

مدل‌سازی سه‌بعدی و ارزیابی ذخیره کانسار مس دره زرشک یزد با استفاده از روش‌های تخمین کلاسیک و زمین‌آماري

رضا احمدی^{۱*} و صادق فاضلی‌نسب^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

نویسنده مسئول: Rezahmadi@gmail.com *

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱۳

چکیده

در پژوهش حاضر به منظور شناخت کامل کانسار مس دره زرشک یزد، مدل سه‌بعدی چاه‌نگار لیتولوژی گمانه‌ها، نیمرخ‌های عرضی لیتولوژی و عیارسنجی منطبق بر پروفیل‌های پوشش‌دهنده کل محدوده و مدل سه‌بعدی لیتولوژی کانسار به کمک نرم‌افزار Rockworks ترسیم شد. بر این اساس لیتولوژی غالب منطقه را سنگ‌آهک، سنگ‌های اسکارنی، ماسه‌سنگ، دیوریت، گرانودیوریت، کوارتزت و مونزونیت تشکیل می‌دهند و سطح محدوده نیز بیشتر توسط روباره، شیل و آهک پوشیده شده است. بسته به شرایط کانسار برای تخمین ذخیره از روش کلاسیک عکس مجذور فاصله و روش زمین‌آماري کریجینگ با کمک نرم‌افزار Surpac استفاده شد. بر اساس واریوگرافی کانسار با استفاده از نرم‌افزار WinGslib کانسار دارای ناهمسانگردی هندسی است و مقدار شعاع تجسس بیشینه در راستای با آزیموت صفر درجه برابر با ۱۳۰ متر، شعاع تجسس متوسط در راستای با آزیموت ۹۰ درجه برابر با ۱۰۰ متر و شعاع تجسس کمینه در راستای قائم با آزیموت صفر درجه برابر با ۴۰ متر بدست آمد. بعد از مدلسازی هندسی و ساخت مدل بلوکی کانسار، تخمین ذخیره کانسار به‌ازای عیارحدهای ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد مس انجام شد و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شد. نتایج محاسبه ذخیره نشان می‌دهد که اختلاف میزان ذخیره محاسبه‌شده با روش‌های مذکور نسبتاً زیاد و مثلاً به‌ازای عیار حد ۰/۱٪ در حدود ۱۵۴۷۶۰۰ تن یعنی ۵/۷٪ می‌باشد. اگرچه روش عکس مجذور فاصله از دقیق‌ترین روش‌های کلاسیک تخمین ذخیره است، اما روش زمین‌آماري کریجینگ با در نظر گرفتن ساختار فضایی منطقه، به‌دلیل ناریب بودن و داشتن کمترین واریانس تخمین، دقیق‌تر بوده و از درجه اعتبار بیشتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: کانسار مس دره زرشک یزد، مدلسازی سه‌بعدی، نرم‌افزار WinGslib، عکس مجذور فاصله، کریجینگ، نرم‌افزار Surpac

پیشگفتار

تخمین، می‌تواند در کیفیت تخمین‌ها موثر واقع شود. به طور کلی روش‌های تخمین ذخایر معدنی را می‌توان به دو دسته روش‌های کلاسیک (هندسی) و زمین‌آماري طبقه‌بندی کرد (مدنی، ۱۳۷۶؛ حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). انتخاب روش محاسبه ذخیره، تابع وضعیت ماده معدنی و مشخصات کارهای اکتشافی است. روش‌های زمین‌آماري از جمله روش‌های نوین تخمین هستند که همواره محل چالش بوده و تحقیقات زیادی در این زمینه در حال انجام است. در ارتباط با این موضوع پژوهش، اخیراً پژوهش‌های چندی انجام شده که به چند مورد از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود.

حکمت‌نژاد و حسنی‌پاک (۱۳۹۰) به مطالعه موردی تخمین توزیع عیار مس با استفاده از تخمین‌گر غیرخطی

امروزه جایگاه، نقش و اهمیت مواد معدنی بر هیچ‌کس پوشیده نیست و نیاز روزافزون بشر سبب شده است که روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی برای پی‌جویی و اکتشاف مواد معدنی فلزی گوناگون به‌کار گرفته شود. پس از انجام اکتشافات عمومی و تفصیلی و اثبات وجود یک ذخیره اقتصادی قابل استخراج، باید خصوصیات ذاتی و توزیع فضایی کانسار مشخص شود. مدلسازی و ارزیابی ذخیره از مهم‌ترین مراحل عملیات اکتشافی هستند و نتایج این بخش‌ها نقش بسیار مهمی در تبدیل کانسار به کانه ایفا می‌کند. انتخاب بهترین تخمین‌گر یا بهترین روش تخمین و برآورد خطای تخمین، اهمیت زیادی دارد زیرا تخمین‌گرهای مختلف دارای توانایی‌ها و محدودیت‌هایی هستند که سازگار بودن یا نبودن آن‌ها با کانسار تحت

کانسار، برای محاسبه ذخیره بر اساس وضعیت ماده معدنی، میزان و نحوه کارهای اکتشافی انجام شده و اطلاعات اکتشافی موجود، از میان روش‌های مختلف محاسبه ذخیره، روش کلاسیک عکس‌مجذورفاصله و روش زمین‌آماری کریجینگ به کمک نرم‌افزار Surpac مورد استفاده قرار گرفته است.

موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کانسار مس دره‌زرشک در جنوب مرکزی ایران در فاصله ۶۵ کیلومتری جنوب‌باختر شهرستان یزد، ۴۵ کیلومتری جنوب‌باختر شهرستان تفت، در مسیر جاده یزد- شیراز و غرب روستای دره‌زرشک، در نیمه جنوبی ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خضراآباد (حاج ملاعلی و علوی نائینی، ۱۳۷۲)، جنوب غربی برکه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ دره‌زرشک و بین طول جغرافیایی $53^{\circ}49'59''$ تا $51^{\circ}01'33''$ و عرض جغرافیایی $33^{\circ}08'58''$ تا $31^{\circ}34'08''$ شمالی قرار دارد (خوئی و همکاران، ۱۳۷۸). راه اصلی دسترسی به این کانسار، جاده آسفالتی یزد-تفت-دره‌زرشک است. منطقه دره‌زرشک دارای سیمای تپه‌ماهور و قله‌های متعدد است ولی گاهی توده‌های نفوذی جای‌گرفته درون سنگ‌ها، موجب تشکیل مورفولوژی خشن و ناهموار شده است (نبوی، ۱۳۵۵؛ خسروتهرانی، ۱۳۷۲). کانسار مس دره‌زرشک بر روی زون تکتونیکی سندانج- سیرجان قرار گرفته و بیشترین سنگ‌های رخنمون‌دار منطقه، مربوط به دوران دوم زمین‌شناسی است. سنگ‌های موجود در محدوده کانسار، بیشتر شامل دیوریت، گرانودیوریت، گرونایت، سنگ‌های اسکارنی، آهک کرتاسه زیرین، شیل و ماسه‌سنگ سازند سنگستان هستند (تقوی و همکاران، ۲۰۱۹).

عامل اصلی کانی‌زایی در کانسار، توده‌های نفوذی دیوریت-گرانودیوریت پورفیری است. کانی‌سازی به سه صورت آغشتگی در سنگ‌های آهکی سیلیسی شده، پرشدگی مابین شکستگی‌ها در سنگ‌های آذرین نفوذی و در بخش‌های عمیق‌تر به صورت آغشتگی در شیل و ماسه‌سنگ‌های سازند سنگستان و تبدیل آن‌ها به کوارتزیت، انجام گرفته است (شرکت کنگاوران، ۱۳۸۴). کانسار مس دره‌زرشک بر روی کمر بند آمیزه‌رنگین تکتونیکی و فعال ایران مرکزی یعنی زون ارومیه- دختر

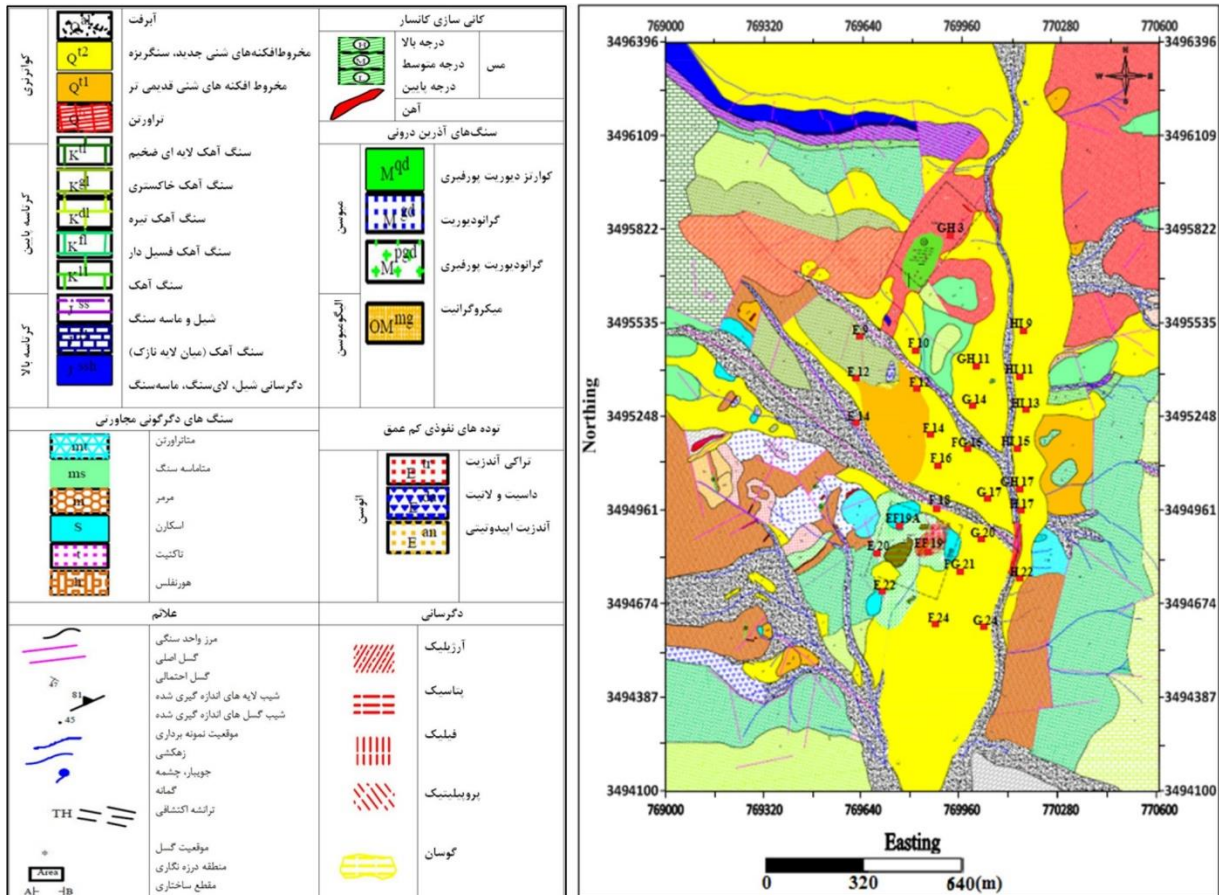
کریجینگ گسسته^۱ در کانسار مس پورفیری سونگون پرداختند. در این مقاله با استفاده از برنامه‌نویسی روش کریجینگ گسسته، توزیع عیار مس در کانسار مس سونگون، مدل‌سازی شده و نتایج آن با نتایج تخمین به روش کریجینگ مقایسه شده است. دایا (۲۰۱۲) به تخمین ذخیره قسمت مرکزی بی‌هنجاری شمال چغارت با استفاده از روش کریجینگ معمولی پرداخت. در این پژوهش ۲۳۲۹ داده به‌دست آمده از ۲۶ گمانه برای تخمین ذخیره، استفاده شده است. مطالعات صورت گرفته حاکی از تک‌جامعه‌ای بودن داده‌های عیاری بوده و برای استفاده از کریجینگ معمولی نیز از برازش مدل کروی بر واریوگرام تجربی استفاده شده است. چادهیوری (۲۰۱۵) به مقایسه تخمین‌گرهای خطی و غیرخطی برای ارزیابی میزان ذخیره یک کانسار آهن پرداخته است. در رویکرد زمین‌آمار خطی، روش کریجینگ معمولی و روش کریجینگ شاخص به عنوان زمین‌آمار غیرخطی انتخاب شده است. پس از برآورد پارامترهای آماری، هر دو نتیجه نسبت به داده‌های خام مقایسه شده و مشخص شد که برای این کانسار پیش‌بینی روش کریجینگ شاخص نسبت به روش کریجینگ معمولی بهتر است. یزدانی و علی‌نیا (۱۳۹۷) برای شناسایی بی‌هنجاری‌های Au-Cu-Fe-W در دره سه‌هزار تنکابن از تکنیک زمین‌آمار کریجینگ استفاده کردند. برای مشخص کردن مناطق بی‌هنجار از ۵۰ نمونه آبراه‌های استفاده شد که به‌روش ICP-MS تجزیه شدند. احمدی (۱۳۹۹) با استفاده از روش‌های تخمین زمین‌آمار خطی و غیرخطی به ارزیابی کانسار مس نارباغی شمالی ساوه پرداخته است. وی ابتدا متوسط عیار و میزان ذخیره کانسار را با روش‌های لاگ کریجینگ و کریجینگ شاخص چندگانه با استفاده از نرم‌افزار SGeMS2 محاسبه کرده است. سپس مدل‌سازی کانسار به کمک نرم‌افزار Datamine صورت گرفته و متوسط عیار و میزان ذخیره کانسار با روش کریجینگ معمولی بلوکی تخمین زده شده است.

در پژوهش حاضر مدل‌سازی ریاضی سه‌بعدی زمین‌شناسی (اریکسون، ۱۹۹۲؛ آنلز، ۲۰۱۲) و کانی‌زایی (عیارسنجی) کانسار مس دره زرشک یزد و تهیه نیمرخ‌های عرضی گوناگون با استفاده از روش‌های درون‌یابی مختلف صورت گرفته است. در این راستا پس از تحلیل اطلاعات اکتشافی کانسار مس دره‌زرشک و مدل‌سازی هندسی سه‌بعدی

1. Disjunctive Kriging

کالکوسیت است. شکل ۱ برشی از ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خضرآباد به‌عنوان نقشه زمین‌شناسی محدوده کانسار را نشان می‌دهد.

واقع شده و دارای کانی‌های مختلف فلزی است. کانی‌های فلزی سولفیدی و اکسیدی شاخص در این کانسار شامل پیریت، کالکوپیریت، منیتیت، بورنیت، مالاکیت، آزوریت و



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی کانسار مس دره زرشک یزد همراه با نمایش موقعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی، برشی از ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خضرآباد (ویرایش شده از حاج ملاعلی و علوی نائینی، ۱۳۷۲).

مس بر روی این کانسار را انجام داده و گزارشی تحت عنوان گزارش جامع اکتشاف کانسار مس دره زرشک، ارائه کرده است. از آبان ماه سال ۱۳۸۱ به بعد اکتشافات تکمیلی توسط شرکت ملی صنایع مس ایران انجام شد. در حال حاضر اطلاعات اکتشافی به‌ویژه داده‌های تمام برداشت‌های گمانه‌ها و نتایج عیارسنجی مس تعداد ۲۲۸۶ مغزه عمدتاً ۲ متری حاصل از حفر تعداد ۲۸ حلقه گمانه اکتشافی (۲۷ حلقه گمانه قائم و یک حلقه گمانه مایل)، با مترآژ حفاری در مجموع ۴۵۱۵/۲ متر، در دسترس می‌باشد. کمترین عمق حفاری‌ها از ۱۱۹ متر (گمانه GH3) تا بیشترین عمق، ۲۰۱ متر (گمانه GH17) متغیر است. مغزه‌های حفاری به دقت مورد بررسی قرار گرفته و بر روی آن‌ها مطالعاتی نظیر تشخیص نوع سنگ، شناسایی حضور و نوع دگرسانی، تعیین نوع زون (هیپوژنی یا سوپرژنی بودن، اکسیده یا

فعالیت‌های اکتشافی انجام‌شده در منطقه
در محدوده مورد مطالعه فعالیت‌های اکتشافی نسبتاً گسترده‌ای انجام شده که ابتدا در محدوده‌ای با وسعت ۱/۲ کیلومتر مربع مطالعات مرحله پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی صورت گرفته است. سپس با استفاده از نتایج مطالعات مرحله پی‌جویی، عملیات اکتشاف تفصیلی شامل تهیه نقشه‌های توپوگرافی - زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰، مطالعات ژئوفیزیکی (صمان کاو، ۱۳۸۵؛ احمدی و بهارلوئی، ۱۴۰۰) و حفر تعداد ۲۸ حلقه گمانه در محدوده‌ای به وسعت ۲۰۰ هزار مترمربع انجام شده است. عملیات اکتشافی در محدوده جنوب یزد و از جمله کانسار مورد نظر، در اوایل سال ۱۳۴۹ توسط شرکت فرانسوی کوفیمین آغاز شد (فرنس کوفیمین، ۱۹۸۹). در سال ۱۳۷۹ شرکت مهندسی کانی‌فرآوران مطالعات اکتشاف

عیارسنجی مس گمانه‌ها و توپوگرافی منطقه دره‌زرشک را نشان می‌دهد. در نقشه شکل ۲(الف) تصویر افقی گمانه‌های مایل (همانند گمانه H17)، با خط سبز رنگ مشخص شده‌اند. همچنین به منظور شناخت بیشتر کانسار مس دره‌زرشک در اعماق، بر روی این نقشه موقعیت چهار پروفیل اکتشافی در راستای شمال-جنوبی، انتخاب و ترسیم شده است. موقعیت پروفیل‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که شاخص بوده، هر پروفیل تاحدممکن بیشترین تعداد گمانه را دربر داشته و پوشش‌دهنده کل محدوده باشند. مطابق شکل ۲(ب) تغییرات عیار منطقه مورد مطالعه با مقدار بیشینه ۰/۶٪ به شش محدوده ۰/۱-۰، ۰/۲-۰، ۰/۱-۰/۳، ۰/۲-۰/۴، ۰/۳-۰/۵، ۰/۴-۰/۵ و ۰/۵-۰/۶ درصد با رنگ‌های مختلف تقسیم شده است. رنگ خاکستری مربوط به فواصل عمقی است که به هر دلیل فاقد داده عیارسنجی می‌باشند.

برای طرح تصویری از تغییرات لیتولوژی و شکل تقریبی توده کانسار دره‌زرشک، در شکل ۳ چاه‌نگار لیتولوژی تمام گمانه‌های اکتشافی به صورت سه‌بعدی نمایش داده شده است. به منظور ارائه تصویری از تغییرات لیتولوژی درون کانسار، برش‌هایی در آن ایجاد شده است. در شکل ۴ نیمرخ عرضی لیتولوژی نظیر پروفیل‌های انتخاب شده در شکل ۲، ترسیم شده است. در ترسیم نیمرخ عرضی لیتولوژی برای طرح اختلاط لیتولوژی^۲ از الگوریتم اختلاط تصادفی^۳ به همراه درون‌یابی مقادیر خارج از محدوده^۴ استفاده شده است. مطابق شکل ۴ در نیمرخ‌های عرضی، تنوع لیتولوژی زیادی شامل طیفی از انواع سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی به چشم می‌خورد که مطابق معمول در سطح زمین و اعماق کم، اغلب سنگ‌های رسوبی و در اعماق بیشتر، توده‌های نفوذی آذرین وجود دارند. شکل ۵ مدل سه‌بعدی لیتولوژی منطقه را نشان می‌دهد که برای ساخت این مدل به منظور طرح اختلاط لیتولوژی از الگوریتم اختلاط تصادفی به همراه درون‌یابی مقادیر خارج از محدوده استفاده شده است. در این شکل به طور واضح می‌توان واحدهای سنگی را مشاهده نمود. مطابق این شکل در منطقه مورد مطالعه، بطور کلی گرانودیوریت و سنگ‌های اسکارنی بیشترین سهم را دارند. سطح محدوده نیز بیشتر توسط روبره، شیل و آهک پوشیده شده است.

احیاء بودن و غیره)، تعیین نوع کانی (آزاد یا اکسیده بودن و غیره)، شناسایی نوع فابریک یا بافت، رنگ ظاهری و تشخیص نوع ساخت، صورت گرفته است (بهارلویی، ۱۳۹۸؛ فاضلی نسب، ۱۳۹۹).

مواد و روش‌ها

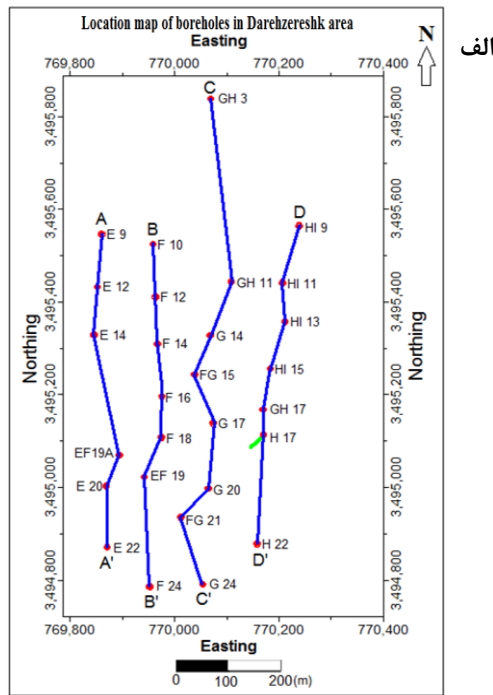
شناخت کامل یک کانسار، مستلزم انجام یک سری عملیات پردازشی و مدلسازی است (حسنی‌پاک، ۱۳۷۹) که این کار به دلیل پیچیدگی‌های موجود، طولانی و زمان‌بر بودن و مشکل بودن محاسبات مربوطه، معمولاً با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی، دقیق‌تر، سریع‌تر و راحت‌تر انجام می‌شود. نرم‌افزار Rockworks (www.rockware.com) یک نرم‌افزار جامع و قوی برای تصویرسازی، مدلسازی و تجزیه و تحلیل اطلاعات زمین‌شناسی و داده‌های اکتشافی است (سادات کودهی، ۱۳۹۶؛ احمدی و سادات، ۱۳۹۷) و انجام مدلسازی‌های مختلف براساس نوع و میزان داده‌ها و اطلاعات اکتشافی در دسترس و نیز تهیه برش‌های مختلف از درون ماده معدنی را برای زمین‌شناسان و مهندسیین امکان‌پذیر می‌سازد (احمدی، ۱۴۰۰). بنابراین با استفاده از نرم‌افزار Rockworks و از طریق ترسیم چاه‌نگار^۱ گمانه‌ها، ترسیم نیمرخ‌های عرضی لیتولوژی و عیارسنجی و مدل سه‌بعدی لیتولوژی، شناخت کاملی از وضعیت سطحی و عمقی کانسار مس دره‌زرشک یزد صورت گرفته است. به منظور ارزیابی ذخیره کانسار مس دره‌زرشک از دو روش کلاسیک عکس‌مجذورفاصله و زمین‌آماري کریجینگ، با کمک نرم‌افزار Surpac استفاده شد. همچنین برای محاسبه ذخیره ماده معدنی، جرم مخصوص (چگالی) متوسط ماده معدنی $2/65 \text{ gr/cm}^3$ در نظر گرفته شد. برای ساخت مدل بلوکی کانسار نیز، ابعاد بلوک‌ها براساس نوع ماده معدنی (مس)، وضعیت و اطلاعات اکتشافی کانسار و در نظر گرفتن شرایط استخراج، $20 \times 20 \times 10$ متر منظور شد.

تحلیل اطلاعات اکتشافی کانسار مس دره‌زرشک

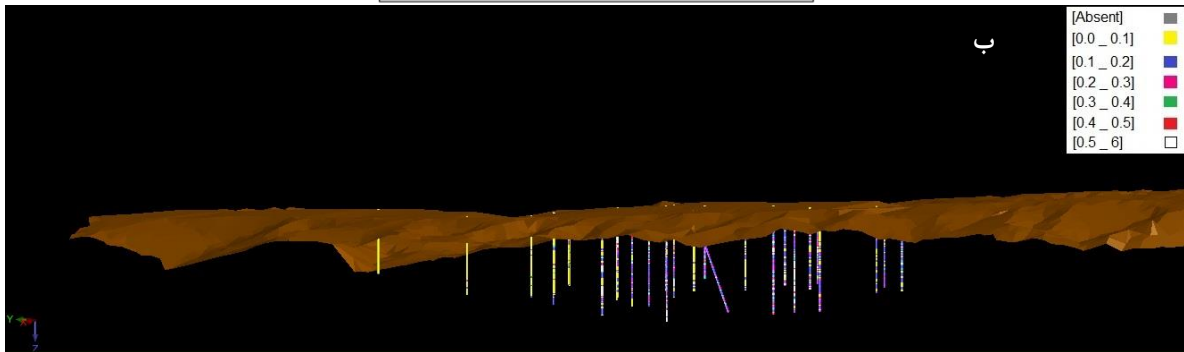
شکل ۲(الف) نقشه دوبعدی موقعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی کانسار مس دره‌زرشک و شکل ۲(ب) نمای سه بعدی گمانه‌های اکتشافی همراه با نمایش تغییرات

3. Randomize Blending
4. Outliers

1. Strip-log
2. Lithoblending

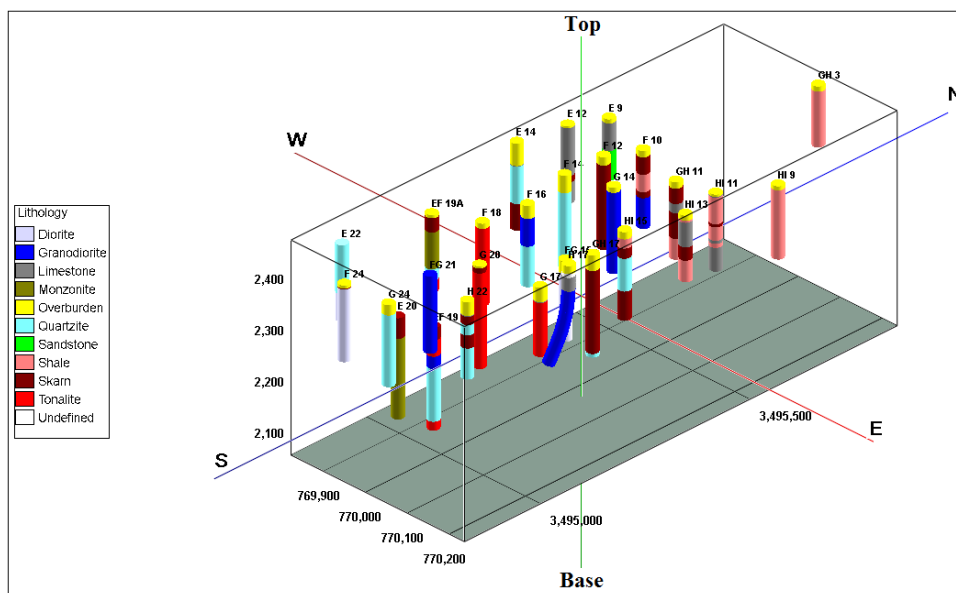


الف

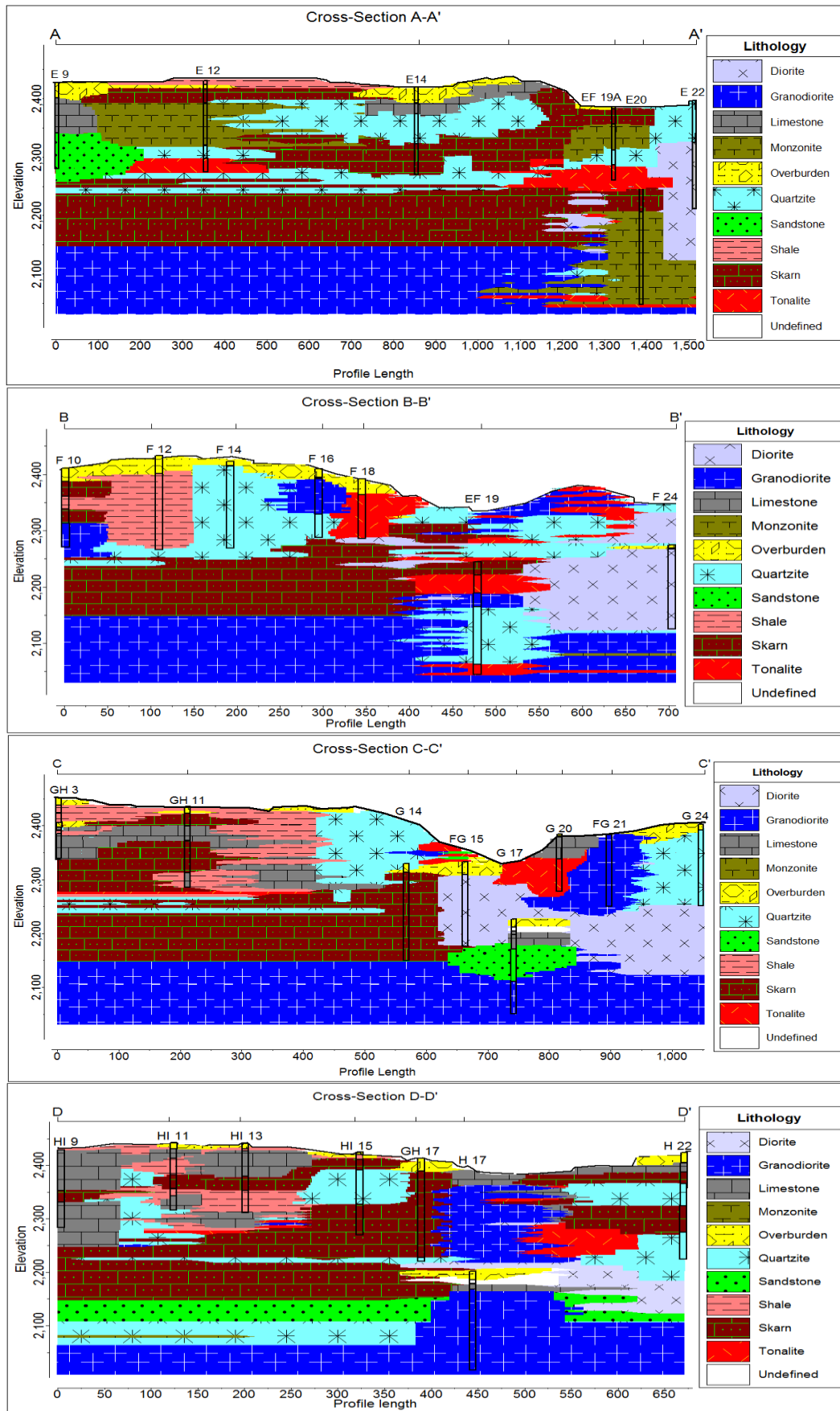


ب

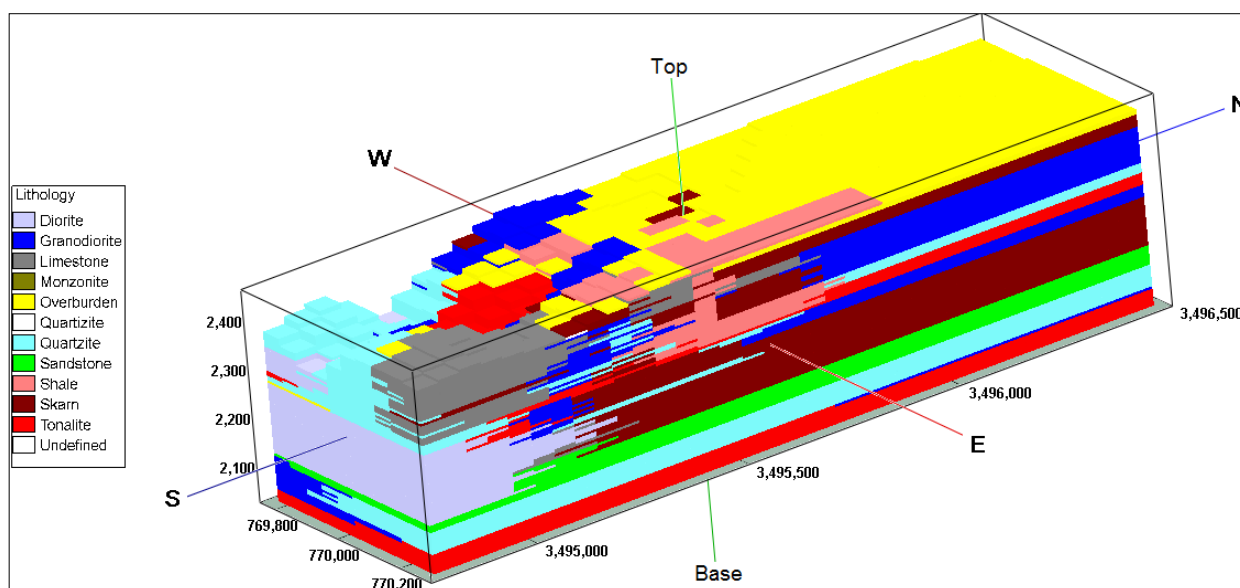
شکل ۲. الف) نقشه دوبعدی موقعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی کانسار مس دره‌زرشک و پروفیل‌های اکتشافی انتخاب شده، ب) نمای سه‌بعدی گمانه‌های اکتشافی به همراه توپوگرافی منطقه (جهت شمال در راستای محور Y است).



شکل ۳. نمایش سه‌بعدی چاه‌نگار لیتولوژی گمانه‌های اکتشافی کانسار مس دره‌زرشک در نرم‌افزار Rockworks (واحد اندازه‌گیری اعداد محورهای افقی و قائم، متر می‌باشد).



شکل ۴. نیمرخ عرضی لیتولوژی نظیر پروفیل‌های انتخابی در شکل ۲ (واحد اندازه‌گیری اعداد محورهای افقی و قائم، متر می‌باشد).



شکل ۵. مدل سه‌بعدی لیتولوژی کانسار مس دره زرشک (واحد اندازه‌گیری اعداد محورهای افقی و قائم، متر می‌باشد).

از داده‌های عیارسنجی هشت گمانه GH3, GH11, G14, FG15, G17, G20, FG21, G24 ترسیم شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که ماده معدنی در یک محدوده در عمق ۴۰ متری گمانه G14 و نیز در محدوده کوچکی در نزدیکی سطح زمین در موقعیت گمانه GH11 از عیار بالاتری برخوردار است. شکل ۶(د) نیز نیمرخ عرضی ماده معدنی ترسیم شده با استفاده از داده‌های عیارسنجی HI9, HI11, HI13, HI15, GH17, H17, H22 را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل دیده می‌شود که ماده معدنی در بخش‌های عمقی محدوده میانی نیمرخ، بیشتر مربوط به گمانه GH17 از عیار بالاتری برخوردار است.

علاوه بر این، مقاطع اکتشافی نظیر چهار پروفیل شکل ۲ با استفاده از نرم‌افزار Surpac نیز ترسیم شده و سطح ماده معدنی بر روی هر مقطع اکتشافی به‌ازای ۵ عیار حد ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد تعیین شده است. اعمال مقادیر عیار حد، به‌منظور استفاده از این مقاطع اکتشافی برای تخمین ذخیره کانسار در مرحله بعدی کار می‌باشد. این مقاطع اکتشافی از طریق ارتباط دادن رشته‌های^۳ کانی‌سازی در گمانه‌های واقع بر روی هر مقطع به یکدیگر به‌ازای عیار حدهای مختلف، ترسیم شده است. به‌عنوان نمونه در شکل‌های ۷ و ۸ مقاطع اکتشافی پروفیل‌های A - Á و B - B̄ نشان داده شده است.

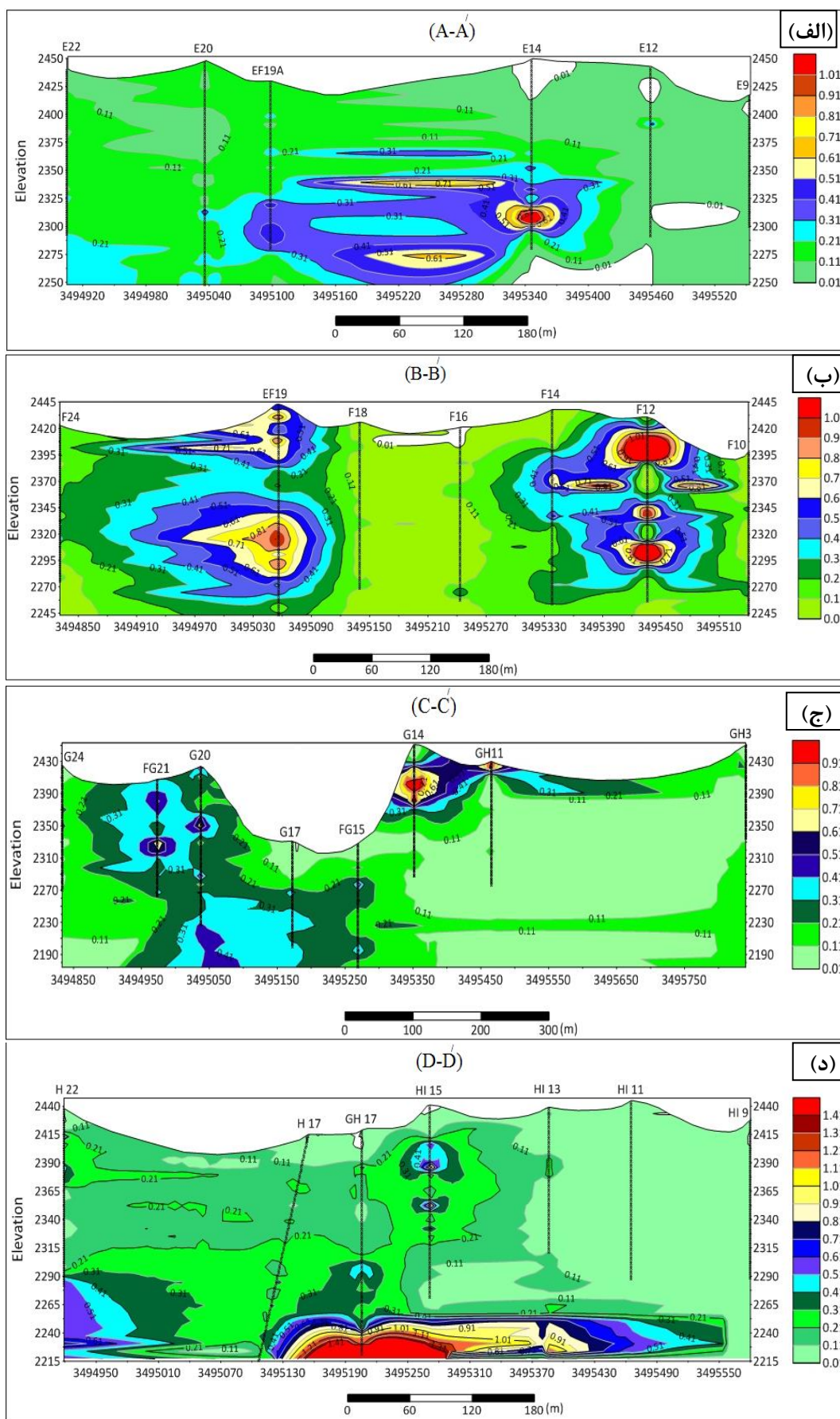
در شکل ۶ نیمرخ عرضی عیارسنجی (نقشه هم‌عیار) نظیر پروفیل‌های شکل ۲، ترسیم شده است. محدوده‌های سفیدرنگ در این شکل نشان‌دهنده محدوده‌های با عیار زیر ۰/۱ درصد هستند. برای ترسیم نیمرخ عرضی عیارسنجی از الگوریتم عکس مجذور فاصله وزن‌دار پیشرفته^۱ در ساخت مدل جامد عیارسنجی و از قاعده بولین^۲ یعنی در نظر گرفتن یک برای کانه و صفر برای باطله، استفاده شده است. در الگوریتم عکس مجذور فاصله وزن‌دار پیشرفته، امکان وزن‌دهی فاصله با تفاوت در جهات مختلف وجود دارد.

شکل ۶(الف) نیمرخ عرضی ماده معدنی ترسیم‌شده با استفاده از داده‌های عیارسنجی شش گمانه E9, E12, E14, EF19A, E20, E22 را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که ماده معدنی در محدوده میانی از عیار بالاتری برخوردار است. شکل ۶(ب) مربوط به نیمرخ عرضی ماده معدنی ترسیم شده با استفاده از داده‌های عیارسنجی هفت گمانه F10, F12, F14, F16, F18, EF19, F24 می‌باشد. با توجه به این شکل دیده می‌شود که ماده معدنی در دو محدوده مجزا یکی در نیمه سمت راست و دیگری در نیمه سمت چپ نیمرخ، از عیار بالاتری برخوردار است. بیشترین میزان عیار مس در این نیمرخ اکتشافی در موقعیت گمانه F12 در اعماق کم قرار دارد. شکل ۶(ج) نیمرخ عرضی ماده معدنی است که با استفاده

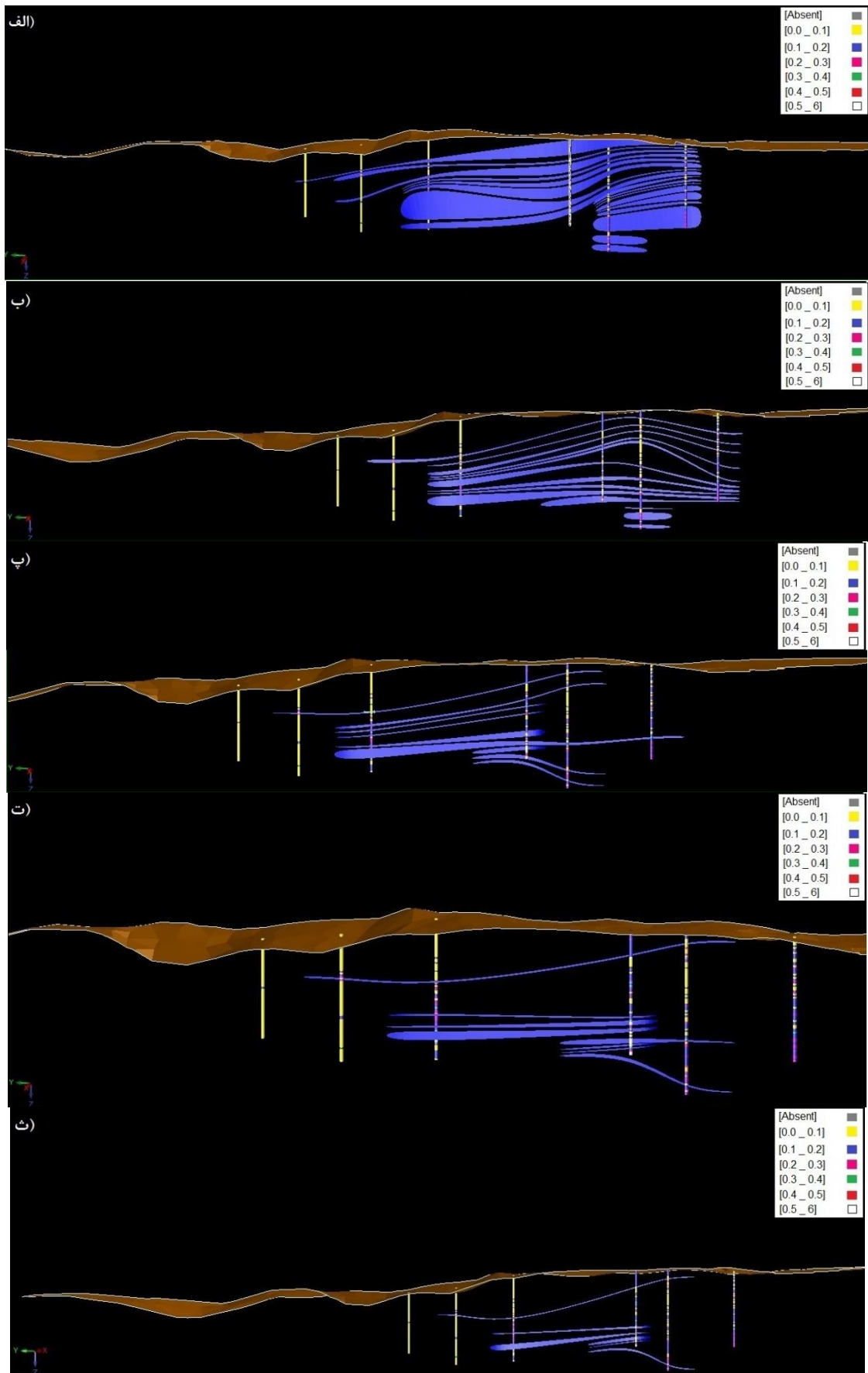
³. String

¹. Advanced inverse distance weighted (IDW)

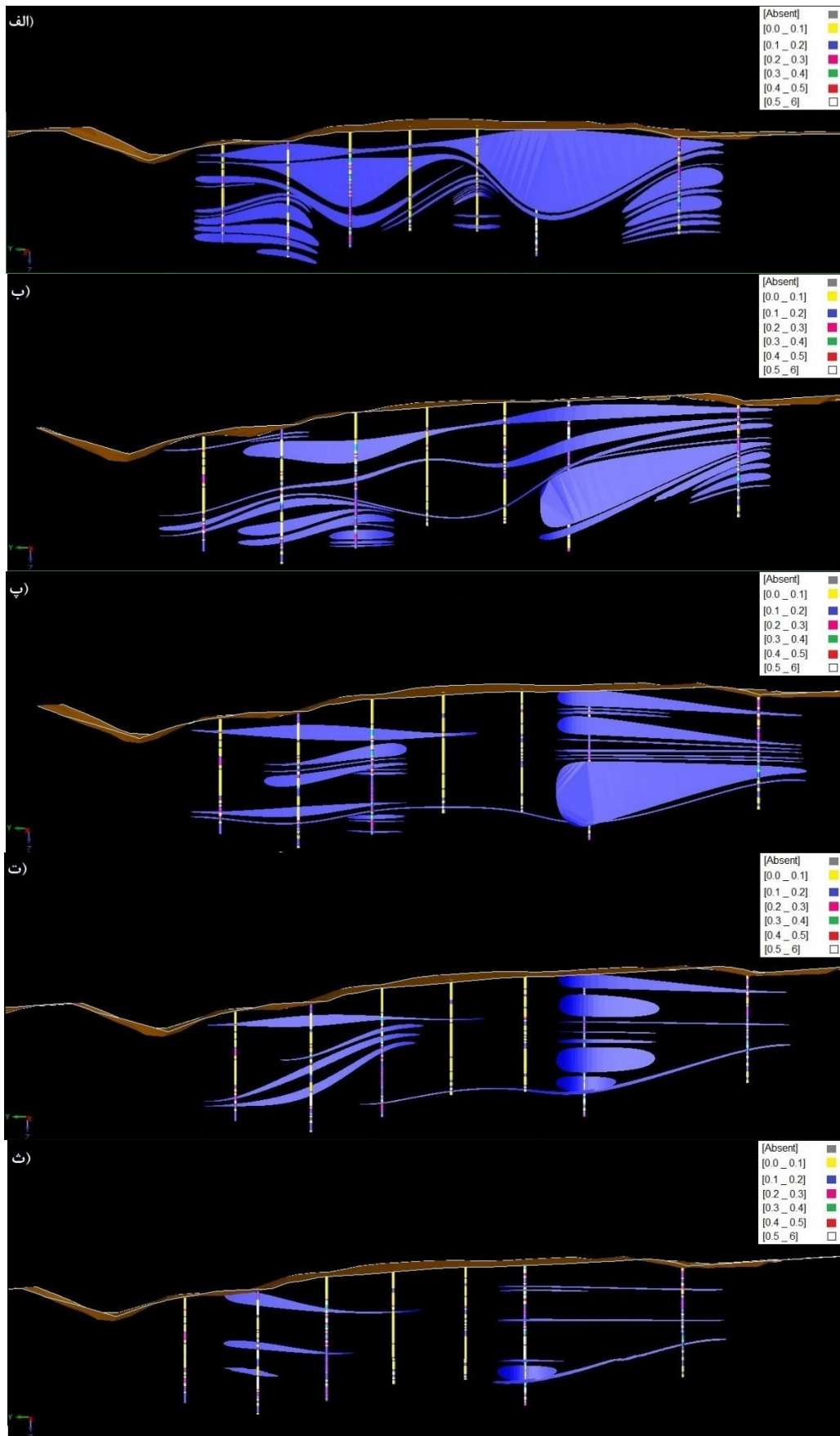
². Boolean



شکل ۶. نیمرخ عرضی عیارسنجی (نقشه هم‌عیار ماده معدنی) نظیر پروفیل‌های شکل ۲ در کانسار مس دره زرشک یزد (واحد اندازه‌گیری اعداد محورهای افقی و قائم، متر می‌باشد).



شکل ۷. مقطع اکتشافی $\bar{A} - A$ کانسار با عیار حدهای الف (۰/۱، ب) ۰/۲، پ) ۰/۳، ت) ۰/۴، ث) ۰/۵ درصد همراه با توپوگرافی منطقه (جهت شمال در راستای محور Y است).



شکل ۸. مقطع اکتشافی $B - \bar{B}$ کانسار با عیار حدهای الف) ۰/۱، ب) ۰/۲، پ) ۰/۳، ت) ۰/۴، ث) ۰/۵ درصد همراه با توپوگرافی منطقه (جهت شمال در راستای محور Y است).

در مقاطع اکتشافی $C - \hat{C}$ و $D - \hat{D}$ که در اینجا آورده نشده‌اند، کانسار به‌ازای تمام عیارحدها پیوستگی نسبتاً خوبی نشان داد. همچنین نسبت به عیار حدهای قبلی، تمرکز ماده معدنی در قسمت جنوبی مقطع، تقریباً بیشتر است. این موضوع بیانگر آن است که عیار ماده معدنی بخش جنوبی محدوده نسبت به بخش شمالی، اندکی بالاتر است.

تخمین ذخیره کانسار مس دره زرشک

برای آگاهی از نحوه توزیع داده‌ها در محدوده، قبل از هر گونه عملیات واریوگرافی و تخمین، ابتدا باید مطالعات آماری بر روی داده‌ها صورت گیرد.

پردازش آماری اولیه داده‌ها

به‌منظور تعیین نحوه توزیع داده‌های عیارسنجی مس، مطالعات آماری با استفاده از نرم‌افزارهای Statistica و GS+ بر روی داده‌ها صورت گرفت. نتایج آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های عیارسنجی مس در جدول ۱ خلاصه شده است. بر اساس نتایج این جدول توزیع داده‌های عیارسنجی، از نوع لاگ نرمال بوده که با یک تبدیل لگاریتمی دو پارامتری به حالت نرمال تبدیل شدند.

براساس مدل عیاری که فضای تخمین را در شکل ۷ می‌سازد، مشاهده می‌شود که کانی‌سازی مس در کانسار تقریباً دارای پیوستگی بوده ولی در عیار حدهای بالاتر از ۰/۴٪ از میزان پیوستگی کانسار کاسته شده و به‌صورت قطعه‌قطعه یا تکه‌تکه (بریده‌بریده) درآمده است. همچنین کانی‌سازی در افق‌های مختلف با ضخامت‌های متغیر صورت گرفته است. میزان گسترش فضایی ماده معدنی در بخش‌های کانی‌سازی شده در گمانه‌ها نیز براساس اصول متداول نحوه تعیین شعاع تاثیر در ارزیابی ذخایر معدنی، صورت گرفته است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش عیار حد، حضور ماده معدنی در بخش‌های شمال و جنوب مقطع، کم‌رنگ شده و ماده معدنی در بخش میانی محدوده مقطع اکتشافی، متمرکز می‌شود.

در شکل ۸ نیز همانند مدل نظیر مقطع اکتشافی $A - \hat{A}$ مشاهده می‌شود که کانی‌سازی در کانسار در این مقطع نیز به صورت نسبتاً پیوسته است که با فراتر رفتن عیار حد از ۰/۲ درصد، از میزان پیوستگی آن کم می‌شود؛ به‌گونه‌ای که به ازای عیار حدهای ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد، بخش میانی مقطع از ماده معدنی تهی شده و ماده معدنی بصورت دو محدوده مجزا در قسمت‌های شمالی و جنوبی مقطع نمایان شده است.

جدول ۱. آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی

آماره / متغیر	تعداد داده	میانگین (%)	میانگین (%)	دامنه تغییرات (%)	واریانس (%) ^۲	انحراف معیار (%)	ضریب تغییرات (%)	چولگی	کشیدگی
عیار مس	۲۲۸۷	۰/۲۲	۰/۱۲	۱۱/۲۰	۰/۱۵	۰/۴۰	۱۸۶/۰۴	۱۲/۰۴	۲۷۲/۷۰
لگاریتم عیار مس	۲۲۸۷	-۲/۵۰	-۲/۱۲	۱/۹۵	۳/۸۰	۱/۹۵	-۷۷/۹۳	-۲/۵۴	۹/۸۰

واریوگرافی و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی

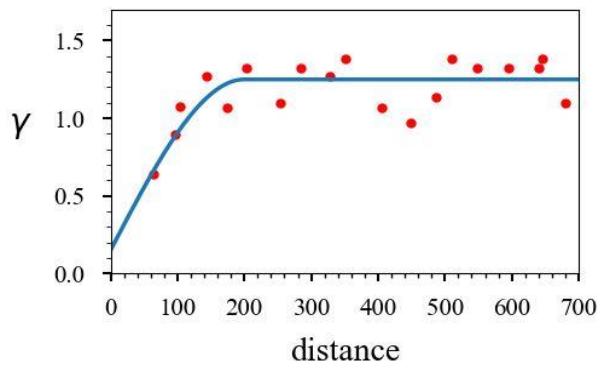
برای تخمین زمین‌آماري ذخایر معدنی در مرحله اول باید شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی عیار ماده معدنی مورد تخمین، انجام شود. در این مرحله مفهوم پیوستگی و میزان تداوم کانی‌سازی، همسانگردی و ناهمسانگردی منطقه و بالاخره ساختار فضایی ذخایر معدنی با ترسیم واریوگرام‌های امتدادی، بررسی می‌شود. به‌منظور تجزیه و تحلیل ساختار فضایی منطقه مورد مطالعه، واریوگرافی داده‌های پردازش شده با استفاده از نرم‌افزار WinGslib

(رمی و بوچر، ۲۰۰۶؛ بالینگ، ۲۰۰۷) به این صورت انجام شد که از آزمون صفر تا ۱۸۰ درجه به‌ازای هر پنج درجه و از شیب صفر تا ۹۰ درجه، به‌ازای هر پنج درجه، یک واریوگرام ترسیم شد. شکل ۹ تعدادی از واریوگرام‌های امتدادی ترسیم شده در جهات مختلف داده‌های عیارسنجی مس را نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیشتر واریوگرام‌های امتدادی با مدل ثنوری از نوع کروی و گوسی برازش یافته‌اند. در اغلب واریوگرام‌های تجربی، اثر چال^۱ دیده می‌شود که دال بر وجود تناوبی از زون‌های کم‌عیار و

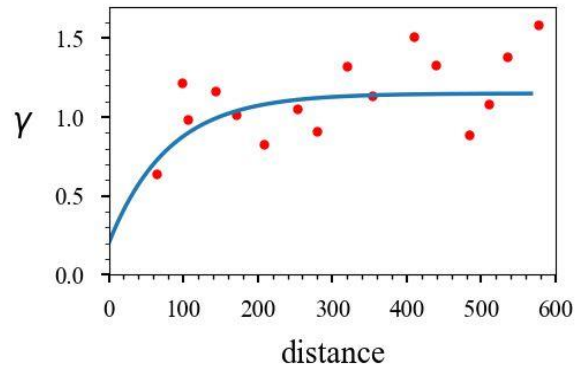
^۱. Hole effect

۱۰۰ متر در راستای با آزمون ۹۰ و شیب صفر درجه و مقدار شعاع تاثیر کمینه برابر با ۴۰ متر در راستای قائم با آزمون صفر درجه است.

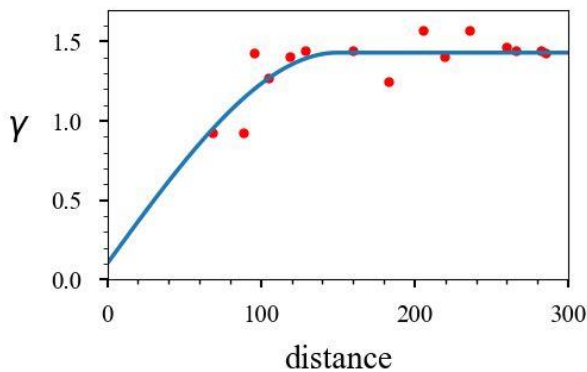
پرعیار در کانسار است. براساس نتایج عملیات واریوگرافی، کانسار دارای ناهمسانگردی از نوع هندسی است؛ مقدار شعاع تاثیر بیشینه برابر با ۱۳۰ متر در راستای با آزمون صفر و شیب صفر درجه، مقدار شعاع تاثیر متوسط برابر با



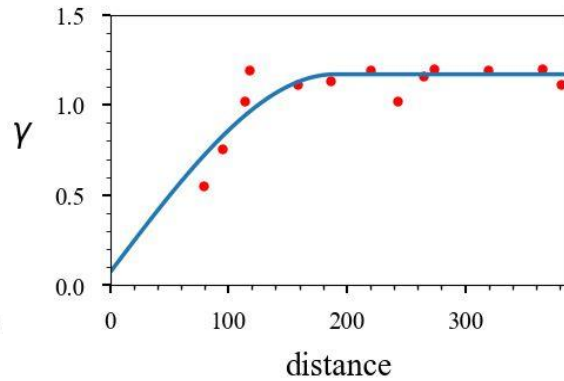
آزمون صفر با شیب پنج درجه



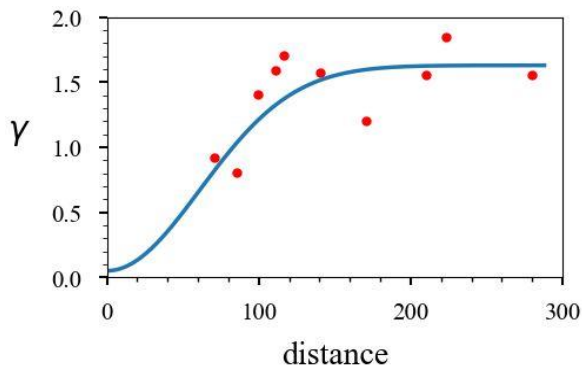
آزمون پنج با شیب پنج درجه



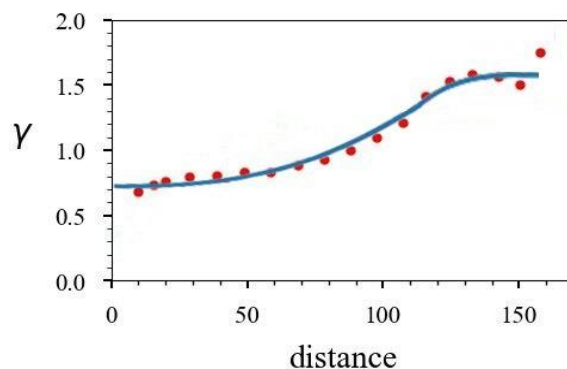
آزمون صفر با شیب ۹۰ درجه



آزمون صفر با شیب صفر درجه



آزمون ۹۰ با شیب صفر درجه



آزمون ۸۰ با شیب صفر درجه

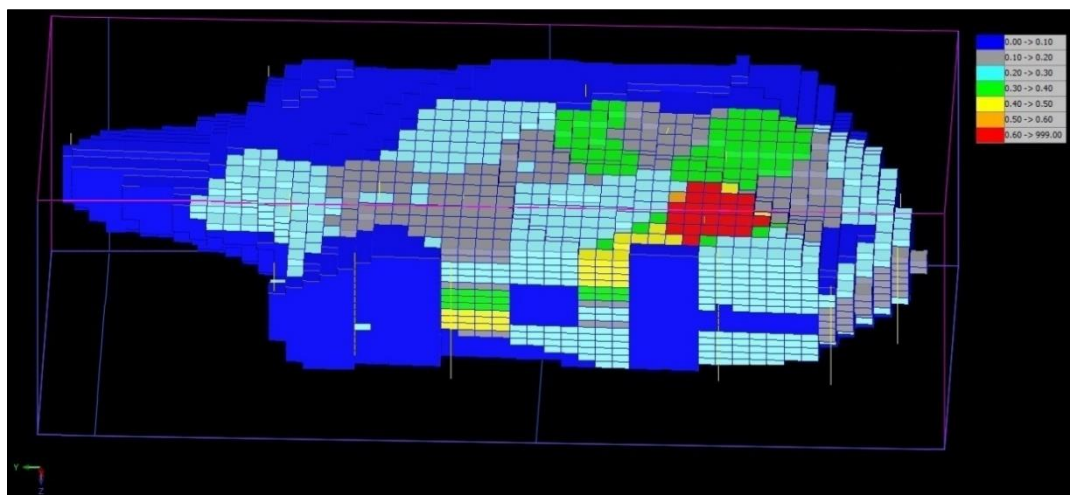
شکل ۹. واریوگرام‌های امتدادی ترسیم شده در راستاهای مختلف در کانسار مس دره زرشک

۱۳۷۱). در این الگوریتم برای یافتن متغیر مورد تخمین در هر نقطه، وزن آماری هر نمونه را به نسبت عکس مجذور فاصله آن از مرکز بلوک در نظر می‌گیرند و به این ترتیب نمونه‌های نزدیک‌تر به مرکز بلوک، وزن آماری بیشتری نسبت به نمونه‌های دورتر خواهند داشت. کانسار مس

تخمین ذخیره کانسار با روش عکس مجذور فاصله در روش عکس مجذور فاصله سطح کانسار به یک سری بلوک‌های منشوری شکل تقسیم شده و مشخصات ماده معدنی در هر بلوک، براساس مشخصات کارهای اکتشافی نمونه‌های درون و پیرامون آن محاسبه می‌شود (مدنی،

جدول ۲ است. نتایج محاسبه عیار و ذخیره کانسار با روش عکس مجذور فاصله در جدول ۳ خلاصه شده است. عیار متوسط ماده معدنی در محدوده مورد مطالعه با روش تخمین عکس مجذور فاصله نیز برابر با ۰/۵۲۹۲۲ درصد بدست آمد.

دره‌زرشک با روش تخمین عکس مجذور فاصله به تعداد ۳۳۹۰۱ بلوک در محدوده مرزهای معرفی شده، تقسیم شد که شکل ۱۰ توزیع عیار تخمینی مدل بلوکی کانسار را نشان می‌دهد. آماره‌های توصیفی داده‌های مس تخمین زده شده با استفاده از روش عکس مجذور فاصله نیز مطابق



شکل ۱۰. مدل بلوکی طراحی شده کانسار مس دره‌زرشک با روش تخمین عکس مجذور فاصله (جهت شمال در راستای محور Y است).

جدول ۲. پارامترهای آماری داده‌های عیار مس تخمین زده شده با روش عکس مجذور فاصله

متغیر	تعداد	میانگین (%)	واریانس (%)	انحراف استاندارد (%)
عیار مس تخمینی	۱۹۸۳	۰/۰۹۶۲	۰/۰۳۰	۰/۱۷

جدول ۳. جزئیات نتایج تخمین ذخیره کانسار با روش عکس مجذور فاصله

عیار حد (درصد)	حجم (متر مکعب)	میزان ذخیره (تن)	متوسط عیار مس (درصد)
۰/۱	۱۰۷۵۶۰۰۰	۲۸۵۰۳۴۰۰	۰/۱۴۵۵۵
۰/۲	۷۰۳۲۰۰۰	۱۸۶۳۴۸۰۰	۰/۳۳۷۰۹
۰/۳	۳۱۴۴۰۰۰	۸۳۳۱۶۰۰	۰/۵۴۲۵۶
۰/۴	۱۵۸۸۰۰۰	۶۸۲۴۶۰۰	۰/۷۴۹۹۵
۰/۵	۲۷۶۴۰۰۰	۴۷۰۸۲۰۰	۰/۸۷۰۹۵

مس دره‌زرشک را بعد از تخمین کریجینگ معمولی در هر بلوک نشان می‌دهد. کانسار مس دره‌زرشک با روش تخمین زمین‌آماري کریجینگ، به تعداد ۳۳۹۰۱ بلوک در محدوده مرزهای معرفی شده، تقسیم شد. برای تخمین عیار با روش کریجینگ، بیضوی تجسس چهارقسمتی انتخاب شد که کمینه و بیشینه تعداد داده‌های شرکت‌کننده در تخمین هر بلوک نیز به ترتیب برابر با ۴ و ۷ عدد می‌باشد. پارامترهای آماری داده‌های مس تخمین زده شده با استفاده از روش زمین‌آماري کریجینگ مطابق جدول ۴

تخمین ذخیره کانسار با روش کریجینگ

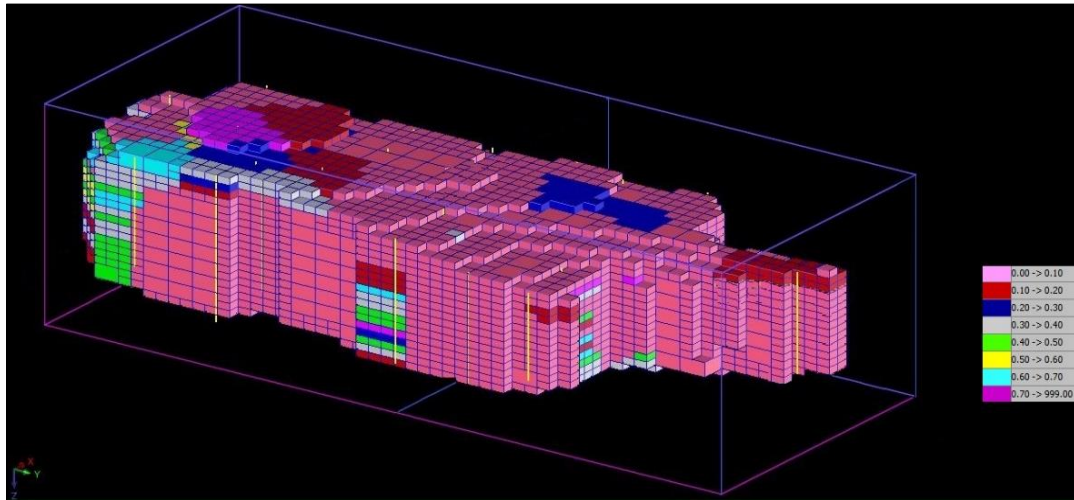
تخمین‌گر زمین‌آماري کریجینگ که بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار است، ناریب بوده و دارای کمترین خطای تخمین است (رندو و آنلز، ۱۹۸۱). در این روش هر نمونه تا بیشینه فاصله معینی به نام شعاع تاثیر با نمونه‌های اطراف خود ارتباط فضایی دارد. این فاصله اهمیت فراوانی دارد و در حقیقت نشان دهنده فاصله ایست که در آن می‌توان از تخمین‌گرهای زمین‌آماري استفاده کرد (مدنی، ۱۳۷۱). شکل ۱۱ توزیع عیار تخمینی مدل بلوکی کانسار

عکس مجذورفاصله و زمین آماری کریجینگ با استفاده از نرم‌افزار Surpac با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل ۱۲ منحنی عیار- تناژ کانسار مس دره‌زرشک با استفاده از این دو روش را نشان می‌دهد. مطابق انتظار در این شکل با افزایش عیار حد، میزان ذخیره کانسار، کاهش یافته و مقدار متوسط عیار، افزایش می‌یابد.

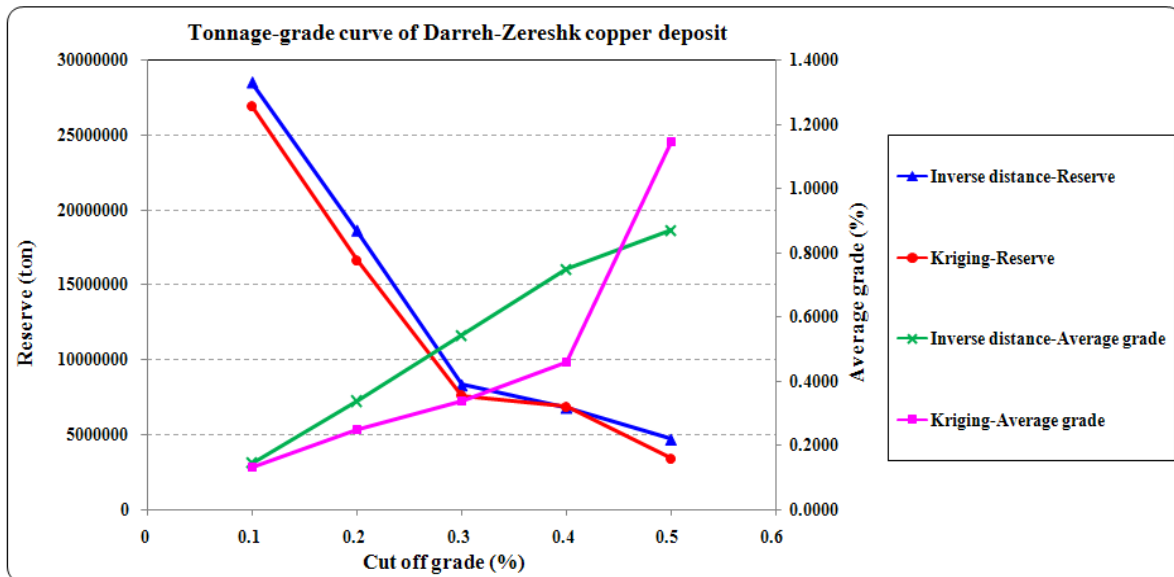
است. نتایج محاسبه عیار و میزان ذخیره کانسار با روش کریجینگ نیز در جدول ۵ خلاصه شده است. همچنین عیار متوسط ماده معدنی در محدوده مورد مطالعه با روش کریجینگ ۰/۴۶۴۹۹ درصد بدست آمد.

مقایسه روش‌های تخمین ذخیره

برای ارزیابی نتایج حاصل از تخمین و دستیابی به نوعی دقت تخمینی، نتایج تخمین ذخیره به دو روش کلاسیک



شکل ۱۱. مدل بلوکی طراحی شده کانسار مس دره‌زرشک با روش تخمین زمین آماری کریجینگ (جهت شمال در راستای محور Y است).



شکل ۱۲. منحنی عیار- تناژ کانسار مس دره‌زرشک با روش‌های عکس مجذور فاصله و کریجینگ

جدول ۴. پارامترهای آماری داده‌های مس تخمین زده شده با روش زمین آماری کریجینگ

متغیر	تعداد	میانگین (%)	واریانس (%)	انحراف استاندارد (%)
عیار مس تخمینی	۱۷۰۶	۰/۰۸۲	۰/۰۲۷	۰/۱۶

جدول ۵: جزئیات نتایج تخمین ذخیره با روش کریجینگ.

عیار حد (درصد)	حجم کانسار (متر مکعب)	میزان ذخیره (تن)	متوسط عیار مس (درصد)
۰/۱	۱۰۱۷۲۰۰۰	۲۶۹۵۵۸۰۰	۰/۱۳۲۲۱۵
۰/۲	۶۲۸۶۰۰۰	۱۶۶۵۷۹۰۰	۰/۲۵۰۲۳۱
۰/۳	۲۸۷۴۰۰۰	۷۶۱۶۱۰۰	۰/۳۳۶۸۸۸
۰/۴	۱۲۸۴۰۰۰	۶۸۷۹۴۰۰	۰/۴۵۸۱۷۷
۰/۵	۲۵۹۶۰۰۰	۳۴۰۲۶۰۰	۱/۱۴۷۴۴۲

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سعی شد از اطلاعات زمین‌شناسی و داده‌های گمانه‌های اکتشافی موجود در کانسار مس دره زرشک، نهایت استفاده را به عمل آورده، با استفاده از پردازش و تلفیق تمام اطلاعات زمین‌شناسی و داده‌های اکتشافی موجود و به تصویر کشیدن آن‌ها، شناخت کاملی از کانسار صورت گیرد. به منظور شناخت کامل کانسار، نمایش بهتر و به تصویر کشیدن مطلوب‌تر ماده معدنی مس در کانسار دره زرشک یزد، چاه نگار سه‌بعدی لیتولوژی تمام گمانه‌ها، نیمرخ‌های عرضی لیتولوژی و عیارسنجی پوشش‌دهنده کل محدوده و مدل سه‌بعدی لیتولوژی کانسار ترسیم شد. شکل چاه‌نگار گمانه‌های عمیق نشان می‌دهد که بطور کلی به لحاظ لیتولوژی، گمانه‌ها عمدتاً از روبره، سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ، دیوریت، گرانودیوریت، کوارتزیت، تونالیت، مونزونیت و شیل تشکیل شده‌اند. مطابق نیمرخ‌های عرضی و مدل سه‌بعدی لیتولوژی در منطقه مورد مطالعه، تنوع لیتولوژی زیادی شامل طیفی از انواع سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی به چشم می‌خورد که در اعماق بیشتر توده‌های نفوذی آذرین وجود داشته و بطور کلی گرانودیوریت و سنگ‌های اسکارنی بیشترین سهم را در منطقه دارند. سطح محدوده نیز بیشتر توسط روبره، شیل و آهک پوشیده شده است. ترسیم مقاطع اکتشافی کانسار به‌ازای عیارحدهای مختلف ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد نشان داد که مناطق شمالی و جنوب‌شرقی کانسار کم‌عیار بوده و بخش‌های غربی و جنوبی کانسار پرعیارتر هستند.

به‌منظور ارزیابی ذخیره کانسار از دو روش کلاسیک عکس مجذور فاصله و زمین‌آماری کریجینگ با استفاده از نرم‌افزار Surpac استفاده شد که نتایج حاصل از آن را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود.

انجام مطالعات واریوگرافی از طریق ترسیم واریوگرام‌های امتدادی در جهات مختلف نشان داد که کانسار دارای ناهمسانگردی از نوع هندسی است. مقایسه نتایج تخمین ذخیره در محدوده مورد مطالعه نیز نشان می‌دهد که بطور کلی اختلاف میزان ذخیره محاسبه شده با استفاده از دو روش استفاده شده نسبتاً زیاد است. به عنوان مثال با استفاده از روش تخمین عکس مجذور فاصله ذخیره ماده معدنی به‌ازای عیار حد ۰/۱٪ برابر با ۲۸۵۰۳۴۰ تن با عیار متوسط ۰/۱۴۵۵۵ درصد بدست آمد. درحالی‌که روش تخمین زمین‌آماری کریجینگ به‌ازای این مقدار عیار حد منجر به تخمین ذخیره برابر با ۲۶۹۵۵۸۰۰ تن با عیار متوسط ۰/۱۳۲۲۱۵ درصد شد. یعنی میزان اختلاف ذخیره دو روش به‌ازای عیار حد ۰/۱٪ در حدود ۱۵۴۷۶۰۰ تن یا ۵/۷٪ می‌باشد. اگرچه روش عکس مجذور فاصله از دقیق‌ترین روش‌های کلاسیک تخمین ذخیره است، اما روش زمین‌آماری کریجینگ با در نظر گرفتن ساختار فضایی منطقه و به‌دلیل ناریب بودن و دارا بودن کمترین میزان واریانس تخمین، دقیق‌تر بوده و از درجه اعتبار بیشتری برخوردار است.

منابع

- احمدی، ر (۱۳۹۹) مقایسه نتایج روش‌های زمین‌آماری خطی و غیرخطی در مدلسازی و ارزیابی ذخیره کانسار مس نارباغی شمالی ساوه، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۱۴، شماره ۵۶، ص ۴۳-۵۹.
- احمدی، ر (۱۴۰۰) مدلسازی زمین‌شناسی - اکتشافی کانسار مس نارباغی شمالی ساوه و تخمین ذخیره کانسار با استفاده از رویکردهای بلوک‌بندی، مدل شبکه دوبعدی و انباشتگی دوبعدی، نشریه زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۱۳، شماره ۲، ص ۴۳۵-۴۶۲.
- احمدی، ر، بهارلوئی، ز (۱۴۰۰) ارزیابی میزان تطابق کیفی و

- مدنی، ح (۱۳۷۴) اصول پی‌جویی، اکتشاف و ارزیابی ذخایر معدنی، انتشارات خانه فرهنگ، ۸۱۶ص.
- نبوی، م. ح (۱۳۵۵) دیباچه ای بر زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- یزدانی، م.، علی‌نیا، ف (۱۳۹۷) بکارگیری مطالعات زمین‌آماري برای شناسایی آنومالی‌های Au-Cu-Fe-W در دره سه هزار تنکابن، علوم زمین، شماره ۱۰۹، ص ۸۳-۹۶.
- Annels, A. E (2012) Mineral deposit evaluation: A practical approach, Springer Science & Business Media, 436 p.
- Bohling, G (2007) SGeMS Tutorial Notes, 26 p.
- 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.
- Daya, A (2012) Reserve estimation of central part of Choghart north anomaly iron ore deposit through ordinary kriging method. International Journal of Mining Science and Technology, 22 (4): 573-577.
- Erickson, Jr. A. J (1992) Geological interpretation, modeling and representation, SME Mining Engineering Handbook (2nd edition), Hartman, H. (ed.), Chapter 5. SME-AIME, New York, 333-343.
- France Coffimine (1989) Co-ali abad dareh zereshk report.
- Remy, N., Boucher, A., Wu, J (2006) SGeMS User's Guide, 129 p.
- Rendu, J. M (1981) An introduction to geostatistical methods of mineral evaluation, South frican institute of mining and metallurgy, 84 p.
- Taghavi, A., Maanijou., M., Lentz., D., Sepahi, A. A (2019) Partial sub-pixel and pixel-based alteration mapping of porphyry system using ASTER data: regional case study in western Yazd, Iran. International Journal of Image and Data Fusion, 10 (4): 300-326.
- کمی داده‌های ژئوفیزیکی با عیارسنجی کانسار مس دره‌زرشک یزد به‌منظور پیشنهاد موقعیت بهینه گمانه‌های اکتشافی جدید، نشریه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی، جلد ۱۵، شماره ۱، ص ۳۴-۱۵.
- احمدی، ر.، سادات کودهی، س. م (۱۳۹۷) تخمین و رده‌بندی ذخیره کانسار سرب و روی ازه‌گیجه رباط خمین استان مرکزی با استفاده از روش‌های زمین‌آماري، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۲، شماره ۲۴، ص ۳۹-۵۳.
- بهارلوئی، ز (۱۳۹۸) پیشنهاد موقعیت حفر گمانه های اکتشافی جدید براساس میزان تطابق و تلفیق اکتشافات ژئوفیزیکی با داده‌های عیارسنجی کانسار مس دره زرشک یزد، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اراک، ۱۵۰ص.
- حاج ملاعلی، ع.، علوی‌نائینی، م (۱۳۷۲) نقشه زمین‌شناسی خضراباد با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- حسنی‌پاک، ع. ا (۱۳۷۹) مدل‌سازی کانسارهای فلزی و غیرفلزی و کاربرد اکتشافی آن‌ها، انتشارات دانشگاه تهران، ۵۱۲ص.
- حسنی‌پاک، ع. ا.، شرف‌الدین، م (۱۳۸۰) تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، ۹۸۷ص.
- حکمت‌نژاد، ا.، حسنی‌پاک، ع. ا (۱۳۹۰) تخمین توزیع عیار مس با استفاده از تخمینگر غیرخطی کریجینگ انفضالی، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره ششم، ص ۱۱-۲۰.
- خسروتهرانی، خ (۱۳۷۲) چینه‌شناسی کرتاسه زیرین در نواحی غرب و جنوب غربی یزد.
- خوئی، ن.، قربانی، م.، تاج‌بخش، پ (۱۳۷۸) کانسارهای مس در ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۴۲۱ص.
- سادات کودهی، س. م (۱۳۹۶) ارزیابی ذخیره کانسار سرب و روی رباط خمین با استفاده از روش‌های کلاسیک و زمین‌آماري، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی اراک، ۱۲۸ص.
- شرکت کنگاوران (۱۳۸۴) گزارش زمین‌شناسی معدن دره‌زرشک.
- شرکت ملی صنایع مس ایران (۱۳۸۱) گزارشات تهیه شده در مقاطع مختلف.
- صمان کاو، مهندسین مشاور (۱۳۸۵) گزارش مطالعات تکمیلی ژئوفیزیک به روش پلاریزاسیون القایی (IP/RS) در محدوده معدن مس دره‌زرشک استان یزد.
- فاضلی‌نسب، ص (۱۳۹۹) مدل‌سازی و ارزیابی ذخیره کانسار مس دره‌زرشک یزد با استفاده از روش‌های زمین‌آماري، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی اراک، ۱۱۵ص.
- مدنی، ح (۱۳۷۱) مبانی زمین‌آمار، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، واحد تفرش، ۶۵۹ص.

3-D modeling and reserve evaluation of Yazd, Dareh-Zereshk copper deposit using geometric and geostatistical estimation methods

R. Ahmadi^{1*} and S. Fazeli Nasab²

1- Assist. Prof., Dept., of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

2- M. Sc., (graduated), Dept., of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

* Rezahmadi@gmail.com

Received: 2021/11/3 Accepted: 2021/12/31

Abstract

In the present research, to fully recognize the Yazd, Darreh-Zereshk copper deposit, 3-D multiple-log of the boreholes lithology, cross-sections of lithology and assay data corresponding to profiles covering the whole area and 3-D lithology model of the deposit were plotted using Rockworks software. Based on this, limestone, skarns, sandstone, diorite, granodiorite, quartzite and monzonite perform the dominant lithology of the region and the surface of the area is mostly covered by overburden, shale and lime. Depending on the deposit conditions, to estimate the deposit reserve, inverse distance squared method as a geometric method and geostatistical kriging method were used through Surpac software. According to the deposit variography using WinGslib software, the deposit has geometric anisotropy and maximum range of 130 m with azimuth zero, mean range of 100 m with azimuth 90 and minimum range of 40 m on the vertical direction with azimuth zero. After geometric modeling and producing block model of the deposit, the reserve was estimated for cut-off grades of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5% copper as well as their results were compared. The results of the reserve calculation show that the difference of the calculated reserves with applied methods is relatively high, i.e. for cut-off grade of 0.1% is about 1547600 tones or 5.7%. Although, inverse distance squared method is the most accurate method among the geometric methods of reserve estimation, geostatistical kriging method considering spatial structure of the region, being unbiased and having minimum estimation variance is more accurate with higher degree of validity.

Keywords: Yazd, Darreh-Zereshk copper deposit, 3-D modeling, WinGslib software, Inverse distance squared, Kriging, Surpac software