

مقاله "علمی-پژوهشی"

مدل سازی عیار و بازیابی کانسار طلای ساری گونی با استفاده از الگوریتم های زمین آماری

زهرا نوری زنوز^۱، امید اصغری^۲، محمد فهیمی نیا^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران Zahra.nouri@ut.ac.ir

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران o.asghari@ut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران m.fahiminia@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۷ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳)

چکیده

با بالا رفتن پیچیدگی کانسارهای موجود، درک تغییر فضایی توزیع عیار برای کسب شناخت کافی از کانسار و جلوگیری از خسارت های مالی و تعیین برنامه های بهینه حین و پس از استخراج اهمیت بالایی دارد. همچنین تغییر پذیری نوع کانی سازی، عیار، آلتراسیون و غیره بر بازیابی کانه هدف اثر می گذارد. بنابراین مدل سازی این پارامترها به منظور بهره برداری بهینه از معدن و به حداقل رساندن هزینه و خسارت، ضرورت می یابد. در این پژوهش به کمک داده های ۹۱ حلقه گمانه ذخیره طلای اپی ترمال ساری گونی در شمال غرب ایران، مدل سازی متغیرهای عیار و بازیابی حاصل از لیچینگ انجام شد. ابتدا به کمک تخمین و شبیه سازی شاخص دو دامنه اکسیده و سولفیده جدا شدند. سپس به کمک مدل بلوکی حاصل از شبیه سازی، در هر بخش به شکل جداگانه به روش شبیه سازی متوالی گوسی، مدل سازی فضایی انجام شد. به کمک مدل به دست آمده از شبیه سازی عیار، منحنی عیار تناژ رسم و میزان ذخیره برآورد شد که بیش از ۷۰ درصد آن مربوط به زون سولفیدی است. سپس به کمک داده های حاصل از شبیه سازی بازیابی، حاصل ضرب عیار در بازیابی به عنوان شاخص بهتری برای رسم این منحنی و تصمیم گیری پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی

مدل سازی، تخمین، شبیه سازی، طلای اپی ترمال، ساری گونی

۱- مقدمه

اهمیت مسائل تخمین ذخیره از ابتدا در علم زمین‌آمار مطرح شد [۱]. اما در سال ۱۹۷۷، دیوید [۲] در تحقیقات خود ضرورت تخمین ذخیره را به خوبی تشریح کرد. همچنین پایه عملی و تئوری روش‌های رایج برای تخمین ذخیره در سال ۱۹۷۸ و توسط ژورنل^۲ و هوبرخت^۳ [۳] بنا نهاده شد. هسته اصلی مسائل ارزیابی ذخیره، تعیین تناژ و عیار کانسار قابل بازیابی به کمک یک برنامه معدنی مشخص است. مدل ساخته شده از ذخیره شامل بلوک‌هایی است که ابعاد آن با توجه به فاصله داده‌های موجود در نظر گرفته می‌شود. مقدار نمونه‌های برداشت شده در یک پروژه، نسبت به حجم ذخیره بسیار کوچک است. بنابراین می‌بایست عیار و سایر پارامترها را در نقاطی که نمونه‌برداری صورت نگرفته، برآورد کرد. تخمین در این نقاط با در نظر گرفتن تغییرات و پیچیدگی‌های زمین-شناسی امری ساده نیست [۴].

در روش‌های تخمین تنها یک مقدار که نزدیک‌ترین به مقدار اصلی است برای هر بلوک تخمین زده می‌شود و این کار به کمک روش‌های رایج زمین‌آماري مثل کریجینگ یا روش‌های غیرزمین‌آماري صورت می‌گیرد. در این روش برای تخمین نقاط جدید از ترکیب خطی داده‌های موجود استفاده می‌شود که مشکل اصلی آن اثر هموارسازی^۴ است. همچنین برای دستیابی به مدلی کامل لازم است تا علاوه بر تخمین یک پارامتر یا توزیع، به ارزیابی عدم قطعیت نیز پرداخته شود.

مدل حاصل از شبیه‌سازی همان اطلاعات مدل بلوکی حاصل از تخمین را فراهم می‌کند اما مدلی از عدم قطعیت نیز ارائه می‌دهد. شبیه‌سازی با بازتولید واریوگرام و هیستوگرام داده‌های اصلی، چندین تحقق تولید می‌کند، داده‌های خارج از ردیف را حفظ کرده و مشکل‌های مطرح شده در روش‌های تخمین را ندارند. این روش به کمک شبیه‌سازی برای هر بلوک به جای تنها یک مقدار مشخص، چندین مقدار ممکن تعیین می‌شود که نشان‌دهنده سطح عدم قطعیت نیز می‌باشند. استفاده از روش‌های شبیه‌سازی در مسائل معدنی همچون آنالیز ریسک مربوط به طبقه‌بندی ذخایر [۵]، ارزیابی عدم قطعیت ذخایر معدنی در مرحله امکان‌سنجی پروژه [۵،۶]، تعیین فاصله بهینه گمانه‌ها و غیره رایج است [۴،۷].

۱-۱- ژئومتالورژی

بهینه‌سازی طراحی معدن به‌منظور کمینه کردن هزینه و بیشینه نمودن مزایا (بازیابی)، به کمک مدل‌های زمین‌آماري و استفاده از آن‌ها برای اهداف ژئومتالورژیکی صورت می‌گیرد [۸].

در علم ژئومتالورژی به‌عنوان بخش جدیدی در صنعت معدن، به مدل‌سازی پارامترهای مرتبط با عملکرد متالورژیکی به کمک روش‌های آماری کلاسیک و یا تخمین و شبیه‌سازی زمین‌آماري پرداخته می‌شود [۴،۹]. این پارامترها شامل خواصی چون سختی، قابلیت خردایش، بازیابی و غیره هستند و تاکنون مطالعات بسیاری برای مدل‌سازی آن‌ها انجام شده است. به‌عنوان مثال در سال ۲۰۱۳ بویورت^۵ و همکاران به کمک داده‌های مینرالوژیکی به مدل‌سازی ۶ پارامتر ژئومتالورژیکی پرداختند. لیچلیتر^۶ نیز مدلی به کمک داده‌های بازیابی طلا حاصل از روش‌های بطری غلتان و شیک‌لیچ، برای معدن طلای لاکلوزا^۷ ساخت [۹]. در سال ۲۰۱۴ نیز حسینی و اصغری مدل‌سازی مس و اکسید مس معدن مس پورفیری سونگون را به‌عنوان روشی برای آنالیزهای اقتصادی مناسب پیشنهاد کردند [۱۰]. در سال ۲۰۱۶ دویچ^۸ و همکاران اندیس خردایش معدن مس-مولیبدن در آمریکا جنوبی را مدل کردند [۱۱]. همچنین در سال ۲۰۲۰ آوالوس^۹ و همکاران مدلی از سختی خوراک داخل آسیا SAG به کمک روش یادگیری عمیق تهیه کردند [۱۲].

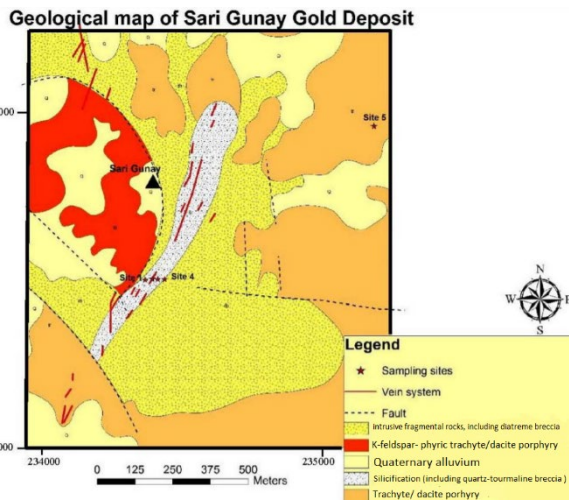
مدل‌سازی‌های ژئومتالورژیکی به‌منظور درک بهتر تغییرات ذخیره برای بهبود عملکرد اقتصادی و اجرایی معدن‌کاری است. فرآیند تخمین و مدیریت رقیق شدن^{۱۰} می‌بایست پیوسته با اطلاعات جدید به روز رسانی شوند. مدلی که بتواند این نیاز را برآورد کند، مدل قابل بازیابی نام دارد. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، هدف اصلی مدل‌سازی ذخایر پیش‌بینی تناژ و عیار ذخیره قابل بازیابی در بازه‌های زمانی مختلف در عملیات معدن‌کاری و همچنین کارخانه تغلیظ است. در مدل‌سازی ذخیره قابل بازیابی، عیار و تناژ کانسار اقتصادی که عیار آن بالاتر از حد آستانه است تعیین می‌شود. اما برای داشتن دید بهتر می‌توان ملاحظات دیگری از جمله خصوصیات ژئومتالورژیکی و ژئومکانیکی را نیز در نظر گرفت [۴].

واضح است که میزان درآمد حاصل از معدن‌کاری، تابعی از حاصل ضرب عیار در بازیابی، قیمت محصول و همچنین هزینه‌های عملیاتی مثل معدن‌کاری متالورژی و هزینه‌های عمومی و اداری خواهد بود. (رابطه ۱)

$$R = P \times r \times G - (\text{هزینه‌ها}) \quad (1)$$

در این رابطه R نشان‌دهنده درآمد، P قیمت محصول، r بازیابی و G عیار است [۴]. انجام مطالعات ژئومتالورژیکی علاوه بر بهینه نمودن ارزش خالص فعلی^{۱۱} (NPV)، با شناسایی تغییرپذیری کانسار، تأثیر قابل توجهی بر مدیریت کانسار و

سنگ میزبان کانی سازی در این منطقه طیفی از داسیت پورفیری است که متعلق به کمپلکسی توده‌ای با دو کوه آتشفشانی ساری گونی و آق داغ است (شکل ۲). در این منطقه، واحدهای سنگی آندزیت پورفیری، لاتیت پورفیری، داسیت پورفیری، برش‌های دیاترم، توف‌ها و برش‌های هیدروترمال کوارتز-تورمالین به‌عنوان هدف برای حفاری و تهیه نقشه در نظر گرفته شده‌اند. منشأ اصلی کانی‌سازی در ساری گونی جریانی هیدروترمال است که با فشار در مکان‌هایی که نفوذپذیری سنگ میزبان بالا بوده به سمت طبقات سنگی ولکانیک اولیه حرکت کرده است. فعالیت‌های اولیه هیدروترمال، رگه‌های شبه پورفیری کوارتز-سولفید-مگنتیت و آلتراسیون پتاسیک را به وجود آورده است ولی عیار طلا در این قسمت کمتر از ۰/۵ ppm است. رگه‌های برشی کوارتز-تورمالین که مرتبط با آلتراسیون سرپسیتی می‌باشند نیز حاوی مقدار کمی طلا هستند ولی به‌عنوان بستری مناسب برای عبور جریان‌های هیدروترمال بوده‌اند. اما مهم‌ترین مرحله تجمع طلا در پاراژنهای رگه‌های کوارتز-پیریت-استینیت-رالگار-ارپیمنت به همراه آرسنیک اتفاق افتاده است [۱۴].



شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه ساری گونی و آق داغ [۱۵].

۳-۱- دامنه‌بندی

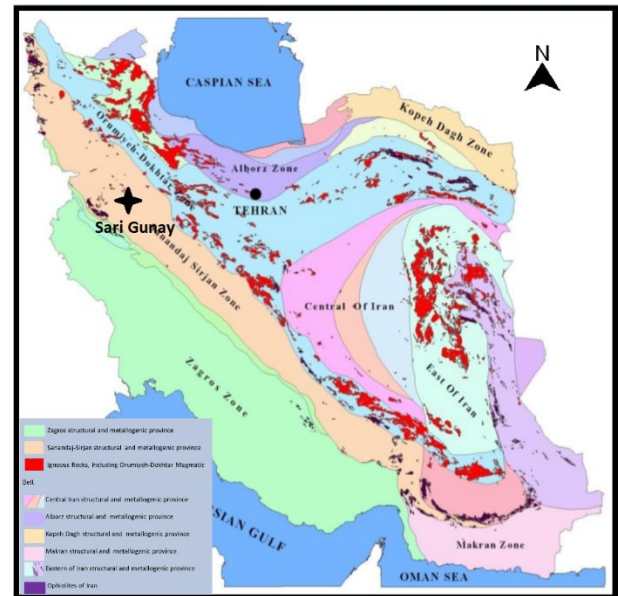
با توجه به این که یکی از اهداف این پژوهش به‌دست آوردن میزان ذخیره با در نظر گرفتن بازیابی طلا است، می‌بایست در ابتدا الگوی بازیابی و همچنین دامنه‌های متالورژیکی بررسی و تعیین شوند. با توجه به اطلاعات موجود در داده‌های حاصل از حفاری گمانه و همچنین مطالعات زمین شناسی منطقه، طلای معدن ساری گونی ریزدانه و در عمق مرتبط با کانی‌های سولفیدی است و هرچه عمق کمتر و به سطح زمین نزدیک شده، اکسیده می‌شوند (شکل ۳). بازیابی طلای مرتبط با

همچنین کاهش هزینه و ریسک دارد. ژئومتالورژی با بهبود تمامی مراحل استخراج و فرآوری از جنبه‌های مختلف تکنیکی، زیست‌محیطی و اجتماعی کمک شایانی به توسعه پایدار می‌کند [۱۳].

در این مطالعه برای برآورد میزان تناژ ذخیره علاوه بر داده‌های عیار طلا، از داده‌های بازیابی طلا به روش سیانوراسیون نیز استفاده شد که میزان تناژ قابل بازیابی ذخیره با توجه به تکنولوژی و روش‌های فعلی را نشان می‌دهد.

۲-۱- زمین شناسی

ذخیره اپی‌ترمال ساری گونی در شمال غربی کشور، در استان کردستان و ۶۰ کیلومتری شمال غرب همدان روی کمربند تکاب واقع شده است و به‌عنوان بزرگترین کانسار اپی‌ترمال کشور، شناخته شده است (شکل ۱) [۱۴، ۱۵]. این ذخیره در یک کمپلکس نیمه قلیایی پتاسیم بالای نفوذی-آتشفشانی که مربوط به دوران میوسن میانی است، قرار دارد (شکل ۲) [۱۵، ۱۶]. پیش از اکتشاف کانی‌سازی طلا، در این منطقه اکتشافاتی برای کانی‌سازی آنتیموان و آرسنیک صورت گرفته بود. در سال ۱۹۹۹ پتانسیل کانی‌سازی طلا تشخیص داده شد. دگرسانی آرژلیک و فیلیک در مساحتی به اندازه ۱۶ کیلومتر مربع در اطراف رگه‌های کانی‌سازی آنتیموان-آرسنیک یافته شد و نمونه‌برداری متناسب با کانی‌سازی‌های اپی‌ترمال صورت گرفت که عیار بالایی از طلا نشان داد [۱۴].



شکل ۱- نقشه زمین شناسی ایران، در این نقشه محل کانسار ساری گونی و برخی کانسارهای پراهمیت دیگر نیز مشخص شده است [۱۴].

روش شبیه‌سازی متوالی گوسی برای متغیرهایی که پیوستگی آن‌ها حائز اهمیت است کاربرد دارد [۱۹،۲۰]. در این روش پس از تعیین دامنه مورد نظر و رسم تابع توزیع تجمعی، لازم است تا داده‌ها به شکل نرمال استاندارد (میانگین ۰ و واریانس ۱) درآیند. برای شبیه‌سازی ابتدا بیضوی جست و جو برای یافتن داده‌های شرطی ترسیم می‌شود. سپس به کمک تخمین کریجینگ ساده و مدل واریوگرام داده‌های نرمال، تابع توزیع تجمعی در محل u به دست می‌آید. در نهایت به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو، یک مقدار مشخص با توجه به تابع توزیع تجمعی به دست آمده به هر نقطه نسبت داده می‌شود. در نهایت این عمل در تمامی نقاط برای دستیابی به یک تحقق انجام می‌گیرد [۲۱]. مراحل این شبیه‌سازی را به این صورت تعریف می‌شوند [۲۰-۱۸]:

۱- تعریف دامنه مورد نظر و نرمال کردن توزیع داده‌ها؛

۲- واریوگرافی داده‌های نرمال شده و تعیین بیضی جست و جو؛

۳- تعیین یک مسیر تصادفی برای بررسی تمام نقاط؛

۴- تخمین کریجینگ ساده در هر نقطه، رسم تابع توزیع تجمعی؛ و استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو برای به دست آوردن یک مقدار مشخص در نقطه؛

۵- تکرار مراحل در تمامی نقاط؛

۶- بازگرداندن داده‌ها از شکل نرمال به توزیع اولیه.

۲-۳- شبیه‌سازی شاخص متوالی

SIS یا شبیه‌سازی شاخص متوالی برای مدل‌سازی فضایی داده‌های گسسته به کار می‌رود. برای مثال اگر در یک دامنه K کلاس ناسازگار s_k داشته باشیم به این معناست که هر محل u یک و تنها یک مقدار K را به خود اختصاص می‌دهد.

اگر شاخصی برای وجود $(I(u; s_k)=1)$ و یا عدم وجود $(=0)$ $(I(u; s_k))$ هر کلاس k در هر نقطه u نظر گرفته شود، تخمین کریجینگ ساده این شاخص‌ها احتمال وقوع s_k در آن محل را طبق رابطه (۳) محاسبه می‌کند:

$$\text{Prob}^*\{(u; s_k)=1\} = p_k + \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} [I(u_{\alpha}; s_k) - p_k] \quad (4)$$

که در این رابطه p_k مقدار مورد انتظار کلاس K است که از داده‌ها استنباط شده است. مقدار λ_{α} با حل کواریانس شاخص برای s_k به دست می‌آید. در این رابطه بهتر است که به جای میانگین کلی از میانگین محلی استفاده شود تا نماینده بهتری برای همسایگی u باشد.

کافی‌های اکسیده به کمک روش‌های ساده سیانوراسیون مطلوب بوده در صورتی که طلای سولفیده از نوع مقاوم به حساب می‌آیند. به این معنا که میزان بازیابی طلا در سیانوراسیون مستقیم، کمتر از ۹۰ درصد خواهد بود [۱۶]. بنابر مسائل مطرح شده، می‌بایست مدل کردن متغیرهای هدف (عیار و بازیابی) در هر زون به شکل جداگانه صورت گیرد.

۲-۲- روش کار

در این پژوهش برای جدا کردن بخش سولفیده و اکسیده با توجه به گسسته بودن داده‌ها از روش‌های تخمین کریجینگ شاخص (IK) و شبیه‌سازی شاخص متوالی (SIS) استفاده شد. پس از تعیین سهم هر بخش در مدل بلوکی، پارامترهای عیار و بازیابی به روش شبیه‌سازی متوالی گوسی برآورد شدند.

۲-۱- کریجینگ شاخص

کریجینگ در زمین‌آمار روشی برای درون‌یابی و تخمین است که به‌عنوان بهترین تخمینگر خطی نااریب شناخته می‌شود [۱۷]. کریجینگ شاخص به علت آن که فرض اولیه‌ای در نظر نمی‌گیرد تخمینی ناپارامتری است. در واقع هدف آن تخمین پارامترهای یک توزیع نیست بلکه تخمین مستقیم خود توزیع است [۱۸]. این روش برای از بین بردن اثر داده‌های خیلی زیاد و یا خیلی کم مؤثر است.

برای مثال متغیر $Z(u)$ توسط یک تبدیل دوگانه به شکل رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$I(u; z_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } z_u \leq z_k \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

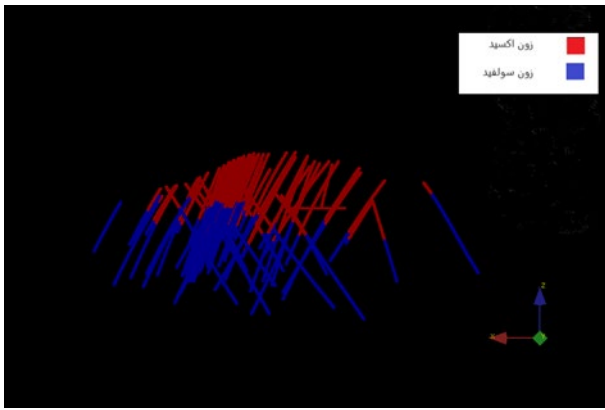
در کریجینگ شاخص، متغیر پیوسته Z به کمک تعریف K آستانه $(K=1,2,3,\dots)$ به شکل گسسته در می‌آید. تابع توزیع تجمعی تجربی n نمونه به‌عنوان توزیع اولیه در نظر گرفته شده و با محاسبه میانگین با اوزان برابر طبق رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$F(u; z_k) = P\{Z(u) \leq z_k\} = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n i(u_{\alpha}; z_k) \quad (3)$$

این رابطه نشان‌دهنده نسبت نمونه‌های $Z(u_{\alpha})$ که کمتر از آستانه z_k هستند می‌باشد [4].

۲-۲- شبیه‌سازی متوالی گوسی

به کمک شبیه‌سازی متوالی تحقق‌هایی به عنوان مدل برای داده‌های ورودی ایجاد می‌شود. با توجه به ماهیت داده‌های ورودی که می‌تواند پیوسته و یا گسسته باشد، از شبیه‌سازی گوسی، شاخص و یا مستقیم استفاده می‌شود [۱۷،۱۹].



شکل ۳- نمای داده‌های تفکیک شده در محیط نرم افزار (سمت شمال در شکل برون سواست)

۳-۲- تخمین و شبیه‌سازی شاخص داده‌ها

با توجه به تفاوت الگوی بازیابی و عیار در زون‌های اکسید و سولفید (جدول ۱)، نیاز است که ابتدا این دو بخش از یکدیگر جدا شده و سپس مدل‌سازی پارامترهای مورد نظر به‌طور مجزا در هر زون صورت گیرد. میزان بازیابی طلا گزارش شده در این داده‌ها، به کمک آزمایش لیچینگ سیانید به‌دست آمده است. این روش به تنهایی روش مناسبی برای استحصال طلای سولفیدی با توجه به خاصیت ریفرکتوری آن نیست. در واقع در این نوع ذخیره‌ها با توجه به قفل شدن ذرات طلا در سولفیدها نیاز است تا پیش از عملیات سیانوراسیون، از روش‌های آماده-سازی مثل فلوتاسیون، استفاده از روش‌های جدایش ثقلی، اکسیداسیون تحت فشار و یا روش‌های دیگر استفاده کرد [۲۲-۲۱].

جدول ۱- بررسی آماری داده‌ها

دامنه	سولفیده	اکسیده	باطله
تعداد داده عیار	۱۱۸۵۴	۱۳۰۹۰	۱۳۵۴
میانگین عیار	۱/۶۳	۱/۴۰	۰/۴۲
تعداد داده بازیابی	۴۸۶۶	۵۴۳۹	۱۳۴
میانگین بازیابی	۱۴/۲۰	۶۷/۷۰	۲۲/۷۴
سهم هر بخش	۰/۴۵	۰/۴۹	۰/۰۶

برای تفکیک دو دامنه، در گام اول داده‌های اکسیده و سولفیده به کمک کدهای ۰ و ۱ مشخص شدند، سپس مدل واریوگرام تجربی این داده‌های گسسته به‌دست آمد (جدول ۱ و شکل ۴). به کمک مدل واریوگرام ابتدا تخمین کریجینگ شاخص انجام شد. با توجه به اینکه تمام تخمین‌ها در بازه ۰ و ۱ هستند با تعیین آستانه، نقاط مربوط به هر زون مشخص

شبیه‌سازی شاخص متوالی برای داده‌های پیوسته و گسسته مشابه است و تنها تفاوت در این است که در داده‌های گسسته، ترتیب برای K های مختلف اهمیتی ندارد. به کمک تابع توزیع تجمعی حاصل از کریجینگ شاخص احتمال‌هایی در بازه $[0,1]$ که به K بخش تقسیم شده به‌دست می‌آید. شاخص شبیه‌سازی شده در نقطه u وابسته به شاخصی که عدد تصادفی P - که دارای توزیع نرمال است- در آن قرار می‌گیرد است [۴].

۱- کد گذاری داده‌ها با توجه به نوع آن‌ها (پیوسته یا گسسته) که به ترتیب به کمک تعیین آستانه و طبقه مشخص انجام می‌شود؛

۲- واریوگرافی داده‌های هر طبقه؛

۳- تعیین یک مسیر تصادفی برای بررسی تمام نقاط؛

۴- تخمین در هر نقطه به روش کریجینگ شاخص رسم تابع توزیع تجمعی و استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو برای به‌دست آوردن یک مقدار مشخص در نقطه؛

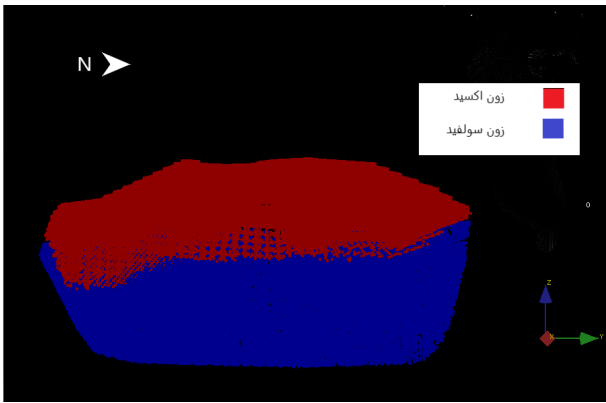
۵- تکرار مراحل در تمامی نقاط؛

۶- بازگرداندن داده‌ها از شکل نرمال به توزیع اولیه.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- معرفی داده‌های موجود

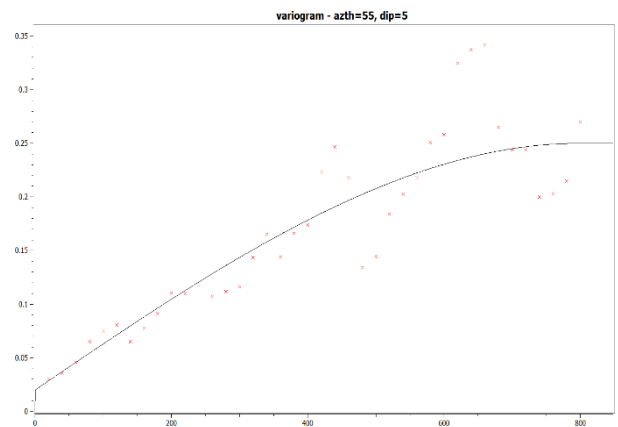
داده‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی کانسار ساری‌گونی شامل داده‌های حاصل از حفاری ۹۱ حلقه گمانه اکتشافی همراه با مختصات، آنالیز عیاری ۴۶ عنصری ICP-OES است. تعداد کل نمونه‌های موجود ۲۸۲۸۸ است و فاصله نمونه‌برداری‌ها برابر ۱ متر است. از این تعداد نمونه ۱۴۰۲۲ متعلق به بخش اکسیدی و ۱۱۹۴۴ مربوط به زون سولفیدی و ۲۳۲۲ داده در بخش باطله گزارش شده که داده‌های مربوط به این بخش از مطالعه حذف شد. همچنین به همراه داده‌های ذکر شده، ۱۰۴۳۹ داده بازیابی طلا موجود است. در جدول ۱ جزئیات مربوط به این داده‌ها مشخص شده است. داده‌های بازیابی به کمک روش سیانوراسیون و حاصل از آزمایش بطری غلتان، است. این آزمایش به مدت ۲۴ ساعت بر روی ۱۰۰ گرم از پالپ در آزمایشگاه OMAC در ایرلند انجام شده است. شکل ۳ نمای از گمانه‌ها به تفکیک زون اکسیدی و سولفیدی را نمایش می‌دهد.



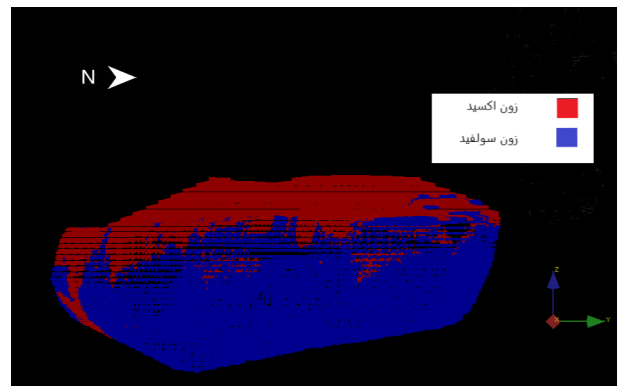
شکل ۶- مدل e-type به دست آمده به روش شبیه‌سازی شاخص. بخش آبی متعلق به زون اکسید و بخش قرمز مربوط به زون سولفید است.

شدند. سپس به کمک روش شبیه‌سازی شاخص گوسی ۱۰۰ تحقق از مدل بلوکی ساخته و با در نظر گرفتن تمامی این تحقق‌ها بخش سولفیده و اکسیده تفکیک شدند. شکل ۵ مدل بلوکی حاصل به کمک کریجینگ شاخص و شکل ۶ مدل بلوکی حاصل از شبیه‌سازی شاخص را نشان می‌دهند.

پس از کنترل مدل‌های به دست آمده با داده‌های گمانه‌ها، مشخص شد که روش شبیه‌سازی شاخص در مدل کردن فضایی و مرزبندی این دو زون بهتر از کریجینگ شاخص عمل کرده است. به همین علت این مدل برای ادامه کار انتخاب گردید.



شکل ۴- واریوگرام جهت اصلی داده‌های صفر و یک



شکل ۵- مدل به دست آمده به روش تخمین کریجینگ شاخص. بخش آبی متعلق به زون اکسید و بخش قرمز مربوط به زون سولفید است.

جدول ۲- مدل واریوگرام داده‌های عیار و بازیابی

بخش	متغیر	جهت	زاویه	شیب	اثر قطعه ای	ساختار اول		ساختار دوم					
						exponential	Spherical	exponential	Spherical				
اکسید	عیار	اصلی	۱۳۰	۴۰	۰/۴	exponential	Spherical	سقف	دامنه				
						سقف	دامنه	۰/۲۵	۲۲	۰/۳۵	۵۲		
						exponential	Spherical	سقف	دامنه	۰/۲۵	۲	۰/۳۵	۲۶/۶
		قائم	۳۱۰	۵۰	۰/۴	Spherical	Spherical	سقف	دامنه	۰/۳۵	۳۶		
						سقف	دامنه	۰/۳۵	۲۶	۰/۵	۳۶		
						Spherical	Spherical	سقف	دامنه	۰/۳۵	۲۵/۲	۰/۵	۳۴/۳
	بازیابی	اصلی	۱۷۵	۳۵	۰/۱۵	Spherical	Spherical	سقف	دامنه	۰/۳۵	۳۶		
						سقف	دامنه	۰/۳۵	۲۶	۰/۵	۳۶		
						Spherical	Spherical	سقف	دامنه	۰/۳۵	۲۵/۲	۰/۵	۳۴/۳
		قائم	۳۵۵	۵۵	۰/۱۵	Spherical	Spherical	سقف	دامنه	۰/۳۵	۳۴/۳		
						سقف	دامنه	۰/۳۵	۲۵/۲	۰/۵	۳۴/۳		
						Spherical	Spherical	سقف	دامنه	۰/۳۵	۲۵/۲	۰/۵	۳۴/۳
سولفید	عیار	اصلی	۱۲۰	۶۰	۰/۱۵	Spherical	exponential	سقف	دامنه	۰/۶۵	۴۲		
						سقف	دامنه	۰/۶۵	۱۲	۰/۱۵	۴۲		
						Spherical	exponential	سقف	دامنه	۰/۶۵	۶/۳	۰/۱۵	۳۵/۷
		قائم	۲۰۰	۳۰	۰/۱۵	Spherical	exponential	سقف	دامنه	۰/۶۵	۶/۳	۰/۱۵	۳۵/۷
						سقف	دامنه	۰/۶۵	۶/۳	۰/۱۵	۳۵/۷		
						Spherical	exponential	سقف	دامنه	۰/۶۵	۶/۳	۰/۱۵	۳۵/۷
	بازیابی	اصلی	۲۰۰	۳۰	۰/۱	exponential	Spherical	سقف	دامنه	۰/۶	۴۸		
						سقف	دامنه	۰/۶	۴۸	۰/۳	۴۸		
						exponential	Spherical	سقف	دامنه	۰/۶	۴۵/۵	۰/۳	۴۲/۷
		قائم	۲۰	۶۰	۰/۱	Spherical	Spherical	سقف	دامنه	۰/۶	۴۲/۷		
						سقف	دامنه	۰/۶	۴۵/۵	۰/۳	۴۲/۷		
						exponential	Spherical	سقف	دامنه	۰/۶	۴۵/۵	۰/۳	۴۲/۷

۳-۳- شبیه‌سازی عیار و بازیابی در هر دامنه

برای تعیین تناژ ذخیره همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، می‌بایست پارامترهای عیار و بازیابی در تمامی نقاط ریزبلوک‌های مدل بلوکی تعیین شوند. برای این کار پس از نرمال نمودن توزیع داده‌های عیار و بازیابی به روش امتیازات نرمال، در هر زون مدل واریوگرام برای هر متغیر مشخص شد (جدول ۲). سپس با استفاده از شبیه‌سازی متوالی گوسی، صد تحقق برای هر پارامتر تولید شد. برای اعتبارسنجی این تحقق‌ها، واریوگرام‌ها و توابع توزیع تجمعی به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها با داده‌های اولیه مقایسه شدند. شکل ۹ و ۱۰، اعتبارسنجی مدل واریوگرام و توابع توزیع تجمعی را به ترتیب نشان می‌دهند.

پس از شبیه‌سازی عیار طلا، با استفاده از نتایج به‌دست آمده و مدل بلوکی ساخته شده، منحنی عیار تناژ در هر دامنه رسم گردید (شکل ۱۱). با تعیین عیار آستانه g/ton ۰/۵ میزان کل ذخیره ۱۹۹/۹۸ Mt برآورد شد که سهم زون اکسید ۵۲/۷۲ Mt و سهم زون سولفید ۱۴۷/۲۶ Mt بود.

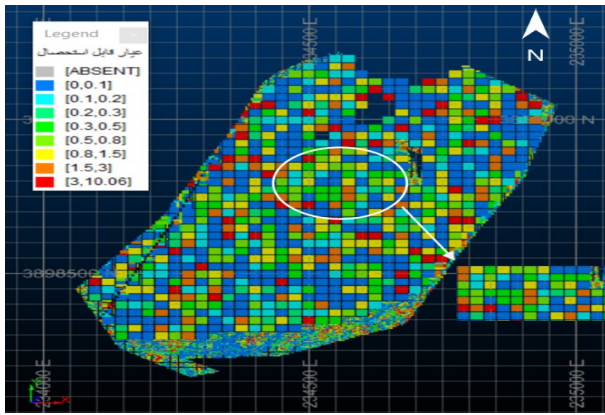
جدول ۳- مدل برازش شده به واریوگرام تجربی

دامنه	۶۲۰	۵۸۰	۲۰۰
سقف	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳
اثر قطعه‌ای	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
ساختار	Spherical	Spherical	Spherical
چرخش	۵۵	۸۷	۴
	چرخش نسبت به محور Z	چرخش نسبت به محور X	چرخش نسبت به محور Y

با توجه به این که برای برآورد میزان تناژ به کمک روش سیانوراسیون می‌بایست میزان بازیابی را نیز در نظر گرفت، حاصل ضرب عیار در بازیابی طلا، شاخص مناسب‌تری برای ارزیابی کنسار به منظور برنامه ریزی‌های معدن‌کاری است. در شکل ۷ و ۸ با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی عیار و بازیابی طلا دو مقطع قائم و افقی از بخش اکسید کنسار که میزان عیار و عیار قابل استحصال در هر بلوک را نشان می‌دهد رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن بازیابی، میزان عیار طلا که در واقع دستیابی به آن به روش فرآوری انجام شده (لیچینگ سیانید) ممکن می‌باشد، در بلوک‌ها کاهش یافته است.

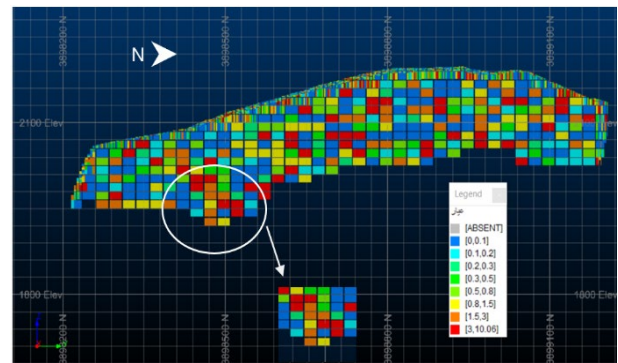
۴- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی تغییرپذیری‌های کنسار همانند عیار و پارامترهای ژئومتالورژیکی منجر به تصمیم‌گیری بهتر اقتصادی و افزایش کارایی در مراحل بعد، از جمله معدن‌کاری و فرآوری می‌شود. در این پژوهش با توجه به تفاوت‌های ناشی از ماهیت اکسیدی و سولفیدی کنسار این دو زون به کمک کریجینگ و شبیه‌سازی شاخص از یکدیگر جدا شدند با توجه به شکل‌های ۵ و ۶، مرز جدایش و همچنین کنترل مدل‌های به‌دست آمده با داده‌های گمانه، مدل‌سازی به‌دست آمده از شبیه‌سازی SIS به-عنوان مدل مینا برای مابقی محاسبات در نظر گرفته شد. در مرحله بعد به کمک شبیه‌سازی گوسی عیار طلا، میزان تناژ ذخیره به کمک رسم منحنی عیار-تناژ برآورد شد. مقدار تناژ ذخیره با عیار طلا آستانه g/ton ۰/۵ برابر با ۱۹۹/۹۸ میلیون تن است که ۵۲/۷۲ میلیون تن آن متعلق به زون اکسید و ۱۴۷/۲۶ میلیون تن متعلق به زون سولفید است. برای مدل کردن ذخیره قابل بازیابی علاوه بر در نظر گرفتن عیار آستانه، بهتر است به‌منظور ارزیابی‌های دقیق‌تر اقتصادی پارامترهای ژئومتالورژیکی و ژئومکانیکی نیز در نظر گرفته شوند. در نظر گرفتن پارامترهای دیگر در کنار عیار برای هر بلوک، دید بهتری نسبت به بلوک در تمامی مراحل معدن‌کاری، استخراج و فرآوری خواهد داد. با استفاده از این اطلاعات می‌توان به پیش‌بینی دقیق‌تر دست یافت، هزینه‌ها را کاهش و در نهایت به افزایش درآمد رسید. به این منظور در این مطالعه پارامتر بازیابی طلا به کمک داده‌های حاصل از تست بطری غلتان، در هر بلوک شبیه‌سازی شد. با محاسبه حاصل ضرب بازیابی طلا و عیار محاسبه شده در این بلوک‌ها، طبق شکل‌های ۷ و ۸ میزان تناژ قابل استحصال به شکل قابل توجهی افت داشت. بررسی حاصل ضرب عیار در بازیابی را می‌توان به عنوان اولین برآورد از میزان فلز قابل استحصال بلوک‌ها در نظر گرفت.

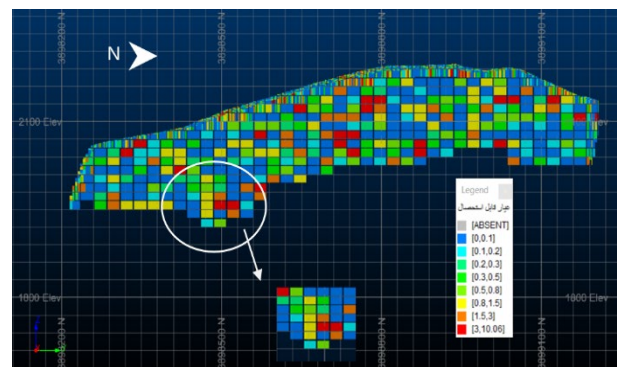


(ب)

شکل ۸- مقطع قائم بلوک‌های بخش اکسید کانسار. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن بازیابی طلا میزان طلای قابل استحصال در بلوک‌ها کاهش یافته است. (الف) عیار (ب) حاصل ضرب عیار در بازیابی

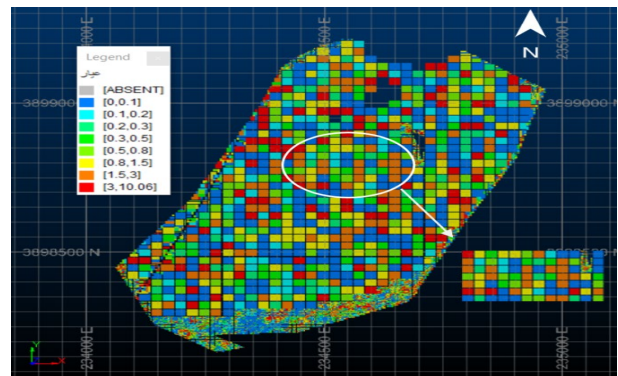


(الف)

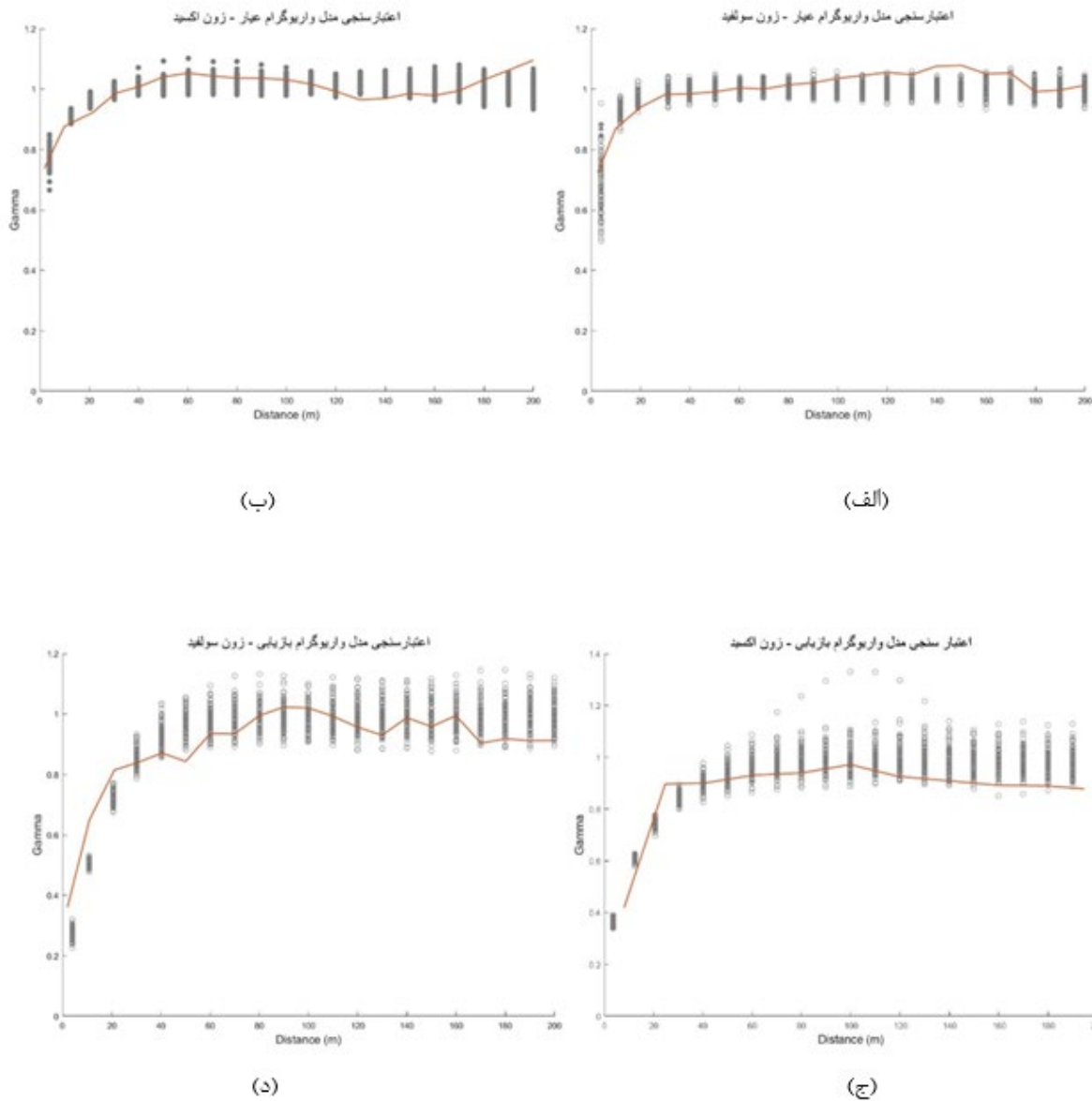


(ب)

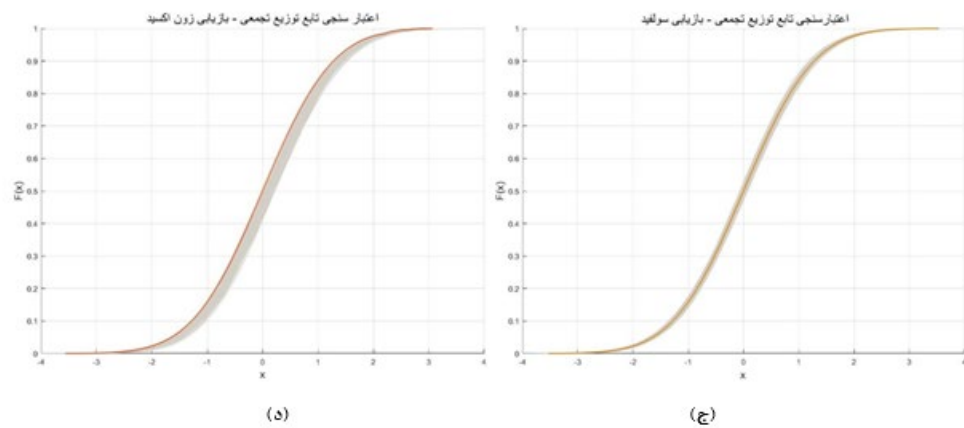
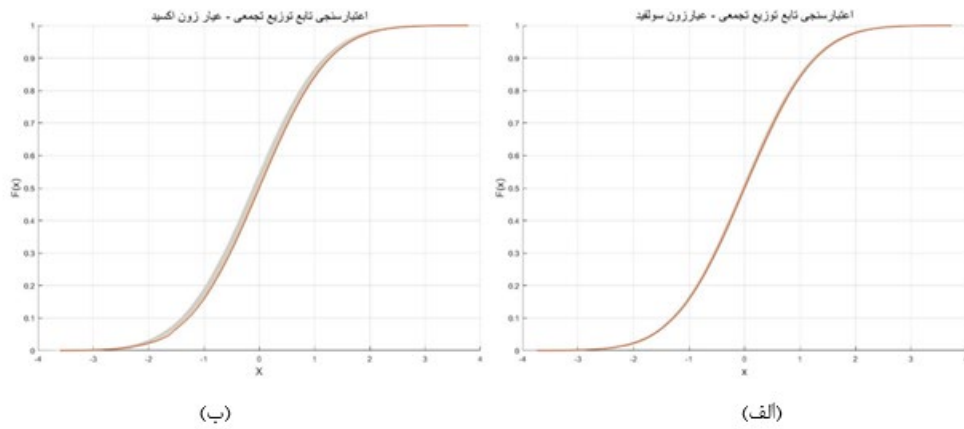
شکل ۷- مقطع قائم بلوک‌های بخش اکسید کانسار. (الف) عیار (ب) حاصل ضرب عیار در بازیابی. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن بازیابی طلا میزان طلای قابل استحصال در بلوک‌ها کاهش یافته است



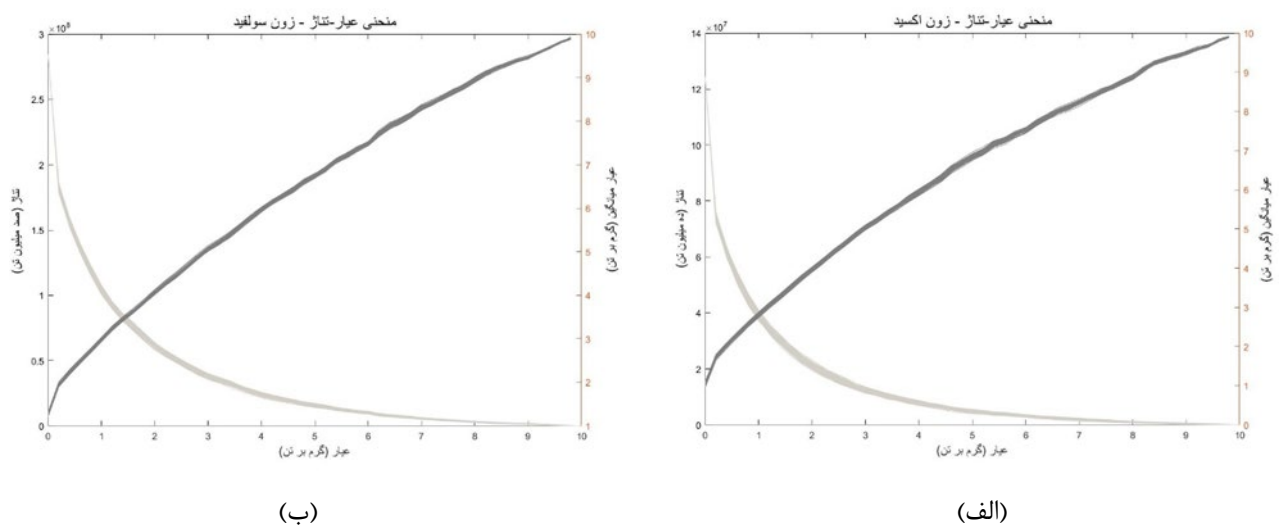
(الف)



شکل ۹- باز تولید و اعتبارسنجی واریوگرام‌های انتخابی برای مدل‌سازی عیار و بازایی در زون‌های اکسید و سولفید به کمک صد شبیه‌سازی صورت گرفته. (الف) باز تولید واریوگرام برای عیار زون اکسید. (ب) باز تولید واریوگرام برای عیار زون سولفید. (ج) باز تولید واریوگرام برای بازایی زون اکسید. (د) باز تولید واریوگرام برای بازایی زون سولفید



شکل ۹ - بازتولید و اعتبارسنجی تابع توزیع تجمعی برای داده‌های حاصل از مدل‌سازی عیار و بازیابی در زون‌های اکسید و سولفید به کمک صد شبیه‌سازی صورت گرفته. (الف) بازتولید تابع توزیع تجمعی برای عیار زون اکسید. (ب) بازتولید تابع توزیع تجمعی برای عیار زون سولفید. (ج) بازتولید تابع توزیع تجمعی برای بازیابی زون اکسید. (د) بازتولید تابع توزیع تجمعی برای بازیابی زون سولفید.



شکل ۱۰ - منحنی عیار تناژ حاصل از ۱۰۰ شبیه‌سازی عیار در (الف): زون اکسید و (ب): زون سولفید

مراجع

- Techniques and a Case Study,” *Nat. Resour. Res.*, vol. 25, no. 2, pp. 161–181, 2016, doi: 10.1007/s11053-015-9276-x.
- [12] S. Avalos, W. Kracht, and J. M. Ortiz, “An LSTM Approach for SAG Mill Operational Relative-Hardness Prediction,” *Miner. Artic.*, vol. 734, pp. 1–10, 2020, doi: 10.3390/min10090734.
- [13] S. C. Dominy, L. O’connor, A. Parbhakar-Fox, H. J. Glass, and S. Purevgerel, “Geometallurgy—A route to more resilient mine operations,” *Minerals*, vol. 8, no. 12, pp. 1–33, 2018, doi: 10.3390/min8120560.
- [14] J. P. Richards, D. Wilkinson, and T. Ullrich, “Geology of the Sari Gunay epithermal gold deposit, northwest Iran,” *Econ. Geol.*, vol. 101, no. 8, pp. 1455–1496, 2006, doi: 10.2113/gsecongeo.101.8.1455.
- [15] B. Mehrabi, H. Alimohammadi, M. Farhadian-Babadi, and F. Ghahramaninejad, “Biogeochemical exploration in Sari Gunay gold deposit, Northwestern Iran,” *Geopersia*, vol. 6, no. 2, pp. 223–232, 2016.
- [16] J. Y. Zhou and L. J. Cabri, “Gold process mineralogy: Objectives, techniques, and applications,” *Jom*, vol. 56, no. 7, pp. 49–52, 2004, doi: 10.1007/s11837-004-0093-7.
- [17] E. H. Isaaks, D. A. E. S. E. H. Isaaks, R. M. Srivastava, and K. (Firm), *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, 1989.
- [18] A. G. Journel, “Geostatistics: Models and tools for the earth sciences,” *Math. Geol.*, vol. 18, no. 1, pp. 119–140, 1986, doi: 10.1007/BF00897658.
- [19] F. Soltani, P. Afzal, and O. Asghari, “Delineation of alteration zones based on Sequential Gaussian Simulation and concentration-volume fractal modeling in the hypogene zone of Sungun copper deposit, NW Iran,” *J. Geochemical Explor.*, vol. 140, pp. 64–76, 2014, doi: 10.1016/j.gexplo.2014.02.007.
- [20] س. طالش حسینی، ع. مرادزاده، ا. اصغری، “کاربرد شبکه برنامه ریزی GERT در ساختار مدیریت پروژه های شبیه سازی زمین آماری- مطالعه موردی نهشته مس- طلا پورفیری دالی شمالی،” نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، vol. 14, no. 42, pp. 32–
- [1] G. Matheron and F. B. de recherches géologiques et minières, *Traite de geostatistique appliquee. Tome II. Le krigeage*. Editions B.R.G.M., 1965.
- [2] M. David, *Geostatistical ore reserve estimation*. Amsterdam: Elsevier, 1977.
- [3] A. . Journel and C. Huijbregts, *Mining geostatistics*. New york: Academic Press, 1978.
- [4] M. E. Rossi and C. V. Deutsch, *Mineral resource estimation*. 2014.
- [5] M. Rossi and V. Camacho, “Applications of geostatistical conditional simulations to assess resource classification schemes,” in *Proceedings of the 102nd annual meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy, and Petroleum (CIM)*, 2001.
- [6] B. H. Van Brunt and M. E. Rossi, “Mine planning under uncertainty constraints,” *Proc. Optim. with Whittle Strateg. Mine Plan. Conf.*, no. March, pp. 181–196, 1999.
- [7] C. Badenhorst and M. Rossi, “Measuring the Impact of the Change of Support and Information Effect at Olympic Dam,” in *Geostatistics Oslo*, P. Abrahamsen, R. Hauge, and O. Kolbjørnsen, Eds. Springer, Dordrecht, 2012.
- [8] C. V. Deutsch, “modelling of geometallurgical variables – problems and solutions,” in *The Second AusIMM International Geometallurgy Conference (GeoMet) 2013*, 2013, pp. 7–16.
- [9] S. E. Leichter, “Gold Department and Geometallurgical Recovery Model for the La Colosa, Porphyry Gold Deposit, Colombia Stacey Elizabeth Leichter,” 2013.
- [10] S. A. Hosseini and O. Asghari, “Simulation of geometallurgical variables through stepwise conditional transformation in Sungun copper deposit, Iran,” *Arab. J. Geosci.*, vol. 8, no. 6, pp. 3821–3831, 2015, doi: 10.1007/s12517-014-1452-5.
- [11] J. L. Deutsch, K. Palmer, C. V. Deutsch, J. Szymanski, and T. H. Etsell, “Spatial Modeling of Geometallurgical Properties:

پی نوشت

-
- ¹ David
² Journal
³ Huijbregts
⁴ Smoothing Effect
⁵ Boisvert
⁶ Leichliter
⁷ La Colosa
⁸ Deutsch
⁹ Avalos
¹⁰ Dilution
¹¹ Net Present Value

- 46, 2019, doi: 10.22034/ijme.2019.35738.
- [21] S. Zanon and O. Leuangthong, "Implementation Aspects of Sequential Simulation," in *Geostatistics Banff*, O. Leuangthong and C. V Deutsch, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2004, pp. 543–548.
- [22] S. R. La Brooy, H. G. Linge, and G. S. Walker, "Review of gold extraction from ores," *Miner. Eng.*, vol. 7, no. 10, pp. 1213–1241, Oct. 1994, doi: 10.1016/0892-6875(94)90114-7.
- [23] J. Zhou and Y. Gu, "Geometallurgical Characterization and Automated Mineralogy of Gold Ores," *Gold Ore Process.*, pp. 95–111, 2016, doi: 10.1016/b978-0-444-63658-4.00006-2.