

مقایسه روش کریجینگ شاخص رسته‌ای با روش‌های سنتی در مدل‌سازی و تفکیک زون‌های کانی‌سازی و دگرسانی در معدن مس میدوک

نداالسادات میر اسمعیلی^۱؛ فرهاد محمدتراب^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه یزد، neda_miresmaili@yahoo.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، fntorab@yazd.ac.ir

(دریافت ۵ دی ۱۳۹۴، پذیرش ۱۶ اردیبهشت ۱۳۹۶)

چکیده

شناسایی آلتراسیون‌ها و زون‌های کانی‌سازی و تفکیک آن‌ها در کانسارهای پورفیری، برای ارزیابی دقیق ذخیره، طراحی معدن و تنظیم خوراک ورودی به کارخانه فرآوری، اهمیت زیادی دارد. روش‌های سنتی در تفکیک زون‌ها به دلیل دقت کم و وقت‌گیر بودن، دخالت شخص کاربر در تعیین مرزها و همچنین کاربرد قوانین درونیابی یکسان برای کانسارهای مختلف می‌تواند با خطا همراه باشد. در این پژوهش، روش زمین‌آماري کریجینگ شاخص رسته‌ای برای تفکیک آلتراسیون‌ها و زون‌های کانی‌سازی در کانسار مس پورفیری میدوک بررسی شده است. بدین منظور داده‌های آلتراسیون و زون‌های کانی‌سازی در بانک اطلاعاتی گمانه‌ها به صورت باینری تبدیل شده و واریوگرام شاخص زون‌های مختلف ترسیم شد و احتمال حضور هریک از زون‌ها در مدل بلوکی به‌طور مجزا به روش کریجینگ شاخص تخمین زده شد. در نهایت احتمالات وجود زون‌های مختلف در هر بلوک با یکدیگر مقایسه و زون آلتراسیون و کانی‌سازی غالب برای هر بلوک با کدهای رنگی مختلف مشخص شد. در مرحله بعد با استفاده از روش زمین‌آماري کریجینگ معمولی، توزیع عیار در زون‌های مختلف و میزان ذخیره هر زون به صورت مجزا محاسبه شده است. نتایج روش کریجینگ شاخص رسته‌ای و مقایسه آن با حفاری‌های جدید انجام شده به منظور اعتبارسنجی نتایج، نشان می‌دهد که این روش در تعیین و تفکیک مرزها، نسبت به روش کلاسیک، دقت به مراتب بیشتری دارد. نتایج این مطالعات هم‌چنین نشان می‌دهد که با توجه به شعاع تاثیر واریوگرام‌های مدل‌سازی شده، زون سوپرژن و هیپوژن در کانسار به ترتیب تا افق ۲۱۰۰ و ۱۳۰۰ ادامه دارند. آلتراسیون پتاسیک نیز تا افق ۱۲۵۰ در عمق ادامه دارد و آلتراسیون غالب در کانسار، از نوع فیلیک است. بنابراین با استفاده از اطلاعات جدید و در نظر گرفتن عیار حد ۰/۲۵٪ مس، ذخیره‌ای بالغ بر ۱/۱۸ میلیارد تن برای مجموع زون‌های کانی‌سازی با متوسط عیار ۰/۷۸٪ برای این کانسار برآورد می‌شود.

کلمات کلیدی

روش کریجینگ شاخص رسته‌ای، زون‌های کانی‌سازی، زون‌های آلتراسیون، کانسارهای مس پورفیری، کانسار میدوک

۱- مقدمه

کانسارهای مس پورفیری از سیالات ماگمایی هیدروترمالی منشأ می‌گیرند [۱]. این سیالات باعث شکل‌گیری زون‌های کانی‌سازی و آلتراسیون با توجه به تغییرات شیمیایی در سنگ‌های میزبان می‌شوند [۲]. توصیف و تفکیک زون‌های کانی‌سازی دو امر مهم در مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی و همچنین اکتشاف مواد معدنی است. در میان انواع مختلف کانسارها، تفکیک زون‌های کانی‌سازی در کانسارهای فلزی قیمتی اپی‌ترمال به دلیل ارتباط نزدیک بین آلتراسیون و کانی‌سازی دشوار است. این کانسارها بسیار مهم هستند، زیرا بخش زیادی از طلا و نقره در سراسر جهان را تولید می‌کنند [۳]. به نقشه درآوردن صحیح زون‌های کانی‌سازی و آلتراسیون یک نگرانی مهم در اکتشاف ماده معدنی است، به طوری که می‌تواند استراتژی و جهت‌گیری یک برنامه اکتشافی را تعیین کند. همچنین توصیف زون‌های کانی‌سازی و آلتراسیون در مدل‌سازی سه‌بعدی کانسار یک گام مهم برای اهداف اکتشافی و بهره‌برداری می‌باشد، چرا که می‌تواند روی پارامترهای مؤثر طراحی معدن تاثیر بگذارد. خواص مکانیکی سنگ‌ها تحت تاثیر آلتراسیون‌های هیدروترمالی قرار می‌گیرند که در مقابل روی برنامه‌های معدنی و فرآوری مواد معدنی تاثیر می‌گذارند [۴]. در تخمین ذخایر معدنی در برخی از موارد به اشتباه بخشی از سنگ دیواره جزو کانی‌سازی در نظر گرفته می‌شود که این می‌تواند سبب اغراق در میزان ذخیره، برنامه‌ریزی اشتباه تولید و نیز مشکلات زیادی در کارخانه فرآوری شود. از آن‌سو، در برخی از موارد عدم دقت در تعیین درست مرز کانسنگ و سنگ دیواره می‌تواند سبب از دست رفتن برخی از بخش‌های کانسنگ به دلیل باطله تلقی کردن آن بشود. به عبارتی تعیین درست مرز و موقعیت زون‌ها سبب یک برنامه‌ریزی تولید مناسب در بلند مدت برای استخراج کانسارهای پورفیری می‌شود که در طول زمان معدن‌کاری دچار تغییرات کمی خواهد شد. این مسائل نشان‌گر اهمیت مدل‌سازی صحیح کانسار با بهره‌گیری از تمامی داده‌ها و استفاده از روش‌های نوین تخمین با حداقل ریسک ممکن است [۵].

مبنا و اساس کلیه روش‌های جداسازی زون‌های کانی‌سازی و دگرسانی مبتنی بر شناسایی کانی‌ها و دگرسانی‌هاست که با استفاده از مطالعات سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری انجام می‌شود. به عبارتی، شواهد مستقیم و کانی‌های شاخص برای جدایش زون‌ها استفاده می‌شوند. نخستین مدل‌سازی براساس پراکندگی دگرسانی کانی‌های گوناگون در یک کانسار روی کانسار مس پورفیری سنت مانویل سانتاکروز در آریزونا ایالت متحده

آمریکا انجام شد. در این مدل دگرسانی‌های اصلی پتاسیک، فیلیک و پروپیلیتیک از یکدیگر در کانسارهای نوع مونزونیتی جدا می‌شوند و ویژگی اصلی آن زون‌بندی کانسار براساس دگرسانی‌ها است [۶]. براساس این مدل‌ها و دیگر مدل‌های ارائه شده، دگرسانی پتاسیک در ژرفا و مرکز کانسار قرار دارد [۵]. این مدل‌ها در طول بیش از ۳۸ سال تغییر چندانی نداشته اما در سال‌های اخیر روش‌های دیگری چون مطالعات میانبارهای سیال و ایزوتوپ پایدار برای توصیف دقیق‌تر زون‌های مختلف کانی‌سازی به کار برده شده‌اند [۷، ۸]. مهم‌ترین آن‌ها ارائه مدل دگرسانی‌ها براساس داده‌های میانبارهای سیال است که نخستین بار روی کانسار مس و طلای پورفیری باجودال‌آلمبرا در آرژانتین انجام شد [۹]. مدل‌سازی پراکندگی ایزوتوپ گوگرد ۳۴ در کانسار مس و طلای پورفیری کادیای استرالیا و تلفیق نتایج آن با مدل دگرسانی‌ها نیز توسط یکی از پژوهشگران انجام شد [۱۰].

به‌کارگیری موفق روش‌های زمین‌آماری در دهه‌های گذشته، آن‌ها را به‌عنوان ابزارهای قدرتمندی برای تخمین توزیع بسیاری از متغیرها در زمینه‌های مختلف مطرح کرده است. به‌عنوان نمونه محققان، دایک‌های نفوذی ثانویه موجود در کانسار مس پورفیری سونگون را که مشکلاتی در مدل‌سازی ماده معدنی ایجاد کرده بود با استفاده از روش شبیه‌سازی زمین‌آماری مدل‌سازی و به این ترتیب مرز بین ماده معدنی و دایک‌ها را جدا کردند [۱۱]. پژوهشگران دیگر به مدل‌سازی سه بعدی کانسار مس پورفیری سونگون با استفاده از روش شبیه‌سازی متوالی گوسی و مقایسه آن با کریجینگ معمولی پرداختند که نتایج آن نشان داد که همه تحقق‌ها در روش شبیه‌سازی منعکس‌کننده پایایی مرتبه اول و دوم متغیر ناحیه‌ای مس است [۱۲]. در سال ۲۰۱۵ نیز مطالعه‌ای با هدف مدل‌سازی تصادفی انواع سنگ‌ها با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی چندگانه در یک کانسار مس پورفیری و کاربرد آن برای ارزیابی عیار مس انجام شد [۱۳].

پژوهشگرانی نیز با ترکیب روش‌های زمین‌آماری و فرکتالی به ارزیابی کمی منابع معدنی در کانسار مس پورفیری تانگشان در چین پرداختند [۱۴]. همچنین مطالعاتی با هدف تشخیص زون‌های آلتراسیون پتاسیک، فیلیک و پروپیلیتیک در زون هیپوزن کانسار مس پورفیری سونگون برمبنای شبیه‌سازی گوسی و مدل‌سازی فرکتالی عیار - حجم انجام شده است [۱۵]. در سال‌های اخیر روش‌هایی برای کمی‌سازی، تحلیل عددی و شبیه‌سازی زمین‌آماری نتایج میانبارهای سیال ارائه شده است که براساس آن‌ها دگرسانی‌ها و زون‌ها جدا می‌شوند [۱۶، ۱۷].

نفوذی کم عمق مس پورفیری را دربرمی گیرد که هر یک از این دو توده نام محلی خاص خود را دارند. یکی از آن ها میدوک (لاچاه) و دیگری سارا است. کارگاه اصلی در محل معدن میدوک است که در ۷ کیلومتری شمال غرب روستای میدوک واقع شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی کانسار میدوک و نقشه راه های دسترسی به منطقه را نشان می دهد [۲۱].



شکل ۱: نقشه راه های دسترسی معدن مس میدوک [۲۲].

۳- زمین شناسی کانسار مس میدوک

منطقه میدوک قسمتی از مناطق مس خیز استان کرمان است که از نظر زمین شناسی می توان آن را قسمتی از سیستم کوهزایی آلپ - هیمالیا دانست. در ناحیه مس خیز کرمان سنگ های گوناگون آذرآواری (با ترکیب ریولیتی تا آندزیت، بازالتی)، گدازه های جریان، سنگ های آهکی و ماسه سنگ، عمده ترین رخساره سنگ شناسی بوده و اغلب متعلق به ائوسن می باشند. کمر بند فلزایی همراه با زون ولکانیکی پلوتونیک ارومیه - دختر از مهم ترین خطوط کمر بندی سیستم کوهزایی آلپ - هیمالیا مربوط به این زمان است که کانسارهای مس سرچشمه، میدوک و بسیاری کانسارهای مس پورفیری دیگر در آن واقع هستند. سنگ میزبان اصلی کانسار میدوک شامل توده استوک گرانودیوریتی است که در پوشش سنگ های آندزیتی منطقه قرار گرفته است. شکل ۲ نقشه زمین شناسی منطقه را نشان می دهد. مشخص ترین سیمای اغلب ذخایر گرمایی

همچنین پژوهشگرانی از میانبارهای سیال و ایزوتوپ های پایدار برای جدایش دگرسانی ها و زون ها در کانسار مس سونگون در اهر استفاده کردند [۱۸]. در سال ۲۰۱۴ نیز با استفاده از روش رگرسیون لوجستیک، انواع آلتراسیون های هیدروترمالی کانسار مس پورفیری کوه پنج در استان کرمان، براساس داده های ژئوشیمیایی و زمین شناسی مدل شد [۴]. نقطه قوت روش های زمین آماری، علاوه بر پشتوانه ریاضی، نتایج مطلوبی بوده است که در کاربردهای عملی آن در خلال دهه های گذشته مشاهده شده است. با این وجود در بین روش های زمین آماری نیز، انتخاب روش مناسب اهمیت خاصی دارد. تخمین های زمین آماری به طور کلی به دو دسته روش های تخمین خطی و روش های تخمین غیر خطی قابل انجام می باشند [۱۹]؛ که اگر در ارزیابی تناژ و عیار کانسارهای مختلف، مسئله برآورد، محدود به برآورد عیار در یک نقطه باشد، به طور معمول برآوردگرهای خطی کریجینگ، نتایج رضایت بخشی ارائه می دهند؛ اما اگر هدف، برآورد توزیع احتمال مورد نظر برای کنترل آمیختگی بلوک های باطله و کانسنگ باشد، حتی استفاده از بهترین برآوردگرهای خطی با پراش کمینه نیز ممکن است نتایج قابل قبولی به دست ندهد. بدین منظور باید از روش های غیر خطی کریجینگ استفاده شود. یکی از مهم ترین روش های غیر خطی برای این منظور کریجینگ شاخص است. مطالعه ای نیز با هدف مرز بندی بلوک های کانسنگ و باطله با استفاده از روش کریجینگ شاخص در کانسار مس سرچشمه انجام شده است [۲۰].

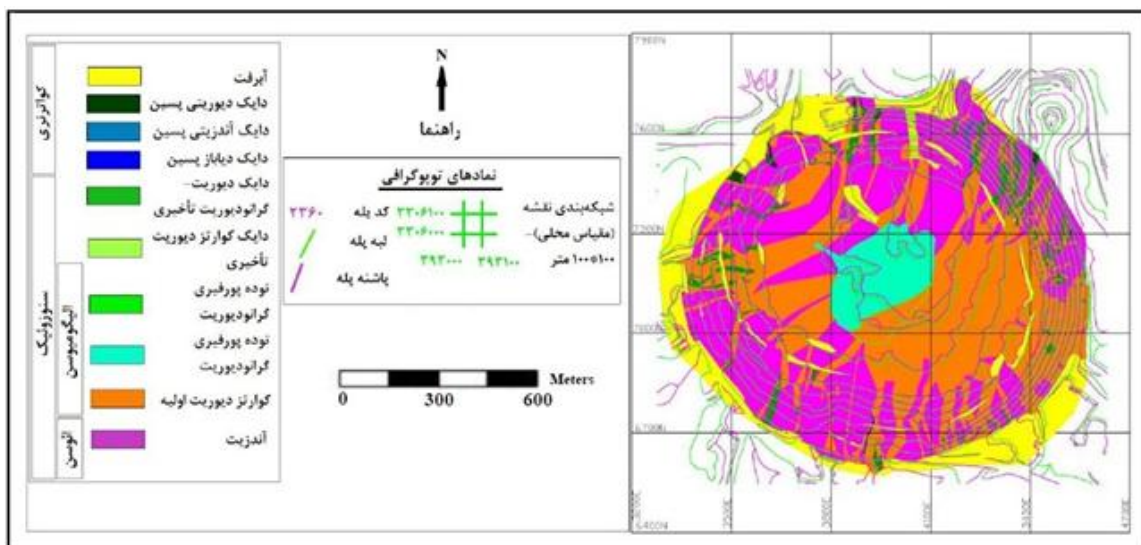
ضعف روش های سنتی و کلاسیک، وابسته بودن به شخص کاربر در تعیین مرزها و به کارگیری قوانین یکسان مدل سازی برای کانسارهای مختلف است. در حالی که مرور تحقیقات انجام شده نشان داده است که استفاده از روش های زمین آماری به خصوص کریجینگ شاخص در تعیین مرزهای کانی سازی و آلتراسیون دقت و سرعت بیشتری دارد. بدین منظور هدف اصلی این مطالعه، استفاده از روش کریجینگ شاخص رسته ای (categorical indicator kriging) در تفکیک زون های گوناگون کانی سازی و آلتراسیون در کانسار پورفیری مس میدوک و مقایسه آن با روش های سنتی است.

۲- موقعیت جغرافیایی کانسار مس پورفیری میدوک

معدن مس میدوک در فاصله ۴۲ کیلومتری شمال شرق شهر بابک و ۱۳۲ کیلومتری شمال غرب معدن مس سرچشمه قرار گرفته است. سیمای ظاهری این منطقه در اغلب نقاط شامل تپه ماهورهای نسبتاً مدوری است که با شیب ملایم به دره های کم عمق منتهی می شود. محدوده مس میدوک دو توده

گسترش زیاد در بالای زون پتاسیک قرار دارد و توسط مجموعه کوارتز - سرسیت - پیریت مشخص می‌شود. بخشی از ذخیره مس در این زون قرار دارد. پیریت مهم‌ترین کانی سولفیدی این منطقه است که به صورت پراکنده و رگه‌ای مشاهده می‌شود. زون آرژلیک هرچند محدود در بالای زون فیلیک واقع شده است. کانی‌های رسی ویژگی اصلی این زون بوده و به‌عنوان یک راهکار اکتشافی محسوب می‌شوند. زون پروپیلیتیک نیز از خارج زون - های بیان شده در بالا را در برمی‌گیرد؛ بدین صورت که از بالا به زون فیلیک و از پایین به زون پتاسیک ختم می‌شود. این زون اغلب گسترش زیادی در خارج از پیت معدن دارد. کلریت رایج- ترین کانی این زون است [۲۱].

پورفیری، زون‌های دگرسانی آن است که به‌طور عمده با نظم خاصی در اطراف توده معدنی قرار می‌گیرند. این زون‌ها توسط سیالات گرمایی ایجاد شده و در بسیاری از موارد همراهی مشخصی بین این زون‌ها و کانه‌زایی دیده می‌شود. در شکل ۳ انواع زون‌های آلتراسیون موجود در کانسار مس میدوک نشان داده شده است. زون پتاسیک در بخش مرکزی توده پورفیری و در عمیق‌ترین بخش کانسار قرار دارد و تحت تأثیر آب‌های ماگمایی غنی از پتاسیم و کمپلکس‌های کلروره مس، به‌وجود آمده است. کانی‌های معروف این زون عبارتند از: فلدسپات پتاسیم، بیوتیت‌های ثانویه، مگنتیت و انیدریت که به‌صورت جانیشینی رگچه‌ای و پراکنده یافت می‌شوند. زون فیلیک با



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی معدن مس میدوک [۲۱].

رسته‌ای تقسیم می‌شود. در این پژوهش از کریجینگ شاخص رسته‌ای که رابطه آن به‌صورت زیر می‌باشد استفاده شده است:

$$i(u_a; k) = \begin{cases} 1, & \text{if category } k \text{ is present at location } u_a \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

که در آن $k = 1, \dots, K$ برابر تعداد رسته‌ها است، به‌گونه‌ای که متغیر رسته‌ای u_a با یک مقدار شاخص K جایگزین می‌شود که این مقدار شاخص ۱ یا ۰ است [۲۴]. روش کریجینگ شاخص رسته‌ای توزیع احتمال یک متغیر در منطقه مورد بررسی را تخمین می‌زند [۲۵].

۴- کریجینگ شاخص رسته‌ای

کریجینگ شاخص، یکی از انواع روش‌های کریجینگ است که روی داده‌های باینری شده اعمال می‌شود. این روش که اولین بار توسط ژورنل ارائه شده است در مواردی که توصیف ارتباط فضایی یک پارامتر با تغییر پذیری زیاد به‌وسیله داده‌های خام دشوار باشد استفاده می‌شود. کاربرد مفید دیگر آن مدل‌سازی متغیرهای رسته‌ای است، برای مثال اگر یک نمونه متعلق به یک نوع خاک و یا سنگ خاصی باشد و یا اگر مقدار یک متغیر بالاتر یا پایین‌تر از یک حد تعیین شده قرار بگیرد [۲۳]. کریجینگ شاخص به دو دسته کریجینگ شاخص عددی و

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص می‌باشد تفکیک زون‌ها به روش کلاسیک غالباً انطباق خوبی با زون‌های کانی‌سازی در گمانه‌های جدید دارد؛ اما مشاهده می‌شود که تعدادی از گمانه‌های جدید نیز خارج از محدوده تخمین خورده به روش کلاسیک قرار گرفته اند بنابراین این روش نتوانسته پوشش خوبی از زون‌های کانی‌سازی به خصوص در برون‌یابی آن‌ها ارائه کند. این مسأله نشان می‌دهد از آنجایی که توصیف حوزه‌های زمین‌شناسی با استفاده از روش کلاسیک به تفسیر شخص و دانش آن در مورد فرآیندهای کانی‌سازی وابسته است، بنابراین امکان تفسیرهای مختلف وجود دارد. هم‌چنین توصیف حوزه‌های زمین‌شناسی با استفاده از روش سنتی در موارد کم بودن اطلاعات در دسترس (محدود بودن حفاری‌های انجام شده در کانسار) صرفاً در محدوده گمانه‌های اکتشافی قابل استفاده و معتبر بوده و برون‌یابی و تعمیم آن به کل محدوده کانسار ساده نبوده و بعضاً با خطا همراه است [۲۶].

از شکل ۱۲ مشخص می‌شود که نتیجه تخمین به روش کریجینگ شاخص به خوبی تمامی گمانه‌های جدید را در بر گرفته است و از نظر تفکیک زون به دلیل عدم دخالت شخص کاربر دقت بالایی دارد. در نتیجه با توجه به این‌که ضعف روش‌های کلاسیک وابسته بودن به شخص کاربر در تعیین مرزها و کاربرد قوانین یکسان درون‌یابی و برون‌یابی برای کانسارهای مختلف می‌باشد، استفاده از روش زمین‌آماري کریجینگ شاخص رسته‌ای همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است دقت و هم‌چنین سرعت اجرای بیش‌تری دارد. هر دو مدل‌سازی نیز نشان می‌دهند که زون سوپرژن و هیپوژن به ترتیب تا افق ۲۱۰۰ و ۱۳۰۰ متر در کانسار ادامه دارند.

قابل ذکر است که اخیراً عمیق‌ترین گمانه اکتشافی حفر شده در کف پیت معدن، گمانه شماره MDK-11 با عمق ۱۰۳۹ متر است که تا افق ۱۵۰۰ حفاری شده و وجود ماده معدنی تا این افق را به اثبات رسانده است. این در حالی است که حفاری انجام شده با وجود حضور ماده معدنی در کف گمانه احتمالاً به دلیل مشکلات حفاری متوقف شده است و تأییدی بر حضور عمیق‌تر زون هیپوژن و کانی‌سازی مربوط به آن در عمق بیش‌تر است که یافته‌های این پژوهش را نیز تأیید می‌کند.

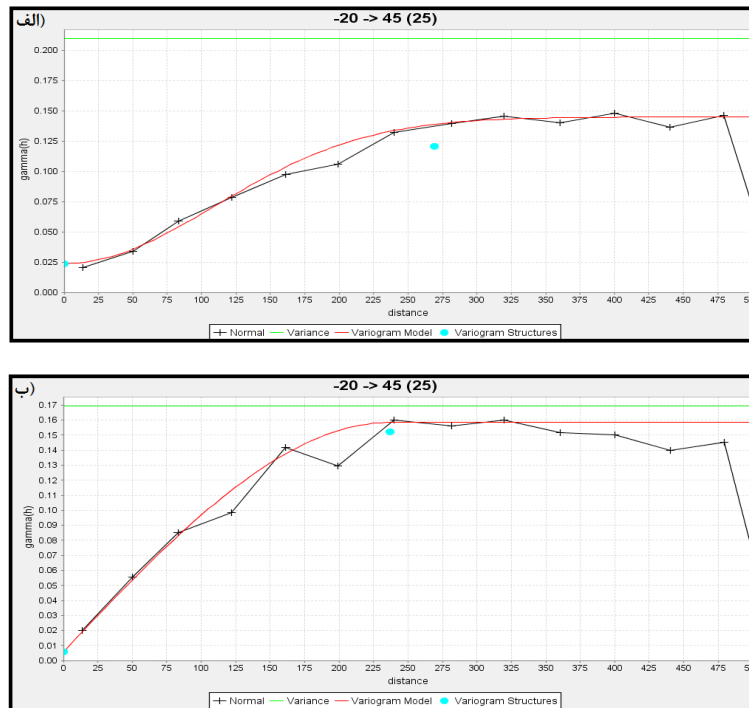
شدند. برای رسم واریوگرام و نیز تفکیک زون‌های کانی‌سازی و آلتراسیون در این کانسار از نرم‌افزار سورپک نسخه ۶,۳ استفاده شده است. بدین منظور ابتدا با استفاده از زون‌های کانی‌سازی و آلتراسیون مشخص شده در گمانه‌ها، داده‌ها به صورت باینری تبدیل شدند و واریوگرام شاخص زون‌های مختلف ترسیم و بهترین مدل واریوگرام به داده‌های تجربی برازش داده شد. به‌عنوان نمونه واریوگرام و نقشه واریوگرام زون‌های هیپوژن و سوپرژن در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است که نشان می‌دهد هر دو زون آنیزوتروپی و در جهت آزیموت ۴۵ درجه، بیش‌ترین پیوستگی را دارند. مشخصات واریوگرام زون‌های هیپوژن و سوپرژن در جدول‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است. واریوگرام و نقشه واریوگرام زون‌های آلتراسیون پتاسیک و فلیک نیز به‌عنوان نمونه در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده و نشان‌دهنده این است که زون پتاسیک دارای روند بوده و واریوگرام آن از سقف عبور می‌کند؛ بنابراین این زون تا اعماق زیاد گسترش دارد و اگر یک فاصله اطمینان مناسب (دو برابر شعاع تأثیر) برای تخمین آن در نظر گرفته شود، تا عمقی بالغ بر ۷۶۰ متر از عمیق‌ترین گمانه‌های اکتشافی، زون پتاسیک می‌تواند ادامه داشته باشد. در جهت قائم نیز آنیزوتروپی و بیش‌ترین پیوستگی این زون مشاهده می‌شود. جدول ۳ مشخصات واریوگرام زون پتاسیک را نشان می‌دهد. شکل ۸-ب و جدول ۴ نیز بیان‌گر این است که زون فلیک نیز آنیزوتروپی و در جهت آزیموت ۸ درجه بیش‌ترین پیوستگی با شعاع تأثیر ۳۱۲ متر را دارد. ابعاد مدل بلوکی در کانسار مس میدوک در سه جهت X ، Y و Z به ترتیب ۲۵، ۲۵ و ۱۵ متر در نظر گرفته شده است. سپس احتمال حضور هر یک از زون‌ها در مدل بلوکی تخمین زده شد و در نهایت احتمالات زون‌های مختلف در هر بلوک با یکدیگر مقایسه و زون کانی‌سازی و آلتراسیون غالب برای هر بلوک با کدهای رنگی خاصی مشخص شد (شکل ۹ و ۱۰).

۵-۳- بحث

پس از این‌که جوامع گوناگون کانی‌سازی و آلتراسیون با استفاده از دو روش کلاسیک و کریجینگ شاخص از یک‌دیگر جدا شدند، نتایج هر دو روش با داده‌های جدید که مربوط به اطلاعات تعدادی از گمانه‌های اکتشافی اخیراً حفر شده در معدن می‌باشد، جهت اعتبارسنجی روش مقایسه گردیده است. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نتیجه تفکیک زون‌های کانی‌سازی به هر دو روش را با گمانه‌های جدید نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۳ نیز مشخص می شود که تفکیک زون های آلتراسیون با استفاده از روش کریجینگ شاخص توسط گمانه های جدید حفر شده به خوبی تأیید می شود و انطباق قابل قبولی بین زون های تفکیک شده به روش کریجینگ شاخص با زون های موجود در گمانه های جدید وجود دارد و این نشان می دهد که این روش به خوبی توانسته است زون های آلتراسیون را مدل سازی و تفکیک کند.

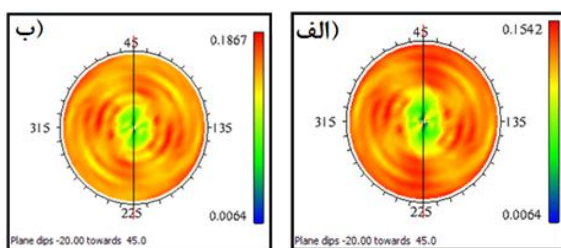
مدل سازی زون های آلتراسیون (شکل ۱۰) نشان می دهد که آلتراسیون غالب در منطقه، از نوع فیلیک است و محدوده وسیعی از کانسار را در بر می گیرد. همچنین مدل سازی آلتراسیون پتاسیک نشان دهنده این است که این آلتراسیون گسترش عمقی قابل توجهی دارد و حداقل تا افق ۱۲۵۰ متر ادامه دارد.



شکل ۵: واریوگرام شاخص زون های کانی سازی در کانسار مس میدوک، الف) واریوگرام شاخص زون هیپوزن در جهت اصلی، ب) واریوگرام شاخص زون سوپرزن در جهت اصلی

جدول ۱: پارامترهای واریوگرام شاخص زون هیپوزن در جهت محور اصلی (بیشترین پیوستگی)

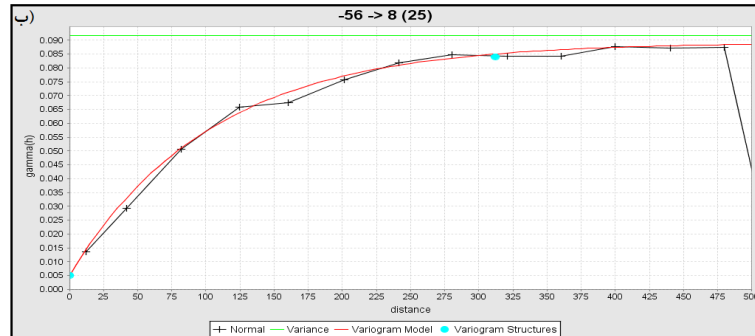
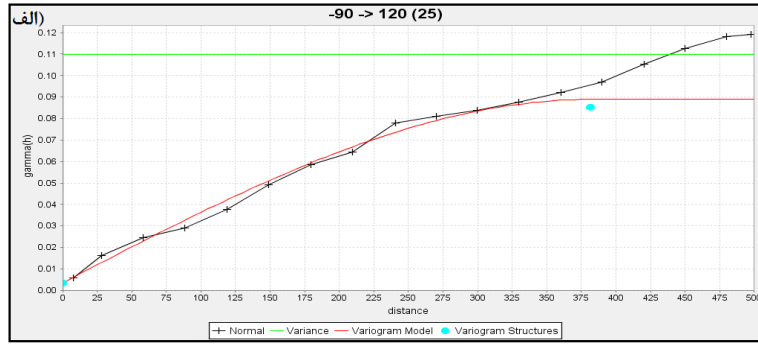
دامنه (متر)	سقف (٪)	اثر قطعه ای (٪)	آزیموت	مدل واریوگرام
۲۶۹	۰/۱۴۵	۰/۰۲۴	۴۵°	گوسی



شکل ۶: نقشه واریوگرام شاخص زون های کانی سازی در کانسار مس میدوک، الف) نقشه واریوگرام شاخص زون هیپوزن (نشان دهنده بیضوی آنیزوتروپی و بیشترین پیوستگی در آزیموت ۴۵°)، ب) نقشه واریوگرام شاخص زون سوپرزن (نشان دهنده بیضوی آنیزوتروپی و بیشترین پیوستگی در آزیموت ۴۵°)

جدول ۲: پارامترهای واریوگرام شاخص زون سوپرزن در جهت محور اصلی (بیشترین پیوستگی)

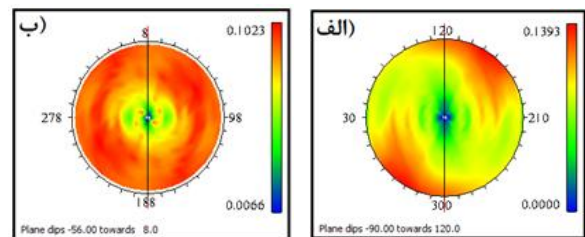
دامنه (متر)	سقف (٪)	اثر قطعه ای (٪)	آزیموت	مدل واریوگرام
۲۳۶	۰/۱۵۸	۰/۰۰۶	۴۵°	کروی



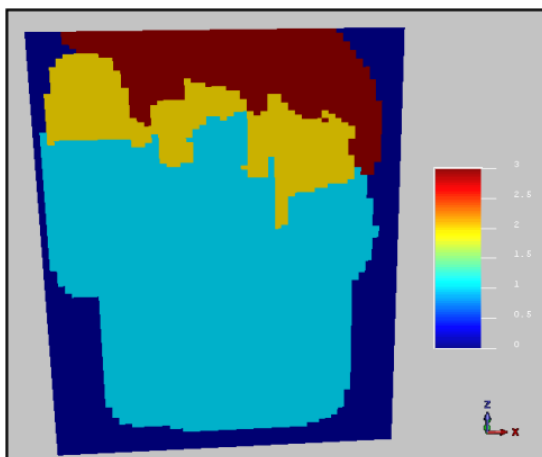
شکل ۷: واریوگرام شاخص زون‌های آلتراسیون در کانسار مس میدوک، الف) واریوگرام شاخص زون پتاسیک در جهت اصلی (جهت قائم)، ب) واریوگرام شاخص زون فیلیک در جهت اصلی

جدول ۴: پارامترهای واریوگرام شاخص زون فیلیک در جهت محور اصلی (بیش‌ترین پیوستگی)

مدل واریوگرام	آزیموت	اثر قطعه‌ای (%)	سقف (%)	دامنه (متر)
نمایی	۸°	۰/۰۰۵	۰/۰۸۹	۳۱۲



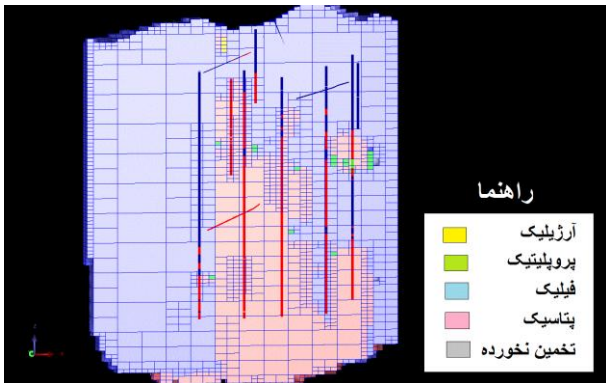
شکل ۸: نقشه واریوگرام شاخص زون‌های آلتراسیون در کانسار مس میدوک، الف) نقشه واریوگرام شاخص زون پتاسیک (نشان‌دهنده بیضوی آنیزوتروپی و بیش‌ترین پیوستگی در آزیموت ۱۲۰°، ب) نقشه واریوگرام شاخص زون فیلیک (نشان‌دهنده بیضوی آنیزوتروپی و بیش‌ترین پیوستگی در آزیموت ۸°)



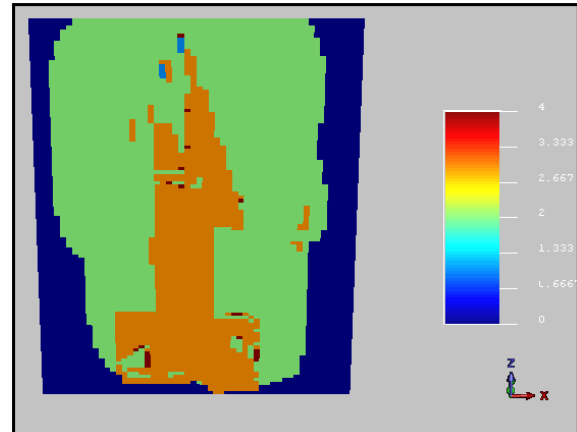
شکل ۹: تفکیک زون‌های کانی‌سازی شده اکسید و شسته شده (قرمز)، سوپرژن (زرد) و هیپوژن (آبی کم‌رنگ) در بلوک‌های معدنی به روش کریجینگ شاخص رسته‌ای در کانسار مس میدوک

جدول ۳: پارامترهای واریوگرام شاخص زون پتاسیک در جهت محور اصلی (بیش‌ترین پیوستگی)

مدل واریوگرام	آزیموت	اثر قطعه‌ای (%)	سقف (%)	دامنه (متر)
کروی	۱۲۰°	۰/۰۰۴	۰/۰۸۹	۳۸۱



شکل ۱۳: اعتبارسنجی نتیجه تفکیک زون های آلتراسیون به روش کریجینگ شاخص رسته ای با گمانه های جدید

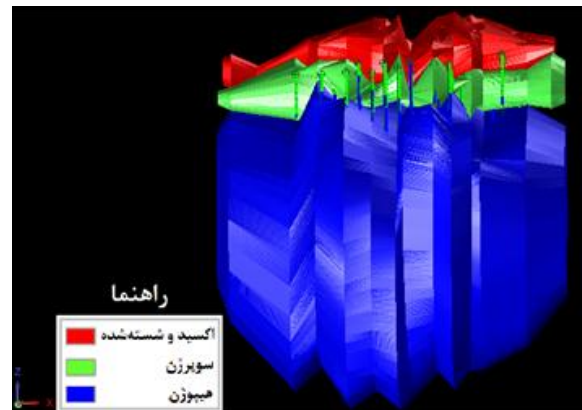


شکل ۱۰: تفکیک زون های آلتراسیون آرژیلیک (آبی کم رنگ)، فیلیک (سبز)، پتاسیک (نارنجی) و پروپیلیتیک (قرمز) در بلوک های معدنی به روش کریجینگ شاخص رسته ای در کانسار مس میدوک

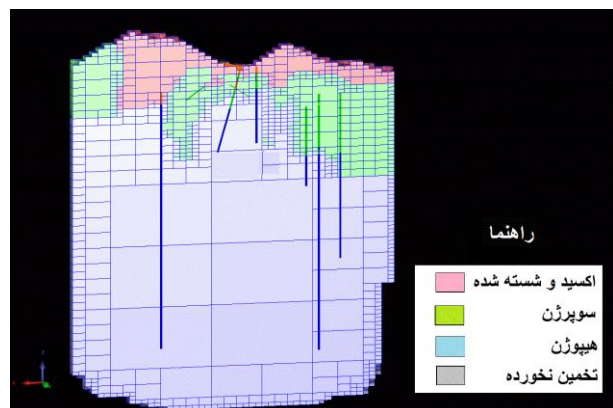
۴-۵- ارزیابی ذخیره و بررسی توزیع عیار مس در زون های مختلف کانی سازی و آلتراسیون

۴-۵-۱- توزیع عیار مس در زون های مختلف کانی سازی

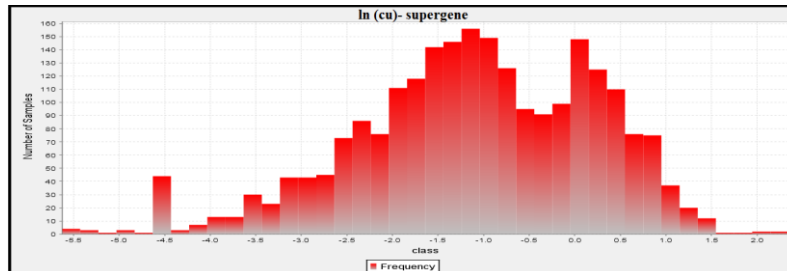
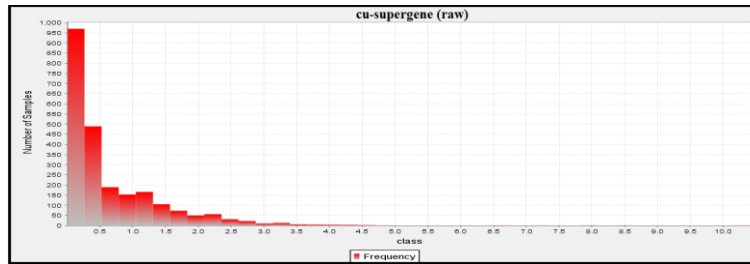
برای بررسی توزیع عیار مس در زون های مختلف کانی سازی ابتدا با توجه به طول نمونه های گرفته شده از گمانه های اکتشافی، کامپوزیت هایی به طول ۵ متر (۱/۳ ارتفاع پله های استخراجی) انتخاب شد؛ سپس با توجه به این که جدایش جوامع هموزن آماری از الزامات پیش از انجام هر تخمین زمین آماری است و کانسارهای مس پورفیری دارای زون بندی های مشخصی هستند و هر کدام از لحاظ کانی شناسی و آلتراسیون مستقل می باشند، داده های مربوط به هر زون تفکیک شد و توزیع داده ها در هر زون به طور مجزا بررسی شد. در کانسار مس میدوک توزیع داده ها در زون های مختلف کانی سازی دارای توزیع لگاریتمی با چولگی مثبت می باشد؛ در این حالت با استفاده از تابع $\ln(\text{Cu})$ ، داده های مس با تقریب قابل قبولی نرمال می شوند. به عنوان نمونه در شکل ۱۴ هیستوگرام توزیع عیار داده های مس در زون سوپرزن قبل و بعد از نرمال سازی نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص می شود که توزیع عیار مس در زون سوپرزن خود از دو جامعه پرعیار و کم عیار تشکیل شده است که بایستی تفکیک شوند.



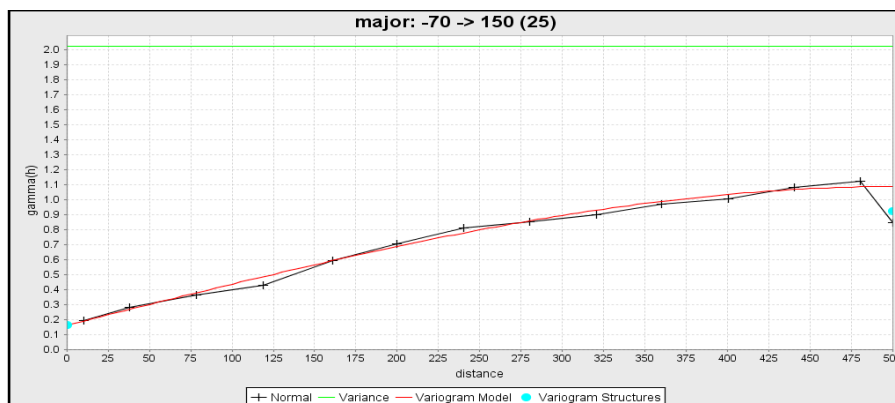
شکل ۱۱: اعتبارسنجی نتیجه تفکیک زون های کانی سازی به روش کلاسیک با گمانه های جدید.



شکل ۱۲: مقطع قائمی از اعتبارسنجی نتیجه تفکیک زون های کانی سازی به روش کریجینگ شاخص رسته ای با گمانه های جدید



شکل ۱۴: هیستوگرام داده‌های عیار مس به‌عنوان نمونه در زون سوپرژن، الف) داده‌های خام کامپوزیت شده، ب) داده‌های کامپوزیت پس از نرمال‌سازی (با تابع لگاریتمی طبیعی) نشان دهنده دو جامعی بودن توزیع عیار در زون سوپرژن



شکل ۱۵: واریوگرام عیار مس به‌عنوان نمونه در زون هیپوژن در جهت اصلی

مس در کل کانسار میدوک به شکل قارچی با کلاهدک رو به پایین است و هرچه به سمت عمق می‌رویم عیار مس موجود در کانسار به طور جزئی افزایش می‌یابد.

جدول ۵: پارامترهای واریوگرام عیارمس در زون کانی‌سازی هیپوژن در جهت اصلی

دامنه (متر)	سقف (٪)	اثر قطعه‌ای (٪)	آزیموت	مدل واریوگرام
۵۰۰	۱/۰۸۷	۰/۱۶۲	۱۵۰°	کروی

پس از نرمال‌سازی داده‌های هر زون و واریوگرافی آن‌ها، مدل بلوکی با ابعاد ۲۵، ۲۵ و ۱۵ متر، تهیه و عملیات تخمین در مدل بلوکی برای هر سه زون کانی‌سازی به روش کریجینگ انجام شد. به‌عنوان نمونه مدل‌سازی واریوگرام زون هیپوژن در شکل ۱۵ و پارامترهای واریوگرام مدل شده در جدول ۵ نشان داده شده است و نتیجه اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده با در نظر گرفتن نسبت‌های آنیزوتروپی به‌عنوان نمونه در جدول ۶ ارائه شده است. جدول ۷ نتیجه تخمین در سه زون کانی‌سازی را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که با توجه به هیستوگرام داده‌ها در زون سوپرژن، این زون خود به دو زیر زون سوپرژن پرعیار در مرکز کانی‌سازی و سوپرژن کم‌عیار در حاشیه کانی‌سازی تفکیک و به طور مجزا تخمین زده شده است. تلفیق توزیع عیار در زون‌های مختلف در شکل ۱۶ ارائه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که توزیع عیار

مشاهده می شود که عیار مس در زون آلتراسیون پتاسیک بیش تر از بقیه زون هاست و این بدان معناست که با افزایش عمق عیار مس در کانسار برخلاف سایر کانسارهای مس پورفیری، بالا می رود. شواهد حفاری های انجام شده اخیر نیز افزایش عیار کانسار در عمق را به خصوص در زون پتاسیک تأیید می کند. میزان ذخیره در زون آلتراسیون فیلیک بالاترین ذخیره را در مقایسه با بقیه زون های آلتراسیون شامل می شود.

جدول ۸: نتیجه تفکیک و ارزیابی ذخیره زون های مختلف آلتراسیون در کانسار مس میدوک

عیار میانگین (درصد)	تناژ (میلیون تن)	زون آلتراسیون
۰/۸	۸/۲	پروپیلیتیک
۰/۲۸	۰/۰۷	آرژلیک
۰/۶۸	۶۸۱	فیلیک
۰/۹	۴۹۶	پتاسیک

۶- نتیجه گیری

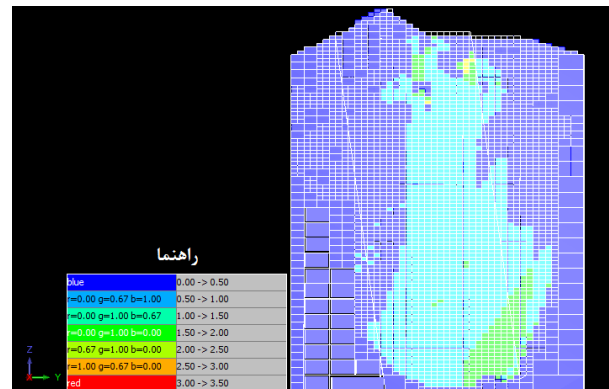
شناسایی زون های کانی سازی و آلتراسیون و تفکیک آن ها در کانسارهای پورفیری، یکی از مهم ترین اهداف اکتشاف این کانسارهاست. روش های زمین آماری و کلاسیک در این زمینه نقش مهمی را ایفا کرده و می تواند در تفکیک این زون ها به کار گرفته شوند. تفکیک زون ها به روش کلاسیک و درون یابی و برون یابی آن با روش های سنتی با توجه به این که قضاوت اشخاص در آن دخیل است، می تواند با خطا همراه باشد. بنابراین استفاده از روش زمین آماری کریجینگ شاخص رسته ای برای جدایش و تخمین مرزها به ویژه زمانی که مرزها به خوبی مشخص نمی باشند ارجحیت دارد. در این روش، شعاع تأثیر در زون های مختلف مدنظر قرار می گیرد و درون یابی و برون یابی مرزها براساس مدل واریوگرام های شاخص و پارامترهای بیضوی آنیزوتروپی صورت می گیرد. این روش به طور قابل توجهی برای کاهش ریسک ارزیابی ذخیره در کانسار مناسب می باشد. تخمین به روش های زمین آماری دقت و سرعت اجرای بیشتری دارد و حسن آن این است که می تواند برای تمام بلوک ها وضعیت زون های کانی سازی و آلتراسیون ها را به طور مجزا تخمین بزند و به صورت کدهای تلفیقی ارائه نماید. بهره گیری از روش کریجینگ شاخص رسته ای نشان داد که تفکیک زون های کانی سازی و همچنین آلتراسیون با این روش نه تنها سرعت بیشتری دارد بلکه مقایسه نتایج با

جدول ۶: نتایج اعتبارسنجی متقابل واریوگرام و بیضوی آنیزوتروپی در نظر گرفته شده مربوط به تخمین عیار در زون هیپوژن

SUMMARY STATISTICS OF KRIGING ERRORS	
MEAN	-0.0008
VARIANCE	0.1977
STD.DEVIATION	0.4447
AVG.SQ.ERROR	0.1977
WEIGHTED SQ. ERR	0.1971
SKEWNESS	0.2927
KURTOSIS	8.5207
NO.OF ASSAYS	6970
AVE. KRIG VARIANCE	0.2168
PERCENTAGE OF ERRORS WITHIN TWO STD. DEVIATIONS	94.46

جدول ۷: نتیجه ارزیابی ذخیره زون های مختلف کانی سازی

عیار میانگین (درصد)	تناژ (میلیون تن)	زون کانی سازی
۰/۴۷	۲/۷	اکسید و لیچ
۰/۳۳	۴۰	سوپرژن کم عیار
۱/۲۲	۳۷	سوپرژن پر عیار
۰/۷۷	۱۱۰۸	هیپوژن
۰/۷۸	۱۱۸۷/۷	جمع



شکل ۱۶: مقطع قائمی از وضعیت توزیع عیار مس در کانسار مس میدوک بر اساس تخمین های زده شده در هر زون

۵-۴-۲- توزیع عیار مس در زون های مختلف آلتراسیون

برای بررسی توزیع عیار در زون های مختلف آلتراسیون ابتدا محدوده های مربوط به هر زون آلتراسیون بریده و سپس با مدل بلوکی ای که عیار مس در آن تخمین زده شده است، قطع داده شد. جدول ۸ نتیجه تخمین در زون های مختلف آلتراسیون را نشان می دهد. با مقایسه تخمین ذخیره هر زون آلتراسیون

فرکتالی عیار - حجم در جدایش زون‌ها در کانسارهای پورفیری"، *مجله علوم زمین*، ش ۷۸، ص ۱۶۸ تا ۱۷۲.

[6] Lowell, J.D. & Guilbert, J.M.; 1970; "*Lateral and vertical alteration- mineralization zoning in porphyry ore deposits*", *Economic Geology*, 65, pp. 373-408.

[7] Faure, K.; Matsuhisa, Y.; Metsugi, H.; Mizota, C.; Hayashi, S.; 2002; "*The Hishikari Au- Ag epitermal deposit, Japan: oxygen and hydrogen isotope evidence in determining the source of paleohydrothermal fluids*", *Economic Geology*, 97, pp. 481-498.

[8] Boyce, A.J.; Fulgnati, P.; Sbrana, A.; Fallick, A.E.; 2007; "*Fluids in early stage hydrothermal alteration of high- sulfidation epithermal systems: A view from the volcano active hydrothermal system (Aeolian Island, Italy)*", *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 166, pp. 76-90.

[9] Ulrich, T.; Gunther, D.; Heinrich, C.A.; 2001; "*The evolution of a porphyry Cu- Au deposit, based on La- ICP-MS analysis of fluid inclusions, Bajo de la Alumbrera, Argentina*", *Economic Geology*, 96, pp. 1743-1774.

[10] Wilson Alan, J.; David, R.; Cooke, B.; Harper, M.; Benjamin, J.; Deyell, Cari L.; 2007; "*Sulfur isotopic zonation in the Cadia district, southeastern Australia: exploration significance and implications for the genesis of alkali porphyry gold- copper deposits*", *Miner Deposita*, 42, pp. 465-487.

[11] Asghari, o.; 2015; "*Geostatistical simulation of dyke systems in sungun porphyry copper deposit, Iran*", *Journal of Mining & Environment*, 6, pp. 1-10.

[12] Soltani, F.; Afzal, P.; Asghari, O.; 2013; "*Sequential Gaussian Simulation in the Sungun Cu Porphyry Deposit and Comparing the Stationary Reproduction with Ordinary Kriging*", *Universal Journal of Geoscience*, 1, pp. 106-113.

[13] Talebi, H.; Asghari, O.; Emery, X.; 2015; "*Stochastic rock type modeling in a porphyry copper deposit and its application to copper grade evaluation*", *Journal of Geochemical Exploration*, 157, pp. 162-168.

[14] Wang, G.; Pang, Zh.; B. Boisvert, J.; Hao, Y.; Cao, Y.; Qu, J.; 2013; "*Quantitative assessment of mineral resources by combining geostatistics and fractal methods in the Tongshan porphyry Cu deposit (China)*", *Journal of Geochemical Exploration*, 134, pp. 85-98.

[15] Soltani, F.; Afzal, P.; Asghari, O.; 2014; "*Delineation of alteration zones based on Sequential Gaussian Simulation and concentration- volume fractal modeling in the hypogene zone of Sungun copper deposit, NW Iran*", *Journal of Geochemical Exploration*, 140, pp. 64-76.

[16] Hezarkhani, A.; 2006; "*Mineralogy and fluid inclusion investigations in the Raigan Porphyry System, Iran, the path to an uneconomic porphyry copper deposit*", *Journal of Asian Earth Sciences*, 27, pp. 598-612.

[17] Asghari, O. & Hezarkhani, A.; 2008; "*Appling Discriminant Analysis to Separate the Alteration Zones within the Sungun Porphyry Copper Deposit*", *Journal of Applied Sciences*, 24, pp. 4472-4486.

[18] Hezarkhani, A. & Williams-Jones, A.E.; 1998; "*Controls of alteration and mineralization in the Sugun porphyry copper deposit, Iran: Evidence from fluid*

اطلاعات گمانه های جدید نیز ثابت کرد که این روش در مقایسه با روش های سنتی در تخمین مرزها به دلیل عدم دخالت شخص کاربر دقت به مراتب بالاتری دارد. نتایج روش زمین‌آماری و تحلیل‌های جدید نشان می‌دهد که زون هیپوژن در کانسار مس میدوک گسترش زیادی دارد و حداقل تا افق ۱۳۰۰ متر در عمق ادامه دارد. مدل‌سازی زون‌های آلتراسیون نیز نشان می‌دهد که آلتراسیون غالب در کانسار متعلق به زون فیلک است و همچنین شعاع تأثیر واریوگرام‌ها در زون پتاسیک نشان‌دهنده این است که کانی‌سازی می‌تواند تا افق ۱۲۵۰ متر ادامه داشته باشد. با تحلیل‌های زمین‌آماری عیار به تفکیک در زون‌های مختلف کانی‌سازی و به کار بردن روش تخمین کریجینگ معمولی و با در نظر گرفتن عیارحد ۰/۲۵٪ برای مس، کل ذخیره برآورد شده برای این کانسار تا پایین‌ترین افق برون‌یابی شده، ۱/۱۸ میلیارد تن در کاتاگوری‌های مختلف می‌باشد.

۷- تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت و پشتیبانی مرکز تحقیق و توسعه مجتمع مس شهربآبک انجام شده است. بنابراین بدین وسیله از مدیریت این مجتمع و مرکز تحقیق و توسعه مجتمع مس شهربآبک و شرکت ملی صنایع مس ایران که مؤلفین را در انجام این پژوهش یاری نمودند، صمیمانه سپاسگزاری به عمل می‌آید.

مراجع

[1] Rapien, M.H.; Bodnar, R.J.; Simmons, S.F.; Szabo, C. and S.R. Sutton; 2003; "*The Embryonic Porphyry Copper System at White Island*", 1st Edn, The Geochemical Society, New Zealand, ISBN, vol. 1-887483-90-x.

[2] Hedenquist, G.W.; Lowenstem, J.B.; 1994; "*The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits*", *Nature*, 370, pp. 519- 527.

[3] Hedenquist, G.W.; Arribas, R.A.; Gonzalez- Urien, E.; 2000; "*Exploration for epithermal gold deposits*", In: Hagemann, S.G (Ed.), *Gold in 2000. Reviews in Economic Geology*, 13, pp. 245- 277.

[4] Mokhtari, A.R.; 2014; "*Hydrothermal alteration mapping through multivariate logistic regression analysis of litho-geochemical data*", *Journal of Geochemical Exploration*, 145, pp. 207-212.

[۵] افضل، پیمان؛ خاکزاد، احمد؛ معارف‌وند، پرویز؛ رشیدنژاد عمران، نعمت‌الله؛ فداکار القلندیس، یونس؛ ۱۳۸۹؛ "*استفاده از روش*

[23] Marinoni, O.; 2003; "Improving geological models using a combined ordinary- indicator kriging approach", Engineering Geology, 69, pp. 37-45.

[24] Leuangthong, O.; Daniel Khan, K.; Deutsch, C.V.; 2008; "Solved Problems in Geostatistics", A JOHN WILEY & SONS, INC.

[25] Alli, M.M.; Novatzki, E.A.; Myers, D.E.; 1990; "Probabilistic analyses of collapsing soil by indicator kriging", Mathematical Geology, 22, pp. 15-35.

[26] Kasmaee, S.; Torab, F.M.; 2014; "Risk reduction in Sechahun iron ore deposit by geological boundary modification using multiple indicator Kriging", Journal of central south university, 21, pp. 2011-2017.

inclusions and stable isotopes", Economic Geology, 93, pp. 651-670.

[۱۹] حکمت نژاد، امین؛ حسنی پاک، علی اصغر؛ ۱۳۹۰؛ "تخمین

توزیع عیار مس با استفاده از تخمین گر غیرخطی کریجینگ

انفصالی، مطالعه موردی: معدن مس سونگون"، نشریه علمی -

پژوهشی مهندسی معدن، ش ۱۲، ص ۱۱ تا ۱۹.

[۲۰] جلالی، محمد؛ رحیمی پور، غلامرضا؛ دیانتهی، محمدرضا؛

تقوایی نژاد، مجتبی؛ ۱۳۹۰؛ "بررسی اعتبار برآوردگرهای

کریجینگ خطی و غیرخطی در پهنه بندی بلوک های کانسنگ

و باطله در معدن مس سرچشمه"، مجله علوم زمین، ش ۷۹، ص

۹۵ تا ۱۰۰.

[۲۱] واحد زمین شناسی و امور اکتشافات شرکت ملی صنایع مس

ایران؛ ۱۳۷۰؛ "گزارش مطالعات اکتشافی در محدوده معدن

مس میدوک توسط شرکت اتوکمپو فنلاند"، آرشیو فنی معدن

مس میدوک.

[۲۲] ساعی نیا، الهام؛ انصاری، عبدالحمید؛ قربانی، احمد؛ مجتهدزاده،

سید حسین؛ موسوی پورتقی زاده، سید مجید؛ ۱۳۹۳؛ "تأثیر سد

باطله معدن مس میدوک بر کیفیت آب زیرزمینی"، همایش

ملی زمین شناسی و منابع اکتشاف، شیراز.