

## تعیین نقاط بهینه حفاری های آتی در معدن شماره ۳ گل گهر سیرجان با استفاده از شبیه سازی متوالی گوسی - فراکتالی

سعید اسکندری<sup>۱\*</sup>، حسن مدنی<sup>۲</sup>، وامق رسولی<sup>۳</sup>، بهزاد تخم چی<sup>۴</sup>

۱. دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، تلفن تماس: ۰۹۱۸۸۶۳۹۰۸۲ eskandari\_saeid@yahoo.com

۲. استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، hmadani@aut.ac.ir

۳. استادیار دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، vrasouli@aut.ac.ir

۴. مربی دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، tokhmechi@ut.ac.ir

(دریافت ۵ دی ۱۳۸۶، پذیرش ۱۳ مهر ۱۳۸۷)

### چکیده

پس از اینکه فرآیند تخمین با استفاده از نمونه های مغزه های حفاری انجام شد، لازم است با استفاده از چند نمونه اضافی کیفیت تخمین عیار و در ادامه طبقه بندی ذخیره را بهبود بخشید. یکی از روش های گزینش بهینه محل حفاری های جدید، انتخاب نقاطی است که در آنها حداکثر کاهش واریانس تخمین رخ می دهد. این پارامتر (واریانس تخمین) برای هر بلوک مستقل از مقادیر داده های اطراف آن بوده و مقدار آن برای بلوک ها با آرایش نمونه برداری مشابه، یکسان است و در نتیجه از تغییرپذیری محلی چشم پوشی می شود. در مقابل، در شبیه سازی زمین آماری، با در نظر گرفتن آرایش فضایی داده ها و همچنین مقادیر واقعی آنها، تغییرپذیری محلی به طور عددی اندازه گیری می شود. در این تحقیق، روش شبیه سازی شرطی فراکتالی، به منظور شبیه سازی عیار توده شماره ۳ معدن آهن گل گهر سیرجان و در نهایت تحلیل ریسک، مورد استفاده قرار گرفته است. این روش، داده ها را به گونه ای شبیه سازی می کند که بعد فراکتال و پارامترهای آماری و زمین آماری، تا حد ممکن ثابت نگه داشته شوند. با استفاده از ترکیب اندیس عدم قطعیت حاصل از شبیه سازی و همچنین تابع GET، روشی جدید برای تعیین نقاط مناسب حفاری های آتی در محدوده شمالی کانسار پیشنهاد شده است.

### کلمات کلیدی

شبیه سازی شرطی فراکتالی، حرکت براونی کسری، تحلیل ریسک، تابع GET، معدن سنگ آهن گل گهر

## ۱- مقدمه

فواصل گمانه‌ای که در مرحله اکتشاف، برای تخمین در مقیاس بزرگ (یا بلوک‌های کوچک) به کار رفته است، برای برنامه‌ریزی کوتاه و میان مدت استخراج معدن مناسب نیست. پیش از معدنکاری، برای تامین اهداف گوناگون نمونه برداری‌های اضافی صورت می‌گیرد که از جمله آن می‌توان به کاهش عدم قطعیت کلی مرتبط با تخمین اشاره کرد. از جنبه زمین آماری، مطالعات گوناگونی برای طراحی نمونه برداری صورت گرفته که در این تحقیقات اکثراً از واریانس تخمین برای اندازه‌گیری عدم قطعیت استفاده شده است. همچنین به محدودیت این پارامتر در ارزیابی تغییرپذیری حقیقی اشاره شده است، زیرا واریانس تخمین محاسبه شده فقط به هندسه نمونه‌ها و یا به عبارت دیگر آرایش فضایی آنها و همچنین واریوگرام برازش شده، بستگی دارد. اصولاً، واریانس تخمین، مقادیر نمونه‌ها را در نظر نمی‌گیرد و همین مسئله، چشم‌پوشی از تغییرپذیری‌های محلی را به دنبال دارد.

تصمیم‌گیری در مورد تعداد نمونه‌های اضافی مورد نیاز، به محدودیت‌های اقتصادی و اکتشافی بستگی دارد. هر یک از نمونه‌های اضافی باید در محلی قرار گیرند که عدم قطعیت مرتبط با تخمین، حداقل شود. علاوه بر این، با افزایش تعداد نمونه‌ها، کاهش عدم قطعیت روند نزولی به خود می‌گیرد. فراتر از این حد، مزیت کلی ناشی از اطلاعات اضافی، محسوس نخواهد بود. برای مثال، اگر یک نمونه بیشتر در یک محدوده با واریانس پایین اضافه شود، این نمونه اثر کمی را بر روی عدم قطعیت کلی مرتبط با تخمین‌ها خواهد داشت، که این امر سبب صرف هزینه و زمان می‌شود.

در این تحقیق روشی برای تعیین موقعیت نمونه‌های اضافی، بر اساس ترکیب عدم قطعیت اندازه‌گیری شده به روش شبیه‌سازی فراکتالی و همچنین تابع GET، به منظور کاهش ریسک تخمین ذخیره معرفی شده است.

## ۲- شبیه‌سازی فراکتالی

روش‌های فراکتالی در توصیف اشکال و خصوصیات زمین‌شناسی موجود در طبیعت، از کانسارها گرفته تا سواحل، شکستگی‌های سنگ، گسل‌ها، مهندسی مخازن و بسیاری مسایل دیگر، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این منطق که در دهه ۱۹۶۴ توسط ماندلبروت ارائه شد، چارچوب ریاضی‌ای را برای توصیف الگوها و هندسه‌های پیچیده‌ای که در طبیعت یافت می‌شوند، مهیا کرد و به پدیده‌هایی اشاره می‌کند که در

مورد آنها بتوان اصل مقیاس‌پذیری را به کار برد [۱]. فراکتال‌ها از طریق مراحل ریاضی که ممکن است معین و یا احتمالی<sup>۱</sup> باشند، ایجاد می‌شوند. یک مدل مشخص از فراکتال‌های احتمالی، حرکت براونی کسری یا به اختصار، fBm<sup>۲</sup> است که از آن می‌توان در مدل‌سازی و شبیه‌سازی سطوح و کانسارها استفاده کرد.

شبیه‌سازی‌های فراکتالی سطوح یا میدان‌های تصادفی دوبعدی، معمولاً به کمک روش جابجایی نقطه میانی و روش‌های طیفی (تبدیل فوریه) انجام می‌شود. گرچه هر دو این روش‌ها بعد فراکتال میدان را ثابت نگه می‌دارند. اما همیشه همبستگی فضایی را حفظ نمی‌کنند و در واقع شرطی نیستند. به علاوه، روش جابجایی نقطه میانی در مورد داده‌های شرطی‌ساز فاصله‌دار پراکنده و نامنظم به کار نمی‌رود. همچنین دیگر روش‌های شبیه‌سازی زمین آماری مورد استفاده در علوم زمین، از قبیل شبیه‌سازی گوسی متوالی و روش تجزیه ILL، با وجود اینکه همبستگی فضایی را حفظ کرده و با داده‌های فاصله‌دار نامنظم کار می‌کنند و شرطی هستند، ولی بعد فراکتال را در نظر نمی‌گیرند و سطوحی را شبیه‌سازی می‌کنند که بعد فراکتال آنها با بعد فراکتال سطح منطبق بر اطلاعات اولیه متفاوت است. لذا از این منظر، سطوح شبیه‌سازی شده اعتبار لازم را ندارند.

روشی که در اینجا از آن برای شبیه‌سازی استفاده شده، روش شبیه‌سازی شرطی فراکتالی نام دارد که این روش بر اساس الگوریتم درونیایی فراکتالی بنا شده است. این الگوریتم توسط روملین طی دو مقاله در سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۲ ارائه شد [۲]، [۳]. در این الگوریتم از کوواریانس نموی حرکت براونی کسری، با آنچه که ذاتاً معادلات کریگینگ هستند، استفاده می‌شود تا میدان فراکتالی را شبیه‌سازی کند و در عین حال، هم بعد فراکتال و هم همبستگی فضایی وابسته را حفظ می‌کند. این الگوریتم امکان تخمین‌ها و واریانس‌های خطا را فراهم می‌سازد و از این نظر مشابه کریگینگ معمولی با مدل توانی است، با این تفاوت که در آن از مدل شبه کوواریانس و پارامتر لاگرانژ برای حل دستگاه کریگینگ استفاده نمی‌شود. در این روش مقادیری که در هر نقطه شبیه‌سازی می‌شوند از رابطه ماتریسی زیر محاسبه می‌شوند:

$$[z_c^{(i)}(\mathbf{u}_i)] = \lambda[z(\mathbf{u}_\alpha)] + \mathbf{Sw}, \quad \alpha=1, \dots, n \quad i=1, \dots, N \quad (1)$$

که در آن

$\mathbf{w}$ : بردار متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع نرمال استاندارد

(۸)  $H = E + 1 - D$   
 که در آن،  $E$  بعد اقلیدسی و  $D$  بعد فراکتال است. این رابطه برای هر ماتریس کوواریانس نمودی بین هر ترکیب از  $\mathbf{u}_\alpha, \mathbf{u}_\eta, \mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j$  به کار می‌رود.  
 مراحل اصلی شبیه‌سازی شرطی فراکتالی به طور خلاصه در شکل ۱ نشان داده شده است [۴].

### ۳- اندیس عدم قطعیت

با استفاده از شبیه‌سازی، تغییرپذیری محلی با در نظر گرفتن موقعیت فضایی داده‌ها و مقادیر واقعی آنها، ارزیابی می‌شود. در این روش در هر بلوک متعلق به مدل یک مقدار حاصل از هر یک از  $n$  بار شبیه‌سازی به دست می‌آید و ترکیب آنها امکان دسترسی به تغییرپذیری محلی را فراهم می‌کند. تغییرپذیری با استفاده از اندیس عدم قطعیت<sup>۳</sup> اندازه‌گیری می‌شود و سپس با استفاده از آن، مناطق با تغییرپذیری بالا مشخص می‌شود که این مناطق، مکان‌های مناسب نمونه‌برداری اضافی هستند. این اندیس از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$IR = q_{0.75} - q_{0.25} \quad (9)$$

که در آن  $q_{0.25}$  و  $q_{0.75}$  به ترتیب، چارک‌های بالا و پایین مقادیر حاصل از  $n$  بار شبیه‌سازی، در هر بلوک هستند.  
 با استفاده از این رابطه، می‌توان عدم قطعیت یا تغییرپذیری یک توزیع را اندازه‌گیری کرد. با رده بندی ناحیه مورد مطالعه، براساس مقادیر به دست آمده برای این اندیس، مناطق با ریسک بالا و پایین مشخص می‌شوند. بدیهی است مناطق با عدم قطعیت یا ریسک بالاتر، برای نمونه برداری اضافی، مقدم خواهند بود [۵].

### ۴- تابع GET

هدف اصلی حفر گمانه‌های اضافی، بهبود قابلیت اعتماد تخمین عیار و تناژ در هر کلاس ذخیره است. تابع  $GET^4$  که در اینجا ارائه می‌شود، روشی را برای دستیابی همزمان به هر دو این اهداف فراهم می‌کند. تابع GET ضرب خطی یا غیر خطی متغیرهای  $G$ ،  $E$  و  $T$  است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(G, E, T) = G^\alpha E^\beta T^\gamma \quad (10)$$

مقادیر  $\gamma, \beta, \alpha$  بر اساس تشخیص فرد ممکن است مقادیری غیر از واحد را به خود اختصاص دهند.  $G$  و  $E$  به ترتیب متوسط عیار تخمین زده شده و متوسط خطای تخمینی بلوک‌ها است که به صورت قائم (ستونی) روی هم قرار

$\lambda$ : ماتریس  $N \times n$  وزن‌ها که ساختار فضایی میدان را در هنگام تخمین  $z(\mathbf{u}_i)$  حفظ می‌کند.

$S$ : ماتریس  $N \times N$  کنترل کننده آهنگ تغییرات تصادفی ضروری برای هر مقدار شبیه‌سازی شده.

حال اگر به طور اختیاری یک مقدار شرطی‌ساز مشخص، مانند  $z(\mathbf{u}_\eta)$  را انتخاب شود و رابطه ۱ در قالب نموها با در نظر گرفتن  $\mathbf{u}_\eta$  مجدداً بازنویسی شود، رابطه زیر را حاصل می‌شود:

$$[z_c^{(l)}(\mathbf{u}_i) - z(\mathbf{u}_\eta)] = \lambda' [z(\mathbf{u}_\alpha) - z(\mathbf{u}_\eta)] + S\mathbf{w} \quad (2)$$

در این رابطه  $\lambda'$ ، ماتریس  $N \times n - 1$  (یعنی  $\lambda$  بدون جملات  $\mathbf{u}_\eta$ ) است. با ضرب کردن هر دو طرف رابطه ۲ از طرف راست در  $[z(\mathbf{u}_\beta) - z(\mathbf{u}_\eta)]^T$  و گرفتن امیدهای ریاضی رابطه زیر به دست می‌آید:

$$[C(\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_\alpha)] = \lambda' [C(\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_\beta)] \quad (3)$$

این دستگاه خطی شبیه دستگاه کریگینگ است و در صورتیکه هر دو ماتریس کوواریانس معلوم باشند، توسط تجزیه چولسکی برای  $\lambda'$  حل می‌شود. با داشتن  $\lambda'$ ،  $\lambda$  توسط رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\lambda_{i\eta} = 1 - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

برای به دست آوردن ماتریس  $S$  هر دو طرف رابطه ۲ از طرف راست در  $\mathbf{w}^T$  ضرب می‌شود و سپس با تعیین امیدهای ریاضی رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$E[(z_c^{(l)}(\mathbf{u}_i) - z(\mathbf{u}_\eta))\mathbf{w}^T] = S \quad (5)$$

حال اگر هر دو طرف رابطه ۲ در  $[z_c^{(l)}(\mathbf{u}_j) - z(\mathbf{u}_\eta)]^T$  ضرب شده و امیدهای ریاضی گرفته شود رابطه زیر به دست می‌آید.

$$SS^T = [C(\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j)] - \lambda' [C(\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_\alpha)]^T \quad (6)$$

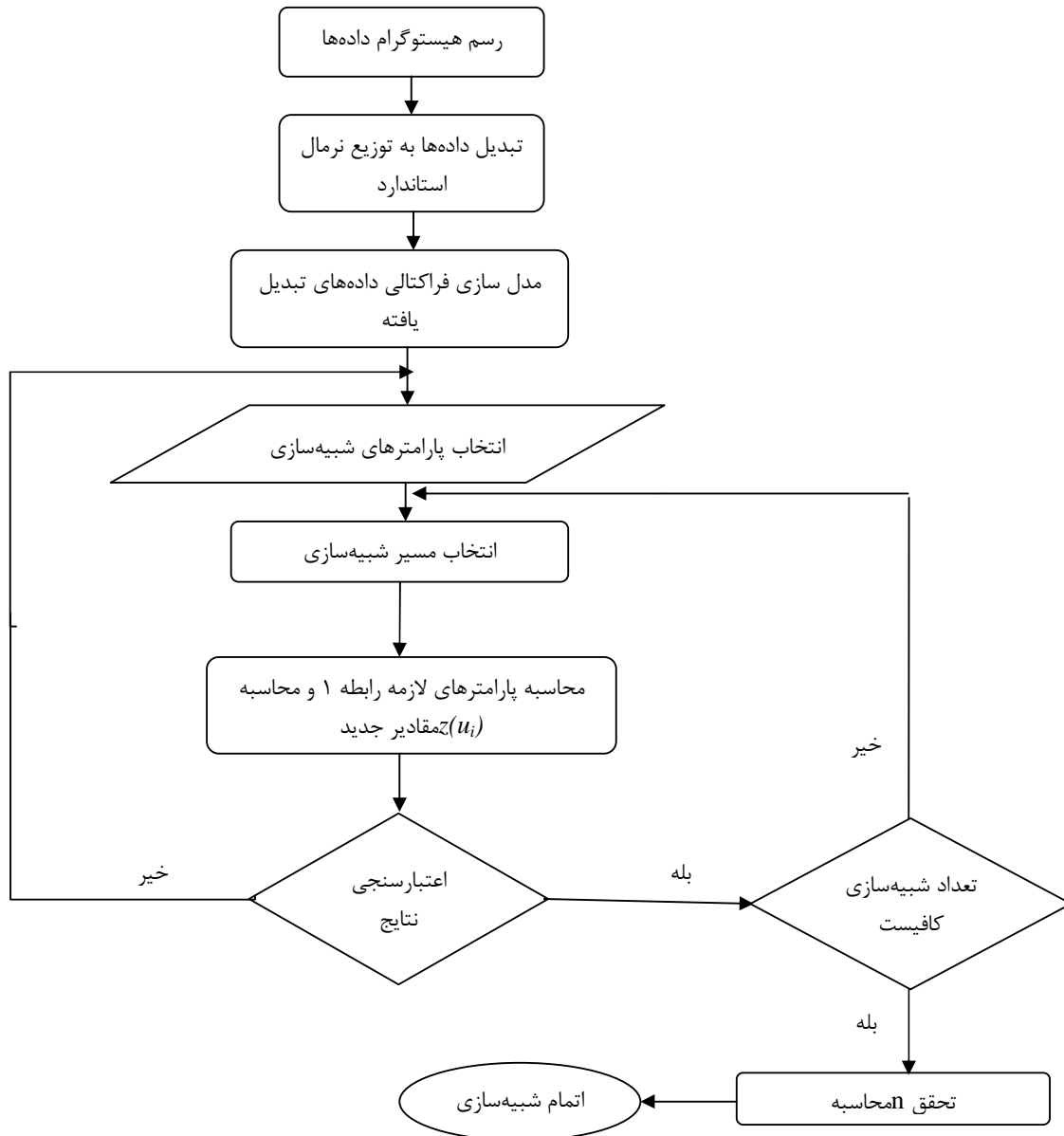
حال می‌توان  $S$  را با استفاده از تجزیه چولسکی محاسبه کرد. اصول این روش در واقع مشابه روش شبیه‌سازی متوالی گوسی است اما پارامترهای توزیع شرطی در هر نقطه که شبیه‌سازی می‌شود، با استفاده از رابطه کوواریانس مقادیر افزایشی (رابطه ۷) به دست می‌آید. این رابطه برای تشکیل دستگاه خطی به جای تخمین کریگینگ و واریانس خطا به کار می‌رود:

$$[C(\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_\beta)] = \frac{1}{2} V [|\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_\eta|^{2H} - |\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_\beta|^{2H} + |\mathbf{u}_\eta - \mathbf{u}_\beta|^{2H}] \quad (7)$$

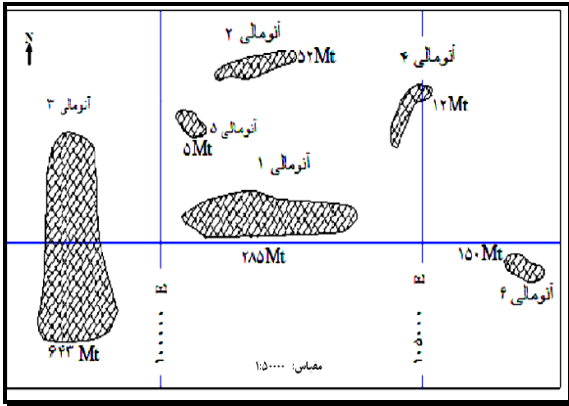
در این رابطه،  $2H$  توان هورست نام دارد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود،  $\frac{1}{2} V_H$  نیز ثابت تناسب است:

(۱۱) 
$$x_i = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$
 که در آن،  $x_i$  مقدار تبدیل یافته،  $x$  داده خام که باید تبدیل شود و  $x_{\min}$  حداقل و  $x_{\max}$  حداکثر مقدار در بین داده‌ها است [۶].

می‌گیرند و  $T$  ضخامت ماده معدنی ترکیب شده (به صورت پیوسته یا ناپیوسته) در ستون مربوطه است. مقادیر بالای این تابع، محل‌های مناسب برای حفاری‌های آتی خواهند بود. با توجه به اینکه متغیرهای  $E$ ،  $G$  و  $T$  در بازه عددی یکسانی قرار ندارند، می‌بایست آنها را با استفاده از رابطه زیر به مقادیری بین صفر و یک تبدیل کرد:



شکل ۱: فلوچارت شبیه‌سازی شرطی فراکتالی

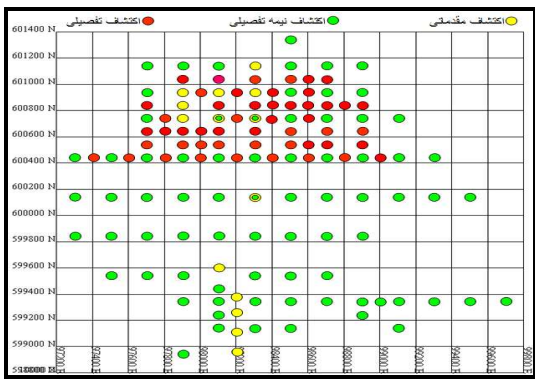


شکل ۳: موقعیت قرارگیری آنومالی‌های شش گانه گل گهر [۷]

در کل ۱۳۹ گمانه به طور قائم (بجز گمانه ۱۶۲) در منطقه حفر شده و ۱۱۵۹ نمونه حاوی کانسنگ به دست آمده است. با توجه به کمبود نمونه در قسمت جنوبی و مرکزی کانسار و کامل بودن نسبی شبکه حفاری در قسمت شمالی و همچنین طرح استخراج، عرض ۶۰۰×۲۰۰ به عنوان مرز شبیه‌سازی و تخمین ذخیره انتخاب شد و فقط داده‌های گمانه ای این قسمت کانسار مورد بررسی قرار گرفت. همچنین متغیرهای Fe و S به لحاظ اهمیت، برای انجام شبیه‌سازی و در نهایت تخمین ذخیره و تعیین موقعیت نمونه‌های اضافی، انتخاب شدند.

#### ۵-۱- تجزیه و تحلیل داده‌ها

بررسی‌های آماری انجام شده بر روی داده‌ها، نشان داد که توزیع عیار آهن در این کانسار چولگی منفی دارد. در حالی که توزیع عیار گوگرد با در نظر گرفتن پارامترهای چولگی و کشیدگی بسیار به حالت نرمال نزدیک است.

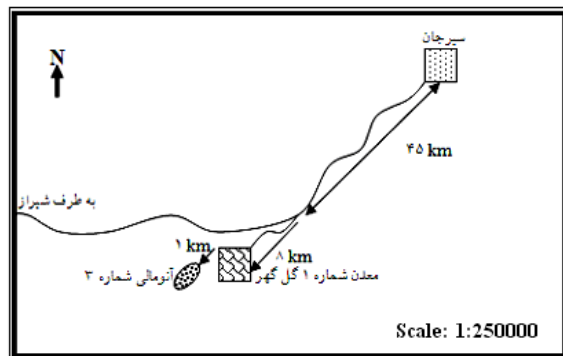


شکل ۴: موقعیت گمانه‌های اکتشافی حفر شده طی سه مرحله

اکتشاف در آنومالی شماره ۳ [۷]

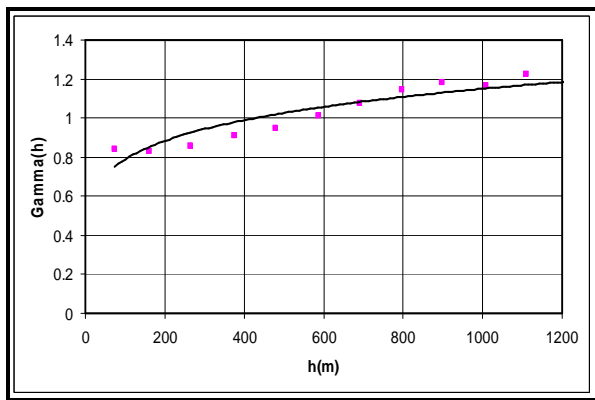
#### ۵- مطالعه موردی

منطقه معدنی گل گهر در ۵۰ کیلومتری جنوب غربی شهر سیرجان در استان کرمان واقع است (شکل ۲). این ناحیه در سال ۱۳۴۸ به وسیله شرکت ایران باریت مورد شناسایی قرار گرفت و در سال ۱۳۵۳ به تملک شرکت ملی صنایع فولاد ایران درآمد. پیشینه تاریخی استخراج این معدن حداقل به ۹۰۰ سال پیش می‌رسد. مجموعه معدنی گل گهر شامل شش توده معدنی با ذخیره‌ای در حدود ۱۱۳۵ میلیون تن است که در مجموع محدوده‌ای به وسعت ۴۰ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد. در این میان، توده شماره ۳ با داشتن ذخیره‌ای معادل ۶۴۳ میلیون تن سنگ آهن بزرگترین آنها است (شکل ۳). بر اساس عملیات اکتشافی انجام شده (۱۳۹ گمانه)، شکل کلی کانسار آهن شماره سه به صورت یک توده گسلیده است که دو انتهای شمالی و جنوبی آن نزدیک سطح زمین و بخش مرکزی آن در عمق بیشتری قرار دارد. سنگهای در بر گیرنده کلاً از نوع دگرگونی با سن احتمالی اردوئین-سیلورین هستند. سنگ بستر شامل گنایس، کوارتز کلریت شیست، کوارتز مسکویت شیست و آمفیبولیت است. سنگ پوشش در قسمتهای شمالی و جنوبی از بین رفته است و در بخش مرکزی ضخامتی در حدود ۳۰۰ متر دارد. کل مجموعه به وسیله آبرفت‌های عهد حاضر با ضخامت ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر پوشیده شده و ضخامت پوشش آبرفت در شمال کمتر و در جنوب بیشتر و ابعاد متوسط توده سنگ آهن تقریباً ۲۵۰۰×۲۰۰×۵۵ متر است و در دسته کانسارهای توده ای قرار می‌گیرد. کانسار دارای امتداد طولی تقریباً شرقی-غربی و شیب متوسط ۲۶ درجه است [۷]. در حال حاضر در آنومالی شماره ۳ معدن گل گهر داده‌های موجود همان گمانه‌های اکتشافی اند، که نحوه آرایش آنها در منطقه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی معدن سنگ آهن گل گهر [۷].

در ادامه لازم است که پارامترهای فراکتالی مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی و یا به عبارت دیگر دو پارامتر  $2H$  و  $\frac{1}{2}V_H$ ، تعیین شوند. بدین منظور باید تغییرنمای تجربی داده‌های امتیازات نرمال در جهت مختلف را محاسبه کرد [۲]. شکل ۷ به عنوان نمونه تغییرنمای تجربی غیرجهتی امتیازات نرمال به همراه مدل توانی برازش داده شده را برای متغیر آهن، جهت تعیین پارامترهای فراکتالی، نشان می‌دهد. مدل‌های توانی برازش داده شده به همراه پارامترهای فراکتالی به دست آمده، به طور خلاصه در جدول ۱ آمده است.



شکل ۷: تغییرنمای تجربی غیرجهتی امتیازات نرمال تغیر آهن به همراه مدل توانی

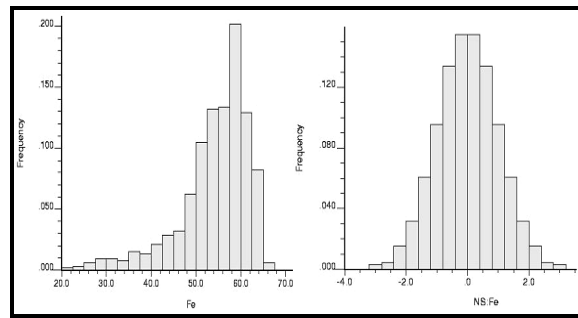
جدول ۱: پارامترهای فراکتالی متغیرها به همراه مدل توانی برازش داده شده

متغیر مورد بررسی	مدل توانی برازش داده شده	$2H$	$\frac{1}{2}V_H$
آهن	$\gamma(h) = 0.3711 H^{0.1637}$	۰/۱۶۳۷	۰/۳۷۱۱
گوگرد	$\gamma(h) = 0.635 H^{0.0742}$	۰/۰۷۴۲	۰/۶۳۵

## ۵-۲- شبیه‌سازی کانسار

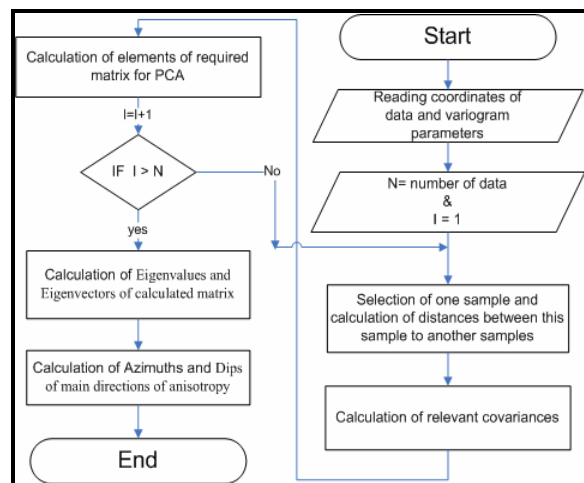
با توجه به مشابه بودن اصول شبیه‌سازی فراکتالی با شبیه‌سازی متوالی گوسی، در برنامه تحت فرتن شبیه‌سازی متوالی گوسی نرم افزار Gslib، تغییراتی مطابق با این روش شبیه‌سازی اعمال و این برنامه با این روش شبیه‌سازی تطبیق و برنامه کامپیوتری آن SGFRACT نام‌گذاری شد. در این برنامه، به جای روش حذفی گوس که در برنامه شبیه‌سازی گوسی متوالی برای حل دستگاه خطی به کار می‌رود، یک زیر

برای انجام شبیه‌سازی، لازم است که داده‌ها در ابتدا به استاندارد نرمال تبدیل شوند که این تبدیل پس از حذف مقادیر خارج از ردیف و همچنین روندهای احتمالی عیار، بر روی داده‌ها انجام شد. در شکل ۵ هیستوگرام داده‌های خام و داده‌های تبدیل شده به استاندارد نرمال برای عیار آهن، آورده شده است.



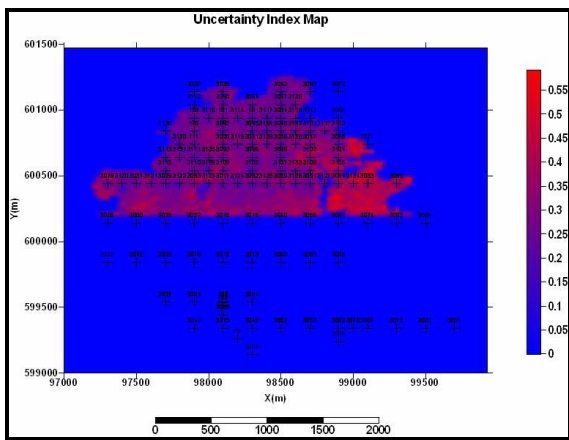
شکل ۵: هیستوگرام داده‌های خام و داده‌های تبدیل شده به استاندارد نرمال عیار آهن

ناهمسانگردی نقش بسیار مهمی را در فرآیندهای تخمین و شبیه‌سازی ایفا می‌کند و تا حد امکان باید به خوبی مدل‌سازی شود. از آنجا که مراحل به دست آوردن بیضوی ناهمسانگردی با استفاده از برازش و مدل‌سازی تغییرنما در جهت‌های مختلف بسیار وقت‌گیر و مشکل است، لذا یک راه سریع برای دستیابی به حدود جهت‌های ناهمسانگردی، استفاده از تکنیک مولفه‌های اصلی است [۸]. بدین منظور برنامه‌ای به زبان مطلب تهیه و این تکنیک بر روی داده‌های عیاری دو متغیر انجام شد که فلوچارت این برنامه در شکل ۶ نشان داده شده است.



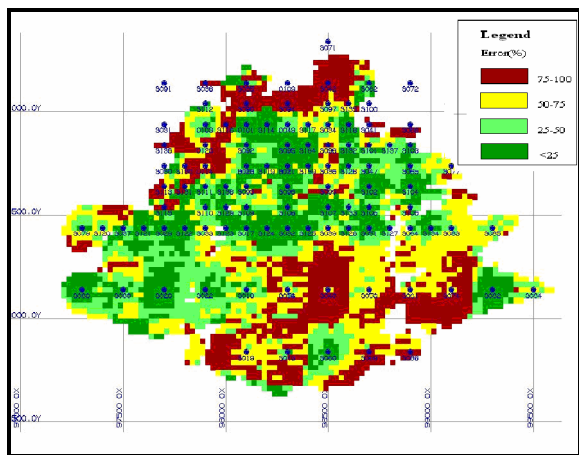
شکل ۶: فلوچارت M-file تهیه شده برای تعیین انیزوتروپ [۹]

اضافی مقدم خواهند بود. شکل ۱۰ نقشه درصد خطای تخمین محاسبه شده توسط روش کریگینگ برای دو متغیر آهن و گوگرد در کل محدوده تخمین را نشان می‌دهد. محدوده‌های قرمز رنگ محل‌های با خطای تخمین بالا و محل‌های سبز رنگ محدوده‌هایی هستند که خطای تخمین پایینی دارند که تا حدودی مشابه نقشه اندیس عدم قطعیت می‌باشد. در ادامه با استفاده از نرم افزار GEMS متوسط قائم(ستونی) این مقادیر محاسبه و به کمک این مقادیر و همچنین مقادیر متوسط قائم ضخامت ماده معدنی و عیار آهن که از تخمین E-Type به دست آمد، مقدار تابع GET محاسبه شد. تمامی مقادیر قبل از محاسبه تابع GET با استفاده از رابطه ۱۱ به مقادیری بین صفر و یک تبدیل شدند.



شکل ۹: نقشه اندیس عدم قطعیت در محدوده شمالی آنومالی

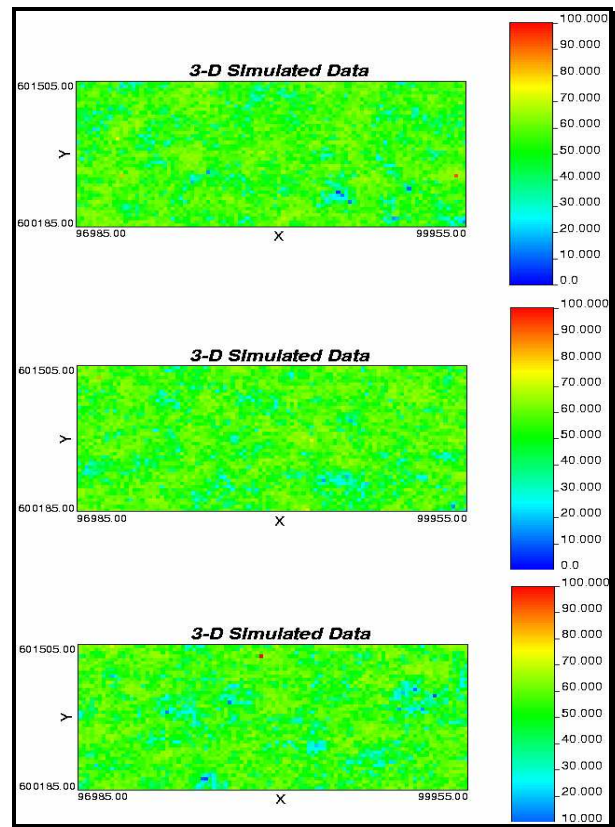
شماره ۳



شکل ۱۰: نقشه درصد خطای تخمین محاسبه شده توسط روش کریگینگ برای دو متغیر آهن و گوگرد در کل محدوده تخمین [۷]

برنامه با استفاده از روش چولسکی<sup>v</sup>، برای حل دستگاه خطی مورد استفاده قرار گرفت [۱۰].

برای شبیه‌سازی کانسار، بلوک‌هایی به ابعاد  $25 \times 25 \times 15$  متر، مورد استفاده قرار گرفت و سپس ۱۰۰ بار شبیه‌سازی برای به‌دست آمدن ۱۰۰ تحقق<sup>vi</sup>، بر روی داده‌های هر دو متغیر انجام شده که نتایج آن در ادامه به صورت جداگانه برای متغیر آهن در سه تحقق ۱، ۵ و ۱۰، در شکل ۸ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بر خلاف کریگینگ، مناطق کم عیار و پر عیار ساختار پیوسته ای ندارند.



شکل ۸: نتیجه شبیه‌سازی یکی از مقاطع افقی کانسار برای متغیر آهن در ۳ تحقق

### ۳-۵- تعیین نقاط مناسب حفاری در محدوده تخمین

در این بخش، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، اندیس عدم قطعیت برای هر یک از بلوک‌ها، برای دو متغیر آهن و گوگرد، محاسبه و سپس جذر حاصلضرب عدم قطعیت این دو متغیر معادل خطا در تابع GET در نظر گرفته شد. شکل ۹ نقشه اندیس عدم قطعیت را برای محدوده مورد تخمین نشان می‌دهد. محدوده‌هایی که با رنگ قرمز مشخص شده‌اند، مناطق با عدم قطعیت یا ریسک بالاتر هستند که برای نمونه‌برداری

## ۶- نتیجه گیری

بهبود قابلیت اطمینان به کلاس‌های ذخیره و همچنین دستیابی به توزیع دقیق تر عیار، از جمله اهداف ضروری در حفر گمانه‌های اضافی است. محل گمانه‌های اضافی را می‌توان بر اساس دو استراتژی زیر تعیین کرد:

- بهبود رده ذخیره بر اساس کاهش عدم قطعیت همراه با تخمین.
- افزایش تناژ ماده معدنی.

ترکیب این استراتژی‌ها، در کنار استفاده از روش‌های شبیه‌سازی زمین آماری به منظور اندازه‌گیری عدم قطعیت، روش مناسبی برای تعیین نقاط مناسب حفاری‌های اضافی است.

این تحقیق از جمله اولین مواردی است که شبیه‌سازی فراکتالی برای شبیه‌سازی کانی سازی به کار برده شده است و تا امروز، بجز در تعداد محدودی مقاله، شبیه‌سازی فراکتالی فقط به صورت تئوری در مدل سازی کانسار بررسی شده است. این امر ممکن است به این علت باشد که یا روش‌های قبلی فراکتالی در مورد داده‌های فاصله‌دار نامنظم به کار نمی‌روند و یا اینکه نمی‌توانند به سرعت یک شبیه‌سازی را شرطی و ساختار فضایی را مجدداً ایجاد کنند. از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های روش به کار برده شده در این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- قابلیت انجام شبیه‌سازی شرطی فراکتالی سه بعدی با استفاده از داده‌های فاصله‌دار نامنظم پراکنده بدون نیاز به آشنایی با روش‌های طیفی و استفاده از توابع طیفی
- استفاده از بعد فراکتال به عنوان پارامتر ورودی و تولید مجدد آن همراه با دیگر پارامترهای آماری و ساختاری پس از شبیه‌سازی

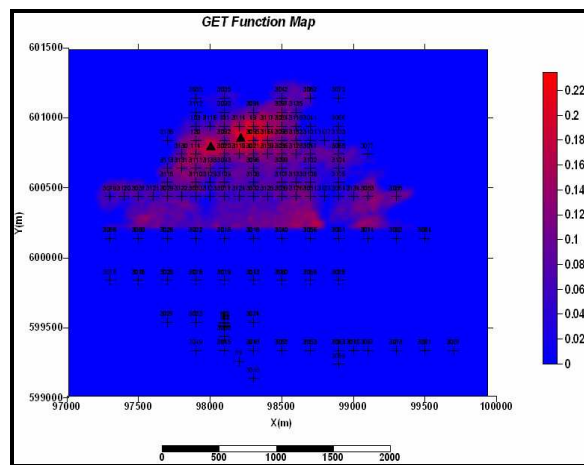
## تقدیر و تشکر

از کلیه مهندسین شرکت سنگ آهن گل گهر به خصوص آقای مهندس فرشید زمانی که امکان حضور محققین را در محل سایت معدنی گل گهر فراهم کردند و همچنین آقایان مهندس حسین اکبری و مهندس محسن نجف آبادی که در تهیه بانک‌های اطلاعاتی مورد نیاز و همچنین اجرای پروژه، یاری کرده اند، سپاسگزاری می‌شود.

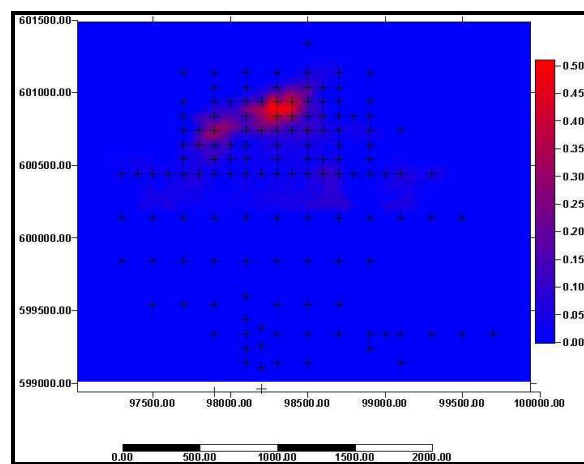
## منابع

- [1] Turcotte, Donald L.; 2002, "Fractals in petrology"; Lithos; v.65, pp.261-271.

شکل ۱۱ نقشه تابع GET را نشان می‌دهد. در این نقشه، نواحی‌ای که دارای مقادیر بالای این تابع (نواحی قرمز رنگ) هستند، محل‌های مناسب برای حفاری‌های آتی خواهند بود. با در نظر گرفتن آرایش گمانه‌ها و همچنین محدوده معدنکاری، نقاط مشخص شده (نقاط مثلثی شکل)، محل‌های مناسبی برای حفاری‌های آتی در محدوده شمالی هستند. این محل‌ها دقیقاً با نقاط پیشنهادی در نتیجه استفاده از کریگینگ و تابع GET مطابقت دارد. با تغییر پارامترهای  $\gamma, \beta, \alpha$  نیز نتایج تقریباً مشابهی به دست آمد و در واقع همان محدوده قبلی به عنوان محدوده پیشنهادی برای حفاری‌های آینده معرفی شد. به عنوان نمونه شکل ۱۲ نقشه تابع GET را برای مقادیر  $\alpha = 1.5, \beta = 0.1, \gamma = 2$  نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: نقشه تابع GET به همراه نقاط حفاری پیشنهادی در محدوده شمالی آنومالی شماره ۳



شکل ۱۲: نقشه تابع GET برای مقادیر غیر از واحد  $\gamma, \beta, \alpha$  در محدوده شمالی آنومالی شماره ۳



- [۷] شرکت مهندسیین مشاور کوشا معدن؛ (۱۳۸۳)؛ گزارش اکتشاف آنومالی شماره ۳ معدن گل گهر سیرجان.
- [8] Krige, Danie G.; 1999; “*The Use of the Principal Component Technique to Define Anisotropy details for Spatial Structures*”; APCOM99, pp.557-564.
- [9] Eskandari, S., Rasouli, V., Najafabadi, M.; 2006; “*The use of the principal component technique to study the anisotropy in spatial structure of iron grade in Gol-E-Gohar No 3 mine*”; Journal of mines, metals& fuels, pp.393-396.
- [10] Kentwell, D. J., Bloom, L. M., and Comber, G. A.; 1999; “*Improvements in grade tonnage curve prediction via sequential gaussian fractal simulation*”; Mathematical geology, v.31, n.3, pp.311-325.
- [2] Rumelin, W.; 1990; “*Simulation of fractional Brownian motion*”; in Peitgen et . al. (eds), Fractals in the Fundamental and Applied Sciences, Elsevier.
- [3] Rumelin, W.; 1992; “*Fractal interpolation of random fields of fractal Brownian motion*”; in Encarnacao et. al. (eds); Fractal Geometry and Computer Graphics, Springer Verlag, p. 122-131.
- [4] Kentwell, D. J., Bloom, L. M., and Comber, G. A.; 1999; “*Geostatistical conditional fractal simulation with irregularly spaced data*”; Mathematics and computers in simulation; v.48, pp.447-456.
- [5] Gustavo, G. Pilger.; 2002; “*Optimizing the value of a sample*”; APCOM2002, pp.85-94.
- [6] Hassanipak, A.A., Sharafodin, M.; 2003; “*GET: A Function for Preferential Site Selection of Additional Borehole Drilling*”; Explor. Mining Geol, v.13, n.1-2, pp.1-2.

## زیر نویس‌ها

- 
- <sup>1</sup>-stochastic  
<sup>2</sup>-fractional Brownian motion  
<sup>3</sup>-uncertainty index  
<sup>4</sup>-Grade Error Thickness  
<sup>v</sup>- cholesky  
<sup>vi</sup> Realization