



تخمین ذخیره کانسار مسجد داغی با استفاده از روش‌های آمار کلاسیک و زمین آماری

مجتبی ملکی¹، افشین کرم پور²، حسین میرزایی نصیر آباد³، یوسف شرقی⁴

¹ دانشگاه صنعتی سهند، تبریز 75mojtabamaleki@gmail.com

² دانشگاه صنعتی سهند، تبریز a_karampour401@sut.ac.ir

³ دانشگاه صنعتی سهند، تبریز hmirzaei@sut.ac.ir

⁴ دانشگاه صنعتی سهند، تبریز sharghi@sut.ac.ir

چکیده

از روش‌های متفاوتی می‌توان برای تخمین ذخیره یک کانسار استفاده کرد. یکی از مسائل بحث بر انگیز در تخمین ذخیره کانسارهای مختلف پیدا کردن روش مناسب برای این کار است. در این تحقیق چگونگی عملکرد دو روش تخمین در کانسار مس (طلا) مسجد داغی مورد بحث و بررسی قرار گرفت و هدف از این تحقیق چگونگی عملکرد این روش‌ها در تخمین عیار مس این کانسار است. این دو روش عبارتند از: روش تخمین عکس مجذور فاصله که بر پایه آمار کلاسیک پایه گذاری شده و روش کریجینگ معمولی که یک روش زمین آماری است. پس از بررسی‌های آماری و زمین آماری و تعیین محدوده تخمین، مدل بلوکی کانسار با استفاده از پارامترهای تخمین توسط روش کریجینگ معمولی و در ادامه توسط روش عکس مجذور فاصله تخمین زده شد. از نتایج به دست آمده با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل می‌توان عملکرد دو روش را چنین بیان کرد: روش کریجینگ معمولی در پارامترهای اعتبارسنجی میانگین عیارهای تخمین خورده و واریانس مقادیر تخمینی مقادیر مطلوب تری را نسبت به روش عکس مجذور فاصله نتیجه داده است؛ روش عکس مجذور فاصله در پارامترهای ضریب همبستگی و میانگین قدر مطلق اختلاف مقادیر واقعی و تخمین خورده (MAD) نتیجه بهتری را نسبت به روش کریجینگ معمولی ارائه داده است.

واژه‌های کلیدی

کریجینگ، تخمین ذخیره، مسجد داغی

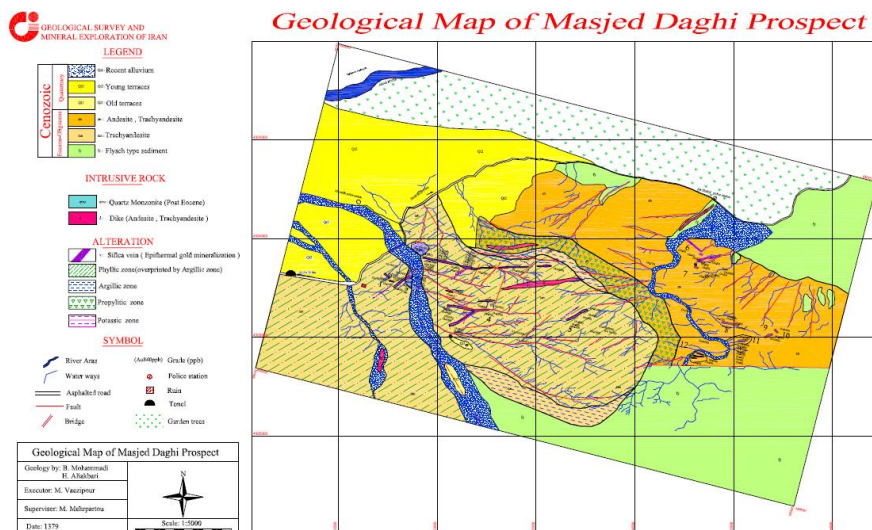


1. مقدمه

از جمله مهمترین بخش‌های تخمین ذخیره یک کانسار یا ماده‌ی معدنی انتخاب روش یا روش‌های مناسب جهت تخمین دقیق‌تر ماده‌ی معدنی می‌باشد. انتخاب روش‌های تخمین مرسوم به شکل، ابعاد، پیچیدگی و نوع نمونه بستگی دارد [1]. در بررسی‌های آمار کلاسیک، نمونه‌ها فاقد اطلاعات موقعیتی در فضا هستند، در نتیجه مقدار اندازه‌گیری شده یک کمیت معین در یک نمونه خاص هیچگونه اطلاعاتی در مورد مقدار همان کمیت در نمونه دیگر به فاصله معین در بر نخواهد داشت [2]. برخلاف روش‌های کلاسیک تخمین ذخیره در روش‌های زمین آماری موقعیت فضایی نمونه‌ها و ارتباط آن‌ها با یکدیگر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از تحقیق پیش رو بررسی نتایج تخمین ذخیره مس کانسار مسجد داغی با استفاده از روش کریجینگ معمولی و روش عکس مجذور فاصله می‌باشد. روش عکس مجذور فاصله از تکنیک ریاضیات ساده برای وزن دهی تأثیر نمونه‌ها در اطراف بلوک‌های در حال تخمین استفاده می‌کند [1]. در این تحقیق از نرم افزار دیتامین¹ استفاده شده است.

2. مطالعه موردی

محدوده مسجد داغی بخش کوچکی از ورقه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جلفا را در چهارگوش تبریز-پلدشت، در زون ساختاری البرز-آذربایجان و در ادامه جنوبی کمربند متالورژیک و ولکانو پاتونیک قفقاز کوچک را شامل می‌شود. مهمترین واحد سنگ شناختی در محدوده مورد مطالعه متشکل از سنگ‌های ولکانیک و ساب ولکانیک به ستن انوالیگوسن جای گرفته است که توسط رسوبات فلیش محصور شده است [3]. در کانسار مسجد داغی کانی سازی مس به صورت رگه‌ای و رگچه‌ای و استوک ورک دیده شده است و با توجه به نتایج حاصل از دگرسانی مقادیر بالای مس در زون استوک ورک می‌باشد [4].



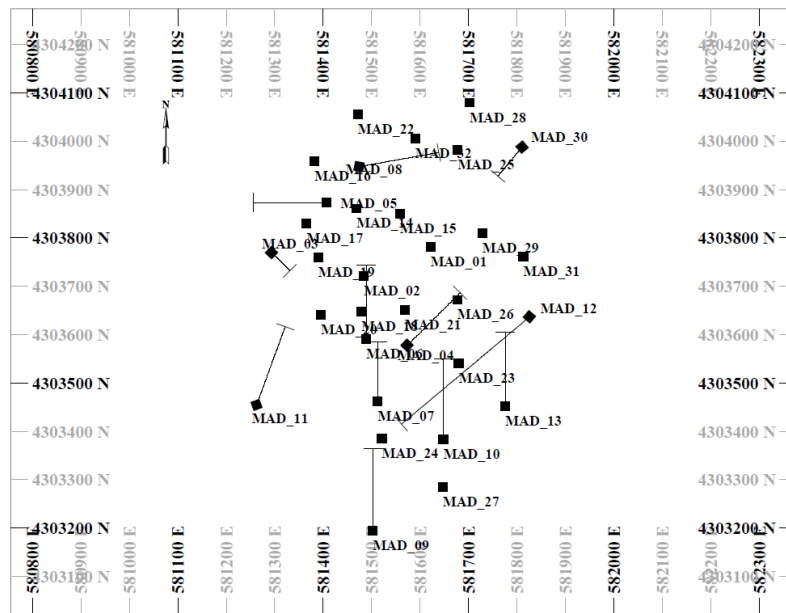
شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ محدوده مسجد داغی (سازمان زمین‌شناسی ۱۳۷۹).

¹ Datamine



3. نتایج

جهت تخمین ذخیره کانسار مسجد داغی تعداد ۳۲ گمانه اکتشافی مورد استفاده قرار گرفت. تعداد ۷۴۴۴ نمونه از گمانه‌ها استخراج شده که اغلب نمونه‌ها دارای فاصله ۲ متری هستند. تصویر نحوه فرارگیری گمانه‌ها در شکل ۲ قابل مشاهده است.

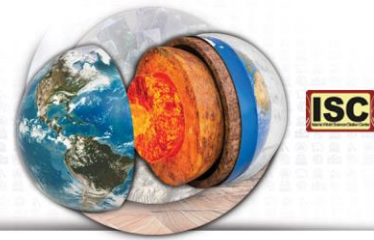


شکل ۲: موقعیت و نحوه فرارگیری گمانه‌های اکتشافی.

کلیدی‌ترین بخش در تخمین ذخیره آنالیز آماری داده‌ها است. توزیع فراوانی داده‌ها یکی از موارد تاثیرگذار در انتخاب روش تخمین می‌باشد. به منظور بررسی داده‌ها تحلیل آماری و زمین آماری انجام شد. در شکل ۳ اطلاعات آماری نمونه‌ها، چگونگی توزیع عیار و فراوانی آن با بهره‌گیری از ابزار هیستوگرام به نمایش گذاشته شده است.

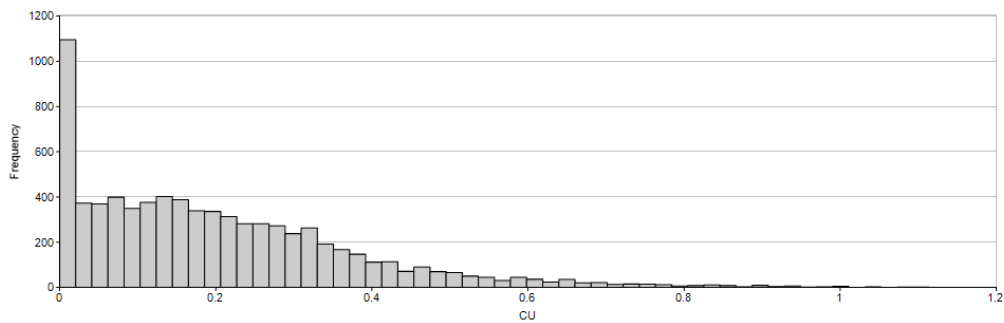
نمونه‌های جمع آوری شده برای ارزیابی ذخیره معدنی می‌توانند از نظر اندازه به طور قابل توجهی متفاوت باشند و بنابراین داده‌ها برای تخمین منابع باید منظم شوند [1]. جهت منظم سازی اندازه (طول) نمونه‌ها عمل ترکیب‌سازی^۲ بر روی داده‌ها صورت گرفت، با بررسی فراوانی طول نمونه‌ها، طول ۲ متر برای ترکیب‌سازی طول داده‌ها در نظر گرفته شد. در شکل ۴ نمودار احتمال داده‌ها پس از کامپوزیت سازی داده‌ها آورده شده است.

در بررسی آماری داده‌ها به مقادیری که اختلاف واضحی با سایر مقادیر دارند مقادیر خارج از ردیف گفته می‌شود، در این تحقیق نمونه‌ها فاقد مقادیر خارج از ردیف هستند.



Histogram for CU

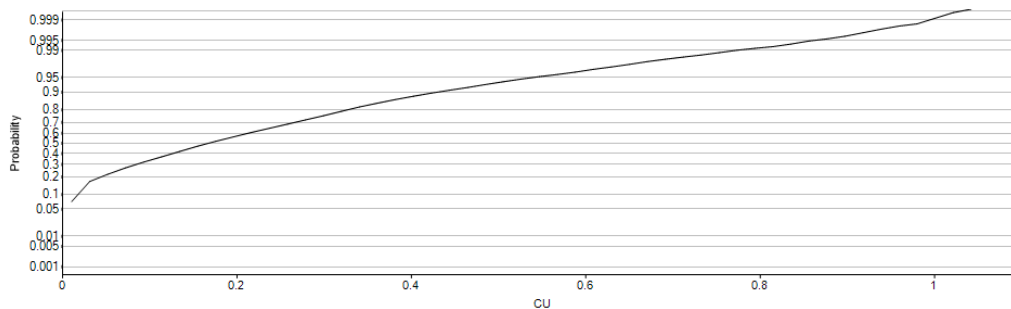
Minimum	:	0.000
Maximum	:	1.105
Total	:	1519.924
Mean	:	0.202
Variance	:	0.030
StdDeviation	:	0.174
Skewness	:	1.246
Kurtosis	:	1.946
25th Percentile	:	0.070
50th Percentile	:	0.167
75th Percentile	:	0.292



شکل ۳: هیستوگرام داده‌های عیاری مس در کانسار مسجد داغی.

Probability Plot for CU

Minimum	:	0.000
Maximum	:	1.105
Total	:	1519.924
Mean	:	0.202
Variance	:	0.030
StdDeviation	:	0.174
Coeff. Variation	:	0.862
Skewness	:	1.246
Kurtosis	:	1.946
25th Percentile	:	0.070
50th Percentile	:	0.167
75th Percentile	:	0.292

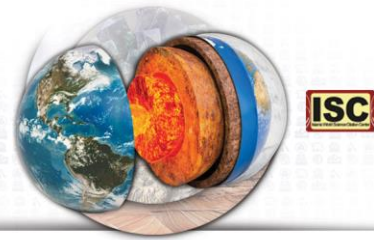


شکل ۴: نمودار احتمال داده‌های کامپوزیت شده.

در استفاده از روش‌های زمین آماری توجه به این نکته که متغییر مورد مطالعه از خود ساختار فضایی نشان می‌دهد یا خیر، بسیار حائز اهمیت است. برای بررسی وجود یا عدم وجود ساختار فضایی داده‌ها با استفاده از ابزار واریوگرام تحلیل‌های زمین آماری بر روی داده صورت گرفت.

با بررسی واریوگرام‌ها در جهت‌های مختلف و توجه به این نکته که واریوگرام در این جهات ساختار مناسبی برای هر دو زون لیچینگ و هیپوژن جهت عمل واریوگرافی از خود نشان نداده‌اند، واریوگرام تجربی غیر جهتی^۳ مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۵ واریوگرام تجربی

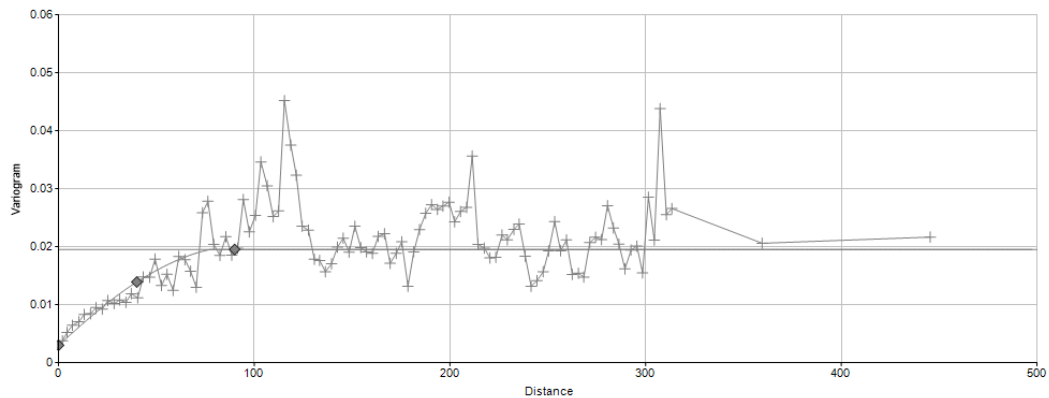
³ omni directional



و مدل برازش شده بر آن در زون لیچینگ و در شکل ۶ واریوگرام تجربی و مدل برازش شده بر آن در زون هیپوزن به همراه پارامترهای مدل برازش شده نشان داده شده است.

Variogram

Type	Variance	Range
Nugget	0.003	-
Spherical	0.001	38.9
Spherical	0.016	90.5

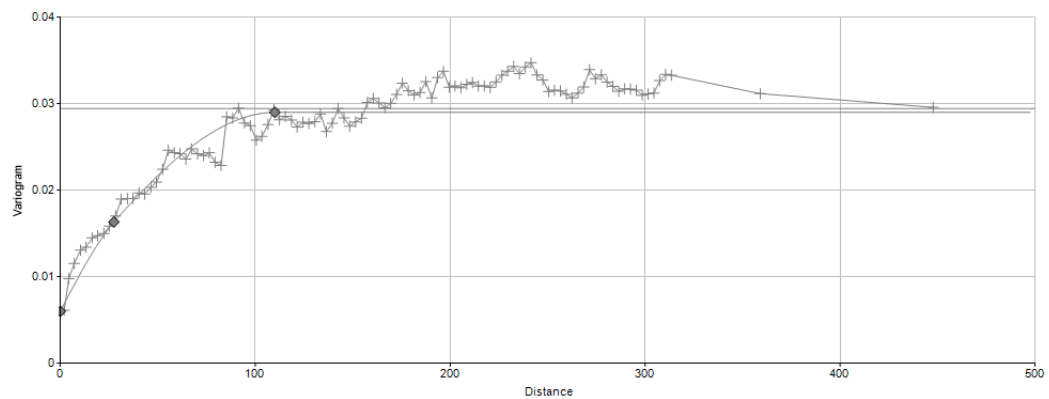


Cu ZONE LEOX AZI - DIP -

شکل ۵: واریوگرام تجربی و مدل برازش شده بر آن در زون لیچینگ.

Variogram

Type	Variance	Range
Nugget	0.006	-
Spherical	0.003	28.5
Spherical	0.020	110.2



Cu ZONE HYP AZI - DIP -

شکل ۶: واریوگرام تجربی و مدل برازش شده بر آن در زون هیپوزن.

با توجه به واریوگرام‌های تجربی و مدل‌های کروی برازش شده بر آن‌ها می‌توان دریافت که واریوگرام زون لیچینگ دارای شعاع تاثیر ۹۰/۵ و اثر قطعه‌ای ۰/۰۰۳ و واریوگرام زون هیپوزن دارای شعاع تاثیر ۱۱۰/۲ و اثر قطعه‌ای ۰/۰۰۶ است.



4. بحث

به تفکیک محدوده‌ای که در آن امکان کانی زائی وجود دارد، از محدوده‌ای که در آن امکان رخ دادن کانی زائی وجود ندارد محدوده تخمین می‌گویند. مشخص نمودن محدوده نهایی تخمین و همچنین محاسبه ذخیره قطعی کانسار مهم‌ترین بخش تخمین ماده‌ی معدنی اکتشاف شده است.

جهت تعیین محدوده تخمین کانسار مسجد داغی توسط داده‌ای اکتشافی ابتدا با تعریف محدوده تخمین، ماده‌ی معدنی از باطله تفکیک شد، سپس زون‌های محدوده تخمین براساس ساختار زمین‌شناسی محدوده و با استفاده از رشته‌ها^۴ و مدل تورسیمی^۵ به صورت: زون لیچینگ^۶ (محدوده سبز رنگ) و زون هیپوژن^۷ (محدوده زرد رنگ) تفکیک شد که نحوه توزیع این دو زون در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: مدل تورسیمی محدوده تخمین.

با تعیین پارامترهای تخمین امکان اعتبارسنجی روش‌ها فراهم شد و در ادامه برای روش‌های مورد استفاده اقدام به اعتبارسنجی متقابل^۸ در بستر نرم افزار دیتاماین گردید. در جدول ۱ و جدول ۲ نتایج اعتبارسنجی با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل آورده شده است.

⁴ Strings

⁵ wireframe

⁶ Leaching

⁷ Hypogene

⁸ Cross validation



جدول ۱: نتایج اعتبارسنجی و تخمین زون لیچینگ کانسار مس مسجد داغی به دو روش کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله.

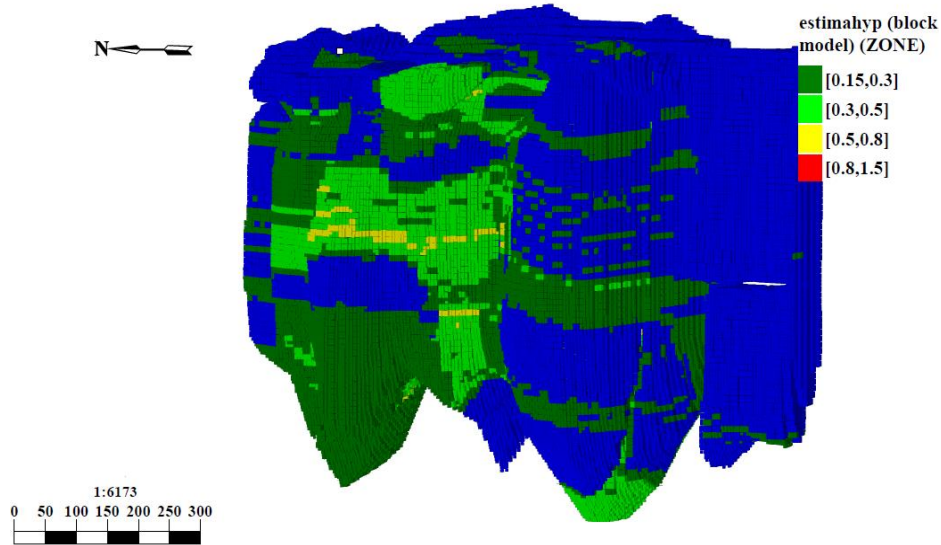
عکس مجذور فاصله	کریجینگ معمولی	
۰/۰۹۳۶	۰/۰۹۳۶	میانگین واقعی عیار نمونه ها
۰/۰۹۳۴	۰/۰۹۳۶	میانگین عیارهای تخمین خورده
۰/۰۳۲	۰/۰۳۴	میانگین قدر مطلق اختلاف مقادیر واقعی و تخمین خورده (MAD)
۰/۰۲۰	۰/۰۲۰	واریانس مقادیر واقعی عیار نمونه‌ها
۰/۰۱۵۷	۰/۰۱۵۰	واریانس مقادیر تخمین خورده نمونه‌ها
۰/۸۶۹	۰/۸۶	ضریب همبستگی بین مقادیر عیارهای واقعی و عیارهای تخمینی نمونه‌ها
۰/۹۸۷	۱/۰۰۲	شیب خط رگرسیون مقادیر واقعی در برابر مقادیر تخمینی

جدول ۲: نتایج اعتبارسنجی و تخمین زون هیپوژن کانسار مس مسجد داغی به دو روش کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله.

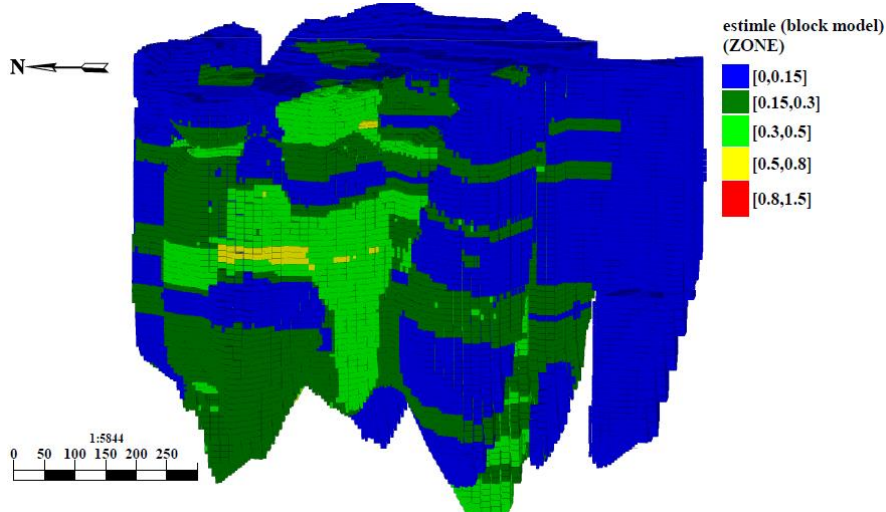
عکس مجذور فاصله	کریجینگ معمولی	
۰/۲۲۵۴	۰/۲۲۵۴	میانگین واقعی عیار نمونه ها
۰/۲۲۵۰	۰/۲۲۵۴	میانگین عیارهای تخمین خورده
۰/۰۵۶	۰/۰۶۴	میانگین قدر مطلق اختلاف مقادیر واقعی و تخمین خورده (MAD)
۰/۰۲۹۹	۰/۰۲۹۹	واریانس مقادیر واقعی عیار نمونه‌ها
۰/۰۲۲۳	۰/۰۲۰	واریانس مقادیر تخمین خورده نمونه‌ها
۰/۸۶۳	۰/۸۳۵	ضریب همبستگی بین مقادیر عیارهای واقعی و عیارهای تخمینی نمونه‌ها
۱/۰۰۰	۱/۰۲	شیب خط رگرسیون مقادیر واقعی در برابر مقادیر تخمینی

در جدول ۱ و جدول ۲ نتایج اعتبارسنجی روش‌های کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله آمده است. از نتایج به دست آمده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: در هر دو زون لیچینگ و هیپوژن؛ روش کریجینگ معمولی میانگین واقعی عیار نمونه‌ها با میانگین عیارهای تخمین خورده یکی است، MAD به دست آمده از روش عکس مجذور فاصله مقدار کمتری را نتیجه داده است، واریانس مقادیر تخمین خورده نمونه‌ها در روش کریجینگ معمولی مقدار کمتری نسبت به روش عکس مجذور فاصله را نشان می‌دهد، روش عکس مجذور فاصله از ضریب همبستگی بالاتری نسبت به روش کریجینگ معمولی برخوردار است و در نهایت هر دو روش تخمین در شیب خط رگرسیون بین مقادیر واقعی و عیار نمونه‌ها مقدار نزدیک به عدد یک را به نمایش گذاشته‌اند.

پس از تعیین محدوده تخمین اقدام به بلوک‌بندی ماده‌ی معدنی با بلوک‌هایی به ابعاد ۱۰ × ۱۵ × ۱۵ در زون‌های لیچینگ و هیپوژن شد، در مجموع محدوده نهایی تخمین شامل تعداد ۱۸۹۶۰۳ بلوک می‌باشد که از این تعداد ۴۴۲۲۴ بلوک و ریز بلوک در زون لیچینگ و تعداد ۱۴۵۴۰۶ بلوک در زون هیپوژن قرار دارد. در ادامه ماده‌ی معدنی در هر دو زون با روش کریجینگ معمولی و سپس روش عکس مجذور فاصله تخمین زده شد. در شکل ۸ و شکل ۹ به ترتیب مدل عیاری بلوک‌های تخمین خورده در روش کریجینگ معمولی و روش عکس مجذور فاصله قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۸: مدل عیاری بلوک‌های تخمین خورده با روش کریجینگ معمولی.



شکل ۹: مدل عیاری بلوک‌های تخمین خورده با روش عکس مجذور فاصله.

با بررسی بصری مدل عیاری بلوک‌های تخمین خورده می‌توان دریافت که هر دو روش مورد استفاده برای تخمین ذخیره کانسار مسجد داغی نتایج نزدیکی را نسبت به یکدیگر دارند.

در جدول ۱ و جدول ۲ مقادیر تناژ، عیارمیانگین برای هر زون به صورت جداگانه آورده شده است.



جدول ۳: مقدار تناژ و عیارمیانگین محاسبه شده با روش‌های تخمین کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله در زون هیپوژن.

عیارمیانگین نمونه‌ها	تناژ (میلیون تن)	عیارمیانگین تخمینی	هیپوژن
۰/۲۲۵۴	۴۵۹/۸۷	۰/۲۱۱۸	کریجینگ معمولی
۰/۲۲۵۴	۴۵۹/۸۷	۰/۲۱۲۳	عکس مجذور فاصله

جدول ۴: مقدار تناژ و عیارمیانگین محاسبه شده با روش‌های تخمین کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله در زون لیچینگ.

عیارمیانگین نمونه‌ها	تناژ (میلیون تن)	عیارمیانگین تخمینی	لیچینگ
۰/۰۹۳۶	۴۵۹/۸۷	۰/۰۹۳۷	کریجینگ معمولی
۰/۰۹۳۶	۴۵۹/۸۷	۰/۱۰۰۹	عکس مجذور فاصله

از جداول ۳ و ۴ می‌توان چنین استنباط می‌شود: در زون هیپوژن میانگین عیار تخمینی در هر دو روش مقداری نزدیک به عیار میانگین نمونه‌ها دارند، با توجه به عیار میانگین نمونه‌ها در زون لیچینگ، عیار میانگین تخمینی به دست آمده از روش کریجینگ معمولی مقدار نسبتاً نزدیکتری را نسبت به عیار میانگین تخمینی با استفاده از روش عکس مجذور فاصله نتیجه می‌دهد.

۵. نتیجه گیری

از جمله مهمترین بخش‌های تخمین ذخیره یک کانسار یا ماده‌ی معدنی انتخاب روش یا روش‌های مناسب جهت تخمین دقیق‌تر ماده‌ی معدنی می‌باشد. در این تحقیق به تخمین ذخیره مس کانسار مسجد داغی با استفاده از روش کریجینگ معمولی که یک روش زمین‌آمار است و روش عکس مجذور فاصله که بر مبنای آمار کلاسیک اقدام به تخمین ذخیره می‌کند بر روی کانسار مسجد داغی پرداخته شد.

نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- ✓ در روش کریجینگ معمولی میانگین عیارهای تخمین خورده مقداری برابر با میانگین واقعی عیارها را نتیجه داده است
- ✓ واریانس مقادیر تخمین خورده در روش کریجینگ معمولی از مقدار کمتری نسبت به روش عکس مجذور فاصله برخوردار است
- ✓ ضریب همبستگی بین مقادیر عیارهای واقعی و عیارهای تخمینی نمونه‌ها در روش عکس مجذور فاصله، مقدار بالاتری نسبت به روش کریجینگ معمولی را نشان می‌دهد
- ✓ شیب خط رگرسیون مقادیر واقعی در برابر مقادیر تخمینی برای هر دو روش استفاده شده در این تحقیق عددی نزدیک به عدد یک شده است.
- ✓ در زون لیچینگ عیار میانگین تخمین زده شده حاصل از روش کریجینگ معمولی برابر با ۰/۰۹۳۷ و عیار میانگین تخمین زده شده توسط روش عکس مجذور فاصله برابر با ۰/۱۰۰۹ شده است، با توجه به عیار میانگین واقعی نمونه‌ها که برابر با ۰/۰۹۳۶ می‌باشد، روش کریجینگ معمولی مقدار عددی نزدیک‌تری را نتیجه داده است.
- ✓ عیار میانگین حاصل از روش کریجینگ معمولی و روش عکس مجذور فاصله در زون هیپوژن به ترتیب ۰/۲۱۱۸ و ۰/۲۱۲۳ به دست آمد که هر دو مقدار به یکدیگر و به عیار میانگین نمونه‌ها که عدد ۰/۲۰۲ هست بسیار نزدیک هستند.



منابع

- [1] Kelley, K. D. (2013). Mineral Exploration: Principles and Applications. Economic Geology, 108(6), 1518-1519.
- [2] زمین آمار، دکتر علی اصغر حسنی پاک، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۴.
- [3] گزارش مطالعات زمین شناسی و عملیات اکتشافی محدوده مسجد داغی، سازمان توسعه و نوسازی معدن و صنایع معدنی ایران، شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۸.
- [4] رویا زنوزی، دکتر احمد خاکزاد، دکتر محمود مهرپر تو، ۱۳۸۴. "مطالعه زمین شناسی اقتصادی کانسار مس-طلا در محدوده مسجد داغی".