

بهینه‌سازی فرایند تخمین کریجینگ با استفاده از آزمون کمی پارامترهای محدوده جستجو در معدن شماره یک گل‌گهر

سجاد طالب حسینی^۱، امید اصغری^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، آزمایشگاه شبیه‌سازی و پردازش داده، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران
۲- دانشیار، آزمایشگاه شبیه‌سازی و پردازش داده، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران

(دریافت ۱۳۹۸/۰۵/۲۶، پذیرش ۱۳۹۸/۱۱/۱۲)

چکیده

کریجینگ به‌عنوان بهترین روش تخمینی خطی ناریب در مدل‌سازی دو بعدی و سه بعدی مطالعات مربوط به علوم زمین، به ارزیابی معیارهای مختلف وابسته است. علاوه بر شناسایی داده‌های خارج از ردیف و خوشه‌زدایی داده‌های مورد مطالعه، شاخص‌هایی از قبیل تعریف شعاع جستجو بهینه و مناسب، نقش مهمی در افزایش دقت مدل‌سازی دارند. در این مقاله، با استفاده از معیار آزمون کمی شعاع جستجوی کریجینگ (QKNA)، مدل‌سازی بهینه‌ای از معدن شماره یک سنگ آهن گل‌گهر سیرجان ارائه شده است. اهمیت و ضرورت آزمون QKNA به دلیل آن است که وزن‌های تخمین مستقیماً تحت تأثیر معیارهایی از قبیل شعاع جستجو، تعداد نقاط موجود در پنجره جستجو، استفاده یا عدم استفاده از روش اکتانت و غیره است. برای این منظور، مجموعه داده‌های مورد مطالعه براساس تغییرات کانسار به دو زون مگنتیتی و هماتیتی تقسیم شد و سپس با تغییر معیارهای معرفی شده، برای هر کدام از زون‌ها تعداد ۱۸۰ استراتژی تخمین، مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور به‌دست آوردن معیارهای بهینه تخمین در هر زون، در استراتژی‌های تعریف شده شاخص‌هایی از قبیل واریانس تخمین، شیب رگرسیون بین داده‌های واقعی و تخمینی، بازده کریجینگ و وزن میانگین ارزیابی شدند. بر این اساس، شعاع‌های جستجوی بهینه در زون اول ۶۸۸، ۲۲۶ و ۱۵۲ و در زون دوم ۴۸۲، ۲۲۳ و ۳۰۳ به‌دست آمدند. همچنین، بازه بهینه تعداد نقاط موجود در بیضیگون جستجو، در زون اول بین ۳ تا ۱۲ و در زون دوم بین ۵ تا ۱۵ است.

کلمات کلیدی

کریجینگ، پیش‌پردازش داده‌ها، واریوگرافی، شعاع جستجوی بهینه، آزمون کمی شعاع جستجوی کریجینگ.

۱- مقدمه

تخمین زمین آماری روشی است که به وسیله آن می توان مقدار یک کمیت را در نقاطی با مختصات معلوم توسط مقدار همان کمیت در دیگر نقاط با مختصات معلوم به دست آورد [۱]. کریگینگ یک روش تخمین منطق بر میانگین متحرک وزن دار و بهترین تخمین گر خطی ناریب است. از مهم ترین ویژگی های کریگینگ آن است که به ازای هر تخمینی، خطای مرتبط با آن را می توان محاسبه کرد. بنابراین برای هر مقدار تخمین زده شده می توان دامنه اطمینان تخمین را محاسبه کرد [۲، ۳]. با توجه به ویژگی های روش کریگینگ، این رویکرد در بررسی های مختلف از قبیل تهیه نقشه های ژئوشیمیایی [۴، ۵]، شناسایی آنومالی های ژئوشیمیایی [۶-۹]، مدل سازی های ژئوفیزیکی [۱۰]، مدل سازی و تخمین ذخایر معدنی [۱۱]، مدل سازی سطح آب های زیرزمینی [۱۲]، مدل سازی استاتیکی مخازن نفتی [۱۳] و غیره استفاده شده است. روش کریگینگ به صورت رابطه ریاضی ۱ تعریف می شود [۳]:

$$Z_V^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{V_i} \quad (1)$$

که در آن:

Z_V^* : عیار تخمینی

λ_i : وزن یا اهمیت کمیت وابسته به نمونه λ_m

Z_{V_i} : عیار نمونه λ_m است.

این نوع کریگینگ را چون ترکیب خطی از n داده است، کریگینگ خطی می نامند [۳]. شرط استفاده از این تخمین گر، توزیع نرمال متغیر مورد بررسی است. اگر متغیر مورد نظر توزیع نرمال نداشته باشد، باید از کریگینگ غیرخطی استفاده کرد و یا می توان، ابتدا تبدیلی پیدا کرد که توزیع مورد نظر را به نرمال تبدیل کند و سپس با داده های تبدیل یافته، کریگینگ خطی انجام داد [۲].

مدل سازی بهینه با استفاده از روش کریگینگ، به عوامل مختلفی از قبیل پیش پردازش داده ها، تعیین شعاع جستجو بهینه، حداقل/حداکثر داده های موجود در شعاع جستجو و استفاده یا عدم استفاده از روش اکتانت بستگی دارد. "ریوایرارد" [۱۴]، وزن میانگین (MW) و شیب رگرسیون خطی (SOR) بین مقادیر واقعی و تخمینی را به عنوان معیارهای مناسب در مدل سازی بهینه روش کریگینگ معرفی کرده است. "آرمسترانگ" [۳]، با اصلاح روش پیشنهادی

ریوایرارد، معیارهای معرفی شده قبلی را با در نظر گرفتن نسبت اثر قطعه ای، برای مدل سازی بهینه روش کریگینگ استفاده کرد. "وان و همکاران" [۱۵]، با ترکیب معیارهای وزن میانگین، شیب رگرسیون خطی، نسبت وزن منفی (NW) و واریانس کریگینگ (KV)، رویکرد مشابهی با عنوان آزمون کمی شعاع جستجوی کریگینگ (QKNA) برای مدل سازی بهینه روش کریگینگ ارائه دادند. "کامبس" [۱۶] برای تعیین مجموعه معیارهای بهینه تخمین، از معیارهای بازده کریگینگ (KE) و شیب رگرسیون خطی استفاده کرد. "امری" [۱۷] تابعی از کریگینگ ارائه داد که قابلیت به روزرسانی وزن ها و واریانس های کریگینگ در زمان های کوتاه را دارد. "بویل" [۱۸] بهترین عوامل موثر در تخمین را با استفاده از معیارهای MW و SOR در مجموعه داده های "جیورا" تعیین کرد. "شادمان خاکستر و همکاران" [۱۹]، سه عامل MW، SOR و KV را برای تعیین معیارهای بهینه تخمین استفاده و نتایج با داده های تحقیق های انجام شده قبلی مقایسه کردند. "کامبس و بواماح" [۲۰]، آزمون کمی شعاع جستجوی کریگینگ محلی (LKNA) را برای بهینه سازی معیارهای کریگینگ مخصوص بلوک های درون زون های مختلف در یک منطقه ارائه دادند. "هاندلشوسن و همکاران" [۲۱]، یک رویکرد جدید با عنوان بهینه سازی معیارهای کریگینگ محلی (LKPO) که معایب روش LKNA را برطرف کرده بود، ارائه دادند. "مدنی و امری" [۲۲]، استراتژی های مختلفی را برای تعیین عوامل بهینه کوکریگینگ در پیش بینی متغیرهای گسسته استفاده کردند.

هدف اصلی این مقاله، مدل سازی بهینه سنگ آهن معدن شماره یک گل گهر سیرجان، با استفاده از روش کریگینگ است. برای نیل به این هدف، در ابتدا گمانه های اکتشافی حفاری شده در منطقه، به دو زون مختلف تقسیم و پیش پردازش مجموعه داده های هر زون، به طور جداگانه انجام شد. در مرحله بعد، پس از واریوگرافی هر کدام از مجموعه داده ها، معیارهای با اهمیت در بهینه سازی فرایند کریگینگ، مورد بررسی قرار گرفت. برای بهینه سازی این معیارها، شاخص های مختلف مورد استفاده در تحقیقات قبلی استفاده شدند. این معیارها شامل واریانس تخمین، شیب رگرسیون بین داده های واقعی و تخمینی، بازده کریگینگ و وزن میانگین بودند. استراتژی های مختلفی با استفاده از این معیارها، مورد ارزیابی قرار گرفتند و بهترین استراتژی برای انجام فرایند تخمین، انتخاب شد.

۲- روش‌شناسی

تمام معیارهای معرفی شده در قسمت قبلی که به منظور بهینه‌سازی عوامل اساسی تخمین و ارزیابی استراتژی‌های مختلف در فرایند کریجینگ، مورد بررسی قرار گرفتند، در ادامه معرفی می‌شوند.

۱-۲- شیب رگرسیون خطی (SOR)

در فرایند کریجینگ، همواره میان مقدار واقعی و مقدار تخمینی، اختلافی وجود دارد. شیب رگرسیون با استفاده از معیارهایی از قبیل کوواریانس و ضریب همبستگی، به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۳]:

$$a = \frac{Cov(Z_v, Z_v^*)}{Var(Z_v^*)} = \rho \frac{\sigma_{Z_v}}{\sigma_{Z_v^*}} = \frac{(\sigma_v^2 - \sigma_k^2 + \mu)}{(\sigma_v^2 - \sigma_k^2 + 2\mu)} \quad (2)$$

که در آن:

a : شیب رگرسیون

Z_v : عیار واقعی بلوک‌ها

Z_v^* : عیار تخمینی بلوک‌ها

ρ : ضریب همبستگی بین عیار واقعی و تخمینی بلوک‌ها

σ_{Z_v} : انحراف معیار داده‌های واقعی

$\sigma_{Z_v^*}$: انحراف معیار مقادیر تخمینی

σ_v^2 : واریانس بلوک

σ_k^2 : واریانس تخمین

μ : ضریب لاگرانژ است.

مقدار کمتر از یک شیب رگرسیون خطی، نشان می‌دهد مقادیر واقعی با استفاده از روش کریجینگ، کمتر از مقدار واقعی خود تعیین شده‌اند. همچنین مقدار بیش‌تر از یک شیب رگرسیون خطی، بیان می‌کند مقادیر واقعی با استفاده از روش کریجینگ، بیش‌تر از مقدار واقعی خود تعیین شده‌اند [۳].

۲-۲- وزن میانگین (MW)

در روش کریجینگ ساده^{۱۰}، مقدار وزن میانگین از اختلاف مجموع اوزان از عدد یک محاسبه می‌شود. با توجه به ویژگی روش کریجینگ معمولی^{۱۱}، مقدار وزن میانگین در این روش برابر صفر خواهد شد. وزن میانگین، شاخصی از میزان اثر پالایش^{۱۲} است که در اصطلاح، یک داده براساس آن پالایش

می‌شود. فرارگرفتن نمونه دیگری بین یک نمونه و موقعیت تخمین، باعث می‌شود وزنی که به داده اول اختصاص می‌یابد ناچیز و حتی منفی شود [۱۴، ۲]. افزایش دامنه واریوگرام، سبب وضوح اثر پالایش می‌شود. افزایش اثر قطعه‌ای واریوگرام و کاهش دامنه واریوگرام نیز سبب پراکنده‌شدن وزن‌ها و کاهش اثر پالایش می‌شود. وزن میانگین در روش کریجینگ با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۳، ۲]:

$$\lambda_m = 1 - \sum_{i=1}^N \lambda_i^{SK} \quad (3)$$

که در آن:

λ_m : وزن میانگین

λ_i^{SK} : وزن داده‌های تخمین

N : تعداد داده‌های شرکت کننده در تخمین یک نقطه است.

وزن میانگین معیار خوبی برای تشخیص کیفیت تخمین

است. در عمل، تخمینی خوب است که وزن میانگین در آن،

برابر صفر باشد [۱۴]. هدف از روش QKNA، به‌دست آوردن

بهترین شیب رگرسیون به‌گونه‌ای است که کمترین وزن

میانگین را داشته باشد.

۳-۲- واریانس کریجینگ (KV)

کریجینگ یک تخمین‌گر با واریانس مینیمم است. به‌طور خاص، کریجینگ ساده دارای حداقل واریانس تخمین است. KV، یک اندازه‌گیری از خطای مرتبط با تخمین‌گر کریجینگ ارائه می‌کند. در نتیجه، واریانس تخمین می‌تواند یک معیار مناسب برای ارزیابی کریجینگ باشد. کاهش میزان واریانس تخمین، نشان‌دهنده افزایش کیفیت آن است. اگرچه این معیار به‌اندازه معیار شیب رگرسیون خطی بین داده‌های واقعی و تخمینی اهمیت ندارد، اما باید در ارزیابی روش کریجینگ استفاده شود. از رابطه ۴ برای محاسبه واریانس تخمین استفاده می‌شود [۳]:

$$var(Z_v^*) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j C(x_i, x_j) \quad (4)$$

که در آن:

$C(x_i, x_j)$: مقدار تابع کوواریانس بین نمونه‌ها در موقعیت‌های

i و j

λ_i و λ_j : وزن‌های اختصاص یافته به این نمونه‌ها هستند [۳].

۴-۲- راندمان کریگینگ (KE)

جنوبی معدن مورد بررسی، به چشم می‌خورد. کمپلکس‌های دگرگونی پالئوزوئیک و تریاس فراوان از ویژگی‌های اصلی این منطقه است که سنگ‌های گرانیتی تریاس و بازالتی در آن‌ها نفوذ کرده‌اند [۲۷]. واحدهای سنگی این منطقه اغلب شامل شیست‌های بازیک (بیوتیت شیست و آمفیبول شیست) و شیست‌های گروه پلیتی (انواع میکاشیست‌ها، گارنت شیست، آندالوزیت و استارولیت‌شیست) است. کانی‌های فرعی نظیر کلریتوئید نیز گاهی دیده می‌شود که بیانگر تنوع پروتولیت (سنگ مادر) سنگ دگرگونی است (شکل ۱).

۳-۲- بررسی مجموعه داده‌ها

در این مطالعه، یک مجموعه داده شامل ۲۵۷۹ نمونه جمع‌آوری شده از گمانه‌های اکتشافی در معدن شماره یک گل‌گهر سیرجان استفاده شده است. نمونه‌ها درون گمانه‌های اکتشافی در فواصل ۳ متری جمع‌آوری و براساس تغییرات کانسار، مجموعه داده‌ها به دو زون با ویژگی‌های مختلف تقسیم شدند (شکل ۲).

براساس شکل ۳ و جدول ۱، دامنه تغییرات عیار آهن در زون اول و دوم به ترتیب ۵۸٫۶ و ۳۹٫۵۶ درصد است. در زون اول، مقدار مینیمم عیار آهن، ۱۹٫۳۴ درصد کمتر از مقدار مینیمم در زون دوم و مقدار ماکزیمم عیار آهن در زون دوم، ۰٫۳ درصد بیشتر از زون اول است. با توجه به کمتر بودن مقدار واریانس در زون دوم، می‌توان نتیجه گرفت که در این زون، عیار عنصر تغییرات زیادی ندارد (جدول ۱). براساس داده‌های جدول ۱، برای نشان دادن تفاوت بین دو زون تفکیک‌شده، معیارهای آماری بازیابی وزن مغناطیسی (MWT) فسفر و گوگرد در این دو زون، با هم مقایسه شدند. در بررسی نتایج، مقدار بالای MWT در زون اول (با میانگین ۷۲٫۲۱)، نشان‌دهنده غیراکسیده‌بودن زون اول و مقدار پایین MWT در زون دوم (با میانگین ۲۶٫۸۸)، نشان‌دهنده اکسیده‌بودن این زون است. بنابراین زون اول، یک کانسنگ مگنتیتی و زون دوم، یک کانسنگ هماتیتی است. مقدار فسفر و گوگرد در زون اول نیز بیشتر از مقدار این دو عنصر در زون دوم است (جدول ۱). بنابراین، دو زون مورد مطالعه را می‌توان از نظر مقدار فسفر و گوگرد نیز تفکیک کرد.

یکی از مسایل مهم در شروع فرایند تخمین، خوشه‌زدایی^{۱۳} داده‌ها است. در منطقه با تغییرات عیاری زیاد، نمونه‌برداری زیادتر از یک قسمت (کم عیار یا پر عیار) نسبت به قسمت دیگر (پر عیار یا کم عیار) سبب تفاوت توزیع تغییرات عیار

عبارت راندمان کریگینگ، اولین بار توسط "وای فانتیس و همکاران" [۲۳] و برای ارزیابی سه الگوی نمونه‌برداری مربعی، مثلثی و شش‌گوش به کار برده شد. اما، برای اولین بار "کریگ" [۲۴] راندمان تخمین بلوکی را بیان کرد. در واقع، راندمان کریگینگ، تعریف دیگری از واریانس است که نسبت به واریانس واقعی بلوک‌ها، نرمال شده باشد. در رابطه ۵ اگر و به ترتیب واریانس نمونه‌ها و واریانس تخمین باشند:

$$KE_{DK}(\%) = \frac{\sigma^2 - \sigma_k^2}{\sigma^2} = \frac{\bar{C}(V, V) - \sigma_k^2}{\bar{C}(V, V)} \quad (5)$$

که در آن:

KE_{DK} : راندمان کریگینگ

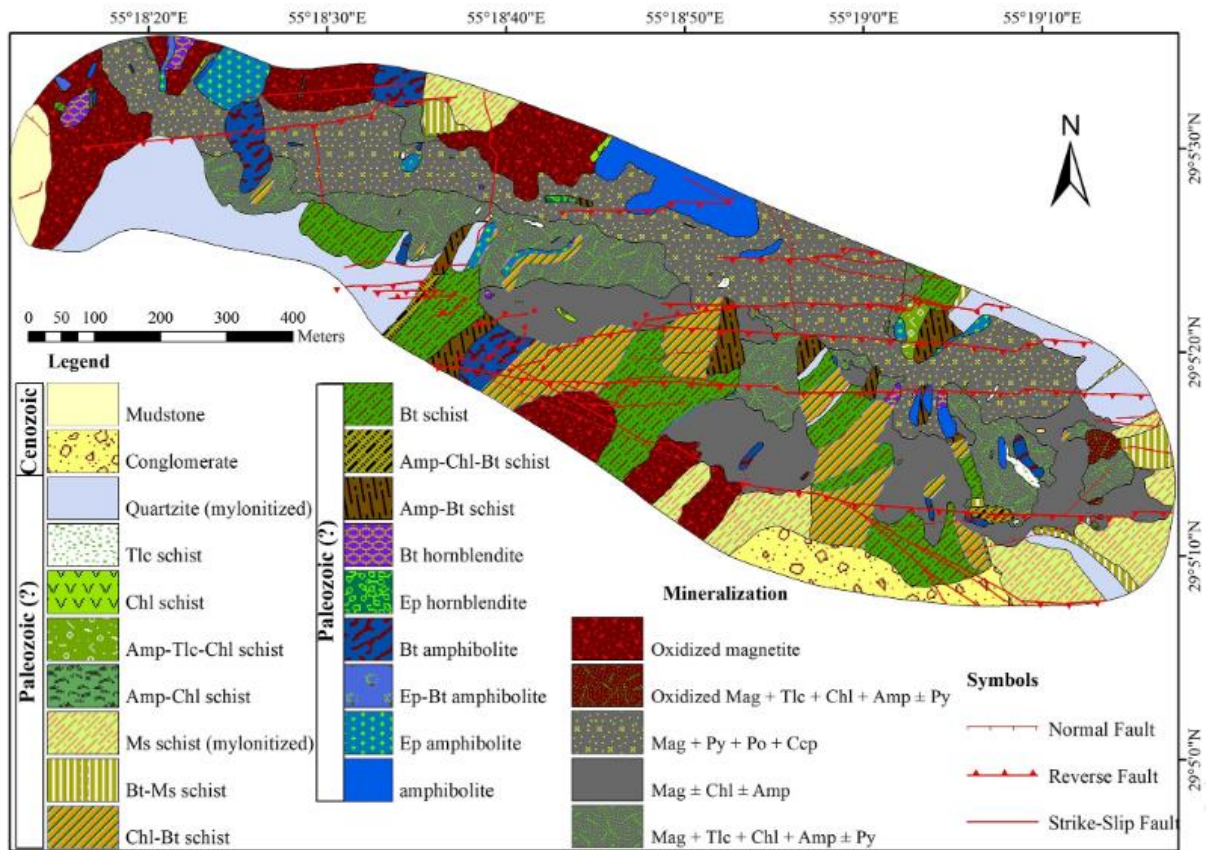
$\bar{C}(V, V)$: میانگین کوواریانس نقاط درون بلوک‌ها است [۲۴].

از نظر تئوری، برای یک الگوریتم تخمین کامل، بازده ۱۰۰ درصد خواهد بود که لازمه آن، صفر بودن واریانس تخمین است. در مطالعات واقعی معمولاً بازده کمتر از ۱۰۰٪ به دست می‌آید. "دویچ و همکاران" [۲۵]، نشان دادند در برخی موارد که واریانس تخمین از واریانس بلوک‌ها بیشتر باشد، مقدار راندمان تخمین می‌تواند منفی باشد.

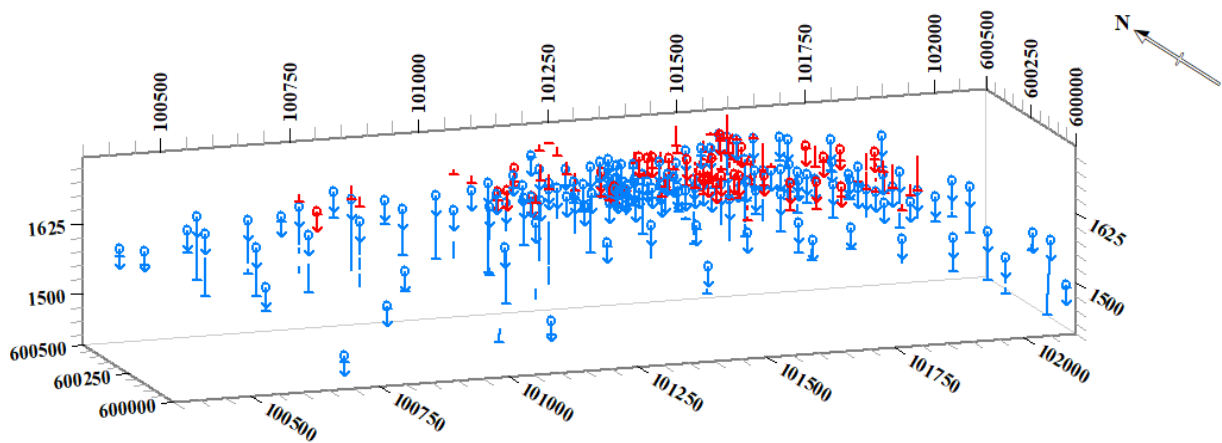
۳- منطقه مورد مطالعه

۳-۱- زمین‌شناسی منطقه

ناحیه معدنی گل‌گهر در ۵۹ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان سیرجان در استان کرمان به مختصات جغرافیایی $29^{\circ} 20'$ تا $29^{\circ} 24'$ شرقی و عرض‌های $29^{\circ} 02'$ تا $29^{\circ} 07'$ شمالی است و در بخشی از پهنه ساختاری سنندج - سیرجان قرار دارد که از شهرستان ارومیه در شمال غربی تا شرق شهرستان میناب در جنوب شرقی ایران، به طول ۱۵۰۰ کیلومتر و عرض ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر کشیده شده است. پهنه ساختاری سنندج - سیرجان با فرورانش اقیانوس نیوتتیس، تحت تاثیر فازهای دگرگونی و ماگماتیسیم قرار گرفته است. در برخی مناطق از این پهنه ساختاری، بقایای پی‌سنگ قدیمی‌تر دیده می‌شود [۲۶]. منطقه مورد مطالعه در جنوب شرقی منطقه گل‌گهر سیرجان قرار دارد. به‌طور کلی، منطقه مورد مطالعه با کانسار آبرفتی کوارترنری پوشیده و قسمت محدودی از جنوب و جنوب شرقی آن توسط سنگ‌های دگرگونی، محدود شده است. سنگ‌های رسوبی و گرانیت میلونیتی نیز به ترتیب در ناحیه شرقی و



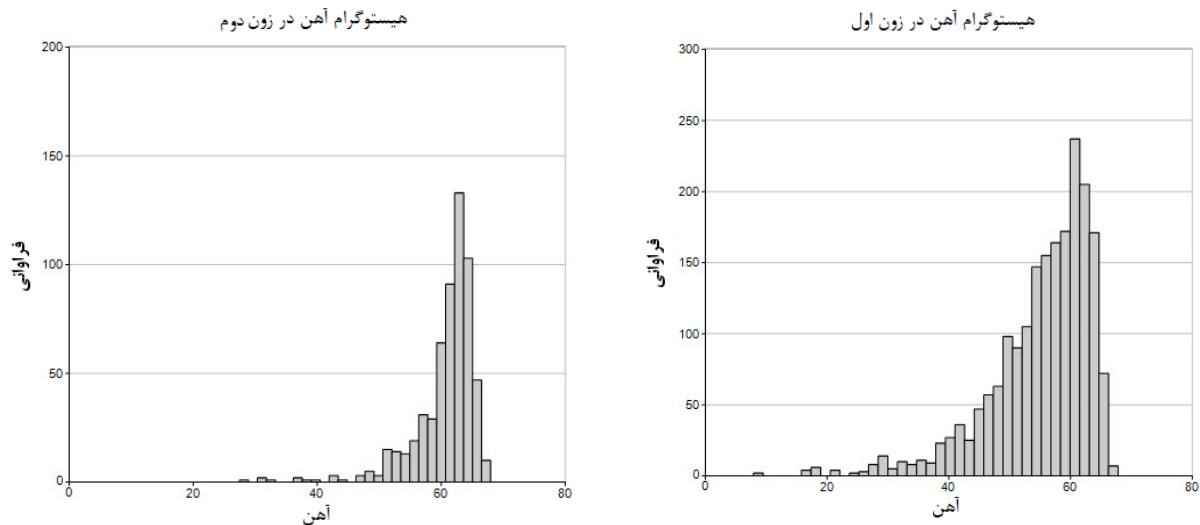
شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی معدن شماره یک سنگ آهن گل‌گهر سیرجان [۲۸]



شکل ۲: موقعیت گمانه‌های اکتشافی در معدن شماره یک سنگ آهن گل‌گهر سیرجان (رنگ آبی و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده گمانه‌های موجود در زون اول و دوم هستند)

خوشه‌زدایی، دو فرض اساسی وجود دارد: (۱) نمونه‌برداری از تمام توزیع متغیر مورد بررسی، انجام شده است و انحراف در داده‌ها وجود ندارد، (۲) ماهیت خوشه‌بندی، نمونه‌برداری

با واقعیت می‌شود [۲۹]. روش‌های خوشه‌زدایی متفاوتی از قبیل سلول‌بندی و پلیگون برای انجام این کار وجود دارد که به وزن‌دهی نمونه‌ها وابسته هستند. در همه روش‌های



شکل ۳: هیستوگرام عنصر آهن در دو زون تفکیک شده در معدن یک سنگ آهن گل گهر سیرجان

جدول ۱: معیارهای آماری متغیرهای مختلف در دو زون تفکیک شده در معدن شماره یک سنگ آهن گل گهر سیرجان

زون	عنصر	تعداد	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	واریانس	چولگی	کشیدگی
۱	آهن	۱۹۸۷	۸٫۷	۶۷٫۳	۵۵٫۰۶	۷۲٫۶	-۱٫۵۷	۳٫۳۲
	MWT	۱۹۸۷	۴٫۴	۹۳	۷۲٫۲۱	۱۷۹٫۰۳	-۱٫۶۶	۳٫۶۴
	فسفر	۱۹۸۷	۰	۰٫۸۵۲	۰٫۱۵۵	۰٫۰۱	۲٫۰۸	۸٫۲۲
	گوگرد	۱۹۸۷	۰	۷٫۱۰۱	۲٫۱۱۶	۱٫۹۹	-۰٫۱۸	-۰٫۶۵
۲	آهن	۵۹۲	۲۸٫۰۴	۶۷٫۶	۶۰٫۶۴۴	۲۷٫۲۰	-۲٫۵۳	۹٫۲۹
	MWT	۵۹۲	۰	۴۲	۲۶٫۸۸	۱۰۱٫۰۱	-۲٫۰۷	۸٫۴۸
	فسفر	۵۹۲	۰٫۰۱	۰٫۵۷۲	۰٫۰۵۴	۰٫۰۰۵	۳٫۶۳	۱۵٫۷۸
	گوگرد	۵۹۲	۰٫۰۰۱	۱٫۷۶	۰٫۰۴۶	۲۷٫۲۰	۹٫۸۷	۱۱۲٫۱۷

مراحل دوم و سوم

- محاسبه مقدار میانگین وزن دار نمونه‌ها
 - تغییر ابعاد سلول شبکه و رفتن به مرحله دوم
 - تعیین ابعاد بهینه براساس مقدار میانگین
- بنابراین، وزن نمونه‌های هر سلول به صورت رابطه ۶ محاسبه می‌شود [۲۹]:

$$w'_j = \frac{1}{n_1} \cdot n \quad (۶)$$

تعداد های داده هر سلول

در این مطالعه با استفاده از ابعاد مختلف، خوشه‌زایی نمونه‌ها در هر دو زون تفکیک شده انجام شد (شکل ۴). به‌طور کلی در این روش، تعیین ابعاد بهینه، به‌ویژگی نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه بستگی دارد؛ اگر نمونه‌برداری در مناطق با عیار بالا بیشتر از نمونه‌برداری در مناطق با عیار پایین باشد،

قابل درک است [۲۹]. از آنجاکه در همه این روش‌ها، تنها وزن نمونه‌ها تغییر می‌کند و مقدار نمونه‌ها تغییر نمی‌کند، فرض اول بسیار اهمیت دارد. فرض دوم بر این است که ماهیت خوشه‌بندی مشخص باشد. اگر داده‌ها هیچ همبستگی فضایی نداشته باشند، نیازی به انجام خوشه‌زایی نیست. تکنیک سلول‌بندی در خوشه‌زایی، به دلیل حساس نبودن به موقعیت‌های مرزی، روشی رایج در مطالعات زمین‌آماري است. مراحل انجام این روش به صورت زیر است [۲۹]:

- تعیین یک شبکه منظم با ابعاد مشخص
- دادن یک وزن برابر به تمام نمونه‌ها براساس تعداد سلول‌های شبکه
- دادن یک وزن برابر به تمام نمونه‌های قرار گرفته در یک سلول براساس تعداد نمونه‌های یک سلول
- محاسبه وزن نمونه‌ها با ضرب وزن‌های محاسبه شده در

در هر دو زون تفکیک‌شده در تعیین شعاع جستجو و سه جهت اصلی، فرعی و قائم انجام شود. واریوگرافی، اولین قدم در تحلیل‌های زمین‌آماري و شامل محاسبه و مدل‌سازی واریوگرام است. واریوگرام، ابزاری برای تعیین میزان همبستگی فضایی یک متغیر ناحیه‌ای است. همان‌گونه که نام این معیار نشان می‌دهد، واریوگرام در واقع اندازه‌ای از واریانس است.

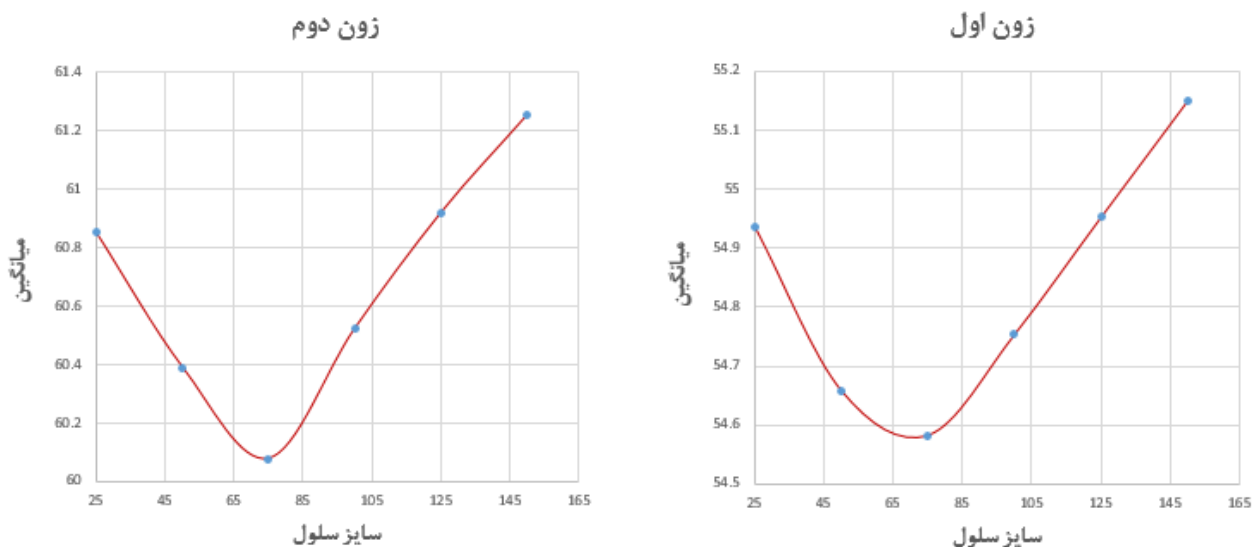
با استفاده از تیوری واریوگرام، واریوگرافی عیار آهن در هر زون انجام می‌شود. مدل‌سازی واریوگرام مهم است. در این مطالعه، براساس وضعیت واریوگرام، یک مدل کروی برازش شده است. شکل ۵ و جدول ۲، مدل واریوگرام و مشخصات آن‌ها نشان می‌دهد. براساس واریوگرام‌های محاسبه‌شده، مدل دو ساختاره بر روی آن‌ها برازش و در واقع، مدل حاصل شامل یک اثر قطعه‌ای و دو مدل کروی است.

مقدار ابعاد بهینه شبکه خوشه‌زدایی درحالتی که مقدار میانگین، مینیمم است، اتفاق می‌افتد. در حالت برعکس، مقدار ابعاد بهینه شبکه خوشه‌زدایی وقتی مقدار میانگین، ماکزیمم است اتفاق می‌افتد [۲۹]. در هر دو زون تفکیک‌شده، الگوریتم روش مورد نظر بر روی شبکه‌هایی با بلوک‌های تشکیل‌شده در ابعاد مختلف (از ۵۰ تا ۱۰۰ متری با ارتفاع سه متری)، پیاده‌سازی شد. به دلیل نمونه‌برداری بیشتر در مناطق پرعبار (شکل ۳) در هر دو زون تفکیک‌شده، مقدار میانگین مینیمم در شبکه تشکیل‌شده از بلوک‌هایی با ابعاد ۳۷۵۷۵ مترمکعب اتفاق می‌افتد. بنابراین، مقدار ابعاد بهینه در هر دو زون برابر با همین ابعاد خواهد شد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- واریوگرافی

پس از پردازش اولیه داده‌ها، باید واریوگرافی عیار آهن

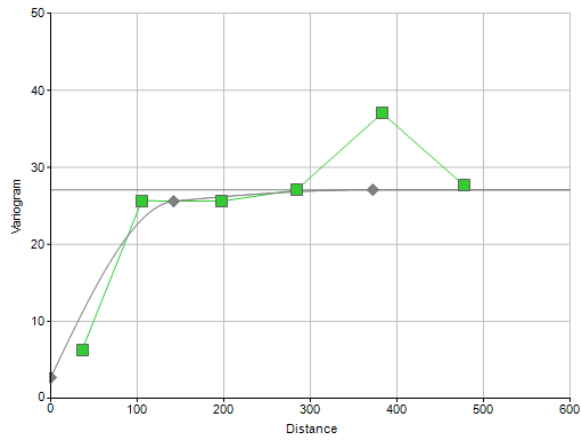


شکل ۴: تغییرات میانگین براساس خوشه‌زدایی نمونه‌ها به روش سلول‌بندی با ابعاد مختلف در دو زون تفکیک‌شده

جدول ۲: مشخصات واریوگرام‌های عیار آهن در دو زون تفکیک‌شده

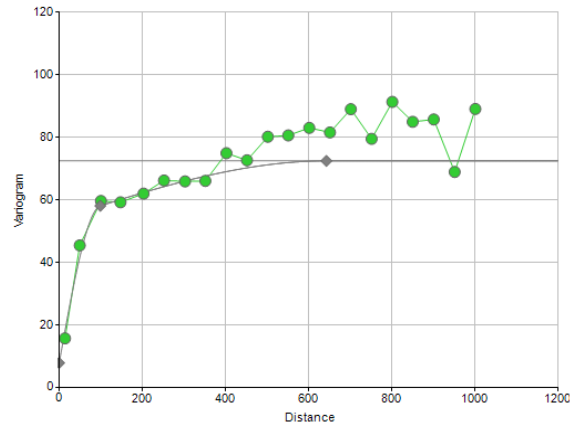
زون	اثر قطعه‌ای	سقف ۱	سقف ۲	دامنه				
				جهت اول		جهت دوم		جهت قائم
۱	۷,۸۵۷	۵۹,۸۳۶	۷,۲۳۲	آزیموت ۹۰ شیب صفر		آزیموت صفر شیب ۱۰		آزیموت ۱۸۰ شیب ۸۰
				۹۹	۶۴۳	۵۲	۱۴۸	۲۱
۲	۲,۷۰۸	۲۲,۸۸۵	۴,۱۹۲	آزیموت ۱۵۰ شیب ۱۰		آزیموت ۶۰ شیب صفر		آزیموت ۳۳۰ شیب ۸۰
				۱۴۲	۳۷۲	۳۲	۲۱۸	۱۰۵

زون دوم
Variogram



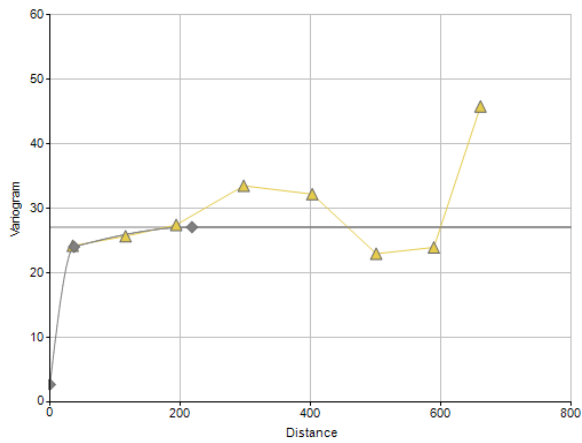
Cap-Fe AZI 150 DIP 10

زون اول
Variogram



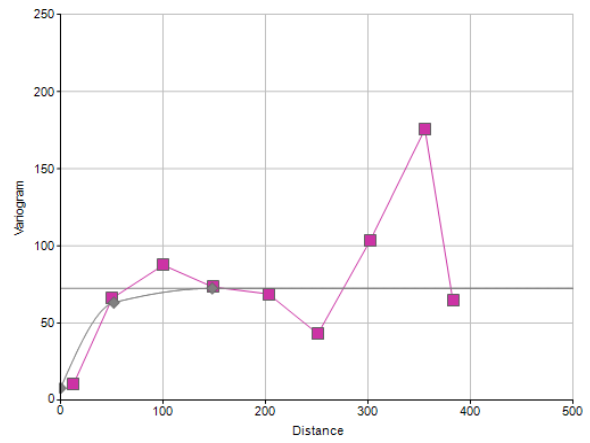
Cap-Fe AZI 90 DIP 0

Variogram



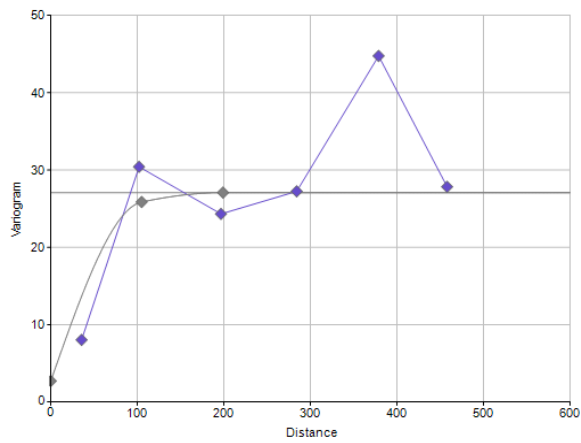
Cap-Fe AZI 60 DIP 0

Variogram



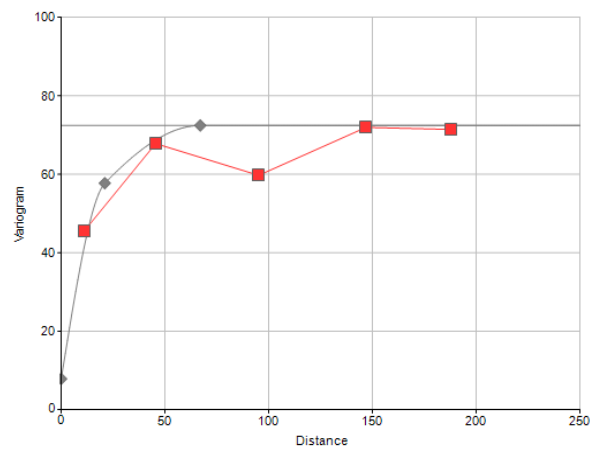
Cap-Fe AZI 0 DIP 10

Variogram



Cap-Fe AZI 330 DIP 80

Variogram



Cap-Fe AZI 180 DIP 80

شکل ۵: مدل واریوگرام عیار آهن در دو زون تفکیک شده

۴-۲- مدل‌سازی عیار آهن

با استفاده از شعاع جستجوی تعیین‌شده و روش کریجینگ، مدل‌سازی عیار آهن در دو زون تفکیک‌شده، انجام شد. با توجه به اطلاعات موجود، مدل بلوکی هر دو زون تفکیک‌شده با بلوک‌هایی به ابعاد ۱۵۱۰۱۰ مترمکعب ساخته شد. در این پژوهش هدف، بهینه‌سازی فرایند تخمین با استفاده از معیار آزمون کمی شعاع جستجوی کریجینگ است. مطالعات قبلی در این زمینه، نشان می‌دهد که همواره شعاع جستجوی تعیین‌شده با استفاده از روش واریوگرافی، بهترین نتیجه تخمین را ارائه نمی‌دهد. بنابراین، نتایج تخمین حاصل از شعاع‌های جستجوی مختلف (حول شعاع جستجوی به‌دست آمده با استفاده از واریوگرام) مورد ارزیابی قرار گرفتند.

در این مطالعه، معیارهای موثر دیگر در تخمین نیز مورد بررسی قرار گرفتند. یکی از معیارهای مهم، تعیین مقدار مینیمم/ماکزیمم داده‌های موجود در شعاع جستجو برای انجام فرایند تخمین است که تعداد نقاط موجود در شعاع جستجو را به یک بازه مشخص، محدود می‌کند. معیار دیگر استفاده از روش اکتانت است. در این روش، شعاع جستجو به قسمت‌های مساوی تقسیم می‌شود و در هر قسمت، تعداد مشخصی داده قرار می‌گیرند. همچنین تعداد گمانه‌هایی که در تخمین یک نقطه مشارکت می‌کنند، باید بهینه باشند. این معیار نیز در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. براساس معیارهای تعریف‌شده، برای بهینه‌سازی فرایند تخمین استراتژی‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت.

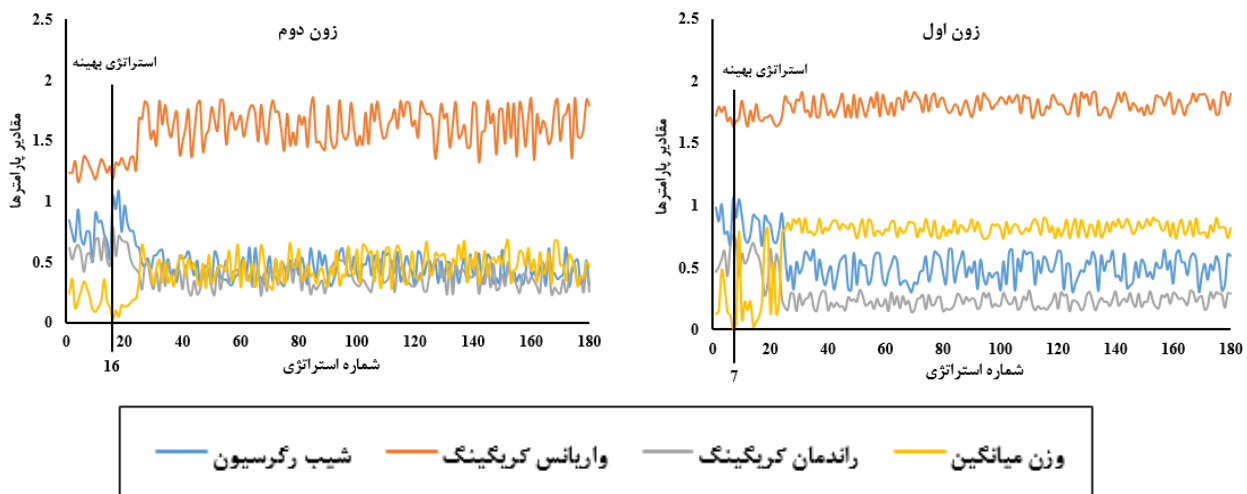
برای به‌دست آوردن معیارهای بهینه موثر در تخمین، بازه‌ای از مقادیر برای هر کدام از آن‌ها در نظر گرفته شد. در زون اول، براساس مقادیر شعاع جستجوی به‌دست آمده از واریوگرام (جدول ۲)، بازه تغییرات شعاع جستجو در جهات اصلی [۶۰۰-۷۵۰]، فرعی [۱۵۰-۲۵۰] و عمودی [۸۰-۲۰۰] در نظر گرفته شد. همچنین در زون دوم، براساس مقادیر شعاع جستجوی به‌دست‌آمده از واریوگرام (جدول ۲)، بازه تغییرات شعاع جستجو در جهات اصلی [۴۵۰-۶۵۰]، فرعی [۲۰۰-۳۰۰] و عمودی [۲۵۰-۳۵۰] در نظر گرفته شد. بازه تغییرات تعداد مینیمم داده‌های شرکت‌کننده در تخمین یک نقطه [۱-۵]، تعداد ماکزیمم داده‌های شرکت‌کننده در تخمین یک نقطه [۱۰-۱۵]، تعداد اکتانت [۰-۵] و تعداد گمانه‌ها [۱-۵] نیز در نظر گرفته شد. بر این اساس، تعداد استراتژی‌های بسیار زیادی برای هر دو زون ایجاد شد. برای کاهش تعداد

استراتژی‌ها، برپایه معیارهای ارزیابی نتایج تخمین (شیب رگرسیون، واریانس تخمین، راندمان تخمین و وزن میانگین)، با ثابت در نظر گرفتن سایر معیارها و تغییر شعاع‌های جستجو در بازه‌های تعیین‌شده، سه شعاع جستجوی بهینه برای هر یک از زون‌ها مشخص شد (جدول‌های ۳ و ۴). نتایج تخمین حاصل از این سه شعاع جستجوی تعیین‌شده، دارای بیشترین مقدار شیب رگرسیون و راندمان تخمین و دارای کمترین مقدار واریانس تخمین و وزن میانگین هستند. با ثابت در نظر گرفتن تعداد اکتانت، تعداد گمانه‌ها و سه شعاع جستجوی بهینه به‌دست آمده برای هر زون، و سپس با تغییر تعداد مینیمم و ماکزیمم داده‌های شرکت‌کننده در تخمین یک نقطه با توجه به بازه‌های معرفی‌شده، ۷۵ استراتژی برای هر زون به‌دست آمد. براساس نتایج حاصل‌شده، معیارهای ارزیابی نتایج تخمین در دو حالت ۳-۱۲ و ۵-۱۵ برای مینیمم و ماکزیمم داده‌های شرکت‌کننده در تخمین، بهینه هستند. در نهایت، با توجه به مقادیر بهینه حاصله برای شعاع‌های جستجوی بیضوی و تعداد مینیمم و ماکزیمم نقاط شرکت‌کننده در تخمین یک نقطه و تغییر تعداد اکتانت و تعداد گمانه‌ها در بازه تعریف‌شده، ۱۸۰ استراتژی در هر کدام از زون‌ها مورد بررسی قرار گرفت. جداول ۳ و ۴ بعضی از استراتژی‌های انجام‌شده در دو زون مختلف تفکیک‌شده را نشان می‌دهند. استراتژی‌های موجود در این جداول دارای بهترین مقادیر برای معیارهای ارزیابی نتایج تخمین هستند. برای مدل‌سازی تغییرات عیار در هر دو زون تفکیک‌شده، از روش کریجینگ ساده استفاده شده است. براساس جدول ۳، در زون اول، فرایند تخمین درحالتی که بازه تعداد داده‌ها بین ۳ تا ۱۲، تعداد اکتانت ۳، تعداد گمانه‌ها ۴ و شعاع جستجوی در سه جهت ۶۸۸، ۲۲۶ و ۱۵۲ باشند، بهینه خواهد شد. در این وضعیت، مقادیر شیب رگرسیون ۰٫۰۶، واریانس تخمین ۴۳٫۱۳، راندمان تخمین ۰٫۷۶۵ و وزن میانگین ۰٫۰۱ هستند. همچنین براساس جدول ۴، در زون دوم وقتی بازه تعداد داده‌ها بین ۵ تا ۱۵، تعداد اکتانت ۲، تعداد گمانه‌ها ۲ و شعاع جستجوی در سه جهت ۴۸۲، ۲۳۳ و ۳۰۳ باشند، فرایند تخمین بهینه خواهد بود. در این حالت، مقادیر شیب رگرسیون ۰٫۰۳، واریانس تخمین ۱۵٫۲۶، راندمان تخمین ۰٫۷۸۴ و وزن میانگین ۰٫۰۳ هستند.

شکل ۶، تغییرات معیارهای ارزیابی فرایند تخمین از قبیل واریانس کریجینگ، شیب رگرسیون خطی بین مقادیر تخمینی و واقعی، راندمان کریجینگ و وزن میانگین براساس

جدول ۳: نتایج روش کریگینگ ساده براساس استراتژی‌های مختلف در زون اول (X = جهت اصلی، Y = جهت فرعی و Z = جهت عمودی)

شماره	مینیمم تعداد داده	ماکزیمم تعداد داده	تعداد اکتانت	تعداد گمانه‌ها	X	Y	Z	شیب رگرسیون	واریانس کریگینگ	راندمان کریگینگ	وزن میانگین
۱	۳	۱۲	۰	۲	۶۸۸	۲۲۶	۱۵۲	۰٫۹۸۲	۵۲٫۵۰۱	۰٫۴۶۸	۰٫۱۳
۲	۳	۱۲	۰	۲	۶۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۰٫۸۷۱	۶۱٫۹۸۶	۰٫۵۰۷	۰٫۱۵۷
۳	۳	۱۲	۰	۲	۷۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۱٫۰۱	۵۶٫۱۲۳	۰٫۵۷۲	۰٫۴۸
۴	۳	۱۲	۲	۲	۶۸۸	۲۲۶	۱۵۲	۰٫۷۷۲	۶۱٫۶۵۳	۰٫۶۳۵	۰٫۳۵
۵	۳	۱۲	۲	۲	۶۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۰٫۷۸۹	۴۷٫۴۷۸	۰٫۴۳۲	۰٫۱۵
۶	۳	۱۲	۲	۲	۷۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۰٫۶۸۹	۵۰٫۷۲۱	۰٫۶۶۸	۰٫۱۲
۷	۳	۱۲	۳	۴	۶۸۸	۲۲۶	۱۵۲	۱٫۰۶	۴۳٫۱۳۴	۰٫۷۶۵	۰٫۰۱
۸	۳	۱۲	۳	۴	۶۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۰٫۹۰۱	۴۷٫۱۰۲	۰٫۷۱۰	۰٫۰۵
۹	۳	۱۲	۳	۴	۷۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۱٫۰۵	۴۹٫۸۶۹	۰٫۴۳۵	۰٫۷۹
۱۰	۳	۱۲	۴	۴	۶۸۸	۲۲۶	۱۵۲	۰٫۹۲۱	۶۹٫۳۲۰	۰٫۶۱۶	۰٫۰۹
۱۱	۳	۱۲	۴	۴	۶۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۰٫۷۴۵	۵۳٫۲۵۸	۰٫۵۳۵	۰٫۲۳
۱۲	۳	۱۲	۴	۴	۷۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۰٫۶۹۸	۴۲٫۷۹۶	۰٫۵۶۸	۰٫۱۶
۱۳	۵	۱۵	۰	۲	۶۸۸	۲۲۶	۱۵۲	۰٫۷۶۸	۵۷٫۹۳۲	۰٫۶۵۳	۰٫۲۳
۱۴	۵	۱۵	۰	۲	۶۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۰٫۹۲۳	۴۷٫۱۰۵	۰٫۷۰۱	۰٫۰۳
۱۵	۵	۱۵	۰	۲	۷۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۰٫۹۰۰	۶۵٫۱۲۹	۰٫۶۲۲	۰٫۰۶۵
۱۶	۵	۱۵	۲	۲	۶۸۸	۲۲۶	۱۵۲	۰٫۸۷۵	۴۹٫۸۸۶	۰٫۵۷۹	۰٫۱۱
۱۷	۵	۱۵	۲	۲	۶۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۰٫۶۷۳	۴۷٫۲۵۲	۰٫۴۵۵	۰٫۲۲
۱۸	۵	۱۵	۲	۲	۷۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۰٫۹۱۴	۵۰٫۵۰۰	۰٫۲۷۳	۰٫۷۳
۱۹	۵	۱۵	۳	۴	۶۸۸	۲۲۶	۱۵۲	۰٫۸۷۳	۵۱٫۰۰۲	۰٫۳۷۲	۰٫۸۱
۲۰	۵	۱۵	۳	۴	۶۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۰٫۸۴۱	۵۳٫۱۰۹	۰٫۶۵۳	۰٫۱۳
۲۱	۵	۱۵	۳	۴	۷۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۰٫۷۱۵	۴۶٫۶۲۲	۰٫۴۰۱	۰٫۵۴
۲۲	۵	۱۵	۴	۴	۶۸۸	۲۲۶	۱۵۲	۰٫۶۹۸	۴۳٫۱۵۷	۰٫۶۰۹	۰٫۱۲۵
۲۳	۵	۱۵	۴	۴	۶۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۰٫۸۰۱	۴۴٫۸۶۷	۰٫۴۹۸	۰٫۲۴۳
۲۴	۵	۱۵	۴	۴	۷۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۰٫۹۳۲	۵۱٫۹۸۸	۰٫۲۴۵	۰٫۷۸



شکل ۶: تغییرات معیارهای ارزیابی کیفیت فرآیند تخمین، براساس استراتژی‌های مختلف در دو زون تفکیک شده

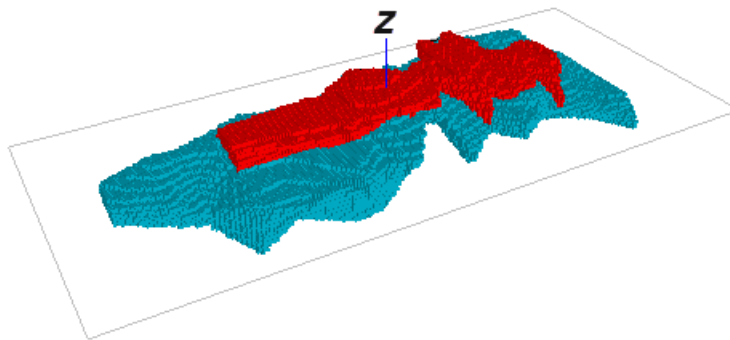
جدول ۴: نتایج روش کریجینگ ساده براساس استراتژی‌های مختلف در زون دوم (X = جهت اصلی، Y = جهت فرعی و Z = جهت عمودی)

شماره	مینیمم تعداد داده	ماکزیمم تعداد داده	تعداد اکتانت	تعداد گمانه‌ها	X	Y	Z	شیب رگرسیون	واریانس کریجینگ	راندمان کریجینگ	وزن میانگین
۱	۳	۱۲	۰	۲	۴۸۲	۲۳۳	۳۰۳	۰٫۸۴۲	۱۷٫۱۷۵	۰٫۶۱۵	۰٫۲۴
۲	۳	۱۲	۰	۲	۴۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۰٫۷۳۰	۱۷٫۲۱۱	۰٫۵۱۸	۰٫۳۶۱
۳	۳	۱۲	۰	۲	۵۰۰	۲۷۵	۳۵۰	۰٫۶۷۱	۲۱٫۳۶۴	۰٫۵۹۷	۰٫۱۲۳
۴	۳	۱۲	۲	۲	۴۸۲	۲۳۳	۳۰۳	۰٫۹۳۱	۱۴٫۴۲۳	۰٫۶۴۰	۰٫۱۷۹
۵	۳	۱۲	۲	۲	۴۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۰٫۶۹۷	۱۶٫۹۵۱	۰٫۵۷۳	۰٫۲۶
۶	۳	۱۲	۲	۲	۵۰۰	۲۷۵	۳۵۰	۰٫۶۴۰	۲۳٫۳۷۱	۰٫۴۱۷	۰٫۳۴۱
۷	۳	۱۲	۳	۴	۴۸۲	۲۳۳	۳۰۳	۰٫۷۵۰	۲۲٫۱۴۰	۰٫۵۵۱	۰٫۲۹
۸	۳	۱۲	۳	۴	۴۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۰٫۷۴۱	۱۹٫۴۲۸	۰٫۵۷۱	۰٫۲۱۳
۹	۳	۱۲	۳	۴	۵۰۰	۲۷۵	۳۵۰	۰٫۴۹۷	۱۷٫۱۰۸	۰٫۵۰۱	۰٫۱۱
۱۰	۳	۱۲	۴	۴	۴۸۲	۲۳۳	۳۰۳	۰٫۹۰۱	۱۵٫۱۲۷	۰٫۶۷۹	۰٫۰۹
۱۱	۳	۱۲	۴	۴	۴۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۰٫۸۲۵	۱۸٫۳۳۳	۰٫۶۹۱	۰٫۱۳
۱۲	۳	۱۲	۴	۴	۵۰۰	۲۷۵	۳۵۰	۰٫۸۳۶	۲۲٫۱۴۷	۰٫۵۱۲	۰٫۱۸۱
۱۳	۵	۱۵	۰	۲	۴۸۲	۲۳۳	۳۰۳	۰٫۷۲۶	۲۰٫۰۵۷	۰٫۶۹۷	۰٫۳۶
۱۴	۵	۱۵	۰	۲	۴۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۰٫۶۶۶	۱۷٫۱۷۰	۰٫۵۱۳	۰٫۱۷۸
۱۵	۵	۱۵	۰	۲	۵۰۰	۲۷۵	۳۵۰	۰٫۵۳۱	۱۹٫۳۲۶	۰٫۴۶۹	۰٫۱۲۵
۱۶	۵	۱۵	۲	۲	۴۸۲	۲۳۳	۳۰۳	۱٫۰۳	۱۵٫۲۶۲	۰٫۷۸۴	۰٫۰۳
۱۷	۵	۱۵	۲	۲	۴۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۰٫۹۳۱	۲۰٫۷۹۴	۰٫۵۴۶	۰٫۱۰۲
۱۸	۵	۱۵	۲	۲	۵۰۰	۲۷۵	۳۵۰	۱٫۰۸	۱۹٫۷۶۰	۰٫۷۱۲	۰٫۰۵
۱۹	۵	۱۵	۳	۴	۴۸۲	۲۳۳	۳۰۳	۰٫۷۴۵	۲۲٫۶۶۶	۰٫۶۷۹	۰٫۱۴۶
۲۰	۵	۱۵	۳	۴	۴۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۰٫۹۶۳	۱۹٫۹۷۱	۰٫۶۶۵	۰٫۱۳۲
۲۱	۵	۱۵	۳	۴	۵۰۰	۲۷۵	۳۵۰	۰٫۸۱۹	۱۸٫۱۴۲	۰٫۶۵۶	۰٫۱۴
۲۲	۵	۱۵	۴	۴	۴۸۲	۲۳۳	۳۰۳	۰٫۷۵۳	۲۲٫۴۶۰	۰٫۵۳۲	۰٫۱۶۳
۲۳	۵	۱۵	۴	۴	۴۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۰٫۷۵۱	۲۳٫۲۳۸	۰٫۴۶۶	۰٫۱۹۱
۲۴	۵	۱۵	۴	۴	۵۰۰	۲۷۵	۳۵۰	۰٫۶۳۳	۱۸٫۱۳۸	۰٫۴۳۶	۰٫۲۰

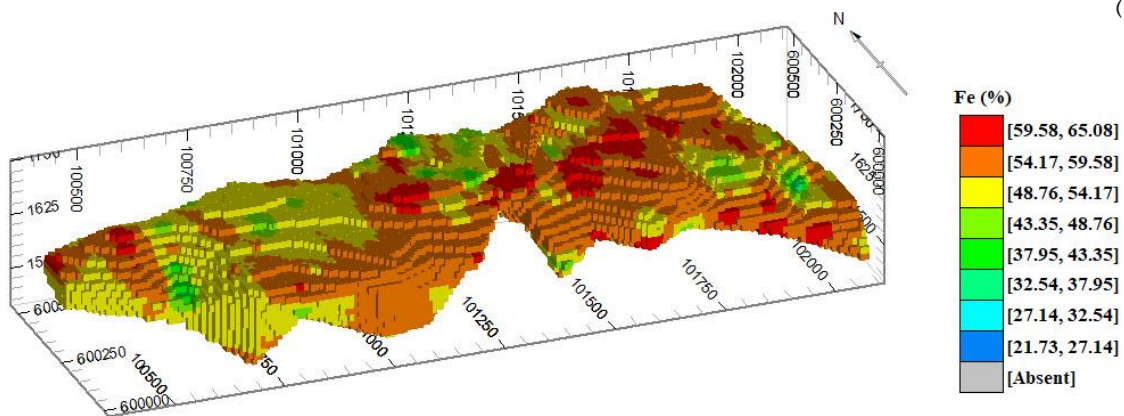
استراتژی‌های مختلف را نشان می‌دهد. استراتژی هفتم از زون اول، بهترین گزینه برای انجام فرایند تخمین این زون است. اگرچه مقدار واریانس کریجینگ در استراتژی دوازدهم از استراتژی انتخابی کمتر است، اما به دلیل بهینه‌بودن سایر معیارهای ارزیابی، این استراتژی مناسب نیست. همچنین، در استراتژی شانزدهم از زون دوم این معیارها به بهینه‌ترین حالت ممکن رسیده‌اند. در این زون نیز، واریانس تخمین در استراتژی چهارم، کمترین مقدار را از آن خود کرده است. سایر معیارها در این استراتژی، مقادیر مناسبی برای انجام تخمین محسوب نمی‌شوند. به دلیل مناسب‌بودن مقادیر معیارهای ارزیابی بر روی نتایج روش کریجینگ معمولی در مقایسه با روش کریجینگ ساده، در این مطالعه برای مدل‌سازی کانسار

مورد نظر از روش کریجینگ ساده استفاده شد. با استفاده از معیارهای بهینه تعیین‌شده و روش کریجینگ ساده، مدل‌سازی عیار آهن در دو زون تفکیک‌شده انجام شد (شکل ۷). با توجه به شکل ۲، زون اکسیده (زون دوم) در مقایسه با زون غیراکسیده (زون اول) در سطح بالاتری از زمین قرار دارد. بنابراین قسمت‌های کم‌عمق مدل مربوط به زون دوم و قسمت‌های عمیق مدل، مربوط به زون اول است (شکل ۷-الف). برای مدل‌سازی قسمت‌های کم‌عمق مدل این زون، از معیارهای بهینه به‌دست‌آمده در زون دوم و گمانه‌های آن استفاده شد. همچنین مدل‌سازی قسمت‌های عمیق‌تر با استفاده از معیارهای بهینه حاصله برای زون اول و گمانه‌های این زون صورت گرفت. در این راستا، مدل بلوکی

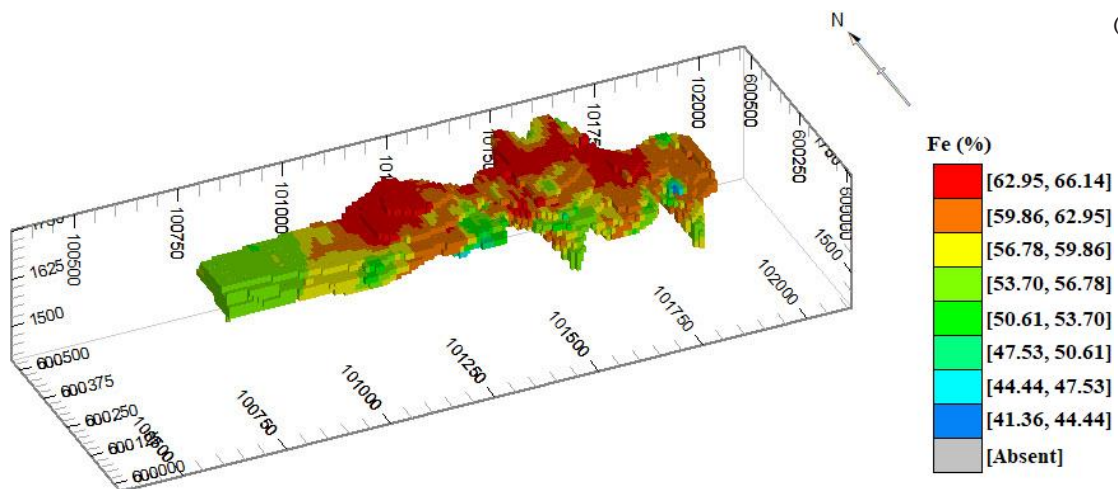
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۷: الف) مدل بلوکی ترکیبی از دو زون تفکیک شده (رنگ آبی و قرمز به ترتیب نشان دهنده موقعیت مدل زون اول و دوم هستند)، ب) مدل سازی عیار آهن در زون اول، ج) مدل سازی عیار آهن در زون دوم با استفاده از روش کریگینگ ساده و معیارهای بهینه

ترکیبی ایجاد شده (شکل ۷-الف)، با توجه به موقعیت گمانه‌ها، به دو مدل جدا از هم برای زون‌های اول و دوم تقسیم شدند. براساس شکل ۷، عیار آهن در قسمت‌های مرکزی هر دو زون دارای افزایش چشم‌گیری است. در قسمت‌های مرکزی زون اول، تغییرات عیار آهن از مقدار ۵۴/۱۷ درصد تا مقدار ۶۵/۰۸ درصد است. در حالی که در قسمت‌های مرکزی زون دوم، تغییرات عیار آهن از مقدار ۵۹/۸۷ درصد تا مقدار ۶۶/۱۴ درصد است. همچنین کمترین عیار آهن در زون اول (۲۱/۷۳) از کمینه عیار آهن در زون دوم (۴۱/۳۶)، به مقدار ۱۹/۶۳ درصد کمتر است.

۶۵/۰۸ درصد است. در حالی که در قسمت‌های مرکزی زون دوم، تغییرات عیار آهن از مقدار ۵۹/۸۷ درصد تا مقدار ۶۶/۱۴ درصد است. همچنین کمترین عیار آهن در زون اول (۲۱/۷۳) از کمینه عیار آهن در زون دوم (۴۱/۳۶)، به مقدار ۱۹/۶۳ درصد کمتر است.

۵- نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی فرایند تخمین با استفاده از روش کریجینگ ساده، مساله مهمی در مدل‌سازی‌های عملیات معدنکاری است. در این مقاله، برای رسیدن به یک مدل بهینه، معیارهای موثر در فرایند از قبیل شعاع جستجو، تعداد نقاط موجود در پنجره جستجو، استفاده یا عدم استفاده از روش اکتانت و تعداد گمانه‌های استفاده‌شده در تخمین یک نقطه، مورد بررسی قرار گرفتند. مطالعات قبلی در این زمینه نشان دادند که شعاع جستجوی تعیین‌شده توسط واریوگرام، همواره بهینه‌ترین مدل را ارائه نمی‌دهد. برای بررسی معیارهای ذکر شده، از مجموعه داده‌های معدن شماره یک سنگ آهن گل‌گهر سیرجان استفاده شد. براساس تغییرات عیار آهن، داده‌های موجود به دو زون مختلف تفکیک و مدل‌سازی هر زون به صورت جداگانه انجام شد. با ترکیب مقادیر مختلف از معیارها، استراتژی‌های مختلفی برای انجام فرایند تخمین استفاده شدند. تعیین بهترین استراتژی، نیازمند ارزیابی نتایج تخمین هر استراتژی است. در این مقاله، از شاخص آزمون کمی معیارهای محدوده مورد جستجو برای ارزیابی مدل‌های مختلف ساخته‌شده، استفاده شد. براساس این شاخص، معیارهای واریانس کریجینگ، شیب رگرسیون بین داده‌های واقعی و تخمینی، راندمان کریجینگ و وزن میانگین اختصاص‌یافته به داده‌ها برای هر مدل مورد بررسی قرار گرفتند. مقدار بالای شیب رگرسیون و راندمان کریجینگ و مقدار پایین واریانس کریجینگ و وزن میانگین، نشان‌دهنده دقت بالای مدل ساخته شده است.

۶- مراجع

- and Fonseca, E. C. (2004). "Combining multiple correspondence analysis with factorial kriging analysis for geochemical mapping of the gold-silver deposit at Marrancos (Portugal)". *Applied Geochemistry*, 19(4): 623-631.
- [6] Jimenez-Espinosa, R., Sousa, A. J., and Chica-Olmo, M. (1993). "Identification of geochemical anomalies using principal component analysis and factorial kriging analysis". *Journal of Geochemical Exploration*, 46(3): 245-256.
- [7] Panahi, A., Cheng, Q., and Bonham-Carter, G. F. (2004). "Modelling lake sediment geochemical distribution using principal component, indicator kriging and multifractal power-spectrum analysis: a case study from Gowganda, Ontario". *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 4(1): 59-70.
- [8] Soltani, F., Afzal, P., and Asghari, O. (2014). "Delineation of alteration zones based on Sequential Gaussian Simulation and concentration-volume fractal modeling in the hypogene zone of Sungun copper deposit, NW Iran". *Journal of Geochemical Exploration*, 140: 64-76.
- [9] Talesh Hosseini, S., Asghari, O., and Ghavami Riabi, S. R. (2018). "Spatial modelling of zonality elements based on compositional nature of geochemical data using geostatistical approach: a case study of Baghloom area, Iran". *Journal of Mining and Environment*, 9(1): 153-167.
- [10] Webber, T., Costa, J. F. C. L., and Salvadoretti, P. (2013). "Using borehole geophysical data as soft information in indicator kriging for coal quality estimation". *International Journal of Coal Geology*, 112: 67-75.
- [11] Rossi, M. E., and Deutsch, C. V. (2013). "Mineral resource estimation". Springer Science & Business Media, 1: pp. 337.
- [12] Varouchakis, E. A., Kolosionis, K., and Karatzas, G. P. (2016). "Spatial variability estimation and risk assessment of the aquifer level at sparsely gauged basins using geostatistical methodologies". *Earth Science Informatics*, 9(4): 437-448.
- [13] Pyrez, M. J., and Deutsch, C. V. (2014). "Geostatistical reservoir modeling". Oxford University Press, 1: pp. 449.
- [14] Rivoirard, J. (1987). "Two key parameters when choosing the kriging neighborhood". *Mathematical Geology*, 19(8): 851-856.
- [15] Vann, J., Jackson, S., and Bertoli, O. (2003), November. "Quantitative kriging Neighbourhood analysis for the mining geologist-a description of the method with worked case examples". In 5th International Mining Geology Conference, Bendigo, Australia, Melbourne,
- [1] David, M. (1977). "Geostatistical ore reserve estimation. Developments in Geomathematics 2". Amsterdam: Elsevier, 1: pp. 400.
- [2] Chiles, J. P., and Delfiner, P. (2009). "Geostatistics: modeling spatial uncertainty". John Wiley & Sons, pp. 704.
- [3] Armstrong, M. (1998). "Basic linear geostatistics". Springer Science & Business Media, 1: pp. 160.
- [4] Changjiang, L., Zhiming, L., Tuhua, M., and Xingsheng, Z. (2009). "A simple kriging method incorporating multiscale measurements in geochemical survey". *Journal of Geochemical Exploration*, 101(2): 147-154.
- [5] Reis, A. P., Sousa, A. J., Da Silva, E. F., Patinha, C.,

- estimates*". Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 114(3): 223-223.
- [26] Badr, M. J., Masoudi, F., Collins, A. S., and Sorbi, A. (2012). "Mineralogical evidence for regional metamorphism overprinted by contact metamorphism". Acta Geologica Sinica (English Edition), 86(1): 48-54.
- [27] سبزه‌ای، م.؛ ۱۳۷۶؛ "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گل‌گهر سیرجان". سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معادن کشور، ۱۲۰ صفحه.
- [28] Jafari, A., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Shafaroudi, A. M., and Ren, M. (2019). "Geochemistry of metamorphic rocks and mineralization in the Golgohar iron ore deposit (No. 1), Sirjan, SE Iran: Implications for pale tectonic setting and ore genesis". Journal of Geochemical Exploration, 205: 106-330.
- [29] Pyrcz, M. J., and Deutsch, C. V. (2003). "Declustering and debiasing". Newsletter, 19: 1-14.
- Australian Institute of Mining & Metallurgy, 8: 215-223.
- [16] Coombes, J. (2008). "The art and science of resource estimation". A practical Guide for Geologists and Engineers, Coombes Capability, pp. 264.
- [17] Emery, X. (2009). "The kriging update equations and their application to the selection of neighboring data". Computational Geosciences, 13(3): 269-280.
- [18] Boyle, C. (2010). "Kriging Neighbourhood analysis by slope of regression and weight of mean-evaluation with the Jura data set". Mining Technology, 119(2): 49-58.
- [19] Shademan Khakestar, M., Madani, H., Hassani, H., and Moarefvand, P. (2013). "Determining the best search Neighbourhood in reserve estimation, using geostatistical method: A case study anomaly No 12A iron deposit in central Iran". Journal of the Geological Society of India, 81(4): 581-585.
- [20] Coombes, J., and Boamah, P. (2015). "Local kriging Neighbourhood optimization". In Africa Australia Technical Mining Conference, 27-35.
- [21] Hundelshausen, R., Costa, J. F. C. L., Marques, D. M., and Bassani, M. A. A. (2018). "Localised kriging parameter optimization based on absolute error minimization". Applied Earth Science, 127(4): 153-162.
- [22] Madani, N., and Emery, X. (2019). "A comparison of search strategies to design the Cokriging neighborhood for predicting coregionalized variables". Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 33(1): 183-199.
- [23] Yfantis, E. A., Flatman, G. T., and Behar, J. V. (1987). "Efficiency of kriging estimation for square, triangular, and hexagonal grids". Mathematical Geology, 19(3): 183-205.
- [24] Krige, D. G. (1996). "A practical analysis of the effects of spatial structure and of data available and accessed, on conditional biases in ordinary kriging". Geostatistics Wollongong, 96: 799-810.
- [25] Deutsch, J. L., Szymanski, J., and Deutsch, C. V. (2014). "Checks and measures of performance for kriging

¹ Mean Weight

² Slope of the linear regression

³ Negative Weight

⁴ Kriging Variance

⁵ Quantitative Kriging Neighborhood Analysis

⁶ Kriging Efficiency

⁷ Jura

⁸ Localized Kriging Neighbourhood Analysis

⁹ Localized Kriging Parameter Optimization

¹⁰ Simple Kriging

¹¹ Ordinary Kriging

¹² Screen Effect

¹³ Declustering



Imam Khomeini International University
Vol. 5, No. 3, Autumn 2020, pp. 1-4



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI: 10.30479/jmre.2020.11431.1307

Design Optimization of Estimation Process Using the Quantitative Kriging Neighbourhood Analysis in the Gol-E-Gohar No.1 Mine

Talesh Hosseini S.¹, Asghari O.^{2*}

1- Ph.D. Candidate, Simulation and Data Processing Laboratory, Dept. of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Sajjad.t.hosseini@ut.ac.ir

2- Associate Professor, Simulation and Data Processing Laboratory, Dept. of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

O.asghari@ut.ac.ir

(Received: 17 Aug. 2019, Accepted: 01 Feb. 2020)

Abstract: As the best linear estimator, Kriging is now a well-established method in all types of 2D and 3D modeling, including geochemical mapping, rock types modeling, geophysical mapping, and resource estimation. In general, a multi-stage approach can be used for evaluating kriging parameters. The first step in the assessment of mineral resources using linear geostatistics is to remove outlier data and to find the best de-cluster size. After this stage, variogram models in the area under study must be provided by a spherical model. In this context, investigating kriging performance has always been of interest to numerous researchers. Evaluating kriging implementation for different applications has been a growing field of study in the last few decades. Although many authors have discussed various kriging parameters, it seems necessary to conduct more detailed reviews on range searching, high and low nugget effect, as well as 2D and 3D estimations. In this paper, an optimal search range was determined using quantitative kriging neighborhood analysis (QKNA), and the utility of this search range was explored by assessing kriging efficiency. To this end, the borehole dataset of the Gol-E-Gohar No.1 mine was used. In total, 2579 samples (of length 3 m) make up the database for this study. In this research, the dataset was divided into two zones based on their associated geological domains. Based on the aforementioned parameters, 180 estimation strategies were generated for each rock type. The results indicate that the optimal search ranges of zone 1 are 688, 226, and 152, and the optimal search ranges of zone 2 are 482, 233, and 303.

Keywords: Kriging, Data preprocessing, Variogram, Optimal search range, Quantitative kriging Neighborhood analysis.

INTRODUCTION

The geostatistical estimation process can be used to estimate the value of points at each target grid node. Among those methods, kriging, as a linear estimator, is popular in different mining operations. The equation 1 represents the kriging method [1]:



$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{v_i} \quad (1)$$

Where λ_i denotes the weight of i th point, and Z_{v_i} represents the grade sample of i th point for block. Kriging is an estimator that yields the best linear unbiased estimate (BLUE) of point values [1], but this is only valid provided that its search neighborhood is defined correctly [2]. Kriging neighborhood parameters are vital in the process of estimation. These parameters, including min/max number of neighborhood data, use of octant or quadrant search, and maximum search ranges in two or three dimensions, are consequential inasmuch as they directly affect kriging weights. Many research papers in the estimation process have considered the mean weight, the slope of the linear regression, negative weight, kriging variance, and kriging efficiency tools [3-10].

In this study, different search ranges for the Gol-E-Gohar No.1 iron deposit are evaluated using QKNA. Range searching is just one of the parameters discussed in this work. Min/max of data, using octane search, and max data from a single borehole are other parameters that are optimized here. The search range with the best QKNA criteria will be introduced as the optimal search range.

METHODS

It has been established that OK is an estimator that can minimize conditional bias. A perfect estimator Z_v^* (estimated values) equals Z_v (true values), but this does not happen in reality, and some fluctuations will always occur. Even if the regression of Z_v^* on Z_v remains linear with a slope of 1.0, the result is conditionally unbiased, and the obtained estimation could be acceptable. Armstrong (1998) defines the slope (P) of linear regression thus [1] (Equation 2):

$$P = \frac{Cov(Z_v, Z_v^*)}{Var(Z_v^*)} \quad (2)$$

When using simple kriging (SK), the sum of weights is not constrained to add to one. Hence, the remaining weight is allocated to the mean, which is assumed to be known. In SK, MW formula is as follows [1,11] (Equation 3):

$$\lambda_m = 1 - \sum_{i=1}^N \lambda_i^{SK} \quad (3)$$

In which $\sum \lambda_i^{SK}$ is the sum of SK weights, and λ_m is WM.

Kriging is an estimator with minimum variance. Specifically, simple global kriging is known to have minimal estimation variance. The kriging variance (KV) provides a measure of the error associated with the kriging estimator; consequently, it can be a criterion to evaluate the quality of data density and geometry. KV formula is as follows [1] (Equation 4):

$$var(Z_v^*) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j C(x_i, x_j) \quad (4)$$

In which $C(x_i, x_j)$ is the value of the covariance function between sample locations x_i, x_j , and λ_i and λ_j represents the weight assigned to these samples.

The kriging efficiency (KE_{DK}) is calculated by the equation 5 [12]:

$$KE_{DK}(\%) = \frac{\bar{C}(V, V) - \sigma_k^2}{\bar{C}(V, V)} \quad (5)$$

In which $\bar{C}(V, V)$ is the average covariance of points within the blocks, and σ_k^2 shows the kriging variance.

FINDINGS AND ARGUMENT

Through de-clustering, the dataset was placed on a regular grid. De-clustering techniques assign a weight to each data based on the closeness to the surrounding data $w_i, i = 1, \dots, n$. In order to find the best cluster size, data are de-clustered in several sizes, and finally, the best size is selected. De-clustered means are plotted in Figure 1, the cell size with minimum de-clustered mean is the best size for de-clustering.

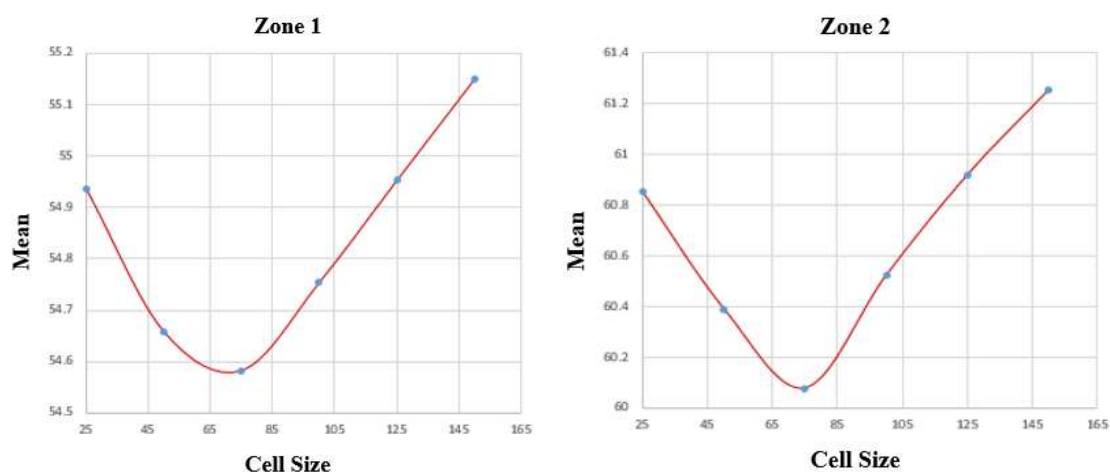


Figure 1. Plot of declustered mean versus cell size in the Zone 1 and Zone 2

The results of QKNA analysis are illustrated in Figure 2. The results of QKNA analysis demonstrated that the optimal strategies determined through QKNA criteria are strategies 7 and 16 for zone 1 and 2, respectively.

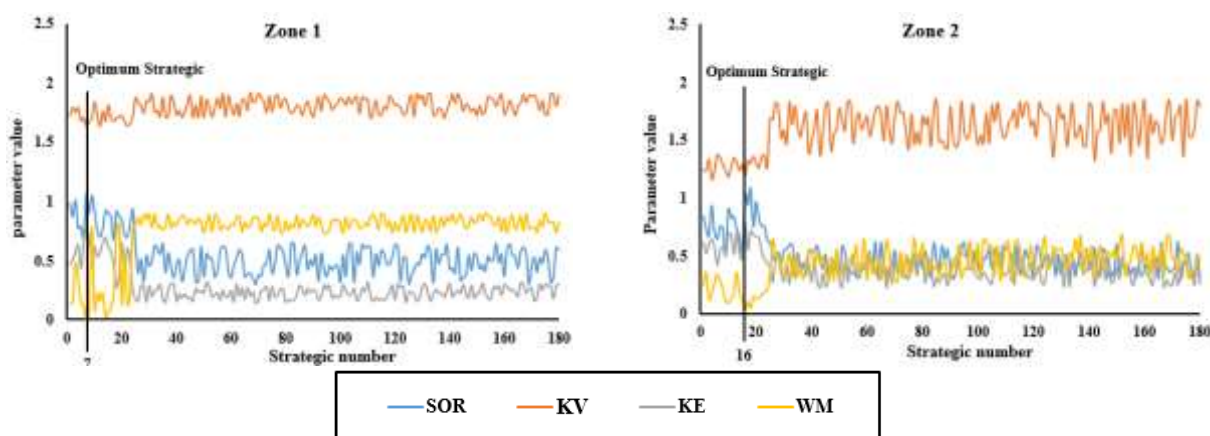


Figure 2. Sensitivity of QKNA parameter to different strategic

CONCLUSIONS

This paper investigated the determination of the kriging search range. It was discovered that selecting the search range through a variogram range is not always the best choice, for it may cause conditional bias. Biasedness of results, especially in the final estimation, is not acceptable, and many strategies should be utilized during the estimation process to eliminate or at least reduce it. On the other hand, as an essential parameter for estimation quality, kriging efficiency is directly related to the search range and the number of data used. Using a restricted neighborhood could not satisfy conditional unbiasedness and afford high-quality estimation. While large search ranges are not always the solution for low quality and biased results, establishing search ranges for different estimation applications is influenced by both QKNA criteria and kriging efficiency.

REFERENCES

- [1] Armstrong, M. (1998). "*Basic linear geostatistics*". Springer Science & Business Media, 1: pp. 160.
- [2] Rivoirard, J. (1987). "*Two key parameters when choosing the kriging neighborhood*". *Mathematical geology*, 19(8): 851-856.
- [3] Vann, J., Jackson, S., and Bertoli, O. (2003). "*Quantitative kriging Neighbourhood analysis for the mining geologist-a description of the method with worked case examples*". In 5th International Mining Geology Conference, Bendigo, Australia, Melbourne, Australian Institute of Mining & Metallurgy, 8: 215-223.
- [4] Coombes, J. (2008). "*The art and science of resource estimation*". A Practical Guide for Geologists and Engineers, Coombes Capability, pp. 246.
- [5] Emery, X. (2009). "*The kriging update equations and their application to the selection of neighboring data*". *Computational Geosciences*, 13(3): 269-280.
- [6] Boyle, C. (2010). "*Kriging Neighbourhood analysis by slope of regression and weight of mean-evaluation with the Jura data set*". *Mining Technology*, 119(2): 49-58.
- [7] Shademan Khakestar, M., Madani, H., Hassani, H., and Moarefvand, P. (2013). "*Determining the best search Neighbourhood in reserve estimation, using geostatistical method: A case study anomaly No 12A iron deposit in central Iran*". *Journal of the Geological Society of India*, 81(4): 581-585.
- [8] Coombes, J., and Boamah, P. (2015). "*Local kriging Neighbourhood optimization*". In Africa Australia Technical Mining Conference, 27-35.
- [9] Hundelshausen, R., Costa, J. F. C. L., Marques, D. M., and Bassani, M. A. A. (2018). "*Localised kriging parameter optimization based on absolute error minimization*". *Applied Earth Science*, 127(4): 153-162.
- [10] Madani, N., and Emery, X. (2019). "*A comparison of search strategies to design the Cokriging neighborhood for predicting coregionalized variables*". *Stochastic environmental research and risk assessment*, 33(1): 183-199.
- [11] Chiles, J. P., and Delfiner, P. (2009). "*Geostatistics: modeling spatial uncertainty*". John Wiley & Sons, pp. 704.
- [12] Krige, D. G. (1996). "*A practical analysis of the effects of spatial structure and of data available and accessed, on conditional biases in ordinary kriging*". *Geostatistics Wollongong*, 96: 799-810.