

## کاهش واریانس شبیه‌سازی شرطی عیار با استفاده از داده‌های سخت و نرم به روش محدودسازی ممان محلی

محمد علی ملکی طهرانی<sup>۱</sup>، امید اصغری<sup>۲\*</sup>، خاویر امری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر m.maleki@aut.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران o.asghari@ut.ac.ir

۳- عضو هیات علمی دانشگاه شیلی xemery@ing.uchile.cl

(دریافت ۲۲ خرداد ۱۳۹۰، پذیرش ۱۹ بهمن ۱۳۹۰)

### چکیده

این مطالعه به بررسی شبیه‌سازی زمین‌آماري عیار در کانسارهایی که توزیع عیار در آن‌ها روند فضایی نشان می‌دهد می‌پردازد. این روند می‌تواند به وسیله تعریف داده‌های شرطی دوباره تولید شود. این داده‌های شرطی می‌توانند داده‌های سخت موجود و یا تعدادی داده نرم باشند که با استفاده از نتایج کوکریجینگ تولید می‌شوند. فرآیند شرطی‌سازی، تحقق‌های صورت گرفته را مجبور به پیروی از این داده‌ها می‌کند و بنابراین می‌توان ویژگی‌های محلی آن‌ها به ویژه میانگین محلی (روند) را دوباره تولید کرد. در حقیقت داده‌های نرم تولید شده نبود داده‌های سخت را در مناطقی که داده‌های سخت به مقدار کافی در دسترس نمی‌باشند، جبران کرده و تحقق‌ها را مجبور به تولید روند موجود در منطقه می‌کنند. روش - Local moment constraints بر روی داده‌های عیار مس به دست آمده از گمانه‌های اکتشافی معدن مس سونگون، واقع در تراز ۱۸۵۰ اعمال شد. محدوده مورد مطالعه به دو واحد سنگی سونگون پورفیری (SP) و دایک (DK) تقسیم شد و نشان داده شد که به کارگیری داده‌های نرم و سخت شرطی مدل‌سازی عدم قطعیت در مقادیر واقعی مس را بهبود می‌بخشد و واریانس شرطی شبیه‌سازی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

### کلمات کلیدی

زمین‌آمار، شبیه‌سازی شرطی، کوکریجینگ، داده‌های نرم شرطی، واریانس شرطی، Local moment constraints

## ۱- مقدمه

است. اما در حالتی که مرز بین زیر مجموعه‌های به طور کامل مشخص نباشد و یا تغییر پذیری عیار در مرزها بسیار تدریجی باشد، کاربرد این روش مشکل ساز است [۱۰].

راه حل دیگر استفاده از مدل‌های متغیر تصادفی ناپایا است. مدل‌هایی که پارامترهای آن‌ها (میانگین، واریانس، سمیواریوگرام و غیره) در محدوده مورد نظر متغیر هستند. به طور رایج در این حالت متغیر ناحیه ای به دو بخش تقسیم می‌شود: یک مولفه جرمی رونددار که دارای میانگین متغیر در محدوده مورد نظر می‌باشد و یک متغیر تصادفی باقی مانده با میانگین صفر [۶]، [۱۳].

راه حل سوم که در این مقاله مورد بحث واقع می‌شود، تولید روند موجود در منطقه به وسیله تعریف داده‌های شرطی است. در حقیقت شرطی‌سازی نتایج شبیه‌سازی را مجبور به مطابقت با داده‌هایی کند و بنابراین اختصاصات ناحیه ای آن‌ها به ویژه میانگین ناحیه ای (روند) و تغییرات ناحیه ای آن دوباره تولید می‌شود. در این مطالعه ابتدا با استفاده از داده‌های عیار به عنوان داده‌های سخت اولیه و همچنین داده‌های لیتولوژی به عنوان داده‌های ثانویه، و با استفاده از روش کوکریجینگ، مقدار عیار در نقاطی که کمبود داده‌های سخت وجود دارد (نقاط کنترلی) تخمین زده می‌شود. سپس از نتایج حاصل از کوکریجینگ برای شبیه‌سازی عیار و تولید داده‌های نرم در نقاط کنترلی استفاده می‌شود. در نهایت داده‌های نرم تولید شده (مقادیر شبیه‌سازی شده عیار در نقاط کنترلی) همراه با داده‌های سخت اولیه به عنوان داده‌های شرطی برای شبیه‌سازی عیار در کل محدوده مورد نظر به کار برده می‌شوند.

## ۲- تئوری روش

همان‌طور که بیان شد هدف از این مطالعه تولید روند فضایی موجود در محدوده در طی فرآیند شبیه‌سازی با کمک داده‌های شرطی است. در این مطالعه برای تولید روند فضایی موجود در منطقه، دو نوع داده شرطی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

- داده‌های سخت که مقادیر دقیق عیار را در نقاط نمونه برداری مشخص می‌کنند.

امروزه زمین‌آمار به طور گسترده‌ای در مشخص کردن توزیع فضایی عیار در کانسارها به کار برده می‌شود. در این راستا تکنیک زمین‌آماري کریجینگ با استفاده از داده‌های موجود (داده‌های حاصل از گمانه‌های حفاری و یا آتشیاری) و همبستگی فضایی بین آن‌ها که توسط تابع کوواریانس و یا واریوگرام توصیف می‌شود، برای پیش‌بینی عیار در هر نقطه از کانسار به کار برده می‌شود [۸]. از آنجایی که این تکنیک بر پایه میانگین وزن دار داده‌ها استوار است، مقادیر حاصل از کریجینگ تصویری نرم شده از توزیع واقعی عیار در کانسار را بیان می‌کنند. برای رفع این محدودیت می‌توان از شبیه‌سازی شرطی که تکنیکی برای تولید داده‌های سازگار با یک متغیر ناحیه ای است، استفاده کرد. زیرا بر خلاف تمام روش‌های تخمین مبنی بر میانگین متحرک، شبیه‌سازی زمین‌آماري به عنوان الگوریتمی برای تعدیل اثر هموارسازی چنین روش‌هایی به کار گرفته می‌شود. اغلب مدل‌های زمین‌آماري که برای شبیه‌سازی به کار برده می‌شوند متغیر ناحیه ای را پایدار نظر می‌گیرند. در حقیقت فرضیه پایایی بیان می‌کند که میانگین عیار در تمامی محدوده مورد نظر ثابت است، فرضی که در حالتی که توزیع عیار تغییر پذیری سیستماتیک و یا روند را نشان دهد سوال برانگیز است. برای مثال می‌توان به کانساری اشاره کرد که میانگین عیار و پیوستگی فضایی وابسته به جنس سنگ باشند. مانند یک کانسار مس پورفیری انتشاری با عیار بالا در مرکز که توسط زون کم عیار در بر گرفته شده است و یا کانسارهای رگه‌ای طلا با رگه‌های کانی زایی شده پراکنده در سنگ‌های میزبان عقیم [۸].

برای در نظر گرفتن این تغییر پذیری فضایی یک روش شامل تقسیم کردن محدوده کانسار به زیر مجموعه‌های (واحدهای زمین شناسی) مختلف است، به طوری که در هر یک از زیر مجموعه‌ها عیار دارای شرایط پایایی و مستقل از عیار دیگر زیر مجموعه‌ها باشد. در صورتی که تقسیم کردن محدوده کانسار به زیر مجموعه‌های مختلف بر اساس رخدادهای زمین شناسی مختلف با منشأهای متفاوت صورت گیرد، این روش بسیار مفید

می‌دهند، بنابراین برای محاسبه ماتریس فوق از رابطه زیر استفاده شد [۹]:

$$\sum_{i,j}^{SK} = C_Y(u_i, u_j) - \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta,j} C_Y(u_i, X_{\beta}) \quad (1)$$

که در این رابطه  $\Sigma$  ماتریس واریانس کوواریانس خطای تخمین،  $C_Y(u_i, u_j)$  کوواریانس بین نقاط کنترلی،  $C_Y(u_i, X_{\beta})$  کوواریانس بین نقاط کنترلی با داده‌های سخت اولیه و  $\lambda_{\beta,j}$  ضرایبی است که هر یک از متغیرها (نوع واحد سنگی و یا عیار) در نقاط معلوم (داده‌های سخت) به متغیر عیار در نقاط کنترلی اختصاص می‌دهند.

اطلاعات به‌دست آمده با استفاده از تخمینگر کوکریجینگ مبنای ایجاد داده‌های نرم می‌باشند. در حقیقت نتایج حاصل (میانگین عیار و ماتریس واریانس - کوواریانس خطای تخمین) نشان دهنده تغییر پذیری عیار و میزان عدم قطعیت از مقادیر واقعی عیار در نقاط کنترلی می‌باشند. بنابراین داده‌های شرطی به نحوی تولید می‌شوند که از نتایج حاصل از کوکریجینگ پیروی کنند و با روند موجود در منطقه مطابقت داشته باشند. در مرحله بعد با استفاده از ماتریس واریانس - کوواریانس خطای تخمین و الگوریتم تجزیه چولسکی مقادیر عیار در نقاط کنترلی شبیه‌سازی می‌شود و به این ترتیب داده‌های نرم در نقاط کنترلی تولید می‌شوند. با استفاده از الگوریتم تجزیه چولسکی می‌توان ماتریس واریانس - کوواریانس خطای تخمین که یک ماتریس متقارن و مثبت است را به صورت حاصل ضرب یک ماتریس بالا مثلثی (U) و یک ماتریس پایین مثلثی (L) تجزیه کرد. سپس با ضرب معکوس ماتریس پایین مثلثی L در یک بردار از اعداد تصادفی با توزیع نرمال مستقل با میانگین صفر و واریانس یک و در نهایت جمع بردار حاصله با بردار نتایج حاصل از تخمین عیار در نقاط کنترلی به وسیله کوکریجینگ، شبیه‌سازی غیر شرطی در نقاط کنترلی انجام می‌شود. حال با استفاده از داده‌های نرم تولید شده و داده‌های سخت اولیه اقدام به شبیه‌سازی شرطی در کل محدوده مورد نظر شد. در این مرحله هر دو نوع از داده‌ها (سخت و نرم) به عنوان داده‌های شرطی به کار گرفته می‌شوند. از آنجایی که هم اکنون داده‌های

داده‌های نرم که در برگزیده اطلاعات کیفی مانند جنس سنگ و شرایط زمین شناسی در نقاط مورد نظر می‌باشند. این داده‌ها در نقاطی که داده‌های سخت وجود ندارند و مقدار آن‌ها کم است، کمبود این داده‌ها را جبران می‌کنند و تولید روند فضایی را در این نقاط قطعی می‌کنند.

برای به کار بردن داده‌ها در فرآیند شبیه‌سازی یک مدل متغیر تصادفی برای متغیر Z مورد نیاز است. در این مطالعه فرض شد که Z یک متغیر تصادفی پایای گوسی است. از آنجایی که در تمامی نقاط منطقه مورد نظر داده‌های سخت برای شرطی‌سازی و تولید مجدد روند موجود نیست و یا تعداد آن‌ها به مقدار کافی نیست، در ابتدا با استفاده از روش ذکر شده اقدام به تولید داده‌های نرم می‌شود. به این منظور باید ابتدا موقعیت داده‌های نرم (نقاط کنترلی) در سراسر منطقه مشخص شود. این نقاط باید در مکان‌هایی تعریف شوند که داده‌های سخت در این نقاط وجود نداشته و یا مقدار آن‌ها کم باشد اما نوع واحد زمین شناسی در این نقاط مشخص شده باشد. پس از تعیین موقعیت نقاط کنترلی، با استفاده از روش کوکریجینگ مقدار عیار در نقاط کنترلی تخمین زده می‌شوند. در این تخمین مقادیر عیار داده‌های سخت موجود به عنوان داده‌های اولیه و نوع واحد زمین شناسی مربوط به هر نقطه (نقاط معلوم و نقاط کنترلی) به عنوان داده‌های ثانویه به کار می‌روند [۸]. با انجام کوکریجینگ اطلاعات زیر در نقاط کنترلی به دست می‌آید:

۱- مقادیر تخمینی عیار در نقاط کنترلی

۲- ماتریس واریانس - کوواریانس خطای تخمین بین نقاط کنترلی

ماتریس واریانس - کوواریانس خطای تخمین، ماتریسی است متقارن که قطر اصلی آن واریانس خطای تخمین را در نقاط مورد تخمین، و درایه‌های دیگر آن کوواریانس خطای تخمین را بین نقاط مورد تخمین نشان می‌دهد. از آنجایی که اغلب نرم افزارهای زمین‌آماری تنها واریانس خطای تخمین (قطر اصلی ماتریس ذکر شده) را به عنوان خروجی در اختیار کاربر قرار

بخشی از نوار پورفیری مس دار شرقی جهان محسوب می‌شود که در شمال غرب ایران واقع شده است. سنگ‌های کربناته و شیلی کرتاسه بالایی، سنگ‌های آذر آواری نظیر توف و توفیت و همچنین برش‌های ولکانیکی ائوسن زیرین - میانی، دایک‌های آندزیتی، سنگ‌های ولکانیک داسیتی پلیوسن و تراکی آندزیت‌های کوارتزی عمده ترین واحدهای سنگی موجود در منطقه معدنی سونگون می‌باشند. استوک پورفیری سونگون که میزبان کانسار مس پورفیری سونگون می‌باشد دارای ترکیب متغیری از کوارتز مونزونیت تا گرانودیوریت و گرانیت می‌باشد. در نتیجه فعالیت‌های آذرین دایک‌های آندزیتی حجمی به وجود آمده اند که این دایک‌ها استوک پورفیری سونگون را قطع کرده اند. این دایک‌ها از لحاظ کانی سازی عقیم می‌باشند و باعث کاهش عیار در استوک پورفیری سونگون و افزایش عدم قطعیت در مدل‌های تهیه شده از کانسار مس پورفیری سونگون شده‌اند. بنابراین شناسایی و تفکیک این دایک‌ها از استوک پورفیری سونگون ضروری بوده و باعث کاهش عدم قطعیت مدل‌های زمین‌آماری تهیه شده و کاهش واریانس شرطی شبیه‌سازی می‌شود.

برای ساده‌سازی و اثبات کاربرد روش ذکر شده، تنها تراز ۱۷۵۰ متر برای بررسی و مطالعه انتخاب شد. به این منظور در این تراز محدوده ای با ابعاد ۵۰۰\*۷۵۰ متر انتخاب شد که در آن هر دو نوع واحد سنگی موجود است (دایک یا سونگون پورفیری). در این تراز تعداد ۳۴ نقطه که در آن‌ها مقادیر عیار و نوع واحد سنگی مشخص است در دسترس است (شکل ۳). به طور کلی برای شبیه‌سازی عیار در منطقه و به دست آوردن روند موجود در منطقه مراحل زیر طی شد:

- ۱- اعمال declustering Cell بر روی داده‌ها به منظور در نظر گرفتن پراکندگی نمونه‌ها [۷]
- ۲- تبدیل داده‌های اولیه عیار به داده‌هایی با توزیع نرمال (میانگین صفر و واریانس واحد) با استفاده از وزن‌های محاسبه شده در مرحله قبل.
- ۳- انجام واریوگرافی بر روی داده‌های نرمال شده

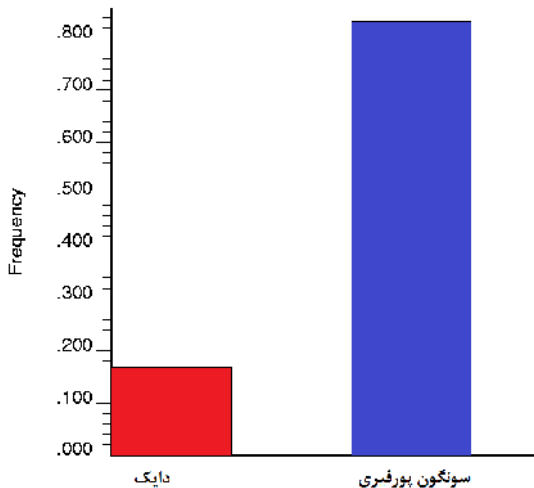
شرطی در تمام منطقه به مقدار کافی وجود دارند بنابراین روند موجود در منطقه دوباره در شبیه‌سازی صورت گرفته تولید می‌شود. به طور خلاصه مراحل انجام کار در این روش به شرح زیر است:

- ۱- واریوگرافی متغیر تصادفی گوسی  $Z$  و متغیر شاخص واحد سنگی به همراه واریوگرافی متقابل بین این دو متغیر
- ۲- انجام کوکریجینگ در نقاط کنترلی توسط داده‌های سخت به عنوان داده‌های اولیه (عیار در نقاط معلوم) و داده‌های نرم به عنوان داده‌های ثانویه (جنس سنگ در نقاط کنترلی و نقاط معلوم). در این مرحله هر یک از انواع کوکریجینگ شامل: کوکریجینگ ساده (معلوم بودن میانگین دو متغیر) و یا کوکریجینگ معمولی (میانگین دو متغیر نا مشخص) قابل انجام می‌باشند. نتایج حاصل از تخمین کوکریجینگ شامل داده‌های زیر می‌شود:

- مقادیر تخمینی عیار در نقاط کنترلی
  - ماتریس واریانس - کوواریانس خطای تخمین بین نقاط کنترلی
- ۳- شبیه‌سازی عیار به عنوان یک متغیر تصادفی گوسی با میانگینی برابر با میانگین حاصل از تخمین کوکریجینگ و ماتریس واریانس - کوواریانس برابر با ماتریس حاصل از واریانس خطای کوکریجینگ. شبیه‌سازی در این مرحله می‌تواند توسط الگوریتم تجزیه چولسکی و شبیه‌سازی LU انجام شود.
  - ۴- انجام شبیه‌سازی شرطی عیار در کل منطقه مورد بررسی توسط داده‌های حاصل از مرحله سوم و داده موجود در نقاط نمونه برداری.

### ۳- بررسی روش ذکر شده در کانسار مس سونگون

در این قسمت روش ذکر شده و کاربرد آن در شبیه‌سازی عیار در معدن مس سونگون شرح داده می‌شود. کانسار مس سونگون یکی از دو کانسار بزرگ مس ایران، همراه با سنگ‌های نفوذی کالک - آلکان در کمربند سنوزوئیک سه‌هند - بزمان،



شکل ۲: هیستوگرام واحد سنگی برای داده‌های واقع در تراز ۱۷۵۰ متر

### ۳-۲- تولید داده‌های نرم در نقاط کنترلی

به منظور تولید داده‌های نرم در نقاط کنترلی، ابتدا با استفاده از روش کوکریجینگ مقادیر عیار در نقاط کنترلی تخمین و میزان عدم قطعیت مقدار واقعی عیار در این نقاط محاسبه شد. سپس با استفاده از نتایج حاصل از کوکریجینگ (به عنوان شرط‌های شبیه‌سازی)، مقادیر عیار در نقاط کنترلی شبیه‌سازی شد.

### ۳-۲-۱- تخمین عیار و میزان عدم قطعیت عیار در نقاط کنترلی با استفاده از روش کوکریجینگ

در انواع مختلف کریجینگ (کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی و...) متغیر مورد نظر تنها توسط یک متغیر و از جنس همان متغیر تخمین زده می‌شود. به عنوان مثال، عیار یک بلوک توسط مقادیر اندازه‌گیری شده عیار در گمانه‌های اکتشافی حفر شده در اطراف این بلوک تخمین زده می‌شوند. در حالی که در روش کوکریجینگ برای تخمین یک متغیر علاوه بر خود متغیر از متغیرهای ثانویه دیگر نیز استفاده می‌شود [۱۲]. متغیرهای ثانویه به طور معمول دارای همبستگی متقابل فضایی با متغیر اصلی می‌باشند. بنابراین می‌توان با تعیین همبستگی متقابل، از متغیرهای ثانویه جهت تخمین بهتر و دقیق تر متغیر اصلی و کاهش واریانس خطای تخمین استفاده کرد. با استفاده از روش کوکریجینگ و در صورت وجود یک همبستگی قوی بین دو

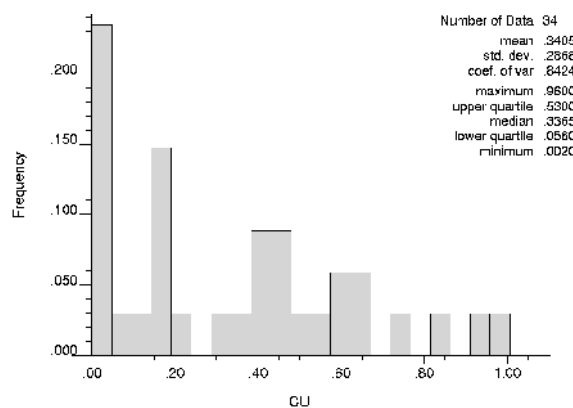
واریوگرام رسم شده برای داده‌های نرمال شده، یک مدل چند ساختاره شامل یک مدل اثر قطعه ای و دو ساختار کروی می‌باشد (شکل ۵)

۴- تعیین موقعیت نقاط کنترلی (داده‌های نرم شرطی) و شبیه‌سازی عیار در این نقاط با استفاده از روش ذکر شده.

۵- شبیه‌سازی شرطی با استفاده از داده‌های سخت و داده‌های نرم تولید شده در نقاط کنترلی در کل محدوده مورد نظر.

### ۳-۱- تعیین موقعیت نقاط کنترلی

موقعیت داده‌های کنترلی به وسیله یک شبکه منظم تعیین شد. بنابراین در محدوده مورد مطالعه ۹۵۰ نقطه کنترلی تعریف و نوع واحد سنگی هر یک از این نقاط نیز مشخص شد (شکل ۲).



شکل ۱: هیستوگرام عیارمس در تراز ۱۷۵۰ متر

برای تعیین جنس واحد سنگی هر یک از این نقاط از مدل زمین‌شناسی تهیه شده برای تراز ۱۷۵۰ استفاده شد. در این مدل محدوده مورد مطالعه به شبکه‌های منظم ۱۰متر\*۱۰متر تقسیم شد و واحد سنگی هر یک از این شبکه‌ها با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی موجود از قبل تعیین شد (شکل ۴ ب).

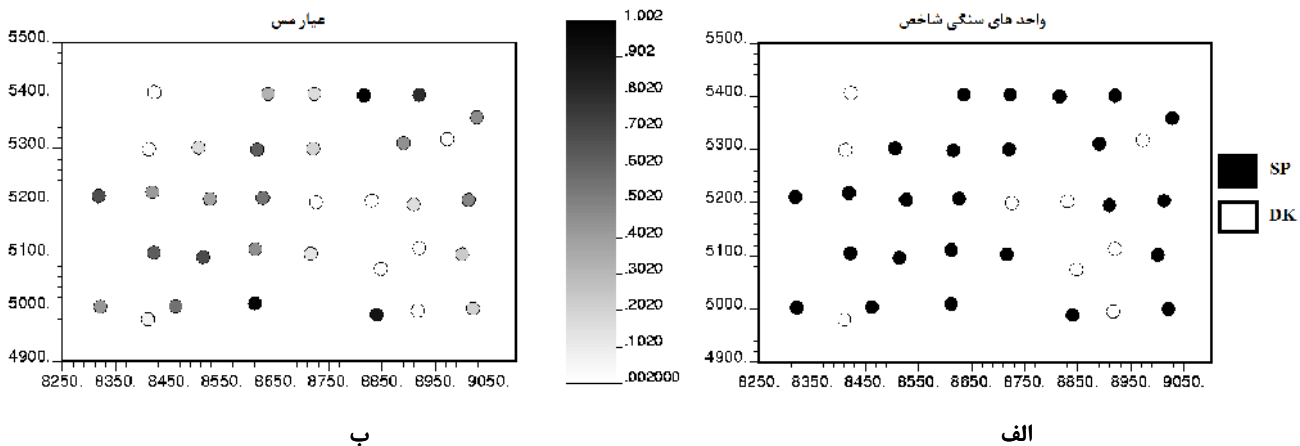
استفاده از خود این متغیر و متغیرهای دیگر می‌باشد. از آنجایی که کوکریجینگ یک ترکیب خطی می‌باشد بنابراین داریم:

$$Z_{u}(B) = \sum_{l=1}^v \sum_{i=1}^{n_l} \lambda_{il} Z_l(X_i) \quad (2)$$

که در آن  $i$  به تعداد  $n_l$  نمونه ای که در آن متغیر  $l$  اندازه گیری شده است اشاره می‌کند و  $\lambda_{il}$  اوزان کوریجینگ می‌باشند که شرایط زیر را دارند:

متغیر مورد تخمین، دقت بیشتر تخمین را می‌توان تضمین کرد. دقت تخمین از آن جهت بالا می‌رود که مقدار تخمینی یک متغیر به وسیله متغیر دیگری که با آن همبستگی دارد کنترل می‌شود. در این صورت اگر به دلیل ورود خطاهای ناهنجار مقدار عیار یکی از فلزات در یک نمونه به طور غیر واقعی بالا یا پایین رفته باشد از تاثیر این خطا تا حدودی کاسته می‌شود [1].

فرض کنید که تعداد  $V$  متغیر در دسترس می‌باشد  $u = 1, 2, \dots, V$  و هدف تخمین یکی از متغیرها یعنی  $u$  با



شکل ۳: الف) نوع واحد سنگی و ب) مقدار عیار مس برآیداده‌های واقع در تراز ۱۷۵۰ متر

ضریب لاگرانژ برای  $v$  امین متغیر است. عبارت "متقابل" به این علت در داخل پرانتز نوشته شده است که در صورتی که  $v = u$  یا  $v = l$  و اریوگرام متقابل همان اریوگرام است. با حل معادله فوق ضرایب لاگرانژ برای تخمین  $Z_u(B)$  به دست می‌آیند.

برای انجام کوکریجینگ داده‌های نرمال شده عیار در نقاط نمونه برداری (داده‌های سخت) به عنوان داده‌های اولیه و نوع واحد سنگی در این نقاط و نقاط کنترلی به عنوان داده‌های ثانویه در نظر گرفته شدند. در این مطالعه از روش کوکریجینگ ساده (معلوم بودن میانگین) با پارامترهای مدل اریوگرام ساده و متقابل زیر استفاده شد (شکل ۵):

$$\begin{pmatrix} \gamma_{Cu} & \gamma_{Cu-SP} & \gamma_{Cu-DK} \\ \gamma_{SP-Cu} & \gamma_{SP-SP} & \gamma_{SP-DK} \\ \gamma_{DK-Cu} & \gamma_{DK-SP} & \gamma_{DK-DK} \end{pmatrix} =$$

$$\sum_{i=1}^{n_l} \lambda_{il} = \begin{cases} 1, & u = l \\ 0, & u \neq l \end{cases} \quad (3)$$

با توجه به وجود شرایط ناربیبی تخمینگر کوکریجینگ و حداقل واریانس خطای تخمین، واریانس خطای تخمین با استفاده از حل معادلات کوریجینگ کمینه می‌شود:

$$\sum_{l=1}^v \sum_{i=1}^{n_l} \lambda_{il} \gamma_{lv}(X_i, X_j) + \psi_v \approx \bar{\gamma}_{uv}(X_j, B) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{n_l} \lambda_{il} = \begin{cases} 1, & u = l \\ 0, & u \neq l \end{cases}$$

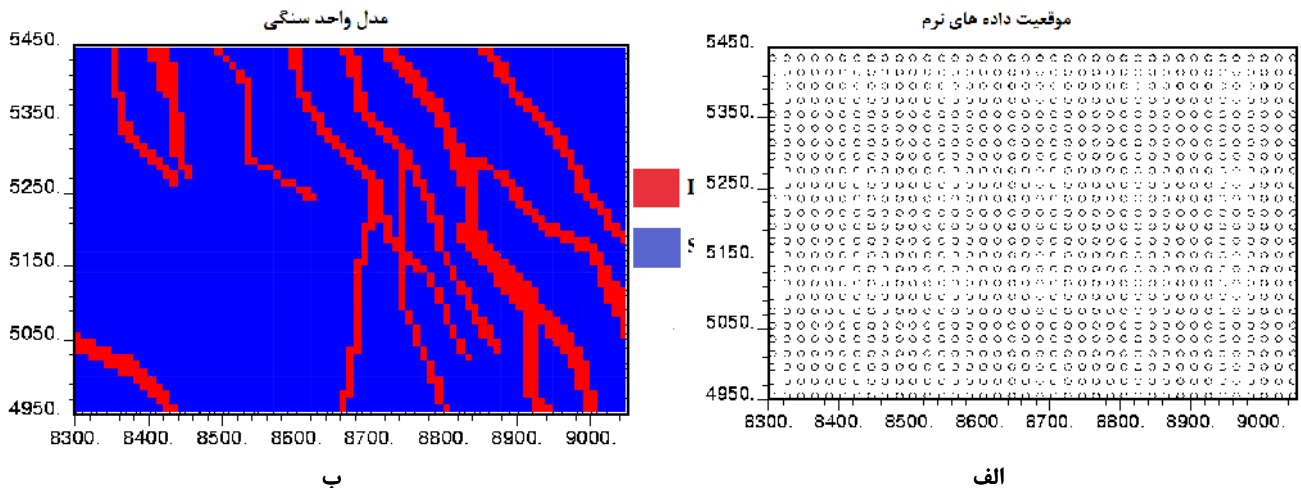
که در آن  $v = 1, 2, \dots, V$  و  $j = 1, 2, \dots, n_v$  می‌باشد.  $\gamma_{lv}(X_i, X_j)$  اریوگرام (متقابل) بین دو متغیر  $l$  و  $v$  در نقاط  $i$  و  $j$  می‌باشد که توسط بردار  $X_i - X_j$  جدا شده اند.  $\bar{\gamma}_{uv}(X_j, B)$  میانگین اریوگرام (متقابل) بین نقطه  $j$  و بلوک مورد تخمین  $B$  می‌باشد.  $\psi_v$

شبیه‌سازی زمین‌آماري تکنیکی است برای تولید داده‌های سازگار با یک متغیر ناحیه ای. مهمترین خاصیت شبیه‌سازی زمین‌آماري این است که به جای بهترین تخمین، مجموعه ای از مدل‌ها را تولید می‌کند که دامنه ای از حالت‌های ممکن را شامل می‌شوند. این تکنیک می‌تواند تعداد بسیار زیادی از نقشه‌های توزیع هر پارامتر را تولید کند که همگی شباهت معینی داشته باشند.

$$\begin{pmatrix} 0.117 & 0.05 & -0.015 \\ 0.05 & 0.03 & -0.021 \\ -0.015 & -0.021 & 0.03 \end{pmatrix} \text{Nugget +}$$

$$\begin{pmatrix} 0.89 & 0.31 & -0.35 \\ 0.31 & 0.19 & -0.187 \\ -0.35 & -0.187 & 0.19 \end{pmatrix} \text{Exponential (300)}$$

### ۲-۲-۳- شبیه‌سازی عیار و تولید داده‌های نرم در نقاط کنترلی با استفاده از نتایج کوکریجینگ



شکل ۴: الف) موقعیت داده‌های کنترلی تعریف شده در تراز ۱۷۵۰ متر (ب) مدل زمین‌شناسی برای تراز ۱۷۵۰ متر

گرفته شرطی می‌باشد، مقدار داده‌ها را در نقاط کنترلی و نقاط داده‌های اولیه حفظ می‌کند و در نتیجه روند موجود در منطقه را دوباره تولید می‌کند.

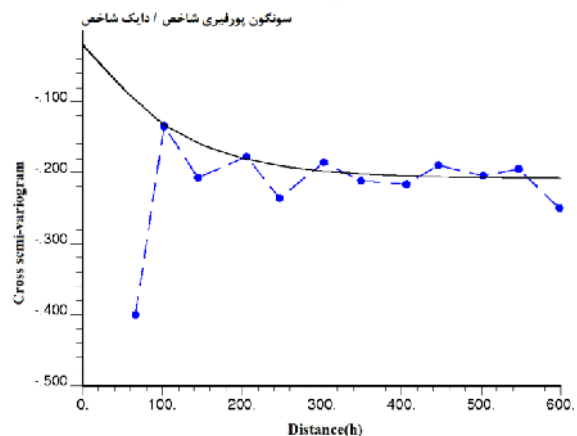
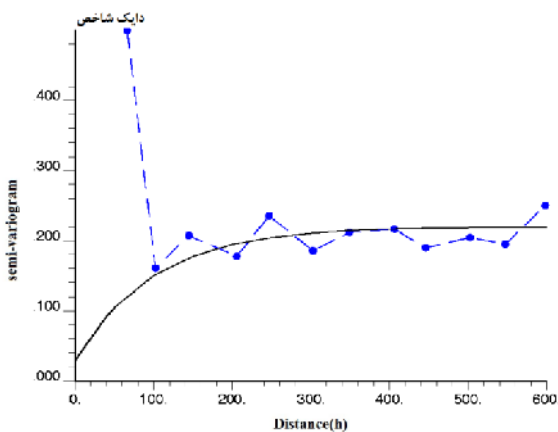
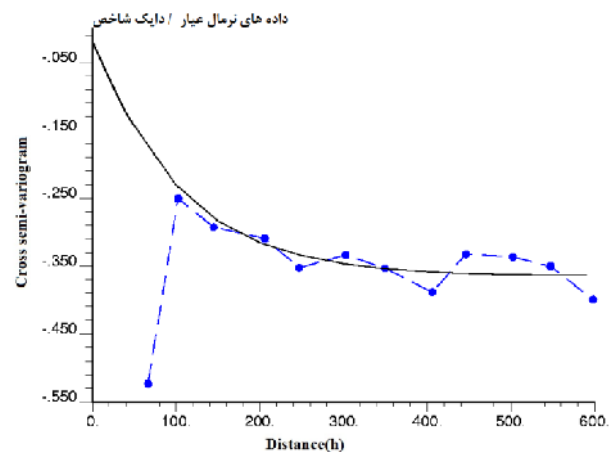
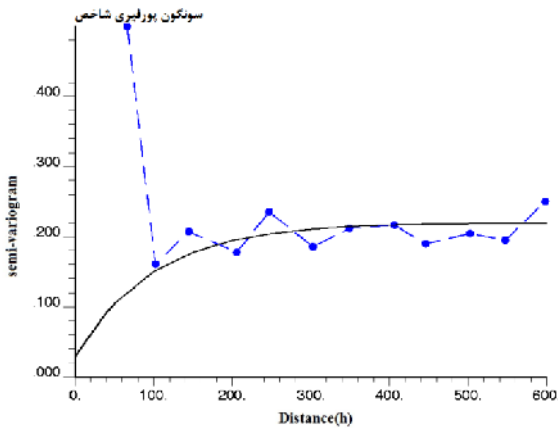
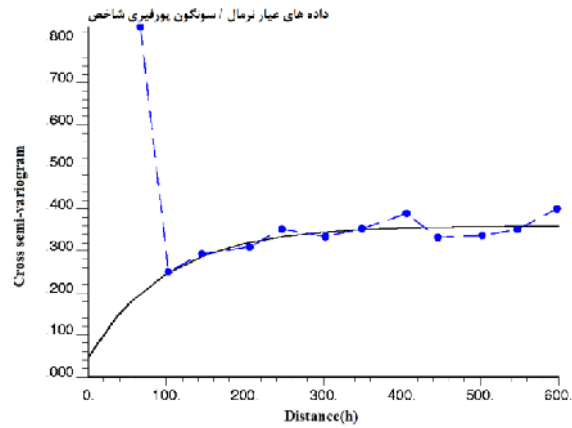
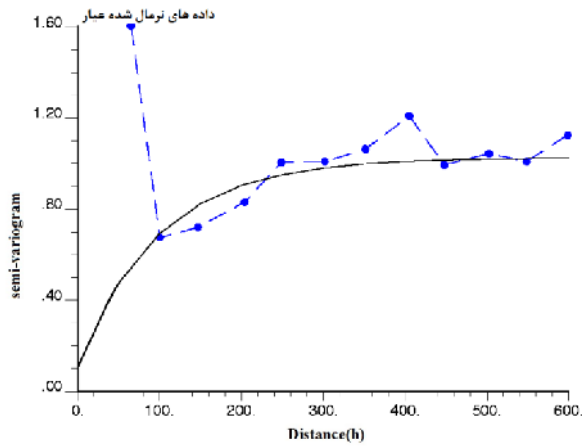
#### ۴- ارائه نتایج

داده‌های سخت به همراه داده‌های نرم تولید شده توسط روش شرح داده شده در بخش ۳ برای انجام ۱۰۰ تحقق در منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شدند. شکل ۶ ب میانگین عیار ۱۰۰ شبیه‌سازی انجام شده توسط داده‌های سخت و نرم را در تراز ۱۷۵۰ متر نشان می‌دهد. همچنین شکل ۶ الف میانگین عیار ۱۰۰ شبیه‌سازی که تنها توسط داده‌های سخت انجام شده است را نشان می‌دهد. از مقایسه این دو شکل با مدل زمین‌شناسی مورد استفاده در مطالعه (شکل ۴ ب)، واضح است که شبیه‌سازی صورت‌گرفته توسط داده‌های سخت و نرم توانایی بیشتری در تفکیک دو واحد سنگی موجود در منطقه نسبت به

آن شباهت معین به زبان زمین‌آماري همان هیستوگرام و واریوگرام یکسان (مشابه) است. نوع خاصی از شبیه‌سازی که شبیه‌سازی شرطی نامیده می‌شود تصاویری تولید می‌کند که ضمن ایجاد هیستوگرام و واریوگرام مفروض، داده‌های معلوم را با همان مقادیرشان در فضا حفظ می‌کنند. در این حالت شبیه‌سازی، شبیه‌سازی به شرطی انجام می‌شود که مقدار داده‌ها در نقاط نمونه برداری شده (داده‌های سخت) تغییر نکند [۱]. همانطور که ذکر شد یکی از نتایج مورد نظر از انجام کوکریجینگ به دست آوردن ماتریس واریانس - کوواریانس خطای تخمین بین نقاط کنترلی است. بعد از به دست آوردن ماتریس واریانس - کوواریانس خطای تخمین با استفاده از ماتریس بالا، مقادیر عیار در ۹۵۰ نقطه کنترلی شبیه‌سازی شد. سپس با استفاده از داده‌های به دست آمده (داده‌های نرم) و داده‌های اولیه به عنوان داده‌های شرطی، شبیه‌سازی شرطی در کل منطقه انجام می‌شود. از آنجاییکه شبیه‌سازی صورت

مربوط به عیارهای کم در دایک‌های موجود در منطقه می‌باشند و با مدل زمین شناسی نیز تطابق دارند.

نتایج شبیه‌سازی توسط فقط داده‌های سخت دارد. همان طور که در شکل ۶ ب مشاهده می‌شود با استفاده از روش مورد استفاده مناطقی با عیار کم در شبیه‌سازی ظاهر می‌شوند که



شکل ۵: واریوگرام‌های ساده و متقابل برای داده‌های نرمال شده عیار و واحدهای سنگی شاخص

شد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود واریانس شرطی هنگامی که داده‌های سخت به همراه داده‌های نرم تولید شده

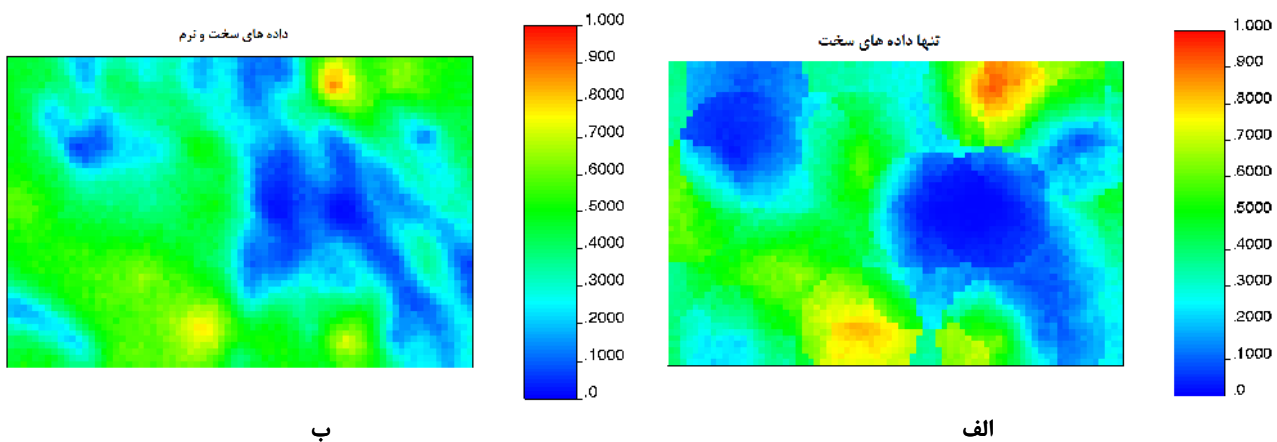
به منظور بررسی واریانس شرطی شبیه‌سازی، واریانس شرطی برای داده‌های نرمال شبیه‌سازی شده در نقاط کنترلی محاسبه



شکل مشخص است میزان واریانس در نقاط کنترلی در حالت اول (فقط استفاده از داده‌های سخت) بیش از حالت دوم (استفاده از داده‌های سخت و نرم) می‌باشد. در حالت اول حداقل واریانس شرطی شبیه‌سازی برابر با  $20,126\%$  و حداکثر آن برابر  $21,094\%$  می‌باشد در حالی که همین مقادیر در حالت دوم به  $0,097\%$  و  $0,35\%$  کاهش می‌یابند.

برای انجام شبیه‌سازی به کار می‌روند به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد که باعث کاهش عدم قطعیت در مدل شبیه‌سازی شده می‌شود. شایان ذکر است میزان کاهش واریانس برای نقاط کنترلی که در محدوده دایک‌ها واقع شده اند تا حدودی بیشتر است و نشان می‌دهد که تفکیک واحدهای سنگی به دو واحد دایک و سونگون پورفیری باعث کاهش بیشتر واریانس شرطی در دایک شده است.

همچنین شکل ۸ به طور جداگانه واریانس شرطی را در نقاط کنترلی در دو حالت فوق نشان می‌دهد. همانطور که از این



شکل ۶: میانگین عیار شبیه‌سازی شده مس (۱۰۰ تحقق) در تراز ۱۷۵۰ الف) (با استفاده از داده‌های سخت ب) (با استفاده از داده‌های سخت و نرم

##### ۵- نتیجه‌گیری

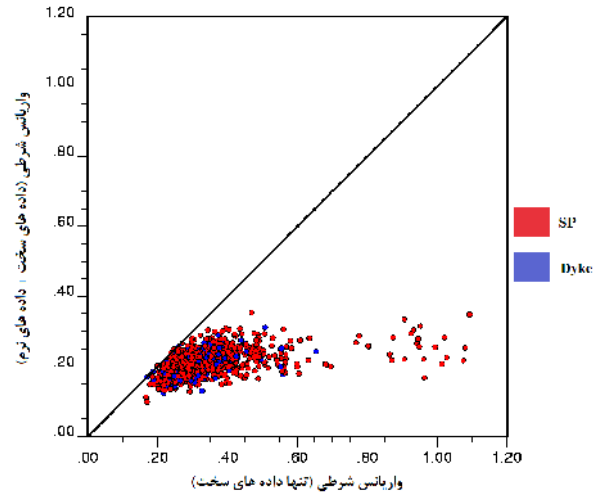
سخت شرطی روند موجود در منطقه را تولید می‌کنند در حالی که در نقاطی که داده‌های شرطی سخت وجود ندارند، روند موجود در منطقه توسط داده‌های شرطی نرم تولید می‌شود. نقاط کنترلی باید در مناطقی که داده‌های سخت وجود ندارند و یا مقدار آن‌ها کم است تعریف شوند. همچنین فواصل بین داده‌های کنترلی باید با توجه به شدت تغییر پذیری فضایی موجود در منطقه تعریف شود. در مناطقی که تغییر پذیری فضایی کم است فواصل بین نقاط کنترلی زیاد در نظر گرفته می‌شود.

روش ارائه شده بر اساس استفاده از داده‌های نرم شرطی، روشی ساده است که از تقسیم متغیر ناحیه ای به دو مولفه جرمی با میانگین متغیر و مولفه تصادفی با میانگین صفر که در بیشتر مطالعات زمین‌آماری در شرایط وجود روند به کار برده می‌شود، جلوگیری می‌کند. در این روش روند فضایی موجود در منطقه با استفاده از مشروط کردن تحقق‌های صورت گرفته به پیروی از مجموعه ای از داده‌های شرطی دوباره تولید می‌شود. داده‌های شرطی مورد استفاده به دو گروه داده‌های شرطی سخت و نرم تقسیم‌بندی می‌شوند. موقعیت نقاط کنترلی که در آن‌ها داده‌های شرطی نرم تولید می‌شوند باید با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی مانند جنس سنگ، کانی زایی و آلتراسیون‌ها تعریف شود. در مناطقی که داده‌های سخت فراوانند نیازی به تعریف نقاط کنترلی نیست. در این نقاط داده‌های

شرطی شبیه‌سازی در دو حالت ۱- استفاده از داده‌های سخت ۲- استفاده از داده‌های سخت و نرم (روش ارائه شده) نشان داد که در حالت دوم مقدار واریانس شرطی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین مقایسه واریانس شرطی شبیه‌سازی در دو حالت ۱- استفاده از داده ای سخت ۲- استفاده از داده‌های سخت و نرم (روش ارائه شده) نشان داد که در حالت دوم مقدار واریانس شرطی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

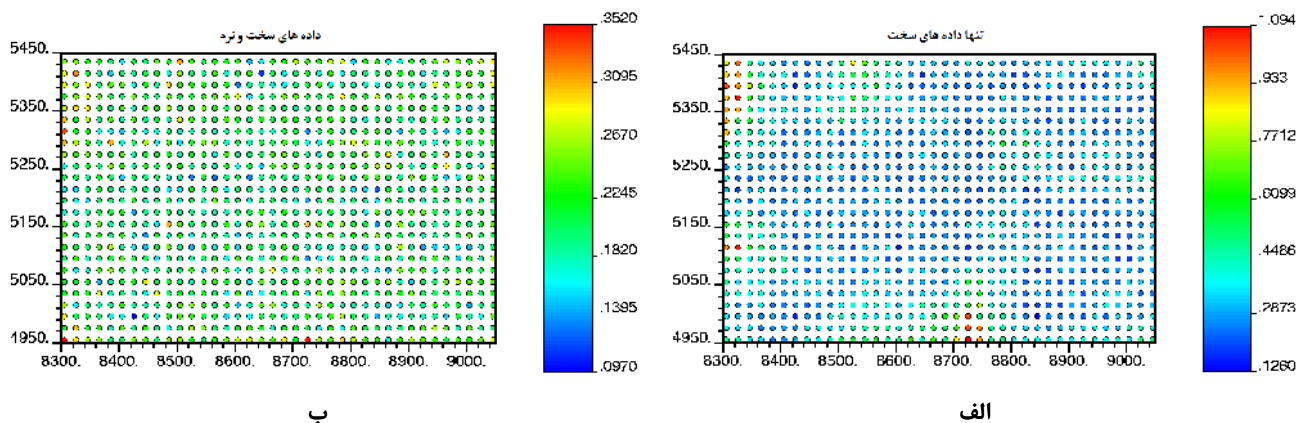
### تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری آقای دکتر Denis Marcotte استاد دانشگاه مونترال و آقای مهندس محمدحسین پیشاهنگ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن دانشگاه تهران که در تهیه بخش‌هایی از کد برنامه، نویسندگان را یاری دادند تشکر و قدردانی می‌نماییم.



شکل ۷: واریانس شرطی داده‌های نرمال شبیه‌سازی شده در نقاط کنترلی در دو حالت استفاده و عدم استفاده از داده‌های نرم

در این مطالعه با توجه به کمبود داده‌های سخت در محدوده مورد نظر، پس از تعریف نقاط کنترلی در مناطقی که داده‌های سخت به مقدار کافی موجود نمی‌باشند، با استفاده از روش Local moment constraints اقدام به تولید داده‌های نرم شد. سپس با داده‌های سخت اولیه و داده‌های نرم تولید شده اقدام به شبیه‌سازی شرطی شد. همچنین مقایسه واریانس



شکل ۸: میزان واریانس شرطی در نقاط کنترلی الف) با استفاده از داده‌های سخت ب) با استفاده از داده‌های سخت و نرم

## مراجع

[15] Wackernagel, H., *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*, 3<sup>rd</sup> edn, Springer, Berlin (2003).

[۱] حسنی پاک، علی اصغر- شرف الدین، محمد- تحلیل داده‌های اکتشافی، دانشگاه تهران (۱۳۸۴).

[۲] حسنی پاک، علی اصغر- زمین‌آمار، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۸۶).

[3] Armstrong, M., Dowe, P.A.: *Geostatistical Simulation, Quantitative Geology and Geostatistics*. Kluwer Academic Publishers (1994)

[4] Asghari, O., Hezarkhani, A., Rafiee, V.: 3D modeling of Dykes in Sungun Porphyry deposit through applying Indicator Kriging, SGEM 2008 Conference, Bulgaria, 325-332 (2008).

[5] Asghari, O., Hezarkhani, A. Geostatistical modeling and reserve estimation of sungun porphyry copper deposit. MPES conference, Torino, Italy, 363-368 (2006).

[6] Chilès, J.P., Delfiner, P.: *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley, New York (1999).

[7] Deutsch, C.V., Journel, A.G.: *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, 2nd edn. Oxford University Press, New York (1998)

[8] Emery, X., Robles, Lucia N.: Simulation of mineral grades with hard and soft conditioning data: application to a porphyry copper deposit. *Computers & Geosciences*. 32(10), 1615-1628 (2009).

[9] Emery, X., Uncertainty modeling and spatial prediction by multi-Gaussian kriging: accounting for an unknown mean value. *Computers & Geosciences* 34 (11), 1431-1442 (2008).

[10] Emery, X., González, K.E.: Incorporating the uncertainty in geological boundaries into mineral resources evaluation. *J. Geol. Soc. India*. 69(1), 29-38 (2007).

[11] Hezarkhani, A.: Petrology of intrusive rocks within the Sungun porphyry copper deposit, Azarbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*. England 73, 326-340 (2006).

[12] Isaaks, E.H., Srivastava, R.M.: *An Introduction to Applied Geostatistics*. NY Oxford University Press, New York (1989)

[13] Matheron, G.: *The Theory of Regionalized Variables and its Applications*. Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris (1971).

[14] Rossi, M.E., Alvarado, C., S.B.: Conditional simulations applied to recoverable reserves. *Proceedings, XXVII APCOM, the Institution of Mining and Metallurgy*, 187-199 (1998).