نشریه علمی پژوهشی «مهندسی معدن» دوره سیزدهم، شماره ۴۰، پاییز ۹۷، صفحه ۹۵ تا ۱۰۷
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME) Vol 13, No 40,2018, pp 95-107

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 زمین‌آماری 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 زمین‌آماری 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

شبیه‌سازی‌های زمین‌شناسی گام اساسی قبل از تخمین عیاری یک کانسار ماده معدنی‌اند که در واقع شامل افراز قطعی کانسار به زیر حوزه‌هایی با مشخصات نسبتا 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 آمار فضایی، 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 زمین‌آماری 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.

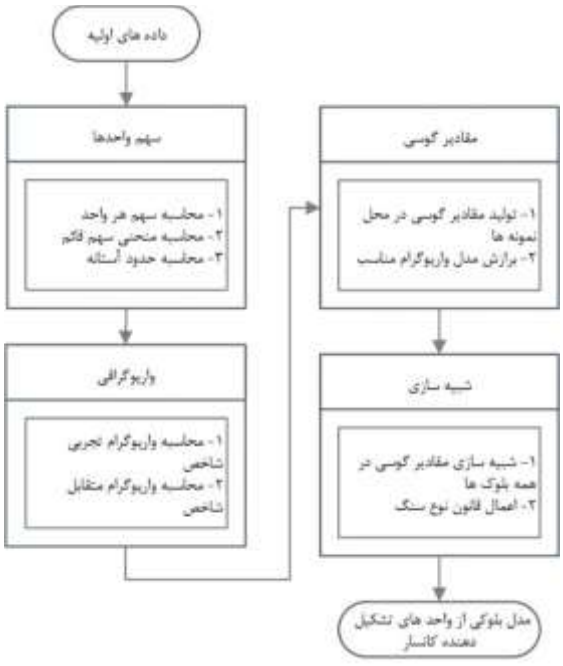
روش تک گوسی(TGS) [۱] قادر است در مقایسه با روشی مانند شاخص ترتیبی مشخصات پیچیده‌تر زمین‌شناسی را مدل کند و در مقایسه با روش‌های پیچیده‌تری مانند شبیه‌سازی چند نقطه‌ای، بدون نیاز به تصویر آموزشی و با استفاده از یک تصویر ساده که ارتباط بین واحدها را مشخص می‌سازد، پیچیدگی‌های زمین‌شناسی را مدل کند [۷]. 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].

کاربرد روش تک گوسی در تعیین محدوده ماده معدنی در کانسار آهن گل‌گهر 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،

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، شبیه‌سازی‌های تک گوسی را کنترل می‌کنند. با توجه به نسبت هر رخساره، قانون نوع سنگ و همبستگی بین متغیرهای گوسی مورد استفاده، مقادیر شاخص محاسبه می‌شود. با مقایسه بین واریوگرام و واریوگرام‌های متقاطع شاخص رخساره‌ها و واریوگرام‌های حاصل از افراز متغیرهای گوسی با استفاده از قانون نوع سنگ، می‌توان مدل واریوگرام و پارامترهای آن را برای هر متغیر گوسی به دست آورد.

ج- تولید مقادیر گوسی در محل گمانه‌ها

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

د- شبیه‌سازی مقادیر گوسی

زمانی در مرحله قبل مقادیر گوسی در موقعیت نمونه‌ها تولید شدند، باید با استفاده از این مقادیر و استفاده از یک روش شبیه‌سازی ساده چون نوارهای دوار، شبکه مورد نظر را شبیه‌سازی کرد و در آخرین گام، مقادیر پیوسته شبیه‌سازی شده در گره‌های شبکه را با توجه به قانون نوع سنگ به مقادیر گسسته نشان‌دهنده رخساره‌ها تبدیل کرد.

۲-۲- روش تابع فاصله

تابع فاصله در واقع فاصله یک نقطه از نزدیک‌ترین داده غیرمشابه است و با مفهوم فاصله از مرز دو حوزه متفاوت است. فاصله می‌تواند 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 افزاینده و در درون حوزه با مقادیر منفی افزاینده تغییر می‌کند. برای تعیین محل مرز، فاصله تا نزدیک‌ترین داده غیرمشابه برای همه داده‌های موجود محاسبه می‌شود. این داده‌های تابع فاصله سپس برای مشروط‌سازی درون‌یابی تابع فاصله بر روی یک شبکه منظم استفاده می‌شود. فرض می‌شود که مرز در محل تغییر مقادیر تابع فاصله درون‌یابی 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 پهنای باند عدم قطعیت را و β اریب بودن آن را کنترل می‌کند. این پارامترها برای به دست آوردن عدم قطعیت مناسب بهینه می‌شوند که بهینه‌سازی این پارامترها فرآیندی هزینه‌بر است و نیازمند مدل‌های چندگانه و چند تابع هدف است [۱۳, ۱۴].

روش‌های زمین‌آماری تصادفی مانند شبیه‌سازی شاخص، (چند)گوسی کوتاه شده یا دیگر روش‌ها اغلب مدل‌های بسیار تصادفی ایجاد می‌کنند، اما روش تابع فاصله امکان مدلسازی محل مرزها و هم‌زمان امکان ارزیابی عدم قطعیت را میسر می‌سازد. این عدم قطعیت به صورت فضایی از طریق یک منطقه (یا پهنای باند) قابل تعیین که باید کالیبره شود مشخص می‌شود [۱۵]. برای کالیبراسیون عدم قطعیت تابع فاصله یک مجموعه داده لازم است که به صورت داخل و خارج حوزه کدبندی شود (رابطه ۱) [۱۰].

$$i(u_\alpha)=\begin{cases}1 & if\ \ domain\ of\ \ interest\ present\ at\ u_\alpha\\ 0 & otherwise\end{cases}\qquad \alpha=1,\dots,n \tag{۱}$$

که در آن:

u بردار موقعیت

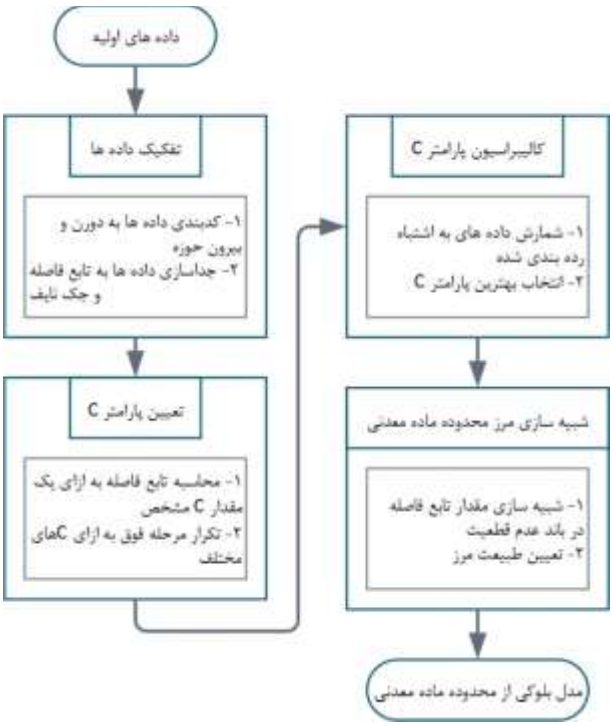
α اندیس نمونه

n تعداد نمونه‌ها

برای هر نمونه u_α نزدیک‌ترین داده در حوزه متفاوت $u_{\alpha'}$ به گونه‌ای تعیین می‌شود 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 اینصورت علامت مثبت می‌گیرد (رابطه۲) [۱۰]:

$$df(u_\alpha)=\begin{cases}+(u_\alpha-u_{\alpha'}) & if\ \ i(u_\alpha)=0\\ -(u_\alpha-u_{\alpha'}) & if\ \ i(u_\alpha)=1\end{cases} \tag{۲}$$

داده‌های تابع فاصله وابسته به فاصله از نزدیک‌ترین مرز مشاهده شده‌اند و نه به نزدیک‌ترین مرز واقعی. این روش برای سیستم‌های دودویی طراحی شده است که نقاط در داخل یا خارج حوزه قرار دارند. حوزه‌های چندگانه را می‌توان به صورت چندگانه و سلسله مراتبی مدل کرد. این روش برای حالت چند حوزه مختلط کاربرد ندارد (شکل ۲)[۱۰].

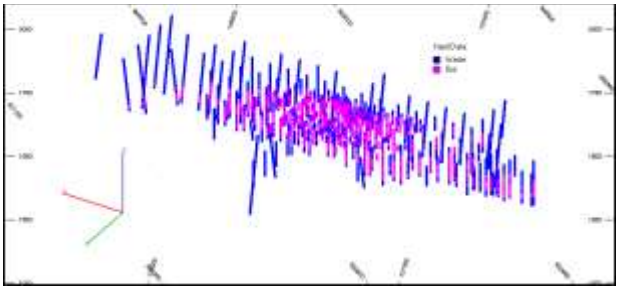


شکل ۲- الگوریتم روش تابع فاصله

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 عیاری آهن، گوگرد و فسفر بر روی ۴۶۶۱ عدد از نمونه‌ها وجود دارد. در شکل ۳ نمایی سه‌بعدی از گمانه‌ها به تفکیک کانسنگ و باطله نمایش داده شده است.



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

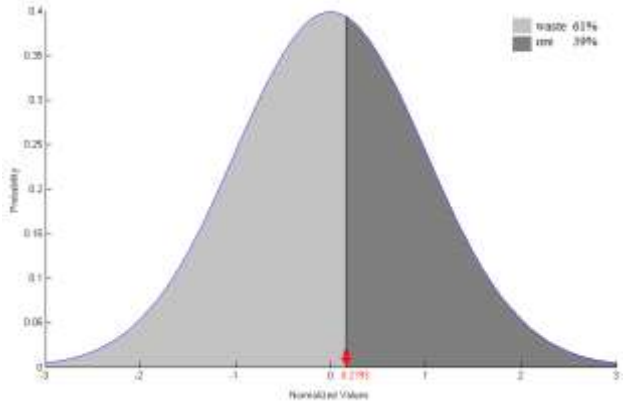
الگوریتم کلی شبیه‌سازی چند گوسی برای در نظر گرفتن ناپایایی رخساره‌ها در جهات مختلف از ابزاری به نام منحنی‌ها یا ماتریس‌های سهم استفاده می‌کند. منحنی‌های سهم، تغییرات سهم رخساره‌ها نسبت به یکدیگر را در جهات مختلف نشان می‌دهد. ماتریس سهم رخساره‌ها نیز درصد سهم هر رخساره را در شبکه‌ای منظم و سه‌بعدی ارائه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

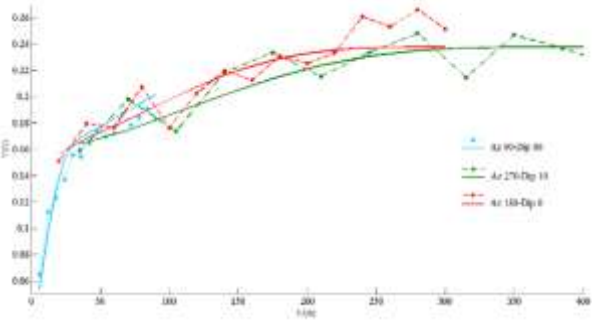
مقادیر حدود آستانه‌ای برای حالت تک گوسی با به کارگیری کد نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB قابل محاسبه است [۱۷]. این مقادیر برای حالت پایا محاسبه می‌شوند. از آن‌جا که برنامه نوشته شده حدود آستانه‌ای و قانون نوع سنگ را به صورت ناحیه‌ای به روز می‌کند [۱۸]، ناپایایی در هر جهت ممکن به صورت خودکار در محاسبات 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 ۴- سهم هر واحد و حد آستانه‌ای

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 می‌شود. ابتدا واریوگرام شاخص متمرکز هر واحد محاسبه می‌شود، سپس واریوگرام‌های شاخص متقابل بین دو واحد نیز محاسبه خواهد شد. با کوتاه‌سازی تابع گوسی و برازش واریوگرام‌های شاخص به دست آمده از آن با واریوگرام‌های شاخص متمرکز تجربی به دست آمده از داده‌های گمانه، می‌توان قیاسی بین آن‌ها انجام داد. پارامترهای توابع گوسی آنقدر تغییر داده می‌شود تا بهترین برازش حاصل شود (شکل ۵).



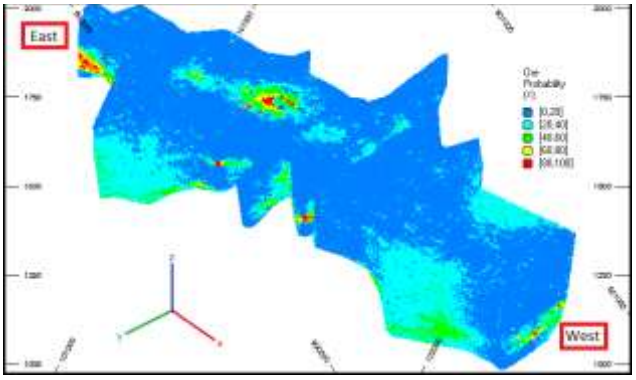
شکل ۵- برازش مدل بر واریوگرام تجربی در سه جهت اصلی

۴-۱-۵- اجرای الگوریتم اصلی شبیه‌سازی تک گوسی

پس از اینکه تمام پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی در مراحل قبل آماده شد. این مقادیر کد شده با استفاده از روش نمونه‌گیر گیبس به مقادیر پیوسته گوسی تبدیل می‌شوند. در اجرای عملیات شبیه‌سازی عمل شرطی‌سازی به داده‌های سخت و نرم کنترل می‌شود. مقادیر پیوسته تولید شده با روش نوارهای دوار[5] بر روی شبکه مورد تخمین شبیه‌سازی خواهند شد.

در نهایت با توجه به قانون نوع سنگ به کار رفته در شبیه‌سازی، این مقادیر پیوسته به مقادیر گسسته نشان‌دهنده واحدهای کانسنگ و باطله تبدیل خواهند شد.

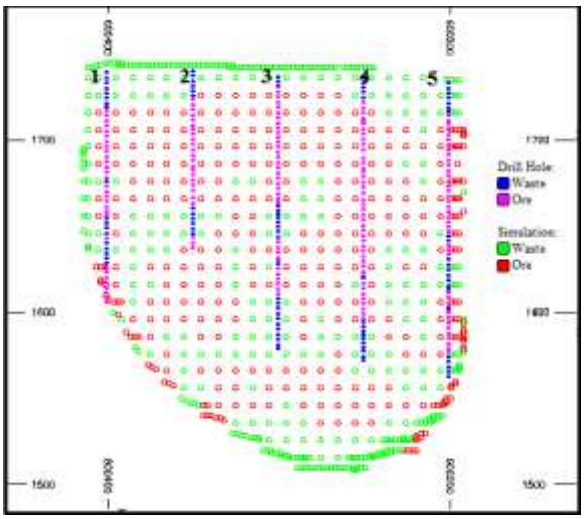
پس از آماده شدن پارامترهای لازم، تعداد ۱۰۰ بار شبیه‌سازی بر روی مدل بلوکی از پیش تعیین شده اجرا شد. در شکل ۶ نمایش سه بعدی از احتمال رخداد واحد کانسنگ به دست آمده از تحقق‌های تک گوسی مشاهده می‌شود. در مجموع روند کانی‌سازی یک روند شرقی- غربی است. مرز کانسنگ- باطله به خوبی مشخص است اما به ازای تحقق‌های مختلف شبیه‌سازی مکان آن به میزان چند پیکسل جابه‌جا می‌شود.



شکل ۶- احتمال رخداد واحد کانسنگ در کانسار گل‌گهر

۴-۱-۶- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی تک گوسی

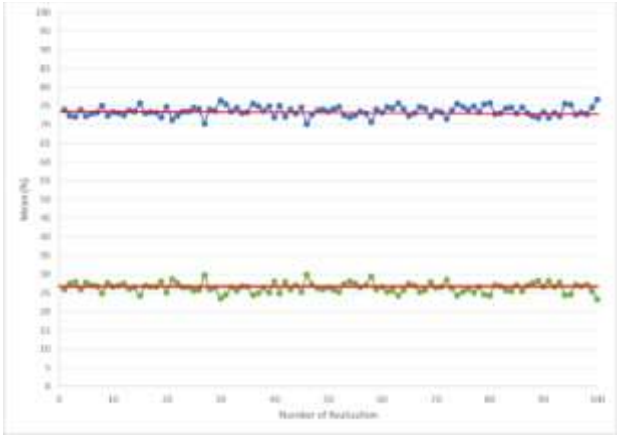
برای بررسی دقت و صحت مدل واحدهای شبیه‌سازی شده به روش تک گوسی، تعدادی از گمانه‌ها از داده‌های به کار رفته در شبیه‌سازی حذف شدند تا از آن‌ها برای اعتبارسنجی نتایج استفاده شود. این گمانه‌ها در قسمت میانی کانسار واقع شده‌اند. شکل ۷ مقطعی از این گمانه را نشان می‌دهد. در این تصویر تغییرات واحد سنگی در جهت 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 می‌گیرد و باز در بخش انتهایی وارد بخش باطله می‌شود. 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 می‌گیرد. در همه این گمانه‌ها در بخش میانی واحد کانسنگ حضور دارد. همخوانی بالای واحدهای سنگی در گمانه‌ها و نتایج شبیه‌سازی، موید دقت بالای مدل تک گوسی در بازتولید این واحدها است.



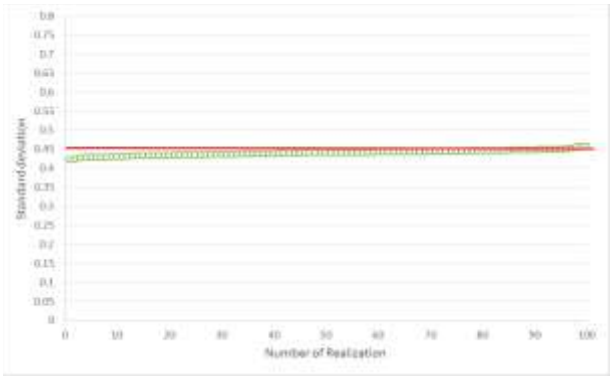
شکل ۷- مقطعی از پنج گمانه و مدل شبیه‌سازی شده همراه با نمایش نوع واحدها

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 تحققی 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



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

ب- اعتبارسنجی زمین‌آماری نتایج شبیه‌سازی تک گوسی

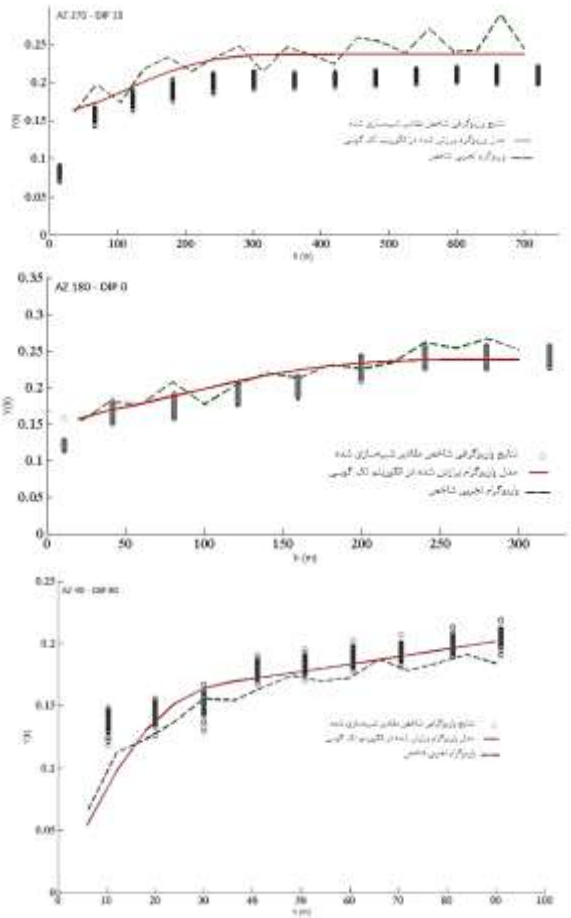
برای بررسی چگونگی عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی در بازتولید ناهمسانگردی موجود در واحدهای مختلف می‌توان از بررسی و مقایسه واریوگرام‌های جهتی محاسبه شده در جهات اصلی ناهمسانگردی هر رخساره با واریوگرام‌های شاخص معادل (به دست آمده از تحقق‌های مختلف) در همان جهات ناهمسانگردی استفاده کرد. در این تحقیق به دلیل 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 زمین‌آماری 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

و منجر به تولید تحقق‌های واقع‌گرایانه از توزیع واحد موردنظر در درون کانسار است، سپس این تحقق‌ها برای محاسبه احتمال رخداد واحدهای مختلف در محدوده موردنظر و برای تخمین عیاری برای هر واحد استفاده می‌شوند.

راه‌های مختلفی برای نشان دادن عدم قطعیت مرز مدل‌شده وجود دارد. الگوریتم تک گوسی تحقق‌های زیادی از حوزه‌ها را محقق می‌سازد. هر یک از این تحقق‌ها مرز مشخصی بین حوزه‌ها را تعیین می‌کند که لزوما این مرزها به ازای تحقق‌های مختلف بر هم منطبق نیستند. عدم قطعیت این مرزها را می‌توان با استفاده از میانگین تحقق‌ها بررسی کرد.



شکل ۱۰- واریوگرام‌های شاخص تجربی و شبیه‌سازی 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، طرح‌ها و برنامه‌های قبلی معدن تاثیر خواهد گذاشت. جدول ۱ سناریوهای با بیشترین و کمترین تناژ کانسنگ را برای نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص شده است تحقق شماره ۲۷ بیشترین تناژ کانسنگ را دارد، اما این بدان معنی نیست که این سناریو به طور قطع بهترین سناریو برای برنامه‌های آتی است.

جدول ۱- بیشترین و کمترین تناژ حاصل از نتایج شبیه‌سازی

	بیشترین حجم	کمترین حجم	میانه حجم	متوسط حجم
شماره تحقق	۲۷	۱۰۰	۹۲ و ۳۵	-
حجم ماده معدنی (میلیون متر مکعب)	۱۰۴	۸۶	۹۴	۹۴

برای انتخاب بهترین سناریو باید میزان دقت و صحت نتایج بررسی شود به این منظور می‌توان از روش محاسبه ماتریس طبقه‌بندی[۴] بهره جست. این ماتریس با شمارش تعداد داده‌هایی که به درستی شبیه‌سازی شده‌اند، دقت هر یک از تحقق‌های روش تک گوسی را اندازه‌گیری و سپس بهترین سناریو را بر مبنای دقت بیشتر انتخاب می‌کند. بدین منظور با استفاده از یک الگوریتم ساده در محیط MATLAB مقدار شبیه‌سازی شده مربوط به محل هر یک از داده‌های اولیه تعیین می‌شود. مقادیر شبیه‌سازی شده به ازای هر یک از تحقق‌ها با مقادیر واقعی داده‌های اولیه مقایسه و ماتریس پیوستگی تشکیل می‌شود. مجموع مقادیر مولفه‌های قطری برابر با تعداد داده‌های درست تخمین زده شده است که با تقسیم این مقدار بر تعداد کل داده‌های اولیه، دقت شبیه‌سازی به دست می‌آید (شکل ۱۱).

		نتایج شبیه‌سازی	
		کانسنگ	باطله
داده‌های واقعی	کانسنگ	درست	غلط
	باطله	غلط	درست

شکل ۱۱- تشکیل ماتریس طبقه‌بندی بر اساس داده‌های درست و غلط شبیه‌سازی شده

دقت نتایج با استفاده از ماتریس طبقه‌بندی با رابطه ۳ تعیین می‌شود.

$$Accuracy\,(ACC) = \frac{\sum True\ Waste + \sum True\ Ore}{\sum Total\ \ Population} \qquad (۳)$$

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، تحققی 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- 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.

$$\hat{d}f\,(u_\alpha) = \begin{cases} df\,(u_\alpha) + C & if\ i\,(u_\alpha) = 0 \\ df\,(u_\alpha) - C & if\ i\,(u_\alpha) = 1 \end{cases} \qquad (۴)$$

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 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:

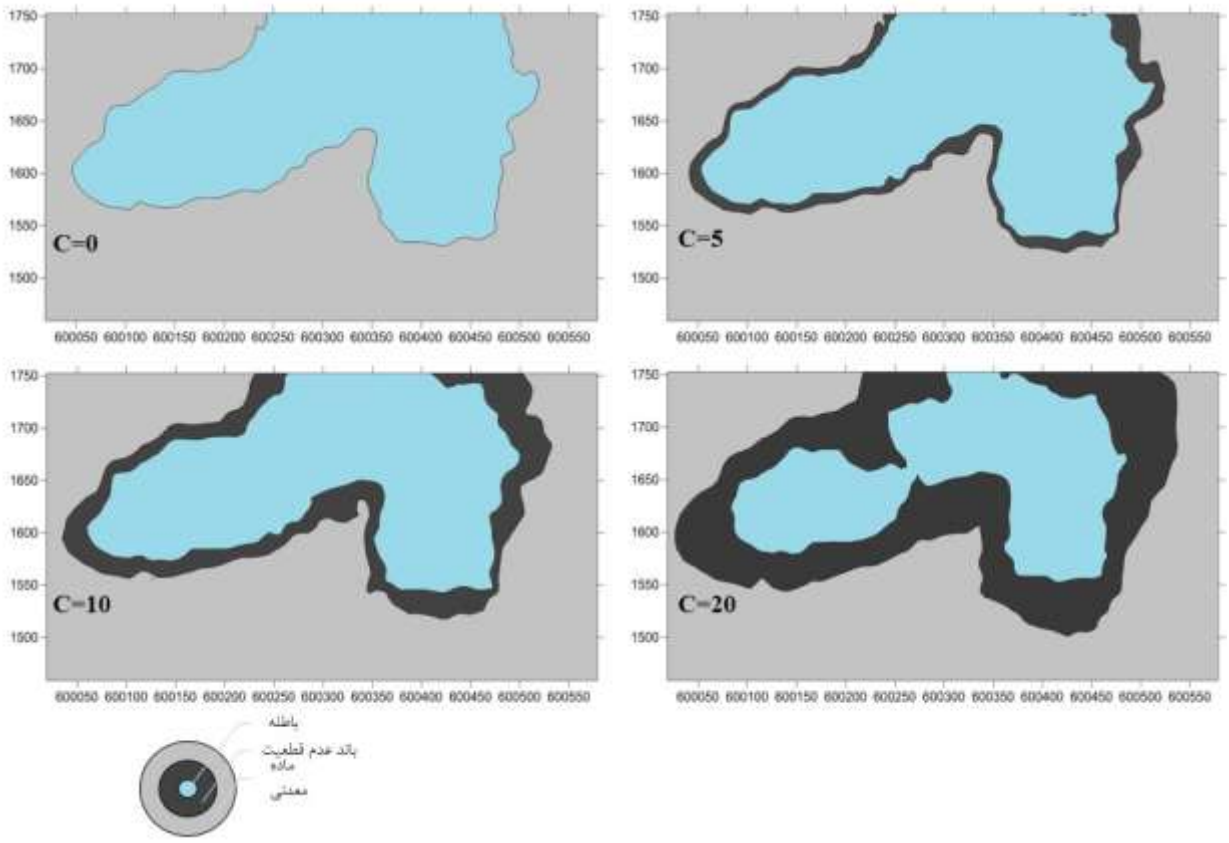
- داده واقعی خارج از حوزه است، اما داخل حوزه تخمین خورده است.
- داده واقعی خارج است و خارج از حوزه تخمین خورده است.
- داده واقعی داخل حوزه است، اما خارج از حوزه تخمین خورده است.
- داده واقعی داخل حوزه است و داخل حوزه تخمین خورده است.

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.

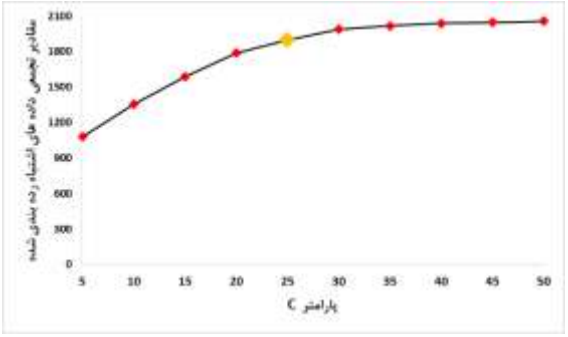
در شکل ۱۳ تعداد داده‌های به اشتباه رده‌بندی شده بر حسب مقادیر مختلف C نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش C این مقدار کاهش می‌یابد و در مقادیر C برابر با ۲۰ به بعد این مقدار کاهش قابل توجهی دارد.

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.

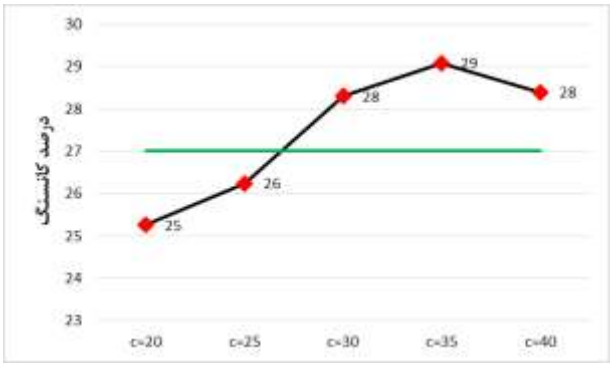


شکل ۱۲- باند عدم قطعیت برای مقادیر مختلف C در یک مقطع مشخص



شکل ۱۳- تعداد داده‌های به اشتباه رده‌بندی شده بر حسب مقادیر مختلف C

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

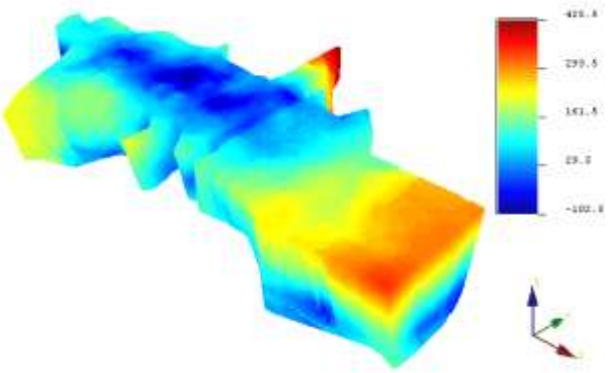


شکل ۱۴- درصد کانسنگ برای مقادیر مختلف C

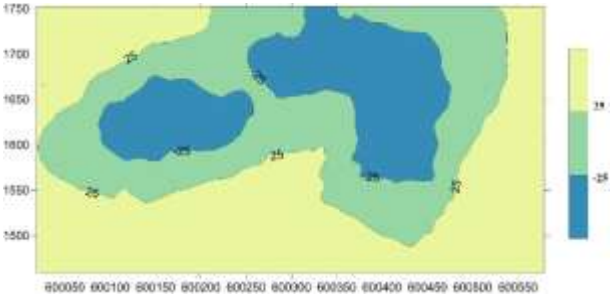
۴-۲-۳- شبیه‌سازی مرز کانسنگ- باطله

باند عدم‌قطعیت (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).

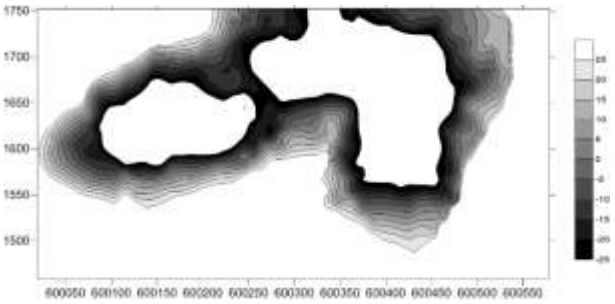
به این منظور در همان چارچوب روش تابع فاصله در نواحی که مقدار آن بین C و C- تخمین زده شده است، مقدار تابع فاصله شبیه‌سازی می‌شود. نقاطی که مقدار تابع فاصله شبیه‌سازی شده



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.

$$df^{\,l}(u) = 2CG^{-1}(y^{\,l}(u)) - C, \quad l = 1,\ldots,L \qquad (۴)$$

که در آن:

$dfl(u)$ مقدار تابع فاصله شبیه‌سازی

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

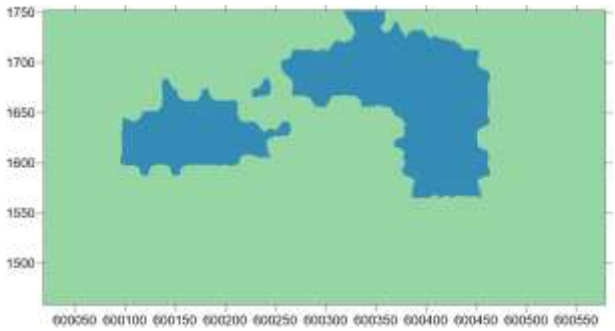
G^{-1} توزیع تجمعی مقدار نرمال استاندارد $y^l(u)$

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

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

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



شکل ۱۸- محدوده مدلسازی شده ماده معدنی

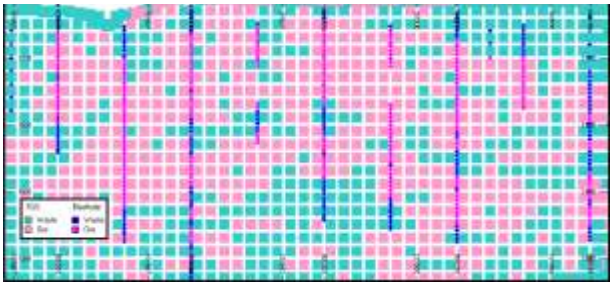
همانگونه که مشاهده می‌شود، روش تک گوسی نسبت به تابع فاصله بالاتری هم در کل طبقه‌بندی و هم در طبقه‌بندی بخش‌های کانسنگی (محدوده ماده معدنی) دارد.

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

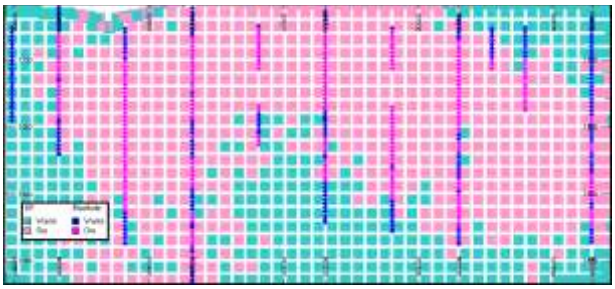
	دقت تخمین کلی	دقت تخمین بخش کانسنگی	دقت تخمین بخش باطله
روش تک گوسی	۸۵/۱۱	۸۲/۹۷	۸۶/۵۰
روش تابع فاصله	۶۷	۵۷/۵۸	۴۲/۴۲

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

است، 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 جزیی 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 بزرگ‌مقیاس 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

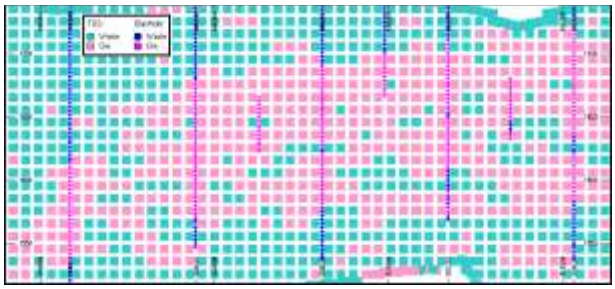
۴-۳- مقایسه نتایج

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.

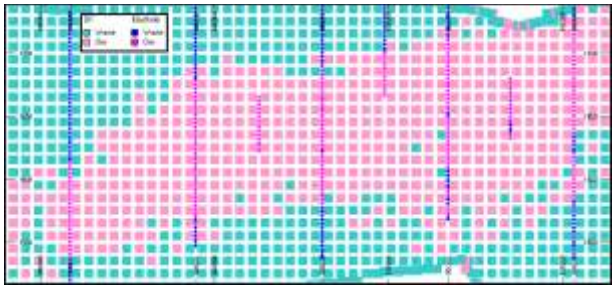
$$\begin{pmatrix} 5074 & 1815 \\ 1985 & 2695 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 73.94 & 26.06 \\ 42.42 & 57.58 \end{pmatrix}$$

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

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 پیچیدگی‌های زمین‌شناسی دارند.

کنترل نتایج و بررسی اعتبار آن‌ها بخشی مهم در در فرآیند تخمین و شبیه‌سازی است. چنانچه در این تحقیق مشخص شد، اعتبارسنجی کیفی نتایج در کنار اعتبارسنجی‌های آماری و زمین‌آماری 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 شبیه‌سازی تک گوسی قادر به بازتولید بهتر ناهمسانگردی در مقیاس‌های کمتر از تابع فاصله است. الگوریتم تابع فاصله تغییرپذیری و ناهمسانگردی را در مقیاس بزرگتر بهتر بازتولید می‌کند.

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

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 شبیه‌سازی‌های 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.*" 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 geostatical 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.

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.

پی‌نوشت‌ها

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