

(یادداشت فنی)

## تعیین ابعاد بلوکی بهینه با استفاده از روش‌های زمین‌آماری و شبیه‌سازی در معادن سنگ آهن سورک و فسفات اسفوردی

ریحانه السادات بهشتی بافقی<sup>۱</sup>، فرهاد محمد تراب<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت: مهر ۱۳۹۷، پذیرش فروردین ۱۳۹۹)

### چکیده

در این مطالعه به روش انتخاب ابعاد بهینه برای مدل‌سازی بلوکی و نقش ابعاد بلوک در تخمین ذخیره پرداخته شده است. به این منظور از داده‌های معادن سنگ آهن سورک و فسفات اسفوردی استفاده شده است. در این راستا سعی شد مطالعات موردی با تیپ کانی‌سازی‌های مختلف در نظر گرفته شود تا تاثیر تغییرپذیری بر روی ابعاد بهینه نیز مورد بررسی قرار گیرد. پایگاه داده با اطلاعات گمانه‌ها ساخته و کامپوزیت‌هایی با طول‌های ۲ متری تهیه گردید. با استفاده از تبدیل به روش امتیاز نرمال توزیع داده‌ها نرمال شد. از واریوگرافی به منظور شناخت پیوستگی ماده معدنی استفاده و بهترین واریوگرام و بیضوی ناهمسانگردی بدست آمد. مجموعاً ۲۵۶ مدل بلوکی برای معدن سورک و اسفوردی ایجاد و به ازای طیف وسیعی از ابعاد بلوکی، بازده کریجینگ محاسبه گردید. به علت بزرگ بودن ابعاد پیشنهادی و عدم تطابق آنها با نسبت‌های انیزوتروپی، این روش کنار گذاشته شد. برای ابعاد بلوکی مختلف روش شبیه‌سازی شرطی گوسی استفاده شد. در هر شبیه‌سازی ۲۰ تحقق ایجاد و واریانس بین تحقق‌ها محاسبه گردید. واریانس کمتر به منزله شباهت بیشتر تحقق‌هاست که ملاک انتخاب ابعاد بهینه قرار گرفت. با این روش ابعاد  $۷/۵ \times ۷/۵ \times ۷/۵$  متر برای معدن سورک  $۱۰ \times ۷/۵ \times ۱۰$  متر برای معدن اسفوردی محاسبه شد. ابعاد بلوکی بدست آمده تطابق مناسبی با نسبت‌های انیزوتروپی داشته لذا بر این اساس ابعاد بهینه حاصل برای محاسبه ذخیره انتخاب گردید. ذخیره محاسبه شده با ابعاد بدست آمده از روش شبیه‌سازی برای معدن سورک با عیارحد آهن ۲۰٪ حدود ۹/۸۴ میلیون تن و معدن اسفوردی با عیارحد فسفر ۵٪ حدود ۱۱/۹۳ میلیون تن برآورد گردید.

### کلمات کلیدی

مدل بلوکی، ابعاد بلوک، واریانس تخمین، بازده کریجینگ، شبیه‌سازی شرطی گوسی

## 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، تاثیر انکارناپذیری در نتیجه محاسبات و طراحی‌های مهندسی داشته و تضمین‌کننده دقت و صحت یک مدل‌سازی مطلوب خواهد بود.

پیشینه تحقیقاتی زیادی در رابطه با انتخاب ابعاد بلوک در تمامی مراحل معدنکاری وجود دارد. جورنل و هوجبرتس (۱۹۷۸) پیشنهاد دادند که به‌عنوان یک راهنمای تقریبی، اندازه بلوک‌ها باید کمتر از فاصله داده‌ها باشد به عبارتی اندازه بلوک از یک سوم تا یک دوم فاصله نمونه‌های حفاری باشد [۱]. دیوید (۱۹۷۹) پیشنهاد داده‌است که حداقل ابعاد بلوکی نباید از یک چهارم میانگین فاصله بین حفاری‌ها کمتر باشد [۲]. آرمسترانگ و چامپینگ (۱۹۸۹) تخمین بلوک‌های کوچک را مورد بحث قرار دادند و نتیجه گرفتند که تخمین‌های معنی دار از بلوک‌های انفرادی زمانی به دست می‌آید که شعاع تاثیر واریوگرام از ابعاد بلوک‌ها و فاصله شبکه‌های حفاری بزرگتر باشد. اما زمانی که شعاع تاثیر کوچک باشد این امر ممکن نیست [۳]. هالس (۱۹۹۲) به رابطه بین ابعاد بلوکی، فاصله نمونه‌برداری و مدل واریوگرام پرداخته است. او نتیجه گرفت که زمانی که شعاع تاثیر واریوگرام ده برابر ابعاد بلوک‌ها است فاصله نمونه‌برداری چهار برابر ابعاد بلوکی می‌شود [۴]. فارلی و دیمیتراکوپولوس (۲۰۰۲) ذخایر قابل استحصال با استفاده از کریجینگ شاخص در ابعاد بلوکی مختلف را تخمین زدند [۵]. در مطالعه حکمت و همکاران (۲۰۱۳) رابطه فاصله نمونه‌برداری و اندازه‌ی بلوکی و همچنین حساسیت روش‌های مختلف تخمین بر روی ابعاد بلوک و در نهایت انتخاب اندازه بهینه بلوک به منظور به حداقل رساندن میانگین خطای تخمین مورد بررسی قرار گرفته‌است [۶]. در مطالعه‌ای از حیاتی و همکاران (۲۰۱۵) 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 روش‌های مختلف زمین آماری مانند واریانس تخمین، بازدهی کریجینگ و شبیه‌سازی شرطی گوسی برای انتخاب ابعاد بلوکی بهینه برای معادن سنگ آهن سورک و فسفات اسفوردی استفاده شده‌است. در این مطالعه با استفاده از

روش‌های فوق و بر اساس طیف وسیعی از مدل‌های بلوکی، ابعاد بلوک بهینه تعیین و ذخیره معادن نامبرده تخمین زده شد همه تخمین‌ها و شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله، با تلفیقی از نرم‌افزارهای SGeMS و Surpac، Wingslib تولید شده‌است.

## ۲- معرفی مناطق مورد مطالعه

## ۲-۱- معرفی معدن سنگ آهن سورک

محدوده معدن سنگ آهن سورک استان یزد به وسعت چهل کیلومتر مربع، در ۱۵۰ کیلومتری غرب شهر یزد، بخش ندوشن و در مجاورت روستای سورک قرار دارد. کانی‌سازی‌های آهن در محدوده مورد بررسی سورک در امتداد بخش زون خاوری زون گسله دهشیر در امتداد شمال غربی جنوب - شرقی به صورت عدسی‌ها و رگه‌هایی در مرز بین سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی با ترکیب متفاوت گرانیت تا گرانودیوریت و مونوزوسینیت جایگزین شده است. تمرکز عدسی‌ها و رگه‌های آهن‌دار در چهار منطقه در امتداد گسل اصلی منطقه بوده که به صورت ناهنجاری‌های یک، دو، سه و چهار تقسیم بندی شده‌اند. بلوک ۲C که در حقیقت بخش اعظم ذخیره سنگ آهن سورک و پهنه مگنتیتی آن را در بر می‌گیرد، در بخش جنوب شرقی ناهنجاری شماره دو قرار دارد. این کانی‌سازی به صورت عدسی‌های متعدد در میزبان اسکارنی اپیدوتی تشکیل شده‌است. میزان ذخیره بلوک ۲C، ۱۳۴۰۰۰۰ تن با عیار متوسط ۴۷/۳۷ درصد آهن با ابعاد بلوک ۱۲/۵ متر گزارش شده‌است که هدف مطالعه موردی در این تحقیق است [۸].

## ۲-۲- معدن فسفات اسفوردی

معدن فسفات اسفوردی در ۳۵ کیلومتری شمال شرق شهرستان بافق در استان یزد در ایران مرکزی واقع شده‌است و با طی جاده‌ای ۲/۵ کیلومتری به جاده آسفالتی بافق - بهاباد متصل می‌شود. این کانسار در بقایای هوازده سنگ‌های پرکامبرین، کامبرین و مزوزوئیک واقع شده‌است. واحدهای سنگی محدوده کانسار، شامل مجموعه‌ای در هم و خرد شده‌ای هستند که مرکب از سنگ‌های ولکانیکی و رسوبی و همچنین سنگ‌های آذرین نفوذی می‌باشند که به شدت چین خورده و گسله‌اند و طبقات مزوزوئیک آن را عمدتاً

در مرحله بعد تبدیل امتیاز نرمال<sup>۱</sup> بر روی داده‌هایی که از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند، اعمال و توزیع داده‌ها به نرمال استاندارد تبدیل می‌شود. سپس به هر یک از داده‌های اولیه، یک امتیاز نرمال اختصاص داده، که می‌توان امتیازهای نرمال را با تبدیل برگشتی به مقدارهای واقعی تبدیل کرد.

#### ۴- مدل‌سازی واریوگرام

واریوگرام یکی از ابزارهای زمین‌آماري است که برای تشریح ارتباط فضایی، مدل‌سازی همبستگی و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی داده‌ها به کار می‌رود [۱۰].

در واقع واریوگرام، میانگین مربعات تفاضل دو مقدار را به عنوان تابعی از نمو فاصله  $h$  بین آن‌ها، بیان می‌کند. بنابراین چنین واریانسی می‌تواند معیاری برای نمایش تأثیرگذاری و یا تأثیرپذیری مقدار یک نمونه روی مقادیر محیط مجاور خود باشد (رابطه (۱)).

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

در رابطه (۱)،  $\gamma(h)$  را سمیواریوگرام<sup>۲</sup> می‌نامند ( $2\gamma(h)$  را واریوگرام می‌گویند).  $n$  تعداد جفت نقاطی است که به فاصله  $h$  از یکدیگر قرار دارند و در محاسبه واریوگرام شرکت می‌کنند،  $x_i$  عیار در نقطه  $i$  ام و  $x_{i+h}$  عیار در نقطه‌ای به فاصله  $h$  از نقطه  $i$  ام می‌باشد. با محاسبه مقدار واریوگرام به ازای  $h$  های مختلف، می‌توان نمودار  $\gamma(h)$  بر حسب  $h$  را رسم نمود [۱۱].

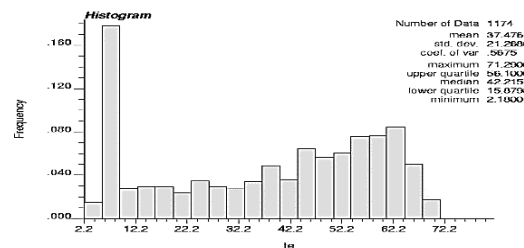
#### ۴-۱- مدل‌سازی ناهمسانگردی با استفاده از واریوگرام جهتی

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 آن 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. به منظور تعیین ناهمسانگردی، واریوگرافی سه بعدی داده‌های کامپوزیت شده آهن و فسفر در جهات مختلف انجام شد و براساس پیوستگی شعاع تأثیر و تغییرات سقف واریوگرام‌ها، جهات و ابعاد قطر بزرگ، میانی و کوچک بیضوی ناهمسانگردی به همراه واریوگرام‌ها و زوایای مربوطه برای هر دو معدن تعیین شد (جدول ۱).

ریولیت‌های تریاس تشکیل می‌دهند. در زیر توده معدنی سکانسی از سنگ‌های ولکانیکی، رسوبی، توف و آگلومرا و در بعضی نقاط دولومیت وجود دارد. علاوه بر آن کانسار مزبور در سمت شمال و شمال غرب به وسیله تپه‌های ریولیتی و دولومیتی‌هایی که کوه اسفوردی را ساخته‌اند، احاطه می‌شوند. میزان ذخیره کانسار اسفوردی بیش از ۱۶/۵ میلیون تن با عیار متوسط ۱۳/۹ درصد تعیین شده‌است. ابعاد بلوک گزارش شده  $10 \times 10 \times 10$  متر می‌باشد [۹].

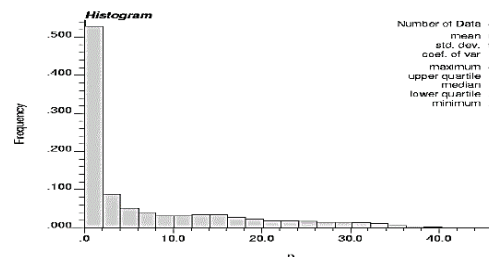
#### ۳- مطالعات آماری

معمولاً اولین قدم در بررسی‌های عددی، مطالعات آماری پایه و استخراج خصوصیات آماری مربوط به داده‌ها است. یکی از ابزارهای گرافیکی آماری تابع توزیع احتمال و هیستوگرام می‌باشد. بررسی آماری معدن سنگ آهن سورک در شکل ۱ نمایانگر این است که داده‌ها از توزیع غیرنرمال تبعیت می‌کنند و داده‌های به‌دست آمده از آنالیز آهن نمونه‌های مغزه، دارای میانگین تقریبی ۳۷/۴۸ درصد و انحراف معیار ۲۱/۲۷ می‌باشند.



شکل ۱: پارامترهای آماری و هیستوگرام آهن در معدن سورک

هیستوگرام برای داده‌های فسفر معدن فسفات اسفوردی نیز ترسیم شد. همین طور که از شکل ۲ مشاهده می‌شود این داده‌ها نیز دارای توزیع غیرنرمال هستند. میانگین عیار فسفر در آنالیز مغزه‌ها نزدیک به ۶/۷۶ درصد و انحراف معیار آن‌ها ۹/۰۹ می‌باشد.



شکل ۲: پارامترهای آماری و هیستوگرام فسفر در معدن اسفوردی

جدول ۱: نمایش خصوصیات بعدی و جهت‌ی بیضوی ناهمسانگردی

معدن	نسبت محور بزرگ به محور میانی	نسبت محور بزرگ به محور کوچک	شعاع تاثیر (متر)	آزیموت (درجه)	شیب (درجه)	پلانچ (درجه)
سورک	۱/۱۶۲	۱/۸۴۰	۸۰/۳۰۴	۱۳۵	-۴۵	۰/۲۱
اسفوردی	۱/۲۴۲	۱/۳۰۹	۱۰۶/۶۳۶	۲۰۳	۱۸/۵	۴۲

### ۵-۲- کریجینگ معمولی

در روش کریجینگ معمولی مقدار میانگین مجهول است ولی فرض می‌شود که مقدار آن مستقل از مختصات است. بنابراین برای یافتن میانگین، شرط نااریب بودن و یا عاری بودن از خطای سیستماتیک را طوری اعمال می‌کنیم که میانگین بخشی از جواب مسئله باشد. در این حالت مجموع اوزان کریجینگ برابر واحد است (رابطه (۲)):

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

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 که دارای کمبود اطلاعات است را تعیین کرد [۱۱].

### ۶- واریانس تخمین

واریانس هر توزیع در واقع معیاری از پراکندگی مقادیر حول میانگین آن‌ها است. واریانس متغیر تصادفی  $X$  به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$S^2 = E(X - \bar{X})^2 \quad (3)$$

که در آن  $S^2$  واریانس در جامعه نمونه،  $\bar{X}$  میانگین داده‌ها و  $E$  امید ریاضی هستند [۱۱].

در ابتدا واریانس تخمین برای انتخاب ارتفاع بهینه بلوک مورد استفاده قرار گرفت. به‌صورتی که ابتدا با ثابت در نظر گرفتن ابعاد  $X$  و  $Y$  و تغییر ابعاد  $Z$  از ابعاد  $۲/۵$  تا  $۲۰$  متر با فواصل  $۲/۵$  متر مدل‌های مختلف ایجاد شدند و سپس با تغییر ابعاد در جهات  $X$  و  $Y$  و انجام مراحل تخمین با روش کریجینگ معمولی، مقادیر واریانس برای حالت‌های ایجاد شده محاسبه گردید. نمودار تغییرات واریانس تخمین در مقابل تغییرات  $Z$  برای معدن سورک در شکل ۳ نشان داده شده‌است. همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش ابعاد بلوک، واریانس تخمین سیر نزولی داشته و امکان انتخاب ابعاد بلوک بهینه با این معیار ساده میسر نمی‌باشد.

مرحله بعد از واریوگرافی، اعتبارسنجی از مدل ساخته شده می‌باشد، که در واقع اعتبارسنجی واریوگرام با روش اعتبار متقابل<sup>۲</sup> صورت می‌گیرد.

در این حالت میانگین و چولگی خطاها باید به صفر نزدیک باشد و گسترش (پوشش  $\bar{X} + 2S$ ) توزیع آن‌ها نزدیک به رقم ۹۵ درصد می‌باشد [۱۱]. مقادیر این اعتبارسنجی در جدول ۲ ارائه شده است:

جدول ۲: خلاصه آماری خطاهای کریجینگ

معدن	میانگین خطاها	چولگی خطاها	گسترش توزیع
سورک	۰/۰۰۱۲	۰/۸۵۸۴	۹۴/۳۴
اسفوردی	۰/۰۰۲۴	۰/۱۲۵۲	۹۵/۰۳

### ۵- مدل‌سازی بلوکی و تخمین‌های زمین‌آماري

مدل‌های بلوکی ابزارهای مناسبی برای ارزیابی معدن، تخمین ذخیره و برنامه‌ریزی معدن و بهینه‌سازی پیت هستند. هندسه مدل بلوکی وابسته به ویژگی‌های کانسار می‌باشد، ویژگی‌های زمین‌شناسی، ناهمسانگردی، الزامات برنامه‌ریزی معدن مثل اندازه و نوع تجهیزات برای این عملیات استفاده می‌شود. انتخاب اندازه و هندسه بلوک از تصمیمات مهم در مدل‌سازی منابع به شمار می‌رود [۱۲].

### ۵-۱- کریجینگ

کریجینگ یک روش زمین‌آماري است. به طور خلاصه می‌توان آن را بهترین تخمین‌گر خطی نااریب<sup>۳</sup> دانست. این تخمین‌گر خطی ضمن آن که کمترین واریانس تخمین را تنظیم می‌کند، نااریب بودن تخمین‌ها را نیز تضمین می‌نماید. مشروط به اینکه داده‌ها توزیع نرمال داشته باشند [۱۱]. در زمین‌آمار، روش‌های مختلف تخمین کریجینگ وجود دارد که از آن میان، در بررسی حاضر روش کریجینگ معمولی به کار گرفته شده‌است.

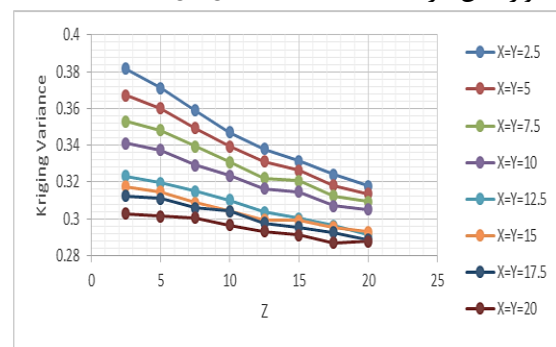
۷- بازده کریجینگ<sup>۵</sup>

با ارزیابی از روش کریجینگ معمولی دو پارامتر حاصل می‌شود، که می‌توان اندازه بلوک بهینه را به وسیله آن‌ها تعیین نمود. در نرم افزار سورپک تجزیه و تحلیل اندازه بلوک با استفاده از مقادیر بازده کریجینگ انجام می‌شود، که در مانند رابطه (۴) از واریانس تخمین کمک گرفته شده است [۱۳]:

$$\text{Kriging Efficiency} = \frac{\text{block variance} - \text{kriging variance}}{\text{block variance}} \quad (4)$$

Block Variance: واریانس بلوکی

Kriging Variance: واریانس کریجینگ

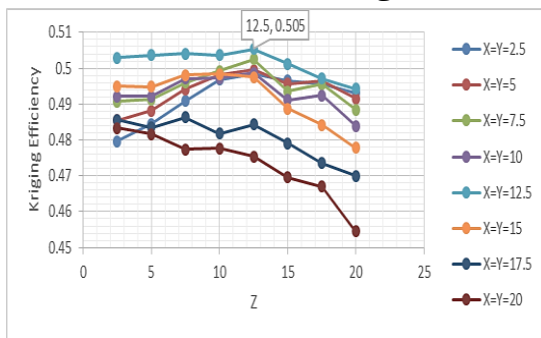


شکل ۳: روند تغییرات واریانس کریجینگ در مقابل تغییرات ابعاد Z، با ثابت در نظر گرفتن ابعاد X و Y برای معدن سنگ آهن سورک

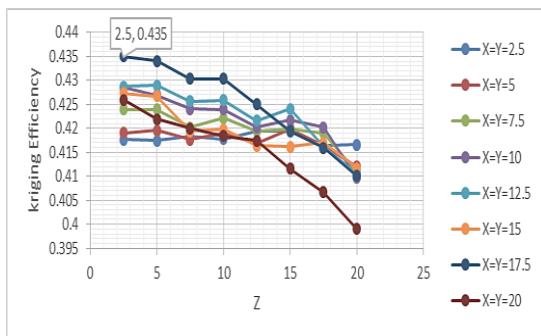
بازده کریجینگ به مقادیر نمونه‌ها وابسته نیست، اما با اندازه بلوک، موقعیت نمونه‌ها و پارامترهای واریوگرام مرتبط است. در حالت ایده‌آل، بازده کریجینگ باید مقدار ۱ را داشته باشد، اما در عمل این نتیجه غیر ممکن است. می‌توان از مقایسه مقادیر این پارامتر به ازای ابعاد مختلف بلوک‌ها، برای انتخاب بلوک با ابعاد بهینه بهره جست [۱۳]. برای مدل سازی معدن سورک و اسفوردی، از نرم افزار Surpac استفاده شده‌است. در این راستا مجموعه وسیعی از ابعاد بلوک در سه جهت X، Y و Z مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این طیف شامل ابعادی از ۲/۵×۲/۵×۲/۵ متر تا ۲۰×۲۰×۲۰ متر می‌باشد که با فواصل ۲/۵ متر از هم انتخاب شده‌اند. ابتدا برای انتخاب ابعاد Z بهینه، با ثابت در نظر گرفتن ابعاد X و Y، ابعاد Z از ۲/۵ تا ۲۰ متر تغییر نمود و عملیات تخمین برای هر مدل بلوکی انجام شد، که در این روش ۵۶ مدل ایجاد شده و بازده کریجینگ ثبت گردیده است.

طبق توضیحات قبل، در این روش ملاک انتخاب ابعاد بهینه، به حداکثر رسیدن مقدار بازده کریجینگ می‌باشد. در

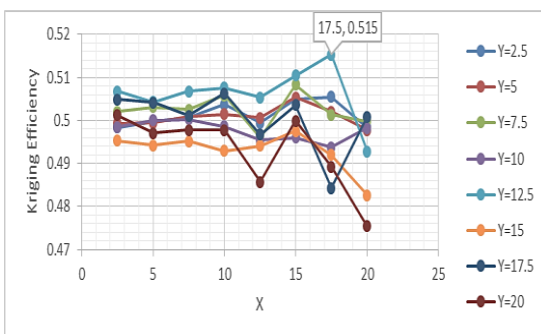
معدن سورک با توجه به شکل ۴ مقدار Z بهینه ۱۲/۵ متر و برای معدن اسفوردی با همین روش و با توجه به شکل ۵ ابعاد ۲/۵ متر به عنوان ارتفاع بهینه بلوک به دست آمد. در مرحله بعد با ثابت در نظر گرفتن مقدار Z بهینه، مقادیر X و Y از ۲/۵ تا ۲۰ تغییر داده شد و عملیات تخمین برای هر مدل بلوکی انجام شد. در مرحله بعد نیز با استفاده از مقدار حداکثری بازده کریجینگ ابعاد بهینه X و Y انتخاب گردید. شکل ۶ مربوط به معدن سورک و شکل ۷ مربوط به معدن اسفوردی می‌باشد.



شکل ۴: روند تغییرات بازده کریجینگ در مقابل تغییرات ابعاد Z با ثابت در نظر گرفتن مقادیر X و Y برای معدن سنگ آهن سورک



شکل ۵: روند تغییرات بازده کریجینگ در مقابل تغییرات ابعاد Z با ثابت در نظر گرفتن مقادیر X و Y برای معدن فسفات اسفوردی

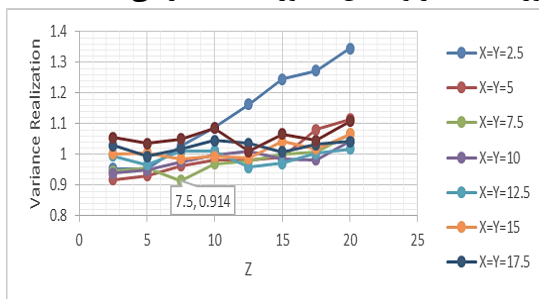


شکل ۶: روند تغییرات بازده کریجینگ در مقابل تغییرات X با ثابت در نظر گرفتن مقادیر Z و Y برای معدن سنگ آهن سورک

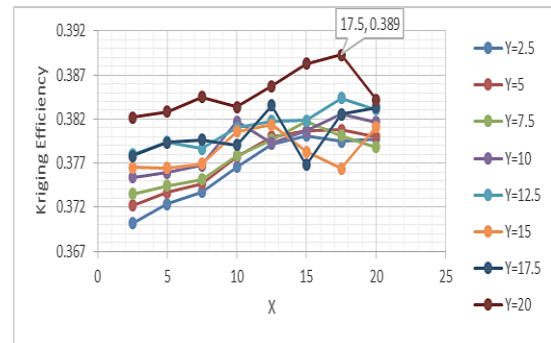
پتانسیل را دارد تا روش‌های زمین‌آماری که در حال حاضر استفاده می‌شوند را ارتقا بخشد. شبیه‌سازی شرطی تعدادی تصویر مشابه برای تخمین عیار، تولید می‌کند که هر کدام از آن‌ها براساس توزیع و تداوم فضایی طبیعی داده‌های ورودی می‌باشد. شبیه‌سازی شرطی همچنین دارای توانایی بازتولید سطحی از تغییرپذیری نمونه‌ها است که برعکس، در دیگر روش‌ها، این تغییرپذیری کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی شرطی ابزارهای مفیدی را برای تعیین ابعاد بلوکی بهینه و درجه هموارشدگی ذاتی<sup>۸</sup> در یک ذخیره فراهم می‌کند. شبیه‌سازی-ها در مقیاس کوچک در مناطق نماینده، این اجازه را می‌دهد تا با تغییر ساپورت‌ها<sup>۹</sup>، یکی از تکنیک‌های دقیق را به صورت محلی انتخاب کنیم. همچنین استفاده از یک روش شبیه-سازی اجازه می‌دهد تا قدرت انتخاب و هموارشدگی ذاتی در یک مدل تخمین خورده را تعیین کنیم [۱۴].

در روش شبیه‌سازی از نرم افزار SGeMS استفاده گردید 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 گردید. 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 می‌باشد. که به منزله شباهت بیشتر تحقق‌ها به یکدیگر است. این روند برای هر دو معدن به کار گرفته شده است. روش شبیه‌سازی نیز روش شبیه‌سازی شرطی گوسی<sup>۱۰</sup> می‌باشد. شبیه‌سازی بر اساس داده‌های حاصل از واریوگرافی در مراحل قبل انجام گرفته است.

بر اساس شکل‌های ۸ و ۹ مقدار Z بهینه برای معدن سورک ۷/۵ متر و معدن اسفوردی ۱۰ متر می‌باشد.



شکل ۸: روند تغییرات واریانس تحقق‌ها در مقابل تغییرات Z با ثابت در نظر گرفتن مقادیر X و Y برای معدن سنگ آهن سورک



شکل ۷: روند تغییرات بازده کریجینگ در مقابل تغییرات X با ثابت در نظر گرفتن مقادیر Z و Y برای معدن فسفات اسفوردی

مقادیر ابعاد بهینه بر اساس روش بازده کریجینگ برای معدن سورک و اسفوردی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: ابعاد بهینه بدست آمده بر اساس روش بازده کریجینگ برای معادن سورک و اسفوردی.

معدن	ابعاد در جهت X	ابعاد در جهت Y	ابعاد در جهت Z
سورک	۱۷/۵	۱۲/۵	۱۲/۵
اسفوردی	۱۷/۵	۲۰	۲/۵

با توجه به اینکه ابعاد بهینه به دست آمده به روش بازده کریجینگ با شرایط عملیاتی و انیزوتروپی کانسار همخوانی ندارد لذا در مرحله بعد از روش شبیه‌سازی زمین آماری استفاده گردید.

## ۸- شبیه‌سازی زمین آماری

از آنجا که کریجینگ حداقل مقدار خطای تخمین را برای داده‌های نرمال تضمین میکند، لذا 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 لذا ممکن است طرح پیشنهاد شده بر اساس این داده‌های تخمین‌گر نتایج غیرمنتظره و نامناسبی را به همراه داشته باشد. در این شرایط استفاده از روش شبیه‌سازی شرطی<sup>۹</sup> ذخیره به روش زمین‌آمار می‌تواند مفید واقع شود [۱۱].

## ۸-۱- شبیه‌سازی شرطی

شبیه‌سازی شرطی به طور معمول با استفاده از روش کریجینگ همراه با رویکرد نمونه‌گیری مونت کارلو<sup>۱۰</sup>، این

جدول ۴: ابعاد بهینه به دست آمده به روش شبیه‌سازی براساس واریانس تحقق‌ها برای معادن سورک و اسفوردی

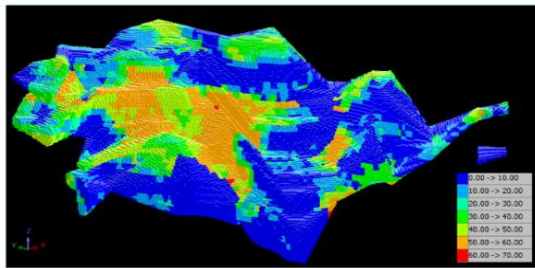
معدن	ابعاد در جهت X	ابعاد در جهت Y	ابعاد در جهت Z
سورک	۷/۵	۷/۵	۷/۵
اسفوردی	۱۰	۷/۵	۱۰

### ۹- ارزیابی ذخیره

اولین و مهم‌ترین بخش ارزیابی اقتصادی هر کانسار پس از انجام مراحل مختلف اکتشافی آن، بخش تخمین ذخیره کل کانسار و تخمین ذخیره قابل استخراج کانسار می‌باشد.

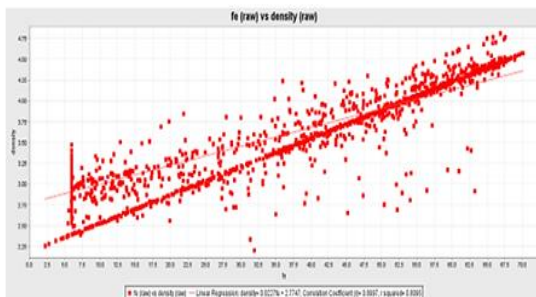
#### ۹-۱- معدن سنگ آهن سورک

بر اساس ابعاد بهینه به دست آمده از روش شبیه‌سازی شرطی، مدل بلوکی کانسار سورک ایجاد گردید و تخمین با روش کریجینگ معمولی انجام گرفت. شمایل کانسار شامل بخش‌های کم عیار و پرعیار در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

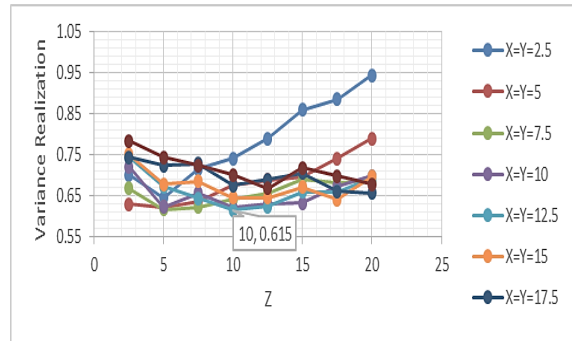


شکل ۱۲: مدل بلوکی کانسار سورک، رنگ آمیزی شده بر اساس عیار آهن

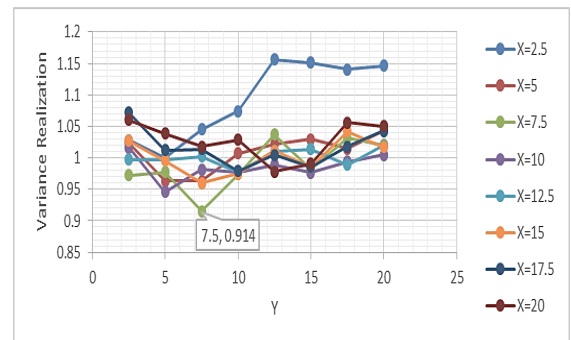
توزیع چگالی کانسنگ معدن سورک بر حسب میزان عیار آن مطابق شکل ۱۳ و با در نظر گرفتن خط رگرسیون بر اساس رابطه (۵) می‌باشد.



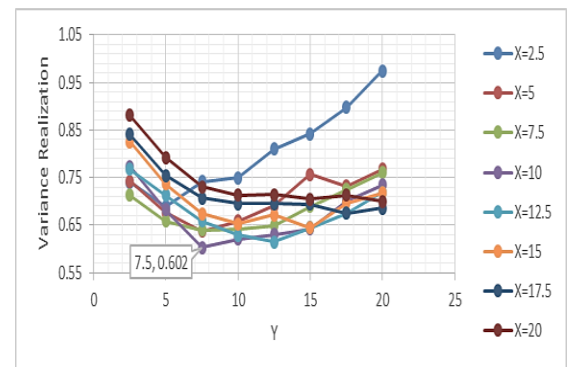
شکل ۱۳: توزیع چگالی کانسنگ معدن سورک بر حسب میزان عیار آهن.



شکل ۹: روند تغییرات واریانس تحقق‌ها در مقابل تغییرات Z با ثابت در نظر گرفتن مقادیر X و Y برای معدن فسفات اسفوردی با ثابت در نظر گرفتن ابعاد Z بهینه برای هر کدام از معادن سه‌گانه، مقادیر X و Y تغییر نموده و اعدادی از طیف ۲/۵ تا ۲۰ متر را با فواصل ۲/۵ متر اختیار کردند. حاصل این مدل‌سازی ۶۴ مدل می‌باشد. که هر کدام در روند شبیه‌سازی ۲۰ تحقق را شامل می‌شوند. همانند مراحل قبل برای انتخاب Z بهینه، واریانس هر بلوک در تحقق‌های بیست‌گانه 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 شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ابعاد بهینه برای هر دو معدن در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۱۰: روند تغییرات واریانس تحقق‌ها در مقابل تغییرات Y با ثابت در نظر گرفتن مقادیر X و Z برای معدن سنگ آهن سورک



شکل ۱۱: روند تغییرات واریانس تحقق‌ها در مقابل تغییرات Y با ثابت در نظر گرفتن مقادیر X و Z برای معدن فسفات اسفوردی

جدول ۵: توزیع چگالی کانسنگ فسفات بر حسب افق‌های مختلف کانسار اسفوردی [۹].

افق‌های مختلف کانسار اسفوردی	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )
افق اصلی (افق آپاتیت)	۳/۰۳
افق آهنی	۳/۳۰
افق سنگ‌های سبز	۲/۶۲
افق رگه‌های آپاتیتی	۳/۰۷
افق سنگ‌های آتشفشانی	۲/۶۱
میانگین وزنی افق‌ها	۳

#### ۱۰- تقسیم بندی ذخیره

یکی دیگر از قابلیت‌های مهم تخمین زمین‌آماري این است که برای هر تخمینی (در مقیاس یک بلوک یا یک نقطه) میزان خطای وابسته به آن محاسبه می‌شود. از این رو می‌توان ملاکی برای اعتماد به تخمین‌های زمین‌آماري در دست داشت. چنین توانایی این امکان را به دست می‌دهد تا ذخیره را براساس خطای وابسته به تخمین، به کلاس‌های مختلف طبقه‌بندی کرد. به منظور محاسبه خطای تخمین هر یک از بلوک‌ها می‌توان از رابطه (۶) استفاده نمود:

$$Pb = t \cdot \delta k G \times 100 \quad (6)$$

که در آن:

$Pb$ : خطای نسبی هر بلوک

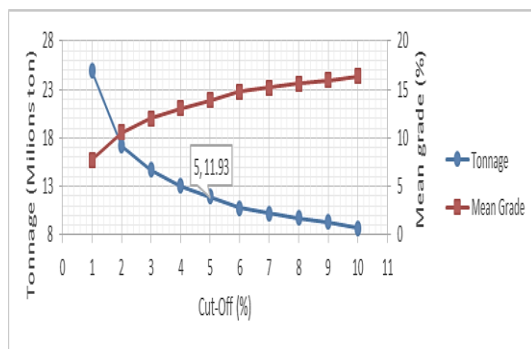
$\delta k$ : انحراف از معیار کریجینگ

$t$ : ضریب مربوط به سطح اعتماد که برای سطح اعتماد

۹۵ درصد مقدار ۲ در نظر گرفته می‌شود.

$G$ : عیار متوسط هر بلوک می باشد.

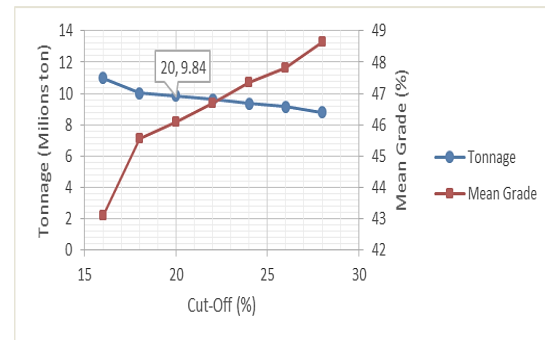
براساس خطای نسبی تخمین برای هر بلوک، ذخیره در کلاس‌های مختلف تقسیم‌بندی شده‌است. میانگین عیار و تناژ هر کلاس برای هر دو معدن در جدول ۶ ارائه گردیده است.



شکل ۱۶: نمودار عیار حد تناژ برای معدن اسفوردی

$$SG = 0.0227Fe + 2.7747 \quad (5)$$

با استفاده از وزن مخصوص هر بلوک و عیارهای محاسبه شده با روش مدل‌سازی کریجینگ معمولی، میزان کانسنگ بر اساس عیار حدهای مختلف محاسبه گردیده است. نتایج در نمودار عیار تناژ شکل ۱۴ ارائه شده‌است.



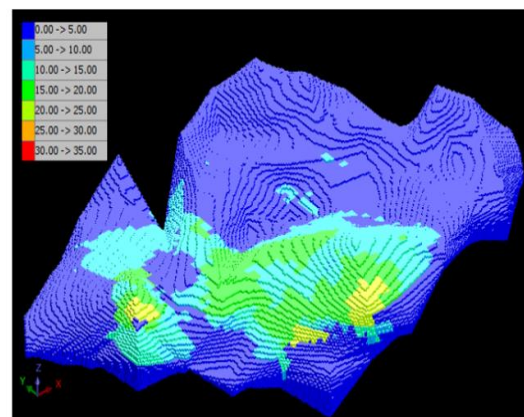
شکل ۱۴: نمودار عیار حد تناژ برای معدن سورک

#### ۹-۲- معدن فسفات اسفوردی

بر اساس ابعاد بهینه به دست آمده از روش شبیه‌سازی شرطی، مدل بلوکی کانسار اسفوردی ایجاد گردید و تخمین با روش کریجینگ معمولی انجام گرفت. شمایل کانسار شامل بخش‌های کم عیار و پرعیار در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.

توزیع چگالی کانسنگ معدن فسفات بر اساس افق‌های مختلف آن مطابق جدول ۵ می‌باشد.

با در نظر گرفتن وزن مخصوص متوسط ۳ برای هر بلوک و عیارهای محاسبه شده با روش مدل‌سازی کریجینگ معمولی، میزان کانسنگ بر اساس عیار حدهای مختلف محاسبه گردیده است. نتایج در نمودار عیار تناژ شکل ۱۶ ارائه شده‌است.



شکل ۱۵: مدل بلوکی کانسار اسفوردی، رنگ آمیزی شده بر اساس عیار فسفر



جدول ۶: مشخصات کلاس‌های مختلف کانسار سورک و اسفوردی

عیار متوسط	تناژ	کلاس	خطای نسبی	عیار حد	معدن
۱۵/۶۴۵	۳۶۰۰۰۰۰	A	$\leq 20$	۵	اسفوردی
۱۴/۱۵۸	۶۴۱۶۲۹۷	B	۳۰-۲۰	درصد	
۹/۴۶۰	۱۹۱۸۶۵۲	C <sub>1</sub>	۳۰-۶۰		
۴۹/۴۷۳	۲۶۶۵۴۷۰	A	$\leq 20$	۲۰	سورک
۴۵/۶۲۹	۵۷۰۲۸۸۸	B	۳۰-۲۰	درصد	
۴۱/۶۲۷	۱۴۷۳۵۳۰	C <sub>1</sub>	۳۰-۶۰		

## ۱۱- بحث و نتیجه‌گیری

- مدل‌سازی زمین‌شناسی می‌تواند به روش‌های دستی یا محاسباتی انجام گیرد. روش‌های دستی به دلیل عدم امکان تخمین قطعیت مدل نمی‌توانند در محاسبه ریسک اقتصادی و طراحی‌های فنی استخراجی در مراحل مختلف عمر کانسار چندان مفید باشند. در حالی که روش‌های محاسباتی، سرعتی بالا در به‌روزرسانی شکل کانسار براساس اطلاعات جدید را نیز در اختیار می‌گذارند. در این مطالعه مشخص شد که روش شبیه‌سازی شرطی گوسی می‌تواند تصویری از واقعیت هندسه کانسار را با ارائه یک مدل زمین‌شناسی به خوبی بازسازی کند. البته این امر در گرو انتخاب صحیح پارامترهای اولیه و واریوگرافی صحیح می‌باشد.

- با افزایش ابعاد بلوک و همگن شدن فضای تخمین، واریانس تخمین کاهش می‌یابد. در نتیجه نمی‌توان صرفاً از واریانس تخمین برای انتخاب ابعاد بهینه استفاده نمود.

- ابعاد بهینه در روش بازده کریجینگ برای معدن سورک  $17/5 \times 12/5 \times 12/5$  متر و برای معدن اسفوردی  $17/5 \times 20 \times 2/5$  متر می‌باشد. بزرگ بودن ابعاد بهینه به‌دست آمده و عدم انطباق آن با شرایط استخراجی و همچنین وجود اختلاف زیاد بین ابعاد بهینه با توجه به نسبت‌های انیزوتروپی معادن مورد مطالعه به‌ویژه معدن فسفات اسفوردی دلیل رد شدن این روش می‌باشد.

- در روش شبیه‌سازی شرطی گوسی، با این ایده که هرچه واریانس بین تحقق‌ها کمتر باشد، حاکی از شباهت بیشتر تحقق‌هاست، می‌توان به ابعاد بهینه دست یافت، ابعاد بهینه از این روش برای معدن سورک  $7/5 \times 7/5 \times 7/5$  متر و اسفوردی  $10 \times 7/5 \times 10$  متر محاسبه شد. ابعاد به‌دست آمده از روش شبیه‌سازی شرطی گوسی تطابق مناسبی با نسبت‌های انیزوتروپی هر کدام از معادن دارد.

- با توجه به ابعاد بهینه به‌دست آمده از روش شبیه‌سازی گوسی، تخمین ذخیره صورت گرفت. براساس عیار حد آهن ۲۰ درصد، تناژ معدن سورک  $9/84$  میلیون تن با متوسط عیار  $46/07$  درصد، براساس عیار حد فسفر ۵ درصد، تناژ معدن اسفوردی  $11/93$  میلیون تن با متوسط عیار  $13/85$  درصد به‌دست آمده‌است.

- با توجه به گزارش تخمین ذخیره معدن سورک [۸] تناژ آنومالی 2C،  $13/4$  میلیون تن با عیار متوسط  $47/37$  درصد می‌باشد. نتایج به‌دست آمده برای معدن سورک با روش شبیه‌سازی گوسی مقدار کمتری را ارائه می‌دهد، چرا که در مدل‌سازی معدن سورک از بلوک‌های مکعبی با ابعاد  $12/5$  متر استفاده گردیده‌است و با توجه به ژنز و شکل رگه‌ای کانسار سورک، ابعاد  $7/5$  متر به‌دست آمده از شبیه‌سازی شرطی گوسی از اختلاط هر چه بیشتر ماده معدنی و باطله جلوگیری کرده‌است.

- با توجه به تناژ  $16/5$  میلیون تن با عیار متوسط  $13/9$  درصد گزارش شده برای معدن اسفوردی، براساس روش شبیه‌سازی گوسی ابعاد بلوک در راستای Y مقدار  $7/5$  متر به‌دست آمده که نسبت به ابعاد گزارش شده  $10$  متر،  $2/5$  متر کاهش داشته و از اختلاط بی‌مورد ماده معدنی و باطله جلوگیری کرده و مقدار محافظه کارانه‌تری برای ذخیره ارائه داده‌است.

## مراجع

- [1] Journel, A.G. and Huijbregts, Ch.J. (1978). Mining geostatistics, Academic Press. 600 Pages.
- [2] David, M. (1979). Grade and tonnage problems. Computers method for the 80s in the mineral industry. In, A. Weiss (ed). New York. pp170-189.
- [3] Armstrong, M. and Champigny, N. (1989). A study on kriging small blocks. Can Min Metall Bull. 82. pp128-133.
- [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). pp225-232.
- [5] Farrelly, C.T. and Dimitrakopoulos, R., (2002). Recoverable reserves and support effects when optimizing open pit mine design. Int J Surf Mining Rec Env. 16(3). pp217-229.
- [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. Arab J Geosci. (6). pp141-155.
- [7] Hayati, M.; Rajabzadeh, R. and Darabi, M., (2015). Determination of Optimal Block Size in Angouran

- [11] HasaniPak, A. A.; SharafAldin, M. (1384). Exploratory data analysis. University of Tehran Press. (In Persian)
- [12] Rossi, E.M. and Deutsch, C.V. (2014). Mineral resource estimation. Springer Press. 332 Pages.
- [13] Bristol, R. (2006). Geostatistics in Surpac Vision.
- [14] Glacken, I. M. and Snowden, D. V. (2001). Mineral Resource Estimation. Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Melbourne. pp189-198.
- Mine Using VIKOR Method. J Mater Environ Sci. 6(11). pp3236-3244.
- [8] Yazd Steel Co. (1392). The Final Exploration During Mining Operation Report in Surk (Sadat 2), Nodushan-Yazd Province. (In Persian)
- [9] HamidKhah, A. (1389). Investigation of the change of input load to Esfordi phosphate mine processing plant by geostatistical method. Bachelor Project. Yazd University. (In Persian)
- [10] Madani, H. (1373). Basic of Geostatistics. Amirkabir University of Technology Publications. (In Persian)

---

<sup>۱</sup> Normal Score Transform

<sup>۲</sup> Semivariogram

<sup>۳</sup> Cross Validation

<sup>۴</sup> linear Unbiased Estimator

<sup>۵</sup> Kriging Efficiency

<sup>۶</sup> Conditional simulation

<sup>۷</sup> Monte Carlo

<sup>۸</sup> Smoothing inherent

<sup>۹</sup> Support

<sup>۱۰</sup> Gaussian Conditional simulation