

به کارگیری مطالعات زمین آماری برای شناسایی آنومالی‌های Au-Cu-Fe-W در دره سه هزار تنکابن

میشم یزدانی^۱ و فیروز علی‌نیا^{۲*}

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۲

چکیده

منطقه سه هزار در جنوب شهرستان تنکابن در استان مازندران واقع شده است که در نزدیکی کمربند طارم - هشتجین قرار دارد، وجود توده گرانیتوئیدی در منطقه می‌تواند از نظر پتانسیل کانی‌زایی دارای اهمیت باشد. تکنیک زمین آماری کریجینگ با استفاده از داده‌های موجود و همبستگی فضایی بین آنها که توسط واریوگرام توصیف می‌شود، برای پیش‌بینی توزیع عیار به کار برده می‌شود. برای مشخص کردن مناطق آنومال از ۵۰ نمونه آبراهه‌ای استفاده شد که به روش ICP-MS تجزیه شدند. ابتدا داده‌ها نرمال شدند و پس از نرمال‌سازی از آنالیز زمین آماری استفاده شد. مطالعات واریوگرافی نشان داد که مدل کروی بهترین مدل برازش داده شده و دامنه وابستگی مکانی برای سه عنصر Au، Cu و Fe تقریباً ۳۵۰ متر و برای W تقریباً ۷۰۰ متر است. در نهایت نقشه‌های تخمین و واریانس تخمین کریجینگ عناصر مورد مطالعه با استفاده از روش زمین آماری کریجینگ نقطه‌ای با مدل کروی در محیط نرم‌افزار GS+ تهیه شد. ارزیابی نتایج با محاسبه مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و محاسبه میانگین خطا (MAE) نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل واریوگرام است. با بررسی نقشه‌های تخمین کریجینگ و واریانس تخمین کریجینگ، مناطق آنومال برای عناصر Au، Cu، Fe و W در منطقه مورد مطالعه معرفی شدند. با توجه به همبستگی مکانی عناصر این نتیجه به دست می‌آید که این توده می‌تواند با ذخایر آهن - طلا - مس مرتبط باشد.

کلیدواژه‌ها: گرانیتوئید، زمین‌آمار، واریوگرافی، کریجینگ، مدل کروی.

***نویسنده مسئول:** فیروز علی‌نیا

E-mail: aliniaf@aut.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

منطقه سه هزار در جنوب شهرستان تنکابن در استان مازندران بین عرض جغرافیایی ۲۷° ۳۶' ۳۵" شمالی و طول جغرافیایی ۴۵° ۵۰' ۵۵" شرقی واقع است. مهم‌ترین توده نفوذی منطقه مربوط به توده گرانیتی منطقه سه هزار است. درون توده نفوذی در مجاورت سازندهای کربناته نیز رگه و رگچه‌های سیلیسی و اکسید آهن و اکسیدهای مس وجود دارد.

در این منطقه تاکنون مطالعات زیادی صورت نگرفته است. از جمله مطالعاتی که انجام شد عبارتند از: پی‌جویی و بررسی لیتوژئوشیمیایی و ژئوشیمیایی آبراهه‌ای توسط شرکت مهندسی مشاور معدن کاو (۱۳۷۷)، اکتشافات فلزات پایه و عناصر همراه در جنوب چالوس و تنکابن توسط شرکت مهندسی مشاور کاوشگران در سال ۱۳۸۸ و ۱۳۹۰ (هاشم‌پور، ۱۳۹۰)، اکتشاف نیمه‌تفصیلی در منطقه آلود دره سه هزار تنکابن توسط شرکت مهندسی مشاور کاوشگران (۱۳۹۳)، مطالعات و بررسی لیتوژئوشیمیایی و ژئوشیمیایی آبراهه‌ای محدوده گرانیت دره سه هزار تنکابن در پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد (رضوانی منطری، ۱۳۹۳؛ قربانی سمسوری، ۱۳۹۳). همچنین در کارهای قبلی صورت گرفته آنومالی شدید آهن از نوع مگنتیت شناسایی شد.

روش زمین‌آمار با استفاده از تئوری آماری همبستگی مکانی، برای پیش‌بینی متغیر در مکان‌هایی به کار گرفته می‌شود که نمونه‌برداری صورت نگرفته و ارزیابی آن غیردقیق است (Goovaerts, 1999). در زمین‌آمار می‌توان بین مقادیر یک کمیت در جامعه نمونه‌ها و فاصله و جهت قرار گرفتن نمونه‌ها نسبت به یکدیگر ارتباط برقرار کرد. بنابراین در این روش ابتدا به بررسی وجود یا عدم وجود ساختار مکانی بین داده‌ها پرداخته می‌شود (Nijmeijer et al., 2001; Meli'i et al., 2013; Njandjock Nouck et al., 2013).

تخمین زمین آماری شامل دو مرحله است: مرحله اول شناخت و مدل‌سازی ساختار مکانی متغیر ناحیه‌ای بوده که به وسیله آنالیز واریوگرام قابل بررسی است و مرحله دوم تخمین متغیر مورد نظر به وسیله توابع زمین آماری از جمله کریجینگ است که مقادیر متغیرها را با استفاده از داده‌های موجود همان متغیر تخمین می‌زند (Hassani pak, 1998).

روش‌های زمین آماری می‌توانند ابزارهای مفید، قابل اعتماد و مؤثری برای افزایش

تعداد نقاط اندازه‌گیری در مکان‌های نمونه‌برداری نشده ارائه دهند و تجزیه و تحلیل واریوگرام برای بررسی رابطه ساختاری است (Rakhmatullaev et al., 2010; Uyan and Cay, 2013). درون‌یابی کریجینگ به عنوان درون‌یابی بهینه به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Nikroo et al., 2010; Rabah et al., 2011; Choi et al., 2012; Parsa et al., 2017; Triki et al., 2013).

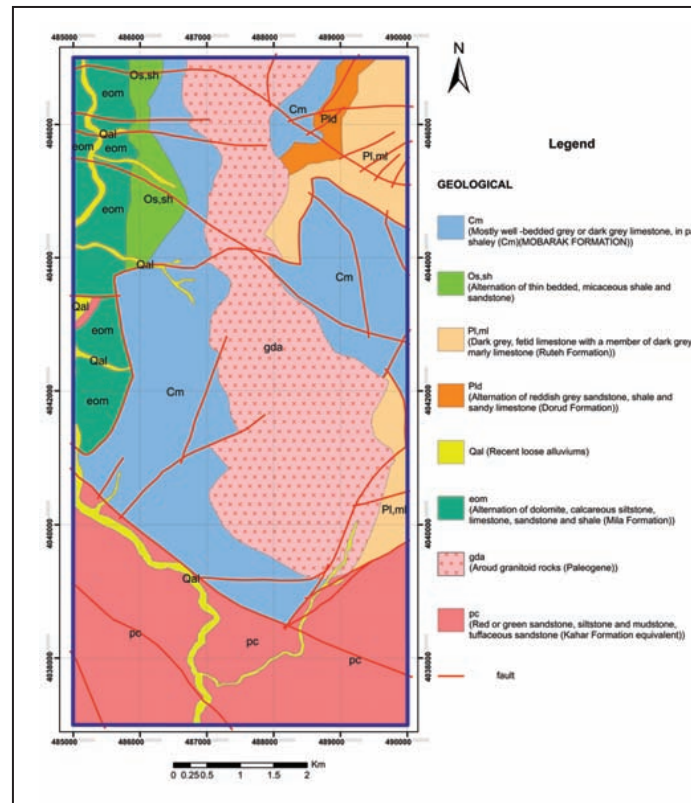
هدف از این مطالعه، شناسایی مناطق پتانسیل بالا و ارتباط آنها با کانی‌زایی با استفاده از روش زمین‌آمار بر پایه داده‌های به دست آمده از برداشت رسوبات آبراهه‌ای در منطقه سه هزار و با استفاده از نرم‌افزارهای EXCEL، Arc GIS و SPSS، GS+، Matlab است.

۲- زمین‌شناسی عمومی منطقه

مجموعه زمین‌شناختی در اطراف محدوده دارای رخنمون عمدتاً دربرگیرنده واحدهای سنگی پالئوزوئیک تا سنوزوئیک است. قدیمی‌ترین سنگ رخنمون یافته در این ناحیه هم‌ارز سازندهای کهر و لالون بوده که بیانگر نهشته‌های محیط حاشیه قاره است و پس از آن مجموعه آتشفشانی به سن سیلورین نشان‌دهنده مراحل شکست و بازشدگی کامل پلتفرم اولیه است. حضور رسوبات کربناته کربنیفر و کربناته آواری پرمین و تریاس نشان‌دهنده شرایط قاره‌ای و محیط دریایی کم‌عمق است. رسوبات کربنات ژوراسیک میانی و بالایی فاقد پیوستگی با رسوبات کرتاسه است و سنگ آتشفشانی روی آنها و سنگ آهک کرتاسه بالا جزو توالی محیط‌های پوسته حاشیه قاره معرفی شده‌اند. پس از آن فعالیت‌های نفوذی تشریری به‌صورت توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی قابل مشاهده است (هاشم‌پور، ۱۳۹۰). شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه است.

۳- روش مطالعه

در این مطالعه از داده‌های مربوط به ۵۰ نمونه رسوبات آبراهه‌ای دره سه هزار تنکابن استفاده شد که در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه ICP-MS تجزیه و عناصر Au، Cu، W، Fe بررسی شدند.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه سه‌هزار.

(Coakes and Steed, 2009).

آمار توصیفی داده‌ها به منظور بررسی چگونگی توزیع آنها و دستیابی به خلاصه‌ای از اطلاعات آماری داده‌ها مورد نظر صورت گرفت. توزیع فراوانی داده‌ها به لحاظ تأثیری که روی تخمین به روش‌های زمین‌آمار دارد، دارای اهمیت زیادی است. به منظور انجام تحلیل‌های زمین‌آمار بایستی نمونه‌ها از توزیع نرمال تبعیت کنند.

۴-۱. پیش‌پردازش و نرمال‌سازی داده‌ها

پیش‌پردازش داده‌های ژئوشیمی شامل جایگزینی داده‌های سنسورد و جایگزینی مقادیر خارج از ردیف است. داده‌های سنسورد به داده‌هایی اطلاق می‌شود که به صورت مقادیر کمتر و یا بیشتر از حد حساسیت دستگاهی (< و >) گزارش شده‌اند. این داده‌ها با توجه به مقادیر بسیار زیاد و یا بسیار کم عناصر و با عنایت به حد تشخیص دستگاه گزارش می‌شوند. روش‌های جایگزینی ساده شامل جایگزینی نصف و یا ۳/۴ حد حساسیت برای مقادیر کوچک‌تر از (<) و ۴/۳ حد حساسیت برای مقادیر بزرگ‌تر از (>) حد حساسیت دستگاهی است (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). در این مقاله ۳/۴ حد تشخیص دستگاهی جهت جایگزینی داده‌های سنسورد لحاظ شد.

مقادیر خارج از ردیف به مقادیری اطلاق می‌شوند که بنا به دلایلی به گونه‌ای چشمگیر، خارج از جامعه اصلی قرار گرفته و خود را جدا از بقیه نمونه‌ها قرار داده‌اند. روش‌های مختلفی برای شناسایی مقادیر خارج از ردیف وجود دارد از آن جمله می‌توان به نمودار جعبه‌ای، نمودار Q-Q Plot، روش محاسباتی $\bar{X} + s.g$ و X_{\geq} نمودار دورفل اشاره کرد (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). در این تحقیق مقادیر خارج از ردیف با دو روش نمودار جعبه‌ای عناصر و نمودار Q-Q-Plot آنها، مشخص و سپس با نمودار دورفل در سطح اعتماد ۹۵٪ جانشین شدند. برای استفاده از روش دورفل ابتدا کد این روش در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی و سپس از آن برای داده‌های فوق استفاده شد و مقادیر خارج از ردیف کاهش یافتند. نمودارهای جعبه‌ای و Q-Q-Plot عناصر قبل از جایگزینی مقادیر خارج از ردیف در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

در ابتدا پارامترهای آماری توسط نرم‌افزار SPSS 22 محاسبه شدند. لیکن با توجه به این موضوع که مهم‌ترین مبحث در تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی جدایش آنومالی از زمینه و نشان دادن مناطق پتانسیل بالا است و نمی‌توان تنها با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و روش‌های سنتی مناطق آنومال را با دقت بالا مشخص کرد، از این رو برای مشخص کردن مناطق پتانسیل بالا از روش زمین‌آمار استفاده شده است.

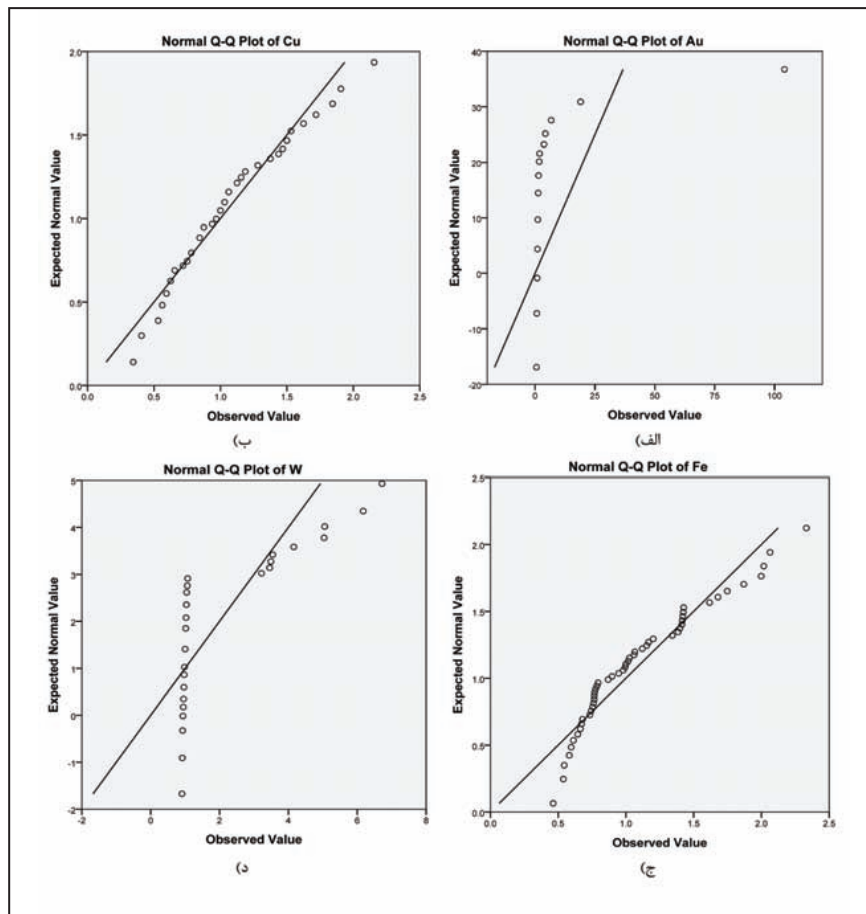
۳-۱. تجزیه و تحلیل زمین‌آمار

بر خلاف روش‌های آماری کلاسیک، روش‌های زمین‌آمار ضمن در نظر گرفتن موقعیت مکانی نقاط و ارتباط بین آنها از کارایی بیشتری برای تجزیه و تحلیل توزیع فلزات سنگین برخوردار هستند. این روش‌ها قادر به مدل‌سازی مناسب زمانی و مکانی جهت توصیف متغیر ناحیه‌ای، با در نظر گرفتن مؤلفه‌های تغییرپذیری ساختاری و تصادفی هستند. اساس این روش‌ها تخمین مقدار نامعلوم متغیر مکانی Z به عنوان یک عدد تصادفی با یک توزیع احتمالاتی مشخص در نقطه‌ای دلخواه از منطقه مورد مطالعه است. در زمین‌آمار، تجزیه و تحلیل ساختار تغییرات مکانی متغیرها با استفاده از واریوگرام صورت می‌گیرد. واریوگرام، تغییرات فاصله‌ای یا ساختار تغییرپذیری یک متغیر خاص را نشان می‌دهد و از ابزارهای اساسی زمین‌آمار جهت بررسی تغییرات مکانی خصوصیات خاک است. محاسبه واریوگرام به صورت معادله ۱ خواهد بود (مدنی، ۱۳۷۳؛ Dengiz et al., 2015; Marko et al., 2014).

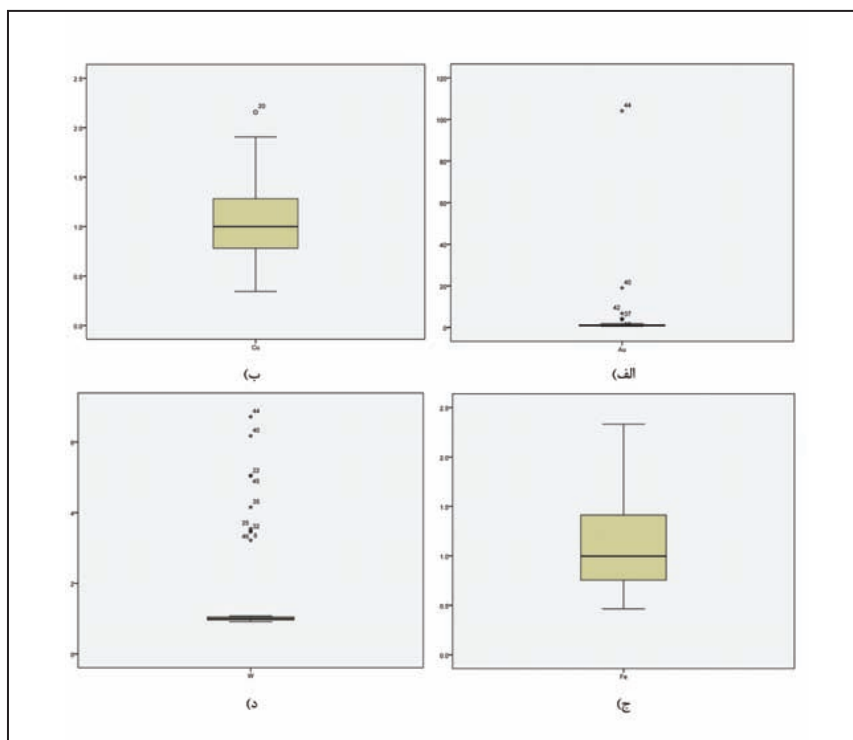
$$\gamma_i(h) = \frac{1}{\sqrt{N(h)}} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

که در آن، $\gamma_i(h)$ نیم‌واریوگرام، $N(h)$ تعداد زوج نمونه‌هایی که به فاصله h از هم جدا می‌شوند، $Z(x_i)$ نقطه Z در موقعیت x و $Z(x_i + h)$ موقعیت نقطه z در فاصله h است.

آنالیز همبستگی مکانی بر اساس ساختار واریوگرام‌ها صورت می‌گیرد که وجود همبستگی مکانی را در بین متغیرها تعیین می‌کند. واریوگرام‌ها برای تعیین درجه همبستگی و دامنه همبستگی مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر واریوگرام می‌تواند با سه پارامتر اثر قطعه‌ای، آستانه و دامنه توصیف شود



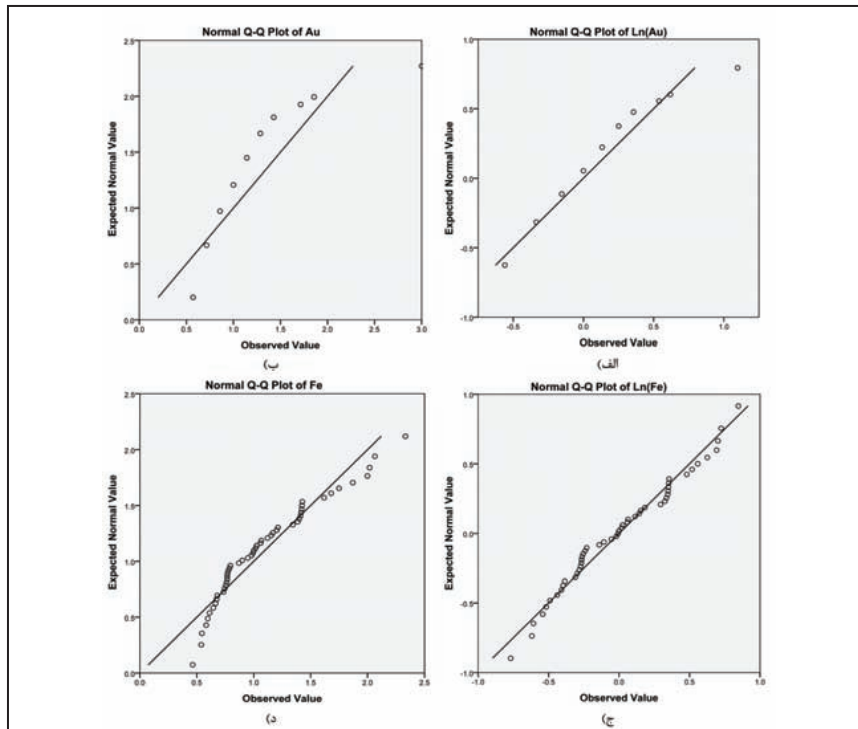
شکل ۲- نمودار Q-Q Plot داده‌های خام عناصر الف (Au؛ ب) Cu؛ ج) Fe؛ د) W.



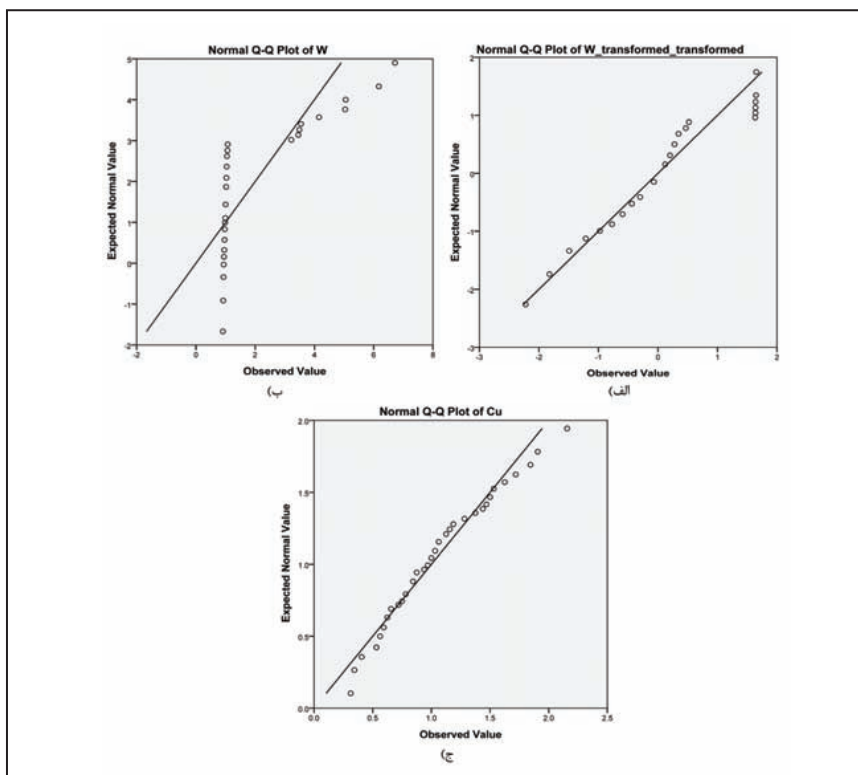
شکل ۳- نمودار جعبه‌ای عناصر الف (Au؛ ب) Cu؛ ج) Fe؛ د) W.

توزیع نرمال نبود که در نهایت با استفاده از ۲ بار پی‌درپی تبدیل کاکس و باکس (Cox and Box) نرمال شد. نمودار فراوانی عناصر قبل از تبدیل و پس از تبدیل در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. همچنین برای بررسی نرمال بودن داده‌ها، نمودارهای P-P Plot و Q-Q Plot و پارامترهای آماری داده‌ها بررسی شدند (شکل‌های ۴ تا ۷؛ جدول‌های ۱ و ۲).

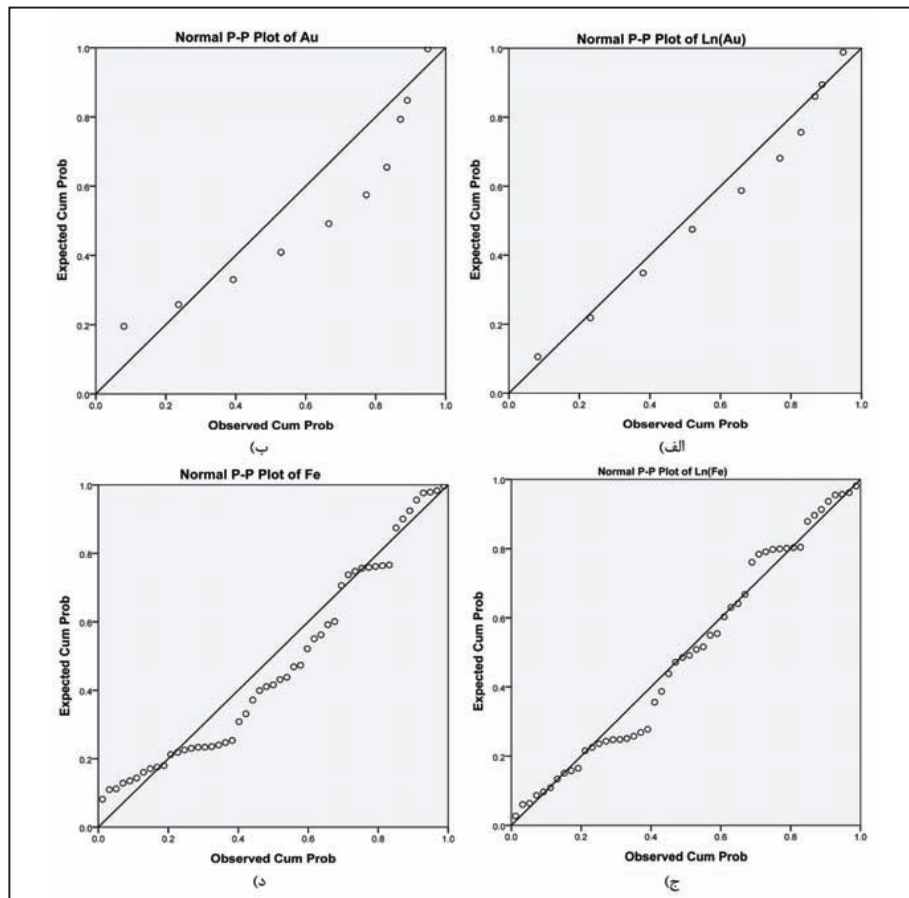
نمودار فراوانی عناصر در محیط نرم‌افزار SPSS رسم و توزیع آنها مشخص شد؛ Cu خود توزیع نرمال نشان داد؛ در حالی که Au، Fe و W از توزیع نرمال پیروی نکردند و باید با یک تبدیل به توزیع نرمال تبدیل شوند که در این مقاله از تبدیل لگاریتمی (Ln) استفاده شد. W با تبدیل لگاریتمی از توزیع نرمال تبعیت نکرد و بنابراین از لگاریتمی سه‌متغیره برای آن استفاده شد؛ ولی همچنان تابع



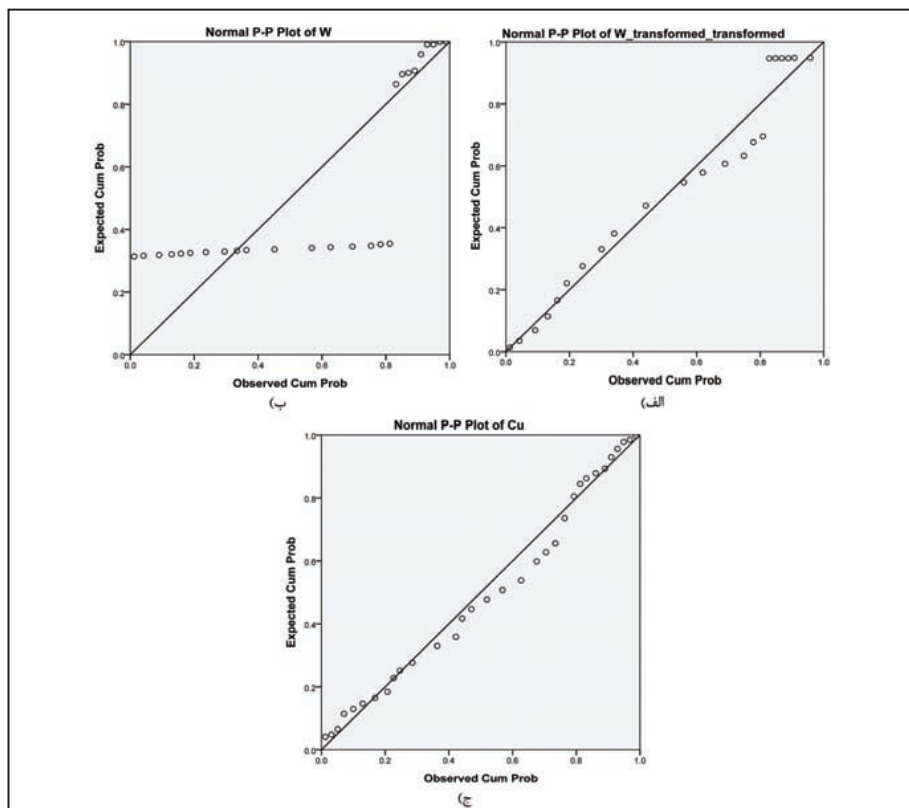
شکل ۴- نمودار Q-Q Plot الف) عنصر Au بعد از تبدیل لگاریتمی؛ ب) عنصر Au قبل از تبدیل لگاریتمی؛ ج) عنصر Fe بعد از تبدیل لگاریتمی؛ د) عنصر Fe قبل از تبدیل لگاریتمی.



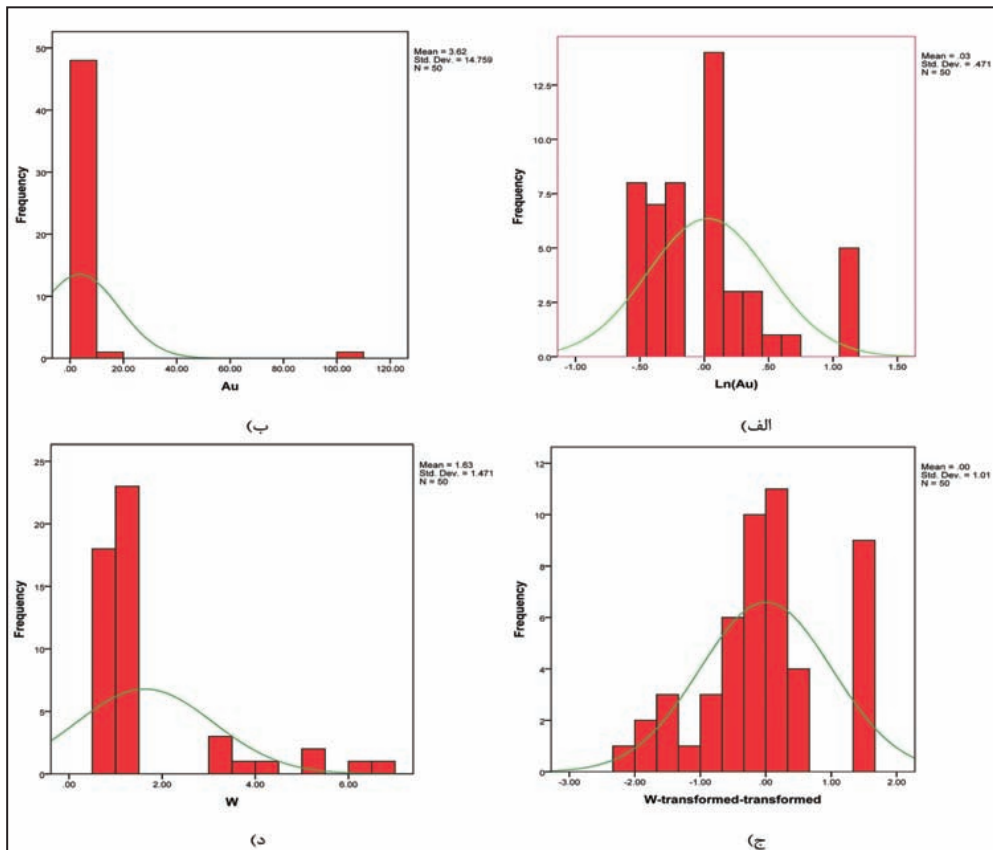
شکل ۵- نمودار Q-Q Plot الف) عنصر W بعد از تبدیل کاکس و باکس؛ ب) عنصر W قبل از تبدیل کاکس و باکس؛ ج) عنصر Cu قبل از تبدیل لگاریتمی.



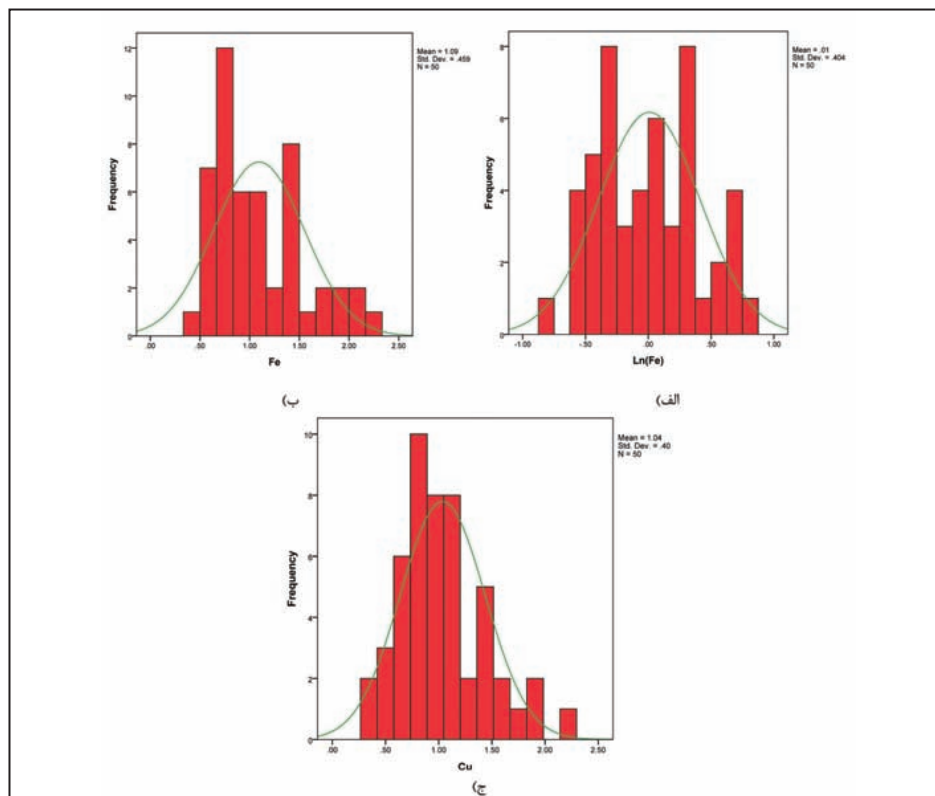
شکل ۶- نمودار Normal P-P Plot (الف) عنصر Au بعد از تبدیل لگاریتمی؛ (ب) عنصر Au قبل از تبدیل لگاریتمی؛ (ج) عنصر Fe بعد از تبدیل لگاریتمی؛ (د) عنصر Fe قبل از تبدیل لگاریتمی.



شکل ۷- نمودار Normal P-P Plot (الف) عنصر W بعد از تبدیل کاکس و باکس؛ (ب) عنصر W قبل از تبدیل کاکس و باکس؛ (ج) عنصر Cu قبل از تبدیل لگاریتمی.



شکل ۸- نمودار فراوانی الف) عنصر Au بعد از تبدیل لگاریتمی؛ ب) عنصر Au قبل از تبدیل لگاریتمی؛ ج) عنصر W بعد از تبدیل کاکس و باکس؛ د) عنصر W قبل از تبدیل کاکس و باکس.



شکل ۹- نمودار فراوانی الف) عنصر Fe بعد از تبدیل لگاریتمی؛ ب) عنصر Fe قبل از تبدیل لگاریتمی؛ ج) عنصر Cu قبل از تبدیل لگاریتمی.

جدول ۱- پارامترهای آماری داده‌های نرمال شده.

| تنگستن دوبار پی‌درپی تبدیل یافته توسط کاکس و باکس | لگاریتم آهن | لگاریتم طلا | مس | |
|---|-------------|-------------|---------|--------------|
| ۱/۰۳۷۵ | ۰/۰۲۹۶ | ۰/۰۰۸۸ | ۰/۰۰۳۶ | میانگین |
| -۰/۰۶۸۲ | -۰/۰۰۳۱ | ۰/۰ | ۱/۰ | میانه |
| -۰/۰۰۷ | -۰/۰۷۷ | -۰/۰۵۶ | ۰/۸۶ | مد |
| ۱/۰۰۹۸۳ | ۰/۴۰۳۹۹ | ۰/۴۷۰۹۲ | ۰/۳۹۹۹۰ | انحراف معیار |
| ۱/۰۲۰ | ۰/۱۶۳ | ۰/۲۲۲ | ۰/۱۶۰ | واریانس |
| ۰/۰۳۵ | ۰/۲۰۹ | ۰/۹۲۹ | ۰/۷۳۳ | چولگی |
| -۰/۲۵۵ | -۰/۸۲۶ | ۰/۴۹۴ | ۰/۲۹۶ | کشیدگی |
| -۲/۲۲ | -۰/۰۷۷ | -۰/۰۵۶ | ۰/۳۴ | مینیمم |
| ۱/۶۵ | ۰/۸۵ | ۱/۱۰ | ۲/۱۶ | ماکزیمم |

جدول ۲- پارامترهای آماری داده‌های خام.

| تنگستن | آهن | مس | طلا | |
|---------|---------|---------|----------|--------------|
| ۱/۶۲۹۵ | ۱/۰۹۴۱ | ۱/۰۳۷۵ | ۳/۶۲۲۹ | میانگین |
| ۱ | ۰/۹۹۶۹ | ۱ | ۱ | میانه |
| ۱ | ۰/۴۶ | ۰/۸۶ | ۰/۵۷ | مد |
| ۱/۴۷۱۰۷ | ۰/۴۵۸۵۵ | ۰/۳۹۹۹۰ | ۱۴/۷۵۹۰۹ | انحراف معیار |
| ۲/۱۶۴ | ۰/۲۱۰ | ۰/۱۶۰ | ۲۱۷/۸۳۱ | واریانس |
| ۲/۲۳۱ | ۰/۸۸۴ | ۰/۷۳۳ | ۶/۷۳۴ | چولگی |
| ۳/۹۹۷ | ۰/۰۵۶ | ۰/۲۹۶ | ۴۶/۴۶۹ | کشیدگی |
| ۰/۹۱ | ۰/۴۶ | ۰/۳۴ | ۰/۵۷ | مینیمم |
| ۶/۷۲ | ۲/۳۳ | ۲/۱۶ | ۱۰۴/۱۴ | ماکزیمم |

در جدول بالاتر از ۰/۰۵ باشد توزیع جامعه از توزیع نرمال تبعیت می‌کند (Coakes and Steed, 2009). نتیجه این آزمون برای داده‌های نرمال شده در جدول ۳ آورده شده است که نشان می‌دهد داده‌ها به خوبی نرمال شدند.

آزمون ناپارامتری کولموگروف-اسمیروف (Kolmogorov-Smirnov) نیز با دقت بالایی به تعیین نرمال بودن جامعه کمک می‌کند. در آزمون ناپارامتری کولموگروف اسمیروف اگر مقدار (Asymp. Sig. (2-tailed) مشخص شده

جدول ۳- نتایج آزمون ناپارامتری کولموگروف-اسمیروف.

| سطح معناداری (Asymp. Sig. (2-tailed) | | آزمون ناپارامتری کولموگروف-اسمیروف یک نمونه‌ای |
|--------------------------------------|---|--|
| ۰/۱۹۳ | لگاریتم عکس | |
| ۰/۳۶۹ | مس | |
| ۰/۴۶۴ | لگاریتم آهن | |
| ۰/۳۰۳ | تنگستن دویارپی در پی تبدیل یافته توسط تاکس و پاکس | |

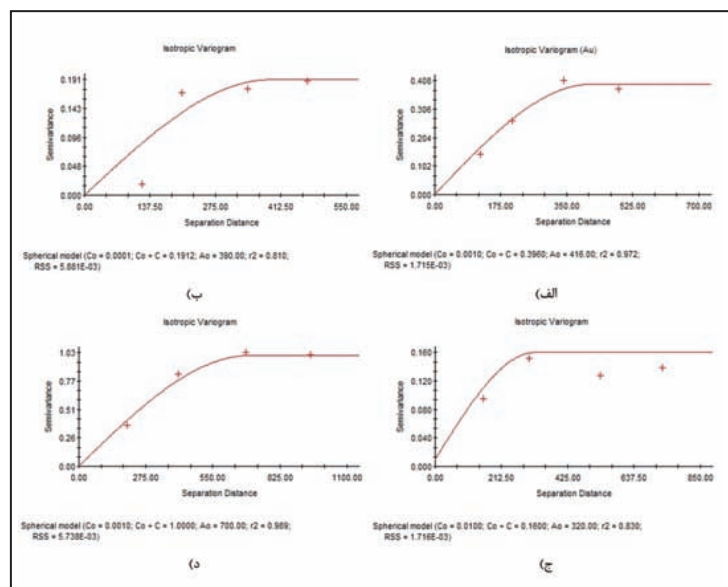
۲-۴. تجزیه و تحلیل زمین آماری

صفر است. واریوگرام بر اساس مقادیر زوج نقاطی ترسیم می‌شود که در یک راستا و یک فاصله مشخص از یکدیگر قرار گرفته‌اند. روش‌های مختلفی برای برآورد متغیرهایی وجود دارد که تغییرات زمانی و مکانی دارند. در این تحقیق از روش کریجینگ نقطه‌ای استفاده شد. کریجینگ تخمین‌گری است که مقادیر یک متغیر را در نقاط نمونه‌برداری نشده به صورت ترکیبی خطی از مقادیر همان متغیر در نقاط اطراف آن در نظر می‌گیرد و برای برآورد نقاط ناشناخته به هر یک از نمونه‌ها، وزنی نسبت می‌دهد. روش کریجینگ بهترین تخمین‌گر نارایب خطی با کمترین مقدار واریانس است (Nshagali et al., 2015). در اینجا تجزیه و تحلیل‌های زمین آماری با استفاده از نرم‌افزار GS+ انجام شد.

واریوگرام متغیرهای مورد مطالعه در شکل ۱۰ نمایش داده شده و پارامترهای آنها در جدول ۴ موجود است. با توجه به این شکل ۱۰ و جدول ۴، ساختار کروی به عنوان بهترین مدل برازش داده شده برای داده‌هاست. ۳ عنصر Cu، Au و Fe تا فاصله‌ای حدود ۳۵۰ متری ساختار وابسته به مکان نشان می‌دهند. طبق نظر (Jiachun et al., 2006) این امر می‌تواند ناشی از یکسان بودن منشأ این عناصر در منطقه مورد مطالعه باشد.

برای تحلیل داده‌ها ابتدا نرمال‌سازی داده‌ها صورت گرفت. اولین گام در استفاده از روش‌های زمین آماری بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌ها توسط آنالیز واریوگرام است. شرط استفاده از این آنالیز، نرمال بودن داده‌هاست. به منظور پیوستگی مکانی یک متغیر به وسیله واریوگرام لازم است تا مجموع مربع تفاضل زوج نقاطی که به فاصله معلوم h از یکدیگر قرار دارند، محاسبه و در مقابل ترسیم شود (Hassani pak, 1998). اجزای یک واریوگرام عبارتند از: ۱) دامنه تأثیر: فاصله‌ای که در آن واریوگرام به حد ثابتی می‌رسد و به حالت خط افقی نزدیک می‌شود. این دامنه محدوده‌ای را مشخص می‌کند که می‌توان از داده‌های موجود در آن برای تخمین مقدار متغیر مجهول استفاده کرد و در خارج از این فاصله دیگر پیوستگی مکانی وجود ندارد و نمونه‌ها به صورت مستقل عمل می‌کنند؛ ۲) حد آستانه: به مقدار ثابتی که واریوگرام در دامنه تأثیر به آن می‌رسد حد آستانه گفته می‌شود. این مقدار برابر واریانس کل نمونه‌هایی است که در محاسبه واریوگرام به کار رفته‌اند؛ ۳) اثر قطعه‌ای (واریانس بدون ساختار): مقدار واریوگرام در مبدأ مختصات یعنی به ازای h=0 اثر قطعه‌ای می‌ماند که جزو تصادفی یا غیر ساختاردار متغیر را نشان می‌دهد و در حالت ایده‌آل باید صفر باشد. اما بیشتر مواقع بزرگ‌تر از

شکل ۱۰- واریوگرام عناصر در منطقه مورد مطالعه الف) Au؛ ب) Cu؛ ج) Fe؛ د) W.



جدول ۴- نتایج برازش مدل کروی در واریوگرام‌ها.

| متغیر | مدل | اثر قطعه‌ای (C ₀) | آستانه (C+C ₀) | دامنه تأثیر (متر) | نسبت بخش ساختاری واریانس به کل واریانس داده‌ها (C/(C+C ₀)) | ضریب همبستگی R ² |
|--------|------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|--|-----------------------------|
| طلا | کروی | ۰/۰۰۱ | ۰/۳۹۶ | ۴۱۶ | ۰/۹۹۷ | ۰/۹۷۲ |
| مس | کروی | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۱۹۱۲ | ۳۹۰ | ۰/۹۹۹ | ۰/۸۱۰ |
| آهن | کروی | ۰/۰۱ | ۰/۱۶ | ۳۲۰ | ۰/۹۳۸ | ۰/۸۳۰ |
| تنگستن | کروی | ۰/۰۰۱ | ۱ | ۷۰۰ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۸۹ |

از معادله ۳ به دست می‌آید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - \hat{z}(x_i)]^2} \quad (3)$$

در این فرمول‌ها N تعداد نمونه، z(x) مقدار نمونه معلوم و $\hat{z}(x)$ مقدار برآورد شده برای نقطه x است. هر چه مقادیر این پارامتر به عدد صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده تخمین بهتر مدل مورد استفاده در ارزیابی مقادیر مجهول پارامتر مورد استفاده است (Webster and Oliver, 2000; Marko et al., 2014).

در این تحقیق مناسب‌ترین الگوی متغیرهای مورد مطالعه با سعی و خطا تعیین شد. معیارهای کنترل اعتبار واریوگرام‌های مورد مطالعه در جدول ۵ خلاصه شده است. مقادیر میانگین خطای مطلق نزدیک به صفر و بیانگر صحت بالای مدل واریوگرام است. همچنین پایین بودن میانگین مجذور خطا نیز بیانگر دقت قابل قبول واریوگرافی است. لذا می‌توان گفت که نتایج کنترل اعتبار واریوگرام بیانگر مناسب بودن پارامترهای مدل‌های برازش داده شده بر واریوگرام‌های تجربی است. شکل ۱۱ هیستوگرام‌های آنالیز باقیمانده‌ها را نشان می‌دهند و همان‌طور که مشخص است آنالیز باقیمانده هر ۴ عنصر نزدیک به صفر است.

نسبت بخش ساختاری واریانس به کل واریانس داده‌ها را با C/(C+CO) نشان می‌دهند که هر اندازه به یک نزدیک‌تر باشد، بهتر و نشان‌دهنده همبستگی قوی‌تر است. با توجه به جدول ۴، مقدار C/(C+CO) عناصر نزدیک به یک به دست آمد که وجود همبستگی مکانی قوی و بسیار خوب را نشان می‌دهد.

ارزیابی صحت: در این بررسی برای ارزیابی صحت واریوگرافی از روش اعتبارسنجی متقابل (Cross Validation) استفاده شده است. در این روش همه داده‌های اولیه، یک به یک و به ترتیب از محاسبات خارج و دوباره با استفاده از مدل واریوگرام و سایر داده‌ها برآورد می‌شوند. سپس از مجموع تفاضل مقادیر اولیه با مقادیر برآورد شده برای ارزیابی صحت واریوگرافی استفاده می‌شود. در نهایت با محاسبه دوآماره میانگین خطا (MAE) و خطای برآورد (RMSE)، درباره اعتبارسنجی مدل واریوگرام قضاوت می‌شود.

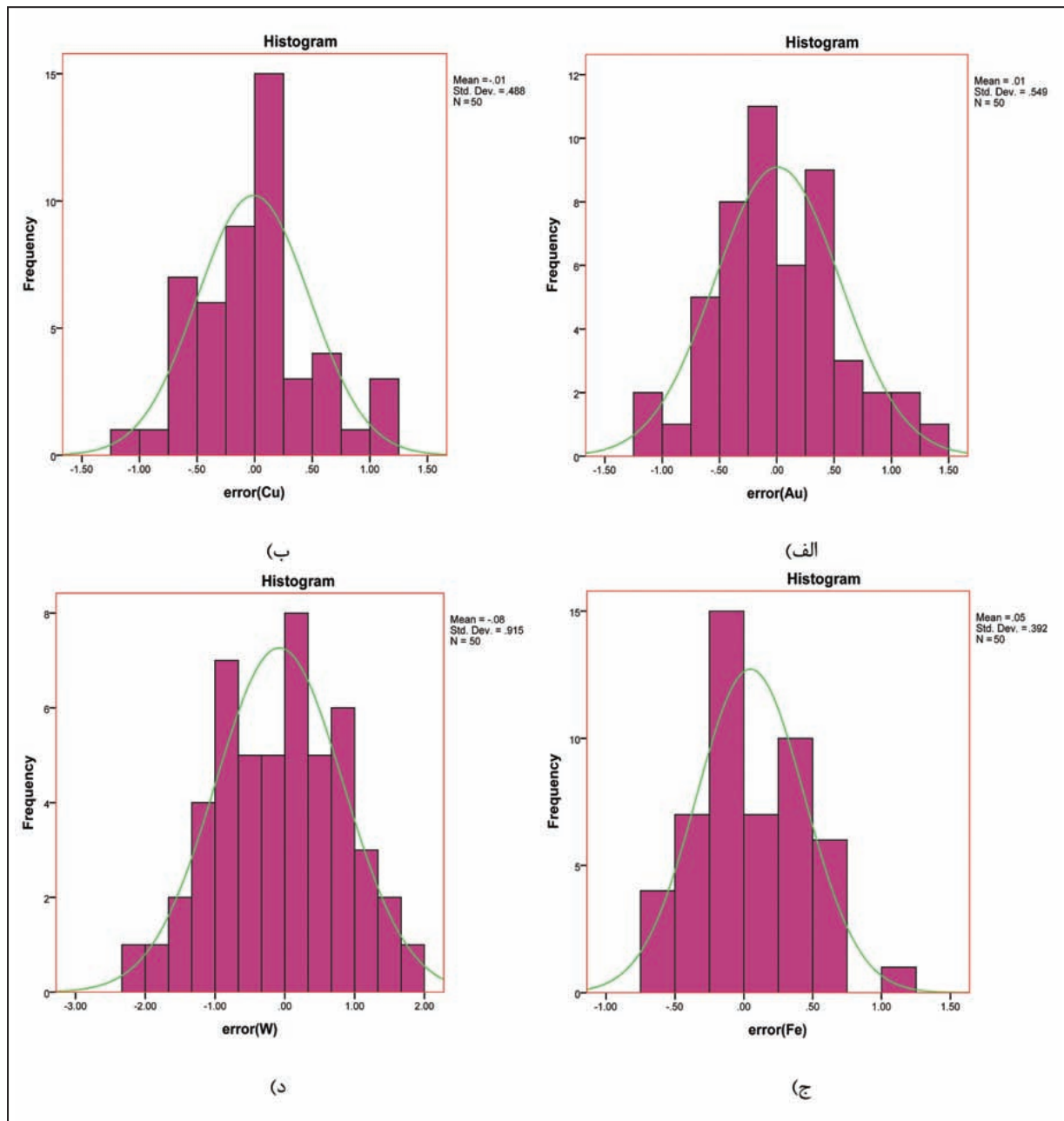
خطای قدر مطلق میانگین (MAE; Mean Absolute Error) از معادله ۲ به دست می‌آید:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z(x_i) - \hat{z}(x_i)| \quad (2)$$

خطای مجذور میانگین استاندارد شده (RMSE; Root Mean Square Standardized)

جدول ۵- پارامترهای کنترل اعتبار واریوگرام‌ها در منطقه مورد مطالعه.

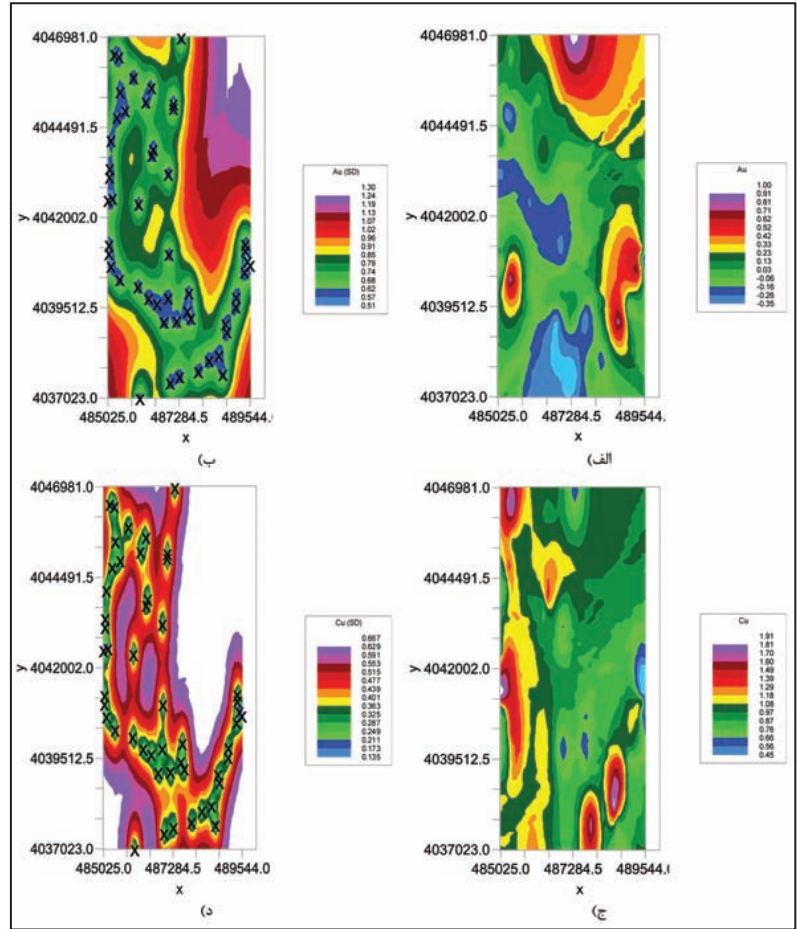
| متغیر | خطای برآورد (RMSE) | میانگین خطا (MAE) |
|--------|--------------------|-------------------|
| طلا | ۰/۵۴۳۳ | ۰/۰۰۶۲ |
| مس | ۰/۲۴۵۴ | ۰/۰۱۳۰ |
| آهن | ۰/۱۷۳۶ | ۰/۰۰۹۱ |
| تنگستن | ۰/۸۹۷۲ | ۰/۰۹۸۷ |



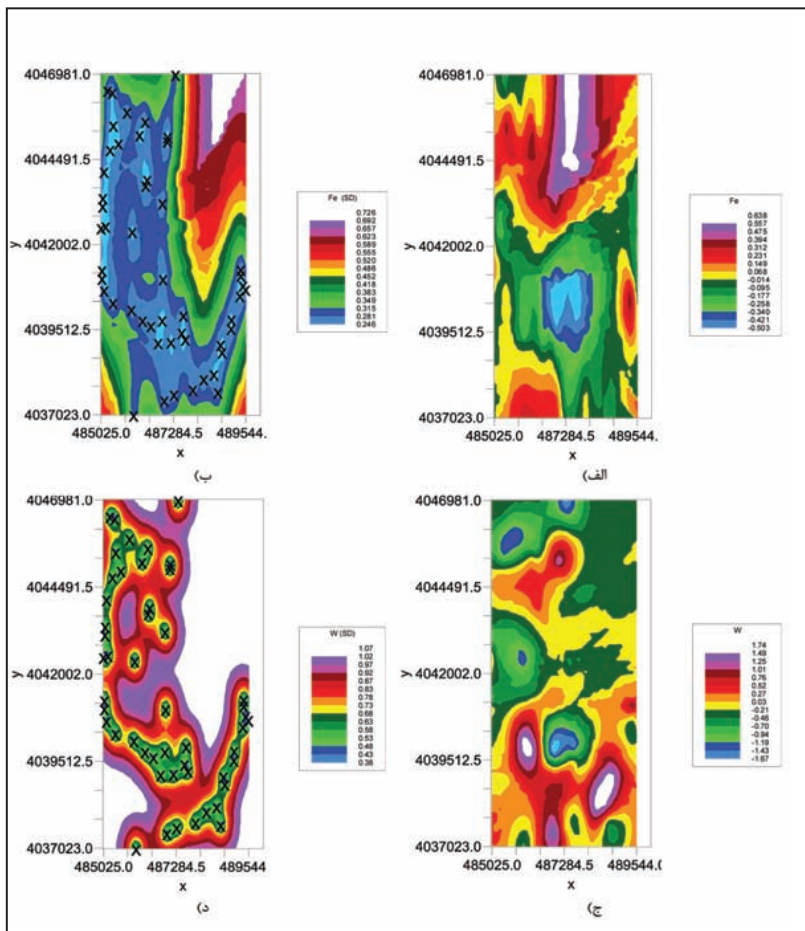
شکل ۱۱- هیستوگرام آنالیز باقیمانده‌های عناصر الف (Au؛ ب) Cu؛ ج) Fe؛ د) W.

که ملاحظه می‌شود، توزیع مکانی تمامی متغیرها پیوسته و وابسته به موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری است. همچنین نقشه‌های واریانس تخمین کریجینگ در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده که با توجه به اشکال فوق در مناطق نمونه‌برداری شده کمترین واریانس تخمین کریجینگ موجود است. در نهایت برای مشاهده نتایج حاصل از آنالیز زمین‌آماري بر روی نقشه زمین‌شناسی، تلفیق نقشه کریجینگ و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS انجام شد (شکل‌های ۱۴ و ۱۵).

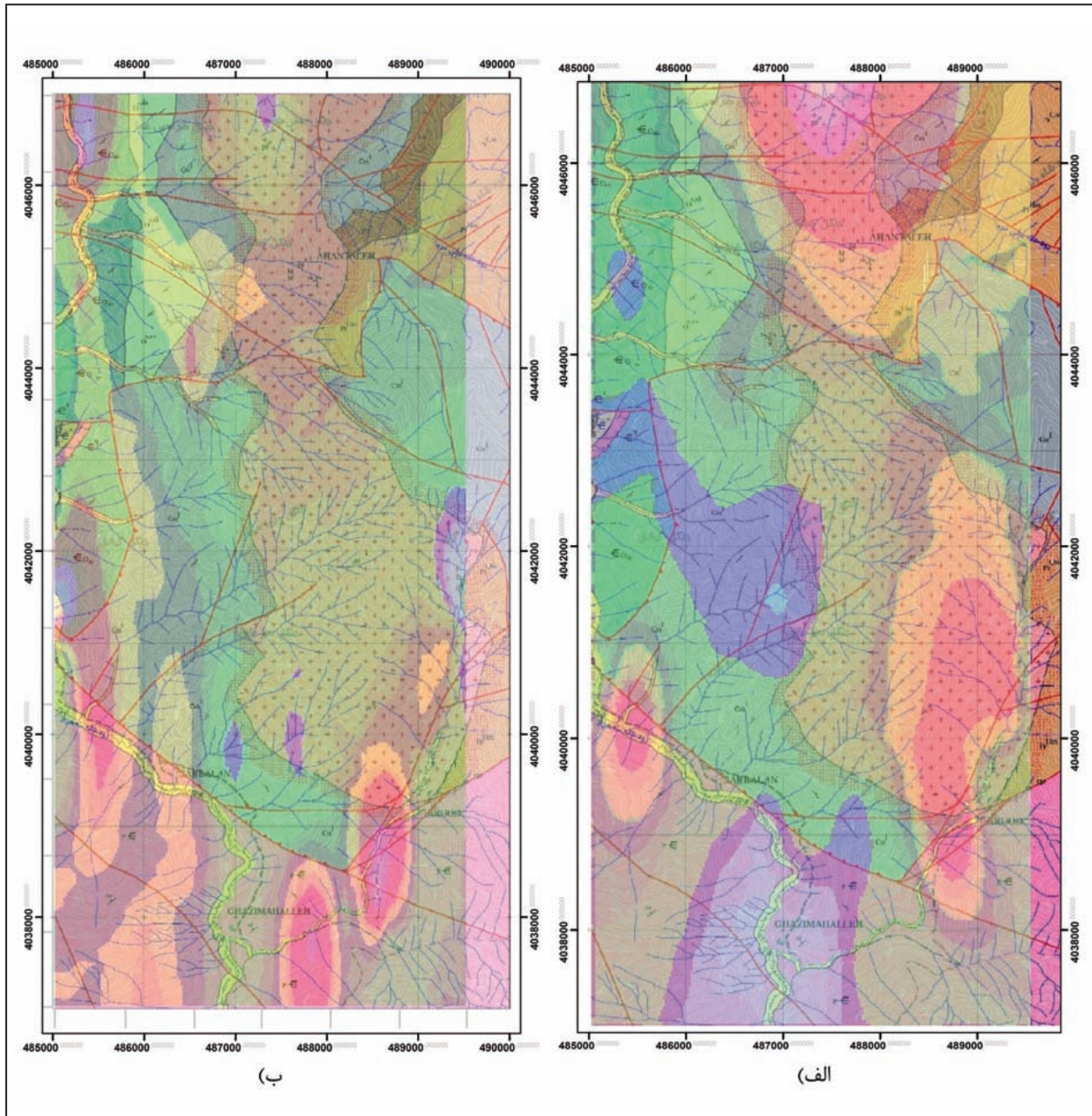
– **تهیه نقشه کریجینگ:** پهنه‌بندی و تهیه نقشه‌های غلظت عناصر سنگین، یکی از مراحل مهم و اولیه در راستای تصمیم‌گیری برای جداسازی محدوده‌های آنومال یا تعیین محدوده‌های مناسب است. از تخمین گر کریجینگ نقطه‌ای بر اساس واریوگرام‌های همسانگرد برای تخمین مقادیر هر یک از عناصر مورد مطالعه در نقاط نمونه‌برداری نشده استفاده شد. پارامترهای کریجینگ بر اساس نتایج حاصل از اعتبارسنجی متقابل بهینه‌سازی شدند. نقشه‌های کریجینگ با نرم‌افزار GS+ رسم شد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). همان‌گونه



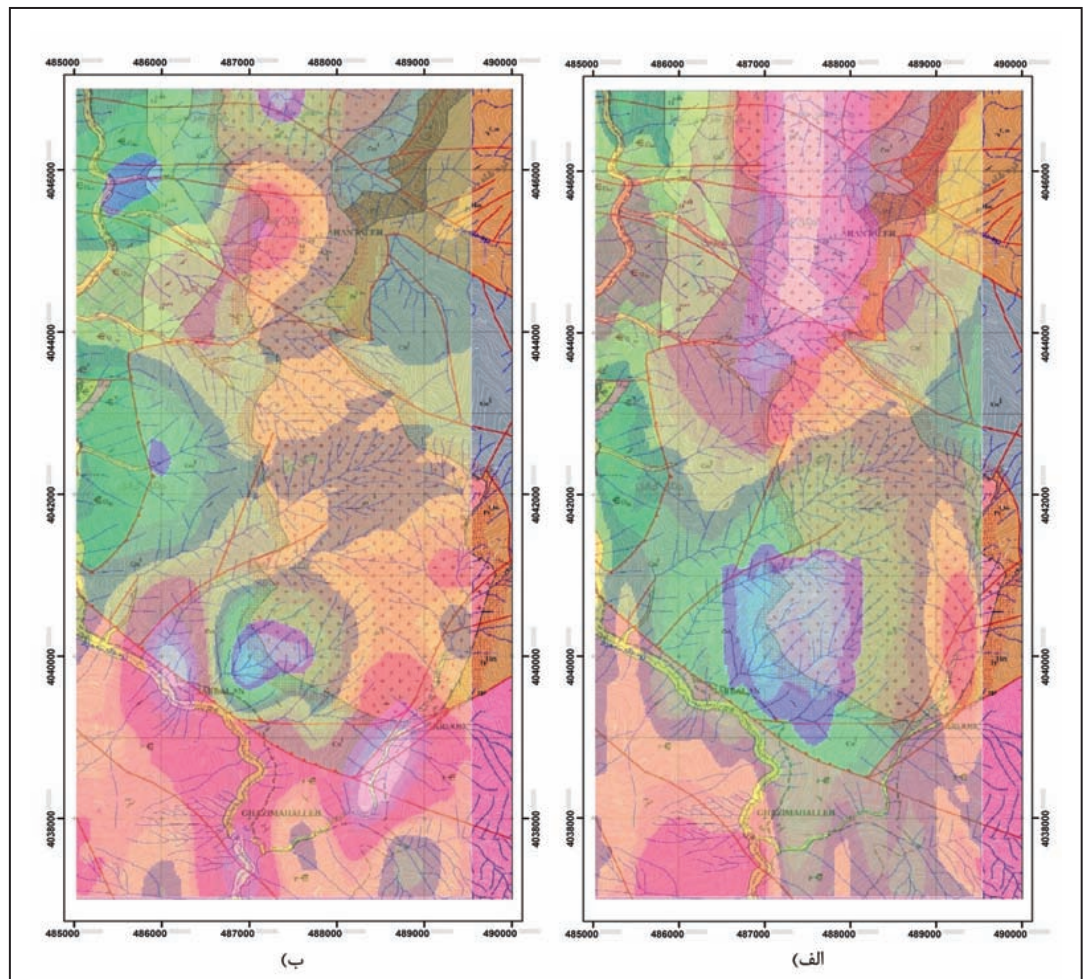
شکل ۱۲- نقشه‌های کریجینگ و واریانس تخمین کریجینگ عناصر Au و Cu در منطقه مورد مطالعه الف) کریجینگ Au؛ ب) واریانس تخمین کریجینگ Au؛ ج) کریجینگ Cu؛ د) واریانس تخمین کریجینگ Cu.



شکل ۱۳- نقشه‌های کریجینگ و واریانس تخمین کریجینگ عناصر Fe و W در منطقه مورد مطالعه الف) کریجینگ Fe؛ ب) واریانس تخمین کریجینگ Fe؛ ج) کریجینگ W؛ د) واریانس تخمین کریجینگ W.



شکل ۱۴- تلفیق نقشه کریجینگ و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه الف) Au؛ ب) Cu.



شکل ۱۵- تلفیق نقشه کریجینگ و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه الف (Fe؛ ب) W.

۵- نتیجه‌گیری

از تجزیه و تحلیل زمین‌آماري، نقشه‌های کریجینگ، واریانس تخمین کریجینگ و تلفیق نقشه‌های کریجینگ با نقشه زمین‌شناسی نتایج زیر به دست می‌آید:

- منطقه شمالی روستای آرود و همچنین شمال منطقه مورد مطالعه از لحاظ طلا تقریباً آنومال هستند و آنومالی طلا بیشتر در واحد سنگی gd^a است؛ یعنی در توده نفوذی منطقه مورد مطالعه یا حاشیه توده نفوذی و خصوصاً در کنتاکت توده نفوذی با سازندهای مبارک و کهر.

- مس در قسمت غربی و همچنین در بین آرود و قاضی محله آنومال است که در غرب روستای آرود در کنتاکت توده نفوذی با سازندهای کهر و مبارک آنومالی شدید نشان داده است.

- تنگستن در بخش جنوبی منطقه و بین روستای آرود و قاضی محله آنومالی نشان داده است؛ که در کنتاکت سازند کهر و مبارک در دو منطقه جنوب غرب روستای آرود و منطقه سربالان، آنومالی شدید دارد.

- آهن در قسمت شمالی و شمال غربی منطقه مورد مطالعه آنومال است و بیشتر در واحد سنگی gd^a شدت دارد؛ همچنین در کنتاکت توده نفوذی با سازندهای مبارک، روته و درود در ناحیه آهن تله آنومالی شدید دارد.

با توجه به همبستگی مکانی عناصر و بررسی‌های انجام شده این نتیجه به دست می‌آید که این توده می‌تواند با ذخایر آهن-طلا-مس مرتبط باشد و پتانسیل تشکیل کانسار را دارد. این نتایج با مطالعات ژئوشیمی، پتروگرافی، پتروژنز و کانه‌زایی که در توده نفوذی منطقه انجام شد مطابقت دارد. مطالعات ژئوشیمی، پتروگرافی، پتروژنز و کانه‌زایی انجام شده در این منطقه نشان دادند که گرانیتهای این منطقه از نوع I و تلفیقی از S هستند که مطالعات زمین‌آماري نیز تقریباً آن را تأیید می‌کند.

مطالعات زمین‌آماري برای عناصر مورد نظر نشان داد که عناصر Au ، Fe ، Cu همبستگی مکانی در حدود ۳۵۰ متر دارند که این امر می‌تواند ناشی از یکسان بودن منشأ این عناصر در منطقه مورد مطالعه باشد. ولی عنصر W همبستگی در حدود ۷۰۰ متر دارد که با سایر عناصر تفاوت چشمگیری نشان می‌دهد. واریوگرام‌های تجربی با استفاده از مدل کروی مدل‌سازی شدند. نقشه‌های واریانس تخمین کریجینگ در مورد عناصر مورد مطالعه نشان داد که در حاشیه منطقه و فواصل بین نمونه‌ها بیشترین واریانس تخمین وجود دارد.

از بررسی نقشه‌های کریجینگ نتایج زیر حاصل شد:

- طلا در قسمت شمال و شرق منطقه مورد مطالعه آنومالی نشان داده است و با توجه به نقشه واریانس تخمین کریجینگ طلا دریافت می‌شود که در این مناطق واریانس تخمین پایین بوده که نشان‌دهنده تأیید این آنومالی‌هاست.

- آهن تقریباً در کل منطقه شمالی آنومال است؛ ولی با توجه به نقشه واریانس تخمین کریجینگ آهن مشخص می‌شود که واریانس تخمین در قسمت شمال شرقی زیاد و در قسمت شمالی و شمال غربی پایین است. در نتیجه آهن در قسمت شمال و شمال غربی منطقه مورد مطالعه آنومال است.

- مس در قسمت غربی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه آنومالی نشان داده و همچنین نقشه واریانس تخمین کریجینگ مس این دو قسمت را تأیید کرده و واریانس تخمین را پایین نشان داده است.

- تنگستن تقریباً در کل قسمت جنوبی آنومال است؛ ولی نقشه واریانس تخمین کریجینگ تقریباً بخشی از قسمت مرکزی منطقه آنومال (یعنی بخش مرکزی قسمت جنوبی) را تأیید کرده و واریانس تخمین را پایین نشان داده است.

کتابنگاری

- حسینی پاک، ع. ا. و شرف‌الدین م.، ۱۳۸۰- تحلیل داده‌های اکتشافی (جدایش زمینه از اتومالی، آمار و احتمال مهندسی، تخمین ذخیره)، انتشارات دانشگاه تهران.
- رضوانی منطری، م.، ۱۳۹۳- مطالعات و بررسی لیتوژئوشیمیایی و ژئوشیمیایی آبراهه‌های محدوده گرانتیت بالای دره سه هزار- تنکابن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- شرکت مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۹۳- اکتشاف نیمه تفصیلی در منطقه آلود دره سه هزار تنکابن.
- شرکت مهندسین مشاور معدن کاو، ۱۳۷۷- پی‌جویی و بررسی لیتوژئوشیمیایی و ژئوشیمیایی آبراهه‌های منطقه آلود.
- قربانی سمسوری، م.، ۱۳۹۳- مطالعات و بررسی لیتوژئوشیمیایی و ژئوشیمیایی آبراهه‌های محدوده گرانتیت پایین دره سه هزار- تنکابن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- مدنی، ح.، ۱۳۷۳- مبانی زمین‌آمار، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر واحد تفرش، ۶۵۹ ص.
- هاشم‌پور، م.، ۱۳۹۰- پی‌جویی و پتانسیل‌یابی مواد معدنی منطقه آلود دره سه هزار تنکابن.

References

- Choi, W., Galasinski, U., Cho, S. and Hwang, C., 2012- A spatiotemporal analysis of groundwater level changes in relation to urban growth and groundwater recharge potential for Waukesha County, Wisconsin. *Geographical Analysis*, 44, 219–234.
- Coakes, S. J. and Steed, L., 2009- SPSS: Analysis without anguish using SPSS version 14.0 for Windows John Wiley and Sons, Inc.
- Dengiz, O., Özyazici, M. A. and Salam, M., 2015- Multi-criteria assessment and geostatistical approach for determination of rice growing suitability sites in Gokirmak catchment. *Paddy and water environment*, 13(1), 1.
- Goovaerts, P., 1999- Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89(1), 1-45.
- Hassani pak, A. A.. 1998- Geostatistics. Tehran University Press, 314p.
- Jiachun, S., Hazian, W., Jianming, X., Jinjun, W., Xingmei, L., Haiping, Z. and Shunlan, J. 2006- Spatial distribution of heavy metals in soil: A case study of Changing, China. *Environmental Geology*, 10:245-264.
- Marko, K., Al-Amri, N. S. and Elfeki, A. M., 2014- Geostatistical analysis using GIS for mapping groundwater quality: case study in the recharge area of Wadi Usfan, western Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(7), 5239-5252.
- Meli'i, J. L., Bisso, D., Njandjock Nouck, P., Mbarga, T. N., Mbanga, A. F., Manguelle-Dicoum, E., 2013- Water table control using ordinary kriging in the Southern part of Cameroon. *J Appl Sci* 13(3):393–400.
- Nijmeijer, R., Haas, A., Dost, R., Budde, P., 2001- *Ilwis 3.0 Academic User's guide*. ITC, Enschede, The Netherlands. Njandjock Nouck P, Kenfack C, Diab DA, Njeudjang K, Meli'i LJ, Kamseu R (2013) A Geostatistical reinterpretation of gravity surveys in the Yagoua, Cameroon region, *Geofisica International*, 52(4):365–373
- Nikroo, L., Kompani-Zare, M., Sepaskhah, A. R. and Shamsi, S. R. F., 2010- Groundwater depth and elevation interpolation by kriging methods in Mohr Basin of Fars province in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166, 387–407. doi:10.1007/s10661-009-1010-x.
- Njandjock Nouck P, Yene, A. Q., Amougou, L, Lissom, P. and Mbida, Y., 2013- Geoelectrical prospection of aquifers in Eseka region, Centre-Cameroon. *J Emerg Trends Eng Appl Sci (Jeteas)* 4(3):471–477.
- Nshagali, B. G., Nouck, P. N., Meli'i, J. L., Arétouyap, Z. and Manguelle-Dicoum, E., 2015- High iron concentration and pH change detected using statistics and geostatistics in crystalline basement equatorial region. *Environmental Earth Sciences*, 73(11), 7135.
- Parsa, M., Maghsoudi, A., Yousefi, M. and Carranza, E. J. M., 2017- Multifractal interpolation and spectrum–area fractal modeling of stream sediment geochemical data: Implications for mapping exploration targets. *Journal of African Earth Sciences*, 128, pp.5-15.
- Rabah, F. K. J., Ghabayen, S. M., and Salha, A. A., 2011- Effect of GIS interpolation techniques on the accuracy of the spatial representation of groundwater monitoring data in Gaza strip. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4(6), 579-589.
- Rakhmatullaev, S., Marache, A., Huneau, F., Coustumer, P. L., Bakiev, M., and Motelica-Heino, M., 2010- Geostatistical approach for the assessment of the water reservoir capacity in arid regions: a case study of the Akdarya reservoir. *Uzbekistan Environment Earth Science*. doi:10.1007/s12665-010-0711-3.
- Triki, I., Trabelsi, N., Hentati, I. and Zairi, M., 2013- Groundwater levels time series sensitivity to pluviometry and air temperature: a geostatistical approach to Sfax region, Tunisia. *Environmental Monitoring and Assessment*. doi:10.1007/ s10661-013-3477-8.
- Uyan, M., and Cay, T., 2013- Spatial analyses of groundwater level differences using geostatistical modeling. *Environmental and Ecological Statistics*. doi:10.1007/s10651-013-0238-3.
- Webster, R. and Oliver, M. A. 2000- Geostatistics for environmental scientists. Wiley press, 271p.

Application of geostatistical studies for identification of Au-Cu-Fe-W anomalies in the Sehezar valley of Tonekabon – Northern Iran

M. Yazdani¹ and F. Alinia^{2*}

¹M. Sc., Department of Mining and Metallurgical Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

²Assistant Professor, Department of Mining and Metallurgical Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 2017 July 07

Accepted: 2017 December 03

Abstract

Sehezar area is located in southern city of Tonokabon in Mazandaran province in north of Iran, and near the Tarom – Hashtjin belt. The existence of granitoid masses in the region can be important in terms of the potential of mineralization. The kriging geostatistical technique is used to predict the grade distribution, by using existing data and spatial correlation between them, which is described by the variogram. To identify the anomalous area, 50 stream sediment samples were collected from the area and analyzed by the ICP-MS method, and then interpreted. At first, the data were normalized and then the geostatistical analysis was used. Variogram studies showed that the spherical model is the best fitted model, and the spatial correlation range for the three elements of Au, Cu and Fe are approximately 350 m and for W is approximately 700 m. Finally, the estimation and estimation variance maps of the studied elements were prepared by using ordinary kriging geostatistical method with the spherical model on the GS+ software. Evaluating the results by calculating the root mean square error (RMSE) and calculating the mean absolute error (MAE) indicates the acceptable accuracy of variogram model. By studying the kriging estimation and kriging estimation variance maps, the anomal regions were introduced for the elements of Au, Cu, Fe and W in the case study. Due to the spatial correlation of the elements, it is concluded that this mass can be associated with iron-gold-copper deposits.

Keywords: Granitoid, Geostatistics, Variogram, Kriging, Spherical Model.

For Persian Version see pages 83 to 96

*Corresponding author: F. Alinia; E-mail: aliniarf@aut.ac.ir