

## تعیین ابعاد بهینه بلوک‌ها در ارزیابی ذخیره کانسار سرب و روی کوشک با روش‌های شبیه‌سازی و کریجینگ شاخص

ریحانه السادات بهشتی<sup>۱</sup>، فرهاد محمدتراب<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد  
۲- دانشیار، گروه اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

(دریافت ۱۳۹۸/۰۲/۰۷، پذیرش ۱۳۹۸/۱۰/۲۲)

### چکیده

در این مطالعه به روش انتخاب ابعاد بهینه برای مدلسازی بلوکی و نقش ابعاد بلوک در تخمین ذخیره پرداخته و به این منظور از داده‌های معدن سرب و روی کوشک استفاده شده است. پایگاه داده با اطلاعات گمانه‌ها ساخته، کمپوزیت‌هایی با طول‌های ۲ متری تهیه و با استفاده از تبدیل به روش امتیاز نرمال توزیع داده‌ها نرمال شد. همچنین از واربیوگرافی برای شناخت پیوستگی ماده معدنی استفاده شد و بهترین واربیوگرام و بیضوی انیزوتروپی به دست آمد. برای ابعاد بلوکی مختلف روش شبیه‌سازی شرطی گوسی استفاده و در هر شبیه‌سازی ۲۰ تحقق ایجاد و واریانس بین آن‌ها محاسبه شد. واریانس کمتر به منزله شباهت بیشتر تحقق‌هاست که ملاک انتخاب ابعاد بهینه قرار گرفت. به دلیل پیچیدگی در شکل و وجود حفاری‌های زیاد در بخش روباز و زیرزمینی و برای ساخت شکل ماده معدنی و تعیین مرز باطله از روش کریجینگ شاخص استفاده شد. با این روش ابعاد ۱۰×۱۰×۷/۵ متر برای معدن کوشک محاسبه شد. ابعاد بلوکی به دست آمده تطابق مناسبی با نسبت‌های انیزوتروپی داشته بنابراین بر این اساس ابعاد بهینه حاصل برای محاسبه ذخیره انتخاب شد. ذخیره محاسبه شده با ابعاد به دست آمده از روش شبیه‌سازی با عیار حد مجموع سرب و روی ۳ درصد حدود ۳۹/۱۲ میلیون تن برآورد شد که مطابقت خوبی با مقدار گزارش شده از پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور دارد.

### کلمات کلیدی

مدل بلوکی، ابعاد بلوک، شبیه‌سازی شرطی گوسی، کریجینگ شاخص.

## ۱- مقدمه

بخش مهمی از مدلسازی کانسارهای معدنی مربوط به مدلسازی بلوکی است که در خلال آن کالبد ذخیره معدنی به بلوک‌های متحدالشکلی تقسیم می‌شود. ابعاد بلوک‌ها و شکل آن‌ها، در نتیجه محاسبات و طراحی‌های مهندسی تاثیر انکارناپذیری دارد و دقت و صحت یک مدلسازی مطلوب را تضمین می‌کند.

پیشینه تحقیقاتی زیادی در مورد انتخاب ابعاد بلوک در تمامی مراحل معدنکاری وجود دارد؛ جورنل<sup>۱</sup> و هوجبرتس<sup>۲</sup> پیشنهاد دادند که به عنوان یک راهنمای تقریبی، اندازه بلوک‌ها باید کمتر از فاصله داده‌ها و به عبارتی اندازه بلوک از  $\frac{1}{4}$  تا  $\frac{1}{2}$  فاصله نمونه‌های حفاری باشد [۱]. دیوید<sup>۳</sup> پیشنهاد داده است که حداقل ابعاد بلوکی نباید از  $\frac{1}{4}$  میانگین فاصله بین حفاری‌ها کمتر باشد [۲]. آرمسترانگ<sup>۴</sup> و چامپیگنی<sup>۵</sup> تخمین بلوک‌های کوچک را مورد بحث قرار دادند و نتیجه گرفتند که تخمین‌های معنی‌دار از بلوک‌های انفرادی زمانی به دست می‌آید که شعاع تاثیر واریوگرام از ابعاد بلوک‌ها و فاصله شبکه‌های حفاری بزرگتر باشد [۳]. هالس<sup>۶</sup> به رابطه بین ابعاد بلوکی، فاصله نمونه‌برداری و مدل واریوگرام پرداخته است. او نتیجه گرفت زمانی که شعاع تاثیر واریوگرام ده برابر ابعاد بلوک‌ها است فاصله نمونه‌برداری چهار برابر ابعاد بلوکی می‌شود [۴]. فارلی<sup>۷</sup> و دیمیتراکوپولوس<sup>۸</sup> ذخایر قابل استحصال با استفاده از کریجینگ شاخص در ابعاد بلوکی مختلف را تخمین زدند [۵]. در مطالعه حکمت و همکاران رابطه فاصله نمونه‌برداری و اندازه‌ی بلوکی و همچنین حساسیت روش‌های مختلف تخمین بر روی ابعاد بلوک و در نهایت انتخاب اندازه بهینه بلوک برای به حداقل رساندن میانگین خطای تخمین بررسی شده است [۶]. در مطالعه‌ای از حیاتی و همکاران، به معرفی مجموعه جامعی از معیارهای موثر برای تعیین اندازه بهینه بلوک‌های معدن با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره VIKOR، پرداخته شده است [۷].

در این مقاله، از روش شبیه‌سازی شرطی گوسی برای انتخاب ابعاد بلوکی بهینه برای معدن سرب و روی کوشک استفاده شده است. در این مطالعه با استفاده از روش یاد شده و بر اساس طیف وسیعی از مدل‌های بلوکی، ابعاد بلوک بهینه تعیین و ذخیره معدن تخمین زده شد. همه تخمین‌ها و شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله، با تلفیقی از نرم‌افزارهای Wingslib، Surpac و SGeMS تولید شده است.

## ۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

## ۲-۱- معرفی معدن سرب و روی کوشک

معدن سرب و روی کوشک در فاصله ۱۶۰ کیلومتری جنوب شرقی استان یزد و ۴۵ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بافق، در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۴۰ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۴۵ دقیقه در حاشیه کویر لوت واقع و راه ارتباطی آن جاده آسفالته یزد - بافق - بهاباد است. معدن کوشک در بلوک پشت بادام و در مرکز حوضه رسوبی - آتشفشانی بافق قرار گرفته که حدود ۷۰۰ کیلومتر مربع وسعت دارد و از نظر ساختمانی ناحیه‌ای بسیار چین خورده و گسله است.

ماده معدنی در معدن کوشک، دو زون پرعیار و کم‌عیار دارد که تاکنون از بخش پرعیار استخراج انجام گرفته است. ضخامت زون پرعیار بین ۳ تا ۲۰ متر متغیر است. عیار متوسط مجموع سرب و روی حدود ۲۰ درصد است که ۱۴ تا ۱۶ درصد سرب دارد. البته این زون در ویژگی‌های کوشک با این تیپ از ذخایر مطابقت دارد. در نتیجه‌گیری به عمل آمده کانسار سرب و روی کوشک کانسار، استراتیفرم، همزاد (همزمان با رسوبگذاری تا مراحل اولیه دیاژنز)، حاصل فرآیندهای آتشفشانی زیردریایی - رسوبی از نوع ذخایر اکسلاتیو دور از منبع و از نظر جایگاه تکنونیک در ارتباط با مراحل پیشرفته ریفت‌های قاره‌ای است [۸].

بر اساس پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، رقم ذخیره قطعی ۲۹۹۷۰۰۰۰ تن با عیار متوسط ۱۴ درصد سرب و روی گزارش شده است.

## ۳- مطالعات آماری

اولین گام در بررسی‌های عددی، مطالعات آماری پایه و استخراج خصوصیات آماری مربوط به داده‌ها است. بررسی آماری معدن سرب و روی کوشک در شکل ۱ نمایانگر این است که داده‌ها از توزیع غیرنرمال تبعیت می‌کنند و داده‌های به دست آمده از آنالیز مجموع سرب و روی نمونه‌های مغزه، میانگین تقریبی ۸٫۷۸ درصد دارند.

در مرحله بعد توزیع داده‌ها به نرمال استاندارد تبدیل شد (شکل ۲). به هر یک از داده‌های اولیه، یک امتیاز نرمال اختصاص داده شد، که می‌توان امتیازهای نرمال را با تبدیل برگشتی به مقدار توزیع اولیه تبدیل کرد.

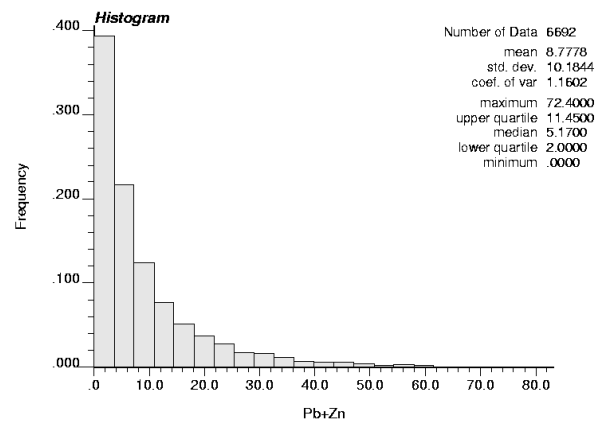
$2\gamma(h)$ : واریوگرام

$n$ : تعداد جفت نقاطی است که به فاصله  $h$  از یکدیگر قرار دارند و در محاسبه واریوگرام شرکت می‌کنند.

$x_i$ : عیار در نقطه  $A_i$

$x_{i+h}$ : عیار در نقطه‌ای به فاصله  $h$  از نقطه  $A_i$  است.

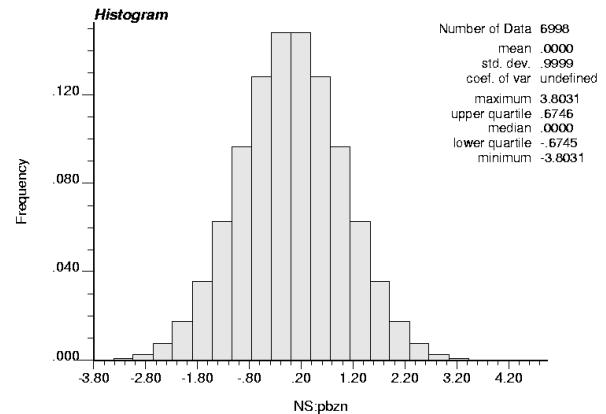
با محاسبه مقدار واریوگرام به ازای  $h$ های مختلف، می‌توان نمودار  $\gamma(h)$  بر حسب  $h$  را رسم کرد [۱۱].



شکل ۱: پارامترهای آماری و هیستوگرام سرب و روی در معدن کوشک

#### ۴-۱- مدل‌سازی ناهمسانگردی با استفاده از واریوگرام جهتی

ترسیم واریوگرام‌های جهتی یا نقشه واریوگرام ابزار مناسبی برای شناخت ناهمسانگردی در یک محیط محسوب می‌شود. بیضوی ناهمسانگردی در حالت سه بعدی با طول سه محور  $A$  و سه زاویه که یکی زاویه محور بزرگ آن نسبت به شمال و دیگری زاویه این محور نسبت به افق و زاویه سوم، زاویه چرخش بیضوی حول محور اصلی است، مشخص می‌شود. برای تعیین ناهمسانگردی، واریوگرافی سه بعدی داده‌های کامپوزیت شده سرب و روی در جهات مختلف انجام (شکل ۳ تا ۵) و بر اساس پیوستگی شعاع تاثیر و تغییرات سقف واریوگرام‌ها، جهات و ابعاد قطر بزرگ، میانی و کوچک بیضوی ناهمسانگردی به همراه واریوگرام‌ها و زوایای مربوطه برای معدن کوشک تعیین شد (جدول ۱).



شکل ۲: تبدیل امتیاز نرمال<sup>۹</sup> برای داده‌های سرب و روی معدن سرب و روی کوشک

مرحله بعد از واریوگرافی، اعتبارسنجی از مدل ساخته شده است. در این حالت میانگین و چولگی خطاها باید به صفر نزدیک باشد و گسترش (پوشش  $\bar{X} + 2s$ ) توزیع ۹۵ درصد است [۱۰]. مقادیر این اعتبارسنجی در جدول ۲ ارائه شده است.

#### ۴-۲ مدل‌سازی واریوگرام

##### ۵- مدل‌سازی بلوکی و تخمین‌های زمین آماری

هندسه مدل بلوکی وابسته به ویژگی‌های کانسار است، ویژگی‌های زمین‌شناسی، ناهمسانگردی، الزامات برنامه‌ریزی معدن مانند اندازه و نوع تجهیزات برای این عملیات استفاده می‌شود. انتخاب اندازه و هندسه بلوک از تصمیمات مهم در مدل‌سازی منابع به شمار می‌رود [۱۱].

واریوگرام یکی از ابزارهای زمین‌آماري است که برای تشریح ارتباط فضایی، مدل‌سازی همبستگی و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی داده‌ها به کار می‌رود [۹]. در واقع واریوگرام، میانگین مربعات تفاضل دو مقدار را به عنوان تابعی از فاصله  $h$  بین آنها، بیان می‌کند، بنابراین چنین واریانسی ممکن است معیاری برای نمایش تاثیرگذاری و یا تاثیرپذیری مقدار یک نمونه روی مقادیر مجاور خود باشد.

##### ۵-۱- کریجینگ

کریجینگ یک روش زمین‌آماري است. به طور خلاصه می‌توان آن را بهترین تخمین‌گر خطی **ناریب<sup>۱۱</sup> دانست**. این تخمین‌گر خطی ضمن آن که کمترین واریانس

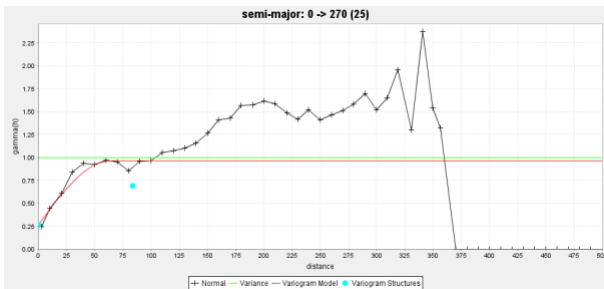
$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+h})^2 \quad (1)$$

که در آن:

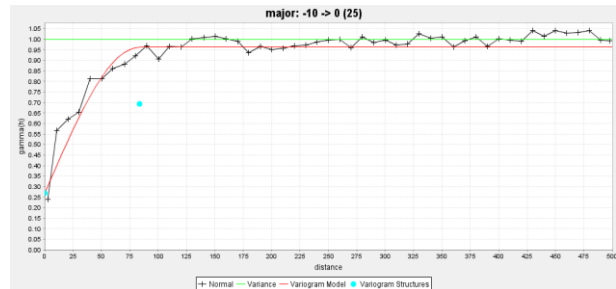
$\gamma(h)$ : سمیواریوگرام<sup>۱۰</sup>

جدول ۱: نمایش خصوصیات بعدی و جهتی بیضوی ناهمسانگردی

پلانچ (درجه)	شیب (درجه)	آزیموت (درجه)	شعاع تاثیر (متر)	نسبت محور بزرگ به محور کوچک	نسبت محور بزرگ به محور میانی	معدن
۰	-۱۰	۰	۸۳,۵۸۷	۲,۰۰۱	۱,۳۲۷	کوشک



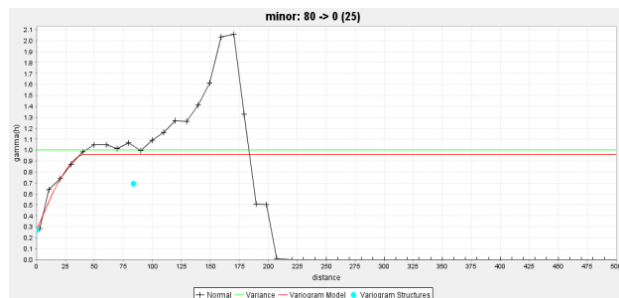
شکل ۴: واریوگرام داده‌ها در جهت قطر میانی بیضوی ناهمسانگردی معدن کوشک با مدل برازش شده



شکل ۳: واریوگرام داده‌ها در جهت قطر بزرگ بیضوی ناهمسانگردی معدن کوشک با مدل برازش شده

جدول ۲: خلاصه آماری خطاهای کریجینگ

معدن	میانگین خطاها	چولگی خطاها	گسترش توزیع
کوشک	۰,۰۰۴۴	-۰,۰۷۱۳	۹۶,۰۰



شکل ۵: واریوگرام داده‌ها در جهت قطر کوچک بیضوی ناهمسانگردی معدن کوشک با مدل برازش شده

جواب مساله باشد. در این حالت مجموع اوزان کریجینگ برابر واحد است:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2)$$

یکی از برتری‌های تخمین‌های زمین‌آماري از جمله کریجینگ نسبت به دیگر تخمین‌گرها، نمایش توزیع خطا در فضای تخمین است که به توزیع فضایی داده‌ها بستگی دارد و با استفاده از آن می‌توان مناطقی را که کمبود اطلاعات دارند تعیین کرد [۱۰].

تخمین را تنظیم می‌کند، ناریب بودن تخمین‌ها را نیز، مشروط به اینکه داده‌ها توزیع نرمال داشته باشند، تضمین می‌کند [۱۰]. در زمین‌آمار، روش‌های مختلف تخمین کریجینگ وجود دارد که از آن میان، در بررسی حاضر روش کریجینگ معمولی به کار گرفته شده است.

### ۵-۲- کریجینگ معمولی

در روش کریجینگ معمولی مقدار میانگین مجهول است ولی مقدار آن مستقل از مختصات فرض می‌شود، بنابراین برای یافتن میانگین، شرط ناریب بودن و یا عاری بودن از خطای سیستماتیک را طوری اعمال می‌کنیم که میانگین بخشی از

## ۶- شبیه‌سازی زمین آماری

از آنجا که کریجینگ حداقل مقدار خطای تخمین را برای داده‌های نرمال تضمین می‌کند، بنابراین مقادیر تخمین هموارتر از نتایج حاصل از تخمین‌گرهای خطی دیگر است. این بدین معنی است که اگر هدف، انتخاب بهترین روش استخراج معدن بر اساس مدل عددی معدن باشد، مقادیر حاصل از کریجینگ به دلیل هموارشدگی، قسمتی از تغییرپذیری کانسار را نشان نمی‌دهد و بنابراین ممکن است طرح پیشنهاد شده بر اساس این داده‌های تخمین‌گر نتایج غیرمنتظره و نامناسبی را به همراه داشته باشد. در این شرایط می‌توان از روش شبیه‌سازی شرطی<sup>۱۲</sup> ذخیره به روش زمین آمار استفاده کرد [۱۰].

## ۶-۱- شبیه‌سازی شرطی

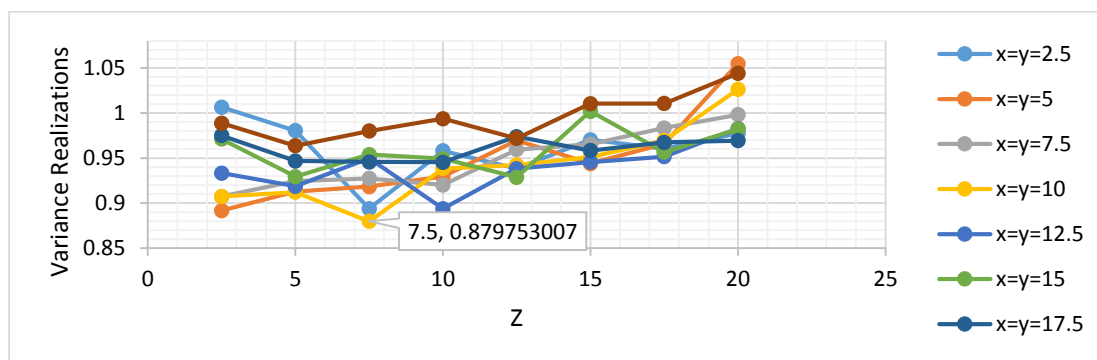
شبیه‌سازی شرطی به طور معمول با استفاده از روش کریجینگ همراه با رویکرد نمونه‌گیری مونت کارلو<sup>۱۳</sup>، این پتانسیل را دارد تا روش‌های زمین آماری را که در حال حاضر استفاده می‌شوند ارتقا بخشد. شبیه‌سازی شرطی تصاویری مشابه برای تخمین عیار، تولید می‌کند که هر کدام از آنها بر اساس توزیع و تداوم فضایی طبیعی داده‌های ورودی است. شبیه‌سازی شرطی همچنین توانایی بازتولید سطحی از تغییرپذیری نمونه‌ها را دارد که برعکس، در دیگر روش‌ها، این تغییرپذیری کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی شرطی ابزارهای مفیدی را برای تعیین ابعاد بلوکی بهینه و درجه هموارشدگی ذاتی<sup>۱۴</sup> در یک ذخیره فراهم می‌کند. شبیه‌سازی‌ها در مقیاس کوچک در مناطق نماینده، این اجازه را می‌دهد تا با تغییر ساپورت‌ها<sup>۱۵</sup>، یکی از روش‌های دقیق را

به صورت محلی انتخاب کنیم. همچنین استفاده از یک روش شبیه‌سازی اجازه می‌دهد تا قدرت انتخاب و هموارشدگی ذاتی در یک مدل تخمین خورده را تعیین کنیم [۱۳].

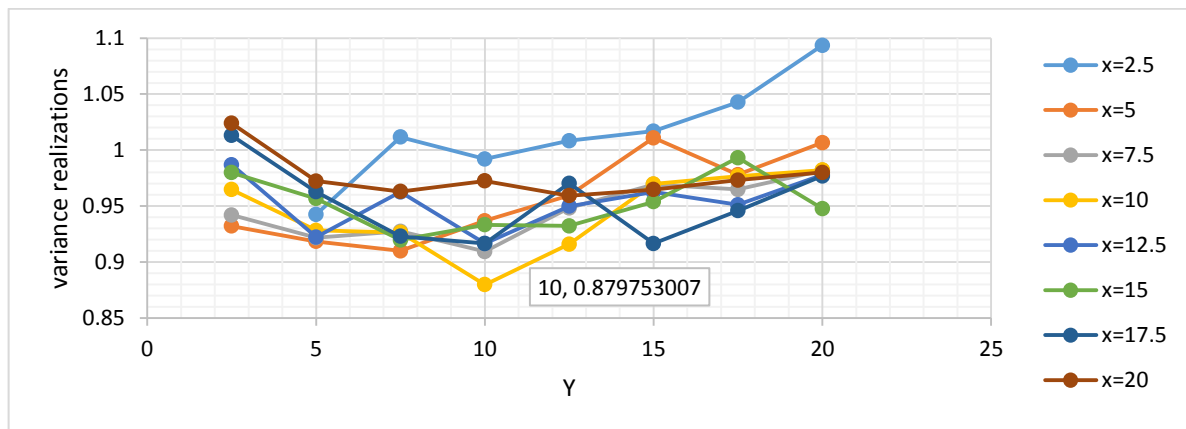
در روش شبیه‌سازی از نرم‌افزار SGeMS استفاده و در آن طیف وسیعی از ابعاد بلوک، با هدف رسیدن به ابعاد بهینه به کار برده شد. در این مرحله برای انتخاب ابعاد بهینه در جهت  $Z$ ، با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای  $X$  و  $Y$  مقادیر  $Z$  از ۲٫۵ تا ۲۰ متر با فواصل ۲٫۵ متری در نظر گرفته شدند؛ در نتیجه ۶۴ مدل ایجاد و در روند شبیه‌سازی برای هر مدل ۲۰ تحقق در نظر گرفته شد. ملاک انتخاب ابعاد  $Z$  بهینه به حداقل رسیدن واریانس بین تحقق‌ها در هر بلوک است که به منزله شباهت بیشتر تحقق‌ها به یکدیگر است. روش شبیه‌سازی نیز روش شبیه‌سازی شرطی گوسی<sup>۱۶</sup> است. شبیه‌سازی بر اساس داده‌های حاصل از واریوگرافی در مراحل قبل انجام گرفته است. شبیه‌سازی روی داده‌های مجموع عیار سرب و روی انجام شده است.

بر اساس شکل ۶ مقدار  $Z$  بهینه برای معدن کوشک ۷٫۵ متر است.

با ثابت در نظر گرفتن ابعاد  $Z$  بهینه مقادیر  $X$  و  $Y$  تغییر کرده و اعدادی از طیف ۲٫۵ تا ۲۰ متر با فواصل ۲٫۵ متر انتخاب می‌شود. حاصل این مدل‌سازی ۶۴ مدل است که هر کدام در روند شبیه‌سازی ۲۰ تحقق را شامل می‌شوند. همانند مراحل قبل برای انتخاب  $Z$  بهینه، واریانس هر بلوک در تحقق‌های بیست گانه محاسبه گردید و در نهایت از تمامی واریانس‌های محاسبه شده میانگین به دست آمد و ملاکی برای تعیین  $X$  و  $Y$  بهینه قرار گرفت. با توجه به شکل ۷ ابعاد  $X$  و  $Y$  مقدار ۱۰ متر را به دست می‌آورند.



شکل ۶: روند تغییرات واریانس تحقق‌ها در مقابل تغییرات  $Z$  با ثابت در نظر گرفتن مقادیر  $X$  و  $Y$  برای معدن سرب و روی کوشک



شکل ۷: روند تغییرات واریانس تحقق‌ها در مقابل تغییرات Y با ثابت در نظر گرفتن مقادیر X و Z برای معدن سرب و روی کوشک

### ۷- تعیین مرز ماده معدنی و باطله

به دلیل پیچیدگی کانسار از روش تخمین کریجینگ شاخص برای ایجاد شکل کانسار و تعیین مرزهای ماده معدنی استفاده می‌شود.

#### ۷-۱- کریجینگ شاخص

در این روش کریجینگ، احتمال آن که عیار بلوک مورد تخمین کوچک‌تر از عیار حد مفروض باشد تخمین زده می‌شود. امتیاز این روش در این است که فرآیند تخمین، مستقل از تابع توزیع داده‌ها است. برای انجام کریجینگ شاخص ابتدا لازم است عیار حدی در نظر گرفته شود ( $Z_c$ ) و سپس با استفاده از تابع دو ضابطه‌ای زیر داده‌ها تبدیل شوند:

$$\begin{cases} i_k(x) = 1; Z(x) \leq Z_c \\ i_k(x) = 0; Z(x) > Z_c \end{cases} \quad (3)$$

که در آن:

$i_k$ : مقدار شاخص نمونه  $i_k$

$Z_c$ : عیار حد مفروض است.

در این حالت مقدار تخمینی متغیر شاخص در هر نقطه به

صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$i_k(x_0) = \sum_{j=1}^n \lambda_j i_k(x_j) \quad (4)$$

که در آن:

$i_k(x_j)$ : مقدار شاخص نمونه  $k$  به مختصات  $x_j$  و  $\lambda_j$

وزن کریجینگ شاخص برای نمونه به مختصات  $x_j$  است که

در تخمین نقطه  $x_0$  شرکت می‌کند. مقدار تخمین شاخص

یعنی  $i_k(x_0)$  بین حداقل صفر و حداکثر یک تغییر می‌کند و معرف احتمال آن است که عیار بلوک مورد تخمین از عیار حد کوچک‌تر باشد. دستگاه معادلات کریجینگ شاخص مانند دستگاه معادلات کریجینگ معمولی است. با این تفاوت که در کریجینگ شاخص از مقادیر واریوگرام شاخص به جای واریوگرام معمولی استفاده می‌شود.

اگر بلوک به اندازه کافی بزرگ باشد مقادیر احتمال تخمین زده شده را می‌توان به صورت نسبی نشان داد، بنابراین اگر  $f_x(Z_c)$  احتمال کوچک‌تر یا مساوی بودن عیار بلوک X از  $Z_c$  باشد می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$I(x, Z_c) = F_x(Z_c) \quad (5)$$

بنابراین احتمال آن که عیار بلوک مورد نظر بزرگ‌تر از عیار حد  $Z_c$  باشد، برابر است با:

$$t_p = 1 - I(x, Z_c) \quad (6)$$

با استفاده از نتایج کریجینگ شاخص می‌توان نقشه احتمال پیدایش مقادیر بزرگ‌تر یا مساوی یک عیار حد را رسم کرد. اگر این عیار حد منطبق بر عیار حد اقتصادی کانسار باشد، این نقشه همان مرز کانسنگ و باطله را نشان می‌دهد.

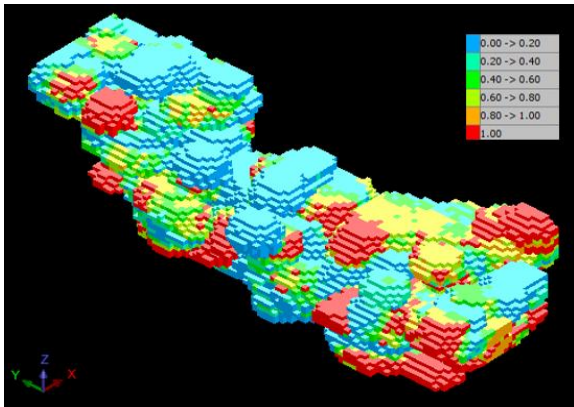
#### ۷-۲- واریوگرافی شاخص

در روش تخمین کریجینگ شاخص برای ایجاد شکل کانسار و تعیین مرزهای ماده معدنی نیاز به مدلسازی واریوگرام به روش شاخص است که در شکل‌های ۸ تا ۱۰ واریوگرام‌های ایجاد شده بر اساس عیار حد ۲ درصد برای مجموع سرب و روی نشان داده شده است.



مشخصات واریوگرافی انجام شده به روش شاخص در جدول ۳ ارایه شده است. پس از مرحله واریوگرافی، مراحل تخمین به روش کریجینگ شاخص انجام گرفت.

بازه تخمین برای روش کریجینگ شاخص بین صفر و ۱ است و برای بخش‌هایی که داده‌ای ندارد، اعداد منفی در نظر گرفته می‌شود که با حذف این اعداد شکل کانسار شامل احتمال بخش‌های کم‌عیار و پرعیار به دست می‌آید که در شکل ۱۱ ارایه شده است. در این شکل بخش‌های با شاخص صفر به احتمال ۱۰۰ درصد ماده معدنی دارد.



شکل ۱۱: مدل بلوکی معدن کوشک، رنگ آمیزی بر اساس احتمال وجود کانسار سرب و روی

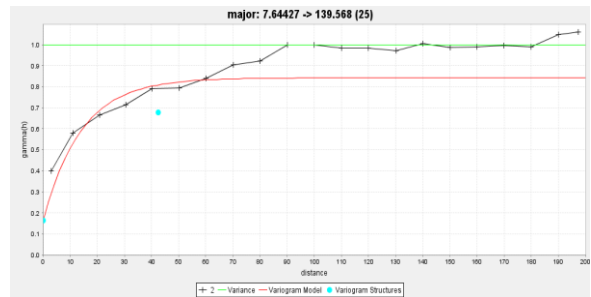
### ۸- ارزیابی ذخیره

پس از تعیین مرزهای کانسار، بر اساس ابعاد بهینه به دست آمده از روش شبیه‌سازی شرطی، مدل بلوکی کانسار کوشک ایجاد شد و تخمین با روش کریجینگ معمولی انجام گرفت. با توجه به وابستگی چگالی به عیار سرب و روی، وزن مخصوص بر اساس شکل ۱۲ با فرمول ۷ برای هر بلوک محاسبه شد.

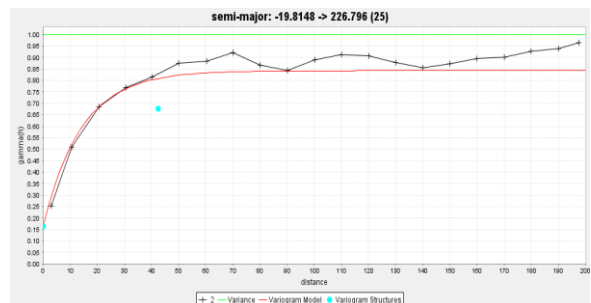
$$SG = 0.0443(Pb + Zn) + 2.8143 \quad (7)$$

جدول ۳: خصوصیات بعدی و جهت بیضوی ناهمسانگردی معدن کوشک بر اساس واریوگرافی شاخص

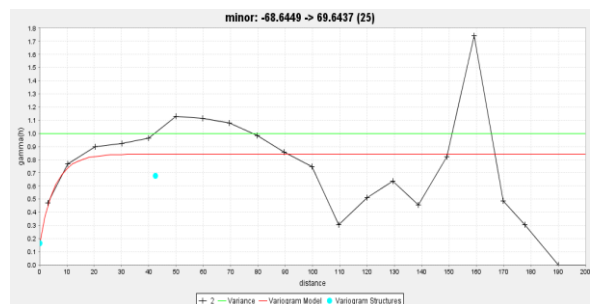
معدن	نسبت محور بزرگ به محور میانی	نسبت محور بزرگ به محور کوچک	شعاع تاثیر (متر)	آزیموت (درجه)	شیب (درجه)	پلانچ (درجه)
کوشک	۱	۲,۵۶	۴۲,۴۴	۱۳۹,۵	-۲۰	۷,۶۴



شکل ۸: واریوگرام داده‌ها بر اساس کریجینگ شاخص در جهت قطر بزرگ بیضوی ناهمسانگردی معدن کوشک به همراه مدل برازش شده به ازای عیار حد ۲ درصد سرب و روی



شکل ۹: واریوگرام داده‌ها بر اساس کریجینگ شاخص در جهت قطر میانی بیضوی ناهمسانگردی معدن کوشک به همراه مدل برازش شده به ازای عیار حد ۲ درصد سرب و روی



شکل ۱۰: واریوگرام داده‌ها بر اساس کریجینگ شاخص در جهت قطر کوچک بیضوی ناهمسانگردی معدن کوشک به همراه مدل برازش شده به ازای عیار حد ۲ درصد سرب و روی

که در آن:

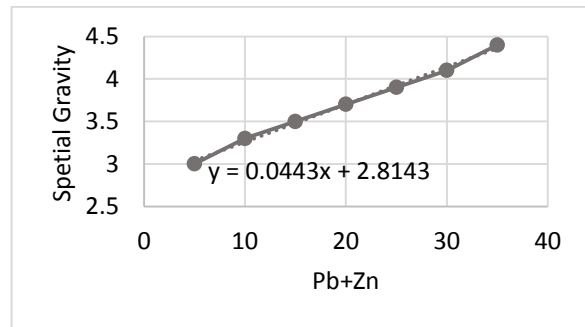
$P_b$ : خطای نسبی هر بلوک

$\delta_k$ : انحراف از معیار کریجینگ

$t$ : ضریب مربوط به سطح اعتماد که برای سطح اعتماد ۹۵ درصد مقدار ۲ در نظر گرفته می‌شود.

$G$ : عیار متوسط هر بلوک است.

بر اساس خطای نسبی تخمین برای هر بلوک، ذخیره در کلاس‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شود. میانگین عیار و تناژ هر کلاس برای معدن کوشک در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۱۲: توزیع چگالی کانسنگ معدن کوشک بر حسب میزان عیار سرب و روی

جدول ۴: مشخصات کلاس‌های مختلف کانسار کوشک

عیار متوسط	تناژ	کلاس	خطای نسبی	عیار حد	معدن
۱۱,۲۱۷	۳۰۶۰۰۰۰	A	$\leq 20$	۳٪	کوشک
۶,۲۶۹	۴۶۰۰۰۰۰	B	۲۰-۳۰		
۵,۸۰۳	۳۸۰۰۰۰۰	C <sub>1</sub>	۳۰-۶۰		

با استفاده از وزن مخصوص هر بلوک و عیارهای محاسبه شده با روش مدل‌سازی کریجینگ معمولی، میزان کانسنگ بر اساس عیار حدهای مختلف محاسبه و نتایج در نمودار عیار-تناژ شکل ۱۳ ارائه شده است.

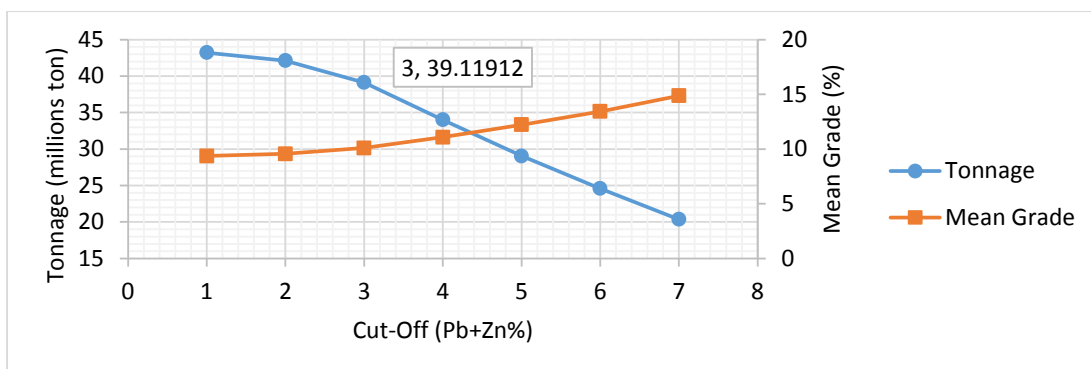
#### ۹- تقسیم بندی ذخیره

یکی دیگر از قابلیت‌های مهم تخمین زمین آماری محاسبه میزان خطای وابسته برای هر تخمین (در مقیاس یک بلوک یا یک نقطه) است. از این رو می‌توان ملاکی برای اعتماد به تخمین‌های زمین آماری در دست داشت. چنین توانایی این امکان را به دست می‌دهد تا ذخیره را بر اساس خطای وابسته به تخمین، به کلاس‌های مختلف طبقه‌بندی کرد. برای محاسبه خطای تخمین هر یک از بلوک‌ها از فرمول ۸ استفاده می‌شود:

$$P_b = \frac{t \cdot \delta_k}{G} \times 100 \quad (8)$$

#### ۱۰- نتیجه‌گیری

در روش شبیه‌سازی شرطی گوسی، با این ایده که هر چه واریانس بین تحقق‌ها کمتر باشد، تحقق‌ها شباهت بیشتری دارند، می‌توان به ابعاد بهینه دست یافت. ابعاد بهینه از این روش برای معدن کوشک  $10 \times 10 \times 7.5$  متر محاسبه شده است. ابعاد به دست آمده از روش شبیه‌سازی شرطی گوسی تطابق مناسبی با نسبت‌های انیزوتروپی معدن کوشک دارد.



شکل ۱۳: نمودار عیار-حد - تناژ برای معدن کوشک



[۸] مهربابی، ب.؛ ۱۳۷۰؛ "کانی شناسی و ژنز کانسار سرب و روی کوشک (باقی)". پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت معلم تهران، ۲۱۵ صفحه.

[۹] مدنی، ح.؛ ۱۳۷۳؛ "مبانی زمین آمار". انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۶۵۹ صفحه.

[۱۰] حسنی پاک، ع. ا.، شرف‌الدین، م.؛ ۱۳۸۴؛ "تحلیل داده‌های اکتشافی". انتشارات دانشگاه تهران، ۱۰۱۰ صفحه.

[11] Rossi, E. M., and Deutsch, C. V. (2014). "Mineral resource estimation". Springer Press, pp. 332.

[12] Bristol, R. (2006). "Geostatistics in Surpac Vision". Surpac Minex Group, pp. 116.

[13] Glacken, I. M., and Snowden, D. V. (2001). "Mineral resource estimation". Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, 189-198.

— با توجه به ابعاد بهینه به دست آمده از روش شبیه‌سازی گوسی، تخمین ذخیره انجام گرفت. بر اساس عیار حد مجموع سرب و روی ۳ درصد، تناژ معدن کوشک ۳۹٫۱۲ میلیون تن با متوسط عیار ۱۰٫۰۱ درصد به دست آمده است.  
— در مورد ذخیره کانسار کوشک برای مقایسه می‌توان از اطلاعات پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور که رقم ذخیره قطعی ۲۹٫۹۷ میلیون تن با عیار متوسط ۱۴ درصد سرب و روی را ارائه می‌دهد، استفاده کرد. بر اساس ابعاد بهینه به دست آمده از روش شبیه‌سازی گوسی ذخیره قطعی ۳۰٫۶ میلیون تن با عیار متوسط ۱۱٫۲۲ درصد محاسبه شده است که مطابقت خوبی با مقدار گزارش شده دارد.

## ۱۱- مراجع

[1] Journel, A. G., and Huijbregts, Ch. J. (1978). "Mining geostatistics". Academic Press, pp. 600.

[2] David, M. (1979). "Grade and tonnage problems". Computers Method for the 80s in the Mineral Industry, In: Weiss A. (Ed), New York, 170-189.

[3] Armstrong, M., and Champigny, N. (1989). "A study on kriging small blocks". Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 82: 128-133.

[4] Hulse, D. E. (1992). "The consequence of block size decisions by ore body modeling". The 23rd International Symposium on the Application and Operation Research in the Mineral Industry (APCOM23), 225-232.

[5] Farrelly, C. T., and Dimitrakopoulos, R. (2002). "Recoverable reserves and support effects when optimizing openpit mine design". International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment, 16(3): 217-229.

[6] Hekmat, A., Osanloo, M., and Moarefvand, P. (2013). "Block size selection with the objective of minimizing the discrepancy in real and estimated block grade". Arabian Journal of Geosciences, (6): 141-155.

[7] Hayati, M., Rajabzadeh, R., and Darabi, M. (2015). "Determination of optimal block Size in angouran mine using VIKOR method". Journal of Materials and Environmental Science, 6(11): 3236-3244.

<sup>1</sup> Journel

<sup>2</sup> Huijbregts

<sup>3</sup> David

<sup>4</sup> Armstrong

<sup>5</sup> Champigny

<sup>6</sup> Hulse

<sup>7</sup> Farrelly

<sup>8</sup> Dimitrakopoulos

<sup>9</sup> Normal Score Transform

<sup>10</sup> Semivariogram

<sup>11</sup> linear Unbiased Estimator

<sup>12</sup> Conditional simulation

<sup>13</sup> Monte Carlo

<sup>14</sup> Smoothing inherent

<sup>15</sup> Support

<sup>16</sup> Gaussian Conditional simulation



## Optimum Block Size Determination in Kushk Lead and Zinc Ore Deposit Evaluation Using Simulation and Indicator Kriging Methods

Beheshti Bafqi R.<sup>1</sup>, Torab F.M.<sup>2\*</sup>

1- M.Sc Student, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran  
homa6001.6769@gmail.com

2- Associate Professor, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran  
fmtorab@yazd.ac.ir

(Received: 27 Apr. 2019, Accepted: 12 Jan. 2020)

**Abstract:** In this research, the optimum block size determination method and its influence on reserve estimation were investigated. For this purpose, the Kushk lead and zinc deposit data were used as case study. The database was built using borehole data and the composite samples were prepared with a 2m length. The data was transformed to Gaussian distribution by normal score transformation method. Variography was used for identification of variability and continuity of the ore, and the best variogram models and anisotropy ellipsoids were fitted. Due to ore complexity and density of boreholes in open pit and undergrounds, indicator kriging method was used for orebody modeling and ore-waste boundary determination. Considering different block size, the lead and zinc grade variability was modeled by sequential Gaussian simulation method. In each block size simulation, 20 realizations were determined and the variances between realizations were calculated. The lower variance is accordance with more similarity of realizations which was selected as a criterion of optimum block size determination. With this method, the optimum block size of Kushk deposit was determined as 10x10x7.5 m. The optimum block size is relatively accordance with the anisotropy ratio at the deposit, therefore it was chosen as suitable block size for reserve estimation of the deposit. By this optimum block size, and considering a 3% cut off grade for sum of lead and zinc, the reserve of the deposit was calculated about 39.12 million tons.

**Keywords:** Block model, Block size, Gaussian conditional simulation, Indicator kriging.

### INTRODUCTION

An important part of mineral ore deposit modeling is block modeling, in which the mineral body is subdivided into uniform blocks. The dimensions of the blocks and their shape have an undeniable impact on engineering calculations and designs and guarantee the accuracy of the modeling [1]. Recently, some researchers have done various studies on the optimum block size modeling in different ore deposits [2-5]. In this paper, the Gaussian conditional simulation method is used to select the optimal block dimensions for Kushk Lead & Zinc Mine. Using the above method, based on a wide range of block models, optimal block dimensions were determined and estimated for mineral reserve. All the estimations and simulations

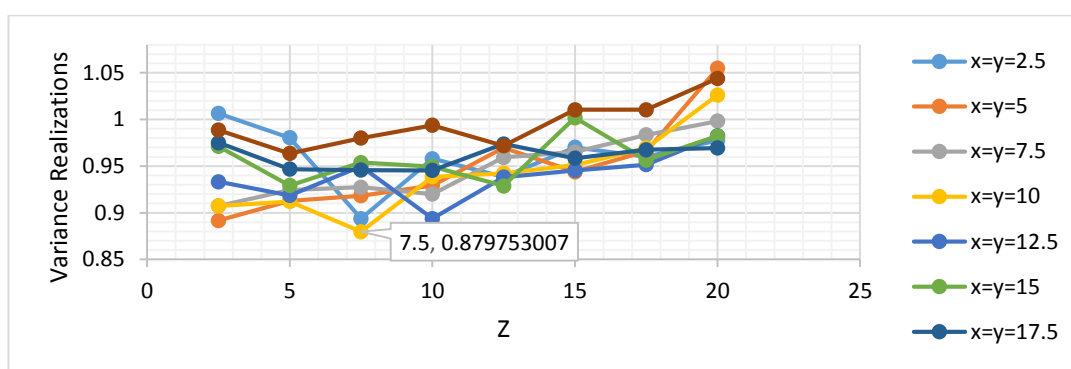


are made using a combination of Wingslib, Surpac and SGeMS softwares.

Kushk Lead & Zinc Mine is located 45 kilometers northeast of Bafgh, on the edge of Lut Desert and it is structurally folded and faulted [6]. According to the National Geosciences Database, a definite reserve of 29.97 million tons with an average grade of 14% lead and zinc has been reported for this deposit previously.

## METHODS

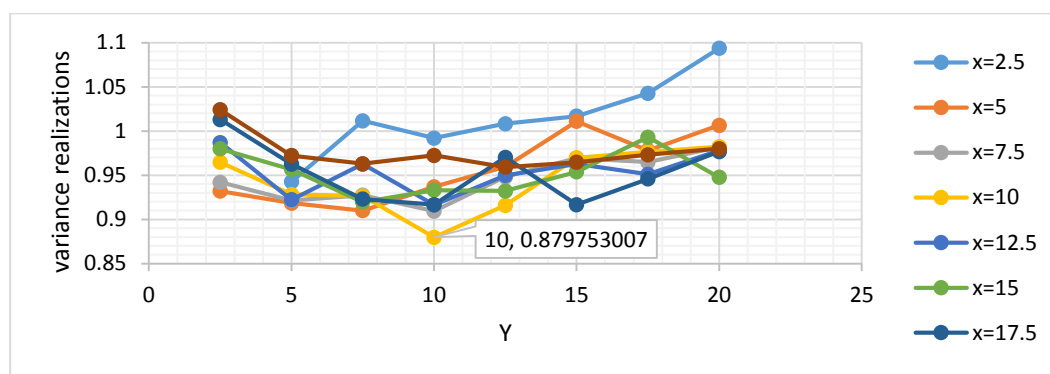
Statistical studies on the Kushk Lead & Zinc Mine data indicate that the data follows an abnormal distribution. So at first stage, the data distribution should be transformed to standard Gaussian distribution. A variogram is one of the important geostatistical tool used to describe spatial continuity, correlation modeling, and analysis of spatial structure of data [7]. In order to determine anisotropy, three-dimensional variogram modeling of lead and zinc composite data was performed in different directions and based on the consistency of ranges and the variations of sills, the large, middle and small range variograms and spatial angles of the modeled ellipsoids were determined for the dataset. Conditional Gaussian simulation provides useful tool for determining optimal block dimensions in the reserve. SGeMS software was used for simulation with a wide range of block dimensions to achieve optimum dimension. At this stage, Z values from 2.5 to 20 m with 2.5 m intervals were considered to determine the optimal dimensions in the Z direction, with X and Y parameters being constant. As a result, 64 models were created. In the simulation process, 20 realizations were considered for each model. Then the optimal Z dimension was selected as criterion to minimize the variance between the realizations in each block, which is similar to the most realities. The Gaussian conditional simulation method is also used to find optimal dimension in X and Y directions. The simulation is based on the data obtained from the variogram on the Pb and Zn aggregate data. Based on Figure 1, the optimal Z value for the Kushk block size is 7.5 meters.



**Figure 1.** Trend of variances of realizations versus Z variations with constant values of X and Y for Kushk Lead & Zinc deposit

With constant Z dimension, the values of X and Y were changed, and they varied from 2.5 to 20 m with 2.5 m intervals for optimization. The results of this modeling were 64 models. As in the previous step (selecting the optimal Z), the variance between twenty realizations in each block was calculated. Finally, all the calculated variances were averaged and applied as the best criterion to determine the optimal X and Y dimensions. According to Figure 2, the optimal dimensions of X and Y were obtained 10 meters.

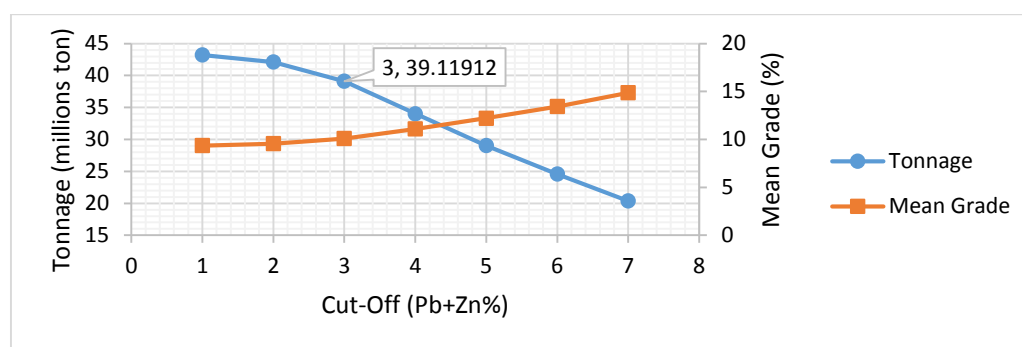
Due to the complexity of the deposit, indicator kriging estimation method was used to model the orebody figure and to determine the mineral boundaries. The method requires indicator variogram modeling to determine the continuity of the orebody boundary. This was done on the basis of 2% grade for the sum of lead and zinc. After the variography step, the estimation was performed by indicator kriging. After determining the boundaries of the ore deposit, based on the optimum block dimensions obtained from the conditional simulation, a block model of Kushk deposit was developed and the reserve was calculated by ordinary kriging method. Due to dependency of the density to the lead and zinc grade, the specific gravity was calculated based on the Formula 1 for each block.



**Figure 2.** Trend of variance variations of realizations versus Y changes with constant values of X and Z for Kushk Lead & Zinc deposit

$$SG = 0.0443(Pb + Zn) + 2.8143 \quad (1)$$

Using the specific gravity of each block and the grades calculated by ordinary kriging modeling, the ore content was calculated based on various cut-offs. The results are presented in Figure 3 as grade-tonnage curves.



**Figure 3.** Grade-tonnage diagram for the Kushk deposit

Based on the relative errors of the estimation for each block, the reserve is divided into different categories. The mean grade and tonnage of each class for the Kushk deposit is presented in Table 1.

**Table 1.** Characteristics of Different Reserve Categories of the Kushk deposit

Deposit	Cut-off grade	Error	Class	Tonnage	Mean grade (Pb+Zn) (%)
Kushk	3%	≤20	A	30,600,000	11.217
		20-30	B	4,600,000	6.269
		30-60	C <sub>1</sub>	3,800,000	5.803
Sum				39,000,000	10.01%

## CONCLUSIONS

- In the Gaussian conditional simulation method, the optimal block dimension can be obtained with the idea that the variance between realizations should be minimal, which shows the similarity of the most realizations. The optimum block dimensions of this method were calculated for the Kushk mine as 10×10×7.5 m. The dimensions obtained by the Gaussian conditional simulation method are in a good agreement with the anisotropic ratios of the Kushk mine.

- According to the optimal dimensions obtained from the Gaussian simulation method, the reserve estimation was performed. According to the Pb+Zn cut off grade of 3%, the tonnage of Kushk deposit was estimated as 39.12 million tons with an average grade of 10.01%.

## REFERENCES

- [1] HasaniPak, A. A., and Sharafodin, M. (1384). "*Exploration data analysis*". University of Tehran Publications, pp. 1010.
- [2] Hulse, D. E. (1992). "*The consequence of block size decisions by ore body modeling*". The 23rd International Symposium on the Application and Operation Research in the Mineral Industry (APCOM23), 225-232.
- [3] Farrelly, C. T., and Dimitrakopoulos, R. (2002). "*Recoverable reserves and support effects when optimizing open pit mine design*". International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment, 16(3): 217-229.
- [4] Hekmat, A., Osanloo, M., and Moarefvand, P. (2013). "*Block size selection with the objective of minimizing the discrepancy in real and estimated block grade*". Arabian Journal of Geosciences, (6): 141-155.
- [5] Hayati, M., Rajabzadeh, R., and Darabi, M. (2015). "*Determination of optimal block size in angouran mine using VIKOR method*". Journal of Materials and Environmental Science, 6(11): 3236-3244.
- [6] Mehrabi, B. (1370). "*Mineralogy and genesis of the lead and zinc ore deposit in Kushk (Bafq)*". M.Sc Student Thesis, Teacher Training University of Tehran, pp. 215.
- [7] Madani, H. (1373). "*Fundamentals of geostatistics*". Amirkabir University of Technology Publications, pp. 659.