

تخمین و رده‌بندی ذخیره کانسار سرب و روی اره‌گیجه رباط خمین استان مرکزی با استفاده از روش‌های زمین‌آماري

رضا احمدی^{۱*} و سیدمیعاد سادات کودهی^۲

۱ و ۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

نویسنده مسئول: Rezahmadi@gmail.com *

دریافت: ۹۶/۱۱/۸ پذیرش: ۹۷/۳/۲۷

چکیده

ذخایر معدنی براساس معیارهای مختلفی رده‌بندی می‌شوند. روش‌های زمین‌آماري از جمله دقیق‌ترین روش‌های تخمین و رده‌بندی ذخایر معدنی می‌باشند. مهم‌ترین روش‌های زمین‌آماري رده‌بندی ذخایر معدنی شامل رده‌بندی با استفاده از تعداد و کیفیت پراکندگی داده‌های شرکت‌کننده در تخمین، رده‌بندی با استفاده از خطای واریانس کریجینگ و رده‌بندی با استفاده از کارایی کریجینگ می‌باشد. در پژوهش حاضر ذخیره توده کانسار سرب و روی اره‌گیجه رباط واقع در محدوده پیرامون شهر خمین در استان مرکزی با استفاده از روش‌های مذکور، به سه رده ذخایر قطعی، احتمالی و ممکن، رده‌بندی شده است. جهت شناخت بهتر کانسار و ماهیت ماده معدنی، ابتدا لاگ لیتولوژی تمام گمانه‌ها و مدل سه‌بعدی لیتولوژی محدوده کانسار با استفاده از نرم‌افزار Rockworks ترسیم شد. برای تخمین ذخیره کانسار بعد از واریوگرافی منطقه با نرم‌افزار SGeMS از روش زمین‌آماري لاگ کریجینگ معمولی بلوکی به کمک نرم‌افزار Datamine استفاده شد. متوسط عیار و ذخیره کانسار نیز با در نظر گرفتن شرایط مختلف اقتصادی، به‌ازای عیاردهای ۱/۵، ۲ و ۳ درصد تعیین شد. مقایسه نتایج پژوهش نشان می‌دهد که اختلاف میزان ذخیره رده‌بندی شده با روش‌های مختلف، نسبتاً زیاد است. روش استفاده از تعداد و کیفیت پراکندگی داده‌های شرکت‌کننده در تخمین نسبت به دو روش دیگر میزان ذخیره قطعی بیش‌تری را نتیجه می‌دهد اما دقت دو روش دیگر در این مورد بیش‌تر است، بنابراین در عمل استفاده از این دو روش به روش استفاده از تعداد و کیفیت پراکندگی داده‌های شرکت‌کننده در تخمین، ارجحیت دارند. میزان ذخیره احتمالی محاسبه شده با هر سه روش به یکدیگر نزدیک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: روش‌های زمین‌آماري، کریجینگ، Datamine، تخمین ذخیره، کانسار سرب و روی اره‌گیجه رباط خمین

مقدمه

ضخامت و عیار متوسط آن‌هاست (آنلز، ۲۰۱۲). انتخاب بهترین روش محاسبه ذخیره، تابع وضعیت ماده معدنی و مشخصات کارهای اکتشافی است. معمولاً تخمین ذخیره ماده معدنی براساس اطلاعات معدودی انجام می‌گیرد، در نتیجه عملیات تخمین همواره با مقداری خطا همراه است که برای کمینه کردن خطای تخمین می‌بایست سازگارترین روش تخمین که در عین حال کمترین حدود اطمینان را نیز به همراه داشته باشد، مورد استفاده قرار گیرد؛ مرز بین کانسنگ و باطله بر اساس رعایت عیار حد و محدودیت‌های استخراجی تعیین شود و حجم داده لازم (گمانه، ترانشه، تونل و غیره) برای دستیابی به یک تخمین معتبر با خطایی در حد خطای مجاز از پیش تعیین شده محاسبه گردد. محاسبه دقیق ذخایر معدنی نیازمند به‌کارگیری روش‌های تخمین دقیق می‌باشد. امروزه با پیشرفت علوم کامپیوتری، روش‌های تخمین

اصلی‌ترین هدف اکتشاف مواد معدنی، مشخص کردن هندسه کانسار و محاسبه ذخیره قطعی است. برای محاسبه ذخیره قابل استخراج و به‌دنبال آن طراحی بهینه استخراج لازم است اطلاعات تفصیلی از خصوصیات ذخیره در دسترس باشد. این خصوصیات شامل توزیع فضایی کانسنگ پرعیار، کم عیار و باطله، هم‌چنین نحوه تغییرپذیری ضخامت کانسنگ و روباره و همبستگی بین عیار فلز اصلی و محصولات فرعی (فلزات با ارزش) است. برای تعیین این خصوصیات لازم است که داده‌های سه‌بعدی (سطحی و عمقی) در اختیار باشند. تخمین ذخیره کانسار با استفاده از روش‌های مختلفی امکان‌پذیر بوده که اصول روش‌های محاسبه ذخیره یکسان است. در واقع اختلاف اساسی روش‌های مختلف، در چگونگی تقسیم‌بندی منطقه به قطعه‌ها و محاسبه

سنگی پورفیری و دایک تقسیم شده و مشخص گردیده که به‌کارگیری داده‌های نرم و سخت شرطی، مدل‌سازی عدم قطعیت در مقادیر واقعی مس را بهبود می‌بخشد و واریانس شرطی شبیه‌سازی را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. پارو-ایگوزکوئیزا و همکاران (۲۰۱۳) به مدل‌سازی زمین‌آماری رگه‌های نازک ذغال‌سنگ برای تخمین ریسک محاسبه ذخیره در منطقه ایبریان پنینسولای اسپانیا پرداختند. در این پژوهش از یک شبیه‌سازی زمین‌آماری برای ارزیابی ذخیره استفاده شد و مدل گوسی مورد استفاده قرار گرفت. قاجار و سلطانی محمدی (۲۰۱۵) در معدن سنگ‌آهن جلال‌آباد در استان کرمان براساس ۳۰۵۵ نمونه برداشت شده از ۸۶ گمانه به طول ۲۵۶۱۶ متر، به مدل‌سازی آماری و زمین‌آماري عیار آهن، گوگرد و فسفر پرداختند. تخمین و مدل‌سازی ذخیره براساس روش کریجینگ معمولی صورت گرفت که براساس آن ذخیره سنگ‌آهن به چهار دسته پرعیار کم گوگرد، پرعیار پرگوگرد، کم‌عیار کم‌گوگرد و کم‌عیار پرگوگرد تقسیم‌بندی شد.

موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه

کانسار رباط در ۳۲ کیلومتری غرب و شمال‌غرب شهرستان خمین، ۱۰ کیلومتری شمال‌غرب شهر قورچی‌باشی و ۲ کیلومتری شمال روستای رباط بالا قرار دارد. محدوده مورد مطالعه به‌صورت چندضلعی نامنظمی است که سه کوه به نام‌های اره‌گیجه، تخت‌حسین و برآفتاب را دربرگرفته است. محدوده مورد مطالعه از نظر ساختاری در پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان قرار داشته و از پوشش کربناته-آواری کرتاسه روی مجموعه دگرگونی قدیمی تشکیل شده است. این محدوده از ناودیس و تاقدیس‌هایی با روند عمومی شمال‌غرب-جنوب‌شرق تشکیل شده که شامل یک ناودیس با هسته مرکزی از جنس نهشته‌های مارنی و آهک مارنی و دو تاقدیس با هسته واحد سنگ‌آهک در جنوب‌غرب و شمال شرق آن می‌باشد. این ساختمان ناودیسی و تاقدیسی با یک سری گسله‌های عرضی عمدتاً با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب قطع شده که اغلب دارای جابجایی امتداد لغز چپ‌گرد یا راست‌گرد بوده و باعث جابجایی افق کانه‌دار و سنگ‌های دربرگیرنده آن به میزان چند متر تا حداکثر ۵۰ متر شده است. کانسار مورد نظر از نظر نوعی تیپ

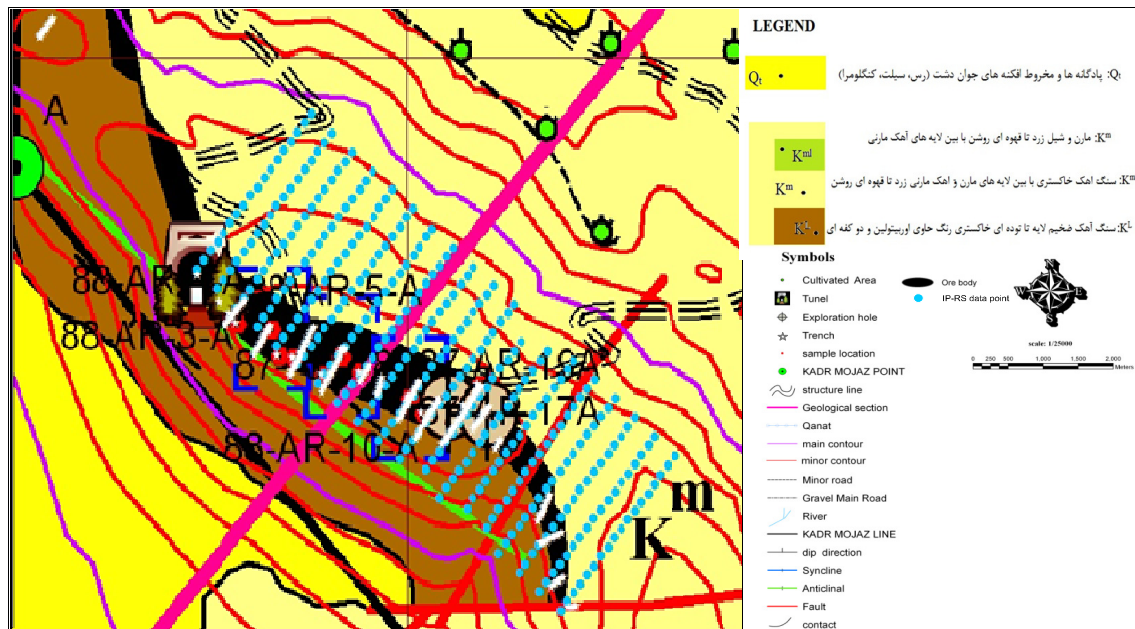
زمین‌آماري مانند شبیه‌سازی‌های زمین‌آماري، رشد و توسعه یافته‌اند و از کاربردی‌ترین روش‌ها به حساب می‌آیند.

هدف اصلی پژوهش حاضر تخمین و رده‌بندی ذخیره کانسار سرب و روی اره‌گیجه رباط خمین با استفاده از روش‌های ارزیابی دقیق زمین‌آماري است. بسته به نوع و میزان فعالیت‌های اکتشافی انجام شده در منطقه مورد مطالعه و اطلاعات اکتشافی موجود، به‌کارگیری این روش‌ها ضروری است. در ادامه به چند مورد از پژوهش‌های انجام شده اخیر در مورد روش‌های تخمین زمین‌آماري اشاره می‌شود.

سعید (۱۳۸۳) میزان ذخیره مربوط به کانساری در زون تکنوتیکی فعال سنندج-سیرجان واقع در ایران مرکزی در دولومیت‌های کرتاسه زیرین و ریسک همراه با تخمین را با استفاده از روش شبیه‌سازی زمین‌آماري متوالی گوسی، تعیین نمود. برای این منظور داده‌ها به صورت استاندارد به نرمال تبدیل شده و سپس ۱۰۰ بار شبیه‌سازی شدند. لیاقت و همکاران (۱۳۸۵) ذخیره آنومالی شماره ۳ معدن سنگ آهن گل‌گهر سیرجان را با استفاده از روش زمین‌آماري کریجینگ تخمین زدند. در آنومالی شماره ۳، سه زون مگنتیت بالای، اکسیداسیون هماتیتی و مگنتیت پایینی تشخیص داده شد. باستانه و همکاران (۲۰۰۸) از روش‌های تخمین کریجینگ شاخص، شبیه‌سازی شاخصی شرطی و آمار چندنقطه‌ای برای مدل‌سازی ذخیره اسلیت استفاده نمودند. در این پژوهش روش‌های آمار چندنقطه‌ای و کریجینگ شاخص، به‌عنوان بهترین روش‌های تخمین و تولید ذخیره اسلیت شناخته شدند. کسمایی و همکاران (۲۰۱۰) از مدل‌سازی زمین‌آماري برای محاسبه ذخیره توده عظیم فسفر در معدن سنگ آهن چغارت یزد استفاده کردند. در این محدوده تحلیل هیستوگرام و واریوگرام‌های به‌دست آمده نشان می‌دهد که توده فسفوری در بخش‌های مختلف، سازمان‌دهی فضایی مختلفی داشته و در هر زون مدل‌سازی زمین‌آماري به‌طور جداگانه انجام شده است. ملکی‌تهرانی و همکاران (۲۰۱۳) به شبیه‌سازی و دسته‌بندی عیار کانسار مس پورفیری سونگون با استفاده از داده‌های سخت (جنس سنگ) و داده‌های نرم (همبستگی عیار) به روش کاهش واریانس شبیه‌سازی شرطی پرداختند. محدوده مورد مطالعه به دو واحد

براساس مطالعات مرحله شناسایی اولیه و پی‌جویی در منطقه مورد مطالعه، محدوده کوه‌های اره‌گیجه، تخت‌حسین و برآفتاب، به‌عنوان محدوده‌های مناسب برای اکتشاف مرحله تفصیلی انتخاب شدند. به‌دلیل اهمیت کمتر مناطق تخت‌حسین و برآفتاب در مقایسه با منطقه اره‌گیجه از نظر زمین‌شناسی اقتصادی، فعالیت‌های اکتشافی عمدتاً در منطقه اره‌گیجه انجام شده و بنابراین تمرکز عمده پژوهش حاضر نیز بر روی منطقه اره‌گیجه می‌باشد. مهم‌ترین فعالیت‌های اکتشافی انجام شده در منطقه اره‌گیجه مطابق شکل ۱ تهیه نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰، مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های قطبش القایی (IP) و مقاومت‌سنجی (RS)، حفر ۱۹ فقره ترانشه به طول‌های ۲۰ تا ۱۵۰ متر بر روی افق سیلیسی کانه‌دار، حفر تعداد ۴۳ حلقه گمانه اکتشافی (۲۶ حلقه گمانه قائم و ۱۷ حلقه گمانه مایل) به عمق‌های ۱۵/۵ تا ۶۰ متر جمعاً به متر اژ ۱۴۱۳/۱۵ متر، برداشت زمین‌شناسی، نمونه‌گیری و تجزیه شیمیایی نمونه‌ها با روش‌های فلورسانس اشعه ایکس و جذب اتمی برای عناصر سرب، روی، نقره و کادمیوم می‌باشد.

دره می‌سی‌سی‌پی^۱ (MVT) می‌باشد که در این نوع کانسارها بخش عمده کانی‌سازی در ساختمان ناودیس قرار می‌گیرد (پیچاب کانسار، ۱۳۸۸). ناحیه مورد مطالعه از نظر کانه‌زایی به‌ویژه حضور کانه‌های سرب و روی، بخشی از نوار کانه‌زایی ملایر- اصفهان به‌شمار می‌آید و این نوار یکی از پرتکاپوترین و غنی‌ترین پهنه‌های ساختاری از دید زمین‌شناسی اقتصادی به‌ویژه از نظر وجود کانسارهای فلزی مانند سرب و روی می‌باشد. کانی‌سازی در محدوده رباط به صورت سرب، روی و باریت در مجموعه کربناته- آواری کرتاسه (آپتین- سنوماین) به‌صورت افق‌هایی در واحدهای سنگ‌آهک و آهک مارنی و مارن تمرکز دارد. همزاد کانه‌ای در کانسنگ شامل پیریت، گالن، سروزیت، اسفالریت، اسمیت‌زونیت، کالکوپیریت، باریت، مالاکیت و اکسیدهای آهن (عمدتاً لیمونیت و گوتیت) بوده و کانی‌سازی به شکل عدسی‌ها، زون‌های رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی است. دگرسانی در محدوده کانی‌سازی به‌صورت سیلیسی شدن، کربناتی‌شدن، آرژیلی‌شدن و هماتیتی شدن بوده و دگرسانی عمده در افق‌های کانه‌دار، سیلیسی شدن همراه با آنکریتی‌شدن می‌باشد (پیچاب کانسار، ۱۳۸۸).



شکل ۱. نقشه توپوگرافی - زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ منطقه اره‌گیجه با نمایش موقعیت کارهای اکتشافی بر روی آن

¹ Mississippi Valley-Type

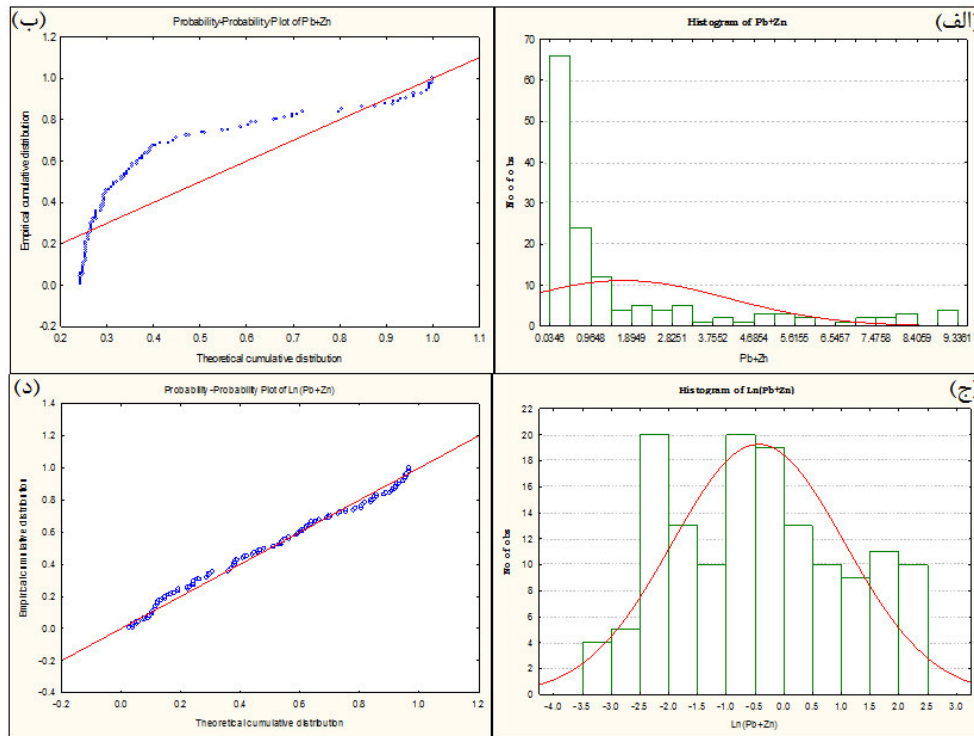
پردازش آماری اولیه داده‌ها

پردازش آماری و اطلاع از نحوه توزیع آماری داده‌ها یکی از مهم‌ترین مراحل در اغلب روش‌های محاسبه ذخیره است (احمدی، ۱۳۸۸). به‌منظور تعیین نحوه توزیع داده‌های عیار مجموع سرب و روی، مطالعات آماری با استفاده از نرم‌افزار Statistica صورت گرفت. نتایج آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های مجموع سرب و روی

گمانه‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است. در شکل ۲ نیز هیستوگرام و نمودار احتمال - احتمال داده‌های طبیعی و لگاریتم مجموع سرب و روی گمانه‌ها به نمایش درآمده است. داده‌های جدول ۱ و نمودارهای شکل ۲ نشان می‌دهند که توزیع داده‌ها از نوع لاگ‌نرمال بوده که با یک تبدیل لگاریتمی به حالت نرمال تبدیل شدند.

جدول ۱. نتایج آماره‌های توصیفی داده‌های گمانه‌های اکتشافی کانسار سرب و روی ازه‌گیجه رباط خمین

متغیر	آماره	میانگین	میانه	دامنه تغییرات	واریانس	انحراف استاندارد	درصد ضریب تغییرات	چولگی	کشدگی
مجموع سرب و روی	۱/۷۰	۰/۶۲	۹/۳۰	۵/۷۶	۲/۴۰	۱۴۱/۴۲	۱/۸۵	۲/۴۳	-۰/۹۶
لگاریتم مجموع سرب و روی	-۰/۴۶	-۰/۴۸	۵/۶۰	۲/۲۲	۱/۴۹	-۳۲۴/۵۴	۰/۱۱	-۰/۹۶	-۰/۹۶



شکل ۲. الف) هیستوگرام، ب) نمودار احتمال - احتمال داده‌های مجموع سرب و روی؛ ج) هیستوگرام و د) نمودار احتمال - احتمال داده‌های لگاریتم مجموع سرب و روی گمانه‌های کانسار ازه‌گیجه

مدل‌سازی اولیه کانسار با نرم‌افزار RockWorks

در شکل ۳ نقشه موقعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی منطقه ازه‌گیجه نشان داده شده است. به منظور شناخت وضعیت کانسار، با استفاده از نرم‌افزار Rockworks لاگ لیتولوژی^۱ گمانه‌ها و مدل سه‌بعدی لیتولوژی کانسار ترسیم شده که به عنوان نمونه در شکل ۴، لاگ

گمانه‌های BH33 و BH50 نشان داده شده است. در این لاگ‌ها علاوه بر ستون لیتولوژی، هیستوگرام تغییرات عمقی عیارسنجی مجموع سرب و روی هم نمایش داده شده است. شکل ۵ نیز مدل سه‌بعدی لیتولوژی کانسار را نشان می‌دهد که در این شکل به‌طور واضح می‌توان واحدهای سنگی را مشاهده نمود. مطابق این شکل در محدوده کانسار، آبرفت و سنگ‌های آهکی (واحدهای K^m،

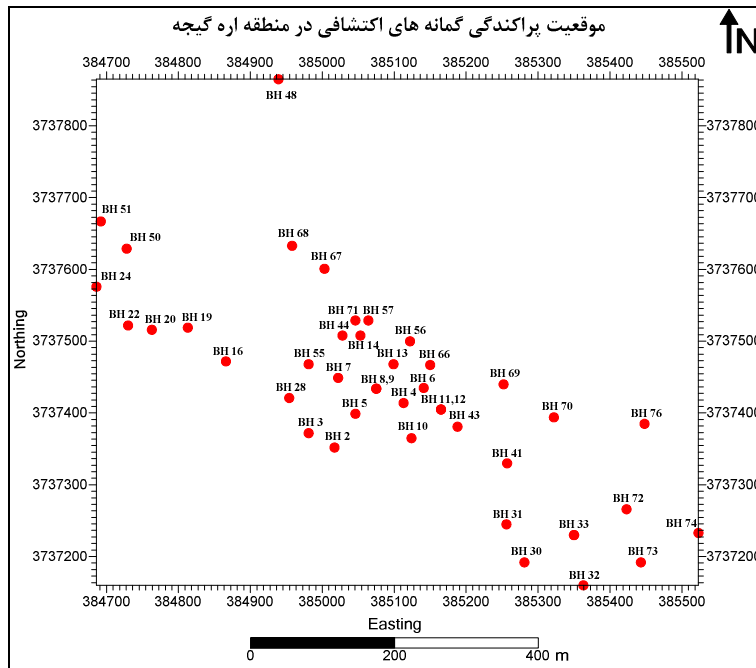
¹ Strip log

سپس در صورت وجود ساختار فضایی، تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد. تخمین زمین‌آماري فرآیندی است که طی آن می‌توان مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم را با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم به‌دست آورد. روش تخمین زمین‌آماري کریجینگ بر منطق "میانگین متحرک وزن‌دار" بنا شده و در این روش تخمین نارایب (حسني‌پاک، ۱۳۷۷؛ مدنی، ۱۳۷۳)، وزن آماری داده‌ها به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که واریانس خطا کمینه شود.

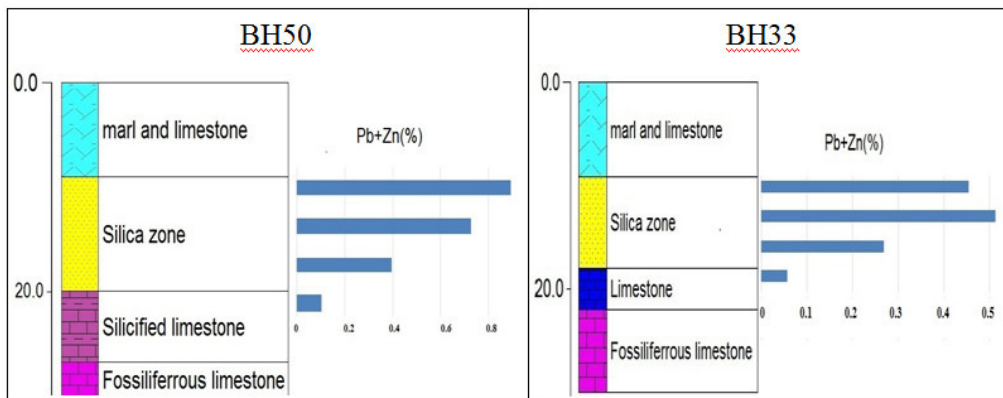
K^L و K^m در نقشه زمین‌شناسی شکل ۱) بیش‌ترین سطح رخنمون‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. بخش بالایی ذخیره معدنی از مارن و زون سیلیسی شده تشکیل شده است. در زیر زون سیلیسی، سنگ‌های آهنکی که براساس اطلاعات فسیل‌شناسی قدیمی‌ترین واحد سنگ‌چینه‌ای و پی‌سنگ منطقه هستند وجود دارند. این سنگ‌ها حاوی اکسیدهای آهن و کربنات آهن (سیدریت) هستند.

مطالعات زمین‌آماري منطقه

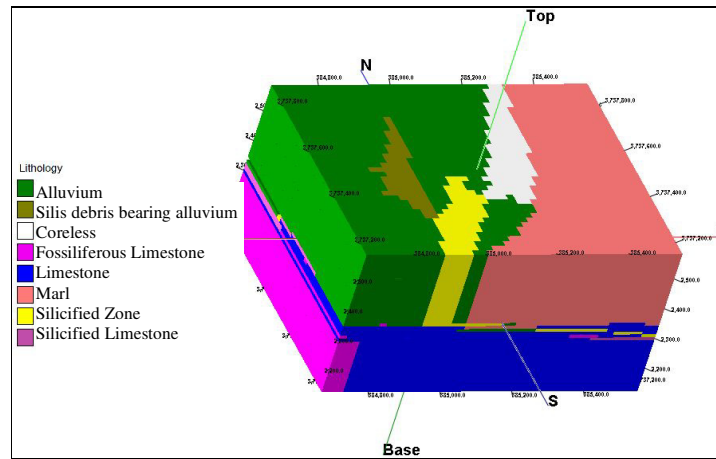
در روش‌های زمین‌آماري ابتدا به بررسی وجود یا عدم وجود ساختار فضایی بین داده‌ها پرداخته می‌شود و



شکل ۳. نقشه موقعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی کانسار سرب و روی اره‌گیجه



شکل ۴. لاگ گمانه‌های BH50 و BH33 کانسار سرب و روی اره‌گیجه



شکل ۵. مدل سه‌بعدی لیتولوژی محدوده کانسار سرب و روی اره‌گیجه

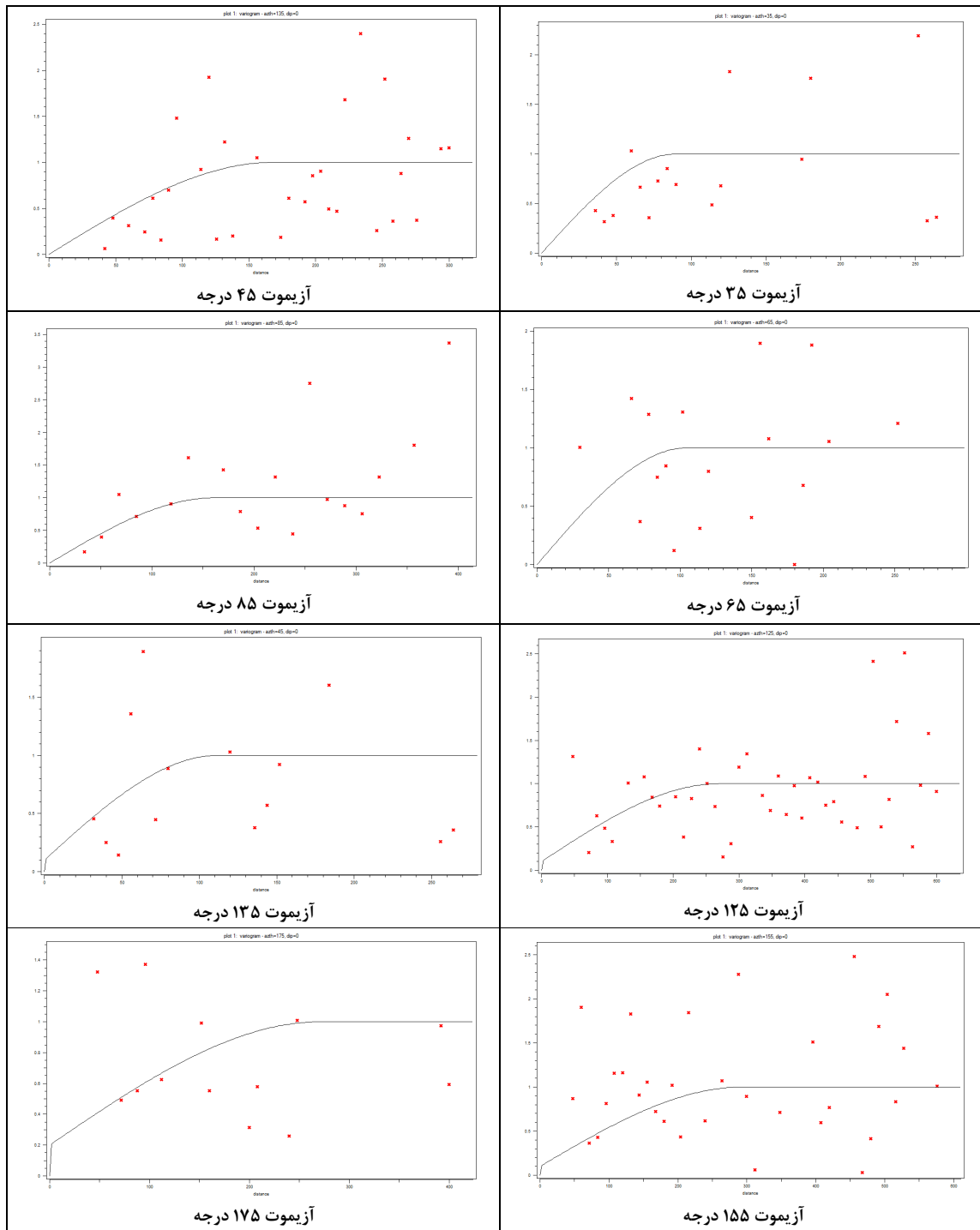
پهچیدگی‌های ذاتی زمین‌شناسی خود کانسار، عیار نسبتاً پایین ماده معدنی، افشان و پراکنده بودن ماده معدنی در محیط میزبان، ارتباط فضایی و فاصله‌ای نه چندان زیاد و ناپیوستگی کانسار، از جمله دلایلی هستند که موجب پراکندگی مقادیر واریوگرام تجربی شده‌اند. براساس نتایج مطالعات واریوگرافی، بیضوی تجسس دارای زاویه شیب ۳۵ درجه با شعاع ۱۶۰ متر در راستای با آزمون ۱۲۵ درجه، شعاع ۶۰ متر در راستای با آزمون ۳۵ درجه و شعاع ۴ متر در راستای عمق انتخاب شد.

واریوگرافی محدوده مورد مطالعه

به‌منظور واریوگرافی و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی کانسار حدود ۳۰۰ واریوگرام امتدادی با استفاده از نرم‌افزار SGeMS ترسیم شد. برای این منظور از آزمون ۰ تا ۱۸۰ درجه هر پنج درجه یک واریوگرام و از شیب ۰ تا ۲۰ درجه هر پنج درجه یک واریوگرام با گام‌های مختلف ترسیم شد که مشخصات تعدادی از آن‌ها در جدول ۲ خلاصه شده است. در شکل ۶ نیز به‌عنوان نمونه تعدادی از واریوگرام‌های امتدادی نشان داده شده است. بطورکلی ماهیت تصادفی ذاتی خود کانسار

جدول ۲. پارامترهای واریوگرام‌های جهت‌ی کانسار اره‌گیجه

مدل واریوگرام	جهت (آزمون)	شیب (درجه)	اثر قطعه‌ای	شعاع تاثیر (متر)	سقف
کروی	۰	۹۰	۰/۰۰۰۱	۴	۱
کروی	۱۲۵	۰	۰/۱	۱۸۰	۱
کروی	۳۵	۰	۰۰۰۰۱/	۶۰	۱
کروی	۶۵	۰	۰/۰۰۰۱	۷۰	۱
کروی	۱۵۵	۰	۰/۱	۱۹۶	۱
کروی	۴۵	۰	۰/۱	۷۵	۱
کروی	۱۳۵	۰	۰/۰۰۰۱	۱۱۲	۱
کروی	۸۵	۰	۰/۰۰۰۱	۱۰۸	۱
کروی	۱۷۵	۰	۰/۲	۱۸۲	۱



شکل ۶. واریوگرام‌های امتدادی با مدل کروی ترسیم شده در راستاهای مختلف در کانسار سرب و روی اره‌گیجه

تخمین میزان ذخیره کانسار

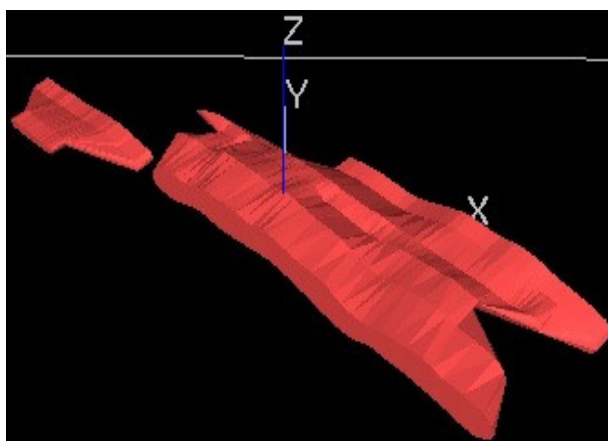
به‌منظور تخمین ذخیره کانسار سرب و روی اره‌گیجه، از نرم‌افزار Datamine استفاده شد. برای دستیابی به تخمین هرچه صحیح‌تر باید پارامترهای تخمین همانند

بیضوی تجسس، تعداد نمونه‌های شرکت کننده در هر تخمین، ابعاد بلوکی کانسار و دیگر پارامترهای تخمین به‌درستی انتخاب شوند. از آنجایی که در پژوهش حاضر طول تمام نمونه‌های مورد استفاده، تقریباً یکسان و حدود

از یکدیگر و شرایط استخراج انتخاب شده است. مدل سه‌بعدی بلوکی کانسار با تفکیک میزان عیار، در شکل ۸ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن شرایط مختلف اقتصادی، عملیات تخمین با روش کریجینگ معمولی بلوکی برای سه عیار حد ۱/۵، ۲ و ۳ درصد وزنی انجام شد. واریانس تخمین برای هر بلوک به صورت جداگانه تعیین گردیده و با استفاده از میانگین واریانس تخمین، حدود بالا و پایین عیار تعیین شده که نتایج تخمین در جدول ۳ خلاصه شده است. در شکل ۹ نیز نمودار عیار-تناژ کانسار ترسیم شده است.

سه متر بودند، بنابراین نیازی به انجام عملیات کامپوزیت‌سازی داده‌ها نبوده و طول سه متر برای تمام نمونه‌ها منظور شده است. شکل ۷ مدل سه‌بعدی جامد کانسار را نشان می‌دهد.

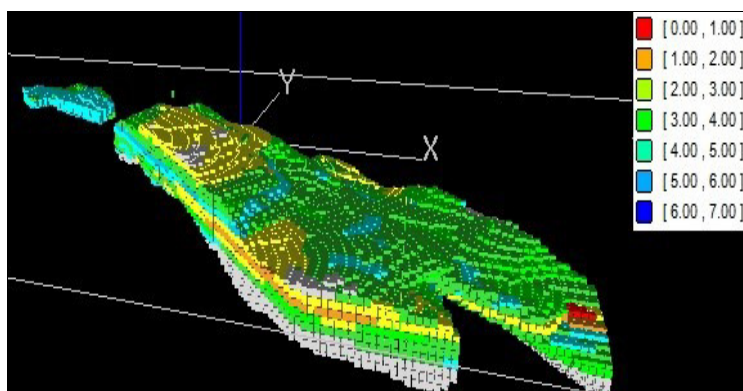
در مدل کلی ساخته شده برای هر بلوک در راستای محورهای X و Y و Z کمترین و بیش‌ترین ابعاد، به ترتیب برابر با ۳ و ۶ متر در نظر گرفته شد که با توجه به بیضوی تجسس مورد نظر در مجموع کل محدوده به ۲۷۷۶۳ بلوک تقسیم‌بندی شد. ابعاد بلوک‌های تخمین براساس گستره طول و عرض محدوده، فاصله گمانه‌های اکتشافی



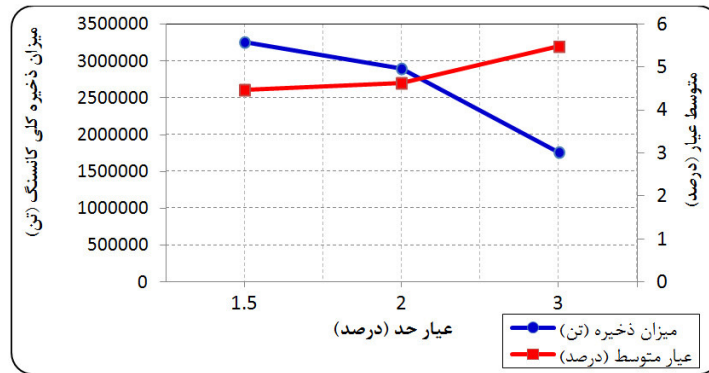
شکل ۷. مدل سه‌بعدی جامد کانسار سرب و روی اره‌گیجه رباط (راستای شمال در راستای محور Y می‌باشد).

جدول ۳. نتایج تخمین ذخیره کانسار سرب و روی اره‌گیجه رباط

عیار حد (درصد)	متوسط عیار (درصد)	حد پایین عیار (درصد)	حد بالای عیار (درصد)	وزن کل کانسار (تن)	وزن خالص ماده معدنی (تن)
۱/۵	۳/۷۰۹	۱/۸۰	۵/۶۲	۳۲۵۸۶۶۲	۱۲۰۸۷۷
۲	۳/۹۵۲	۲/۰۵	۵/۸۵	۲۸۹۹۷۱۳	۱۱۴۶۱۶
۳	۴/۹۳۸	۳/۰۳	۶/۸۵	۱۷۶۵۱۰۸	۸۷۱۶۸



شکل ۸. مدل بلوکی کانسار سرب و روی اره‌گیجه رباط با تفکیک میزان عیار



شکل ۹. نمودار عیار - تناژ کانسار با استفاده از روش زمین آماری کریجینگ

مختلفی مانند تعداد نمونه‌های شرکت کننده در تخمین، واریانس تخمین و فاصله نمونه‌ها تا بلوک استفاده شده است.

رده‌بندی براساس تعداد و کیفیت پراکندگی داده‌های شرکت کننده

این طبقه‌بندی براساس دو معیار انجام‌پذیر است: الف) تعداد نمونه: بر این اساس ذخیره به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شود: ذخیره قطعی با α عدد نمونه، ذخیره احتمالی با β عدد نمونه و ذخیره ممکن با γ عدد نمونه که بین این تعداد باید رابطه (۲) برقرار باشد.

$$\alpha > \beta > \gamma \quad (2)$$

یعنی هرچه تعداد نمونه شرکت کننده در تخمین کم شود، دقت تخمین نیز کاهش پیدا می‌کند که در هر سطح اعتمادی کمترین تعداد نمونه شرکت کننده در تخمین بسیار مهم است.

ب) اندازه بیضوی جستجو: بر این اساس ذخیره به انواع ذخیره قطعی در صورت استفاده از اولین بیضوی جستجو، ذخیره احتمالی در صورت استفاده از دومین بیضوی جستجو و ذخیره ممکن در صورت استفاده از سومین بیضوی جستجو، طبقه‌بندی می‌شود. در هنگام تخمین یک نقطه با توجه به پارامترهای تخمین، اگر تعداد نمونه‌های لازم کمترین تعداد را شامل شده باشد، تخمین صورت می‌گیرد، اگر حداقل تعداد نمونه لازم برای تخمین در بیضوی جستجو حاصل نشود، اندازه بیضوی با یک ضریب معین افزایش می‌یابد و اگر تعداد نمونه‌ها از بیش‌ترین تعداد نمونه‌ها بیش‌تر باشد، اندازه بیضوی به میزانی کاهش می‌یابد تا به بیش‌ترین تعداد نمونه برسد و سپس تخمین انجام می‌شود. در صورتی که در این گام

اعتبارسنجی فرآیند تخمین

اعتبارسنجی^۱ به منظور بررسی درستی و اعتبار پارامترهای مورد استفاده در تخمین به کار می‌رود. روش کار بدین صورت است که یکی از داده‌ها از مجموعه داده‌ها حذف می‌شود و مقدار آن با استفاده از مابقی داده‌ها و پارامترهای فضایی تعیین شده برای تخمین، برآورد می‌شود (حسنی‌پاک، ۱۳۷۷). این عملیات برای هر نمونه معلوم در محدوده مورد بررسی انجام می‌گیرد.

شکل ۱۰ نمودار پراکندگی مقادیر واقعی و تخمینی داده‌های محدوده کانسار اره‌گیجه را نشان می‌دهد. معادله خط راست منطبق بر این داده‌ها مطابق با رابطه (۱) بوده و میزان ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و تخمینی برابر با 0.502 یعنی متوسط رو به بالاست. در شکل ۱۱ نیز هیستوگرام مقادیر خطا (اختلاف بین مقادیر واقعی و تخمینی) نشان داده شده است که داشتن توزیع نرمال و پراکندگی داده‌ها حول صفر نشان‌دهنده بهینه بودن تخمین می‌باشد.

$$(1) \text{ مقدار تخمینی} = 0.7418 \times 0.107 + \text{مقدار واقعی}$$

رده‌بندی توده کانسار اره‌گیجه

ذخایر معدنی بر مبنای میزان دقت تخمین به سه گروه قطعی^۲، احتمالی^۳ و ممکن^۴ رده‌بندی می‌شوند (مدنی، ۱۳۹۱؛ حسنی‌پاک، ۱۳۸۰). بنابراین ذخایر رده "قطعی" دارای بیش‌ترین و رده "ممکن" دارای کمترین درجه اعتماد می‌باشند. در پژوهش حاضر برای رده‌بندی ذخیره معدنی کانسار اره‌گیجه به رده‌های مختلف، از معیارهای

¹ Cross-validation

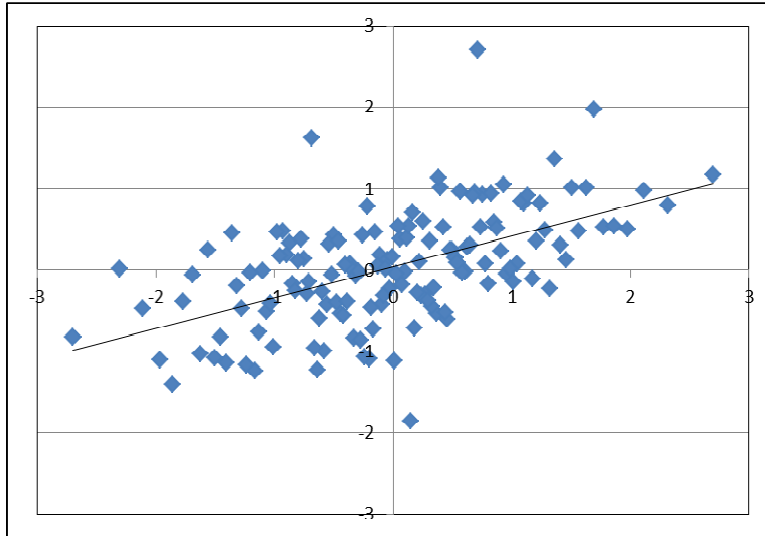
² Proven

³ Probable

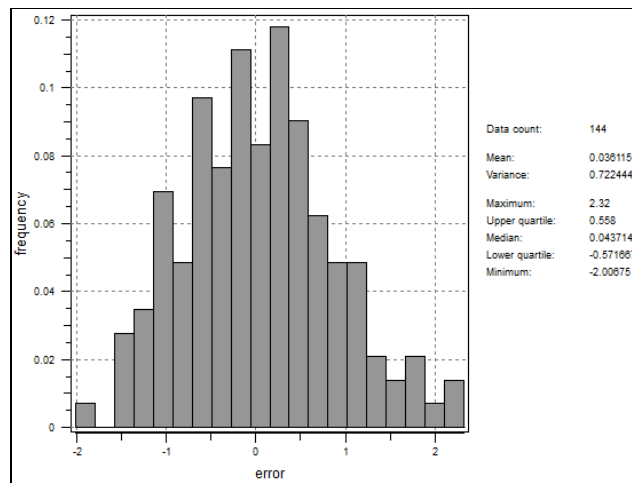
⁴ Inferred

۱۲ پراکندگی بلوک‌های تخمین قطعی، احتمالی و ممکن با عیار حد‌های ۱/۵، ۲ و ۳ درصد وزنی مشاهده می‌شود. جدول ۴ نشان‌دهنده ذخایر با سه عیار حد مختلف با توجه به شماره بیضوی بدون در نظر گرفتن هشتک بیضوی جستجو می‌باشد.

نیز به کمترین تعداد نمونه شرکت کننده نرسد، این عمل برای سومین بیضوی جستجو تکرار می‌شود. در پژوهش حاضر از سه بیضوی جستجو با ضرایب ۲ و ۳ برابر بیضوی اولیه در تخمین استفاده شد. همچنین کمترین و بیش‌ترین تعداد نمونه‌های شرکت کننده در تخمین به ترتیب ۲ و ۲۰ عدد نمونه می‌باشد. در شکل



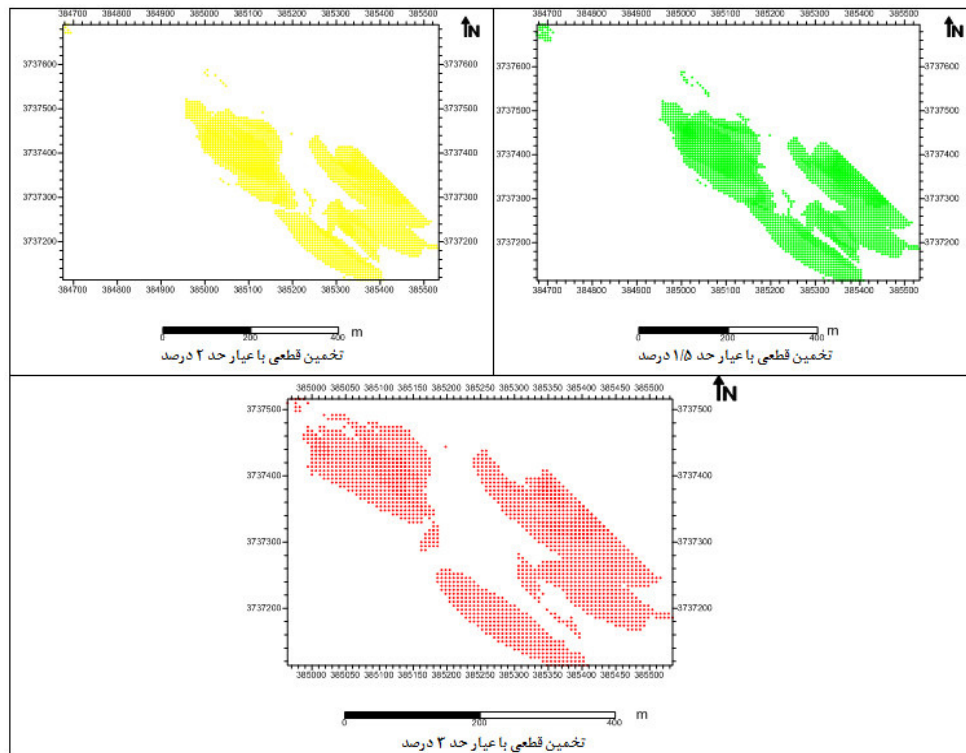
شکل ۱۰. نمودار پراکندگی مقادیر تخمینی در برابر مقادیر واقعی کانسار سرب و روی ازه‌گیجه رباط



شکل ۱۱. هیستوگرام مقادیر خطای داده‌های کانسار سرب و روی ازه‌گیجه رباط

جدول ۴. میزان ذخیره سه رده براساس بیضوی جستجو بدون در نظر گرفتن هشتک بیضوی جستجو

بیضوی شماره ۳		بیضوی شماره ۲		بیضوی شماره ۱		عیار حد (درصد وزنی)
مقدار خالص ماده معدنی (تن)	وزن کل کانسنگ (تن)	مقدار خالص ماده معدنی (تن)	وزن کل کانسنگ (تن)	مقدار خالص ماده معدنی (تن)	وزن کل کانسنگ (تن)	
۱۱۰۴۷	۳۳۰۵۲۳	۲۸۵۵۰	۹۰۷۵۲	۸۱۲۸۰	۲۰۲۰۶۳۷	۱/۵
۱۰۶۶۰	۳۰۸۴۴۸	۲۵۷۵۷	۷۴۹۳۴۷	۷۸۱۹۸	۱۸۴۱۹۱۸	۲
۶۵۲۹	۱۳۶۶۸۵	۱۸۴۲۱	۴۳۶۳۶۳	۶۲۲۱۷	۱۱۹۲۰۶۱	۳



شکل ۱۲. نقشه پراکندگی بلوک‌های تخمین قطعی با عیار حدهای مختلف کانسار سرب و روی اره‌گیجه رباط خمین

کارآیی کریجینگ بین صفر و یک تغییر می‌کند که مقدار یک، بیانگر تخمین کامل و ناریب است. منفی شدن عدد نیز ممکن است. وجود عدد صفر بیان‌گر آن است که عدد تخمین براساس کریجینگ، همانند میانگین‌گیری می‌باشد. کارآیی کریجینگ با افزایش ابعاد بلوک‌ها بهبود می‌یابد که مقدار بیش از ۰/۵ توصیه می‌شود. مقدار عددی کارآیی کریجینگ از رابطه (۴) به‌دست می‌آید (دی-ویتری، ۲۰۰۳):

$$KE = \frac{(s_v^2 - s_k^2)}{s_v^2} \quad (4)$$

که در این رابطه KE کارآیی کریجینگ، s_v^2 واریانس بلوک و s_k^2 واریانس کریجینگ است. در حالت ایده‌آل، واریانس کریجینگ باید برابر صد و یا بسیار نزدیک به آن باشد. در چنین حالتی مطابق رابطه کارآیی کریجینگ مقدار عددی این رابطه برابر با یک خواهد شد. رده‌بندی توسط کارآیی کریجینگ مطابق جدول ۷ است. در جدول ۸ خلاصه رده‌بندی ذخیره با استفاده از کارآیی کریجینگ آورده شده است. هم‌چنین در نمودار عیار-تناژ شکل ۱۳ نیز میزان ذخیره خالص ماده معدنی به ازای عیار حدهای مختلف با سه روش مذکور، رده‌بندی شده است.

رده‌بندی براساس خطای واریانس کریجینگ

در فرآیند تخمین بلوکی با روش زمین‌آماري، واریانس تخمین مربوط به هر بلوک قابل محاسبه است. بنابراین براساس این متغیر می‌توان خطای تخمین هر بلوک را جداگانه محاسبه کرد و سپس ماده معدنی را به گروه‌های مختلف رده‌بندی نمود. خطای تخمین مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود (یانگ، ۲۰۰۸).

$$E_b = \frac{S \cdot t}{G_b} \quad (3)$$

که در این رابطه E_b درصد خطای تخمین، S انحراف استاندارد بلوک، t ضریب مربوط به سطح انتخابی و G_b عیار بلوک است. در رده‌بندی ذخیره با این معیار، نظرات مختلفی وجود دارد که در پژوهش حاضر مطابق نظر آنلز (۲۰۱۲) عمل شده است (جدول ۵). هم‌چنین در جدول ۶ خلاصه رده‌بندی ذخیره با استاندارد روسی بدون در نظر گرفتن هشتک بیضوی آورده شده است.

رده‌بندی براساس کارآیی کریجینگ

از این پارامتر به‌عنوان معیاری برای حصول اطمینان از ابعاد بلوک‌ها و فواصل شبکه استفاده می‌شود و به‌طور مستقیم با واریانس کریجینگ ارتباط دارد. مقدار عددی

جدول ۵. خطای مجاز رده‌های مختلف ذخیره در استاندارد روسی (آنلز، ۲۰۱۲)

ممکن		احتمالی (B)	قطعی (A)	رده ذخیره
C ₂	C ₁			
۹۰	۶۰	۳۰	۲۰	حداکثر خطای مجاز (درصد)

جدول ۶. رده‌های ذخیره با استاندارد روسی بدون در نظر گرفتن هشتم بیضوی جستجو

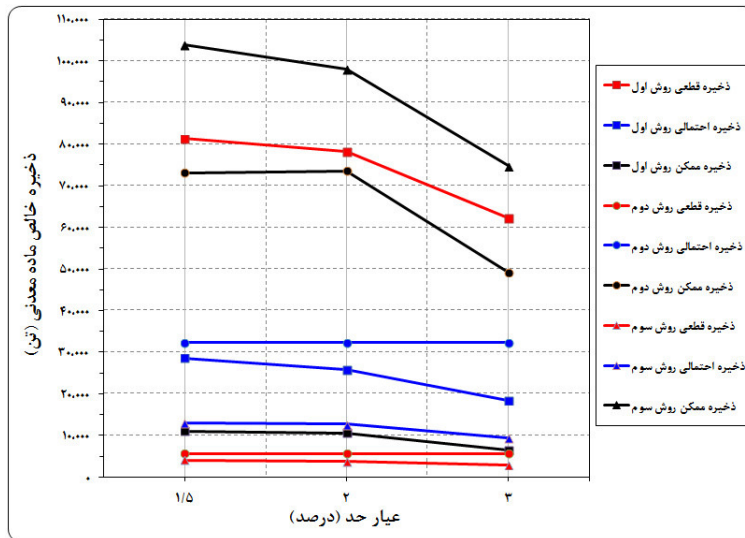
وزن کل کانسنگ (تن)	متوسط عیار (درصد وزنی)	مقدار خالص ماده معدنی (تن)	عیار حد (درصد وزنی)	رده‌بندی ذخیره
۶۵۰۱۶	۸/۷۹۷	۵۷۲۰	۱/۵	قطعی
۶۵۰۱۶	۸/۷۹۷	۵۷۲۰	۲	
۶۵۰۱۶	۸/۷۹۷	۵۷۲۰	۳	
۴۱۱۲۶۴	۷/۸۴۹	۳۲۲۸۴	۱/۵	احتمالی
۴۱۱۲۶۴	۷/۸۴۹	۳۲۲۸۴	۲	
۴۱۱۲۶۴	۷/۸۴۹	۳۲۲۸۴	۳	
۸۶۴۵۶۲	۴/۱۵۲	۳۵۸۹۶	۱/۵	ممکن
۸۶۳۹۵۶	۴/۲۴۴	۳۶۶۶۸	۲	
۷۶۳۸۶۲	۴/۳۴۲	۳۳۱۷۳	۳	
۱۳۹۱۳۴۲	۲/۶۷۱	۳۷۱۷۴	۱/۵	
۱۳۷۲۵۹۴	۲/۶۸۲	۳۶۸۳۱	۲	
۵۲۴۹۶۶	۳/۰۴۵	۱۵۹۹۰	۳	
۵۲۶۴۷۸	۱/۸۶۱	۹۸۰۲	۱/۵	>۹۰%
۱۸۶۸۸۳	۲/۰۸۳	۳۸۹۴	۲	
.	.	.	۳	

جدول ۷. رده‌های ذخیره براساس شاخص کارآیی کریجینگ (بنداری، ۲۰۰۷)

شاخص کارآیی کریجینگ	رده ذخیره
بیش از ۰/۵	اندازه‌گیری شده (قطعی)
۰/۵ تا ۰/۳	شناسایی شده (احتمالی)
کمتر از ۰/۳	استنباط شده (ممکن)

جدول ۸. رده‌بندی ذخیره سرب و روی کانسار اره‌گیجه رباط خمین براساس کارآیی کریجینگ

وزن کل کانسنگ (تن)	متوسط عیار (درصد وزنی)	مقدار خالص ماده معدنی (تن)	عیار حد (درصد وزنی)	رده‌بندی ذخیره
۲۸۵۴۰۵۱	۳/۶۳۷	۱۰۳۸۰۵	۱/۵	استنباط شده
۲۵۲۴۷۳۸	۳/۸۸۴	۹۸۰۶۲	۲	
۱۵۵۵۸۴۸	۴/۸۰۸	۷۴۸۱۲	۳	
۳۰۶۹۳۶	۴/۲۴۳	۱۳۰۲۵	۱/۵	شناسایی شده
۲۹۰۶۰۶	۴/۳۸۴	۱۲۷۴۲	۲	
۱۶۲۹۹۴	۵/۸۱۹	۹۴۸۶	۳	
۹۷۶۷۵	۴/۱۴۴	۴۰۴۸	۱/۵	اندازه‌گیری شده
۸۴۳۷۰	۴/۵۱۷	۳۸۱۱	۲	
۴۶۲۶۷	۶/۲۰۲	۲۸۷۰	۳	



شکل ۱۳. نمودار رده‌های مختلف ذخیره خالص ماده معدنی کانسار سرب و روی اره‌گیجه رباط خمین، طبقه‌بندی شده توسط سه روش مختلف

نتیجه‌گیری

با توجه به وضعیت ماده معدنی و پیچیدگی‌های ذاتی کانسار اره‌گیجه رباط خمین، برای محاسبه ذخیره این کانسار از روش زمین‌آماری کریجینگ معمولی بلوکی به کمک نرم‌افزار Datamine استفاده شد. متوسط عیار و میزان ذخیره کانسار به‌ازای عیار حدهای ۱/۵، ۲ و ۳ درصد تعیین شد و نمودار عیار- تناژ کانسار ترسیم گردید. در نهایت ذخیره محاسبه شده برای کانسار با استفاده از روش‌های مختلف شامل رده‌بندی با استفاده از تعداد و کیفیت پراکندگی داده‌های شرکت‌کننده در تخمین (روش اول)، رده‌بندی با استفاده از خطای واریانس کریجینگ (روش دوم) و رده‌بندی با استفاده از کارایی کریجینگ (روش سوم) به سه دسته ذخایر قطعی، احتمالی و ممکن رده‌بندی شد. به‌منظور آسان‌تر شدن مقایسه نتایج روش‌های مختلف با یکدیگر به‌صورت مشاهده‌ای، در این شکل میزان ذخایر خالص هم‌رده حاصل از روش‌های مختلف رده‌بندی، به‌صورت هم‌رنگ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که میزان ذخیره قطعی محاسبه شده با روش اول به‌مراتب از دو روش دیگر بیشتر است و با توجه به اساس رده‌بندی ذخیره روش اول، دقت روش‌های دیگر بیشتر بوده و از درجه اعتماد بالاتری برخوردارند. بنابراین در عمل بهتر است برای تعیین ذخیره قطعی کانسارهای فلزی از دو روش دیگر استفاده شود. میزان ذخیره

احتمالی محاسبه شده با سه روش، تقریباً به یکدیگر نزدیک است و اختلاف چندانی ندارند. به هرجهت میزان ذخیره احتمالی محاسبه شده با روش دوم از دو روش دیگر اندکی بیشتر است. میزان ذخیره ممکن محاسبه شده توسط روش سوم از دو روش دیگر بیشتر است، ضمن آن‌که اختلاف روش‌های سوم و دوم با روش اول بسیار چشمگیر می‌باشد که این نتیجه با توجه به مقدار زیاد ذخیره قطعی روش اول، منطقی به‌نظر می‌رسد.

منابع

- احمدی، ر (۱۳۸۸) کاربرد الگوهای آماری در ارزیابی ذخایر معدنی با نگرشی بر معدن مس علی‌آباد یزد، دانشگاه صنعتی اراک، ۱۰۲ ص.
- پیچاب کانسار، مهندسین مشاور (۱۳۸۸) گزارش زمین‌شناسی محدوده اکتشافی رباط همراه با تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰.
- حسنی‌پاک، ع.ا (۱۳۷۷) زمین‌آمار (ژئواستاتستیک)، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۱۴ ص.
- حسنی‌پاک، ع.ا، شرف‌الدین، م (۱۳۸۰) تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، ۹۸۷ ص.
- سعید، س (۱۳۸۳) تخمین ذخیره معدن گوشفیل به روش شبیه‌سازی زمین‌آماری، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی.
- قاجار، ی، سلطانی‌محمدی، س (۱۳۹۳) مدلسازی آماری و زمین‌آماری عیار آهن، گوگرد و فسفر در معدن سنگ‌آهن جلال‌آباد، سی و سومین گردهمایی ملی علوم زمین.

لیاقت، س.، حسینی، م.، حاجی‌آقا محسنی، ج.، رونقی، س (۱۳۸۵) استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ معمولی در تخمین ذخیره آنومالی شماره ۳ معدن آهن گل‌گهر، جنوب غرب سیرجان، دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران، انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت‌مدرس.

مدنی، ح (۱۳۷۳) مبانی زمین‌آمار، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر- واحد تفرش، ۶۵۹ ص.

مدنی، ح (۱۳۹۱) مبانی اکتشاف مواد معدنی، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، جلد ۲، چاپ اول، ۱۲۴۴ ص.

Annels, A.E (2012) Mineral deposit evaluation: a practical approach, Springer Science & Business Media.

Bastante, F.G., Ordóñez, C., Taboada, J., Matías, J.M (2008) Comparison of indicator kriging, conditional indicator simulation and multiple-point statistics used to model slate deposits, Department of natural resources and environmental engineering, University of Vigo.

Bhandari, D (2007) Comparison of recoverable reserves estimation techniques, MSc Thesis, Department of civil and environmental engineering, Edmonton, Alberta, Canada.

De-Vitry, C (2003) Resource classification—a case study from the Joffre-hosted iron ore of BHP Billiton's Mount Whaleback operations, Mining Technology, 112(3): 185-196.

<http://www.rockware.com/Rockworks15>.

Kasmaeei, S., gholamnejad, J., yarahmadi, A (2010) Reserve estimation of the high phosphorous stockpile at the Choghart iron mine of Iran using geostatistical modeling", Department of mining and metallurgical engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Maleki Tehrani, M.A., Asghari, O., Emery X (2013) Simulation of mineral grades and classification of mineral resources by using hard and soft conditioning data: application to Sungun porphyry copper deposit, Arabian Journal of Geosciences, 6(10): 3773–3781.

Pardo-Iguzquiza, E., Dowd, P.A., Baltuille, J.M (2013) Geostatistical modeling of coal seam for resource risk assesment, Geological survey of Spain, University of Adeaide, University of Grandoa.

Young, D.R (2008) The effect of ignoring the sample support on the global and local mean grade estimates, mineral resource classification and project valuation of variable width Merensky and UG2 Reef orebodies, Third International Platinum Conference 'Platinum in Transformation, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy: 63-76.

Classification and reserve estimation of Robat Arregije Pb-Zn deposit, Khomein Township, Markazi Province, using geostatistical methods

R. Ahmadi^{1*} and S. M. Sadat Koodehi²

1,2- Dept., of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak

* Rezahmadi@gmail.com

Received: 2018/1/28

Accepted: 2018/6/17

Abstract

Ore reserves can be classified on the basis of various criteria. Geostatistical methods are highly accurate to estimate and classify ore reserves. The most important geostatistical methods to classify the ore reserves are number and quality of the data involved in estimation, error of Kriging variance and Kriging efficiency. In current research, the ore reserve of Robat-Arregijeh lead-zinc located in Khomein township in Markazi province, has been classified into three classes comprising proven, probable and prospected. In order to better recognizing the deposit and ore nature, first the strip log of all boreholes and 3-D lithology model of the region were drawn using Rockworks software. To estimate the ore reserve after variography of the region with SGeMS software, geostatistical ordinary block log-kriging method was used by DATAMINE software. By considering different economic conditions, average grade and amount of the ore reserve were estimated for cut off grade 1.5, 2 and 3 weighted percent. The comparison of the research results shows that amounts of reserves classified by the various methods are highly different. Number and quality of the data involved in estimation method with respect to the two others, yields higher value for proven reserve, with less accurate reversely. Therefore in practice these two methods are preferred in the first method. The amount of probable reserve of each three methods is close to each other.

Keywords: Geostatistical methods, Kriging, Datamine, Reserve estimation, Khomein Robat-Arregijeh Pb-Zn deposit.