

(پژوهشی)

مقایسه طبقه بندی کانسنگ و باطله براساس نتایج حاصل از روش‌های لاگ کریجینگ و شرطی سازی یکنواخت محلی (LUC)

آرش طاهری نیا*^۱، سعید سلطانی محمدی^۲

۱- کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، کارشناس طراحی و پروژه معدن، مجتمع مس میدوک، شرکت ملی صنایع مس ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کاشان

(دریافت: دی ۱۳۹۷، پذیرش: شهریور ۱۳۹۹)

چکیده

در شرایطی که فاصله داری داده‌ها در مقایسه با ابعاد بلوک مورد تخمین بزرگ باشد استفاده از تکنیک‌های تخمین مبتنی بر رگرسیون خطی برای مدلسازی عیار بلوک‌های کوچک نامناسب است. برای غلبه بر این مشکل، از روشی جدید تحت عنوان شرطی سازی یکنواخت محلی (LUC) که نتیجه توسعه روش شرطی سازی یکنواخت (UC) است می‌توان استفاده نمود. در این پژوهش کاربرد این روش برای تفکیک واحدهای استخراج انتخابی به باطله و ماده معدنی براساس عیار حد ۰/۲ درصد در معدن مس میدوک مورد بررسی و با نتایج حاصل از روش متداول تخمین مقایسه شده است. براساس چالهای انفجاری در معدن برای دو پنل استخراجی ۲۴۵۰ و ۲۴۶۵ نتایج نشان داد که از مجموع کل بلوک‌ها ۴ درصد باطله و ۹۶ درصد کانسنگ می‌باشد. بنابراین درصد تغییرات کانسنگ جهت نتیجه گیری مد نظر قرار گرفت. برای روش لاگ کریجینگ، در این دو پهنه ۴۹ درصد موارد تفکیک ماده معدنی با خروجی کنترل عیار تطابق دارد در حالیکه در ۵۱ درصد موارد ماده معدنی به صورت باطله تفکیک شده است. همچنین براساس خروجی‌های روش شرطی سازی یکنواخت محلی در این دو پهنه ۹۸ درصد رده بندی ماده معدنی با خروجی کنترل عیار تطابق داشته و ۲ درصد تفکیک ماده معدنی به عنوان باطله تفکیک شده است. بنابراین حتی با فرض یکسان دانستن هزینه های ناشی از خطای کم رده بندی و بیش رده بندی، روش شرطی سازی یکنواخت محلی از مطلوبیت بیشتری برخوردار است.

کلمات کلیدی

طبقه بندی باطله و کانسنگ، بلوک مدل، روش شرطی سازی یکنواخت محلی، مدل استخراجی، معدن مس میدوک

* عهده‌دار مکاتبات: taheri.mpe@gmail.com

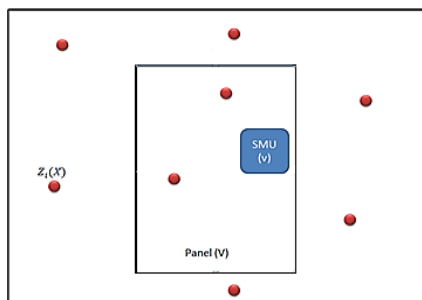
۱- مقدمه

شمار می‌رود که در سال ۲۰۰۶ بر مبنای محلی‌سازی نتایج حاصل از روش شرطی‌سازی یکنواخت ارائه شده‌است [۸]. به عبارت دیگر ابتدا تابع توزیع عیار با استفاده از روش شرطی‌سازی یکنواخت محاسبه گردیده و سپس از رابطه تناژ - عیار متوسط شناسایی شده در پهنه برای تخصیص عیار به هر یک از بلوک‌های با ابعاد SMU استفاده می‌شود [۸، ۱۵، ۱۶]. در این مقاله تلاش شده‌است تا ضمن معرفی روش شرطی‌سازی یکنواخت از آن برای تخمین عیار بلوک‌های با ابعاد واحد معدنکاری استخراجی در معدن میدوک استفاده شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شرطی‌سازی یکنواخت (UC)

برای محاسبه تناژ (Tv) و عیار متوسط (Mv) یک ذخیره قابل استحصال از یک پنل بزرگ (V) متشکل از تعدادی بلوک با سایز کوچک‌تر (v) می‌توان از روش شرطی‌سازی یکنواخت استفاده نمود. در شکل ۱ بلوک‌های کوچک نشان دهنده واحدهای معدنکاری انتخابی‌ای (v) هستند که می‌توان آن‌ها را به‌صورت انتخابی از پنل (V) استخراج نمود [۱۱، ۱۷].



شکل ۱: توزیع واحدهای معدنکاری انتخابی (v) در پنل (V). داده‌های موجود در محدوده $Z(x)$ با نقاط مشکی نشان داده شده است.

روش UC [۹، ۱۸] به‌صورت امید ریاضی شرطی یک تابع غیر خطی $\Psi(Z(v))$ در بلوک v متناسب با عیار پنل مرتبط با آن $Z(V)$ بیان می‌شود که در عمل عیار واقعی پنل $Z(V)$ مشخص نیست و در مدل‌های UC مقدار آن با عیار تخمینی برای پنل $Z^*(V)$ که براساس روش کریجینگ معمولی تخمین زده شده، جایگزین می‌شود. برای تخمین تابع غیر خطی $\Psi(Z(v))$ از یک مدل گسسته گوسین نقطه - بلوک استفاده می‌گردد. روش UC از این مدل گسسته

در زمین آمار، نامناسب بودن روش‌های تخمین بر پایه رگرسیون خطی در شرایطی که فاصله نمونه‌های عباری در مقایسه با ابعاد بلوک تخمینی زیاد باشد، به عنوان یک اصل پذیرفته شده‌است [۱-۳]. کریجینگ معمولی (یکی از تخمین‌گرهای خطی) به عنوان یکی از روش‌های معمول تخمین ذخیره [۴]، زمانی که فاصله بین نمونه‌ها نسبت به ابعاد بلوک زیاد باشد باعث نرم‌شدگی در گزارش خروجی ذخیره قابل استحصال می‌شود [۱، ۲، ۵]. ماده معدنی که عیار آن بیش از عیار حد بوده و قابل استخراج باشد، به‌عنوان ذخیره قابل استحصال تعریف می‌شود [۶]. دشوارترین مرحله ارزیابی ذخیره، محاسبه ذخیره قابل استحصال براساس گمانه‌هایی با تعداد محدود و فاصله‌داری زیاد می‌باشد [۷].

برای بررسی‌های فنی و اقتصادی در پروژه‌های معدنکاری بلوک‌های بزرگ تخمین زده شده (پلن‌ها) با فاصله‌داری زیاد داده‌های تعریف شده قابل اتکا نیست. زیرا نیاز به تخمین تناژ و عیار بخشی از کانی‌زایی واقع در واحد معدنکاری مورد نظر که به عنوان ماده معدنی شناخته شده است، دارد. در زمین آمار، این فرآیند به عنوان تخمین ذخیره قابل استحصال در پایه v شناخته می‌شود که بلوک با ابعاد v بیانگر کوچکترین واحد معدنکاری انتخابی است (SMU) [۸]. این روش تخمین، بدون استفاده از موقعیت مکانی، قسمتی از ذخیره که از لحاظ اقتصادی قابل استحصال است را ارائه می‌دهد. روش فوق تناژ و عیار ذخیره قابل استحصال را براساس یک روش زمین آماری غیرخطی تخمین زده [۹] که رابطه تناژ - عیار متوسط واحد معدنکاری با ابعاد v را براساس توزیع تجربی نمونه‌های موجود محاسبه می‌کند [۹]. روش شرطی‌سازی یکنواخت [۱۰] یکی از این روش‌هایی است که معمولاً در معدنکاری برای مدل‌سازی منابع قابل استحصال استفاده می‌شود [۱۱-۱۴].

عدم توانایی برای تخمین موقعیت مکانی بخش‌های قابل استخراج که اقتصادی می‌باشند به‌عنوان عیب روش شرطی‌سازی یکنواخت سنتی شناخته می‌شود [۸]. امروزه در علم معدنکاری علاوه بر اطلاعات تناژ و عیار، توزیع مکانی ماده معدنی جهت برنامه ریزی تولید از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۱]. یکی از جدیدترین روش‌های مدل‌سازی عیار در واحد SMU روش شرطی‌سازی یکنواخت محلی به

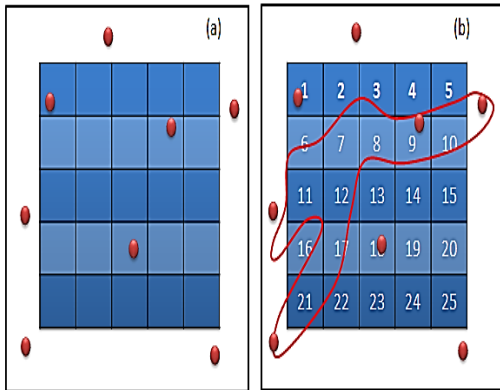
۲ - ۲ - ۱ - تقسیم‌بندی پنلها به بلوک‌های کوچک

اولین مرحله تقسیم پنل به زیر سلول‌هایی است که اندازه آن‌ها برابر با اندازه انتخاب شده برای تخمین بلوک‌های کوچک است (شکل (a) ۲) [۱۷، ۱۵].

۲ - ۲ - ۲ - مرتب سازی بلوک‌های واحد معدنکاری

انتخابی به ترتیب افزایش عیار

بلوک‌های واحد معدنکاری انتخابی که در هر پنل توزیع شده‌اند بایستی بر اساس افزایش عیار مرتب شوند. حتی در شرایطی که فاصله‌داری گمانه‌های اکتشافی بسیار زیاد باشد، از عیار تخمینی حاصل از روش کریجینگ معمولی به منظور رده‌بندی آن‌ها استفاده می‌شود. نحوه مرتب سازی بلوک‌های واحد معدنکاری انتخابی در پنل‌ها در شکل (b) ۲ نشان داده شده است [۱۷-۱۵، ۲۰-۱۹].



شکل ۲: تقسیم‌بندی پنل‌ها به بلوک‌های واحد معدنکاری انتخابی و رده‌بندی آن‌ها [۱۷].

اعتبار رده بندی عیار بدست آمده، به الگوهای توزیع عیار بستگی دارد. در این مرحله فرض بر این است که برای متغیرهای عیاری اثر قطعه‌ای کم و یک پیوستگی مناسب در واریوگرام اولیه وجود دارند استفاده از تخمین‌گرهای خطی مجاز است [۱۷-۱۵، ۲۰-۱۹].

۲ - ۲ - ۳ - کلاسه‌بندی عیاری و تخمین عیار میانگین

آن‌ها

در این مرحله گسسته‌سازی مدل UC روی کلاس‌های عیاری و تخمین عیار میانگین هر کلاس انجام می‌شود [۱۷]. برای هر پنل کلاس‌های عیاری با استفاده از رابطه تناژ (قابل بازیابی) - عیار (حد)، در عیار حد تخمین زده شده به‌وسیله روش UC تعریف می‌شود (شکل ۳) [۱۷]. کلاس عیاری

گوسین نقطه - بلوک برای تبدیل از نقطه به‌واحد معدنکاری انتخابی (رابطه (۱)) و تبدیل از یک نقطه به پنل (رابطه (۲)) استفاده می‌کند [۹، ۱۷، ۱۸].

$$Z(v) = \phi v(Y(v)) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\phi_k}{k!} r^k H_k(Y(v)) \quad (1)$$

$$Z(v) = \phi v(Y(v)) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\phi_k}{k!} S^k H_k(Y^*(v)) \quad (2)$$

که در آن:

H_k : چند جمله‌ای هرمیت مرتبه k ام

ϕ_k : ضریب چندجمله‌ای هرمیت مرتبه k ام

ϕv : تابع تبدیل نرمال سازی

$Y(v)$: متغیر نرمال استاندارد با میانگین صفر و انحراف

استاندارد ۱

r : ضریب تغییر پایه از نقطه به واحد معدنکاری انتخابی

S : ضریب تغییر پایه از نقطه به پنل

سپس از این مدل‌ها برای محاسبه تناژ قابل بازیابی (T_v)

و مقدار فلز محتوی (Q_v) برای عیار حد مورد نظر Z_C براساس

روابط (۳) و (۴) استفاده می‌شود [۱۷، ۳].

$$T_v(z_C) = E[I_{Z(v) \geq z_C} | Z^*(V)] = E[I_{Y_v \geq y_C} | Y_v^*] \quad (3)$$

$$= 1 - G[4]$$

$$Q_v(z_C) = E[Z(v) I_{Z(v) \geq z_C} | Z^*(V)] = \sum_{k=1}^N \left(\frac{S}{r}\right)^k H_k(Y_v^*) * \sum_{j=1}^N \phi_j r^j \int_{y_C}^{+\infty} H_k(y) H_j(y) g(y) dy \quad (4)$$

که $Y_v^* = \phi_v^{-1}(Z^*(V))$ و $y_C = \phi_v^{-1}(z_C)$ است. در

نهایت نیز عیار متوسط کانسار قابل بازیابی (M) برای عیار

حد مورد نظر Z_C براساس رابطه (۵) قابل تخمین است [۱۷]:

$$M_{v(z_C)} = \frac{Q_v(z_C)}{T_v(z_C)} \quad (5)$$

توزیع کامل عیار - تناژ برای هر پنل را می‌توان با استفاده

از چند عیار حد (Z_C) مختلف محاسبه نمود [۱۷].

۲ - ۲ - شرطی سازی یکنواخت محلی (LUC)

روش LUC با غلبه بر محدودیت روش UC قادر است

نتایج مدل UC را محلی سازی کرده و تابع توزیع عیار برای

پنل‌های بزرگ بر اساس روش UC را ارائه نماید [۱۷]. به

طوری که براساس چهار مرحله ذیل، به هر یک از بلوک‌های

با ابعاد واحد معدنکاری انتخابی عیاری را اختصاص خواهد

داد.

۲ - ۲ - ۴ - اختصاص عیار به بلوک‌های واحد معدنکاری انتخابی بر اساس رده‌بندی آن‌ها

بر اساس یک تطبیق بین کلاس‌های عیاری و رتبه SMU، می‌توان عیار میانگین هر کلاس عیاری را به بلوک تخصیص داد. برای این امر از رابطه بین رتبه‌بندی SMU و سهم پنل (رابطه (۷)) استفاده می‌شود (شکل (۳) (c) [۱۷]).

$$SMU_{Rank} \subset (T_{RANK}, T_{RANK+1}) \quad (7)$$

T_{RANK} سهمی از پنل توزیع شده در بلوک‌های واحد معدنکاری انتخابی است که رده‌بندی آن کوچکتر یا مساوی RANK است و T_{RANK+1} سهمی از پنل توزیع شده در بلوک‌های واحد معدنکاری انتخابی که رده‌بندی آن بالاتر از RANK+1 است [17]. کلاس عیاری برای هر SMU_{RANK} به وسیله مقایسه بازه (T_{RANK}, T_{RANK+1}) با بازه‌های کلاس‌های عیاری $\{T_i(Z_i), T_{i+1}(Z_{i+1})\}$ (شکل (۳) (c)) تعیین می‌شود [۱۷].

قسمتی از پنل است که عیار آن بیش از عیار حد (Z_i) و کوچکتر از عیار حد بعدی (Z_{i+1}) است. به عبارت دیگر، هر کلاس عیاری را می‌توان توسط عیار حدهای کمینه (Z_i) و بیشینه (Z_{i+1}) و در نتیجه توسط تناژهای قابل بازیابی کمینه $T_i(Z_i)$ و بیشینه $T_{i+1}(Z_{i+1})$ تعریف نمود (رابطه (۶)).

$$GC_i \subset \{T_i(Z_i), T_{i+1}(Z_{i+1})\} \text{ و } GC_i \subset \{Z_i, Z_{i+1}\} \quad (6)$$

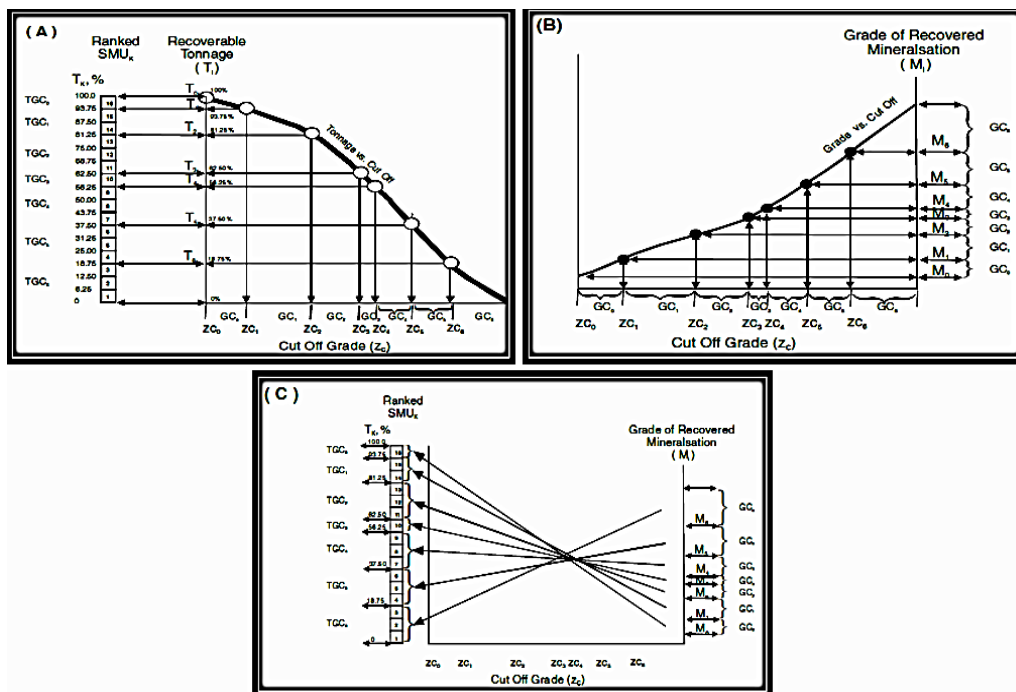
که در آن [۱۷]:

GC_i : کلاس عیاری i ام

$T_i(Z_i)$: تناژ قابل بازیابی در عیار حد Z_i

$T_{i+1}(Z_{i+1})$: تناژ قابل بازیابی در عیار حد Z_{i+1}

در هر کلاس عیاری عیار میانگین (MGC_i) از تخمین عیار ذخیره قابل بازیابی مدل UC در مقادیر مختلف عیار حد استنتاج می‌شود (شکل (b) [۱۷]).



شکل ۳: تعریف کلاس‌های عیاری و اختصاص عیارها به بلوک‌های واحد معدنکاری انتخابی [۸]

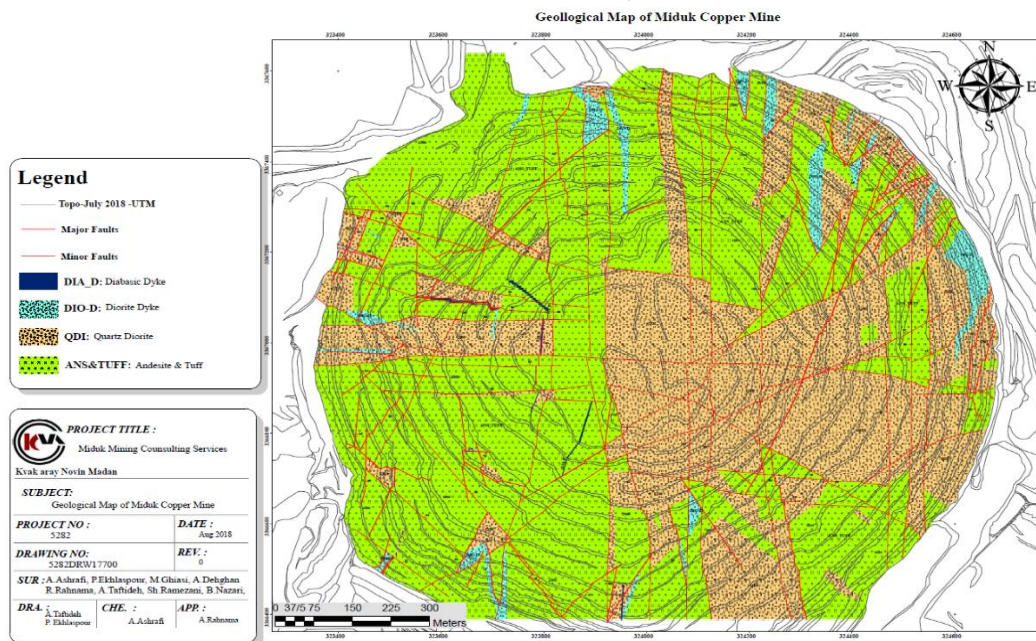
۳ - مطالعه موردی

معدن مس میدوک در فاصله ۴۲ کیلومتری شمال شرق شهر بابک و ۱۳۲ کیلومتری شمال غرب معدن مس سرچشمه در طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۱۰° و ۵۵° و ۲۵' و ۳۰° قرار گرفته‌است [۲۱]. مطالعات اکتشافی اولیه در خصوص این کانسار در سال ۱۹۹۲ توسط شرکت اتوکمپو

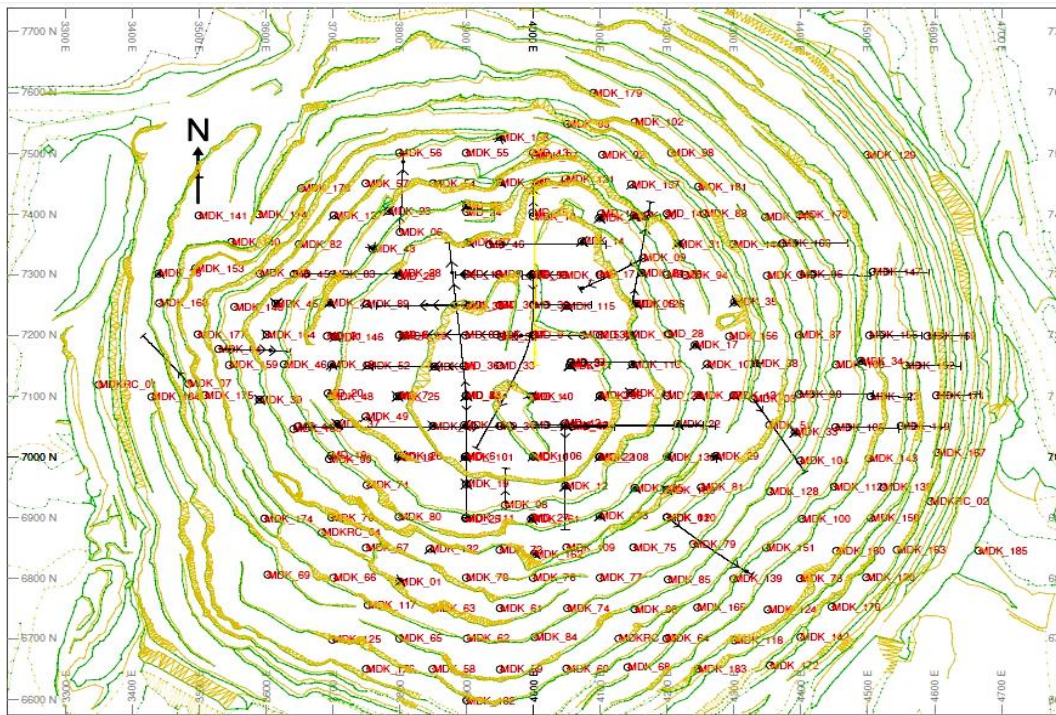
به این صورت که اگر بازه $(T_{RANK}-T_{RANK+1})$ داخل محدوده (T_i-T_{i+1}) کلاس عیاری (GC) واقع شود، SMU_{RANK} به کلاس عیاری (TGC_i) اختصاص خواهد یافت (شکل (۳) (c) [۱۷]). در نهایت، به وسیله انطباق شاخص‌های کلاس عیارهاشان (MGC_i و TGC_i)، یک عیار میانگین (MGC_i) از هر کلاس به بلوک‌های SMU_{RANK} اختصاص داده می‌شود [۸، ۱۷].

هایپوژن در نظر گرفته شد که با هدف مدل‌سازی صحیح داده‌ها، این جوامع به‌صورت جداگانه مدل‌سازی و ارزیابی ذخیره شدند [۲۳]. در شکل ۵ موقعیت گمانه‌ها نشان داده شده‌است. از سال ۱۳۸۳ استخراج ماده معدنی در این کانسار با تناژ سالیانه ۷ میلیون تن و نسبت باطله‌برداری کلی ۲/۵ به منظور ارسال به کارخانه آغاز شده و تاکنون ادامه دارد [۲۳، ۲۴]. انجام مطالعات آماری پیش زمینه ورود به محاسبات زمین‌آماری و تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب روش مناسب و تنظیم پارامترهای تخمین بشمار می‌رود. در جدول ۱ پارامترهای آماری و در شکل ۶ هیستوگرام و نمودار چندک - چندک عیار مس این کانسار ارائه شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود علاوه بر تفاوت فاحش هیستوگرام ترسیمی از تابع توزیع نرمال (شکل ۶-الف)، نمودار چندک - چندک نیز از خط مستقیم انحراف داشته (شکل ۶-ب) و پارامترهای چولگی و کشیدگی نیز با حالت مطلوب فاصله زیادی دارند که مجموع این دلایل بیانگر عدم تبعیت از توزیع نرمال می‌باشد. براین اساس، برای مدل‌سازی آماری تغییرات عیار مس از تابع توزیع لاگ نرمال استفاده شد. همچنین بررسی وجود مقادیر خارج از ردیف در داده‌ها صورت پذیرفت و مشخص شد که با توجه به طبیعت داده‌ها از تابع توزیع لاگ نرمال داده خارج از ردیفی مشاهده نمی‌شود.

صورت گرفته‌است. این مطالعات در برگزیده تهیه نقشه زمین‌شناسی، نقشه توزیع عنصر مس و عناصر همراه و حفاری ۴۶ حلقه گمانه اکتشافی است که نتیجه آن ۱۴ کیلومتر مغزه‌گیری بوده‌است [۲۲]. از لحاظ زمین‌شناسی سنگ میزبان کانسار میدوک یک پلوتون نیمه عمیق پورفیری با سن میوسن است که از حاشیه توسط ولکانیک‌های ائوسن و سنگ‌های آذرآواری احاطه شده‌است. از دیدگاه سنگ‌شناسی واحدهای ولکانیکی منطقه بیشتر دارای ترکیب آندزیت، تراکی آندزیت و آندزیت پورفیری، سنگ‌های آذرآواری از نوع توف‌های خاکستری و توده نفوذی نیمه عمیق و دایک‌ها از جنس دیوریت و میکرو دیوریت هستند. در شکل ۴ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این مطالعات ذخیره قطعی این کانسار را ۱۴۱ میلیون تن با عیار متوسط ۰/۸ درصد نشان داد [۲۲]. پس از آن در طی سال‌های مختلف توسط شرکت پارس اولنگ حفاری‌ها تکمیل شد. تاکنون در این منطقه ۱۸۵ گمانه حفر شده‌است که براساس آن ذخیره قطعی این کانسار معادل ۱۸۸ میلیون تن با عیار متوسط ۰/۶۱ درصد تخمین زده شده‌است [۲۳] که از نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌های برداشت شده از این گمانه‌ها برای مطالعه عیار مس به‌عنوان متغیر ناحیه‌ای استفاده شده‌است. با توجه به مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی و بررسی تغییرپذیری عیار در جوامع مختلف، درنهایت این ذخیره به‌صورت دو جامعه سوپرژن و



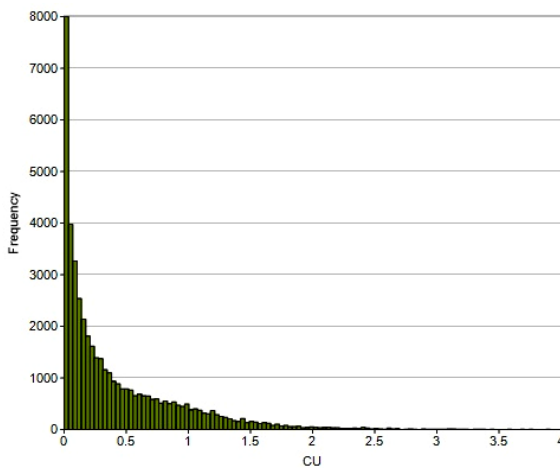
شکل ۴: نقشه زمین‌شناسی معدن مس میدوک



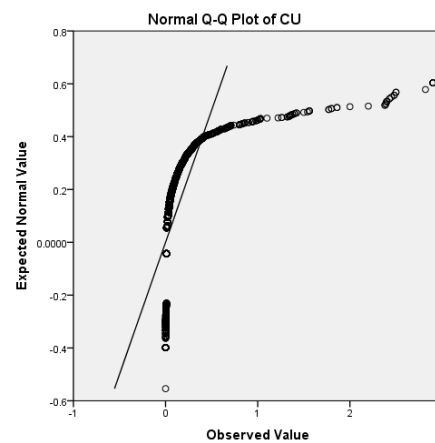
شکل ۵: موقعیت گمانه‌های اکتشافی بر روی پیت معدن

جدول ۱: پارامترهای آماری عیار مس در نمونه‌ها

مجموعه طول نمونه‌های دارای آنالیز شیمیایی	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف استاندارد	واریانس	چولگی	کشیدگی
CU (%)	۷۱۸۴۱	۰/۴۸	۱۱/۹۴	۰/۵۶	۰/۳۱	۲/۸۵	۲۱/۹۷



الف



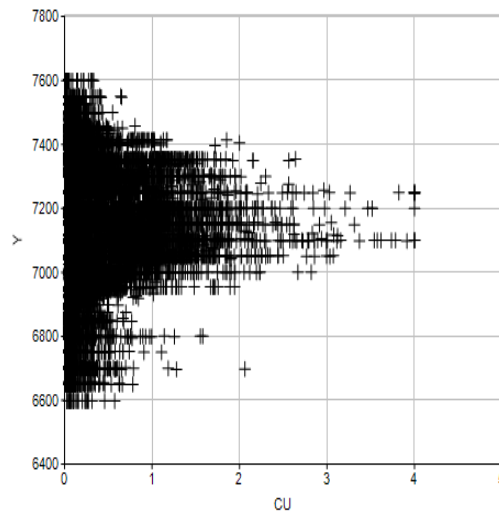
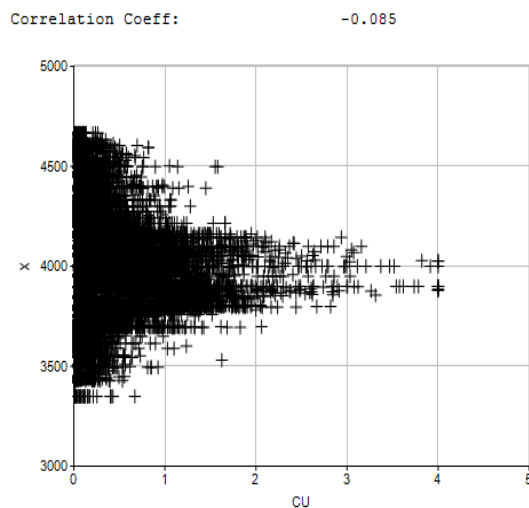
ب

شکل ۶: نمودارهای هیستوگرام و چندک-چندک عیار مس در نمونه‌ها

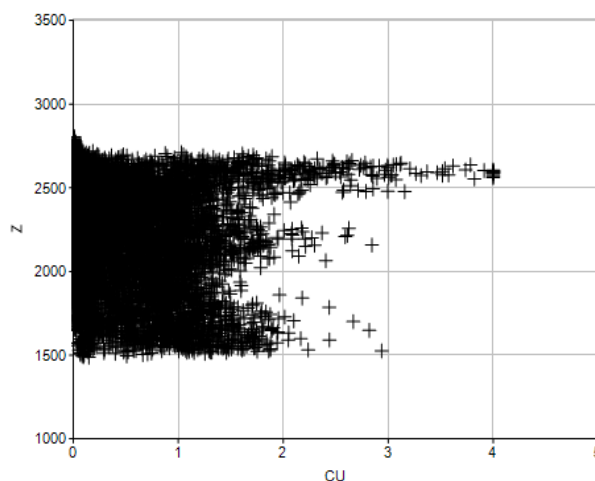
ساختار تغییرپذیری است که موجب کاربرد بسیار و سبب آن در همه زمینه‌های وابسته به صنعت معدنی است. در شکل‌های ۸، ۹، ۱۰ به واریوگرام تجربی محاسبه شده برای عیار مس در سه راستای عمود برهم به ترتیب در دو زون سوپرژن و هیپوژن نشان داده شده است [۲۵]. پس از محاسبه و رسم واریوگرام تجربی باید به واریوگرام حاصل یک مدل تئوریک که ورودی مرحله تخمین عیار می‌باشد، برازش یابد. در شکل‌های ۸ و ۹ مدل ناهمسانگرد برازش یافته به واریوگرام‌های تجربی عیار مس و در جدول‌های ۲ و ۳ پارامترهای این مدل‌ها شامل نوع مدل، اثر قطعه‌ای، سقف و بازه ارائه شده‌است.

یکی دیگر از پیش پردازش‌های ضروری در مطالعات زمین آماری، بررسی عدم وجود روند در داده‌ها است که عموماً با استفاده از نمودار بررسی نمودار پراکندگی عیار در مقابل مختصات (طول و عرض و ارتفاع) نمونه‌ها صورت می‌پذیرد. همان‌طور که شکل ۷ نشان می‌دهد در راستاهای شرقی - غربی، شمالی - جنوبی و عمق هیچ روندی مشاهده نمی‌شود. در روش‌های زمین آماری، همبستگی فضائی داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این رو اساس این روش‌ها بر وجود ساختار فضائی داده‌هاست. واریوگرام مهمترین ابزار برای بررسی همبستگی فضائی بین داده‌ها است [۲۵]. مهمترین ویژگی واریوگرام نسبت به سایر ابزارهای آماری ساده‌سازی

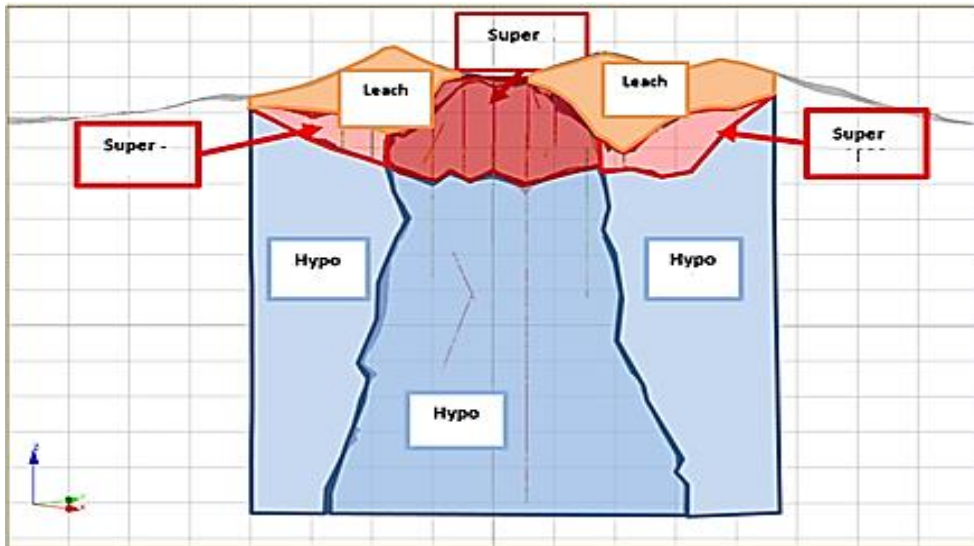
Correlation Coeff: 0.075



Correlation Coeff: -0.217

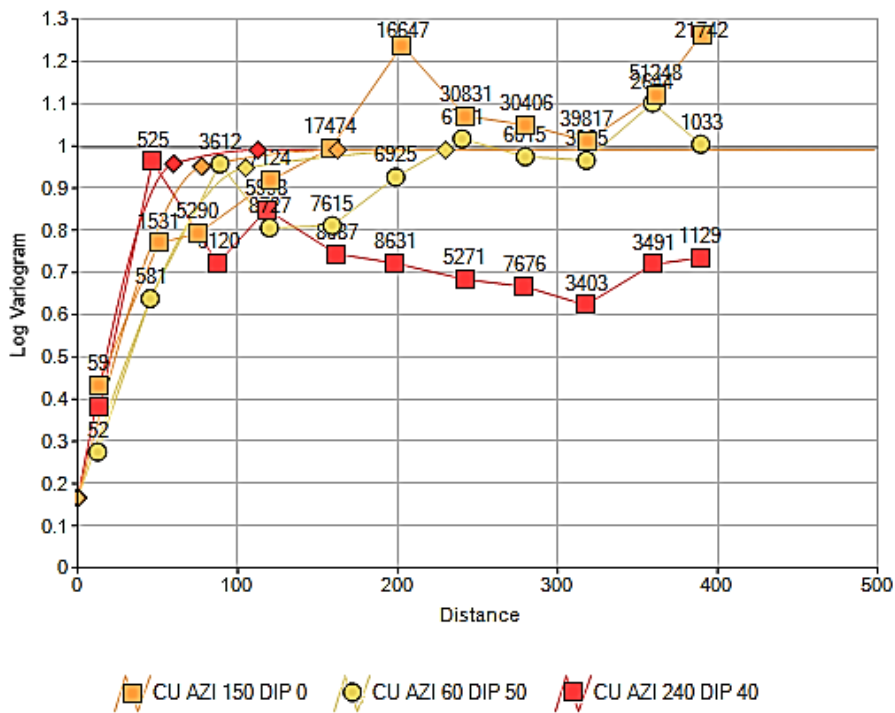


شکل ۷: توزیع عیار مس در راستای شرقی - غربی (X)، شمالی - جنوبی (Y) و عمقی (Z)



شکل ۸: مقطع ۶۲۰۰ شرقی-غربی زون‌های زمین‌شناسی مدل شده در معدن مس میدوک

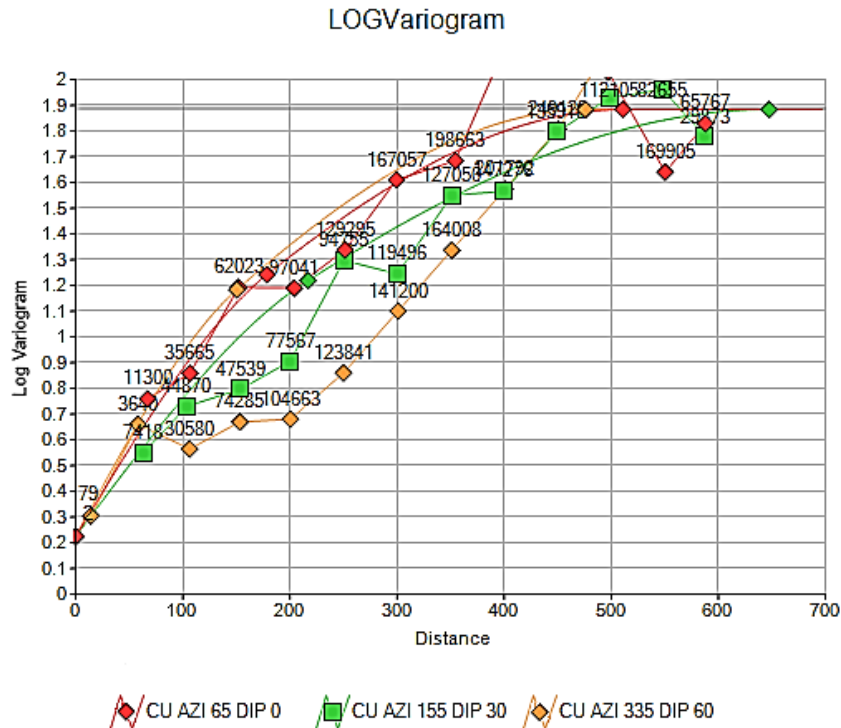
LOGVariogram



شکل ۹: واریوگرام‌های عیار مس در زون سوپرژن و مدل کروی برازش یافته به آن در سه راستای اصلی ناهمسانگردی

جدول ۲: مشخصات پارامترهای مدل‌های واریوگرام‌های جهت‌دار در زون سوپرژن

نسبت ناهمسانگردی	مدل واریوگرام	آزیموت	شیب	اثر قطعه‌ای γ^2 (%)	دامنه تأثیر (متر)	آستانه γ^2 (%)
۰/۶۹	کروی	۱۵۰	۰	۰/۱۶	۱۵۵	۱
۱	کروی	۶۰	۵۰	۰/۱۶	۲۲۵	۱
۰/۴۹	کروی	۲۴۰	۴۰	۰/۱۶	۱۱۰	۱



شکل ۱۰: واریوگرام‌های عیار مس در زون هایپوژن و مدل کرووی برازش یافته به آن در سه راستای اصلی ناهمسانگردی

جدول ۳: مشخصات پارمترهای مدل‌های واریوگرام‌های جهت‌دار در زون هایپوژن

نسبت ناهمسانگردی	مدل واریوگرام	آزیموت	شیب	اثر قطعه‌ای ۲٪ (%)	دامنه تأثیر (متر)	آستانه ۲٪ (%)
۰/۷۸	کروی	۶۵	۰	۰/۲۱	۵۱۰	۱/۹۱
۱	کروی	۱۵۵	۳۰	۰/۲۱	۶۵۰	۱/۹۱
۰/۷۴	کروی	۳۳۵	۶۰	۰/۲۱	۴۸۰	۱/۹۱

(Studio RM) صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که تاثیرخوشه‌بندی در داده‌ها با استفاده از یک شبکه $50 \times 50 \times 15$ به ترتیب در راستاهای x, y, z برطرف گردید. در شکل ۱۲ نتیجه تخمین در مدل بلوکی و در شکل ۱۳ نمودار تناژ - عیار متوسط برای خروجی‌های روش لاگ کریجینگ و شرطی‌سازی یکنواخت محلی ارائه شده‌است. در ادامه براساس عیار حد $0/2$ درصد اقدام به تفکیک واحدهای استخراج انتخابی به باطله و ماده معدنی شد. بهترین راه برای مقایسه این دو روش، مقایسه آن‌ها با خروجی مرحله کنترل عیاراست [۲۶، ۲۷]. برای این منظور از نتایج حاصل از چال‌های انفجاری در معدن برای دو پنل استخراجی 2450 و 2465 استفاده شد. براساس داده‌های حاصل از چال‌های انفجاری حفر شده در این دو پله، مدل بلوکی عیار به روش نزدیکترین همسایگی تهیه و تفکیک بلوک‌های باطله و ماده معدنی صورت پذیرفت. سپس نتایج حاصل از تفکیک صورت

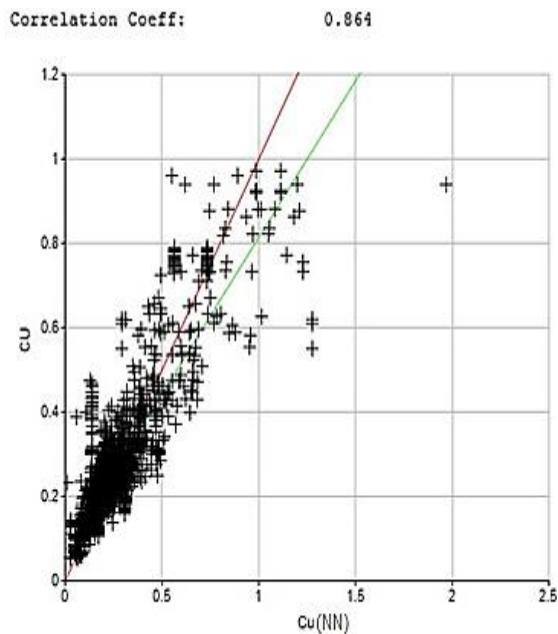
۴- بحث و تحلیل داده‌ها

در این تحقیق به منظور طبقه بندی کانسنگ و باطله از روش‌های لاگ کریجینگ و شرطی‌سازی یکنواخت محلی استفاده شده‌است. باتوجه به ابعاد جام شاول $(3 \times 2 \times 5/2)$ ، متوسط شبکه حفاری (6×5) ، ارتفاع پله معدن (۱۵ متر)، و بر اساس مشورت با کارشناسان بخش استخراج و ارزیابی ذخیره معدن برابر ابعاد واحدهای استخراج انتخابی (SMU) برابر $5 \times 5 \times 15$ متر انتخاب شد. سپس بر اساس نتایج حاصل از واریوگرافی به‌عنوان یکی از ورودی‌های تخمین و همچنین گمانه‌های کامپوزیت‌سازی شده در طول‌های برابر ۴ متری، با استفاده از دو روش لاگ کریجینگ و شرطی‌سازی یکنواخت محلی عیار هر یک از واحدهای استخراج انتخابی در مدل بلوکی تخمین زده شد. محاسبات مربوط به روش UC، LUC و کریجینگ با استفاده از نرم‌افزار Datamine

بلوک‌های ماده معدنی و باطله خواهد داشت و جزئیات بیشتری از مرزبندی ماده معدنی در اختیار مهندسان معدن جهت تصمیم‌گیری برای گسیل قرار خواهد داد.

جدول ۴: مقایسه آماری مدل استخراجی واحد کنترل عیار با چال‌های انفجاری در دو تراز ارتفاعی ۲۴۵۰ و ۲۴۶۵ متر از سطح دریا

عیار مس در چال‌های انفجاری	عیار مس در بلوک‌ها
۰/۰۲	۰/۰۲
۴/۳۳	۴/۳۳
۴/۳۱	۴/۳۱
۰/۷۲۶۹	۰/۷۲۶۵
۰/۱۳۱۴	۰/۱۳



شکل ۱۱: مقایسه عیار مدل استخراجی و چال‌های انفجاری

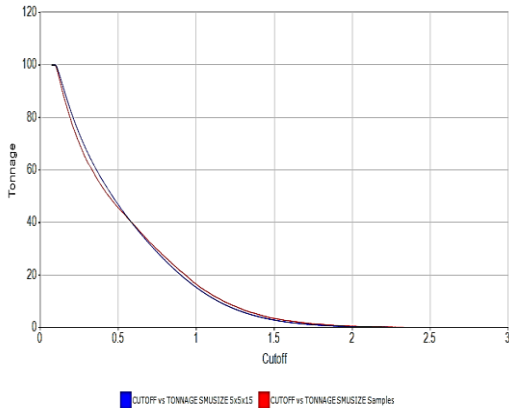
جدول ۵: مقادیر طبقه‌بندی نادرست با استفاده از روش LOGKR

رده بندی صورت گرفته براساس خروجی روش لاگ کریجینگ (درصد)	رده بندی صورت گرفته	
	باطله	ماده معدنی
باطله	۴۳/۲۲	۵۶/۷۸
ماده معدنی	۵۰/۹۷	۴۹/۰۳

گرفته براساس خروجی LUC با تفکیک صورت گرفته براساس چال‌های انفجاری مقایسه شد. با توجه به فاصله‌داری کم چال‌های انفجاری، تفکیک صورت گرفته در واحد کنترل عیار برای این دو پنل معادل واقعیت در نظر گرفته شد. بنابراین مدلی را که بیشترین شباهت را با این مدل نزدیک به واقعیت داشته باشد، می‌توان به عنوان مدل مناسب‌تر انتخاب نمود. در جدول ۴ نتایج حاصل از مقایسه آماری عیار تخمینی مدل بلوکی حاصل برای این دو پنل به روش نزدیکترین همسایگی با داده‌های چال‌های انفجاری ارائه شده‌است. همچنین همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است یک محور معرف عیار چال‌های انفجاری و محور دیگر معرف عیار مدل استخراجی تخمین خورده به روش نزدیک‌ترین همسایگی می‌باشد که موید تخمین و همبستگی مناسب است. به‌منظور بررسی دقت تفکیک ماده معدنی و باطله براساس روش‌های استفاده شده در این پژوهش در جدول‌های ۵، ۶ و ۷ مقایسه مدل بلوکی تفکیک شده براساس روش کریجینگ و شرطی‌سازی محلی با مدل حاصل براساس چال‌های انفجاری ارائه شده‌است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود براساس تخمین‌های صورت گرفته به روش لاگ کریجینگ، در ۲۲/۴۳ و ۴۹/۰۳ درصد موارد تفکیک ماده معدنی و باطله با خروجی کنترل عیار به ترتیب تطابق دارد در حالیکه ۵۶/۷۸ درصد موارد باطله به‌عنوان ماده معدنی و در ۵۰/۹۷ درصد موارد ماده معدنی به‌عنوان باطله تفکیک شده است (جدول ۵). نتایج همین مقایسه برای خروجی روش شرطی‌سازی یکنواخت محلی نشانگر ۹۷/۶۱ و ۶/۷۸ درصد تطبیق بین تفکیک‌های صورت گرفته ماده معدنی و باطله، ۹۳/۲۲ درصد تفکیک باطله به‌عنوان ماده معدنی و ۲/۳۹ درصد تفکیک ماده معدنی به‌عنوان باطله است. لازم به‌ذکر است دو پنل استخراجی که مورد بررسی قرار گرفته‌است از مجموع کل بلوک‌ها ۶۲/۳ درصد باطله و ۹۶/۳۸ درصد کانسنگ است. بنابراین درصد تغییرات کانسنگ نسبت به باطله دارای اهمیت بسیار بیشتری می‌باشد. همچنین جدول شماره ۷ نشان‌دهنده آن است که طبقه‌بندی صحیح در روش LUC ۹۴ درصد و در روش لاگ کریجینگ فقط ۴۹ درصد، به درستی صورت گرفته‌است. بنابراین حتی با فرض یکسان دانستن هزینه‌های ناشی از خطای کم رده‌بندی و بیش رده‌بندی، روش شرطی‌سازی یکنواخت محلی از مطلوبیت بیشتری برخوردار است. بنابراین روش معرفی شده خطای کمتری در تفکیک

روش LUC و کریجینگ کاهش می‌یابد. با توجه به داده‌های معدن مورد مطالعه با عیار حد ۰/۲ درصد تناژ باقی مانده از ذخیره قابل معدنکاری در حدود ۱۰۰ میلیون تن است که با نتایج بدست آمده مطابقت دارد.



شکل ۱۳: نمودار تناژ-عیار متوسط بر اساس خروجی‌های روش کریجینگ و شرطی سازی یکنواخت شرطی

۵- نتیجه گیری

در زمین آمار، نامناسب بودن روش‌های تخمین بر پایه رگرسیون خطی در شرایطی که فاصله نمونه‌های عیاری در مقایسه با ابعاد بلوک تخمینی زیاد باشد، به‌عنوان یک اصل پذیرفته شده است. برای غلبه بر این مشکل، آزالو در سال ۲۰۰۶ با اعمال تصحیحاتی بر روی روش شرطی‌سازی یکنواخت (UC) روشی جدید تحت عنوان شرطی‌سازی یکنواخت محلی معرفی نمود. در این پژوهش داده‌های معدن مس میدوک با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۱۰' و ۵۵' و ۲۵' و ۳۰' مورد استفاده گرفته است. ابعاد واحدهای استخراج انتخابی (SMU) برابر ۵×۵×۱۵ متر انتخاب شد و مدل UC و سپس LUC با استفاده از پارامترهای واریوگرافی ساخته شد. براساس عیار حد ۰/۲ درصد اقدام به تفکیک واحدهای استخراج انتخابی به باطله و ماده معدنی شد. بهترین راه برای مقایسه این دو روش، مقایسه آن‌ها با خروجی مرحله کنترل عیار است. برای کانسار مس میدوک، دسترسی به تفکیک ماده معدنی و باطله صورت گرفته بر اساس نتایج حاصل از چال‌های انفجاری در معدن برای دو پنل استخراجی ۲۴۵۰ و ۲۴۶۵ امکان‌پذیر بود. نتایج نشان داد که براساس نتایج روش لاگ کریجینگ، در این دو پهنه به ترتیب در ۴۹/۰۳ و ۲۲/۴۳ درصد موارد تفکیک ماده معدنی و باطله با خروجی کنترل عیار تطابق دارد در حالی که

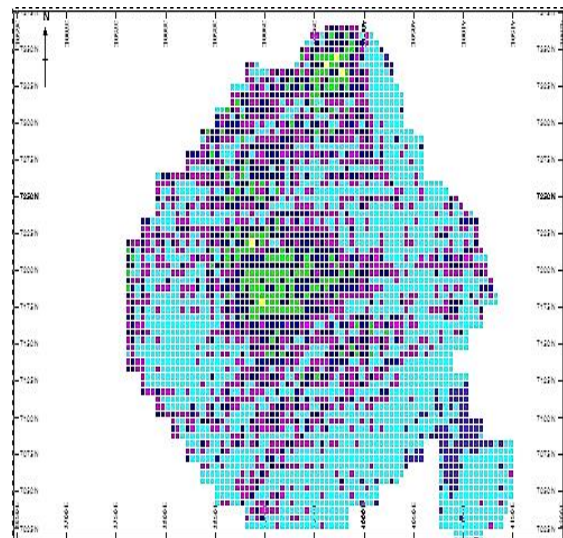
جدول ۶: مقادیر طبقه‌بندی نادرست با استفاده از روش LUC

رده بندی صورت گرفته بر اساس خروجی روش LUC (درصد)		
	باطله	ماده معدنی
رده بندی صورت گرفته براساس چال انفجاری (درصد)	۶/۷۸	۹۳/۲۲
	ماده معدنی	۲/۳۹
	باطله	۹۷/۶۱

جدول ۷: شاخص طبقه‌بندی صحیح

روش طبقه بندی	نوع طبقه بندی	
	نادرست	درست
LUC	۰/۰۶	۰/۹۴
لاگ کریجینگ	۰/۵۱	۰/۴۹

همان‌طور که از شکل ۱۲ مشخص می‌شود بلوک مدل حاصل از روش LUC با توجه به ابعاد کوچکتر بلوک و تغییرات جزئی‌تر عیار در هر یک از بلوک‌ها دارای دقت بیشتری از مدل حاصل از روش OK می‌باشد. بنابراین با استفاده از مدل LUC می‌توان با دقت بیشتری برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت معدن را انجام داد و همچنین از ترفیق ماده معدنی و باطله با طراحی الگوی انفجار مناسب جلوگیری کرد.



شکل ۱۲: بلوک مدل تخمین خورده بر اساس روش LUC برای تراز انتخابی ۲۴۶۵.

در صورتی که به نمودار تغییرات عیار حد بر حسب تناژ دقت شود (شکل ۱۳) با افزایش عیار حد تناژ برای هر دو

- [8] Abzalov, M. Z. (2006), "Localised Uniform Conditioning (LUC): a new approach for direct modelling of small blocks.", *Mathematical Geology*, 38(4), 393-411.
- [9] Rivoirard, J. (1994), "Introduction to disjunctive kriging and non-linear geostatistics (spatial information systems).", Oxford University Press, Oxford.
- [10] Chiles, J., & Delfiner, P. (1999), "Modelling spatial uncertainty."
- [11] Assibey-Bonsu, W., & Krige, D. G. (1999, October), "Use of direct and indirect distributions of selective mining units for estimation of recoverable resource/reserves for new mining projects.", In *Proceedings, APCOM'99 Symposium, Colorado School of Mines*, (pp. 239-247).
- [12] Krige, D. G., & Assibey-Bonsu, W. (2001), "Valuation of recoverable resources by Kriging, direct condition or simulation.", *Computer Applications in the Mineral Industries*, 3.
- [13] Abzalov, M. Z., & Humphreys, M. (2002), "Geostatistically assisted domaining of structurally complex mineralisation: method and case studies." In *TheAusIMM 2002 conference*. (Vol. 150, pp. 345-350).
- [14] Abzalov, M. Z., & Humphreys, M. (2002), "Resource estimation of structurally complex and discontinuous mineralization using non-linear geostatistics: case study of a mesothermal gold deposit in Northern Canada.", *Exploration and Mining Geology*, 11(1-4), 19-29.
- [15] Khorram, F., Asghari, O., & Memarian, H. (2017), "Change of support based on modified localized uniform conditioning and direct block multivariate simulation on the Sungun porphyry deposit, Iran." *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 58(2).
- [16] Maritz, E. (2016), "A test of the appropriateness of the LUC technique in high-nugget Birimian-style gold deposits." *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(7), 609-619.
- [17] Abzalov, M. Z. (2014), "Localized uniform conditioning (LUC): method and application case studies." *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114(3), 205-205.
- [18] Allard, D. J.-P. Chilès, P. (2013), "Delfiner: Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty."
- [19] Badenhorst, C., O'Connell, S., & Rossi, M. (2017), "New Approach to Recoverable Resource Modelling: The Multivariate Case at Olympic Dam." In *Geostatistics Valencia 2016* (pp. 131-149). Springer, Cham.
- [20] Maritz, E. (2017), "The appropriateness of the Localised Uniform Conditioning technique for high-nugget Birimian-style gold deposits." (Doctoral dissertation).
- [21] Ghaeini, N., Mousakhani, M., Amnieh, H. B., & Jafari, A. (2017), "Prediction of blasting-induced fragmentation in Meydook copper mine using empirical, statistical, and mutual information models." *Arabian Journal of Geosciences*, 10(18), 409.
- [22] Nasr Esfahani, A.; Baghbanan, A. (2002), "Geological survey of Miduk porphyry copper ore deposit (Kerman)." 6th Iranian Geological Society Conference; Kerman; Iran.

۵۰/۹۷ درصد موارد باطله به‌عنوان ماده معدنی و در ۵۶/۷۸ درصد موارد ماده معدنی به صورت باطله تفکیک شده‌است. همچنین براساس خروجی‌های روش شرطی سازی یکنواخت محلی در این دو پهنه به ترتیب ۹۷/۶۱ و ۶/۷۸ درصد تطبیق بین تفکیک‌های صورت گرفته ماده‌معدنی و باطله، ۹۳/۲۲ درصد تفکیک باطله به‌عنوان ماده معدنی و ۲/۳۹ درصد تفکیک ماده معدنی به‌عنوان باطله است. لازم به ذکر است دو پنل استخراجی که مورد بررسی قرار گرفته‌است، از مجموع کل بلوک‌ها ۳/۶۲ درصد باطله و ۹۶/۳۸ درصد کانسنگ می‌باشد. بنابراین درصد تغییرات کانسنگ نسبت به باطله دارای اهمیت بسیار بیشتری است. بنابراین حتی با فرض یکسان دانستن هزینه‌های ناشی از خطای کم رده‌بندی و بیش رده‌بندی، روش شرطی‌سازی یکنواخت محلی از مطلوبیت بیشتری برخوردار است.

سپاسگزاری

نویسندگان از شرکت ملی صنایع مس ایران به ویژه امور معدن مس میدوک که در زمینه جمع آوری داده‌های موردنیاز همکاری بیشائبه داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- [1] Armstrong, M., & Champigny, N. (1989), "A study on kriging small blocks.", *CIM BULLETIN*, 82(923), 128-133.
- [2] Ravenscroft, P. J., & Armstrong, M. (1990, September), "Kriging of block models—the dangers re-emphasised." In *proceedings of APCOM XXII*, (pp. 17-21).
- [3] Deraisme, J., & Assibey-Bonsu, W. (2012), "Comparative study of localized block simulations and localized uniform conditioning in the multivariate case.", In *Geostatistics Oslo 2012* (pp. 309-320). Springer, Dordrecht..
- [4] Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. (1978), "Mining geostatistics", (Vol. 600). London: Academic press.
- [5] Pan, G. (1998), "Smoothing effect, conditional bias and recoverable reserves.", *CIM bulletin*, 91(1019), 81-86.
- [6] Tercan, A. E. (2004), "Global recoverable reserve estimation by covariance matching constrained kriging.", *Energy sources*, 26(12), 1177-1185.
- [7] Lipton, I., Gaze, R., Horton, J., & Khosrowshahi, S. (1998), "Practical application of multiple indicator kriging and conditional simulation to recoverable resource estimation for the Halley's lateritic nickel deposit.", In *Proceedings of A 1 Day Symposium, Perth*, (pp. 88-105).

of a multivariate uniform conditioning technique for mineral resource modelling of a porphyry copper gold deposit." *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114(3), iv-v.

[27] Assibey-Bonsu, W., Searra, J., & Aboagye, M. (2015), "The use of indirect distributions of selective mining units for assessment of recoverable mineral resources designed for mine planning at Gold Fields' Tarkwa Mine, Ghana." *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(1), 51-57.

[23] Pars Olang, (2016), "Report on Miduk Resource Estimation".

[24] Pars Olang, (2010), "Report on mining-geological mapping".

[25] Sinclair, A. J., & Blackwell, G. H. (2006), "Applied mineral inventory estimation. Cambridge University Press"

[26] Assibey-Bonsu, W., Deraisme, J., Garcia, E., Gomez, P., & Rios, H. (2014), "Production reconciliation

¹ Outokompu