Archive of SID

بررسی تأثیر فاکتورهای هندسی بر تکنیک‌های مدل‌سازی ذخایر معدنی (مورد کاوی: کانسار مس رگه‌ای تکنار)

حسین حمداد فرامرزی[۱] و رضا شکورشهابی*[۲]

۱و ۲- گروه مهندسی معدن دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

نویسنده مسئول: shahabi@eng.ikiu.ac.ir *

دریافت: ۹۶/۱۰/۲۲ پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۴

چکیده

هدف از ارزیابی ذخایر معدنی، پیش‌بینی مشخصات فیزیکی کانسار از طریق گردآوری و تحلیل نمونه و مدل‌سازی ابعاد شکل و توزیع عیار آن است. عواملی متعددی در فرآیند مدل‌سازی کانسارها مؤثر می‌باشند. در این تحقیق تلاش گردید تا در قالب مطالعه کانسار رگه‌ای مس سولفیدی تکنار، تأثیرات محدودیت‌های مرتبط با فاکتورهای هندسی کانسار، بر فرآیند مدل‌سازی نرم‌افزاری ذخیره بررسی گردد و تکنیک‌های متناسب‌سازی فرآیند مدل‌سازی جهت برخورد با این فاکتورها و افزایش دقت مدل‌سازی پیشنهاد گردد. مجموع اطلاعات اکتشافی به کار گرفته شده برای این محدوده برابر ۱۴۵۷ متر حفاری مغزه‌گیری و ۴۸۳۹ متر گمانه پودری است. به‌منظور تکمیل اطلاعات اکتشافی، از اطلاعات به‌دست‌آمده از ۲۶۸۵ متر چال پودری استخراجی نیز در عملیات مدل‌سازی استفاده گردید. جهت حصول نتیجه نزدیک به واقعیت، مدل‌سازی به‌وسیله تهیه رویه توپوگرافی، مدل‌سازی گسل‌های مؤثر در کانسار، مدل سه‌بعدی گمانه‌ها و مدل سه‌بعدی زون کانی‌زایی انجام شد. پس از مراحل ذکر شده بالا با در نظر گرفتن عیار ۰/۲۸ درصد به‌عنوان عیار اقتصادی کانسار مس، مدل‌سازی به روش کریجینگ و عکس مجذور فاصله انجام گردید. برآورد تناژ در روش کریجینگ برابر ۱۱۸۲۵۰تن و در روش عکس مجذور فاصله برابر ۱۲۵۱۵۰تن صورت گرفت.

واژه‌های کلیدی: تخمین ذخیره، زمین‌آمار، کانسارهای رگه‌ای، کریجینگ معمولی، مدل‌سازی

۱- مقدمه

امروزه به دلیل ارزش اقتصادی بالای عناصر فلزی، بهره‌برداری از عمده ذخایر توده‌ای و نیز کاهش تناژ ذخایر باقی‌مانده، کانسارهای رگه‌ای به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع این‌گونه فلزات مطرح گردیده‌اند. لذا شناخت دقیق خصوصیات این‌گونه ذخایر امری ضروری است. ارزیابی یک کانسار به مفهوم پیش‌بینی مشخصات فیزیکی کانسار از طریق گردآوری و تحلیل نمونه و مدل‌سازی ابعاد شکل و توزیع عیار آن است (آصفی، ۱۳۹۳). یکی از مهم‌ترین بخش‌های این ارزیابی، در فرآیند مدل‌سازی نمود می‌یابد و با شناخت و درک دقیق از کانسار مورد مطالعه، امکان بالا بردن صحت کار و در نتیجه کاهش ریسک این عملیات را باعث خواهد گردید. به‌بیان‌دیگر در صورت بروز خطا در این مراحل احتمال ضررهای هنگفتی چه در ازاء پیش‌بینی ذخیره بیش از مقدار واقعی و با عیار بالاتر می‌شود که باعث تحمیل هزینه‌های هنگفت مراحل آماده‌سازی به سرمایه‌گذار و عدم بازگشت سرمایه می‌گردد. هم‌چنین پیش‌بینی ذخیره کمتر از مقدار واقعی، باعث غیراقتصادی شدن کانسار و در نهایت بلا استفاده شدن آن می‌شود. حتی در صورت بهره‌برداری ذخیره، بروز نقص و خطا در مدل‌سازی کانسار معدنی، موجب مشکلات متعدد در طراحی معدن می‌گردد. لذا در این تحقیق تلاش می‌گردد تا تکنینک مدل‌سازی متناسب با ویژگی‌های ذخیره با تاکید ویژه بر مولفه‌های هندسی ذخیره بهبود یابد و پیاده‌سازی تکنیک مدل‌سازی پیشنهادی بر روی کانسار مس تکنار صورت گیرد.

۲- بررسی ارتباط فاکتورهای هندسی ذخایر معدنی و پارامترهای مدل‌سازی

۲-۱- طبقه‌بندی ذخایر معدنی

ذخایر معدنی برحسب شرایط زمین‌شناسی و منشأ تشکیل در شکل‌ها، ابعاد و ضخامت‌های مختلف و با معیارهای متفاوتی تقسیم‌بندی می‌گردند. یکی از انواع

www.SID.ir

Archive of SID

تقسیم‌بندی، بر اساس مؤلفه‌های هندسی مانند شکل و شیب‌بندی بین ذخیره با لایه‌بندی سنگ‌های میزبان استوار است. در جدول‌های ۱ تا ۴ انواع تقسیم‌بندی‌ها بر اساس مشخصات هندسی اشاره شده است. در کنار شناخت نوع کانسار، تعیین عوامل مؤثر در گسترش و توزیع عیار در محدوده مورد بررسی ضرورت دارد. در مواردی که داده‌های عیارسنجی کافی نیست، داده‌های زمین‌شناسی مانند همبری واحدهای سنگی، گسل‌ها و دیگر عوامل ساختمانی می‌توانند در تصحیح و اصلاح مرزها مفید واقع شوند (معدن‌زمین، ۱۳۹۵).

با مقایسه انواع طبقه‌بندی کلی کانسارها بر اساس شکل و ریخت و ابعاد آن‌ها، مشخص می‌گردد اکثر طبقه‌بندی‌ها بر سه دسته اصلی کانسارهایی که در سه بعد گسترش تقریباً یکسانی دارند، کانسارهایی که در دو بعد گسترش یکسانی داشته و در بعد سوم محدود می‌باشند و کانسارهای رگه‌ای اتفاق نظر داشته و مشترک می‌باشند و دیگر بخش‌های تقسیم‌بندی بیش‌تر مشتق‌شده از این سه دسته کلی می‌باشند. لذا به‌طور کلی این سه دسته را به‌عنوان اصلی‌ترین دسته‌های تقسیم‌بندی می‌توان در نظر گرفت. هم‌چنین جهت طبقه‌بندی کانسارها از خواص شیمیایی و بر اساس خانواده عناصر اصلی کانسارها را تفکیک نمود.

جدول ۱. تقسیم‌بندی کانسارها بر اساس ژنز(ایوانز،۲۰۰۰)

توده‌های معدنی غیر هم‌شیب		توده‌های معدنی هم‌شیب	
با شکل منظم	با شکل نامنظم	میزبان آذرین	میزبان رسوبی
صفحه‌ای[1] شکل (رگه موازی، بادبزنی[2] و ...)	افشان (استوک‌ورک[3])	خروجی	-
لوله‌ای شکل (مانتو[4] و تخت)	جانشینی (اسکارن[5])	درونی	-

جدول ۲. تقسیم‌بندی کلی کانسارها از دیدگاه لومونوسف(اسمیرنوف،۱۳۶۷)

تقسیم‌بندی کانی‌ها از دیدگاه لومونوسف	رگه‌های کانه پر شده در شکاف‌ها
	لایه‌های افقی در سنگ‌ها
	کانه‌های خوشه‌ای[6]
	کانه‌های روی سطح زمین

جدول ۳. تقسیم‌بندی کانسارها از دیدگاه ریخت‌شناسی(اسمیرنوف،۱۳۶۷)

از دیدگاه‌های ریخت‌شناسی	ایزومتریک[7] (استوک‌ها، کیسه‌ای و...)
	تخت (لایه‌ای، رگه‌ای و ...)
	چینه‌ای (چینه‌های ساده، چینه‌های مرکب)

جدول ۴. تقسیم‌بندی کانسارها بر اساس ابعاد کانسار (ایوانز،۲۰۰۰)

تقسیم‌بندی بر اساس ابعاد کانسار	ذخایر ایزومتریک
	ذخایر صفحه‌ای
	ذخایر استوانه‌ای
	ذخایر عدسی[8]
	ذخایر رگه‌ای

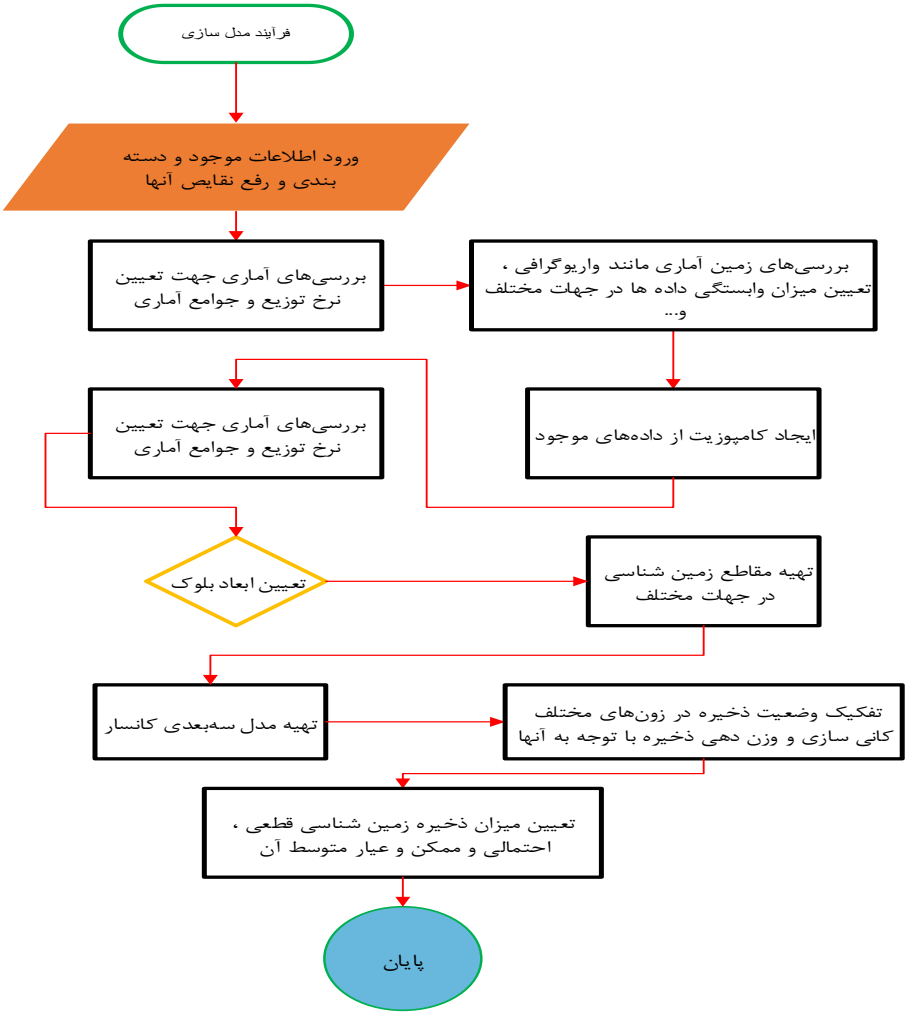
1 Plate
2 Fan Vain
3 Stock Work
4 Manto
5 Skarn
6 Clustered Ore
7 Isometric
8 Lens

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۲- فرآیند مدل‌سازی نرم‌افزاری ذخایر معدنی

پس از اتمام عملیات اکتشاف و به‌منظور تأیید وجود یک ذخیره، تعیین توزیع فضایی و هندسی کانسنگ یا به عبارتی مدل‌سازی کانسار لازم است. اولین گام در ارزیابی ذخیره یک کانسار، تعیین شکل هندسی و مدل‌سازی سه‌بعدی کانسار است تا علاوه بر تعیین حجم و محدوده تخمین عیار بتوان تصویر مناسبی جهت تصمیم‌گیری‌های آتی مهیا کرد. در جدول ۵ دسته داده‌های اصلی در مدل‌سازی منبع کانسار بیان شده است (آصفی، ۱۳۹۳). هم‌چنین در شکل ۱ رویه متداول مدل‌سازی نرم‌افزاری کانسار معدنی نمایش داده شده است.



شکل ۱. فرآیند کلی مدل‌سازی نرم‌افزاری ذخایر معدنی (حمداد، ۱۳۹۶)

جدول ۵. دسته داده‌های اصلی مورد نیاز در مدل‌سازی (اریکسون، ۲۰۱۱)

دسته داده	توصیف
موقعیتی	داده‌های جغرافیایی مربوط به داده‌های زمین‌شناسی مورد تحلیل
سنگ‌شناسی	ویژگی‌های ژئومورفولوژی، چینه‌شناسی و لایه‌بندی واحدهای سنگ‌شناسی
زمین‌ساختاری	توصیف پدیده‌های ثانویه از قبیل درزه‌ها، شکستگی‌ها، چین‌ها بر مبنای نمونه‌های جمع‌آوری‌شده
دگرسانی	داده‌های کانی‌شناسی و توزیع زون‌های دگرسانی
کانی‌زایی	توزیع عیار در منبع، مشخصات رگه‌ها و زون‌ها

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۳- بررسی مؤلفه‌های مؤثر در مدل‌سازی نرم‌افزاری ذخایر معدنی

الف) شکل هندسی کانسار: در واقع شکل کانسار با ایجاد فضا بین مقاطع تعیین می‌شود که در ادامه با ساخت اجسام صلب و بلوک‌بندی با ابعاد معین، تخمین ذخیره انجام می‌شود. قابل ذکر است جهت ساخت این مدل می‌بایست عیاری به‌عنوان عیار حد که نشان‌دهنده یک عیار حداقلی برای تعیین حد اقتصادی کانسار ملاک قرار می‌گیرد (حسنی‌پاک، ۱۳۷۷)

ب) ابعاد بلوک‌ها: یک مدل زمین‌شناسی از یک سری بلوک‌های منظم یا غیرمنظم تشکیل شده است که به هر کدام خصوصیاتی از قبیل عیار، نوع سنگ و کدهای مشخصاتی دیگر نسبت داده شده است. معمولاً ارتفاع قائم هر یک از بلوک‌ها را برابر ارتفاع پله‌های معدن می‌گیرند. توصیه شده است که به‌عنوان یک قاعده تجربی ابعاد بلوک‌ها در حدود یک چهارم تا نصف فاصله گمانه‌ها در نظر گرفته شوند (حسنی‌پاک، ۱۳۷۷)

پ) نحوه توزیع داده‌ها: بررسی آماری داده‌ها در تخمین و شناخت ویژگی‌های آماری جامعه داده‌ها به‌خصوص ماهیت تابع توزیع و نحوه صحیح به کار بردن آن‌ها و تجزیه و تحلیل مناسب‌تر نتایج حاصل از تخمین، کمک زیادی می‌کند. هیستوگرام‌ها و نمودارهای پراکندگی ابزار مؤثری برای این هدف می‌باشند (حسنی‌پاک، ۱۳۷۷)

ت) یکپارچه‌سازی: به‌منظور القاء عیار به بلوک‌ها اقدام به یکسان‌سازی یا برابر نمودن پایه‌های تخمین می‌گردد. بدین منظور از ابتدا کلیه نمونه‌ها را با شرایط یکسان (به لحاظ طول و ابعاد نمونه) برداشت نمود و یا در صورت وجود نمونه با ابعاد و حجم متفاوت تمامی آن‌ها را با استفاده از روش‌های عددی به پایه یکسان تبدیل نمود (ژوسی،۲۰۰۳).

یکپارچه‌سازی بسته به ماهیت کانی‌سازی و نوع معدن‌کاری و اهداف مختلف مدل‌سازی می‌تواند انواع مختلفی داشته باشد:

- یکپارچه‌سازی ناحیه کانه‌دار که بر مبنای به دست آوردن میانگین عیار در طولی از گمانه که ماده معدنی را قطع نموده است حاصل می‌شود.

- یکپارچه‌سازی بر مبنای پله‌های استخراجی[1] که به اندازه ارتفاع پله و در حدود راس و پاشنه پله تعیین می‌شود. در معادن سطحی و کانسارهایی که مرز مشخصی بین کانسار و باطله وجود ندارد نمونه‌ها در طول گمانه و بر اساس قرارگیری در پله‌های مختلف تفکیک و یکپارچه‌سازی پله‌ای انجام می‌شود.

- یکپارچگی با فواصل مساوی[2] که از ابتدای گمانه شروع و با فواصل مساوی تا انتهای عمق گمانه صورت می‌گیرد و عمدتاً با گمانه‌های مایل صورت می‌گیرد (عطایی‌پور،۱۳۹۱).

ث) دامنه واریوگرامتری: روش‌های زمین آماری یکی از دقیق‌ترین روش‌های تخمین می‌باشند. مبنای این روش محاسبه میانگین وزن‌دار مقادیر واقع در همسایگی نقطه مورد تخمین، بر اساس ارتباط فضایی موجود بین آن‌ها، شعاع تأثیر و ناهمسانگردی محاسبه شده به‌وسیله واریوگرام است (حسنی‌پاک،۱۳۹۱).

ج) حداقل نمونه استفاده شده در تخمین بلوک: مهم‌ترین پارامتر شرکت‌کننده در تخمین یک بلوک، تعداد نمونه‌های شرکت‌کننده در تخمین بلوک است. برای تعیین حداقل و حداکثر تعداد نقاط شرکت‌کننده در تخمین، ضرایب بیضوی‌های دوم و سوم و .... از روش آزمون متقابل می‌توان استفاده نمود (صیادی، ۱۳۸۶).

چ) ابعاد حجم جستجو: حجم جستجو محدوده‌ای است که در بردارنده نمونه‌هایی است که در تخمین یک سلول مورد استفاده قرار می‌گیرند. مرکز این حجم جستجو در مرکز سلول مورد تخمین قرار می‌گیرد.

ح) حداقل بخش‌های استفاده شده در جستجوی هشت قسمتی: در بسیاری از موارد، نمونه‌های قرار گرفته در یک حجم جستجو، به‌طور یکنواخت در داخل آن پراکنده نشده‌اند. برای حل این حجم جستجو به هشت بخش متعامد تقسیم می‌گردد و در هر بخش می‌توان حداقل نمونه را تعیین نمود.

حال تصمیم‌گیری در هر یک از مراحل ۱۰ گانه ارزیابی ذخیره، تابعی از شناخت نوع کانسار و رفتار ژئومورفولوژی هر کانسار به‌صورت منحصربه فرد خواهد بود. هم‌چنین در هر مرحله، تأثیر فاکتورهای هندسی بر فرآیند مدل‌سازی باید در آن لحاظ گردد.

[1] Composite over bench
[2] Composite down drillholes

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۴- تحلیل تأثیر فاکتورهای هندسی ذخیره بر پارامترهای مدل‌سازی

با توجه به انواع طبقه‌بندی کانسارها، عوامل مؤثر در هر بخش عملیات مدل‌سازی به شرح زیر است (حمداد، ۱۳۹۶):

- در بخش کامپوزیت‌سازی، در معادنی که دارای گستردگی در یکی از ابعاد می‌باشند مهم‌ترین عامل توجه به یکسان‌سازی یا برابر نمودن پایه‌های تخمین در جهت گسترش ابعاد کانسار است و در معادنی که گسترش کانسار در چند بعد است یکسان‌سازی پایه‌ها به‌طوری‌که حداقل نمونه‌ها در تخمین از دست برود و حداکثر هم‌پوشانی را دارا باشد انجام می‌گیرد.

- عامل مؤثر دیگر در عملیات مدل‌سازی تعیین فضای تخمین است. در معادنی که به‌صورت توده‌ای می‌باشند و توزیع عیاری نسبتاً یکنواختی دارند مهم‌ترین عامل در انتخاب ابعاد فضای تخمین فواصل کارهای اکتشافی (گمانه‌ها) است. در معادنی که به‌صورت توده‌ای بوده و توزیع عیار یکنواختی را دارا نمی‌باشند، می‌بایست علاوه بر فواصل تخمین در جهات سه‌گانه زوایای چرخش نیز به‌گونه‌ای انتخاب گردند که علاوه بر تعیین مقدار عیار در یک بخش، جهت‌یافتگی عیاری را نیز به صورتی مدنظر قرار دهد که توزیع عیاری بخش‌های پرعیار و کم‌عیار به‌صورت واقعی لحاظ گردد. به‌منظور بررسی روند پراکندگی نسبت به محورهای مختصات X، Y و عمق (Z)، نمودار پراکندگی در امتدادهای مختلف ترسیم می‌گردد.

حال در صورت رگه‌ای بودن کانسار معدنی، دو حالت وجود خواهد داشت.

- در دسته اول ذخایر رگه‌ای، رگه‌هایی با طول زیاد و باریک و توزیع عیار نامنظم می‌باشند که در شکاف‌ها و بریدگی طبقات جا گرفته‌اند و حاصل تزریق می‌باشند و معمولاً دارای شیب زیادی می‌باشند. این‌گونه شرایط بیش‌تر در کانسارهایی که سیال گرمابی در تشکیل آن‌ها نقش داشته است، دیده می‌شود. به‌منظور تخمین عیار در جهات و شیب‌های مختلف اقدام به رسم واریوگرام کرده و در نهایت یک روند برای پراکندگی عیاری تهیه می‌شود. کانسارهای گرمابی از این دسته کانسارها می‌باشند.

- در دسته دوم معادن رگه‌ای، رگه‌های به نسبت عریض‌تر و با توزیع عیار یکنواخت‌تر می‌باشند که کانسارهای نوع رسوبی را می‌توان در این دسته قرار داد که جهت‌یافتگی کانسار از شرایط تشکیل کانسار پیروی می‌کند. به‌منظور مدل‌سازی، این عوامل محدودکننده باید لحاظ گردد. به‌منظور تخمین عیاری نیز می‌توان از مباحث آماری کلاسیک استفاده نمود.

مؤلفه‌های مربوط به مدل‌سازی کانسارها در جدول ۶ مورد اشاره قرار گرفته است:

جدول ۶. ارتباط پارامترهای کانسار و مؤلفه‌های مدل‌سازی (حمداد،۱۳۹۶)

ذخایر ایزومتریک	توزیع عیاری یکنواختی دارند، یکسان‌سازی پایه‌های تخمین به‌وسیله روش‌های عددی است، فضای تخمین کارهای اکتشافی، معمولاً از روش‌های تخمین نزدیک‌ترین همسایگی و عکس مجذور فاصله و کریجینگ معمولی جهت تخمین استفاده می‌شود.
ذخایر صفحه‌ای	رگه‌های به نسبت عریض‌تر که در دو بعد گستردگی دارند، دارای توزیع عیار یکنواخت‌تر، عوامل ژئومکانیکی معمولاً مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده جهت‌یافتگی این‌گونه کانسارها می‌باشند، جهت فرآیند تخمین عیاری معمول برای این‌گونه کانسارها می‌توان از مباحث آماری کلاسیک و روش عکس مجذور فاصله استفاده نمود.
ذخایر استوانه‌ای	به‌صورت توده‌ای می‌باشند و توزیع عیاری نسبتاً یکنواختی دارند مهم‌ترین عامل در انتخاب ابعاد فضای تخمین فواصل کارهای اکتشافی (گمانه‌ها) است. تخمین عیار برای این‌گونه کانسارها نزدیک‌ترین همسایگی و کریجینگ معمولی را می‌توان نام برد.
ذخایر عدسی	این‌گونه کانسارها معمولاً توزیع عیار یکنواختی را دارا نمی‌باشند و دارای جهت‌یافتگی عیاری در بعضی ابعاد می‌باشند و می‌توان به‌وسیله رسم دیاگرام پراکندگی در امتدادهای مختلف این جهت یافتگی را مشخص نمود که به‌وسیله آن‌ها زوایای چرخش فضایی نسبت به محورهای اصلی مختصاتی و تعداد نمونه‌های شرکت‌کننده در تخمین تعیین می‌گردد. روش‌های معمول تخمین عیار روش عکس مجذور فاصله و کریجینگ عام است.
ذخایر رگه‌ای	رگه‌هایی که با طول زیاد و باریک و توزیع عیار نامنظم می‌باشند به‌صورت پر شده در شکاف‌ها و ثانویه دیده می‌شوند. دارای توزیع عیاری به‌شدت متغیری می‌باشند. جهت تعیین آنیزوتروپی کانسار و پراکندگی عیاری از روش واریوگرافی و مباحث زمین‌آمار استفاده می‌گردد. به علت تغییرات شدیدتر عیاری، پیشنهاد می‌گردد از روش کریجینگ معمولی جهت مدل‌سازی استفاده گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

۳- مطالعه موردی: مدل‌سازی کانسار رگه‌ای مس سولفیدی تکنار

۳-۱- زمین‌شناسی کانسار

واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در محدوده مورد مطالعه شامل ماسه‌سنگ توفی سبز رنگ، شیست‌های حاصل از دگرسانی، ریوداسیت تا داسیت، ریوداسیت تا میکروگرانیت پورفیری، میکرومونزودیوریت پورفیری و متادیوریت می‌باشند. سن نسبی این واحدهای سنگی با توجه به نقشه زمین‌شناسی (مقیاس یک‌صد هزار) بردسکن، پرکامبرین ذکر شده است (شکل ۲). هم‌چنین آبرفت‌های قدیمی و جوان کواترنری توسعه اندکی در محدوده دارند (مهندسین مشاور زرناب، ۱۳۹۰).

شکل ۲. نقشه یک‌صدهزار زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

کانسار مورد نظر دارای طول عمومی حدود ۴۰۰ متر است. بخش جنوبی آن که کانی‌سازی اصلی را در خود جای داده است با طول حدود ۲۱۰ متر در راستای شمالی- جنوبی قرار گرفته است. عرض رخنمون کانه‌دار حدود ۲ تا ۳.۵ متر است که با زاویه ۴۵ درجه به سمت شرق به زیر لایه‌های ماسه‌سنگ توفی و هم امتداد با آن‌ها ادامه دارد. پاراژنز کانی‌سازی در این رگه عمدتاً شامل کالکوپیریت و پیریت و نوع کانی‌سازی نیز غالباً به‌صورت رگچه‌ای و پراکنده در متن سنگ است. سیالاتی که به‌صورت هم‌زمان یا احتمالاً در یک فاز تأخیری در گسل‌ها نفوذ کرده‌اند کانی‌سازی‌های پراکنده مس را در واحدهای مختلف ایجاد کرده‌اند (مهندسین مشاور زرناب، ۱۳۹۰).

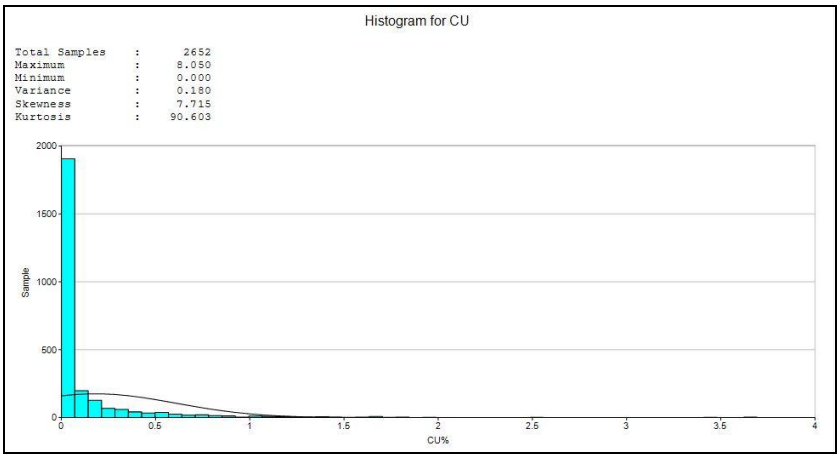
۳-۲- تحلیل آماری داده‌ها

مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار دیتاماین ویرایش ۳.۲۱ انجام گرفت. جهت ساخت مدل کانسار ابتدا عیار اقتصادی جهت تفکیک ماده معدنی کم‌عیار از پر عیار برابر ۰/۲۸ درصد انتخاب گردید و نمونه‌هایی که دارای عیار بالاتر از این مقدار بودند به‌عنوان عیارهای دارای ارزش در نظر گرفته شدند. در کانسار مورد بررسی تغییرات عیاری در زون کانه‌دار به‌شدت بالا بوده و از ۰/۱ درصد تا ۸/۰۵ درصد در تغییر است. در مجموع ۲۶۵۲ نمونه که از مجموع حفاری‌های عمیق گمانه‌های پودری و مغزه‌گیری و نمونه‌های حاصل از چال‌های آتشباری تهیه و تحلیل گردید که پراکندگی عیاری در نمونه‌های بخش جنوبی کانسار بسیار شدید است و در شکل ۳ دیده می‌شود.

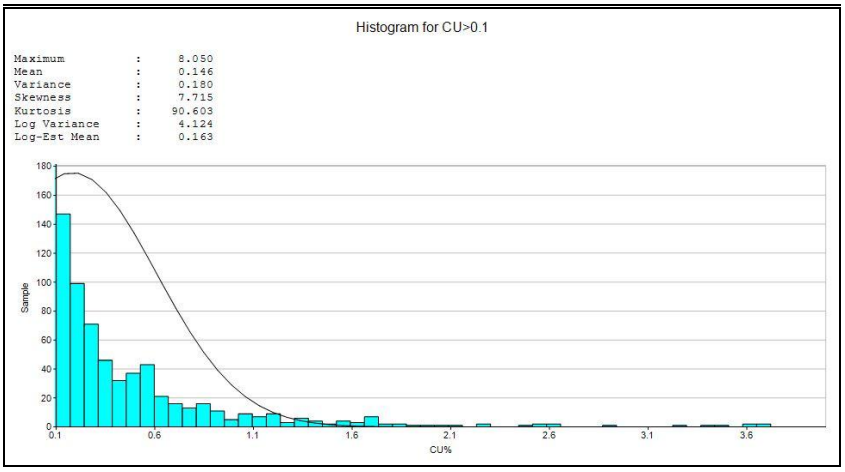
با توجه به رعایت عیار ۰/۱ درصد جهت مشخص شدن مرز باطله و ماده معدنی کم‌عیار، توزیع عیاری برای نمونه‌های بالای این مقدار در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۴ ملاحظه گردید با خارج نمودن نمونه‌های با عیار پایین‌تر از ۰/۱ درصد مقدار میانه نمونه‌ها برابر ۰/۱۴۶ درصد است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳. هیستوگرام تغییرات عیار مس نمونه‌های حاصل از کارهای اکتشافی کانسار تکنار



شکل ۴. توزیع تجمعی عیارهای بالای ۰/۱ درصد نمونه‌های کانسار تکنار

۳-۳- مدل‌سازی ذخیره

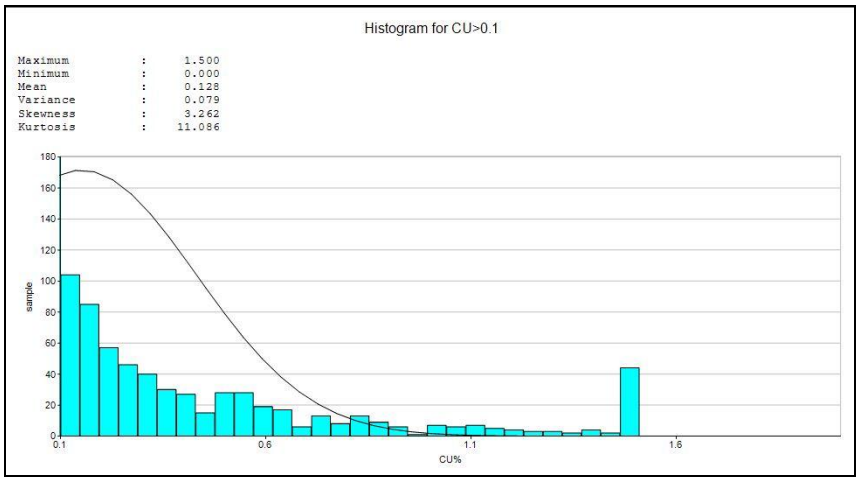
یک مدل زمین‌شناسی از یک سری بلوک‌های منظم یا غیرمنظم تشکیل شده است که به هر کدام خصوصیاتی از قبیل عیار، نوع سنگ و کدهای مشخصاتی دیگر نسبت داده شده است. این بلوک‌ها می‌توانند اشکال مختلفی از قبیل چندضلعی، نامنظم، سطوح محاسبه‌ای و مثلثی داشته باشند. اما متداول‌ترین مدل‌ها، مدل دکارتی است، که معمولاً ارتفاع قائم هر یک از بلوک‌ها را برابر ارتفاع پله‌های معدن می‌گیرند و وجه افقی بلوک‌ها غالباً مربع یا مستطیل شکل است (عطایی،۱۳۹۰). در ذخیره معدنی مورد مطالعه، با توجه به عرض کم کاری و حجم کم تولید مورد نیاز و نیز عرض کم رگه‌های ماده‌معدنی و جهت به حداقل رساندن ترقیق ناشی از عملیات استخراج کانسار مورد مطالعه، ابعاد پله‌ها برابر ۵ متر در نظر گرفته شد. ابعاد بلوک‌ها به‌صورت ضریبی از ارتفاع پله برابر ۱/۲۵ متر در جهت X و Y و ۵ متر در جهت Y که جهت گسترش رگه است، لحاظ شد(هاسترولید،۲۰۱۳).

هم‌چنین ابعاد ریز بلوک‌ها برای پوشش بهتر رگه برابر ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. هم‌چنین به‌منظور پالایش مقادیر خارج از رده عیار ۱/۵درصد مس به‌عنوان حد بالای عیار مس در کانسار تعیین گردید و مقادیر بالاتر از این عیار برابر ۱/۵ درصد در نظر گرفته شد که نتیجه این عمل به‌صورت شکل ۵ نمایش داده شده است. نمودار توزیع عیاری با طول نمونه‌ها رسم گردید که در شکل ۶ قابل مشاهده است.

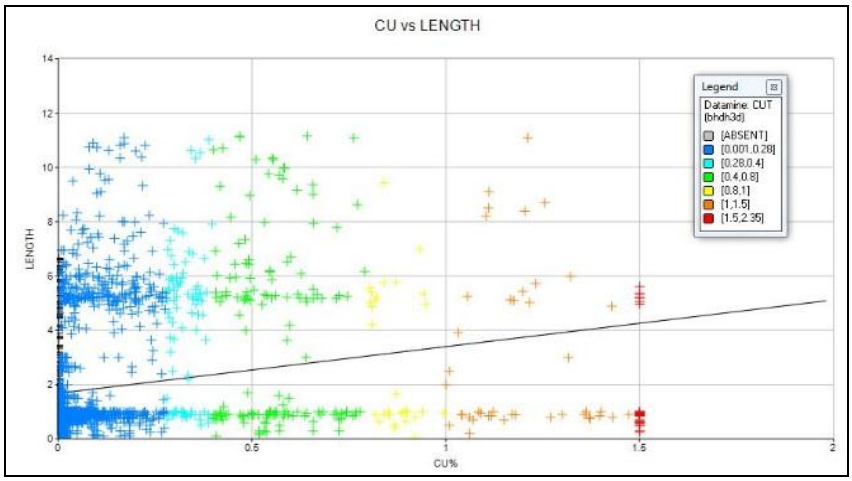
معمولاً در انتخاب طول‌های یکسان‌سازی پایه‌ها، هر چه این طول کوتاه‌تر انتخاب گردد دقت کار بالاتر خواهد بود. در معادن رگه‌ای با توجه به ابعاد کمتر کانسار در بعضی ابعاد، این طول تحت تأثیر ابعاد کانسار بوده و طول‌ها باید به صورتی انتخاب شوند که طول از دست رفته نمونه‌ها به حداقل برسد. در این کانسار با توجه به عرض کم رگه طول یکسان‌سازی برابر ۱ متر در نظر گرفته شد که نتیجه در نمودار هیستوگرام شکل ۷ قابل مشاهده است.

www.SID.ir

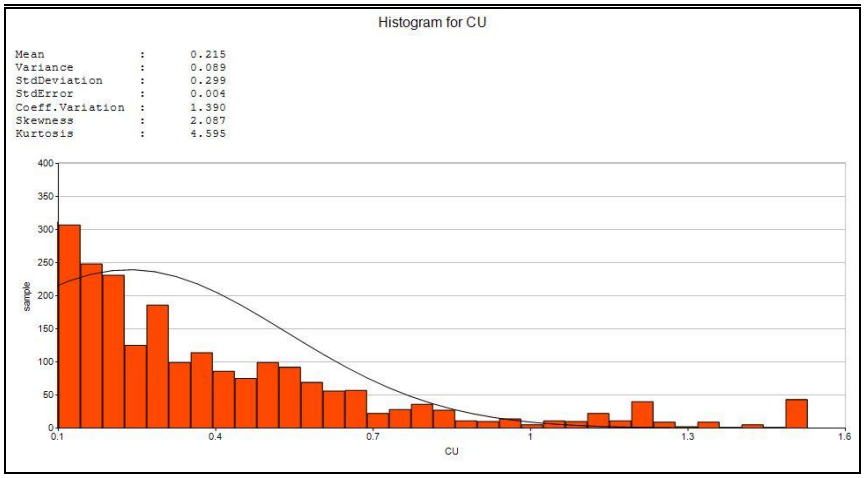
Archive of SID



شکل ۵. نمودار هیستوگرام عیارهای بالای ۰/۱ درصد کانسار تکنار



شکل ۶. توزیع عیاری رگه‌های کانسار تکنار با در نظر گرفتن طول نمونه‌ها



شکل ۷. نمودار هیستوگرام عیارها برای نمونه‌های کامپوزیت شده کانسار تکنار

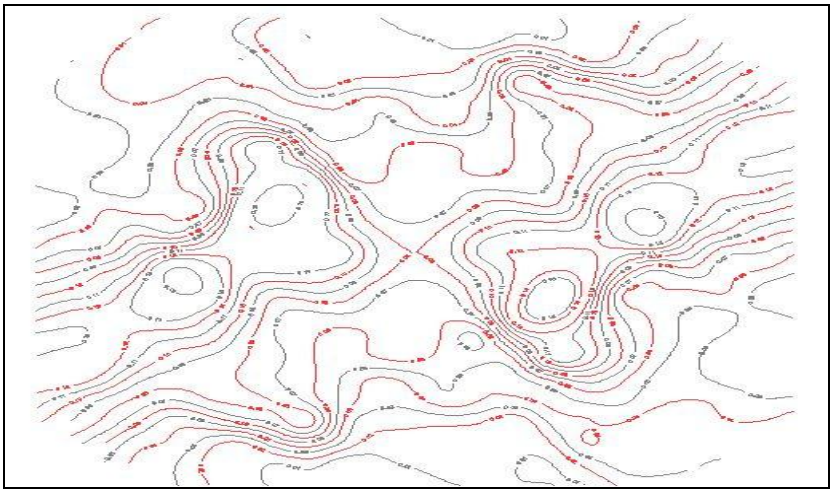
یکی دیگر از عوامل مؤثر در تشخیص روند مدل‌سازی تعیین فضای تخمین و ساختار فضایی متغیرها است. این فضای سه‌بعدی باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که بخش عمده آن را کانسنگ تشکیل دهد. روش‌های گوناگونی جهت تعیین ساختار گسترش کانسار وجـود دارد که مهم‌ترین این روش‌ها در کانسارهای رگه‌ای واریوگرامتری است که به‌وسیله این روش همبستگی فضائی داده‌ها بررسی خواهد شد.

در این کانسار با توجه به امتداد شمالی جنوبی و شیب شرقی رگه اقدام به‌رسم واریوگرام از جهت شمال و با

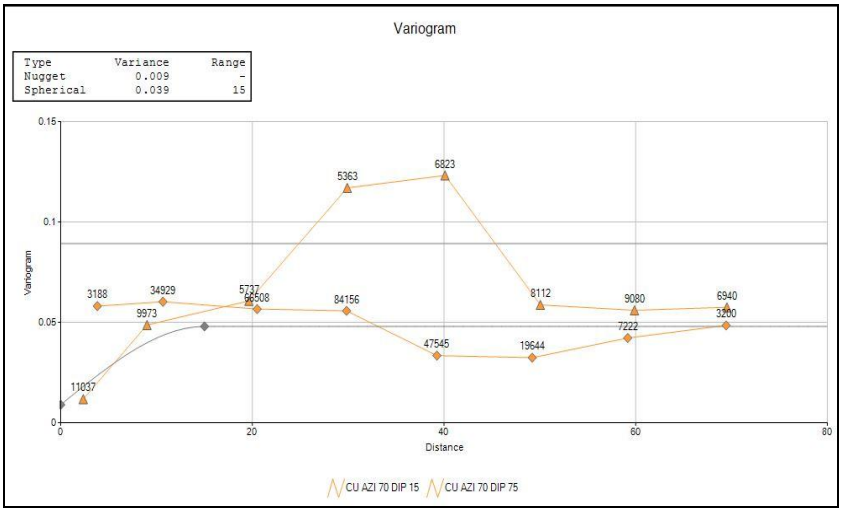
www.SID.ir

Archive of SID

رشد ۱۵ درجه‌ای برای امتداد و رشد ۱۰ درجه‌ای زوایا در شیب گردید (شکل ۸). لذا مناسب‌ترین واریوگرام انتخاب شده برای امتداد ۷۰ درجه از شمال و زاویه ۷۵ درجه با پارامترهای جدول ۶ است که در شکل ۹ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۸. منحنی میزان واریوگرام‌های مدل کانسار تکنار



شکل ۹. واریوگرام ایجاد شده برای امتداد ۷۰ و شیب ۷۵ درجه کانسار تکنار

جدول ۶. مؤلفه‌های واریوگرامتری برای بخش جنوبی کانسار تکنار

بخش	آزیموت (درجه)	شیب (درجه)	اثر قطعه‌ای	دامنه تأثیر (متر)	واریانس
جنوبی	۷۰	۷۵	۰/۰۰۹	۱۵	۰/۰۳۹

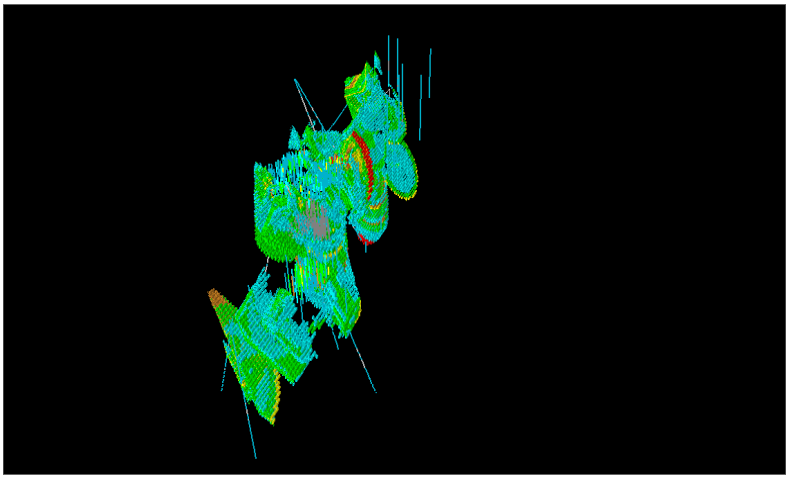
در کانسارهای رگه‌ای با توجه به محدودیت در یک یا دو بعد لازم است که حجم جستجو با توجه به ابعاد گسترش کانسار محدود شود. علت این امر عدم شرکت نمونه‌های دارای اهمیت کمتر در عملیات تخمین است. اتفاقی که معمولاً در کانسارهای رگه‌ای رخ می‌دهد این است که در حجم جستجوی مشخص شده نمونه‌ای جهت تخمین وجود ندارد بدین منظور از احجام جستجوی دوم و سوم استفاده خواهد شد که دارای ابعاد بزرگ‌تری نسبت حجم جستجوی ابتدائی می‌باشند. پارامترهای حجم جستجوی لحاظ شده برای این کانسار برابر ۲۵ متر در راستای محور X و Y و با توجه به عرض رگه ۰/۵ متر در راستای محور Z ها در نظر گرفته شد.

جهش چرخش محور حجم جستجو برابر ۴۵ درجه در راستای محور Z در نظر گرفته شده که شیب کلی رگه

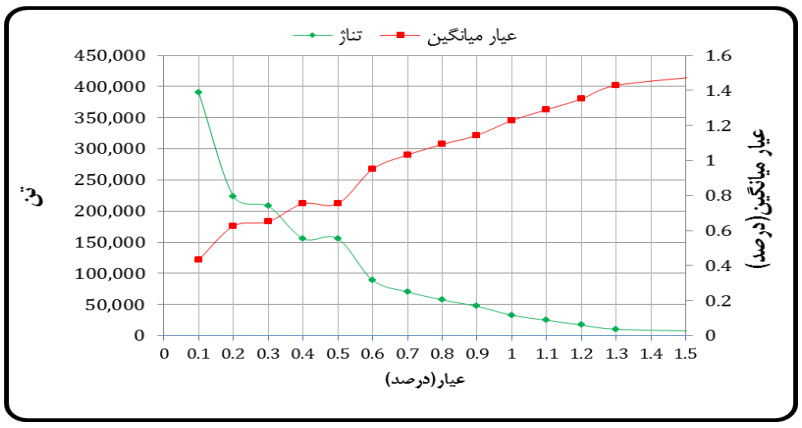
www.SID.ir

Archive of SID

مورد نظر است. برای حجم جستجوی اول حداقل تعداد نمونه برابر ۲ و حداکثر ۴ نمونه تعیین گردید. تعداد نمونه‌ها در هر هشتک نیز حداقل برابر ۱ و حداکثر برابر ۴ در نظر گرفته شد. پس از مدل‌سازی و تخمین عیار، شکل شماره ۱۰ به‌عنوان شکل تخمینی ذخیره و شکل شماره ۱۱ به‌عنوان منحنی تناژ- عیار به دست آمد.



شکل ۱۰. مدل حاصل از عملیات تخمین به روش کریجینگ معمولی کانسار تکنار



شکل ۱۱. نمودار عیار -تناژ مدل حاصل از تخمین کریجینگ معمولی کانسار تکنار

۳-۴- اعتبارسنجی عملیات تخمین مدل بلوکی

بعد از انجام عملیات تخمین عیار مس کل بلوک‌ها، جهت تعیین میزان اعتبار تخمین از دو روش به‌منظور کنترل صحت تخمین انجام شده، که به ترتیب اعتبارسنجی آماری، کنترل تصویری بود، استفاده گردید. در جدول شماره ۷ و شکل ۱۲ بررسی‌های آماری و مقایسه‌ای بر مبنای میانگین، انحراف استاندارد[1] و واریانس داده‌ها نمایش داده شده است.

۴- بحث

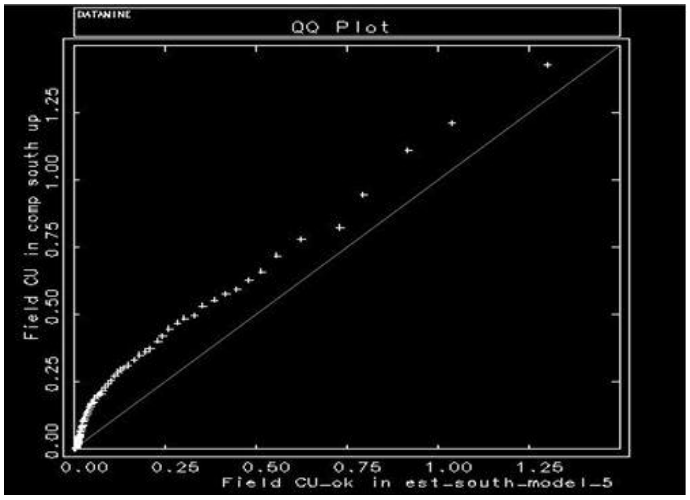
اگرچه تکنیک‌های متعددی برای مدل‌سازی کانسارها ارائه شده‌اند لیکن بعضی از این روش‌ها مناسب کانسارهای رگه‌ای و برخی مناسب ذخایر توده‌ای و یکنواخت و برخی برای کانسارهای پیچیده می‌باشند (حمداد، ۱۳۹۶). در این تحقیق علاوه بر بررسی عوامل مختلف در فرآیند مدل‌سازی، اقدام به مقایسه بین دو روش تخمین عکس مجذور فاصله و کریجینگ معمولی جهت به دست آوردن روش بهینه گردید.

جهت انجام روش کریجینگ ابتدا مقادیر کریجینگ منفی برابر صفر در نظر گرفته شده و فرآیند تخمین انجام گردید. در نهایت مقایسه‌ای بین تناژ و عیار تخمینی به‌وسیله دو روش کریجینگ معمولی (جدول ۸) و عکس مجذور فاصله (جدول ۹) صورت گرفت. مقایسه صورت گرفته بین دو روش تخمین کریجینگ و عکس مجذور فاصله در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

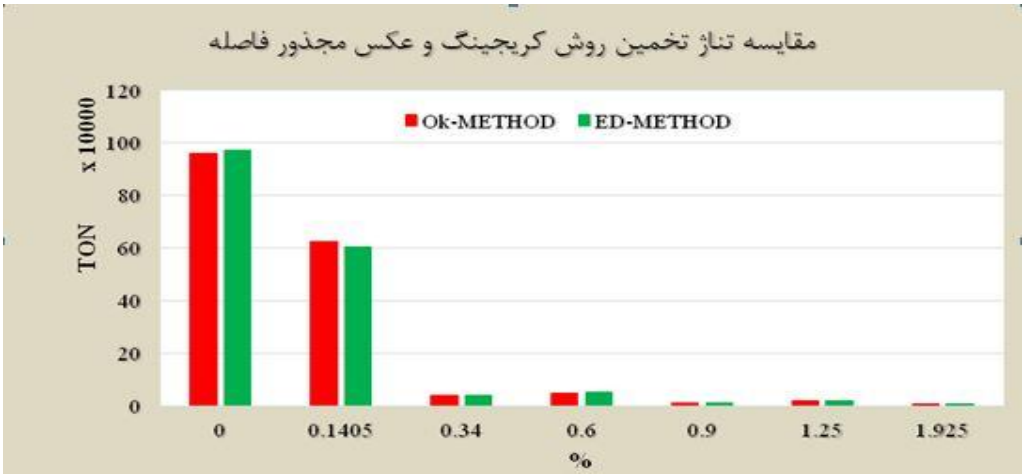
[1] Standard Deviation

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ای گمانه‌های کامپوزیت شده و بلوک‌های تخمین زده شده کانسار تکنار



شکل ۱۳. مقایسه تناژ دو روش تخمین کریجینگ و عکس مجذور فاصله کانسار تکنار

جدول ۷. مؤلفه‌های مورد استفاده جهت صحت‌سنجی کانسار تکنار

مؤلفه	حداقل عیار (٪)	حداکثر عیار (٪)	میانگین عیار	انحراف استاندارد	واریانس
داده‌های اکتشافی	۰	۱/۵	۰/۲۱	۰/۲۹۸۷	۰/۸۹e-01
مدل بلوکی تخمینی	۰	۱/۵	۰/۱۶۸	۰/۲۵۹۶	۰/67e-01

جدول ۸. نتایج تخمین به روش کریجینگ کانسار تکنار

بازه عیاری (٪wt)	تناژ تخمینی	عیار تخمینی (٪wt)	چگالی (g/cm^3)
فاقد عیار	۹۵۹۹۷۲	۰	2/5
0/28-۰	۶۲۵۸۴۵	0/49	2/5
0/4-0/28	۳۸۹۴۲	0/33	2/5
0/8-0/4	۴۹۱۴۸	0/539	2/5
1/0-0/8	۹۳۳۱	0/889	2/5
1/5-1/0	۱۶۴۰۸	1/181	2/5
2/35-1/5	۴۴۲۱	1/5	2/5

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۹. نتایج تخمین به روش عکس مجذور فاصله

بازه عیاری (wt٪)	تناژ تخمینی	عیار تخمینی (wt٪)	چگالی (g/cm^3)
فاقد عیار	۹۷۳۰۷۲	۰	2/5
0/28-۰	۶۰۵۸۴۵	0/046	2/5
0/4-0/28	۹۰۹۴۲	0/324	2/5
0/8-0/4	۵۱۱۴۸	0/557	2/5
1/0-0/8	۱۰۷۳۱	0/905	2/5
1/5-1/0	۱۷۴۰۸	1/17	2/5
2/35-1/5	۴۹۲۱	1/5	2/5

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا با بررسی فرآیند متداول مدل‌سازی نرم‌افزاری، فاکتورهای مختلف مرتبط با هندسه ذخیره که بر فرآیند مدل‌سازی مؤثر می‌باشند بررسی و تأثیر آن‌ها بر نحوه مدل‌سازی نرم‌افزاری با یک مثال عملی تحلیل گردید. وجه تمایز این تحقیق، تحلیل تغییرات لازم در فرآیند مدل‌سازی نرم‌افزاری جهت متناسب‌سازی با هندسه کانسار به‌منظور افزایش دقت تخمین بر مبنای تجارب عملی صورت گرفت و سپس مدل‌سازی ذخایر رگه‌ای به‌عنوان پیچیده‌ترین نوع کانسارها جهت مدل‌سازی ارائه گردید.

تأثیر نوع تخمین‌گر مورد استفاده نیز بحث و مقایسه نتایج بر مبنای داده‌های اکتشافی موجود و نمونه‌های پودری استخراجی ذخیره مس رگه‌ای تکنار تحلیل گردید. پس از فرآیند تخمین این کانسار رگه‌ای، روش کریجینگ در عیارهای بالا مقادیر کمتری را نسبت به روش عکس مجذور فاصله تخمین می‌زند که این امر ناشی از کاهش شدت تأثیر عیارهای بالا در فرآیند تخمین به‌وسیله روش کریجینگ است.

لذا ضمن اعمال تغییرات پیشنهادی در پارامترهای مدل‌سازی، پیشنهاد می‌گردد از روش عکس مجذور فاصله برای کانسارهایی که یکنواختی عیاری بیش‌تری دارند مانند کانسارهای رسوبی و از روش کریجینگ برای کانسارهایی که توزیع عیاری به‌شدت متغیری دارند مانند کانسارهای گرمابی استفاده گردد.

منابع

آصفی، م، نائینی، م و ملائی کوشکی، ف (۱۳۹۳) رویکرد نرم‌افزاری در مدل‌سازی منابع معدنی، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، (چاپ اول)،۳۱۰ص.

اسمیرنوف، و، ای، ترجمه علی‌پور، ک (۱۳۶۷) زمین‌شناسی ذخایر معدنی، مرکز نشر دانشگاهی ۷۷۹ص.

حسنی پاک، ع. ا (۱۳۷۷) زمین‌آمار، انتشارات دانشگاه تهران، (چاپ اول) ۳۱۴ ص.

حسنی‌پاک، ع. ا (۱۳۹۱) تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران (چاپ اول).۱۰۱۰ص.

حمداد فرامرزی، ح (۱۳۹۶) برنامه‌ریزی تولید معادن بر مبنای کاهش ریسک عدم قطعیت عیاری (مطالعه موردی: معدن رگه‌ای مس تکنار)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امام خمینی.

شرکت معدن‌زمین، تجزیه و تحلیل داده‌ها و گزارش‌های اکتشافی معدن بوکسیت تاش شرکت آلومینای ایران (۱۳۹۵)

صیادی، ا، حیدری، م، شبستری ا (۱۳۸۶) آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در تخمین ذخیره معدن سونگون، نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۳، شماره ۳.

عطایی‌پور، م (۱۳۹۱) مبانی مدل‌سازی دوبعدی ذخایر معدنی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (چاپ دوم) ۳۰۸ ص.

عطایی‌پور، م، حسینی، م. ع (۱۳۹۰) عملیات و تحلیل‌های اقتصادی در معادن روباز، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، ۳۳۸ ص.

مهندسین مشاور زرناب (۱۳۹۰) گزارش اکتشاف تفصیلی محدوده تکنار مشتمل بر نقشه زمین‌شناسی- آلتراسیون ۱:۱۰۰۰ و مطالعات ژئوفیزیک به روش مگنتومتری.

Ericson,A.J and Padgett J.T (2011) Geological data Collection. SME mining Engineering Handbook, 3rd edition, new York, pp145-171

Evans, A. M (2000) Ore Geology and Industrial Minerals: An Introduction, 3rd Edition. Wiley-Blackwell.389 P

Hustrulid, William&Kuchta Mark (2013) Opean Pit Mine Planning and Design volume1,3rd edition.CRC Press\ Balkena,1004P

Xu, C. and Dowd, P. A (2003) Optimal construction and visualization of geological structures" *Computers& Geosciences*, Vol. 29, PP. 761–773

www.SID.ir

Archive of SID

Investigation of geometric factors on modelling technics of mineral reserves (Case study: Taknar Copper vein deposit)

H. Hamdad Faramarzi[1] and R. Shakoor Shahabi[2*]

1, 2- Dept., of Mining Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin

*shahabi@eng.ikiu.ac.ir

Recieved: 2018/1/12 Accepted: 2018/3/5

Abstract

The main objective of reserve estimation is prediction of physical properties of mineral deposit based on sample analysis and modelling of dimension, shapes and grade distribution. Numerous factors such as shape, depth, dimensions and grade distribution effect on deposit modelling process. In this research, with evaluation on copper vein deposit, the effects of geometric factors constrains on modelling process evaluated. Also the suitable modelling technics for increasing the accuracy of modeling suggested. Whole of exploration information analyzed based on gathered data from 1457 m conventional core drilling boreholes, 4839 m reverse circulation (RC) boreholes and 2685 m production boreholes. For increasing the accuracy, the modelling performed with creation of topographic DTM, fault models, 3D model of boreholes, and mineralization. Based on assuming the 0.28 percent grade as cutoff grade, the reserve estimation with kriging and Inverse distance performed. The estimated reserve tonnage in kriging and Inverse distance are equal to 118250 and 125150 tone.

Keywords: Reserve estimation, Modelling, Deposit geometry, Ordinary kriging, Vein deposits.

www.SID.ir