



مقایسه‌ی نتایج روش‌های تخمین و شبیه‌سازی زمین آماری برای مدل‌سازی کانسار کانی اورانیوم در بلوک ۱ آنومالی ۳ نارینگان

داود جمالی اسفهان*، حسن مدنی

دانشکده مهندسی معدن، نفت و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران-ایران

چکیده: در پایان فاز تفصیلی اکتشاف برای مدل‌سازی کانسارهای معدنی به طور معمول از روش‌های زمین آماری استفاده می‌شود. با استفاده از نتایج حاصل از این مدل‌ها، مطالعات فنی و اقتصادی بر روی کانسار صورت می‌گیرد. روش‌های مدل‌سازی زمین آماری غالباً شامل روش‌های تخمین و شبیه‌سازی است. روش تخمین مانند کریجینگ، با استفاده از ارتباط فضایی (مدل پیوستگی زمین‌شناسی) بین داده‌ها بهترین حدس منحصر به فرد از ناشناخته‌ها را ایجاد می‌کند. با وجود این، در موقع کاربرد این روش برای یک شبکه‌ی حفاری بر روی کانسار، متوجه یک تفاوت آشکار بین پدیده‌ی زمین‌شناسی واقعی و نقشه‌ی کریجینگ تخمین‌ها می‌شویم. پیوستگی فضایی که به وسیله‌ی نقشه‌ی کریجینگ تخمین زده شده نمایش داده می‌شود، نرم‌تر از حقیقت ناشناخته است. در مقابل، هدف شبیه‌سازی ایجاد تابع‌ها یا مجموعه‌ای از مقادیر متغیرها است که با اطلاعات موجود سازگار باشند. این اغلب بدین معنی است که مقادیر شبیه‌سازی شده دارای میانگین و واریانس مشابه با اطلاعات خام هستند و ممکن است که با داده‌های خام در نقاط اندازه‌گیری شده برابر باشند. منطقی‌ترین مورد مطالعه کانسار اورانیوم محدودی ۳ نارینگان واقع در ایران مرکزی است. برای این کانسار، روش‌های تخمین کریجینگ و شبیه‌سازی گاوسی متوالی انجام گردید، و در پایان با مقایسه‌ی نتایج مشخص شد که نتایج روش تخمین کریجینگ، به علت داشتن تخمین‌های محلی مناسب و ارایه‌ی میانگین قابل قبول می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت معدن‌کاری استفاده شود. در مقابل، نتایج شبیه‌سازی به دلیل دوباره‌سازی ساختارهای تصادفی، می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت مربوط به طراحی استخراج معدن مناسب باشد.

کلید واژه‌ها: تخمین، شبیه‌سازی، زمین‌آمار، کانسار اورانیوم، کریجینگ

Comparison of Estimation and Simulation Methods for Modeling Block 1 of Anomaly No.3 in Narigan Uranium Mineral Deposit

D. Jamali Esfahlan*, H. Madani

Metallurgy and Petroleum Faculty, AmirKabir University of Technology, P.O.Box: 15875-4413, Tehran - Iran

Abstract: Geostatistical methods are applied for modeling the mineral deposits at the final stage of the detailed exploration. By applying the results of these models, the technical and economic feasibility studies are conducted for the deposits. The geostatistical modeling methods are usually consist of estimation and simulation methods. The estimation techniques, such as Kriging, construct spatial relation (geological continuation model) between data, by providing the best unique guesses for unknown features. However, when applying this technique for a grid of drill-holes over a deposit, an obvious discrepancy exists between the real geological features and the Kriging estimation map. Because of the limited number of sampled data applied for Kriging, it could not appear as the same as the real features. Also the spatial continuity estimated by the Kriging maps, are smoother than the real unknown features. On the other hand, the objective of simulation is to provide some functions or sets of variable values, to be compatible with the existing information. This means that the simulated values have an average and the variance similar to the raw data and may even be the same as the measurements. we studied the Anomaly No.3 of Narigan uranium mineral deposit, located in the central Iran region and applied the Kriging estimation and the sequential Gaussian simulation methods, and finally by comparing the results we concluded that the Kriging estimation method is more reliable for long term planning of a mine. Because of the reconstructing random structures, the results of the simulation methods indicate that they could also be applied for short term planning in mine exploitation.

Keywords: Estimation, Simulation, Geostatistics, Uranium Deposit, Kriging

۱. مقدمه

روش شبیه‌سازی زمین‌آماری برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ توسط ژورنل مطرح گردید، و بعد از آن در اکثر شبیه‌سازی‌های مربوط به پدیده‌های علوم زمین به کار گرفته شد. شبیه‌سازی زمین‌آماری از مفهوم شبیه‌سازی مونت کارلو گرفته شده است. ویژگی مهم آن این است که، به جای بهترین تخمین، مجموعه‌ای از مدل‌ها را تولید می‌کند که دامنه‌ای از حالت‌های ممکن را شامل می‌شوند. روش‌های شبیه‌سازی برخلاف روش‌های تخمین، که فقط دقت‌های محلی را در مدل‌سازی پدیده‌ها لحاظ می‌کند، دقت کلی را مدنظر قرار داده، و در نهایت مدلی را ارائه می‌دهد که تغییرپذیری هماهنگی با داده‌های واقعی داشته باشد.

در این مقاله، برای مدل‌سازی توزیع عیار اورانیم کانسار کانی^(۱) محدوده‌ی ۳ ناریگان از روش‌های تخمین و شبیه‌سازی استفاده شده است. روش تخمین کریگینگ^(۲) استفاده شده از نوع کریگینگ معمولی بوده و شبیه‌سازی از نوع شرطی با روش گاوسی متوالی است. پس از تشکیل بانک اطلاعاتی مربوط به داده‌ها، مطالعات رگرسیون بین داده‌های گاما و آنالیز اورانیم صورت گرفت، تا متغیر ناحیه‌ای تحت عنوان عیار معادل^(۳) اورانیم انتخاب گردد. در ادامه با ترکیب این داده‌ها در فواصل منظم ۰/۵ متری، بررسی‌های آماری کلاسیک، نظیر تشخیص وجود و یا عدم وجود روند در داده‌ها، حذف مقادیر خارج از ردیف انجام گردید. با مطالعه بر روی مقطع‌های زمین‌شناسی و ارتباطی ناحیه‌های معدنی در مقطع‌های شمال‌شرق-جنوب‌غرب، فضای تخمین و شبیه‌سازی مدل‌سازی شده و مدل بلوکی خام با ابعاد $10m \times 10m \times 10m$ در این فضای سه‌بعدی تشکیل شد. ساختار فضایی داده‌ها با انجام تغییرنگاری داده‌ها به دست آمد و با برآزش با مدل کروی سه‌ساختاری، اعتبارسنجی بر روی این مدل و سایر شاخص‌های موردنیاز برای تخمین صورت گرفت، و در نهایت تخمین‌های سه‌بعدی با استفاده از روش زمین‌آماری کریگینگ معمولی بر روی داده‌ها به دست آمد. برای شبیه‌سازی‌های زمین‌آماری تبدیل داده‌ها با استفاده از روش امتیازهای نرمال انجام شد، و با مدل‌سازی بیضی‌وار ناهمسانگردی و استخراج شاخص‌های موردنیاز برای شبیه‌سازی و اعتبارسنجی آن‌ها، شبیه‌سازی گاوسی متوالی بر روی مدل بلوکی با استفاده از نرم‌افزار معدنی انجام و نتایج ۱۰ تحقق^(۴) به همراه مدل نوع E

ارائه گردید. در پایان نتایج تخمین و شبیه‌سازی با یک‌دیگر مقایسه شد.

۲. مشخصات جغرافیایی

ناریگان در استان یزد و در ناحیه‌ی متالورژی بافق-ساغند در ۴۰ کیلومتری شمال‌شرقی شهرستان بافق واقع شده است. نقشه‌ی محدوده‌ی اکتشافی ناریگان و راه‌های دسترسی به آن در شکل ۱ نمایش داده شده است [۱].

۳. مشخصات زمین‌شناسی محدوده‌ی اکتشافی

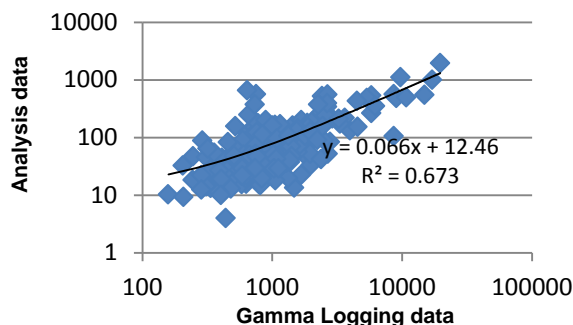
محدوده‌ی ۳ ناریگان، به طور تقریبی در غرب محدوده‌های ۱ و ۲ آن واقع شده و محدوده‌ی مطالعاتی بلوک یک در غرب محدوده‌ی ۳ ناریگان قرار گرفته است. مهم‌ترین واحدهای سنگی پرکامبرین در این بلوک عبارت‌اند از: گرانیت صورتی‌رنگ ناریگان، توف‌های قلیایی، توف‌های سیلیسی، آپلیت گرانیتی و دایک‌های دیابازیک، واحدهای سنگی جوان- (کواترنری) شامل رسوبات سخت شده و رسوبات سخت نشده‌ی کواترنری. این منطقه در حاشیه‌ی توده‌ی گرانیت ناریگان قرار دارد و کانی‌سازی اورانیم در این بلوک، در دو بخش دیده می‌شود [۱ و ۲].



شکل ۱. نقشه‌ی محدوده‌ی اکتشافی ناریگان و راه‌های دسترسی به آن.



Scatter-plot of gamma-ray and chemical-analysis



شکل ۲. نمودار پراکنده‌ی ترکیب داده‌های گاما و ترکیب نتایج با مقادیر بازیابی مغزه‌ی بالای ۸۰ درصد.

جدول ۱. معادله‌های نهایی برای تبدیل گاما به عیار معادل اورانیم برای بلوک ۱ محدودده‌ی ۳ نارینگان

محدوده‌ی داده‌های گاما	درصد بازیابی مغزه	معادله‌ی رگرسیون
زیر ۱۰۰۰ cps*	بزرگ‌تر از ۷۰ درصد	$e_ppm = 0.04\text{Gamma} + 15.3$
بین ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰ cps	بزرگ‌تر از ۸۰ درصد	$e_ppm = 0.059\text{Gamma} - 0.03$
بالای ۲۵۰۰ cps	بزرگ‌تر از ۸۰ درصد	$e_ppm = 0.066\text{Gamma} + 6.18$

* cps: شمارش بر ثانیه.

نمونه‌هایی که مبنای محاسبه‌های زمین‌آماري و شبیه‌سازی قرار می‌گیرند، دو ویژگی اندازه و شکل دارند که در مجموع تحت عنوان پایه^(۷) شناخته می‌شوند. رابطه‌ی پایه و واریانس از جمله‌ی مسایل بسیار مهم و قابل توجه در روش‌های زمین‌آماري است که باید به آن توجه کافی شود. هر اندازه حجم نمونه‌ها کم‌تر باشد، واریانس آن‌ها به همان اندازه بیش‌تر است و بالعکس، با افزایش حجم نمونه‌ها واریانس آن‌ها کاهش می‌یابد [۴ و ۵]. در این تحقیق داده‌های e_ppm اورانیم در فواصل ۰٫۵ متری متناسب با فواصل نمونه‌برداری ترکیب شده‌اند.

۶. مدل‌سازی بیضی‌وار ناهمسانگردی^(۸)

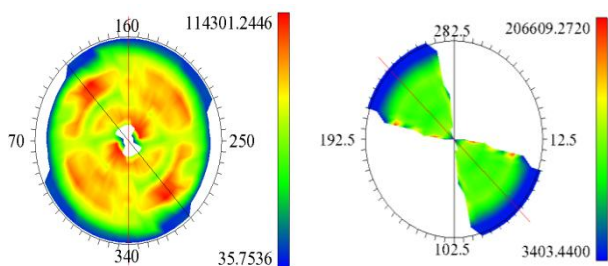
با مشخص کردن ناهمسانگردی در داخل یک کانسار، در واقع یک سری جهت با اندازه و مقادیر مربوط به آن‌ها در داخل کانسار مشخص می‌شود که تداعی‌کننده‌ی جهت‌هایی با بیش‌ترین و کم‌ترین تغییرپذیری هستند. برای یک تخمین درست، تشخیص این که در چه روندهایی از کانسار تغییرپذیری

۴. نوع کانسار نارینگان

با این که هیچ‌گونه تجزیه‌ی ایزوتوپی اکسیژن در دسترس نیست، به نظر می‌رسد که با توجه به داده‌های حاصل از سیالات درگیر، محلول‌های کانی‌زا به طور عمده ناشی از آب‌های اکسیده‌ی سازندی بوده و کم‌تر به فعالیت‌های مستقیم ماگمایی مربوط می‌شوند. یکی از دلایل این امر می‌تواند شباهت زیاد شوری سیال‌های درگیر کوارتزهای رگه‌ای-برشی نارینگان با شوری آب‌های تشکیلاتی حوضه‌های رسوبی قاره‌ای باشد، همان‌گونه که فرگوسن^(۵) این سیالات را توصیف و گزارش نموده است. محلول‌های اکسیدان از توانایی لازم برای فروشویی^(۶) و حمل اورانیم و نیز دیگر فلزات از سنگ‌های پیروکلاستیک و متامورف شده (شیلی) برخوردارند. آب و هوای خشک نیز عامل دیگری برای ایجاد شرایط مناسب برای مهاجرت اورانیم از گرانت‌های پیرامون کانسار، با ایجاد موقعیت‌های سوپرژنیک بوده و توانسته است منشاء دیگری برای افزایش اورانیم در بخش زایای کانسار باشد. دو گسل عمیق و امتداد لغز در منطقه، که باعث ایجاد برش‌های عمیقی در نارینگان شده‌اند، تمرکز سیال‌های جدا شده با هر دو منشاء مذکور را سبب شده‌اند [۳]. با توجه به نوع سیال‌های درگیر می‌توان اذعان نمود که به احتمال بسیار قوی سنگ‌های پیروکلاستیک و متامورف شده در نارینگان منشاء اصلی اورانیم در کانسار هستند [۳].

۵. تعیین رابطه بین پرتوزایی گاما و ترکیب داده‌های عیار معادل اورانیم

با مطالعه‌ی همبستگی بین نتایج تجزیه‌ی عنصری نمونه‌ها با استفاده از تکنیک XRF و داده‌های گامای طبیعی در طول گمانه‌ها می‌توان به متغیر جدید e_ppm اورانیم رسید. به طوری که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با محدود کردن داده‌ها به مناطقی که در آن‌ها درصد بازیابی مغزه بیش‌تر از ۸۰ درصد است، ضریب همبستگی قابل قبول بوده و اعتبار معادله‌ی رگرسیون بیش‌تر می‌شود. در این مقاله برای افزایش اعتبار منحنی رگرسیون، کلیه‌ی داده‌ها براساس جدول ۱ طبقه‌بندی، و منحنی رگرسیون به طور جداگانه با هر دسته برآزش شده، و نهایتاً نتایج مندرج در جدول ۱، مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۳. نقشه‌ی هم‌میزان تغییرنگاره بر روی رویه‌ی تغییرنگاره‌ی اولیه و ثانویه با گام ۴۰ متری.

جدول ۲. مشخصات محور اصلی بیضی وار ناهمسانگردی

نوع محور	محور اصلی
زاویه‌ی سمتی محور	۲۸۲٫۵
زاویه‌ی میل محور	۳۷٫۵

جدول ۳. مشخصات محور شبه‌اصلی بیضی وار ناهمسانگردی عیار اورانیم

نوع محور	محور شبه‌اصلی
زاویه‌ی سمتی محور	۴۱
زاویه‌ی میل محور	۳۲

جدول ۴. مشخصات بیضی وار ناهمسانگردی محاسبه شده‌ی عیار اورانیم

زاویه‌ی سمت	۲۸۲°
زاویه‌ی میل	۳۷°
شیب	۴۲°

۷. انتخاب مدل بهینه‌ی تغییرنگاره برای ساختار فضایی عیار اورانیم

آزمون اعتبار متقابل^(۱۰) با استفاده از نرم‌افزارهای معدنی به این صورت انجام شد که با استفاده از مدل‌های نظری برازش شده و نیز شاخص‌های بیضی وار ناهمسانگردی، برای نقاط حاوی داده‌های عیار اورانیم، مقدار عیار تخمین زده شد. در نتیجه، متناظر با هر داده یک تخمین به دست آمد. سپس تفاضل هر داده از تخمین نظیر آن، محاسبه شد. به دلیل خطای ناشی از برازش مدل نظری تغییرنگاره به مدل تجربی، در عمل این دو مقدار کمی با هم تفاوت دارند. این تفاوت نباید از حد معینی که می‌توان آن را

عیار به کمینه مقدار خود می‌رسد، اهمیت دارد. علت این امر آن است که جهت‌های با کم‌ترین میزان تغییرپذیری در عین حال، بیش‌ترین پیوستگی را به لحاظ عیار دارند. جهت‌های با بیش‌ترین پیوستگی عیار، باید بیش‌ترین وزن را در انتخاب نقاط برای تخمین داشته باشند تا در نهایت تخمین‌ها و شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی هم‌خوانی مناسبی با شرایط تشکیل کانی‌سازی داشته باشند.

ابتدا با استفاده از نرم‌افزارهای معدنی شیب و امتداد ناحیه‌ی غالب کانی‌سازی تعیین گردید. صفحه‌ی پوشش دهنده برای ناحیه‌ی کانی‌سازی دارای امتداد N70E و شیب ۵۵ درجه به سمت جنوب شرق است. برای رسم رویه‌ی تغییرنگاره‌ی اولیه، این امتداد و شیب باید به شکل نرم‌افزاری درآید. طبق این شکل‌بندی شیب و زاویه‌ی سمت شیب باید مشخص گردد، که به ترتیب ۵۵ و ۱۶۰ درجه‌اند. آن‌گاه، بر روی این صفحه و با استفاده از داده‌های e_ppm اورانیم درون ناحیه‌ی معدنی شماره ۱ رویه‌ی تغییرنگاره رسم گردید تا با استفاده از این رویه جهت و زاویه‌ی میل محور اصلی بیضی وار ناهمسانگردی تعیین شود. همان‌طور که گفته شد محور اصلی بیضی وار ناهمسانگردی، جهتی با بیش‌ترین پیوستگی در داخل کانسار است و اگر بخواهیم این پیوستگی را به خصوصیات ساختاری و زمین‌شناسی سیستم گرمابی^(۹) ارتباط دهیم، در واقع این جهت تداعی‌کننده‌ی جهت اصلی نهشته شدن اورانیم است. پس از مشخص شدن مشخصات مربوط به محور اصلی بیضی وار ناهمسانگردی، نوبت به تعیین مشخصات محور شبه‌اصلی و کوچک بیضی وار ناهمسانگردی رسید. برای این منظور همان‌طور که اشاره شد رسم رویه‌ی تغییرنگاره‌ی ثانویه ضروری بود (شکل ۳).

براساس این تغییرنگاری، و این که محور اصلی باید دارای بزرگ‌ترین شعاع تأثیر و کم‌ترین واریانس در فواصل بزرگ باشد این محور، تعیین گردید [۶]. مشخصات محور اصلی بیضی وار ناهمسانگردی در جدول ۲ داده شده است.

براساس تغییرنگاری در رویه‌ی ثانویه مشخصات محور شبه‌اصلی در جدول ۳ آمده است.

و در نهایت شاخص‌های بیضی وار ناهمسانگردی در جدول ۴ درج شده‌اند.



جدول ۵. شاخص‌های زمین‌آماري برای انتخاب مدل تغییرنگاره‌ی بهینه

نوع مدل واریوگرام	نوع شاخص برای اعتبارسنجی	مقدار شاخص
مدل کروی تک‌ساختاری	میانگین خطاهای کریجینگ	۰,۲۴
	واریانس خطاهای کریجینگ	۶۸۸۰۵
	واریانس کریجینگ	۴۹۴۸۴
مدل کروی دو‌ساختاری	میانگین خطاهای کریجینگ	-۰,۱
	واریانس خطاهای کریجینگ	۵۹۵۹۲
	واریانس کریجینگ	۵۰۷۴۰
مدل کروی سه‌ساختاری	میانگین خطاهای کریجینگ	۰,۰۶
	واریانس خطاهای کریجینگ	۵۹۵۱۱
	واریانس کریجینگ	۵۱۶۴۹

جدول ۶. مشخصات مدل کروی سه‌ساختاری

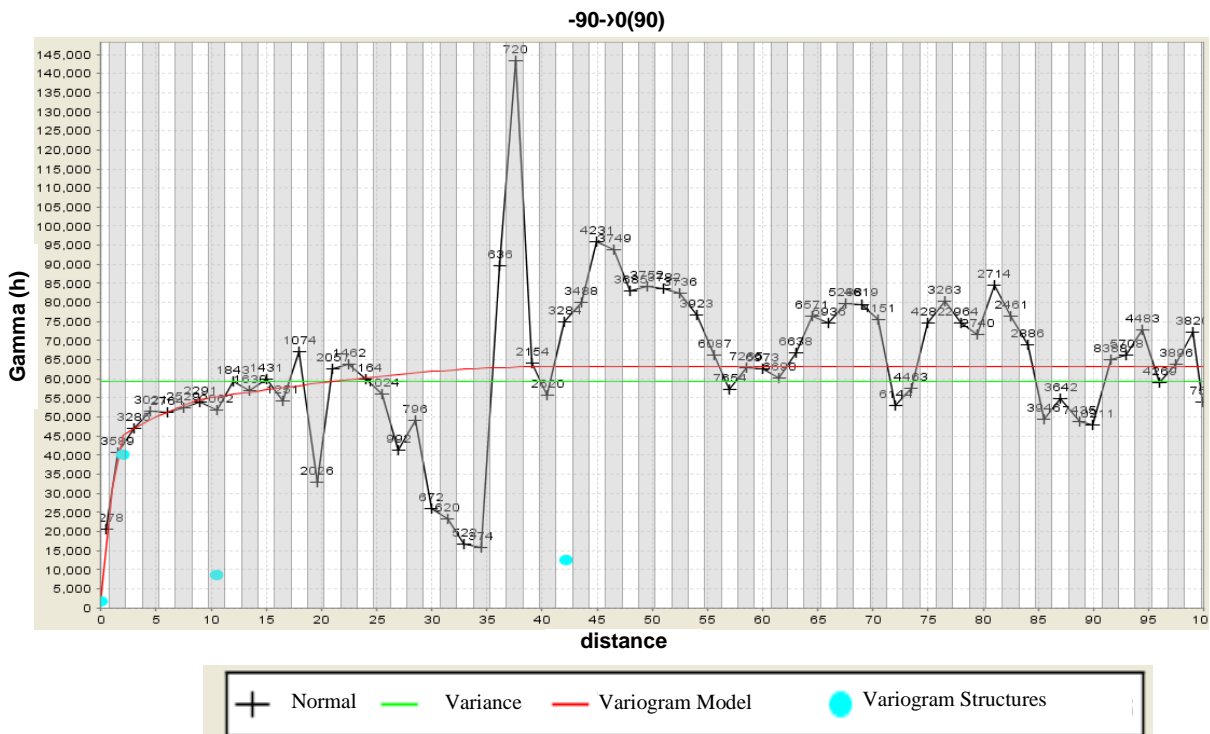
نوع مدل	نوع ساختار	مشخصات ساختار
مدل کروی سه‌ساختاری	ساختار اول	$C_0=1761(\text{ppm}^2)$, $C_1=40241(\text{ppm}^2)$, $a_1=1.97(\text{m})$
	ساختار دوم	$C_2=8657(\text{ppm}^2)$, $a_2=10.5(\text{m})$
	ساختار سوم	$C_3=12673(\text{ppm}^2)$, $a_3=42.15(\text{m})$

از پیش تعیین کرد، بیش تر شود. ملاک قابل قبول بودن، درستی دو شرط از سه شرط زیر است:

۱. میانگین اختلاف‌ها برای تمام نقاط نزدیک به صفر باشد.
 ۲. اختلاف دو واریانس σ_K^2 (واریانس کریجینگ) و S^2 (واریانس خطاهای کریجینگ) از ۱۵ درصد تجاوز نکند.
 ۳. نمودار ستونی اختلاف‌ها دارای توزیع نرمال باشد و $\bar{X} \pm 2S$ تقریباً ۹۵ درصد جامعه را پوشاند.
- نتایج مربوط به آزمون اعتبار متقابل با استفاده از مدل‌های مختلف در جدول ۵ داده شده است.

با توجه به شاخص‌های به دست آمده برای سه مدل جدول ۵، مدل‌های دو‌ساختاری و سه‌ساختاری به دلیل آشکار ساختن تغییرات کوچک-مقیاس یا درون گمانه‌ای، از اعتبار بهتری نسبت به مدل تک‌ساختاری برخوردار هستند، و از میان این دو مدل، مدل کروی سه‌ساختاری نتایج مناسب‌تری را ارائه داده است؛ لذا، این مدل از اعتبار بیش‌تری برای به تصویر کشیدن تغییرات ساختاری عیار در ناحیه‌ی معدنی شماره ۱ برخوردار بوده و برای استفاده در تخمین‌های زمین‌آماري به کار می‌رود. مشخصات این مدل در جدول ۶ و تغییرنگاره‌ی مربوطه در شکل ۴ داده شده است.

خلاصه‌ی شاخص‌های بهینه شده برای استفاده شدن در فرایند تخمین به شرح جدول ۷ است.



شکل ۴. مدل تغییرنگاره‌ی تجربی غیرجهتی با گام ۰,۵ متری به همراه مدل کروی ۳ ساختاری.



جدول ۷. پارامترهای بهینه شده برای استفاده شدن در تخمین

ردیف	پارامتر	ویژگی
۱	بیشینه شعاع جستجو	۹۰ متر
۲	بیشینه تعداد نقاط شرکت کننده در تخمین	۳۷ عدد
۳	تعداد کمینه‌ی نقاط شرکت کننده در تخمین	۱۰ عدد
۴	حداکثر فاصله‌ی قائم برای جستجو	۴ متر
۵	زاویه‌ی سمتی محور اصلی بیضی وار ناهمسانگردی	۲۸۲ درجه
۶	زاویه‌ی میل محور اصلی بیضی وار ناهمسانگردی	۳۷ درجه
۷	زاویه‌ی سمتی محور شبه‌اصلی بیضی وار ناهمسانگردی	۴۱ درجه
۸	شیب محور وسط بیضی وار ناهمسانگردی	۳۲ درجه
۹	نسبت محور بزرگ به محور وسط بیضی وار	۱٫۰۵
۱۰	نسبت محور بزرگ به محور کوچک بیضی وار ناهمسانگردی	۵٫۷۳
۱۱	نوع مدل انتخابی برای تغییرنگاره‌ی کلی	مدل کروی سه‌ساختاری
۱۲	مقدار اثر قطعه‌ای	۱۷۶۱ppm^2
۱۳	شعاع تأثیر ساختار اول	۲ متر
۱۴	مقدار سقف ساختار اول	۴۰۲۴۱ppm^2
۱۵	شعاع تأثیر ساختار دوم	۱۰٫۵ متر
۱۶	مقدار سقف ساختار دوم	۸۶۵۷ppm^2
۱۷	شعاع تأثیر ساختار سوم	۴۲٫۱۵ متر
۱۸	مقدار سقف ساختار سوم	۱۲۶۷۳ppm^2

۸. تخمین‌های کریگینگ

داده‌های عیار، پس از پردازش‌های آماری وارد مدل بلوکی خام (با اندازه‌های $10\text{m} \times 10\text{m} \times 10\text{m}$ متر) گردید و پس از محدود شدن فضای مورد تخمین، با استفاده از شاخص‌های مورد نیاز تخمین نظیر: بیضی وار ناهمسانگردی، بیشینه شعاع جستجو، تعداد کمینه و بیشینه‌ی نقاط شرکت کننده در تخمین، عوامل مربوط به مدل تغییرنگاره‌ی کلی کانسار و عامل زیر بلوک‌سازی، تخمین با روش کریگینگ معمولی^(۱۱) انجام شد. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، بهینه‌سازی شاخص‌های مورد نیاز تخمین و شبیه‌سازی گاوسی متوالی^(۱۲)، و نیز تخمین و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای معدنی به انجام رسید. شکل ۵ مدل بلوکی را پس از تخمین نشان می‌دهد.

۹. شبیه‌سازی گاوسی متوالی

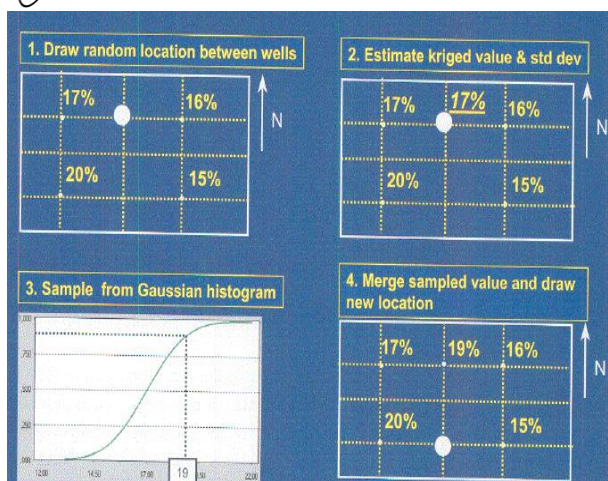
۱.۹ مراحل و الگوریتم شبیه‌سازی گاوسی متوالی

الگوریتم شبیه‌سازی متوالی را می‌توان برای تولید میدان گاوسی چند متغیره به کار برد. هر گره^(۱۳) براساس یک مسیر تصادفی و به

صورت متوالی شبیه‌سازی می‌شود. توالی بررسی شبیه‌سازی گره‌های مختلف را می‌توان با روش‌های متفاوتی انجام داد. شکل ۶ یک مسیر تصادفی برای نقاطی، که باید شبیه‌سازی شوند، را نشان می‌دهد [۷].

داده‌های شرطی‌ساز شامل همه‌ی داده‌های خام و مقادیر شبیه‌سازی شده‌ی قبلی واقع در همسایگی گره شبیه‌سازی است. به عنوان مثال در این پروژه که e_ppm اورانیم به عنوان متغیر ناحیه‌ای برای تخمین و شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است، مراحل فرایند شبیه‌سازی به شرح زیر است [۸]:

- تشکیل تابع چگالی احتمال^(۱۴) (pdf) تک متغیری e_ppm براساس همه‌ی داده‌های خام و تبدیل امتیاز بهنجار با استفاده از این تابع چگالی احتمال برای تبدیل داده‌ی e_ppm به t_e_ppm که از یک تابع چگالی احتمال بهنجار استاندارد تبعیت می‌کند (t_e_ppm عیار معادل بهنجار شده است).

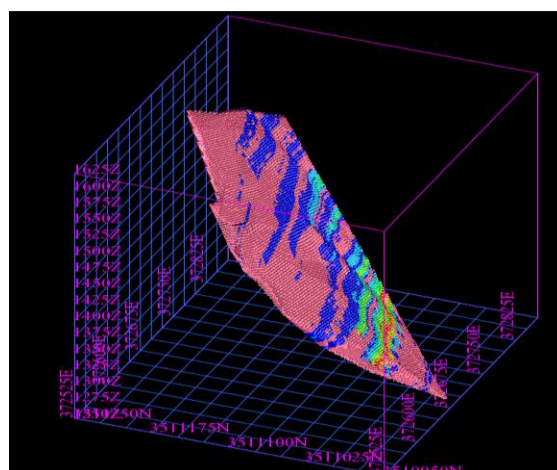


شکل ۷. مراحل طرح‌وار شبیه‌سازی زمین‌آماري گاوسی متوالی.

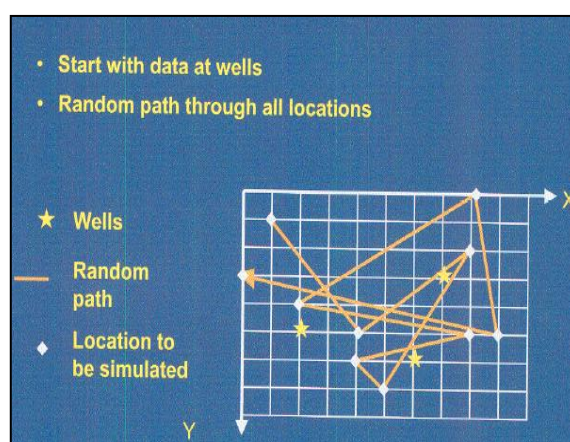
- مقدار شبیه‌سازی شده، از تابع چگالی احتمال تجمعی محاسبه شده در مرحله‌ی یاد شده انتخاب و سپس مقدار شبیه‌سازی شده به مجموعه‌ی داده‌های شرطی ساز برای شبیه‌سازی گره‌های بعدی اضافه می‌شود. این فرایند برای گره‌های بعدی نیز تکرار می‌شود. هنگامی که آخرین گره شبیه‌سازی شد یک دور شبیه‌سازی پایان می‌یابد.
- در مورد تمام گره‌ها تبدیل معکوس انجام می‌شود تا مقیاس داده‌ها با مقیاس داده‌های خام مطابقت داشته باشند. فرایند توصیف شده در بالا می‌تواند مجدداً برای یک شبیه‌سازی جدید، انجام شود. در شکل ۸ تعداد ۱۰ تحقق شبیه‌سازی شده آمده است.

۲.۹ اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی (تحقق‌ها) هنگامی قابل قبول هستند که بتوانند شباهت معین جامعه را که در این جا همان شاخص‌های آماری و زمین‌آماري جامعه (کانسار) هستند، دوباره‌سازی کنند. بنابراین برای بررسی این موضوع، نمودار ستونی، منحنی‌های احتمال و تغییرنگاره‌های ۱۰ تحقق محاسبه شد. برای مقایسه‌ی نتایج نمودارهای یاد شده، به همراه آن‌ها نمودارهای مربوط به داده‌های گمانه‌های داخل کانسار در شکل ۹ و ۱۰ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تحقق‌ها قادر به بازسازی نمودار ستونی و نمودارهای احتمال مشابه با نمودار ستونی و نمودارهای احتمال کانسار بوده‌اند. هم‌چنین مقایسه‌ی تغییرنگاره‌های تحقق‌ها با تغییرنگاره‌ی داده‌های خام و اولیه نشان می‌دهد که تحقق‌ها به خوبی قادر به تولید مجدد شاخص‌های زمین‌آماري کانسار بوده‌اند و از این لحاظ نیز دارای اعتبار هستند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).

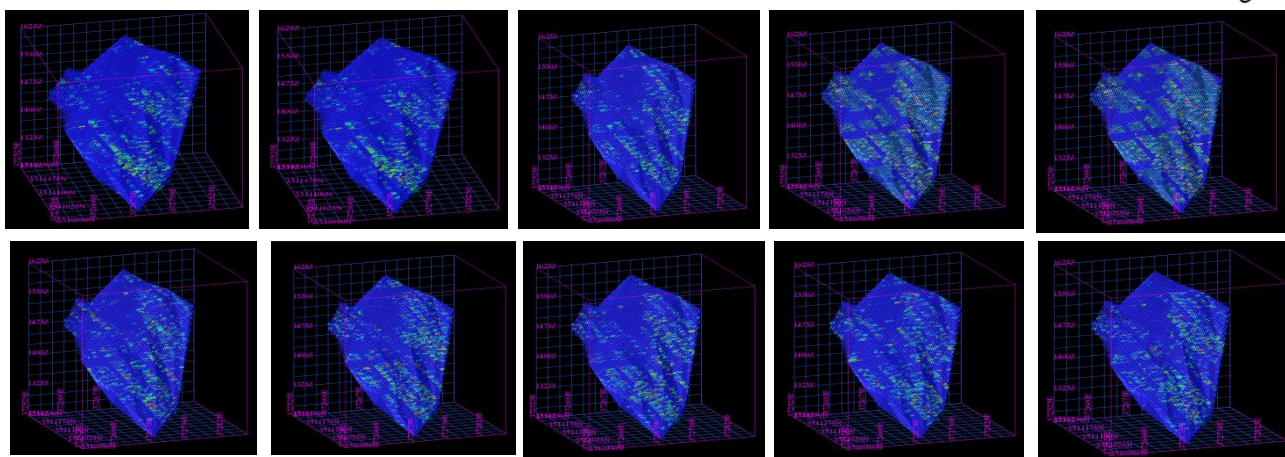


شکل ۵. مدل بلوکی تخمین خورده با روش کریجینگ معمولی.

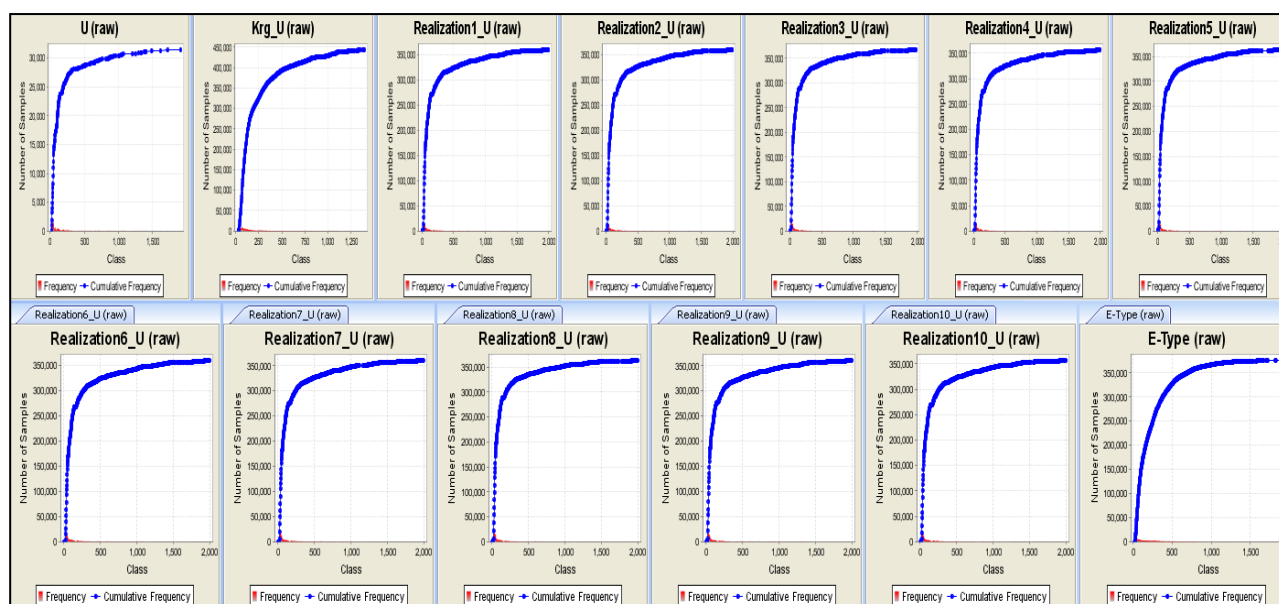


شکل ۶. یک مسیر تصادفی طرح‌وار که نشان‌دهنده‌ی عملکرد شبیه‌سازی گاوسی متوالی است.

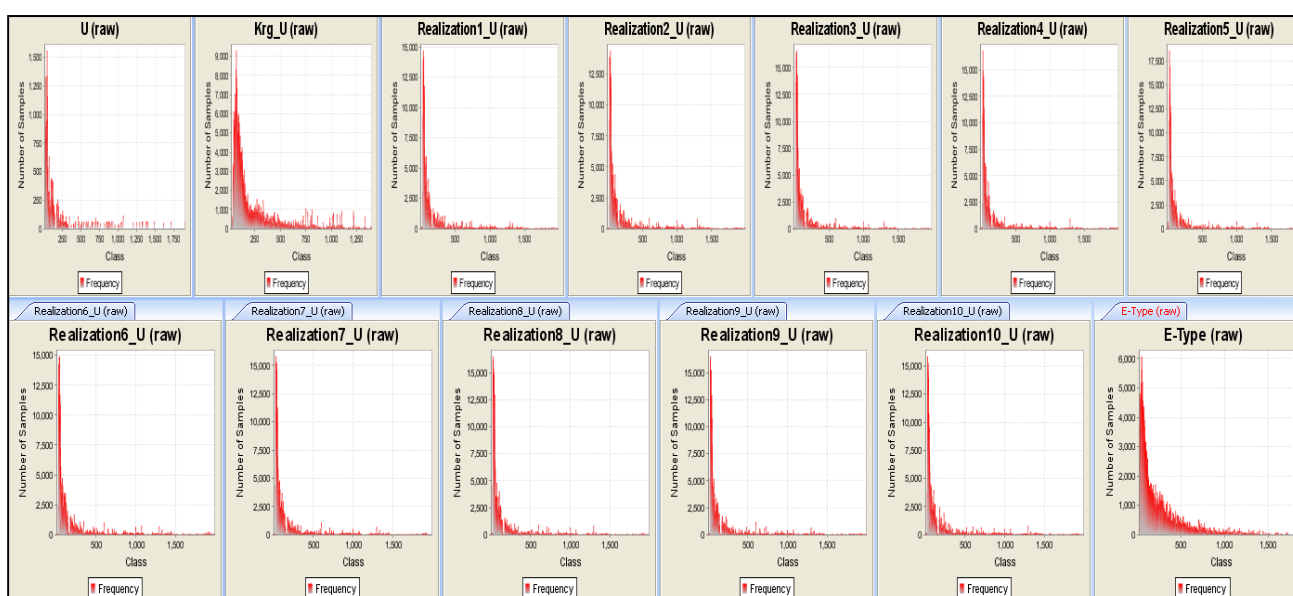
- انتخاب یک مسیر تصادفی به نحوی که براساس این مسیر هر گره فقط یک بار دیده شود. در هر گره شماری از داده‌های شرطی ساز شامل داده‌ی عیار معادل بهنجار شده و مقادیر شبیه‌سازی شده در گره‌های قبلی، که به گره تحت شبیه‌سازی نزدیک هستند و درون بیضی‌وار ناهمسانگردی قرار می‌گیرند، مشخص می‌شود. سپس با استفاده از تغییرنگاره‌ی مشخص شده با استفاده از داده‌های بهنجار، به کریجینگ معمولی اقدام و با استناد به فرضیه‌ی چندگاوسی^(۱۵)، مقدار تخمین‌زده شده (کریگ شده) و واریانس کریجینگ به ترتیب به عنوان میانگین و واریانس شرطی تابع چگالی احتمال تجمعی^(۱۶) (cpdf) برای متغیر t_e_ppm در هر گره در نظر گرفته می‌شود (شکل ۷) [۷].



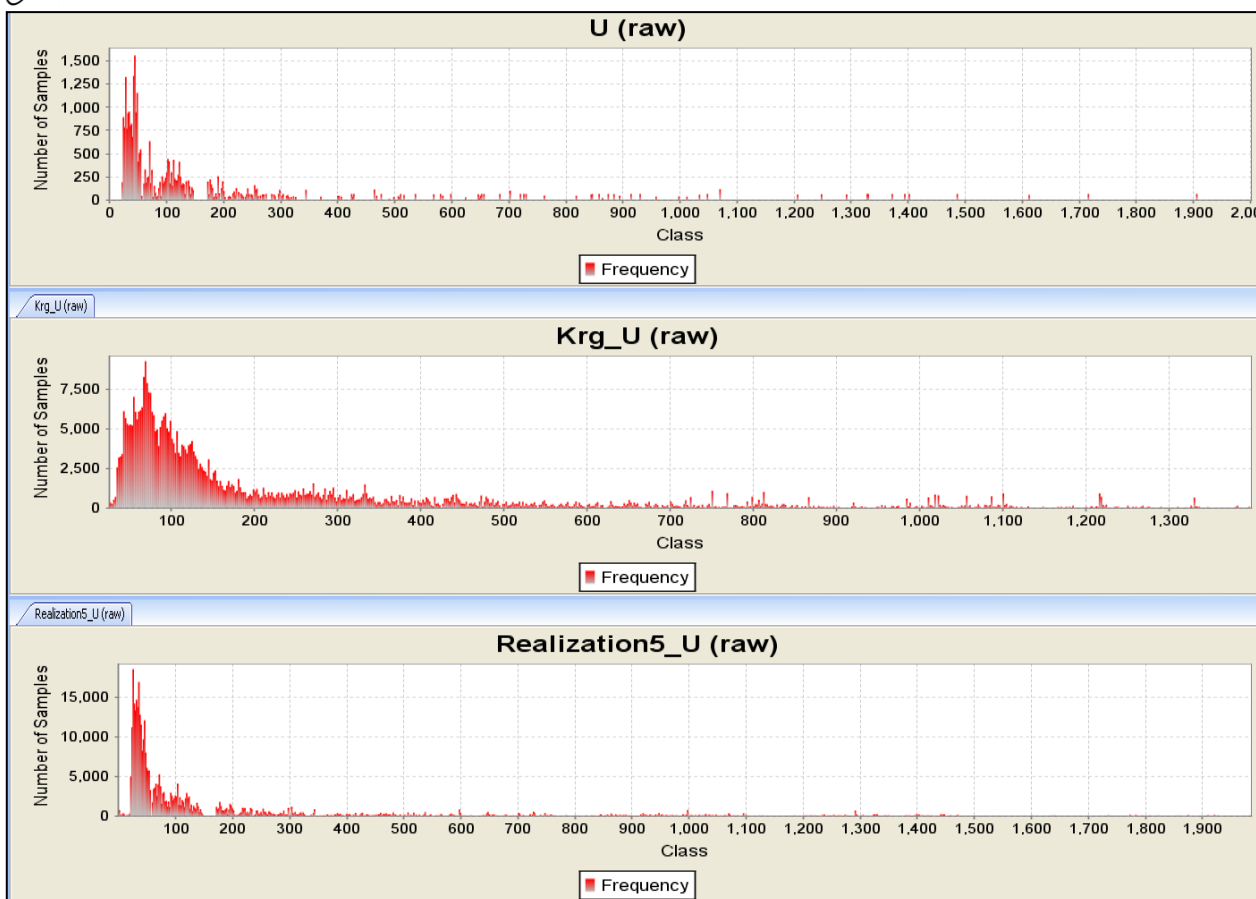
شکل ۸. مدل سه‌بعدی شبیه‌سازی شده برای ۱۰ تحقق.



شکل ۹. نمودارهای فراوانی تجمعی ۱۰ تحقق به همراه نمودار فراوانی داده‌های اولیه و نیز کریگ شده.



شکل ۱۰. نمودارهای ستونی ۱۰ تحقق به همراه نمودارهای ستونی داده‌های اولیه و نیز کریگ شده.



شکل ۱۱. نمونه‌ای از اثر هموارسازی کریجینگ به صورت نمودار ستونی، در مقابل نمودار ستونی داده‌های خام و تحقق شماره ۵.

کریجینگ تخمین زده شده نمایش داده می‌شود، نرم‌تر از حقیقت ناشناخته است [۹].

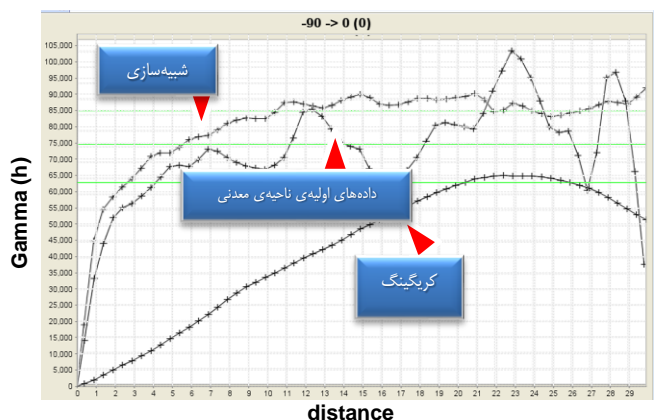
کریجینگ (و سایر روش‌های درون‌یابی) تلاش می‌کنند که بهترین تخمین در هر موقعیت نمونه‌برداری شده را ایجاد کنند. برای به دست آوردن یک تخمین که نزدیک‌ترین مقدار ممکن به داده‌های حقیقی در هر موقعیت باشد، باید محافظه‌کار^(۱۷) بود. در یک مفهوم آماری محافظه‌کاری به معنی حداقل کردن ضرر در موقع ایجاد خطاها است. اندازه‌گیری محافظه‌کاری انجام شده در کریجینگ، حداقل کردن مجذور اختلاف بین تخمین‌ها و مقادیر ناشناخته تا حد ممکن است. تفاوت بین شبیه‌سازی زمین‌آماري و تخمین در هدف آن‌ها نهفته است. هدف از تخمین، تهیه‌ی یک تخمین گر $Z^*(x)$ است که تا حد امکان به عیار ناشناخته‌ی حقیقی $Z(x)$ نزدیک باشد. ملاک سنجش کیفیت تخمین، نااریبی و کمینه‌سازی واریانس تخمین $E[Z(x) - Z^*(x)]^2$ است. هرچند هیچ دلیلی وجود ندارد که این تخمین گر، تغییرپذیری مکانی عیارهای حقیقی را مجدداً تولید

بنابراین از آن‌جا که تحقق‌ها قادر به دوباره‌سازی مناسب شاخص‌های آماری و زمین‌آماري کانسار هستند، لذا تمامی آن‌ها دارای اعتبار بوده و می‌توان در برنامه‌ریزی‌های مربوط به امکان‌سنجی معدن از آن‌ها استفاده کرد.

۱۰. بحث و نتیجه‌گیری

براساس این بررسی نتایج زیر قابل طرح است:

روش تخمین مانند کریجینگ، با استفاده از ارتباط فضایی (مدل پیوستگی زمین‌شناسی) بین داده‌ها بهترین حدس منحصر به فرد از ناشناخته‌ها را ایجاد می‌کند. با وجود این، در موقع استفاده از این روش برای یک مدل بلوکی سه‌بعدی، متوجه یک تفاوت آشکار بین پدیده‌ی زمین‌شناسی واقعی و مدل کریجینگ تخمین‌ها می‌شویم. نقشه‌ی کریجینگ به علت داده‌های نمونه‌برداری محدود، نمی‌تواند به طور عینی همانند پدیده‌ی واقعی باشد. در واقع، پیوستگی فضایی که توسط نقشه‌ی



شکل ۱۲. تغییرنگاره‌ی داده‌های خام به همراه تغییرنگاره‌ی داده‌های تخمین‌خورده و شبه‌سازی شده.

روش‌های تخمین و شبه‌سازی هدف‌های مختلفی را دنبال می‌کنند، و تحت شرایط خاصی می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. کریگینگ، تخمین‌گر مناسبی برای میانگین است، و تخمین‌های محلی خوبی ارائه می‌دهد. ولی ایراد کلی آن این است که قادر به بازسازی ساختار فضایی داده‌ها نیست و نیز هموارسازی در بین نتایج کریگینگ بسیار مشهود است. در مقابل، روش شبه‌سازی با ارائه تحقق‌های مختلف برای کانسار، قادر به دوباره‌سازی شاخص‌های آماری و زمین‌آماری است و از این حیث نسبت به کریگینگ برتری دارد. نتیجه‌گیری بسیار مهمی که می‌توان از این مقاله کرد این است که: از نتایج به دست آمده از کریگینگ می‌توان برای برنامه‌ریزی بلند مدت معدن‌کاری در ارزیابی‌های امکان‌سنجی استفاده کرد، و در مقابل، از نتایج شبه‌سازی می‌توان در مطالعات مربوط به طراحی استخراج معدن بهره گرفت.

کند. اما شبه‌سازی با حفظ شاخص‌های ساختاری داده‌ها در پی معرفی حالت‌های تحقق نیافته‌ی ممکن است. شبه‌سازی $\{Z_S(x)\}$ و به طور ترجیحی شبه‌سازی شرطی $\{Z_{SC}(x)\}$ دارای خصوصیات توزیع (میان، هم‌تغییرنگاره، تغییرنگاره و نمودار ستونی) مشابه عیارهای حقیقی $\{Z_c(x)\}$ است (یعنی خصوصیات توزیع اصلی مقادیر حقیقی را نشان می‌دهد)، ولی در هر نقطه مقدار شبه‌سازی $\{Z_S(x)\}$ یا $\{Z_{SC}(x)\}$ بهترین تخمین‌گر $\{Z_c(x)\}$ نیست [۱۰].

هدف شبه‌سازی ایجاد تابع‌ها یا مجموعه‌ای از مقادیر متغیرها است که با اطلاعات موجود سازگار باشند. این اغلب بدین معنی است که مقادیر شبه‌سازی شده دارای میانگین و واریانس مشابه با اطلاعات خام هستند و ممکن است که با داده‌های خام در نقاط اندازه‌گیری شده برابر باشند [۱۱]. در این مقاله نیز که در آن از دو روش تخمین با کریگینگ معمولی و شبه‌سازی گاوسی متوالی برای به تصویر کشیدن توزیع عیار استفاده شده است، همه‌ی مواردی که در مراجع روز دنیا در رابطه با تفاوت این دو روش، به آن‌ها اشاره می‌شود، به دست آمد. کریگینگ با این که با کمینه نمودن واریانس تخمین، به خوبی می‌تواند بهترین تخمین محلی را ارائه دهد، ولی قادر به دوباره‌سازی ساختار فضایی بین داده‌ها نیست؛ اما در مقابل می‌تواند شاخص‌های آماری نظیر نمودار ستونی و زمین‌آماری نظیر تغییرنگاره را به خوبی دوباره‌سازی کند. در شکل ۱۱ نمونه‌ای از اثر هموارسازی کریگینگ به صورت نمودار ستونی، در مقابل نمودار ستونی داده‌های خام و تحقق شماره ۵ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شبه‌سازی به‌خوبی قادر به دوباره‌سازی توزیع آماری داده‌ها است، ولی در مقابل، کریگینگ نمی‌تواند توزیع آماری داده‌ها را دوباره‌سازی کند.

در مورد تغییرنگاره نیز وضعیت به همین نحو است. تغییرنگاره که ابزاری زمین‌آماری برای به تصویر کشیدن ساختار فضایی بین داده‌ها است، در هر دو فرایند تخمین و شبه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بررسی نتایج مشخص گردید که در روش تخمین کریگینگ به دلیل هموارسازی، تغییرنگاره‌ی داده‌های تخمینی مشابه تغییرنگاره‌ی داده‌های خام نیست، ولی در مقابل نتایج شبه‌سازی نشان می‌دهد که تغییرنگاره‌ی داده‌های شبه‌سازی مشابه تغییرنگاره‌ی داده‌های خام است (شکل ۱۲).



پی‌نوشت‌ها:

۱. Mineral Deposit
۲. Kriging
۳. Equal ppm (e-ppm)
۴. Realization
۵. Ferguson
۶. Leaching
۷. Support
۸. Anisotropy Ellipsoid
۹. Hydrothermal
۱۰. Cross Validation
۱۱. Ordinary Kriging
۱۲. Sequential Gaussian Simulation
۱۳. Node
۱۴. PDF: Probability Density Function
۱۵. Multigaussian Hypothesis
۱۶. Cumulative Probability Density Function
۱۷. Conservative

References:

1. S. Noorian, "General exploration report of block 1 from anomaly 3 of narigan," Internal Report of Exploration Department-Atomic Energy Organization of Iran (AEOI) (2005).
2. M.T. Tahmaseb-Nezami, "Uranium resources evaluation based on general exploration for block 1 of anomaly 3 of Narigan," Internal Report of Exploration Department-Atomic Energy Organization of Iran (AEOI) (2006).
3. A. Hezarkhani, "Practical study of uranium mineralization by fluid inclusion analysis," (2009).
4. A.A. Hasanipak, "Geostatistics (persian language)," University of Tehran Publications (1998).
5. J. Combes, "Handy hints for variography," Snowden Associates Ltd (2002).
6. B. Rowdy, E. Peter, Phil Jackson, Kiran Kumar, "Geostatistics in surpac6," Gemcom Software International Inc. (Gemcom) (2007).
7. D. Oliver, "Geostatistics for seismic data integration in earth models," Society of Exploration Geophysicists, Printed in USA (2003).
8. G. Pan, D.P. Harris, "Information synthesis for mineral exploration," Oxford University Press (2000).
9. C. Deutsch, "Petroleum geostatistic," Stanford University, USA (2005).
- 10.A. Journel and Ch. Huijbergts, "Mining geostatistics," Academic Press Inc (1978).
- 11.C. Deutsch and A. Journel, "GSLIB: geostatistical software library and user's guide," Oxford University Press, New York, 384 (1998).