

## کاربرد شبیه‌سازی گوسی متوالی شرطی در تعیین عدم قطعیت عیار بلوک‌های تخمینی در معدن فسفات اسفوردی

احمد رضا صیادی<sup>۱\*</sup>، نادر فتحیان پور<sup>۲</sup>، امین‌اله موسوی<sup>۳</sup>

۱- استادیار بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان،

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مهر ۹۰، پذیرش اردیبهشت ۹۱)

### چکیده

میزان ذخیره و عیار کانسار از جمله متغیرهای کلیدی در تعیین شاخص‌های فنی و اقتصادی کانسار هستند. این متغیرها همواره با عدم قطعیت همراه بوده و بنابراین ضروری است تا با به‌کارگیری روش‌های مناسب، میزان ریسک همراه با آن‌ها برآورد گردد. از جمله این روش‌ها می‌توان روش شبیه‌سازی گوسی متوالی شرطی (CSGS) را نام برد که امکان تعیین میزان ریسک و تهیه نقشه‌های هم احتمال کانسار را فراهم می‌آورد. بر خلاف روش‌های رایج تخمین زمین‌آماري که با نوعی هموارسازی مواجه‌اند، شبیه‌سازی شرطی ابزاری جهت کمی کردن میزان ریسک همراه با عیار و شاخص‌های طراحی و برنامه‌ریزی تولید را فراهم می‌آورد. در این تحقیق از روش شبیه‌سازی شرطی جهت تعیین عدم قطعیت مرتبط با عیار و تناژ معدن فسفات اسفوردی و نیز تعیین فاصله اطمینان و نقشه‌های هم احتمال مربوط به عیار بلوک‌ها استفاده شده است. در پایان میزان و تأثیر ریسک برآورد شده بر شاخص‌های اقتصادی معدن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، معدن فسفات اسفورد دارای ذخیره‌ای بین ۱۲/۲۱۲ تا ۱۸/۸۳۵ میلیون تن است و می‌توان گفت این معدن به طور متوسط دارای ۱۵/۲۶۹ میلیون تن ماده معدنی با عیار متوسط ۱۶/۸٪ است. همچنین نتایج بررسی اثر عدم قطعیت بر سود معدن، نشان‌دهنده ریسک ۳۰ درصدی همراه با عیار بلوک‌ها است.

### کلمات کلیدی

عدم قطعیت، شبیه‌سازی شرطی، شبیه‌سازی گوسی مرحله‌ای، تحلیل ریسک، معدن فسفات اسفوردی

## ۱-مقدمه

در مراحل مختلف معدنکاری همواره با درجه‌ای از عدم قطعیت روبرو هستیم. برخی از این عدم قطعیت‌ها نظیر میزان ذخیره و عیار کانسار از تغییرات ذاتی کانسار ناشی می‌شوند که به طور مستقیم بر شاخص‌های فنی و اقتصادی کانسار تأثیر می‌گذارند. از سوی دیگر هزینه‌های سنگین بخش اکتشاف اغلب باعث محدود شدن حجم اطلاعات اکتشافی می‌گردد که این خود لزوم به کارگیری روش‌های دقیق تخمین را ایجاب می‌نماید. در میان روش‌های زمین آماری، کریجینگ تخمینی با تضمین به حداقل رساندن خطا انجام می‌دهد. بنابراین اگر هدف از تخمین دستیابی به مقادیر میانگین بر جای یک متغیر باشد کریجینگ روش مفیدی خواهد بود [۱]. اگرچه در این روش حداقل شدن خطا تضمین می‌شود، اما همواره رسیدن به کمترین خطا، دلیل بهینه بودن تخمین نیست. اگر هدف تخمین، ارزیابی شدت تغییرپذیری یک متغیر باشد کریجینگ معایبی دارد. دستیابی به حداقل پراش تخمین عیار منجر به هموارسازی مقادیر عیار تخمین زده می‌شود. نتیجه این هموارسازی این است که عیار بلوک‌های تخمینی پراش کمتری نسبت به عیارهای واقعی خواهند داشت. مهم‌ترین خاصیت شبیه‌سازی زمین آماری این است که به جای بهترین تخمین، مجموعه‌ای از مدل‌های ممکن را تولید می‌کند و لذا دامنه‌ای از حالت‌های ممکن را می‌تواند به نمایش بگذارد [۲]. به طور کلی هدف تخمین، محاسبه پارامترهای تابع توزیع احتمال بر اساس داده‌های موجود است، در صورتی که در شبیه‌سازی هدف بازسازی برخی از حالات ممکن بر اساس پارامترهای تابع توزیع احتمال، واریوگرام و یا کوواریوگرام موجود است. نوع خاصی از شبیه‌سازی که شبیه‌سازی شرطی (Conditional simulation) نامیده می‌شود، تصاویری را تولید می‌کند که ضمن ایجاد هیستوگرام و واریوگرام مفروض، داده‌های معلوم را با همان مقادیرشان در فضا حفظ می‌کند. در این حالت، شبیه‌سازی به شرطی انجام می‌شود که مقدار داده‌ها در نقاط نمونه‌برداری شده (معلوم) تغییر نکنند [۳]. تاکنون الگوریتم‌های متعددی برای شبیه‌سازی ارائه شده است که بر اساس ملاک‌های متفاوتی مانند ماهیت نوع داده‌ها، الگوریتم‌های به کاررفته و وابستگی داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های معلوم دسته‌بندی می‌شوند [۴][۵]. انواع روش‌های شبیه‌سازی بر اساس الگوریتم به کاررفته در شکل ۱ نشان داده شده است.

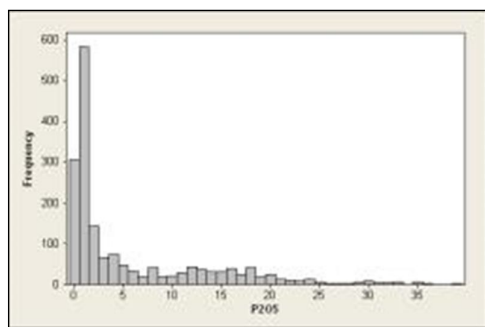


شکل ۱: دسته‌بندی روش‌های مختلف شبیه‌سازی [۱]

در رابطه با انتخاب نوع روش، مطالعات چندی صورت گرفته است که می‌توان بر مبنای آن‌ها روش مناسب را انتخاب نمود [۵][۶]. در این مطالعات، روش شبیه‌سازی گوسی متوالی (Sequential Gaussian Simulation) یا (SGS) به عنوان روشی ساده و سودمند جهت استفاده در کانسارهای پیوسته پیشنهاد شده است. با توجه به این موضوع در این تحقیق جهت تخمین عدم قطعیت مرتبط با عیار و تناژ معدن فسفات اسفوردی و نیز تعیین فاصله اطمینان و نقشه‌های احتمال مربوط به عیار بلوک‌ها در راستای ارزیابی‌های اقتصادی و برنامه‌ریزی تولید معدن از شبیه‌سازی شرطی استفاده شده و در نهایت میزان ریسک برآورد و مورد تحلیل قرار گرفته است.

## ۲- شبیه‌سازی گوسی متوالی

امروزه، شبیه‌سازی گوسی متوالی به عنوان یکی از روش‌های معمول و انعطاف‌پذیر در بسیاری از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته بر روی پارامترهایی نظیر عیار، تخلخل، تراوایی و ... بکار برده می‌شود [۴][۷]. این روش یکی از پرکاربردترین روش‌های شبیه‌سازی در صنعت معدن است. الگوریتم این روش در ساده‌ترین بیان به این صورت است که یک مسیر تصادفی به گونه‌ای که از تمام نقاط شبکه بلوک‌ها بگذرد، انتخاب می‌شود. تخمین حاصل از کریجینگ ساده بر روی نقاطی که روی این مسیر قرار دارند کمک می‌کند تا یک تابع توزیع محلی ایجاد گردد. سپس از این توزیع یک مقدار



شکل ۲: هیستوگرام مقادیر عیار فسفات

جدول ۱: آماره‌های توصیفی مقادیر عیار فسفات

| تعداد نمونه | حداقل        | حداکثر | میانگین | میانه        |
|-------------|--------------|--------|---------|--------------|
| ۸۸۳         | ۰/۲۵۳        | ۳۸/۴۳  | ۵/۵۴    | ۲/۲۱         |
| واریانس     | انحراف معیار | چولگی  | کشیدگی  | ضریب تغییرات |
| ۵۳/۵۷       | ۷/۳۲         | ۲/۰۸   | ۱/۵۵    | ۱/۱۹         |

### ۳-۱- واریوگرافی

جهت انجام تخمین مناسب و نیز تعیین پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی لازم است تا مطالعات واریوگرافی صحیحی انجام گیرد. با رسم واریوگرام‌های گوناگون در جهات مختلف مشخص شد که منطقه دارای ناهمسانگردی هندسی است. برای پیدا کردن جهات اصلی ناهمسانگردی از تکنیک مؤلفه‌های اصلی استفاده گردید. مشخصات مدل‌های واریوگرام منطبق بر واریوگرام‌های امتدادهای اصلی بیضوی ناهمسانگردی در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین واریوگرام‌های منطبق بر این جهات در شکل ۳ آورده شده است.

جدول ۲: مدل‌های واریوگرام منطبق بر جهات اصلی ناهمسانگردی

| حداقل | میانی  | حداکثر | امتداد     |
|-------|--------|--------|------------|
| کروی  | کروی   | کروی   | نوع مدل    |
| ۱۰۸/۳ | ۱۰۸/۸۴ | ۸۵/۶۹  | امتداد     |
| ۸۸/۹۳ | ۸۵/۱   | ۵      | شیب        |
| ۱۵    | ۱۵     | ۱۵     | تلورانس    |
| ۰/۱۱  | ۰/۲۵   | ۰/۰۸   | اثر قطعی   |
| ۴۳/۷۴ | ۶۰/۴۳  | ۱۴۵    | شعاع تأثیر |
| ۰/۹۲  | ۰/۹۳   | ۰/۹۷   | سقف        |

پس از به دست آوردن امتدادهای تغییرپذیری و شیب آن‌ها، از نرم‌افزار VARIOWIN جهت برازش واریوگرام استفاده شد. همان‌گونه که وضعیت نقاط روی واریوگرام نشان می‌دهد، بهترین مدل برای هر سه جهت مدل کروی است. بنابراین با

انتخاب و به عنوان عیار به آن نقطه اختصاص داده می‌شود. این عملیات دوباره تکرار شده تا تمام نقاط موجود بر روی این مسیر شبیه‌سازی شود.

مراحل اصلی این شبیه‌سازی به صورت زیر است [۸][۹]:

- ۱- تبدیل داده‌های اولیه به داده‌های با توزیع نرمال (در صورت نرمال نبودن توزیع داده‌های خام)
- ۲- رسم واریوگرام با استفاده از داده‌های نرمال
- ۳- انتخاب یک مسیر تصادفی برای شبیه‌سازی
- ۴- تخمین داده‌ها بر روی شبکه انتخاب شده با استفاده از یکی از روش‌های کریجینگ
- ۵- رسم هیستوگرام در هر نقطه و انتخاب یک عدد به طور تصادفی از روی هیستوگرام
- ۶- تکرار مراحل قبل برای تمام شبکه
- ۷- تکرار مراحل قبل برای همه تحقیقات
- ۸- تبدیل معکوس داده‌ها
- ۹- اعتبارسنجی

### ۳- کاربرد شبیه‌سازی شرطی معدن فسفات اسفوردی

معدن فسفات اسفوردی در حدود ۳۵ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بافق در استان یزد در طول ۵۵ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی و عرض ۳۱ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی واقع شده است. این معدن به عنوان مهم‌ترین مرکز تولیدکننده فسفات در کشور شناخته می‌شود. طبق مطالعات قبلی انجام گرفته، نوع کانه این کانسار عمدتاً از نوع فلوئورآپاتیت بوده ولیکن در برخی مناطق کلر جانشین فلوئور شده و به کلروآپاتیت تغییر یافته است [۱۰]. از اطلاعات ۵۷ گمانه جهت مطالعات زمین‌آماري و شبیه‌سازی استفاده شده است. از آنجا که لزوم نرمال بودن داده‌ها شرط لازم جهت مطالعات زمین‌آماري است در ابتدا نرمال‌سازی توزیع داده‌های اولیه انجام شده است. هیستوگرام مقادیر فسفات در شکل ۲ و پارامترهای مربوط به توزیع داده‌های اولیه در جدول ۱ آورده شده است. همچنان که در شکل ۲ مشخص است دامنه داده‌ها زیاد است که باعث گردیده انحراف معیار از میانگین بیشتر شود. حتی می‌توان داده‌ها را به صورت جامعه دو مودی بررسی کرد اما در این تحقیق تنها یک جامعه در نظر گرفته شده است. نرمال‌سازی در نرم‌افزار WINGSLIB انجام شد. WINGSLIB نرم‌افزاری است مشتمل بر تعدادی برنامه‌های مفید، که جهت اجرای الگوریتم‌های زمین‌آماري توسط دویچ و ژورنل ارائه شده است [۱۱].

متقابل (Cross validation) استفاده گردید. در روش اعتبار مقابل، یکی از داده‌های واقعی حذف می‌گردد و سپس بر اساس پارامترهای تخمین دوباره برآورده می‌شود. اگر این روند برای همه داده‌های معلوم تکرار شود، بر اساس معیارهای زیر می‌توان بهترین ابعاد برای بلوک‌ها را در نظر گرفت [۱۲]:

#### ۱- هیستوگرام خطا:

خطا تفاضل بین عیار واقعی و عیار تخمینی در همان نقطه است. بهترین حالت داشتن هیستوگرامی با میانگین صفر و انحراف معیار ۱ است.

#### ۲- نمودار خطا در مقابل مقدار تخمینی

در بهترین حالت تمام نقاط مماس با محور مربوط به مقدار تخمینی قرار می‌گیرند.

#### ۳- نمودار مقدار واقعی در مقابل مقدار تخمینی

در بهترین حالت ضریب همبستگی ۱ است.

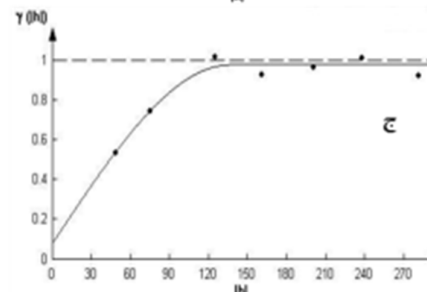
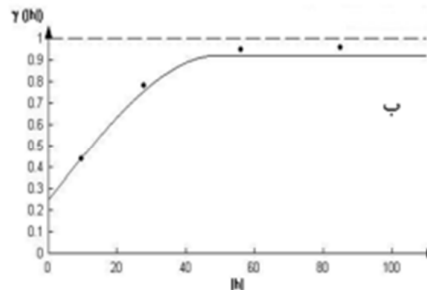
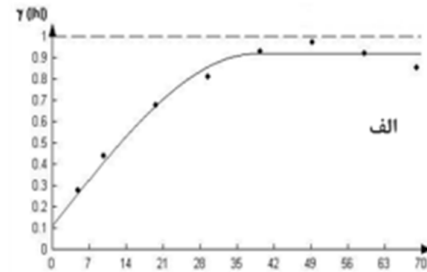
شکل ۴ نشان‌دهنده معیارهای فوق برای بهترین حالت است. بر اساس این روش و نیز محدودیت‌های عملیاتی، ابعاد بلوک‌ها در راستای غربی- شرقی و شمالی- جنوبی ۱۰ متر در نظر گرفته شد.

از آنجا که میانگین تقریبی از توده کانسار برای کل منطقه در دست نیست، تخمین زمین آماری سه بعدی استفاده شده برای فسفات، کریجینگ معمولی است. با استفاده از برنامه KT3D از نرم‌افزار Wingslib عملیات تخمین کریجینگ معمولی بلوکی، روی مقادیر تبدیل یافته فسفات در محدوده فضای تخمین با در نظر گرفتن جهات حداکثر و حداقل و نسبت ناهمسانگردی صورت گرفته است. بیشترین تعداد نقاطی که در عملیات تخمین برای هر بلوک شرکت داشته‌اند ۱۶ عدد و کمترین تعداد ۴ عدد است. سایر پارامترهای تخمین در جدول ۴ ذکر شده است.

جدول ۴: پارامترهای مربوط به تخمین و شبیه‌سازی

| نام پارامتر                           | مقدار   | نام پارامتر                     | مقدار  |
|---------------------------------------|---------|---------------------------------|--------|
| حداکثر تعداد نقاط شرکت‌کننده در تخمین | ۱۶      | حداقل شعاع جستجو                | ۳۲ متر |
| حداکثر تعداد نقاط شرکت‌کننده در       | ۴       | تعداد تحقق                      | ۵۰     |
| حداکثر شعاع جستجوی                    | ۱۱۶ متر | حداکثر تعداد نقاط شرکت‌کننده در | ۲۴     |

برازش مدل کروی، تغییر دادن پارامترها و استفاده از روش آزمون متقابل بهترین مدل ممکن برازش گردید. جزئیات بیشتری از روش آزمون متقابل در بخش بعدی اشاره شده است. همچنان که در شکل مشخص است حداکثر شعاع تأثیر ۱۴۵ و حداقل آن ۴۳ متر و در راستای قائم است.



شکل ۳: واریوگرام تغییرپذیری (الف) حداقل (ب) میانی (ج) حداکثر

#### ۳-۲- تخمین عیار با استفاده از روش کریجینگ

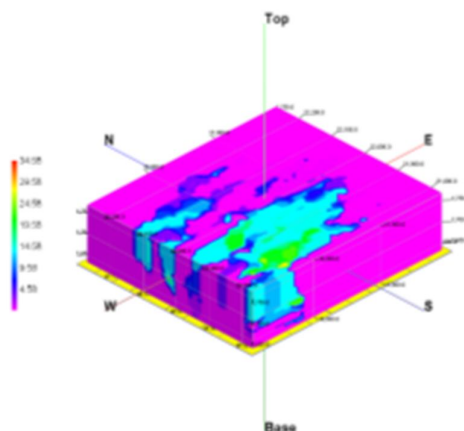
جهت تخمین عیار بلوک‌ها لازم است تا یک مدل بلوکی پایه از منطقه تهیه شود. با توجه به محدوده گمانه‌های حفر شده در منطقه، محدوده تخمین تعیین گردید که اطلاعات آن در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: محدوده تخمین کانسار

|       | آغاز محدوده تخمین | پایان محدوده تخمین |
|-------|-------------------|--------------------|
| UTM X | ۱۰۶۲۰             | ۱۱۱۸۰              |
| UTM Y | ۲۱۷۷۴             | ۲۲۲۵۳              |
| Z (m) | ۱۶۳۵              | ۱۷۶۵               |

ارتفاع بلوک‌ها بر مبنای ارتفاع پله‌های استخراجی معدن ۵ متر لحاظ شد. جهت بهینه‌سازی ابعاد بلوک‌ها از روش اعتبار

بر این اساس معدن فسفات اسفوردی دارای حدود ۱۵ میلیون تن ماده معدنی با عیار متوسط ۱۲/۸۵ با در نظر گرفت عیار حد ۶ درصد و حدود ۸ میلیون تن ماده معدنی با عیار متوسط ۱۶/۳۳ با در نظر گرفتن عیار حد ۱۲ درصد است. همچنین مدل بلوکی کانسار پس از تخمین کریجینگ در شکل ۶ آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است بیش‌ترین ماده معدنی در قسمت جنوب غربی محدوده وجود دارد.



شکل ۶: مدل بلوکی حاصل از نتایج کریجینگ.

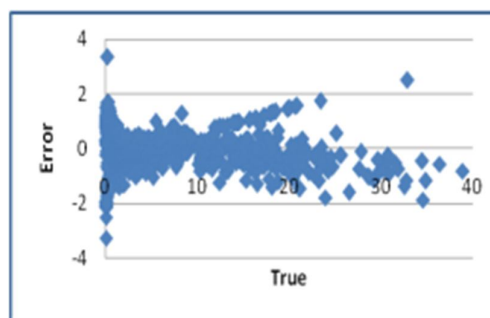
### ۳-۳- شبیه‌سازی کانسار

جهت شبیه‌سازی کانسار به روش SGS از برنامه Sgsim از نرم‌افزار Wingslib استفاده گردید. تعداد ۵۰ تحقق جهت شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. پارامترهای مورد نیاز جهت شبیه‌سازی در جدول ۴ آورده شده است. جهت اعتبارسنجی نتایج این ۵۰ تحقق سه معیار زیر مورد ارزیابی قرار گرفتند:

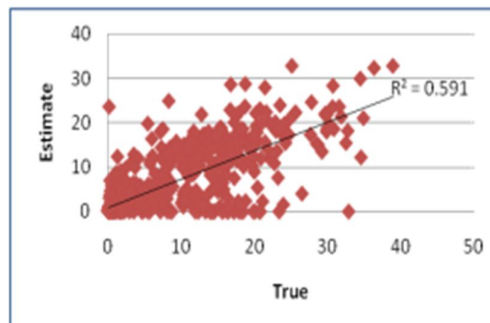
- (۱) توزیع داده‌های شبیه‌سازی شده
- (۲) واریوگرام حاصل از نتایج شبیه‌سازی
- (۳) بررسی نتایج در نقاط با داده‌های معلوم

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که هیستوگرام و واریوگرام هر ۵۰ تحقق با هیستوگرام و واریوگرام داده‌های اولیه مطابقت دارند. در جدول ۵، پارامترهای آماری مربوط به ۵۰ تحقق پس از تبدیل داده‌های نرمال شده به حالت اول و نیز توزیع داده‌های خام به عنوان نمونه آورده شده است. پارامترهای میانگین، انحراف معیار، میانه و چولگی گشتاورهای آماری هستند که با همدیگر مقایسه شدند. با بررسی سایر تحققات مشاهده گردید که برای بقیه تحققات نیز، این ضرورت به خوبی رعایت گردیده است.

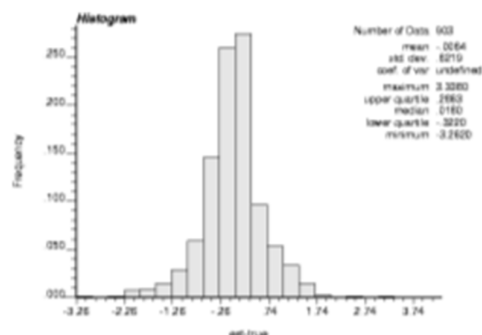
الف



ب

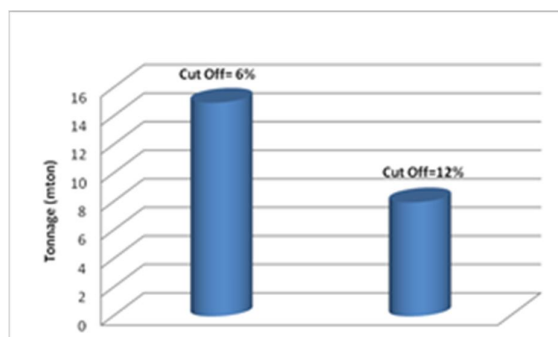


ج

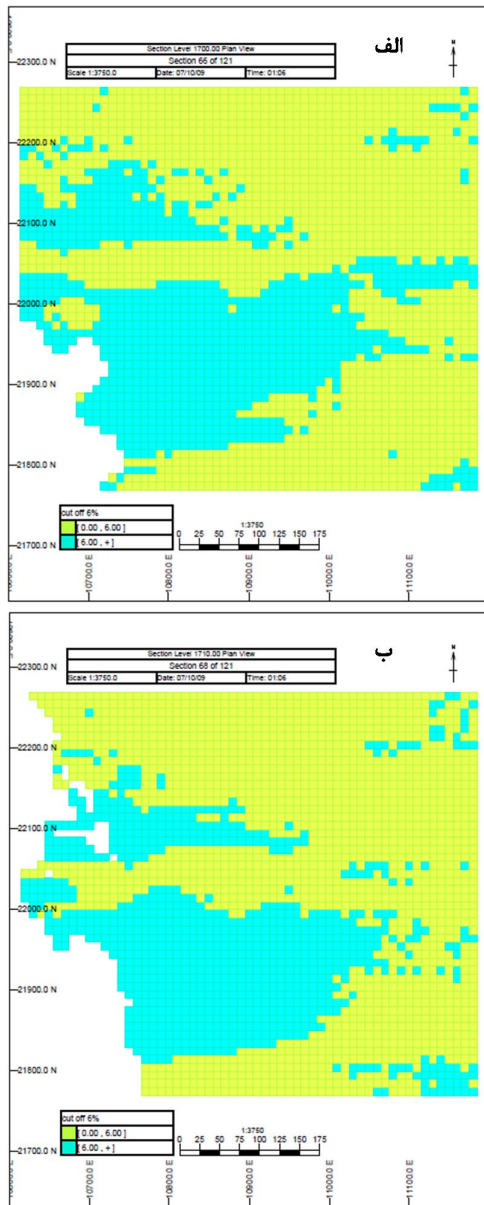


شکل ۴: الف) خطا در مقابل مقدار واقعی (ب) مقدار تخمینی در مقابل خطا (ج) توزیع خطا

میزان ذخیره بر اساس روش کریجینگ برای دو عیار حد ۶ و ۱۲ درصد در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵: میزان ذخیره برای دو عیار حد با استفاده از روش کریجینگ.



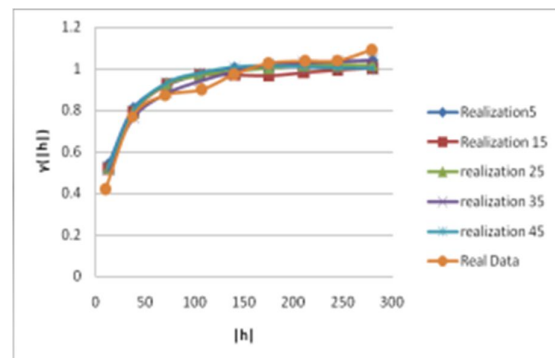
شکل ۸: نتایج متوسط شبیه‌سازی در افق‌های الف (۱۷۰۰) و ب (۱۷۱۰) متری

یکی از مهم‌ترین نتایجی که از روش شبیه‌سازی به دست می‌آید نقشه‌های هم احتمال و یا احتمال گذر از عیار حد است. احتمال گذر از عیار حد با شمارش تعداد دفعاتی که عیار یک بلوک از عیار حدی می‌گذرد به دست می‌آید. در حقیقت بالاتر بودن احتمال گذار از عیار حد برای یک بلوک نشان‌دهنده درجه اطمینان بالاتر و یا داشتن ریسک کمتر است. شکل ۹ نمایانگر بلوک دیاگرام احتمال گذر از عیار حد ۶٪ برای فسفات است. در بلوک‌های واقع در جنوب غربی منطقه میزان احتمال گذار از عیار حد بیشتر است و این

جدول ۵: پارامترهای آماری داده‌های اولیه و داده‌های ۵ تحقق.

| چولگی | میانه | انحراف معیار | میانگین |               |
|-------|-------|--------------|---------|---------------|
| ۲/۰۸  | ۲/۲۱  | ۷/۳۲         | ۵/۵۴    | داده خام      |
| ۲/۱۵  | ۲/۶۱  | ۷/۵۳         | ۵/۵۷    | تحقق شماره ۵  |
| ۲/۱۴  | ۲/۵۷  | ۷/۴۵         | ۵/۴۸    | تحقق شماره ۱۵ |
| ۱/۹۹  | ۲/۸۵  | ۷/۶۹         | ۵/۹۵    | تحقق شماره ۲۵ |
| ۲/۲۲  | ۲/۵   | ۷/۳۶         | ۵/۳۶    | تحقق شماره ۳۵ |
| ۲/۲۹  | ۲/۴۴  | ۷/۱۵         | ۵/۱۶    | تحقق شماره ۴۵ |

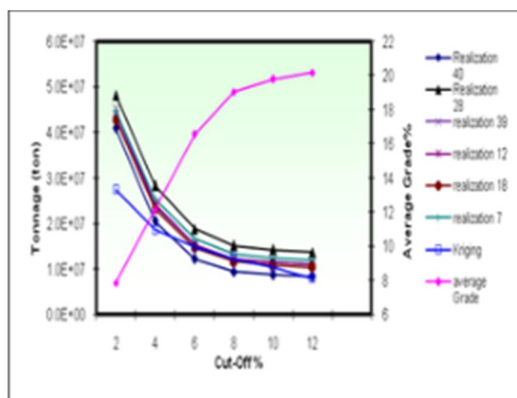
همچنین شکل ۷ نشان‌دهنده واریوگرام غیر جهتی ۵ تحقق و نیز واریوگرام داده‌های اولیه است. این واریوگرام‌ها خام هستند و هیچ مدلی به آن‌ها برازش نشده است اما همانطور که در شکل مشخص است واریوگرام‌ها کاملاً منطبق بر یکدیگر هستند و این انطباق در سایر تحقق‌ها نیز رعایت شده است. از آنجا که شبیه‌سازی شرطی است، می‌بایست در تمامی تحقق‌ها، به نقاط با داده‌های معلوم (نقاطی که نمونه برداری در آن‌ها صورت گرفته است) همان داده‌های واقعی تعلق گیرد که در هر ۵۰ تحقق این امر صورت گرفته شده است.



شکل ۷: واریوگرام‌های غیر جهتی مربوط به داده‌های اولیه و داده‌های ۵ تحقق.

نمایی از متوسط نتایج شبیه‌سازی در افق‌های ۱۷۰۰ و ۱۷۱۰ متری در شکل ۸ نشان داده شده است.

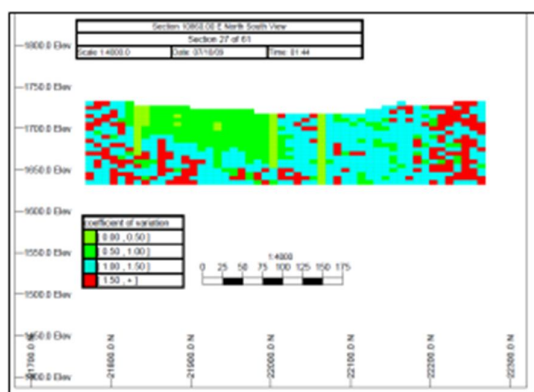
همان‌گونه که در شکل مشخص است در این دو افق نیز بیش‌ترین تمرکز ماده معدنی در قسمت جنوب غربی کانسار است که این نتیجه مطابق نتایج حاصل از کریجینگ است. در واقع متوسط نتایج شبیه‌سازی با کریجینگ مشابه می‌باشند با این تفاوت که در روش شبیه‌سازی انحراف از معیار و یا به عبارتی عدم قطعیت هر بلوک محاسبه می‌شود.



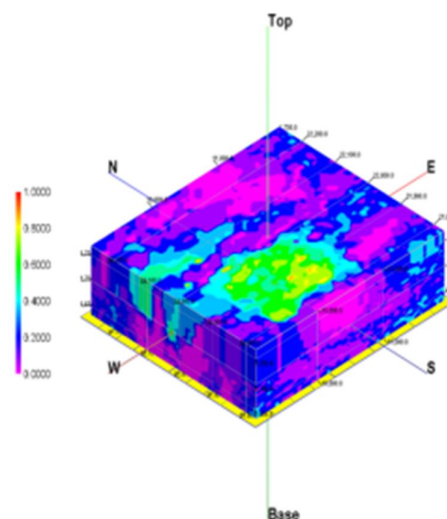
شکل ۱۰: نمودار عیار-تناژ

جهت برآورد عدم قطعیت هر بلوک از شاخص ضریب تغییرات استفاده گردید. ضریب تغییرات که نسبت انحراف معیار به میانگین است شاخص مناسبی جهت بیان میزان عدم قطعیت است. نقاط با ضریب تغییرات بالاتر نشان‌دهنده دقت پایین‌تر و میزان ریسک بالاتر است.

شکل ۱۱ نشان‌دهنده این ضریب برای هر بلوک در مقطع  $E=10880$  است. بلوک‌های با رنگ سبز دارای ضریب تغییرات کمتر از ۱ است و سایر بلوک‌ها دارای ضریب تغییرات بیشتر از ۱ می‌باشند. بلوک‌های سبز رنگ در واقع نشان‌دهنده مناطقی هستند که حفاری اکتشافی در آن جا انجام شده است و از قابلیت اعتماد خوبی جهت استخراج برخوردار هستند اما در سایر بلوک‌ها تخمین از دقت بالایی برخوردار نیست بنابراین اگر این بلوک‌ها در محدوده استخراج قرار گیرند قبل از استخراج بهتر است حفاری‌های تکمیلی انجام شود. بنابراین با رجوع به پلان‌های مختلف معدن و در نظر گرفتن ضریب تغییرات امکان تعیین مناطق با ریسک بالا و نیز تعیین نقاط بهینه حفاری به وجود می‌آید.

شکل ۱۱: ضریب تغییرات برای بلوک‌ها در مقطع  $E=10880$ 

نشان‌دهنده این است که استخراج این بلوک‌ها به احتمال بسیار زیاد با کسب سود همراه است. نقشه‌های هم احتمال می‌بایست برای تمامی پلان‌ها تهیه گردند. این نقشه امکان برنامه‌ریزی دقیق استخراج و نیز تعیین نقاط بهینه جهت اکتشاف تفصیلی را در اختیار قرار می‌دهد [۱۳][۶].



شکل ۹: بلوک دیاگرام احتمال گذر از عیار حد ۶٪

### ۳-۳- عدم قطعیت همراه با عیار و تناژ

عدم قطعیت همراه با تناژ و عیار هر بلوک به معنای انحراف معیار توزیع آن‌ها است [۱]. از طریق رسم هیستوگرام برای میزان ذخیره معدن اسفوردی میانگین میزان تناژ ۱۵/۲۶۹ میلیون تن با انحراف معیار ۱/۳۱۲ میلیون تن به دست آمد. با توجه به میانگین و پراش میزان تناژ می‌توان فاصله اطمینانی برای سطوح مختلف اطمینان مطابق رابطه زیر به دست آورد:

$$(\bar{T} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{1-\frac{\alpha}{2}}, \bar{T} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{1-\frac{\alpha}{2}}) \quad (1)$$

که در آن  $\bar{T}$  میانگین تناژ،  $\sigma$  انحراف معیار،  $n$  تعداد برآوردها و  $1-\alpha$  سطح اعتماد مورد نظر است ( $\alpha$  سطح ریسک) [۱۴]. برای میزان ذخیره معدن فسفات اسفوردی بازه (۱۴۸۹۵۶۰، ۱۵۶۴۱۱۸۳) تن یک فاصله اطمینان در سطح اعتماد ۹۵٪ است که می‌تواند شامل میانگین میزان ذخیره باشد.

نمودار عیار-تناژ برای ۶ تحقق و نیز برای کریجینگ در شکل ۱۰ آورده شده است. می‌توان ملاحظه نمود که میانگین مقادیر شبیه‌سازی به مقدار کریجینگ بسیار نزدیک است اما دامنه تغییرات به میزان ۶/۶۲۴ میلیون تن است که می‌تواند به طور چشم‌گیری شاخص‌های اقتصادی را تغییر دهد.

## ۳-۴- تحلیل ریسک از دیدگاه مالی

پس از تخمین عیار بلوک‌های منطقه دو حالت ممکن است پیش آید. حالت اول اینکه بلوک باطله باشد اما به عنوان ماده معدنی تخمین زده شود (منظور از ماده معدنی بلوک‌های با عیار بالای عیار حد اقتصادی است). حالت دوم اینکه عیار حقیقی بلوک بیشتر از عیار حد اقتصادی باشد اما به عنوان باطله در تخمین ظاهر گردد. هرچند که در حالت دوم ممکن است یک کانسار اقتصادی در مرحله بررسی امکان‌سنجی غیر اقتصادی جلوه دهد اما ریسک حالت اول از دیدگاه سرمایه‌گذاران وخیم‌تر است، چرا که ممکن است کانسار غیر اقتصادی، اقتصادی جلوه دهد. برای تحلیل ریسک مالی تعریف زیر را در نظر می‌گیریم:

$$R_i = P_u C_u \quad (2)$$

که در آن  $R_i$  ریسک بلوک  $u$ ام،  $P_u$  احتمال رخداد نامناسب و  $C_u$  هزینه ناشی از رخداد نامناسب است [۱]. در مورد بلوک‌های معدن اسفوردی احتمال باطله بودن بلوک‌های با عیار بالای ۶٪ از شمارش تعداد دفعاتی که نتیجه شبیه‌سازی برای هر بلوک زیر ۶٪ است و تقسیم بر تعداد تحقق‌ها به دست می‌آید. هزینه ناشی از باطله بودن بلوک‌ها در واقع کاهش سود معدن به اندازه سود حاصل از بالای ۶ بودن عیار بلوک است. بنابراین در حالت اول این هزینه به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$C = (C_w + C_o - I_o) \times W \quad (3)$$

که در آن  $C$  هزینه ناشی از رخداد نامناسب برای هر بلوک،  $C_w$  هزینه‌های استخراج یک تن باطله،  $C_o$  هزینه استخراج فراوری یک تن ماده معدنی،  $I_o$  درآمد یک تن ماده معدنی و  $W$  وزن بلوک است. میزان ریسک هر بلوک طبق رابطه ۲ محاسبه می‌گردد. اگر  $R_i$  مجموع ریسک بلوک‌ها در حالت اول و  $R_e$  سود ناشی از تمام بلوک‌های با عیار بالای عیار حد باشد با استفاده از رابطه زیر می‌توان ریسک مالی ناشی از عدم قطعیت عیار را محاسبه نمود:

$$R = \frac{R_i}{R_e} \times 100 \quad (4)$$

که در آن  $R$  ریسک مالی است. هرچند که در مرحله استخراج بسیاری از این بلوک‌ها در محدوده معدن قرار نمی‌گیرند اما ریسک محاسبه‌شده در این مرحله نسبتی از ریسک مالی معدن در مرحله استخراج را به دست می‌دهد.

برای محاسبه ریسک مالی معدن فسفات اسفوردی پارامترهای اقتصادی زیر در نظر گرفته شده است (جدول ۶):

هزینه‌های فوق بر اساس گزارش‌های قبلی معدن استخراج شده است. ارزش اقتصادی بلوک‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I_o = \begin{cases} (-c_w) & z \leq z_c \\ (prz - c_o) & z > z_c \end{cases} \quad (5)$$

که در آن  $p$  قیمت محصول،  $r$  حاصل‌ضرب بازیابی‌ها،  $z$  عیار بلوک و  $z_c$  عیار حد است.

در مورد معدن اسفوردی با در نظر گرفتن عیار حد ۶٪ برای فسفات، میزان ریسک بر اساس رابطه ۳ به میزان ۳۰٪ به دست آمد. بنابراین در مرحله ارزیابی فنی و اقتصادی این میزان ریسک می‌بایست در نظر گرفته شود تا تصمیمات بعدی با درجه بالاتری از صحت اخذ گردد.

جدول ۶: پارامترهای اقتصادی معدن (مربوط به سال ۱۳۸۷)

| پارامتر                  | مقدار  | پارامتر         | مقدار |
|--------------------------|--------|-----------------|-------|
| قیمت کنسانتره            | ۲۰۶۰۰۰ | بازیابی استخراج | ۹۰٪   |
| هزینه واحد استخراج       | ۱۶۰۰۰  | بازیابی فراوری  | ۶۰٪   |
| هزینه واحد فراوری و فروش | ۳۶۰۰۰  | ترقیق           | ۱۰٪   |

## ۴- نتایج

ارزیابی عدم قطعیت همراه با پارامترهای تأثیرگذار بر طراحی و برنامه‌ریزی تولید یک معدن امری ضروری است که در روش‌های تخمین کلاسیک مانند کریجینگ امکان‌پذیر نیست. روش شبیه‌سازی زمین آماری یکی از کارآمدترین روش‌ها در تعیین ریسک همراه با ذخیره است. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی SGS، ذخیره معدن فسفات اسفوردی بین ۱۲/۲۱۲ تا ۱۸/۸۳۵ میلیون تن است و به طور متوسط ۱۵/۲۶۹ میلیون تن با عیار متوسط ۱۶/۸٪ برآورد می‌گردد. در سطح اعتماد ۹۵٪ بازه (۱۵۶۴۱۱۸۳، ۱۴۸۹۵۶۰۰) یک فاصله اطمینان برای میانگین تناژ است. واریانس بلوک‌ها و ضریب تغییرات به عنوان شاخص‌های کمی عدم قطعیت بلوک‌ها برآورد گردید که بر اساس آن‌ها و نیز نقشه‌های احتمال گذر از عیار حد امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر در مراحل اکتشافات حین استخراج و نیز برنامه‌ریزی تولید فراهم می‌شود.

on an efficient joint simulation of multiple correlated variables", APCOM, pp 373-382.

[۱۴]- بهبودیان، جواد؛ ۱۳۷۷؛ آمار و احتمال مقدماتی؛ انتشارات دانشگاه امام رضا؛ مشهد، چاپ یازدهم.

همچنین بررسی اثر عدم قطعیت بر سود معدن نشان‌دهنده ریسک ۳۰٪ همراه با عیار بلوک‌ها است. بنابراین در ارزیابی‌های فنی و اقتصادی این میزان ریسک می‌بایست در نظر گرفته شود.

## ۵- مراجع

[۱]- حسنی پاک، علی‌اصغر؛ ۱۳۸۲؛ مدیریت خطا و ریسک در اکتشاف؛ انتشارات دانشگاه تهران؛ چاپ اول.

[2]- Georges. V; 2005; "Grade control classification of ore and waste: A critical review of estimation and simulation based Procedures", Mathematical Geology, Vol. 37, No. 5.

[۳]- حسنی پاک، علی‌اصغر؛ ۱۳۸۰؛ تحلیل داده‌های اکتشافی؛ انتشارات دانشگاه تهران؛ چاپ اول.

[4]- Deutch. C.V; 2002; "Geostatistical reservoir modeling", Oxford University Press, New York, 371 pp.

[5]- Vanna. J; Bertoli. T.O; Jackson. S; 2002; "Geostatistical simulation for quantifying risk, Geostatistical association of Australian symposium.

[6]- Dimitrakopoulos. R; 1998; "Conditional simulation algorithms for modelling ore body uncertainty in open pit optimization", International Journal of Mining, Reclamation and Environment, Vol 12, 173 - 179.

[7]- Dubrule. O; 2003; "Geostatistics for seismic data integration in earth models", EAGE: European Association of Geoscientists and Engineers, printed in US.

[8]- Godoy. M.C; Dimitrakopoulos. R; Costa J.F; 2001; "Economic function and geostatistical simulation Applied to grade control, Mineral resource and ore reserve estimation", the AUSIMM guide to good practice, 591-600.

[9]- Barbosa. J.c; Sturaro. J.R; Riedel. P.S; 2001; "Geostatistic mapping of arsenic, Manganese and Iron contamination risk in the Port of Santana, Apama, Brazil", Universidade Estadual Palista, Brazil.

[۱۰]- فتحیان پور، نادر؛ ۱۳۸۴؛ "گزارش فاز ۲ طرح امکان-

سنجی استخراج انتخابی در مجتمع فسفات، مطالعه و شناسایی روند تغییرات کلر در محدوده معدن اسفوردی".

[11]- Deutch. C; Journel A; 1998; "Geostatistical Software Library and user Guide", Oxford University Press.

[12]- Oz. B; Deutsch. C; 2000; "Cross Validation for Selection of Variogram Model and Kriging Type: Application to IP Data from West Virginia", in 2000 CCG Annual Report Papers.

[13]- Dimitrakopoulos. R.; Fonseca. M. B; 2003; "Assessing risk in grade- tonnage curves in a complex copper deposit, Northern Brazil, Based