

تخمین ذخیره کانسارهای مس پورفیری با استفاده از مدل‌های عدم قطعیت در مرز واحدهای سنگ‌شناسی

حمید کر*^۱، ناصر مدنی^۲، اله یار خوجم‌لی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده نفت، ژئوفیزیک و معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشجوی دکتری، مرکز پیشرفته علوم معدنکاری (AMTC)، دانشگاه شیلی، سانتیاگو، شیلی

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده نفت ژئوفیزیک و معدن، دانشگاه شاهرود، شاهرود

(دریافت: تیر ۱۳۹۵، پذیرش: خرداد ۱۳۹۷)

چکیده

مدلسازی زمین‌شناسی یکی از مراحل اساسی و مقدم بر تخمین عیار در یک کانسار است که شامل تقسیم بندی قطعی کانسار به زیر بخش‌های کوچک‌تر تحت عنوان واحدهای زمین‌شناسی است. اگر چه این تقسیم‌بندی باعث ارائه رفتار بهتر از تغییرپذیری عیار در فضا می‌شود، اما امکان ارائه مدل‌های عدم قطعیت که مورد نیاز طبقه‌بندی منابع و ذخائر معدنی بر اساس استانداردهای جهانی نظیر JORC است را در مرز این واحدهای زمین‌شناسی ندارد. این مقاله روشی را ارائه می‌نماید که با استفاده از آن می‌توان عدم قطعیت زمین‌شناسی را در ارزیابی منابع و ذخائر معدنی لحاظ نمود. کارآیی روش در یک مطالعه موردی در یک معدن مس پورفیری در شیلی ارائه گردیده است. در ابتدا شبیه‌سازی زمین آماری برای به دست آوردن توصیف احتمالاتی سه نوع واحد سنگ‌شناسی در این کانسار (گرانودیوریت، تورمالین برشی و دیگر برشی‌ها) استفاده شده است. سپس تحقق‌های شرطی به منظور تعیین عدم قطعیت عیار در کانسار به کار گرفته شده‌اند. مدل ذخیره معدنی در نهایت با استفاده از وزن‌دار کردن شبیه‌سازی عیار مس بوسیله احتمال رخداد واحدهای سنگ‌شناسی مختلف ارائه گردیده است. مدل ارائه شده، امکان تولید یک مدل عیاری را فراهم نموده است که دارای عدم قطعیت واحدهای سنگ‌شناسی با اجتناب از مدل‌های مصنوعی ناشی از فرضیه‌های مرزی قطعی بین مناطق پرعیار و کم عیار در نزدیکی مرزهای سنگ‌شناسی است.

کلید واژه‌ها

شبیه‌سازی زمین آماری، مدل‌های عدم قطعیت زمین‌شناسی، احتمال رخداد زمین‌شناسی

۱- مقدمه

با طرح‌های هندسی پیچیده به کار رود. این هموارسازی باعث می‌شود که در نقاط با تراکم‌پذیری بالای عیار؛ کم تخمینی و در نقاط با عیار پایین، بیش تخمینی به وجود آورد که نمود غیرواقعی از وجود عیار در منطقه است. از طرف دیگر واریانس ارائه شده توسط روش کریجینگ به پیکربندی اطلاعات وابسته بوده و به مقدار متغیر در محل نقاط نمونه‌برداری بستگی ندارد، بنابراین نمی‌تواند خصوصیت‌های مانند اثر قطعه‌ای را ارائه دهد. در ضمن به دلیل خطی بودن فرمول کریجینگ، پراکندگی داده‌های تخمینی کمتر از داده‌های اولیه است. بنابراین این روش می‌تواند باعث به وجود آمدن نتایج نادرست در هنگام تخمین رابطه‌های غیرخطی مانند تناژ، عیار میانگین، محتوای فلزی و ... شود. در مقابل، شبیه‌سازی به معنای ایجاد توابع یا مجموعه مقادیری از متغیر ناحیه‌ای (عیار، ضخامت، و ...) است. مجموعه داده‌های حاصل از فرآیند شبیه‌سازی با داده‌های واقعی همخوانی دارد، یعنی مقادیر شبیه‌سازی شده دارای ساختار فضایی (واریوگرام یا کواریانس) یکسانی با داده‌های اولیه بوده و در بعضی روش‌ها، خروجی‌ها در نقاط نمونه‌برداری شده با داده‌های خام اولیه برابر هستند یا به بیان دیگر همان داده‌های اصلی لحاظ می‌شوند (شرطی‌سازی شبیه‌سازی‌ها). با برقراری شرط فوق، اعتبار شبیه‌سازی‌های زمین‌آماری مورد سنجش قرار می‌گیرند [۵]. شبیه‌سازی با ابزاری که در اختیار دارد مدل‌های محتمل پذیرتری از کانسار را ارائه می‌کند به طوری که می‌توان بدترین و بهترین حالت ممکن از یک ذخیره را مشاهده نمود. بنابراین میانگین این حالت‌ها به نقشه کریجینگ شبیه بوده و دارای مشکلاتی که همراه با کریجینگ است، نخواهد بود. در این مقاله سعی شده است روش نوینی ارائه شود که پس از تعیین مدل‌های احتمالاتی واحدهای سنگ‌شناسی، تغییرپذیری عیار در داخل این واحدها با استفاده از روش شبیه‌سازی زمین‌آماری بررسی گردد. این روش علاوه بر اینکه شامل مدل‌های محتمل‌پذیرتری از کانسار است، نسبت به روش کریجینگ قابل اعتمادتر است. روش پیشنهادی در قالب یک مطالعه موردی در کانسار ریوبلانکو در شیلی بحث و ارائه شده است.

۲- شبیه‌سازی زمین‌آماری

هدف شبیه‌سازی، دستیابی به مدل‌های محتمل‌پذیری است که هم معرف عدم قطعیت منابع و ذخایر معدنی بوده

خصوصیات متالورژیکی و زمین‌شناختی مواد معدنی (نوع سنگ، نوع کانی‌ها، آلتراسیون، بازیابی، قابلیت فلوتاسیون یا انحلال‌پذیری، قابلیت خردشدگی) اغلب مرتبط با تغییرپذیری و پیوستگی فضایی عیار در منبع و ذخیره است و باید در هنگام تخمین منبع و ذخیره معدنی مورد بررسی قرار گیرد. روش رایج در صنعت معدنکاری، تقسیم‌بندی منبع معدنی به بخش‌های مجزا تحت عنوان واحدهای زمین‌شناسی (سنگ‌شناختی یا واحدهای مینرالوژیکی) است. این روش می‌تواند بر اساس اطلاعات در دسترس از چال‌های حفاری و یا دانش و تفسیر مهندس معدن و زمین‌شناس صورت گیرد. پس از تعیین محدوده‌های زمین‌شناختی، تغییرپذیری عیار در هر واحد زمین‌شناسی به صورت همگن فرض شده و تحلیل‌های زمین‌آماري مانند واریوگرافی و کریجینگ برای تخمین ذخیره معدنی در هر واحد به صورت مجزا انجام می‌شود [۱-۳]. اساس این روش بر مبنای دو فرضیه بنیادی است؛ اول اینکه، به دلیل مشخص شدن جداگانه هر واحد زمین‌شناسی، مرزهای بین این واحدها کاملاً صاف و مستقیم است، این به معنی عبور ناگهانی عیار از یک واحد به واحد دیگر است. دوم اینکه، مهندس معدن و زمین‌شناس در نهایت باید این مرزها را در بدنه کانسار معلوم نمایند. در عمل، تعیین این مرزها غیر واقعی بوده و وجود خطا در محل آنها، به خصوص در کانسارهایی با شرایط پیچیده زمین‌شناسی، غیر قابل اجتناب است. بنابراین، عدم قطعیت همراه با منابع و ذخایر ممکن است کمتر از مقدار واقعی برآورد شده و دقت یا صحت در تخمین‌های عیار رعایت نشود [۴]. همچنین فرآیند تخمین به دلیل وابستگی مرزهای سنگ‌شناسی به تفسیر زمین‌شناس به سختی قابل تکرار است. یک روش مرسوم جهت لحاظ کردن اطلاعات واحدهای زمین‌شناسی و همچنین عدم قطعیت در محل دقیق قرارگیری این مرزها در تخمین منابع و ذخایر معدنی با روش زمین‌آمار، استفاده از مدل‌های احتمالاتی (شبیه‌سازی شرطی) واحدهای زمین‌شناسی در داخل کانسار و ترکیب کردن این مدل‌های احتمالاتی با فرآیند تخمین عیار (مانند کریجینگ) است. اما کریجینگ تصاویر هموار شده‌ای را ارائه می‌دهد و بنابراین نمی‌تواند برای ایجاد مدل‌های عددی پیکره‌های ماده معدنی

و هم جهت فراهم نمودن مدل‌های واقعی‌تر برای تحلیل ریسک قابل استفاده گردند [۶].

۱-۲- شبیه‌سازی متوالی

۱-۱-۲- شبیه‌سازی شاخص متوالی

شبیه‌سازی متوالی خانواده‌ای از شبیه‌سازی براساس الگوریتم پایه یکسان است. در این الگوریتم یک شبکه به صورت تصادفی انتخاب شده (تا زمان شبیه‌سازی کل شبکه) و سپس توزیع احتمال محلی شرطی متغیر مورد نظر در آن شبکه به صورت تخمینی برآورد می‌شود. در ادامه یک مقدار تصادفی از توزیع احتمال محلی شرطی استخراج شده و در مجموع داده‌های شرطی‌سازی را تولید می‌کنند. این مراحل تا اختصاص مقدار به تمامی شبکه و ایجاد مدل‌های هم‌احتمال به تعداد معین شده، ادامه می‌یابد. الگوریتم‌های گوسی و شاخص متوالی دو گزینه اصلی الگوریتم شبیه‌سازی متوالی هستند که در عمل نیز کاربرد زیادی دارند. روش شبیه‌سازی شاخص متوالی در کاربردهای معدنی، نوعی روش شبیه‌سازی طبقه‌بندی شده بشمار می‌آید. این روش به علت سادگی در اجرا برای شبیه‌سازی واحدهای سنگی دارای کاربرد زیادی است. شبیه‌سازی شاخص متوالی بر اساس تخمین توزیع احتمال شرطی محلی با استفاده از کریجینگ شاخص است. در روش شبیه‌سازی شاخص متوالی نیز همانند روش تخمین کریجینگ شاخص، هیچ نوع فرضیاتی روی شکل توزیع احتمال شرطی وجود ندارد. بدینسان، به جای تبدیل داده‌ها به مقادیر با توزیع نرمال به یک توزیع شاخص دودویی یا شاخص‌هایی به تعداد دسته‌های متفاوت موجود در داده‌های اولیه تبدیل می‌گردند، سپس روی داده‌های تبدیل یافته، کریجینگ ساده اجرا می‌گردد. از این رو از لحاظ اجرایی در مقایسه با روش گوسی، کندتر است. شاید استفاده از گزینه‌ای به غیر از کریجینگ شاخص برای تخمین توزیع‌های احتمال شرطی محلی بتواند مفید واقع گردد [۷].

۲-۱-۲- شبیه‌سازی گوسی متوالی

در الگوریتم گوسی متوالی از کریجینگ ساده برای تخمین توزیع احتمال شرطی محلی استفاده می‌شود. در این فرآیند فرض بر آن است که توزیع احتمال شرطی محلی دارای توزیع نرمال کلاسیک با میانگین و واریانس به ترتیب برابر با مقدار تخمین کریجینگ ساده و واریانس تخمین است. کاربرد شبیه‌سازی گوسی متوالی نیازمند نرمال نمودن

داده‌ها و سپس انتقال نتایج شبیه‌سازی به حالت اولیه است. اشکال عمده تمام روش‌های گوسی این است که محدوده‌ای که مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد، باید بسیار بزرگ‌تر از دامنه واریوگرام انتخاب شود. در مورد الگوریتم گوسی متوالی (و همین‌طور شبیه‌سازی شاخص متوالی) بزرگ‌ترین مشکل، انتخاب شعاع تاثیر برای جستجو است. انتخاب همسایگی‌های کوچک ممکن است منجر به شرطی‌سازی ضعیف و تولید واریوگرام‌هایی با شباهت کم به واریوگرام اصلی شوند. برای رفع این مشکل از روش شبکه‌های چندگانه برای افزایش کیفیت شبیه‌سازی استفاده می‌گردد. برای این کار ابتدا شبیه‌سازی‌ها روی یک شبکه درشت‌تر با شعاع تاثیر بزرگ جهت بازتولید ساختارهایی با دامنه واریوگرام و سپس روی شبکه ریزتر جهت بازتولید ساختارهای کوچک مقیاس اجرا می‌شود. در این حالت از داده‌های شبیه‌سازی شده شبکه درشت‌تر جهت شبیه‌سازی شبکه ریزتر استفاده می‌گردد. این روند می‌تواند به هر تعداد از شبکه‌های میانی تعمیم یابد که تعداد آنها به تعداد ساختارهای تحت بازتولید در بازه‌های مختلف و فاصله‌داری شبکه نهایی بستگی دارد [۸، ۹]. مراحل الگوریتم شبیه‌سازی گوسی متوالی برای یک متغیر پیوسته به شرح زیر است:

الف) تبدیل داده‌های اولیه به داده‌هایی با توزیع گوسی (نرمال)

ب) تعیین یک شبکه برای شبیه‌سازی منطقه‌ی مورد نظر، به گونه‌ای که محل داده‌های اولیه در آن مشخص شود
پ) محاسبه و مدل نمودن واریوگرام داده‌های اولیه نرمال شده

ت) انتخاب یک نقطه از شبکه به صورت تصادفی

ث) تعیین مقدار متغیر در نقطه انتخاب شده شبکه، با استفاده از سایر داده‌ها (اولیه و داده‌های شبیه‌سازی شده) به

روش کریجینگ و محاسبه واریانس تخمین

ج) ارزش تخمین زده شده و واریانس مرتبط با آن، پارامترهای توزیع گوسی شرطی متغیر $Z(u)$ در نقطه انتخاب شده شبکه است. به وسیله این پارامترها، تابع توزیع تجمعی نرمال در این نقطه تعیین شده و سپس یک ارزش از این توزیع با استفاده از یک ارزش تصادفی انتخاب شده و مقدار آن در نقطه مذکور شبکه قرار داده می‌شود.

عیار تخمینی در واحدهایی با نمونه‌های کمتر، دارای عدم قطعیت بالاتر است، زیرا در این روش اطلاعاتی که در واحدهای دیگر زمین‌شناختی است، نادیده گرفته شده و از دست می‌روند [۱۳].

پ) تخمین عیار با استفاده از مدل‌های احتمالاتی زمین‌شناختی: در این روش مدل‌های احتمالاتی با استفاده توابع احتمال هر سنگ در منطقه تهیه و سپس تاثیر حضور هر سنگ در منطقه در میزان عیار تخمینی لحاظ می‌شود. اساس این روش بر مبنای قواعد احتمال است. در این روش ابتدا عیار در واحد زمین‌شناسی مورد نظر به صورت تخمینی برآورد شده و سپس احتمال حضور سنگ در منطقه با توجه به مدل‌های احتمالاتی در میزان عیار تخمینی لحاظ می‌گردد. با استفاده از این روش، تغییرات عیار در محل‌های مرزی سنگ شناختی به صورت تدریجی و غیر ناگهانی برآورد می‌گردد اما به خاطر استفاده از روش کریجینگ، عیار تخمینی در برخی از قسمت‌ها دارای مشکل کم تخمینی و بیش تخمینی است. این روش از کارایی بالایی برخوردار بوده و بسیار مورد توجه مهندسين معدن قرار گرفته است [۶].

ت) تخمین عیار با استفاده از مدل‌های احتمالی شبیه‌سازی زمین‌شناختی: در این روش که موضوع این مقاله است، ابتدا مدل‌های زمین‌شناختی مورد شبیه‌سازی شرطی قرار می‌گیرند. پس از تهیه نقشه‌های احتمالاتی از مدل‌های شبیه‌سازی زمین‌شناختی، تغییرپذیری عیار با استفاده از روش شبیه‌سازی به عنوان یک ابزار برتر نسبت به روش‌های تخمینی قبلی مانند کریجینگ مورد بررسی قرار گرفته و سپس تاثیر حضور احتمالاتی سنگ مورد نظر منتج شده از مرحله قبلی در عیار لحاظ می‌شود. در این مقاله سعی شده است تا با ارائه این روش جدید، علاوه بر غلبه بر مشکلات تغییرات غیر تدریجی عیار در مرز واحدهای زمین‌شناختی که در مراحل قبلی به آنها اشاره شد؛ مشکلات بیش تخمینی و کم تخمینی عیار که برونزد نتیجه نسبتاً نامناسب روش‌های تخمینی قدیمی متداول مثل کریجینگ است را بررسی و مرتفع نماید. برای این منظور از رابطه‌های (۱) و (۲) استفاده شده است.

چ) انتخاب نقطه دیگر از شبکه به صورت تصادفی و تکرار مرحله پنجم به بعد تا زمانی که تمام نقاط شبکه شبیه‌سازی شوند.

ح) تبدیل معکوس داده‌های شبیه‌سازی شده. با رسم نتایج، تصویری از منطقه مورد بررسی حاصل می‌شود. برای اینکه تصاویر شبیه‌سازی شده بیشتری تولید گردد، لازم است برای هر تصویر، مراحل مذکور دوباره تکرار گردند [۱۰، ۱۱].

۲-۲- شبیه‌سازی متوالی عیار با توجه به عدم قطعیت زمین‌شناسی

بر هیچ کس پوشیده نیست که تغییرپذیری عیار در یک منطقه به شدت به رفتار زمین‌شناختی و نوع سنگ در برگیرنده وابسته است. در برخی موارد حضور یک نوع خاص از سنگ در منطقه باعث می‌شود تا ذخیره معدنی غنی‌تر شده و میزان آن افزایش یابد. مطالعات بسیاری در دهه اخیر بر روی تخمین عیار با استفاده از تأثیر مدل زمین‌شناختی ارائه شده است. در این بین برخی از آنها به دلیل کارایی بالا مورد توجه زیادی قرار گرفته است که در ادامه به شرح مختصری از آنها پرداخته شده است:

الف) تخمین عیار با استفاده از مدل‌های قطعی زمین‌شناختی:

در این روش ابتدا مدل زمین‌شناسی با استفاده از روش‌های قطعی مانند مدل‌های توری و سیمی ایجاد می‌شود و سپس عیار درون هر واحد زمین‌شناختی به صورت جداگانه به صورت تخمینی برآورد می‌گردد. این روش علیرغم سادگی از مشکلات زیادی برخوردار است. از جمله اینکه در این روش، تغییرات عیار در مرز واحدهای زمین‌شناسی به صورت ناگهانی و غیر تدریجی است که به دور از واقعیت‌های تشکیلات عیار و زمین‌شناسی است [۱۲].

ب) تخمین عیار با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی زمین‌شناختی:

در این روش ساختارهای زمین‌شناختی ابتدا مورد شبیه‌سازی شرطی قرار گرفته و سپس عیار درون هر ساختار زمین‌شناسی با استفاده از کریجینگ تخمین زده شده است. این روش تا حدودی شبیه روش‌های تخمین با استفاده از مدل‌های قطعی است. نام دیگر این روش تخمین مرحله به مرحله عیار است. از مشکلات این روش نیز تغییرات عیار در مرزهای سنگ‌شناسی به صورت ناگهانی است و اینکه

$$Grades(K^{th}lithotype) = \sum_{k=1}^n Probability(K^{th}lithotype) \times Simulated \ Simulated \ Weighted \ (1)$$

$$\text{Weighted Simulated Grades Average} = \sum_{k=1}^n \text{Probability}(K^{\text{th lithotype}}) \times \text{Simulated Grades Average}(K^{\text{th lithotype}}) \quad (2)$$

است که تعدادی از معادن روباز و زیرزمینی از آن کانسار در حال بهره‌برداری هستند. معدن روباز لاس برانسس روی رگه‌های برشی حاوی تورمالین دونوسو متمرکز شده است که تولید جاری آن ۵۰ هزار تن ماده معدنی در هر روز با عیار میانگین ۱/۲ درصد مس است. این کانسار شامل دو معدن زیرزمینی متمرکز روی رگه پیچیده‌ی برشی ریوبلانکو و یک معدن روباز متمرکز روی رگه مس پرعیار جنوبی (در رگه برشی حاوی تورمالین) است که در اندازه و مس محتوا شبیه رگه برشی دونوسو است [۱۴].

در این مطالعه به بخش کوچکی از کانسار ریوبلانکو پرداخته شده است که واحدهای زمین‌شناسی آن به سه دسته اصلی گرانودیوریت، تورمالین برشی‌ها و برشی‌های دیگر تقسیم شده است. در ادامه به چگونگی به کارگیری تکنیک‌های زمین‌آماري و مدل‌های احتمالاتی پرداخته شده است. بدین منظور نمونه‌های گمانه‌های اکتشافی به طول ۱۲ متر کامپوزیت شده‌اند که متناظر با ارتفاع پله‌های استخراجی است. اطلاعات حاصل از گمانه‌های اکتشافی علاوه بر عیار مس شامل نوع سنگ هر نمونه است. نقشه‌های موقعیت توزیع این نمونه‌ها به همراه نوع سنگ هر نمونه در شکل ۱ نشان داده شده است.

۴- برآورد عدم قطعیت زمین آماری

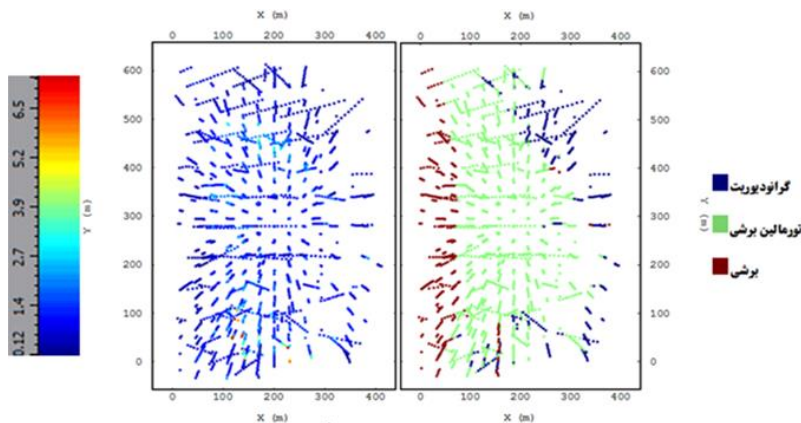
همان‌طور که در بخش‌های پیشین ذکر شد، برای بررسی عدم قطعیت زمین‌شناسی و عیار، ابتدا داده‌های گمانه‌های اکتشافی برحسب نوع سنگ و عیار آن تفکیک شده و به صورت جداگانه مورد بررسی‌های آماری و زمین آماری قرار گرفته است. در این راستا برای هر یک از انواع سنگ‌ها واریوگرام‌های شاخص تجربی در راستاهای ناهمسانگردی و راستای قائم محاسبه و به آنها مدل‌های تئوری مناسب برازش شده است. جهت شبیه‌سازی عیار در واحدهای زمین‌شناسی باید ابتدا واحدهای زمین‌شناسی مورد شبیه‌سازی قرار گرفته و نقشه‌های احتمال آنها تهیه شود.

رابطه‌های (۱) و (۲) به ترتیب معادل عیارهای شبیه‌سازی شده وزن‌داده شده و میانگین عیارهای شبیه‌سازی شده وزن داده شده هستند که در آن k شاخص نوع سنگ و n تعداد آنها است. در این مطالعه مقدار n برابر با سه است. همچنین $\text{Probability}(K^{\text{th lithotype}})$ احتمال رخداد هر یک از سنگ‌ها است. در نهایت $\text{Simulated Grades}(K^{\text{th lithotype}})$ و $\text{Grades Average}(K^{\text{th lithotype}})$ نیز به ترتیب عیارهای شبیه‌سازی شده درون هر نوع سنگ و میانگین عیارهای شبیه‌سازی شده درون هر نوع سنگ است.

نحوه اجرای آن برای هر نوع سنگ بدین گونه است که شبیه‌سازی‌های شاخص برای مجموعه نوع سنگ‌ها انجام شده و از آنها احتمال رخداد نوع سنگ‌ها حاصل گردیده است. عیارهای درون هر نوع سنگ نیز با تفکیک نمونه‌های اولیه برحسب نوع سنگ‌های یکسان به دست می‌آید و شبیه‌سازی‌های عیار در شبکه‌های یکسان برای هر نوع سنگ با داده‌های تفکیک شده انجام می‌پذیرد. در ادامه عیارهای شبیه‌سازی شده درون هر نوع سنگ در احتمال رخداد همان نوع سنگ ضرب شده و این فرآیند برای هر تعداد نوع سنگ اجرا شده و برای هر بلوک، عیارهای وزن‌دار شده که به تعداد نوع سنگ‌ها برای هر بلوک هستند باهم جمع می‌گردند تا تحقق‌های وزن‌دار شده عیار به دست آیند. در نهایت برای دستیابی به یک مدل نهایی از تحقق‌های وزن‌دار شده عیار می‌توان میانگین‌گیری نمود یا اینکه می‌توان میانگین عیارهای شبیه‌سازی شده در هر نوع سنگ را برای هر بلوک در احتمال رخداد همان نوع سنگ ضرب نموده و حاصل جمع این فرآیند برای هر تعداد نوع سنگ، مدل میانگین وزن‌دار شده نهایی را ارائه می‌دهد.

۳- زمین‌شناسی منطقه

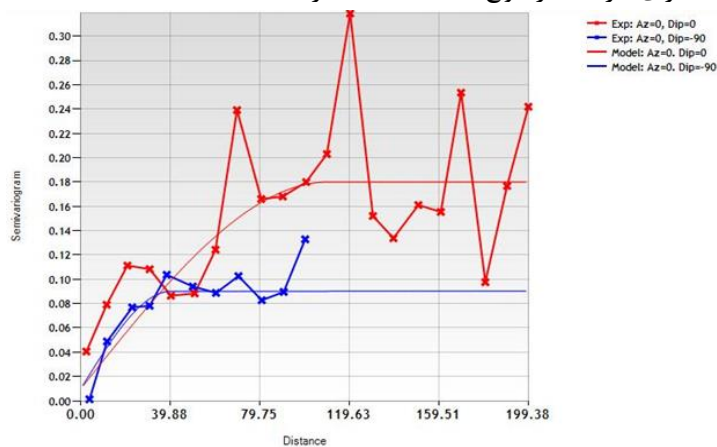
کانسار بزرگ مس ریوبلانکو لاس برانسس در ۷۰ کیلومتری شرق سانتیاگو در کشور شیلی و در ارتفاع ۳۴۰۰ تا ۴۰۰ متری قرار دارد. این کانسار به دو بخش تقسیم شده



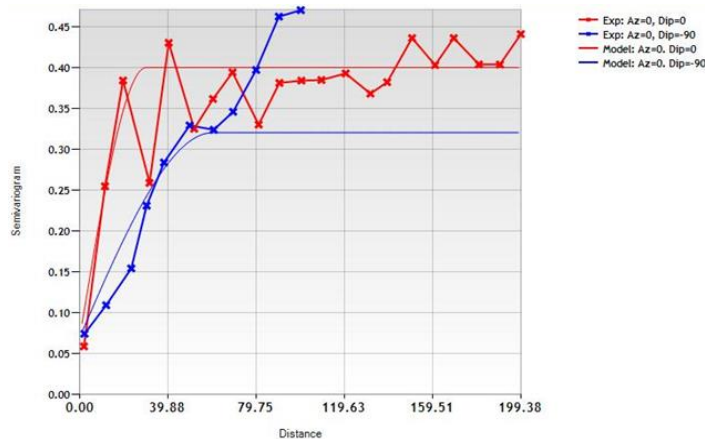
شکل ۱: الف) نقشه موقعیت نمونه‌ها براساس نوع سنگ ب) نقشه موقعیت نمونه‌ها براساس عیار مس

واریوگرام‌های شاخص تجربی در راستای افقی و راستای قائم محاسبه و به آنها مدل‌های تئوری مناسب برازش شده است. چگالی احتمال هر یک از انواع سنگ‌ها نیز محاسبه و برای تخمین و شبیه‌سازی به همراه مشخصات واریوگرام‌های مدل شده مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲). مشخصات واریوگرام‌های شاخص و بیضوی جستجوی مورد استفاده جهت شبیه‌سازی شاخص در جدول ۱ به تفکیک نوع سنگ ارائه شده است.

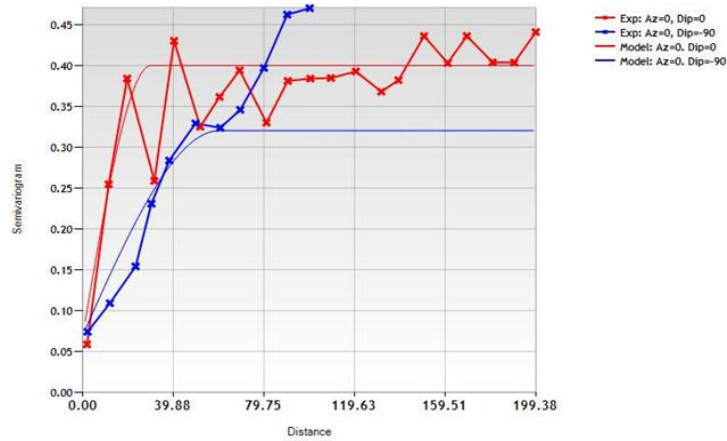
سپس شبیه‌سازی زمین آماری عیار در واحدهای زمین‌شناسی انجام و احتمال حضور سنگ در منطقه به آنها میانگین آنها اعمال گردد. در ادامه این روش در بخشی از کانسار ریوبلانکو به تفصیل ارائه شده است. برای بررسی عدم قطعیت زمین‌شناسی و عیار، ابتدا داده‌های گمانه‌های اکتشافی برحسب نوع سنگ و عیار درون هر نوع سنگ تفکیک شده و به صورت جداگانه مورد بررسی‌های آماری و زمین آماری قرار گرفته است. برای هر یک از انواع سنگ‌ها



شکل ۲-الف: واریوگرام‌های تجربی و مدل شده برای سنگ گرانودیوریت



شکل ۲-ب: واریوگرام‌های تجربی و مدل شده برای سنگ تورمالین برشی

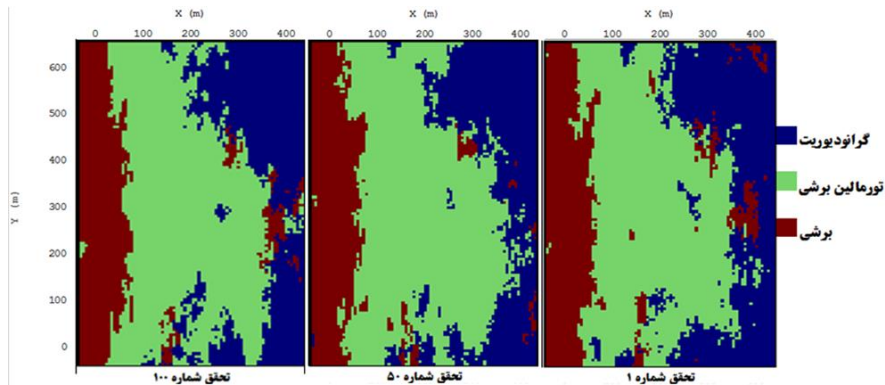


شکل ۲-پ: واریوگرام‌های تجربی و مدل شده برای سنگ برشی
جدول ۱: مشخصات واریوگرام‌های شاخص و بیضوی جستجو

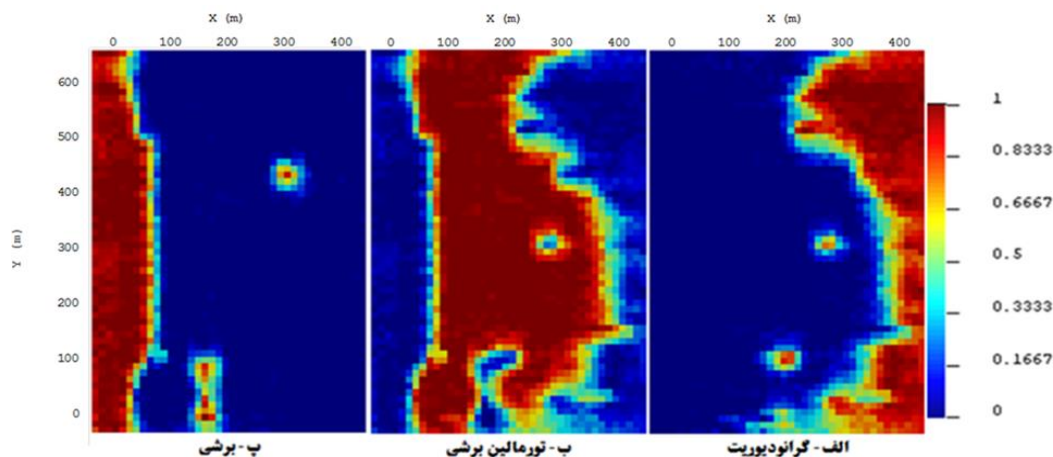
طول قطرهای بیضوی جستجو (m)			واریوگرام راستای قائم				واریوگرام راستای افقی			
Z	Y	X	شعاع تأثیر (m)	واریانس	اثر قطعه‌ای	مدل	شعاع تأثیر (m)	واریانس	اثر قطعه‌ای	مدل
۳۲	۸۴	۸۴	۴۰	۰/۰۹	۰/۰۱۴	کروی	۱۰۵	۰/۱۸	۰/۰۱۴	کروی
۴۸	۲۴	۲۴	۶۰	۰/۳۲	۰/۰۷۵	کروی	۳۰	۰/۴	۰/۰۷۵	کروی
۲۴	۶۸	۶۸	۳۰	۰/۰۸	۰/۰۲۸	کروی	۸۵	۰/۲۸	۰/۰۲۸	کروی

استفاده شده است. در مجموع ۱۰۰ تحقق برای بررسی عدم قطعیت زمین‌شناسی ایجاد شده است که در شکل ۳ سه تحقق زمین‌شناسی (نوع سنگ منطقه) قابل مشاهده است. همان گونه که از این شکل‌ها نیز بر می‌آید برخلاف مدل قطعی و سنتی، مدل شبیه‌سازی شده فاقد هموارشدگی است و حاشیه‌های مرزی سه نوع سنگ نیز هنگامی که به یکدیگر می‌رسند، برخلاف مدل سنتی دارای مرز مشخصی نیست که منطبق با اصول زمین‌شناسی است. همچنین احتمال رخداد هر نوع سنگ در هر بلوک محاسبه شده است که در شکل ۴ قابل مشاهده است.

با توجه به پراکندگی عیار مس در هر سه نوع سنگ لازم است برای ترکیب نتایج شبیه‌سازی‌های زمین‌شناسی و عیار، شبکه تعریف شده یکسان برای هر دو مورد انتخاب شود. شبیه‌سازی شاخص در شبکه تعریف شده (در راستاهای X، Y و Z به ترتیب ۴۰، ۶۰ و ۱۲ بلوک به ابعاد متناظر ۱۰، ۱۰ و ۱۲ متر) برای هر سه نوع سنگ به صورت همزمان اجرا شده است. اما شبیه‌سازی‌های عیار در هر نوع سنگ به صورت جداگانه و در شبکه یکسان برای هر کدام اجرا شده است. نکته قابل توجه این است که برای شبیه‌سازی عیارهای درون هر نوع سنگ از داده‌های اولیه درون همان نوع سنگ



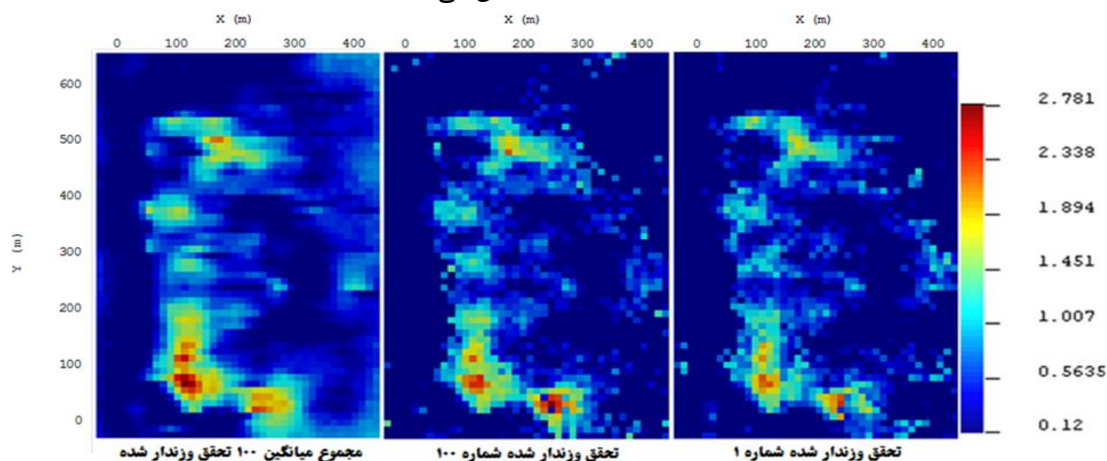
شکل ۳: تحقق‌های شبیه‌سازی شده مدل زمین‌شناسی (نوع سنگ)



شکل ۴: احتمال رخداد سنگ گرانودیوریت (الف)، تورمالین برشی (ب) و برشی (پ)

آمد. سپس از تحقق‌های وزن داده شده میانگین‌گیری شده و برای هر بلوک، عیار مورد انتظار از مجموع عیارهای وزن داده شده بلوک مورد نظر در سه نوع سنگ به دست می‌آید. گزینه دیگر این است که طبق رابطه (۲) قبل از وزن‌دار شدن تحقق‌ها، ابتدا برای هر بلوک میانگین عیارهای شبیه‌سازی شده (برای هر نوع سنگ به صورت جداگانه) محاسبه و سپس با احتمال رخداد هر نوع سنگ وزن‌دار شود. از آنجایی که این رابطه خطی است نتایج مینگین‌گیری قبل و بعد از وزن‌دادن شبیه‌سازی‌ها یکسان خواهد بود. شکل ۵ دو تحقق وزن‌دار شده و مجموع میانگین تحقق‌های وزن‌دار شده را نشان می‌دهد.

در مرحله بعد به منظور ترکیب عدم قطعیت عیار و زمین‌شناسی همانند روش بیان شده در بالا تعداد ۱۰۰ تحقق از عیار مس در هر سنگ ایجاد شده است. شبیه‌سازی عیارهای هر سه نوع سنگ به صورت جداگانه و با داده‌های عیاری تفکیک شده نسبت به نوع سنگ اجرا شده است. به عبارت دیگر جهت شرطی‌سازی عیار در هر نوع سنگ از عیار نمونه‌هایی با نوع سنگ یکسان استفاده شده است. در ادامه این تحقق‌ها در هر نوع سنگ با احتمال رخداد سنگ متناظر وزن داده شده است که در این حالت برای هر بلوک ۱۰۰ تحقق از عیار وزن داده شده در هر نوع سنگ به دست خواهد

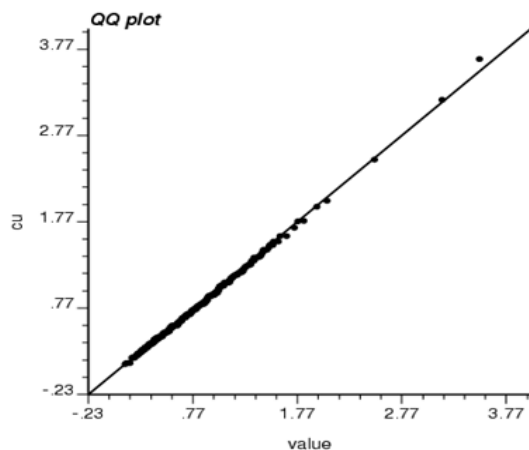


شکل ۵: تحقق‌های وزن‌دار شده و مجموع میانگین تحقق‌های وزن‌دار شده

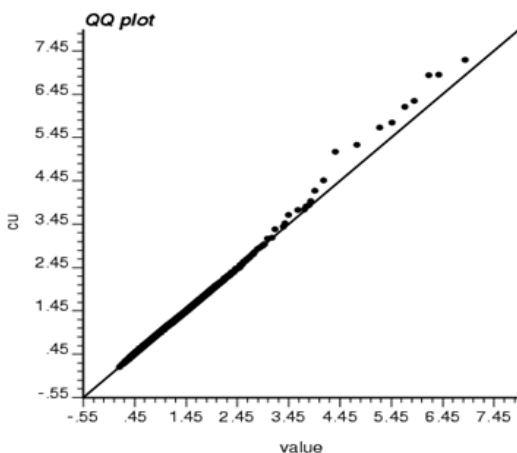
اینکه عدم قطعیت زمین‌شناسی لحاظ شده است اما از آنجایی که عیار این مدل حاصل تخمین کریجینگ معمولی بوده و تنها احتمال رخداد سنگ‌ها روی آن اعمال شده است، بنابراین با وجود هموارشدگی کمتر در حاشیه‌های مرزی باز هم دارای هموارشدگی محسوسی در عیار مدل ایجاد شده است. در مدل تخمینی وزن‌داده شده، عدم قطعیت عیار

همان گونه که شکل ۶ نشان می‌دهد در مدل تخمینی وزن‌داده شده و مدل شبیه‌سازی شده وزن‌داده شده، مرز بین عیارها در بخش‌های خاصی (هنگام عبور از یک نوع سنگ به سنگ مجاور) تغییرات تدریجی را نشان داده و هیچ نوع مرز مشخص و محسوسی مشاهده نمی‌شود. در مدل تخمینی وزن‌دار شده (با استفاده از مدل شماره ۳ در بالا) با وجود

بزرگتر از ۴۵ درجه نشان می‌دهد که پراکندگی Y بیشتر از X است. یک شیب کمتر از ۱ تأیید می‌کند که پراکندگی X بیشتر است. ج: انحناء یا خمیدگی روی نمودارهای Q-Q نشان می‌دهد که دو توزیع شکل متفاوتی دارند. در عمل، اختلافات در هر سه مورد (مرکز، گستردگی و شکل) مشاهده شده است [۱۵]. شکل ۷ نمودارهای Q-Q برای مقادیر شبیه‌سازی شده در مقابل داده‌های اولیه هر نوع سنگ را نشان می‌دهد. این مقادیر به جز در سنگ تورمالین برشی که آن هم در چند مورد مقادیر عیار بالا است، انحراف خاصی را نسبت به خط ۴۵ درجه نشان نمی‌دهند و این امر حاکی از آن است که شبیه‌سازی‌ها در هر سه نوع سنگ، توزیع داده‌های اولیه را بازسازی نموده‌اند و اندک بیش تخمینی در عیارهای بالا که در سنگ تورمالین برشی رخ داده است به علت کمبود داده‌های شرطی‌سازی در برخی نقاط بوده است.

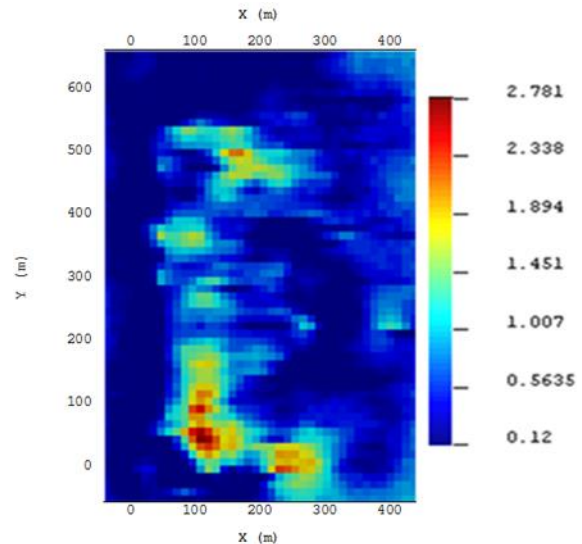


شکل ۷-الف: نمودار Q-Q مقدار شبیه‌سازی شده در مقابل داده‌های اولیه عیار سنگ گرانودیوریت



شکل ۷-ب: نمودار Q-Q مقدار شبیه‌سازی شده در مقابل داده‌های اولیه عیار سنگ تورمالین برشی

لحاظ نمی‌شود. عیار این مدل مبتنی بر تنها تک مدل قطعی است و برخلاف مدل شبیه‌سازی شده وزن‌دار شده (که ۱۰۰ حالت امکان‌پذیر عیار را مورد بررسی قرار می‌دهد)، تنها یک حالت بررسی می‌شود که آن هم دارای هموارشدگی قابل توجهی است. بنابراین با تک مقدار تخمینی عیار نمی‌توان عدم قطعیت عیار را تعیین نمود.



شکل ۶: مدل تخمینی ترکیبی وزن‌دار شده مس

۵- اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی

۵-۱- نمودارهای Q-Q و بررسی بازسازی نسبت فراوانی داده‌های اولیه

یکی از ابزار اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها، استفاده از نمودارهای Q-Q است که بهترین ابزار گرافیکی برای مقایسه دو توزیع است. اساس این روش به این صورت است که وقتی همه نقاط نمودارهای Q-Q روی خط ۴۵ درجه قرار گیرند، آنگاه دو توزیع دقیقاً یکسان خواهند بود. انحراف از خط ۴۵ درجه اختلاف در دو نسبت فراوانی را نشان خواهد داد. مخصوصاً زمانی که الف: یک انحراف سیستماتیک در بالا یا پایین خط ۴۵ درجه، نشان می‌دهد که مقدار مرکزی یا متوسط توزیع‌ها متفاوت است. یک تغییر جهت در بالای خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که توزیع Y بیشتر از توزیع X ارزیابی شده است. یک تغییر جهت در زیر خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که مقادیر X بیشتر یا بزرگ‌تر هستند (توزیع X و Y به ترتیب توزیع مقادیر قرار گرفته در محورهای X و Y هستند). ب: یک شیب متفاوت از ۴۵ درجه نشان می‌دهد که گسترش یا پراکندگی دو توزیع متفاوت است. یک شیب

مورد انتظار تابع توزیع شرطی برآورد شده به وسیله مجموع ناپیوسته است و طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$z_E^*(u) = \sum_{k=1}^{k+1} \bar{z}_k [F(u; z_k) - F(u; z_{k-1})] \quad (4)$$

و $F(u; z_k)$ و $F(u; z_{k-1})$ به ترتیب مقادیر متناظر تابع توزیع شرطی تجمعی در نقطه u با عیارهای Z_k و Z_{k-1} هستند [۱۶]. جدول ۲ آماره‌های پایه‌ای مربوط به واریانس شرطی عیار مس وزن داده شده (واریانس ۱۰۰ تحقق عیار مس) را ارائه می‌دهد.

جدول ۲: میزان واریانس شرطی

مدل شبیه‌سازی شده وزن دار شده	
میانگین	۰/۲۹۲۹۵۹
انحراف معیار	۰/۲۷۰۶۴۲
حداکثر	۴/۰۶۳۸۸
حداقل	۰

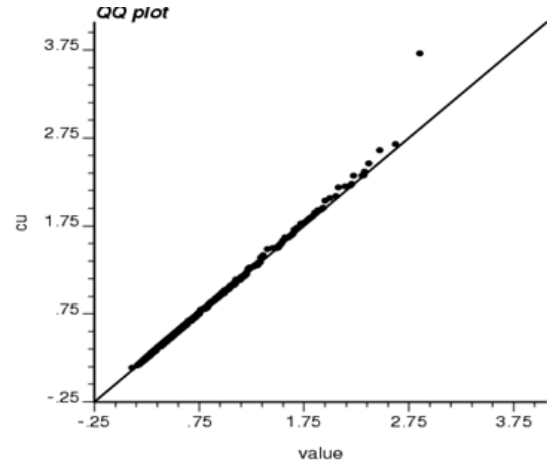
همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، انحراف معیار واریانس شرطی نقاط کم بوده و مدل معتبر است.

۶-۲- ضریب پراکندگی شرطی

ضریب پراکندگی شرطی یا انحراف معیار نسبی شرطی متناظر با انحراف معیار شرطی تقسیم شده بوسیله میانگین است. ضریب پراکندگی شرطی تغییرپذیری را به صورت یک درصدی از میانگین بیان می‌کند و مطابق زیر محاسبه می‌شود:

$$CCV(u) = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{k+1} [\bar{z}_k - z_E(u)]^2 [F(u; z_k) - F(u; z_{k-1})]}}{z_E^*(u)} \quad (5)$$

در شکل ۹ ضریب پراکندگی شرطی برای مدل وزن داده شده قابل مشاهده است. همان گونه که از تصویر بر می‌آید ضریب پراکندگی مدل وزن داده شده در محل انتقال از یک واحد سنگی به دیگری بسیار پایین بوده و این نشان دهنده تخمین مناسب در این نقاط است. بنابراین مدل عدم قطعیت در این موقعیت‌ها کم است. در ضمن شکل ۹ به خوبی گویای بیش‌ترین ضریب پراکندگی در بخش‌هایی با عیار بالا (محدوده نوع سنگ تورمالین برشی) است.



شکل ۷-پ: نمودار Q-Q مقدار شبیه‌سازی شده در مقابل داده‌های اولیه عیار سنگ برشی

روش دیگر اعتبارسنجی استفاده از نسبت فراوانی توزیع است. همان‌طور که در شکل ۸ نیز نشان داده شده است، نسبت فراوانی تحقق‌های حاصل از شبیه‌سازی نیز بیانگر این واقعیت است و شکل کلی تحقق‌های شبیه‌سازی شده، توزیع داده‌های اولیه را دوباره تولید نموده است. قبلاً نیز بیان شده است که این امر یکی از ویژگی‌های شبیه‌سازی شرطی است.

۶- ارزیابی مدل‌های مبتنی بر عدم قطعیت

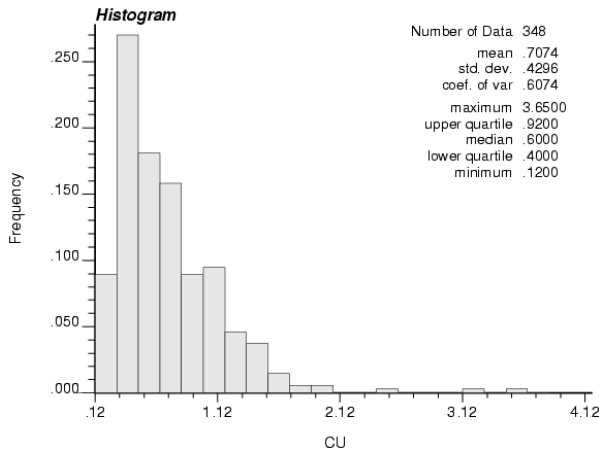
جهت بررسی میزان تغییرپذیری در محل‌های انتقال از یک واحد زمین‌شناسی به واحد دیگر، می‌توان معیارهای زیر را مورد ارزیابی قرار داد. این پارامترها بیانگر این است که تا چه حدی مدل‌های شبیه‌سازی شده در این محدوده‌ها معتبر بوده و قابل اطمینان هستند.

۶-۱- واریانس شرطی

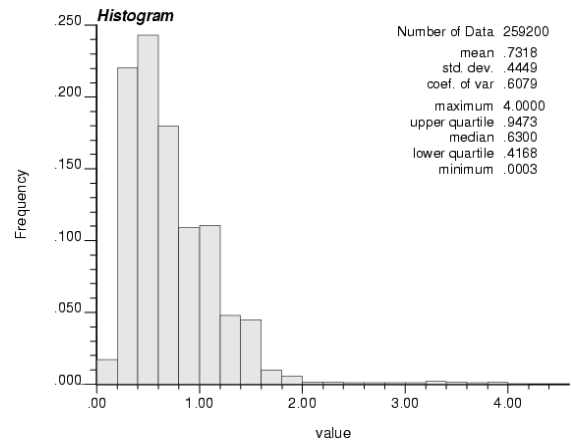
واریانس شرطی، گستردگی تابع توزیع شرطی تجمعی را در اطراف مقدار میانگین Z_E^* اندازه می‌گیرد. پایین بودن تغییرپذیری این متغیر نشان دهنده تخمین مناسب است. واریانس شرطی با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه است.

$$CVar(u) = \sum_{k=1}^{k+1} [\bar{z}_k - z_E(u)]^2 [F(u; z_k) - F(u; z_{k-1})] \quad (3)$$

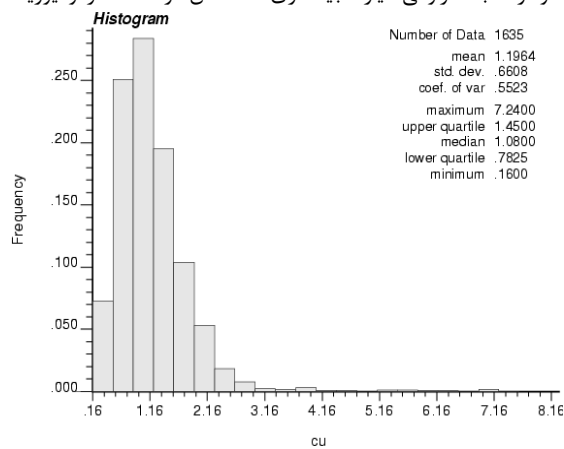
که در آن $CVar(u)$ واریانس شرطی در یک نقطه u داخل شبکه شبیه‌سازی، Z_k ($k=1 \dots k$) مقدار آستان‌های مشخص کننده بازه تغییرات مقادیر Z ، \bar{z}_k میانگین کلاس $Z_{(k-1)}$ ، Z_k ، $Z_{(k+1)}$ که در مورد مدل درونیابی خطی درون کلاسی متناظر است با $Z_k = (Z_{k-1} + Z_k) / 2$ و $Z_E^*(u)$ ارزش



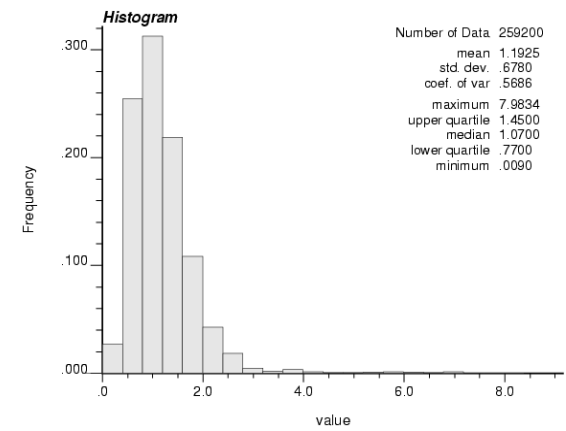
نمودار نسبت فراوانی عیار شبیه‌سازی شده مس در سنگ گرانودیوریت



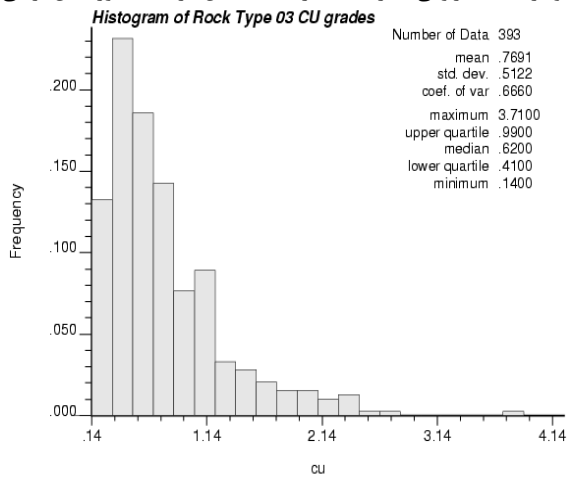
نمودار نسبت فراوانی عیار مس داده‌های اولیه در سنگ گرانودیوریت



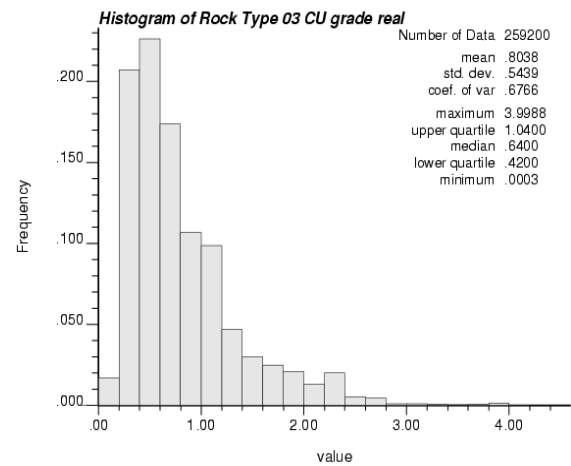
نمودار نسبت فراوانی عیار شبیه‌سازی شده مس در سنگ تورمالین برشی



نمودار نسبت فراوانی عیار مس داده‌های اولیه در سنگ تورمالین برشی



نمودار نسبت فراوانی عیار شبیه‌سازی شده مس در سنگ برشی



نمودار نسبت فراوانی عیار مس داده‌های اولیه در سنگ برشی

شکل ۸: نمودارهای نسبت فراوانی مقادیر شبیه‌سازی شده عیار مس در مقابل داده‌های اولیه هر نوع سنگ

قرار گرفته است. هر یک از نمودارها، نتیجه ۱۰۰ تحقق شبیه‌سازی شده است که برای هر یک از تحقق‌ها، محاسبات مربوطه انجام گرفته و نمودار آنها ایجاد شده است. در نهایت میانگین هر یک از مدل‌ها نیز از میانگین‌گیری تحقق‌ها به دست آمده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود میزان درصد تناژ در مدل وزن‌دار شده بالاتر از مدل

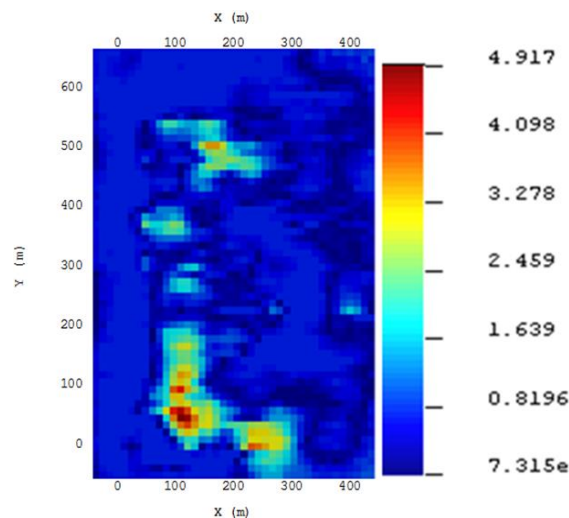
۷- نمودار عیار- تناژ

جهت ارائه کارایی بالای مدل ارائه شده و مقایسه با روش‌های متداول شبیه‌سازی، عیار مس بدون در نظر گرفتن سنگ مورد نظر شبیه‌سازی شده است. نمودار عیار- تناژ برای تحقق‌های وزن داده شده و شبیه‌سازی کلی مورد محاسبه

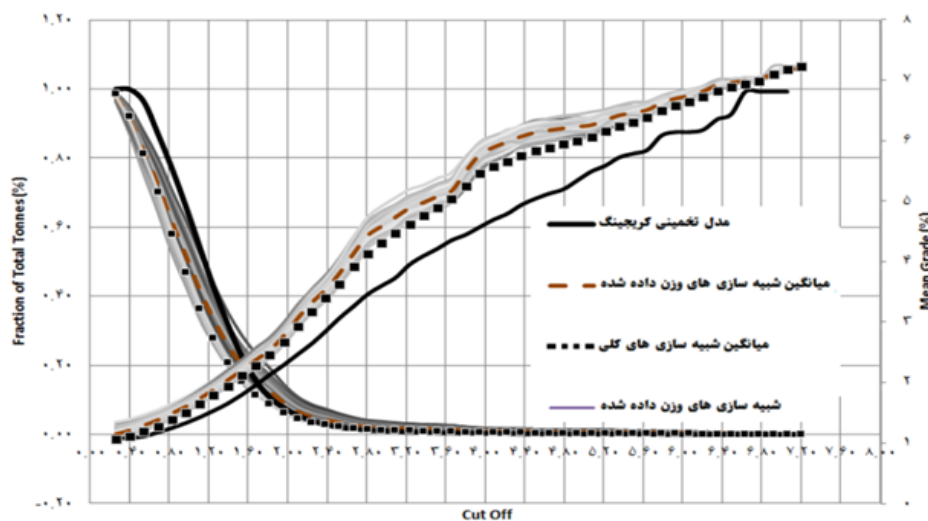
۸- نتیجه‌گیری

مدلسازی سنتی زمین‌شناسی براساس تفسیر قطعی واحدهای اصلی زمین‌شناسی بر اساس اطلاعات در دسترس از چال‌های حفاری و بر اساس دانش مهندس معدن و زمین‌شناس متخصص است. اگرچه این روش برای درک کلی از منشاء کانسار و پیکربندی واحدهای زمین‌شناسی مفید است، اما امکان برآورد خطاهای احتمالاتی را در مرز واحدهای زمین‌شناسی فراهم نمی‌کند. این مشکل باعث کاهش و عدم ارائه دقت و صحت مناسب در برآورد منبع و ذخیره معدنی می‌گردد و به عنوان یک پارامتر بحرانی بر روی طبقه‌بندی منابع و ذخایره معدنی تاثیر می‌گذارد. عدم قطعیت در مرزهای زمین‌شناسی در زمان تعیین طبقه‌های مختلف ماده معدنی بر اساس استانداردهای JORC, SAMREC, UNFC باید برآورد شود.

شبیه‌سازی کلی است که نشان دهنده کارآیی بالای این روش است.



شکل ۹: ضریب پراکندگی شرطی شبیه‌سازی‌های وزن‌دار شده



شکل ۱۰: نمودار عیار تناژ مدل تخمینی کریجینگ، میانگین شبیه‌سازی‌های وزن داده شده، میانگین شبیه‌سازی‌های کلی و شبیه‌سازی‌های وزن‌دار شده

مرزهای واحدهای زمین‌شناسی موثر است، جهت تخمین منبع و ذخیره معدنی باید برقرار گردد. هنگامی که پارامترهای مدل و اطلاعات دیگر تعیین می‌شوند، اجرای مدل شبیه‌سازی شاخص کاملاً قابل انجام بوده و منجر به تولید تصاویر (تحقق‌های) توزیع نوع سنگ در کانسار می‌گردند. این تحقق‌ها سپس به منظور محاسبه مدل‌های احتمالاتی از رخداد سنگ‌های مختلف در ناحیه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفته و سپس با شبیه‌سازی عیار برای هر واحد سنگ‌شناسی ترکیب و یا به اصطلاح وزن‌دار می‌شوند. با توجه به نتایج به دست آمده؛ روش شبیه‌سازی به عنوان یک روش مناسب‌تر نسبت به کریجینگ، نتایج بهتری را ارائه نموده

برای مثال، منابع نزدیک به مرز بین واحدهای کم عیار و پرعیار در صورتی که محل این مرز غیر قابل اطمینان است، می‌توانند به عنوان منابع حدس زده (Inferred) (به جای اندازه‌گیری شده (Measured) و مشخص شده (Indicated) طبقه‌بندی گردند. در این مقاله، یک روش احتمالاتی بر اساس شبیه‌سازی زمین‌آمار برای مدلسازی زمین‌شناسی ارائه شده است. این روش، کاربرد شبیه‌سازی شاخص راه، به عنوان دانش اولیه زمین‌شناسی در توزیع واحدهای سنگ‌شناسی در فضا بیان می‌دارد. به همین منظور، یک ارتباط تنگاتنگ بین متخصصین زمین‌آمار و زمین‌شناسان به عنوان کسانی که نظرشان در مورد جانمایی

[5] Journel, A., and Huijbregts, C. (1978). *Mining Geostatistics*. New York: Academic Press, pp. 597.

[6] Emery, X., González, K., (2006). "Probabilistic modeling of geological units in a Chilean porphyry copper deposit", in: 2nd International Conference on Mining Innovation MININ 2006. J.M. Ortiz, R. Guzmán, E. Rubio, F. Henríquez and P. Lillo (eds.), Impresos Socias Ltda, Santiago, Chile, p. 465-476.

[7] Deutsch, C.V. (2006): A sequential indicator simulation program for categorical variables with point and block data: *BlockSIS*, *Computers & Geosciences* 32: 1669–1681

[8] Dimitrakopoulos, R. (1998). Conditional simulation algorithms for modelling orebody uncertainty in open pit optimisation. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, p. 173-179.

[9] Emery, X. (2005): Properties and limitations of sequential indicator simulation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 6: 414-424

[10] Dowd, P. (1994). *Optimal Open Pit Design: sensitivity to stimated block values*. Geological Society, London, Special Publications, v. 79, p. 87-94.

[11] Journel, A.G., (1989) *Fundamentals of geostatistics in five lessons*. American Geophysical Union Publication, Washington, DC, pp. 40.

[12] Vistelius, A.B. (1989): *Principles of Mathematical Geology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 500

[13] Caceres, A., Emery, X., Aedo, L., Gálvez, O. (2011): *Stochastic geological modeling using implicit boundary simulation*, *Geomin 2011*, Santiago, Chile, 7 p.

[14] Skewes, M. A., Holmgren, C., Stern, C. R., (2002). The Donoso copper-rich, tourmaline-bearing breccia pipe in central Chile: petrologic, fluid inclusion and stable isotope evidence for an origin from magmatic fluids. *Springer-Verlag, Mineral Deposita*. 20 pp. 2-21.

[15] Deutsch, C., and Journel, A. (1998). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York: Oxford University Press, pp. 384.

[16] Duggan, S. y., Dimitrakopoulos, R. (2005). Application of conditional simulation to quantify uncertainty and to classify a diamond deflation deposit. *Geostatistics Banff v.14pp*. 419-428

است. همچنین، برآورد عدم قطعیت زمین‌شناسی در کانسار از بروز مدل‌های غیر واقعی تخمین عیار جلوگیری نموده است. اعتبار مدل نیز در قالب پارامترهای مربوطه بیان گردیده‌اند؛ به گونه‌ای که انحراف معیار واریانس شرطی نقاط شبیه‌سازی شده وزن داده شده کم بوده که نشان از مناسب بودن روش شبیه‌سازی‌های وزن داده شده دارد. همچنین ضریب پراکندگی در مرزهای واحدهای سنگی کم بوده که حاکی از مطلوب بودن روش شبیه‌سازی‌های وزن داده شده و کم بودن عدم قطعیت در این مناطق است.

۹- تقدیر و تشکر

در پایان بر خود لازم میدانیم از شرکت معدنی کودلکو شیلی (CODELCO-Chile)، مرکز تکنولوژی پیشرفته معدنکاری (AMTC)، لابراتوار پیشرفته زمین آمار (ALGES) در دانشگاه شیلی کمال تشکر را ابراز داریم.

مراجع

[1] Dowd, P.A., (1986). Geometrical and geological controls in geostatistical estimation and ore body modelling. In: R.V. Ramani (Editor), *Proceedings of the 19th APCOM Symposium*. Society of Mining Engineers, Littleton, Colorado, pp. 81-99.

[2] Duke, J.H., and Hanna, P.J., (2001). Geological interpretation for resource modeling and estimation. In: A.C. Edwards (Editor), *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice*. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, Australia, pp. 147-156.

[3] Sarkar, B.C., O' Leary, J., and Mill, A.J.B., (1990). Computer based geological -geostatistical evaluation system. In: *Proceedings of the 22nd International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*. Tech. Univ. Berlin, Berlin, Germany, v. 2, pp. 601-612.

[4] Stegman, C.L., (2001). How domain envelopes impact on the resource estimate – Case studies from the Cobar gold field, NSW, Australia. In: A.C. Edwards (Editor), *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice*. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, Australia, pp. 221-236.