

تعیین گستره ماده معدنی با روش های تابع فاصله و شبیه سازی تک گوسی

در سنگ آهن گل گهر

فاطمه امیرپورسعید^۱، امید اصغری^{۲*}^۱ دانشجوی دکتری مهندسی معدن، اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران f.poursaeid@ut.ac.ir
^۲ عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران o.asghari@ut.ac.ir

چکیده

مهم‌ترین گام در آغاز یک فعالیت معدنکاری، تعیین محدوده ماده معدنی است. بر اساس محدوده تعیین شده طراحی معدن، برنامه‌ریزی استخراج و خوراک کارخانه فرآوری انجام می‌شود. برای تعیین این محدوده روش‌های مرسوم به صورت تقریبی و بدون درکی از میزان خطای محدوده تعیین شده، انجام می‌گیرد، اما زمین آمار به عنوان یک ابزار قدرتمند قادر است که با استفاده از آمار فضایی داده‌ها، این محدوده را مشخص کند. برای مشخص کردن محدوده ماده معدنی به عنوان یک متغیر گسسته از انواع روش‌های شبیه‌سازی می‌توان استفاده کرد که از این جمله روش تک گوسی است که بر مبنای شبیه‌سازی یک تابع گوسی تصادفی و قانون نوع سنگ، تخمین محدوده را میسر می‌سازد. در کنار این روش‌ها، می‌توان از روابط ساده‌ای نیز برای تعیین محدوده یک دامنه مشخص بهره برد، از این جمله می‌توان روش تابع فاصله را نام برد که با استفاده از فواصل اقلیدسی بین نقاط غیر مشابه و کالیبراسیون این فواصل، محل مرز ماده معدنی قابل تعیین است. برای تعیین بهترین شبیه‌سازی در روش تک گوسی از اعتبارسنجی‌های آماری و زمین‌آمار استفاده شد. برای مقایسه بین دو روش نیز از محاسبه ماتریس پیچیدگی در راستای تعیین میزان خطا و دقت تعیین محدوده و همچنین مقایسه کیفی مقاطع و پلان‌های مختلف بهره برد. اعتبارسنجی کیفی نتایج در کنار اعتبارسنجی‌های آماری و زمین‌آمار نشان از نتایج کارآمد روش تک گوسی است. در مقام مقایسه روش تک گوسی دقت بالایی در شبیه‌سازی واحد کانسنگی و باطله دارد و دقت آن از روش تابع فاصله بالاتر است. الگوریتم تک گوسی قادر به بازتولید بهتر ناهمسانگردی در مقیاس‌های کمتر از تابع فاصله است در صورتی که تابع فاصله تغییرپذیری و ناهمسانگردی را در مقیاس بزرگتر بهتر بازتولید می‌کند.

کلمات کلیدی

زمین‌آمار، محدوده ماده معدنی، شبیه‌سازی تک گوسی، تابع فاصله

* نویسنده مسئول مکاتبات

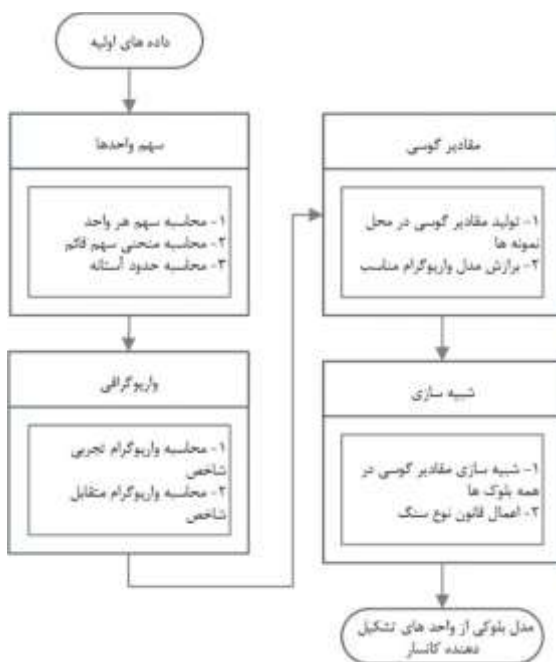
۱- مقدمه

کاربرد روش تک گوسی در تعیین محدوده ماده معدنی در کانسار آهن گل گهر مورد آزمایش قرار گرفته است [۱۱]. در این مقاله سعی بر این است که علاوه بر اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی تک گوسی، نتایج حاصل از روش تابع فاصله و تک گوسی را مقایسه کرد و کارایی هر یک از روش‌ها را به دست آورد.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- شبیه‌سازی تک گوسی

ایده اصلی در روش شبیه‌سازی تک و یا چند گوسی، این است که یک یا چند تابع تصادفی گوسی $(N(0,1))$ در هر نقطه‌ای از منطقه شبیه‌سازی شود و سپس با استفاده از قانون نوع سنگ، این مقادیر گوسی، به مقادیر گسسته نشان‌دهنده نوع واحد سنگی بازگردانده شود. این روش برای حالت یک رسوبگذاری ترتیبی و منظم از واحدهای مختلف وجود دارد، یا روابط بین واحدها به حدی ساده است که تنها با یک تابع گوسی قابل مدل شدن است، استفاده می‌شود [۱۲]. الگوریتم این روش به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- الگوریتم روش شبیه‌سازی تک گوسی

گام‌های اساسی در شبیه‌سازی تک گوسی به شرح زیر است [۱۲]:

الف- انتخاب نوع مدل

با توجه به نوع و ارتباط بین رخساره‌ها شبیه‌سازی تک گوسی به چند دسته تقسیم می‌شود. به طور مثال یک توالی رسوبی،

شبیه‌سازی‌های زمین‌شناسی گام اساسی قبل از تخمین عیاری یک کانسار ماده معدنی‌اند که در واقع شامل افراز قطعی کانسار به زیر حوزه‌هایی با مشخصات نسبتاً همگن به نام "واحدهای زمین‌شناسی" است [۱]. هرچند که این افراز توزیع بهتری از عیار را در فضا مشخص می‌کند اما قادر به تعیین عدم قطعیت در محل مرزهای واحدهای زمین‌شناسی نیست. در نتیجه روش‌هایی که علاوه بر تعیین محدوده واحدهای زمین‌شناسی قادر به تعیین عدم قطعیت این مرزها باشند، اهمیت زیادی دارند. از این رو زمین‌آمار بر پایه فضای، قادر به مدلسازی محدوده ماده معدنی و واحدهای زمین‌شناسی است. از اصلی‌ترین نتایج این روش‌ها در نظر گرفتن عدم قطعیت مرز واحدهای مختلف و همچنین توانایی کمی‌سازی این عدم قطعیت است [۲].

قبل از تخمین تناژ و عیار، مدلسازی زمین‌شناسی برای تفکیک کانسار به زیرحوزه‌هایی به نام واحدهای زمین‌شناسی استفاده می‌شود. این افراز منجر به شناخت بهتر توزیع عیاری درون کانسار می‌شود [۱]. شبیه‌سازی‌های احتمالی یکی از بهترین روش‌های مدلسازی دامنه‌های درون کانسار ماده معدنی هستند. روش‌های زمین‌آمار متنوعی برای مدلسازی چنین دامنه‌هایی توسعه یافته‌اند که از جمله می‌توان به روش شبیه‌سازی شاخص ترتیبی [۳، ۴]، شبیه‌سازی گوسی کوتاه شده [۵]، آمار نقطه‌ای چندگانه [۶] و شبیه‌سازی چندگوسی اشاره کرد.

روش تک گوسی (TGS) ^۱ قادر است در مقایسه با روشی مانند شاخص ترتیبی مشخصات پیچیده‌تر زمین‌شناسی را مدل کند و در مقایسه با روش‌های پیچیده‌تری مانند شبیه‌سازی چند نقطه‌ای، بدون نیاز به تصویر آموزشی و با استفاده از یک تصویر ساده که ارتباط بین واحدها را مشخص می‌سازد، پیچیدگی‌های زمین‌شناسی را مدل کند [۷]. در مقابل پیچیدگی روش تک گوسی، روش تابع فاصله (DF) ^۲ روشی ساده و منعطف است که با درون‌یابی مقادیر آن می‌توان به دقت مرز ماده معدنی را تعیین کرد اما نیازمند حجم بالایی از داده‌های اولیه است و قادر نیست که عدم قطعیت را به صورت مستقیم به دست آورد. تابع فاصله در واقع فاصله یک نقطه از نزدیک‌ترین نقطه غیرمشابه است. این روش برای اولین بار در دانشگاه آلبرتا توسط دوئج و همکارانش مطرح شد و در مراحل مختلف سعی شد که این فاصله کالیبره شود و مرز به درستی و با عدم قطعیت مشخصی مدل شود [۸-۱۰].

پهنای باند عدم قطعیت را و β اریب بودن آن را کنترل می کند. این پارامترها برای به دست آوردن عدم قطعیت مناسب بهینه می شوند که بهینه سازی این پارامترها فرآیندی هزینه بر است و نیازمند مدل های چندگانه و چند تابع هدف است [۱۳، ۱۴].

روش های زمین آماری تصادفی مانند شبیه سازی شاخص، (چند)گوسی کوتاه شده یا دیگر روش ها اغلب مدل های بسیار تصادفی ایجاد می کنند، اما روش تابع فاصله امکان مدلسازی محل مرزها و همزمان امکان ارزیابی عدم قطعیت را میسر می سازد. این عدم قطعیت به صورت فضایی از طریق یک منطقه (یا پهنای باند) قابل تعیین که باید کالیبره شود مشخص می شود [۱۵]. برای کالیبراسیون عدم قطعیت تابع فاصله یک مجموعه داده لازم است که به صورت داخل و خارج حوزه کدبندی شود (رابطه ۱) [۱۰].

$$i(u_{\alpha}) = \begin{cases} 1 & \text{if domain of interest present at } u_{\alpha} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha = 1, \dots, n$$

که در آن:

u بردار موقعیت

α اندیس نمونه

n تعداد نمونه ها

برای هر نمونه u_{α} نزدیک ترین داده در حوزه متفاوت u_{α}' به گونه ای تعیین می شود که $i(u_{\alpha}') \neq i(u_{\alpha})$ فاصله اقلیدسی بین این دو موقعیت مکانی برابر با مقدار تابع فاصله است ($df(u_{\alpha})$). اگر u_{α} در درون حوزه قرار گیرد این مقدار منفی است و در غیر این صورت علامت مثبت می گیرد (رابطه ۲) [۱۰]:

$$df(u_{\alpha}) = \begin{cases} +(u_{\alpha} - u_{\alpha}') & \text{if } i(u_{\alpha}) = 0 \\ -(u_{\alpha} - u_{\alpha}') & \text{if } i(u_{\alpha}) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

داده های تابع فاصله وابسته به فاصله از نزدیک ترین مرز مشاهده شده اند و نه به نزدیک ترین مرز واقعی. این روش برای سیستم های دودویی طراحی شده است که نقاط در داخل یا خارج حوزه قرار دارند. حوزه های چندگانه را می توان به صورت چندگانه و سلسله مراتبی مدل کرد. این روش برای حالت چند حوزه مختلط کاربرد ندارد (شکل ۲) [۱۰].

یک رودخانه مدفون و یا یک سیستم پورفیری نیاز به تعداد متغیر گوسی و قانون نوع سنگ متفاوتی دارد.

ب- تخمین مقادیر پارامترها

دو فاکتور اساسی مقادیر شاخص و مدل واریوگرام متغیر گوسی، شبیه سازی های تک گوسی را کنترل می کنند. با توجه به نسبت هر رخساره، قانون نوع سنگ و همبستگی بین متغیرهای گوسی مورد استفاده، مقادیر شاخص محاسبه می شود. با مقایسه بین واریوگرام و واریوگرام های متقاطع شاخص رخساره ها و واریوگرام های حاصل از افزاز متغیرهای گوسی با استفاده از قانون نوع سنگ، می توان مدل واریوگرام و پارامترهای آن را برای هر متغیر گوسی به دست آورد.

ج- تولید مقادیر گوسی در محل گمانه ها

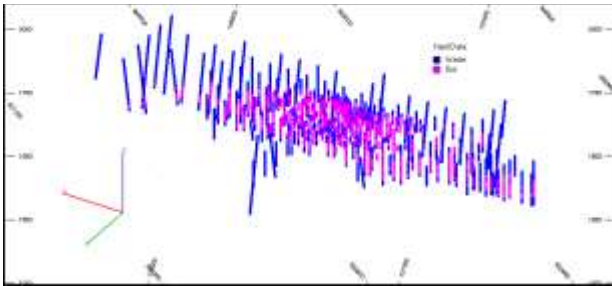
نوع رخساره در فواصل مختلف در طول گمانه مشخص است. نوع رخساره به صورت اعداد گسسته کد می شود. حال این مقادیر باید با توجه به قانون نوع سنگ به مقادیر گوسی با توزیع پیوسته و مدل واریوگرام مد نظر تبدیل شوند.

د- شبیه سازی مقادیر گوسی

زمانی در مرحله قبل مقادیر گوسی در موقعیت نمونه ها تولید شدند، باید با استفاده از این مقادیر و استفاده از یک روش شبیه سازی ساده چون نوارهای دوار، شبکه مورد نظر را شبیه سازی کرد و در آخرین گام، مقادیر پیوسته شبیه سازی شده در گره های شبکه را با توجه به قانون نوع سنگ به مقادیر گسسته نشان دهنده رخساره ها تبدیل کرد.

۲-۲- روش تابع فاصله

تابع فاصله در واقع فاصله یک نقطه از نزدیک ترین داده غیرمشابه است و با مفهوم فاصله از مرز دو حوزه متفاوت است. فاصله می تواند بسته به موقعیت داده درون یا بیرون حوزه، علامت مثبت یا منفی بگیرد اما این علامت باید همواره ثابت باشد. تابع فاصله با دور شدن از محل مرز حوزه در خارج از حوزه به آرامی و با مقادیر مثبت به صورت افزایشی و در درون حوزه با مقادیر منفی افزایشی تغییر می کند. برای تعیین محل مرز، فاصله تا نزدیک ترین داده غیرمشابه برای همه داده های موجود محاسبه می شود. این داده های تابع فاصله سپس برای مشروط سازی درون یابی تابع فاصله بر روی یک شبکه منظم استفاده می شود. فرض می شود که مرز در محل تغییر مقادیر تابع فاصله درون یابی شده مثبت و منفی قرار گرفته است [۱۰]. اما در محل این مرزها عدم قطعیتی وجود دارد که به پیشنهاد منرو و دویچ برای ارزیابی این عدم قطعیت پارامترهای C و β را باید کالیبره کرد که C



شکل ۳- نمایش داده‌ها به تفکیک کانسنگ (رنگ صورتی) و باطله (رنگ آبی)

۴- مطالعه موردی

۴-۱- روش تک گوسی

۴-۱-۱- منحنی و ماتریس سهم کانسنگ و باطله

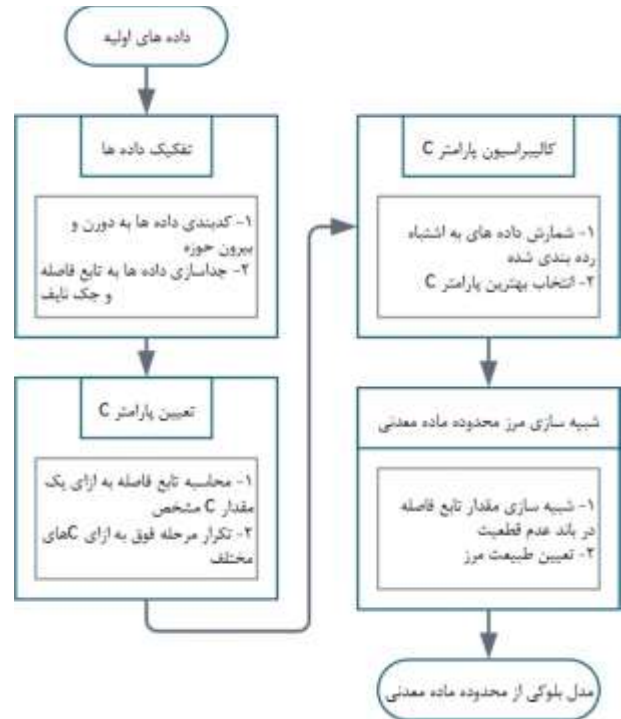
الگوریتم کلی شبیه‌سازی چند گوسی برای در نظر گرفتن ناپایایی رخساره‌ها در جهات مختلف از ابزاری به نام منحنی‌ها یا ماتریس‌های سهم استفاده می‌کند. منحنی‌های سهم، تغییرات سهم رخساره‌ها نسبت به یکدیگر را در جهات مختلف نشان می‌دهد. ماتریس سهم رخساره‌ها نیز درصد سهم هر رخساره را در شبکه‌ای منظم و سه‌بعدی ارائه می‌دهد.

۴-۱-۲- قانون نوع سنگ

در روش تک گوسی با استفاده از یک تابع گوسی تصادفی و n حد آستانه می‌توان کانسارهای دارای ساختار ساده دوگانه و چندگانه ترتیبی را به سادگی مدل کرد. در مطالعه موردی این پژوهش هدف اصلی مدل کردن مرز ماده معدنی است. از این رو با مدل کردن محدوده کانسنگ می‌توان در واقع محل مرز آن را درون‌یابی و عدم قطعیت مرتبط با آن را محاسبه کرد.

۴-۱-۳- محاسبه حدود آستانه‌ای

مقادیر حدود آستانه‌ای برای حالت تک گوسی با به کارگیری کد نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB قابل محاسبه است [۱۷]. این مقادیر برای حالت پایا محاسبه می‌شوند. از آنجا که برنامه نوشته شده حدود آستانه‌ای و قانون نوع سنگ را به صورت ناحیه‌ای به روز می‌کند [۱۸]، ناپایایی در هر جهت ممکن به صورت خودکار در محاسبات منظور می‌شود. در اینجا به علت سادگی روابط، حد آستانه با استفاده از سهم هر واحد محاسبه می‌شود که در واقع سهم هر واحد از داده‌های تجربی به دست می‌آید. در شکل ۴ سهم هر واحد بر روی نمودار نرمال نمایش داده شده است.



شکل ۲- الگوریتم روش تابع فاصله

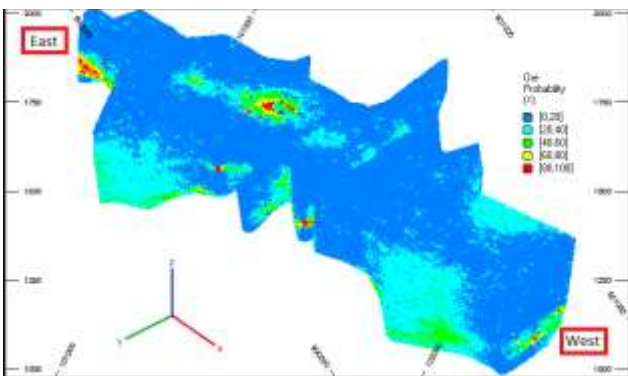
بعد از محاسبه تابع فاصله برای هر نمونه این داده‌های تابع فاصله را می‌توان بر روی یک شبکه منظم با استفاده از یک تخمین‌گر مانند کریجینگ یا تخمین معکوس فاصله، درون‌یابی کرد. فرض می‌شود که مرز در محل انتقال بین مقادیر مثبت و منفی تابع فاصله تخمین زده قرار دارد [۱۶].

۳- معرفی داده‌ها

آنومالی شماره یک کانسار گل‌گهر در طی فازهای اکتشافی مختلف توسط گمانه‌های قائم و شیب‌دار نمونه‌برداری شده است. عملیات حفاری بر روی یک شبکه مستطیلی و در محدوده‌ای با ابعاد ۲۴۰۰ متر شرقی-غربی، ۱۱۰۰ متر شمالی-جنوبی و عمق ۴۳۰ متر با متوسط فاصله‌داری ۱۰۰ متر انجام شده است. در مجموع از ۳۱۹۲۲ متر حفاری انجام گرفته، ۱۱۵۷۰ داده با فاصله نمونه‌برداری ۳ متر در طول گمانه‌ها وجود دارد. در همه نمونه‌ها نوع رخساره سنگی که با استفاده از روابط تجربی به دست آمده است، مشخص است. در مجموع آنالیز عیار آهن، گوگرد و فسفر بر روی ۴۶۶۱ عدد از نمونه‌ها وجود دارد. در شکل ۳ نمایش سه‌بعدی از گمانه‌ها به تفکیک کانسنگ و باطله نمایش داده شده است.

در نهایت با توجه به قانون نوع سنگ به کار رفته در شبیه سازی، این مقادیر پیوسته به مقادیر گسسته نشان دهنده واحدهای کانسنگ و باطله تبدیل خواهند شد.

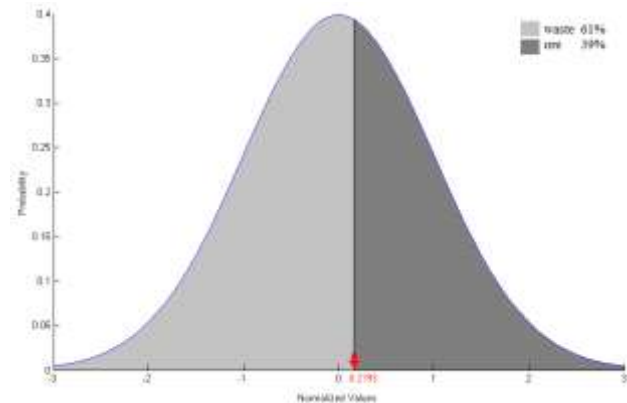
پس از آماده شدن پارامترهای لازم، تعداد ۱۰۰ بار شبیه سازی بر روی مدل بلوکی از پیش تعیین شده اجرا شد. در شکل ۶ نمایش سه بعدی از احتمال رخداد واحد کانسنگ به دست آمده از تحقق های تک گوسی مشاهده می شود. در مجموع روند کانی سازی یک روند شرقی- غربی است. مرز کانسنگ- باطله به خوبی مشخص است اما به ازای تحقق های مختلف شبیه سازی مکان آن به میزان چند پیکسل جابه جا می شود.



شکل ۶- احتمال رخداد واحد کانسنگ در کانسار گل گهر

۴-۱-۶- اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی تک گوسی

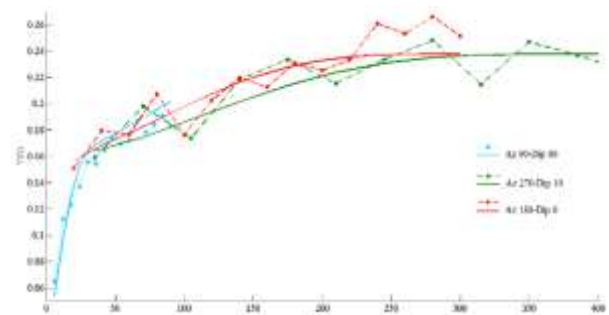
برای بررسی دقت و صحت مدل واحدهای شبیه سازی شده به روش تک گوسی، تعدادی از گمانه ها از داده های به کار رفته در شبیه سازی حذف شدند تا از آن ها برای اعتبارسنجی نتایج استفاده شود. این گمانه ها در قسمت میانی کانسار واقع شده اند. شکل ۷ مقطعی از این گمانه را نشان می دهد. در این تصویر تغییرات واحد سنگی در جهت قائم نشان داده شده است. گمانه ۱ از سطح ارتفاعی ۱۷۵۰ متر شروع شده و تا عمق ۱۶۰۰ متر ادامه یافته است. این گمانه از سطح تا عمق حدود ۱۷۲۵ متر در واحد کانسنگ قرار دارد و از آن پس داخل واحد باطله قرار می گیرد و باز در بخش انتهایی وارد بخش باطله می شود. گمانه ۲ از سطح ارتفاعی ۱۷۵۰ متر شروع شده و تا عمق ۱۶۳۰ متر ادامه یافته است. این گمانه از سطح تا عمق حدود ۱۶۵۰ متر در واحد کانسنگی است و از آن پس داخل واحد باطله قرار می گیرد. در همه این گمانه ها در بخش میانی واحد کانسنگ حضور دارد. همخوانی بالای واحدهای سنگی در گمانه ها و نتایج شبیه سازی، موید دقت بالای مدل تک گوسی در باز تولید این واحدها است.



شکل ۴- سهم هر واحد و حد آستانه ای

۴-۱-۴- اعمال قانون نوع سنگ و تعیین پارامترهای توابع گوسی

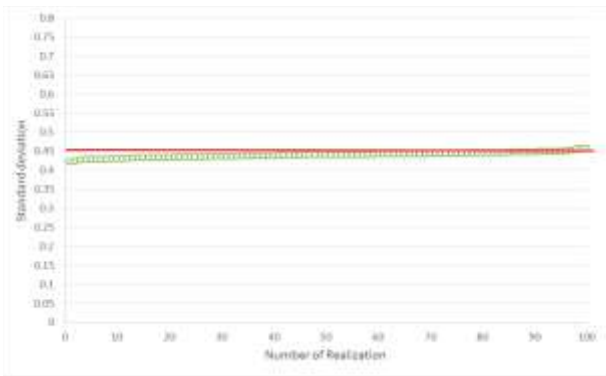
برای به دست آوردن پارامترهای توابع گوسی از روشی مبتنی بر تکرار و قیاس استفاده می شود. ابتدا واریوگرام شاخص متمرکز هر واحد محاسبه می شود، سپس واریوگرام های شاخص متقابل بین دو واحد نیز محاسبه خواهد شد. با کوتاه سازی تابع گوسی و برازش واریوگرام های شاخص به دست آمده از آن با واریوگرام های شاخص متمرکز تجربی به دست آمده از داده های گمانه، می توان قیاسی بین آن ها انجام داد. پارامترهای توابع گوسی آنقدر تغییر داده می شود تا بهترین برازش حاصل شود (شکل ۵).



شکل ۵- برازش مدل بر واریوگرام تجربی در سه جهت اصلی

۴-۱-۵- اجرای الگوریتم اصلی شبیه سازی تک گوسی

پس از اینکه تمام پارامترهای مورد نیاز برای شبیه سازی در مراحل قبل آماده شد. این مقادیر کد شده با استفاده از روش نمونه گیر گیس به مقادیر پیوسته گوسی تبدیل می شوند. در اجرای عملیات شبیه سازی عمل شرطی سازی به داده های سخت و نرم کنترل می شود. مقادیر پیوسته تولید شده با روش نوارهای دوار^۵ بر روی شبکه مورد تخمین شبیه سازی خواهند شد.



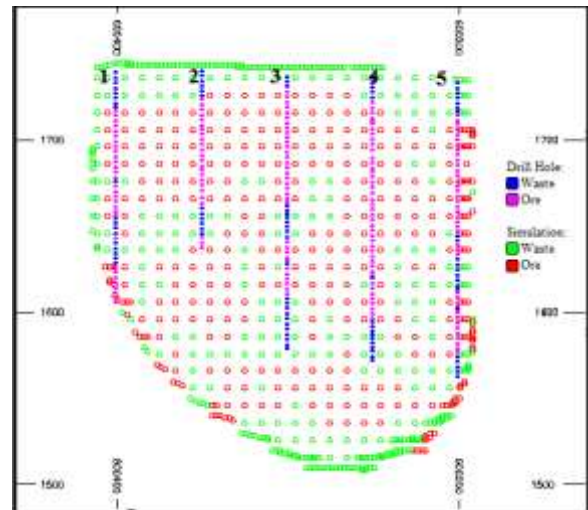
شکل ۹- تغییرات کم میانگین و انحراف معیار سهم واحدهای شاخص کانسار گل گهر به ازای تحقق‌های مختلف

ب- اعتبارسنجی زمین آماری نتایج شبیه‌سازی تک گوسی

برای بررسی چگونگی عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی در بازتولید ناهمسانگردی موجود در واحدهای مختلف می‌توان از بررسی و مقایسه واریوگرام‌های جهتی محاسبه شده در جهات اصلی ناهمسانگردی هر رخساره با واریوگرام‌های شاخص معادل (به دست آمده از تحقق‌های مختلف) در همان جهات ناهمسانگردی استفاده کرد. در این تحقیق به دلیل اهمیت موضوع شبیه‌سازی واحدهای کانسنگ و باطله، به مقایسه ناهمسانگردی تجربی این واحدها با نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش تک گوسی پرداخته شده است. در شکل ۱۰ مقایسه واریوگرام‌های شاخص تجربی این واحدها با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در سه جهت اصلی ناهمسانگردی مشاهده می‌شود. در واریوگرام‌های شاخص شبیه‌سازی شده در جهات اصلی ناهمسانگردی واحدها، بازتولید دامنه تاثیر و سقف واریوگرام‌ها مشهود است. از آنجا که سقف واریوگرام‌های شاخص در ارتباط با احتمال رخداد آن رخساره بوده و به نوعی بیان‌کننده سهم آن رخساره در تحقق است، بازتولید آن در نتایج شبیه‌سازی مهم است. در شکل ۱۰ از بالا به پایین به ترتیب بیشترین دامنه تاثیر، دامنه تاثیر متوسط و کوتاه‌ترین دامنه تاثیر واحدها مشاهده می‌شود.

ج- انتخاب بهترین سناریو شبیه‌سازی شده

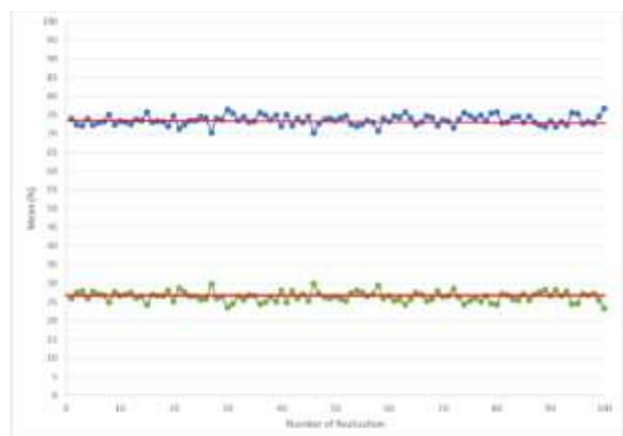
روش شبیه‌سازی تک گوسی در واقع روشی احتمالی بر مبنای شبیه‌سازی‌های زمین آماری است که برای مدلسازی حوزه‌های کانسنگ و باطله در اینجا استفاده شده است. در واقع این الگوریتم امکان مدل کردن مرز بین واحدهای زمین‌شناسی (در اینجا کانسنگ-باطله)، پیوستگی فضایی (واریوگرام شاخص) و اطلاعات نمونه‌ها را به خوبی اطلاعات زمین‌شناسی در هر یک از واحدها میسر می‌سازد. اجرای الگوریتم تک گوسی ساده است



شکل ۷- مقطعی از پنج گمانه و مدل شبیه‌سازی شده همراه با نمایش نوع واحدها

الف- اعتبارسنجی آماری نتایج شبیه‌سازی تک گوسی

یکی از روش‌های کنترل کردن شبیه‌سازی‌های شاخص که با مقادیر کد شده سر و کار دارند، مقایسه میانگین سهم هر رخساره در تحقق‌های مختلف با میانگین سهم هر رخساره برآورد شده از داده‌های تجربی است. اگر در تحقق‌های سهم رخساره‌های نامتعارف تولید شده باشد، با کنترل این نمودارها می‌توان این تحقق را شناسایی و حذف کرد. همگرایی میانگین و واریانس سهم رخساره‌ها حول مقادیر تجربی محاسبه شده از داده‌های گمانه، نشان‌دهنده دقت شبیه‌سازی در بازتولید پارامترهای آماری مقادیر شاخص دارد [۱۹].



شکل ۸- تغییرات کم میانگین سهم واحدهای شاخص کانسار گل-گهر به ازای تحقق‌های مختلف

کانسنگ را دارد، اما این بدان معنی نیست که این سناریو به طور قطع بهترین سناریو برای برنامه های آتی است.

جدول ۱- بیشترین و کمترین تناژ حاصل از نتایج شبیه سازی

بیشترین حجم	کمترین حجم	میانه حجم	متوسط حجم
۲۷	۱۰۰	۹۲ و ۳۵	-
۱۰۴	۸۶	۹۴	۹۴

شماره تحقق
حجم ماده معدنی (میلیون متر مکعب)

برای انتخاب بهترین سناریو باید میزان دقت و صحت نتایج بررسی شود به این منظور می توان از روش محاسبه ماتریس طبقه بندی^۴ بهره جست. این ماتریس با شمارش تعداد داده هایی که به درستی شبیه سازی شده اند، دقت هر یک از تحقق های روش تک گوسی را اندازه گیری و سپس بهترین سناریو را بر مبنای دقت بیشتر انتخاب می کند. بدین منظور با استفاده از یک الگوریتم ساده در محیط MATLAB مقدار شبیه سازی شده مربوط به محل هر یک از داده های اولیه تعیین می شود. مقادیر شبیه سازی شده به ازای هر یک از تحقق ها با مقادیر واقعی داده های اولیه مقایسه و ماتریس پیوستگی تشکیل می شود. مجموع مقادیر مولفه های قطری برابر با تعداد داده های درست تخمین زده شده است که با تقسیم این مقدار بر تعداد کل داده های اولیه، دقت شبیه سازی به دست می آید (شکل ۱۱).

		نتایج شبیه سازی	
		کانسنگ	باطله
داده های واقعی	کانسنگ	درست	غلط
	باطله	غلط	درست

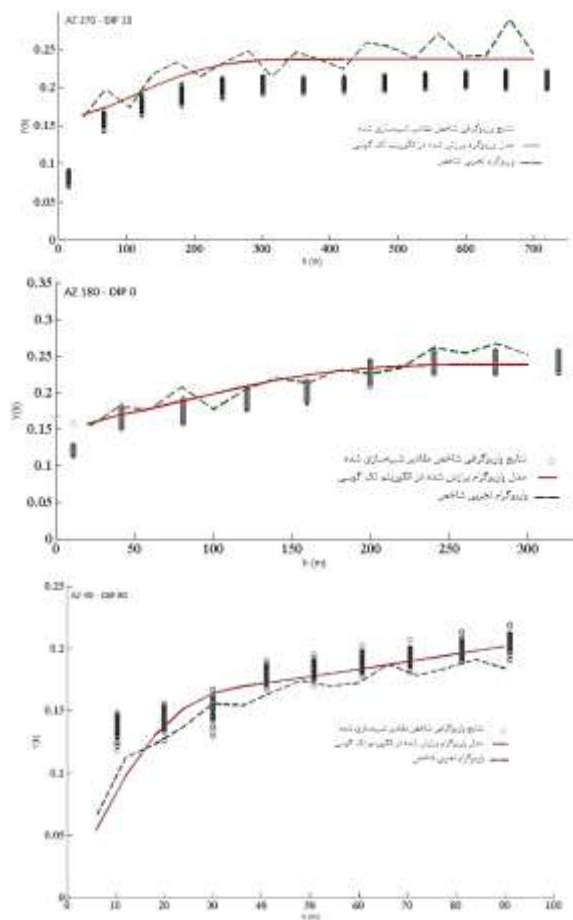
شکل ۱۱- تشکیل ماتریس طبقه بندی بر اساس داده های درست و غلط شبیه سازی شده

دقت نتایج با استفاده از ماتریس طبقه بندی با رابطه ۳ تعیین می شود.

$$Accuracy (ACC) = \frac{\sum True Waste + \sum True Ore}{\sum Total Population} \quad (3)$$

و منجر به تولید تحقق های واقع گرایانه از توزیع واحد موردنظر در درون کانسار است، سپس این تحقق ها برای محاسبه احتمال رخداد واحدهای مختلف در محدوده موردنظر و برای تخمین عیاری برای هر واحد استفاده می شوند.

راه های مختلفی برای نشان دادن عدم قطعیت مرز مدل شده وجود دارد. الگوریتم تک گوسی تحقق های زیادی از حوزه ها را محقق می سازد. هر یک از این تحقق ها مرز مشخصی بین حوزه ها را تعیین می کند که لزوماً این مرزها به ازای تحقق های مختلف بر هم منطبق نیستند. عدم قطعیت این مرزها را می توان با استفاده از میانگین تحقق ها بررسی کرد.



شکل ۱۰- وارپوگرام های شاخص تجربی و شبیه سازی واحدهای کانسنگ و باطله در سه جهت اصلی ناهمسانگردی

در واقع هر تحقق یک سناریو برای تخمین تناژ کانسنگ و عیار آهن است که بر روی اقتصاد معدن، طرح ها و برنامه های قبلی معدن تاثیر خواهد گذاشت. جدول ۱ سناریوهای با بیشترین و کمترین تناژ کانسنگ را برای نتایج شبیه سازی نشان می دهد. همانگونه که مشخص شده است تحقق شماره ۲۷ بیشترین تناژ

است قرار بگیرد. این کار برای مقادیر C برابر با ۵ و ۱۰ تا ۴۰ با فواصل ۵ تایی تکرار شده است. همانطور که C افزایش می‌یابد، مقادیر داده‌ها تغییر می‌کند و اندازه باند عدم قطعیت مرز افزایش می‌یابد. لازم است که برای تعیین مرز یک مقدار مناسب C به دست آید.

۴-۲-۲- کالیبراسیون تابع فاصله با استفاده از پارامتر C

از پارامتر C برای کنترل میزان عدم قطعیت استفاده می‌شود. بخشی از داده‌های اولیه به منظور کالیبراسیون تابع فاصله، حذف شدند. حال با استفاده از مقادیر تابع فاصله به دست آمده در محل نمونه‌های باقیمانده، مقدار تابع فاصله در محل داده‌های جک‌نایف استفاده می‌شوند، سپس مجموعه‌ای از داده‌های تخمین خورده و واقعی در محل داده‌های جک‌نایف وجود دارد [۱۶]. چهار خروجی ممکن از مقایسه مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده بر اساس شکل به شرح زیر است:

- داده واقعی خارج از حوزه است، اما داخل حوزه تخمین خورده است.

- داده واقعی خارج است و خارج از حوزه تخمین خورده است.

- داده واقعی داخل حوزه است، اما خارج از حوزه تخمین خورده است.

- داده واقعی داخل حوزه است و داخل حوزه تخمین خورده است.

مجموع مقادیر ۱ و ۳ برابر با تعداد داده‌های به اشتباه رده‌بندی شده است که با افزایش مقدار پارامتر کالیبراسیون تعداد این داده‌ها کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۳ تعداد داده‌های به اشتباه رده‌بندی شده بر حسب مقادیر مختلف C نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش C این مقدار کاهش می‌یابد و در مقادیر C برابر با ۲۰ به بعد این مقدار کاهش قابل توجهی دارد.

در

شکل ۱۴ درصدی از حجم کانسار که داخل حوزه تخمین خورده است (کانسنگ) برای این مقادیر به دست آمده است. مقدار واقعی این درصد برابر با ۲۷ درصد است در نتیجه با توجه به اینکه C برابر با ۲۵ تا حد قابل قبولی تعداد داده‌های به اشتباه رده‌بندی شده را کاهش داده است و درصد کانسنگ آن به واقعیت داده‌ها نزدیک است به عنوان بهترین مقدار C در نظر گرفته می‌شود.

ماتریس طبقه‌بندی برای هر ۱۰۰ تحقق شبیه‌سازی محاسبه شده است. به علت عدم توزیع همگن بخش باطله و کانسنگ و سهم متفاوت هر یک از این دو حوزه، تحقق بهترین حالت ممکن است که بیشترین دقت را داشته باشد که برابر با مجموع نتایج درست طبقه‌بندی شده است، اما در اینجا حذف تعیین محدوده ماده معدنی است. در نتیجه تعداد داده‌های کانسنگ به درست رده‌بندی شده اهمیت دارد. بهترین سناریوی شبیه‌سازی شده تحقق شماره ۳۸ است که بیشترین دقت در طبقه‌بندی بخش کانسنگ را دارد و ماتریس طبقه‌بندی آن به شرح زیر است:

$$\begin{pmatrix} 6104 & 955 \\ 768 & 3742 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 86.50 & 13.50 \\ 17.03 & 82.97 \end{pmatrix}$$

بخش باطله ۸۶/۵۰ درصد و بخش کانسنگ ۸۲/۹۷ درصد به درستی شبیه‌سازی شده‌اند.

۴-۲-۲- روش تابع فاصله

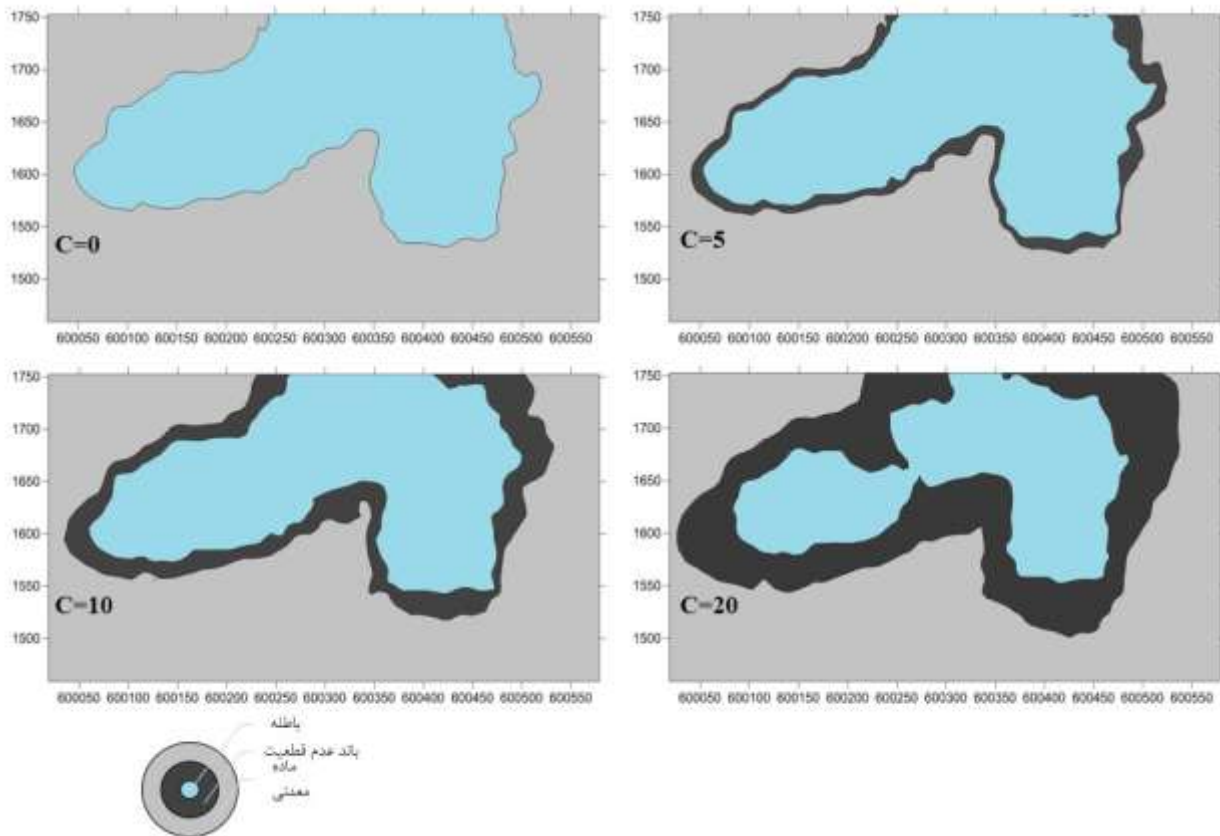
۴-۲-۱- پارامتر C

کالیبراسیون تابع فاصله و به دست آوردن بهترین محل مرز ماده معدنی، بر اساس رابطه ۴ و به ازای مقادیر مختلف C مقدار تابع فاصله در محل نمونه‌ها به دست می‌آید که به این مقادیر در واقع تابع فاصله اصلاح شده گفته می‌شود.

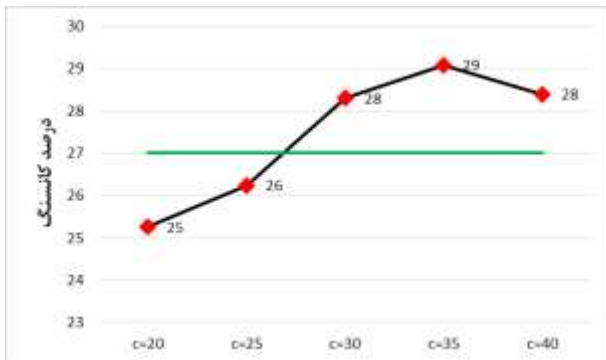
$$\hat{d}f(u_{\alpha}) = \begin{cases} df(u_{\alpha}) + C & \text{if } i(u_{\alpha}) = 0 \\ df(u_{\alpha}) - C & \text{if } i(u_{\alpha}) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

با افزایش مقدار C، اختلاف بین مقادیر مثبت و منفی تابع فاصله افزایش می‌یابد. پس از اعمال پارامتر C بر روی داده‌ها، تابع فاصله اصلاح شده درون‌یابی می‌شود. تخمین‌های تابع فاصله اصلاح شده بزرگتر از C خارج از حوزه فرض می‌شوند. تخمین‌های تابع فاصله اصلاح شده کوچکتر از -C داخل حوزه فرض می‌شوند. تخمین تابع فاصله اصلاح شده در بازه C و -C در واقع دامنه‌ای از عدم قطعیت مرز است که مرز ماده معدنی می‌تواند در این دامنه قرار گیرد.

باند عدم قطعیت برای مقادیر مختلف C در شکل نشان داده شده است. مقدار C یک مقادیر مثبت و منفی تابع فاصله را یک واحد تغییر می‌دهد. مقادیر تابع فاصله اصلاح شده درون‌یابی می‌شوند. هر تخمین تابع فاصله اصلاح شده بزرگتر از یک خارج از حوزه (خاکستری روشن) و هر تخمین تابع فاصله اصلاح شده کوچکتر از منفی یک درون حوزه (خاکستری تیره) در نظر گرفته می‌شود. نواحی سیاه رنگ تخمین‌های تابع فاصله اصلاح شده بین ۱ و -۱ نشان‌دهنده ناحیه‌ای است که درون آن مرز ممکن



شکل ۱۲- باند عدم قطعیت برای مقادیر مختلف C در یک مقطع مشخص

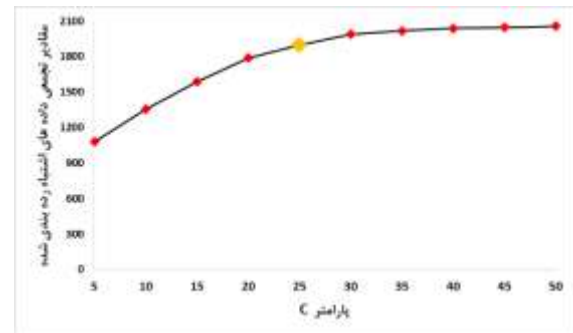


شکل ۱۴- درصد کانسنگ برای مقادیر مختلف C

۴-۲-۳- شبیه سازی مرز کانسنگ- باطله

باند عدم قطعیت (مقادیر بین C و -C) مرز باید در حدی باشد که هم عدم قطعیت را در نظر بگیرد و هم اینکه پهنای نه چندان زیاد و نه چندان کمی داشته باشد (شکل ۱۷).

به این منظور در همان چارچوب روش تابع فاصله در نواحی که مقدار آن بین C و -C تخمین زده شده است، مقدار تابع فاصله شبیه سازی می شود. نقاطی که مقدار تابع فاصله شبیه سازی شده



شکل ۱۳- تعداد داده های به اشتباه زده بندی شده بر حسب مقادیر مختلف C

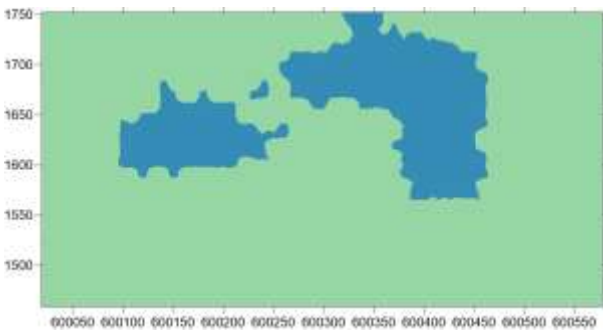
پس از تعیین C برای محاسبه تابع فاصله اصلاح شده در همه نقاط نمونه استفاده می شود. پارامتر C به مقادیر مثبت تابع فاصله افزوده می شود و از مقادیر منفی تابع فاصله کم می شود، سپس تابع فاصله اصلاح شده درون یابی می شود. فرض می شود که مرز ماده معدنی در ناحیه انتقال تابع فاصله بین ۲۵ و -۲۵ قرار گرفته باشد (شکل ۱۵ و شکل ۱۶).

تخمین زده شده بزرگتر از C به طور قطع خارج از حوزه و مقادیر تخمین زده شده کوچکتر از -C به طور قطع داخل حوزه قرار دارند [۳۱].

برای تعیین اینکه موقعیت u داخل یا خارج از حوزه قرار دارد، باید مقادیر شبیه‌سازی شده و تخمین زده شده با یکدیگر مقایسه شوند [۳۱]:

$$i(u) = \begin{cases} \text{inside} & \text{if } df^l(u) > \hat{d}f(u) \\ \text{outside} & \text{if } df^l(u) < \hat{d}f(u). \end{cases}$$

محل شبیه‌سازی شده مرز در مقطع مورد بررسی در **Error!** Reference source not found. مشاهده می‌شود.



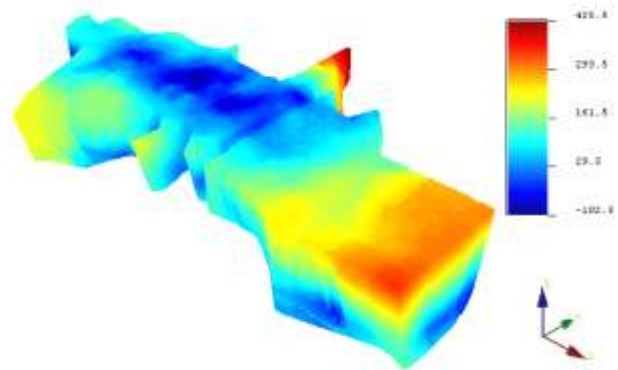
شکل ۱۸- محدوده مدل‌سازی شده ماده معدنی

همانگونه که مشاهده می‌شود، روش تک گوسی نسبت به تابع فاصله بالاتری هم در کل طبقه‌بندی و هم در طبقه‌بندی بخش‌های کانسنگی (محدوده ماده معدنی) دارد.

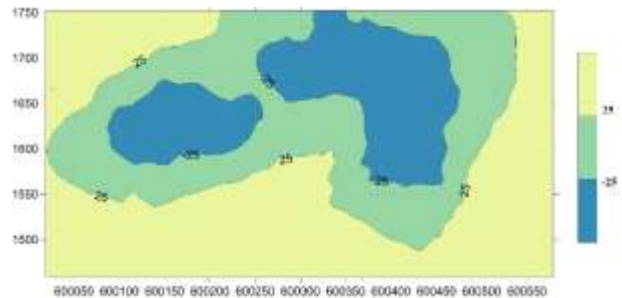
جدول ۲- مولفه‌های ماتریس همبستگی در روش تابع فاصله و تک گوسی

دقت تخمین	دقت تخمین بخش کانسنگی	دقت تخمین کلی	
۸۶٫۵۰	۸۲٫۹۷	۸۵٫۱۱	روش تک گوسی
۴۲٫۴۲	۵۷٫۵۸	۶۷	روش تابع فاصله

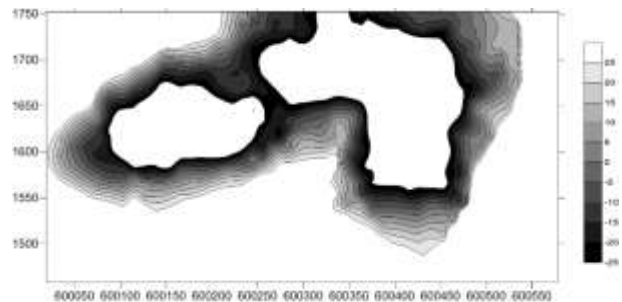
برای مقایسه کیفی نتایج، در یک مقطع مشخص شمالی-جنوبی در X برابر با ۱۰۱۵۰۰ متر، نتایج شبیه‌سازی تک گوسی و تابع فاصله با داده‌های اولیه حفاری‌های اکتشافی مقایسه شده است. شکل ۱۸ مقطع شمالی-جنوبی از کانسار است که انطباق بالایی بین مقادیر شبیه‌سازی شده در روش تک گوسی را با داده‌های اولیه نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشخص شده



شکل ۱۵- مقدار تابع فاصله با پارامتر ۲۵ در همه توده کانساری



شکل ۱۶- باند عدم قطعیت برای C برابر با ۲۵



شکل ۱۷- مقادیر بین ۲۵ تا ۲۵ در باند عدم قطعیت

و تخمین زده شده آن‌ها با یکدیگر برابر باشد معادل با مرز کانسنگ- باطله است. برای شبیه‌سازی محل مرز، L تحقق از تابع فاصله بین مقادیر C و -C با استفاده از مقدار انحرافی گوسی، $y^l(u)$ ، بر اساس فرمول ۴، شبیه‌سازی می‌شود.

$$df^l(u) = 2CG^{-1}(y^l(u)) - C, \quad (4)$$

$$l = 1, \dots, L$$

که در آن:

$df^l(u)$ مقدار تابع فاصله شبیه‌سازی

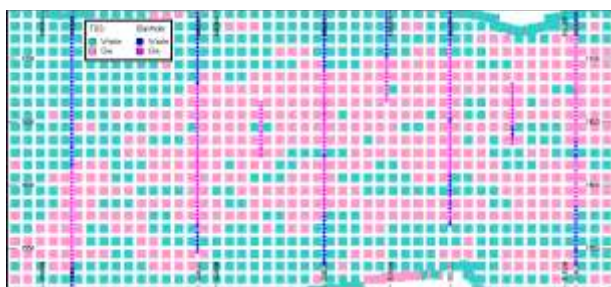
$y^l(u)$ مقدار تابع نرمال استاندارد شبیه‌سازی شده

G^{-1} توزیع تجمعی مقدار نرمال استاندارد $y^l(u)$

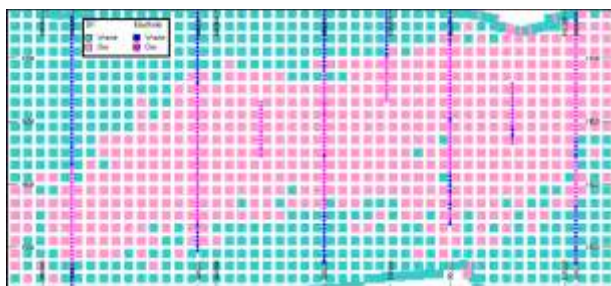
تنها لازم است که این شبیه‌سازی در جایی که مقدار تابع فاصله تخمین زده شده بین C و -C است انجام شود زیرا مقادیر

شکل ۲۰ یک مقطع شرقی- غربی از نتایج روش تک گوسی است که به خوبی کشیدگی کانسار را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که توده ماده معدنی دارای کشیدگی شرقی- غربی با شیب حدود ۱۰ درجه به سمت شرق است که به خوبی با داده‌های گمانه‌های اکتشافی و اطلاعات زمین‌شناسی موجود مطابقت دارد. این شکل نیز مطابقت بالای روش تک گوسی در مقیاس کم را نشان می‌دهد. در واقع این روش مشروط‌سازی به داده‌های اولیه را به خوبی انجام داده است. روش تک گوسی همزمان با بازتولید شرایط موجود در داده‌های اولیه قادر به بازتولید تغییرپذیری‌های در کوچکترین ابعاد کانسار است.

شکل ۲۱ مطابقت نتایج تابع فاصله را با داده‌های گمانه نشان می‌دهد. همچنین روند شرقی- غربی با شیب به سمت شرق را بازتولید کرده است. در نتایج تابع فاصله تا حد قابل قبولی مطابقت وجود دارد، اما مشروط‌سازی نتیجه نهایی آن به داده‌های اولیه به خوبی روش تک گوسی نیست.



شکل ۲۰- مقایسه کیفی نتایج شبیه‌سازی تک گوسی با گمانه‌های اکتشافی، در مقطع شرقی- غربی در $Y=600300$ m

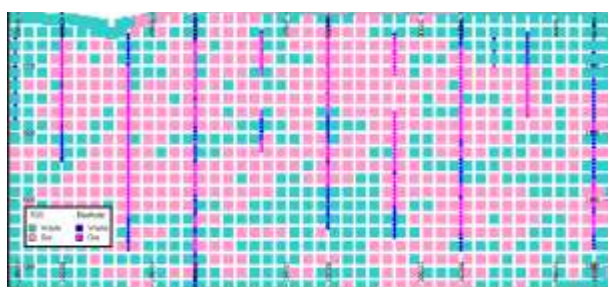


شکل ۲۱- مقایسه کیفی نتایج تابع فاصله با گمانه‌های اکتشافی، در مقطع شرقی- غربی در $Y=600300$ m

۵- نتیجه‌گیری

قبل از تخمین تناژ و عیار، مدلسازی زمین‌شناسی برای تفکیک کانسار به زیرحوزه‌هایی به نام واحدهای زمین‌شناسی استفاده می‌شود. این افراز منجر به شناخت بهتر توزیع عیاری درون کانسار می‌شود. شبیه‌سازی‌های احتمالی یکی از بهترین روش‌های مدلسازی دامنه‌ها درون کانسار ماده معدنی‌اند. در این

روش تک گوسی به خوبی قادر به مشروط‌سازی نتایج خود به داده‌های اولیه است. این روش کوچکترین تغییرات را در نتایج خود لحاظ می‌کند. مطابق شکل در گمانه‌هایی که بخش عمده آن از کانسنگ و بخش‌های جزئی از باطله تشکیل شده است، روش تک گوسی به خوبی قادر به تولید مقادیر باطله در اطراف بخش باطله بوده است. در واقع می‌توان گفت که این روش قادر به بازتولید کوچکترین تغییرپذیری‌ها است. در شکل ۱۹ مرز ماده معدنی پیوستگی بالاتری نسبت به نتایج روش تک گوسی دارد، اما همانگونه که مشاهده می‌شود، در برخی جاها انطباق خوبی با داده‌های اولیه نشان نمی‌دهد. در واقع روش تابع فاصله، انطباق بزرگ مقیاس بهتری نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- مقایسه کیفی نتایج شبیه‌سازی تک گوسی با گمانه‌های اکتشافی، در مقطع شمالی- جنوبی در $X=101500$ m



شکل ۱۹- مقایسه کیفی نتایج تابع فاصله با گمانه‌های اکتشافی، در مقطع شمالی- جنوبی در $X=101500$ m

۴-۳- مقایسه نتایج

برای مقایسه کمی نتایج، ماتریس طبقه‌بندی، با توجه به بیشترین دقت ممکن در تعیین محدوده ماده معدنی، ماتریس طبقه‌بندی به ازای بهترین نتیجه روش تک گوسی و تابع فاصله محاسبه شده است. روش تک گوسی در بهترین حالت ممکن دارای دقت کلی ۸۵/۱۱ درصد و دقت طبقه‌بندی بخش کانسنگی ۸۲/۹۷ درصد است. روش تابع فاصله دارای دقت کلی ۶۷ درصد و دقت بخش کانسنگی ۵۷/۵۸ درصد است. ماتریس زیر طبقه‌بندی روش تابع فاصله را نشان می‌دهد.

$$\begin{pmatrix} 5074 & 1815 \\ 1985 & 2695 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 73.94 & 26.06 \\ 42.42 & 57.58 \end{pmatrix}$$

In Spe annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers, 1987.

7- Deutsch, J. L.; Deutsch, C. V.; 2014; "A multidimensional scaling approach to enforce reproduction of transition probabilities in truncated plurigaussian simulation", Stochastic environmental research and risk assessment, 28(3), 707-716.

8- Hosseini, Amir Hossein. "Probabilistic modeling of natural attenuation of petroleum hydrocarbons." (2009).

9- Larrondo, Paula, and Clayton V. Deutsch. "Accounting for geological boundaries in geostatistical modeling of multiple rock types." In Geostatistics Banff 2004, pp. 3-12. Springer, Dordrecht, 2005.

10- Wilde, Brandon J., and Clayton V. Deutsch. "Kriging and simulation in presence of stationary domains: developments in boundary modeling." In Geostatistics Oslo 2012, pp. 289-300. Springer, Dordrecht, 2012.

11- Amirpoursaeid, F., & Asghari, O. (2016). "Application of truncated gaussian simulation to ore-waste boundary modeling of Golgohar iron deposit" International Journal of Mining and Geo-Engineering, 50(2), 175-181.

12- Armstrong, Margaret, Alain Galli, Hélène Beucher, Gaelle Loc'h, Didier Renard, Brigitte Doligez, Rémi Eschard, and Francois Geffroy. "Plurigaussian simulations in geosciences". Springer Science & Business Media, 2011.

13- Munroe, Michael J., and Clayton V. Deutsch. "Full calibration of C and β in the framework of vein-type deposit tonnage uncertainty." Center for Computational Geostatistics Annual Report 10 (2008).

14- Munroe, Michael J., and Clayton V. Deutsch. "A methodology for modeling vein-type deposit tonnage uncertainty." Center for Computational Geostatistics Annual Report 10 (2008).

15- Rossi, Mario E., and Clayton V. Deutsch. "Mineral resource estimation". Springer Science & Business Media, 2013.

پژوهش از روش تک گوسی و تابع فاصله برای مدل کردن محدوده ماده معدنی استفاده شد. این دو روش در عین سادگی قابلیت بالایی برای مدل کردن پیچیدگی های زمین شناسی دارند.

کنترل نتایج و بررسی اعتبار آن ها بخشی مهم در در فرآیند تخمین و شبیه سازی است. چنانچه در این تحقیق مشخص شد، اعتبارسنجی کیفی نتایج در کنار اعتبارسنجی های آماری و زمین آماری نشان از نتایج کارآمد روش تک گوسی است.

در مقام مقایسه روش تک گوسی دقت بالایی در شبیه سازی واحد کانسنکی و باطله دارد و دقت آن از روش تابع فاصله بالاتر است. الگوریتم شبیه سازی تک گوسی قادر به بازتولید بهتر ناهمسانگردی در مقیاس های کمتر از تابع فاصله است. الگوریتم تابع فاصله تغییرپذیری و ناهمسانگردی را در مقیاس بزرگتر بهتر بازتولید می کند.

نتایج هر دو روش، وجود روندی شرقی- غربی با شیب حدود ۱۰ درجه به سمت شرق را که منطبق با داده های اولیه است را تایید می کنند.

منابع و مراجع

1- Emery, Xavier, and Karina González. "Incorporating the uncertainty in geological boundaries into mineral resources evaluation." (2007).

[۲] امیرپورسعید، فاطمه؛ «مدلسازی مرز ماده معدنی با استفاده از شبیه سازی های تابع فاصله و تک گوسی»؛ دانشکده مهندسی معدن. ۱۳۹۵، دانشگاه تهران.

3- Alabert, Francois Georges. "Stochastic imaging of spatial distributions using hard and soft information." PhD diss., Stanford University Press, 1987.

4- Journel, A. G., and E. H. Isaaks. "Conditional indicator simulation: application to a Saskatchewan uranium deposit." Journal of the International Association for Mathematical Geology 16, no. 7 (1984): 685-718.

5- Galli, A., H. Beucher, G. Le Loc'h, and B. Doligez. "The pros and cons of the truncated Gaussian method." In Geostatistical simulations, pp. 217-233. Springer, Dordrecht, 1994.

6- Matheron, G., H. Beucher, Ch De Fouquet, A. Galli, D. Guerillot, and Ch Ravenne. "Conditional simulation of the geometry of fluvio-deltaic reservoirs."

16- Wilde, Brandon J., and Clayton V. Deutsch. "A new way to calibrate distance function uncertainty." CCG Annual Report 13 (2011).

17- Emery, Xavier. "Simulation of geological domains using the plurigaussian model: new developments and computer programs." *Computers & Geosciences* 33, no. 9 (2007): 1189-1201.

18- Emery, Xavier, J. M. Ortiz, and A. M. Cáceres. "Geostatistical modelling of rock type domains with spatially varying proportions: application to a porphyry copper deposit." *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 108, no. 5 (2008): 284-292.

19- Srivastava, R. Mohan, Peter Frykman, and Mark Jensen. "Geostatistical simulation of fracture networks." In *Geostatistics Banff 2004*, pp. 295-304. Springer, Dordrecht, 2005.

پی نوشت ها

- 1-Truncated Guassian Simulation
- 2-Distance Function
- 3-Turning Band Method
- 4-Confusion matrix