین‌آماري	۶۵
شکل (۶-۴) روند نمای کلی تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی	۶۶
شکل (۷-۴) آماره‌های داده‌های اولیه (الف) نمودار هیستوگرام و (ب) نمودار احتمال داده‌های اولیه.....	۶۷

- شکل (۸-۴) هیستوگرام و نمودار احتمال داده‌های نرمال شده (الف) هیستوگرام (ب) نمودار احتمال ۶۸
- شکل (۹-۴) نقشه‌ی موقعیت داده‌های اکتشافی ۶۹
- شکل (۱۰-۴) روند نمای کلی تجزیه و تحلیل فضایی ۷۰
- شکل (۱۱-۴) نمودار واریوگرام تجربی تمام جهتی و مشخصات مدل برازش شده بر آن ۷۱
- شکل (۱۲-۴) واریوگرام‌های جهتی در راستاهای مختلف و نحوه‌ی تشکیل دیاگرام رز دامنه و واریانس واریوگرام‌ها تجربی ۷۲
- شکل (۱۳-۴) دیاگرام رز واریوگرام‌ها در جهات مختلف، (الف) دیاگرام رز دامنه، و (ب) دیاگرام رز واریانس ۷۳
- شکل (۱۴-۴) کنتور سطوح واریوگرام‌های تجربی محاسبه شده با نرم‌افزار DataMine برای کانسار دردوی ۷۴
- شکل (۱۵-۴) نقشه واریوگرام در سه صفحه XY، XZ و YZ ۷۵
- شکل (۱۶-۴) نقشه‌ی واریوگرام بعد از تخمین با واریوگرام تمام جهتی در سه صفحه XY، XZ و YZ ۷۷
- شکل (۱۷-۴) دو مدل واریوگرام برازش شده بر واریوگرام‌های جهتی و نحوه استنباط مدل نهایی از آنها (خط‌های افقی معرف واریانس ساختارها می‌باشند). ۷۸
- شکل (۱۸-۴) شمای کلی از روند اعتبارسنجی و تخمین کریجینگ. ۸۰
- شکل (۱۹-۴) مقادیر واریوگرام تجربی و مدل برازش شده بر آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار DataMine ۸۱
- شکل (۲۰-۴) نمای کلی از روند اجرایی فرآیند روش مؤلفه‌های اصلی. ۸۲
- شکل (۲۱-۴) نمودار پراکندگی عیارهای تخمین در مقابل عیارهای واقعی برای مدل‌های واریوگرام: (الف) تمام جهتی با بیضوی جستجوی حاصل از روش مؤلفه‌های اصلی (ب) محاسبه و برازش شده با نرم‌افزار DataMine (پ) شکل (۱۷-۴-الف)، (ت) شکل (۱۷-۴-الف). ۸۴
- شکل (۲۲-۴) نمودار هیستوگرام (الف) توزیع عیار داده‌های اولیه و (ب) توزیع عیارهای تخمین زده شده ۸۶
- شکل (۲۳-۴) نقشه‌ی دوبعدی (الف) تخمین کریجینگ در افق ۱۵۰ و (ب) موقعیت داده‌های اولیه ۸۶
- شکل (۲۴-۴) روند نمای کلی از فرآیند شبیه‌سازی گاوسی پی در پی و فرآیندهای پس از آن. ۸۷

شکل (۴-۲۵) نمای دو بعدی از قطعه‌ی ۴۰ (افق ۱۵۰) در صفحه XY از شبکه‌ی سه بعدی حاصل از (الف) تخمین کریجینگ و (ب) تحقق ۹۵..... ۸۸

شکل (۴-۲۶) نمودار Q-Q، (الف) توزیع عیار داده‌های اولیه و توزیع عیارهای تخمین زده شده و (ب) توزیع عیار داده‌های اولیه و توزیع عیارهای شبیه‌سازی شده ۸۹

شکل (۴-۲۷) هیستوگرام داده‌های اولیه (الف) و ۵ تحقق شبیه‌سازی شده (ب، پ، ت، ث و ج)..... ۹۱

شکل (۴-۲۸) واریوگرام‌های تجربی و تحقق‌های شبیه‌سازی شده (الف) راستای ۴۵ درجه، (ب) راستای ۱۳۵ درجه، (پ) راستای قائم، (ت) تمام جهتی ۹۳

شکل (۵-۱) شمای کلی از روند فرآیند بهینه‌سازی با نرم‌افزار NPV Scheduler ۹۸

شکل (۵-۲) نمودار تجمی ارزش خالص فعلی و تعیین محدوده‌ی نهایی بهینه ۱۰۳

شکل (۵-۳) نمودار سود تجمعی و تشخیص پیت نهایی بهینه ۱۰۳

شکل (۵-۴) شکل پیت نهایی و شکل پیت فازهای ۲۴ و ۳۷، پیت بیرونی، درونی و مابین (وسط) به ترتیب محدوده‌ی پیت نهایی، فاز ۲۴ و فاز ۲۷ را نشان می‌دهد. ۱۰۴

شکل (۵-۵) تناژ کل ماده معدنی برای فازهای افزایشی پیت‌ها ۱۰۸

شکل (۵-۶) عیار خوراک آسیا برای فازهای افزایشی پیت‌ها ۱۰۹

شکل (۵-۷) تناژ فلز قابل بازیابی برای فازهای افزایشی پیت‌ها ۱۰۹

شکل (۵-۸) ارزش خالص تجمعی (سود) برای فازهای افزایشی پیت‌ها ۱۱۱

شکل (۵-۹) ارزش خالص فعلی تجمعی فازهای افزایشی ۱۱۲

شکل (۵-۱۰) هزینه‌های فرآوری ناشی از تغییرات عیار برای فازهای افزایشی پیت‌ها ۱۱۳

شکل (۵-۱۱) نتایج تناژ کلی سنگ محتوای فازهای افزایشی مدل تخمینی (خط ضخیم) و مدل‌های شبیه‌سازی (خطوط باریک) ۱۱۵

شکل (۵-۱۲) تناژ کلی ماده معدنی محتوای فازهای افزایشی مدل تخمینی (خط ضخیم) و مدل‌های شبیه‌سازی (خطوط باریک) ۱۱۶

- شکل (۵-۱۳) نتایج حاصل از ارزیابی تحقق‌های شبیه‌سازی شده و مدل تخمینی برای عیار خوراک آسیا ۱۱۶
- شکل (۵-۱۴) تناژ کل فلز قابل بازیابی محتوای فازهای مدل تخمینی (خط ضخیم) و مدل‌های شبیه‌سازی شده (خطوط باریک) ۱۱۹
- شکل (۵-۱۵) سود کلی فازهای افزایشی مدل تخمینی (خط ضخیم) و مدل‌های شبیه‌سازی شده (خطوط باریک) ۱۲۰
- شکل (۵-۱۶) ارزش خالص فعلی فازهای افزایشی مدل تخمینی (خط ضخیم) و مدل‌های شبیه‌سازی شده (خطوط باریک) ۱۲۱
- شکل (۵-۱۷) هیستوگرام ارزش خالص فعلی محدوده‌های نهایی ۱۲۱
- شکل (۵-۱۸) مناطق بالقوه‌ی کمترین و بیشترین ریسک، نقاط مشکلی (مدل تخمینی) و نقاط رنگی (مدل‌های شبیه‌سازی شده) ۱۲۳
- شکل (۵-۱۹) میانگین تناژ ماده معدنی در دسترس برای آسیا ۱۲۵
- شکل (۵-۲۰) تناژ میانگین ماده معدنی برای یک مدل‌های شبیه‌سازی شده و مدل تخمینی ۱۲۶
- شکل (۵-۲۱) تأثیر عدم قطعیت عیار روی هزینه‌ی تولید بر تناژ فلز بازیابی شده ۱۲۸

فهرست جدول‌ها

عنوان جدول‌ها	شماره صفحه
جدول (۱-۳) خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته در ارتباط با موضوع مورد مطالعه	۴۱
جدول (۱-۴) مشخصات واریوگرام شکل‌های شکل (۱۷-۴-الف) و شکل (۱۷-۴-ب)	۷۹
جدول (۲-۴) نتایج اعتبارسنجی بر روی مدل‌های واریوگرام کاندید	۸۳
جدول (۳-۴) نتایج بررسی واریوگرام‌های کاندید با معیارهای مثبت و منفی	۸۳
جدول (۴-۴) راستاهای قابل تعریف برای داده‌های منظم	۹۲
جدول (۱-۵) پارامترهای استفاده شده برای بهینه‌سازی پیت کانسار دردوی	۱۰۰
جدول (۲-۵) تناژ کل ماده معدنی محتوای فازهای ابتدایی، میانی و انتهایی به همراه ارزش مورد انتظار و درصد ریسک	۱۰۷
جدول (۳-۵) تناژ کل ماده معدنی محتوای فازهای ابتدایی، میانی و انتهایی به همراه ارزش مورد انتظار و درصد ریسک	۱۱۷
جدول (۴-۵) مقادیر حداقل و حداکثر تناژ فلز قابل بازیابی برای محتوای فازهای ابتدایی، میانی و نهایی به همراه مقدار مورد انتظار و درصد ریسک	۱۱۹

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

در این فصل کلیاتی از مسأله‌ی مورد بررسی و هدف از انجام مطالعه‌ی حاضر بیان خواهد شد و همچنین به ضرورت انجام چنین تحقیق‌هایی پرداخته خواهد شد. در این فصل معدن سنگ آهن دردوی که در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است به صورت مختصر معرفی خواهد شد. در انتها نیز به مرور مطالب عنوان شده و فرآیندهای انجام گرفته در فصل‌های مختلف این تحقیق پرداخته خواهد شد.

۱-۲- بیان مسأله

در طراحی معادن روباز عمدتاً ماده معدنی به صورت یک پدیده ثابت در نظر گرفته می‌شود و طراحی شکل پیت بر اساس مدل تخمین زده شده کانسار (مدل بلوکی) انجام می‌شود. در مراحل پیش امکان‌سنجی یک پروژه‌ی معدنی شکل کلی و توزیع ماده معدنی در کانسار از داده‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی به دست می‌آید. از آنجا که فاصله گمانه‌ها نسبتاً زیاد است (چگالی شبکه‌ی اکتشافی کم است) بنابراین داده‌های حاصل نمی‌تواند اطلاعات کاملی از وضعیت کانسار را ارائه نماید. به علاوه با توجه به این‌که روش‌های تخمینی که در این مرحله به کار گرفته می‌شوند محدودیت‌هایی در تفکیک ماده معدنی/باطله (غیر خطی بودن تخمین ، مسأله تغییر پایه، هموار سازی) دارند. لذا این سؤال مطرح

می‌شود که این مدل تا چه اندازه برای طراحی مفید است؟ واقعیت تا چه میزان می‌تواند با آن متفاوت باشد؟ و سرانجام این که با مبنا قرار دادن آن طراحی پیت تا چه اندازه با ریسک مواجه است؟

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

دغدغه‌ی اصلی هنگامی که با عدم قطعیت و ریسک سر و کار داریم، مخصوصاً با توجه به پیامدهای اقتصادی تصمیم‌گیری‌ها براساس مطالعات بهینه‌سازی شاید به این صورت بیان شود: "من راست تقریبی را از اشتباه دقیق می‌پسندم". این عبارت به نوعی به عدم قطعیت موجود در هر برنامه‌ریزی برای طرح‌های معدنی اشاره دارد. مدیریت و بهره‌گیری از ریسک نیازمند گسترش بیشتر روش‌های عددی استفاده شده در برنامه‌ریزی و طراحی است که می‌تواند احتمال یک تک اشتباه دقیق مورد انتظار را به حداقل برساند. در نتیجه سرمایه‌گذاری‌های راهبردی حاشیه امنیت بیشتری خواهند داشت و عملیات اجرایی به توانایی‌های بالقوه‌ی خود نزدیک‌تر خواهد شد.

نیاز به کمی‌نمودن عدم قطعیت در ارزیابی سرمایه و تصمیم‌گیری، تبدیل به نیاز برای تعیین کمیت عدم قطعیت و ریسک در هر جزء مربوط به طراحی محدوده‌ی (پیت) معادن روباز و برنامه‌ریزی بلند مدت تعبیر می‌شود. ریسک طرح‌های معدنی ممکن است، ناشی از سه عامل اصلی فنی (معدنکاری، زمین‌شناسی)، مالی و محیطی باشد. منبع اصلی ریسک فنی، عدم قطعیت در عیارها، تناژ، زمین‌شناسی و ژئومکانیکی است. برای هر عملیات طراحی پیت، عدم قطعیت عیارهای بالا، تناژ و زمین‌شناسی می‌تواند سریع‌تر از یک تک ارزش تخمینی برای هر مؤلفه‌ی مورد نظر به سهولت مدل‌سازی شده و در فرآیند طراحی و بهینه‌سازی اعمال شود. این امر قادر می‌سازد تا علاوه بر فراهم نمودن مدل دقیق و مقدار کمی عدم قطعیت و ریسک، یک شیوه‌ی متفاوت مبتنی بر ریسک و دقت فنی برای ارزیابی یک سرمایه، عملیات یا طرح ارائه شود. بدین‌سان تا زمان به حداقل رسیدن ریسک در انتخاب یک طرح پیت روباز مناسب می‌تواند این فرآیند توسعه یابد.

از آنجا که وجود ریسک فنی و زمین‌شناسی در طرح‌های معدنکاری به خوبی شناخته و احساس شده است. در سال‌های اخیر شگردهای فنی، امکان مدل‌سازی مستقیم ریسک فنی و زمین‌شناسی را فراهم نموده‌اند. در نتیجه‌ی آن چندین موضوع برجسته شده است. این مباحث شامل اعمال عدم قطعیت عیار در بهینه‌سازی پیت و ذخایر قابل بازیابی، الگوریتم‌ها و شگردهایی برای مدل‌سازی ریسک زمین‌شناسی در بهینه‌سازی پیت و برنامه‌ریزی تولید، ریسک در طرح‌های معدنی و محدوده‌های پیت نهایی، تأثیر مناطقی با ریسک بالای عیار در محدوده‌های بهینه‌ی پیت و تحلیل ریسک برای برنامه‌ریزی تولید است. با وجود این پیشرفت‌ها، یک نیاز مفرطی برای درک بیشتر محدودیت‌های اصلی رویکردهای سنتی و غیر مبتنی بر ریسک بهینه‌سازی پیت معادن روباز و تأثیرات بالقوه‌ی آنها روی تصمیم‌گیری طرح وجود دارد (DIMITRAKOPOULOS. R, FARRELLY. C, and GODOY. M, 2002).

در روش‌های رایج طراحی معادن روباز با وجود بهینه نمودن بسیاری از پارامترها، طراحی بر اساس مدل تخمینی ماده معدنی است و احتمال دارد این مدل به طور محلی با واقعیت کانسار متفاوت باشد، یعنی اینکه که به طور ناخواسته بخشی از مواد باطله به جای ماده معدنی استخراج شده و مقداری از مواد معدنی نیز بعنوان باطله در نظر گرفته شوند. رخداد این پدیده بسته به میزان آن می‌تواند حیات اقتصادی و فنی پروژه‌ی معدنی را به چالش بکشاند. بنابراین لزوم یک تحقیق علمی در راستای برآورد حساسیت طراحی از این منظر احساس می‌شود.

در سطح کشور کمتر به مسائل فوق‌الذکر پرداخته شده است، به جز در یکی دو مورد که سعی شده است به این موضوعات پرداخته شود. اما یا برخی از جنبه‌های مشکلات روش‌های سنتی در نظر گرفته نشده است (برای مثال مشکلات حاصل از میانگین‌گیری) و یا اینکه در مرحله‌ی ارزیابی و تخمین ذخیره دقت لازم بعمل نیامده است و تنها به اختلاف مدل تخمینی و شبیه‌سازی شده پرداخته شده و به جنبه‌ها و کاربردهای دیگر مدل‌های شبیه‌سازی شده کمتر توجه شده است.

۱-۴- اهداف تحقیق

مشکل کار با روش‌های ارزیابی سنتی در موارد عدم قطعیت و فرآیندهای غیر خطی است، و در مورد فرآیند ارزیابی/بهینه‌سازی، تک مقادیر تخمینی اغلب به خاطر کمبود دقت آن‌ها در توصیف یک فرآیند نامعلوم به ندرت استفاده می‌شوند. به عبارت دیگر هنگامی که تنها یک مقدار برای یک توزیع احتمالات استفاده می‌شود، می‌تواند مشکلات قابل توجهی به وجود آید. یکی از اهداف تعریف شده برای این طرح دستیابی به محدوده‌ای از حالات امکان‌پذیر هر یک از پارامترهای طراحی پیت معادن روباز است. همچنین دستیابی به میزان اطمینان روش سنتی طراحی پیت نسبت به عدم قطعیت عیار در کل طول عمر معدن می‌تواند ریسک سرمایه‌گذاری در معدن دردوی را در کل عمر معدن در اختیار قرار دهد. به ویژه در سال‌های اولیه تولید مسأله نرخ بازگشت سرمایه و میزان سرمایه‌گذاری‌های لازم در بخش‌های مختلف نقش تعیین کننده‌ای در ارزش خالص فعلی کلی طرح خواهند داشت. بنابراین آگاهی از ارزش‌های مورد انتظار واقع گرایانه‌تر می‌تواند برای دست یابی به پتانسیل حقیقی معدن کمک نماید. علاوه بر موارد بیان شده به صورت خلاصه اهداف اصلی زیر را می‌توان برای تحقیق حاضر برشمرد:

- پی بردن به اینکه طراحی انجام گرفته تا چه حد به بهینه واقعی نزدیک است.
- برآورد ماده معدنی که در طراحی انجام شده به روش سنتی از دست می‌رود.
- بررسی تأثیر اشکال طراحی شده‌ی ماده معدنی بر روی پارامترهای اصلی ارزیابی اقتصادی.

۱-۵- معرفی معدن سنگ آهن دردوی

مطالعه‌ی موردی تحقیق حاضر روی معدن سنگ آهن دردوی، یکی از آنومالی‌های مجموعه کانسارهای سنگ آهن سنگان در شرق ایران است که کارهای اجرایی و مدیریتی آن توسط شرکت سنگ آهن شرق ایران انجام می‌شود و کار طراحی و برنامه‌ریزی آن بر عهده‌ی شرکت مهندسی مشاور

کاوشگران است (در زمان این مطالعه). کلیه‌ی کانسارهای این منطقه اغلب با نام سنگان شناخته می‌شوند، و با نام کانسارهای دیگر آن مثل دردوی کمتر شناخته شده هستند. بنابراین در ادامه این فصل به صورت مختصر موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی و کانی‌شناسی کانسار دردوی مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۵-۱- خصوصیات کانی‌شناسی ذخیره

کانسار سنگ آهن دارای بافت توده‌ای است و مگنتیت مهمترین کانی آهن به شمار می‌آید. توده‌های مگنتیت عمدتاً در سنگ‌های کربناته (ژوراسیک فوقانی تا کرتاسه تحتانی) با امتداد شرقی غربی واقع شده و با ۲۰۰۰ متر طول عمدتاً نقاط مرتفع را شامل می‌شوند. توده‌های مگنتیت از غرب به شرق به توده‌های A، B، C شمالی، C جنوبی، منطقه باغک تفکیک می‌شود.

۱-۵-۲- منطقه دردوی

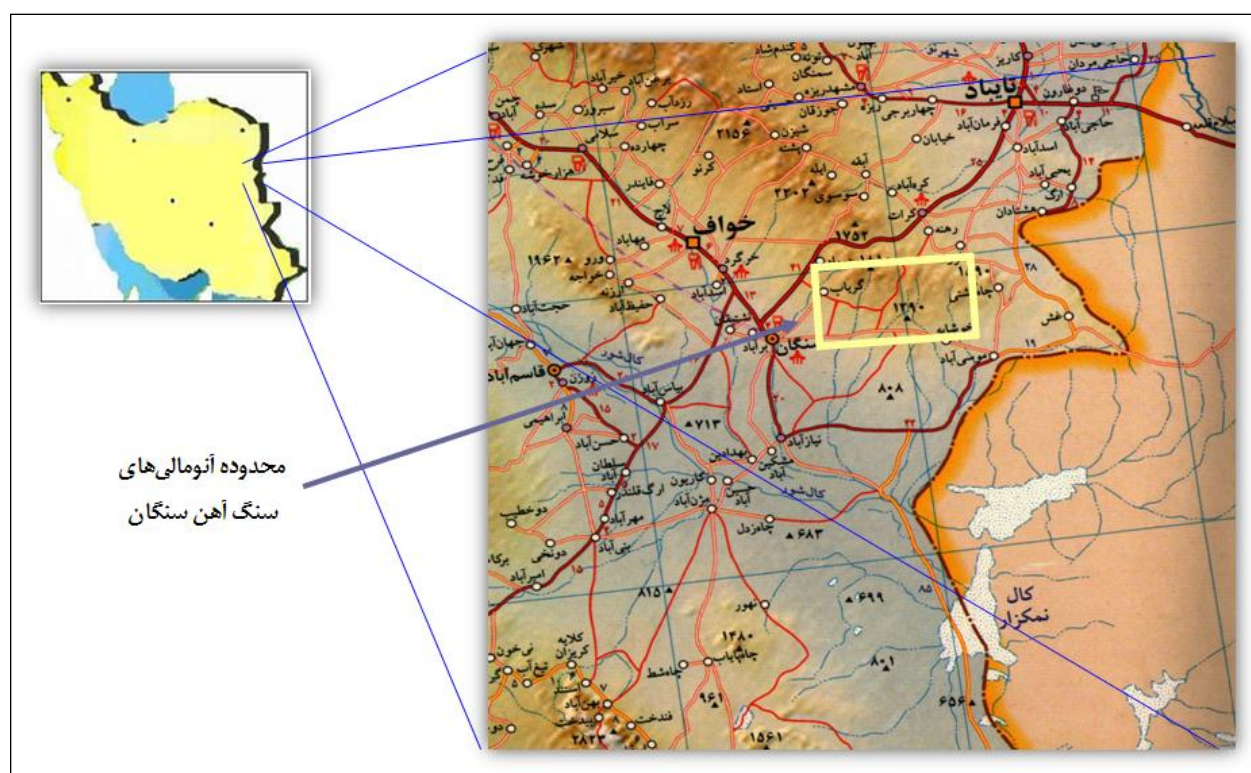
توده مگنتیت دردوی از نقطه نظر عیار آهن و یا کم بودن عناصر مزاحم بسیار مناسب است. مگنتیت مهمترین کانی اولیه آهن است. بلورهای مگنتیت این توده درشت بوده و میزان سولفید بسیار کم است. کانی‌سازی پیریت و پیروتیت در بخش‌های خاصی تشکیل شده و نسبت به مگنتیت جوانتر است. کانی‌های باطله آهن شامل فلوگوپیت، تالک، اکتینولیت، گارنت، دیوپسید و اکتینولیت نسبتاً درشت هستند.

۱-۵-۳- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی معدن دردوی

کانسار سنگ آهن دردوی بخشی از محدوده کانسارهای سنگ آهن سنگان در استان خراسان رضوی (شمال شرقی ایران) در فاصله ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد، ۶۸ کیلومتری جنوب غرب

تایباد، ۴۰ کیلومتری جنوب شرق خواف و ۱۸ کیلومتری شمال شرق شهر سنگان واقع شده است. این منطقه در حدود ۴۰ کیلومتری مرز افغانستان نیز قرار دارد (شکل ۵-۱).

نزدیکترین شهرستان به محل کانسار شهرستان خواف است که فاصله آن تا محل کانسار حدود ۴۰ کیلومتر است. کانسار سنگ آهن دردوی با ابعاد 1200×1800 مترمربع به فاصله ۳۵۰ متری کانسار (کانسار سنگ آهن باغک) قرار دارد. کانسار سنگ آهن دردوی بین مختصات $266900-268700$ X و Y از $3818600-3819800$ در سیستم مختصاتی (European 1950) UTM^1 در محدوده بخش ۴۱ و در شرق کانسار C گسترش یافته است (کاوشگران، ۱۳۹۰).



شکل (۱-۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (بدون مقیاس) (کاوشگران، ۱۳۹۰)

¹ -Universal Transverse Mercator

۱-۶- ساختار پایان نامه

پایان نامه حاضر مشتمل بر شش فصل می‌باشد، که در شرح زیر توضیح داده می‌شود:

فصل حاضر که شامل بیان کلی مسأله‌ی مورد بررسی، ضرورت و اهداف تحقیق به همراه معرفی معدن دردوی است.

فصل دوم تحت عنوان مفاهیم کلی می‌باشد که در آن تعریف برخی مفاهیم پایه‌ای و اصطلاحات مورد استفاده در فصل‌های بعدی آورده شده است. همچنین در این فصل نرم‌افزارهایی که در تحقیق حاضر به کار گرفته شده‌اند معرفی شده و برخی اصطلاحات مربوط به بهینه‌سازی پیت و زمین‌آماري نیز تشریح شده است.

فصل سوم که با عنوان بررسی سابقه‌ی علمی موضوع و تئوری کارهای صورت گرفته تعریف شده است، شامل برخی از مهمترین مطالعات صورت گرفته در طی سالیان اخیر می‌باشد. همچنین در این فصل بیشتر به بیان نکات تأثیر گذار عملی و اجرایی در فرآیند ارزیابی ذخیره پرداخته شده است. در ضمن برخی معیارهای مورد استفاده در فرآیند اعتبارسنجی به صورت مختصر توضیح داده شده است.

فصل چهارم با عنوان ارزیابی ذخیره‌ی کانسار دردوی می‌باشد. در این فصل در مورد تشکیل مدل زمین‌شناسی کانسار دردوی و بررسی‌های زمین‌آماري صورت گرفته برای تخمین و شبیه‌سازی عیار مدل بلوکی کانسار فوق به تفصیل بیان شده است. همچنین در مورد فرآیندهای تخمین و شبیه‌سازی اجرا شده به همراه اعتبار سنجی شبیه‌سازی‌ها و فرآیندهای پس از تخمین و شبیه‌سازی نیز مطالب لازم بیان شده است.

در فصل پنجم که تحت عنوان بررسی عدم قطعیت و ریسک طراحی پیت کانسار دردوی می‌باشد، به تجزیه و تحلیل فرآیند بهینه‌سازی‌های صورت گرفته روی مدل تخمینی و مدل‌های شبیه‌سازی شده‌ی عیار مدل بلوکی کانسار دردوی پرداخته شده است.

فصل ششم تحت عنوان نتایج و پیشنهادات می‌باشد. در این فصل به برخی نتایج قابل مشهود و قابل استنباط حاصل از این تحقیق به همراه پیشنهادات ارائه شده بر طبق نتایج حاصل از تحقیق حاضر پرداخته شده است.

فصل دوم

مفاهیم کلی

۲-۱- مقدمه

ارزیابی سنتی طرح‌های معدنکاری شامل حفاری و نمونه‌گیری، ایجاد یک مدل معرف پیکره‌ی ماده معدنی، تصمیم‌گیری در خصوص روش‌های معدنکاری و فرآوری، تعیین هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری و توسعه و ایجاد یک طرح فنی و اقتصادی برای طول عمر معدن هستند. علاوه بر آن برای تعیین ارزش یک طرح شاخص‌های خلاصه وضعیت؛ شامل اندازه‌ی کلی طرح نیازمندی‌های سرمایه‌ای و ارزش خالص فعلی و برای ایجاد بهترین گزینه‌های تصمیم‌گیری استفاده می‌شود که در نهایت منجر به بیشینه شدن سود مورد انتظار طرح می‌شود. گر چه در عمل پیچیده به نظر می‌رسد ولی فرآیند ارزیابی می‌تواند به صورت ترکیب راهبرد مدیریتی با یک درک حیاتی و برآورد عدم قطعیت و ریسک حاصل از منابع فنی، مالی و محیطی در نظر گرفته شود. یک منبع بحرانی ریسک فنی، مورد انتظار در تناژ و عیار ماده معدنی است. توانایی مدل‌سازی و اعمال ریسک در برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی اهمیت زیادی دارد. رویکرد آگاهانه‌تری را برای ارزیابی یا دارایی و مدیریت یک طرح فراهم می‌سازد.

برای بررسی مباحث عدم قطعیت و ارتباط دادن آن‌ها به ^۱OPDPS، شبیه‌سازی شرطی توسط افراد مختلف به عنوان یک گزینه‌ی جایگزین به جای روش‌های سنتی مدل‌سازی ماده معدنی پیشنهاد شده

^۱ - Open Pit Design and Production Scheduling

است. شبیه‌سازی شرطی کلاسی از شیوه‌های مونت کارلو^۱ است که برای ایجاد تحقق‌های هم احتمال عیار ماده معدنی درجا و تغییرپذیری نوع مواد می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد

در این فصل علاوه بر تشریح شبیه‌سازی شرطی به تعریف و بیان مفصل‌تر برخی از مفاهیم و اصطلاحاتی پرداخته خواهد شد، که در ادامه‌ی تحقیق حاضر به مراتب از آن‌ها استفاده خواهد شد. این اصطلاحات و مفاهیم علاوه بر شباهت برخی از آن‌ها از لحاظ مفهومی، نیاز به توضیح بیشتر آن‌ها نیز احساس می‌شود که در فصل‌های آینده مجالی برای آن‌ها نخواهد بود. همچنین در این فصل به معرفی اجمالی و بیان برخی از خصوصیات نرم‌افزارهای استفاده شده در این طرح پرداخته خواهد شد.

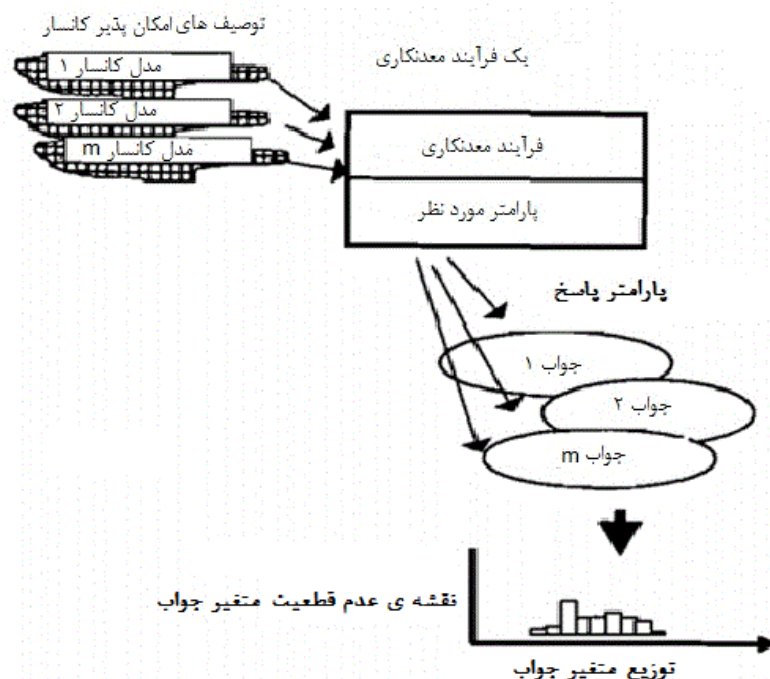
۲-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت درباره‌ی متغیر پاسخ

برای یک توصیف امکان‌پذیر معین از یک کانسار ماده معدنی ممکن است، یک دسته مقادیر امکان‌پذیر برای یک عامل مورد نظر انتخاب شود. سپس یک فرآیند معدنکاری کامپیوتری مثل OPDPS می‌تواند برای هر یک از مقادیر انتخاب شده به کار گرفته شود. بسته به فرآیند معدنکاری موجود انتخاب عوامل مختلف مد نظر می‌تواند به عنوان یک مسأله‌ی بهینه‌سازی با هدف بیشینه نمودن سودآوری فرمول‌نویسی شود. برای یک دسته از مدل‌های امکان‌پذیر کانسار و هر یک از مقادیر برای هر یک از پارامترهای مد نظر، تابع انتقال یک توالی توزیع‌های متغیرهای جواب را ایجاد می‌کند که می‌تواند به عنوان یک نقشه‌ی (طرح) فضای عدم قطعیت متغیر پاسخ در نظر گرفته شود. اگر این نقشه (طرح) ایجاد شده مناسب (یا کافی) باشد سپس تابع بهینه‌سازی نتایج مورد انتظاری را بر حسب خروجی‌های امکان‌پذیر، محدوده‌های مقادیر مورد انتظار و انتخاب‌های بهینه را ارائه خواهد کرد. شکل (۲-۱)

^۱ - Mont Carlo

^۲ - Realizations

قسمت‌های متفاوت روش استفاده از شبیه‌سازی‌های متعدد برای تعیین عدم قطعیت را به طور خلاصه (شماتیک) نمایش می‌دهد (Dimitrakopoulos R, 1998).



شکل (۱-۲) نمایش شماتیک چهارچوب کاری پیشنهاد شده (After Dimitrakopoulos, 1998)

۳-۲- مفاهیم زمین‌آماري

از آنجا که در فصل‌های بعدی پرداختن به برخی مسائل سخت خواهد بود. بنابراین در این بخش قبل از پرداختن به موضوعات عملی زمین‌آمار در فصل‌های بعدی به معرفی مهمترین بخش زمین‌آمار که واریوگرام است پرداخته خواهد شد. همچنین دلایل اهمیت و ضرورت واریوگرام به همراه برخی مفاهیم مرتبط و با آن نیز تشریح خواهد شد.

۳-۲-۱- مدل واریوگرام

سیمي‌واریوگرام که در اکثر کتاب‌های مرجع زمین‌آماري با نام واریوگرام شناخته می‌شود، یک گراف مرتبط با درجه‌ی شباهت بین عیارهای نمونه‌ها یا دیگر پارامترهای مرتبط با فاصله‌ی بین آن‌ها در

طول هر راستای معین است. مقادیر واریوگرام اندازه‌گیری شده برای یک نمونه‌ی معین مجزاً در یک فاصله‌ی جدایش معین به صورت ریاضی مدل‌سازی می‌شود. سطح‌های گراف در یک مقدار برابر با واریانس جامعه‌ی نمونه‌برداری است. عیارهای نمونه‌های جدا شده به وسیله‌ی فواصل بزرگتر از دامنه‌ی تأثیر ناهمبسته هستند که آن نیز به دلیل تصادفی بودن آن‌ها در عیار نسبت به راستا و جدایش فضایی آن‌ها است. تأثیر قطعه‌ای مجموع تغییرپذیری ذاتی به علاوه‌ی تغییرپذیری نمونه‌برداری در فاصله‌ی جدایش صفر است. واریوگرام امکانی را فراهم می‌سازد تا ناهمسان‌گردی^۱ کانی‌سازی به صورت ریاضی اندازه‌گیری شود (Delfiner and Chiles, 1999).

۲-۳-۲- اهمیت واریوگرام در زمین‌آمار

واریوگرام به وسیله‌ی بیشتر الگوریتم‌های مدل‌سازی و نقشه‌برداری به‌طور وسیع استفاده می‌شود. در مدل‌های رخساره‌های مبتنی بر شیء^۲ و الگوریتم‌های تکرار شونده‌ی معین مثل آنلینگ^۳ از واریوگرام استفاده نمی‌شود. گاهی اوقات داده‌های کافی برای بازرسی و کنترل ظاهر و رفتار مدل‌های عددی وجود دارند ولی این موارد نادر بوده و اهمیت کمتری در کنترل داده‌های پراکنده دارند. معمولاً داده‌های در دسترس خیلی پراکنده‌تر از آن هستند که بتوانند کنترل مؤثری بر روی مدل عددی داشته باشند. واریوگرام تنها امکان بررسی و کنترل مؤثر بر نتایج مدل‌های عددی را فراهم می‌سازد، یعنی کمبود داده‌ای را که باعث اهمیت واریوگرام می‌شود همچنین باعث ایجاد مشکلاتی در محاسبه، تفسیر و مدل‌سازی یک واریوگرام قابل اطمینان می‌شود. افراد حرفه‌ای از این مسأله در راه حل‌هایی نامطلوب آگاه هستند. مدل‌سازی واریوگرام مهم بوده و جزئیات آن اغلب تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر پیش‌بینی‌ها دارند. به ویژه،

^۱ - Anisotropy

^۲ - Object based

^۳ - Annealing

نحوه‌ی مدل‌سازی واریوگرام ناهمسانگردی ناحیه‌ای و روندهای منظم افقی و قائم تعیین کننده است (Isaak and Srivastava, 1987).

۲-۳-۳- ساختارهای تودرتو^۱

اگر عیارهای دو نقطه یا شبه نقطه‌ی $Z(x)$ و $Z(x+h)$ را در نظر بگیریم که به وسیله‌ی یک بردار فاصله‌ی h از هم جدا شده باشند، آنگاه تغییرپذیری بین این دو نقطه که به وسیله‌ی واریوگرام مشخص می‌شود ناشی از موارد زیادی است که روی یک دامنه‌ای از مقیاس‌های متفاوت ظاهر می‌شود، برای مثال: الف: در سطح ساپورت ($h \approx 0$)، یک تغییرپذیری ناشی از اندازه‌گیری‌ها وجود دارد، مانند: نوسانات نرخ بازیابی نمونه‌برداری مغزه و خطاهای نمونه‌برداری.

ب: در سطح سنگ‌شناسی ($|h| < 1\text{cm}$) تغییرپذیری ثانویه به علت گذر از عنصر کانی‌شناسی به دیگری ظاهر می‌شود.

ج: در سطح لایه‌بندی یا عدسی‌های کانی‌سازی ($|h| < 100\text{m}$) سومین تغییرپذیری ممکن است به علت تناوب‌های لایه‌بندی یا عدسی‌های کانی‌سازی با مواد باطله حاصل شود.

د: در سطح یک ناحیه کانی‌سازی یا فلزدار ($|h| < 100\text{ km}$)، تغییرپذیری چهارم ممکن است، به علت توزیع کانسارهای مرتبط با کوهزایی ناحیه‌ای ظاهر شود.

همه‌ی این منابع یا ساختارهای تغییرپذیری و احتمالاً موارد زیاد دیگر به طور همزمان برای تمام فواصل h بکار گرفته می‌شوند، که به آن‌ها ساختارهای تودرتو نامیده می‌شود. (Journel and Huijbregts, 1978)

¹ - Nested Structures

۲-۳-۴- نیاز به یک مدل واریوگرام سه بعدی

برای پی بردن به رفتار واریوگرام، همه‌ی واریوگرام‌های جهتی باید به طور همزمان بررسی شوند. نقاط واریوگرام تجربی در مراحل زمین‌آماري بعدی مستقیماً مورد استفاده قرار نمی‌گیرند، بلکه یک مدل واریوگرام پارامتری به نقاط تجربی برازش می‌شوند. چندین دلیل برای مدل نمودن واریوگرام‌های تجربی وجود دارد:

أ- تابع واریوگرام $\gamma(h)$ برای همه‌ی فواصل و بردارهای راستای h در درون شعاع همسایگی محاسبات زمین‌آماري بعدی لازم می‌باشد. به هر حال، معمولاً تنها واریوگرام برای فواصل گام‌های و راستاهای خاص محاسبه می‌شود (اغلب، تنها در راستاهای اصلی پیوستگی). نیاز به تفسیر تابع واریوگرام برای مقادیر h وجود دارد، جایی که تعداد زیادی از جفت داده‌های تجربی در دسترس هستند. به ویژه، اینکه واریوگرام اغلب در راستاهای افقی و قائم محاسبه شده است، اما برنامه‌های شبیه‌سازی زمین‌آماري نیاز به واریوگرام در راستاهای قطری (اریب) دارند، جای که بردار فاصله به طور همزمان شامل ترکیبی از راستاهای قائم و افقی است.

ب- نیاز اساسی به شناسایی و نشان دادن اطلاعات زمین‌شناسی در ارتباط با ناهمسانگردی، روندها، خطاهای نمونه‌برداری و مدل ارتباط فضایی نیز وجود دارد.

ت- کوواریانس یا همان نقطه‌ی مقابل واریوگرام اندازه‌گیری شده برای همه‌ی بردارهای راستا و فواصل باید خصوصیات ریاضی مثبت نامحدودی داشته باشند، و ما باید قادر باشیم تا واریوگرام یا کوواریانس متقابل را در کریجینگ و شبیه‌سازی تصادفی استفاده نماییم. یک مدل مثبت محدود مطمئن می‌سازد که معادلات کریجینگ می‌توانند حل شوند و واریانس کریجینگ آن نیز مثبت باشد، به عبارت دیگر، یک واریوگرام مثبت محدود یک مقیاس مناسبی از فاصله است.

بنابر دلایل فوق‌الذکر، در زمین‌آمار واریوگرام‌های تجربی با توابع مثبت محدود شناخته شده مثل مدل‌های واریوگرام کروی، نمایی، گاوسی و تأثیر قطعه‌ای^۱ برازش می‌شوند. (Gringarten and Deutsch, 2001)

۲-۳-۵- اعتبار سنجی

اعتبارسنجی روشی قدرتمند برای کنترل کارایی مدل برای کریجینگ است. بررسی N داده‌ی $Z(x_\alpha)$ و یک مدل واریوگرام برازش شده بر واریوگرامی که از این داده‌ها محاسبه شده‌اند. اصل این روش بر مبنای تخمین $Z(x)$ در هر نقطه‌ی نمونه‌برداری x_α از داده‌های موجود در همسایگی $Z(x_\beta)$ است، مانند حالتی که $Z(x_\alpha)$ مجهول باشد. این فرآیند به عنوان آزمایشی است که فرآیند تخمین با فرض این که در موقعیت معین نمونه‌برداری نشده است انجام می‌گیرد. بدین‌سان در هر نقطه‌ی نمونه‌برداری یک تخمین کریجینگ $Z_{(\alpha)}^*$ و واریانس متناظر با آن $\sigma_{k\alpha}^2$ حاصل خواهد شد. مقدار واقعی نمونه $Z_\alpha = Z(x_\alpha)$ نیز از قبل شناخته شده است، بنابراین می‌توان خطای کریجینگ $Z_\alpha - Z_{(\alpha)}^*$ و خطای استاندارد شده $e_\alpha = E_\alpha / \sigma_{k\alpha}$ را محاسبه نمود. اگر $\gamma(H)$ واریوگرام تئوری باشد، آنگاه یک متغیر تصادفی با میانگین صفر و واریانس $\sigma_{k\alpha}^2$ خواهد بود، همچنین یک متغیر تصادفی با واریانس یک و متوسط صفر است. نکته اینجاست که خطاهای کریجینگ مستقل نیستند. برای مقایسه مدل‌ها و روش‌های مختلف به وسیله روش اعتبارسنجی، موارد زیر قابل بررسی هستند:

- هیستوگرام خطاهای استاندارد شده
- نمودار پراکندگی مقدار واقعی در مقابل مقدار تخمینی
- نمودار پراکندگی مقدار تخمینی در مقابل خطاهای استاندارد شده

¹ - hole effect

در مورد معیار هیستوگرام خطاهای استاندارد شده متقارن بودن هیستوگرام، کمتر بودن واریانس و مرکزیت صفر هیستوگرام مذکور مهم است. برای نمودار پراکندگی خطاهای استاندارد شده در مقابل مقادیر تخمینی پراکندگی کم و متمرکز بودن حول محور خطای برابر صفر ($e_a = 0$) ملاک است. در ارتباط با نمودار پراکندگی مقادیر واقعی در مقابل مقادیر تخمینی نیز پارامترهایی مثل ضریب همبستگی، ضریب همبستگی مرتبه‌ای، میانگین خطا و خط رگرسیون مورد بررسی قرار می‌گیرد.

این نمودارها باید در زمینه‌ی تخمین‌گر کریجینگ امتحان شوند. در مورد کریجینگ ساده، می‌توان متعامد بودن نمودار خطا و مقدار تخمینی و همچنین ارتباط هموارشدگی را بررسی نمود. در مورد کریجینگ معمولی، لازم نیست که این شباهت که بررسی شوند، حال آنکه نمودارهای پراکندگی اجازه‌ی بررسی میزان فاصله‌ی نتایج از حالت ایده‌آل تخمین کریجینگ را فراهم می‌سازند. مقایسه‌ی نتایج دو اعتبارسنجی انجام شده تحت شرایط مختلف می‌توان در ارتباط با تصمیم‌گیری بین دو مدل نامزد مثل دو مدل واریوگرام برازش شده یا بین مدل تخمین محلی و کلی می‌تواند مفید باشد. به هر حال این روش اعتبارسنجی برای فرآیند برازش اتوماتیک مدل واریوگرام مفید نمی‌باشد. در اکثر مواقع برازش چشم بسته‌ی مدل‌های واریوگرام بوسیله‌ی حداقل نمودن سقف واریوگرام‌ها اغلب باعث اختصاص وزن‌های نامتعرفی را به نقاط محلی انتهایی (کرانی محلی) می‌شوند، که امر متعارفی نیست. چندین راهکار می‌تواند این امر را کاهش دهد که شامل بررسی مقدار خطاهایی که بیشتر از مربع خودشان هستند، مرز (آستانه) بندی خطاها (به عنوان مثال در ۲/۵ برابر انحراف معیارها)، و مقایسه‌ی دو گزینه به وسیله‌ی امتیازات آن‌ها در تعداد دفعاتی که گزینه‌ی اول بهتر از گزینه‌ی دوم کارآیی بهتری نشان داده است و بالعکس، هستند (Chiles and Delfiner, 1999).

۲-۳-۶- محدودیت‌های اعتبارسنجی

مقیاس‌بندی مجدد مدل واریوگرام تأثیری بر وزن‌های کریجینگ ندارد. بنابراین کل مقادیر سقف‌ها نمی‌تواند از نمرات یا (امتیازات) تخمین مجدد اعتبارسنجی شود.

مقادیر مدل واریوگرام برای گام‌های کوچکتر از کمترین فاصله‌ی نمونه‌برداری در الگوریتم‌های درون‌یابی مداخله نمی‌کند. از آنجا که، پارامترهای بحرانی مدل مثل تأثیر قطعه‌ای نسبی و رفتار واریوگرام در مبدأ نمی‌تواند اعتبارسنجی شود.

داده‌های نمونه‌برداری، مخصوصاً هنگامی که پراکنده باشند و یا با اختصاص وزن‌های امتیازی تعیین مکان شده باشند نمی‌توانند که نمایانگر فضای مورد مطالعه باشند، از این رو، مدلی که بهترین نتایج اعتبارسنجی را تولید می‌نماید، نمی‌تواند به بهترین پیش‌بینی‌ها در موقعیت‌های نمونه‌برداری نشده را ارائه دهد.

امتیازات تخمین مجدد با وجود این که به مدل واریوگرام بستگی دارد، ولی به راه کار جستجو و الگوریتم درونیابی خاص مورد استفاده نیز مرتبط می‌باشد. اگر امتیازات تخمین مجدد همه‌ی مدل‌ها به فرض نامطلوب باشند، آنگاه واضح نخواهد بود که مشکل موجود چیست و کجاست؟ آیا از نتیجه‌ی پایایی، مدل‌های واریوگرام یا اجرای الگوریتم ناشی می‌شود؟ اگر مدل نامطلوب باشد آنگاه تشخیص این که کدام پارامتر باید تغییر یابد سخت و مبهم خواهد بود.

نکته‌ی قابل توجه این است که انتخاب یک مدل واریوگرام نسبت به انتخاب بنیادی مدل تابع تصادفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت و برای تصمیم‌گیری بحرانی پایایی جزء مراحل بعدی است (از لحاظ اهمیت) (Goovaerts, 1997).

۲-۳-۷- مفهوم و اهداف شبیه‌سازی

روش‌های تخمین زمین‌آماري به منظور کسب اطلاعاتي پیرامون میانگین و واریانس توابع توزیع احتمال متغیر مورد مطالعه طراحی شده‌اند. در بسیاری موارد مانند پیش‌بینی نوسانات و تغییرات ویژگی‌های مختلف کانسنگ استخراجی و تحلیل پروژه‌های استخراجی نیازمند کسب اطلاعاتي پیرامون پراکندگی و طیف کامل مقادیر امکان‌پذیر یک تابع توزیع هستیم که بایست از از شیوه‌های شبیه‌سازی استفاده نمود. هدف از شبیه‌سازی، ایجاد توابع یا مجموعه مقادیری از متغیر ناحیه‌ای (عیار، ضخامت، و ...) است. مجموعه داده‌های حاصل از فرآیند شبیه‌سازی باید با داده‌های واقعی همخوانی داشته باشند، یعنی مقادیر شبیه‌سازی شده دارای ساختار فضایی (واریوگرام یا کواریانس) یکسانی با داده‌های موجود بوده و بعضاً ممکن است در بعضی روش‌ها در نقاط نمونه‌برداری شده برابر با داده‌های تجربی باشد. با برقراری شرط فوق، اعتبار شبیه‌سازی‌های زمین‌آماري سنجیده می‌شود (Journel, 1974).

ونیکف^۱ در سال ۱۹۶۹ شبیه‌سازی را این گونه تعریف کرده است: " یک سیستمی از مدل‌ها است که شباهت معینی به سیستم دارند". منظور از شباهت معین همان هیستوگرام و واریوگرام داده‌های اولیه است که در همه‌ی تحقق‌های شبیه‌سازی شده یکسان می‌باشد. در واقع هر یک از تحقق‌ها حالت‌های مختلف امکان‌پذیر از متغیر مورد بررسی کانسنگ هستند و به نوعی نمایانگر تغییرپذیری متغیر مورد بررسی کانسنگ است. اگر چه ممکن است، یکی از این حالت‌ها بهترین حالت تحقق یافته از وضعیت متغیر مورد بررسی در کانسنگ باشد، و ویژگی‌های بیشتری را از آن به نمایش بگذارد، ولی برای پی‌بردن به تغییرپذیری متغیر مورد بررسی به همه‌ی حالت‌ها نیاز است (Vann, Bertoli, and Jackson, 2002).

¹-Venikov

۲-۳-۸- تفاوت کریجینگ^۱ و شبیه‌سازی

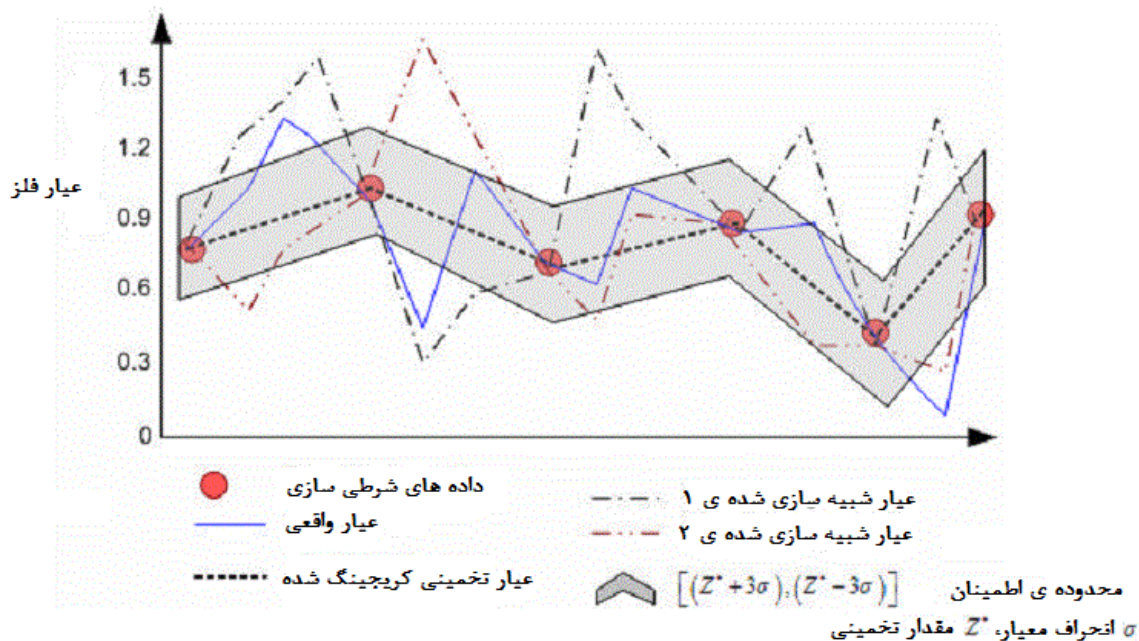
به طور سنتی (متداول)، تعیین توزیع فضایی عیارها در یک مدل ماده معدنی بر اساس تخمین‌های زمین‌آماري است. اشکال اصلی روش‌های تخمین این است که قادر به ساختن دوباره‌ی تغییرپذیری فضایی برجای از داده‌های در دسترس نیستند. نادیده گرفتن چنین منبع مهم ریسک و عدم قطعیت ممکن است، منجر به تولید طرح‌های غیر واقع گرایانه‌ای شوند (Richmond, 2009).

هدف از یک تخمین مناسب دستیابی به ارائه تخمین با حداقل خطای ممکن است. چنین تخمینی را کریجینگ با تضمین به حداقل رساندن خطا انجام می‌دهد. اگر هدف از تخمین، دستیابی به مقادیر برجای یک متغیر باشد، کریجینگ روش مفیدی خواهد بود. ولی اگر هدف تخمین، ارزیابی شدت تغییرپذیری یک متغیر باشد روش کریجینگ دارای معایبی است مانند: دستیابی به حداقل واریانس تخمین عیار منجر به هموارسازی مقادیر تخمینی می‌شود. نتیجه‌ی چنین هموارسازی این است که عیار بلوک‌های تخمینی، واریانس کمتری نسبت به بلوک‌های واقعی خواهند داشت. هر چه ابعاد بلوک‌ها کوچک‌تر شود هموارسازی غیر واقعی بلوک‌ها بیشتر می‌شود.

در اغلب موارد این هموارسازی داده‌ها مشکل عمده‌ای را در خلال فرآیند استخراج و فرآوری مواد معدنی ایجاد نمی‌کند. در فاز تخمین ذخیره هم تنها دو ویژگی یعنی غیراریب بودن تخمین‌ها و حداقل بودن واریانس آن‌ها برای دستیابی به یک تخمین مناسب کفایت می‌کند. لذا در این فاز نیز هموارسازی داده‌ها در حد نامطلوبی ندارد، ولی اگر هدف از انجام یک مطالعه، بررسی تغییرپذیری یک متغیر باشد (نه تخمین میانگین)، این هموارسازی مشکلاتی را ایجاد خواهد کرد. و دانستن تنها یک عدد میانگین کارگشا نخواهد بود (حتی با در نظر گرفتن حدود اطمینان نیز مشکل حل نخواهد شد). شبیه‌سازی زمین‌آماري با ابزاری که در دست دارد، می‌تواند برای هر بلوک یا نقطه، حالت‌های مختلف آن را بازسازی کرده و توزیعی

¹ - Kriging

از آن‌ها را در اختیار قرار دهد. در کل هدف از شبیه‌سازی و تخمین دو هدف متفاوت است. هدف از تخمین کریجینگ، محاسبه‌ی مشخصات تابع توزیع احتمال (نظیر میانگین) و دستیابی به حداقل خطای تخمین بر اساس داده‌های موجود (واقعیت‌های تحقق یافته) است. ولی هدف از شبیه‌سازی ایجاد حالات تحقق نیافته‌ی امکان‌پذیر با حفظ عوامل ساختاری داده‌ها (واقعیت‌های تحقق یافته) است. در شکل (۲-۲) تفاوت کریجینگ و شبیه‌سازی نشان داده شده است (Martinez, 2007).



شکل (۲-۲) تفاوت کریجینگ و شبیه‌سازی با وجود حدود اطمینان (After Martinez, 2007)

۹-۳-۲- روش‌های مختلف شبیه‌سازی زمین‌آماري

روش شبیه‌سازی تا حد زیادی تابع طبیعت متغیری است که مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد از این نظر روش‌های شبیه‌سازی مختلفی وجود دارند. از آنجا که در این تحقیق از روش شبیه‌سازی گاوسی پی-درپی^۱ استفاده می‌شود. بنابراین تنها در ابتدا کلیاتی از شبیه‌سازی‌های شرطی^۲، غیر شرطی^۳ و

^۱ - Sequential Gaussian Simulations

^۲ - Conditional Simulation

^۳ - Nonconditional Simulation

شرطی سازی^۱ بیان شده و در ادامه به تشریح روش شبیه سازی شرطی پی در پی^۲ و شبیه سازی گاوسی پی در پی پرداخته خواهد شد.

۲-۳-۱۰- شبیه سازی های شرطی و غیر شرطی

روش های شبیه سازی زمین آماری به دو روش کلی قابل اجرا است، که شامل شبیه سازی غیر شرطی و شبیه سازی شرطی است. شبیه سازی غیر شرطی کافی است تا متوسط حالات بازسازی شده (اعداد تولید شده)، پارامترهای آماری و ساختارهای فضایی مشابهی نسبت به داده های اولیه داشته باشد. در شبیه سازی شرطی نه تنها لازم است شرایط فوق صادق باشد، بلکه باید برای نقاط خاصی مقادیر معینی تولید شود. از شبیه سازی شرطی در مواقعی استفاده می شود، که لازم باشد، مقادیر اندازه گیری شده در نقاط نمونه برداری حفظ شوند (با حفظ مختصات). اغلب روش های زمین آماری غیر شرطی است. برای شرطی سازی آن ها لازم است، تا یک مرحله به الگوریتم آن ها اضافه گردد. البته در برخی از روش های شبیه سازی مثل شبیه سازی متوالی شرطی سازی جزئی از ساختار شبیه سازی است و جدا از آن صورت نمی گیرد.

۲-۳-۱۱- شرطی سازی و شبیه سازی شرطی به روش مقادیر باقیمانده

ژورنل در سال ۱۹۷۴ رابطه زیر را برای شرطی سازی ارائه نموده است:

$$Z_{sc}(x) = Z_k^*(x) + [Z_s(x) - Z_{sk}^*] \quad (1-2)$$

که در آن:

$Z_{sc}(x)$: مقدار شبیه سازی شده شرطی در نقطه x

^۱ - Conditioning

^۲ - Sequential Conditional Simulations

$Z_k^*(x)$: مقدار تخمینی $z(x)$ در نقطه x بر اساس داده‌های موجود $Z(x_i)$,

$Z_s(x)$: مقدار شبیه‌سازی شده غیر شرطی در نقطه x ,

Z_{sk}^* : مقدار تخمینی $Z_s(x)$ در نقطه x بر اساس مقادیر شبیه‌سازی شده غیر شرطی در نقاط نمونه

برداری x_i

چون در هر موقعیت نمونه برداری $(x_i \in I)$ ، بواسطه تعریف کریجینگ، دو مقدار باقیمانده $Z_k^*(x_i) -$

$$Z_{sc}^*(x_i) = Z_0(x_i), \forall x_i \in I \text{، بنابراین می‌شوند. } Z_s(x_i) - Z_{sk}^*(x_i), Z_0(x_i)$$

با توجه به رابطه (۱-۲)، برای انجام شبیه‌سازی شرطی می‌بایست ابتدا یک دور تخمین کریجینگ

انجام شود، تا ارقام تولید شوند $Z_k^*(x)$ سپس در هر دور شبیه‌سازی ابتدا باید شبیه‌سازی غیر شرطی

برای تعیین $Z_s(x)$ اجرا شود و در ادامه برای برآورد مقادیر Z_{sk}^* باید با استفاده از نتایج شبیه‌سازی،

تخمین کریجینگ صورت گیرد. با در دست داشتن سه مجموعه داده‌های فوق می‌توان بر اساس رابطه (۲-۱)

(۱) مقدار شبیه‌سازی شرطی $Z_{sc}(x)$ را محاسبه نمود.

۱۲-۳-۲- شبیه‌سازی‌های شرطی پی در پی

شبیه‌سازی‌های متوالی مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها بر اساس الگوریتم پایه‌ی یکسان است. این

الگوریتم پایه به طور خلاصه در شکل (۳-۲) آورده شده و شامل مراحل زیر است:

ا- انتخاب تصادفی یک گره شبکه تا زمان شبیه‌سازی کل شبکه

ب- تخمین توزیع احتمال محلی شرطی^۱ (lcpd) عیارها در آن گره شبکه

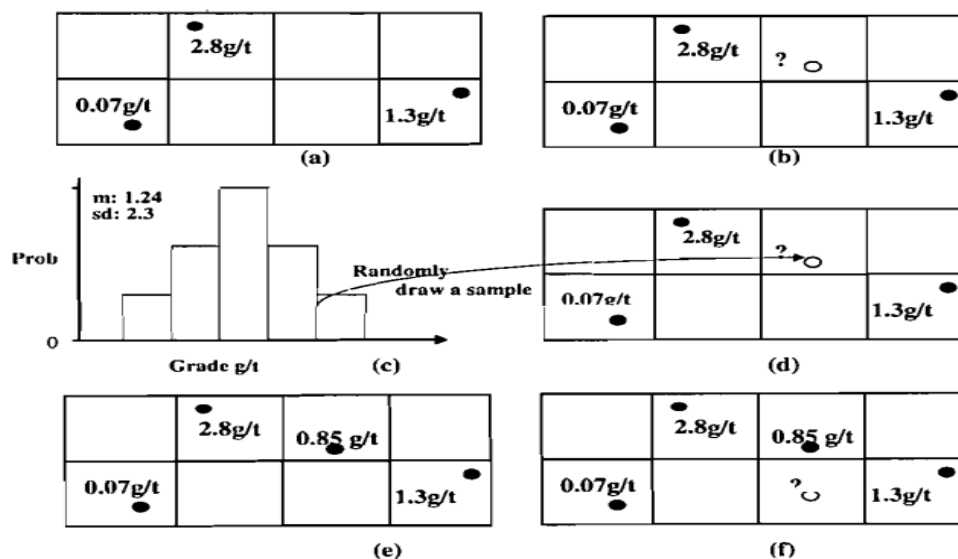
ت- انتخاب تصادفی یک ارزش عیار از lcpd

ث- اضافه نمودن مقدار شبیه‌سازی شده به مجموعه داده‌های شرطی‌سازی

ج- تکرار مراحل ۱ تا ۴ تا زمانی که تمام گره‌های شبکه دارای یک ارزش (مقدار) شوند.

ح- تکرار مراحل ۱ تا ۶ برای ایجاد مدل‌های هم احتمال اضافی

دو تا از گزینه‌های اصلی الگوریتم شبیه‌سازی متوالی که در عمل استفاده می‌شوند، شامل الگوریتم‌های شبیه‌سازی گاوسی متوالی و شاخص متوالی هستند (Dimitrakopoulos, 1998).



شکل (۲-۳) شبیه‌سازی عیارهای طلا در یک کانسار: (a) کانسار و داده‌ها؛ (b) یک موقعیت (نقطه) برای شبیه‌سازی؛ (c) lcpd تخمین زده شده در موقعیت (b)؛ (d) بیرون کشیدن تصادفی از lcpd؛ (e) افزودن مقدار شبیه‌سازی شده به داده‌ها؛ و (f) تکرار مراحل قبلی در یک موقعیت جدید (Dimitrakopoulos, 1998).

¹ - Local Conditional Probability Distribution

۲-۳-۱۳- شبیه‌سازی گاوسی پی در پی

در الگوریتم گاوسی پی‌درپی یا SGS از کریجینگ ساده^۱ برای تخمین lcpd استفاده می‌شود. در این فرآیند فرض می‌شود که lcpd توزیع نرمال کلاسیک با میانگین و واریانس به ترتیب برابر با تخمین کریجینگ ساده و واریانس تخمین است. کاربرد SGS نیازمند نرمالایز نمودن داده‌ها و تبدیل برگشتی^۲ نتایج است. اشکال عمده‌ی تمام روش‌های گاوسی این است که محدوده‌ای که مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد، باید بسیار بزرگتر از دامنه‌ی واریوگرام باشد. در مورد SGS (و همین طور شبیه‌سازی شاخص متوالی^۳ SIS) بزرگترین مشکل، انتخاب شعاع همسایگی برای جستجو است. انتخاب همسایگی‌های کوچک ممکن است منجر به شرطی‌سازی ضعیف و تولید واریوگرام‌هایی شود که چندان به واریوگرام اصلی شباهت نداشته باشد (Dimitrakopoulos, 1998). مراحل الگوریتم شبیه‌سازی گاوسی متوالی برای یک متغیر پیوسته به شرح زیر است:

ا- تبدیل داده‌های اولیه به داده‌هایی که توزیع گاوسی (نرمال) داشته باشند.

ب- تعیین یک شبکه برای شبیه‌سازی منطقه‌ی مورد نظر، به گونه‌ای که محل داده‌های اولیه در آن مشخص باشد.

ت- محاسبه و مدل نمودن واریوگرام داده‌های اولیه نرمال شده.

ث- انتخاب یک نقطه از شبکه به صورت تصادفی.

^۱ - Simple Kriging

^۲ - Backtransform

^۳ - Sequential Indicator Simulation

ج- تعیین مقدار متغیر در نقطه‌ی انتخاب شده شبکه، با استفاده از سایر داده‌ها (اولیه و داده‌های شبیه‌سازی شده) به روش کریجینگ و محاسبه‌ی واریانس تخمین.

ح- ارزش تخمین زده شده و واریانس مرتبط با آن، پارامترهای توزیع گاوسی شرطی متغیر $Z(u)$ در نقطه‌ی انتخاب شده‌ی شبکه می‌باشد. به وسیله‌ی این پارامترها، تابع توزیع تجمعی نرمال در این نقطه تعیین شده و سپس یک ارزش از این توزیع با استفاده از یک ارزش تصادفی انتخاب شده و مقدار آن در نقطه‌ی مذکور شبکه قرار داده می‌شود.

خ- انتخاب نقطه‌ی دیگر از شبکه به صورت تصادفی و تکرار مرحله‌ی پنجم به بعد تا زمانی که تمام نقاط شبکه شبیه‌سازی شوند.

د- تبدیل معکوس داده‌های شبیه‌سازی شده.

با رسم نتایج، تصویری از منطقه‌ی مورد بررسی حاصل می‌شود. برای این که تصاویر شبیه‌سازی شده‌ی بیشتری تولید شود، لازم است برای هر تصویر، مراحل مذکور دوباره تکرار شوند (Dowd, 1994).

۴-۲- نرم‌افزار WinGslib

نرم‌افزار WinGslib یکی از نرم‌افزارهای استاندارد برای بررسی‌های زمین‌آماري کانسارهای معدنی، ذخایر نفت و سایر زمینه‌های مشابه است. این نرم‌افزار برای کار در محیط ویندوز ترتیب داده شده است؛ و شامل یک سری کادرهای محاوره‌ای است که ارتباط گرافیکی کاربر ویندوز با برنامه تحت سیستم عامل DOS با نام GSLIB را به عهده دارد. مجموعه‌ی WinGslib امکان تنظیم پارامترهای برنامه‌های مختلف موجود در نرم‌افزار GSLIB را فراهم می‌سازد. همچنین امکان مشاهده‌ی نتایج برنامه‌های مختلف به صورت گرافیکی به وسیله‌ی این نرم امکان‌پذیر می‌شود.

عنوان GSLIB برای مجموعه برنامه‌هایی استفاده می‌شود که بوسیله‌ی دانشجویان و پژوهشگران دانشگاه استنفورد^۱ در طول ۱۵ سال توسعه یافته است. این مجموعه در برگیرنده‌ی یک سری برنامه‌های کاربردی به منظور اجرای الگوریتم‌های مختلف زمین‌آماري مانند روش‌های مختلف کریجینگ، شبیه‌سازی و دیگر ابزار مفید در ارتباط با بررسی‌های زمین‌آماري مانند واریوگرام ست (Deutsch and Journel, 1998).

۲-۵- نرم‌افزار DataMine

نرم‌افزار DataMine یکی از قدرتمندترین و انعطاف‌پذیرترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی پیکره‌ی ماده‌ی معدنی و طراحی معدن است که تاکنون تولید شده است. این نرم‌افزار برای تمام جنبه‌های عملیات معدنکاری مناسب می‌باشد و برای طراحی معادن متنوعی مثل معادن سنگ آهن، طلا، نیکل، فسفات‌ها، الماس، مس، بوکسیت، زغال سنگ، پلاتین، لیگنیت، نفت خام و کانی‌های صنعتی برنامه‌ریزی شده است. نرم‌افزار DataMine به وسیله‌ی شرکت کانادایی CAE^۲ تولید شده است. این شرکت در سال ۱۹۸۱ تأسیس شده و به فراهم نمودن نرم‌افزارهای خاص و ارائه‌ی خدمات صنایع معدنی در سرتاسر جهان پرداخته است. بوسیله‌ی نمایندگی‌های مختلف در سرتاسر جهان سطح بی‌نظیری از مهارت و حمایت از مشتریان را ارائه نموده است.

نرم‌افزار DataMine حول یک هسته‌ی مرکزی تولید شده است. این هسته مدیریت عالی داده‌ها را به واسطه‌ی یک پایگاه داده‌ی ارتباطی اختصاصی، با گرافیک‌های گسترده، آمارگیری و مدیریت داده‌های گمانه‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. نرم‌افزار شامل یک محیط گرافیکی محاوره‌ای برای ارائه و بررسی گمانه‌ها،

^۱ - Stanford

^۲ - Canadian Aviation Electronics Ltd

مدل‌های بلوکی، مدل‌های وایرفریم^۱ سطح (مدل‌های عددی عوارض زمین)، مدل‌های وایرفریم خاک، نقاط و استرینگ‌ها^۲ است. این نرم‌افزار شامل بسیاری از خصوصیات طراحی کامپیوتری، تبدیل داده‌های قیاسی به داده‌های عددی، بررسی استرینگ‌ها و توابع محاوره‌ای ترسیم نمودار است. این نرم‌افزار در موارد زیر کاربرد دارد:

- ✓ تجزیه و تحلیل و کنترل داده‌ها (مدیریت داده‌ها، پردازش داده‌ها و ابزار ترسیم نمودارها)،
- ✓ عملیات اکتشاف (ادغام داده‌ها، محاسبه‌ی آمار داده‌ها، ویرایش گمانه‌ها و ارزیابی ذخیره)،
- ✓ زمین‌شناسی (بررسی‌های زمین‌آماري، مدل‌سازی مدل بلوکی و تعیین ذخیره‌ی ماده معدنی)،
- ✓ نقشه‌برداری، مدل‌سازی پیکره‌ی ماده معدنی، برنامه‌ریزی تولید (زمان‌بندی تولید، کنترل عیار و ترکیب ماده معدنی)
- ✓ طراحی معادن روباز (بهینه‌سازی پیت، برنامه‌ریزی بلند مدت و طراحی پیت و حمل و نقل)
- ✓ طراحی معادن زیرزمینی (طراحی و بهینه‌سازی گارگاه‌های استخراج و طراحی گسترش معدن)
- ✓ در فضاهایی مرتبط با فضاهایی مثل مطالعات زیست‌محیطی (اصلاح، احیاء و بازسازی زمین‌های معدن) (DataMine Stodio 3 Help, 2005).

^۱ - Wireframe

^۲ - Strings

۲-۶- نرم افزار زمان بندی و برنامه ریزی تولید NPV Scheduler

نرم افزار NPV Scheduler نخستین بار در سال ۱۹۹۶ میلادی توسط آقایان تولونیسکی^۱ و اندرود^۲ پیشنهاد شد و سپس در سال ۱۹۹۷ میلادی نسخه جدید آن ارائه شده است.

نرم افزار NPV محدوده های اقتصادی را برای معدنکاری پیت معادن روباز و برای هر دسته از پارامترهای اقتصادی تعیین می کند. یک مرتبه که محدوده نهایی تعیین می شود، بلوک های درون آن با هدف دستیابی به بیشترین ارزش خالص فعلی امکان پذیر یا برای دستیابی به یک تولیدی که به حالت بهینه مخلوط سازی^۳ شده باشد، برای کل عمر معدن ترتیب بندی می شود. سکانس بهینه ی استخراج سپس برای ایجاد یک دسته از پوششک ها یا مراحل با اعمال معیار حداقل عرض دسترسی و یا دیگر کنترل کننده های قابل تعریف کاربر ایجاد می شود. سپس پله های درون هر پوششک می توانند برای برآورده هر تعداد از محدودیت های اقتصادی، فرآوری، حمل و نقل و معدنکاری عملی زمان بندی شوند. یک مدل شبیه سازی حمل و نقل با مقصدهای مختلف مواد معدنی و باطله می تواند تعریف شود، که اجازه می دهد یک بهینه سازی تک مرحله ای طرح حمل و نقل معدن انجام شود. زمان بندی می تواند با استفاده از پارامترهای اقتصادی متغیر به طور متوالی ارزیابی شود، همچنین استراتژی های متناوب دیو (انبار) کردن و متغیر عیار حد نیز به همین نحو است. (Earthwork's NPV Scheduler 3.4 Tutorial, 2005)

^۱ - Tolwinsky

^۲ - Underwood

^۳ - Blending

۲-۷- مفاهیم کلی بهینه‌سازی پیت

در این بخش به بیان برخی مفاهیم بهینه‌سازی پیت نهایی پرداخته خواهد شد. همچنین برخی قابلیت‌های موجود در نرم‌افزار NPV Scheduler که جهت بهینه‌سازی پیت معادن روباز بکارگرفته می‌شود بیان خواهد شد.

پیت نهائی^۱: LG: شکل پیتی است، که بیشترین جریان نقدینگی تنزیل نشده را برای پارامترهای اقتصادی معین و شیب‌های دیوارها هدف قرار می‌دهد. اصطلاح پیت نهایی همچنین برای بزرگترین پیت نهائی LG تحت بررسی نیز استفاده می‌شود.

پیت‌های تودرتو^۲: یک پیت کوچکتر با تصحیح شیب‌های دیواره درون یک پیت بزرگتر است، برای مثال بزرگترین پیت نهائی بررسی شده می‌تواند بعنوان پیت بزرگتر در نظر گرفته شود.

سکانس استخراج^۳: یک سکانسی از بلوک‌هایی که اگر یک به یک استخراج شوند یک سکانسی از پیت‌های تودرتو را تولید خواهد کرد به‌طوری‌که یک پیت با پیت بعدی فقط به اندازه یک بلوک اختلاف خواهد داشت.

سکانس استخراج با NPV بهینه: یک سکانس استخراجی که بیشترین NPV را برای یک مدل اقتصادی معین و شیب‌های معین دیوارهای پیت مورد هدف قرار می‌دهد.

فازهای LG^۴: یک سکانس پیت‌های نهائی تودرتوی LG است، که بوسیله تغییر پارامترهای اقتصادی حاصل می‌شوند. این پارامترها معمولاً ارزش‌های بلوک، هزینه‌های معدنکاری یا قیمت‌های تولید می‌باشند. فازهای LG می‌تواند با روش تنزیل بالا به پائین تنزیل یابد.

^۱ - Lerch & Grossman Ultimat Pit

^۲ - Nested Pits

^۳ - Extraction Sequence

^۴ - LG Phases

پیت NPV بهینه: یک پیت تودرتوی بدست آمده بوسیله معدنکاری همه بلوک‌های موجود در سکانس استخراج با NPV بهینه است. این پیت شاید با پیت نهائی LG یکسان باشد که متناظر با هزینه‌ها و قیمت‌های مرجع است (Earthwork's NPV Scheduler 3.4 Tutorial, 2005).

۲-۷-۱- پیت نهایی

مدول بهینه‌سازی محدوده نهایی پیت براساس مدل اقتصادی و تنظیمات مربوط به پیت نهایی، شکل نهایی پیت و یک سکانس بهینه استخراجی را ایجاد می‌کند که شامل برخی یا همه بلوک‌های پیت نهایی است. محدوده‌ی نهایی می‌تواند به صورت پیت لرچ و گرسمن، پیت ماکزیمم منبع تعریف شود و یا اینکه می‌تواند به نرم‌افزار NPV از منبع دیگر وارد شود. سکانس استخراج نیز می‌تواند برای NPV بیشینه یا برای اهداف تعریف شده‌ی کاربر مثل مخلوط کردن عیارهای مختلف ماده معدنی (ترکیب یک نوع ماده معدنی با عیارهای زیاد و کم برای دستیابی به یک عیار خاص) بهینه‌سازی شود (Earthwork's NPV Scheduler 3.4 Tutorial).

۲-۷-۲- مراحل LG و تجزیه و تحلیل حساسیت

برای تطبیق نیازمندی‌های تحلیل حساسیت سنتی و گزارش داده‌ها در بعضی معادن فلزی، فازهای LG می‌توانند با استفاده از فاکتورهای هزینه‌ی معدنکاری، قیمت و یا سود تعیین شوند. برای مثال، می‌توان فازها را با سکانسی از قیمت‌های تولید (ضریب‌های درآمد در موارد تولید متعدد) و همچنین ضریب قیمت ماکزیمم برای یک مقدار بالای ۱۰۰ درصد تنظیم نمود و پیت‌های بزرگتر از پیت نهایی که متناظر با قیمت‌های تنظیم شده‌ی مرجع برای مدل اقتصادی است، به دست آورد (Earthwork's NPV Scheduler 3.4 Tutorial, 2005).

۲-۷-۳- روش تنزیل بالا به پایین

هدف از روش تنزیل بالا به پایین برای بهبود NPV پروژه با استفاده از استثناء قائل شدن (بیرون نگه داشتن) ماده معدنی پیت نهایی است که تنها بعد از معدنکاری مقادیر زیادی از باطله می‌تواند به دست آید. این روش بر این واقعیت استوار است که معدنکاری معادن روباز همیشه از بالا به پایین انجام شده و اغلب باطله باید قبل از ماده معدنی استخراج شود. از آنجا که هزینه‌های باطله‌برداری قبل از درآمدهای حاصل از استخراج ماده معدنی است، بنابراین بعضی از بخش‌های عمیق ماده معدنی اگر ارزش زمانی پول لحاظ شود، ممکن است که معدنکاری آن‌ها با ارزش نباشد حتی اگر آن‌ها در پیت نهایی تنزیل نشده‌ی LG قرار گیرند (Earthwork's NPV Scheduler 3.4 Tutorial, 2005).

۲-۷-۴- استفاده از شکل پیت حاضر^۱

به جای ایجاد یک پیت نهایی جدید می‌توان از یک شکل پیت موجود استفاده نمود. برای این کار باید اسم یک پوشه سطح حاصل از نرم‌افزار NPV که بیانگر یک پیت باشد را مشخص نمود. همچنین برای ارزیابی فازهای استخراجی بهینه‌سازی‌های جداگانه نیز می‌توان از فازهای موجود استفاده نمود (Earthwork's NPV Scheduler 3.4 Tutorial, 2005).

۲-۸- نتیجه‌گیری

در این فصل ابتدا به مفاهیم مدل‌سازی عدم قطعیت و برخی مفاهیم کلی زمین‌آماري از قبیل شبیه‌سازی و تفاوت کریجینگ پرداخته شده است. در مفهوم مدل‌سازی عدم قطعیت بررسی چندین مدل هم احتمال کانسار برای تعیین عدم قطعیت مناسب‌ترین بررسی عنوان شده است. بر خلاف تک مدل تخمینی که هدف از آن دستیابی به حداقل خطای تخمین است. هدف از شبیه‌سازی، ایجاد حالات تحقق

¹ - Use Existing Pit

نیافته‌ی امکان‌پذیر با حفظ عوامل ساختاری داده‌ها (واقعیت‌های تحقق یافته) است که هر دو بر اساس داده‌های موجود (واقعیت‌های تحقق یافته) هستند. همچنین شبیه‌سازی شرطی به همراه شبیه‌سازی گاوسی پی در پی نیز به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه به معرفی نرم‌افزارهای به کارگرفته شده در این تحقیق پرداخته شده است. همچنین مفاهیم کلی بهینه‌سازی پیت نیز مورد به اختصار بیان شده است.

فصل سوم

بررسی سابقه علمی موضوع و تئوری کارهای صورت گرفته

۳-۱- مقدمه

در این فصل در ابتدا سابقه‌ی علمی موضوع بررسی خواهد شد. بعلاوه گستردگی موضوع مورد بحث کارهای متنوعی توسط محققان مختلفی صورت گرفته است، اما بدلیل اقتضای این تحقیق و دسترسی کم تحقیقات مذکور برخی از مهمترین کارهای انجام شده در سال‌های نزدیک در این فصل مختصراً بررسی شده است. در ادامه‌ی این فصل به تئوری برخی از فرآیندهای انجام شده در فصل بعدی بنا به نیاز بررسی شده است.

۳-۲- بررسی سابقه‌ی علمی موضوع

بررسی و توجه به عدم قطعیت در معدنکاری روباز در دهه‌ی اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. ابزار استاندارد کنونی برای مدل‌سازی این نوع عدم قطعیت استفاده از شبیه‌سازی‌های شرطی پیکره‌های کانسار بوده و تلفیق آن‌ها در فرآیند ارزیابی و طراحی معادن موضوع بسیاری از مقالات اخیر بوده است. دیمیتراکوپولوس^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۲، از شبیه‌سازی‌های شرطی استفاده نموده‌اند، برای نشان دادن اینکه طراحی به دست آمده برای تنها یک مدل ماده معدنی حاصل از روش‌هایی مثل کریجینگ معمولی می‌تواند یک ریسک بالا به شکل انحراف اساسی از طرح‌های مالی خود را در بر داشته باشد. همچنین دیمیتراکوپولوس و همکارانش در سال ۲۰۰۷، به وسیله‌ی ارزیابی چندین طرح، تحت

^۱ - Dimitrakopoulos

مدل‌های مختلف از ماده معدنی و انتخاب یکی که بهترین شاخص‌های کارائی را ارائه نماید، شبیه‌سازی‌های شرطی را در فرآیند طراحی گنجانده‌اند. ویتل و بزرگ ابراهیمی در سال ۲۰۰۴، پیت‌های پیوندی را به عنوان راهی برای معرفی شبیه‌سازی‌های شرطی برای ایجاد حد نهایی پیت‌های نهایی معرفی نموده‌اند، و غلام‌نژاد و اصائلو در سال ۲۰۰۷ محدودیت‌های احتمالی را برای کاهش ریسک در برنامه‌ریزی تولید بلند مدت گنجانده‌اند.

در جدول (۱-۳) لیست و خلاصه‌ای از برخی دیگر از مطالعات انجام شده در زمینه‌ی شبیه‌سازی پیکره‌ی ماده معدنی که روی معادن روباز نیز این کارها انجام گرفته، آورده شده است.

جدول (۱-۳) خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

مؤلف (سال انتشار)	عنوان	توضیح مختصر
باسو ^۱ ، فونسکا ^۲ ، ریچموند ^۳ (۲۰۰۱)	اندازه گیری ریسک معادن روباز بوسیله‌ی شبیه سازی تصادفی	از آنجاکه مجموعه تحقق‌های متناوب یک سنجش عددی عدم قطعیت فضایی را فراهم می‌سازد. و بواسطه‌ی بکارگیری یک معادله‌ی انتقال، محدوده‌ی عدم قطعیت اندازه گیری می‌شود، بنابراین در این مطالعه برای شبیه سازی، نرم‌افزار Gslib و برای محاسبه NPV و سایر محاسبات نرم‌افزار GEMCOM بکارگرفته شده است. از ۱۰ شبیه سازی شرطی عیار استفاده شده و در ادامه محدوده تغییرپذیری و نمودار عیار- تناژ را به دست آمده است که تجزیه و تحلیل این نتایج در طراحی راهبردی معدن مورد مطالعه مفید خواهد بود.
دیمیتراکپولوس (۲۰۰۷)	عوامل ریسک و عدم قطعیت عیار در طراحی معادن روباز	در این بررسی دو محدوده‌ی فنی مجزا و گسترده کاربرد روش‌ها شبیه‌سازی در معدنکاری زغال ارائه شده است. رویکرد ارائه شده بر این اساس است که طرح‌های در حال توسعه سعی در جذب حداکثر توان بیشینه دارند در حالی که ریسک نامطلوب را به حداقل می‌رسانند. مزیت این روش بر این اساس است که امکان استفاده از ابزار بهینه سازی تجاری و سنتی را برای پرداختن به مسأله‌ی ریسک و تولید طرح‌ها فراهم می‌سازد.
دیمیتراکپولوس، مارتینز ^۴ ، رمضان ^۵ (۲۰۰۷)	یک رویکرد بالاترین حد/کمترین حد برای بهینه سازی سنتی طراحی معادن روباز	در این بررسی دو محدوده‌ی فنی مجزا و گسترده کاربرد روش‌ها شبیه‌سازی در معدنکاری زغال ارائه شده است. رویکرد ارائه شده بر این اساس است که طرح‌های در حال توسعه سعی در جذب حداکثر توان بیشینه دارند، در حالی که ریسک نامطلوب را به حداقل می‌رسانند.

- 1- Basue
- 2- Fonseca
- 3- Richmond
- 4- Dimitrakopoulos

- 5 - Martinez
- 6 - Ramazan

ریچموند	دستورالعمل بهینه سازی ارزش خالص فعلی محدوددهی معادن روباز با	یک الگوریتم جدید بهینه سازی کاواک معادن روباز برای بررسی زمانبندی معدنکاری پیشنهاد شده است. همچنین برای محاسبه‌ی صریح چرخه های قیمت مواد و عدم قطعیت که می تواند بوسیله روش های شبیه سازی تصادفی مدل سازی شود نیز بکار گرفته می شود. الگوریتم این تکنولوژی جدید، شبیه سازی مونت کارلو و روش های بهینه سازی ابتکاری را درون یک سیستم کلی که به طور مستقیم NPV طرح های بهینه ی کاواک روباز را ارائه می دهد، گنجانده است.
گادی ^۱	تحلیل ریسک مبتنی بر چهارچوبی برای کاربرد در طراحی و برنامه ریزی راهبردی معدن	این مطالعه رویکردی را ارائه می نماید که شامل یک سری از روش ها برای ارزیابی ریسک در بهینه سازی و طراحی کاواک می باشد. هدف از این کار نشان دادن کاربردهای مختلف تحلیل ریسک روی تأثیرات عدم قطعیت عیار برای جنبه های مختلف بهینه سازی و طراحی کاواک معادن روباز بوده است. در این مطالعه تحلیل ریسک چهار مورد برای نشان دادن انواع مختلف کاربردها انجام شده است.
ویلیما ^۲ ، اسپینوزا ^۳ و مورنو ^۴	کنترل ریسک در محدوده‌ی نهایی با استفاده از شبیه سازی شرطی	در این کار برای کنترل ریسک، محدودیت های تصادفی در ارزش نهایی پیت در نظر گرفته شده است، این اندازه گیری بوسیله حل یک نسخه از برنامه نویسی تصادفی در ایجاد کاواک های نهایی گنجانده شده است. در این مسأله برنامه نویسی تصادفی با روش های قبلی مثل ایجاد کاواک نهایی برای هر شبیه سازی و روش کاواک پیوندی مقایسه شده است، و همچنین تأثیر استفاده از تعداد متفاوت شبیه سازی ها در ایجاد و ارزیابی کاواک های نهایی را مطالعه و بررسی شده است.
موسوی ^۵ ، فتحیانپور ^۶ و صیادی ^۷	کاربرد شبیه سازی شرطی در تعیین عدم قطعیت عیار بلوک های تخمینی در معدن فسفات اسفوردی	برای بررسی عدم قطعیت عیار در کانسار فسفات اسفوردی، ۵۰ شبیه سازی عیار انجام شده و برای تعیین عدم قطعیت عیار بلوک ها نیز از ضریب تغییرات که نسبت انحراف معیار به میانگین است، استفاده شده است، و در نهایت میزان ریسک برآورد شده و مورد تحلیل قرار گرفته است.
منجری ^۸ ، کاشانی ^۹ و عطائی ^{۱۰}	مطالعه‌ی مقایسه‌ای بین روش های شبیه سازی شرطی و کریجینگ در مدل سازی عیار معادن روباز	در این مطالعه، که بر روی کانسار مس سونگون انجام گرفته است، مدل های شبیه سازی شده نسبت به تخمینی علاوه بر مقادیر زیاد ماده معدنی قابل استخراج، ارزش خالص فعلی میانگین بیشتری (بمیزان ۴۰ درصد) را ارائه نموده اند.

۳-۳- نکات عملی تخمین کریجینگ و اعتبارسنجی

در این بخش نکات کلیدی و تأثیرگذار در فرآیند عملی تخمین و اعتبارسنجی به صورت مختصر بیان خواهد شد. در ابتدا در مورد برخی از پارامترهای تأثیرگذار در سه فرآیند اعتبارسنجی، تخمین

1- Godoy
2- Vielma
3- Espinoza
4- Moreno
5- Mousavi

6- Fathianpour
7- Sayyadi
8- Monjezi
9- Kashani
10- Ataei

کریجینگ و شبیه‌سازی که در روند اجرایی این طرح نیز استفاده شده است، نکات عملی عنوان خواهد شد. سپس در معیار اصلی انتخاب مدل واریوگرام مناسب برای تخمین و شبیه‌سازی توضیح داده خواهد شد.

۳-۳-۱- انتخاب پارامتر فاصله

دو پارامتر فاصله وجود دارد که لازم است انتخاب شوند. یکی فاصله‌ی بین لاگ‌ها^۱ یا گام‌های افزایشی^۲ است و دیگری دامنه‌ی تغییرات است که تغییر فاصله در آن محدوده مجاز خواهد بود. طرح نمونه‌برداری ممکن است که به عنوان یک افزایش معقول گام پیشنهاد شود. اگر نمونه‌ها روی شبکه‌ی شبه‌منظم یا کاذب قرار داشته باشند، فاصله‌داری شبکه نیز معمولاً یک فاصله‌ی مناسب برای گام‌ها خواهد بود. اگر نمونه‌برداری به صورت تصادفی باشد آن گاه تخمینی از فاصله‌ی میانگین بین نمونه‌های مجاور را می‌توان به عنوان فاصله‌ی اولیه‌ی گام‌ها در نظر گرفت. اگر طرح نمونه‌برداری به طور قابل ملاحظه‌ای ناهمسانگرد باشد، با فاصله‌داری کوچکتر نمونه‌ها در بعضی از راستاها نسبت به دیگر راستاها پارامتر فاصله به راستاها نیز بستگی خواهد داشت. یک مثال معمول، مجموعه داده نمونه‌برداری است که شامل عیارهای حاصل از هسته‌های حفاری بوده که فاصله‌داری نمونه‌ها در راستای قائم خیلی کمتر از فاصله‌ی افقی نمونه‌ها از یکدیگر است. در وضعیت‌های مشابه، یک واریوگرام تمام جهتی برای توسعه‌ی پارامترهای فاصله مناسب نخواهد بود در عوض باید جفت نمونه‌ها را گروه‌بندی نمود که فاصله‌داری‌های مشابه را به اشتراک می‌گذارند، برای مثال، با یک مجموعه داده‌ی گمانه حفاری یک واریوگرام که همه‌ی راستاهای افقی را ترکیب نموده است برای گسترش پارامترهای فاصله‌ی افقی مناسب خواهد بود، البته در صورتی که یک

^۱ - lag spacing

^۲ - lag increment

واریوگرام برای راستای قائم و برای گسترش پارامترهای فاصله‌ی قائم استفاده شده باشد (Deutsch and Journal, 2002).

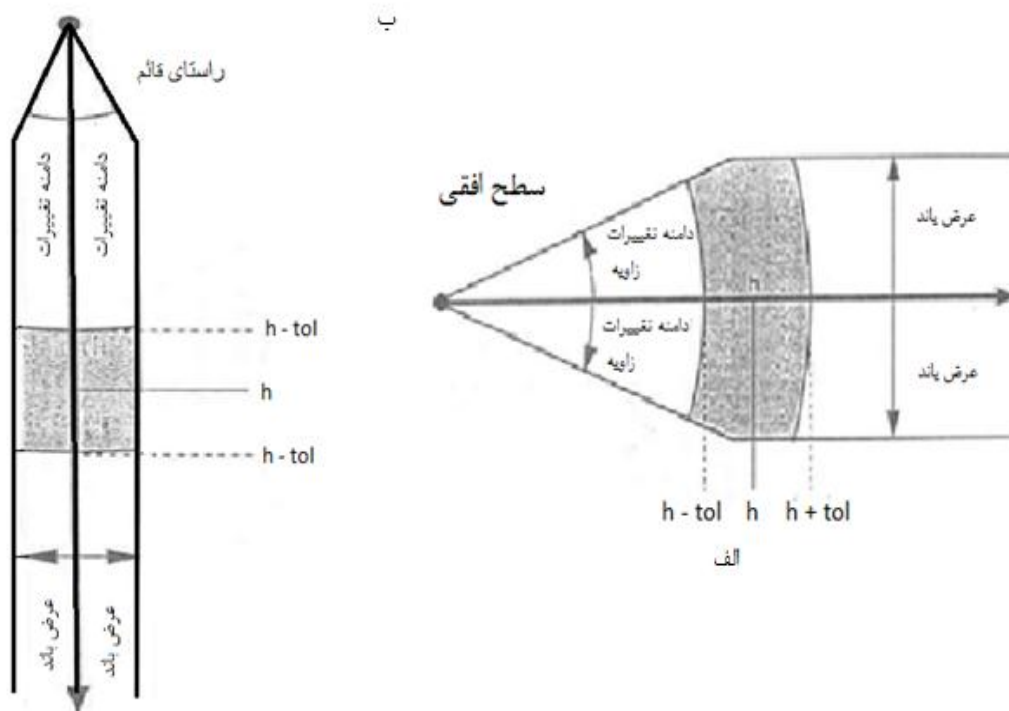
انتخاب معمول برای دامنه‌ی تغییرات گام‌ها نصف فاصله‌ی گام‌ها است. اگر نمونه‌ها روی یک شبکه‌ی منظم یا روی یک شبکه‌ی منظم کاذب واقع باشند، ممکن است یک دامنه‌ی تغییرات گام کوچکتر از نصف فاصله‌ی گام‌ها انتخاب شود. وجود نمونه‌های نزدیک به هم نیز در انتخاب پارامترهای فاصله مؤثر خواهد بود.

فاصله‌ی گام‌ها در راستای قائم نیز معمولاً از فاصله‌داری داده‌ها مطابقت می‌کند، هر چند که در انتها هر دو واریوگرام افقی و یک واریوگرام قائم به صورت هم زمان و با یکدیگر بررسی می‌شوند، و معمولاً برای محاسبه‌ی واریوگرام تجربی این مقدار برابر با فاصله‌ی کامپوزیت^۱ها در نظر گرفته می‌شود. پارامتر دیگر تعداد گام‌ها است که در این مورد نیز باید تعداد نمونه‌های شرکت کننده در محاسبات باید مناسب و کافی باشند. معمولاً تعداد گام‌ها را مقداری در نظر می‌گیرند که حاصل ضرب اندازه‌ی فاصله در تعداد گام-ها در هر جهت حداقل نصف شبکه را پوشش دهد تا واریوگرام محاسبه شده قابل اطمینان باشد. همچنین عرض باند^۲ و تلرانس زاویه^۳ نیز با توجه به هدف از محاسبه‌ی واریوگرام‌های تجربی و جهات محاسبه می‌تواند متغیر باشد. مقادیر آن در راستاهای افقی و قائم متفاوت بوده و در راستای قائم معمولاً کمتر از مقادیر آن در راستای افقی است. شکل (۱-۳-الف) و شکل (۱-۳-الف) تصویری از پارامترهای بیان شده در بالا را به ترتیب در راستاهای قائم و افقی را نشان می‌دهند (Deutsch and Journal, 2002).

^۱ - Composite

^۲ - Band Width

^۳ - Angle Tolerance



شکل (۱-۳) تصویر یک فاصله‌ی گام در دو راستا، (الف) راستای افقی h ، نوسان فاصله‌ی افقی، نوسان زاویه‌ی افقی، (الف) عرض باند، نوسان زاویه‌ی قائم و عرض باند قائم (After Deutsch and Journal, 2002)

در مراحل اولیه‌ی اکتشاف محاسبه‌ی واریوگرام ممکن است خیلی مشکل باشد. در این موارد، معمولاً مدل‌های واریوگرام کانسارهای مشابه می‌تواند برای تعیین فاصله‌داری گمانه‌ها تا جمع‌آوری داده‌های کافی استفاده شوند. همچنین در مراحل اکتشاف تفصیلی کانسار، راستاهای ناهمسانگردی‌ها نیز می‌تواند به عنوان راهنمایی برای فاصله‌داری گمانه‌های اکتشافی در جهات مختلف استفاده شود (Dowd, 1994).

۲-۳-۳- مدل‌سازی ناهمسانگردی

مهم‌ترین اختلاف بین تخمین یا شبیه‌سازی دو بعدی و سه بعدی نحوه‌ی بررسی ناهمسانگردی است. بعد سوم باعث افزایش زوایا و ضرایبی می‌شود که باید تعیین شوند. یک سری از واریوگرام‌های

متعامد در راستاهای متفاوت ایجاد می‌شود، تا اینکه سه واریوگرام تجربی متناظر با سه محور ناهمسانگردی یافت شود. ترکیبی که بیشترین اختلاف در دامنه‌ی واریوگرام‌ها داشته متناظر با محورهای اصلی خواهند بود. محور با بیشترین دامنه، بزرگترین محور اصلی خواهد بود. هنگام محاسبه‌ی واریوگرام‌های جهتی تجربی در سه بعد، دو زاویه آزیموت و شیب برای تعیین بردار راستا استفاده می‌شود. زاویه‌ی آزیموت زاویه‌ی اول چرخش است و چرخش ساعتگرد در صفحه‌ی افقی را ارائه می‌دهد که از جهت مثبت محور Y شروع می‌شود. زاویه‌ی شیب، زاویه‌ی دوم چرخش است که نمایانگر چرخش رو به پایین بردار از صفحه‌ی افق است. زوایای آزیموت و شیب می‌توانند برای تعیین یک واریوگرام تجربی در هر راستا استفاده شوند (Isaak and Srivastava, 1987).

بعد از آنکه ناهمسانگردی با استفاده از واریوگرام‌های تجربی آشکار شد، آنگاه ناهمسانگردی می‌تواند با استفاده از مدل واریوگرام مدل‌سازی شود که این کار هم با استفاده از روش واریوگرام جهتی و یا با روش ضرایب ناهمسانگردی قابل اجرا است. ساده‌ترین روش رویکرد واریوگرام جهتی است. اگر رویکرد واریوگرام جهتی استفاده شود، آنگاه یک مدل واریوگرام مجزا برای هر یک از سه محور قائم ساخته می‌شود. اگر روش ضرایب ناهمسانگردی استفاده شود، علاوه بر زوایای آزیموت و شیب متناظر با محور راستای اصلی باید زاویه‌ی سومی (زایه‌ی پلانچ^۱) برای چرخش محاسبه شود. زاویه‌ی پلانچ نمایانگر چرخش یا پیچش حول بردار راستا (که در حال حاضر بوسیله‌ی شیب و آزیموت چرخش یافته) است. راستای چرخش به صورت ساعتگرد تعریف می‌شود، هنگامی که از بردار راستا به سمت مرکز نگاه می‌شود. در بیشتر موارد، زاویه‌ی پلانچ می‌تواند مقدار صفر در نظر گرفته شود.

بعد از تعیین زوایای چرخش، مدل واریوگرام مناسب باید تعیین شده و به واریوگرام‌های تجربی در راستای اصلی به خوبی فیت شود. از واریوگرام برازش شده در راستای اصلی بزرگ دامنه‌ی واریوگرامی به

¹ - Plunge

دست می‌آید که با ضرب آن در ضریب ناهمسانگردی مقدار دامنه‌ی واریوگرام در راستای محور اصلی دوم (متوسط) به دست می‌آید (معمولاً این مقدار با دامنه‌ی به دست آمده از محاسبه‌ی جداگانه واریوگرام در راستای محور اصلی دوم یکسان نیست، که با تغییر ضریب ناهمسانگردی این مورد رفع می‌شود). در مورد محور سوم و نمودار آن نیز به همین نحو باید عمل نمود، تا نمودار مناسبی به واریوگرام‌های تجربی برازش شوند. بعد از آنکه ضرایب ناهمسانگردی مناسبی به دست آمد، آنگاه به کمک این ضرایب و دامنه‌ی واریوگرام‌ها باید بیضوی جتسجو تعریف شود، به طوری که با واریوگرام ناهمسانگردی مطابقت داشته باشد (Isaak and Srivastava, 1987).

۳-۳-۳- مدلسازی ناهمسانگردی با استفاده از روش مؤلفه‌های اصلی^۱

روش دیگر برای تعیین پارامترهای بیضوی ناهمسانگردی ترسیم ابرهای کوواریانس^۲ در یک فضای سه‌بعدی است. این روش برای نخستین بار توسط کریج^۳ در سال ۱۹۹۹ مطرح شده است. در این روش، هر دو نقطه که در فاصله‌ی h از یکدیگر در جهات مختلف قرار داشته باشند، با برداری به هم وصل می‌شود که ابتدای آن در مرکز مختصات و انتهای آن، با توجه به فاصله‌ی زوج نمونه‌ی بررسی شده و جهت آن‌ها نسبت به هم در فضای سه بعدی قرار می‌گیرد. در نهایت مجموعه‌ای از نقاط، در اطراف مبدأ مختصات تشکیل می‌شود. حال اگر به مرکز هر یک از این نقاط، کره‌ای به شعاع متناسب با کوواریانس زوج نمونه‌ها رسم شود، در نهایت فضایی از کره‌ها تشکیل می‌شود که بدان ابر کوواریانس می‌گویند. ابرهای کوواریانس تشکیل شود می‌توان با یک بیضوی به گونه‌ای برازش کرد که بیش‌ترین کشیدگی با محور بزرگ آن هم امتداد باشد. جهت‌هایی را که در آن‌ها بیضوی دارای کشیدگی است، جهت‌های ناهمسانگردی می‌نامند (جمالی اسفهلان و مدنی، ۱۳۸۸).

^۱ - Principal Components Method

^۲ - Covariance Clouds

^۳ - Krig

تعیین دقیق پارامترهای مورد نیاز برای بیضوی ناهمسانگردی از روی شکل و کشیدگی ابرکوواریانس مشکل به نظر می‌رسد، ولی با استفاده از روش مؤلفه‌های اصلی می‌توان این پارامترها را محاسبه کرد. به این صورت که بایستی مقدار ویژه و بردار ویژه‌ی بردارهای ماتریس تشکیل شده از کوواریانس در جهت محوره‌های x ، y و z را به دست آورد. ماتریس مورد نظر یک ماتریس 3×3 است.

$$\begin{bmatrix} \sum C_i x_i^2 & \sum C_i x_i y_i & \sum C_i x_i z_i \\ \sum C_i y_i x_i & \sum C_i y_i^2 & \sum C_i y_i z_i \\ \sum C_i z_i x_i & \sum C_i z_i y_i & \sum C_i z_i^2 \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

که در آن x ، y و z به ترتیب مؤلفه‌های x ، y و z بردار فضایی و C مقدار کوواریانس به ازای فاصله‌ی h است. مقدار ویژه و بردار ویژه‌ی ماتریس کوواریانس به ترتیب تعیین‌کننده‌ی محدوده و جهت بیضوی ناهمسانگردی است. بعد از تعیین مقادیر ویژه و نسبت آنها با تعیین دامنه‌ی واریوگرام در راستای اصلی ناهمسانگردی (بردار ویژه‌ی متناظر با بیشترین مقدار ویژه) دامنه‌ی واریوگرام در راستاهای دیگر ناهمسانگردی به دست می‌آید. راستای محوره‌های بیضوی ناهمسانگردی نیز همان طور که عنوان شد، از بردارهای ویژه قابل محاسبه است. برای تشکیل ماتریس کوواریانس در نظر گرفتن برخی پارامترها، تعیین‌کننده است. این پارامترهای شامل تعیین مناسب‌ترین طول گام در جهات اصلی، حذف مقادیر منفی کوواریانس و اختصاص مختصات منظم به کوواریانس‌های محاسبه شده است. در ارتباط با مورد اول راهکار مناسب بررسی واریوگرام‌هایی با طول گام‌های متفاوت در جهات اصلی و برازش بهترین مدل بر آن‌هاست تا از این طریق مناسب‌ترین طول گام انتخاب شود. در مورد حذف کوواریانس‌های منفی نیز علت القای پیوستگی مجازی و به وجود آمدن خطاهای نامطلوب به دلیل وجود مقادیر منفی کوواریانس است. و ولی اختصاص مختصات منظم به مقادیر کوواریانس محاسبه شده نیز برای جلوگیری از القای ناهمسانگردی مجازی به سیستم به سبب ناهمسانگرد بودن داده‌های اولیه است. چون که پراکندگی داده‌های حاصل از

گمانه‌های اکتشافی اغلب اوقات در جهات مختلف یکسان نمی‌باشد، بنابراین تعریف شبکه‌ی منظم برای کوواریانس‌های محاسبه شده اجتناب‌ناپذیر است.

تغییر موقعیت مختصاتی کوواریانس یک جفت نقطه، با توجه به فرضیات پایایی موجود قابل پذیرش است، زیرا در تمام فرضیات پایایی موجود شرط استقلال مقدار میانگین کمیت مورد نظر در یک فضای محدود تعریف شده به نام پایه (و وابسته نبودن آن به مختصات) آورده شده است. در واقع در این فرضیات ذکر می‌شود که میانگین متغیر ناحیه‌ای لازم است قالب h داشته باشد، و به مختصات وابسته نباشد. این فرض مشترک همه فرضیات پایایی است. اختلاف این فرضیات در درجه استقلال یا عدم استقلال گشتاورهای مرتبه دوم شامل هم پراش (کوواریانس) و پراش (واریانس) از مختصات است (مشکین فر، شیوایی و اسلامبول نساج، ۱۳۸۷).

۳-۳-۴- زوایای چرخش

ساختارهای زمین‌شناسی مطابق با سیستم‌های مختصات دکارتی ساده نیستند. کار در یک سیستم مختصاتی که مطابق با زمین‌شناسی منطقه چرخش یافته باشد، برای مدل‌سازی بهتر و مؤثرتر خصوصیات زمین‌شناسی ضروری به نظر می‌رسد.

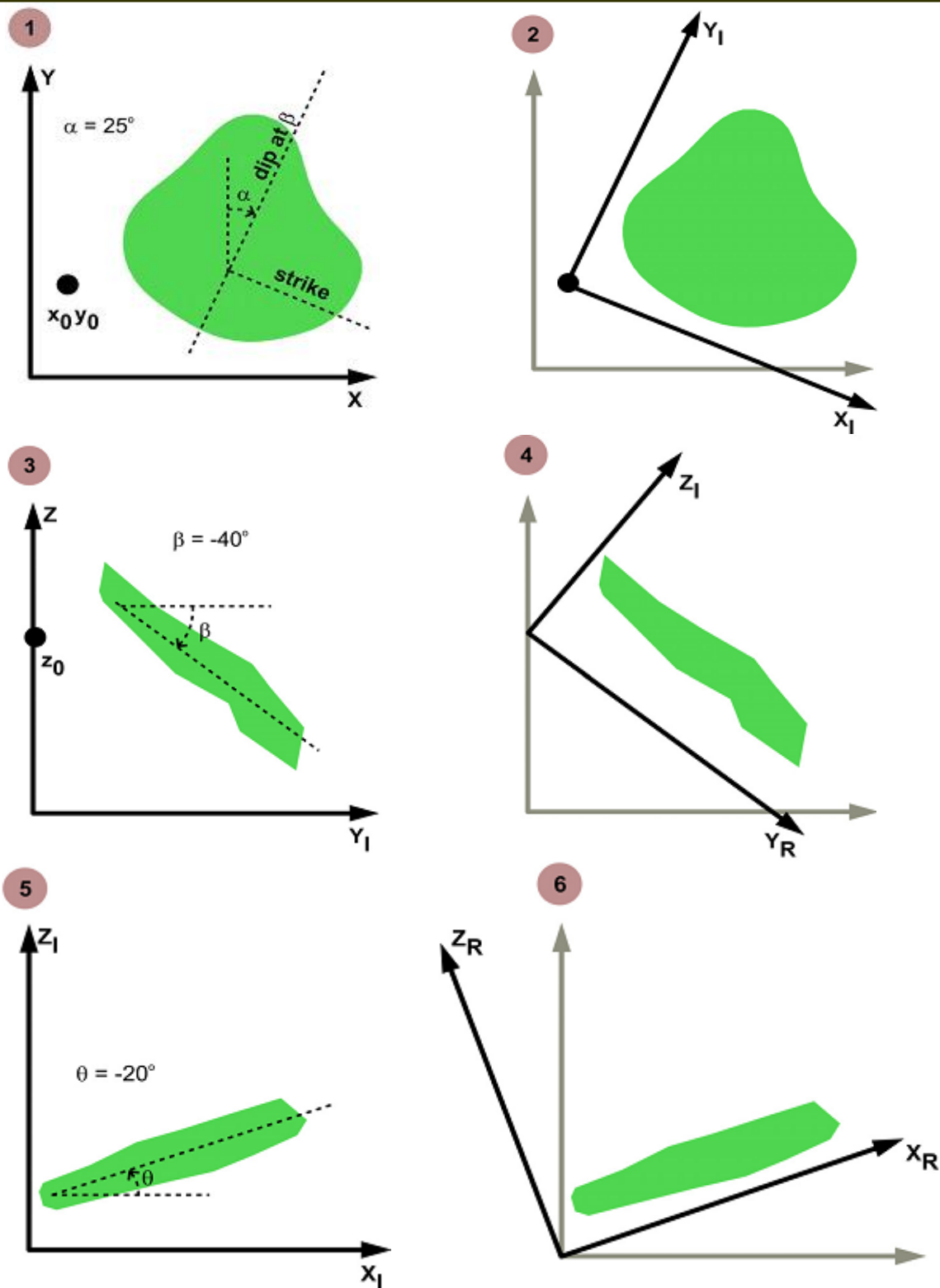
یافتن یک کانسار ماده معدنی در راستای شمال- جنوب با یک شیب صفر درجه خیلی نادر است. به همین منظور، محاسبه‌ی راستای مناسب این کانسارها قبل از هر مدل‌سازی سه بعدی ضروری است و نیازمند برخی تبدیلات مختصاتی است. کار با یک سیستم مختصات چرخش یافته مزایا و موانعی دارد. بعضی از مزایا عبارتند از: (الف) ناهمسانگردی درست کانسار می‌تواند در یک فرآیند مدل‌سازی مشخص شود، (ب) در درک و فهم بهتر زمین‌شناسی منطقه کمک می‌کند و (ج) زمان محاسباتی را کاهش می‌دهد. بعضی از موانع و اشکال‌های آن عبارتند از: (الف) تعیین راستای محور اصلی چرخش یافته سخت

است، به‌طوریکه چرخش‌ها پیچیده‌تر می‌شوند، و (ب) بعضی از موارد چرخش سیستم مختصات شاید خیلی ساده شده (Neufeld and Deutsch, 2001).

۳-۳-۵- روابط قرار دادی برای زوایای چرخش در GSLIB

سیستم‌های مختصات استفاده شده در GSLIB به این صورت است که راستای X در راستای شرقی، راستای Y در جهت شمال و راستای اصلی Z به صورت ارتفاع قائم و رو به بالا است. هدف، چرخش سیستم مختصات اصلی است تا در امتداد محور اصلی پیوستگی شیب رو به پایین و عمود بر مختصات‌های ساختاری یا همان پلانچ^۱ است. به بیان دیگر هدف از چرخش سیستم مختصات برای شناسایی محورهای اصلی ساختار بیضوی واریوگرام است. مختصات نهایی چرخش یافته‌ی X ، قطر اصلی بیضوی؛ محور مختصات Y ، قطر اصلی دوم بیضوی و محور مختصات Z ، نیز قطر کوچک بیضوی خواهد شد. این فرآیند از طریق سه چرخش متوالی انجام می‌شود. هر چرخش، یک صفحه‌ی تشکیل شده با دو محور مختصات را به دور محور مختصات سوم به اندازه‌ی یک زاویه‌ی معین می‌چرخاند. محور مختصات سوم محور چرخش و زاویه نیز زاویه‌ی چرخش نامیده می‌شود. زاویه‌ی چرخش همیشه خلاف جهت عقربه‌ی ساعت اندازه‌گیری می‌شود. در نتیجه اگر زاویه‌ی چرخش ساعتگرد اندازه‌گیری شود، یک علامت منفی خواهد داشت (Ying, 2001). در شکل (۳-۲) سه مرحله‌ی چرخش به صورت دو بعدی نشان داده شده است.

^۱-Plunge



شکل (۲-۳) تصویر دو بعدی از سه مرحله‌ی چرخش زوایا (Neufeld and Deutsch, 2001)

هر سه فرآیند چرخش می‌توانند به صورت یک ضریب ماتریسی تنها ترکیب شوند. در زیر ماتریس فوق‌الذکر و همچنین ماتریس مربوط به هر یک از چرخش‌ها آورده شده است. فرمول‌های ارائه شده در این بخش برای چرخش یک نقطه هستند، در حالی که مسأله‌ی مورد بررسی چرخش محورهای مختصات است (Neufeld and Deutsch, 2001).

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \theta + \sin \alpha \sin \beta \sin \theta & -\sin \alpha \cos \theta + \cos \alpha \sin \beta \sin \theta & -\cos \beta \sin \theta \\ \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ \cos \alpha \sin \theta - \sin \alpha \sin \beta \cos \theta & -\sin \alpha \sin \theta - \cos \alpha \sin \beta \cos \theta & \cos \beta \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

فرآیند چرخش می‌تواند در هر زمانی به وسیله‌ی معکوس نمودن این ماتریس یا به وسیله‌ی برگرداندن ترانزپوزی این ماتریس به حالت اول برگردانده شود. نکته‌ی قابل توجه این است که ماتریس معکوس و ترانزپوزی این ماتریس یکسان می‌باشند.

ماتریس چرخش و معکوس آن برای تبدیل سیستم مختصات نقشه‌ای قائم‌الزاویه یا هر سیستم مختصات محلی به یک سیستم مختصات معین که در امتداد ماده معدنی، شیب و راستای عمود بر ساختار تنظیم شده است، بسیار مفید و سودمند خواهد بود. مدل‌های زمین‌آماري در سیستم مختصات چرخش‌یافته $\{X_R, Y_R, Z_R\}$ محدود شده‌اند و همه‌ی مقادیر پس از آن به مختصات اولیه $\{X, Y, Z\}$ برگردانده می‌شوند.

در نرم‌افزار Gslib ماتریس چرخش با سه زاویه‌ی α ، β و θ تنظیم می‌شود. در حالی که در پارامترهای برنامه، پارامتر ang1 به صورت یک جهت قطب‌نمایی تعریف می‌شود (آزیموت، یا زاویه‌ی اندازه‌گیری شده برحسب درجه از شمال در جهت حرکت عقربه‌های ساعت است). زاویه‌ی α معادل ang1 در Gslib بوده و زوایای β و θ که نمایانگر شیب و پلانژ هستند، به ترتیب معادل ang2 و ang3 در Gslib

هستند (Ying, 2001). بنابراین استرایک یا راستای اصلی ناهمسانگردی است. نیز شیب ماده معدنی است. نیز پلانچ ماده معدنی و معادل α_3 در Gslib است.

۳-۳-۶- راه کار شعاع جستجو

برای روش‌های تخمین که می‌توانند هر تعداد از نمونه‌های نزدیک به نقطه یا محدوده‌ی تخمین را دستکاری نمایند، رویکرد رایج انتخاب نمونه‌های شرکت کننده در تخمین با تعیین یک همسایگی جستجویی است که همه‌ی نمونه‌های در دسترس مورد استفاده قرار گیرند. همسایگی یا محدوده‌ی جستجو معمولاً یک بیضوی متمرکز روی نقطه‌ی مورد تخمین است. راستای این بیضوی از ناهمسانگردی در طرح پیوستگی فضایی حاصل می‌شود. ناهمسانگردی بیضوی معمولاً از ناهمسانگردی مشاهده شده از برخی اندازه‌گیری‌های پیوستگی فضایی مثل واریوگرام نمونه‌ها تعیین می‌شود. اگر هیچ نوع ناهمسانگردی مشهودی وجود نداشته باشد بیضوی جستجو به یک دایره تبدیل می‌شود.

بعد از تعیین نوع روش جستجو و در ادامه راستای ناهمسانگردی و سایر پارامترهای آن مثل نسبت ناهمسانگردی برای بیضوی جستجو، باید در مورد میزان بزرگی ابعاد بیضوی جستجو و یا حتی شعاع دایره‌ی جستجو تصمیم‌گیری شود. در عمل دو عامل برای محدود نمودن اندازه‌ی محدوده‌ی جستجو وجود دارد. اولین مورد این است که استفاده از نمونه‌های بیشتر زمان محاسباتی مورد نیاز را افزایش می‌دهد. مورد بعدی نیز تأثیر نمونه‌های خارج از محدوده‌ی همبستگی بر سازگاری یک مدل تابع تصادفی پایدار است که بیشتر مورد شک و تردید قرار می‌گیرد.

بحث دیگری که در زمینه‌ی محدوده‌ی جستجو مطرح است، بررسی تکراری و اضافه بودن برخی از نمونه‌های نزدیک به هم است. یکی از راه‌کارهای معمول برای این مسأله جستجوی چارکی^۱ (ربعی یا

^۱-Quadrant Search

چهارگوشی) است که با تعیین حداکثر تعداد داده‌ها در هر چارک می‌توان زمان محاسبات را کنترل نمود (Goovaerts, 1997).

شعاع جستجو باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا امکان یک تخمین پایدار فراهم شود. اگر شعاع جستجو خیلی بزرگ در نظر گرفته شود، سطح حاصل از آن ممکن است خیلی هموار باشد. شعاع جستجو و حداکثر تعداد داده‌ها در شعاع جستجو با هم ارتباط متقابل دارند. اگر تعداد حداکثر داده‌ها به اندازه‌ی کافی کوچک در نظر گرفته شده باشد، آنگاه شعاع جستجو مهم نیست که چقدر بزرگ در نظر گرفته می‌شود، و بالعکس. تنظیم استقرایی شعاع جستجو به مقدار کمتر از دامنه همبستگی، در کل یک عمل اشتباه است. زیرا در کریجینگ معمولی داده‌های دورتر (خارج از محدوده‌ی دامنه‌ی همبستگی) نیز برای تخمین مجدد محلی متوسط (یا میانگین) شرکت می‌کنند (Deutsch and Journel, 1998).

۳-۷-۳- حداکثر و حداقل تعداد داده‌ها برای تخمین

هر چه داده‌های (نمونه‌های) بیشتری برای تخمین استفاده شود، آنگاه هموارشدگی تخمین‌ها بیشتر آشکار می‌شود. در کل باید داده‌های کافی‌ای برای تخمین استفاده شود به طوری که تخمین پایدار باشد و هیچ نوع ناپیوستگی مجازی را ارائه ندهد. کریجینگ معمولی امکان محاسبه، تعبیر و تفسیر را برای همه‌ی داده‌ها در شعاع جستجو فراهم می‌سازد، حتی اگر آن‌ها با نقطه‌ای که تخمین زده می‌شود، همبستگی نداشته نباشند. چون که متوسط تخمین‌ها تلویحاً به طور موضعی یا محلی مجدداً تخمین زده می‌شود. به این دلیل استفاده از حد بیشینه ممکن است در صورتی که توان کامپیوتری اجازه دهد مناسب باشد. نکته‌ی قابل توجه اینجاست که زمان محاسباتی وارون‌سازی ماتریس افزایش می‌یابد، همان‌طور که تعداد نمونه‌ها به توان سه می‌رسد. حداقل داده‌هایی که در تخمین شرکت داده می‌شود، نیز علاوه بر زمان محاسبات در دقت محاسبات نیز تأثیرگذار است، البته تأثیر داده‌های حداقل روی زمان محاسبات منفی و روی دقت تخمین تأثیر مثبت را دارد. همچنین در صورتی که در محدوده‌ی شعاع جستجوی تعریف

شده، به اندازه‌ی مقدار حداقل تعریف شده برای این پارامتر داده یافت نشود آنگاه بلوک بدون تخمین باقی می‌ماند (Deutsch and Journal, 1998).

۳-۳-۸- ریز بلوک‌سازی^۱

ریز بلوک‌سازی یک به یک معادل با کریجینگ نقطه‌ای است، با سطح‌های بزرگ‌تر ریز بلوک‌سازی نیازمند انجام کریجینگ بلوکی است. هنگامی که اندازه‌ی بلوک نسبت به میانگین فاصله‌داری داده‌ها افزایش می‌یابد، آنگاه واریانس تخمین به خاطر میانگین‌گیری کوچک مقیاس خطاها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. سطح ریز بلوک‌سازی نسبت به اندازه‌ی ابعاد بلوک مهم نیست. اگر سطح ریز بلوک‌سازی کم باشد، آنگاه مقادیر تخمینی در برخی نقاط منفی خواهد شد. با افزایش سطح ریز بلوک‌سازی این مقادیر منفی، کم شده و در حالت مطلوب از بین می‌روند. به عنوان مثال، اگر سطح ریز بلوک‌سازی ۱۰ در نظر گرفته شود، آنگاه هر بلوک به ۱۰ بلوک ریزتر تقسیم شده و هر یک از بلوک‌ها جداگانه تخمین زده شده و از میانگین‌گیری این ۱۰ مقدار یک مقدار نهایی عیار بلوک به دست می‌آید (Deutsch and Journal, 1998).

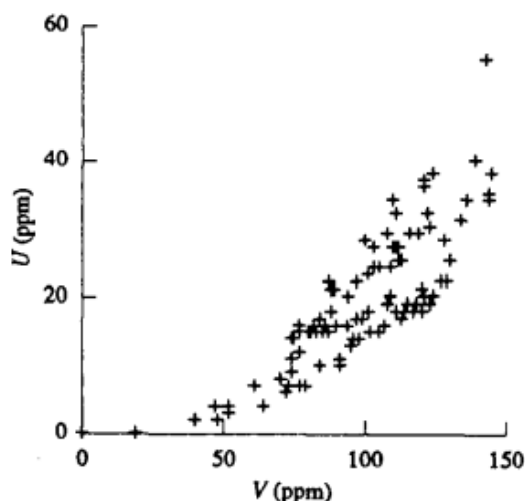
۳-۳-۹- نمودار پراکندگی^۲

بهترین نمایشگر داده‌های دومتغیره نمودار پراکندگی است که یک نمودار $x-y$ داده‌هایی است که روی مختصات x متناظر با مقدار یک متغیر و محور مختصات y متناظر با مقدار متغیر دیگر است. یک نمونه از نمودار پراکندگی در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. با وجود اینکه مقداری پراکندگی در ابر (توده‌ی) نقاط وجود دارد، اما مقادیر بزرگتر محور افقی به مقادیر بزرگتر محور قائم متمایل هستند، و

¹ - discretization

² - Scatter Plot

مقادیر کوچک نیز به همین نحو است. در مراحل اولیه مطالعه‌ی یک مجموعه داده‌ای که ارتباط فضایی دارند، مرتب‌سازی و بررسی داده‌ها لازم است. موفقیت و کامیابی هر روش تخمین به داده‌های معقول و قابل اطمینان بستگی دارد. حتی بعد از آنکه داده‌ها مرتب شوند، تعداد کمی از داده‌های نامنظم ممکن است، تأثیر زیادی روی تخمین داشته باشند. نمودار پراکندگی می‌تواند برای کمک به اعتبارسنجی داده‌های اولیه و درک نتایج بعدی مفید باشد (Isaak and Srivastava, 1987).



شکل (۳-۳) نمودار پراکندگی مقادیر U در مقابل مقادیر V (Isaak and Srivastava, 1987)

۳-۳-۱۰- رگرسیون خطی

یک ارتباط قوی بین دو متغیر برای پیش‌بینی یکی از متغیرها در حالت ناشناخته بودن متغیر دیگر می‌تواند مفید باشد. ساده‌ترین دستورالعمل برای این نوع پیش‌بینی، رگرسیون خطی است. جایی که ما فرض می‌کنیم که ارتباط یک متغیر با متغیر دیگر می‌تواند بوسیله‌ی معادله‌ی خطی زیر توصیف شود.

$$y = ax + b \quad (۳-۳)$$

در رابطه (۳-۳) شیب a و مقدار ثابت b را می‌توان به وسیله‌ی روابط زیر به دست آورد:

$$a = \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad b = m_y - a.m_x \quad (۴-۳)$$

شیب a ، حاصل ضرب ضریب همبستگی با نسبت انحراف معیارها است که σ_x ، انحراف معیار متغیر معلوم و σ_y ، انحراف معیار متغیر مجهول هستند. همچنین m_x و m_y ، به ترتیب متوسط مقادیر داده‌های معلوم و مجهول است.

رابطه (۳-۳) مقادیر پیش‌بینی شده‌ی y را در صورتی که مقادیر x معلوم باشند، ارائه می‌دهد. حال اگر بخواهیم مقادیر x را در صورتی که مقادیر y شناخته شده باشند محاسبه نماییم، آنگاه معادله‌ی آن با رابطه‌ی (۳-۳) متفاوت خواهد بود. همچنین خط رگرسیون حاصل برای این دو معادله و نمودار پراکندگی آنها نیز یکسان نخواهد بود، به بیان دیگر نمودارهای پراکندگی و خطوط رگرسیون هر دو حالت بر مبنای اینکه کدام متغیر روی محورهای x و y قرار گیرند؛ متفاوت خواهند بود. در هر دو حالت خطوط رگرسیون محورهای x یا y را در نقطه‌ای غیر از صفر قطع خواهند نمود. بنابراین عرض از مبدأ یا طول از مبدأ وجود خواهد داشت که همان مقدار ثابت b می‌باشد و برای مقادیر معلوم کمتر از این مقدار، مقدار پیش‌بینی شده منفی خواهد بود که پیش‌بینی معقولی نخواهد بود، زیرا مقادیر پیش‌بینی شده هرگز منفی نخواهد بود و بی‌معنی است. رگرسیون خطی ساده تخمین‌های مثبت را تضمین نمی‌کند. بنابراین درک رایج تأکید می‌کند که مقادیر داده‌ها همیشه مثبت هستند، پس مناسب‌ترین راه حل تنظیم پیش‌بینی‌های منفی به صفر یا بررسی نمودن شکل‌های دیگر رگرسیون است، به طوری که این محدودیت‌ها را ملاحظه و رعایت نماید (Isaak and Srivastava, 1987).

۳-۴- نتیجه گیری

در این فصل مدل‌سازی ناهمسانگردی که به دو روش جهتی و استفاده از ضرایب ناهمسانگردی است توضیح داده شده است. سپس روش مؤلفه‌های اصلی که برای تعیین راستای ناهمسانگردی و محدوده‌ی جستجو در صورت استفاده از ضرایب ناهمسانگردی مناسب می‌باشد، به اختصار تشریح شده است. زوایای چرخش نیز به همراه روابط قراردادی آن در GSLIB تشریح شده است. شعاع جستجو و

حداکثر و حداقل داده‌های شرکت کننده در تخمین نیز به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر یکدیگر بیان شده است، به گونه‌ای که با افزایش شعاع جستجو می‌توان تعداد داده‌های شرکت کننده در تخمین را محدود نمود تا از هموارشدگی بیشتر جلوگیری شود. در ادامه نیز بعد از بیان ریزبلوک‌سازی و تأثیر آن در فرآیند تخمین، به برخی از معیارهای مورد استفاده در فرآیند اعتبارسنجی اشاره شده است.

فصل چهارم

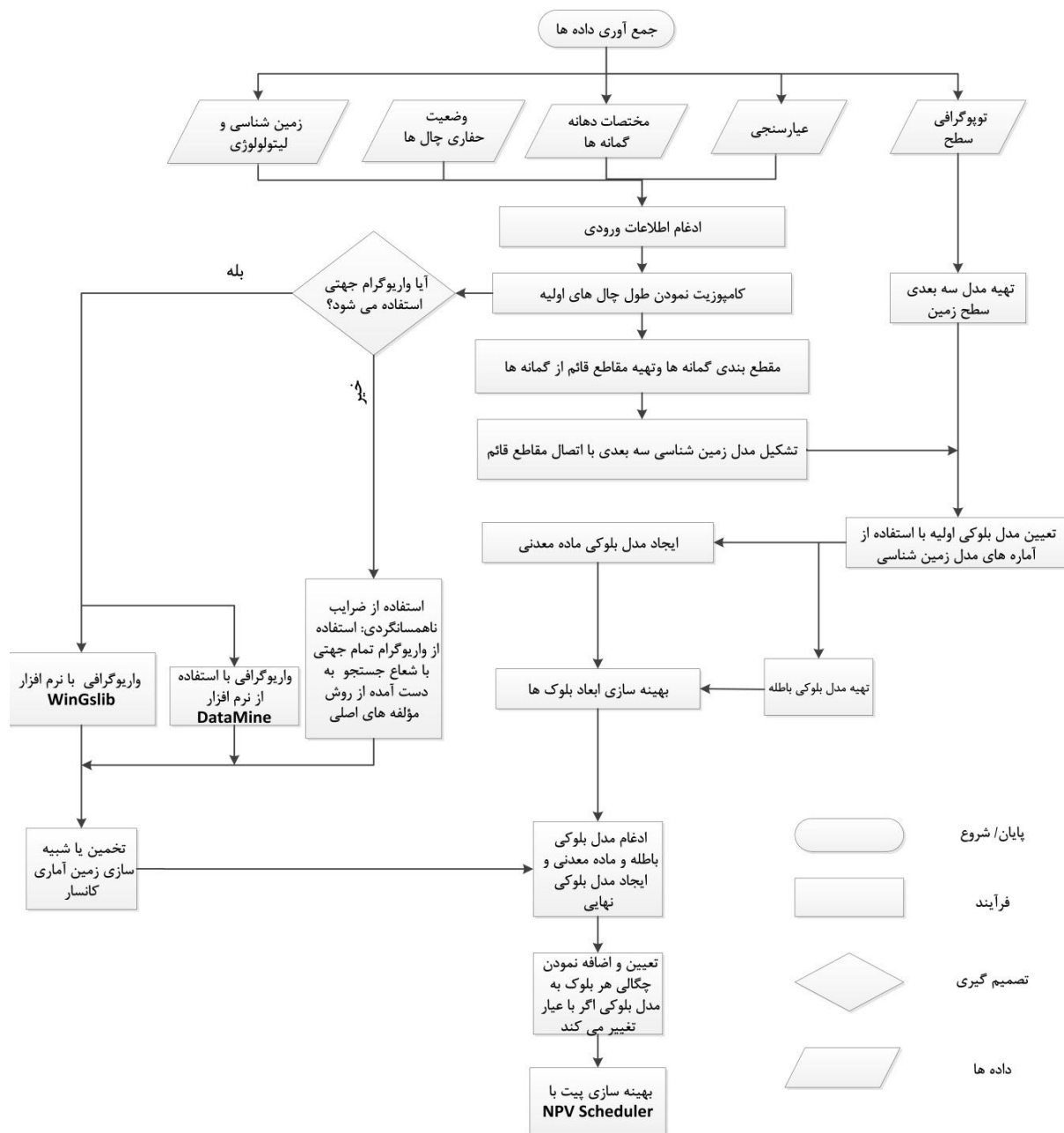
مدل سازی و ارزیابی ذخیره ی کانساردردوی

۴-۱- مقدمه

روند اجرایی این پروژه از بخش‌های اصلی مدل‌سازی، بررسی و برآورد زمین‌آماري، بهینه‌سازی و تعیین عدم قطعیت و ریسک طراحی پیت تشکیل شده است که در ادامه سعی شده است با روند نماهای ارائه شده همراه با توضیحات مفصل‌تر به تشریح این مراحل پرداخته شود.

۴-۲- مدل‌سازی کانساردردوی با استفاده از نرم‌افزار DataMine

برای مدل‌سازی پیکره‌ی ماده معدنی نرم‌افزارهای زیادی وجود دارند که اغلب آن‌ها انحصاری بوده و تنها در اختیار شرکت‌های بزرگ معدنی و دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی خاص است. یکی از این نرم‌افزارها DataMine است که به علت در دسترس بودن این نرم‌افزار، راحتی کار با آن و سازگاری مناسب با نرم‌افزار بهینه‌سازی NPV Scheduler از آن برای مدل‌سازی کانسار سنگ آهن دردوی استفاده شده است. روند کلی فرآیندهای صورت گرفته در راستای مدل‌سازی سه بعدی مدل زمین‌شناسی و مدل بلوکی و همچنین تخمین عیار مدل بلوکی در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. همچنین نمای کلی استفاده‌ی ترکیبی از نرم‌افزار DataMine و نرم‌افزارهای زمین‌آماري مثل WinGslib برای تخمین و شبیه‌سازی سه بعدی ذخیره‌ی ماده معدنی نیز در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.

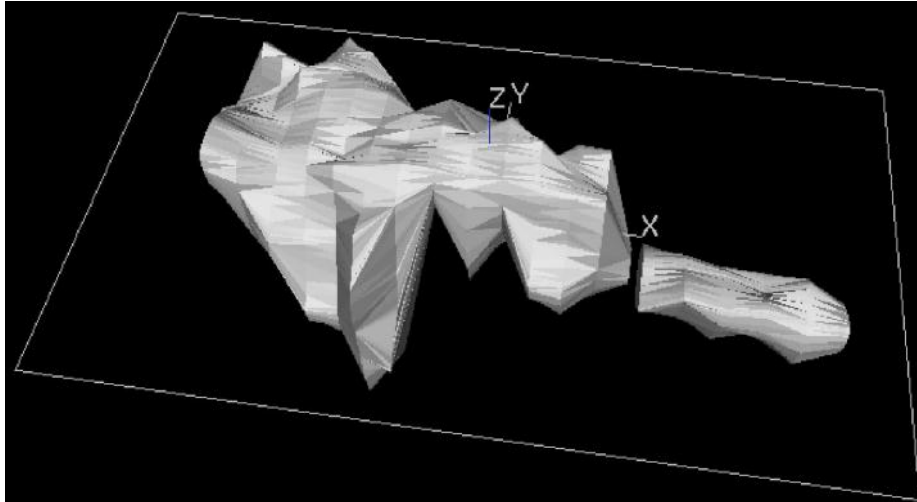


شکل (۱-۴) روند کلی مدل سازی، تخمین و شبیه سازی سه بعدی تا مرحله ی بهینه سازی

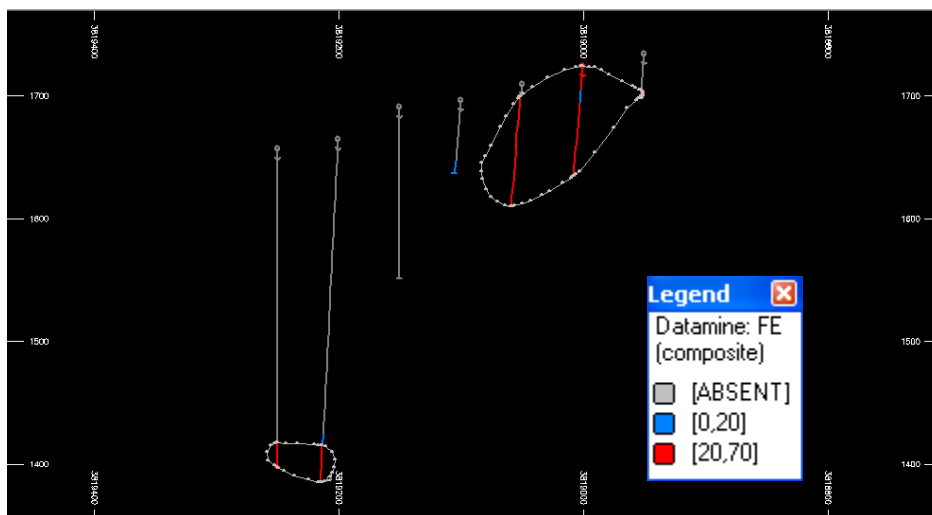
در مجموع در این کانسار ۱۷۹ گمانه به منظور عملیات اکتشافی حفر شده است، ولی تنها اطلاعات ۱۵۴ گمانه در دسترس است (تا زمان این مطالعه). بنابراین مدل سازی بر مبنای اطلاعات این ۱۵۴ گمانه انجام شده است. متراژ کل آن ها ۳۸۲۳۷/۲ متر است. با توجه به حفاری های انجام شده بیشترین عمق

گمانه‌ای که فاری شده ۴۴۲/۱ متر و کمترین عمق آن حدود ۵۴/۵ متر است. گمانه‌های حفر شده در این آنومالی اکثراً به صورت قائم هستند. برای تشکیل مدل زمین‌شناسی، عیار گمانه‌ها به طول ۱۰ متر (ارتفاع پله‌های استخراجی) کامپوزیت شده‌اند. به دلیل پراکندگی و ناپیوسته بودن عیار گمانه‌های اکتشافی عیارهای بالای ۲۰ درصد برای تشکیل استرینگ‌ها به عنوان عیار مرزی به کار گرفته شده است (در معدن دردوی و در زمان این مطالعه عیارهای بالای ۲۰ درصد تا عیار حد در بخش کم عیارها دپو می‌شوند). در شکل (۲-۴) مدل زمین‌شناسی ایجاد شده در نرم‌افزار DataMine برای کانسار دردوی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳-۴) نشان داده شده است ماده معدنی در بخشی از آن گسسته است که تنها دلیل این امر کمبود اطلاعات عیار و زمین‌شناسی در این بخش از کانسار می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۳-۴) نشان داده شده است گمانه‌هایی که در این بخش زده شده است هم از عمق کافی برخوردار نیستند و هم این که بنابر اطلاعات عیارسنجی هیچ گونه عیاری حتی عیار زیر ۲۰ درصد هم ثبت نشده است. بنابراین در مقطع مربوط به این ردیف از گمانه‌ها استرینگی که براساس عیار بسته می‌شود به صورت دو بخش مجزا تشکیل می‌شود. علاوه بر آن همان‌طور که در شکل (۴-۴) نیز نشان داده شده است راستای این دو قسمت گسسته از پیکره‌ی ماده معدنی در امتداد یکدیگر قرار ندارد. بنابراین حتی با یک دست نمودن استرینگ‌های مذکور (اتصال دو استرینگ جدا به یکدیگر) در مقطع مورد نظر، پیکره‌ی ماده معدنی شکل معقولانه‌ای نخواهد داشت. بعد از تشکیل مدل زمین‌شناسی با اطلاعات آماری حاصل از آن مدل بلوکی اولیه، باطله و ماده معدنی تشکیل شده است. ابعاد بلوک‌ها در راستاهای X ، Y و Z معمولاً به ترتیب اندازه‌ی یک چهارم فاصله‌ی گمانه‌های اکتشافی و ارتفاع پله‌های معدن در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که ابعاد شبکه‌ی اکتشافی برای کانسار دردوی در راستای شمال - جنوب و شرق - غرب، ۵۰ متر و ارتفاع پله‌های معدن نیز ۱۰ متر است. بنابراین ابعاد بلوک‌ها در راستای X ، Y و Z به ترتیب ۱۵، ۱۵ و ۱۰ متر در نظر گرفته شده است که در نتیجه‌ی آن تعداد ۱۶۷۰۷ بلوک تشکیل شده است. همچنین

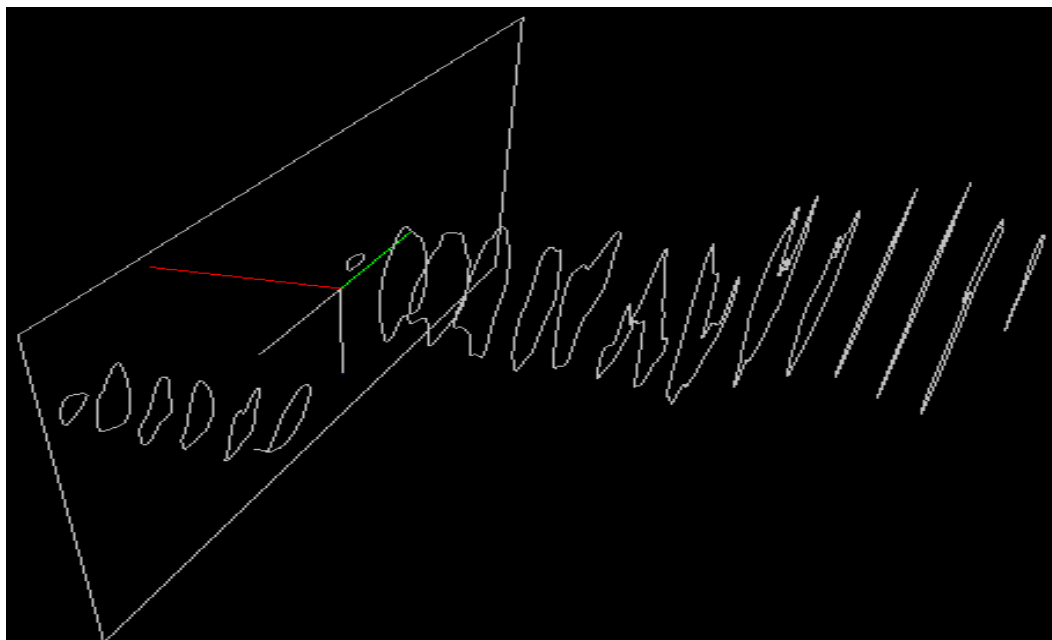
بدلیل این که در مرحله‌ی شبیه‌سازی کار با ریز بلوک‌ها مشکل است بنابراین از ایجاد ریز بلوک‌ها صرف نظر شده است.



شکل (۲-۴) مدل زمین‌شناسی ایجاد شده در نرم‌افزار DataMine برای کانسار در دوی



شکل (۳-۴) مقطع مربوط به بخش گسسته‌ی پیکره‌ی ماده معدنی

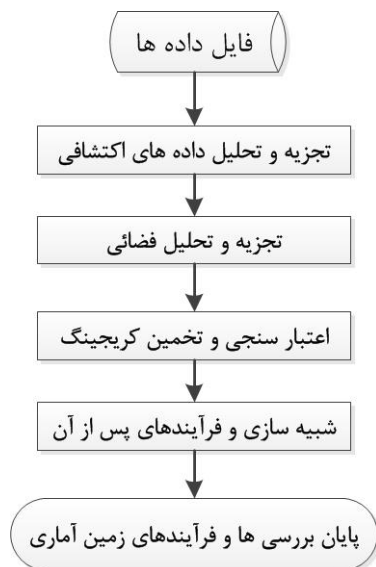


شکل (۴-۴) اختلاف امتداد راستاهای دو قسمت مجزای پیکره‌ی ماده معدنی در یک نمای سه بعدی از کل استرینگ‌های ایجاد شده برای تشکیل پیکره‌ی ماده معدنی (دید از قسمت پائین پیکره‌ی ماده معدنی)

۳-۴- ارزیابی و تخمین ذخیره

در اکثر نرم‌افزارهای برای ارزیابی و تخمین ذخیره روند کلی‌ای وجود دارد که بسته به اهداف مورد نظراز بخش‌هایی مثل تجزیه و تحلیل داده‌ها، پیش پردازش‌ها^۱، تجزیه و تحلیل واریوگرام، مدل‌سازی زمین‌آماري، پس‌پردازش و در برخی موارد کنترل عیار تشکیل می‌شوند. هدف این بررسی‌ها انجام تجزیه و تحلیل زمین‌آماري برای محاسبه ذخیره‌ی دربرگیرنده‌ی کانسارهای مواد معدنی است. شکل (۴-۵) روند کلی فرآیندهای مختلف ارزیابی ذخیره را نشان می‌دهد.

^۱ -Preprocessing



شکل (۴-۵) نمای کلی از روند بررسی ها و فرآیندهای زمین آماری

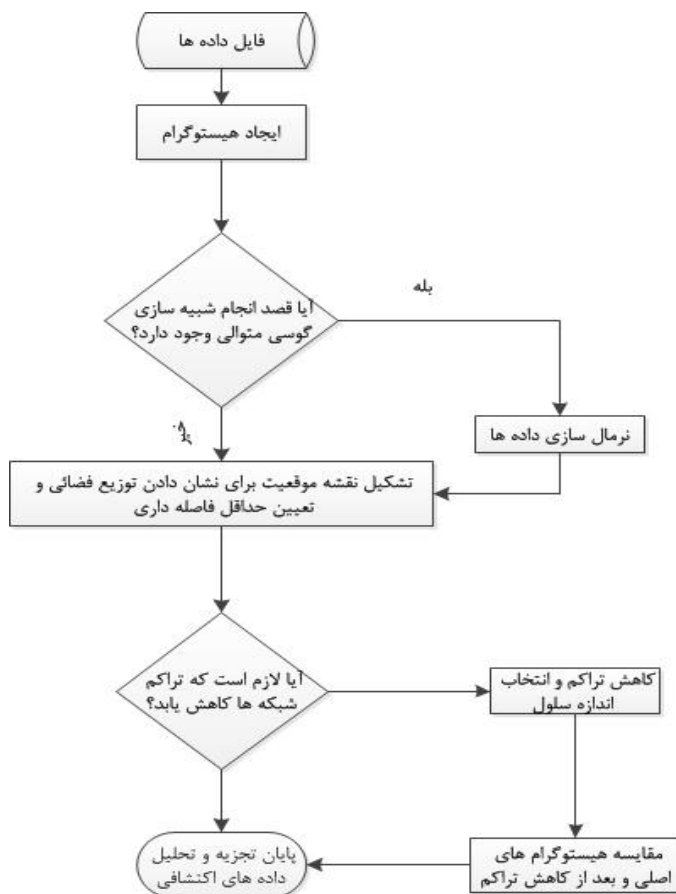
۴-۳-۱- داده‌های اولیه

داده‌های حاصل از عیار سنجی و اطلاعات زمین‌شناسی کانسار یا منطقه‌ی مورد بررسی باید تنظیم و مرتب شود و با یک فرمت و قالب مناسب برای تجزیه و تحلیل آماده شوند. در مورد کانسار سنگ آهن در دودی اطلاعات زمین‌شناسی در اختیار نبوده و تنها اطلاعات عیارسنجی موجود است که در قالب یک شبکه‌ی اکتشافی نسبتاً منظم با فاصله‌ی ۵۰ متر در راستای شمال به جنوب و شرق به غرب است. همچنین در راستای قائم نیز عمق گمانه‌ها یکسان نبوده که به علت متفاوت بودن مغزه‌ها^۱ برای یکسان‌سازی آن‌ها همان‌طور که قبلاً نیز بیان شده است به کمک نرم‌افزار DataMine داده‌های اولیه به فواصل ۱۰ متر (ارتفاع پله‌های معدن) با هم کامپوزیت شده و سپس برای وارد نمودن به نرم‌افزار WinGslib به فرمت مناسب تبدیل و تنظیمات لازم انجام گرفته است.

^۱ - Samples

۴-۳-۲- تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی

نمای کلی از روند تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی در شکل (۴-۶) نشان داده شده است.



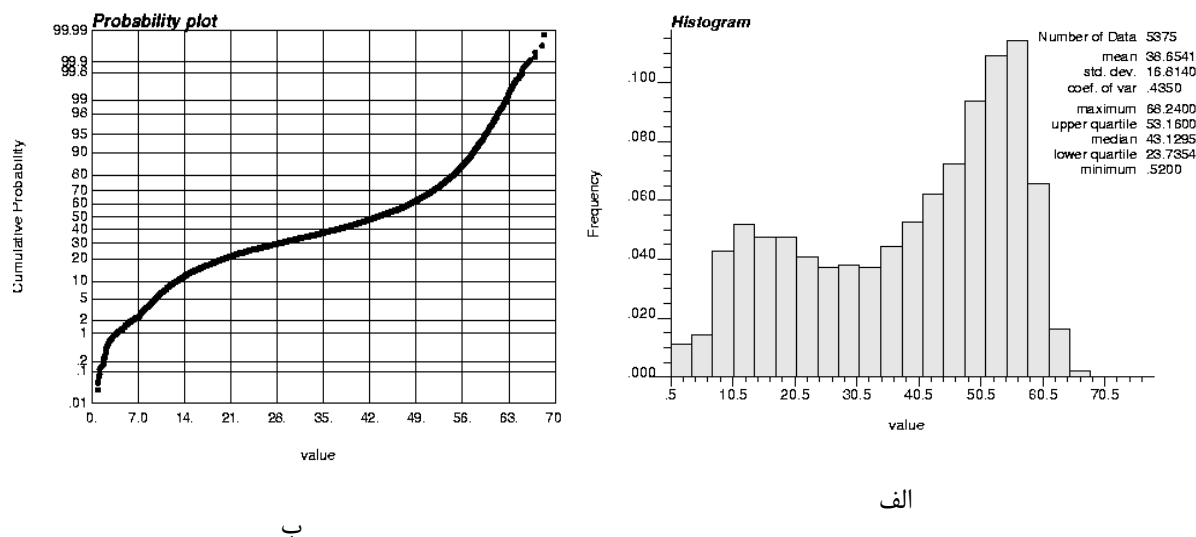
شکل (۴-۶) روند نمای کلی تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی

۴-۳-۲-۱- هیستوگرام

یکی از کاربردهای نمودار هیستوگرام تشخیص نوع توزیع داده‌های اولیه است. شکل (۴-۷-الف) و شکل (۴-۷-ب) به ترتیب هیستوگرام و نمودار احتمال داده‌های اولیه‌ی عیار آهن (Fe) کانسار سنگ آهن دردوی را نشان می‌دهد. از مشخصه‌ی بارز هیستوگرام داده‌های کانسار دردوی، دو نمایی یا دومدی^۱ بودن توزیع داده‌های اولیه است که در این شرایط انجام هر گونه فرآیندی بر روی آن نیازمند جداسازی داده‌ها

^۱ - Bimodal

به دو بخش می‌باشد. ولی از آنجا که برای تخمین و شبیه‌سازی که از اهداف این مطالعه است، داده‌ها به توزیع نرمال تبدیل می‌شود. بنابراین به جای مدل‌سازی با توزیع دومدی با توزیع نرمال مدل‌سازی خواهد شد.

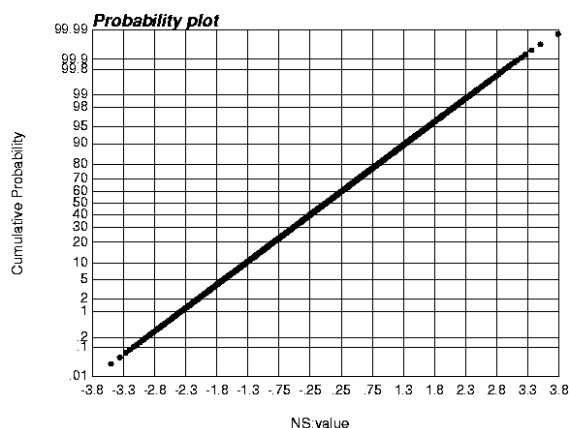


شکل (۴-۷) آماره‌های داده‌های اولیه (الف) نمودار هیستوگرام و (ب) نمودار احتمال داده‌های اولیه

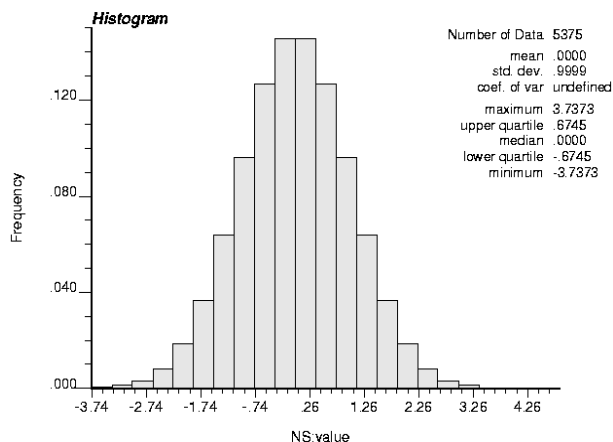
۴-۳-۲-۲- نرمال‌سازی داده‌ها

در بررسی طبیعت توزیع داده‌های معدنی اعم از اکتشافی و استخراجی، توزیع نرمال از اهمیت خاصی برخوردار است. تاریخچه‌ی استفاده از توزیع نرمال برای داده‌های اکتشافی بسیار طولانی است. علت این امر را می‌باید در خصوصیات منحصر به فرد این نوع توزیع خاص و همچنین در نبود توزیع فراگیر و مناسب دیگری جستجو کرد. اغلب می‌توان داده‌های اکتشافی را با تبدیل مناسب نرمال در نظر گرفت. اکثر روش‌های آماری (به جز روش‌های غیر پارامتری) فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها را به همراه دارند. اگر داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند، میانگین جامعه‌ی نمونه، تخمین معتبرتری از میانگین جامعه‌ی کل به دست می‌دهد. همچنین بسیاری از روش‌های آماری برای بیان سطح اعتماد و آزمون‌های خود فرض نرمال بودن داده‌ها رابه عنوان شرط اولیه در نظر می‌گیرند (Davis, 2002).

در شکل (۴-۸ الف) و شکل (۴-۸ ب) نمودار احتمال و هیستوگرام داده‌های نرمال شده نشان داده شده است. (اگر توزیع داده‌های اولیه نرمال نباشد برای تخمین به روش کریجینگ و بررسی‌های زمین آماری لازم است که توزیع داده‌ها نرمال شده و بعد از تخمین نیز تبدیل معکوس انجام می‌شود. برای شبیه‌سازی نرمال‌سازی و تبدیل معکوس می‌تواند به صورت پیوسته به وسیله‌ی الگوریتم انجام گیرد.



ب



الف

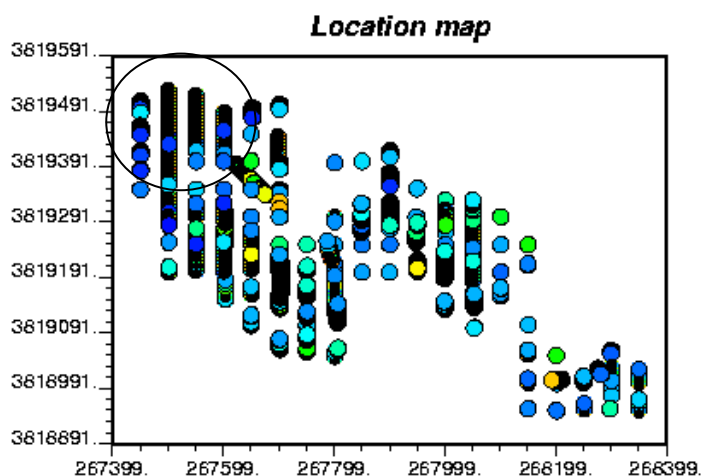
شکل (۴-۸) هیستوگرام و نمودار احتمال داده‌های نرمال شده (الف) هیستوگرام (ب) نمودار احتمال

۴-۳-۲-۳- نقشه موقعیت

برای ارائه‌ی گزارشی مختصر از مجموعه داده‌ی دو بعدی، نقشه موقعیت اغلب مناسب‌ترین گزینه است. نقشه‌ی موقعیت داده‌های اولیه برای تشخیص دسته‌بندی یا تراکم و پراکندگی داده‌های اولیه استفاده می‌شود. شکل (۴-۹) نقشه‌ی موقعیت داده‌های اولیه را ارائه می‌دهد. همان‌طور که از شکل بر می‌آید برخی از چال‌ها شیب‌دار می‌باشند.

۴-۳-۴- منظم‌سازی نمونه‌ها

داده‌ها اغلب به صورت فضایی دسته‌بندی یا گروه‌بندی شده هستند، حال آنکه ما نیاز به هیستوگرامی داریم که نمایانگر فضای یکپارچه و کاملی از محدوده‌ی مورد نظر باشد. برای به دست آوردن یک توزیع نمونه اختصاص وزن‌های کاهش تراکم یکی از رویکردها است، به گونه‌ای که مقادیر در فضاهایی با داده‌های بیشتر وزن کمتری از داده‌های موجود در فضاهای با پراکندگی بیشتر دریافت نمایند. از آنجا که در نمونه‌برداری از کانسار سنگ آهن در دوی تقریباً به صورت منظم صورت گرفته است، بنابراین نیازی به منظم‌سازی نمونه‌ها نیست. البته نسبت فاصله‌ی نمونه‌ها در افق و در عمق با هم متفاوت است. همان‌طور که در شکل (۴-۹) نیز قابل مشاهده است برخی از گمانه‌ها شیب‌دار می‌باشند.



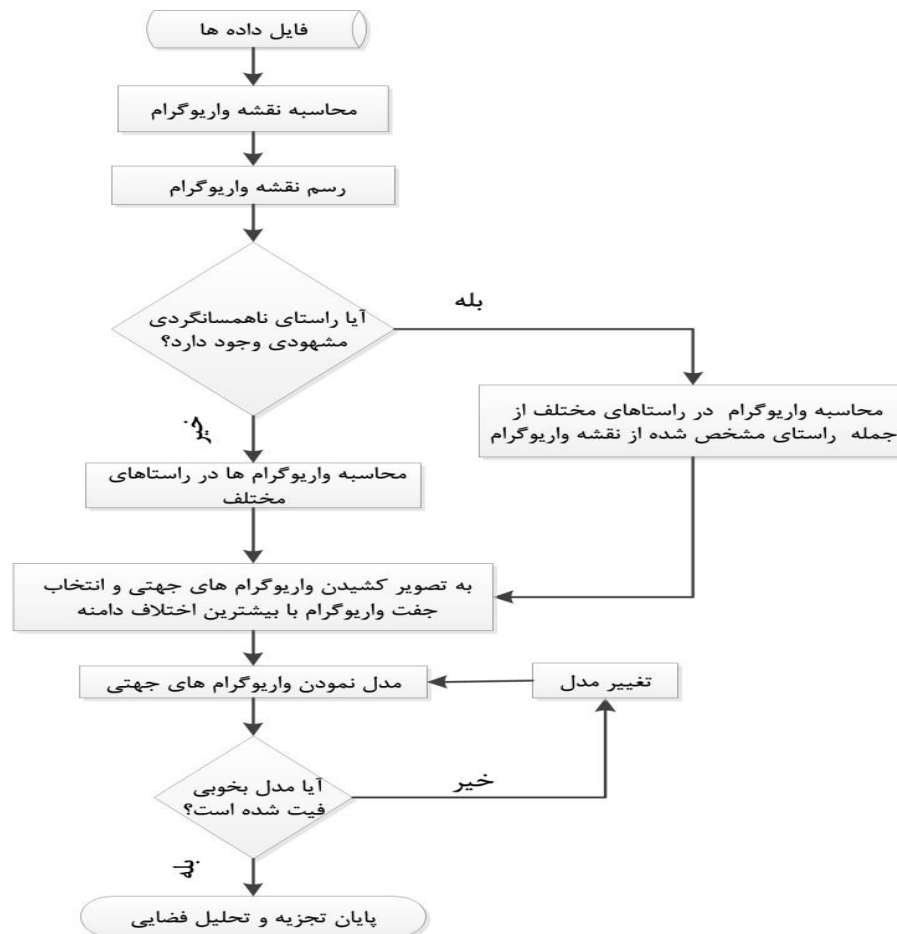
شکل (۴-۹) نقشه‌ی موقعیت داده‌های اکتشافی

۴-۴- تجزیه و تحلیل فضایی

روند کلی فرآیندهایی که برای تجزیه و تحلیل فضایی داده‌ها استفاده شده است در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است. این بخش از کار عبارت از تعیین پیوستگی فضایی متغیر مورد نظر و شامل (الف) ارزیابی عددی و بصری پیوستگی داده‌ها در راستاهای مختلف، (ب) محاسبه‌ی واریوگرام سه‌بعدی، و (پ) برازش یک مدل واریوگرام به نقاط تجربی است.

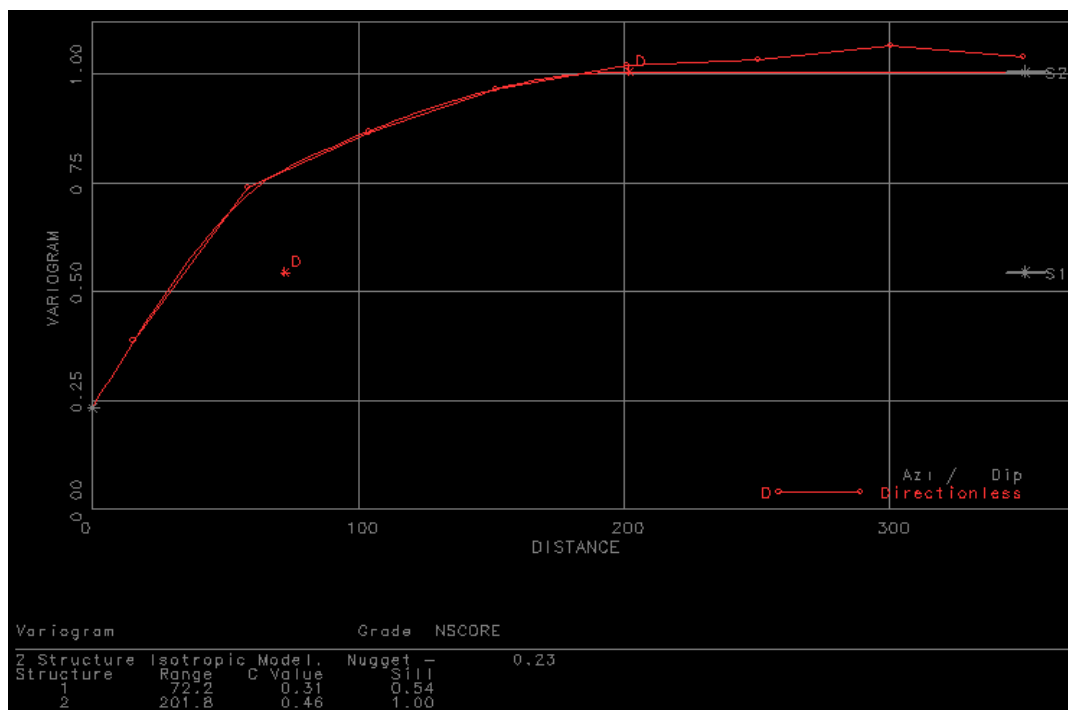
۴-۴-۱- محاسبه‌ی واریوگرام تجربی

برای محاسبه واریوگرام تمام جهتی^۱ داده‌های نرمال شده‌ی کانسار در دوی پارامترهای تنظیم شده به این صورت بوده است که تعداد لاگ‌ها ۷ و فاصله‌ی گام‌ها ۵۰ متر و میزان دامنه‌ی نوسان گام‌ها ۲۵ متر در نظر گرفته شده است. شکل (۴-۱۱) واریوگرام تجربی تمام جهتی محاسبه شده را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات مدل واریوگرام برازش شده بر آن‌ها که یک مدل کروی با دو ساختار تودرتو است در این شکل نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۰) روند نمای کلی تجزیه و تحلیل فضایی

^۱ - Omnidirectional



شکل (۱۱-۴) نمودار واریوگرام تجربی و مشخصات مدل برازش شده بر آن

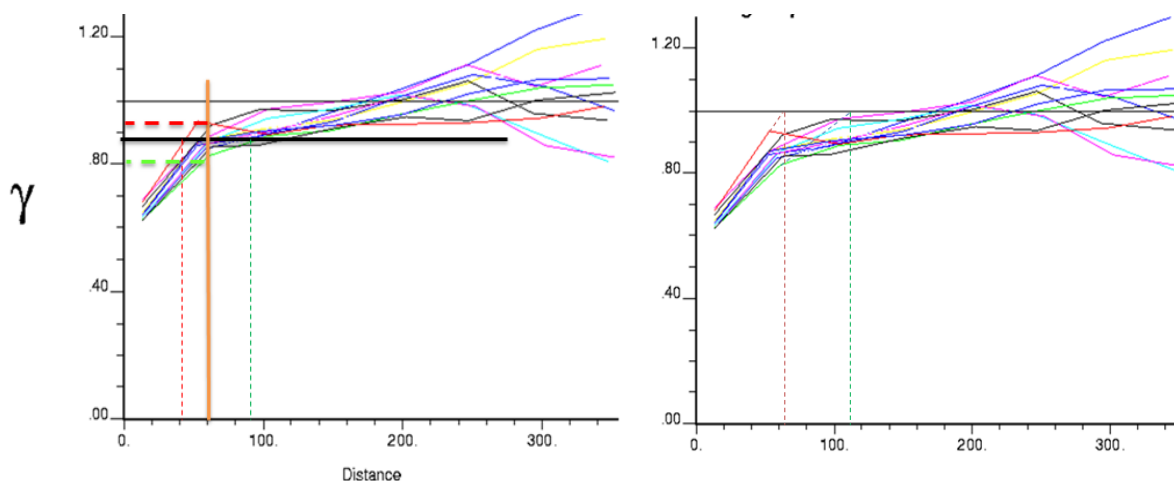
۲-۴-۴- تعیین راستای اصلی ناپیوستگی

در این بخش برای تعیین راستای اصلی ناپیوستگی (اگر از واریوگرام استفاده می‌شود) و یا پیوستگی (اگر از کوواریانس استفاده شود) از روش‌های متداول برای اطمینان از نتیجه‌ی به دست آمده استفاده شده است. همچنین به کمک روش مؤلفه‌های اصلی نیز می‌توان به این مهم دست یافت (البته اگر روش ضرایب ناهمسانگردی برای مدل‌سازی ناهمسانگردی استفاده می‌شود) که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته خواهد شد.

۱-۲-۴-۴- تعیین راستاهای ناهمسانگردی با استفاده از روش دستی

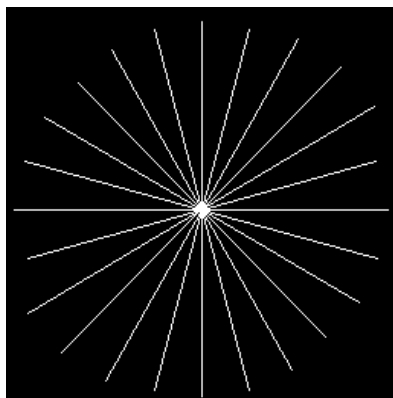
برای تشخیص ناهمسانگردی در جهات مختلف ۱۸ واریوگرام با زوایای افزایشی ۱۰ از آزیموت صفر محاسبه شده است که در شکل (۱۲-۴) نتایج نشان داده شده است. دو روشی که در مرجع‌های زمین-

آماري برای هدف یکسان (تشکیل دیاگرام رز) با اجرای نسبتاً متفاوت نسبت به هم به کار گرفته شده‌اند، برای داده‌های مورد بررسی نیز اجرا شده است که هر دو نتایج یکسانی را نشان می‌دهند (Goovaerts, 1997, (Isaak and Srivastava, 1987).

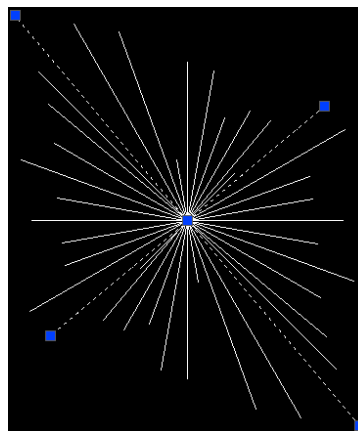


شکل (۴-۱۲) واریوگرام‌های جهتی در راستاهای مختلف و نحوه‌ی تشکیل دیاگرام رز دامنه و واریانس واریوگرام‌ها تجربی

شکل (۴-۱۳) دیاگرام رز مقادیر دامنه و واریانس واریوگرام‌های تجربی در راستاهای مختلف را نشان می‌دهد. بعد از محاسبه‌ی واریوگرام در راستاهای مختلف و بنابر نتایج این محاسبات راستای بیشترین پیوستگی در آزمون ۱۴۰ الی ۱۳۵ درجه و کمترین پیوستگی در راستای ۴۵ الی ۵۰ درجه تشخیص داده شده است (در حقیقت، بیشترین دامنه در آزمون ۱۴۰ درجه رخ می‌دهد و بیشترین اختلاف دو واریوگرام راستای اصلی و راستای عمود بر آن به ترتیب در آزمون‌های ۱۳۵ و ۴۵ اتفاق می‌افتد. حال آنکه این دو موضوع باید هر دو در یک آزمون یا همان راستای ناهمسانگردی اصلی رخ دهد که این تناقض ناشی از نامناسب یا کافی نبودن داده‌ای اولیه است).



ب

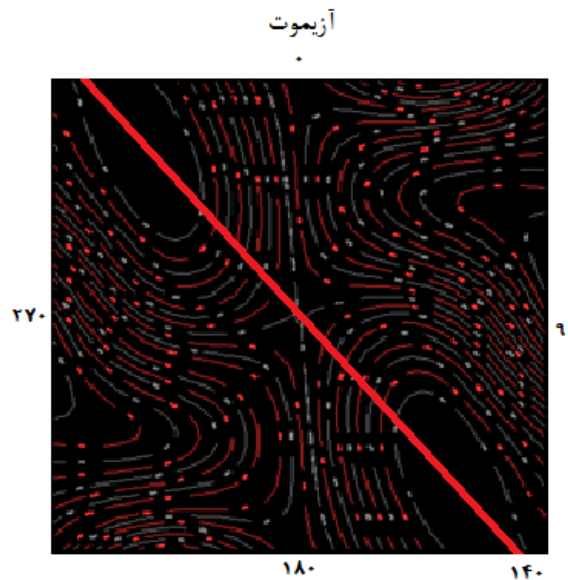


الف

شکل (۴-۱۳) دیاگرام رز واریوگرام‌ها در جهات مختلف، (الف) دیاگرام رز دامنه، و (ب) دیاگرام رز واریانس .

۴-۲-۲-۴- تعیین راستاهای ناهمسانگردی از طریق کنترل سطوح واریوگرام

یک نقشه‌ی واریوگرام یا نقشه‌ی کنترل سطوح واریوگرامیک راه آسان (در صورت منظم بودن داده‌ها) برای تعیین سریع راستاهای اصلی پیوستگی است. زوایای تعیین شده از این طریق برای محاسبه‌ی واریوگرام‌های تجربی جهت استفاده خواهد شد. نمونه‌ای از کنترل سطوح واریوگرام که با استفاده از نرم‌افزار DataMine و روی داده‌های نرمال شده‌ی کانسار در دوی انجام گرفته است در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است؛ که راستای تقریبی ۱۴۰ درجه را به عنوان راستای ناهمسانگردی اصلی نشان می‌دهد. نقشه‌های کنترل سطوح واریوگرام از داده‌های اولیه در عمل کمتر استفاده می‌شود.

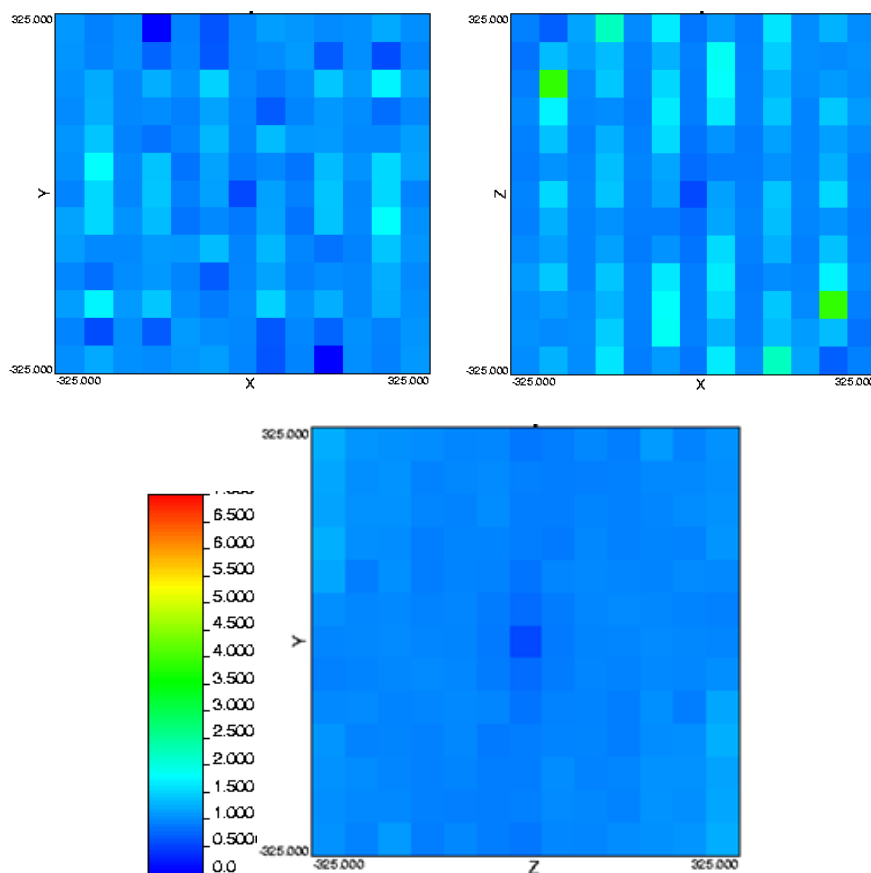


شکل (۴-۱۴) کنتور سطوح واریوگرام‌های تجربی محاسبه شده با نرم‌افزار DataMine برای کانسار دردوی

۴-۲-۳- تعیین راستاهای ناهمسانگردی با استفاده از نقشه‌ی واریوگرام

برای مجموعه داده‌های خیلی نامنظم، مقادیر واریوگرام درون گام‌های چهارگوش مختلف برای تولید یک نقشه واریوگرام مفید شاید خیلی نامنظم باشد. بنابراین رویکرد رایج مقایسه‌ی واریوگرام‌های تجربی محاسبه شده در راستاهای مختلف است که در قسمت قبل نیز این روش بکار گرفته شده است. اما روش دیگری که توسط کوشاوند و همکارانش در سال (۲۰۰۷) ارائه شده است نیز برای بررسی جهات ناهمسانگردی استفاده شده است. این روش موثرتر بوده و راستای ناهمسانگردی را به طور واضح و روشن آشکار می‌سازد. در این روش در ابتدا واریوگرام تمام جهتی محاسبه می‌گردد و بهترین مدل به مقادیر تجربی برازش می‌شود. سپس به وسیله‌ی کریجینگ معمولی و واریوگرام تمام جهتی ناحیه‌ی مورد بررسی تخمین زده می‌شود. پس از آن نقشه واریوگرام با مقادیر تخمین زده شده محاسبه می‌شود. به علت تأثیر هموارسازی کریجینگ نقشه‌ی واریوگرامی حاصل می‌شود که محورهای ناهمسانگردی را به خوبی آشکار می‌سازد. یکی از دلایل برای استفاده از واریوگرام تمام جهتی برای تخمین ناحیه‌ی مورد بررسی بدین دلیل است؛ که واریوگرام تمام جهتی جفت نمونه‌های بیشتری از هر واریوگرام جهتی را در بر می‌گیرد. از

این رو برای نشان دادن واضح یک ساختار قابل تفسیر مفیدتر خواهد بود (Kushavand, Aghababei, and Alizadeh, 2007). شکل (۴-۱۵) نقشه‌ی واریوگرام داده‌های اولیه را در سه صفحه‌ی مختلف نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۵) نقشه واریوگرام در سه صفحه XY، XZ و YZ

همان‌طور که از شکل‌ها نیز بر می‌آید؛ با این نتایج تشخیص جهات ناهمسانگردی سخت بوده و طبق شواهد هیچ نوع ناهمسانگردی مشاهده نمی‌شود. ولی روش دستی خلاف این امر را ثابت نموده است و کانسار مورد بررسی در راستای ۱۴۰ در جهت‌داری بیشترین پیوستگی فضایی است. بنابراین بعد از تخمین کانسار با واریوگرام تمام جهتی نسبت به محاسبه‌ی نقشه‌ی واریوگرام اقدام شده است که نتایج در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در فصل سوم و در بخش مدل‌سازی ناهمسانگردی عنوان شده است، بسته به استفاده از واریوگرافی جهتی و یا ضرایب ناهمسانگردی باید زوایای چرخش را

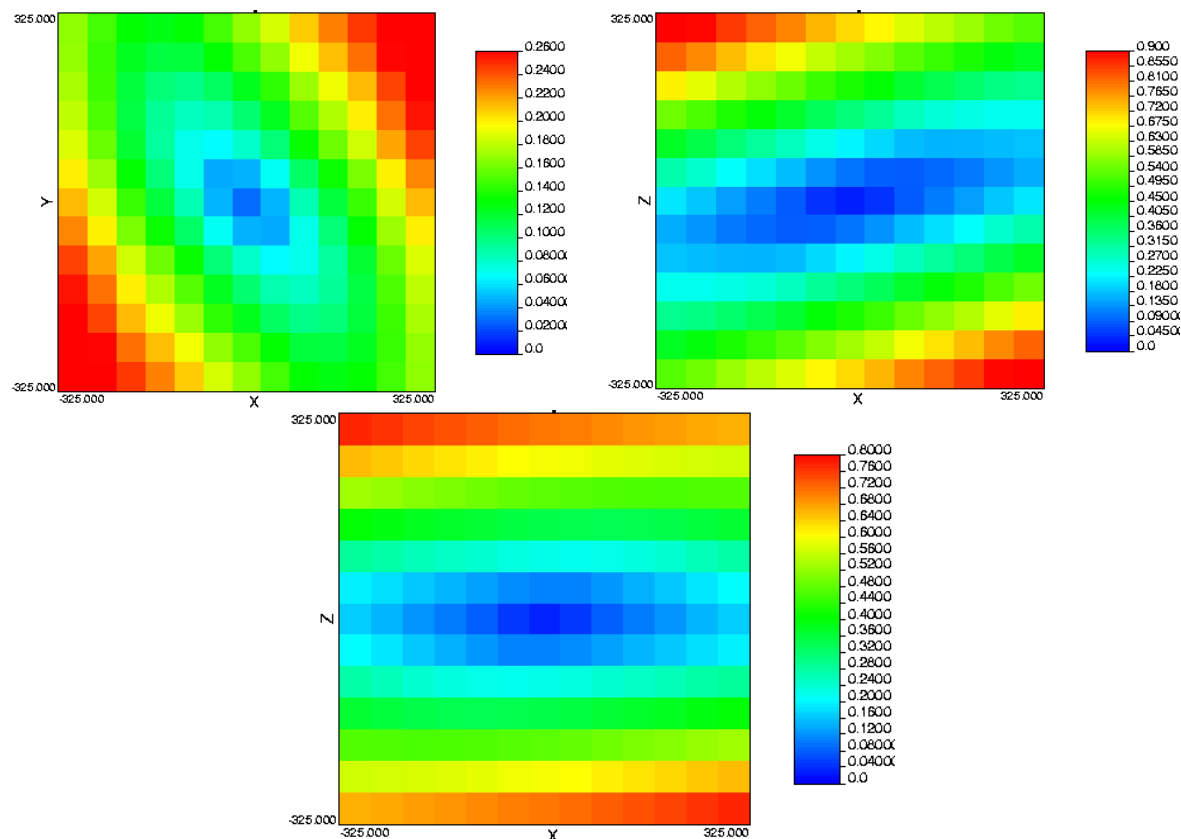
مشخص نمود که برای تعیین این زوایا می‌توان از راستای ناهمسانگردی در صفحات نقشه‌ی واریوگرام استفاده نمود. طبق بررسی‌های اولیه انجام شده حتی نتایج اعتبارسنجی نشان از کارایی فرآیند تخمین با اعمال زوایای چرخش داشته است. یعنی اینکه فرآیند اعتبارسنجی هم با اعمال زوایای چرخش بررسی شده و هم بدون اعمال آن‌ها که نتایج در کلیه معیارها نشان از برتری هر چند خفیف حالت اعمال زوایای چرخش داشته است (اعتبارسنجی در این مرحله با واریوگرام تمام جهتی و بیضوی جستجوی بدست آمده از روش مؤلفه‌های اصلی نیز انجام شده است).

۴-۴-۳- محاسبه‌ی واریوگرام‌های جهتی

با استفاده از زوایای تعیین شده در مرحله‌ی قبل واریوگرام‌های جهتی در راستاهای تعیین شده و راستای قائم محاسبه می‌شوند. در شکل (۴-۱۷-الف) و شکل (۴-۱۷-ب) واریوگرام‌های جهتی تجربی با نقطه‌های رنگی نشان داده شده است. نقاط سبز، قرمز و مشکی به ترتیب معرف واریوگرام‌های تجربی در راستاهای ۱۴۰، ۵۰ و قائم می‌باشند.

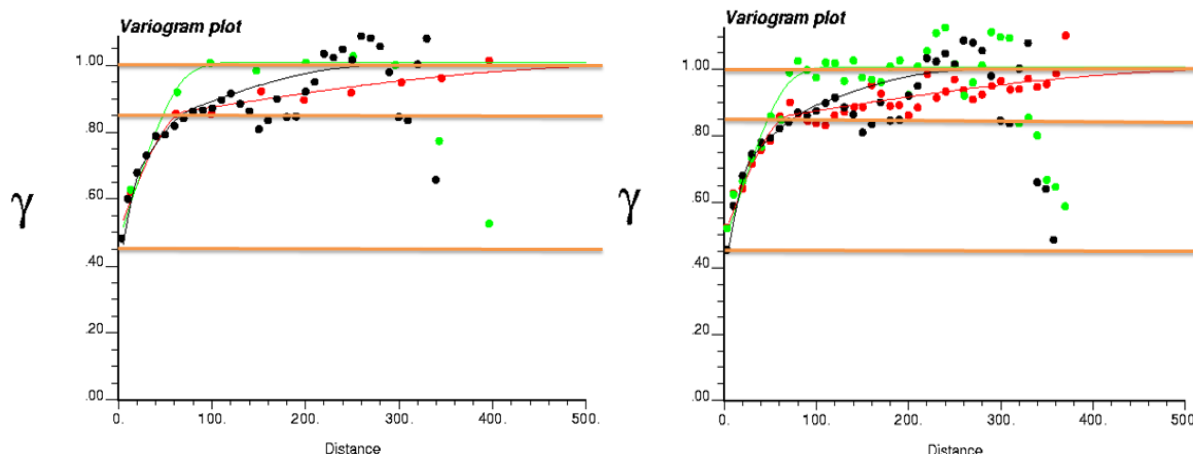
۴-۴-۴- برازش مدل واریوگرام

با بررسی‌های متعدد مناسب‌ترین مدل‌ها به واریوگرام‌های تجربی برازش شده‌اند که نتایج در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است. نقاط و خطوط قرمز، سبز و مشکی رنگ به ترتیب بیانگر واریوگرام‌های تجربی و مدل‌های برازش شده‌ی متناظر با آزمون‌های به ترتیب ۱۴۰ و ۵۰ درجه و راستای قائم هستند. برای دستیابی به مدل نهایی واریوگرام، سه واریوگرام جهتی همزمان باهم بررسی شده و در نهایت مدل واریوگرامی به عنوان مدل نهایی انتخاب شده است که در فرآیند اعتبارسنجی بین این مدل‌ها (شکل (۴-۱۷-الف و شکل (۴-۱۷-ب) و مدل حاصل از روش مؤلفه‌های اصلی و نرم‌افزار DataMine بهترین عملکرد را داشته است.



شکل (۴-۱۶) نقشه‌ی واریوگرام بعد از تخمین با واریوگرام تمام جهتی در سه صفحه YZ و XZ ، XY .

معیارهای انتخاب مدل برتر در فصل دوم و در بخش اعتبارسنجی بیان شده است. علاوه بر آن نحوه‌ی مقایسه‌ی مدل‌ها با این معیارها نیز در این فصل و در بخش بعدی بیان خواهد شد. شکل‌های شکل (۴-۱۷-الف) و شکل (۴-۱۷-ب) مدل‌های واریوگرام برازش شده به واریوگرام‌های تجربی را به تصویر می‌کشند. در مدل شکل (۴-۱۷-الف) هر سه واریوگرام‌های تجربی با فاصله‌ی گام‌های ۱۰ متر محاسبه شده است. حال آن‌که که در مدل واریوگرام شکل (۴-۱۷-ب) به جز فاصله‌ی گام‌های قائم که ۱۰ متر است فاصله‌ی گام‌ها در دو واریوگرام‌ها جهتی دیگر ۵۰ متر می‌باشد. لذا مدل واریوگرام‌های برازش شده بر مقادیر تجربی نیز متفاوت خواهد بود.



ب

الف

شکل (۴-۱۷) دو مدل واریوگرام برازش شده بر واریوگرام‌های جهتی و نحوه استنباط مدل نهایی از آن‌ها (خط‌های افقی معرف واریانس ساختارها می‌باشند).

برای تعیین مدل نهایی واریوگرام باید در ابتدا تعداد ساختارها تعیین شود که بهتر است تعداد آن کمتر در نظر گرفته شود. سپس به تعداد ساختارها واریانس‌های مشترک برای هر سه راستا تعریف می‌شود. سپس مقدار دامنه‌ی هر یک از مدل‌های برازش شده در سه جهت به‌عنوان دامنه‌های مدل نهایی در واریانس متناظر در نظر گرفته می‌شوند (برای ناهمسانگردهای ناحیه‌ای این دامنه‌ها برای یک یا دو واریانس مشترک مقدار بی‌نهایت خواهد بود) (Gringarten and Deutsch and Journe, 2002) (Deutsch, 2001). در جدول (۴-۱) مشخصات واریوگرام‌های حاصل از بررسی همزمان واریوگرام‌های جهتی تجربی نشان داده شده است که در مرحله‌ی بعد برای تخمین و شبیه‌سازی اعتبارسنجی خواهند شد.

۴-۵- بررسی اعتبار و تخمین کریجینگ

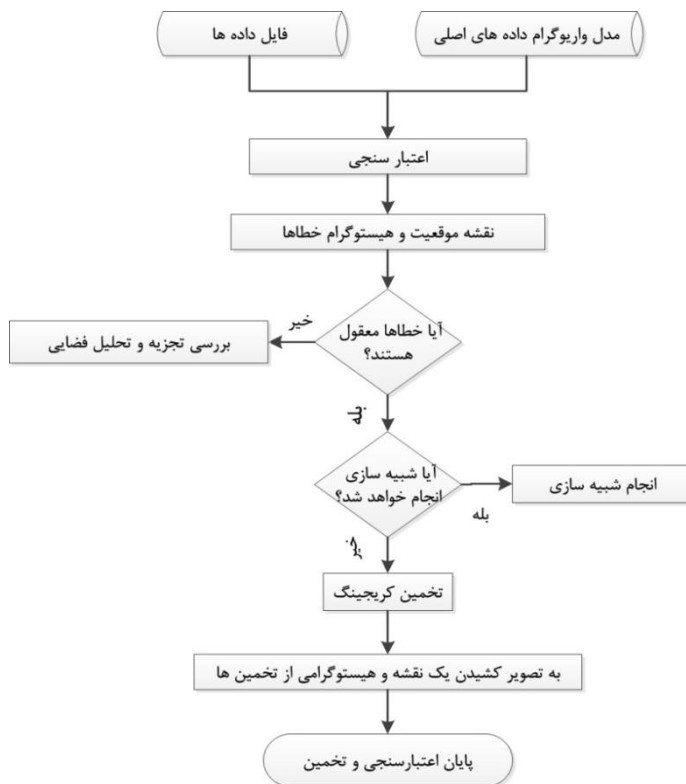
روند نمای کلی از فرآیندهای انجام گرفته برای تخمین کریجینگ و اعتبارسنجی در شکل (۴-۱۸) نشان داده شده است. از آنجا که نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل‌های واریوگرام‌های در نظر گرفته شده

نزدیک به هم می‌باشند. بنابراین تشخیص مدل کارآمدتر از روی هیستوگرام‌ها و یا میزان تمرکز یا پراکندگی نقاط حول خط خطای صفر مشکل خواهد بود.

جدول (۱-۴) مشخصات واریوگرام شکل‌های شکل (۴-۱۷-الف) و شکل (۴-۱۷-ب)

شماره ساختار	نوع مدل ساختار	واریانس		دامنه‌ی واریوگرام در راستای ۵۰ درجه (قرمز)		دامنه‌ی واریوگرام در راستای ۱۴۰ درجه (سبز)		دامنه‌ی واریوگرام در راستای قائم (مشکی)	
		مدل شکل ب	مدل شکل الف	مدل شکل ب	مدل شکل الف	مدل شکل ب	مدل شکل الف	مدل شکل ب	مدل شکل الف
۱	Nugget Effect	۰.۴۵	۰.۴۵						
۲	کروی	۰.۴	۰.۴	۵۰	۴۵	۸۰	۷۰	۸۵	۹۰
۳	کروی	۰.۱۵	۰.۱۵	۱۰۰	۹۰	۵۰۰	۴۸۰	۲۷۰	۲۵۰

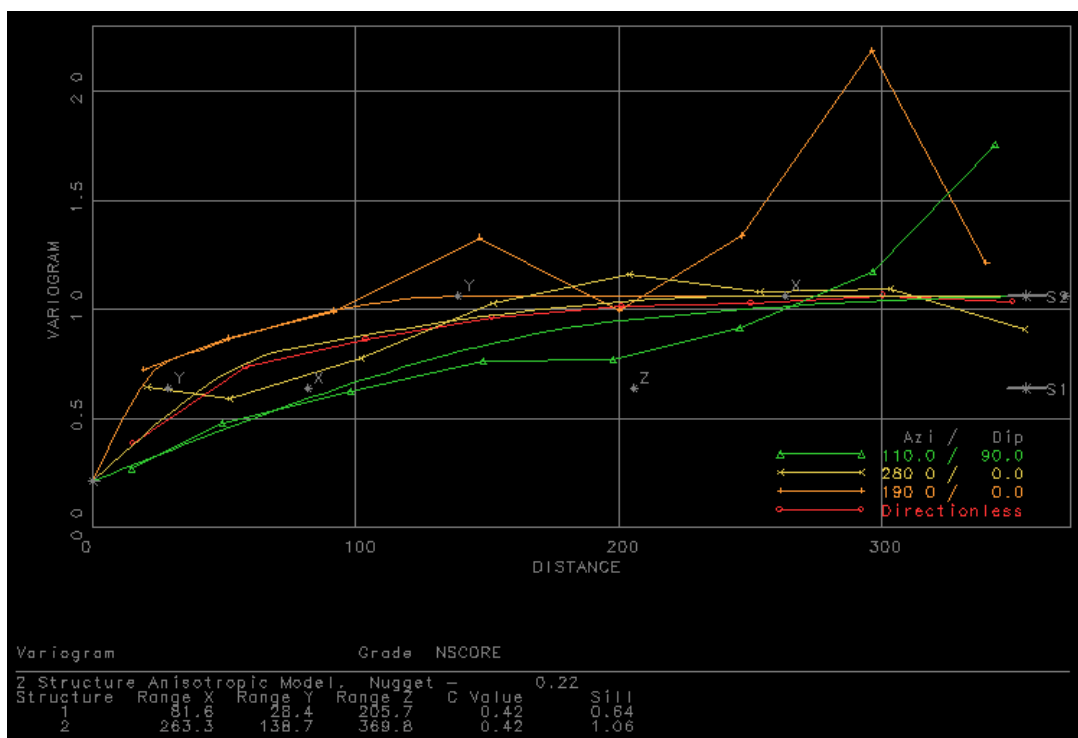
از بین معیارهایی که در فصل دوم عنوان شده است تنها معیار نمودار پراکندگی مقادیر تخمینی در مقابل مقادیر واقعی برای ارزیابی مدل‌های واریوگرام انتخاب شده است. برای نمودار پراکندگی مقادیر تخمینی در مقابل مقادیر واقعی نیز کم بودن (به صفر نزدیک‌تر بودن) میانگین خطاها، بیشتر بودن ضریب همبستگی، ضریب همبستگی مرتبه‌ای و ضریب X در خط رگرسیون (به یک نزدیک‌تر بودن) معیارهای کارآمد بودن مدل واریوگرامی به کار رفته در فرآیند تخمین خواهد بود.



شکل (۴-۱۸) شمای کلی از روند اعتبارسنجی و تخمین کریجینگ.

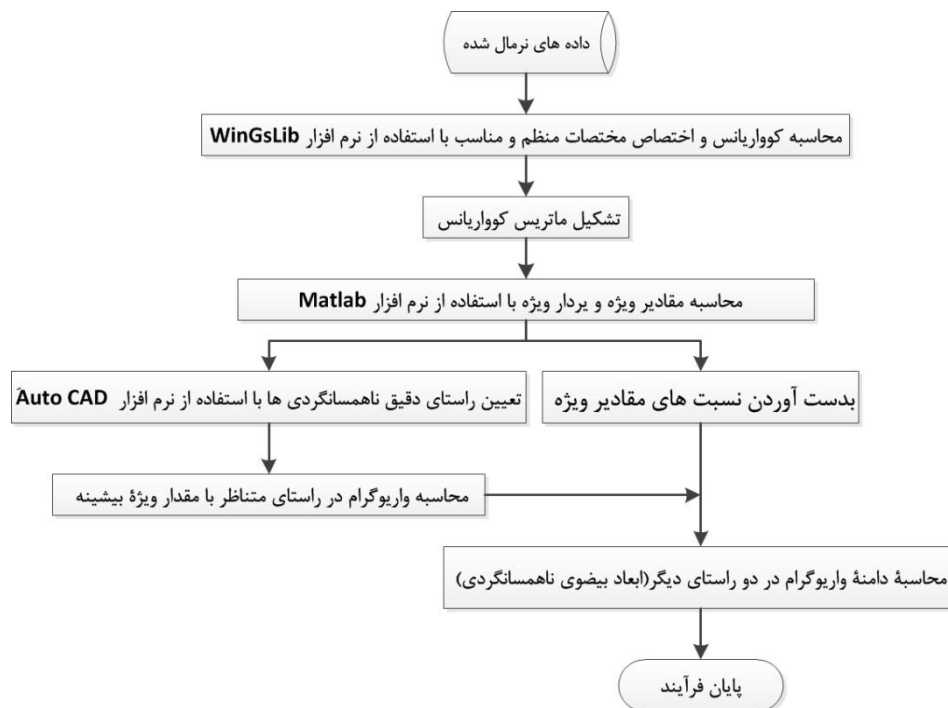
۴-۵-۱- بررسی اعتبار

همان گونه که در فصل قبل عنوان شده است اعتبارسنجی راهی برای بررسی و تأیید اعتبار روش تخمین و مدل واریوگرام است. برای این کار یک نقطه پنهان می‌شود و سپس با استفاده از داده‌های در برگیرنده تخمین زده می‌شود. برای انتخاب مدل واریوگرام جهت تخمین کریجینگ و شبیه‌سازی از میان مدل‌های در نظر گرفته شده برای این کار یک مدل بر مبنای نتایج حاصل از فرآیند اعتبارسنجی انتخاب شده است. مدل‌های مورد ارزیابی شامل؛ واریوگرام‌های جهتی شکل (۴-۱۷-الف) و شکل (۴-۱۷-ب)، واریوگرام تمام جهتی شکل (۴-۱۱) با بیضوی جستجوی به دست آمده از روش مؤلفه‌های اصلی به همراه یک مدل واریوگرام محاسبه و برازش شده در نرم‌افزار DataMine می‌باشند. مدل واریوگرام محاسبه و برازش شده در نرم‌افزار DataMine در شکل (۴-۱۹) به همراه مشخصات مدل برازش شده نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۹) مقادیر واریوگرام تجربی و مدل برازش شده بر آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار DataMine.

در شکل (۴-۲۰) روند کلی محاسبات انجام گرفته روی داده‌های معدن دردوی در جهت تعیین راستاهای ناهمسانگردی و بیضوی جستجو با استفاده از روش مؤلفه‌های اصلی نشان داده شده است. نتایج به دست آمده راستای ناهمسانگردی اصلی را در آزمون ۱۴۴ درجه (با در نظر گرفتن میزان حساسیت روش مؤلفه‌های اصلی به مختصات تعریف شده و همچنین حذف کوواریانس‌های منفی می‌توان راستای اصلی را معادل ۱۴۰ درجه در نظر گرفت) و راستای دوم ناهمسانگردی را در ۵۰ درجه و در نهایت راستای حداقل ناهمسانگردی را در جهت قائم (۸۷ درجه) و عمود بر دو راستای اصلی نشان می‌دهد. در راستای آزمون ۱۴۰ درجه نیز واریوگرام تجربی محاسبه و مدل مناسبی با حداکثر دامنه‌ی ۵۰۰ متر بر آن برازش شده است. بنابر نسبت‌های محاسبه شده از مقادیر ویژه محدوده‌های دیگر بیضوی جستجو به ترتیب ۳۸۰ و ۹۸ متر به دست آمده است.



شکل (۴-۲۰) نمای کلی از روند اجرایی فرآیند روش مؤلفه‌های اصلی.

برای اعتبارسنجی بین مدل‌های فوق‌الذکر کلیه‌ی پارامترهای لحاظ شده برای اعتبار سنجی، معادل پارامترهای تخمین کریجینگ و شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. جدول (۴-۲) نتایج اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. حالت ایده‌آل حالتی است که ضریب x در معادله رگرسیون خطی و ضرایب همبستگی و همبستگی مرتبه‌ای یک باشند و همچنین میانگین خطاها نیز صفر باشد. نتایج نزدیکی کارآیی مدل‌های تحت بررسی را نشان می‌دهند. ولی مدل واریوگرامی که با نرم‌افزار DataMine محاسبه و برازش شده است برتری محسوسی را نسبت به سه مدل دیگر نشان می‌دهد.

از آنجا که نتایج اعتبارسنجی برای تشخیص مدل مناسب به هم نزدیک می‌باشند و از طرفی مدل‌های مورد بررسی به ویژه مدل نرم‌افزار DataMine به صورت خودکار برازش شده‌اند. بنابراین همان‌طور که در فصل قبل عنوان شد در چنین شرایطی معیارهای آستانه‌بندی خطاها (معیار منفی) و یا تعداد

خطاهای بزرگتر از مربعاتشان (معیار مثبت) می‌توانند به کارگرفته شوند که نتایج این بررسی‌ها نیز در جدول (۳-۴) نشان داده شده است.

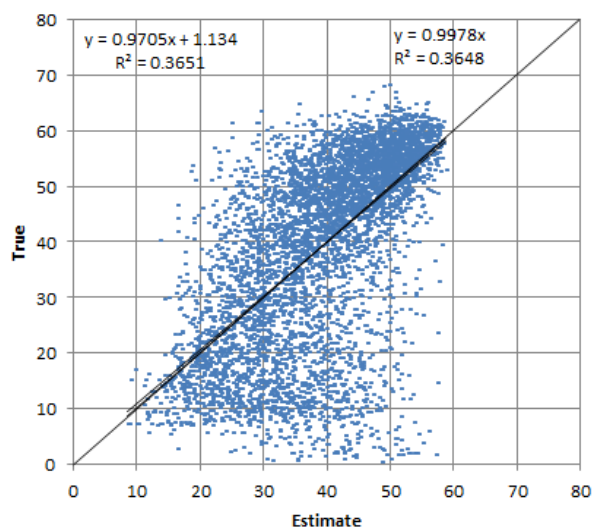
جدول (۲-۴) نتایج اعتبارسنجی بر روی مدل‌های واریوگرام کاندید

مدل واریوگرام معیار	مدل تمام جهتی با بیضوی جستجوی حاصل از روش مؤلفه‌های اصلی	مدل محاسبه و برازش شده در نرم افزار DataMine	مدل واریوگرام شکل (۱۵-۴-الف)	مدل واریوگرام شکل (۱۵-۴-ب)
ضریب X در رگرسیون خطی	۰.۹۹۴۷	۰.۹۹۷۸	۰.۹۹۵	۰.۹۹۶۸
ضریب همبستگی	۰.۶۰۲	۰.۶۰۴	۰.۵۹۷۴	۰.۵۹۸
ضریب همبستگی مرتبه ای	۰.۶۲	۰.۶۴	۰.۶۲	۰.۶۳
میانگین خطا	۰.۰۷	۰.۰۰۶	۰.۱۳	۰.۱۲

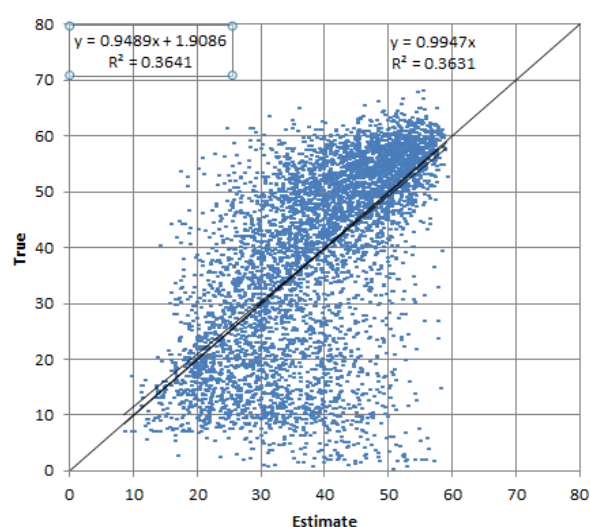
می‌توان نتیجه گرفت که چهار مدل واریوگرام می‌توانند هر کدام برای تخمین و شبیه‌سازی به کارگرفته شوند و اختلاف زیادی با هم ندارند به ویژه مدل‌های حاصل از نرم‌افزار DataMine و مدل شکل (۱۷-۴-ب) ولی از آنجا که مدل محاسبه و برازش شده در نرم‌افزار DataMine با وجود نتایج تقریباً ضعیف در معیار منفی نسبت به دیگر مدل‌ها، در معیارهای مثبت وضعیت خیلی بهتری را ارائه داده است. از آنجا که مقدار اختلاف معیار مثبت مدل نرم‌افزار DataMine از اختلاف معیار منفی آن با دیگر مدل‌ها به نسبت بیشتر است بنابراین مدل نرم‌افزار DataMine به عنوان مدل واریوگرام نهایی انتخاب خواهد شد. شکل (۲۱-۴) نمودار پراکندگی را برای هر یک از مدل واریوگرام‌های بررسی شده نشان می‌دهد.

جدول (۳-۴) نتایج بررسی واریوگرام‌های کاندید با معیارهای مثبت و منفی

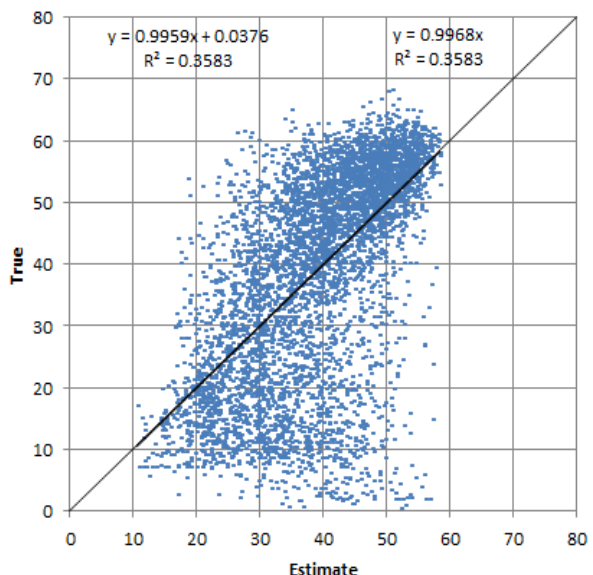
مدل واریوگرام معیار	مدل تمام جهتی با بیضوی جستجوی حاصل از روش مؤلفه‌های اصلی	مدل محاسبه و برازش شده در نرم افزار DataMine	مدل واریوگرام شکل (۱۵-۴-الف)	مدل واریوگرام شکل (۱۵-۴-ب)
معیار مثبت	۳۳۰	۳۷۴	۳۲۸	۳۴۰
معیار منفی	۱۲۵	۱۳۱	۱۲۸	۱۲۶



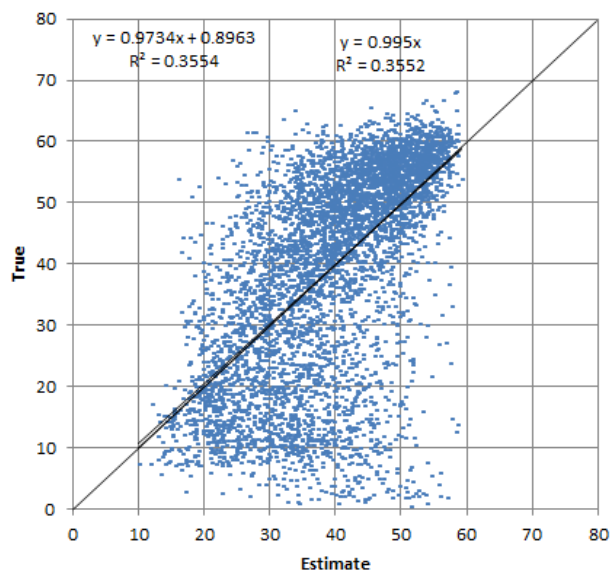
ب



الف



ت



پ

شکل (۴-۲۱) نمودار پراکندگی عیارهای تخمین در مقابل عیارهای واقعی برای مدل‌های واریوگرام: (الف) تمام جهتی با بیضوی جستجوی حاصل از روش مؤلفه‌های اصلی (ب) محاسبه و برازش شده با نرم‌افزار DataMine (پ) شکل (۴-۱۷-الف)، (ت) شکل (۴-۱۷-الف).

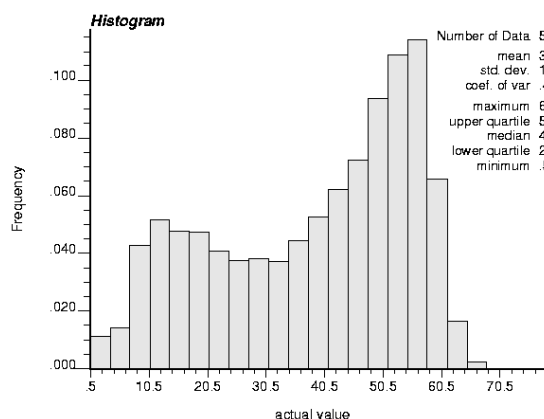
۴-۵-۲- تخمین به روش کریجینگ

برای تخمین به روش کریجینگ از روش کریجینگ معمولی استفاده شده است. همچنین شعاع جستجو بیشتر از دامنه‌ی واریوگرام انتخاب شده در نظر گرفته شده است. دلیل آن نیز به این خاطر بوده است که با شعاع جستجوی برابر با دامنه‌ی واریوگرام مقادیر زیادی از بلوک‌هایی که درون مدل

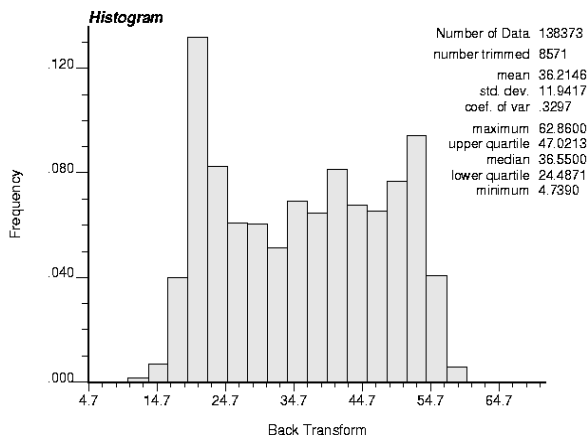
زمین‌شناسی وجود دارند نیز بدون تخمین باقی می‌مانند. لذا شعاع جستجو (طبق نتایج بدست آمده از بررسی مقادیر مختلف) در راستاهای X ، Y و Z به ترتیب ۵۰۰، ۴۲۰ و ۴۵۰ در نظر گرفته شده است که با این محدوده‌های جستجو به تمام بلوک‌هایی که درون مدل زمین‌شناسی قرار دارند مقادیر عیار تخمینی اختصاص می‌یابد. همچنین روش تخمین نسبت به شعاع جستجوی جدید اعتبار سنجی شده است که نتایج با هم اختلاف چندانی نداشته است. حتی در میزان میانگین خطا نیز با شعاع جستجوی بیشتر از دامنه‌ی واریوگرام، نتیجه‌ی اعتبار سنجی به میزان خیلی کمی نشان از کارایی بهتر فرآیند تخمین داشته است.

در فصل سوم نیز در ارتباط با امکان اتخاذ شعاع جستجوی بیشتر از شعاع تأثیر واریوگرام توضیح داده شده است. همچنین تعداد حداقل و حداکثر نمونه‌های مورد استفاده برای تخمین به ترتیب ۱ و ۳۵ نمونه در نظر گرفته شده است. ریزبلوک‌سازی‌ها نیز در راستاهای X ، Y و Z به ترتیب ۱۰، ۱۰ و ۵ در نظر گرفته شده است. شکل (۴-۲۲-الف) و شکل (۴-۲۲-ب) به ترتیب نمودار هیستوگرام توزیع عیارهای تخمینی و توزیع عیار داده‌های اکتشافی را نشان می‌دهند.

شکل (۴-۲۳-الف) و شکل (۴-۲۳-ب) به ترتیب موقعیت داده‌های اولیه و نقشه‌ی کریجینگ شده‌ی محدوده‌ی قطعه‌ی ۴۰ (افق ۱۵۰-) صفحه‌ی XY را نشان می‌دهند که میزان عیار با شدت رنگ مشخص شده است. نکته‌ی قابل توجه این است که نقشه‌ی کریجینگ شده در جاهایی که عیار نمونه‌ها بالاست مقادیر بالا و در جاهایی هم که عیار نمونه‌ها کم است مقادیر کم عیار را نشان می‌دهد. در واقع مقادیر نمونه‌های اولیه احراز شده است.

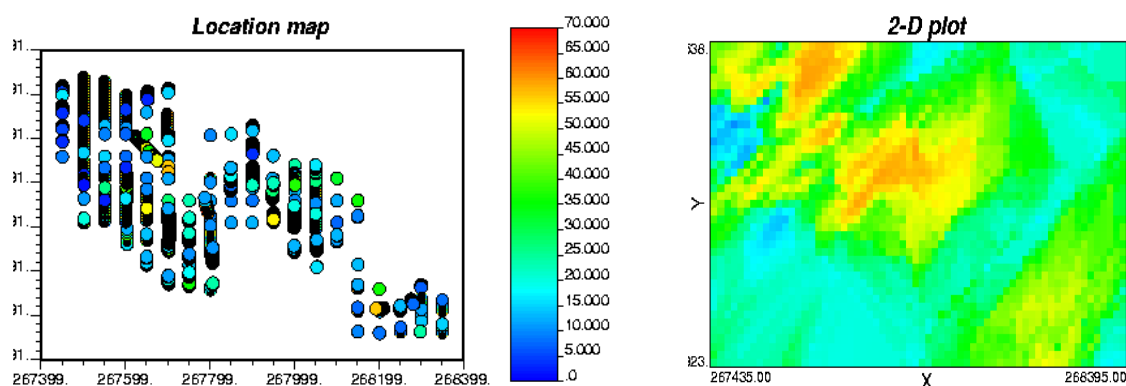


ب



الف

شکل (۴-۲۲) نمودار هیستوگرام (الف) توزیع عیار داده‌های اولیه و (ب) توزیع عیارهای تخمین زده شده



الف

ب

شکل (۴-۲۳) نقشه‌ی دوبعدی (الف) تخمین کریجینگ در افق ۱۵۰- و (ب) موقعیت داده‌های اولیه

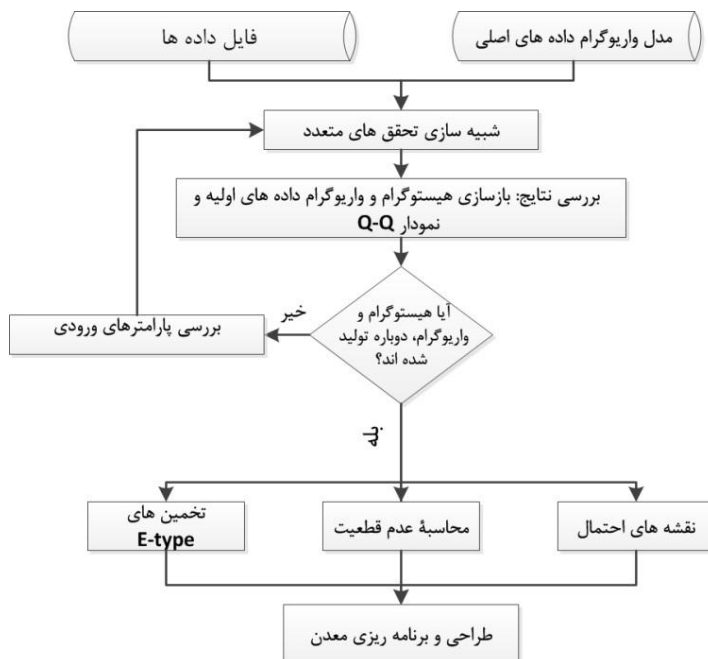
۴-۶- شبیه‌سازی

روند نمای کلی فرآیند شبیه‌سازی و فرآیندهای پس از آن در شکل (۴-۲۴) نشان داده شده است.

در فصل دوم به بحث روش‌های شبیه‌سازی و شرطی‌سازی به طور مختصر پرداخته شده است. برای

شبیه‌سازی عیار مدل بلوکی کانسار سنگ آهن دردوی از روش شبیه‌سازی گاوسی پی‌درپی استفاده شده

است.

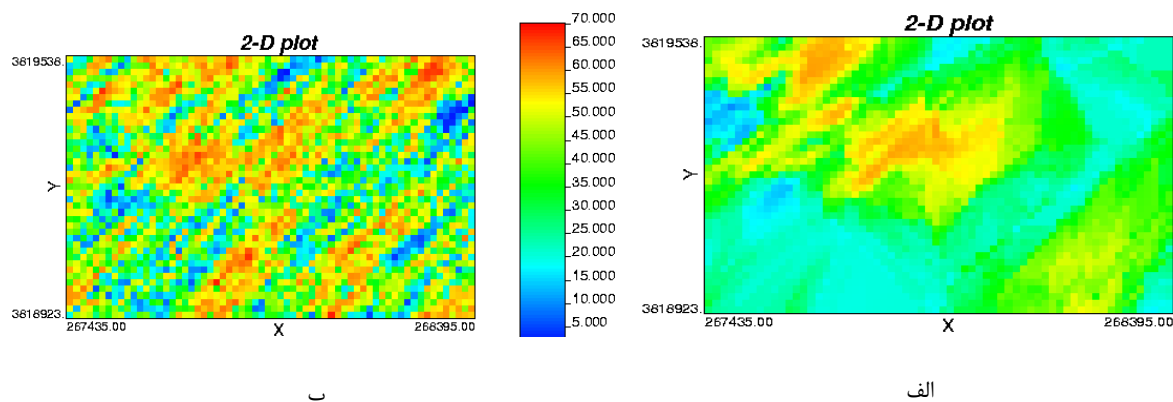


شکل (۴-۲۴) روند نمای کلی از فرآیند شبیه‌سازی گاوسی پی در پی و فرآیندهای پس از آن.

۴-۶-۱- شبیه‌سازی گاوسی پی‌درپی

در این مطالعه برای شبیه‌سازی پیکره‌ی ماده معدنی کانسار سنگ آهن دردوی از الگوریتم تعبیه شده برای اینکار در نرم افزار WinGslib استفاده شده است که از موارد اجرایی قابل توجه در اجرای شبیه‌سازی با این الگوریتم می‌توان به انتخاب کریجینگ ساده برای نوع کریجینگ مورد استفاده در شبیه‌سازی شرطی اشاره نمود. علاوه بر آن انتخاب مقادیر مناسب (در نظر گرفتن ارقام و حجم‌های بالا) برای جدول ارجاع^۱ کوواریانس نیز از موارد مهم در اجرای عملی شبیه‌سازی شرطی است. برای اجرای شبیه‌سازی از مدل واریوگرام و کلیه پارامترهای استفاده شده در فرآیند تخمین استفاده شده است. برای ارزیابی عدم قطعیت عیار مدل بلوکی کانسار دردوی تعداد شبیه‌سازی‌ها نیز ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. نتیجه‌ی تخمین کریجینگ و تحقق ۹۵ در قطعه‌ی ۴۰ (افق ۱۵۰-) صفحه‌ی XY در شکل (۵-۲۴) نشان داده شده است.

^۱ - Lookup Table



شکل (۴-۲۵) نمای دو بعدی از قطعه‌ی ۴۰ (افق ۱۵۰-) در صفحه XY از شبکه‌ی سه بعدی حاصل از (الف) تخمین کریجینگ و (ب) تحقق ۹۵.

۴-۶-۲- نمودارهای Q-Q و بررسی بازسازی هیستوگرام داده‌های اولیه

نمودارهای Q-Q بهترین ابزار گرافیکی برای مقایسه دو توزیع است. هنگامی که همه‌ی نقاط روی یک نمودارهای Q-Q روی خط ۴۵ درجه قرار گیرند، آنگاه دو توزیع دقیقاً یکسان خواهند بود. انحراف از خط ۴۵ درجه اختلاف در دو هیستوگرام را نشان خواهد داد. مخصوصاً:

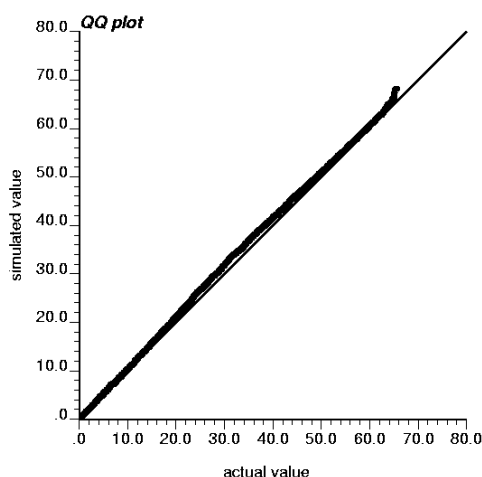
- الف: یک انحراف سیستماتیک بالا یا پایین خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که مرکز یا متوسط توزیع‌ها متفاوت است. یک تغییر جهت یا مکان در بالای خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که توزیع Y- بیشتر از توزیع X- ارزیابی شده است. یک تغییر مکان در زیر خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که مقادیر X- بیشتر یا بزرگتر هستند (توزیع X و Y به ترتیب توزیع مقادیر قرار گرفته در محورهای X و Y می‌باشند).
- ب: یک شیب متفاوت از ۴۵ درجه نشان می‌دهد که گسترش یا پراکندگی دو توزیع متفاوت است. یک شیب بزرگتر از ۴۵ درجه نشان می‌دهد، که پراکندگی Y- بیشتر از X است. یک شیب کمتر از ۱ تأیید می‌کند که پراکندگی X- بیشتر است.

ج: انحناء یا خمیدگی روی نمودارهای Q-Q نشان می‌دهد که دو توزیع شکل متفاوتی دارند.

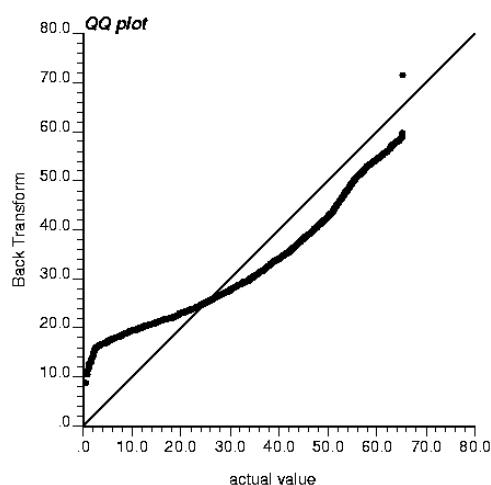
در عمل، اختلافات در هر سه مورد (مرکز، گستردگی و شکل) مشاهده می‌شود (Deutsch and

Journel, 1998).

همان‌طور که در شکل (۴-۲۶-الف) نیز قابل مشاهده است مطابقت مناسبی بین توزیع عیارهای تخمینی و توزیع عیار داده‌های اولیه وجود ندارد و نسبت به خط ۴۵ درجه انحرافات واضحی را ارائه می‌دهد. شکل (۴-۲۶-ب) نمودار Q-Q را برای دو توزیع داده‌های اولیه و مقادیر شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که به جز چند مورد انطباق خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های اولیه وجود دارد که این مقدار اختلاف نیز دور از انتظار نیست و قابل چشم‌پوشی است. نتایج کلی، تکرار توزیع داده‌های اولیه به وسیله‌ی تحقق‌های شبیه‌سازی را به خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۴-۲۷) نیز نشان داده شده است هیستوگرام تحقق‌های حاصل از شبیه‌سازی نیز بیانگر این واقعیت است و شکل کلی تحقق‌های شبیه‌سازی شده توزیع داده‌های اولیه را دوباره تولید نموده‌اند و قبلاً نیز بیان شده است که این امر یکی از ویژگی‌های شبیه‌سازی شرطی است.



ب



الف

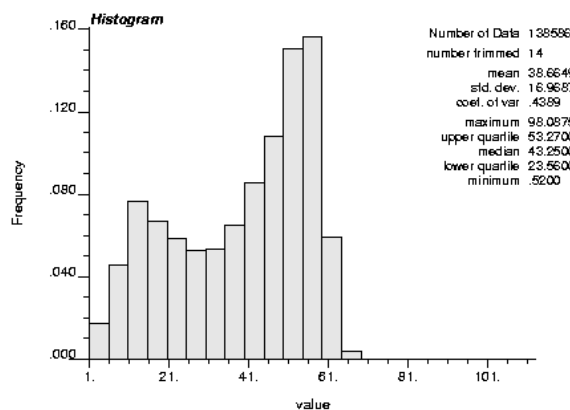
شکل (۴-۲۶) نمودار Q-Q، (الف) توزیع عیار داده‌های اولیه و توزیع عیارهای تخمین زده شده و (ب) توزیع عیار داده‌های اولیه و توزیع عیارهای شبیه‌سازی شده

۴-۶-۳- محاسبه و رسم واریوگرام تحقق‌های شبیه‌سازی شده

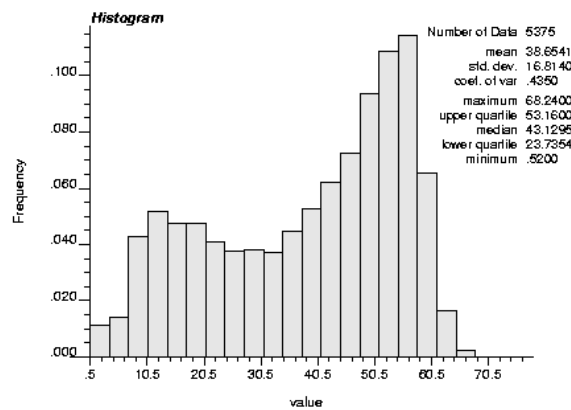
هنگامی که داده‌ها روی یک شبکه‌ی منظم قرار داشته باشند آنگاه راستاها به وسیله‌ی تعیین تعداد گره‌های شبکه‌ای که باید تغییر یابند برای حرکت از یک گره روی شبکه به نزدیک‌ترین نود بعدی روی شبکه‌ای که در راستای بردار جهتی قرار دارد، مشخص می‌شوند. برای محاسبه‌ی واریوگرام داده‌هایی با شبکه‌ی منظم راستاها به وسیله‌ی جابجایی‌های نشان داده شده در جدول (۴-۴) مشخص می‌شوند. برای محاسبه واریوگرام شبکه‌ی منظم هیچ نوع راستا یا دامنه‌ی نواسان زاویه‌ای یا محدوده گامی جایز نمی‌باشد.

در برخی موارد این تعیین راستا خیلی محدود کننده است و ممکن است که منجر به جفت‌های ترکیبی ناکافی شوند. برای حل این مشکل نیز راه حل‌هایی مثل میانگین‌گیری از راستاهای متعدد با وزن‌دهی بوسیله تعداد جفت‌ها یا با ذخیره شبکه به صورت داده‌هایی با فواصل نامنظم و استفاده از روش حالت شبکه نامنظم برای محاسبه واریوگرام‌ها، وجود دارد، که مورد آخری زمان محاسبه واریوگرام را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد (Deutsch and Journel, 1998).

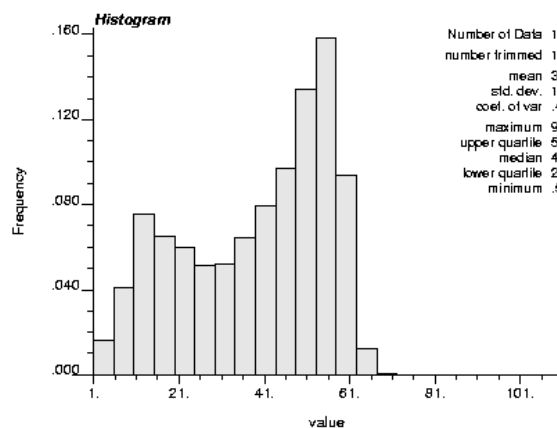
در شکل (۴-۲۸-الف)، شکل (۴-۲۸-ب)، شکل (۴-۲۸-پ) و شکل (۴-۲۸-ت) واریوگرام داده‌های اصلی (واریوگرام تجربی که مدل برازش شده بر آن‌ها برای تخمین و شبیه‌سازی استفاده شده است) و واریوگرام‌های تحقق‌های شبیه‌سازی شده به ترتیب در راستاهای ۴۵ درجه، ۱۳۵ درجه، قائم به همراه واریوگرام تمام جهتی نشان داده شده است.



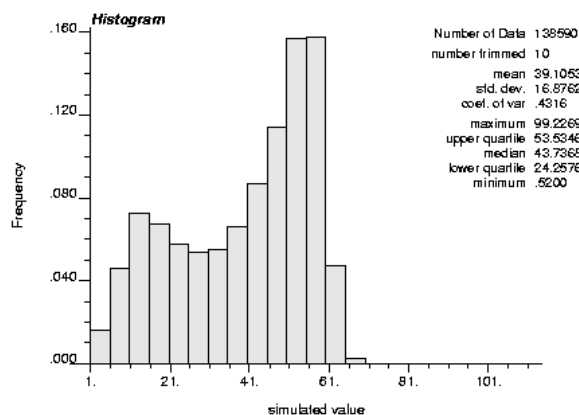
ب



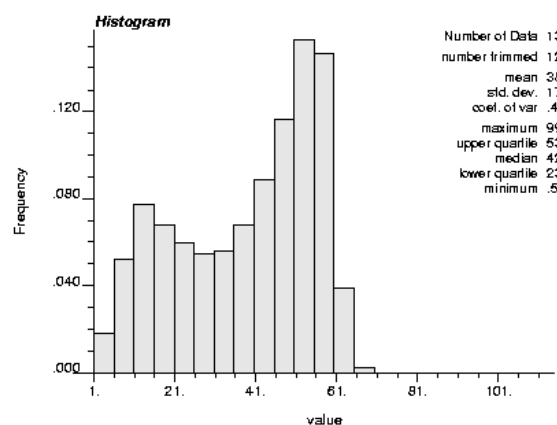
الف



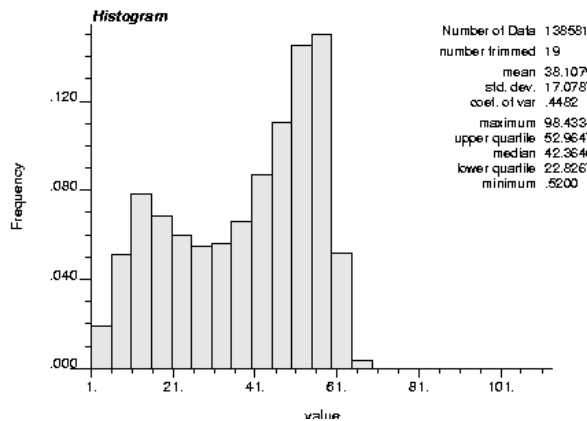
ج



پ



ث



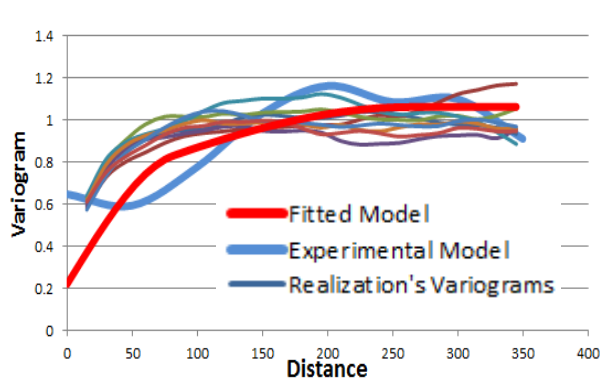
ت

شکل (۴-۲۷) هیستوگرام داده‌های اولیه (الف) و ۵ تحقق شبیه سازی شده (ب، پ، ت، ث و ج).

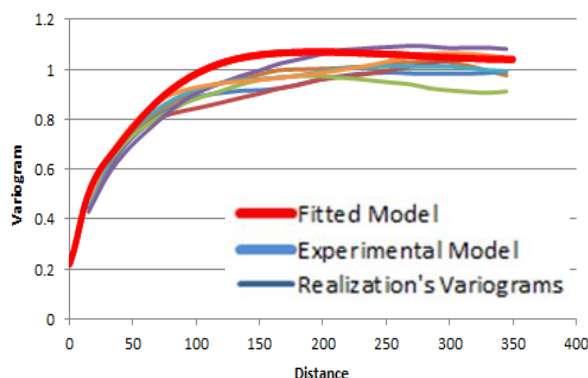
جدول (۴-۴) راستاهای قابل تعریف برای داده‌های منظم

جایابی X	جایابی Y	جایابی Z	
۱	۰	۰	تنظیم شده در راستای X
۰	۱	۰	تنظیم شده در راستای Y
۰	۰	۱	تنظیم شده در راستای Z
۱	۱	۰	راستای ۴۵ درجه در سطح افق
۱	-۱	۰	راستای ۱۳۵ درجه در سطح افق
۱	۱	۱	راستای ۲۲۵ درجه نسبت به Y در شیب منفی ۴۵ درجه

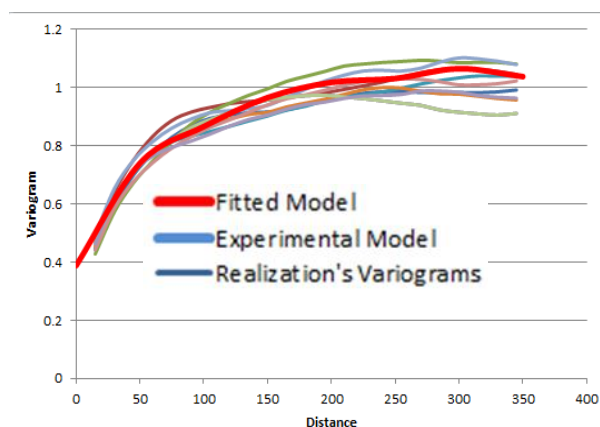
واریوگرام‌های مربوط به تحقق‌های شبیه‌سازی در محدوده‌ی واریوگرام‌های تجربی اولیه قرار دارند و در فواصل کم به جز دو مورد انطباق مناسبی بین واریوگرام‌های تجربی تحقق‌های و واریوگرام‌های اولیه به ویژه واریوگرام تمام جهتی اولیه وجود دارد. اما اختلافی که در سایر راستاها وجود دارد بعلت این است که راستای محاسبه شده برای شبیه‌سازی‌ها دقیقاً برابر با راستای واریوگرام‌های متناظر نمی‌باشد، زیرا برای داده‌هایی با شبکه‌ی منظم تعریف نمودن راستاهایی مثل ۵۰ و ۱۴۰ درجه مشکل است. راستاهای قابل تعریف در جدول (۴-۵) درج شده است. در راستای آزمون ۱۴۰ و راستای قائم بین واریوگرام‌های تحقق‌ها و مدل واریوگرام برازش شده بر مقادیر تجربی در فواصل کم انطباق مناسبی را نشان نمی‌دهد. دلیل این امر می‌تواند علاوه بر دلایل بیان شده در بالا می‌تواند به نقص داده‌ها اولیه برگردد. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته در زمان مطالعه، مدل‌های برازش شده از بررسی چندین مدل بدست آمده است و سعی شده است که بهترین مدل‌ها انتخاب شود. ولی با وجود دلایل فوق الذکر نیاز به بررسی بیشتر مدل واریوگرام‌های برازش شده در این دو راستا احساس می‌شود.



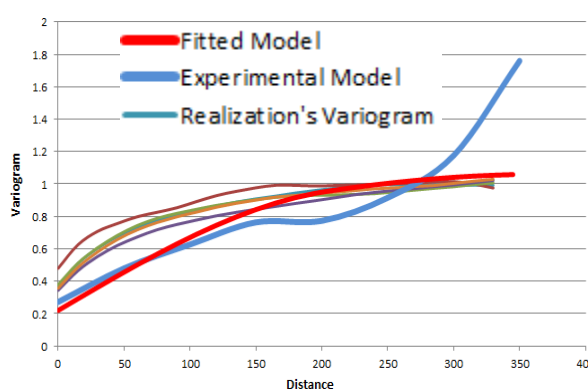
ب



الف



ت



پ

شکل (۴-۲۸) واریوگرام‌های تجربی و تحقق‌های شبیه‌سازی شده (الف) راستای ۴۵ درجه، (ب) راستای ۱۳۵ درجه، (پ) راستای قائم، (ت) تمام جهتی

۴-۶-۴- فرآیندهای پس از شبیه‌سازی

مدل‌های ایجاد شده به وسیله‌ی شبیه‌سازی ابزارهای مفیدی هستند، ولی به تنهایی برای ارزیابی و تعیین ریسک کافی نیستند. هنوز فرآیندهایی وجود دارند که باید برای مدیریت منابع معدنی انجام گیرند. بعد از آنکه شبیه‌سازی پایان پذیرفت لازم است که برخی ویرایش‌های و محاسبات انجام گیرد. بعضی از پارامترها یا ویژگی‌ها مثل مختصات نقاط شبیه‌سازی و چگالی هر بلوک یا نقطه به آنها لازم است که

اضافه شود. می‌توان تناژ ماده معدنی را محاسبه و عیار حدهای مختلف را به آن‌ها اعمال نمود. همچنین میزان ذخیره و نمودارهای عیار- تناژ قابل محاسبه و ترسیم است. ولی با توجه به اهداف از پیش تعیین شده‌ی هر مطالعه و ضرورت داشتن یا نداشتن هر یک از فرآیندهای بعد از شبیه‌سازی، در اغلب بررسی‌ها و مطالعات تنها برخی از فرآیندهای بیان شده استفاده می‌شود. پس از اختصاص مختصات به هریک از تحقق‌ها با استفاده از قابلیت ادکوردینیت^۱ نرم‌افزار WinGslib تحقق‌ها برای واریوگرافی و بهینه‌سازی آماده‌سازی می‌شوند. ویرایش‌ها و تنظیمات لازم برای آماده نمودن هر یک از تحقق‌ها برای بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای اکسل، متلب و DataMine قابل انجام است. از آنجا که در این بررسی برای فرآیند بهینه‌سازی پیت از نرم‌افزار NPV Scheduler استفاده شده است، بنابراین استفاده از نرم‌افزار DataMine برای تنظیم و آماده سازی هریک از تحقق‌ها به شکل ورودی نرم‌افزار بیان شده ضروری خواهد بود، زیرا نرم‌افزار DataMine، i ، j و k هایی به هر یک از بلوک‌ها اختصاص می‌دهد که به مدل اولیه کلی^۲ ایجاد شده در مرحله‌ی بلوک‌بندی ارتباط دارد و نظم و ترتیب خاص خود را دارد که ایجاد آن روند خارج از محیط نرم‌افزار دشوار می‌نماید. نکته‌ی قابل توجه این است که نرم‌افزار NPV فایل‌های ورودی را تنها با فرمت‌های تعریف شده‌ای مثل خروجی DataMine قبول می‌کند.

۴-۷- نتیجه گیری

در این فصل بعد از تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی و تجزیه و تحلیل فضایی داده‌ها، چهار مدل واریوگرام با هم مقایسه شده است که مدل واریوگرام محاسبه و برازش شده در نرم‌افزار DataMine به عنوان مدل واریوگرام داده‌های اولیه برای تخمین و شبیه‌سازی استفاده شده است. سپس با استفاده از این مدل واریوگرام و داده‌ها نرمال شده عیار مدل بلوکی تخمین زده شده است. ولی برای شبیه‌سازی از

^۱ - Add coordinate

^۲ - Proto Model

داده‌های اولیه به استفاده شده است، چون در الگوریتم شبیه‌سازی شرطی تعبیه شده در WinGslib امکان نرمال‌سازی و تبدیل برگشتی خودکار وجود دارد. بر خلاف تک مدل تخمینی ۱۰۰ مدل از عیار سنگ آهن کانسار در دوی شبیه‌سازی شده است، که با هیستوگرام و واریوگرام داده‌های اولیه نیز مطابقت مناسبی از خود نشان داده‌اند. در انتها نیز فرآیندهای پس از شبیه‌سازی و تخمین به اختصار بیان شده است. برای محاسبه‌ی کلیه واریوگرام‌ها (واریوگرام داده‌های اولیه و مقادیر شبیه‌سازی شده)، توزیع داده‌های اولیه و مقادیر حاصل از شبیه‌سازی‌ها به توزیع نرمال تبدیل شده است.

فصل پنجم

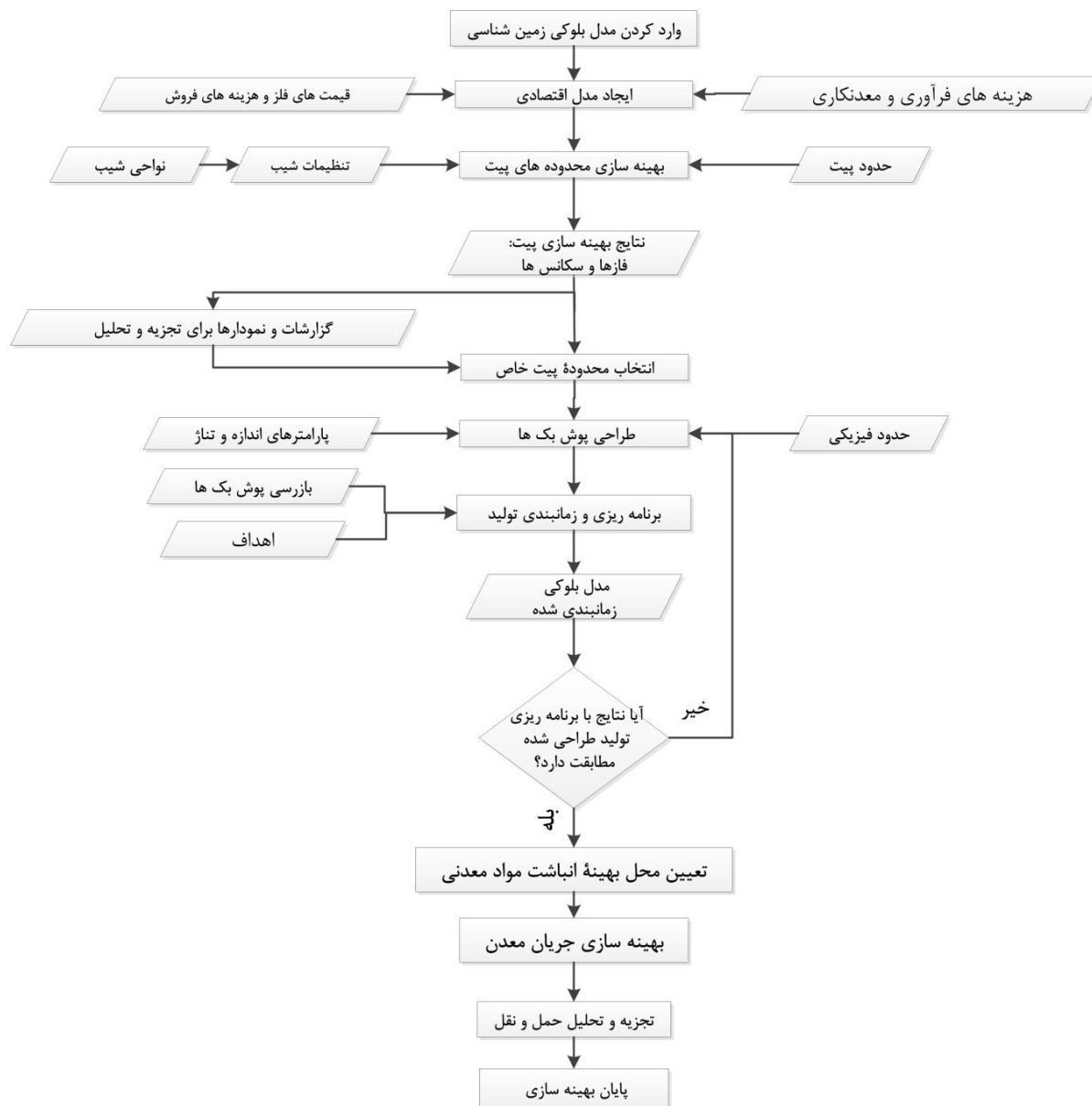
بررسی عدم قطعیت و ریسک طراحی پیت کانسار در دوی

۵-۱- مقدمه

در این فصل در راستای تعیین عدم قطعیت و ریسک پارامترهای مختلف طراحی پیت و محدوده‌ی نهایی معدن دردوی از دو روش متفاوت استفاده شده است. در روش اول یک پیت بهینه به عنوان مبنا انتخاب می‌شود و مدل بلوکی تخمینی و هر یک از مدل‌های بلوکی شبیه‌سازی شده با این پیت بهینه‌سازی می‌شوند. اما در روش دوم به جای استفاده از یک پیت نهایی قطعی هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی شده و مدل تخمینی به صورت مستقل بهینه‌سازی می‌شوند. نتایج هر یک از این دو روش مورد بررسی قرار گرفته و میزان ریسک هر یک از پارامترها تعیین شده است.

۵-۲- کار با نرم‌افزار بهینه‌سازی NPV Scheduler

مراحل کلی که برای بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تولید معادن روباز با استفاده از نرم‌افزار NPV طی می‌شود، در شکل (۵-۱) به طور شماتیک نشان داده شده است که در مطالعه‌ی حاضر بنابر اهداف از پیش تعیین شده تا مرحله‌ی تعیین محدوده‌ی بهینه، فرآیندها دنبال شده است. در فرآیندهای شکل (۵-۱) سه فرآیند بهینه‌سازی یعنی محل انباشت مواد معدنی، جریان معدن و تجزیه و تحلیل حمل و نقل عملیات اختیاری نرم‌افزار NPV Scheduler است.



شکل (۵-۱) شمای کلی از روند فرآیند بهینه سازی با نرم افزار NPV Scheduler (Earthwork's NPV Scheduler Scheduler 3.4 Tutorial, 2005)

مراحل عملیات بهینه سازی بدین صورت است که مدل بلوکی زمین شناسی به عنوان داده اولیه برای محاسبه مدل اقتصادی وارد نرم افزار می شود. مدل بلوکی زمین شناسی حاوی اطلاعاتی نظیر عیار ماده معدنی، عیار سایر مواد معدنی همراه، وزن مخصوص هر بلوک، نوع بلوک (باطله یا ماده معدنی) است. مدل بلوکی اقتصادی کانسار نیز بر مبنای مدل زمین شناسی ساخته می شود. در این مرحله بایستی داده های مورد نیاز نظیر قیمت فروش، هزینه های تولید و درصدهای بازیابی وارد نرم افزار شود. بعد از تعیین مدل

اقتصادی، نرم افزار داده های مورد نیاز در این مرحله را دریافت کرده و بر مبنای اهدافی که باید بهینه شوند، پیت نهایی را با استفاده از الگوریتم لرچ گرسمن تعیین می کند. در ادامه فازهای استخراجی با توجه به عرض قابل کار برای پله های استخراجی و حداقل تولید مورد نیاز در هر فاز مشخص می شود. اهداف مورد نظر برای برنامه ریزی تولید به نرم افزار وارد می شود، و نرم افزار با جستجو در حالت های ممکن برای برنامه ریزی تولید، گزینه ای را می یابد که علاوه بر برآورده ساختن اهداف تعیین شده، سود بیشینه را نیز در پی داشته باشد. در صورت نیاز به انباشت مواد معدنی برای تنظیم عیار ورودی به مرحله فرآوری، در این قسمت از نرم افزار محلهایی برای انباشت کانسنگ پرعیار تعریف شده و با تعیین شرایط و محدودیت های هر یک و برآورد هزینه بارگیری و حمل مجدد مواد معدنی، مناسب ترین گزینه برای انباشت برداشت کانسنگ از محلهای مختلف توسط نرم افزار داده می شود. در انتها با کمک بهینه ساز انتخابی جریان معدن می توان عاملیت (سودمندی) بهینه ساز انباشت مواد معدنی و بهینه سازی عیار حد را برای تعیین نرخ های معدن کاری و عیارهای حدی که بیشترین ارزش خالص فعلی را ارائه می دهند، را با هم ترکیب نمود (Earthwork's NPV Scheduler 3.4 Tutorial, 2005).

۵-۳- پارامترهای مورد استفاده در فرآیند بهینه سازی

از آنجا که هدف از این مطالعه بررسی تأثیرات تغییر عیار بر پارامترهای مختلف طراحی پیت است. بنابراین برای بهینه سازی پیت سایر پارامترهای تأثیرگذار برای کلیه بهینه سازی ها ثابت در نظر گرفته شده است. پارامترهای استفاده شده برای کلیه بهینه سازی ثابت بوده که در جدول (۵-۱) نشان داده شده است.

جدول (۵-۱) پارامترهای استفاده شده برای بهینه‌سازی پیت کانسار در دوی

عنوان	مقدار	مقادیر پارامترهای مختلف	مقدار
نرخ تنزیل سالیانه مدنظر	۱۰٪	قیمت ماده معدنی	۷۰ \$/ton cons.68%
تعداد روزهای کاری در یک سال	۳۶۰	هزینه فروش	صفر
شیب مورد نظر برای محدوده نهایی	۳۵ الی ۴۰ درجه	هزینه معدنکاری (هزینه معدنکاری پایه + هزینه سرمایه‌گذاری)	۱/۵۵ \$ (۱/۵ + ۰/۰۵)
وزن مخصوص ماده معدنی	$Y = ۰/۰۲۹ * (Fe) + ۲/۷۶۹$	درصد ترقیق	۵٪
هزینه حمل باطله و سنگ آهن به ازای هر تن-کیلومتر	۸۰۰ ریال	روش فرآوری	خردایش و جدایش مغناطیسی
هزینه استخراج باطله و ماده معدنی	باطله ۱/۵ دلار بر تن و ماده معدنی ۲/۵ دلار بر تن	هزینه فرآوری	۱۵ \$/tonne
متوسط نرخ تولید سالانه	۴ میلیون تن	میزان بازیابی روش فرآوری	۸۵ - ۹۰٪

۵-۴- فرق فاز با سکانس و پیت نهایی با پیت بهینه

بر اساس مدل بلوکی اقتصادی ایجاد شده و یک دسته زوایای شیب کلی فراهم شده، NPV Scheduler یک محدوده‌ی نهایی را ایجاد می‌کند که بیشترین جریان نقدینگی (بیشترین سود) امکان پذیر را داشته باشد. بعد از دستیابی به پیت با بیشترین جریان نقدینگی یک تعداد از فازهای درونی نیز ایجاد می‌شود. هر یک از این فازها یک پیت با جریان نقدینگی بیشینه را ارائه می‌دهند که یکی از پارامترهای اقتصادی فراهم شده تغییر می‌یابند. یک مجموعه‌ی کاملی از فازها می‌تواند تولید شود که هر یک از آن‌ها به یکی از متغیرهای زیر اعمال می‌شوند: سود، قیمت، هزینه معدنکاری.

این فازهای درونی برای انتخاب پیت‌های بهینه‌ی متناوب، ایجاد سکانس‌های معدنکاری و برای علامت‌گذاری گسترش‌های پوش بک مهم می‌باشند. برای همه‌ی بلوک‌های درون پیت نهایی یک سکانس بهینه‌ی استخراج ایده‌آل نیز ایجاد می‌شود. این سکانس بهینه استخراج سعی در یافتن بیشترین جریان نقدینگی تنزیل شده‌ی امکان‌پذیر براساس نرخ تنزیل فراهم شده و نرخ فرآوری ماده معدنی دارد. ساختار

فاز ایجاد شده برای یک محدوده‌ی پیت معین به عنوان مبنا برای ساخت^۱ OES (یک سکانس استخراج بلوک به بلوک) است. بهرحال EOS برای فراهم نمودن بیشترین جریان نقدینگی تنزیل شده انتخاب می‌شود حال آنکه هر فاز برای ارائه‌ی بیشترین جریان نقدینگی تنزیل نشده برای پارامترهای اقتصادی معین ساخته می‌شود. برخی از بلوک‌ها به سمت انتهای پیت نهایی ممکن است که باعث افزایش^۲ DCF نشوند در این مورد یک پیت کوچکتر از پیت نهایی ممکن است منجر به بیشترین DCF شود. بهرحال این‌که آیا همه‌ی بلوک‌های محدوده‌ی نهایی هنوز در محدوده باشند یا نه تا حدودی به کاربر ربط دارد.

اصطلاحات پیت نهایی و پیت بهینه اغلب به جای یکدیگر به کار می‌روند. بهرحال کاربردهای مشابه می‌تواند کاملاً اشتباه باشد. پیت نهایی به عنوان پیتی است که بیشترین جریان نقدینگی تنزیل شده را ارائه می‌کند. پیت بهینه به عنوان پیتی تعریف می‌شود که بیشترین جریان نقدینگی تنزیل شده را ارائه نماید. بنابراین محدوده‌ی پیت بهینه معمولاً درون محدوده‌ی پیت نهایی خواهد بود.

۵-۵- انتخاب پیت نهایی بهینه

فرآیند بهینه‌سازی پیت براساس مدل تخمینی ذخیره و با استفاده از اجرای پیت‌های تودرتوی لرج و گرسمن انجام می‌شود که نتیجه‌ی آن یک سری شکل‌های محدوده پیت است. معیارهای متفاوتی برای انتخاب شکل پیت نهایی مثل ارزش خالص پیت و ارزش خالص فعلی بر اساس سکانس استخراج می‌تواند استفاده شود.

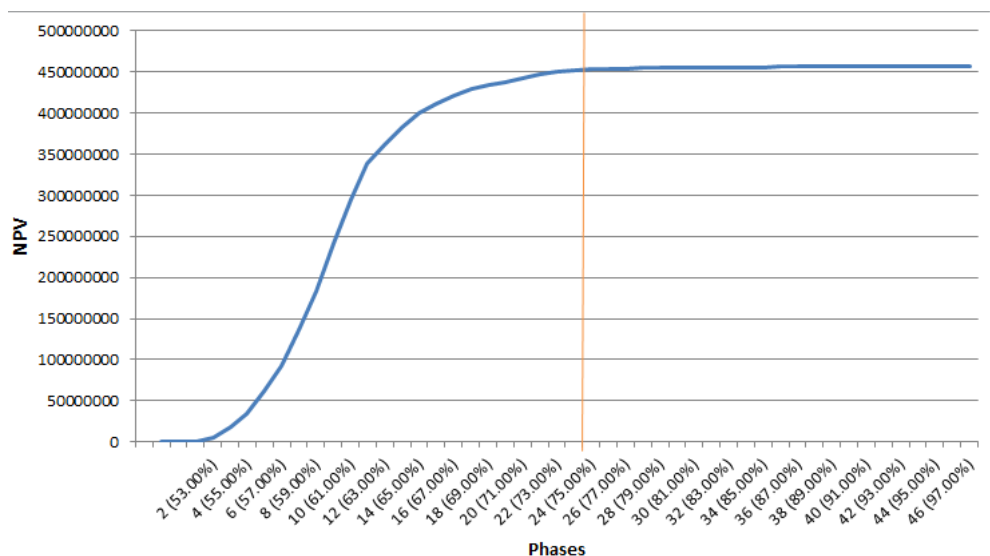
نرم‌افزار NPV Scheduler برای هر فاز، پارامترهای مختلف تعیین شده (به عنوان مثال ارزش خالص فعلی، درآمد، سود و تناژ ماده معدنی) را به صورت مرتب و فراوانی تجمعی ارائه می‌دهد. با ترسیم نمودار فراوانی تجمعی ارزش خالص فعلی، سود حاصل از فازها و تجزیه و تحلیل نمودار فوق‌الذکر به

^۱ - Optimal Extraction Sequence

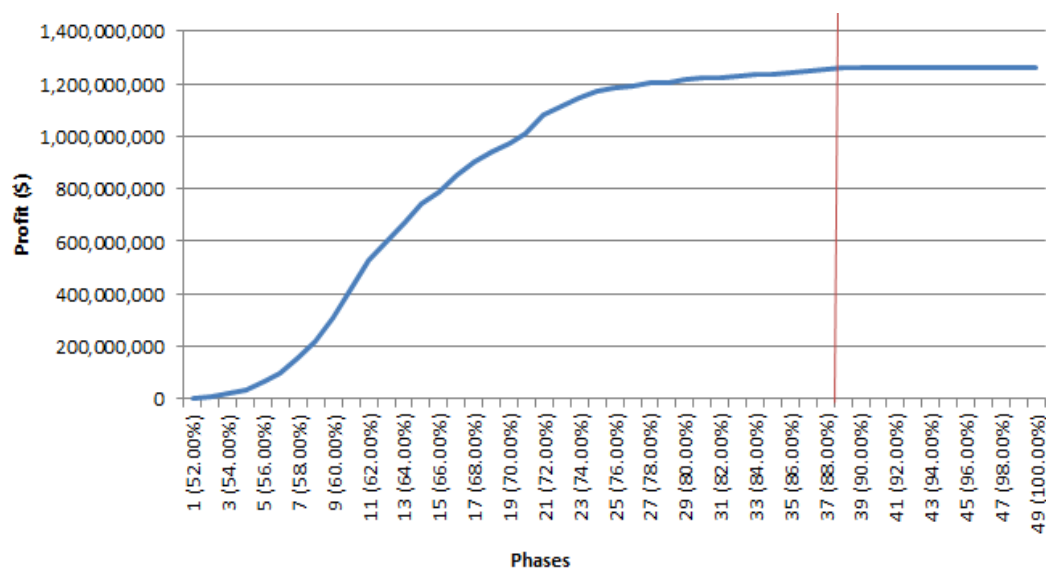
^۲ - Disconted Cash Flow

صورت همزمان می‌توان به پیت بهینه و محدوده‌ای از پیت‌های بهینه دست یافت. ممکن است این پیت یا پیت‌ها از پیت نهایی^۱ کوچکتر باشند. با وجود اینکه نرم‌افزار پیتی را ارائه می‌دهد که ارزش خالص آن بیشینه است؛ ولی اگر روند کلی پارامترهای مختلف فازهای ایجاد شده به صورت تجمعی بررسی شود آنگاه از یک مرحله (فاز یا فازها) به بعد با افزایش پارامترهای دیگر میزان ارزش خالص فعلی و سود (جریان نقدینگی تنزیل نشده) افزایش زیادی نداشته و تاحدودی ثابت باقی می‌ماند که علت این امر را می‌توان افزایش نسبت باطله‌برداری و افزایش عمر معدن ضمن گسترش بیشتر ابعاد کاواک نهایی دانست. بسته به معیار مورد نظر (سود یا NPV) می‌توان محدوده‌ی فازی را به عنوان محدوده‌ی پیت بهینه در نظر گرفت که فازهای بعد از آن با وجود افزایش قابل توجه مقادیر ماده معدنی میزان ارزش خالص فعلی و ارزش خالص تجمعی تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد. با در نظر گرفتن ارزش خالص فعلی به عنوان معیار انتخاب پیت نهایی همان طور که در شکل (۵-۲) نیز مشخص است از فاز ۲۴ به بعد با افزایش سود و ابعاد پیت، فازهای استخراجی افزایش زیادی را در میزان ارزش خالص فعلی نشان نمی‌دهند. یعنی از فاز ۲۴ به بعد معدنکاری با توجه به میزان عمر معدن معقولانه نیست. ولی اگر ارزش خالص پیت به عنوان معیار انتخاب پیت بهینه در نظر گرفته شود آنگاه محدوده‌ی فاز ۳۷ می‌تواند انتخاب شود (شکل (۵-۳)). بنابراین پیت‌های ۲۴ یا ۳۷ و پیت‌های تودرتوی درون آن‌ها پیت نهایی بهینه محسوب می‌شوند. در شکل (۵-۴) پیت نهایی و پیت‌های تودرتوی بهینه شده برای مدل تخمینی (کریجینگ شده) نشان داده شده است.

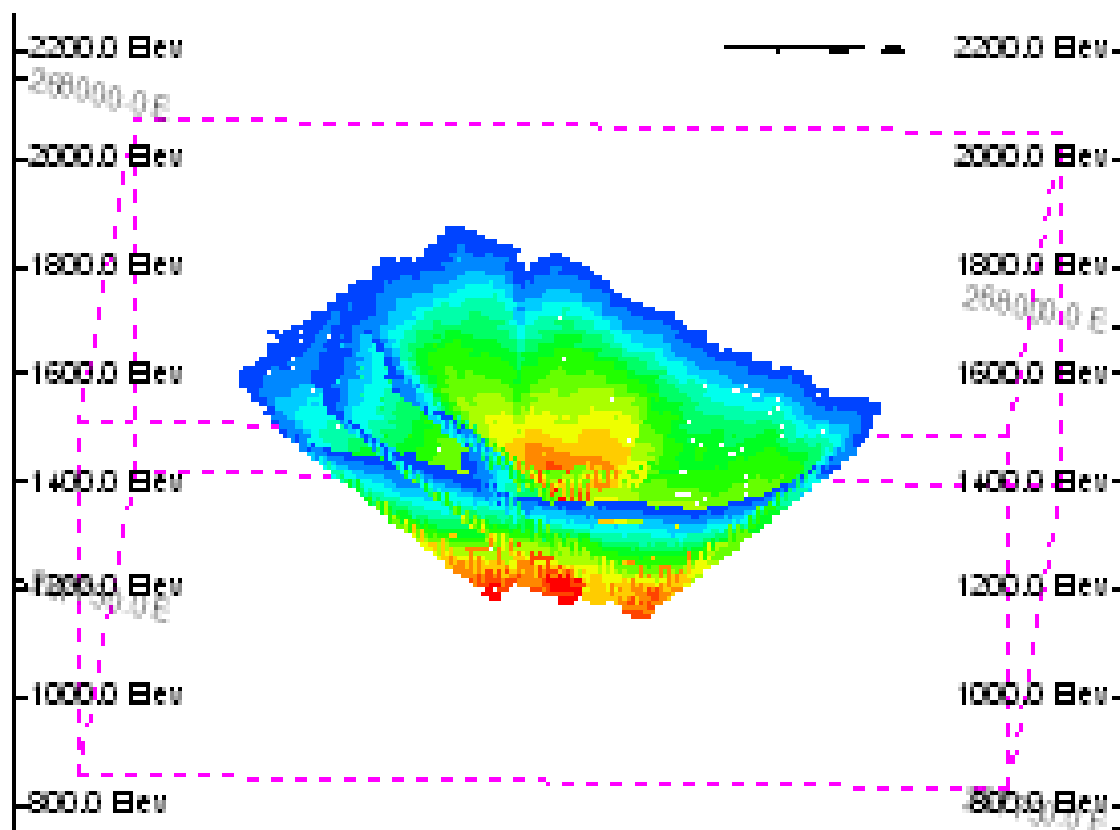
¹ - Ultimate Pit



شکل (۲-۵) نمودار تجمعی ارزش خالص فعلی و تعیین محدوده‌ی نهایی بهینه



شکل (۳-۵) نمودار سود تجمعی و تشخیص پیت نهایی بهینه



شکل (۴-۵) شکل پیت نهایی و شکل پیت فازهای ۲۴ و ۳۷، پیت بیرونی، درونی و مابین (وسط) به ترتیب محدوده‌ی پیت نهایی، فاز ۲۴ و فاز ۲۷ را نشان می‌دهد.

۵-۶- بررسی عدم قطعیت برای یک شکل پیت نهایی معین

هدف از این تحلیل ارزیابی حساسیت پارامترهای مختلف طراحی پیت معدن به عدم قطعیت عیار است. فرآیندی که به عنوان بهینه‌سازی محدوده شناخته می‌شود معمولاً بر اساس مدل تخمینی ذخیره و با استفاده از اجرای فازهای تودرتوی الگوریتم لرج و گروسمن نرم‌افزار NPV Scheduler انجام می‌شود. نتیجه‌ی فرآیند بهینه‌سازی یک سری شکل‌های محدوده است. همان طور که عنوان شد، معیارهای متفاوتی می‌تواند برای انتخاب شکل پیت نهایی استفاده شود که شامل ارزش خالص پیت و ارزش خالص فعلی بر اساس یک توالی استخراج است. سپس این شکل پیت نهایی به عنوان مبنا برای برنامه‌ریزی و طراحی محدوده استفاده می‌شود. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی شده‌ی شرطی به عنوان ورودی برنامه‌های تحلیلی و بهینه‌سازی می‌تواند برای ارزیابی عددی ریسک ناشی از عدم قطعیت توزیع عیارهای

حقیقی ولی ناشناخته استفاده شود. در روند ارائه شده زیر یک محدوده نهایی پیت ایجاد شده در نرم افزار NPV Scheduler در برابر مجموعه‌ای از مدل‌های شبیه‌سازی شده ماده معدنی (۵۰ تحقق) مقایسه و ارزیابی شده است.

ا- برای ارزیابی عدم قطعیت روی پارامترهای اصلی مؤثر در انتخاب شکل پیت نهایی، روند طی شده مطابق مراحل زیر بوده است:

ب- برای بهینه‌سازی پیت نهایی برای دستیابی به یک پیت بهینه‌ی مبنا (در این بررسی بهینه‌سازی روی مدل بلوکی تخمینی انجام شده است).

ت- نتیجه‌ی بهینه‌سازی به وسیله‌ی نرم افزار NPV Scheduler پوشه‌ی فازهای ایجاد شده برای بهینه‌سازی است که شامل اطلاعات کلیه فازها است و هر بلوک نیز بخشی از یکی از آنها است.

ث- به کار بردن پوشه فازهای تولید شده در مرحله‌ی قبل برای هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی شده‌ی ماده معدنی.

اجرای برنامه‌ی تنظیم شده‌ی NPV Scheduler برای ایجاد اطلاعات یکسانی که قبلاً به وسیله‌ی تحلیل روی بهینه‌سازی پیت اصلی ایجاد شده است. تجزیه و تحلیل باید برای هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی شده‌ی در دسترس انجام شود.

با اجرای روند بالا دامنه‌ای از خروجی‌های متناوب برای فرآیند بهینه‌سازی اصلی ایجاد می‌شود که این محدوده به طراحان امکان ارزیابی دامنه‌ی احتمالی ماده معدنی و فلز محتوی و یک سری از شاخص‌های مهم اقتصادی را فراهم می‌سازد. شکل (۵-۵)، تناژ پیش‌بینی شده‌ی ماده معدنی محتوی فازها را نشان می‌دهد. خط ضخیم مطابق نتایج به دست آمده از تحلیل روی شکل‌های افزایشی (فازها) بهینه‌سازی شده بر اساس مدل بلوکی زمین‌شناسی تخمینی است که از این به بعد برای سادگی با عنوان مدل تخمینی بیان خواهد شد و خط‌های نازک نیز مطابق نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل‌های انجام

شده بر روی هر یک از مدل‌های بلوکی زمین‌شناسی شبیه‌سازی شده است که این‌ها نیز با عنوان مدل‌ها یا تحقق‌های شبیه‌سازی شده بیان خواهند شد. در فازهای اولیه مقدار ماده معدنی تخمینی به طور تقریبی $69/35$ درصد کمتر از مقدار مورد انتظار^۱ شبیه‌سازی‌ها است. میزان این اختلاف به سمت فازهای میانی کاهش می‌یابد و به $12/3$ درصد می‌رسد. تناژ تخمینی در این قسمت به حدود 37 میلیون تن می‌رسد. ولی از این قسمت به بعد اختلاف میزان ماده معدنی تخمینی نسبت به مقادیر مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها روند افزایشی را نشان می‌دهد به گونه‌ای که در فازهای انتهایی میزان مواد معدنی تخمینی از مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها بالاتر می‌رود و اختلاف به میزان تقریبی $8/55$ درصد می‌رسد. مقدار تخمینی ماده معدنی محتوای پیت نهایی به حدود 52 میلیون تن می‌رسد، در حالی که شبیه‌سازی‌ها مقدار میانگین تقریبی 48 میلیون تن را پیش‌بینی می‌کنند. منحنی ریسک^۲ ماده معدنی محتوای فازها از $29/1$ میلیون تن تا $67/3$ میلیون تن است که این هم متناظر با یک دامنه‌ی $39/93$ - درصد به $38/84$ + درصد نسبت به ارزش مورد انتظار است. نکته‌ی جالب توجه شیب زیاد نمودار تجمعی است که در فازهای میانی و انتهایی با افزایش اندک ابعاد پیت مقادیر ماده معدنی به طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابند. در ضمن گستردگی دامنه‌ی مقادیر شبیه‌سازی‌ها نیز قابل ملاحظه است که نشان از حساسیت این فازها نسبت به عدم قطعیت عیار دارد. همچنین می‌تواند منطقه‌ای برای افزایش اطلاعات (اضافه حفاری‌ها و مطالعات زمین‌شناسی) باشد. در تجزیه و تحلیل‌های بعدی نیز از اصطلاحاتی مثل: فازهای ابتدایی، فازهای میانی و فازهای انتهایی به همراه منحنی ریسک و ارزش یا مقدار مورد انتظار استفاده شده است که لازم است در این بخش توضیحاتی مختصر در مورد آن‌ها بیان شود. از آنجا که تعداد فازها در بهینه‌سازی‌های مختلف یکسان نمی‌باشد بنابراین ارزیابی‌ها براساس شماره‌ی دقیق فازها تا حدودی سخت و مشکل خواهد بود. بنابراین مجموعه‌ی فازها به سه بخش فازهای اولیه، میانی و انتهایی تقسیم شده است که فازهای

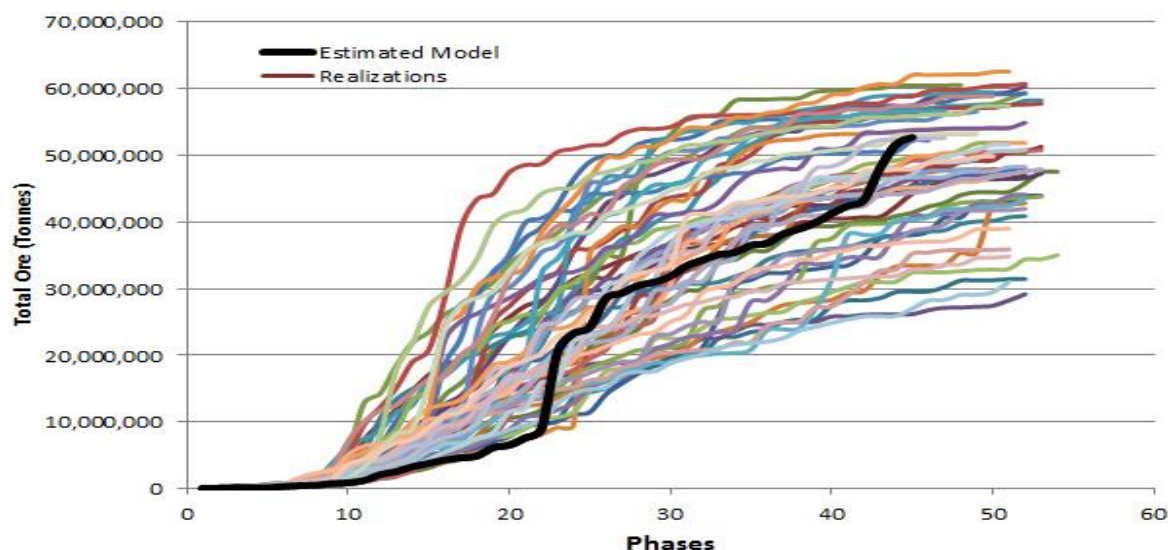
¹ -Expected Value

² - Risk Profile

ابتدایی تا حدود فاز ۲۰، فاز میانی از فاز ۲۰ تا حدود فاز ۴۰ و فازهای انتهایی از فاز ۴۰ تا فازهای نهایی خواهد بود. همچنین منظور از منحنی ریسک دامنه‌ی تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به ارزش مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها است. منظور از ارزش مورد انتظار نیز امید ریاضی یا میانگین مقادیر مورد انتظار می‌باشد و از میانگین‌گیری مقادیر شبیه‌سازی شده بدست می‌آید. اما نحوه‌ی محاسبه‌ی منحنی ریسک بدین صورت است که کمترین و بیشترین مقدار شبیه‌سازی‌ها برای پارامتر مورد نظر نسبت به مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها سنجیده می‌شود، یعنی درصد آن‌ها محاسبه می‌شود. در جدول (۵-۲) تناژ کل ماده معدنی محتوای فازهای ابتدایی، میانی و انتهایی به همراه ارزش مورد انتظار و درصد ریسک آن‌ها نشان داده شده است.

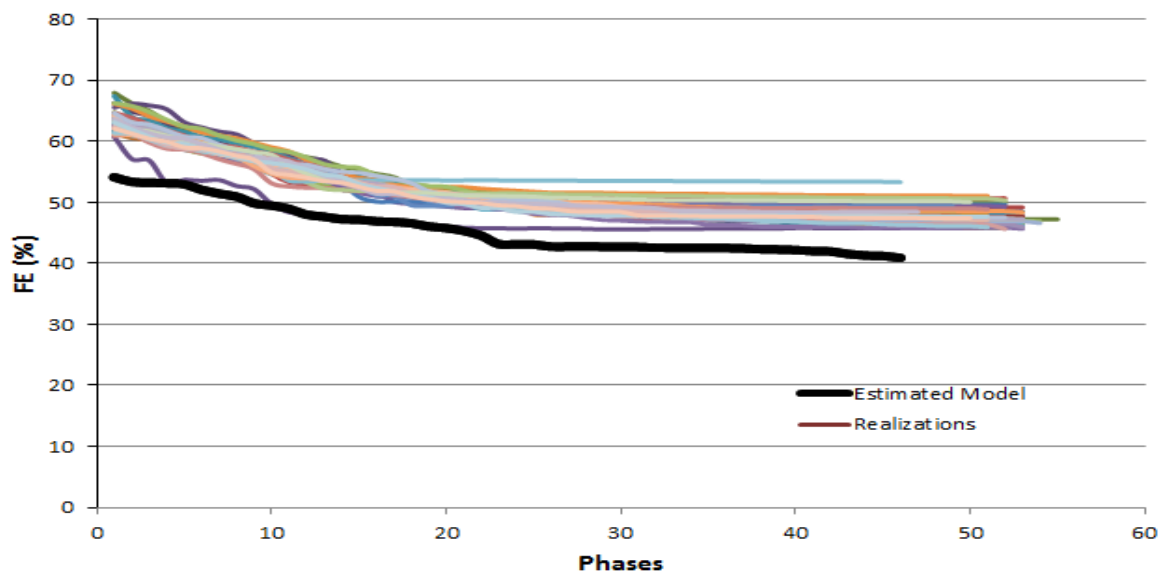
جدول (۵-۲) تناژ کل ماده معدنی محتوای فازهای ابتدایی، میانی و انتهایی به همراه ارزش مورد انتظار و درصد ریسک

ابتدایی	میانی	انتهایی	فازها شرح
۴,۹۱۳,۹۲۷	۳۶,۸۱۴,۰۹۱	۵۲,۶۹۲,۳۷۳	مقدار تخمینی
-۶۹/۳۵	-۱۲/۳۱	+۸/۵۵	درصد مقادیر تخمینی نسبت به مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها
۵,۴۷۱,۴۴۳	۲۲,۰۶۰,۷۲۰	۲۹,۱۶۰,۹۲۴	حداقل مقدار شبیه‌سازی‌ها
۵۱,۴۴۶,۹۱۰	۶۶,۶۱۰,۱۱۳	۶۷,۳۹۶,۷۴۶	حداکثر مقدار شبیه‌سازی‌ها
۱۶,۰۳۱,۲۲۲	۴۱,۹۸۰,۵۰۱	۴۸,۵۴۲,۰۴۹	مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها
-۶۵/۸۷	-۴۷/۴۵	-۳۹/۹۳	منحنی ریسک حداقل مقادیر شبیه‌سازی‌ها
+۲۲۰/۹۲	۵۸/۶۷	۳۸/۸۴	منحنی ریسک حداکثر مقادیر شبیه‌سازی‌ها

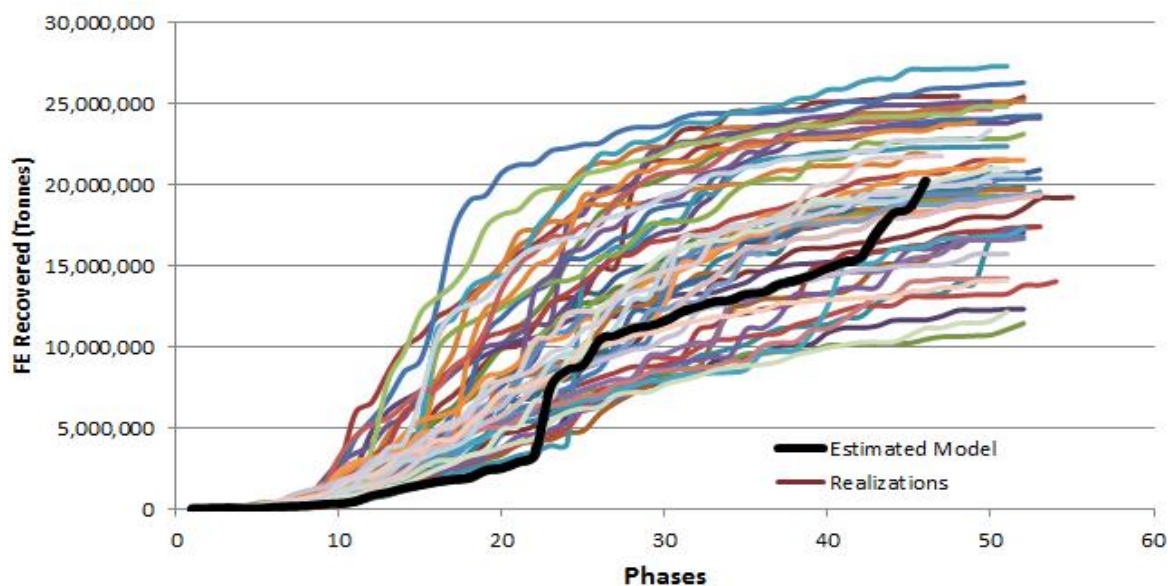


شکل (۵-۵) تناژ کل ماده معدنی برای فازهای افزایشی پیت‌ها

تحلیل‌های مشابهی روی عیار سنگ آهن انجام شده است. شکل (۵-۶) عیار خوراک آسیا را براساس مدل بلوکی تخمینی و مدل بلوکی شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مذکور مشاهده می‌شود، عیار تخمینی کمتر از عیارهای شبیه‌سازی شده است. در فاز شماره‌ی یک، پیش‌بینی‌های مدل تخمینی برای عیار سنگ آهن یک عیار متوسط $54/14$ درصد است در صورتی‌که شبیه‌سازی‌ها یک عیار متوسط $63/37$ درصد را نشان می‌دهند. این اختلاف تا محدوده‌ی فاز ۱۰ با وجود نوسانات در فازهای مختلف تقریباً ثابت باقی می‌ماند. روند هر دو مدل نزولی بوده و میزان اختلاف از محدوده‌ی فازهای میانی به بعد کاهش محسوسی می‌یابد. دلیل بالا بودن عیار ماده معدنی در فازهای ابتدایی به این دلیل است که در فرآیند بهینه‌سازی بر مبنای یک الگوریتم ابتکاری، مواد معدنی پرعیار برای بیشینه نمودن ارزش خالص فعلی در سال‌های اولیه استخراج می‌شوند. منحنی ریسک روی عیار سنگ آهن از $45/64$ درصد به $53/33$ درصد است که این هم متناظر با یک دامنه‌ی $5/03$ - درصد به $10/95$ + درصد نسبت به ارزش مورد انتظار $48/07$ درصد است.



شکل (۶-۵) عیار خوراک آسیا برای فازهای افزایشی پیت‌ها



شکل (۷-۵) تناژ فلز قابل بازیابی برای فازهای افزایشی پیت‌ها

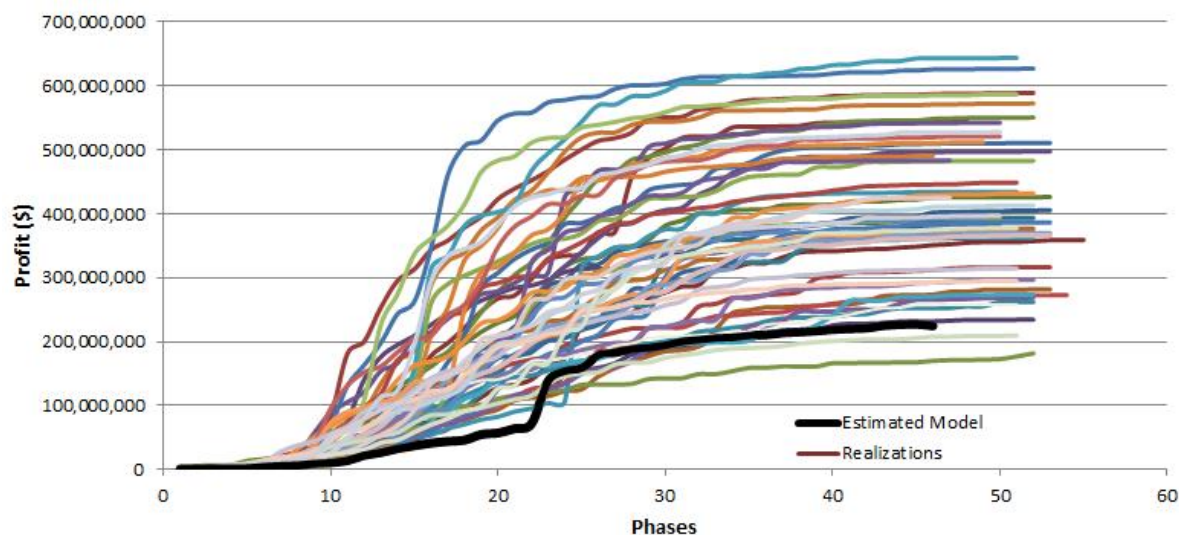
شکل (۷-۵) فلز قابل بازیابی پیش‌بینی شده بوسیله‌ی تجزیه و تحلیل‌ها را نشان می‌دهد. روند مشاهده شده در این بررسی مشابه روند موجود در مقادیر ماده معدنی و مقدار سنگ محتوای فازها است. در محدوده‌ی فازهای ابتدایی و میانی احتمال کمی برای دستیابی به مقادیر فلز قابل بازیابی پیش‌بینی

شده برای مدل تخمینی وجود دارد. با توجه به اینکه مدل تخمینی مقدار ماده معدنی و فلز قابل بازیابی را نسبت به شبیه‌سازی‌ها بجز فازهای انتهایی کمتر تخمین زده است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل تخمینی به دلیل تأثیر هموارسازی‌های مفرط مستعد کمتر تخمین زدن عیارها است. نتایج تحلیل‌های انجام گرفته روی عیار سنگ آهن (شکل (۵-۶)) نیز نشان از کمتر بودن عیار سنگ آهن پیش‌بینی شده بوسیله‌ی مدل تخمینی نسبت به شبیه‌سازی‌ها دارد.

دلیل این امر را شاید بتوان در این موضوع جستجو نمود که با توجه به توزیع عیار گمانه‌ها و عیارهای تخمینی (شکل (۴-۲۲-الف) و شکل (۴-۲۲-ب))، کریجینگ باعث شده تا عیارهای بالا که فراوانی آن‌ها نیز زیاد است به عیارهای کمتری تنزیل یابند ولی نه تا آن حدی که از عیار حد پایین‌تر قرار بگیرند، و به باطله تبدیل شوند. ولی در مقابل عیارهای کم که فراوانی آن‌ها نسبت به عیارهای بالا کمتر است، گستردگی زیادی دارند و در فرآیند تخمین، عیارهای بالایی به آن‌ها اختصاص یافته، به طوریکه عیارهای خیلی کم به عیارهای کمی بالاتر و عیارهای نزدیک عیار حد اما کمتر از آن به عیارهای بالای عیار حد ارتقاء یافته‌اند. بنابراین ضمن افزایش مقدار ماده معدنی مقدار میانگین عیار کاهش می‌یابد، زیرا عیارهای بالایی که عیارهای آن‌ها تنزیل یافته است، به باطله تبدیل نشده‌اند. ولی در عوض باطله‌ها به ماده معدنی اضافه شده‌اند. بنابراین مقدار ماده معدنی و سنگ محتوای فازهای ابتدایی کمتر (عیارهای بالا) و فازهای انتهایی (عیارهای کم) بیشتر تخمین زده شده‌اند، حال آنکه فراوانی عیارهای بالا بیشتر از فراوانی عیارهای کم نزدیک به عیار حد است. اما گستردگی عیارهای کم بیشتر است و این امر باعث شده تا در فرآیند تخمین با اختصاص عیارهای بیشتر به آن‌ها فراوانی آن‌ها زیاد شده و گستردگی آن‌ها کاهش یابد.

در محدوده‌ی فازهای اولیه، فراوانی تجمعی ارزش خالص (شکل (۵-۸)) حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی شده افزایش میانگین تقریبی ۷۶/۴۴ درصدی نسبت به ارزش خالص پیش‌بینی شده به

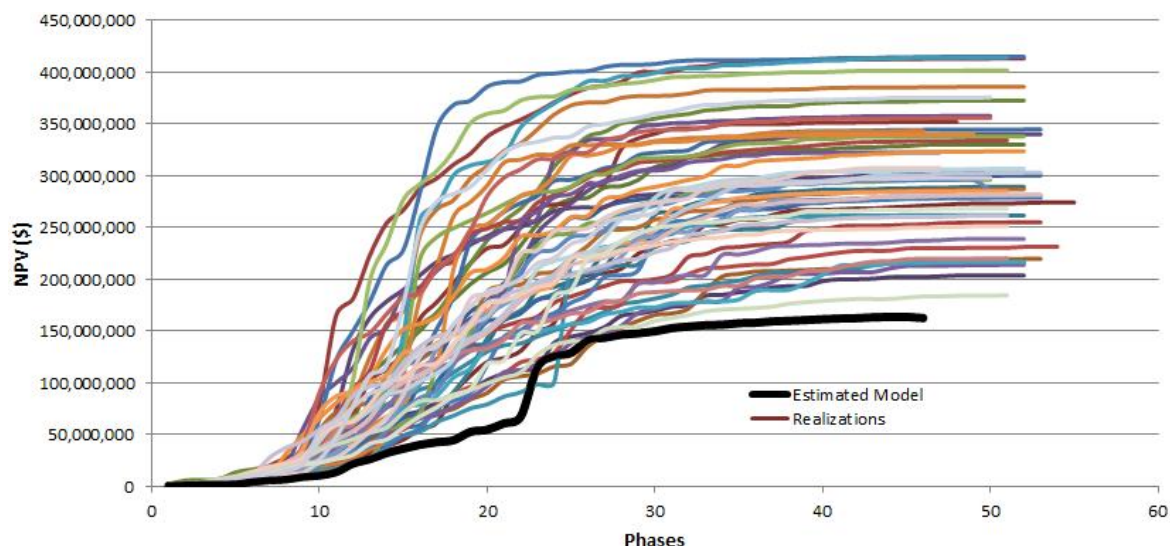
وسیله‌ی مدل تخمینی را نشان می‌دهد. این درصد تا محدوده‌ی فازهای میانی کاهش می‌یابد و مقادیر تخمینی به مقادیر مورد انتظار همگرایی نشان می‌دهند، تا حدی که این اختلاف به میانگین تقریبی ۴۶/۲۵ درصد می‌رسد، ولی بعد از آن تا انتها با شدت کمتری این اختلاف افزایش یافته تا اینکه به مقدار میانگین تقریبی ۵۴/۳۴ درصد می‌رسد. اگر ارزش خالص فعلی به عنوان معیار انتخاب پیت نهایی در نظر گرفته شود، آنگاه مدل تخمینی برای انتخاب شدن به عنوان پیت نهایی شانس زیادی نخواهد داشت، زیرا با مقادیر مورد انتظار اختلاف خیلی زیادی دارد. دامنه‌ی شبیه‌سازی‌ها گستردگی زیادی را نشان می‌دهد که نشان از حساسیت زیاد ارزش خالص پیت به عدم قطعیت عیار دارد.



شکل (۸-۵) ارزش خالص تجمعی (سود) برای فازهای افزایشی پیت‌ها

همچنین ارزش خالص فعلی نیز مطابق شکل (۹-۵) روند مشابهی را نشان می‌دهد، با این تفاوت که دامنه‌ی شبیه‌سازی‌ها محدوده‌ی متراکم‌تری را نسبت به ارزش خالص ارائه می‌دهد که این امر نیز به تنزیل یافته بودن ارزش خالص فعلی بر می‌گردد. نکته‌ی جالب توجه اختلاف زیادتر مقدار تخمینی ارزش خالص فعلی نهایی و ارزش خالص فعلی مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها نسبت به این اختلاف در ارزش خالص است. (البته در فازهای ابتدایی تا میانی چنین اختلاف زیادی وجود ندارد). این امر میزان اطمینان ارزش

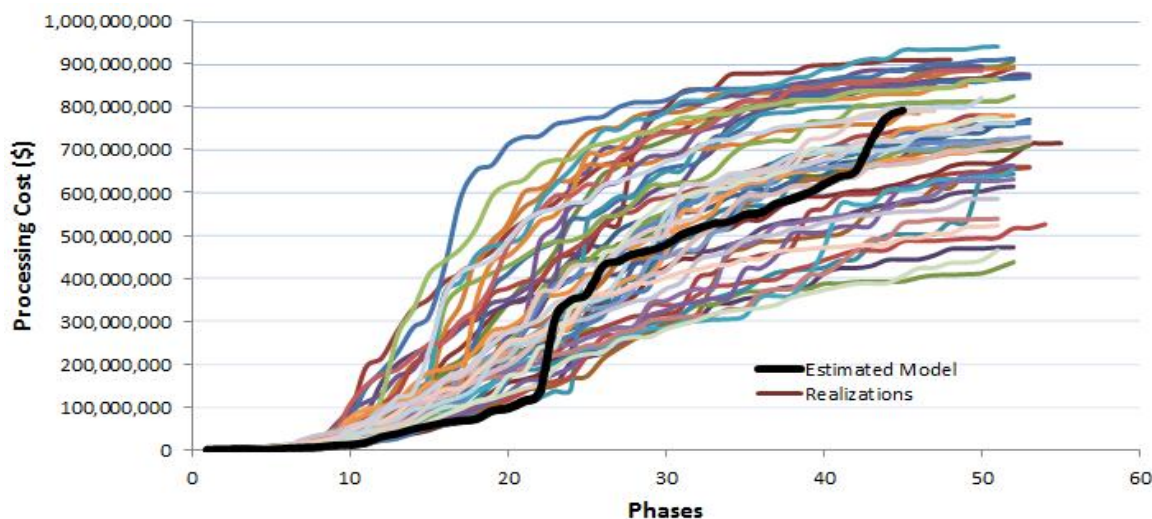
خالص فعلی نهایی طرح پیت تخمینی را نسبت به عدم قطعیت عیار نشان می‌دهد. ارزش خالص فعلی تخمینی ۱۶۲/۴ میلیون دلار در مقابل ۳۰۱/۱ میلیون دلار مورد انتظار است. منحنی ریسک روی NPV تقریباً از ۱۴۵ میلیون دلار تا ۴۷۲ میلیون دلار است که این هم متناظر با یک دامنه‌ی ۵۱/۸- درصد به ۵۶/۸+ درصد نسبت به ارزش مورد انتظار است.



شکل (۵-۹) ارزش خالص فعلی تجمعی فازهای افزایشی

تجزیه و تحلیل‌های تنظیم شده، روی هزینه‌های فرآوری نیز صورت گرفته است که روند مشاهده شده در شکل (۵-۱۰) تقریباً نشان از کمتر بودن مقادیر پیش‌بینی شده‌ی تخمینی نسبت به مقادیر مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها در فازهای اولیه و میانی است. این امر بیشتر به کمتر بودن مقدار ماده معدنی محتوای فازهای افزایشی در این فازها بر می‌گردد. در فازهای میانی اختلاف مدل تخمینی و مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها کمتر شده و در فازهای انتهایی حتی مقدار تخمینی از مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها بیشتر نیز می‌شود. این امر نیز به دلیل زیاده‌تر بودن مقدار ماده معدنی محتوای فازهای انتهایی پیش‌بینی شده به وسیله‌ی مدل تخمینی نسبت به مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها است. این امر نیز به نوبه‌ی خود از هموارسازی مفرط ماده معدنی محتوای فازهای انتهایی ناشی می‌شود. از ترکیب

نمودارهای هزینه‌ی فرآوری و مقادیر مواد معدنی محتوای فازها به همراه نمودار تجمعی فلز بازیابی شده می‌توان دریافت که مقادیر باطله‌ی همراه مواد معدنی محتوای فازها برای مدل تخمینی در فازهای انتهایی قابل توجه است، به گونه‌ای که روند مشاهده شده برای مدل تخمینی در هزینه‌های فرآوری و مواد معدنی محتوای فازها روند کاملاً مشابهی است. در فازهای انتهایی نیز اختلاف مقدار تخمینی و مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها در هر دو مورد تقریباً یکسان است. در حالی که این اختلاف در فلز بازیابی شده کمتر می‌باشد و این بدین معناست که مقدار باطله‌ی همراه ماده معدنی در این فازها به اندازه‌ای بوده که باعث کاهش فلز قابل بازیابی شده است. در واقع اختلاف مدل تخمینی با مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها در فلز قابل بازیابی کمتر از این اختلاف در مقدار ماده معدنی و هزینه‌ی فرآوری است.



شکل (۵-۱۰) هزینه‌های فرآوری ناشی از تغییرات عیار برای فازهای افزایشی پیت‌ها

۵-۷- شناسایی توان حداکثر و حداقل ریسک شکل پیت نهایی

هدف از این تحلیل جستجو و یافتن پایین‌ترین/بالا‌ترین توان شکل پیت نهایی انتخاب شده در ارتباط با مدل‌های در دسترس عدم قطعیت عیار است. برای دستیابی به این هدف، بهینه‌سازی پیت روی هر مدل شبیه‌سازی شده به صورت مستقل اجرا شده است. در این بخش تحلیل‌ها به دو قسمت تقسیم می‌شوند:

ابتدا هر خروجی بهینه‌سازی بر حسب ماده معدنی محتوی، کل سنگ محتوای، عیار، فلز و ارزش خالص پیت و ارزش خالص فعلی پیت ارزیابی شده است و این امر یک تعریفی (کمیتی) از پتانسیل پروژه‌ها را با توجه به طرح‌های واقع گرایانه‌ی توزیع فضایی عیارها فراهم می‌سازد.

در قسمت دوم به گسترش فضایی شکل‌های پیت نهایی حاصل از هر بهینه‌سازی مستقل پرداخته شده است. مقایسه‌ی این توده‌ی شکل‌های پیت در مقابل یک طرح خاص، یک ارزیابی از فضاهایی با بیشترین و کمترین ریسک بالقوه را فراهم می‌سازد و می‌تواند برای تعیین اهداف اضافه حفاری استفاده شود. همچنین یک شاخصی برای میزان نیرومندی یک طرح پیت معین نسبت به عدم قطعیت عیار را فراهم می‌سازد. بنابراین در این مرحله تعداد ۱۰۰ تحقق از شبیه‌سازی‌ها بهینه‌سازی شده است.

روند اجرایی طی شده برای گسترش این تجزیه و تحلیل به صورت زیر است:

ا- تنظیم و ایجاد یک طرح جدید برای اجرای بهینه‌سازی در NPV Scheduler و وارد نمودن هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی شده.

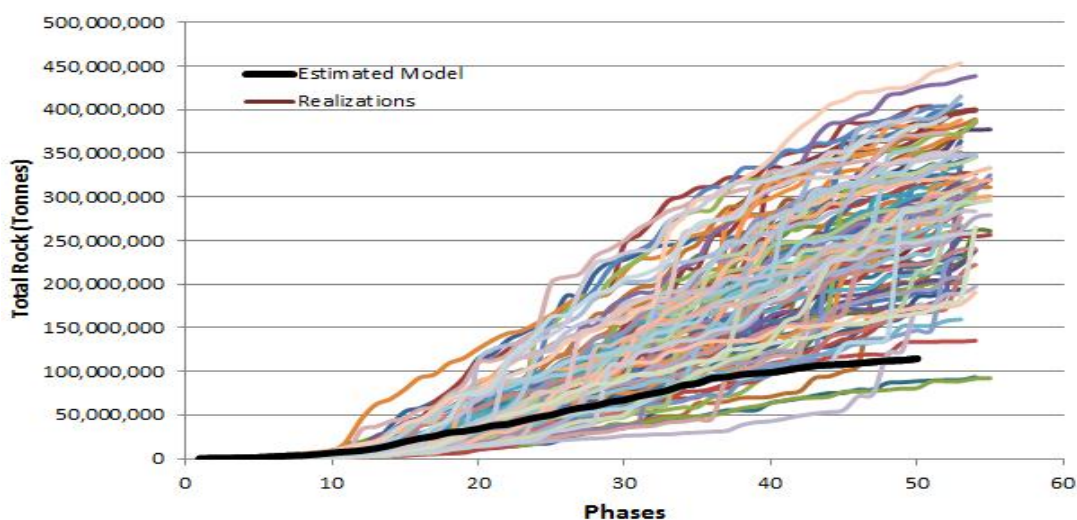
ب- اعمال پارامترهای یکسان برای هر مدل و اجرای بهینه‌سازی که این فرآیند یک فایل نتایج فازها و پیت نهایی را برای هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی شده ایجاد خواهد کرد.

ت- تجزیه و تحلیل نتایج برای ایجاد اطلاعات مختصر مناسب که تجزیه و تحلیل‌ها باید برای هر یک مدل‌های شبیه‌سازی شده‌ی در دسترس انجام گیرد.

ث- تهیه پلان‌هایی برای پیت‌های نهایی بهینه شده روی همه‌ی مدل‌های بهینه‌سازی شده.

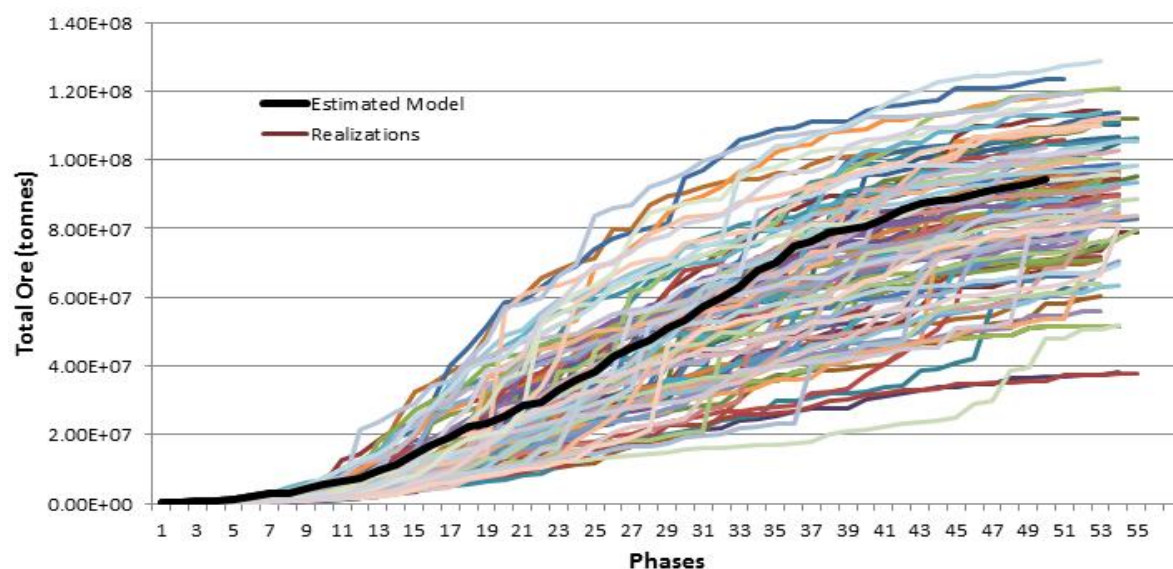
بر خلاف توسعه‌ی تحلیل ریسک روی فازهای پیت نهایی معین، همان طور که در بخش قبل انجام گرفت، روش بالا مجموعه‌های متناوبی از شکل‌های افزایشی را تشکیل می‌دهد. برای هر مدل شبیه‌سازی شده یک مجموعه‌ای از فازها تشکیل می‌شود.

شکل (۵-۱۱) کل سنگ محتوای هر فاز افزایشی را نشان می‌دهد که به وسیله‌ی هر بهینه‌سازی مستقل ایجاد شده است. این شکل نشان می‌دهد که در فازهای اولیه میزان سنگ محتوی (باطله و ماده معدنی) مدل تخمینی نسبت به مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها به میزان ۱۴/۴۱ درصد کمتر است. در فازهای میانی و انتهایی میزان اختلاف با افزایش ابعاد پیت به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و در فازهای انتهایی مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها ۶۱/۸۹ درصد بیشتر از مقدار تخمینی پیش بینی شده است.

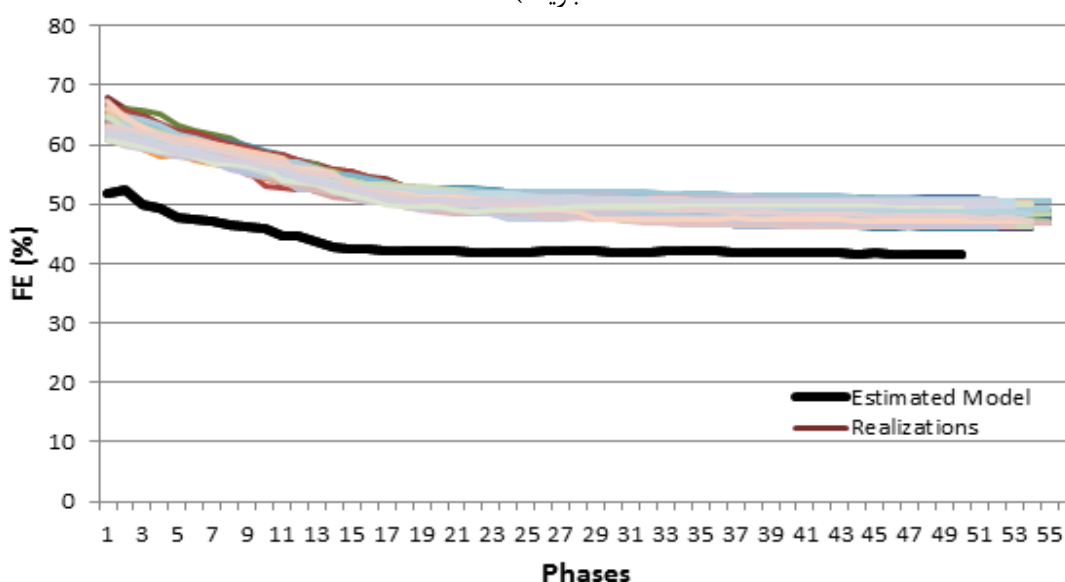


شکل (۵-۱۱) نتایج تناژ کلی سنگ محتوای فازهای افزایشی مدل تخمینی (خط ضخیم) و مدل‌های شبیه‌سازی (خطوط باریک)

از حدود فازهای میانی به بعد مقادیر تخمینی برخلاف مقادیر شبیه‌سازی‌ها با شیب ملایم‌تری افزایش یافته است تا جایی که در فازهای انتهایی با محدوده‌ی انتهایی مقادیر شبیه‌سازی‌ها یکسان شده و در فازهای آخر با افزایش‌های ناچیزی همراه است. گستردگی محدوده‌ی شبیه‌سازی‌ها با افزایش ابعاد پیت افزایش می‌یابد که نشان از حساسیت زیاد پارامتر سنگ محتوای پیت‌های افزایشی در اعماق بیشتر به عدم قطعیت عیار دارد. میانگین سنگ محتوا روی پیت‌های شبیه‌سازی شده تقریباً ۳۰۰ میلیون تن است، در مقابل در پیت تخمینی این مقدار ۱۱۴ میلیون تن است. این امر نشان از بزرگ بودن ابعاد پیت‌های شبیه‌سازی شده دارد.



شکل (۵-۱۲) تناژ کلی ماده معدنی محتوای فازهای افزایشی مدل تخمینی (خط ضخیم) و مدل‌های شبیه‌سازی (خطوط باریک)



شکل (۵-۱۳) نتایج حاصل از ارزیابی تحقق‌های شبیه‌سازی شده و مدل تخمینی برای عیار خوراک آسیا

شکل (۵-۱۲)، نتایج به دست آمده برای کل ماده معدنی محتوای فازها را نشان می‌دهد. در این مورد پیت‌های شبیه‌سازی شده و تخمینی برخلاف کل سنگ محتوا تا فازهای میانی رفتاری متفاوت را نشان می‌دهند. مقدار تخمینی به طور تقریبی ۱۲/۱۶ درصد بیشتر از مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها است. ولی اختلاف‌ها در فازهای میانی و انتهای زیاد تغییر نکرده و مقدار تخمینی از مقدار مورد انتظار

شبیه‌سازی‌های بیشتر است. روند افزایشی مقادیر شبیه‌سازی‌ها و مقدار تخمینی در فازهای مختلف مشابه بوده که این روند در فازهای میانی با ابعاد پیت شدت بیشتری را نشان می‌دهد. همانند سنگ محتوای پیت‌ها با افزایش ابعاد پیت‌ها علاوه بر میزان ماده معدنی محتوا، گستردگی محدوده‌ی شبیه‌سازی‌ها نیز افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد حساسیت ماده معدنی نسبت به عدم قطعیت عیار به خصوص در قسمت‌های عمیق‌تر زیاد است. در جدول (۳-۵) اطلاعات مربوط به تناژ کلی ماده معدنی محتوای فازهای ابتدایی، میانی و انتهایی به همراه درصد ریسک آن‌ها نشان داده شده است.

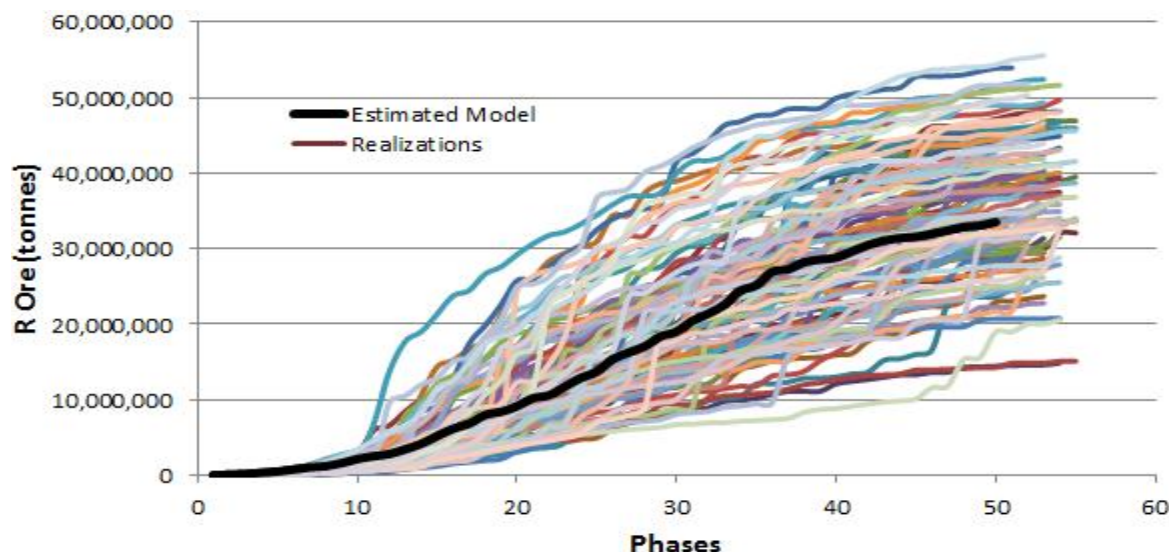
جدول (۳-۵) تناژ کل ماده معدنی محتوای فازهای ابتدایی، میانی و انتهایی به همراه ارزش مورد انتظار و درصد ریسک

ابتدایی	میانی	انتهایی	فازها شرح
۲۵,۴۶۲,۲۳۱	۸۰,۵۸۲,۰۰۸	۹۴,۲۹۰,۱۸۸	مقدار تخمینی
۱۲/۱۶۱	۱۲/۶۷۹	۵/۴۱۹	درصد بیش تخمینی ^۱
۶,۹۷۹,۲۹۹	۲۱,۴۶۵,۱۳۰	۳۷,۸۴۲,۰۸۶	حداقل مقدار شبیه‌سازی‌ها
۵۸,۶۸۷,۹۲۸	۱۱۴,۱۹۲,۹۷۳	۱۲۸,۷۳۹,۹۱۲	حداکثر مقدار شبیه‌سازی‌ها
۲۲,۷۰۱,۳۲۴	۷۱,۵۱۴,۱۵۱	۸۹,۴۴۳,۰۵۶	مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها
-۶۹/۲۵	-۶۹/۹۸	-۵۷/۶۹	منحنی ریسک حداقل مقدار شبیه‌سازی‌ها
۴۳/۹۳	۵۹/۶۷	۵۸/۵۲	منحنی ریسک حداکثر مقدار شبیه‌سازی‌ها

بر حسب عیار سنگ آهن، پیت تخمینی با ۵۱/۸۹ درصد و در مقابل پیت‌های شبیه‌سازی شده با یک مقدار میانگین ۶۳/۱۳ درصد شروع می‌شوند. این اختلاف تا فازهای میانی ثابت باقی می‌ماند. در محدوده‌ی فازهای میانی و انتهایی اختلاف مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها و مقدار تخمینی کاهش می‌یابد ولی خود عیار فلز بازیابی شده در فازهای فوق‌الذکر نسبت به فازهای اولیه کاهش زیادی را نشان نمی‌دهد. محدوده‌ی شبیه‌سازی‌ها نیز گستردگی کمی دارد که نشان دهنده حساسیت کمتر این پارامتر به عدم قطعیت عیار است (شکل (۵-۱۳)). منحنی ریسک در عیار سنگ آهن از ۴۵/۷۶ درصد به ۵۱/۱ درصد

¹ - Overestimate

می‌رسد که این هم متناظر با یک دامنه‌ی $-5/6$ به $+5/4$ درصد نسبت به ارزش مورد انتظار تقریبی $48/34$ درصد است.



شکل (۵-۱۴) تناژ کل فلز قابل بازیابی محتوای فازهای مدل تخمینی (خط ضخیم) و مدل‌های شبیه‌سازی شده (خطوط باریک)

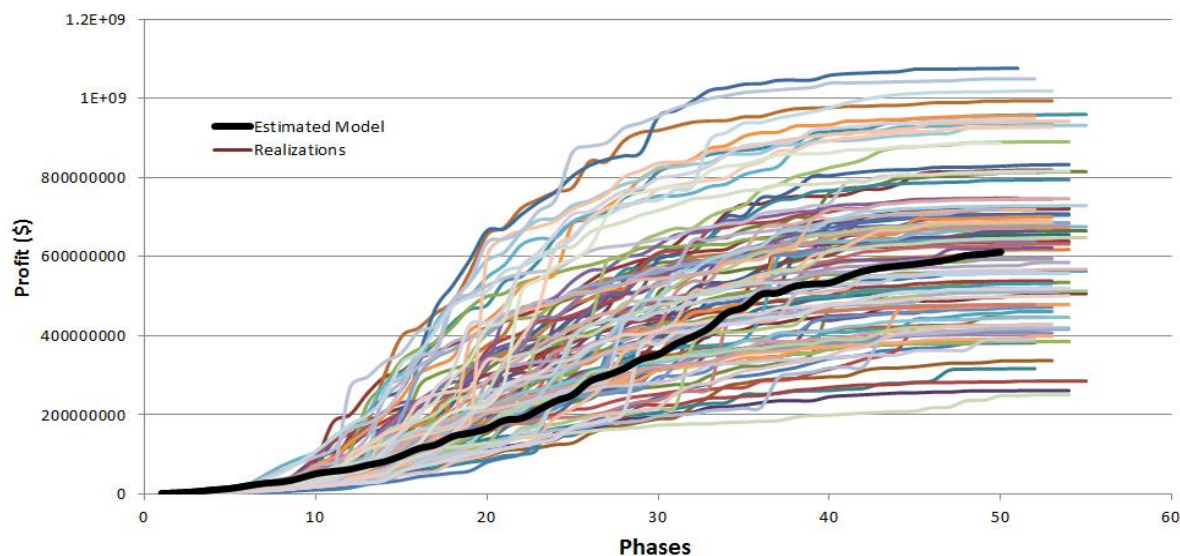
شکل (۵-۱۴) و شکل (۵-۱۵) نتایج به دست آمده برای فلز قابل استحصال و ارزش خالص پیت‌ها را نشان می‌دهند. انتظار می‌رود که فلز قابل استحصال برای پیت‌های تخمینی و شبیه‌سازی شده مطابق روند کلی مشاهده شده در نمودار ماده معدنی محتوای فازها باشد. اما مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها کمتر از مقدار تخمینی در پیت‌های افزایشی است که دلیل آن نیز می‌تواند زیاد بودن باطله‌ی واقعی همراه ماده معدنی محتوای فازها برای مدل تخمینی باشد. روند افزایشی مقدار فلز قابل بازیابی نیز همانند ماده معدنی محتوای فازهای افزایشی است. همچنین با افزایش ابعاد پیت‌های تودرتو گستردگی مقادیر پیش‌بینی شده نیز افزایش می‌یابد که این نیز افزایش عدم قطعیت با عمق و ابعاد پیت‌های افزایشی را نشان می‌دهد.

جدول (۵-۴) اطلاعات کلی فلز قابل بازیابی از فازهای افزایشی را برای مدل تخمینی و مدل‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. فلز قابل بازیابی مورد انتظار پیت‌های شبیه‌سازی شده $37/75$ میلیون تن

در مقابل $33/53$ میلیون تن پیت تخمینی است که این هم کاهش تقریباً $11/19$ درصدی را برای فازهای تخمینی نشان می‌دهد.

جدول (۴-۵) مقادیر حداقل و حداکثر تناژ فلز قابل بازیابی برای محتوای فازهای ابتدایی، میانی و نهایی به همراه مقدار مورد انتظار و درصد ریسک

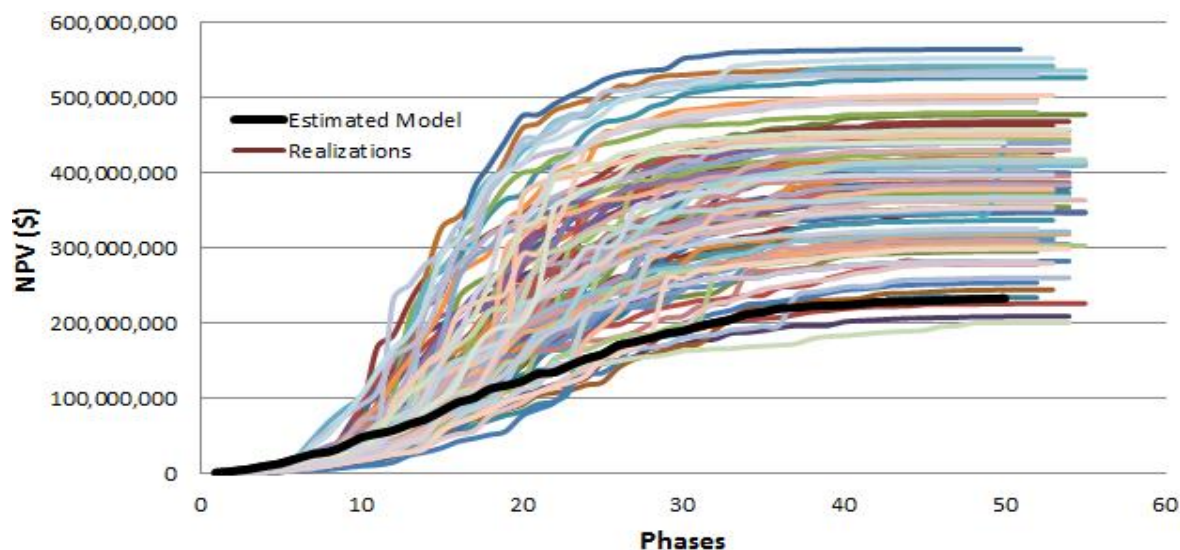
فازها	انتتهایی	میانی	ابتدایی
شرح			
مقدار تخمینی	۳۳,۵۳۱,۶۲۶	۲۸,۸۱۸,۵۳۸	۹,۱۴۳,۶۱۳
درصد بیش تخمینی	-۱۱/۱۹	-۵/۴۴	-۹/۹
حداقل مقدار شبیه‌سازی‌ها	۱۴,۸۷۲,۶۰۳	۸,۸۵۴,۲۹۳	۳,۰۶۹,۱۵۱
حداکثر مقدار شبیه‌سازی‌ها	۵۵,۵۸۷,۵۸۳	۴۹,۹۴۲,۵۴۲	۲۹,۲۳۲,۸۱۱
مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها	۳۷,۷۵۷,۵۹۴	۳۰,۴۷۸,۳۰۲	۱۰,۱۴۸,۹۵۲
منحنی ریسک حداقل مقدار شبیه‌سازی‌ها	-۶۰/۶۱	-۷۰/۹۴	-۶۹/۷۵
منحنی ریسک حداکثر مقدار شبیه‌سازی‌ها	۴۷/۲۲	۶۳/۸۶	۱۸۸/۰۳



شکل (۵-۱۵) سود کلی فازهای افزایشی مدل تخمینی (خط ضخیم) و مدل‌های شبیه‌سازی شده (خطوط باریک)

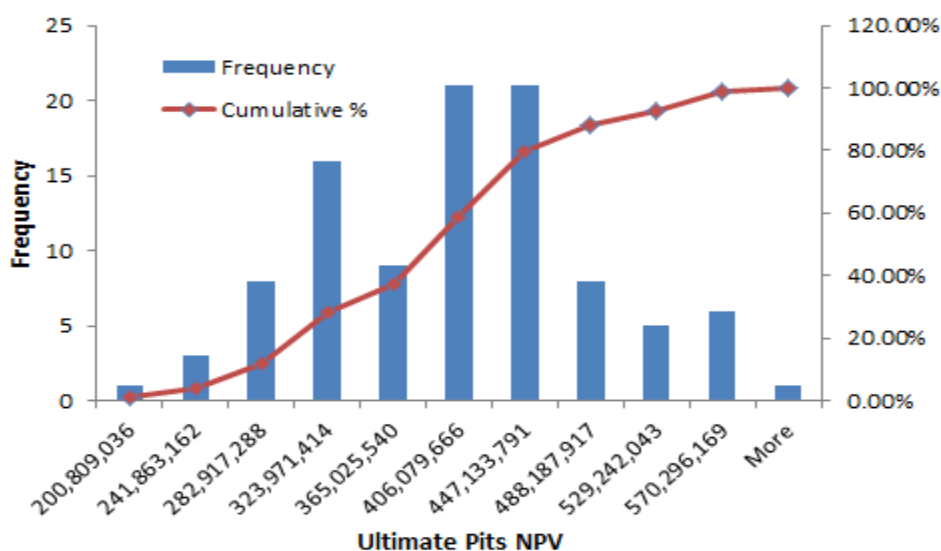
با توجه به نزدیک بودن میزان ماده معدنی پیش بینی شده بوسیله‌ی مدل تخمینی و مدل‌های شبیه‌سازی شده، ترکیب مقدار کم فلز بیشتر با تناژ خیلی بیشتر سنگ در پیت‌های شبیه‌سازی شده

هنگامی که با پیت تخمینی مقایسه می‌شود، انتظار می‌رود که منجر به کاهش قابل توجه ارزش خالص پیت شود. اما در عمل این اتفاق رخ نداده است. علت این امر نیز می‌تواند بالا بودن عیار فلز قابل بازیابی پیش‌بینی شده با مدل‌های شبیه‌سازی شده نسبت به مدل تخمینی باشد که بالا بودن میزان باطله نسبت به مدل تخمینی را جبران نموده است. همچنین با توجه به اینکه میزان فلز قابل بازیابی نیز نسبتاً زیادتر از مدل تخمینی می‌باشد بنابراین باعث بالاتر رفتن ارزش خالص پیت‌های تودرتوی شبیه‌سازی شده گشته است. پیت تخمینی به طور مداوم ارزش خالص کمتری را ارائه می‌دهد. میزان اختلاف بین نتایج دو مدل در فازهای اولیه و میانی بیشتر از فازهای انتهایی است. ارزش خالص میانگین روی پیت‌های شبیه‌سازی شده تقریباً ۶۲۹ میلیون دلار در مقابل ۶۱۱ میلیون دلار پیت تخمینی است (تقریباً ۲/۸۳ درصد بیشتر). منحنی ریسک روی ارزش خالص از ۲۵۰ میلیون دلار به ۱/۱۲۳ میلیارد دلار می‌رسد که این هم متناظر با دامنه‌ی ۷۸/۵- درصد به ۶۰/۲۳+ درصد نسبت به ارزش خالص مورد انتظار است. ارزش خالص فعلی تخمینی شکل (۵-۱۶) نشان از بیش تخمینی واضح مقدار مورد انتظار مدل‌های شبیه‌سازی شده در مقابل تک مدل تخمینی به جز در چند فاز اولیه دارد. از اواسط فازهای ابتدایی اختلاف قابل توجهی بین مقدار تخمینی و مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها به وجود آمده است. در کل پیت‌های افزایشی، مدل تخمینی مقدار ۲۳۲ میلیون دلار و شبیه‌سازی‌ها مقدار مورد انتظار ۳۸۳ میلیون دلار را پیش‌بینی می‌کنند. منحنی ریسک روی ارزش خالص فعلی از ۲۰۰ تا ۵۶۴ میلیون دلار است که این هم متناظر با یک دامنه‌ی ۴۷/۲۴- درصد به ۴۷/۶۲+ درصد نسبت به ارزش مورد انتظار است. هیستوگرام ارزش خالص فعلی محدوده‌های نهایی نیز همان‌طور که در شکل (۵-۱۷) نشان داده شده است، نشان از تکرار بیشتر محدوده‌ی تقریبی ارزش خالص فعلی مورد انتظار دارد. در شکل فوق‌الذکر درصد فراوانی تجمعی NPV های پیش‌بینی شده نیز نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۶) ارزش خالص فعلی فازهای افزایشی مدل تخمینی (خط ضخیم) و مدل‌های شبیه‌سازی شده (خطوط باریک)

Histogram

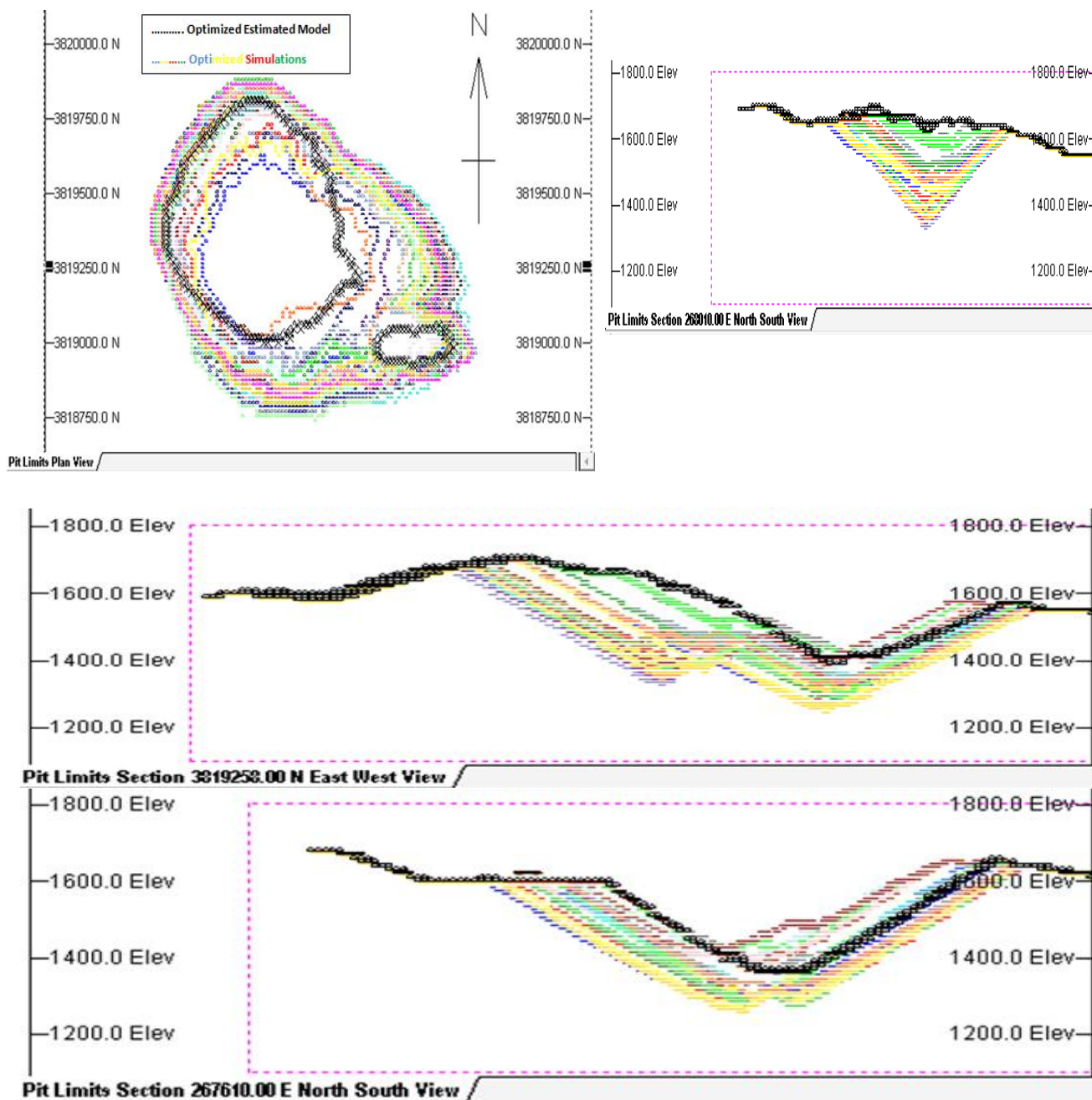


شکل (۵-۱۷) هیستوگرام ارزش خالص فعلی محدوده‌های نهایی

یک دسته از پلان‌ها و سطح مقطع‌ها برای شکل‌های پیت نهایی روی مدل‌های شبیه‌سازی شده ایجاد شده است. این پلان‌ها روی هم قرار گرفته و در شکل (۵-۱۸)، نشان داده شده است. نتایج اصلی حاصل از تحلیل این پلان‌ها به این قرار است که پیت‌های شبیه‌سازی شده به دقت نشان می‌دهند که دیواره‌های طرح تخمینی نسبت به عدم قطعیت عیار پایدار نبوده و در کل نوسانات مشخصی در دیواره‌های پیت وجود دارد که این هم نشان دهنده‌ی سطح‌های بالایی از عدم قطعیت عیار است. این گستردگی‌ها

ریسک نامطلوب بالقوه را ارائه می‌دهند. مهمترین مشخصه‌ی طرح پیت تخمینی دو قسمت بودن محدوده‌ی نهایی است. این ناحیه با توجه به محدوده‌های شبیه‌سازی شده نسبت به تغییرات عیار حساسیت خیلی زیادی را نشان می‌دهد. دلیل این امر می‌تواند کمبود اطلاعات در این قسمت باشد. در این قسمت شبیه‌سازی‌ها محدوده‌های وسیعی را نشان می‌دهند که به وسیله‌ی مدل تخمینی پوشش داده نمی‌شود. اکثر محدوده‌های شبیه‌سازی شده محدوده‌ی یکپارچه‌ای بوده و هر دو محدوده‌ی کوچک و بزرگ تخمینی را تا حدودی شامل می‌شوند. در بین مدل‌های شبیه‌سازی شده برخی نیز مانند مدل تخمینی محدوده‌ی دو قسمتی را برای معدن پیش بینی می‌کنند. اما تعداد آن‌ها خیلی کم می‌باشد که نشان از ضعیف بودن احتمال دو قسمت شدن محدوده‌ی نهایی واقعی دارد. گستردگی محدوده‌های شبیه‌سازی شده در دیواره‌های شمالی و غربی محدوده‌ی نهایی معدن در مقایسه با دیواره‌ی جنوبی و شرقی کمتر بوده و بخش‌های بیشتری از آن‌ها نیز به وسیله‌ی محدوده‌ی مدل تخمینی پوشش داده می‌شود. اما با توجه به این که خود محدوده‌های شبیه‌سازی‌ها نیز در این ناحیه دارای گستردگی وسیعی می‌باشند بنابراین محدوده‌ی تخمینی در این ناحیه نیز نمی‌تواند از اطمینان بالایی برخوردار باشد. پس در انتخاب محدوده‌ی نهایی با توجه به مدل تخمینی باید با احتیاط عمل نمود. همچنین گستردگی محدوده‌ی پیت‌ها در عمق نیز ادامه می‌یابد و تا عمق ۱۲۰۰ متری نیز پیت‌های شبیه‌سازی شده گسترش می‌یابند و از سطح زمین تا این عمق در بخش جنوبی به ویژه گستردگی پیت‌ها ادامه دارد. در مقاطع شرقی-غربی و شمالی-جنوبی ایجاد شده، گستردگی پیت‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها افزایش عدم قطعیت در توزیع عیارها را در عمق منعکس می‌کند که مستقیماً به کمبود حفاری و نمونه برداری ربط دارد. علاوه بر آن پیت حاصل از مدل بلوکی تخمینی این پیت‌ها را در بر نمی‌گیرد که نشان از این دارد که اگر پیت معدن بر اساس مدل تخمینی طراحی شود آنگاه اتلاف ماده معدنی وجود خواهد داشت. ولی نسبت به

اینکه آیا پیت طراحی شده بهینه‌ی واقعی است یا نه با وجود نوسانات موجود در عمق نیاز به اطلاعات بیشتر از این قسمت دارد. به عبارت دیگر این قسمت از پیت می‌تواند جزو اهداف اضافه حفاری باشد.

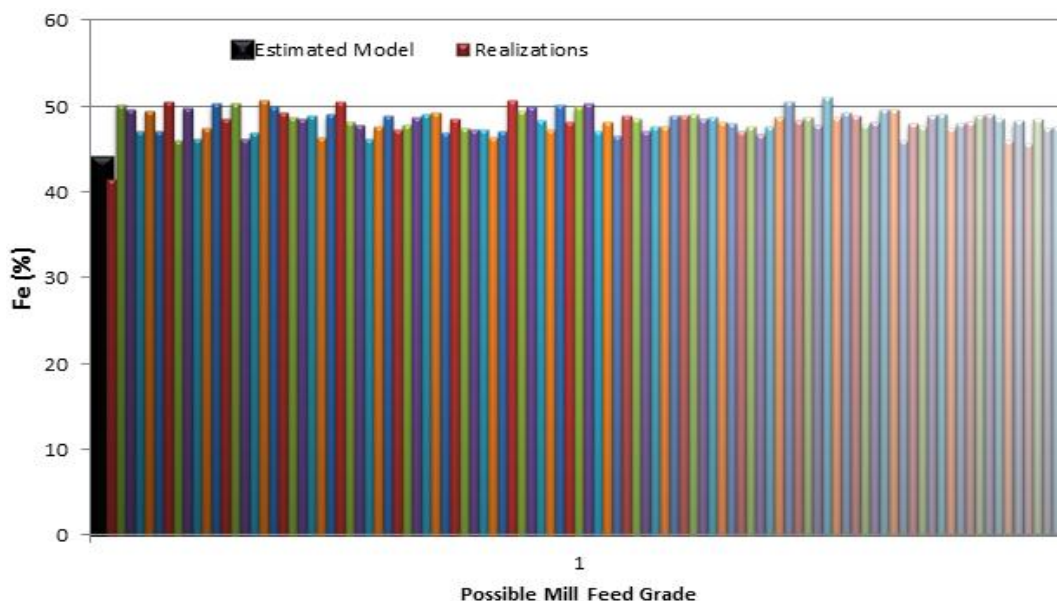


شکل (۱۸-۵) مناطق بالقوه‌ی کمترین و بیشترین ریسک، نقاط مشکی (مدل تخمینی) و نقاط رنگی (مدل‌های شبیه‌سازی شده)

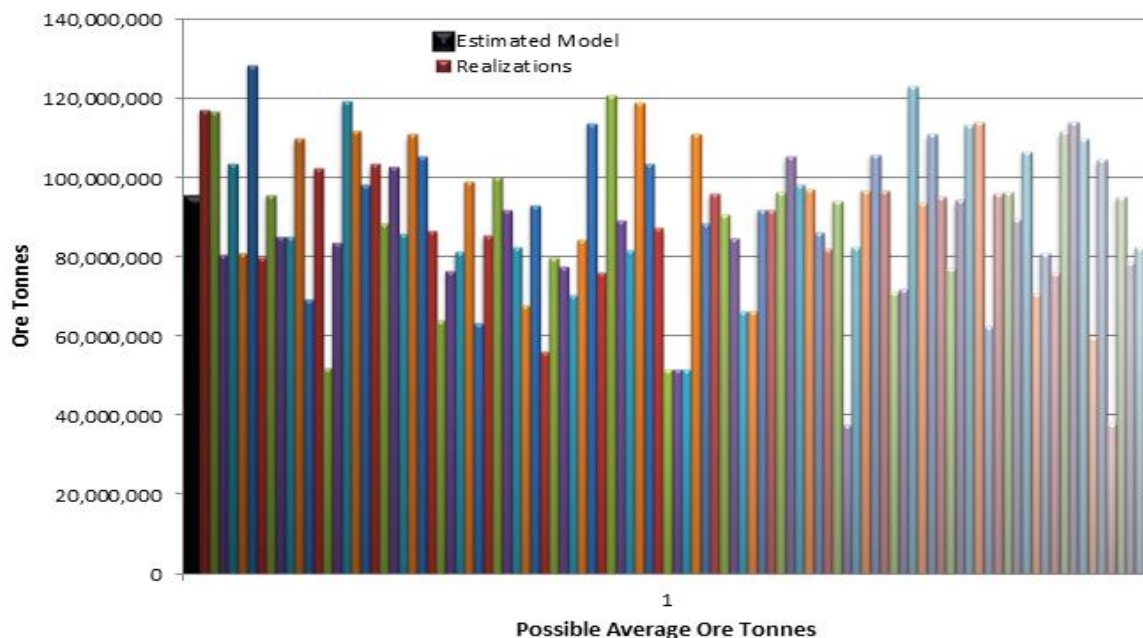
۵-۸- تعیین عدم قطعیت در تناژ و عیار خوراک آسیا

عوامل فیزیکی تناژ ماده معدنی استخراجی و خوراک آسیا نیز به ویژه در سال‌های اولیه‌ی یک طرح، منابع اصلی ریسک محسوب می‌شوند. ریسک طراحی و ساخت یک تأسیسات نامناسب برای خوراک آسیا هنگامی که عدم قطعیت در مقدار خوراک و عیار تعیین شده باشد، بهتر قابل درک خواهد بود.

عدم قطعیت در عیار خوراک آسیا برای کانسار در دودی تحلیل شده است که تجزیه و تحلیل‌های شکل (۵-۱۹) عیار متوسط بررسی شده را برای عمر طرح نشان می‌دهد. شکل فوق الذکر دامنه‌ی نسبتاً محدودی را برای میانگین عیارهای امکان‌پذیر خوراک آسیای طرح مورد بررسی نشان می‌دهد. در این بررسی، عیار تخمینی نسبت به تحقق‌های شبیه‌سازی شده به طور میانگین ۱۴/۰۵ درصد عیار کمتری را نشان می‌دهد. داشتن این اطلاعات هنگام طراحی تأسیسات کارخانه‌ی فرآوری مفید خواهد بود.



شکل (۵-۱۹) عیار ماده معدنی در دسترس برای آسیا

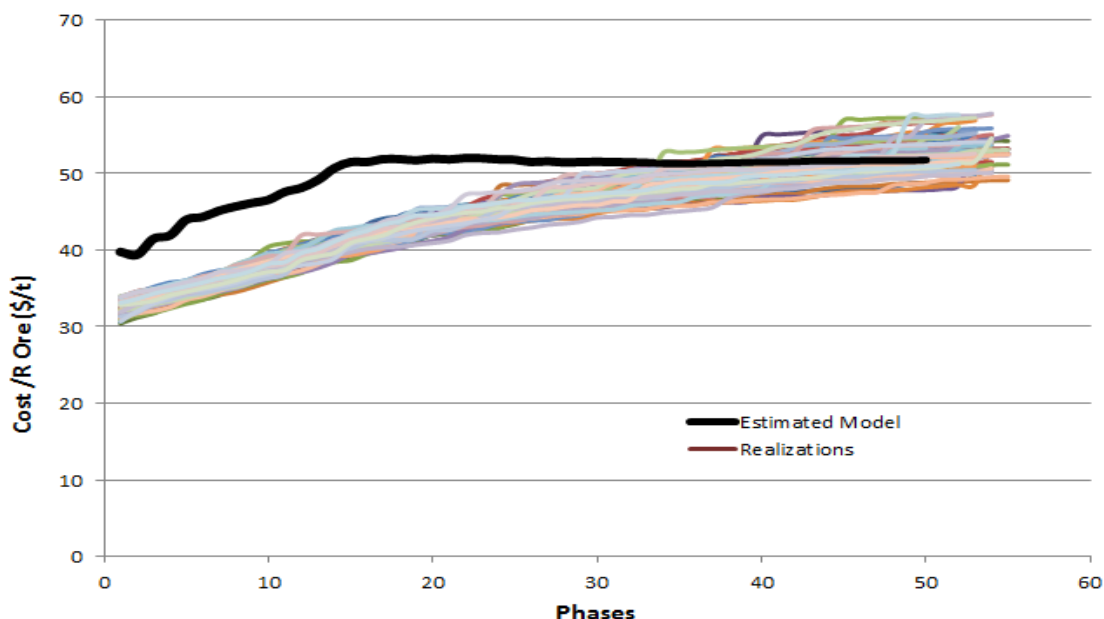


شکل (۵-۲۰) تناژ میانگین ماده معدنی برای یک مدل‌های شبیه‌سازی شده و مدل تخمینی

عامل (فاکتور) مشترک توأم با عیار خوراک آسیا، تناژ ماده معدنی است که در شکل (۵-۲۰) نشان داده شده است. تحقیقاتی شبیه‌سازی شده در اکثر موارد تناژ کلی کمتری را نشان می‌دهند که در مقایسه با مدل تخمینی به طور میانگین ۵/۴۱ درصد کمتر است. محدوده‌ی نه چندان گسترده‌ی عیار (دامنه‌ی تغییرات تقریبی ۵/۳۴ درصدی) و تناژ پایین خوراک آسیا ضمن گستردگی دامنه‌ی مقادیر (دامنه‌ی تغییرات تقریبی ۹۰ میلیون تن) حاصل از تحقیقاتی شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که این طرح در دست یافتن به توان عملیاتی برنامه‌ریزی شده‌ی آسیا برای عمر معدن اگر بر اساس مدل کریجینگ شده طراحی شود تا حدودی به مشکل بر خواهد خورد. تناژ پایین ماده معدنی حاصل از شبیه‌سازی‌ها ممکن است تغییر طراحی را برای تأسیسات خردایش و فرآوری پیشنهاد دهد.

۵-۹- تعیین کمیت عدم قطعیت هزینه‌ی تولید

هزینه‌ی عملیاتی تولید ممکن است، به عنوان یک شاخص هنگام مقایسه‌ی طرح‌های معدنکاری در نظر گرفته شود. شکل (۵-۲۱) عدم قطعیت عیار و ریسک موجود در هزینه‌ی تولید مورد انتظار بر تناژ سنگ آهن تولید شده از کانسار در دودی را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، احتمال این که هزینه‌ی تولید بر تناژ آهن برای شبیه‌سازی‌ها نسبت به مدل تخمینی عیار کمتر تخمین زده شود زیاد است. به هر حال، دامنه‌ی کوچک خروجی‌ها تا حدود فازهای میانی حدود اطمینانی فراهم خواهد کرد که مطابق آن احتمالاً هزینه‌ی تولید برای این طرح از ۵۷/۸۳ دلار بر تن تجاوز نمی‌کند. برای فازهای اولیه مقادیر پیش‌بینی شده‌ی مدل تخمینی تقریباً به طور میانگین به اندازه‌ی ۱۹/۸۱ درصد از مقادیر مورد انتظار تحقق‌ها بیشتر است، این اختلاف به سمت فازهای میانی کمتر شده و در محدوده‌های نهایی پیت‌ها، مقدار تخمینی و مقادیر مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها تقریباً باهم برابر می‌شوند و حتی در فازهای انتهایی مقدار تخمینی از مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها کمتر نیز می‌شود. گستردگی نسبی دامنه‌ی تغییرات مقادیر هزینه برحسب تناژ فلز قابل بازیابی در فازهای انتهایی در مقایسه با فازهای اولیه به‌طور نسبی بیشتر می‌باشد که دلیل آن نیز می‌تواند عدم قطعیت زیاد مقادیر ماده معدنی در این فازها باشد. نکته‌ی قابل توجه این است که دامنه یا گستردگی هزینه‌ها بر تناژ فلز قابل بازیابی در کل فازهای بهینه‌سازی پیت ثابت نیست. این موضوع نشان می‌دهد که هزینه‌ی تولید به اندازه‌ی پیت روباز تا حدودی حساس است، و با افزایش مقیاس عملیات معدنکاری به طور محسوسی تغییر می‌کند. مقدار تخمینی برای هزینه‌ی تولید فاز نهایی ۵۱/۷۶ دلار بر تن در مقابل مقدار مورد انتظار ۵۳/۲۲ دلار بر تن است که کاهش ۲/۷۳ درصدی را برای مجموع کل پیت‌ها نشان می‌دهد. اگر شرکت مرتبط با طرح مورد بررسی به تغییرات هزینه‌ی تولید حساس باشد، آنگاه در اختیار داشتن این اطلاعات کمی خیلی مفید خواهد بود.



شکل (۵-۲۱) تأثیر عدم قطعیت عیار روی هزینه‌ی تولید بر تناژ فلز بازیابی شده

۵-۱۰- نتیجه‌گیری

در این فصل با وارد نمودن مدل بلوکی زمین‌شناسی به همراه عیار و چگالی هر بلوک (مدل بلوکی با عیار تخمینی و مدل بلوکی با عیارهای شبیه‌سازی شده)، اقدام به بهینه‌سازی پیت‌های نهایی آن‌ها شده است. بهینه‌سازی‌ها با دو هدف و به دو روش اجرایی متفاوت انجام شده است. در روش اول با هدف تعیین عدم قطعیت شکل پیت نهایی، هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی شده به درون یک پیت بهینه وارد شده و پس از بهینه‌سازی پارامترهای اصلی طراحی پیت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج فازهای اولیه نشان از اختلاف محسوس مقدار مدل تخمینی در مقابل مقدار مورد انتظار مدل‌های شبیه‌سازی شده دارد (تا فازهای میانی، مدل تخمینی کمتر از مدل‌های شبیه‌سازی شده است). در این روش بنابر محدودیت زمانی و مشکلات نرم‌افزاری در زمان اجرا تنها ۵۰ مدل شبیه‌سازی شده در مقابل تک مدل تخمینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. روش دوم با هدف شناسایی پتانسیل کانسار مورد بررسی در مورد پارامترهای مختلف و شناسایی ناحیه‌ی بالقوه‌ی ریسک حداقل و حداکثر بدین صورت بوده است که برخلاف روش اول که تحلیل ریسک روی یک شکل پیت خاص (یا فازهای افزایشی بهینه شده‌ی خاص) صورت گرفته

است، در این روش مجموعه‌ی متناوبی از فازهای افزایشی برای هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی شده تولید می‌شود. با استفاده از این روش در ابتدا طبق تنظیمات صورت گرفته در نرم‌افزار NPV Scheduler خروجی‌های متناوب برای فازهای افزایشی پتانسیلی از هر یک از پارامترهای طراحی را ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از این روش نیز با وجود بیش تخمینی نسبی مدل تخمینی نسبت به مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها در مقادیر ماده معدنی محتوای فازها و هزینه‌ی فرآوری، در مقادیر پیش‌بینی شده عیار فلز قابل بازیابی در هر دو مورد روند تقریباً مشابهی داشته است که آن هم به تغییرات کم عیارهای پیش‌بینی شده به وسیله‌ی شبیه‌سازی‌ها بر می‌گردد. همچنین در سایر پارامترها مثل ارزش خالص فعلی، مقدار فلز قابل بازیابی و به خصوص مقدار سنگ محتوای فازها مقدار تخمینی، پیش‌بینی کمتری نسبت به مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد.

فصل ششم

نتایج و پیشنهادات

۶-۱- نتایج

شبیه‌سازی شرطی به عنوان ابزار تکمیلی برای بهینه‌سازی و طراحی با تمرکز روی مدل‌سازی عدم قطعیت عیار و زمین‌شناسی در بهینه‌سازی پیت و تأثیرات آن روی بهینه‌سازی، پیش‌بینی‌ها، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی مطرح است. الگوریتم‌های شبیه‌سازی متعددی در دسترس هستند و می‌توانند برای طراحی بهینه‌ی معدن و مطالعات طراحی و برنامه‌ریزی مورد استفاده قرار گیرند. روش استفاده شده در اینجا برای برخورد با عدم قطعیت بویژه عیار کلی بوده، و می‌تواند در هر فرآیند معدنکاری مرتبط با پیکره‌ی ماده‌ی معدنی مورد استفاده قرار گیرد. روش شبیه‌سازی شرطی و روش‌های شبیه‌سازی دیگر ممکن است به این صورت به نظر برسند که در ابتدا عوامل معدنکاری مد نظر را بررسی کرده و سپس تأثیرات مقادیر مختلف هر یک از عوامل را مورد آزمایش قرار داده و در نهایت نقشه‌های مقادیر امکان‌پذیر عوامل را ارائه می‌کنند. در ارتباط با این موضوع معیار اصلی برای مدل‌های ماده‌ی معدنی استفاده شده بدین صورت است: آن‌ها چه مقدار در فراهم نمودن یک طرح (نقشه) از مقادیر امکان‌پذیر عوامل معدنکاری مناسب هستند. فرآیند شبیه‌سازی شرطی نیازمند زمان، تلاش و تخصص بیشتر در مقایسه با روش‌های سنتی است. به هر حال قابلیت آن‌ها و تعهد آن‌ها در ارتباط با عدم قطعیت در طراحی و برنامه‌ریزی پیت معادن روباز تلاش با ارزشی است. با قبول شبیه‌سازی شرطی به عنوان مناسبترین روش در دسترس (به ویژه در کشور ایران) برای مدل‌سازی عدم قطعیت عیار و بر طبق منطق آماری نهفته در دل آن و با توجه به غیرخطی بودن پارامتر مورد بررسی (عیار) و تصادفی بودن ذات آن می‌توان نتایج روش‌های خطی برای پیش‌بینی پارامتر غیرخطی تصادفی را با این روش تصادفی سنجید و به ارزیابی میزان اطمینان آن‌ها پرداخت. با این توصیفات نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، روش کریجینگ به کار گرفته شده برای تخمین عیار مدل بلوکی دارای هموارسازی مفراطی بوده که تأثیرات آن را می‌توان در مقادیر نسبتاً بالای ماده معدنی پیش‌بینی شده به وسیله‌ی مدل تخمینی برای فازهای افزایشی در مقایسه با مقادیر مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها مشاهده نمود.
- از ترکیب بیش تخمینی در میزان مواد معدنی مدل تخمینی و کم تخمینی^۱ در میانگین عیار سنگ آهن می‌توان به تأثیر بیشتر هموارسازی بر عبارهای پایین در مقایسه با عبارهای بالا پی‌برد. به بیان دیگر میزان ترقیق بیشتر از میزان اتلاف ماده معدنی بوده است. یعنی شدت هموارسازی در مقادیر بالای عیار به‌گونه‌ای بوده است که هم مقدار کمتری از مواد معدنی به باطله تبدیل شده و هم اینکه کاهش عیار در برخی از آن‌ها به حدی نبوده که به عنوان باطله محسوب شوند، حال آنکه این بخش تنها باعث کاهش میانگین کلی عیار شده‌اند.
- گستردگی زیاد مقادیر شبیه‌سازی‌ها در محدوده‌ی فازهای انتهایی نشان از عدم قطعیت زیاد عیار در این بخش دارد که نیازمند افزایش اطلاعات در این قسمت است. همچنین در این فازها کلیه‌ی پارامترها تغییر فزاینده‌ای دارند، یعنی کلیه‌ی پارامترها نسبت به ابعاد پیت حساسیت شدیدی را نشان می‌دهند که این امر نیز به طراحان معدن هشدار می‌دهد، که در مورد کلیه‌ی عوامل طراحی برای تولید در این فازها دقت لازم را داشته باشند. زیرا به عنوان مثال با افزایش چندین برابری میزان ماده معدنی ظرفیت کلیه‌ی تجهیزات استخراجی لازم است، که نسبت به سال‌های اولیه‌ی تولید تغییرات چشم‌گیری داشته باشند. یا اگر ظرفیت تجهیزات در فازهای اولیه (سال‌های اولیه‌ی تولید) بر مبنای ظرفیت تولید بالا در این فازهای طراحی شود، به نوعی

¹ - Underestimate

سرمایه‌گذاری اضافی در این سال‌ها محسوب شده و میزان ارزش خالص فعلی را بی دلیل کاهش خواهد داد. بنابراین می‌توان تمديدات لازم را برای این بخش‌ها اتخاذ نمود.

- با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل‌ها انجام گرفته بر روی پارامتر سنگ محتوا و ماده معدنی محتوای فازهای افزایشی به همراه عیار فلز بازیابی شده (عیار خوراک آسیا) می‌توان به این نتیجه رسید که ارزش خالص پیت‌های افزایشی برای مدل تخمینی نسبت به مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها کاهش خواهد یافت همان‌طور که نتایج نیز این امر را نشان می‌دهند. که دلیل این امر را می‌توان به پائین بودن عیار ماده معدنی‌ای دانست که مقدار آن در مدل تخمینی نسبت به مقدار مورد انتظار شبیه‌سازی‌ها حتی به نسبت ناچیزی نیز بیشتر است. یعنی پائین بودن عیار خوراک آسیا باعث گشته تا ارزش خالص پیت‌های افزایشی کاهش یابد.
- با بررسی همزمان گستردگی محدوده‌های نهایی پیت‌های شبیه‌سازی شده و پیت تخمینی می‌توان به وضعیت پیت تخمینی نسبت به شبیه‌سازی‌های پی‌برد و همچنین نواحی بالقوه‌ی ریسک حداقل یا ریسک حداکثر را شناسایی نمود و نسبت به عملیات اضافه حفاری در مناطق بالقوه‌ی ریسک حداکثر اقدام نمود، تا با افزایش اطلاعات در این قسمت‌ها عدم قطعیت موجود و ریسک مربوط به آن را تعیین نمود.

۶-۲- پیشنهادات

- تعمیم فرآیند صورت گرفته در این مطالعه در مورد طراحی پوش بک‌ها و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید با اهداف مورد نظر در ارتباط با کانسار سنگ آهن دردوی و بررسی نتایج و تحلیل ریسک برنامه‌ریزی تولید حاصل از مدل تخمینی و تحقق‌های شبیه‌سازی شده، با توجه به حساسیت پارامترهای مختلف طراحی به عدم قطعیت عیار امری ضروری به نظر می‌رسد.

- تعیین عدم قطعیت زمین‌شناسی همین کانسار با استفاده از روش شبیه‌سازی شاخص متوالی و تجزیه تحلیل نتایج منجر به نتایج جالب توجه‌ای خواهد شد. ترکیب نتایج عدم قطعیت عیار و زمین‌شناسی چه در مورد بهینه‌سازی پیت نهایی و چه در مورد برنامه‌ریزی تولید نیز می‌تواند یکی از بررسی‌ها تأثیر گذار در شناسایی واقعیت ناشناخته در مورد کانسار دردوی و هر کانسار دیگر باشد.
- محاسبات NPV برای یک محدوده معین پیت معادن روباز با اعتماد بر تخمین‌های عوامل بیشماری انجام می‌گیرد که شامل (البته محصور به این موارد نمی‌باشد) همه‌ی این عوامل نامطمئن می‌باشند و باید به صورت تصادفی مدلسازی شوند. برای مثال، مقادیر عیار کانی بوسیله‌ی شبیه‌سازی‌های زمین‌آماري (که در این تحقیق نیز بانجام رسید)، هزینه‌های عملیاتی با توابع رشد و قیمت‌های محصولات با استفاده از مدل‌های میانگین برگشتی طولانی مدت که به صورت دوره‌ای محاسبه می‌شوند. بنابراین، توزیع تجمعی درآمدهای مالی کل برای یک محدوده‌ی پیت روباز می‌تواند از ترکیب یک سری مدل‌های تصادفی عیارهای کانی، زمین‌شناسی، هزینه‌ها، قیمت‌ها و بازیابی‌ها به دست آید.
- ترکیب نتایج حاصل از تعیین عدم قطعیت عیار، زمین‌شناسی، قیمت ماده معدنی یا فلز بازیابی شده، هزینه‌های تولید و فراوری و طراحی معدن باعث خواهد شد تا نتایج این مطالعه‌ی جامع‌تر و واقع‌گرایانه‌تر شود.
- ارزیابی ذخیره‌ی کانسار سنگ آهن دردوی با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته در این زمینه مثل Pangeos، MineSigh 3D، Isatis و سایر نرم‌افزارهای زمین‌آماري قوی به منظور دقت زیاد در ارزیابی ذخیره‌ای که مبنای کلیه‌ی طراحی‌های می‌باشد.

- انجام بهینه‌سازی پیت و برنامه‌ریزی تولید با نرم‌افزارهای معتبر و قوی در این زمینه به ویژه Whittle 4X و Milware می‌تواند مفید باشد. همچنین برای داشتن تحلیل ریسک جامع‌تر و کلی‌تر برای حتی کل فرآیند معدنکاری استفاده از نرم‌افزار Whittle 4D بهترین گزینه خواهد بود.

- استفاده از نرم‌افزارهایی که لااقل از لحاظ گرافیکی بهتر از نرم‌افزار NPV Scheduler باشند، زیرا این نرم‌افزار برای بررسی سه بعدی پیت نهایی و شناسایی نقاط حساس به عدم قطعیت‌ها دارای ضعف‌های عمده‌ای می‌باشد. به عنوان مثال تحلیل صورت گرفته در این پایان‌نامه در خصوص شناسایی مناطق مستعد ریسک حداقل و حداکثر را می‌توان در عمق با دقت بیشتر انجام داد تا بتوان مناطقی از عمق پیت را که نیاز به اضافه حفاری و یا تفسیرهای زمین‌شناسی و تکتونیکی دارند مشخص شود.

- همچنین برای بررسی عدم قطعیت پارامترهای مختلف بین یک یا چند پیت بهینه (پیت‌هایی که با معیار قرار دادن ارزش خالص فعلی و ارزش خالص بدست می‌آیند) می‌توان از نرم‌افزارهای مناسب‌تر از NPV Scheduler استفاده نمود.

- با توجه به اینکه مدل زمین‌شناسی تشکیل شده دو قسمت مجزا می‌باشد، بنابراین نیاز به بررسی بیشتر در بخش انفصال یافته لازم و ضروری به نظر می‌رسد، علاوه بر آن در بخش‌هایی که مدل زمین‌شناسی شیب‌های تندی نسبت به بخش‌های مجاور خود دارند، باید مورد بررسی جدی قرار بگیرند، چه از لحاظ عیار و چه از لحاظ زمین‌شناسی تا به مدل واقعی نزدیکتر شود.

- طبق بررسی‌های انجام گرفته روی پلان‌ها و سطح مقطع‌های مدل تخمینی و مدل‌های شبیه‌سازی شده دیواره‌های معدن به ویژه دیواره‌ی جنوبی نسبت به تغییرات عیار حساسیت

شدیدی را نشان می‌دهند. همچنین در عدم قطعیت عیار در عمق نیز وجود دارد که نشان از کمبود اطلاعات در این قسم دارد و می‌تواند مناطق اضافه حفاری باشند.

منابع فارسی

- جمالی اسفهلان ، داوود، و مدنی، حسن. (۱۳۸۸). استفاده از ابرهای کوواریانس برای یافتن ویژه بردارهای بیضوی ناهمسانگردی عیار اورانیم همراه با ارایه ی یک نمونه ی کاربردی . مجله علوم و فنون هسته ای.
- کاوشگران. (۱۳۹۰). گزارش مطالعات انجام شده.
- مشکین فر، آزاده، شیوایی، علیرضا، و اسلامبول نسلج، فرامرز. (۱۳۸۷). بررسی کانسار سنگ آهن چغارت با استفاده از تکنیک مؤلفه های اصلی. دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران. تهران
- موسوی، امین اله، فتحیانپور، نادر، و صیادی، احمد رضا. (۱۳۸۸). کاربرد شبیه سازی شرطی در تعیین عدم قطعیت عیار بلوک های تخمینی در معدن فسفات اسفوردی. سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران یزد.

منابع لاتین

- Basu, A., Fonseca, M., and Richmond, A. (2001). Open pit mining risk measured by stochastic simulation. BEIJING/CHINA, BEIJING/CHINA: A.A.BALKEMA PUBLISHERS.
- Chiles, J., and Delfiner, P. (1999). Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty, . New York: A Wiley-Interscience Publication.

- Davis, J.C. (2002). Statistics and data analysis in geology. New York. Jhon wiley and Sons.
- Deutsch, C., and Journel, A. (1998). GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. New York: Oxford University Press.
- Deutsch, C., and Journel, A. (2002). Geostatistical Reservoir Modeling. New York: Oxford University Press.
- Dimitrakopoulos, R., Farrelly, C., and Godoy, M. (2002). Moving forward from traditional optimisation: Grade uncertainty and risk effects in open pit mine design. Transactions of the IMM, Section A Mining Industry, A82–A89.
- Dimitrakopoulos, R. (1998). Conditional simulation algorithms for modelling orebody uncertainty in open pit optimisation. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment.
- Dimitrakopoulos, R., Martinez, L., and Ramaza, S. (2007). A Maximum Updide / Minimum Downside Approach to the Rraditional Optimization of Open Pit Mine Design Journal of Mining Science, Vol. 43, No. 1, 2007.
- Dowd, P. (1994). Optimal Open Pit Design: sensitivity to stimated block values. Geological Society Special Publication.
- Earthwork's NPV Scheduler 3.4 Tutorial (2005)
- Gholamnejad, J., and Osanloo, M. (2007). Incorporation of ore grade uncertainty into the push back design process. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, VOLUME 107 REFEREED PAPER.
- Godoy, M. (2009). A Risk Analysis Based Framework for Strategic Mine Planning and Design Method and Application. Orebody Modelling and Strategic Mine Planning. 13-19.
- Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press.
- Gringarten, E., and, Deutsch, C. (2001). Teacher's Aide Variogram Interpretation and Modeling. Mathematical Geology.
- Isaak, E., and Srivastava, R. (1987). An Introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press.
- Journel, A. (2006). Geostatistics for conditional Simulation of Ore Bodies. Economic Geology.
- Journel, A., and Huijbregts, C. (1978). Mining Geostatistics. New York: Academic Press.
- Journel, A., and Kyriakidis, P. C. (2003). Evaluation of mineral reserves: a simulation approach. Evaluation of mineral reserves: a simulation approach.

- Martinez, L. (2007). Orebody modelling and mine project evaluation: Estimation versus simulation – A practical viewpoint. in 33rd International Symposium on Applications of Computers and Operation Research in Mineral Industry (APCOM).
- Monjezi, M., Rajabalizadeh, M., and Ataei, M. (2011). A comparative study between sequential Gaussian simulation and kriging method grade modeling in open-pit mining. Saudi Society for Geoscience.
- Neufeld, C., Deutsch, C. (2001). Angle Rotations in GSLIB. Centre for Computational Geostatistics Department of Civil and Environmental Engineering University of Alberta.
- Pyrz, J., Deutsch, C. (2000). Variogram Models Based on the Intersection of Geometric Shapes. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.
- Richmond, A. (2009). Direct Net Present Value Open Pit Optimisation with Probabilistic Models. Orebody Modelling and Strategic Mine Planning.
- Vielma, J. P., Vielma, D., and Moreno, E. (2009). Risk control in ultimate pits using conditional simulations. Proceedings of the 34th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in The Mineral Industry (APCOM 2009) 107-114.
- Whittle, D., Bozorgebrahimi, A. (2004). Hybrid pits linking conditional simulation and Lerchs-Grossmann through set theory. Orebody and Strategic Mine Planning, Perth.
- www.Statio.com/WinGslib. (2010).
- Ying, Z. (2001). Specification of variogram structures with geometric anisotropy.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

Investigation of the risk of *open pit* mines planning by *geostatistical simulation*, Case Study: Dardvey Iron Ore Mine

Hamid Kor

Supervisors:

Dr. Farhang Sereshki

Dr. *Reza* Khalou Kakaie

Advisors:

Dr. Mohammad Koneshloo

Alireza Shivaee

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
in
Mining Engineering**

February 2012

Abstract

According to slake of surface high grade ore deposits Seems that facing strategy of mining industry can be turning to underground mining methods and also tracking and explore the resources and reserves that are not discovered. But another Strategy can be searches in management and optimal utilization of the existing potentials and now extracting mines. Although complex in practice, but this evaluation process can be seen as a combination of management strategy with a critical understanding and assessment of uncertainty and risk from technical, financial and environmental sources. A critical source of technical risk is in the expected ore grade and tonnage. The ability to model and integrate this risk into optimization and planning is of paramount importance and allows a more informed approach to be taken to the valuation of an asset or design and management of a project. During the past few years evolving technologies have allowed direct modeling of technical and geological risk. In this study to investigate the sensitivity of open pit mine design and planning with relation to chances of inherent ore grade, Dardvey Iron ore deposit (One of the sangan deposits, Iran) using conditional simulation methods has been evaluated. For construction of deposit geological model, geostatistical evaluation, optimization of estimated and simulated models respectively used from software's of Datamine, WinGslib and NPV Scheduler. The obtained results show that the estimated model underestimates total rock tonnage, recoverable ore tonnage, average mill filed grade, pit value and NPV against over all expected values of simulated realizations. The magnitude of the differences for mentioned parameters respectively are 61.89, 11.19, 14.05, 2.83 and 60.53 per cent. However, the total ore tonnage of estimated model against the expected value of realizations show a decrease of approximately 5.4 per cent that it is because smoothing of kriging estimation. A series of plans and cross-sections produced for all ultimate pits of simulated block models and an estimated block model. These plans and cross-sections overlaid that the main conclusions drawn from the analysis of these cross-sections are the following. The walls of pit limit are unstable with relation to grade uncertainty specially the southearth wall that indicates higher levels of grade uncertainty and are main upside potential risk regions. In addition, spread of simulated limits in depth was significant that uncovered by estimated pit limit, so this region can be additional drilling targets. Also, operational cost per recoverable ore calculated for all of simulated models and estimated model that results show an increase of approximately 19.81 per cent for estimated model

against the expected value of simulated models in early pits, but in end phases estimated model show an decrease of approximately 2.73 per cent against the expected value of simulated models.