

مقایسه نتایج روش‌های زمین‌آماری خطی و غیرخطی در مدلسازی و ارزیابی ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی ساوه

رضا احمدی^(۱)

۱. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۰۶

چکیده

در پژوهش حاضر ارزیابی کانسار مس نارباغی شمالی ساوه با استفاده از روش‌های تخمین زمین‌آماری خطی و غیرخطی صورت گرفته و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است. برای این منظور ابتدا متوسط عیار و میزان ذخیره کانسار با روش‌های لاگ کریجینگ و کریجینگ شاخص چندگانه با استفاده از نرم‌افزار SGeMS2 برای عیار حدهای ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ گرم بر تن (ppm) محاسبه شد و نمودارهای عیار-تناژ کانسار رسم شد. سپس به کمک نرم‌افزار Datamine مدلسازی کانسار صورت گرفت و متوسط عیار و میزان ذخیره کانسار با روش کریجینگ معمولی بلوکی نیز تخمین زده شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که اختلاف ذخیره روش‌های لاگ کریجینگ و کریجینگ معمولی بلوکی به‌ازای عیار حدهای مذکور به‌ترتیب برابر با ۰/۹۶، ۱۹/۱۸، ۹/۸۱ و ۱۰/۴۴ درصد است. همچنین اختلاف ذخیره بین روش‌های کریجینگ شاخص و کریجینگ معمولی بلوکی نیز به‌ازای عیار حدهای مذکور به‌ترتیب برابر با ۱۳/۴۵، ۹/۲۱، ۱۴/۷۳ و ۱۷/۶۳ درصد است. به‌طور کلی نزدیک بودن نتایج تخمین متوسط عیار و میزان ذخیره توسط سه روش مورد استفاده، دلیلی بر صحت نتایج و عملکرد پژوهش است. بالاتر بودن متوسط عیار در روش کریجینگ شاخص چندگانه نسبت به روش‌های دیگر، به دلیل اختلاط کمتر کانسنگ و باطله و در نتیجه درجه خلوص بیشتر بلوک‌های ماده معدنی در این روش است. همچنین علت بیشتر بودن میزان ذخیره با روش کریجینگ معمولی بلوکی به کمک نرم‌افزار Datamine دخالت کاربر در تعیین منطقه تاثیر گمانه‌ها در فواصل عمقی کانی‌سازی شده در داخل گمانه‌هاست.

واژه‌های کلیدی: کانسار مس نارباغی شمالی ساوه، کریجینگ شاخص چندگانه، لاگ کریجینگ، Datamine، SGeMS

مقدمه

و برآورد خطای تخمین، اهمیت زیادی دارد. از آنجایی که ذخایر معدنی در سطح زمین یا در اعماق آن، به شکل‌های بسیار متفاوتی یافت می‌شوند، انتخاب روش محاسبه ذخیره، تابع وضعیت ماده معدنی و مشخصات کارهای اکتشافی است (مدنی، ۱۳۷۶). تخمین‌گرهای مختلف، دارای توانایی و محدودیت‌هایی هستند که سازگار بودن یا نبودن آنها با کانسار مورد تخمین می‌تواند در کیفیت تخمین‌ها موثر واقع

تخمین ذخیره یکی از مهم‌ترین مراحل عملیات اکتشافی است و از آنجایی که اغلب براساس اطلاعات اکتشافی معدود انجام می‌شود، نیاز به دقت بالایی دارد. تخمین ذخایر معدنی به روش‌های گوناگونی انجام‌پذیر است که تفاوت این روش‌ها در دقت و سرعت الگوریتم محاسبه و داده‌های مورد نیاز آن روش‌ها است. به همین دلیل انتخاب بهترین روش تخمین

* نویسنده مرتبط: Rezahmadi@gmail.com

و باطله در معدن مس سرچشمه پرداختند. هدف از پژوهش آنها تعیین مرز بهینه کانسنگ و باطله در پله ۲۴۶۲/۵ معدن به کمک تخمین‌گر غیرخطی کریجینگ شاخص و ارزیابی اعتبار تخمین‌گر خطی کریجینگ معمولی است. بررسی آماری نتایج این دو تخمین‌گر نشان داد که از مجموع ۲۵۶۲۹ بلوک تخمینی در فضای مورد نظر، ۲۹۰۵ بلوک با استفاده از کریجینگ شاخص به طور صددرصد باطله اعلام شد در حالی که تخمین‌گر خطی کریجینگ معمولی، ۲۴۷۵ بلوک را به عنوان باطله معرفی کرد. کایدانی و دلبری (۱۳۸۹) با استفاده از روش‌های زمین‌آماری کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص، پهنه‌بندی شوری خاک و ریسک شوری در منطقه میانکنگی (سیستان) را مورد مطالعه قرار دادند. برای مقایسه روش‌ها از تکنیک اعتبارسنجی متقابل و معیارهای ارزیابی مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین انحراف خطا (MBE) استفاده شد. نتایج نشان داد که در تخمین شوری خاک هر دو روش زمین‌آماری از دقت مشابهی برخوردارند.

قاجار و سلطانی محمدی (۱۳۹۳) به مقایسه روش‌های کریجینگ شاخص و لاگ کریجینگ در تفکیک کانسنگ‌های هماتیتی و مگنتیتی در معدن آهن جلال‌آباد پرداختند. در این تحقیق از نتایج حاصل از آنالیز ۲۶۶۲ نمونه برداشت شده از ۸۶ گمانه (به طول ۶۱۶/۲۵ متر) در معدن سنگ آهن جلال‌آباد زرد برای مطالعه نسبت Fe/FeO به عنوان متغیر ناحیه‌ای استفاده شده و نتایج حاصل از دو تخمین‌گر در تعیین مرز مواد معدنی هماتیتی و مگنتیتی، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج بیانگر آن است که روش کریجینگ شاخص ضمن آشکارسازی بهتر پیوستگی متغیر ناحیه‌ای نسبت Fe/FeO، تعداد بیشتری از بلوک‌های با ترکیب هماتیتی قطعی (تعداد ۱۰۵ بلوک) را نسبت به روش لاگ کریجینگ (تعداد ۷۸ بلوک) معرفی می‌کند. (Choudhury 2015) به مطالعه مقایسه‌ای بین تخمین‌گرهای خطی و غیرخطی برای ارزیابی منابع یک ذخیره آهن پرداخته است. روش کریجینگ معمولی در رویکرد زمین‌آمار خطی و روش کریجینگ شاخص به عنوان زمین‌آمار

شود (مدنی، ۱۳۷۴؛ احمدی، ۱۳۸۸). به طور کلی روش‌های تخمین ذخایر معدنی را می‌توان به دو دسته روش‌های کلاسیک (هندسی) و زمین‌آمار (وزن‌دهی آماری) تقسیم‌بندی کرد (مدنی، ۱۳۷۶؛ احمدی، ۱۳۹۸). در روش‌های سنتی تخمین ذخیره که مبتنی بر آمار کلاسیک هستند، به ساختار داده‌ها و تغییرپذیری عیار و یا ضخامت آنها توجه نمی‌شود، به همین دلیل تخمین‌های حاصل، اغلب دارای خطای نظام‌دار هستند (مدنی، ۱۳۷۴). به دلیل اثرات نامطلوب خطای تخمین در افزایش ریسک سرمایه‌گذاری، لازم است دقیق‌ترین روش تخمین ذخیره که بتواند کمترین خطای تخمین را تضمین نماید، به کار گرفته شود. روش‌های تخمین زمین‌آمار به خاطر ویژگی‌های خاص خود قادرند بهترین برآورد را از متغیرهای مورد بررسی در زمینه‌های مختلف از جمله معدنکاری ارائه کنند (حسینی پاک، ۱۳۷۷). به طور کلی در روش‌های زمین‌آمار به بررسی آن دسته از متغیرها پرداخته می‌شود که ساختار فضایی از خود بروز می‌دهند و تخمین براساس ساختار فضایی موجود در محیط انجام می‌شود. بدین صورت که ابتدا به بررسی وجود یا نبود ساختار فضایی بین داده‌ها پرداخته می‌شود، سپس در صورت وجود ساختار فضایی، تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد (حسینی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰).

هدف اصلی پژوهش حاضر تعیین متوسط عیار و تخمین دقیق ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی ساوه براساس اطلاعات اکتشافی موجود با استفاده از روش‌های زمین‌آمار کریجینگ خطی و غیرخطی و مقایسه نتایج آنها با یکدیگر است. زیرا طراحی درست و برنامه‌ریزی برای عملیات بهره‌برداری بهینه از کانسار، مستلزم آگاهی از میزان نزدیک به واقعیت عیار و تخمین تاحدممکن دقیق ذخیره کانسار است. روش‌های زمین‌آمار از جمله روش‌های نوین تخمین می‌باشند که همواره محل چالش بوده و تحقیقات زیادی در این زمینه در حال انجام است. در ارتباط با موضوع پژوهش، به تازگی پژوهش‌هایی انجام شده که در ادامه به چند مورد از مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود.

جلالی و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی اعتبار تخمین‌گرهای کریجینگ خطی و غیرخطی در پهنه‌بندی بلوک‌های کانسنگ

1. Root Mean Square Error
2. Mean Bias Error

مهم‌ترین و بزرگ‌ترین توده نفوذی در منطقه اکتشافی نارباغی شمالی دارای ترکیبی در حد گرانیت-گرانودیوریت پورفیری است که با رنگ خاکستری خود به خوبی از واحدهای دربرگیرنده به‌ویژه آندزیت متمایز است. این توده به صورت تپه‌های فرسایش یافته بروز دارد و بلندترین ارتفاعات منطقه اکتشافی را تشکیل می‌دهد. توده مذکور، بافت دانه‌ای تا پورفیری دارد و رگه‌هایی از آندزیت در داخل این سنگ‌ها دیده می‌شود (پیچاب کانسار، ۱۳۹۴). در بخش شمالی و مرکزی گستره، توده‌های نفوذی میکروگرانیتی زرد تا قهوه‌ای روشن و صورتی‌رنگ دیده می‌شود. این توده‌های نفوذی در بخش‌هایی حاوی رگچه‌های سیلیسی، کالکوپیریت، پیریت، کالکوسیت، مالاکیت و تنانتیت می‌باشد و بیشتر کارهای اکتشافی از جمله حفاری‌ها در این توده‌های نفوذی انجام شده است.

تجزیه و تحلیل اکتشافی کانسار

در منطقه مورد مطالعه فعالیت‌های اکتشافی به نسبت گسترده‌ای انجام شده که شامل تهیه نقشه توپوگرافی-زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰، برداشت‌های ژئوفیزیکی، برداشت نمونه‌های سطحی، انجام حفاری‌های سطحی (ترانشه) و عمیق (گمانه) است. در این گستره تعداد ۱۱ عدد ترانشه اکتشافی به طول ۲۳۴ متر نیز حفر شده است. پس از انجام عملیات مرحله پی‌جویی و مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی در منطقه، دو گستره امیدبخش کانی‌سازی مس پورفیری به صورت دو استوک کوارتز مونزونیتی با دگرسانی فیلیک و پتاسیک، شناسایی شده و تعداد ۲۳ حلقه گمانه اکتشافی قائم به نام‌های NN1 تا NN23 در گستره دو استوک، شامل ۱۸ گمانه در استوک غربی و پنج گمانه در استوک شرقی حفر شده است. شکل ۱ نقشه توپوگرافی-زمین‌شناسی منطقه کانسار نارباغی شمالی را همراه با موقعیت پراکندگی گمانه‌ها و ترانشه‌های اکتشافی حفر شده، نشان می‌دهد. در مجموع حدود ۲۴۲۵ متر گمانه حفاری شده که عمق حفاری‌ها از ۵۲ متر (گمانه NN9) تا ۲۲۴ متر (گمانه NN1) متغیر است. از تمامی گمانه‌ها برای مطالعات پتروگرافی، کانه‌نگاری و تجزیه شیمیایی، مغزه‌گیری و برداشت زمین‌شناسی انجام شد. از این گمانه‌ها

غیرخطی انتخاب شده است. پس از برآورد پارامترهای آماری، هر دو نتیجه نسبت به داده‌های خام مقایسه شده و مشخص شد که پیش‌بینی روش کریجینگ شاخص نسبت به روش کریجینگ معمولی بهتر است.

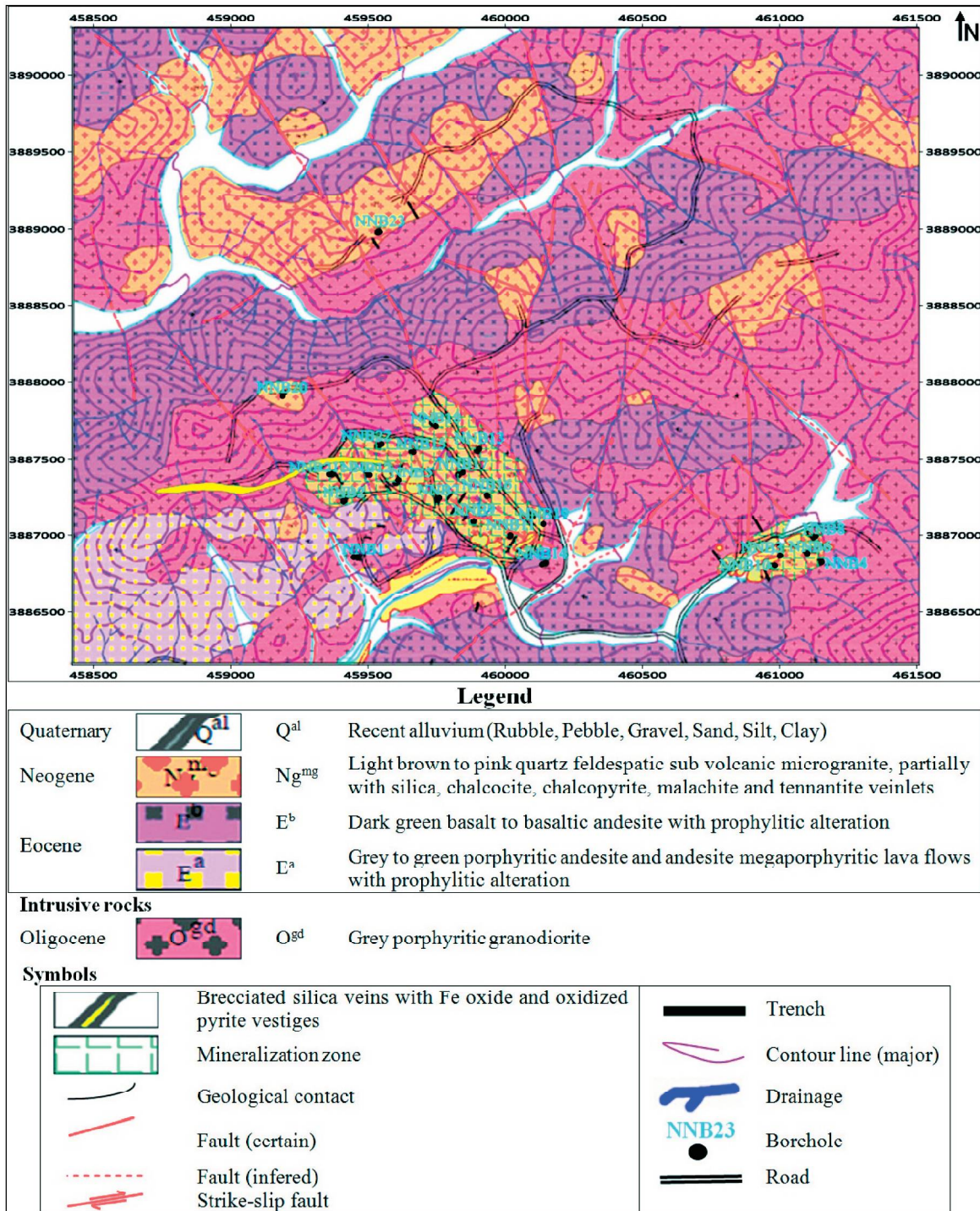
منطقه مورد مطالعه

منطقه اکتشافی نارباغی شمالی در شمال شرق استان مرکزی، ۲۶ کیلومتری شمال شرق شهرستان ساوه و در برکه ۱:۱۰۰/۰۰۰ زاویه واقع شده است. راه ارتباطی منطقه از طریق آزادراه تهران-ساوه میسر است که پس از گذر از عوارضی ساوه (۱۰ کیلومتری شهرستان ساوه) و عبور از زیرگذر شهرک صنعتی، از طریق یک راه خاکی به طول ۱۵ کیلومتر به سمت روستای عباس‌آباد نارباغی، دسترسی به بخش‌های مختلف منطقه، امکان‌پذیر است (پیچاب کانسار، ۱۳۹۴).

براساس تقسیم‌بندی ساختاری ایران توسط Alavi (1991) و Stoecklin (1968) گستره اکتشافی مس نارباغی شمالی در زون آتشفشانی تیپ آندی ارومیه-دختر واقع است. رخنمون‌های سنگی منطقه شامل توالی‌های آتشفشانی-رسوبی ائوسن با ترکیب آندزیت و توف بلورین-خرده‌سنگی است که توسط توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق با ترکیب دیوریت و مونزودیوریت الیگوسن قطع شده‌اند. این کانسار دارای جهت‌یافتگی تقریبی شمال غربی-جنوب شرقی است. کانی‌زایی بیشتر به صورت مالاکیت و کمتر کالکوسیت به دو صورت افشان و پرکننده شکستگی‌ها (رگه و رگچه‌ای) مشاهده می‌شود و تا حدودی تحت دگرسانی آرژیلیک و سربستیک (فیلیک) قرار گرفته است. دگرسانی فیلیک به وسیله جایگزینی سربستیت و کوارتز به جای بیشتر کانی‌های سیلیکاتی سنگ‌ساز (همانند فلدسپات‌ها) مشخص می‌شود. دگرسانی سوپرژن باعث تبدیل بخشی از کانی‌های سولفیدی به کانی‌های کربناتی و نیز اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن به همراه جاروسیت شده است. دگرسانی پروپیلیتیک آخرین فاز دگرسانی و گسترده‌ترین دگرسانی موجود در منطقه اکتشافی است که به صورت جانبی دگرسانی‌های دیگر را دربر می‌گیرد و به وسیله کانی‌های کلریت و اپیدوت مشخص می‌شود (پیچاب کانسار، ۱۳۹۴).

منطقه بیشتر به صورت مالاکیت، آزوریت، پیریت و کمتر کالکوپیریت و کالکوسیت است که به صورت پراکنده، رگه و رگچه‌ای در سنگ میزبان دیده می‌شود.

تعداد ۵۵۸ نمونه برای عنصر مس مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت که نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌ها عیار مس را متغیر بین (۲ ppm) تا ۱۲/۲ درصد نشان می‌دهد (پیچاب کانسار، ۱۳۹۴). کانی‌سازی در مغزه‌های حاصل از حفاری‌های این



شکل ۱. نقشه توپوگرافی-زمین‌شناسی کانسار نارباغی شمالی ساوه با مقیاس ۱:۱۰۰۰ همراه با نمایش موقعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی (ویرایش شده از (پیچاب کانسار، ۱۳۹۴)

کریجینگ شاخص از مقادیر تغییرنمای شاخص به جای تغییرنمای معمولی استفاده می‌شود. برای محاسبه تغییرنمای شاخص، ابتدا باید داده‌های خام را به متغیرهای شاخص تبدیل کرد. از این روش می‌توان برای تعیین ذخیره کانسار با عیار بالاتر از حد مورد نظر همراه با احتمال رخداد آن استفاده کرد. همچنین می‌توان نقشه توزیع فضایی احتمال پیدایش بلوک‌هایی از کانسار با عیار بالاتر یا مساوی یک حد آستانه را به راحتی رسم کرد (حسینی پاک و خالصی، ۱۳۸۲). در تخمین به روش کریجینگ شاخص چندگانه آنچه که سنجیده می‌شود، احتمال گذر عیار یک بلوک از یک یا چند عیار حد متوالی است (قاجار و سلطانی محمدی، ۱۳۹۳). یکی از کاربردهای اصلی کریجینگ شاخص، تعیین مرز ماده معدنی و باطله در کانسار است (Gossage, 1998). در واقع کریجینگ شاخص در جدا کردن باطله از کانسنگ کارایی بالاتری دارد. برای انجام کریجینگ شاخص چندگانه ابتدا لازم است داده‌های اولیه به مقادیر شاخص تبدیل شوند. برای این منظور لازم است عیار حدی در نظر گرفته شود و متغیرهای شاخص از طریق تابع شاخص به دست آیند که مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود (حسینی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰):

$$I(x; Z_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z(x) \leq Z_k \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad k = 1, \dots, k \quad (1)$$

که در آن $I(x; Z_k)$ مقدار شاخص نمونه a ، Z_k حد آستانه و k تعداد کل آستانه‌ها می‌باشد. بدین صورت که به مقادیر اصلی کوچک‌تر یا مساوی حد آستانه منتخب، کد یک و به مقادیر بزرگ‌تر، کد صفر تعلق می‌گیرد. بدین ترتیب کلیه داده‌های موجود به صفر (بزرگ‌تر از عیار حد) و یک (کوچک‌تر یا مساوی عیار حد) تبدیل شده و سپس براساس داده‌های تبدیل شده، کلیه مراحل کریجینگ انجام می‌شود. مزیت تخمین‌گر کریجینگ شاخص آن است که با تقسیم تابع توزیع تجمعی به بخش‌های کوچک‌تر، در آن بخش‌ها تابع توزیع حالت نرمال به خود گرفته و نیازی به نرمال کردن نیست.

1. Log-kriging
2. Indicator kriging
3. Disjunctive kriging
4. Sequential gaussian simulation
5. Cumulative distribution function

روش مطالعه

برای محاسبه ذخیره منطقه مورد مطالعه از روش‌های تخمین دقیق زمین‌آماري مبتنی بر کریجینگ به کمک نرم‌افزارهای SGeMS2 (Remy et al., 2009) و Datamine (Bohling, 2007; Remy et al., 2006) استفاده شد. کریجینگ یک تخمین‌گر خطی نااریب با کمترین واریانس تخمین است (Annels, 2012; Journel, 1989; Rendu, 1981). بنابراین در پژوهش حاضر این روش تخمین به دلیل دقت بالا برای محاسبه ذخیره، انتخاب شده است. روش‌های تخمین زمین‌آماري خود به دو دسته روش‌های خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. روش کریجینگ معمولی از جمله روش‌های خطی و روش‌های لاگ کریجینگ، کریجینگ شاخص^۲ (IK)، کریجینگ گسسته^۳ و شبیه‌سازی متوالی گوسی^۴ از مهم‌ترین روش‌های غیرخطی زمین‌آماري می‌باشند. هر یک از این روش‌ها دارای پیچیدگی‌های خاص خود بوده و با توجه به شرایط داده‌ها، یک یا چند مورد از این روش‌ها به‌طور متناسب، قابل استفاده خواهند بود. آنچه مهم است در تمامی این روش‌ها انتخاب بهینه پارامترهای تخمین، نقش مهمی در دقت محاسبه‌ها دارد. علاوه بر روش لاگ کریجینگ برای محاسبه ذخیره، براساس نحوه توزیع داده‌های عیارسنجی در منطقه، از روش کریجینگ شاخص چندگانه به کمک نرم‌افزار SGeMS استفاده شد. همچنین برای تهیه مدل سه‌بعدی (مدل جامد) و محاسبه ذخیره کانسار از روش کریجینگ معمولی بلوکی به کمک نرم‌افزار Datamine نیز استفاده شد.

کریجینگ شاخص یک تکنیک تخمین زمین‌آماري غیرخطی است که توسط Journel (1983) معرفی شده است. هدف اصلی جورنل براساس کار Switzer (1977) و دیگران، تخمین محلی توسط فرایند تابع توزیع تجمعی^۵ (cdf) محلی بود. ویژگی اصلی کریجینگ شاخص، غیرپارامتری بودن آن است و بر فرض مدل توزیع خاصی برای نتایج، استوار نیست. در واقع روش کریجینگ شاخص مستقل از توزیع فراوانی داده‌ها می‌باشد.

دستگاه معادلات کریجینگ شاخص همانند دستگاه معادلات کریجینگ معمولی است با این تفاوت که در

بحث

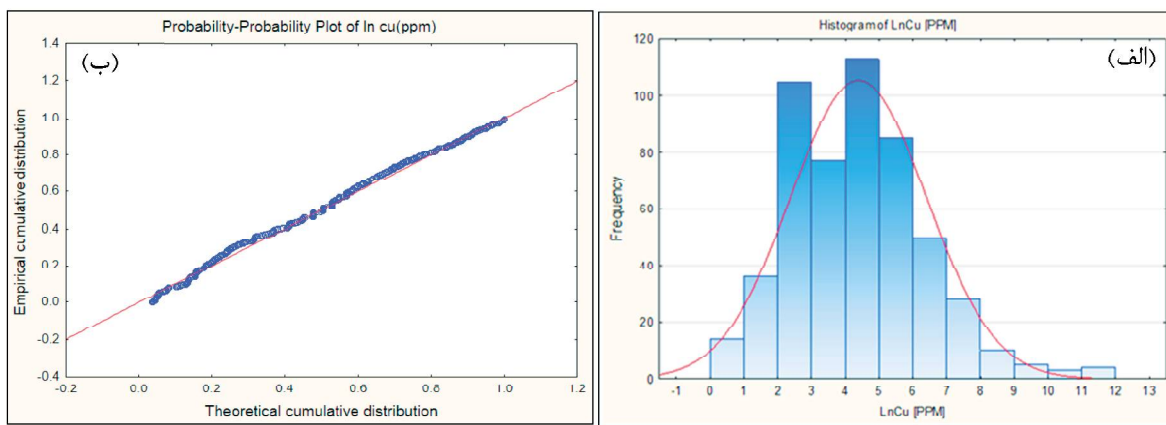
پردازش آماری اولیه داده‌ها

مختصر تعیین شده و فراوانی نما و نمودار احتمال-احتمال (توزیع احتمال تجمعی) نیز رسم شده است. نتایج آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های عیارسنجی مس گمانه‌های اکتشافی در جدول ۱ خلاصه شده است. شکل ۲ نیز فراوانی نما و نمودار احتمال-احتمال لگاریتم داده‌های عیارسنجی مس گمانه‌ها را نشان می‌دهد. داده‌های جدول ۱ و شکل ۲ نشان می‌دهند که توزیع داده‌های عیارسنجی گمانه‌ها از نوع لاگ نرمال بوده که با یک تبدیل لگاریتمی دو پارامتری به حالت نرمال تبدیل شدند.

تجزیه و تحلیل و پردازش آماری داده‌ها یکی از مهم‌ترین مراحل تخمین ذخیره است. در تمام روش‌های محاسبه ذخیره اعم از روش‌های هندسی (کلاسیک) و زمین‌آماری، اطلاع از نحوه توزیع آماری داده‌ها ضروری است. به منظور تعیین نحوه توزیع داده‌های عیارسنجی مس، مطالعات آماری با استفاده از نرم‌افزارهای Statistica و GS+ بر روی داده‌های عمقی صورت گرفته است. در این راستا آماره‌های توصیفی

جدول ۱. آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی کانسار مس نارباغی شمالی

آماره متغیر	کمینه (ppm)	بیشینه (ppm)	میانگین (ppm)	میانه (ppm)	دامنه تغییرات (ppm)	واریانس (ppm) ²	انحراف معیار ضریب تغییرات (%)	چولگی	کشیدگی
عیار مس	۲	۱۲۲۰۰۰	۸۸/۱۳۸۶	۸۰	۷۸/۰۶	۹۰۹۲۳۳۶۴	۶۸۷/۵۴	۱۰/۵۶	۱۱۷/۲۰
لگاریتم عیار مس	۰/۶۹	۱۷۷	۴/۳۵	۴/۳۸	۳/۸۵	۴/۰۱۷	۲/۰۰۴	۰/۶۰	۰/۶۲



شکل ۲. الف) فراوانی نما و ب) نمودار احتمال-احتمال (توزیع تجمعی تجربی-تئوری) لگاریتم داده‌های عیارسنجی مس گمانه‌های اکتشافی منطقه نارباغی شمالی

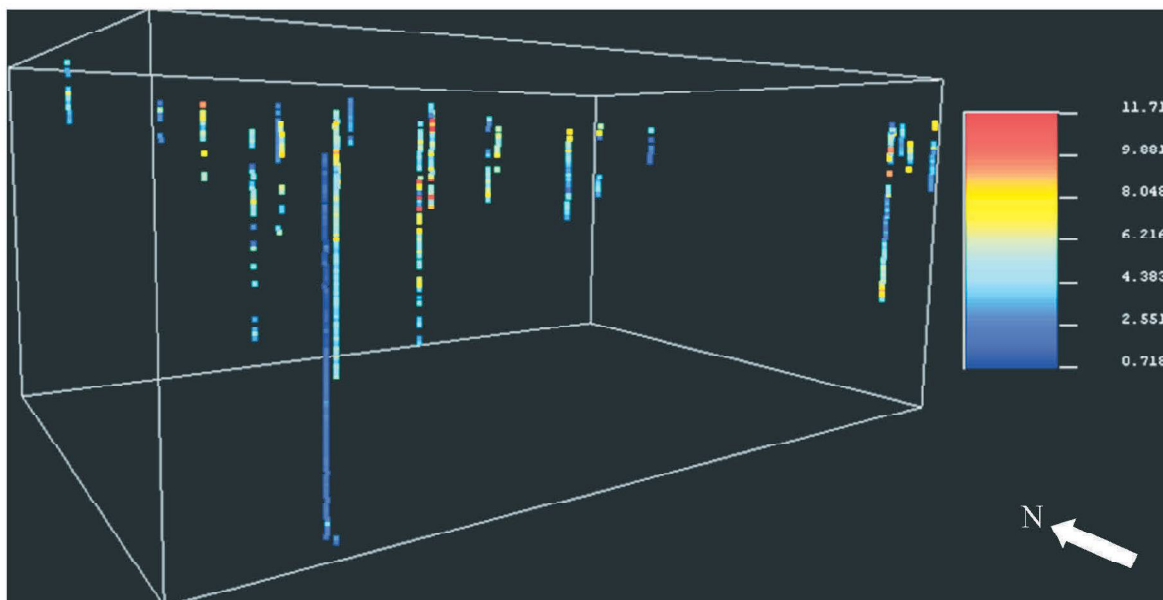
ارزیابی کانسار با استفاده از روش‌های زمین‌آماری

شود، تاثیرگذار است. در صورت وجود روند در داده‌ها می‌بایست از روش کریجینگ عام استفاده کرد. به منظور بررسی وجود یا نبود روند در داده‌های کانسار مس نارباغی شمالی، نمودار پراکندگی مقادیر عیارسنجی مس گمانه‌های اکتشافی در راستاهای افقی شرقی-غربی و شمالی-جنوبی و نیز در راستای قائم (عمقی) رسم شد. نمودارهای مذکور روند خاصی را در داده‌های منطقه نشان نداد. براساس مطالعات آماری، بیشترین فراوانی طول مغزه‌های گمانه‌های اکتشافی مربوط به انواع دو متری بوده، میانه داده‌ها

برای تخمین ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی اطلاعات ترانشه‌ها کارایی چندانی نداشته و فقط از اطلاعات ۲۳ حلقه گمانه اکتشافی استفاده شده است زیرا نمی‌توان ارتباط منطقی و معنی‌داری بین داده‌های سطحی (ترانشه‌های اکتشافی) و عمقی (گمانه‌های اکتشافی) در کانسار برقرار کرد. یکی از مهم‌ترین مسائل زمین‌آماری مطالعه روند در منطقه مطالعاتی است که در نوع کریجینگ که باید به کار برده

قطعه‌ای افزایش می‌یابد. موقعیت پراکندگی سه‌بعدی ۲۳ حلقه گمانه اکتشافی به همراه تغییرات عیار مس در طول گمانه‌ها و مرز گستره، در شکل ۳ نشان داده شده است.

برابر با دو متر و ۸۴ درصد مغزه‌ها دارای طولی کمتر از ۳/۱۲۸ متر هستند. بنابراین ترکیب کردن (کامپوزیت‌سازی) برای طول دو متر انجام شد زیرا برای طول‌های کمتر از این مقدار، اثر



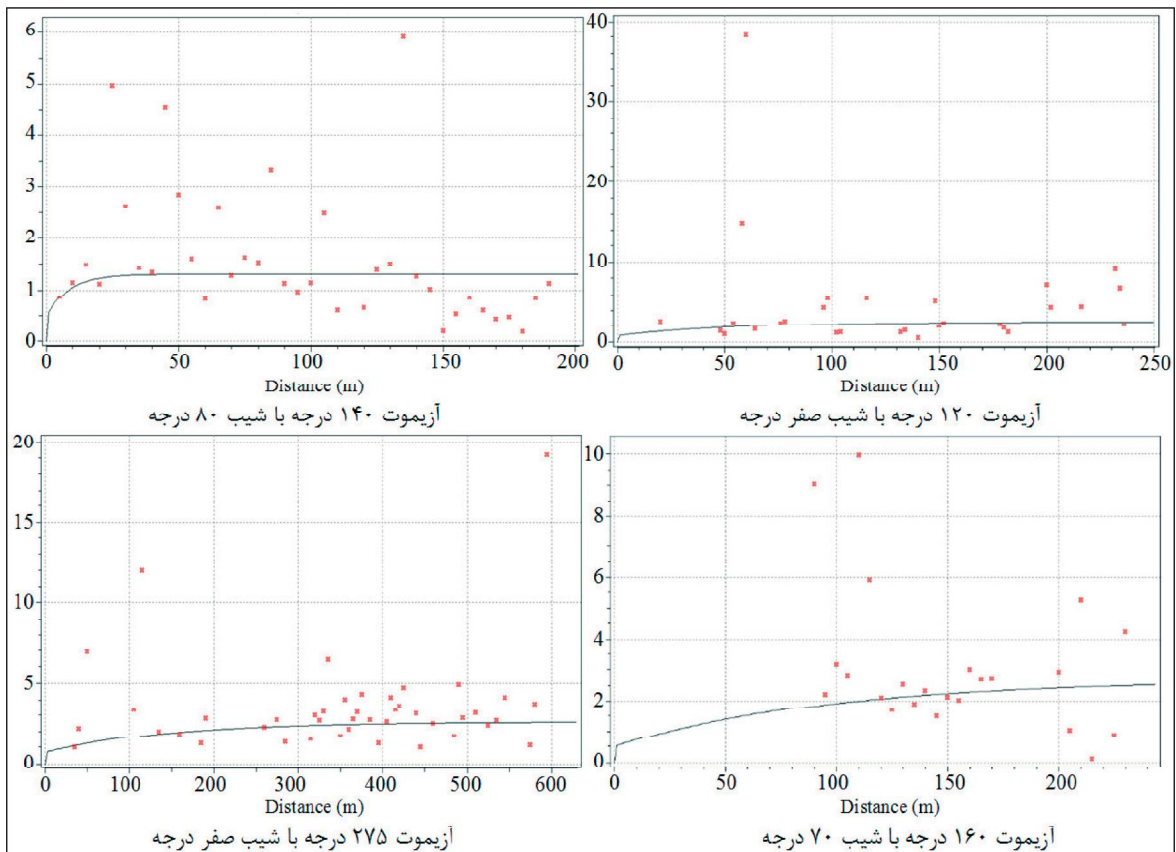
شکل ۳. نمایش موقعیت فضایی و تغییرات عیاری گمانه‌های کانسار مس نارباغی شمالی در نرم‌افزار SGeMS

محاسبه ذخیره کانسار به روش لاگ کریجینگ

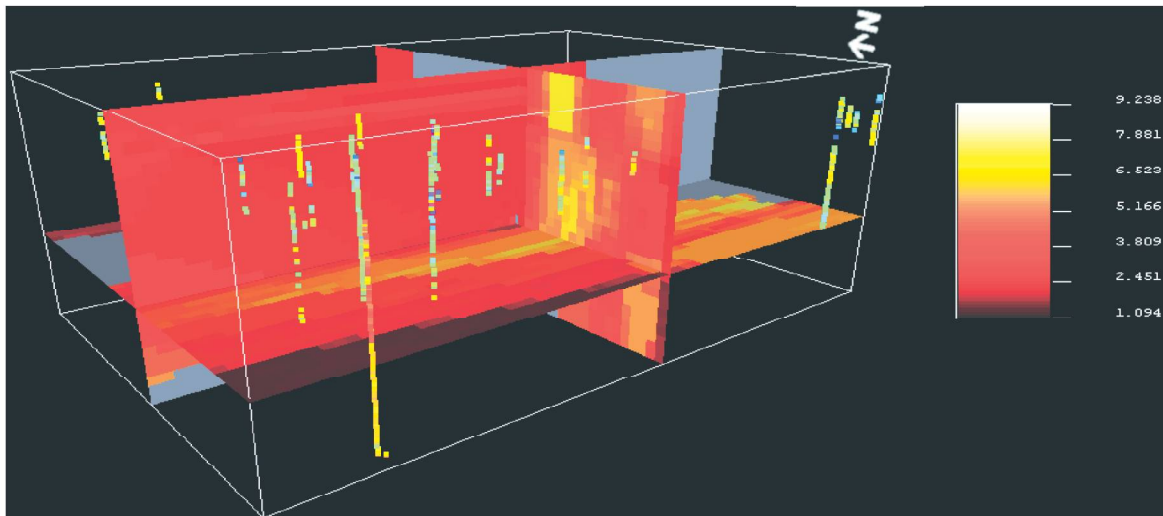
از آنجایی که توزیع داده‌های عیار سنجی مس در منطقه مورد مطالعه، از نوع لاگ نرمال است، برای تخمین ذخیره کانسار، روش تخمین لاگ کریجینگ معمولی بلوکی با اندازه بلوک‌های $10 \times 10 \times 10$ متر و تعداد ۱۳۲۵ بلوک (تعداد ۴۲۴ بلوک در راستای شمالی-جنوبی، ۶۳۶ عدد در راستای شرقی-غربی و ۲۶۵ بلوک در راستای قائم) بکار برده شد. بر اساس واریوگرافی صورت گرفته در منطقه نارباغی، بیضوی جستجو در راستای آزیموت 275° درجه دارای شعاع ۴۳۳ متر با زاویه شیب پنج درجه نسبت به افق، در راستای آزیموت پنج درجه دارای شعاع ۱۸۳ متر و در راستای عمق دارای شعاع ۵۰ متر است. بنابراین عملیات تخمین لاگ کریجینگ معمولی با بیضوی تجسس با این مشخصات، با استفاده از نرم‌افزار SGeMS صورت گرفت. سه نیم‌رخ عمود برهم از تخمین لاگ کریجینگ در منطقه مورد مطالعه، در محل سلول شماره ۳۶ محور شرقی، ۱۹ محور شمالی و ۱۰ محور قائم همراه با موقعیت گمانه‌های منطقه، در شکل ۵ نمایش داده شده است.

تجزیه و تحلیل ساختار فضایی کانسار

به منظور شناسایی ساختار فضایی کانسار، تعیین وضعیت همسانگردی یا ناهمسانگردی کانسار و انجام تخمین‌های کریجینگ، واریوگرافی (در فضای سه‌بعدی) در منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار SGeMS به این شکل انجام گرفت که از آزیموت صفر، 120° تا 160° و 270° تا 285° درجه، هر پنج درجه یک تغییرنما و از شیب صفر و 50° تا 90° درجه، از هر پنج درجه با گام‌های مختلف یک تغییرنما رسم شد و در نهایت تعداد ۳۰۰ تغییرنما به دست آمد. در شکل ۴ تعدادی از تغییرنماهای امتدادی رسم شده در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. نمودارهای شکل ۴ نشان می‌دهند که مقادیر تغییرنماهای تجربی محاسبه شده برای منطقه مورد مطالعه بسیار پراکنده است و این موضوع در ارتباط با ماهیت ذاتی کانسار و پیچیدگی‌های زمین‌شناسی آن می‌باشد. اغلب تغییرنماهای تجربی منطقه مورد مطالعه با تغییرنماهای تئوری از نوع کرووی انطباق یافته‌اند. با توجه به این که شعاع تاثیر تغییرنماها در جهات مختلف، متفاوت است، بنابراین کانسار ناهمسانگرد می‌باشد.



شکل ۴. تغییرنماهای امتدادی رسم شده در راستاهای مختلف در منطقه نارباغی شمالی

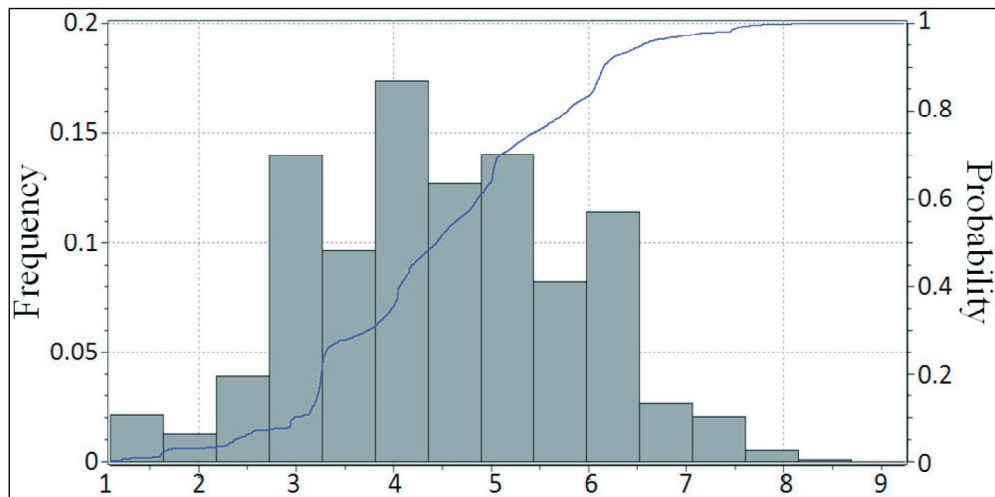


شکل ۵. نمایش سه‌بعدی عیارسنجی تخمین لاگ کریجینگ معمولی در منطقه مورد مطالعه از طریق سه نیم‌رخ عمود بر هم

انجام تخمین لاگ کریجینگ، مقادیر تخمین زده شده با یک تبدیل معکوس (آنتی لگاریتم) به مقادیر واقعی تبدیل شده و با در نظر گرفتن عیار حدهای ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ (ppm)، حجم ۱۰۰۰ متر مکعبی هر بلوک و جرم مخصوص متوسط ماده معدنی برابر با $2/65 \text{ gr/cm}^3$ ، ذخیره منطقه به‌زای

در شکل ۶ فراوانی نما و نمودار فراوانی تجمعی داده‌های لگاریتمی بعد از تخمین لاگ کریجینگ نشان داده شده است که کم‌وبیش متقارن و در نتیجه از نوع نرمال می‌باشد. واریانس لگاریتم داده‌های اولیه $3/98 (\%)^2$ و واریانس داده‌های تخمینی $1/73 (\%)^2$ به‌دست آمده است. پس از

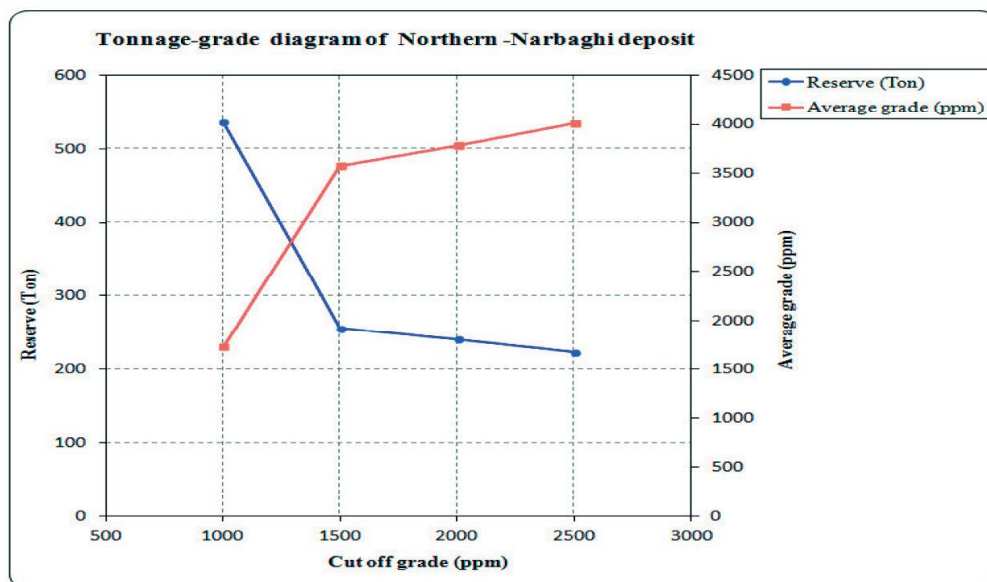
عیار حدهای مختلف مطابق جدول ۲ به دست آمد. شکل ۷ نمودار عیار-تناژ حاصل از تخمین ذخیره را با استفاده از روش کریجینگ نمایش می دهد. در این نمودار محور افقی، میزان عیار حد برحسب گرم بر تن، محور قائم سمت چپ معرف میزان ذخیره برحسب تن و محور قائم سمت راست مبین متوسط عیار برحسب گرم بر تن می باشند.



شکل ۶. فراوانی نما و نمودار فراوانی تجمعی داده های لگاریتمی حاصل از تخمین لاگ کریجینگ

جدول ۲. نتایج محاسبه متوسط عیار و ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی با روش لاگ کریجینگ معمولی بلوکی

عیار حد (ppm)	عیار متوسط (ppm)	وزن کل کانسنگ (تن)	ذخیره خالص ماده معدنی (تن)
۱۰۰۰	۱۷۲۸/۰۷۰۰	۳۱۰۰۵۰	۵۳۵/۷۹
۱۵۰۰	۳۵۷۴/۹۵۶۱	۷۱۵۵۰	۲۵۵/۷۹
۲۰۰۰	۳۷۸۶/۵۷۴۰	۶۳۶۰۰	۲۴۰/۸۳
۲۵۰۰	۴۰۰۷/۰۵۹۵	۵۵۶۵۰	۲۲۲/۹۹

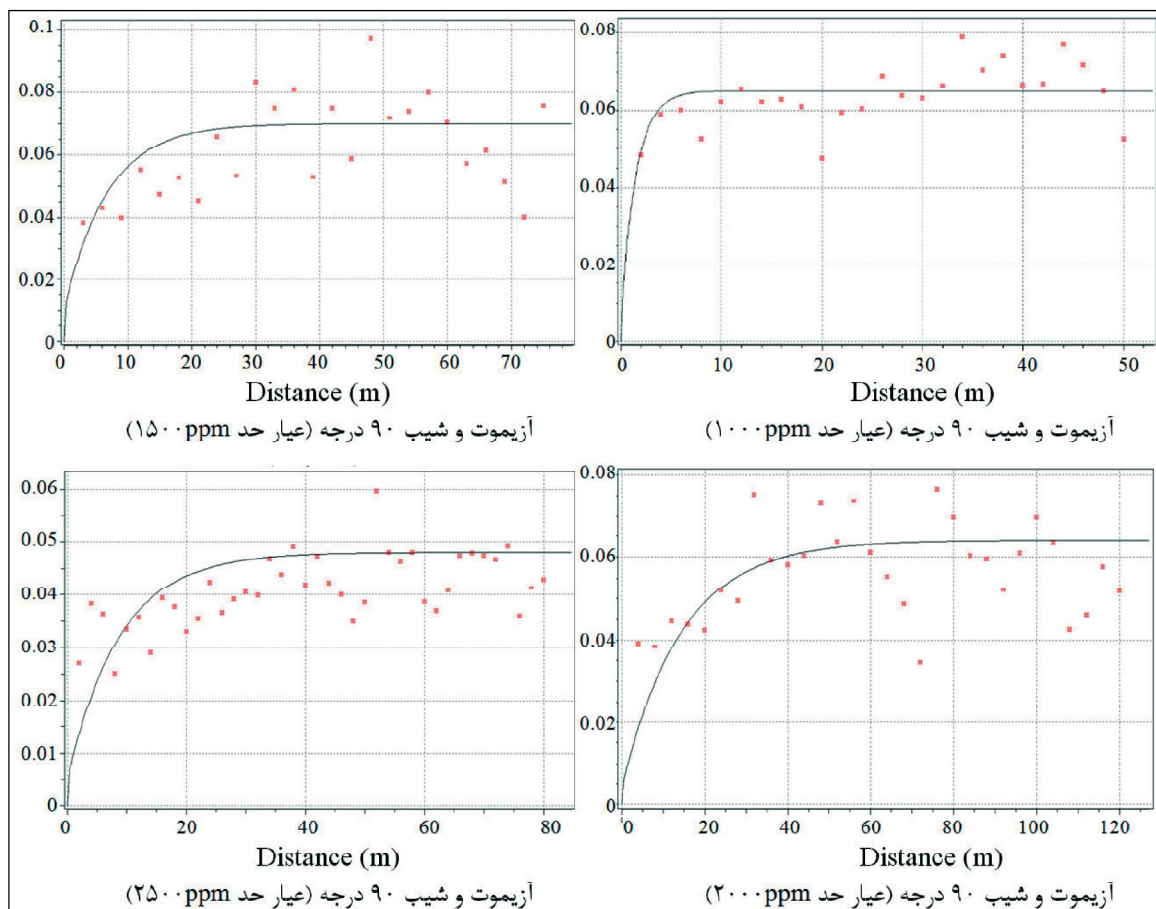


شکل ۷. نمودار عیار-تناژ کانسار مس نارباغی شمالی با روش لاگ کریجینگ معمولی با استفاده از SGeMS

محاسبه ذخیره کانسار به روش کریجینگ شاخص چندگانه

ناپیوسته با یکدیگر تلفیق شدند و با اعمال عیار حدهای ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، (ppm) ۲۵۰۰ و حجم ۱۰۰۰ متر مکعبی هر بلوک، ذخیره منطقه به ازای عیارحدهای مختلف به دست آمد. شکل ۸ تعدادی از تغییرنماهای شاخص امتدادی به‌ازای عیار حدهای مختلف را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات تعدادی از تغییر نماهای شاخص امتدادی رسم شده در راستای آزیموت‌های مختلف، در جدول ۳ آورده شده است. تغییر نماهای شکل ۸ و داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهند که در منطقه مورد مطالعه، اغلب تغییر نماهای تجربی شاخص با مدل تئوری از نوع کروی انطباق یافته و کانسار نیز ناهمسانگرد می‌باشد. در جدول ۴ عیار متوسط و میزان ذخیره منطقه به‌ازای عیارحدهای مختلف خلاصه شده است. شکل ۹ نیز نمودار عیار-تناژ حاصل از تخمین ذخیره را با استفاده از روش کریجینگ شاخص چندگانه نمایش می‌دهد.

برای محاسبه ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی با استفاده از روش کریجینگ شاخص چندگانه، بر روی داده‌های خام عیارسنجی منطقه، عیار حدهای ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و (ppm) ۲۵۰۰ اعمال شد. با توجه به تابع شاخص، داده‌های کوچک‌تر یا مساوی با عیار حدها برابر با مقدار یک و داده‌های بیشتر از عیار حدها برابر با مقدار صفر منظور شد و ابتدا با استفاده از نرم‌افزار SGeMS واریوگرافی شاخص و سپس برای تخمین ذخیره، با روش تخمین کریجینگ شاخص با اندازه بلوک‌های $10 \times 10 \times 10$ متر و تعداد ۱۳۲۵ بلوک (تعداد ۴۲۴ بلوک در راستای شمالی-جنوبی، ۶۳۶ عدد در راستای شرقی-غربی و ۲۶۵ بلوک در راستای قائم) بکار برده شد. بعد از انجام تخمین کریجینگ شاخص، مقادیر تخمین زده شده با رابطه مربوط به کریجینگ شاخص



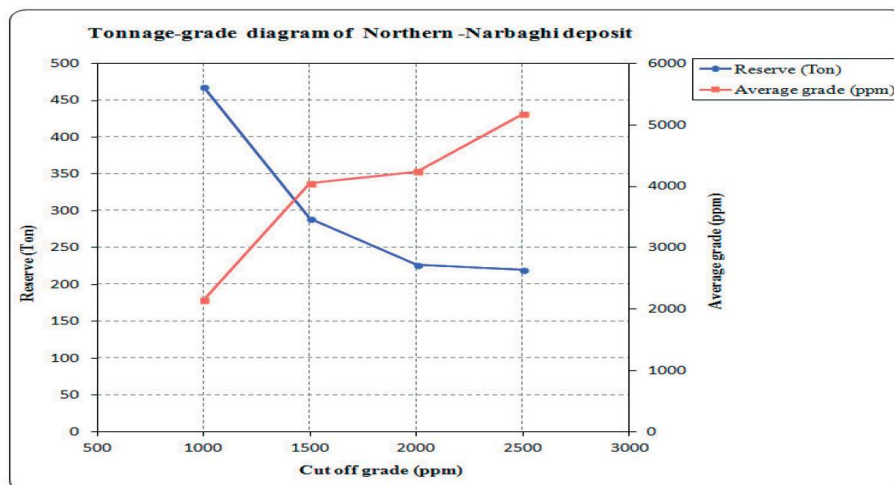
شکل ۸. تغییر نماهای شاخص امتدادی رسم شده در منطقه نارباغی شمالی به‌ازای عیارحدهای مختلف

جدول ۳. مشخصات تغییر نماهای شاخص امتدادی رسم شده در راستاهای مختلف در منطقه نارباغی شمالی

مدل تغییرنما	جهت یا آزیموت (درجه)	تلاسنس (درجه)	اثر قطعه‌ای (%) ^۲	سقف (%) ^۲	شعاع تاثیر (متر)
کروی	۰	۲۵	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۲۱
کروی	۱۲۰	۲۵	۰/۰۱	۰/۱۲	۱۵۰
کروی	۲۸۰	۲۵	۰/۰۰۴	۰/۰۶	۴۳
کروی	۲۸۵	۲۵	۰/۰۰۱	۰/۰۶۲	۱۰۸

جدول ۴. نتایج محاسبه متوسط عیار و ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی با روش کریجینگ شاخص

عیار حد (ppm)	عیار متوسط (ppm)	میزان ذخیره (تن)
۱۰۰۰	۲۱۴۸/۲۷۶	۴۶۸/۲۱
۱۵۰۰	۴۰۵۷/۹۰۱	۲۸۹/۶۳
۲۰۰۰	۴۲۴۴/۷۴۸	۲۲۷/۶۷
۲۵۰۰	۵۱۷۸/۲۴۹	۲۲۰/۰۴



شکل ۹. نمودار عیار-تناژ کانسار مس نارباغی شمالی با روش کریجینگ شاخص از استفاده از SGeMS

۱۰۰۰، ۲۰۰۰-۱۵۰۰، ۲۵۰۰-۲۰۰۰ و ۱۵۰۰۰۰-۲۵۰۰ (ppm) با رنگ‌های مختلف تقسیم شده است. انتخاب این گستره‌ها براساس مقادیر عیار حد مناسب انتخاب شده به منظور تخمین ذخیره منطقه، صورت گرفته است. رنگ خاکستری هم مربوط به فواصل عمقی است که به هر دلیل فاقد داده عیارسنجی می‌باشند.

ساخت مدل بلوکی کانسار

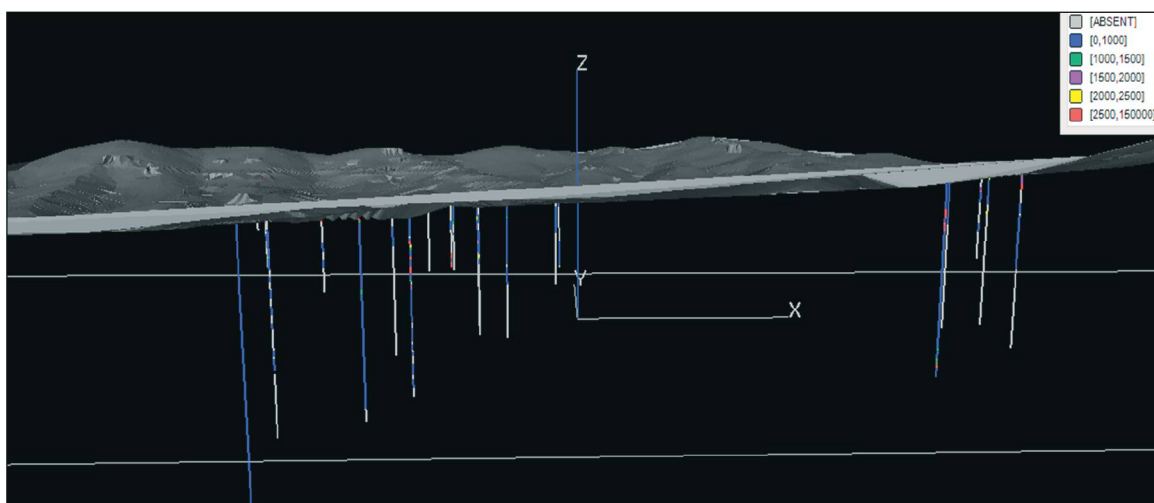
همواره توده‌های کانسار دارای شکل‌های هندسی نامنظمی هستند. به منظور تخمین ذخیره درست توده‌های کانساری به‌ویژه با اشکال هندسی نامنظم، در بسیاری از موارد لازم است که ابتدا مدل جامد کانسار ایجاد شود و

۱. صلب

تخمین ذخیره کانسار با نرم‌افزار Datamine

برای ارزیابی عیار و تناژ کانسار به روش کریجینگ معمولی با استفاده از نرم‌افزار Datamine، تمامی نتایج عملیات واریوگرافی کانسار انجام شده توسط نرم‌افزار SGeMS مورد استفاده قرار گرفت و انتخاب تمامی پارامترهای زمین‌آماری، براساس همین نتایج انجام شد.

شکل ۱۰ نمایی سه‌بعدی از وضعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی و توپوگرافی منطقه نارباغی شمالی ساوه را نشان می‌دهد. راهنمای رنگی عیاری، تغییرات میزان عیار ماده معدنی در گمانه‌های اکتشافی منطقه است. مطابق این شکل تغییرات عیار منطقه مورد مطالعه با مقدار کمینه صفر و مقدار بیشینه (ppm) ۱۵۰۰۰۰ به پنج گستره ۰-۱۰۰۰، ۱۰۰۰-۱۵۰۰



شکل ۱۰. نمای سه‌بعدی تغییرات عیارسنجی مس گمانه‌های اکتشافی در منطقه نارباغی شمالی ساوه به همراه توپوگرافی منطقه (جهت شمال در راستای محور Y می‌باشد)

می‌شود که با توجه به مدل عیاری سازنده فضای تخمین، کانی‌سازی مس در این کانسار دارای پیوستگی نبوده بلکه به صورت قطعه قطعه یا تکه تکه می‌باشد. همچنین کانی‌سازی در افق‌های مختلف با ضخامت‌های متغیر صورت گرفته است. میزان گسترش فضایی ماده معدنی در بخش‌های کانی‌سازی شده در گمانه‌ها، براساس اصول متداول نحوه تعیین منطقه (شعاع) تاثیر در ارزیابی ذخایر معدنی، صورت گرفته است. شکل ۱۱-ب نیز قطعه قطعه بودن ماده معدنی در کانسار را به وضوح نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که تمرکز ماده معدنی با عیار حد (ppm) ۱۰۰۰ در بخش غربی کانسار بیشتر است. برای ساخت مدل بلوکی ابتدا براساس مقادیر حداقل و حداکثر آماره‌های طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع مدل عیاری رشته‌بندی شده، مدل اولیه^۳ ساخته می‌شود. این مدل خالی است که سپس توسط بلوک‌های تخمین عیار، پر می‌شوند.

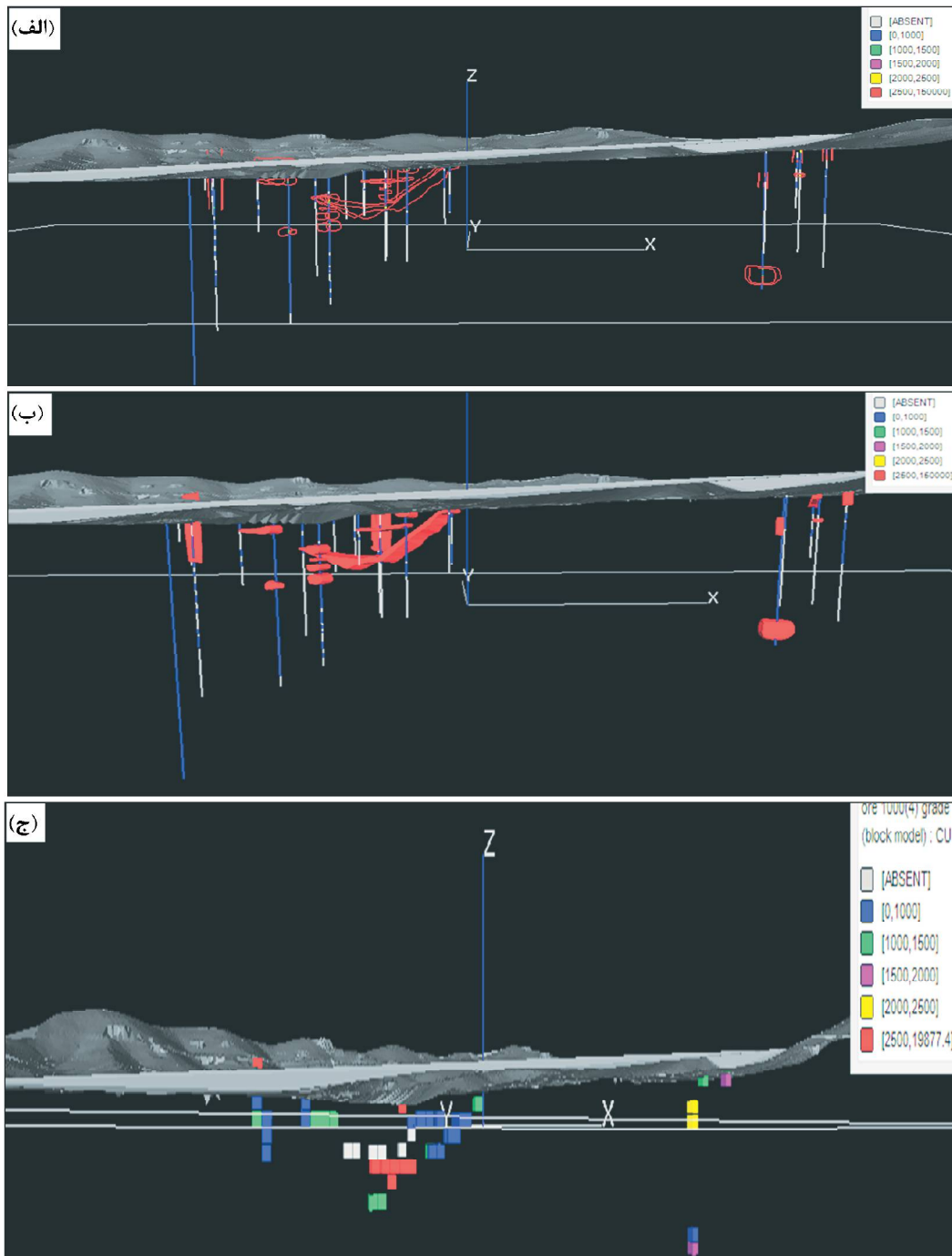
مدل تورسیمي عیاردهای (ppm) ۲۰۰۰ و (ppm) ۲۵۰۰ نشان داد که نسبت به عیار حد‌های قبلی، تمرکز ماده معدنی در دو منطقه شرقی و غربی کانسار کم‌وبیش به‌طور مساوی تقسیم شده است. این موضوع بیانگر آن است که عیار ماده

سپس بلوک‌بندی کانسار صورت گیرد. به عبارت دیگر بایستی شکل هندسی نامنظم به شکل هندسی منظم تبدیل شود تا محاسبه دقیق حجم امکان پذیر شود.

به‌طور کلی مراحل ساخت مدل بلوکی در نرم‌افزار Datamine شامل تعیین و محدود کردن حد و مرز ماده معدنی از طریق رشته‌بندی^۱، تهیه مدل جامد (تورسیمي^۲) کانسار با استفاده از مدل رشته‌ای و در نهایت بلوک‌بندی مدل جامد کانسار است. سپس در مراحل بعد با استفاده از مدل بلوکی ایجاد شده، تخمین میزان عیار و ذخیره کانسار صورت می‌گیرد. تمامی مراحل این فرآیند برای کانسار مس نارباغی شمالی برای چهار عیار حد ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و (ppm) ۲۵۰۰ صورت گرفت. برای ساخت مدل بلوکی کانسار نیز، ابعاد بلوک‌ها برابر با ۲×۱×۱۰ متر منظور شد. این ابعاد براساس نوع ماده معدنی (مس)، وضعیت و اطلاعات اکتشافی کانسار، طول غالب مغزه‌های حفاری و در نظر گرفتن شرایط استخراج انتخاب شد.

به‌عنوان نمونه شکل ۱۱-الف مدل رشته‌بندی شده کانسار به ازای عیارهای بالاتر از عیار حد، ۱۱-ب مدل سه‌بعدی جامد (تورسیمي) کانسار از طریق ارتباط دادن رشته‌های کانی‌سازی به یکدیگر و ۱۱-ج مدل بلوکی کانسار با ابعاد بلوک‌های ۲×۱×۱۰ متر براساس واریوگرافی منطقه را برای عیار حد (ppm) ۱۰۰۰ نشان می‌دهد. مشاهده

1. String
2. Wireframe
3. Prototype



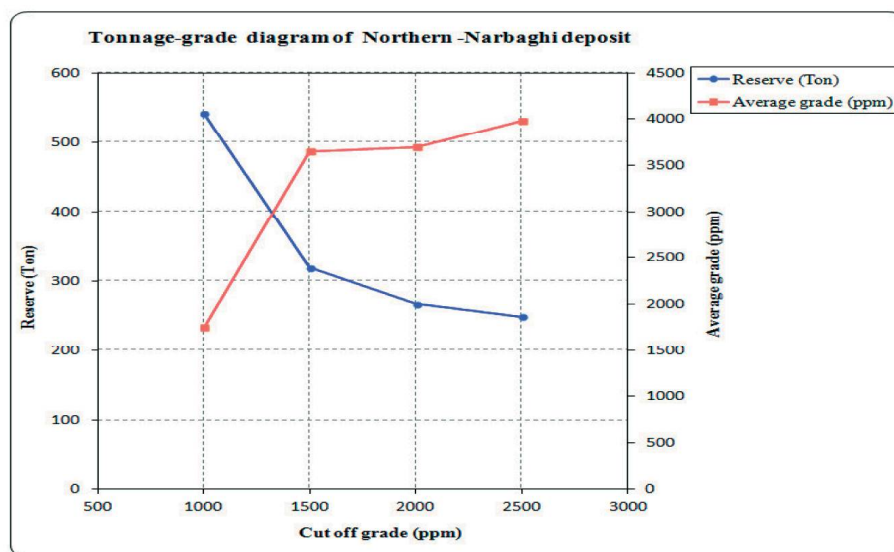
شکل ۱۱. الف) مدل سه بعدی رشته بندی شده، ب) مدل سه بعدی جامد (تورسیمی)، ج) مدل بلوکی کانسار به ازای عیار حد ۱۰۰۰ (ppm) همراه با توپوگرافی منطقه (جهت شمال در راستای محور Y می باشد)

معدنی بخش شرقی منطقه نسبت به بخش غربی، اندکی بالاتر است. در این جدول حدود بالا و پایین عیار ماده معدنی نیز براساس واریانس تخمین عیار هر بلوک، در سطح اعتماد ۹۵ درصد محاسبه شده است. همان گونه که داده های این جدول نشان می دهند، فاصله حدود بالا و پایین عیار معدنی بخش شرقی منطقه نسبت به بخش غربی، اندکی بالاتر است. با استفاده از مدل بلوکی ایجاد شده برای کانسار به ازای عیار حد های مختلف، مقدار متوسط عیار، وزن کلی کانسنگ و میزان ذخیره خالص ماده معدنی محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۵ خلاصه شده است.

ماده معدنی در کانسار مورد مطالعه قدری بالاست که نشان دهنده بالا بودن میزان خطای (انحراف معیار) داده ها است و این نیز در ارتباط با وضعیت (تعداد، پراکندگی و دقت) داده های اولیه می باشد. شکل ۱۲ نیز نمودار عیار- تناژ کانسار با روش کریجینگ معمولی بلوکی با استفاده از نرم افزار Datamine را نشان می دهد.

جدول ۵. نتایج محاسبه متوسط عیار و ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی با روش کریجینگ معمولی با نرم افزار Datamine

عیار حد (ppm)	حد پایین عیار (ppm)	متوسط عیار (ppm)	حد بالای عیار (ppm)	وزن کل کانسنگ (تن)	ذخیره خالص ماده معدنی (تن)
۱۰۰۰	۱۱۰۵	۱۷۴۹	۲۳۹۳	۳۰۹۳۱۹	۵۴۱
۱۵۰۰	۳۱۲۴	۳۶۵۲	۴۱۸۰	۸۷۳۴۹	۳۱۹
۲۰۰۰	۳۱۵۶	۳۶۹۴	۴۲۳۲	۷۲۲۷۹	۲۶۷
۲۵۰۰	۳۶۲۲	۳۹۷۸	۴۳۳۴	۶۲۵۹۴	۲۴۹



شکل ۱۲. نمودار عیار-تناژ کانسار مس نارباغی شمالی به روش کریجینگ معمولی با نرم افزار Datamine

مقایسه

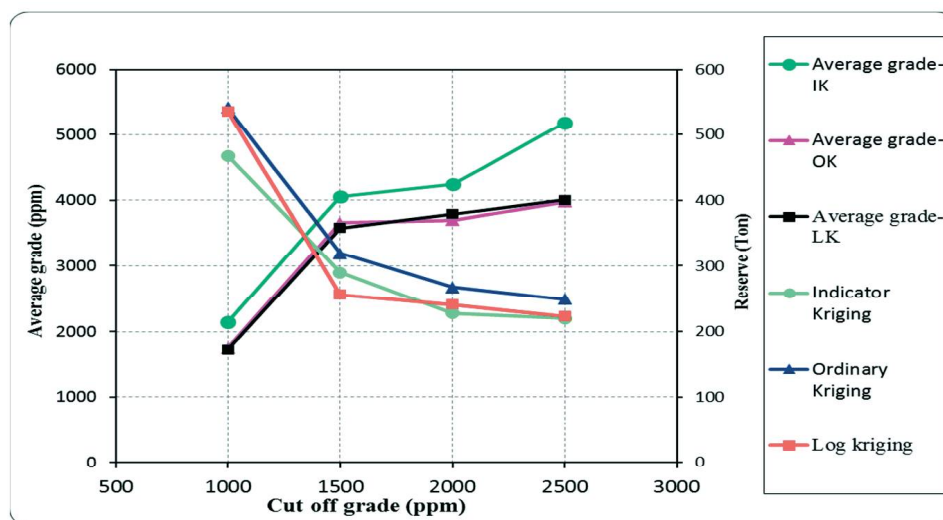
عیار و میزان ذخیره توسط سه روش مورد استفاده که از دقیق ترین روش های تخمین نیز می باشند، دلیلی بر صحت نتایج و عملکرد پژوهش می باشد.

در جدول ۶ علت بالاتر بودن متوسط عیار بهزای عیار حدهای مختلف در روش کریجینگ شاخص نسبت به روش های دیگر، جداسازی بلوک های کانسنگ و باطله در این روش است. به عبارت دیگر این روش تا حدودی از اختلاط کانسنگ و باطله جلوگیری می نماید و در نتیجه درجه خلوص بلوک های ماده معدنی در این روش از روش های دیگر بیشتر است. همچنین علت بیشتر بودن میزان ذخیره با روش کریجینگ معمولی بلوکی به کمک نرم افزار Datamine آن

به منظور ارزیابی نتایج محاسبه ذخیره با روش های مختلف لازم است که نتایج حاصل از این روش ها با یکدیگر مقایسه شوند. نتایج محاسبه متوسط عیار و میزان ذخیره کانسار نارباغی شمالی با روش های مختلف در جدول ۶ خلاصه شده است. در شکل ۱۳ نیز نمودار عیار-تناژ کانسار با استفاده از روش های مختلف بهزای چهار عیار حد ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ (ppm) رسم شده است. با توجه به داده های جدول ۶ و نمودار شکل ۱۳ مشاهده می شود که اختلاف میزان ذخیره محاسبه شده با روش های مختلف، چندان زیاد نیست زیرا اساس تمام روش های مورد استفاده یکسان است. به طور کلی نزدیک بودن نتایج تخمین متوسط

جدول ۶. نتایج تخمین متوسط عیار و ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی با روش‌های مختلف

روش تخمین ذخیره	عیار حد (ppm)	عیار متوسط (ppm)	میزان ذخیره (تن)
لاگ کریجینگ معمولی بلوکی با استفاده از نرم‌افزار SGeMS	۱۰۰۰	۱۷۲۸/۰۷۰۰	۵۳۵/۷۹
	۱۵۰۰	۳۵۷۴/۹۵۶۱	۲۵۵/۷۹
	۲۰۰۰	۳۷۸۶/۵۷۴۰	۲۴۰/۸۳
کریجینگ شاخص با استفاده از نرم‌افزار SGeMS	۱۰۰۰	۲۱۴۸/۲۷۶	۲۲۲/۹۹
	۱۵۰۰	۴۰۵۱/۹۰۱	۴۶۸/۲۱
	۲۰۰۰	۴۲۴۴/۷۴۸	۲۸۹/۶۳
کریجینگ معمولی بلوکی با استفاده از نرم‌افزار Datamine	۱۰۰۰	۵۱۷۸/۲۴۹	۲۲۰/۰۴
	۱۵۰۰	۱۷۴۹	۵۴۱
	۲۰۰۰	۳۶۵۲	۳۱۹
	۲۵۰۰	۳۶۹۴	۲۶۷
	۲۵۰۰	۳۹۷۸	۲۴۹



شکل ۱۳. نمودار عیار-تناژ کانسار مس نارباغی شمالی با روش‌های مختلف

مورد استفاده قرار گیرد، به عوامل زیادی از جمله شرایط و خصوصیات کانسار، وضعیت داده‌های اکتشافی و میزان شناخت از کانسار بستگی دارد. بدیهی است که هر یک از روش‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر نسبت به دیگری دارای یک سری مزایا و معایب می‌باشند. به‌عنوان مثال سادگی روش تخمین لاگ کریجینگ معمولی از مزیت‌های این روش نسبت به دیگر روش‌های تخمین است و در مقابل عدم امکان بازیابی درست واریانس تخمین، از معایب آن است. جداسازی باطله از کانسار از مزایای روش تخمین کریجینگ شاخص است و پیچیدگی نسبی آن، از معایب این روش می‌باشد. بکارگیری حداکثری دانش و شناخت از

است که در این روش در تعیین گسترش جانبی ماده معدنی در فواصل عمقی کانساز می‌شده در داخل گمانه‌ها (منطقه تاثیر گمانه‌ها)، دخالت کاربر یا سلیقه شخصی عملگر (اپراتور) تاثیرگذار است. به‌عبارت دیگر در این روش دانش کاربر و شناخت وی از وضعیت کانسار، تاثیر زیادی بر روی میزان ذخیره محاسبه شده، می‌گذارد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از روش‌های تخمین زمین‌آماري خطی و غیرخطی به‌منظور ارزیابی ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی ساوه استفاده شد. اما پاسخ این سوال که کدام روش بهتر بوده و نتایج کدام روش دقیق‌تر است و همواره باید

منابع

- احمدی، ر.، ۱۳۸۸. کاربرد الگوهای آماری در ارزیابی ذخایر معدنی با نگرشی بر معدن مس علی‌آباد یزد. گزارش طرح پژوهشی طرف قرارداد با دانشگاه علم و صنعت اراک، ۱۰۲.
- احمدی، ر.، ۱۳۹۸. درسنامه دیجیتال (الکترونیکی) ارزیابی ذخایر معدنی. انتشارات دانشگاه صنعتی اراک، ۲۵۰.
- پیچاب کانسار، مهندسین مشاور، ۱۳۹۴. گزارش پایانی عملیات اکتشافی در محدوده اکتشافی مس نارباغی شمالی، ۳۵۶.
- جلالی، م.، رحیمی پور، غ.ل.، دیان‌تی، م.ر. و تقوایی نژاد، م.، ۱۳۸۸. بررسی اعتبار برآوردگرهای کریجینگ خطی و غیرخطی در پهنه‌بندی بلوک‌های کانسنگ و باطله در معدن مس سرچشمه. کنفرانس ملی علوم زمین، سال بیستم، ۷۹، ۹۵-۱۰.
- حسنی پاک، ع.ا. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۸۰. تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، ۹۸۷.
- حسنی پاک، ع.ا. و خالصی، م.ر.، ۱۳۸۲. مدیریت خطا و ریسک در اکتشاف، موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران، ۳۸۲.
- حسنی پاک، ع.ا.، ۱۳۷۷. زمین‌آمار (ژئواستاتستیک)، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۱۴.
- قاجار، ی. و سلطانی محمدی، س.، ۱۳۹۳. مقایسه روش‌های کریجینگ شاخص و لاگ کریجینگ در تفکیک کانسنگ‌های هماتیتی و مگنتیتی در معدن آهن جلال‌آباد، همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشاف منابع، شیراز.
- کایدانی، م. و دلبری، م.، ۱۳۸۹. پهنه‌بندی شوری خاک و ارزیابی ریسک شوری در منطقه میانکنگی (سیستان) با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، مجله علمی کشاورزی، ۳۵، ۱، ۶۰-۴۹.
- مدنی، ح.، ۱۳۷۴. مبانی زمین‌آمار. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر-واحد تفرش، ۶۵۹.
- مدنی، ح.، ۱۳۷۶. اصول پی‌جویی، اکتشاف و ارزیابی ذخایر معدنی. انتشارات خانه فرهنگ، ۸۱۶.
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the paleo-Tethys remnants in Northeastern Iran. Geological Society of America

کانسار در مرحله تخمین و امکان محاسبه واریانس تخمین از مزایای روش تخمین کریجینگ معمولی با استفاده از نرم‌افزار Datamine است و در مقابل اثر تناسب واریانس با میانگین و پیدایش ناهمسانگردی منطقه‌ای دروغین (در صورت غیرنرمال بودن توزیع داده‌های خام) از معایب آن است.

بنابراین نمی‌توان همواره و برای تمامی کانسارهای مختلف، نسخه واحدی تجویز کرد و روش واحدی توصیه شود؛ بلکه ممکن است برای کانسارهای مختلف، روش‌های متفاوتی کارآیی بهتری داشته باشند. به‌طور کلی برای دستیابی به بهترین پاسخ و مطلوب‌ترین نتیجه، بهتر است که برای محاسبه ذخیره یک کانسار از چند روش مختلف به‌ویژه از روش‌های نوین و دقیق زمین‌آماری استفاده کرد. چرا که تکیه بر نتایج تنها یک روش، از ریسک بالایی برخوردار است و احتمال خطاهای نظام‌دار وجود دارد. معقولانه‌ترین تصمیم، استفاده از چند روش دقیق مختلف و متوسط‌گیری از نتایج آنها می‌باشد.

به‌منظور بهبود نتایج به‌دست آمده از پژوهش، پیشنهاد می‌شود که وزن مخصوص ماده معدنی در نقاط مختلف کانسار به روش آزمایشگاهی و با دقت زیاد تعیین شود. سپس با روش شبیه‌سازی شاخصی و تعیین جنس، به هر بلوک وزن مخصوص دقیق آن نسبت داده شود. همچنین برای تخمین ذخیره منطقه مورد مطالعه، از دیگر روش‌های تخمین کریجینگ همانند کریجینگ ناپیوسته و یا شبیه‌سازی متوالی گوسی نیز استفاده شود و نتایج تخمین آنها با نتایج پژوهش حاضر مورد مقایسه قرار گیرد.

سپاسگزاری

نگارنده مقاله بر خود لازم می‌داند از مدیر عامل محترم شرکت زاگرس مس‌سازان و تمام کارکنان مجتمع معدنی مس نارباغی، به‌خاطر همکاری‌های ارزنده درخصوص زمینه‌سازی امکان بازدید از منطقه، نمونه‌برداری و در اختیار قرار دادن کلیه اطلاعات و داده‌های اکتشافی مورد نیاز، کمال تقدیر و تشکر را به عمل آورد.

Bulletin, 103, 8, 983-992.

- Annels, A.E., 2012. Mineral Deposit Evaluation: A Practical Approach, Chapman and Hall, London, XV, 436.

- Bohling, G., 2007. SGeMS Tutorial Notes in Hydrogeophysics: Theory, Methods, and Modeling. Boise State University, Boise, Idaho, 26.

- Choudhury, S., 2015. Comparative Study on Linear and Non-Linear Geostatistical Estimation Methods: A Case Study on Iron Deposit. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11, 131-139.

- Gossage, B., 1998. The Application of indicator kriging in the modeling of geological Data, Proceedings of a one day symposium: Beyond ordinary kriging. October 30th, Perth Western Australia. Geostatistical Association of Australasia.

- Journel, A.G., 1983. Nonparametric estimation of spatial distributions. *Mathematical Geology*, 15, 445-468.

- Journel, A.G., 1989. Fundamentals of Ge-

ostatistics in Five Lessons, Short Course in Geology. American Geophysical Union, 8, 57.

- Remy, N., Boucher, A. and Wu, J., 2006. SGeMS User's Guide. Stanford University, Stanford, 129.

- Remy, N., Boucher, A. and Wu, J., 2009. Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide. Cambridge University Press, New York, 284.

- Rendu, J.M., 1981. An Introduction to Geostatistical Methods of Mineral Evaluation, South African Institute of Mining and Metallurgy Monograph Series, Johannesburg, 84.

- Stoecklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: A Review. *American Association of Petroleum Geologists*, 52, 7, 1229-1258.

- Switzer, P., 1977. Estimation of spatial distributions from point sources with application to air pollution measurement. *Bulletin of the International Statistical Institute*, 47, 123-137.