

مقاله پژوهشی

مدلسازی عیاری کانسار آهن دره زیارت کردستان با روش‌های تخمین و شبیه‌سازی زمین‌آماري

سیاوش سالاریان^۱، بهروز اسکوئی^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، siavash.salarian@gmail.com

۲. دانشیار، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، boskooi@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

چکیده

هدف از این پژوهش، مدل‌سازی عیاری، رده‌بندی ذخیره و ارزیابی ریسک نمودار عیار-تناژ کانسار آهن دره زیارت، واقع در ۳۰ کیلومتری جنوب شهر سقز در غرب ایران است. بدین منظور، ابتدا مطالعات آماری روی نتایج آنالیز تعداد ۱۰ گمانه حفاری شده، صورت گرفت. در ادامه به کمک داده‌های عیاری، یک مدل سه‌بعدی برای کانسار ترسیم شد. مدل حاصل با توجه به فواصل گمانه‌ها بلوک‌بندی شد. برای حذف بلوک‌های باطله از روش کریجینگ شاخص استفاده شد. تخمین عیار بلوک‌های باقی‌مانده به روش کریجینگ معمولی انجام شد و رده‌بندی ذخیره به دو روش صورت گرفت. همچنین نمودار عیار-تناژ برای عیارهای حد مختلف با توجه به نتایج تخمین رسم شد. در ادامه، تمامی مراحل قبل به روش شبیه‌سازی انجام شد. با این تفاوت که برای حذف بلوک‌های باطله، از روش شبیه‌سازی شاخص متوالی و برای تخمین عیار از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی استفاده شد. در پایان، بررسی عدم قطعیت تخمین عیار، تهیه مدل‌های احتمال گذر از عیار حد مشخص و ایجاد مدل E-type با اجرای ۱۰۰ مرتبه شبیه‌سازی گوسی متوالی انجام شد. نتایج نمودار عیار-تناژ تخمین کریجینگ نشان داد که با احتساب عیار حد ۲۰ درصد آهن، میزان ذخیره و عیار میانگین آهن به ترتیب برابر است با ۲/۹ میلیون تن و ۴۰/۷۹ درصد. همچنین نتایج نمودار عیار-تناژ E-type مربوط به ۱۰۰ شبیه‌سازی نشان داد که با احتساب عیار حد ۲۰ درصد آهن، میزان ذخیره و عیار میانگین آهن به ترتیب برابر است با ۳/۱ میلیون تن و ۴۰/۹۲ درصد. در نهایت نواحی امیدبخش کانی‌سازی از طریق مقایسه روش‌های کریجینگ و E-type شناسایی شد.

کلمات کلیدی

شبیه‌سازی شاخص متوالی، شبیه‌سازی گوسی متوالی، کانسار آهن دره زیارت، کریجینگ شاخص، کریجینگ معمولی.

۱- مقدمه

همچنین مشاهده شد که نتایج توزیع عیار شبیه‌سازی نسبت به کریجینگ تقریباً مشابه داده‌های اکتشافی واقعی است. بر این اساس، با استفاده از روش شبیه‌سازی مشروط، مقدار کانسنگ مورد استخراج به طور قابل توجهی افزایش یافت و همچنین میانگین ارزش خالص فعلی (NPV) به عنوان مهم‌ترین شاخص اقتصادی معدن تا ۴۰٪ پیشرفت کرد [۳].

رحیمی و همکاران (۲۰۱۸) پس از مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی منطقه دره زیارت سقز، از روش شبیه‌سازی گوسی توام (Gaussian co-simulation) به منظور تخمین عیار آهن استفاده کردند. همچنین بار دیگر عملیات تخمین عیار را به روش کریجینگ چندگوسی (Multi-Gaussian Kriging) تکرار کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که نتایج تخمین عیار به روش شبیه‌سازی توام وابستگی زیادی به نتایج مدل‌سازی وارون مغناطیسی دارد. دلیل این امر، حضور نقاط متغیر خودپذیری مغناطیسی در تمامی بلوک‌های شبیه‌سازی شده بود. نهایتاً مقایسه این دو روش زمین‌آماري، نتایج معتبرتری را در اعماق کم و نتایج با عدم قطعیت بیشتری را در مناطق عمیق نشان داد [۴].

نوری و همکاران (۱۳۹۹) به مدل‌سازی متغیرهای عیار و بازیابی حاصل از لیچینگ با استفاده از گمانه‌های ذخیره طلای ساری‌گونی پرداختند. به این منظور، ابتدا به روش‌های تخمین و شبیه‌سازی شاخص، دو دامنه اکسیدی و سولفیدی را جدا کردند. سپس به کمک مدل حاصل از شبیه‌سازی شاخص، در هر بخش به شکل جداگانه، به روش شبیه‌سازی گوسی متوالی، مدل‌سازی فضایی انجام دادند. به کمک مدل بدست آمده از شبیه‌سازی عیار، منحنی عیار-تناژ رسم شد و میزان ذخیره برآورد شد که بیش از ۷۰ درصد آن مربوط به زون سولفیدی بود. آنها برای مدل‌سازی ذخیره قابل بازیابی، علاوه بر در نظر گرفتن عیار آستانه، به منظور ارزیابی‌های دقیق‌تر اقتصادی، پارامترهای ژئومتالورژیکی و ژئومکانیکی را هم در نظر گرفتند. در همین راستا، پارامتر بازیابی طلا به کمک داده‌های حاصل از تست بطری غلطان در هر بلوک شبیه‌سازی شد. با محاسبه حاصل ضرب بازیابی طلا و عیار محاسبه شده در بلوک‌ها، میزان تناژ قابل استحصال به شکل قابل توجهی افت داشت [۵].

هدف پژوهش حاضر، مقایسه کارکرد روش‌های کریجینگ معمولی (OK) و شبیه‌سازی گوسی متوالی برای مدل‌سازی ذخیره و ارزیابی ریسک تخمین در کانسار آهن دره زیارت در منطقه سقز کردستان است. در این پژوهش پس از پردازش و مطالعات آماری مربوط به داده‌ها، علاوه بر روش‌های مذکور، از روش‌های کریجینگ شاخص (IK) و شبیه‌سازی شاخص متوالی

روش شبیه‌سازی شرطی در مقایسه با کریجینگ بیش‌تر به انعکاس نوسانات در داده‌های فضایی توجه می‌کند. در حالی که هدف کریجینگ تمرکز روی به حداقل رساندن خطای تخمین است. به طور کلی می‌توان سه تفاوت بین این دو روش قائل شد:

- روش کریجینگ، نوعی درون‌یابی است. این روش فقط روی دقت تخمین محلی متمرکز می‌شود. این دقت شامل ارزیابی بهینه (به حداقل رساندن واریانس تخمین) و ناریب بودن تخمین است.
- روش کریجینگ یک تابع نرم‌شدگی دارد. اگر داده مشاهده شده گسسته باشد، صلاحیت این روش به دلیل نتایج تخمین نرم شده کم می‌شود و تغییرات نامحسوس بین چاه‌ها را نادیده می‌گیرد. این در حالی است که شبیه‌سازی شرطی با استفاده از نویز تصادفی (random noise) که در سیستم مدل درون‌یابی استفاده می‌شود، نتایج را واقعی‌تر از درون‌یابی برآورد می‌کند. نویز تصادفی، تغییرات نامحسوس بین چاه‌ها است. البته مقدار هر شبیه‌سازی برای نقطه محلی کاملاً درست نیست و واریانس تخمین این روش حتی ممکن است بیشتر از روش درون‌یابی باشد. منحنی‌های شبیه‌سازی بهتر می‌توانند نوسانات منحنی واقعی را نشان دهند.
- روش کریجینگ فقط یک نتیجه قطعی به کمک درون‌یابی می‌دهد، این در حالی است که شبیه‌سازی شرطی تعداد بی‌شماری مدل حاصل می‌کند. تفاوت بین این مدل‌ها منعکس‌کننده عدم قطعیت فضایی است [۱].

اصغری و همکاران (۲۰۰۹) به مقایسه دو روش شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS) و تخمین کریجینگ پرداختند. در این پژوهش که به مدل‌سازی معدن آهن چغارت پرداخته شد، پس از مطالعات آماری گمانه‌ها، عملیات کریجینگ و شبیه‌سازی به صورت جداگانه انجام شد. سپس برای هر تراز یک نقشه رسم شد. نقشه‌های تراز کریجینگ به صورت نقشه تخمین عیار و نقشه‌های تراز شبیه‌سازی به صورت نقشه احتمال گذر رسم شدند. همچنین به ارزیابی ریسک به کمک نمودار عیار-تناژ شبیه‌سازی‌ها پرداخته شد. نهایتاً از این پژوهش به این نتیجه رسیدند که نتایج تخمین عیار به روش کریجینگ و شبیه‌سازی بسیار نزدیک است [۲].

منجری و همکاران (۲۰۱۳) از دو روش کریجینگ و شبیه‌سازی برای مدل‌سازی عیاری در معدن کاری روباز استفاده کردند. در این پژوهش مشاهده شد که شبیه‌سازی شرطی به طور موثری می‌تواند ضعف‌های کریجینگ را پوشش دهد.

از عدم قطعیت محلی یا مقادیر احتمالی مشروط به داده‌ها در همسایگی بلوکی که تخمین زده می‌شود.

دلیل اصلی استفاده از روش کریجینگ شاخص در علوم زمین، غیر پارامتری بودن آن است. به علاوه، این روش یکی از معدود روش‌هایی است که با جمعیت‌های داده‌های مختلط کنار می‌آید. از آنجایی که این روش کل توزیع نمونه را توسط تعدادی حد آستانه دسته‌بندی می‌کند، دیگر احتیاجی به برازش دادن یا در نظر گرفتن یک مدل توزیع مشتق شده تحلیلی خاص برای داده‌ها نیست. مزیت دیگر این در این است که نیاز به تبدیل به عقب (Back transform) ندارد. اعتبار دیگر رویکرد شاخص در تخمین داده‌های گسسته (مانند دگرسانی یا لیتولوژی) است. در این موارد، تخمین کریجینگ شاخص، احتمال رخ دادن کد لیتولوژی یا دگرسانی اختصاص داده شده را در یک مکان مشخص می‌دهد. بنابراین، می‌تواند نقشه‌های احتمال لیتولوژی‌ها یا دگرسانی‌های داده شده را بر اساس کد فراهم کند [۱۰].

۲-۲- شبیه‌سازی گوسی متوالی و شبیه‌سازی شاخص متوالی

در علم زمین‌آمار، رایج‌ترین روش شبیه‌سازی به منظور ایجاد تحقق‌های احتمالی، روش شبیه‌سازی گوسی متوالی می‌باشد. این روش اگرچه می‌تواند به صورت دقیق هم اجرا شود، اما در حالت کلی در دسته روش‌های تقریبی قرار می‌گیرد [۸]. در این الگوریتم، ابتدا باید یک مسیر تصادفی برای شبیه‌سازی مشخص شود. سپس با استفاده از داده‌های معلوم، در نقطه یا بلوک اول، روش کریجینگ اجرا شده و میانگین و واریانس پراکندگی متغیر در آن نقطه با کمک تابع cdf محاسبه شود. نهایتاً مقدار شبیه‌سازی به کمک توزیع نرمال معکوس بدست آورده می‌شود [۷].

$$Z_i^{Sim} = \bar{z}_i + \tilde{\sigma}_i \sqrt{-2(\ln(1-A))\text{Cos}(2B)} \quad (2)$$

در رابطه ۲، Z_i^{Sim} همان مقدار شبیه‌سازی شده در موقعیت مورد نظر است. همچنین متغیرهای A و B مقادیر تصادفی در بازه $[0, 0.99]$ هستند. \bar{z}_i مقدار تخمینی و $\tilde{\sigma}_i$ خطای تخمین در موقعیت مورد نظر می‌باشد. این مقدار که برای شبیه‌سازی محاسبه شد، به مقدار تخمین خورده آن نقطه اضافه می‌شود [۱۱]. اگر این الگوریتم بدون توجه به داده اولیه انجام شود (یعنی متغیر Z_i در موقعیت $(x_i, i = 1, \dots, n)$ بدون داده اولیه شبیه‌سازی شود، شبیه‌سازی غیر شرطی نامیده می‌شود. همچنین اگر مقادیر شبیه‌سازی شده مربوط به داده‌های اولیه معادل با مقادیر واقعی این نقاط باشند، شبیه‌سازی از نوع شرطی خوانده می‌شود.

شبیه‌سازی شاخص متوالی نه تنها برای شبیه‌سازی متغیرهای

(SIS) به منظور حذف بلوک‌های باطله استفاده شد. در نهایت پس از مدل‌سازی عیاری به دو روش، رده‌بندی ذخیره با استفاده از واریانس کریجینگ و ارزیابی ریسک محاسبه تناژ به روش شبیه‌سازی انجام شد. همچنین مدل بلوکی گذر از عیارهای حد مختلف به کمک تحقق‌های شبیه‌سازی رسم شد.

در این پژوهش برای ساخت مدل سه‌بعدی کانسنگ (شکل ۹) از نرم‌افزار Leapfrog استفاده شد. شبیه‌سازی‌های SIS و SGS به کمک نرم‌افزار SGeMS انجام شد. سایر محاسبات و خروجی‌های مشاهده شده در این پژوهش (هیستوگرام، واریوگرام، تخمین کریجینگ، تصویر سه‌بعدی گمانه‌ها و ...) به کمک نرم‌افزار Datamine RM صورت گرفت.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص

تخمین گر کریجینگ که به عنوان بهترین تخمین گر خطی ناریب شناخته می‌شود، دارای حداقل خطای تخمین است. این روش دارای اثر نرم‌شدگی می‌باشد و وزن‌دهی داده‌ها در آن بر اساس مدل واریوگرام است. همچنین روابط ریاضی و ماتریسی پیچیده‌ای ندارد و به کمک واریانس آن می‌توان عدم قطعیت داده‌ها را مشخص کرد [۶]. زمانی از روش کریجینگ معمولی استفاده می‌شود که میانگین متغیر در کل ناحیه ثابت فرض شود (شرط پایایی مرتبه اول) و یا حداقل به طور محلی این فرض قابل قبول باشد (پایایی مرتبه دوم) [۷، ۸].

تخمین کریجینگ شاخص یک رویکرد غیر پارامتری است؛ به این معنی که این روش توزیع تخمین را پیش‌بینی نمی‌کند. روش کریجینگ شاخص می‌تواند پدیده‌های طبیعی بسیار تغییرپذیر را بدون حذف مقادیر پرت یا تبدیل غیر خطی مدیریت کند [۹]. هدف این روش مدل‌سازی کانی‌زایی پیچیده با ساختار غیر نرمال است. در واقع، این ساختارها شامل پیوستگی فضایی نامتقارن مقادیر بالا و پایین است. رویکرد تخمین شاخص، دسته‌بندی کردن داده‌ها در دو گروه ۰ و ۱ بر اساس یک حد آستانه مشخص است.

$$i(x; Z_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } z(x) \geq Z_k \\ 0 & \text{if } z(x) < Z_k \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه ۱، Z_x یک مقدار پیوسته با عیار حد/حد آستانه است. این یک تبدیل غیر خطی مقدار داده به کد دودویی ۰ و ۱ است. داده تبدیل شده کریجینگ شاخص، یک مقدار بین ۰ و ۱ برای هر نقطه از تخمین تولید می‌کند. خروجی این روش، یک تابع توزیع تجمعی شرطی است (ccdf). در واقع یک توزیع

وسعت محدوده دره زیارت ۲۴/۰۷ کیلومتر مربع می‌باشد. این محدوده در شمال برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ مریوان واقع شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به این محدوده را نشان می‌دهد.

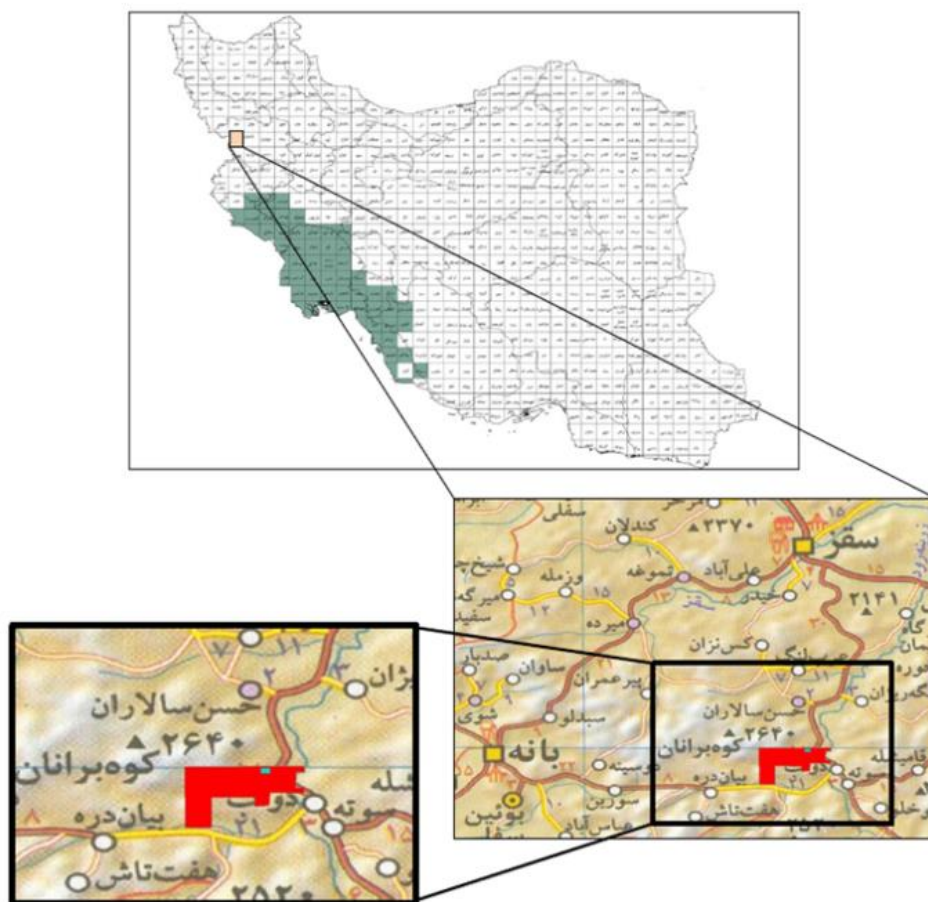
مهم‌ترین استعداد محدوده دره زیارت، کانی‌سازی آهن است. کانی‌سازی فوق به صورت دو رگه موازی با فاصله عرض ۱۰ متر از هم در انطباق با لایه‌بندی واحد شیستی در شمال روستای دره زیارت جای گرفته است. امتداد افق‌های آهن‌دار N65E با شیب ۲۰ درجه به سمت شمال غرب است. طول تقریبی رخنمون‌های آهن‌دار بین ۴۰ تا ۶۰ متر بوده و عرض آنها از ۱ تا ۳ متر در تغییر است. کانه عمده افق‌های آهن‌دار مگنتیت و هماتیت می‌باشد. موازی بودن لایه‌بندی واحدهای سنگی با افق‌های کانه‌سازی، اسکارنی بودن این کانسار را (که در مطالعات قبلی به آن اشاره شده) دور از ذهن می‌کند.

برای منطقه مورد مطالعه نقشه زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ تهیه شده است (شکل ۲). به‌طور کلی منطقه از مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی دگرگون شده شامل سرسیت - کوارتز شیست، انواع واحدهای کربناتی و میان‌لایه‌های فیلیت تشکیل شده است.

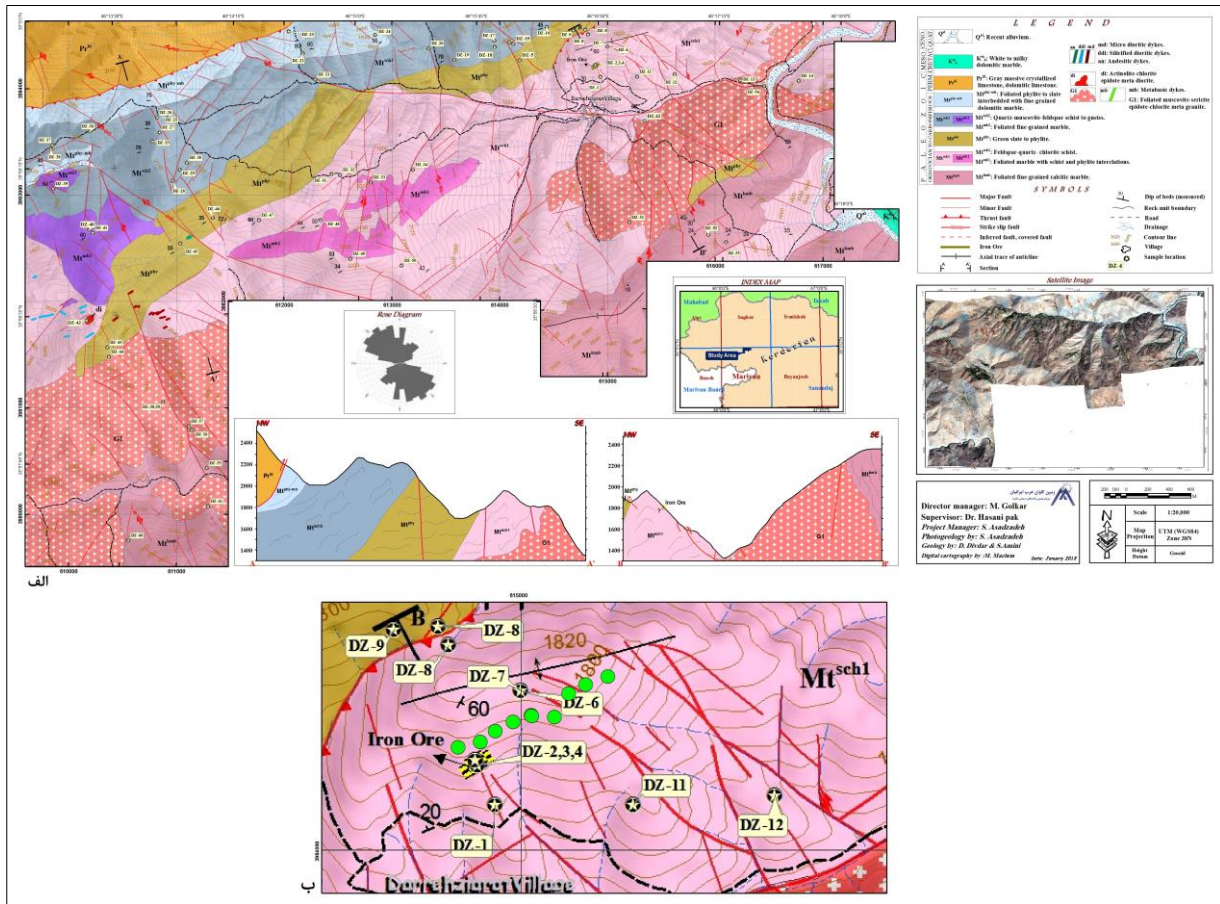
پیوسته استفاده می‌شود، بلکه متغیرهای گسسته را هم به کمک قواعد اولیه کریجینگ شاخص شبیه‌سازی می‌کند. این روش سرعت کم‌تری نسبت به شبیه‌سازی گوسی متوالی دارد، اما مزیت آن در این است که می‌تواند ناهمگنی‌های پیچیده (مانند ناهمسانگردی یا رخساره‌های سنگی گوناگون) را شبیه‌سازی کند. کاربرد اصلی روش شبیه‌سازی شاخص متوالی در شبیه‌سازی پارامترهای خواص سنگ، مانند تخلخل و نفوذپذیری است [۱].

۳- زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

محدوده دره زیارت علیا در ۳۰ کیلومتری جنوب شهر سقز در شمال غرب کشور واقع است. جاده اصلی سقز - مریوان از درون این محدوده می‌گذرد و دسترسی به آن از طریق کیلومتر ۴۰ همین جاده میسر است. مهم‌ترین روستای محدوده، دره زیارت علیا است که در بخش شمال شرقی آن واقع است. محدوده حاضر کوهستانی بوده و ارتفاع در آن بین ۱۵۰۰ تا ۲۳۸۰ متر در تغییر است. با وجود این اختلاف ارتفاع، با استفاده از جاده‌های فرعی درجه دو و مالرو می‌توان به بخش‌های زیادی از منطقه دسترسی داشت.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های ارتباطی روستای دره زیارت (قرمز) و محدوده مورد مطالعه (آبی) [۱۲]



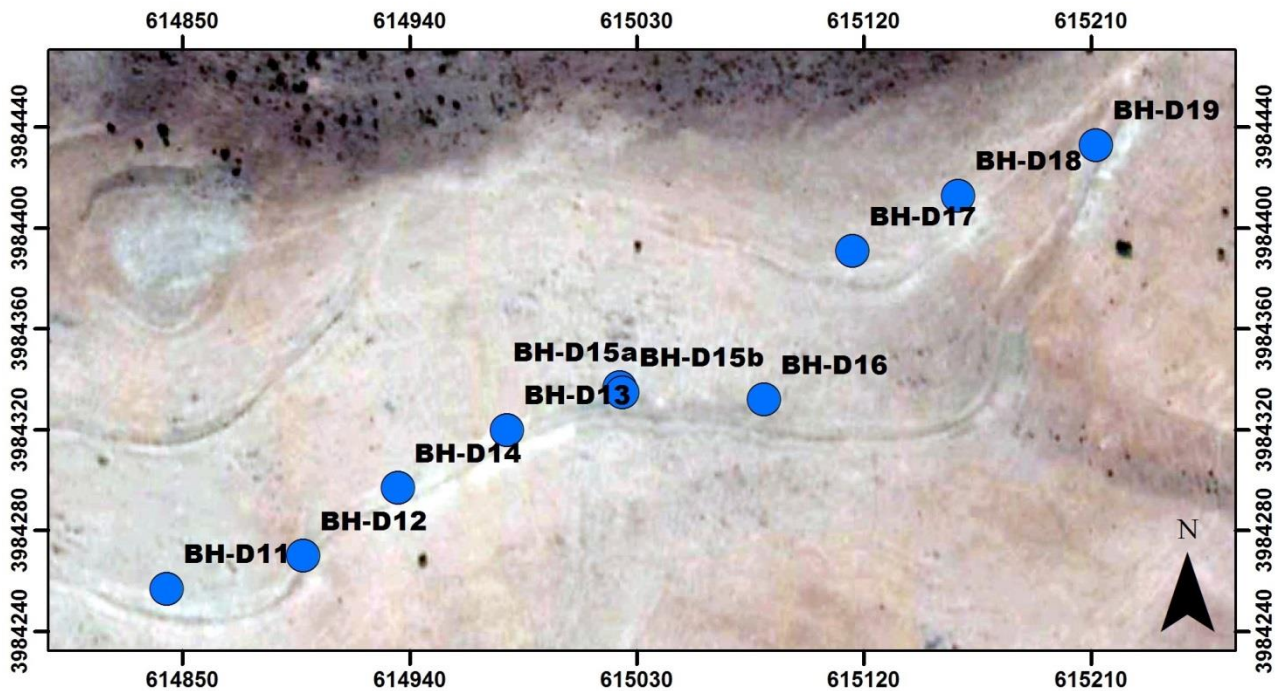
شکل ۲- الف) نقشه زمین شناسی ۱:۲۰۰۰۰ محدوده دره زیارت، ب) جزئیات زمین شناسی محدوده آهن دره زیارت به همراه محل حفاری‌ها [۱۲]

۴- مدل سازی و رده بندی ذخیره به روش تخمین

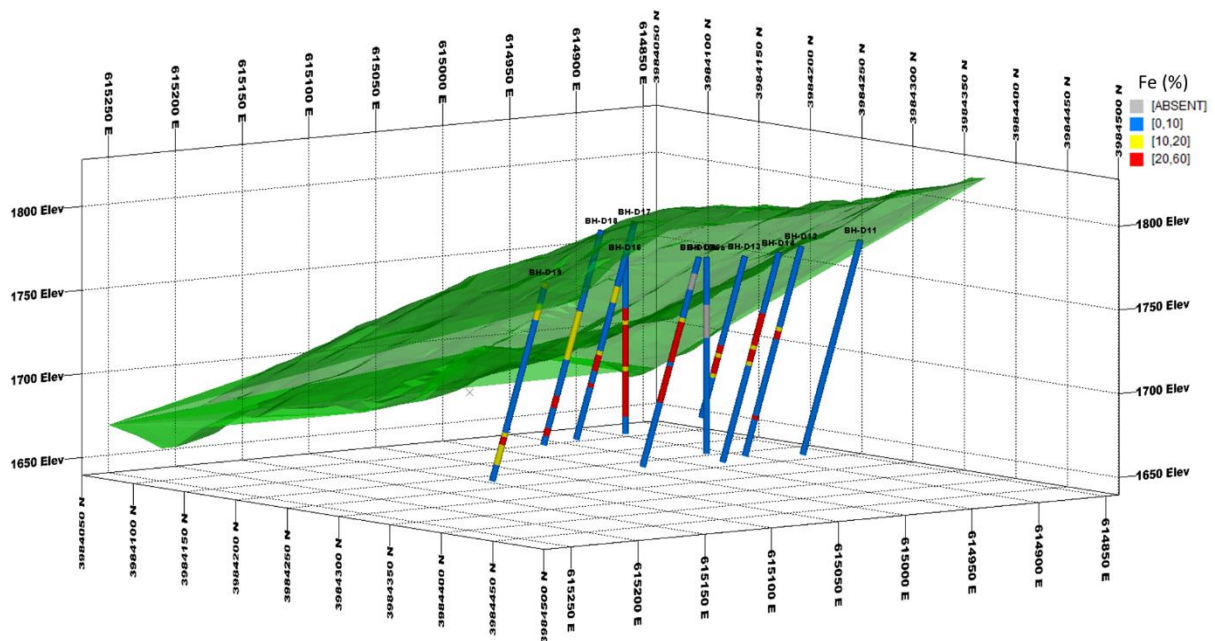
۴-۱- اطلاعات حفاری

حفاری اکتشافی در محدوده دره زیارت توسط دو دستگاه حفاری دی بی ۱۲۰۰ و یک دستگاه لانگر صورت گرفت. حفاری‌ها تا عمق حدودا ۱۰۰ متری با قطر H و بعد از آن با قطر N صورت گرفت. در مجموع و با توجه به داده‌های موجود در این محدوده اطلاعات ۱۰ گمانه به متر ۱۳۴۳ متر در دسترس می‌باشد و از این حفاریات تعداد ۲۰۵ نمونه برای آنالیز عیار آهن که در آزمایشگاه شرکت زرازا به روش شیمی تر مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند، اخذ شده است (جدول ۱). نظر به آنکه احساس می‌شد که در طرح استخراج آبی معدن، برداشت ماده معدنی در پله‌های ۵ متری صورت گیرد، لذا نمونه برداری از مغزه‌های حاوی ماده معدنی در طول‌های ۲/۵ متری و از مغزه‌های فاقد ماده معدنی در طول‌های ۱۰ متری صورت گرفت. موقعیت حفاریات اکتشافی نیز به صورت دبد از بالا و دید سه بعدی به ترتیب در شکل ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است. گمانه‌های مذکور با میانگین فاصله تقریبا ۵۰ متر نسبت به هم حفر شده‌اند که محدوده‌ای به طول و عرض به ترتیب ۵۰۰ متر و ۲۵۰ متر را پوشش می‌دهند.

واحدهای مزبور دچار چین خوردگی با جهت شمال شرقی - جنوب غربی شده و آنگاه در محور این چین، توده‌های گرانیتی - گنایسی نفوذ کرده است. وجود توده‌های کوچک دیوریتی فاقد فابریک جهت یافته درون واحدهای قدیمی تر، نشانگر جایگزینی آنها پس از رخداد دگرگونی یا چین خوردگی است. کانسنگ آهن در این محدوده به صورت افق‌های مگنتیتی - هماتیتی است که در سنگ میزبان سرسیت - کوارتز شیبست (واحد Mt^{schl}) جای گرفته‌اند. از نگاه ساختاری، محدوده دره زیارت در حاشیه شمال غربی زون دگرگونی سنندج - سیرجان واقع شده است. از این رو واحدهای مختلف سنگی موجود در این محدوده خصوصیات این زون دگرگونی را از خود نشان می‌دهند. نهشته‌های مربوط به پالئوزوئیک زیرین تا میانی (اردوسین تا کربنیفر) که به صورت واحدهای دگرگونی در منطقه رخنمون دارند، به طور ناهمساز یا راندگی با آهک‌های پرمین پوشیده می‌شوند. نهشته‌های مربوط به کرتاسه عمدتا شامل واحدهای کربناتی هستند [۱۲].



شکل ۳- موقعیت گمانه‌های حفر شده روی تصویر هوایی



شکل ۴- تصویر سه بعدی گمانه‌های حفاری شده در محدوده مورد مطالعه در حضور توپوگرافی

۲-۴- محاسبات آماری داده‌های حفاری

به منظور تعیین پارامترهای آماری و چگونگی توزیع عیار در سنگ آهن معدن دره زیارت، ابتدا مطالعات آماری بر روی داده‌های خام و سپس با حذف مقادیر خارج از رده و استانداردهای داده‌ها، محاسبات آماری روی داده‌های استاندارد صورت خواهد گرفت. جهت تعیین نوع توزیع،

میانگین و سایر پارامترهای آماری برای عنصر آهن، عیار هر نمونه مطابق با طول نمونه وزن‌دهی و سپس نتایج به شرح جدول ۲ و هیستوگرام شکل ۵ ارائه شده است.

۳-۴- حذف داده‌های خارج از ردیف

در مباحث آماری به مقادیری که به طور معنی‌داری نسبت به سایر مقادیر اختلاف دارند، مقادیر خارج از ردیف گفته می‌شود.

۲/۵، ۵ و ۱۰ متر انجام شد. نتایج این محاسبات در جدول ۳ و جدول ۴ آورده شده است.

پیوستگی کانسنگ و درجه پیوستگی عیار که تابع تیپ کانی‌سازی است، نقش کلیدی در تخمین ایفا می‌کند. برای مثال، در کانسارهای لایه‌ای، این پیوستگی در جهات x و y نسبت به z از درجه بالاتری برخوردار است. در این بخش، هدف بررسی پیوستگی ضخامت باطله و کانه در امتداد گمانه‌ها است. بدین منظور در معدن دره زیارت با در نظر گرفتن عیار حد ۲۰٪ آهن، طول نمونه‌هایی که به صورت پیوسته شامل ماده معدنی و یا باطله هستند، به صورت جداگانه جمع و به عنوان یک قطعه پیوسته در نظر گرفته شده است. سپس محاسبات آماری بر روی این قطعات انجام شد. نتایج این محاسبه برای تغییرات پیوستگی طول زون کانی‌زایی و باطله به ترتیب در جدول ۵ و جدول ۶ نمایش داده شده است.

مطابق شکل ۸، طول بیشتر نمونه‌ها ۲/۵ متری و ۱۰ متری است. دلیل این امر این است که از قسمت کانسنگ با طول ثابت ۲/۵ متر نمونه‌برداری شده و در محدوده باطله این مقدار تا ۱۰ متر افزایش یافته است. از طرفی در انتخاب طول کامپوزیت مناسب باید توجه داشت که بایستی حتی‌الامکان از تقسیم نمونه‌ها جلوگیری به عمل آید (ضرایب صحیحی از طول غالب نمونه‌گیری انتخاب شود). همچنین از یک طرف با افزایش طول کامپوزیت، پارامترهای آماری عیار آهن در زون کانی‌سازی از مقادیر نمونه‌ها اولیه فاصله گرفته و تأثیر میانگین‌گیری مقادیر در فرآیند کامپوزیت‌سازی نمود بیشتری دارد. استفاده از کامپوزیت‌هایی با طول زیاد علاوه بر اختلاط ماده معدنی و باطله، منجر به کاهش تعداد نمونه‌ها شده و در نتیجه مطالعات آنالیز ساختاری و تخمین با مشکل مواجه خواهد شد. اما از طرف دیگر با کاهش طول کامپوزیت، پیوستگی زون کانی‌سازی کاهش پیدا کرده و باعث اختلاف در پارامترهای آماری مدل بلوکی و گمانه‌ها خواهد شد.

با توجه به نتایج مطالعات پیوستگی زون‌های کانی‌زایی و باطله و پیوستگی مناسب طول کانی‌زایی آهن در این داده‌ها و ارتفاع ۵ متری پله‌های استخراجی و همچنین با در نظر گرفتن طول غالب نمونه‌برداری (۲/۵ متر)، کوچک‌ترین واحد معدنکاری (SMU) که در معادن روباز امکان‌پذیر است، لزوم تشابه پارامترهای آماری (واریانس و میانگین) داده‌های خام با داده‌های کامپوزیت شده و جلوگیری از اختلاط بیش از حد داده‌های کم‌عیار و پرعیار، طول کامپوزیت ۲/۵ متر به عنوان گزینه نهایی طول کامپوزیت‌سازی انتخاب شد.

این مقادیر گاهی به دلیل وجود خطاهای تجربی مانند خطای آنالیز در داده‌ها وارد می‌شوند، ولی گاهی هم به دلیل ناهمگنی‌های موجود در جامعه داده‌های اکتشافی بروز می‌کنند. از آنجا که وجود مقادیر خارج از رده باعث بروز اختلال در برخی استنباط‌های آماری می‌گردد، لذا برای نزدیک شدن به نتیجه‌ای قابل قبول لازم است با انجام آزمون‌هایی مقادیر خارج از ردیف تصحیح یا حذف شود.

با رسم منحنی فراوانی داده‌ها مطابق شکل ۶ مقادیر خارج از ردیف برای متغیر مورد نظر مشخص می‌شود. با توجه به منحنی مذکور، در هر نقطه از حد بالای منحنی که ناپیوستگی نامتعارف مشخصی وجود داشته باشد، مقادیر آن به عنوان حد داده‌های خارج از ردیف تلقی و آن داده حذف یا جایگزین می‌شود.

با توجه به منحنی فراوانی عیار آهن، در این متغیر داده خارج از ردیف مشاهده نمی‌شوند.

۴-۴- مطالعه وجود روند در کانسار

قبل از ورود به مطالعات زمین‌آماری، می‌بایست داده‌ها از نظر وجود روند مورد ارزیابی قرار گیرند. بدین منظور مقادیر عیاری آهن در هر سه جهت اصلی از نظر وجود روند مطابق شکل ۷ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات مقادیر عیاری در متغیر آهن در هیچ جهتی از روند خاصی تبعیت نمی‌کند و استفاده از روش کریجینگ بلامانع است. در غیر این صورت به ناچار می‌بایست از روش کریجینگ عام استفاده کرد.

۴-۵- انتخاب طول مناسب کامپوزیت

اولین قدم در کاربرد روش‌های زمین‌آماری، استفاده از مجموعه داده‌هایی است که دارای پایه مساوی باشند و جامعه نمونه‌برداری به گونه‌ای باشد که یک محیط همگن و هم احتمال به لحاظ حجم نمونه‌های برداشت شده را تشکیل دهد. در مواردی که طول نمونه‌های برداشت شده یکسان نباشد، لازم است تا از طریق فرآیند کامپوزیت‌سازی نمونه‌هایی با طول برابر ایجاد نمود. در این روش، کامپوزیت‌سازی از سر دهانه هر چاه با یک فاصله مشخص میانگین‌گیری شده و تمام طول گمانه پیمایش می‌شود. بدین ترتیب یک سری داده با طول ثابت به صورت وزنی در یک فضای هم احتمال بدست می‌آید که در ادامه مراحل پردازش و تخمین استفاده می‌شود.

به منظور بررسی تأثیر طول کامپوزیت بر جوامع آماری، محاسبات آماری عیار آهن بر روی کل داده‌ها و همچنین داده‌های زون کانی‌زایی آن‌ها (نمونه‌هایی از گمانه‌ها که عیار آهن بالای ۲۰ درصد داشته باشند) برای کامپوزیت با طول‌های

۴-۶- ساخت مدل سه‌بعدی ماده معدنی

همان‌طور که گفته شد، یکی از خصوصیات کریجینگ، هموارسازی تغییرات است. لذا در صورت اینکه کل داده‌های کانسنگ و باطله برای تخمین فضای کانسار به کار رفته شود، باطله‌های موجود در فضای تخمین، عیار بلوک کانسنگ را کاهش می‌دهند و داده‌های کانسنگ در اطراف بلوک‌های باطله، عیار بلوک باطله را به صورت غیر واقعی افزایش می‌دهند. بنابراین برای کنترل این فرایند، محدوده‌ای در فضا که لازم است تخمین در آن صورت گیرد، از محدوده اطراف باید جدا شود. از نظر فرآیند تخمین، یک محدوده مناسب، محدوده‌ای است که در آن باطله به حداقل مقدار ممکن رسیده باشد. به منظور رسیدن به مناسب‌ترین فضای تخمین، ابتدا با استفاده از نتایج آنالیز شیمیایی عنصر آهن، مقاطع قائمی بر روی گمانه‌های دربرگیرنده ماده معدنی (نمونه‌هایی از گمانه که عیار بیشتر از ۲۰ درصد دارند) ترسیم شده و نهایتاً مدل سه‌بعدی گمانه‌ها تهیه شد. مدل حاصل، قسمت‌هایی از گمانه که عیار بالاتر از ۲۰ درصد دارند را در برگرفته است (شکل ۹).

برای انتخاب ابعاد مدل بلوکی باید توجه داشت که برای بلوک‌های کوچک، خطای تخمین افزایش یافته و عدم قطعیت مدل بلوکی اقتصادی مورد استفاده در بهینه‌سازی کاواک بالا می‌رود. به عنوان یک قاعده کلی، ابعاد بلوک در جهت x و y نباید کم‌تر از یک‌چهارم فاصله گمانه‌ها باشد. اگر ابعاد بلوک‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر از این اندازه باشند، تخمین حاصله دقت کافی ندارد [۱۳]. بر این اساس و به‌منظور آماده‌سازی فضای ذخیره جهت تخمین، با توجه به فاصله ۵۰ متری شبکه حفاری، مدل حجمی با بلوک‌های $5 \times 10 \times 10$ و ریز بلوک $1 \times 5 \times 5$ طراحی شد. مدل بلوکی حاصل حجمی برابر با 979525 مترمکعب دارد.

۴-۷- تعیین ساختار فضایی داده‌ها

هدف از تعیین ساختار فضایی متغیرها، بررسی تغییرپذیری مقادیر اندازه‌گیری شده هر متغیر با توجه به موقعیت محل نمونه‌های برداشت شده در فضای سه‌بعدی است. بدین ترتیب قانونمندی تغییرات مقدار اندازه‌گیری شده در جهات و امتدادهای مختلف تعیین شده و به وسیله اعمال قانونمندی بدست آمده در تخمین سایر نقاط محیط نمونه‌برداری، می‌توان دقیق‌ترین تخمین ممکن را برای هر متغیر در هر نقطه بدست آورد.

متداول‌ترین روش برای تعیین ساختار فضایی، ترسیم

واریوگرام در جهات مختلف و بررسی پارامترهای واریوگرام ترسیم شده در این جهات است. بدین منظور لازم است تا تعداد زیادی واریوگرام در جهات مختلف و با شرایط متفاوت برای هر متغیر ترسیم شود تا بتوان ساختار فضایی مورد نظر را تعیین نموده و بیضوی ناهمسانگردی (یا ساختار همسانگرد) توزیع مقدار اندازه‌گیری شده برای متغیر مورد بررسی را در فضای سه‌بعدی تعیین نمود. در این پژوهش، دو مرحله تخمین لازم است. ابتدا برای جداسازی مرز کانسنگ و باطله و سپس تخمین عیار آهن.

برای انجام مرحله اول، ابتدا تخمین کریجینگ شاخص به منظور افزایش دقت و بهبود مدل بلوکی ماده معدنی اجرا می‌شود. به این صورت که به داده‌هایی از گمانه که عیار بالاتر از ۲۰ درصد آهن دارند، کد ۱ و به داده‌هایی از گمانه که عیار کمتر از ۲۰ درصد آهن دارند، کد ۰ اختصاص داده می‌شود. سپس مدل بلوکی ساخته شده در مرحله قبل، با این داده‌های ۰ و ۱ شده تخمین زده می‌شود. پس از این تخمین، بلوک‌هایی که باطله اطلاق شدند، از مدل حذف می‌شوند. نهایتاً تخمین عیار آهن در بلوک‌های باقی‌مانده انجام خواهد شد.

به منظور شناسایی ناهمسانگردی و جدایش مرز کانسنگ و باطله، واریوگرام‌های شاخص متعددی در شیب و آزیموت مختلف بر روی داده‌های شاخص (۰ و ۱ شده) کامپوزیت $2/5$ متری ترسیم شد. با توجه به واریوگرام‌های تجربی به دست آمده، مشخص شد که داده‌های مذکور ناهمسانگردی واضحی را نشان نمی‌دهند که نشان‌دهنده رفتار ایزوتروپ این متغیر می‌باشد. شکل ۱۰ واریوگرام غیر جهتی شاخص کل داده‌های آهن را به همراه مدل برازش شده بر آن نشان می‌دهد.

در مرحله بعد، به منظور شناسایی ناهمسانگردی در کانسار، واریوگرام‌های تجربی متعددی در شیب و آزیموت مختلف بر روی داده‌های آهن کانسنگ (عیار بالای ۲۰ درصد آهن) که به صورت کامپوزیت‌های $2/5$ متری در آمدند، ترسیم شد. با توجه به تعداد کم و فاصله زیاد داده‌های آهن با عیار بالای ۲۰ درصد، واریوگرام مناسبی در جهات و شیب‌های مختلف یافت نشد. تنها واریوگرام نسبتاً قابل قبول به صورت غیر جهت‌دار و با طول گام ۵ متر حاصل شد (شکل ۱۱).

۴-۸- حذف بلوک‌های باطله از مدل بلوکی به روش کریجینگ شاخص

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، به منظور افزایش دقت مدل ذخیره و شناسایی باطله‌های غیر رونددار، عملیات

بودن عیار میانگین داده‌های حفاری با عیار میانگین بلوک‌های تخمین، اثر نرم‌شدگی در داده‌های عیار بالا و پایین و همچنین واریانس پایین تخمین، از ویژگی‌های ذاتی تخمین کریجینگ هستند.

۴-۱۰- رده‌بندی ذخیره

رده‌بندی تخمین صورت گرفته به دو روش انجام شد. روش اول بر اساس "دستورالعمل رده‌بندی ذخایر معدنی، نشریه شماره ۳۷۹، معاونت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۸۷" و روش دوم بر اساس سطح اعتماد.

در روش اول که به روش روسی معروف است، برای هر بلوک تخمینی مقداری به‌عنوان انحراف معیار تخمین به دست می‌آید که این مقدار تابع ساختار فضایی داده‌های معلوم به‌کار رفته در تخمین عیار بلوک مربوطه است. مطابق رابطه ۳ و بر اساس سطح اعتماد مطلوب، با ضرب یک عدد ثابت (Z) در انحراف معیار (S) و تقسیم حاصله بر عیار هر بلوک (X)، مقدار خطای نسبی تخمین عیار هر بلوک محاسبه می‌شود. در این مطالعات سطح اعتماد ۹۰٪ در نظر گرفته شد که در این صورت مقدار $Z=1/64$ است. همچنین در سطح اعتماد ۸۰٪ مقدار $Z=1/28$ می‌شود.

$$Err = \left(\frac{Z \times S}{X} \right) \times 100 \quad (3)$$

رده‌بندی ذخیره در این بخش بر اساس "دستورالعمل رده‌بندی ذخایر معدنی، نشریه شماره ۳۷۹، معاونت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۸۷" انجام شد (جدول ۸). مطابق این دستورالعمل، ذخایر برحسب خطا به چهار گروه ذخایر A، B، C1 و C2 تقسیم می‌شود که سه گروه اول ذخایر صنعتی (قابل طراحی) و منبع معدنی گروه C2 منبع معدنی زمین‌شناسی خوانده می‌شود. بر اساس این رده‌بندی، ذخایر صنعتی را می‌توان در طرح آماده‌سازی معدن تهیه و اجرا کرد. همچنین ذخایر نوع A را قطعی، نوع B را احتمالی و نوع C را ممکن می‌نامند [۱۴].

در روش دوم برای رده‌بندی ذخیره، متغیر سطح اعتماد به عنوان معیار در نظر گرفته شد. بر اساس مقدار خطای تخمین در سطوح اعتماد مختلف می‌توان دامنه تغییرات عیار هر بلوک را بدست آورد. بر اساس حدود اطمینان که در سطح اطمینان P٪ با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود، به راحتی می‌توان دامنه تغییرات عیار هر بلوک را در هر سطح اعتماد دلخواه بدست آورد.

$$CL = Z_{p\%} \times S \quad (4)$$

متغیر S همان انحراف از معیار و مقدار Z معادل تابع نرمال شده لاپلاس است که به عنوان تابعی از احتمال، از جداول آماری قابل

تخمین با استفاده از روش کریجینگ شاخص با عیار حد ۲۰ درصد آهن در مدل بلوکی کانسار انجام شد. در نتیجه این تخمین که با داده‌های کدگذاری شده ۰ و ۱ انجام شد، هر بلوک عددی بین ۰ تا ۱ تخمین زده شد. این اعداد نشان‌دهنده احتمال کانسنگ یا باطله بودن بلوک هستند. هر چه عدد بلوک تخمین زده شده به ۱ نزدیک‌تر باشد، یعنی احتمال کانسنگ بودن آن بلوک بیشتر است. شعاع جستجوی اول این تخمین، برابر با دوسوم دامنه برازش شده بر واریوگرام شاخص کل داده‌های آهن در نظر گرفته شد. در نهایت، بلوک‌هایی که عدد ۰/۴ یا بیشتر تخمین خوردند، به عنوان کانسنگ و بلوک‌های کمتر از ۰/۴ باطله تشخیص داده شدند (شکل ۱۲). عدد ۰/۴ با آزمون و خطای مقادیر مختلف و به کمک سنجش بصری و مقایسه گمانه‌ها با نتیجه تخمین شاخص انتخاب شد.

لازم به ذکر است که تخمین شاخص آهن در این مرحله به عنوان پارامتر تفکیک‌کننده کانسنگ و باطله می‌باشد و جهت ارزیابی نهایی ذخیره، بر اساس پارامترهای تخمین کانسنگ آهن (آهن بالای ۲۰ درصد) اقدام به تخمین مجدد (تخمین نهایی) خواهد شد. تخمین نهایی عیار آهن در مدل بلوکی شکل ۱۳ انجام خواهد شد. پس از انجام این عمل، حجم مدل بلوکی از ۹۷۹۵۲۵ مترمکعب به ۷۳۸۵۵۰ مترمکعب کاهش یافت.

۴-۹- تخمین نهایی عیار آهن به روش کریجینگ معمولی

پس از حذف بلوک‌های با عیار کمتر از ۲۰ درصد آهن از فضای تخمین اولیه توسط تخمین کریجینگ شاخص، تخمین نهایی فقط با استفاده از داده‌های کامپوزیت ۲/۵ متری با عیار آهن بالای ۲۰ درصد به روش کریجینگ معمولی انجام پذیرفت (شکل ۱۴). شعاع جستجوی تخمین به طور تجربی برابر با دوسوم دامنه واریوگرام در نظر گرفته می‌شود؛ اما در این پژوهش، به دلیل پایین بودن دامنه واریوگرام و تخمین نخوردن همه بلوک‌ها، شعاع جستجوی تخمین برابر با دامنه واریوگرام در نظر گرفته شد. همچنین شعاع‌های جستجوی دوم و سوم به ترتیب ۱/۵ برابر و ۲ برابر شعاع جستجوی اول در نظر گرفته شدند. با توجه به مدل واریوگرام برازش داده شده، مدل بیضوی جستجو به شکل همسانگرد در نظر گرفته شد.

لازم به ذکر است که به دلیل عدم انجام نمونه‌برداری وزن مخصوص و بررسی نشدن رابطه بین عیار آهن و وزن مخصوص نمونه‌ها، به ناچار و به صورت تجربی مقدار g/cm^3 ۴ به عنوان وزن مخصوص همه بلوک‌ها در نظر گرفته شد. به منظور اعتبارسنجی نتایج تخمین، از مقایسه پارامترهای آماری داده‌های اولیه با نتایج تخمین استفاده شد (جدول ۷). نزدیک

کد ۱ نشان از کانسنگ بودن و کد ۰ نشان از باطله بودن آن بلوک دارد. میانگین این ۱۰۰ شبیه‌سازی برای هر بلوک محاسبه شد (شکل ۱۹). در نتیجه به هر بلوک عددی بین ۰ تا ۱ تعلق می‌گیرد. هرچه این عدد به ۱ نزدیک‌تر باشد، احتمال کانسنگ بودن آن بیشتر است و برعکس.

حال باید یک میزان حد برای انتخاب بلوک‌های کانسنگ انتخاب شود. از مقایسه بصری مدل بلوکی حاصل از میانگین ۱۰۰ شبیه‌سازی شاخص متوالی با گمانه‌ها، به نظر می‌رسد بلوک‌هایی که میانگین ۱۰۰ شبیه‌سازی آنها مقدار $0/2$ یا بیشتر بوده، با عیارهای بالاتر از ۲۰ درصد آهن رابطه نزدیکی دارند. بر همین اساس بلوک‌ها با میانگین $0/2$ و بیشتر به عنوان مدل بلوکی کانسنگ انتخاب شدند و سایر بلوک‌ها از مدل بلوکی حذف شدند (شکل ۲۰). پس از انجام این عمل، حجم مدل بلوکی از ۹۷۹۵۲۵ مترمکعب به ۷۷۶۸۰۰ مترمکعب کاهش یافت.

تخمین نهایی در بلوک مذکور به روش شبیه‌سازی گوسی متوالی انجام می‌شود. لازم به ذکر است که روش شبیه‌سازی بیشتر بر مدل‌سازی عدم قطعیت تاکید دارد تا مدل‌سازی عیار. در این پژوهش با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی هم مدل‌سازی عیاری انجام شد و هم میزان ریسک عیار و تناژ محاسبه شد. برای اجرای الگوریتم شبیه‌سازی گوسی متوالی، ابتدا باید داده‌ها وارد فضای نرمال شوند. سپس وارپوگرافی با داده‌های نرمال شده انجام شود (شکل ۲۱). در همین راستا تعداد ۱۰۰ تحقق شبیه‌سازی گوسی متوالی به وسیله داده‌های نرمال شده کانسنگ آهن (داده‌های آهن با عیار بالای ۲۰ درصد) انجام شد. این ۱۰۰ تحقق در فضای نرمال قرار دارند و باید به فضای معمولی بازگردانده شوند. با توجه به ذات تصادفی شبیه‌سازی، هر تحقق نتیجه منحصر به فرد خود را دارد. به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، می‌توان هیستوگرام هر تحقق را با هیستوگرام داده‌های اولیه مقایسه کرد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، در روش شبیه‌سازی برخلاف روش تخمین (که اثر نرم‌شدگی دارد)، عیارهای بالا و پایین بازتولید می‌شوند (جدول ۱۱ و شکل ۲۲)، اما واریانس بیش‌تری دارد.

برای دستیابی به یک مدل به عنوان مدل عیاری، می‌توان از این ۱۰۰ تحقق شبیه‌سازی گوسی متوالی، میانگین‌گیری کرد. به این مدل E-type گفته می‌شود (شکل ۲۳). خروجی مدل E-type از جنس عیار است و می‌تواند با خروجی کریجینگ مقایسه شود. در ادامه نتایج E-type با نتایج تخمین کریجینگ مقایسه شد (جدول ۱۲) و نمودار عیار-تناژ آن رسم شد (شکل ۲۴). این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج E-type مانند

استخراج است. مثلاً برای سطح اعتماد ۹۵ درصد، مقدار آن معادل $1/96$ می‌باشد. الگوریتم این روش در شکل ۱۵ آورده شده است.

رابطه ۴ برای عیار هر بلوک کانسنگ دو حالت متصور است:

- در صورتی که مقدار Grade Block-CL بیش‌تر از عیار حد باشد، بلوک مورد نظر در رده کانسنگ قطعی طبقه‌بندی می‌شود.
- در صورتی که مقدار Grade Block-CL کم‌تر از عیار حد باشد، بلوک مورد نظر در رده کانسنگ احتمالی طبقه‌بندی می‌شود.

نتایج رده‌بندی آنومالی دره زیارت به دو روش مذکور در شکل ۱۶، شکل ۱۷، جدول ۹ و جدول ۱۰ مشاهده می‌شود.

۴-۱۱- نمودار عیار-تناژ

رسم نمودار عیار-تناژ نیازمند محاسبه تناژ نظیر برای عیار حدهای مختلف آهن است. با توجه به عیار تخمینی آهن بلوک‌ها و وزن مخصوص آنها، می‌توان به محاسبه ذخیره به ازای عیار حدهای مختلف پرداخت. بر اساس نمودار شکل ۱۸ با احتساب عیار حد ۲۰ درصد آهن، میزان ذخیره و عیار میانگین آهن به ترتیب برابر است با $2/9$ میلیون تن و $40/79$ درصد. با در نظر گرفتن عیار حد ۴۰ درصد، میزان ذخیره و عیار میانگین آهن به ترتیب برابر می‌شود با $1/5$ میلیون تن و $45/73$ درصد.

۵- مدل‌سازی ذخیره و ارزیابی ریسک به روش شبیه‌سازی

مدل‌سازی عیاری که در بخش قبل به روش تخمین انجام شد، در این بخش بار دیگر به روش شبیه‌سازی انجام می‌شود؛ با این تفاوت که برای تعیین مرز ماده معدنی به جای روش کریجینگ شاخص، از روش شبیه‌سازی شاخص متوالی استفاده شد. همچنین برای تخمین عیار به جای روش کریجینگ معمولی، از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی استفاده شد.

به منظور حذف باطله‌های موجود در مدل ماده معدنی به روش شبیه‌سازی شاخص متوالی، در ابتدا داده‌های کامپوزیت شده $2/5$ متری آهن به داده‌های شاخص با کد ۰ و ۱ تبدیل شدند. به این ترتیب که به داده‌های مربوط به کانی‌زایی (عیار ۲۰ درصد به بالای آهن) کد ۱ و به داده‌های مربوط به باطله (عیار کمتر از ۲۰ درصد آهن) کد ۰ اختصاص داده شد. وارپوگرافی شاخص با داده‌های ۰ و ۱ شده، انجام شد. این وارپوگرام قبلاً به منظور تخمین شاخص هم رسم شده بود (شکل ۱۰). تعداد ۱۰۰ تحقق برای شبیه‌سازی شاخص متوالی با داده‌های مذکور انجام شد. خروجی هر شبیه‌سازی به این صورت است که به هر بلوک کد ۰ یا کد ۱ اختصاص می‌گیرد.

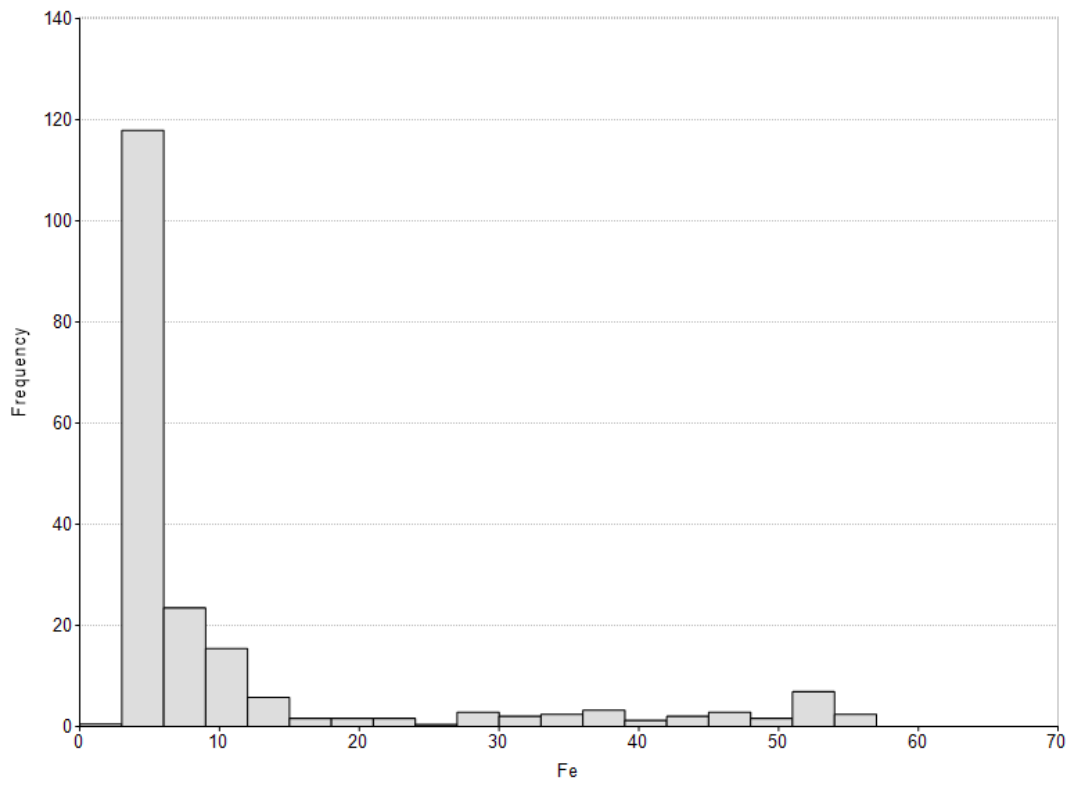
- روش کریجینگ، نوعی درون‌یابی است. این روش فقط روی دقت تخمین محلی متمرکز می‌شود. این دقت شامل ارزیابی بهینه (به حداقل رساندن واریانس تخمین) و ناریب بودن تخمین است. روش کریجینگ یک تابع نرم‌شدگی دارد. اگر داده مشاهده شده گسسته باشد، صلاحیت این روش به دلیل نتایج تخمین نرم شده کم می‌شود و تغییرات نامحسوس بین چاه‌ها را نادیده می‌گیرد. این در حالی است که شبیه‌سازی شرطی، نتایج تخمین را واقعی‌تر از درون‌یابی نشان می‌دهد.
 - روش شبیه‌سازی بیش‌تر بر مدل‌سازی عدم قطعیت و ارزیابی ریسک تاکید دارد تا مدل‌سازی عیار.
 - بازتولید مقادیر بالا و پایین در شبیه‌سازی گوسی متوالی نتیجه بهتری دارد. همچنین کریجینگ در کاهش واریانس تخمین و دست‌یابی به میانگین نزدیک به داده‌های اولیه بهتر عمل می‌کند.
 - نتایج E-type مانند کریجینگ توانست به خوبی به میانگین عیار داده‌های اولیه نزدیک شود. همچنین در ارزیابی عیارهای بالا و پایین ناموفق بوده و نتایج ضعیف‌تری نسبت به کریجینگ داشت. همچنین واریانس مدل E-type بسیار پایین‌تر از کریجینگ بود.
 - نتایج نمودار عیار-تناژ تخمین نشان داد که با احتساب عیار حد ۲۰ درصد آهن، میزان ذخیره و عیار میانگین آهن به ترتیب برابر است با ۲/۹ میلیون تن و ۴۰/۷۹ درصد. با در نظر گرفتن عیار حد ۴۰ درصد، میزان ذخیره و عیار میانگین آهن به ترتیب برابر می‌شود با ۱/۵ میلیون تن و ۴۵/۷۳ درصد.
 - نتایج نمودار عیار-تناژ E-type مربوط به ۱۰۰ شبیه‌سازی نشان داد که با احتساب عیار حد ۲۰ درصد آهن، میزان ذخیره و عیار میانگین آهن به ترتیب برابر است با ۳/۱ میلیون تن و ۴۰/۹۲ درصد. با در نظر گرفتن عیار حد ۴۰ درصد، میزان ذخیره و عیار میانگین آهن به ترتیب برابر می‌شود با ۱/۸ میلیون تن و ۴۲/۹۵ درصد.
 - نتایج نمودارهای عیار-تناژ ۱۰۰ شبیه‌سازی نشان داد که میزان ذخیره با در نظر گرفتن عیار حد ۴۵ درصد، می‌تواند از ۹۰۰ هزار تن تا ۱/۹ میلیون تن تغییر کند. ریسک (تغییرات) میزان ذخیره در عیار حد ۴۰ تا ۵۰ درصد، به بالاترین میزان خود می‌رسد.
 - مقایسه مدل کریجینگ و مدل E-type شبیه‌سازی‌ها حاکی از این است که قسمت‌های پرعیار آهن عموماً به صورت یک توده بزرگ در ناحیه غربی منطقه یافت می‌شوند. یک توده کم‌حجم عمیق هم در بخش شرقی دیده می‌شود.
- ۶- نتیجه‌گیری**
- بر اساس پژوهش انجام شده، نتایج زیر قابل طرح است:

کریجینگ توانست به‌خوبی به میانگین عیار داده‌های اولیه نزدیک شود. همچنین در ارزیابی عیارهای بالا و پایین ناموفق بوده و نتایج ضعیف‌تری نسبت به کریجینگ داشت. واریانس مدل E-type بسیار پایین‌تر از کریجینگ بود.

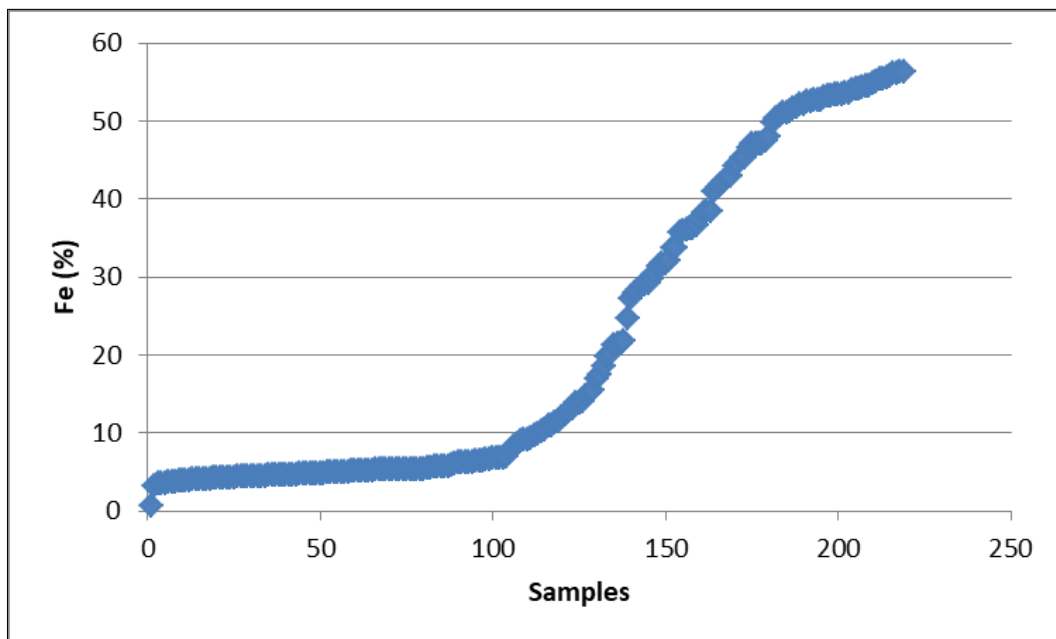
طبق نتایج مدل E-type، بر اساس نمودار شکل ۲۴ و با احتساب عیار حد ۲۰ درصد آهن، میزان ذخیره و عیار میانگین آهن به ترتیب برابر است با ۳/۱ میلیون تن و ۴۰/۹۲ درصد. با در نظر گرفتن عیار حد ۴۰ درصد، میزان ذخیره و عیار میانگین آهن به ترتیب برابر می‌شود با ۱/۸ میلیون تن و ۴۲/۹۵ درصد.

برای ارزیابی ریسک و عدم قطعیت محاسبه عیار و تناژ، تمامی ۱۰۰ شبیه‌سازی گوسی متوالی انجام شده، در یک نمودار عیار-تناژ آورده شد. به کمک این نمودار، به جای یک مقدار به عنوان عیار و تناژ، می‌توان حدود تغییرات عیار و تناژ را برآورد کرد. نمودار شکل ۲۵ نشان می‌دهد که میزان ذخیره با در نظر گرفتن عیار حد ۴۵ درصد، می‌تواند از ۹۰۰ هزار تن تا ۱/۹ میلیون تن تغییر کند. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که ریسک (تغییرات) میزان ذخیره در عیار حد ۴۰ تا ۵۰ درصد، به بالاترین میزان خود می‌رسد.

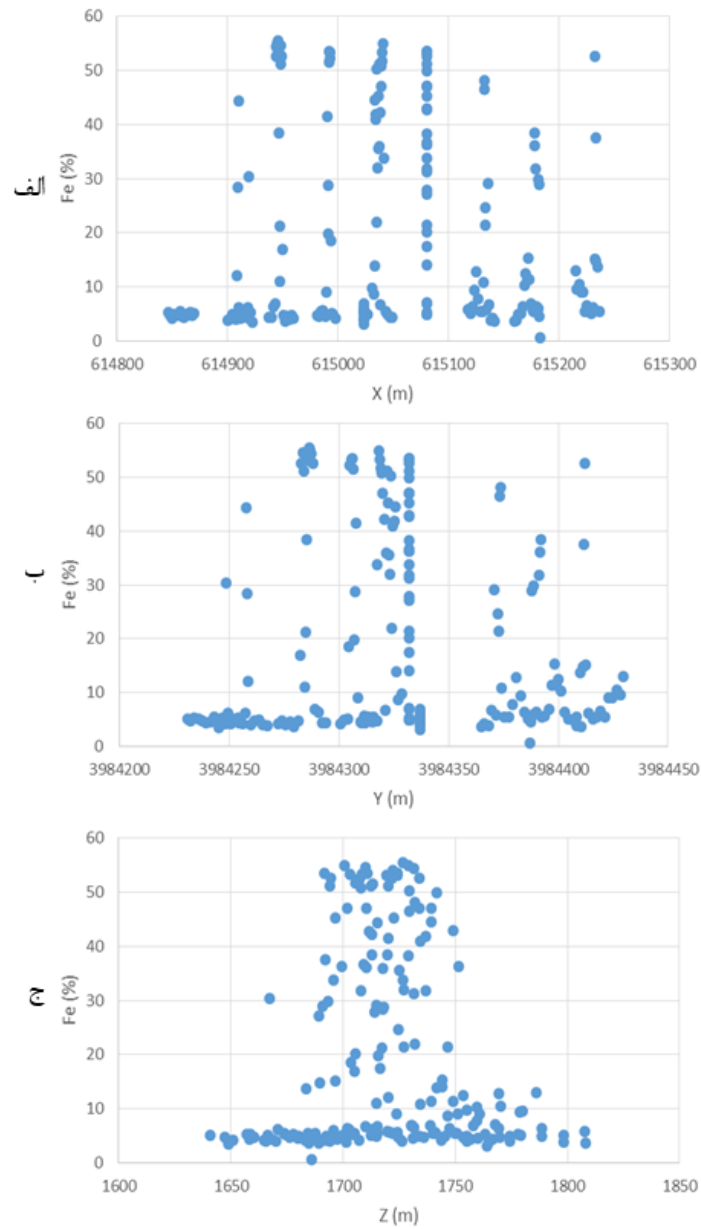
کاربرد دیگر روش شبیه‌سازی، به دست آوردن مدل احتمال گذر از عیار حد مشخص است. بدین منظور، تعداد دفعاتی که عیار یک بلوک از عیار حد مورد نظر می‌گذرد، محاسبه می‌شود. مقدار محاسبه‌شده یک عدد بین ۰ تا ۱۰۰ است (زیرا ۱۰۰ شبیه‌سازی انجام شد) که در واقع احتمال بیشتر بودن عیار آن بلوک از عیار حد مورد نظر را نشان می‌دهد. از این مدل می‌توان برای رسیدن به اطمینان بالاتر و ریسک کمتر استفاده کرد. برای مثال، این مدل‌ها می‌توانند برای برنامه‌ریزی استخراج و تعیین نقاط تکمیلی حفاری به کار گرفته شوند. شکل ۲۶ مدل مذکور را برای گذر از عیارهای ۳۵٪، ۴۰٪ و ۴۵٪ نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۲۷، بلوک‌ها با عیار بالاتر از ۴۵ درصد (بر اساس نتایج تخمین کریجینگ) با بلوک‌های دارای احتمال حداقل ۵۰٪ برای گذر از عیار ۴۵٪ (بر اساس نتایج شبیه‌سازی) مقایسه شده‌اند. این مقایسه که نتایج نزدیکی را نشان می‌دهد، حاکی از این است که قسمت‌های پرعیار آهن عموماً به صورت یک توده بزرگ در ناحیه غربی منطقه یافت می‌شوند. یک توده کم‌حجم عمیق هم در بخش شرقی دیده می‌شود.



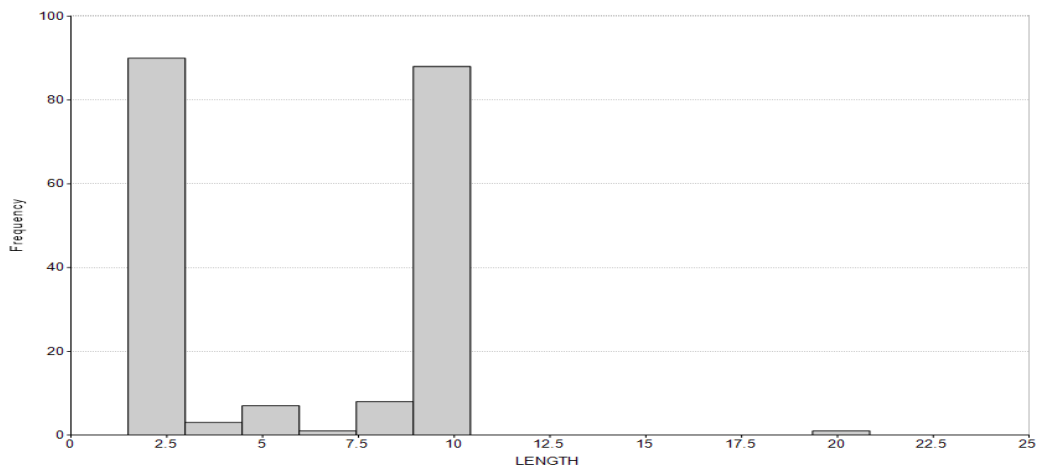
شکل ۵- هیستوگرام توزیع عیار آهن در داده‌های خام



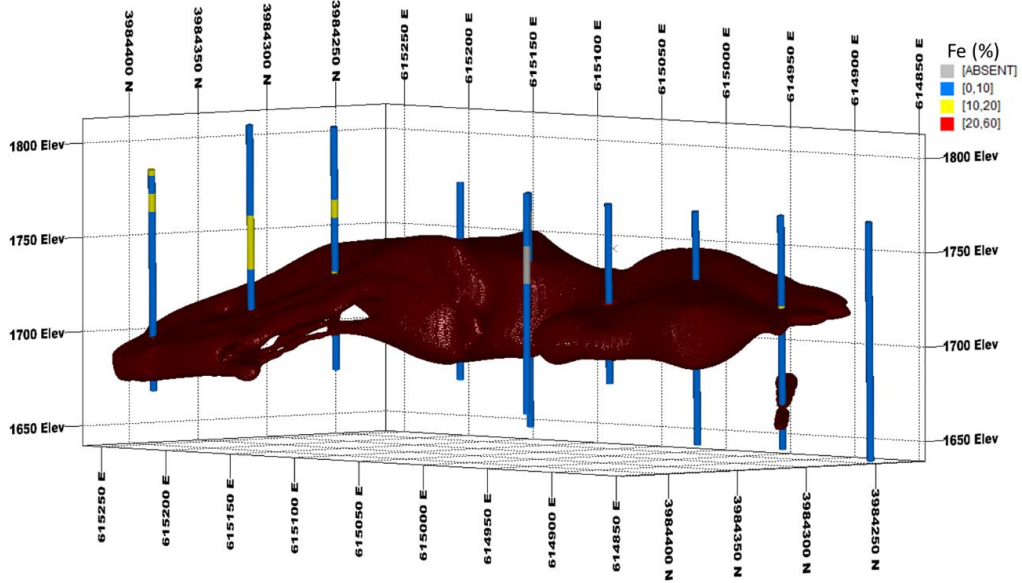
شکل ۶- منحنی فراوانی داده‌های عیار آهن



شکل ۷- نمودار پراکندگی عیار آهن بر حسب جهت‌های الف(x، ب(y و ج(z)

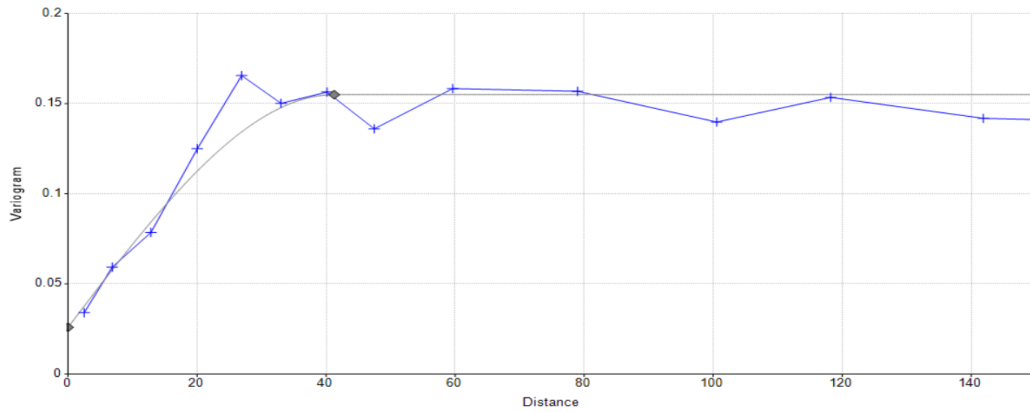


شکل ۸- هیستوگرام فراوانی طول نمونه‌های داده‌های خام



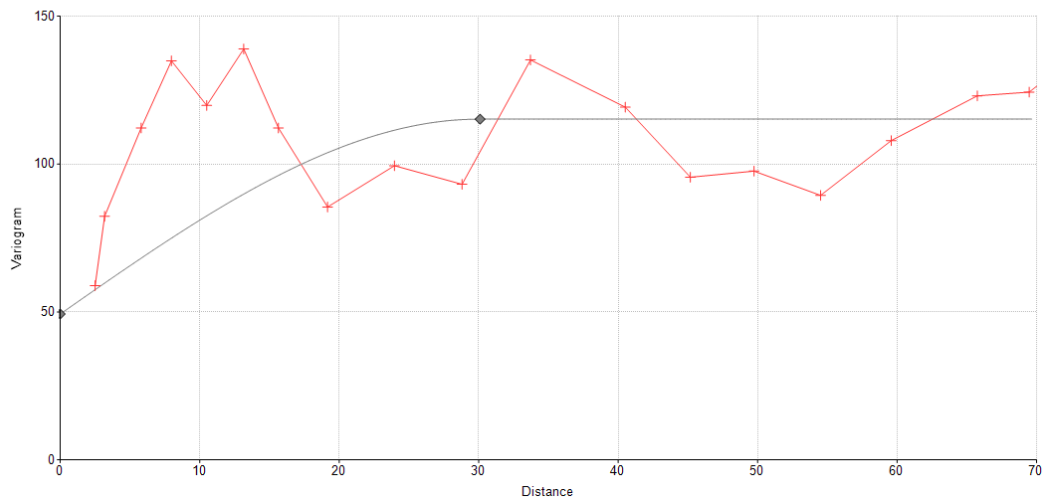
شکل ۹- مدل سه بعدی کانسنگ

Type	Variance	Range
Nugget	0.026	-
Spherical	0.129	41.2

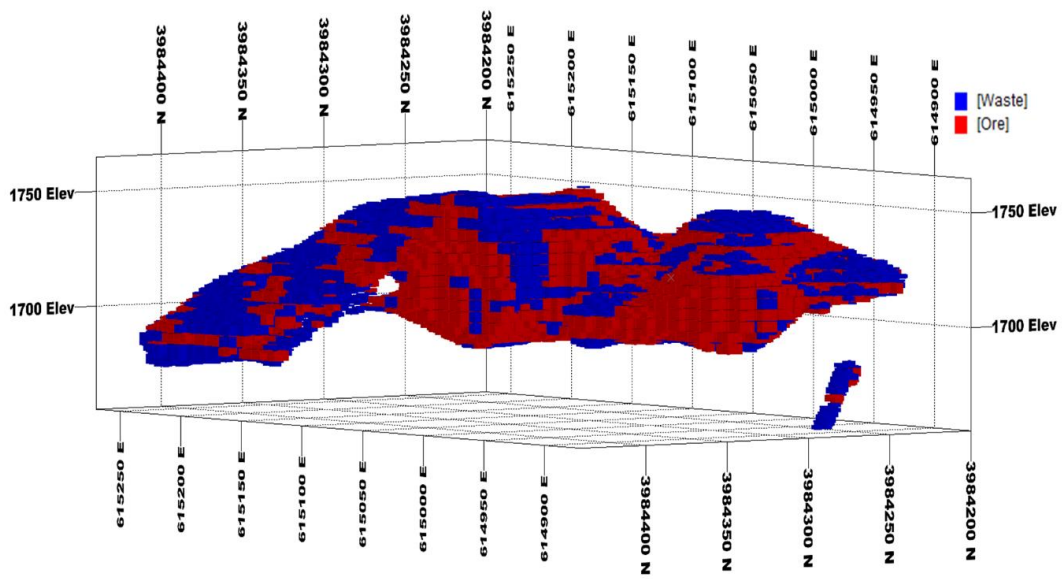


شکل ۱۰- واریوگرام شاخص بدون جهت کل داده‌های آهن با عیار حد ۲۰ درصد

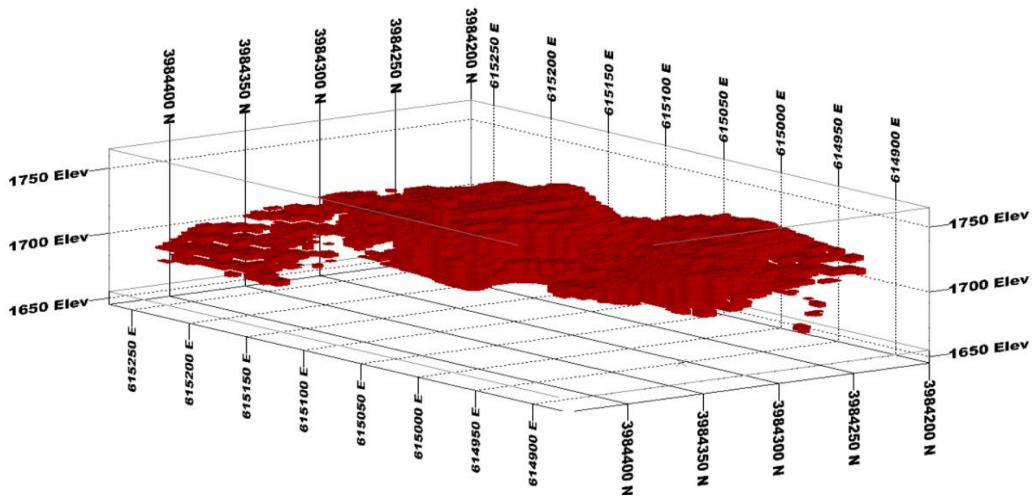
Type	Variance	Range
Nugget	49.315	-
Spherical	65.888	30.0



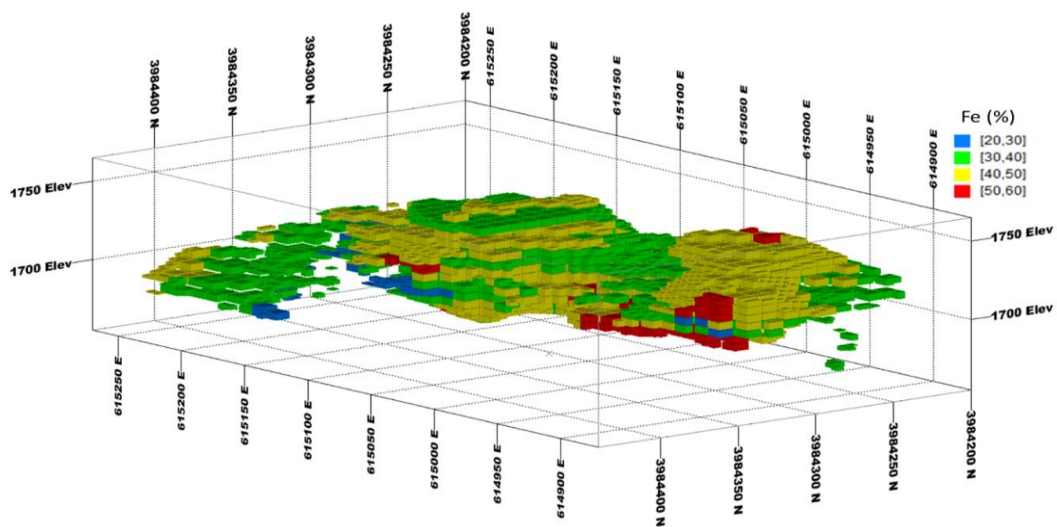
شکل ۱۱- واریوگرام بدون جهت داده‌های آهن زون کانی‌زایی (عیار بالاتر از ۲۰ درصد)



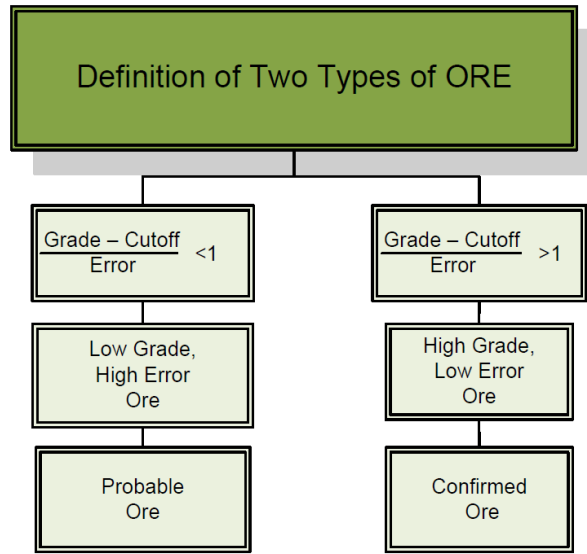
شکل ۱۲- نمایی از نتایج تخمین شاخص و جداسازی باطله از کانسنگ



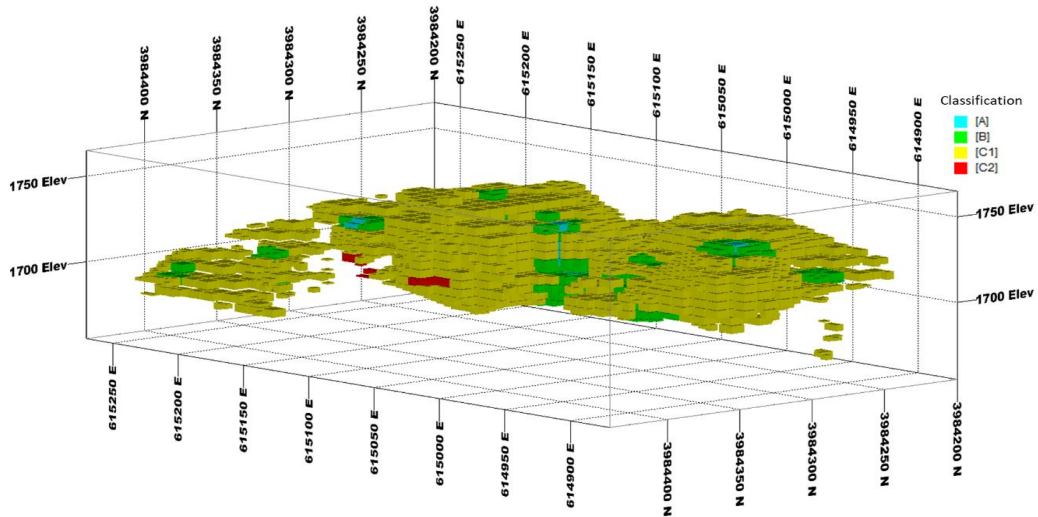
شکل ۱۳- مدل بلوکی نهایی کانسنگ پس از حذف بلوک‌های باطله به روش کریجینگ شاخص



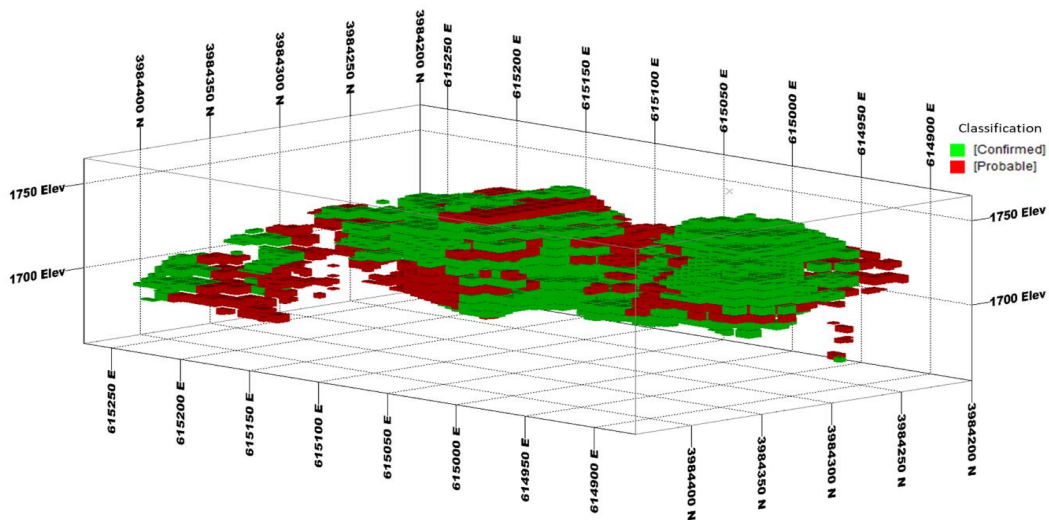
شکل ۱۴- نمایی از تخمین نهایی عبار آهن



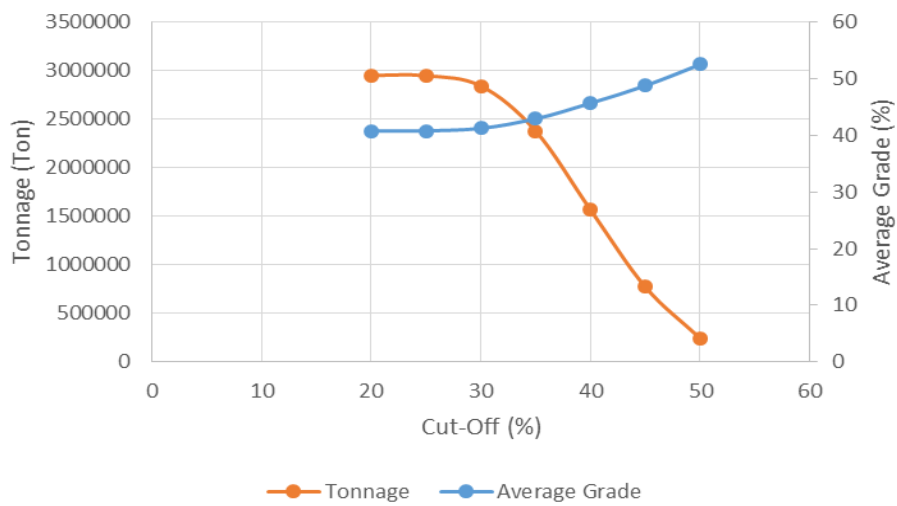
شکل ۱۵- الگوریتم رده‌بندی ذخیره بر اساس سطح اعتماد



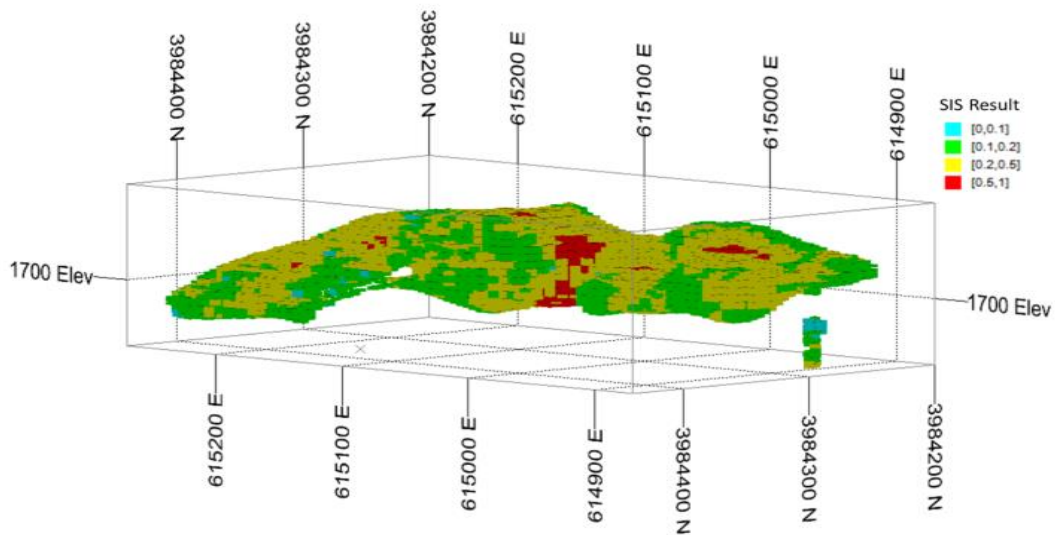
شکل ۱۶- رده‌بندی آنومالی دره زیارت بر اساس روش روسی با در نظر گرفتن $Z=1/64$



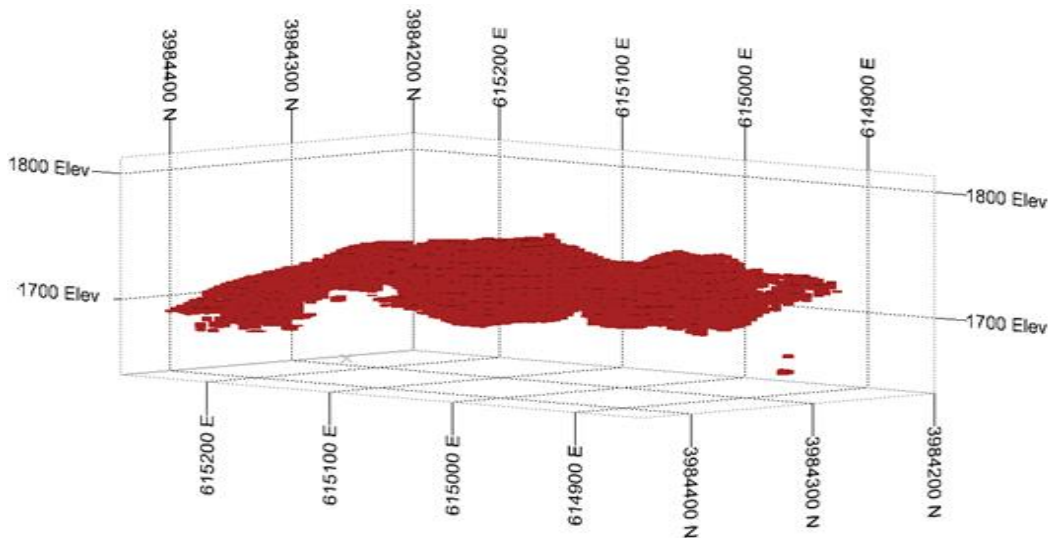
شکل ۱۷- رده‌بندی آنومالی دره زیارت بر اساس معیار سطح اعتماد با مقدار $Z_{95\%}$



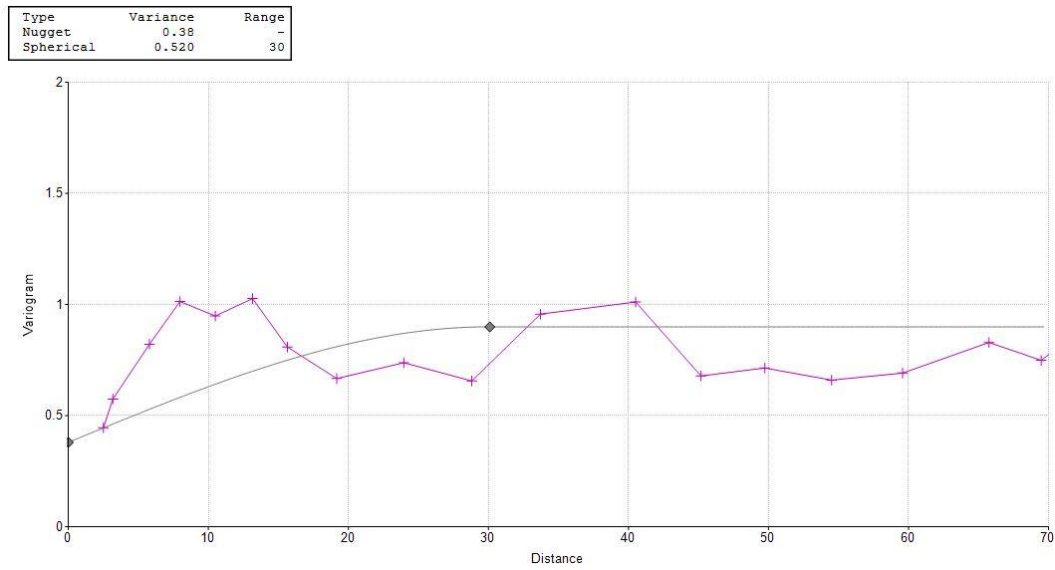
شکل ۱۸- نمودار عیار-تناژ حاصل از تخمین ذخیره



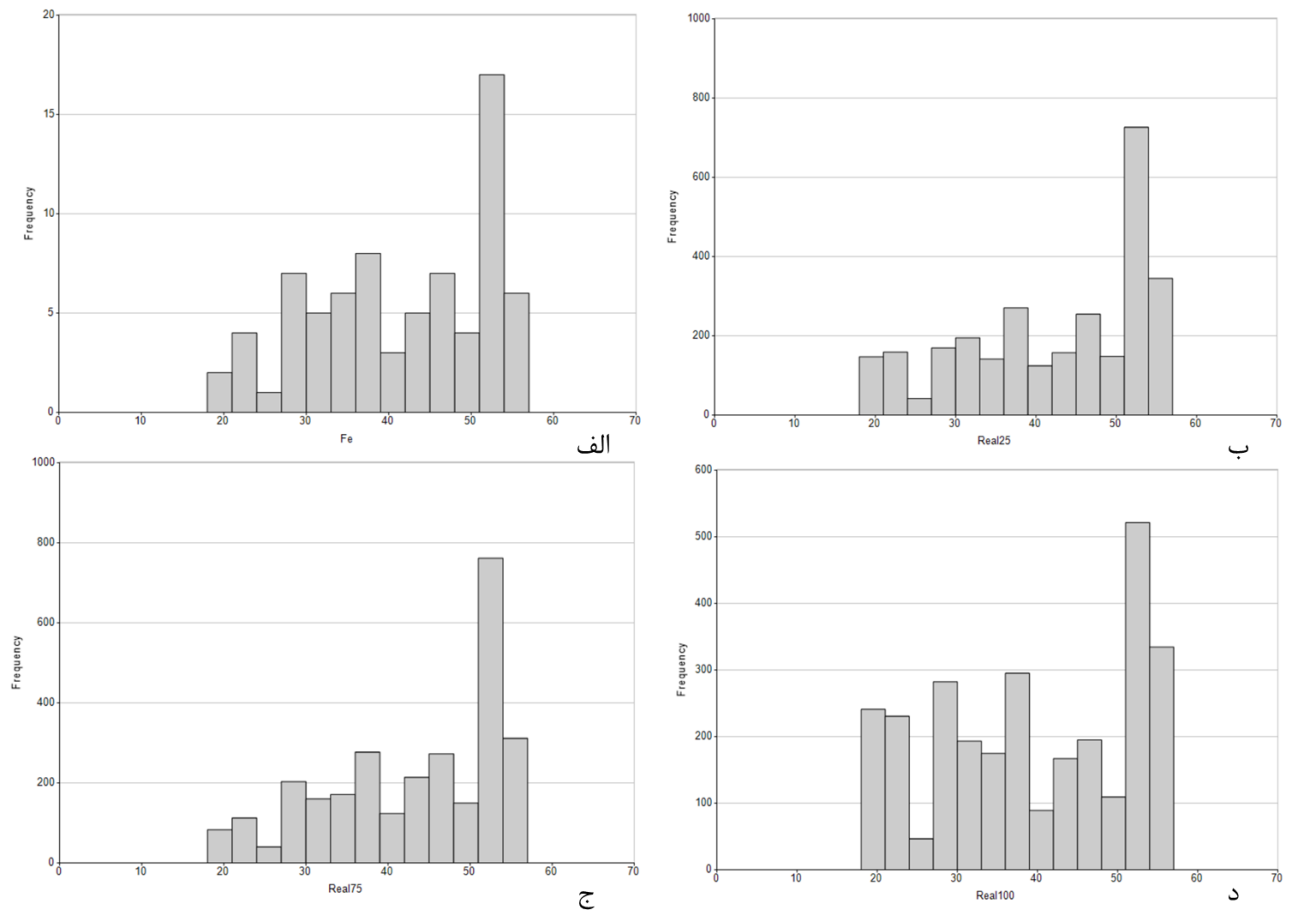
شکل ۱۹- مدل میانگین نتایج ۱۰۰ بار شبیه‌سازی شاخص متوالی



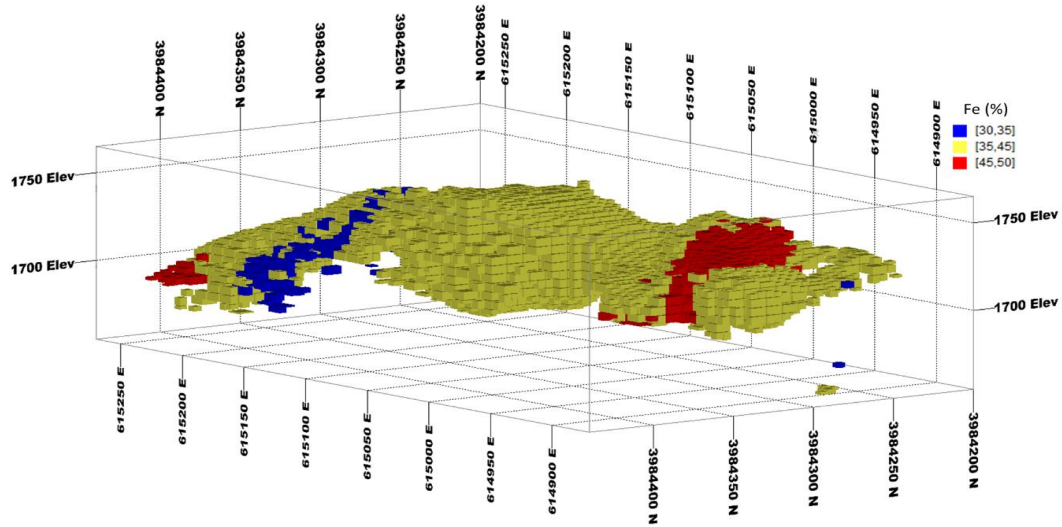
شکل ۲۰- مدل بلوکی نهایی کانسنگ پس از حذف بلوک‌های باطله به روش شبیه‌سازی شاخص متوالی



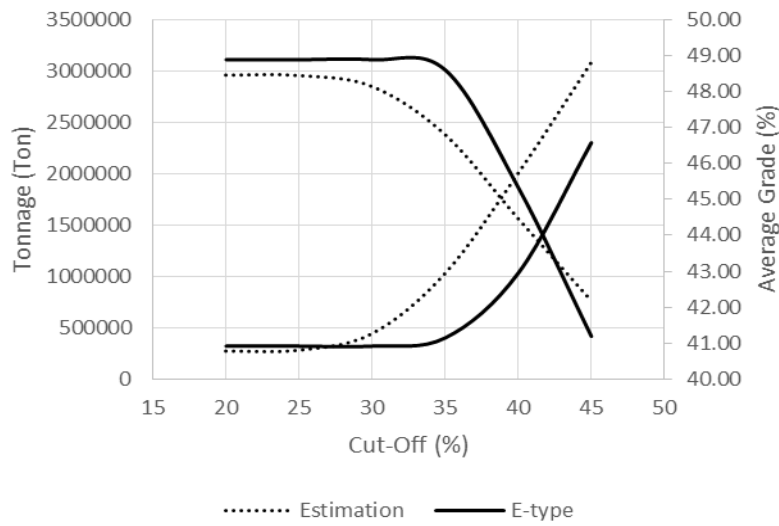
شکل ۲۱- واریوگرافی بدون جهت داده‌های آهن زون کانی‌زایی (عیار بالای ۲۰ درصد) در فضای نرمال



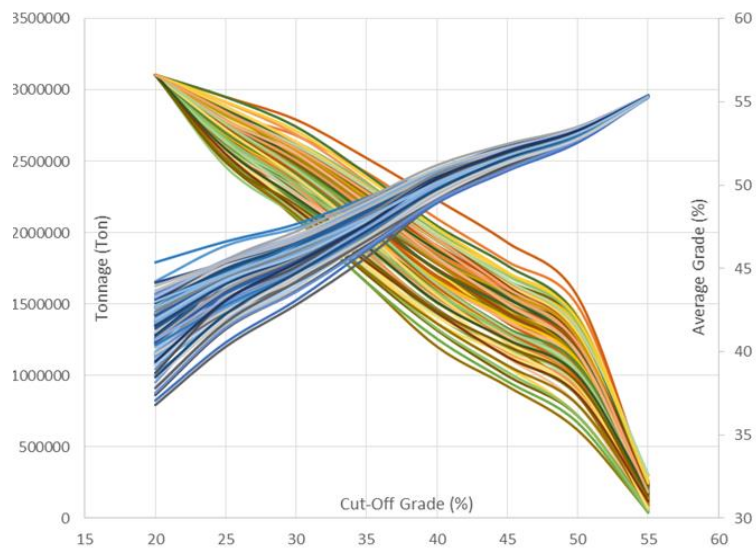
شکل ۲۲- مقایسه هیستوگرام داده‌های اولیه آهن زون کانی‌زایی (الف) با تحقق‌های شماره ۲۵ (ب)، شماره ۷۵ (ج) و شماره ۱۰۰ (د)



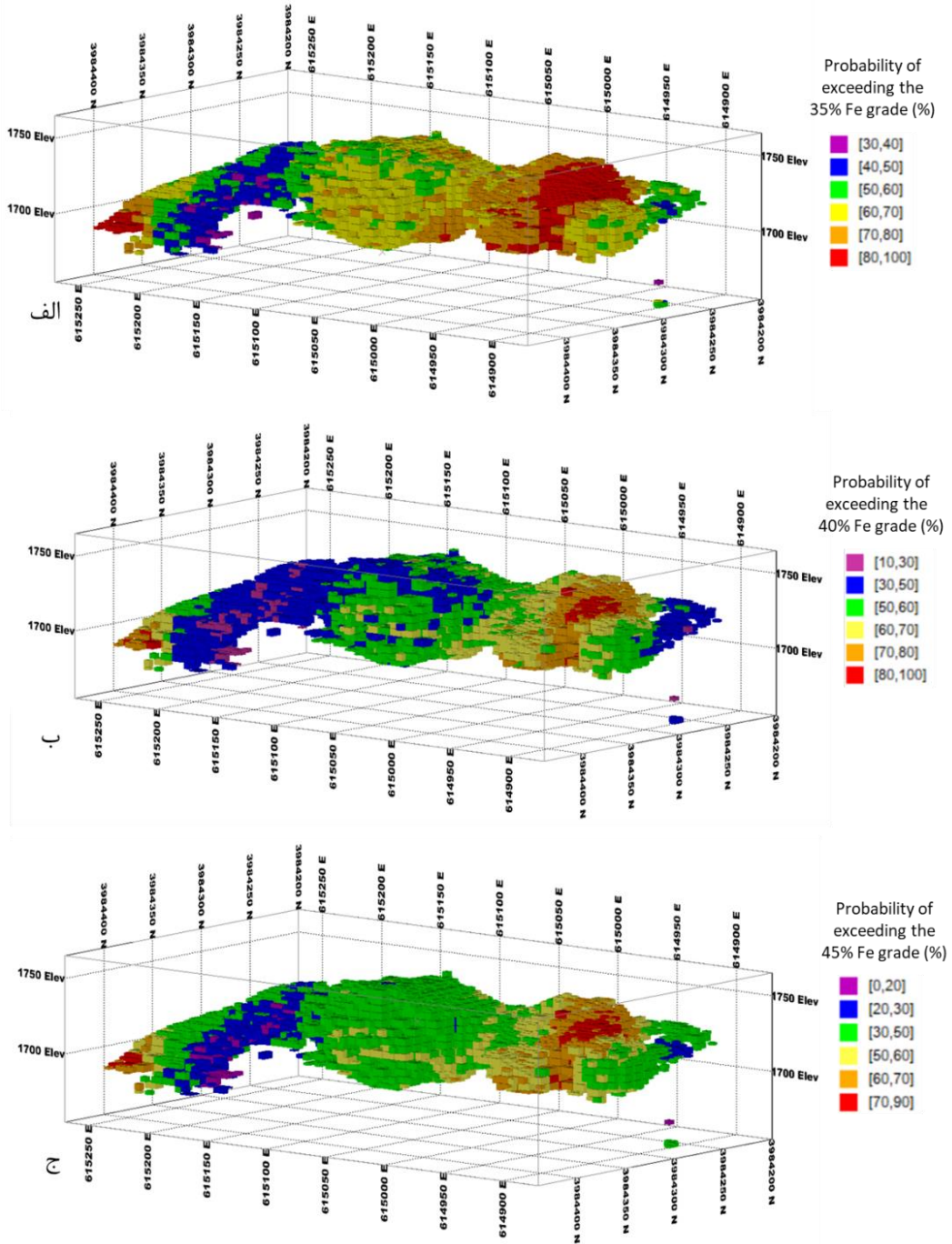
شکل ۲۳- مدل E-type عیار آهن حاصل از میانگین گیری ۱۰۰ شبیه سازی گوسی متوالی



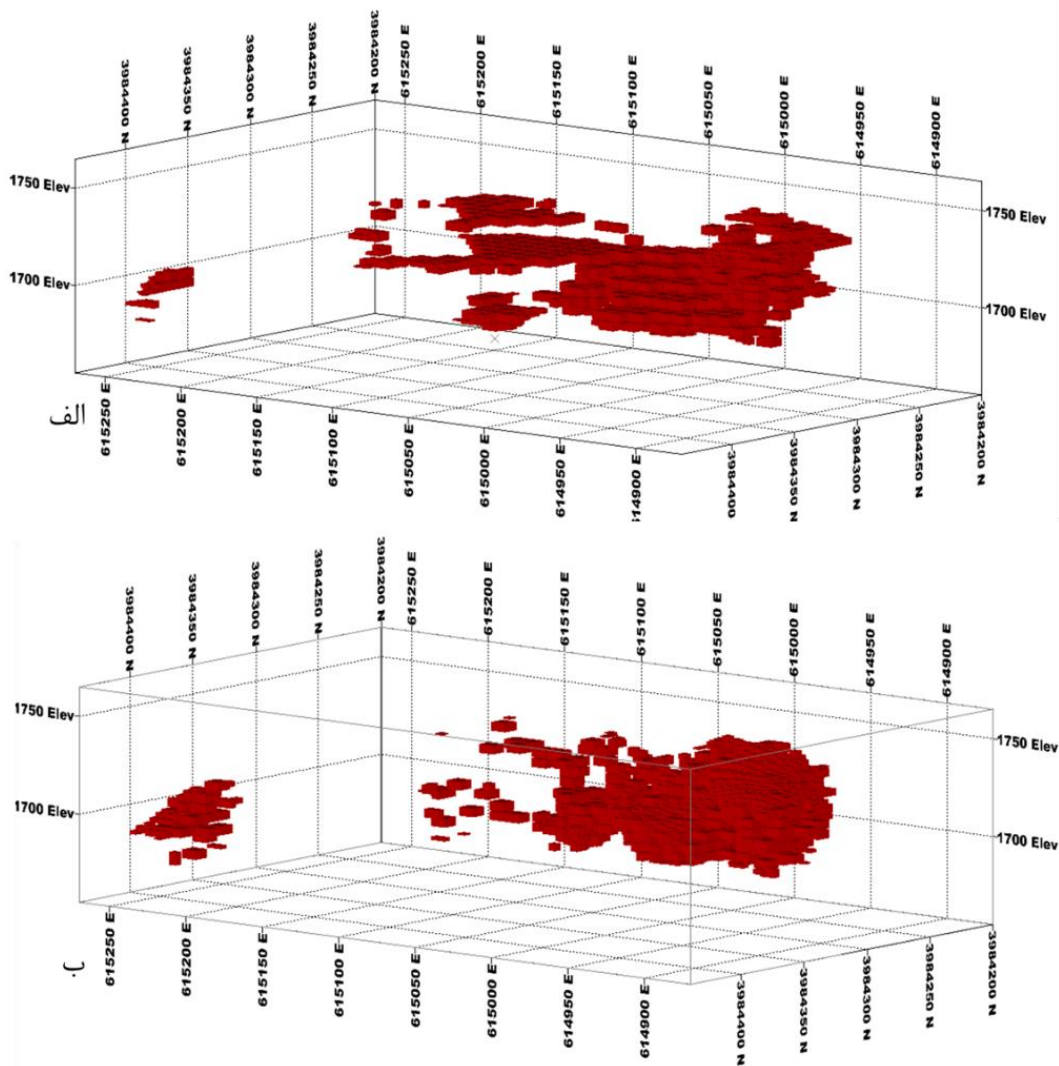
شکل ۲۴- مقایسه نمودار عیار-تناژ تخمین کریجینگ و E-type



شکل ۲۵- نمودارهای عیار-تناژ حاصل از ۱۰۰ تحقق شبیه سازی گوسی متوالی



شکل ۲۶- مدل سه بعدی احتمال گذر از عیارهای حد الف) ۳۵٪، ب) ۴۰٪، ج) ۴۵٪ بر اساس نتایج ۱۰۰ مرتبه شبیه‌سازی



شکل ۲۷- الف) بلوک‌ها با عیار بالاتر از ۴۵ درصد بر اساس نتایج تخمین و ب) بلوک‌ها با احتمال حداقل ۵۰٪ برای گذر از عیار ۴۵٪ بر اساس نتایج شبیه‌سازی

جدول ۱- مشخصات گمانه‌های حفر شده در محدوده مورد مطالعه

نام گمانه	تعداد آنالیز آهن	شیب (درجه)	آزیموت (درجه)	عمق حفاری (متر)
BH-D11	۱۵	۷۵	۱۳۵	۱۴۳
BH-D12	۱۹	۷۵	۱۳۵	۱۴۰
BH-D13	۱۸	۷۵	۱۳۵	۱۱۰
BH-D14	۲۴	۷۵	۱۳۵	۱۴۰
BH-D15a	۱۲	۹۰	۰	۱۲۷
BH-D15b	۲۷	۷۵	۱۳۵	۱۴۰
BH-D16	۳۱	۹۰	۰	۱۱۵
BH-D17	۲۰	۷۵	۱۳۵	۱۴۵
BH-D18	۲۳	۷۵	۱۳۵	۱۴۳
BH-D19	۱۶	۷۵	۱۳۵	۱۴۰
مجموع	۲۰۵			۱۳۴۳

جدول ۲- نتایج محاسبات آماری داده‌های آهن

مقدار	مشخصه
۰/۶۲	کم‌ترین عیار (%)
۵۵/۵۰	بالاترین عیار (%)
۱۱/۴۷	عیار میانگین (%)
۱۸۷/۶۴	واریانس (%)
۲/۱۲	چولگی
۴/۹۸	چارک اول (%)
۸/۸۳	میانه (%)
۳۶/۱۱	چارک سوم (%)

جدول ۳- نتایج محاسبات آماری عیار آهن کل داده‌ها برحسب کامپوزیت‌های ۲/۵، ۵ و ۱۰ متر

داده خام	کامپوزیت ۲/۵ متری	کامپوزیت ۵ متری	کامپوزیت ۱۰ متری
۱۱/۴۷	۱۱/۴۸	۱۱/۴۸	۱۱/۵۳
۱۸۷/۶۴	۱۸۷/۰۱	۱۶۸/۱۰	۱۴۹/۴۷
۰/۶۲	۰/۶۲	۰/۶۲	۳/۱۳
۵۵/۵۰	۵۵/۵۰	۵۴/۷۱	۵۴/۵۱

جدول ۴- نتایج محاسبات آماری عیار آهن در زون کانی‌زایی (عیارهای بالای ۲۰ درصد) برحسب کامپوزیت‌های ۲/۵، ۵ و ۱۰ متر

داده خام	کامپوزیت ۲/۵ متری	کامپوزیت ۵ متری	کامپوزیت ۱۰ متری
۴۱/۳۳	۴۱/۳۳	۴۱/۳۳	۴۱/۷۶
۱۱۳/۶۷	۱۱۳/۶۷	۸۶/۶۴	۴۸/۴۴
۲۰/۲۴	۲۰/۲۴	۲۱/۳۶	۲۹/۴۱
۵۵/۵۰	۵۵/۵۰	۵۵/۲۷	۵۴/۳۷

جدول ۵- نتایج محاسبات پیوستگی طول کانی‌زایی در داده‌های کامپوزیت شده

داده خام	کامپوزیت ۲/۵ متری	کامپوزیت ۵ متری	کامپوزیت ۱۰ متری
۱۱/۷۲	۱۱/۷۲	۱۹/۵	۲۷/۵
۲/۵	۲/۵	۵	۱۰
۲۷/۵	۲۷/۵	۵۵	۷۰
۱۸۷/۵	۱۸۷/۵	۱۹۵	۲۲۰

جدول ۶- نتایج محاسبات پیوستگی طول باطله در داده‌های کامپوزیت شده

داده خام	کامپوزیت ۲/۵ متری	کامپوزیت ۵ متری	کامپوزیت ۱۰ متری
۴۰/۳۳	۴۰/۲۷	۵۱/۹۵	۵۵/۹۵
۲/۵	۲/۵	۵	۵
۱۳۳	۱۳۲/۵	۱۳۳	۱۳۰
۱۰۴۸/۵	۱۰۴۷	۱۰۳۹	۱۰۰۷

جدول ۷- اعتبارسنجی آماری نتایج تخمین

تخمین	گمانه	
۲۴۴۸	۷۵	تعداد نمونه/ بلوک
۲۳/۰۷۵	۲۰/۲۴۰	کمترین عیار (%)
۵۵/۲۶۵	۵۵/۵۰۰	بالاترین عیار (%)
۴۰/۷۹۴	۴۱/۳۳۴	میانگین (%)
۴۰/۴۴۶	۱۱۳/۶۶۷	واریانس (%) ^۲

جدول ۸- رده‌های ذخایر معدنی بر اساس درصد خطا

درصد خطا	رده ذخیره
تا ۲۰ درصد	گروه ذخایر A
۲۰ تا ۳۰ درصد	گروه ذخایر B
۳۰ تا ۶۰ درصد	گروه ذخایر C1
بیشتر از ۶۰ درصد	گروه ذخایر C2

جدول ۹- رده‌بندی آنومالی دره زیارت بر اساس روش روسی با در نظر گرفتن $Z=1/64$

رده	حجم (مترمکعب)	تناژ (تن)	عیار آهن (%)
A	۸۹۰۰	۳۵۶۰۰	۴۸/۴۵
B	۱۰۹۰۲۵	۴۳۶۱۰۰	۴۶/۳۷
C1	۶۱۵۴۰۰	۲۴۶۱۶۰۰	۳۹/۸۱
C2	۵۲۲۵	۲۰۹۰۰	۲۷/۳۲
مجموع/ میانگین	۷۳۸۵۵۰	۲۹۵۴۲۰۰	۴۰/۷۹

جدول ۱۰- رده‌بندی آنومالی دره زیارت بر اساس معیار سطح اعتماد با مقدار Z_{95}

رده	حجم (مترمکعب)	تناژ (تن)	عیار آهن (%)
قطعی	۴۸۱۷۷۵	۱۹۲۷۱۰۰	۴۴/۲۴
احتمالی	۲۵۶۷۷۵	۱۰۲۷۱۰۰	۳۴/۳۳
مجموع/ میانگین	۷۳۸۵۵۰	۲۹۵۴۲۰۰	۴۰/۷۹

جدول ۱۱- اعتبارسنجی نتایج تحقق‌های شماره ۲۵، ۷۵ و ۱۰۰ شبیه‌سازی گوسی متوالی با داده‌های اولیه آهن زون کانی‌سازی

گمانه	تحقق ۱۲۵م	تحقق ۱۷۵م	تحقق ۱۰۰م	
۷۵	۲۸۸۰	۲۸۸۰	۲۸۸۰	تعداد نمونه/ بلوک
۲۰/۲۴۰	۲۰/۲۴۰	۲۰/۲۴۰	۲۰/۲۴۰	کمترین عیار (%)
۵۵/۵۰۰	۵۵/۵۰۰	۵۵/۵۰۰	۵۵/۵۰۰	بالاترین عیار (%)
۴۱/۳۳۴	۴۲/۳۰۵	۴۳/۰۱۸	۳۹/۴۰۵	عیار میانگین (%)
۱۱۳/۶۶۷	۱۲۸/۶۶۴	۱۱۰/۲۶۶	۱۴۵/۱۳۴	واریانس (%) ^۲

جدول ۱۲- مقایسه نتایج تخمین کریجینگ و E-type

E-type	کریجینگ	
۲۸۸۰	۲۴۴۸	تعداد بلوک
۳۱/۴۶	۲۳/۰۷۵	کم‌ترین عیار (%)
۴۹/۹۶۸	۵۵/۲۶۵	بیشترین عیار (%)
۴۰/۹۲۳	۴۰/۷۹۴	میانگین عیار (%)
۱۰/۶۷۰	۴۰/۴۴۶	واریانس (%)

منابع

- multilingual dictionary*. 1991: Oxford University Press on Demand.
- Armstrong, M., *Basic linear geostatistics*. 1998: Springer Science & Business Media.
 - Chiles, J.-P. and P. Delfiner, *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. Vol. 497. 2009: John Wiley & Sons.
 - Journel, A.G., *Nonparametric estimation of spatial distributions*. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 1983. 15(3): p. 445-468.
 - Glacken, I. and P. Blackney. *A practitioners implementation of indicator kriging*. in *Proceedings of a one day symposium: Beyond Ordinary Kriging*. 1998.
 - Hengl, T., *A practical guide to geostatistical mapping*. 2009.
 - هنرپژوه، جمال‌الدین؛ ۱۳۹۲؛ «گزارش پایان کار اکتشاف کانسار آهن دره زیارت علیا»، سازمان صنعت، معدن و تجارت استان کردستان.
 - Lerchs, H. and F. Grossman, *Optimum Design of Open-Pit Mines*. CIM Bulletin, 1965. 58: p. 47-54.
 - معاونت نظارت راهبردی؛ ۱۳۸۷؛ «دستورالعمل رده‌بندی ذخایر معدنی»، نشریه شماره ۳۷۹.
 - Yu, X. and X. Li, *The application of sequential indicator simulation and sequential Gaussian simulation in modeling a case in Jilin Oilfield*, in *Future Control and Automation*. 2012, Springer. p. 111-118.
 - Asghari, O., F. Soltani, and H.B. Amnieh, *The comparison between sequential gaussian simulation (SGS) of Choghart ore deposit and geostatistical estimation through ordinary kriging*. Australian Journal of Basic Applied Sciences, 2009. 3(1): p. 330-341.
 - Monjezi, M., M.R. Kashani, and M. Ataei, *A comparative study between sequential Gaussian simulation and kriging method grade modeling in open-pit mining*. Arabian Journal of Geosciences, 2013. 6(1): p. 123-128.
 - Rahimi, H., O. Asghari, and A. Afshar, *A geostatistical investigation of 3D magnetic inversion results using multi-Gaussian kriging and sequential Gaussian co-simulation*. Journal of Applied Geophysics, 2018. 154: p. 136-149.
 - نوری زنوز، زهرا؛ اصغری، امید؛ فهیمی‌نیا، محمد؛ ۱۳۹۹؛ «مدل سازی عیار و بازیابی کانسار طلای ساری‌گونی با استفاده از الگوریتم‌های زمین‌آماري»، مجله مهندسی معدن، دوره ۱۶، شماره ۵۰، صفحات ۱-۱۳.
 - Olea, R.A., *Geostatistical glossary and*