

طراحی اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌های تخمین ذخیره بر اساس معیارهای مختلف (مورد مطالعه: کانسار طلای زرزیمای موچش)

رضا احمدی^{۱*} و هانیه شاه‌زمانی^۲

۱. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

چکیده

انتخاب اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌ها تاثیر بسزایی بر روی مدل بلوکی و در نتیجه دقت نتیجه‌های تخمین عیار و میزان ذخیره کانسارها می‌گذارد. در پژوهش حاضر، اندازه بهینه بلوک‌های تخمین به منظور مدل‌سازی بلوکی و ارزیابی ذخیره کانسار طلای زرزیمای موچش واقع در استان کردستان، تعیین شده است. برای دستیابی به هدف، علاوه بر معیارهای معمول همانند اندازه شبکه اکتشاف و میزان خطای تخمین، از پارامتر شاخص کیفی سنگ (RQD) نیز استفاده شد. با این رویکرد، اندازه بهینه هر بلوک اصلی 5×5 متر در جهت‌های افقی و دو متر در جهت قائم و برای زیر بلوک‌ها $2/5 \times 2/5$ متر در جهت‌های افقی و یک متر در جهت قائم انتخاب شد. بر پایه واریوگرافی داده‌های تبدیل‌یافته عیارسنجی طلا، مدل‌های تئوری انطباق‌یافته بر تغییر نماهای تجربی از نوع کروی، گوسی و نمایی است و کانسار دارای ناهمسانگردی هندسی می‌باشد. برای تخمین متوسط عیار و ذخیره کانسار از روش‌های هندسی عکس مجذور فاصله و زمین‌آماری لاگ کریجینگ معمولی به کمک نرم‌افزار Datamine استفاده شد. استفاده از روش عکس مجذور فاصله همراه با روش لاگ کریجینگ معمولی، به منظور امکان‌پذیری ارزیابی صحت نتیجه‌های از طریق مقایسه نتیجه‌های تخمین می‌باشد. برای کنترل عیار در شرایط مختلف اقتصادی، متوسط عیار، میزان ذخیره و متوسط واریانس تخمین عیار کانسار به‌ازای عیاردهای ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر تن محاسبه شد. روند نمودارهای عیار-تناژ کانسار صحت انجام فرآیند را تایید می‌کند. همچنین مطابق انتظار، نتیجه‌های روش تخمین لاگ کریجینگ به دلیل ناریب بودن و خطای تخمین کمتر، از روش عکس مجذور فاصله دقیق‌تر و قابل اعتمادتر است.

واژه‌های کلیدی: زرزیمای موچش، شاخص کیفی سنگ (RQD)، اندازه بهینه بلوک، مدل‌سازی بلوکی، خطای تخمین، لاگ کریجینگ معمولی

مقدمه

در ارتباط با تعیین اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌ها به منظور بلوک‌بندی کانسارها و تخمین ذخیره زمین‌آماری کانسارها، طی سال‌های اخیر، تحقیقات معدود و انگشت‌شماری صورت گرفته که در ادامه به چند مورد از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. بر اساس نظر جرنل و هوجبرت (Journel and Huijbregts, 1978) ابعاد بلوک‌ها باید کمتر از فواصل نمونه‌برداری باشد. این پژوهشگرها یک سوم تا نصف فاصله بین گمانه‌ها را برای ابعاد بلوک‌ها پیشنهاد کرده‌اند و اعتقاد دارند که انتخاب بلوک‌هایی با ابعاد کوچک‌تر، باعث هموارشدگی مصنوعی مدل می‌شود؛ چرا که به بلوک‌های کوچک همجوار، عیار یکسانی نسبت داده می‌شود و از سویی انتخاب بلوک‌های خیلی بزرگ نسبت به فواصل گمانه‌ها نیز باعث کاهش تفکیک‌پذیری مدل در جداسازی بلوک‌های کانسنگ و باطله می‌شود. دیوید (David, 1979) پیشنهاد کرده است که ابعاد بلوک‌ها نباید از یک چهارم فاصله بین گمانه‌ها کمتر باشد. مطابق نظر هالس (Hulse, 1992) انتخاب ابعاد بلوک برابر با یک چهارم فاصله نمونه‌ها زمانی مفید خواهد بود که طول دامنه تغییرنا کم‌وبیش ده برابر ابعاد بلوک‌ها باشد. وان و همکاران (Vann et al., 2003) اعتقاد دارند وقتی ابعاد بلوک‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای از نصف فواصل شبکه حفاری کوچک‌تر انتخاب شود، همواره نتیجه‌های قابل قبولی به دست نمی‌آید، مگر آنکه عیار، پیوستگی خیلی زیادی داشته باشد؛ یعنی مقدار اثر قطعه‌ای خیلی کم و دامنه تاثیر تغییرنا خیلی زیاد باشد. مدل‌سازی سه‌بعدی، بلوک‌بندی و تخمین ذخیره کانسار طلای شماره ۳ هیردا واقع در فاصله ۱۴۰ کیلومتری شهر بیرجند توسط عسکری و همکاران (۱۳۹۲) انجام شده است. در این مطالعه با توجه به نحوه گسترش ماده معدنی، پیوستگی کانسنگ و باطله، فاصله حفاریات و میزان متوسط ضخامت کانسنگ، ابعاد بلوک‌های تخمین برابر با $1 \times 1 \times 1$ متر انتخاب شده است. مطابق نظر رسی و داتچ (Rossi and Deutsch, 2014) ابعاد بلوک‌های تخمین با در نظر گرفتن فواصل گمانه‌ها

یکی از مسائل مهم در ارتباط با اکتشاف و ارزیابی ذخایر اغلب کانسارهای فلزی، پیچیدگی‌های زمین‌شناسی، گسترش پراکنده ماده معدنی درون سنگ میزبان و همواره عیار بسیار پایین ماده معدنی است. تخمین ذخیره دقیق کانسارهای فلزی یکی از مهم‌ترین و بحرانی‌ترین مراحل طراحی و تصمیم‌گیری در مورد این نوع کانسارها به شمار می‌رود. شناخت کامل یک کانسار، مستلزم انجام یک سری عملیات پردازشی و مدل‌سازی است که این کار به دلیل پیچیدگی‌های موجود و طولانی، زمان‌بر بودن و مشکل بودن محاسبات مربوطه، همواره با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی، دقیق‌تر و سریع‌تر انجام می‌شود. مهم‌ترین کاربرد مدل‌سازی، تعیین پارامترهای لازم برای طراحی و برنامه‌ریزی تولید معدن است (عطایی‌پور، ۱۳۹۸). انواع زیادی از مدل‌ها وجود دارند که برای توصیف و نمایش ذخایر معدنی به کار رفته‌اند. انتخاب نوع مدل به عواملی همچون شکل و هندسه کانسار، پیچیدگی وضعیت زمین‌شناختی، نوع ماده معدنی، پذیرش کاربر و آشنایی وی با تکنیک‌های مختلف مدل‌سازی بستگی دارد.

به‌طورکلی روش‌های تخمین ذخیره کانسارها به دو گروه روش‌های کلاسیک (هندسی) و روش‌های زمین‌آماری تقسیم می‌شوند. روش‌های تخمین زمین‌آماری از دقیق‌ترین روش‌های تخمین ذخیره برای اغلب کانسارهای فلزی باارزش و کم‌عیار، به‌ویژه کانسارهای طلا و مس هستند (احمدی، ۱۳۹۹). اصول تمام روش‌های محاسبه ذخیره یکسان است و گام نخست تخمین ذخیره اغلب کانسارهای معدنی ساخت مدل بلوکی (بلوک‌بندی) کانسار می‌باشد. ساخت مدل بلوکی کانسار، بسیار مهم و حیاتی است زیرا میزان دقت این مرحله از فرآیند به‌طور مستقیم بر روی دقت نتیجه‌های تخمین ذخیره، تاثیر قابل توجهی می‌گذارد (Ahmadi and Ehsan-nejad, 2022). عوامل مختلفی همانند وضعیت زمین‌شناسی کانسار، اندازه و ابعاد شبکه اکتشاف، میزان سختی و مقاومت مکانیکی کانسنگ و میزان خطای تخمین، بر روی طراحی اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌های تخمین تاثیرگذارند.

که در این رابطه σ_v^2 واریانس بلوکی، σ_k^2 واریانس کریجینگ و KE بازدهی کریجینگ می‌باشد. زکی و همکاران (Zaki et al., 2022) برای تخمین داده‌های بسیار اریب کانسار طلای رگه‌ای کوارتزریج^۷ واقع در پنج کیلومتری شرق معدن طلای سوکاری^۸ از پنج الگوریتم یادگیری ماشین شامل رگرسیون فرآیند گاوسی^۹ (GPR)، رگرسیون بردار پشتیبان^{۱۰} (SVR)، مجموعه درخت تصمیم^{۱۱} (DTE)، شبکه عصبی به‌طور کامل متصل^{۱۲} (FCNN) و K نزدیک‌ترین همسایه^{۱۳} (KNN) استفاده کردند. آن‌ها مدل سازی بلوکی را بر اساس هندسه زمین‌شناسی، راهکار بهره‌برداری و فاصله بین گمانه‌ها انجام داده و ترکیب بندی بلوک مادر را $20 \times 20 \times 5$ متر و حداقل اندازه بلوک را $5 \times 5 \times 1/25$ متر انتخاب کردند که بلوک مادر دامنه کانی‌سازی تفسیر شده را پوشش می‌دهد و از بلوک فرعی برای تضمین مناسب بودن نمایش حجم استفاده شده است.

در پژوهش حاضر ابتدا طراحی و تعیین ابعاد بهینه بلوک‌های کانسار طلای زرزیمای موجش به کمک تلفیق تمام اطلاعات اکتشافی موجود به‌ویژه شبکه اکتشاف از پیش طراحی شده و نتیجه‌های مدل سازی سه‌بعدی ویژگی مکانیکی کانسنگ^{۱۴} (RQD) صورت گرفته است. سپس مدل سازی بلوکی و تخمین ذخیره کانسار با استفاده از روش‌های زمین‌آماری کریجینگ و هندسی عکس مجذور فاصله براساس میزان خطای تخمین حاصل، انجام گرفته تا با افزایش دقت تخمین، نتیجه‌های تخمین به واقعیت نزدیک‌تر شود.

و سایر ملاحظات مهندسی حتی ممکن است از واحدهای معدنکاری انتخابی^۱ (SMU) بزرگ‌تر باشند. به‌طور کلی تخمین عیار بلوک‌های بزرگ نسبت به بلوک‌های کوچک، آسان‌تر و عیار تخمینی آن‌ها به عیار واقعی نزدیک‌تر است، اما انتخاب ابعاد خیلی بزرگ برای بلوک‌ها نیز در کار برنامه‌ریزی معدنی، مسئله‌ساز خواهد بود. چاندرمن و همکاران (Chanderman et al., 2017) اندازه بهینه بلوک کانسار طلا در کشور مالی را $25 \times 25 \times 10$ متر انتخاب کردند. برای بهینه‌سازی تعداد کامپوزیت‌ها، از فواصل نمونه‌های نظری با فاصله نزدیک $25 \times 25 \times 7$ متر همراه با گسسته‌سازی $5 \times 5 \times 5$ متر استفاده شده است. برای بهینه‌سازی اندازه بلوک، بیشینه و کمینه تعداد نمونه بهینه برای پهنه‌های کانی‌سازی، براساس سعی و خطا تعیین شده است. برای بهینه‌سازی شعاع جستجو، فواصل بزرگ بین نمونه‌ها به‌طور نظری $25 \times 25 \times 10$ متر، گسسته‌سازی $5 \times 5 \times 5$ متر همراه با اندازه بلوک بهینه شده در نظر گرفته شده است. عزمی و همکاران (Azmi et al., 2020) برای مدل سازی بلوکی کانسار طلای دامن‌قر^۲ واقع در شمال شرق ایران از سه روش عکس فاصله وزن‌دار^۳ (IDW)، کریجینگ معمولی^۴ (OK) و کریجینگ شاخص کامل^۵ (FIK) استفاده کردند. بر اساس مدل هندسی، نوع کانی‌سازی و طول نمونه‌ها برای ساخت مدل بلوکی کانسار، کمترین و بیشترین اندازه سلول‌ها به ترتیب برابر با $1 \times 1 \times 1$ و $2 \times 2 \times 2$ متر انتخاب شده است. در مجموع تعداد 86489 سلول به ترتیب با کمترین و بیشترین حجم برابر با یک و هشت متر مکعب و حجم کلی بلوک‌های برابر با 381643 متر مکعب بوده که نتیجه‌های تخمین هر سه روش یکسان است. به‌منظور تعیین ابعاد بهینه بلوک‌های کانسار مس علی‌آباد یزد توسط احمدی و احسان‌نژاد (Ahmadi and Ehsan-nejad, 2022)، از معیارهای بازدهی کریجینگ^۶ (Krige, 1996) با تعریفی مطابق رابطه (۱) و واریانس کریجینگ استفاده شد.

$$KE (\%) = \frac{\sigma_v^2 - \sigma_k^2}{\sigma_v^2} \times 100 \quad (1)$$

1. Selection mining unit
2. Damanghor
3. Inverse Distance Weighting
4. Ordinary Kriging
5. Fully Indicator Kriging
6. Kriging efficiency
7. Quartz Ridge
8. Sukari
9. Gaussian Process Regression
10. Support Vector Regression
11. Decision Tree Ensemble
12. Fully Connected Neural Network
13. K-Nearest Neighbors
14. Rock Quality Designation

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی گستره

کانسار طلای زرزیمما در بخش جنوبی استان کردستان، در فاصله تقریبی ۵۰ کیلومتری جنوب شهر سنندج، ۵۰ کیلومتری شهر کامیاران و چهار کیلومتری شهر موچش واقع شده است. پهنه مورد مطالعه در حد فاصل $47^{\circ} 4'$ تا $47^{\circ} 7'$ طول شرقی و $35^{\circ} 2'$ تا $35^{\circ} 4'$ عرض شمالی قرار دارد. این گستره بر روی پهنه تکتونیکی سنندج-سیرجان، چهارگوش زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ سنندج و برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سنندج قرار دارد.

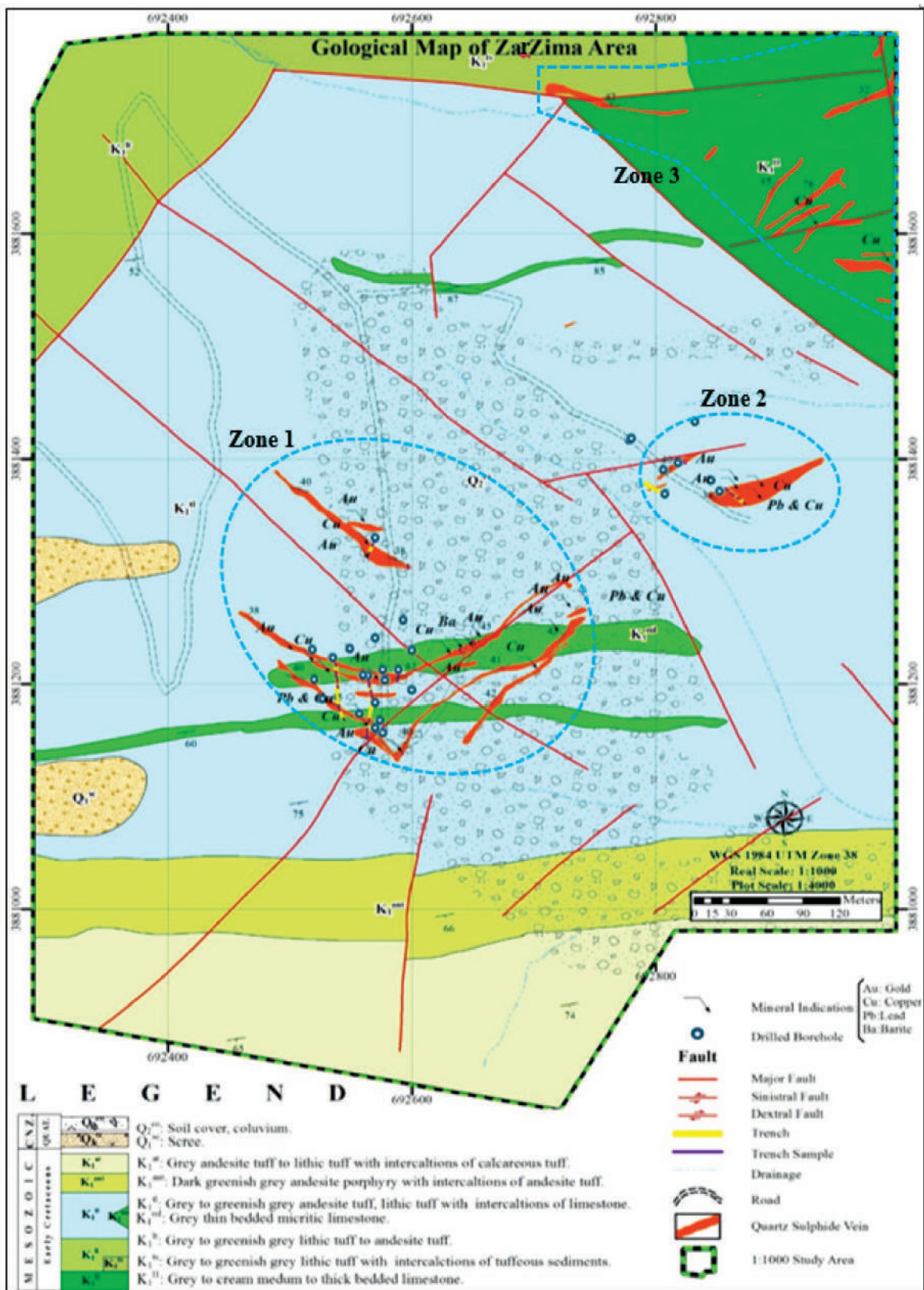
گستره، اغلب شامل ارتفاعات می‌باشد و دشت‌ها در آن جایگاهی ندارند؛ ولی روی رخنمون‌های سنگی در بالای ارتفاعات توسط قشر نازک خاک پوشیده شده است. واحدهای سنگی گستره شامل تناوب سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی است. واحدهای رسوبی شامل سنگ‌آهک خاکستری است که چند متر ضخامت دارد و به‌صورت یک افق در دریای کم‌عمق نهشته شده است. واحدهای آتشفشانی و آذرآواری به‌صورت بین‌لایه‌ای با واحدهای رسوبی و با ترکیب غالب آندزیتی دیده می‌شوند. قدیمی‌ترین واحد گستره شامل سنگ‌آهک متوسط تا ضخیم‌لایه چین‌خورده‌ای است که به‌ندرت دارای میان‌لایه‌هایی از آهک ماسه‌ای است. واحد توف آندزیتی لیتیک، توف خاکستری تا خاکستری مایل به سبز با میان‌لایه‌های سنگ‌آهک، مهم‌ترین واحد سنگی گستره از نظر کانه‌زایی است. به نظر می‌رسد که سنگ‌آهک نقش مؤثری در تشکیل کانی‌سازی داشته باشد. حضور افق‌های کربناتی در محل‌های دارای رگه کوارتز سولفیدی کانه‌دار نشانگر اهمیت این واحد است. افق‌های کربناتی به‌صورت بین‌لایه‌ای در بخش‌های مختلفی از این افق دیده می‌شوند (کاظمی مهرنیا، ۱۳۹۹).

از نظر ساختاری منطقه مورد مطالعه بر اساس شواهد با حضور گسل‌های معکوس، رانده و رورانده فراوان مشخص شده است. چین‌خوردگی‌های فراوان همراه با گسلش از نوع راندگی، از مشخصات این گستره می‌باشد. از نگاه زمین‌شناسی اقتصادی حضور رگه‌های سیلیسی در پهنه مطالعاتی حائز اهمیت است. این رگه‌ها در سنگ‌های ولکانیکی و همچنین آهک‌ها دیده می‌شوند. در این رگه‌ها

کانه‌هایی از قبیل مالاکیت به‌صورت آغشتگی، پیریت و کالکوپیریت به‌صورت افشان و به‌صورت محدودتر، گالن حضور دارند. همچنین اکسیدهای آهن نیز به‌صورت آغشتگی دیده می‌شوند. در مواردی هم رگه‌های کانه‌دار همراه با باریت و کلسیت هستند. رگه‌های سیلیسی گستره دو روند را نشان می‌دهند، یکی شمال شرقی-جنوب غربی و دیگری کم‌وبیش شرقی-غربی که تا حدودی با روند گسل‌ها همخوانی دارند و شاید یکی از عوامل اصلی کنترل‌کننده آن‌ها گسل‌ها هستند. بنابراین، فرآیند گسلش در گستره سهم بسزایی در تشکیل رگه‌های سیلیسی داشته است. وجود بافت‌هایی از قبیل بافت شانه‌ای در سیلیس‌ها و بافت پرکننده فضاهای خالی نشان از تشکیل این رگه‌ها در عمق و فشار کم می‌باشد (کاظمی مهرنیا، ۱۳۹۹). کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه در پیکره رگه‌های سیلیسی رخ داده است. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی-معدنی کانسار طلای زرزیمما را همراه با نمایش رگه‌های سیلیسی در سه پهنه اصلی نشان می‌دهد. براساس مشاهدات صحرایی و اطلاعات موجود از کانسار زرزیمما مطابق جدول ۱، می‌توان تیپ این کانسار را طلای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین در نظر گرفت. سنگ میزبان ولکانیک دگرگون شده همراه با سنگ‌آهک دوباره تبلور یافته، بافت و ساخت رگه‌های سیلیسی و ویژگی‌های ژئوشیمیایی حاکی از همراهی طلا با مس، سرب، روی، نقره و کادمیوم، همگی شواهدی از کانسارهای طلای اپی‌ترمال ارائه می‌کند (کاظمی مهرنیا، ۱۳۹۹).

تحلیل اکتشافی گستره

سطح گستره کانسار براساس شرایط زمین‌شناسی، وضعیت رخنمون و حضور ماده معدنی، نوع و تعداد فعالیت‌های اکتشافی انجام شده مطابق شکل ۱ به سه پهنه دارای پتانسیل معدنی به نام پهنه‌های ۱ تا ۳ نام‌گذاری شده است. در این سه پهنه تعداد ۲۸ رگه سیلیسی کانه‌دار شناسایی شده که این رگه‌ها اغلب روند شمال شرقی-جنوب غربی دارند و ضخامت آن‌ها از یک تا ۱۰ متر متغیر است. به‌منظور بررسی وضعیت و گسترش کانی‌سازی طلا در سطح و اعماق، فعالیت‌های اکتشافی سطحی و عمقی گسترده‌ای در کل کانسار صورت گرفته است. در این راستا تعداد ۴۳



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی-معدنی کانسار طلای زرزیما با نمایش رگه‌های سیلیسی در سه پهنه اصلی به صورت گستره‌های خطچین آبی‌رنگ (ویرایش شده از کاظمی مهرنیا، ۱۳۹۹)

نمونه لیتوژئوشیمیایی از سطح کل کانسار (پهنه‌های ۱، ۲ و ۳) برداشت شده است. تعداد ۱۱ رشته ترانشه اکتشافی نیز در راستای عمود بر امتداد عمومی کانی‌سازی (کم‌وبیش شمال‌غربی-جنوب‌شرقی) و با فواصل متغیر ایجاد شده که از این تعداد، هشت رشته ترانشه در پهنه ۱ و سه رشته در پهنه ۲ ایجاد شده است. از رخساره‌های سنگی کانه‌دار هر ترانشه با روش لب‌پری پیوسته در مجموع ۵۹ نمونه و از دیواره‌های سنگی ترانشه‌ها تعداد ۲۱ نمونه شیاری (کانالی) با وزن بیش از دو کیلوگرم برداشت شده است. همچنین به منظور بررسی وضعیت کانی‌سازی طلا در اعماق، تعداد ۲۱ حلقه گمانه اکتشافی با طول کلی ۱۰۱۲/۵ متر در پهنه ۱ و تعداد نه حلقه گمانه با طول کلی ۴۶۸/۵ متر در پهنه ۲ با یک شبکه اکتشافی تا حدودی منظم ۲۵×۲۵ متری حفاری شده است. از این تعداد، ۱۴ حلقه گمانه به‌طور قائم و ۱۶ حلقه نیز به‌طور مایل (آزیموتی) حفاری شده که کوتاه‌ترین و بلندترین آن‌ها به‌ترتیب BH11 با طول ۱۸ متر و BH31 با طول ۸۶ متر هستند. مغزه‌های حاصل از حفر گمانه‌های اکتشافی از مدل HQ و قطر آن‌ها ۶۵ میلی‌متر است. تعداد ۱۲۵ نمونه مغزه‌ای از گمانه‌های پهنه ۱ و تعداد ۲۲ نمونه از گمانه‌های پهنه ۲ برداشت شده و همه نمونه‌های مغزه‌ای حاصل از حفر گمانه‌ها با روش Fire Assay برای عنصر طلا (برحسب ppb) و ICP-OES برای یک بسته ۲۶ عنصری از جمله مس، نقره، آرسنیک، روی، سرب، مولیبدن و آنتیموان (برحسب ppm) مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند.

جدول ۱. مقایسه ویژگی‌های مدل توصیفی کانسارهای طلای تیپ ای‌تریال سولفیداسیون پایین و زرزیمای موحش (ویرایش شده از کاظمی مهرنیا، ۱۳۹۹)

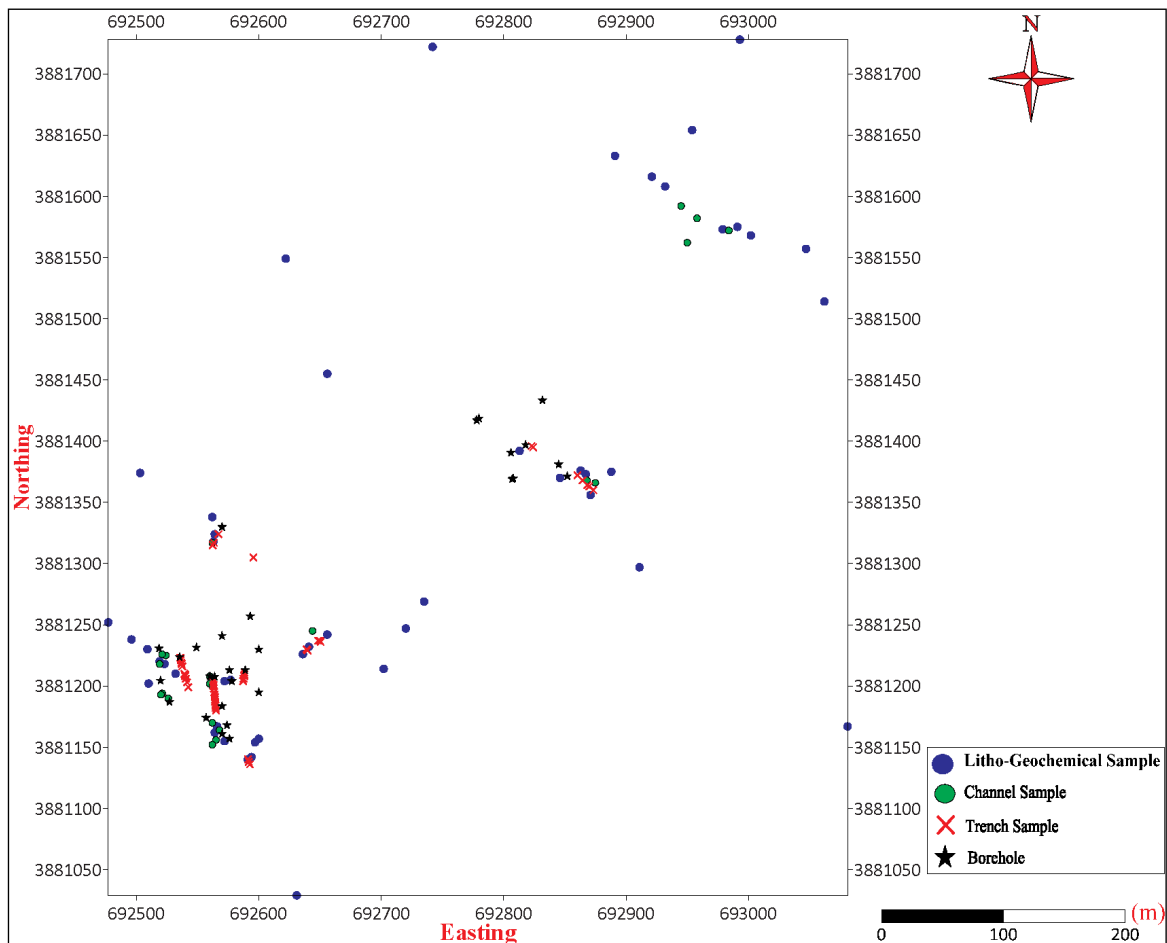
ویژگی‌ها	توصیف	گستره زرزیمای
سنگ میزبان	بازالت، آندزیت، ریولیت پورفیری، همراه با سنگ‌های آتشفشانی بایمدال بازالتی-ریولیتی	آندزیت با بین‌لایه‌های سنگ‌آهک
ارتباط با سنگ‌های نفوذی	حضور توده‌های نفوذی، سیل، دایک‌های کالک‌آلکان تا شوشونیتی	توده‌های گرانودیوریت، دیوریت تا کوارتز مونوپهنه‌ییت در فاصله دو کیلومتری گستره برونزد دارند.
ساختارها	گسل پرشیب، پهنه‌های کششی پهنه فرورانش و ریفت‌های پس از برخورد	گسلش اصلی پهنه از نوع گسل‌های معکوس پرشیب است.
پاراژنز	الکتروم، نقره آزاد، آرژانتیت، پیریت، کالکوپیریت، پیروتیت، آرسنوپیریت، اسفالریت، گالن، کانی‌های سلنید و تلورید (نادر)، کائولینیت، کلریت، کوارتز کراستیفرم، کالسدونی، کراستیفرم، کالسدونی، کلسیت تیغه‌ای، آدولاریا، سرسیت، باریت و فلوریت	پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، اسفالریت، گالن، کلریت، کوارتز کراستیفرم، کالسدونی، کلسیت تیغه‌ای، باریت و فلوریت
ساخت و بافت کانسنگ	نواری، کراستیفرم، کلوفر، پرکننده فضای خالی و شانه‌های	نواری، کراستیفرم، کلوفر، پرکننده فضای خالی و شانه‌های
عناصر همراه	جیوه، آرسنیک، نقره، سلنیوم، تلوریوم و آنتیموان	مس، سرب، روی، آرسنیک
دگرسانی	سیلیسی‌شدن (کوارتز، کالسدونی)، مجموعه سرسیت-ایلیت-کائولینیت، آرژیلیک‌حدواسط (کائولینیت-ایلیت-مونت‌موریونیت) و پروپیلیتیک (اپیدوت، کلسیت و کلریت)	سیلیسی‌شدن، آرژیلیک حدواسط (کائولینیت-ایلیت-مونت‌موریونیت) و پروپیلیتیک (اپیدوت، کلسیت و کلریت)
شکل هندسی	کانی‌سازی طلای رگه‌ای کوچک، استوک‌ورک و پراکنده	کانی‌سازی طلای رگه‌ای کوچک، استوک‌ورک و پراکنده
گستره سنی	سنوزوئیک و به‌ندرت ژوراسیک و پالئوزوئیک	سنگ میزبان کرتاسه است.
ویژگی‌های ژئوفیزیکی	پلاریزاسیون القایی (IP) برای تعیین پهنه‌های سولفیدی همراه با طلا در عمق، مغناطیس‌سنجی برای تعیین توده‌های آذرین نفوذی و پهنه‌های دگرسانی اکسید آهن در عمق	مطالعات ژئوالکتریک (IP-Rs) به‌خوبی کاربرد دارد.
ویژگی‌های ژئوشیمیایی	مقادیر بالای Ag, Au, As, Cu, Sb, Hg, Zn, Pb, Ba, F, Mn در سنگ و به‌طور محلی Te, Se, Hg	مقادیر بالای Ba, Pb, Zn, Sb, Cu, Au, Mn
محیط ژئودینامیکی	فرورانش با زاویه کم و حرارت ناشی از فعالیت‌های گرمایی و ساختارهای کششی	کمان ماگمایی

ادامه جدول ۱.

ویژگی‌ها	توصیف	گستره زرزیمما
کانسارهای مرتبط	طلا- نقره چشمه آب گرم، ماسیوسولفید کروکو	کانسارهای آهن اسکارنی
عیار	کم‌وبیش بین یک تا چهار گرم در تن	عیار متوسط یک گرم در تن ولی عیارها به طور محلی بالاست.
عمق تشکیل	کمتر از یک کیلومتر	نامشخص
میزان ذخیره	کم‌وبیش تناژ بالا، بیش از ۱۰۰ تن طلای خالص	برآورد ذخیره حدود یک تن فلز محتوی
نمونه ایران و جهان	قلعه‌زری، کانسارهای چالو، دارستان و آستانه (ترود-چاه‌شیرین) McLaughlin (California), Hishikari (Japan), Pajingo (Australia)	

شکل ۲. نقشه موقعیت پراکندگی تمام کارهای اکتشافی سطحی و گمانه‌های اکتشافی را در سطح گستره کانسار طلای زرزیمما نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، برداشت این تعداد کار اکتشافی با تراکم به نسبت زیاد در یک سطح گستره با مساحت نه چندان زیاد، قابل قبول است. مشخصات آماری گمانه‌های اکتشافی حفرشده در کانسار

طلای زرزیمما به تفکیک پهنه‌ها و نیز در سطح کل کانسار در جدول ۲ خلاصه شده است. با توجه به داده‌های این جدول مشاهده می‌شود که میزان بیشینه، دامنه تغییرات و میانگین عیار طلای گمانه‌های اکتشافی در پهنه ۲ از پهنه ۱ بسیار بیشتر است. درحالی‌که تعداد نمونه‌های برداشت و آنالیزشده گمانه‌های پهنه ۱ از پهنه ۲ خیلی بیشتر است.



شکل ۲. نقشه موقعیت پراکندگی تمام کارهای اکتشافی سطحی و گمانه‌ها در سطح گستره کانسار طلای زرزیمما

جدول ۲. پارامترهای آماری داده‌های عیارسنجی طلای گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای موجش

پارامتر گستره	تعداد نمونه	کمینه (ppb)	بیشینه (ppb)	دامنه تغییرات (ppb)	میانگین (ppb)	میانه (ppb)	مد (ppb)	انحراف معیار (ppb)	ضریب تغییرات (%)	چولگی	کشیدگی
پهنه ۱	۱۲۵	۷	۷۱۰۷	۷۱۰۰	۵۷۸/۳۴	۱۴۵/۸۳	۲۳	۱۰۶۵/۱۶	۱۸۴/۱۸	۳/۴۴	۱۴/۴۳
پهنه ۲	۲۲	۵	۳۰۱۶۵	۳۰۱۶۰	۲۸۶۲	۴۵۴	-	۶۶۴۱/۱۷	۲۳۲/۰۵	۳/۶۹	۱۴/۷۹
سطح کل کانسار	۱۴۷	۵	۳۰۱۶۵	۳۰۱۶۰	۹۲۰/۱۱	۱۵۴/۳۱	۲۳	۲۸۲۴/۱۳	۳۰۶/۹۳	۸/۱۸	۸۰/۴۱

میزان شعاع هر استوانه نشان‌دهنده بزرگی مقدار عیار در طول مغزه مربوطه در گمانه است. مطابق این شکل تغییرات عیار پهنه مورد مطالعه با کمترین مقدار صفر و بیشترین مقدار حدود (ppb) ۳۱۰۰۰ به ۳۱ بخش رنگی با رنگ‌های مختلف تقسیم شده است. در این شکل بیشینه عیار ماده معدنی در اعماق، مربوط به گمانه‌های اکتشافی BH17 و BH46 می‌باشد که این دو گمانه با فاصله اندک در مجاورت یکدیگر و در راستای قائم حفر شده‌اند. در برخی از گمانه‌ها (همانند BH4، BH8، BH22، BH36 و BH40) نیز از سطح زمین تا اعماق، هیچ‌گونه ماده معدنی مشاهده نمی‌شود.

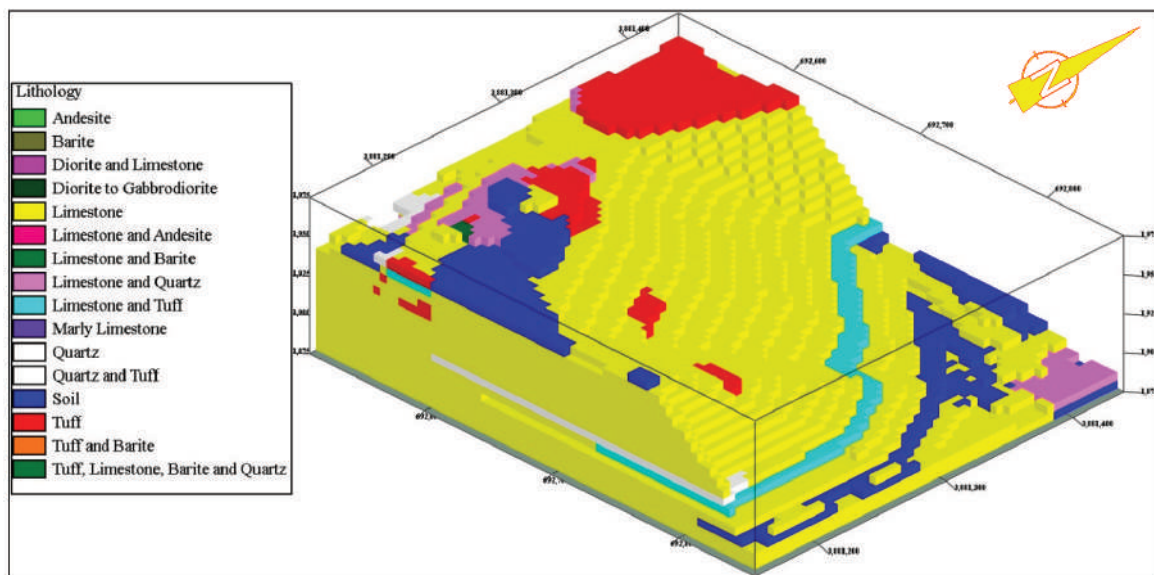
مدل سازی پارامتر شاخص کیفی سنگ

از جمله پارامترهای مهم و موثر بر طراحی و تعیین اندازه و ابعاد بلوک‌های استخراجی معدن، میزان سختی و مقاومت سنگ دربرگیرنده ماده معدنی است. مهم‌ترین ویژگی مکانیکی قابل اندازه‌گیری سنگ در این خصوص، پارامتر شاخص کیفی سنگ (RQD) است که به کمک مغزه‌های حاصل از حفر گمانه‌های اکتشافی براساس ران‌های حفاری (فواصل عمقی متناظر با طول محفظه مغزه‌گیر^۱) محاسبه می‌شود. پارامتر RQD عبارت از نسبت مجموع طول مغزه‌های بزرگ‌تر و یا مساوی ۱۰ سانتی‌متر (چهار اینچ) به طول کل هر دور حفاری^۲ است که همواره برحسب درصد بیان می‌شود. RQD معیار و نشانه‌ای از کیفیت سختی سنگ می‌باشد (Akingboye, 2023; Lukić and Zlatanović, 2017; Pells et al., 2016;

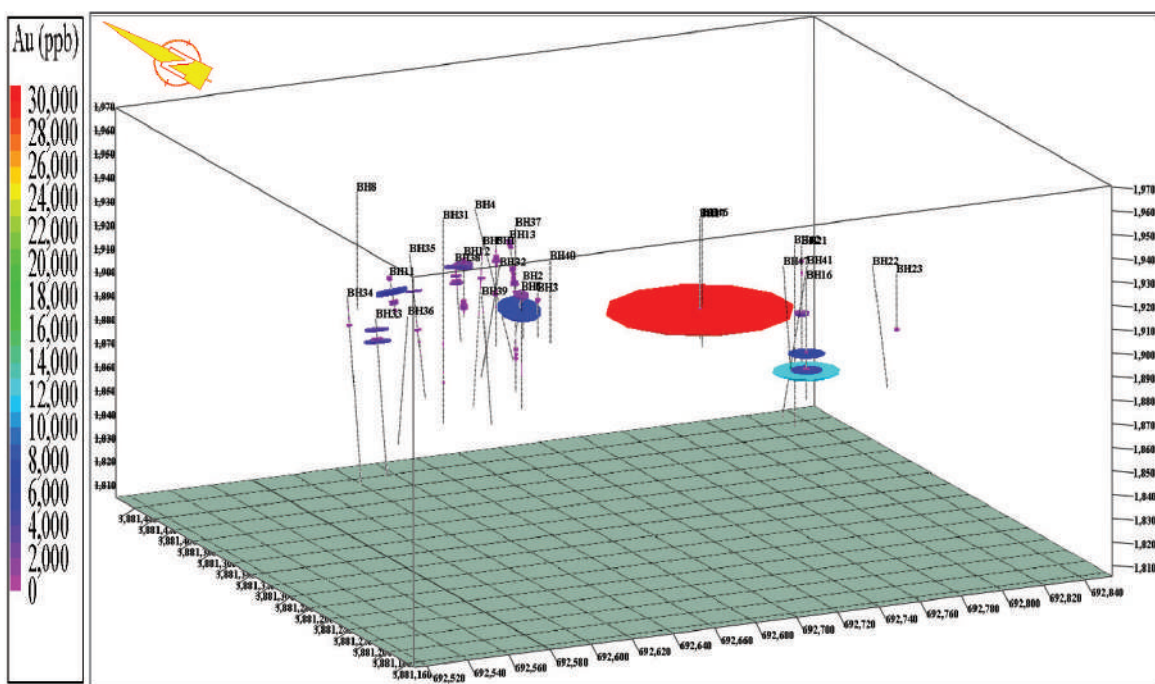
براساس مطالعات چشمی مغزه‌ها، مشخصات زمین‌شناسی شامل کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی، دگرسانی‌ها، رنگ ظاهری و غیره و نیز با استفاده از داده‌های عیارسنجی حاصل از تجزیه شیمیایی مغزه‌ها، ابتدا به کمک نرم‌افزار Rockworks از طریق رسم چاه‌نگار^۳ سه‌بعدی عیارسنجی گمانه‌ها و مدل سه‌بعدی لیتولوژی شناخت کاملی از کانسار طلای زرزیمای موجش صورت گرفته است. در شکل ۳ مدل سه‌بعدی سنگ‌شناسی گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای نشان داده شده است. در این شکل‌ها واحد اندازه‌گیری اعداد محورهای افقی و قائم، متر می‌باشد. براساس راهنمای رنگی این شکل، تنوع سنگ‌شناسی در گستره به نسبت زیاد است، به‌گونه‌ای که تعداد ۱۵ واحد لیتولوژی قابل تشخیص است. مطابق این شکل سنگ‌آهک، توف، آندزیت، دیوریت، سنگ‌آهک مارنی، سیلیس و باریت عمده‌ترین واحدهای سنگی تشکیل‌دهنده گستره می‌باشند. به‌طور کلی واحدهای سنگی سنگ‌آهک، توف‌ها و سیلیس در سطح گستره، بیشتر به چشم می‌خورند. برای ساخت مدل سه‌بعدی سنگ‌شناسی به‌منظور طرح اختلاط لیتولوژی، از الگوریتم اختلاط تصادفی به‌همراه درون‌یابی مقادیر خارج از گستره با سلول‌هایی به ابعاد ۵×۵×۵ متر استفاده شده است. این الگوریتم مدل‌سازی سنگ‌شناسی خاص، از پایه برای پرکردن فضای خالی بین چاه‌نگارها استفاده می‌شود. درون‌یابی مقادیر خارج از گستره نیز همانند عملیات برون‌یابی است که منجر به درون‌یابی کامل و به‌نقشه درآمدن تمام گستره به‌ویژه حاشیه‌ها می‌شود (Tutorial-RockWare).

شکل ۴ نمایش سه‌بعدی چاه‌نگار عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی کل کانسار طلای زرزیمای می‌باشد. در این شکل

1. Strip-log
2. Boring Cylinder
3. Drill run



شکل ۳. مدل سه‌بعدی سنگ‌شناسی گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای موش (واحد اندازه‌گیری اعداد محورهای افقی و قائم، متر می‌باشد)

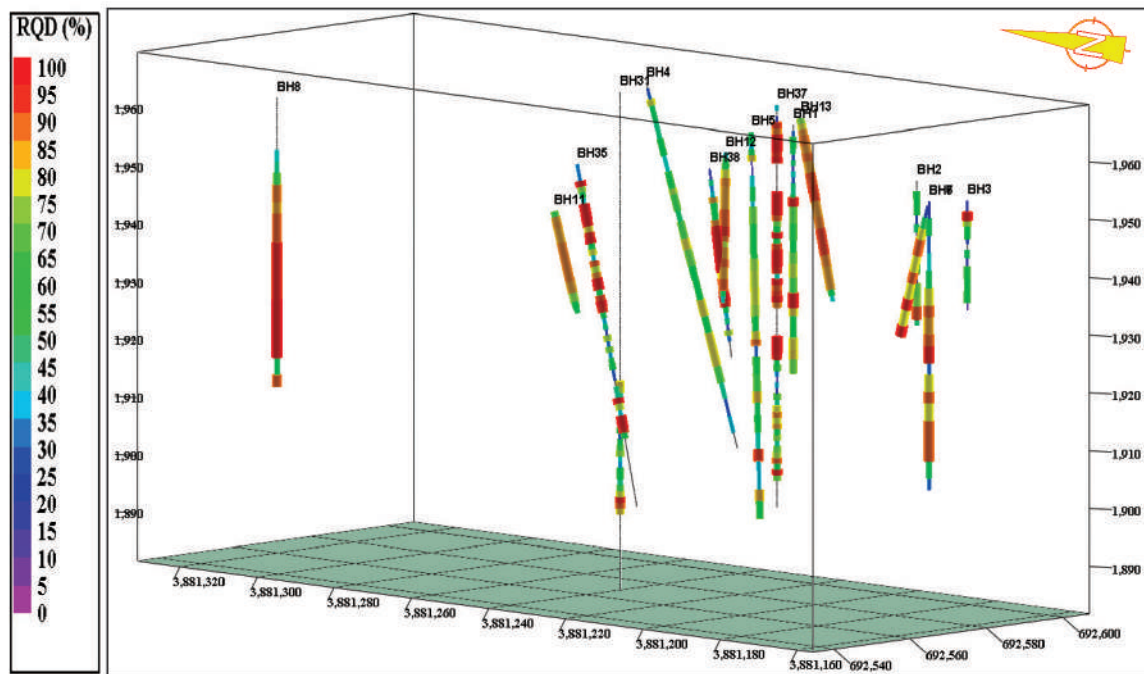


شکل ۴. نمایش سه بعدی چاه‌نگار عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی کل کانسار طلای زرزیمای موش

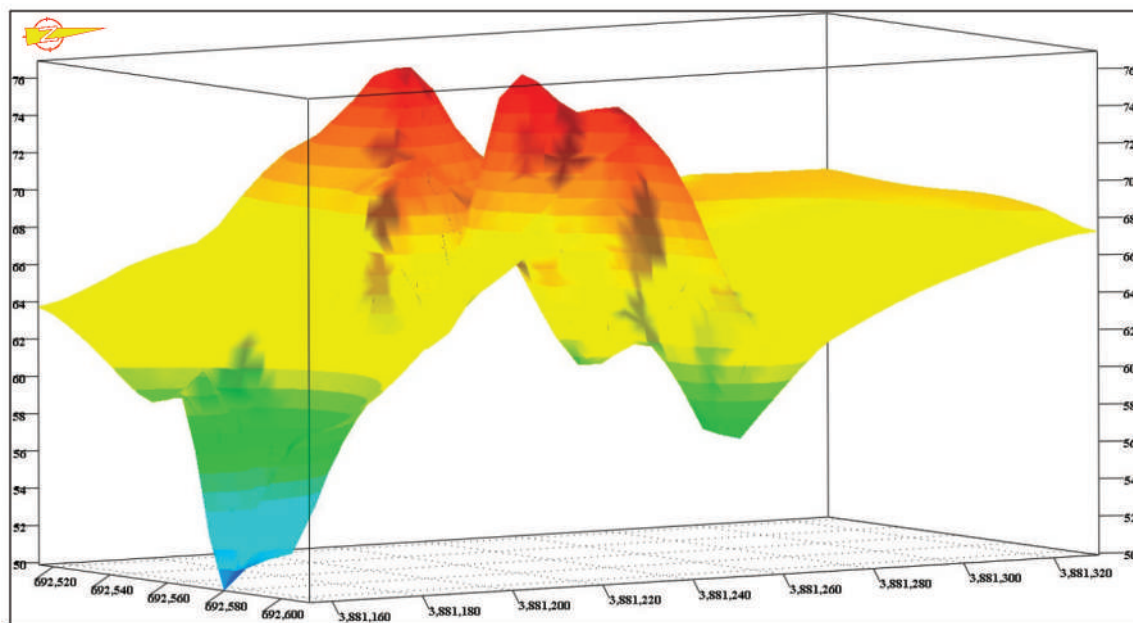
مغزه‌های حاصل از حفاری گمانه‌ها نشان می‌دهد. شکل ۶ نیز نقشه سه‌بعدی آماری داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای را نشان می‌دهد. برای رسم این نقشه، ابتدا مقدار میانگین RQD هر گمانه به موقعیت دهانه آن گمانه نسبت داده شد، سپس شبکه‌بندی صورت گرفت و با استفاده از الگوریتم عکس مجذور فاصله، درون‌یابی انجام

Hencher, 2015; Jaeger et al., 2007; Carter, 1992; Goodman, 1991; Bieniawski, 1989; Deere, 1989, 1963) و بارش‌های مختلفی تعیین می‌شود (Xu et al., 2023).

شکل ۵ چاه‌نگار سه‌بعدی تغییرات عمقی مقادیر RQD گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای را با استفاده از



شکل ۵. نمایش سه‌بعدی چاه‌نگار RQD گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای موجش



شکل ۶. نقشه سه‌بعدی آماری داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی کانسار طلای زرزیمای موجش

شکل مشاهده می‌شود که متوسط مقادیر RQD سنگ‌های کانسار در بخش میانی گستره، بالای ۷۰ درصد (زیاد) و در بخش مرکزی نیمه شمالی و نیز جنوب گستره، زیر ۶۰ درصد (متوسط) است.

شد. ترکیب رنگ‌بندی هم بدین صورت است که به کمترین مقدار RQD رنگ آبی تیره، به مقدار متوسط، رنگ زرد و به بیشترین مقدار، رنگ قرمز تخصیص داده شده و در فاصله بین آن‌ها ترکیب رنگی به‌طور خودکار از رنگ‌های سردا به گرم^۲ تغییر می‌کند. به‌منظور دید بهتر، در راستای قائم ۳/۵ برابر بزرگ‌نمایی صورت گرفته است. با توجه به این

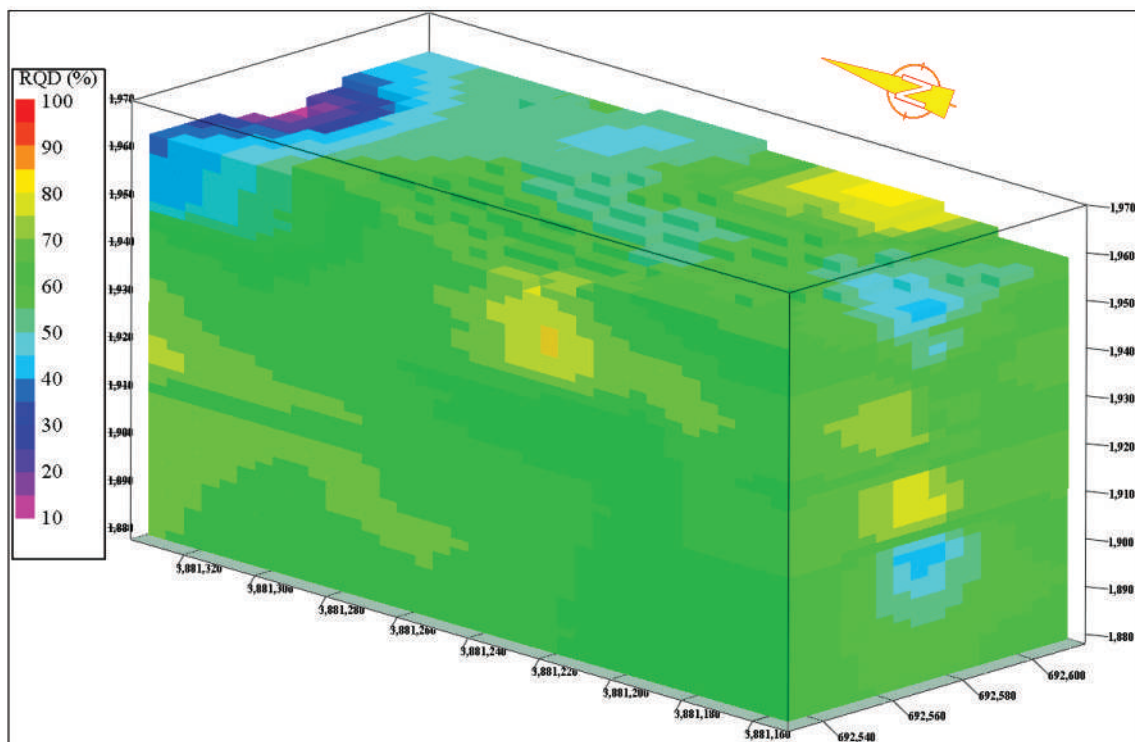
1. Cold
2. Hot

مختلف تقسیم شده است. مطابق این شکل سختی سنگ در بخش بزرگی از گستره، به نسبت زیاد (بین ۵۰ تا ۷۵ درصد) و در بخش کوچکی از شمال گستره بسیار کم است.

پردازش آماری اولیه داده‌های عیارسنجی

به منظور بررسی ویژگی‌های آماری و تعیین نحوه توزیع داده‌های عیارسنجی طلائی گمانه‌های اکتشافی و کارهای اکتشافی سطحی، تجزیه و تحلیل آماری روی این متغیر صورت گرفت. در شکل ۸ نمودار فراوانی‌نما و توزیع احتمال تجمعی داده‌های خام و تبدیل‌یافته عیارسنجی طلا در کل کانسار نشان داده شده است. مطابق این شکل توزیع داده‌های عیارسنجی طلا در کل کانسار از نوع نرمال نیست بلکه از نوع لاگ نرمال می‌باشد.

در شکل ۷ مدل سه‌بعدی داده‌های RQD کانسار طلائی زرزیمای نشان داده شده است. برای ساخت این مدل نیز از یک مدل شبکه‌ای مکعب مستطیلی شکل به ابعاد $۷۵ \times ۱۷۵ \times ۸۸$ متر با سلول‌های $۵ \times ۵ \times ۲$ متری و داده‌های RQD نمونه‌های حفاری گمانه‌های اکتشافی، به کمک الگوریتم عکس فاصله وزن‌دار پیش‌رفته استفاده شده است. در این شکل برای دید بهتر، ارتفاع گمانه‌ها تا $۳/۵$ برابر بزرگ‌نمایی شده است. بیشترین تعداد داده‌های شرکت‌کننده در تخمین هر نقطه بر اساس سعی و خطا، در هر سلول ۲۰ عدد و در داخل گمانه، یک عدد انتخاب شد. راهنمای رنگی این شکل تغییرات میزان RQD در گستره را برحسب درصد نشان می‌دهد. مطابق این شکل تغییرات RQD منطقه مورد مطالعه با کمترین مقدار ۱۰ و بیشترین مقدار ۱۰۰ درصد به ۱۸ گستره رنگی با رنگ‌های

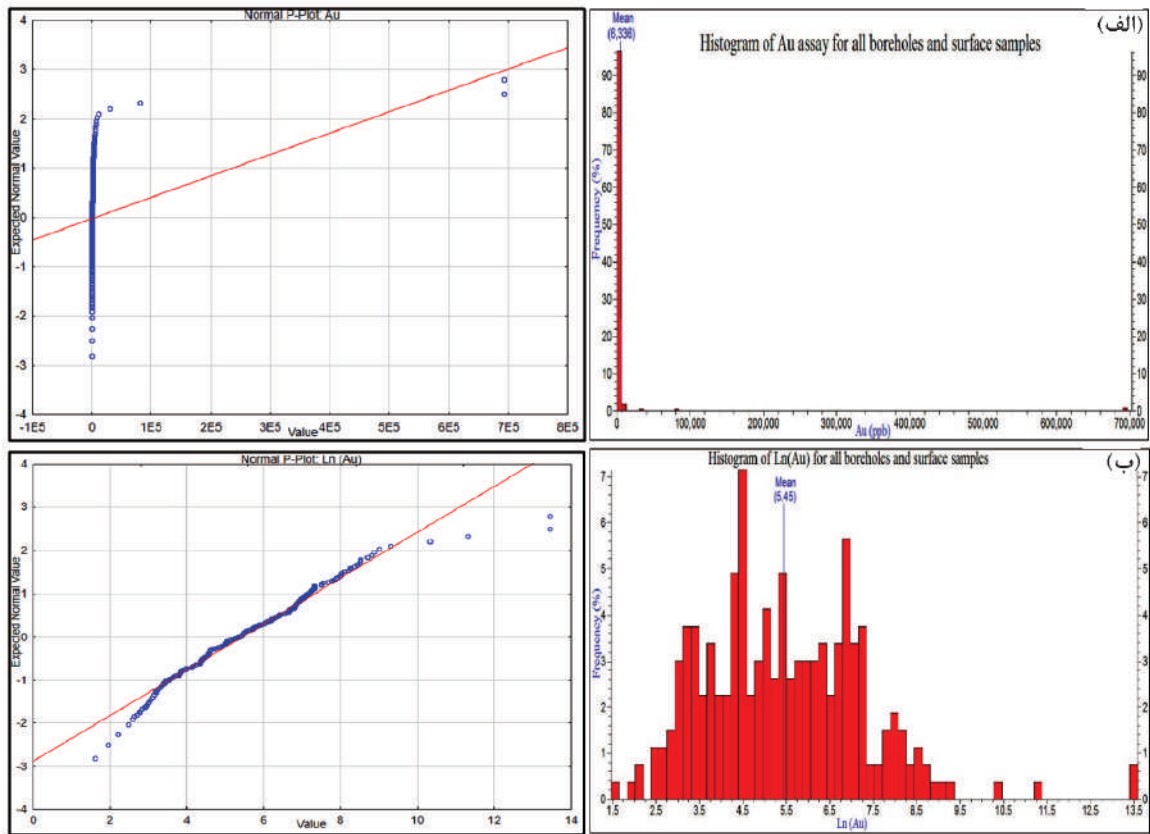


شکل ۷. مدل سه‌بعدی داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی کانسار طلائی زرزیمای موش

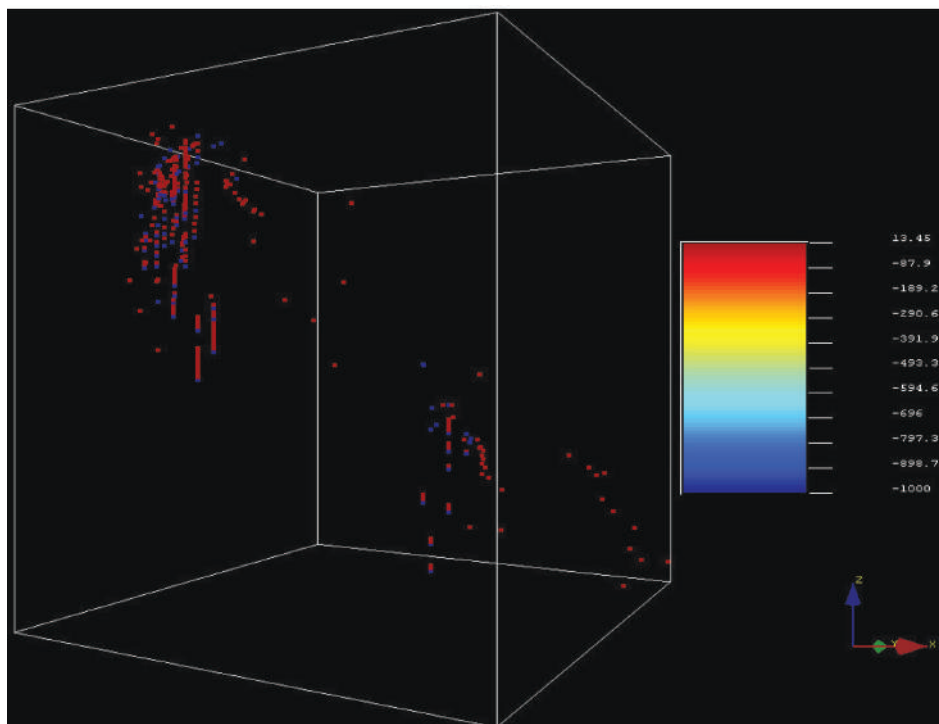
(2006 نشان داده شده است. در این شکل ابعاد شبکه (بلوک بزرگ) دربرگیرنده داده‌ها، $۲۶۰ \times ۳۵۱ \times ۱۳۵$ متر و اندازه هر سلول $۲ \times ۲ \times ۱$ متر انتخاب شده است. همچنین به منظور دید بهتر، ارتفاع گمانه‌ها تا پنج برابر بزرگ‌نمایی شده است.

در شکل ۹ موقعیت پراکندگی سه‌بعدی نمونه‌های سطحی و ۳۰ حلقه گمانه اکتشافی برداشت شده در سطح گستره کانسار طلائی زرزیمای به همراه تغییرات لگاریتم عیار طلا در آن‌ها و مرز گستره بلوک‌بندی شده، به کمک نرم‌افزار SGeMS (Remy, 2009; Bohling, 2007; Remy

طراحی اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌های تخمین ذخیره بر اساس معیارهای مختلف ...



شکل ۸. نمودار فراوانی‌نما و توزیع احتمال، الف) داده‌های عیارسنجی طلا، ب) داده‌های تبدیل‌یافته عیارسنجی طلا در کل کانسار طلای زرزیمای موجش

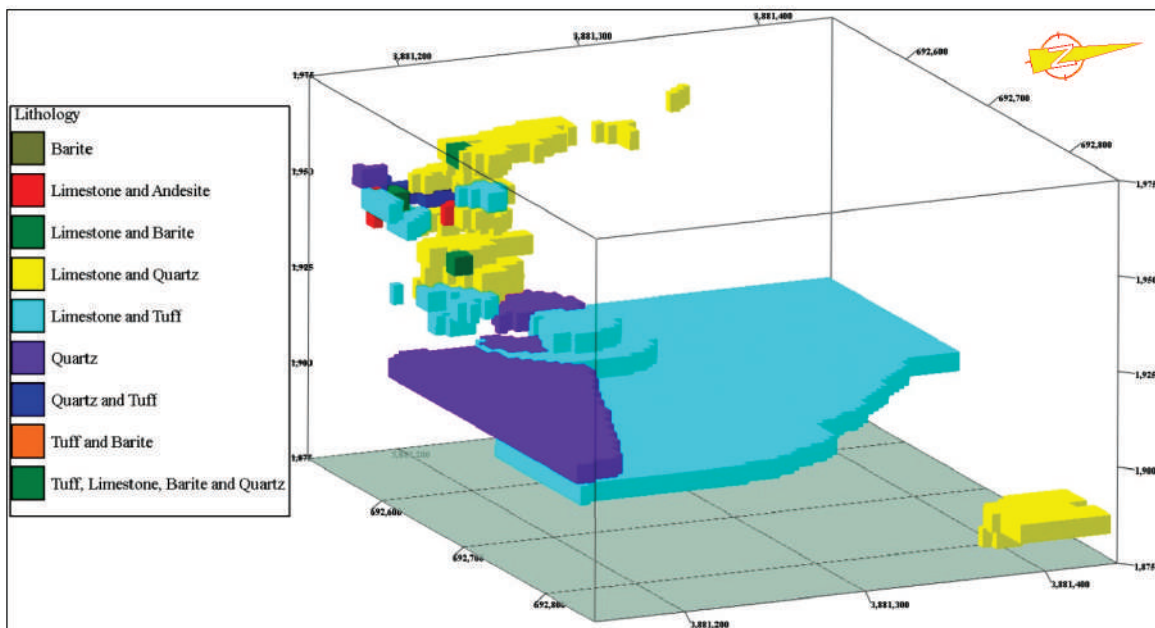


شکل ۹. نمایش موقعیت فضایی لگاریتم داده‌های عیارسنجی طلای نمونه‌های سطحی و گمانه‌های اکتشافی کانسار زرزیمای موجش درون گستره بلوکی در نرم‌افزار SGeMS

مدل سه‌بعدی لیتولوژی ذخیره

صورت گرفته است. مطابق این شکل ماده معدنی در نه نوع لیتولوژی وجود دارد که به‌صورت پراکنده و البته در مجموع بخش کوچکی از کل حجم گستره را تشکیل می‌دهند. این مدل به‌عنوان یک راهنمای اولیه در ساخت مدل جامد کانسار براساس داده‌های عیارسنجی، کمک‌کننده خواهد بود.

در شکل ۱۰ مدل جامد ماده معدنی کانسار طلای زرزیمما فقط به کمک لیتولوژی ایجاد شده است. در واقع این مدل به‌کمک تمام انواع لیتولوژی‌های دارای ماده معدنی در گستره، ساخته شده است. سلول‌های تشکیل‌دهنده این مدل به ابعاد ۵×۵×۵ متر هستند و به‌منظور نمایش بهتر در این شکل، بزرگ‌نمایی در راستای قائم تا دو برابر



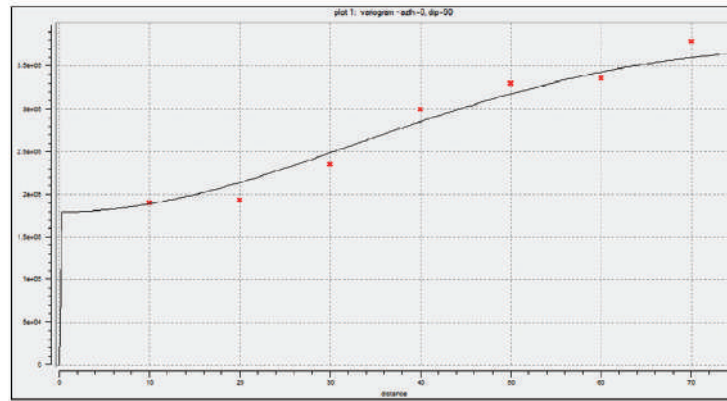
شکل ۱۰. مدل جامد ماده معدنی کانسار طلای زرزیمما موحش به کمک لیتولوژی

تجزیه و تحلیل ساختار فضایی داده‌های عیارسنجی طلا

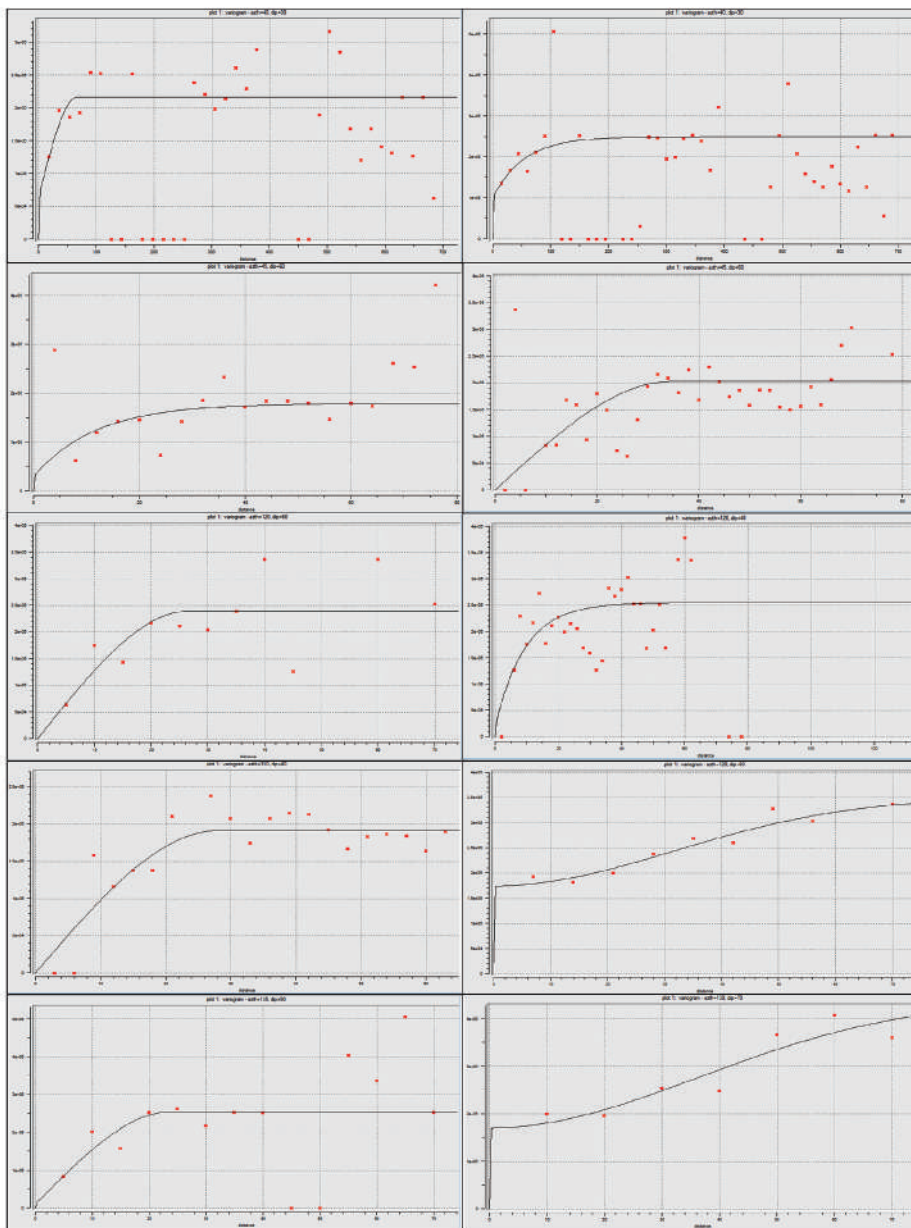
داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ساختار فضایی حاکم بر توزیع عیار در این گستره در فواصل کم به‌خوبی در تغییرنا عمقی پدیدار شده است. به‌منظور تجزیه و تحلیل ساختار فضایی گستره به‌جز تغییرنا در راستای عمقی، تغییرناهای امتدادی با آزمون‌های ۴۰، ۴۵، ۱۲۰، ۱۳۰ و ۱۳۵ درجه نیز رسم شد. نمودار تغییرناهای امتدادی رسم‌شده در جهت‌های مختلف، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

برای تشخیص ساختار فضایی عیار طلای حاکم بر گستره، تغییرناهای امتدادی (Hassani-pak, 1998; Rendu, 1981) در جهت‌های مختلف رسم شد. پارامترهای اولیه مربوط به محاسبه تغییرناها براساس هندسه شبکه حفاری و متوسط طول نمونه‌های مغزه‌ای، انتخاب شدند. با توجه به لاگ‌نرمال بودن توزیع داده‌های عیارسنجی طلا، به‌منظور اجتناب از پیدایش ناهمسانگردی دروغین، واریوگرافی برای مقادیر تبدیل‌یافته انجام شد. در شکل ۱۱ نمودار تغییرنا در راستای عمقی (با شیب ۹۰ درجه) نشان

طراحی اندازه و ابعاد بهینه بلوک‌های تخمین ذخیره بر اساس معیارهای مختلف ...



شکل ۱۱. تغییرنمای داده‌های عیارسنجی طلا در راستای عمقی



شکل ۱۲. تغییرنماهای امتدادی رسم‌شده در جهت‌های مختلف برای داده‌های عیارسنجی طلا

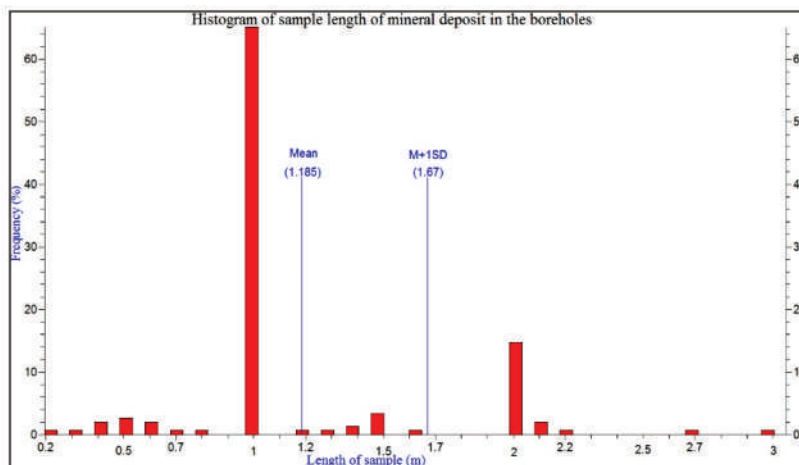
جدول ۳. مشخصات بیضوی جستجو

پارامتر	راستا (درجه)	طول (متر)	شیب (درجه)
شعاع بزرگ	۳۱۰	۲۶	۴۰
شعاع متوسط	۴۵	۲۰	۶۰
شعاع کوچک	۱۳۵	۱۴	۵۰

ساخت مدل سه‌بعدی کانسار

در شکل ۱۳ نمودار درصد فراوانی طول نمونه‌های مغزه‌ای نشان داده شده است. مطابق این شکل بیشترین فراوانی، مربوط به طول نمونه‌های برابر با یک متر است و ۸۴ درصد از نمونه‌ها دارای طولی کمتر از ۱/۷ متر هستند. بنابراین برای هم‌وزن کردن داده‌ها، طول یک متر برای کامپوزیت‌سازی نمونه‌ها انتخاب شد.

مطابق نمودار تغییرنماهای امتدادی رسم شده در شکل ۱۲ انواع مدل‌های تئوری تغییرنما شامل کروی، گوسی و نمایی بر تغییرنماهای تجربی امتدادی در جهت‌های مختلف، منطبق شده‌اند. همچنین تغییرنماهای امتدادی در جهت‌های مختلف دارای سقف کم‌وبیش یکسان ولی شعاع تاثیر متفاوت هستند؛ بنابراین منطقه مورد مطالعه دارای ناهمسانگردی از نوع هندسی می‌باشد. برای تغییرنماهای امتدادی نوع کروی، $\frac{2}{3}$ دامنه تاثیر تغییرنما و برای تغییرنما نوع نمایی مقدار فاصله همانند ۹۵٪ سقف تغییرنما به عنوان شعاع جستجو منظور شد. با برازش یک بیضوی بر شعاع‌های تاثیر تغییرنماهای امتدادی مختلف، شعاع‌های بیضوی جستجوی نهایی برای عبار طلا در گستره، مطابق جدول ۳ انتخاب شد. این پارامترها در تخمین با روش درون‌یابی لاگ کریجینگ معمولی بکار گرفته می‌شوند.



شکل ۱۳. نمودار درصد توزیع فراوانی طول نمونه‌ها

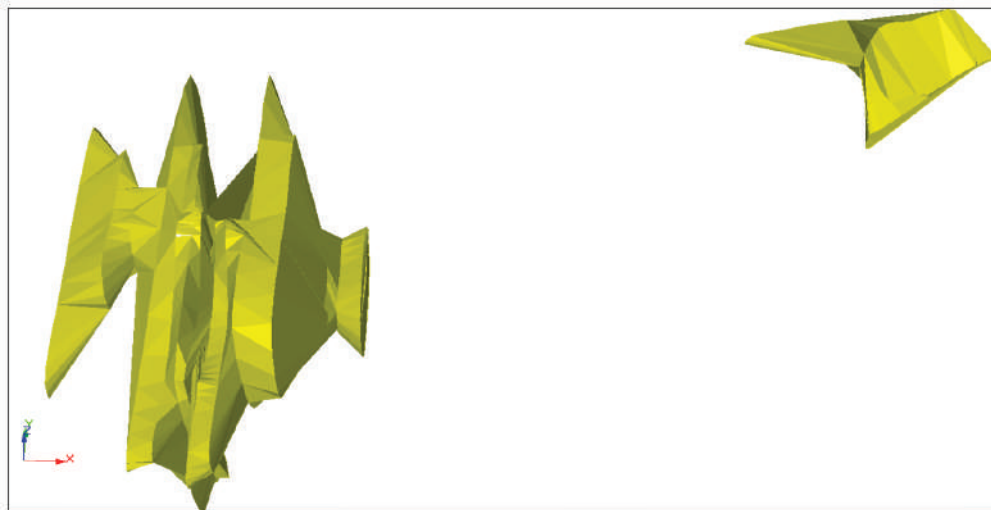
ابتدا لازم است که چال‌های انفجار حفر شود و بعد از خرج‌گذاری، کانسار منفجر شود تا توده سنگ به قطعات کوچک‌تر و قابل بارگیری تبدیل شود. همواره چال‌های انفجار به صورت شبکه‌های منظم مربعی یا مستطیلی طراحی می‌شوند. فاصله بین چال‌ها در یک ردیف را فاصله ردیفی چال‌ها می‌گویند که برای انفجارهای متعارف همواره بیشتر از اندازه بارسنگ می‌باشد. فرمول کلی بین بارسنگ (S) و فاصله ردیفی چال‌ها (B) به صورت رابطه ۲ است (افروغ، ۱۳۸۹):

$$S = (1-2)B \quad (2)$$

قبل از تخمین عیار باید ابتدا فضای تخمین مشخص شود که این موضوع از طریق ساخت مدل رشته‌ای و سپس مدل جامد کانسار انجام می‌شود. بر این اساس با استفاده از موقعیت نمونه‌های گستره کانسار، ساخت مدل رشته‌ای انجام شده و با اتصال آن‌ها مطابق شکل ۱۴ مدل جامد کانسار تولید شد.

ابعاد بهینه بلوک‌های کانسار

برای استخراج بسیاری از انواع مواد معدنی به‌ویژه کانسارهای فلزی همانند طلا، مس، سرب، روی و آهن



شکل ۱۴. مدل جامد کانسار طلای زرزیم (جهت شمال در راستای محور Y می‌باشد)

متوسط مقادیر داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی در گستره کانسار طلای زرزیم برابر با ۶۶/۵٪ است و مطابق مرجع (معاونت نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۰) این مقدار RQD متناظر با سنگ‌های بلوکی و سخت می‌باشد، بنابراین به هنگام انفجار و آتشیاری این توده کانسار باید فواصل چال‌های انفجار کم‌و‌بیش برابر با فاصله بارسنگ انتخاب شود. بنابراین، اندازه شبکه اولیه چال‌های انفجار برای این کانسار برابر با پنج متر طراحی می‌شود. در پژوهش حاضر به منظور تعیین ابعاد بهینه بلوک‌های کانسار طلای زرزیم، از معیارهای اندازه شبکه اکتشافی، پارامتر RQD و واریانس کریجینگ استفاده شد. در جدول ۴ معیارهای مورد نظر و اندازه و ابعاد نهایی بلوک‌های طراحی شده برای کانسار زرزیم خلاصه شده است.

در این رابطه هرچه نسبت ارتفاع پله (H) به بارسنگ بیشتر باشد، ضریب بزرگ‌تری در نظر گرفته می‌شود ولی در شرایط معمولی $S/B/4 = 1$ می‌باشد. در انتخاب فاصله ردیفی چال‌ها، شرایط زمین‌شناسی، نوع ماده منفجره، روش انفجار و تجربیات قبلی باید لحاظ شوند. یکی از موارد موثر در انتخاب ابعاد شبکه چال‌های انفجار میزان مقاومت یا سختی سنگ است که آن نیز با استفاده از معیارهای اندازه‌گیری همانند RQD تعیین می‌شود. ارتباط بین میزان RQD، وضعیت سنگ و بارسنگ نیز در مراجعی همانند (معاونت نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۰) آورده شده است. بنابراین با استفاده از مطالب مذکور و داده‌های مرجع (معاونت نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۹۰) می‌توان برای یک کانسار به کمک داده‌های RQD اندازه و ابعاد شبکه اولیه چال‌های انفجار را طراحی نمود. از آنجایی که

جدول ۴. معیارهای مورد نظر و اندازه و ابعاد نهایی بلوک‌های کانسار زرزیم

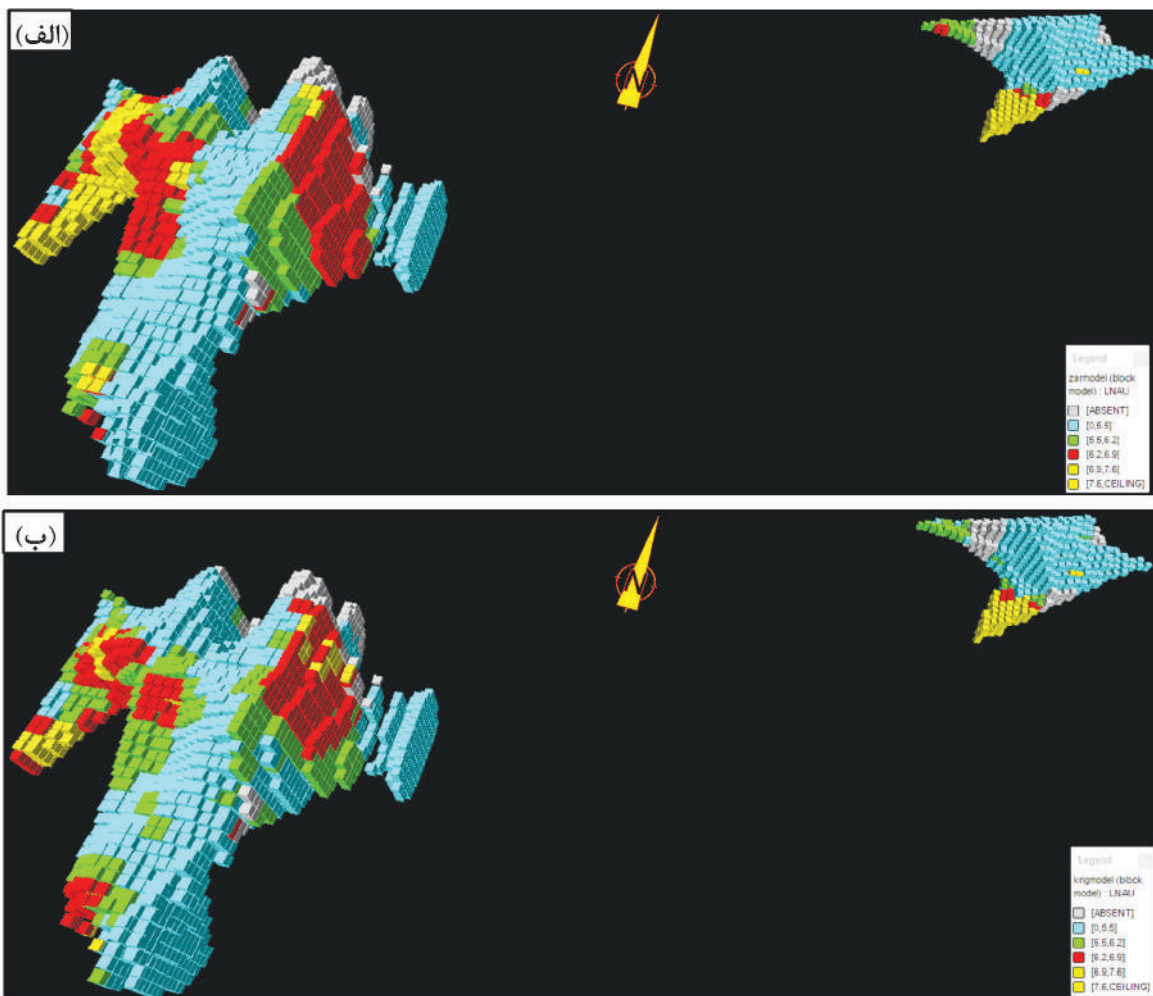
مقدار (متر)	پارامتر
۲۹۵	اندازه و ابعاد پهنه ۱
۲۱۰	طول
۱۷۰	عرض
۹۰	اندازه و ابعاد پهنه ۲
۲۵×۲۵	اندازه شبکه گمانه‌های اکتشافی
۵×۵	طراحی اندازه شبکه چال‌های آتشیاری و انفجار بر اساس RQD
۵×۵×۲	اندازه و ابعاد بلوک‌های تخمین
۲/۵×۲/۵×۱	اندازه و ابعاد زیربلوک‌های تخمین

ساخت مدل بلوکی و تخمین ذخیره کانسار

درون‌یابی عکس مجذور فاصله و لاگ کریجینگ معمولی با استفاده از نرم‌افزار Datamine ایجاد شد. سپس با اعمال پارامترهای بیضوی جستجو، تخمین عیار هر بلوک با دو روش مذکور مطابق شکل ۱۵ انجام گرفت.

براساس وضعیت ماده معدنی، میزان و نحوه کارهای اکتشافی انجام شده و اطلاعات اکتشافی موجود، برای محاسبه ذخیره کانسار طلای زرزیم با میان‌روشی‌های مختلف محاسبه ذخیره، دو روش عکس مجذور فاصله و لاگ کریجینگ معمولی استفاده شد و نتیجه‌های آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. روش عکس مجذور فاصله از دقیق‌ترین روش‌های هندسی تخمین ذخیره است و به همین دلیل از این روش نیز همراه با روش کریجینگ معمولی برای تخمین

برای انجام عملیات تخمین بعد از ساخت مدل جامد کانسار، فضای تخمین به بلوک‌های کوچک تقسیم می‌شود تا امکان تخمین عیار هر بلوک از طریق عیار نمونه‌های معلوم درون و بیرون آن فراهم شود. در پژوهش حاضر برای ایجاد مدل بلوکی کانسار، اندازه اولیه هر بلوک مادر (اصلی) براساس اطلاعات موجود تا این مرحله از فرآیند، پنج در پنج متر در جهت‌های افقی و دو متر در جهت قائم انتخاب شد. همچنین به منظور تخمین دقیق‌تر و تفکیک بهتر کانسنگ از باطله به‌ویژه در مرزها، بلوک‌های اصلی با این ابعاد به بلوک‌های کوچک‌تر (زیربلوک‌ها) با اندازه ۲/۵ در ۲/۵ متر در جهت‌های افقی و یک متر در جهت قائم تبدیل شدند. با معرفی مدل جامد و ابعاد بلوک‌ها، مدل بلوکی با دو روش

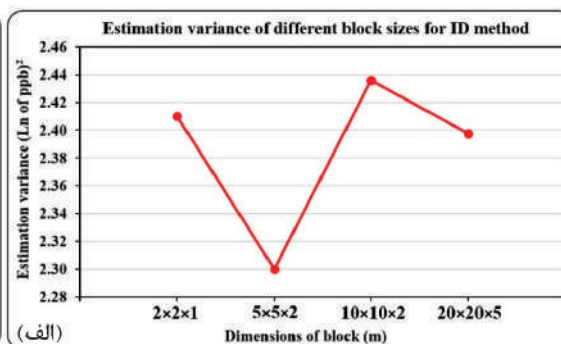
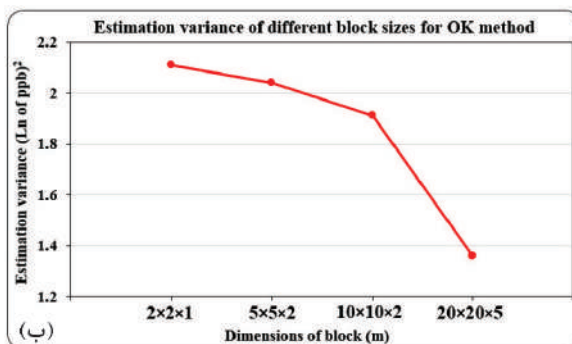


شکل ۱۵. مدل بلوکی عیار کانسار طلای زرزیم با روش‌های (الف) عکس مجذور فاصله، (ب) لاگ کریجینگ معمولی

بلوک، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر نمودار شکل ۱۶ درستی فرایند تخمین با روش لاگ کریجینگ معمولی را تایید می‌کند. اگرچه کمترین میزان واریانس تخمین عیار مربوط به اندازه بلوک $20 \times 20 \times 5$ متر است، ولی براساس تمام معیارهای بیان شده در پژوهش حاضر، اندازه بلوک $5 \times 5 \times 2$ متر به‌عنوان اندازه بلوک بهینه برای تخمین عیار و ذخیره کانسار مورد مطالعه با روش لاگ کریجینگ معمولی انتخاب شد. بدون در نظر گرفتن عیار حد، برای روش کریجینگ معمولی متوسط عیار تمام بلوک‌های کانسار برابر با $383/35$ میلی‌گرم بر تن و متوسط واریانس تخمین عیار تمام بلوک‌ها برابر با $2/04$ (لگاریتم میلی‌گرم بر تن)^۲ به دست آمد. همچنین برای روش عکس مجذور فاصله، متوسط عیار تمام بلوک‌های کانسار برابر با $514/72$ میلی‌گرم بر تن و متوسط واریانس تخمین عیار تمام بلوک‌ها برابر با $2/3$ (لگاریتم میلی‌گرم بر تن)^۲ محاسبه شد.

ذخیره کانسار طلای زرزیم استفاده شد. برای تخمین متوسط عیار و میزان ذخیره کانسار طلای زرزیم با روش‌های مذکور، به منظور دستیابی به نتیجه‌های مطلوب براساس اندازه و ابعاد بهینه بلوک، ابتدا مقدار متوسط عیار طلا و واریانس تخمین مربوطه به‌ازای اندازه بلوک‌های مختلف تعیین شد. در شکل ۱۶ نتیجه‌های این بررسی‌ها به‌صورت نمودار تغییرات واریانس تخمین عیار به‌ازای اندازه بلوک‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۶-الف برای روش عکس مجذور فاصله، میزان واریانس تخمین عیار به‌ازای اندازه بلوک $5 \times 5 \times 2$ متر نسبت به سایر اندازه بلوک‌ها کمتر است. در نتیجه این اندازه بلوک به‌عنوان اندازه بهینه بلوک برای تخمین عیار و ذخیره کانسار مورد مطالعه با روش عکس مجذور فاصله، انتخاب شد.

با توجه به شکل ۱۶-ب و مطابق انتظار در روش کریجینگ، میزان واریانس تخمین عیار با افزایش اندازه



شکل ۱۶. نمودار تغییرات واریانس تخمین عیار کانسار طلای زرزیم با روش‌های الف) عکس مجذور فاصله، ب) لاگ کریجینگ معمولی به‌ازای اندازه بلوک‌های مختلف

عیار حد (به‌جز عیار حد 2000 ppb) متوسط عیار تخمینی با روش عکس مجذور فاصله از روش لاگ کریجینگ معمولی بیشتر است. همچنین میزان ذخیره محاسبه شده به‌ازای عیار حد‌های پایین (250 ppb) و بالا (2000 ppb) با دو روش عکس مجذور فاصله و لاگ کریجینگ معمولی کم و بیش برابر است، در حالی‌که به‌ازای عیار حد‌های 500 و 1000 میلی‌گرم بر تن مقادیر تخمینی توسط روش عکس مجذور فاصله بیشتر است.

شکل ۱۷ نیز نمودار عیار-تناژ کانسار طلای زرزیم را به‌ازای عیار حد‌های مختلف با استفاده از روش‌های به‌کاررفته

بر اساس شرایط استخراج، ارزش روز ماده معدنی و ارزش فلز طلا در آینده، عیار حد‌های 250 ، 500 ، 1000 و 2000 ppb برای این کانسار انتخاب گردید و میزان ذخیره ماده معدنی به‌ازای عیار حد‌های مذکور محاسبه شد. نتیجه‌های محاسبه متوسط عیار، میزان ذخیره و متوسط واریانس تخمین عیار کانسار در جدول ۵ خلاصه شده است. وزن مخصوص متوسط ماده معدنی نیز براساس نتیجه‌های آزمایش تعداد سه نمونه (دو نمونه از گمانه‌ها و یک نمونه از ترانشه‌ها) برابر با $2/7$ گرم بر سانتی‌متر مکعب منظور شد. با توجه به داده‌های این جدول، به‌ازای اغلب مقادیر

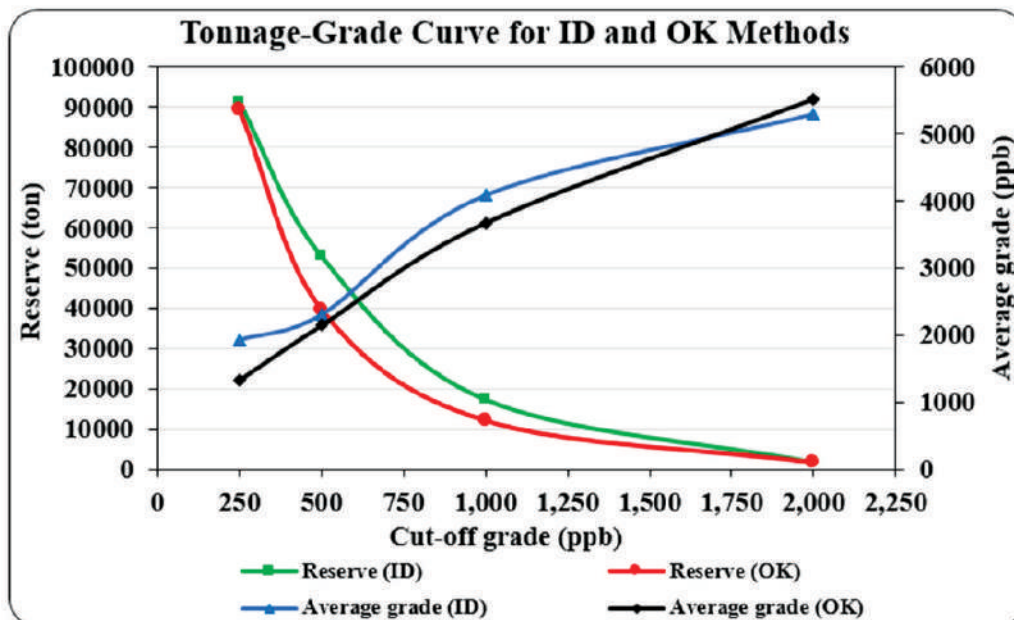
جدول ۵. نتیجه‌های تخمین ذخیره کانسار طلای زرزیم با روش‌های مختلف

روش تخمین ذخیره	عیار حد (میلی‌گرم بر تن)	عیار متوسط (میلی‌گرم بر تن)	میزان ذخیره (تن)	متوسط واریانس تخمین عیار (میلی‌گرم بر تن) ^۲
عکس مجذور فاصله	۲۵۰	۱۹۳۱/۳۵	۹۱۲۴۳/۱۳	۲/۳۱
	۵۰۰	۲۳۰۹/۰۱	۵۳۰۰۴/۳۸	۱/۹۲
	۱۰۰۰	۴۰۸۶/۷۲	۱۷۳۸۱/۲۵	۲/۰۸
	۲۰۰۰	۵۲۹۶/۳۲	۱۸۲۲/۵۰	۱/۶۷
لاگ کریجینگ معمولی	۲۵۰	۱۳۲۹/۳۱	۸۹۰۶۶/۲۵	۱/۸۶
	۵۰۰	۲۱۴۰/۲۳	۳۹۶۷۳/۱۳	۱/۷۸
	۱۰۰۰	۳۶۶۲/۶۷	۱۲۱۶۶/۸۸	۱/۷۸
	۲۰۰۰	۵۵۰۳/۹۳	۱۸۳۹/۳۸	۱/۶۱

تخمین عیار با روش لاگ کریجینگ معمولی به ازای تمام عیارهای حد مختلف، نسبت به روش عکس مجذور فاصله کمتر است و مطابق انتظار عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. به هرجهت اگرچه روش لاگ کریجینگ معمولی روش دقیق‌تری نسبت به روش عکس مجذور فاصله است ولی عدم امکان بازیابی واریانس تخمین، از معایب آن است. نکته پایانی آنکه روش‌های تخمین زمین‌آماری در صورت در دسترس بودن تعداد داده اکتشافی کافی و وجود ارتباطات فاصله‌ای و فضایی بین داده‌ها، همواره از تمام روش‌های تخمین هندسی دقیق‌تر هستند.

نشان می‌دهد. مطابق این شکل، به‌طور کلی روند نمودارهای عیار-تناژ کانسار یعنی افزایش میزان عیار متوسط و کاهش میزان ذخیره کانسار با افزایش میزان عیار حد، درستی انجام فرآیند تخمین را تایید می‌کنند.

اما پاسخ این سوال که کدام روش بهتر است و همواره باید مورد استفاده قرار گیرد، به عوامل زیادی از جمله شرایط و خصوصیات کانسار، وضعیت داده‌های اکتشافی و میزان شناخت از کانسار بستگی دارد. یکی از معیارهای مقایسه و سنجش عملکرد دو روش تخمین، میزان واریانس تخمین است. داده‌های جدول ۵ نشان می‌دهد که میزان واریانس



شکل ۱۷. نمودار عیار-تناژ کانسار طلای زرزیم با روش‌های مختلف

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل‌سازی بلوکی کانسار طلای زرزیمای موچش با استفاده از بلوک‌های با اندازه و ابعاد بهینه به‌منظور تخمین عیار و میزان ذخیره کانسار صورت گرفت. برای دستیابی به هدف، تمامی عوامل موثر بر روی انتخاب اندازه و ابعاد بهینه بلوک شامل اندازه و ابعاد شبکه حفر گمانه‌های اکتشافی (اندازه شبکه اکتشاف)، اندازه و ابعاد گستره کانسار، زمین‌شناسی کانسار، پارامتر شاخص کیفی سنگ و میزان خطای تخمین بلوک‌ها مد نظر قرار گرفت و با در نظر گرفتن همه عوامل، در نهایت اندازه بلوک‌های تخمین 5×5 متر در راستاهای افقی و دو متر در راستای قائم تعیین شد. در ادامه مدل‌سازی بلوکی و تخمین متوسط عیار هر بلوک و میزان ذخیره کانسار با روش‌های دقیق هندسی عکس مجذور فاصله و زمین‌آماری لاگ کریجینگ معمولی بلوکی انجام شد. در نهایت به کمک میزان عیار و خطای تخمین عیار هر بلوک، متوسط عیار و میانگین خطای تخمین تمام بلوک‌های کانسار محاسبه شد.

در عمل هیچ روش نظری و محاسباتی مستقیمی برای تعیین اندازه بهینه بلوک‌های تخمین وجود ندارد و اغلب کاربران، اندازه بلوک‌ها را تن‌ها براساس یک معیار معمول انتخاب کرده و با سعی و خطا تلاش می‌کنند تا نتیجه‌های تخمین را با خطای کمتر همراه کنند. از آنجایی که اندازه بلوک‌های تخمین تاثیر مستقیم و چشم‌گیری بر روی دقت نتیجه‌های تخمین عیار و میزان ذخیره کانسارها می‌گذارند، بنابراین در پژوهش حاضر، استفاده از معیارهای تاثیرگذار دیگر بر روی اندازه بلوک‌ها همانند شاخص کیفی سنگ و میزان خطای تخمین علاوه بر معیارهای معمول، منجر به انتخاب اندازه بهینه بلوک‌های مدل بلوکی و در نتیجه درجه اعتماد بالای نتیجه‌های تخمین عیار و میزان ذخیره کانسار شد.

برای دستیابی به بهترین و مطلوب‌ترین نتیجه در انتخاب روش تخمین ذخایر معدنی نیز، بهتر است که برای محاسبه ذخیره یک کانسار از چند روش مختلف به‌ویژه از روش‌های نوین و دقیق زمین‌آماری استفاده کرد و نتیجه‌های آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود

در منطقه مورد مطالعه در موقعیت گره‌های شبکه اکتشافی فاقد گمانه اکتشافی به‌ویژه در فضاهای تهی بین گمانه‌های اکتشافی موجود، گمانه‌های اکتشافی جدید حفر شوند تا شبکه اکتشاف منظم‌تر شده و اطلاعات اکتشافی گستره کامل‌تر شود. نتیجه‌های این پژوهش برای کلیه متخصصین علوم زمین درگیر با مسائل زمین‌شناسی اقتصادی و تخمین و ارزیابی ذخایر معدنی، قابل اهمیت و کاربردی خواهد بود.

منابع

- احمدی، ر.، ۱۳۹۹. مقایسه نتیجه‌های روش‌های زمین‌آماری خطی و غیرخطی در مدل‌سازی و ارزیابی ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی ساوه، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۴، ۵۶، ۴۳-۵۹.
- افروغ، م.ر.، ۱۳۸۹. طراحی الگوی حفاری و انفجار به‌منظور تولید خوراک مناسب برای سنگ‌شکن معدن کارخانه سیمان بجنورد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- عسکری، ع.، کریم‌پور، م.ح.، مظاهری، س.ا.، ملک‌زاده‌شفاوردی، آ.، ۱۳۹۲. مدلسازی هندسی و برآورد ذخیره کانسار طلای شماره ۳ هیرد (جنوب بیرجند)، پنجمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، شهر مشهد.
- عطایی‌پور، م.، ۱۳۹۸. مبانی مدلسازی دوبعدی ذخایر معدنی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۳۲۶ ص.
- کاظمی مهرنیا، ا.، شرکت پارسی کان کاو، ۱۳۹۹. گزارش پایان عملیات اکتشافی محدوده طلا زرزیمای موچش- استان کردستان، ۱۶۸.
- معاونت نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، ۱۳۹۰. دستورالعمل طراحی و اجرای سیستم‌های نگهداری تونل‌های معدنی، نشریه شماره ۵۳۷.

- Ahmadi, R. and Ehsan-nejad, J., 2022. Employing non-linear geostatistical estimation methods for grade modeling and ore reserve estimation of Yazd, Aliabad copper deposit based on selecting optimal size of blocks. *Earth and Statistics*, 2(1): 1-12.

- Akingboye, A.S., 2023. RQD modeling using statistical-assisted SRT with compensated ERT methods: Correlations between borehole-based and SRT-based RMQ models, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 131, 103421.
- Azmi, H., Moarefvand, P. and Maghsoudi, A., 2020. Resource estimation of the Damanghor gold deposit (Brdaskan, Northeast Iran) based on geological and grade continuity. *Geopersia*, 10 (2): 381-394.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley, 272 p.
- Bohling, G., 2007. *SGeMS Tutorial Notes*, 26.
- Carter, T.G., 1992. Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessments. *Proceeding of 4th International rock mechanics and rock engineering conference*, Torino.
- Chanderman, L., Dohm, C.E. and Minnitt, R.C.A., 2017. 3D geological modelling and resource estimation for a gold deposit in Mali, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117 (2): 189-197, <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n2a10>.
- David, M., 1979. Grade and tonnage problems. *Computers method for the 80s in the mineral industry*. In: A. Weiss (ed). New York; 170-189.
- Deere, D.U., 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Felsmechanik undIngenieurgeologie*, 1: 16-22.
- Deere, D.U., 1989. Rock quality designation (RQD) after 20 years. U.S. Army Corporations Engineers Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
- Goodman, R.E., 1991. *Introduction to rock mechanics*, 2nd edition, Wiley, 576.
- Hassani-pak, A.A., 1998. *Geostatistics*. Tehran University Press, 314. (In Persian).
- Hencher, S.R., 2015. *Practical rock mechanics*, Taylor & Francis group, London, 374.
- Hulse, D.E., 1992. The consequence of block size decisions by ore body modeling. *The 23rd International Symposium on the Application and Operation Research in the Mineral Industry (APCOM23)*, 225-232.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W. and Zimmerman, R., 2007. *Fundamentals of rock mechanics*, 4th edition, Wiley-Blackwell, 488.
- Journel, A.G. and Huijbregts, Ch.J., 1978. *Mining geostatistics*. Academic Press, New York.
- Krige, D.G., 1996. A practical analysis of the effects of spatial tructure and of data available and accessed, on conditional biases in ordinary kriging, *International Geostatistics Congress*, Wollongong, Australia.
- Lukić, D. and Zlatanović, E., 2017. RQD classification of rock masses, 10th International scientific conference "Science and Higher Education in Function of Sustainable Development", Mećavnik- Drvengrad, Užice, Serbia.
- Pells, P.J., Bieniawski, Z.T., Hencher, S.R. and Pells, S.E., 2016. RQD: time to rest in peace, *Canadian Geotechnical Journal*, 54: 825-834.
- Remy, N., Boucher, A. and Wu, J., 2006. *SGeMS User's Guide*, 129.
- Remy, N., Boucher, A. and Wu, J., 2009. *Applied geostatistics with SGeMS: A User's Guide*.
- Rendu, J.M., 1981. *An introduction to geostatistical methods of mineral evaluation*, South African Institute of Mining and Metallurgy monograph series, Johannesburg, 84.
- Rossi, M.E. and Deutsch, C.V., 2014. *Mineral resource estimation*, 1st Edition, Springer Dordrecht Heidelberg New York London.
- Tutorial-RockWare,197. www.rockware.com/downloads/documentation/rockworks/rw16_tutorial_from_chm.pdf
- 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, 5th International Mining Geology Conference, Bendigo, Vic, 17-19 November.
- Xu, S., Ma, J. and Liang, R. 2023. Intelligent recognition of drill cores and automatic RQD analytics based on deep learning, Acta Geotechnica, 18: 6027-6050.
 - Zaki, M.M., Chen, S., Zhang, J., Feng, F., Khoreshok, A.A., Mahdy, M.A. and Salim, K.M., 2022. A novel approach for resource estimation of highly skewed gold using machine learning algorithms, Minerals 2022, 12, 900, <http://doi.org/10.3390/min12070900>.