

## مدل سازی فرکتالی طیف توان - مساحت داده‌های حاصل از تحلیل طیفی آماره فضایی U جهت جداسازی مناطق آنومال ژئوشیمیایی مس پورفیری

حسین مهدیان فر<sup>۱</sup>، میرمهدی سیدرحیمی نیارق<sup>۲</sup>

۱- استادیار مجتمع آموزش عالی گناباد، گروه مهندسی معدن hssn.shahi@gmail.com

۲- استادیار دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی و مهندسی m.seyedrahimi@uma.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۳ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹)

### چکیده

در مطالعات اکتشافات ژئوشیمیایی، روش‌های ساختاری جداسازی آنومالی مختلفی مثل روش‌های فرکتالی و آماره فضایی U برای تفسیر داده‌ها و جدایش مناطق آنومال ارائه شده است. سپس بر اساس مدل توزیع و با در نظر گرفتن موقعیت فضایی نمونه‌ها اقدام به جداسازی مناطق آنومال می‌شود. در این مقاله، اقدام به مطالعه ویژگی‌های طیفی مقادیر U مربوط به کانی‌سازی نوع مس پورفیری در منطقه ظفرقند شده است. با استفاده از مقادیر طیف توان می‌توان پارامترها و متغیرها را به صورت سیگنال‌های مکانی در نظر گرفت و تحلیل‌ها را روی دامنه سیگنال‌های مختلف انجام داد. سیگنال‌ها در داده‌های ژئوشیمیایی و متغیرهای حاصل از آن‌ها، نشان‌دهنده وضعیت تغییرپذیری داده‌ها در موقعیت‌های مکانی هستند. برای تعیین تغییرپذیری آماره U و تحلیل فرکانس‌های مختلف آن، روش جدیدی تحت عنوان روش فرکتالی طیف توان - مساحت آماره U معرفی و به کار گرفته شد. در این روش داده‌های طیف توان آماره U به ۵ گروه مختلف تقسیم‌بندی شد که هر کدام از این کلاس‌ها مربوط به طیف‌های فرکانسی مختلفی هستند. برخی از این کلاس‌های فرکانسی مربوط به زمینه و برخی مربوط به آنومالی هستند. برای تعیین نوع زمینه یا آنومالی بودن این کلاس‌ها از روش چند متغیره تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی روی ماتریس طیف توان مربوط به مقادیر U تمام عناصر و برای هر کلاس به صورت جداگانه انجام شد. نتایج نشان از وجود فاکتور کانی‌سازی مس در کلاس‌های فرکانسی ۱، ۲ و ۳ است که مقادیر طیف توان کم را نیز نشان می‌دهند. این کلاس‌ها را می‌توان به عنوان کلاس‌های مربوط به آنومالی و کلاس‌های ۴ و ۵ را می‌توان به عنوان زمینه در نظر گرفت. کلاس‌های فرکانسی مربوط به زمینه از کلاس‌های آنومالی فیلتر شده و از داده‌ها حذف شدند. در نهایت طیف توان‌های باقی مانده با استفاده از تبدیل فوریه معکوس به حوزه مکان منتقل شده و نقشه آنومالی به دست آمد. در این نقشه، مقادیر از جنس پارامتر U بوده و محل آنومالی‌ها به خوبی روی آن مشخص شدند. در محدوده آنومالی حاصل، آلتراسیون فیلیک به صورت قوی در داخل سنگ‌های داسیت پورفیری و کوارتز دیوریت مشاهده می‌شود. نتایج حفاری روی این آنومالی‌ها نشان‌دهنده وجود کانی‌سازی در عمق است.

کلمات کلیدی

تحلیل طیفی ژئوشیمیایی، روش آماره فضایی U، روش فرکتال طیف توان-مساحت آماره U، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، زمینه و آنومالی

## ۱- مقدمه

توان به ارتباط بین ماهیت فرکانس‌های ایجاد شده توسط داده‌های ژئوشیمیایی در سطح زمین با وضعیت عمقی کانسار پی برد [۳۴]. برخی از محققین روش فرکتال طیف توان - مساحت را در حوزه فرکانس مورد استفاده قرار داده‌اند [۲۶،۳۵،۳۶].

یکی از روش‌های کاهش بعد فضای ویژگی و کلاسه‌بندی متغیرها، روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی<sup>۲</sup> است که می‌توان به تحلیل‌های مناسبی از داده‌ها بر اساس نتایج آن دست یافت. روش فرکتالی طیف توان - مساحت بر روی فاکتورهای حاصل از این روش نیز انجام گرفته است [۳۷]. روش PCA یکی از روش‌های آنالیز چند متغیره است. این روش بر اساس کواریانس و همبستگی متغیرها بوده که در آن، یک همبستگی درونی میان متغیرها نشان داده می‌شود و ابزار مفیدی برای ترکیب چند متغیر وابسته در یک متغیر و کاهش بعد مجموعه داده‌ها است [۳۸].

در این مقاله مدل جدید فرکتالی بر مبنای توزیع طیف فرکانسی مقدار آماره U برای تعیین مناطق آنومالی معرفی و استفاده شده است. به‌منظور تعیین عناصر مرتبط با کانی‌سازی، شناخت الگوی توزیع، چگونگی همراهی عناصر با یکدیگر و تعیین فاکتور کانی‌سازی، از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی روی داده‌های فرکانس داده‌های ژئوشیمیایی استفاده شده است. بعد از تعیین اهمیت فرآیند کانی‌سازی در هر کلاس فرکانسی، کلاس‌های فرکانسی مرتبط با کانی‌سازی از کلاس‌های فرکانسی مربوط به زمینه جدا شده و با استفاده از روش تبدیل فوریه معکوس به حوزه مکان انتقال یافته و مناطق آنومالی تعیین شده است.

## ۲- زمین شناسی، کانی‌زایی و آلتراسیون‌های منطقه مورد مطالعه

منطقه ظرفرند در فاصله ۸۹ کیلومتری شمال شرق مرکز اصفهان و ۲۲ کیلومتری جنوب شهر اردستان قرار دارد. این منطقه روی کمر بند ولکانیکی ارومیه دختر واقع شده است (شکل ۱). منطقه مورد نظر از لحاظ زمین‌ساختی در لبه زون ایران مرکزی و در کمر بند ارومیه-دختر واقع شده است، بنابراین می‌تواند از نظر وجود مس و یا عناصر دیگر دارای پتانسیل قابل توجهی باشد [۳۹]. بخش کانی‌سازی این منطقه در ابتدا با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای ETM در سال ۱۳۸۵ شناسایی شد. بعد از تهیه نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه، نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی به‌صورت

تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی یکی از مباحث مهم در اکتشافات معدنی است. یکی از اهداف مطالعات این داده‌ها، تعیین مناطق آنومال یا کانی‌سازی است. روش‌های جداسازی آنومالی مختلفی مثل روش‌های فرکتالی و آماره فضایی U از گروه تکنیک‌های ساختاری، برای تفسیر داده‌ها و جدایش مناطق آنومال ارائه شده است [۱۵-۱]. این گروه از روش‌ها بر اساس مدل توزیع و با در نظر گرفتن موقعیت فضایی نمونه‌ها اقدام به جداسازی مناطق آنومال می‌کند [۱۶-۱۸]. جوامع مختلفی در داده‌های ژئوشیمیایی ناشی از تفاوت‌های زمین‌شناسی، آلتراسیون‌ها و فرآیندهای کانی‌سازی ممکن است مشاهده شود. قابلیت‌های این دو روش در تفکیک این جوامع از یکدیگر با وجود تفاوت‌های موجود، تا حدودی مشخص است.

در روش آماره فضایی U، فاصله بین نمونه‌ها به‌عنوان یک وزن برای جداسازی آنومالی از زمینه ژئوشیمیایی استفاده می‌شود [۴،۱۹،۲۰]. در این روش، بر اساس شعاع‌های مختلف پنجره تعریف شده، محدوده‌ای از مقادیر مختلف U محاسبه می‌شود [۲،۶،۸]. مقدار ماکزیمم قدرمطلق U یک مفهوم بنیادی در بهینه‌سازی جدایش آنومالی بوده و به‌عنوان مناسب‌ترین مقدار U تخمینی برای نمونه مورد نظر انتخاب می‌شود [۱۳،۱۴،۲۱]. تعداد فازهای کانی‌سازی، که منجر به تغییر عیار می‌شود، در نمودار هیستوگرام مقادیر U تعیین می‌شود [۲۰].

تاکنون انواع روش‌های فرکتال مانند روش عیار-مساحت، عیار-حجم روی داده‌های ژئوشیمیایی انجام گرفته است [۲۵-۲۲]. یکی از روش‌های فرکتالی که البته کمتر از سایر روش‌ها استفاده شده است روش فرکتالی طیف توان - مساحت<sup>۱</sup> است. این روش فرکتالی در حوزه فرکانس داده‌های ژئوشیمیایی استفاده مورد استفاده قرار گرفته است که از ویژگی خود تشابهی در حوزه فرکانس برای تعیین و جدایش الگوهای مختلف استفاده می‌کند [۲۶-۲۹]. در حال حاضر تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی بیشتر در حوزه مکان انجام می‌شود. علاوه بر حوزه مکان، از حوزه فرکانس نیز می‌توان برای دست‌یابی به اطلاعات اکتشافی موجود در داده‌های ژئوشیمیایی بهره برد. تحلیل طیف توان عناصر در حوزه فرکانس برای داده‌های ژئوشیمیایی به‌منظور شناسایی الگوهای رفتاری عناصر استفاده شده است [۳۰-۳۴]. با استفاده از تحلیل سیگنال‌های حوزه فرکانس داده‌های ژئوشیمیایی می‌توان به اطلاعات اکتشافی دست پیدا کرد که استخراج این اطلاعات از داده‌ها در حوزه مکان به سادگی امکان‌پذیر نیست. با استفاده از این حوزه می-

۵۰ متر و در حاشیه آن ۱۰۰ در ۱۰۰ متر طراحی شده و این نمونه ها با روش ICP برای ۴۳ عنصر در کشور استرالیا آنالیز شده است. بررسی آماری این داده‌ها، مقدار عیار مس یکی از نمونه‌های برداشت شده در حاشیه شبکه را به‌عنوان داده خارج از ردیف تشخیص داد و از کل داده‌ها حذف شد.

### ۲-۳- روش آماره فضایی U

روش آماره فضایی  $U^2$  نوعی روش میانگین‌گیری متحرک<sup>۴</sup> است، با این ویژگی که در هر نقطه خاص ابعاد پنجره‌ای که در داخل آن میانگین‌گیری صورت می‌گیرد، تغییر داده می‌شود. بنابراین برای هر نقطه خاص تعدادی از مقادیر برای آماره  $U$  آن نقطه از روی نقاط اطراف آن محاسبه می‌شود. بدین ترتیب ارتباط فضایی نقاط در این روش کاملاً در نظر گرفته می‌شود [۳۸، ۱۹، ۴۲]. تغییر در ایزوتروپی و ان ایزوتروپی متغیرها در شکل پنجره موثر است. فاصله ایستگاه‌های اطراف مرکز پنجره، برای محاسبه وزن این ایستگاه‌ها استفاده می‌شود. این وزن‌ها به مقادیر اندازه‌گیری شده ایستگاه‌ها ضرب شده تا نهایتاً تخمینی برای نقطه مرکزی پنجره مورد نظر به‌دست آید.

مقدار متوسط مقادیر  $U$  که با  $U_i(r)$  نشان داده می‌شود، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۸، ۱۹]:

$$U_i(r) = \frac{\sum_{j=1}^{n_1} w_j(r)x_j - \mu}{\sigma} + \frac{\sum_{k=1}^{n_2} w_k(r)x_k - \mu}{\sigma} = \frac{\bar{x}_i(r) - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

که در آن  $\mu$  میانگین و  $\sigma$  انحراف معیار کل داده‌ها است.  $X_i$  و  $X_j$  مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های  $j$  و  $k$  داخل پنجره هستند.  $w_k(r)$  و  $w_j(r)$  وزن‌های این ایستگاه‌ها می‌باشند.  $\bar{x}_i(r)$  میانگین وزنی ایستگاه  $i$  بر اساس ایستگاه‌های اطراف است. در این رابطه،  $j$  مربوط به نمونه‌های با مقادیر زمینه و  $k$  برای مقادیر آنومال است. اگر میانگین جامعه آنومالی  $\mu_A$  و میانگین جامعه زمینه  $\mu_B$  باشد، آنگاه  $\mu_B < \mu < \mu_A$  است.

### ۳-۳- روش فرکتالی طیف توان - مساحت

به‌طور کلی این روش در ۳ مرحله به صورت زیر انجام می‌پذیرد:

الف: انتقال داده‌های ژئوشیمیایی از حوزه مکان به حوزه فرکانس: بعد از انجام درون‌یابی و تهیه نقشه رستر از داده‌ها، این نقشه توزیع ژئوشیمیایی با استفاده از تبدیل فوری دوحده

سیستماتیک در منطقه برداشت و آنالیز شد. علاوه بر این، برداشت‌های ژئوفیزیکی شامل مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی نیز در منطقه مورد مطالعه صورت گرفته است و در نهایت بر مبنای اطلاعات به‌دست آمده، ۴ حفاری مغزه در منطقه جنوبی ظرفقند انجام شده است [۴۰].

واحدهای لیتولوژیکی محدوده اکتشافی این اندیس اغلب شامل داسیت پورفیری، آندزیت، بازالت، به‌طور محلی دیوریت و آبرفت است. بخش عمده‌ای از این واحدهای سنگی تحت تأثیر محلول‌های هیدروترمال به شدت دگرسان شده و زون‌های آلتراسیون که از مرکز سیستم پورفیری به سمت حاشیه‌ها به ترتیب شامل فیلیک، آرژیلیک، پروپیلیتیک هستند را به وجود آورده است. البته در بخش‌هایی از منطقه آلتراسیون پتاسیک هم مشاهده می‌شود. هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و جاروسیت) در اکثر قسمت‌ها در رابطه با آلتراسیون‌های مرکزی مشاهده می‌شوند. رگه‌ها و استوک‌ورک‌های سیلیسی و کوارتز - مگنتیتی پرکننده درزه و شکاف‌ها، در نقاط بسیاری در رابطه با کانی‌سازی مس (مالاکیت و آزوریت) مشاهده می‌شوند. آلتراسیون‌های فیلیک و پتاسیک مانند آلتراسیون اکسید آهن با شدت بالایی همراه با کوارتز دیوریت و داسیت پورفیری در مرکز سیستم مشاهده می‌شوند. مهم‌ترین سنگ‌های واقع در این سیستم پورفیری شامل داسیت پورفیری، ریولیت داسیت پورفیری و کوارتز دیوریت هستند که توسط آندزیت پورفیری و پیروکلاست‌های آندزیتی احاطه شده‌اند. در برخی قسمت‌ها رگه‌های کوارتزی با کانی‌سازی مس تا ضخامت ۴ متر و طول ۳۰ متر مشاهده می‌شود. کانی‌های کالکوپیریت، پیریت، گالن، اسفالریت، مالاکیت و اکسید آهن در رگه‌های سیلیسی شده و کوارتزی وجود دارد. آلتراسیون پتاسیک در منطقه جنوبی ظرفقند در میکرودیوریت‌ها قرار گرفته است. آلتراسیون پروپیلیتیک به صورت وسیعی در منطقه گسترش یافته است و آلتراسیون‌های آرژیلیک را در قسمت شمالی، جنوبی و غربی دربر می‌گیرد [۴۱].

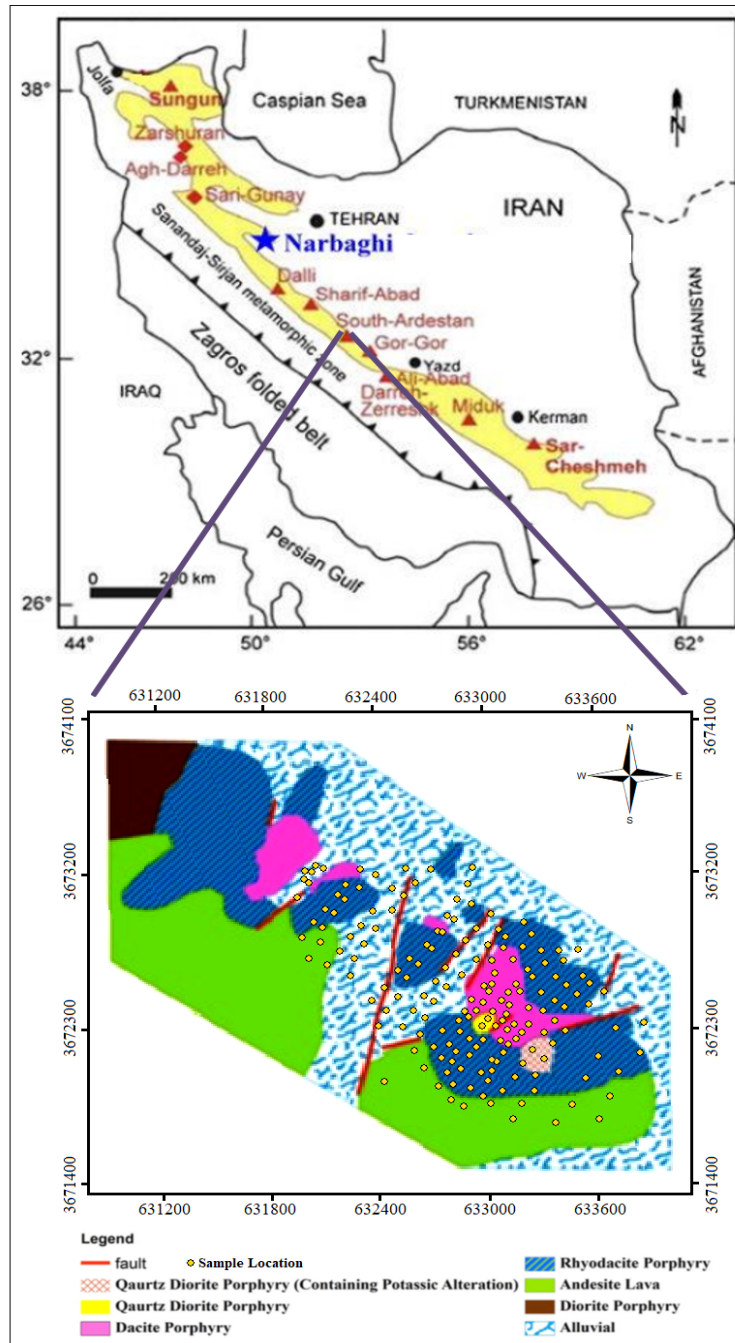
### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- نمونه‌برداری و آنالیز داده‌ها

تعداد ۱۷۷ نمونه ژئوشیمی از محیط سنگی در یک شبکه منظم برداشت شده است. در شکل ۱ موقعیت نمونه‌ها بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. ابعاد شبکه در قسمت مرکزی سیستم پورفیری ۱۰۰ متر در

به حوزه فرکانس انتقال داده می‌شود. تبدیل فوریه مختلط مربوط به یک تابع به صورت زیر محاسبه می‌شود [۴۳، ۴۴]:

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega x} f(x) dx \quad (2)$$



شکل ۱- نقشه زمین شناسی و موقعیت منطقه زفراند در کمر بند ارومیه - دختر [۳۴، ۴۱]

توزیع ژئوشیمیایی از یکدیگر تفکیک می‌شوند. فرآیند تبدیل فوریه در نرم افزار متلب<sup>۵</sup> انجام می‌گیرد.

$Ff(\omega)$  تبدیل فوریه مختلط  $f(x)$  نامیده می‌شود. با استفاده از تبدیل فوریه، سیگنال‌های مختلف موجود در تابع

#### ۴-۱- مدل‌سازی داده‌های خام ژئوشیمیایی با روش

##### آماره فضایی U

برای مدل‌سازی داده‌های ژئوشیمیایی عنصر مس با روش آماره فضایی U، الگوریتم این روش در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی شد. این برنامه برای هر نقطه از شعاع همسایگی صفر تا ۵۰۰۰ متر ( $r_{max}$ )، با استفاده از روابط بالا، مقدار U را محاسبه کرده و سپس بزرگ‌ترین مقدار U از نظر قدر مطلق را تحت عنوان  $U^*$  به نقطه مورد نظر اختصاص می‌دهد. این محاسبات برای غلظت عنصر مس با ۱۷۶ نمونه، انجام شد. نظر به این‌که مقدار  $U^*(r_{max})$  بستگی به چگالی نمونه‌برداری در ناحیه دارد یا به عبارت دیگر از نظر آماری چگالی نمونه‌برداری، قابلیت این روش را در تشخیص جوامع ژئوشیمیایی تحت تأثیر قرار می‌دهد، اندازه حداکثر شعاع جستجو نیز بسته به چگالی نمونه‌برداری و وسعت منطقه انتخاب می‌شود. با بررسی شعاع-های ۱، ۳ و ۵ کیلومتری در منطقه مشخص شد که نتایج نسبتاً یکسانی به دست می‌آید، بنابراین روش مورد نظر نسبت به این پارامتر چندان حساس نیست. در خصوص تغییر میزان شعاع‌های جستجو از صفر تا ۵ کیلومتر، با توجه به چگالی نمونه‌ها اندازه شعاع‌ها طوری انتخاب شد که از میزان شرکت تمامی نمونه‌ها در محاسبه مقدار آماره U اطمینان حاصل شود، بنابراین به منظور دقت در محاسبات فاصله بین شعاع دو دایره در دو مرحله متوالی ۱۰ متر در نظر گرفته شد. نحوه محاسبه نیز به این ترتیب است که برای هر نقطه نمونه‌برداری، محاسبه از دایره‌ای به شعاع صفر شروع و تا شعاع ۵۰۰۰ متر ادامه می‌یابد. با توجه به فاصله ۱۰ متری بین دو شعاع متوالی، برای هر نقطه نمونه‌برداری ۵۰۰ دایره رسم شد و برای تک‌تک آن‌ها مقدار آماره U محاسبه شد. سپس مقدار حداکثر Uها از لحاظ قدر مطلق، برای نقطه مورد نظر مشخص شده و این مقدار به عنوان  $U^*$  ذخیره شد. هیستوگرام مقادیر خام و  $U^*$  برای عنصر مس، در شکل ۲ آورده شده است. همان‌طور که از این نمودار مشاهده می‌شود، توزیع فراوانی داده‌های خام عنصر مس نشان می‌دهد که این عنصر از توزیع غیرنرمال پیروی می‌کند (شکل ۲-الف). توزیع فراوانی داده‌های  $U^*$  این عنصر نیز یک می‌نیم در نقطه صفر را نشان می‌دهد (شکل ۲-ب) و این همان مرزی است که از محدوده زمینه خارج شده و به منطقه آئومال (فازهای کانی‌سازی) نزدیک می‌شود و در واقع مرز تقریبی ناحیه آئومالی و زمینه را نشان می‌دهد. قبل از این مرز یک ماکزیمم و بعد از آن دو ماکزیمم در توزیع فراوانی داده-

ب: رسم نمودار لگاریتمی فرکتال: در این مرحله از مقادیر طیف توان لگاریتم گرفته می‌شود و مقادیر تجمعی برای این اعداد به دست می‌آید و نمودار مربوط به لگاریتم مقادیر طیف توان و لگاریتم مساحت‌های مربوطه ترسیم می‌شود. با استفاده از این نمودار می‌توان خطوط راستی را روی داده‌ها برازش داد و محل شکست نمودار که مقادیر حدآستانه‌ای را نشان می‌دهد را تعیین کرد.

در روش فرکتالی طیف توان- مساحت که شامل اعداد موج با چگالی انرژی طیفی بالای  $S[A(>S)]$  در یک حوزه فرکانسی دو بعدی می‌باشند رابطه زیر برقرار است:

$$A(\geq S)\alpha S^{-2d/\beta} \quad (3)$$

که  $\beta$  معرف میزان انیزوتروپی و  $d$  پارامتر تولید کننده نامتغیر مقیاسی تعمیم داده شده<sup>۵</sup> است [۴۵]. برای یک مورد خطی دو بعدی رابطه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A(\geq S)\alpha S^{-2/\beta} \quad (4)$$

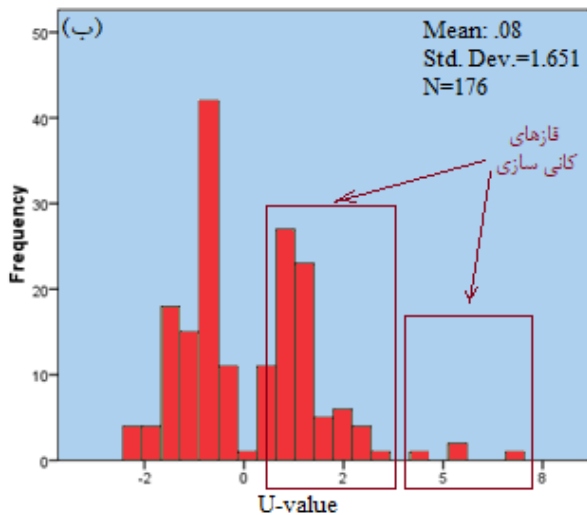
ج: فیلتر کردن داده‌ها و تبدیل معکوس فوری: در این مرحله فیلترها بر اساس مقادیر حد آستانه‌ای طراحی و روی داده‌ها اعمال می‌شوند. سپس نتایج با استفاده از تبدیل فوری معکوس به حوزه مکان انتقال داده می‌شوند و نقشه‌های مختلف بر این اساس به دست می‌آیند [۴۶]. معادله زیر تبدیل معکوس فوری را نشان می‌دهد [۴۳، ۴۴].

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Ff(\omega)e^{i\omega x} d\omega \quad (5)$$

#### ۴- بحث و نتایج

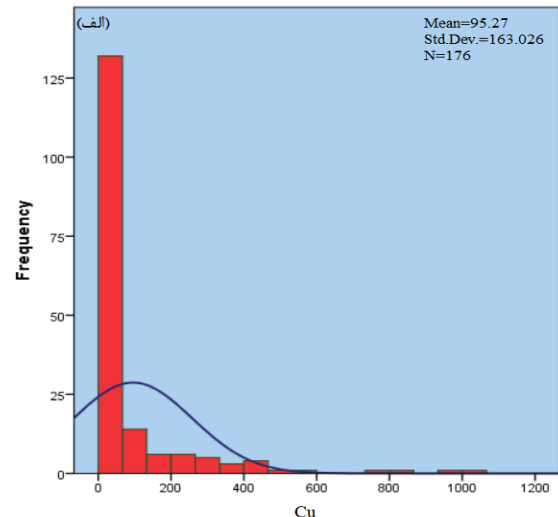
شناسایی ویژگی‌های فرکانسی توزیع عناصر کمک زیادی به تهیه نقشه آئومالی و بررسی وضعیت کانی‌سازی می‌کند. به منظور ترسیم نقشه آئومالی و تعیین محدوده پتانسیل‌دار برای تمرکز کارهای اکتشافی تفصیلی‌تر در منطقه، از روش فرکتالی جدیدی مبتنی بر توزیع مقادیر طیف توان آماره U استفاده شد. در حقیقت وضعیت توزیع مقادیر طیف توان پارامتر آماره U در حوزه فرکانس تحلیل شده است. بعد از تفکیک کلاس‌های مختلف آماره U در حوزه فرکانس با استفاده از روش فرکتال، این کلاس‌های فرکانسی از نظر ارتباط با کانی‌سازی ارزیابی شد. به منظور بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی این کلاس‌ها در منطقه مورد مطالعه، روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی روی نتایج فرکتال انجام شد و در نهایت نقشه آئومالی با حذف مقادیر طیف توان مربوط به زمینه، ترسیم شد.

به داده‌های بعد از مرحلهٔ زمینه است و با فراوانی بیشتر در شکل ظاهر شده است و فاز نهایی کانی‌سازی عنصر مس نیز مربوط به مقادیر با غلظت‌های بالاتر است که از فاز کانی‌سازی قبلی خود را جدا کرده است.



شکل ۲- توزیع فراوانی مقادیر عنصر مس برای ۱۷۶ نمونه عنصر مس، الف: داده‌های خام، ب: مقادیر  $U^*$

های  $U^*$  مشاهده می‌شود که نشان از سه مدی بودن این داده‌ها است. با توجه به این‌که توزیع فراوانی داده‌های خام عنصر مس یک مد را در داده‌ها نشان می‌دهد، بنابراین قابلیت بالای تفکیک‌پذیری دسته داده‌ها با روش آماره  $U$  کاملاً مشهود است. این توزیع نشان از دو فاز کانی‌سازی دارد که یکی مربوط



مقادیر طیف توان پارامتر  $U$  برای عنصر مس در ۵ کلاس تقسیم‌بندی شد (شکل ۴). خلاصه‌ای از وضعیت این کلاس‌ها در جدول ۱ مشاهده می‌شود. کلاس ۱ مقادیر طیف توان کوچک را نشان می‌دهد که در ارتباط با فرکانس‌های بالا بوده و کلاس ۲ و ۳ مربوط به اعداد طیف توان و فرکانس‌های متوسط و کلاس ۴ و ۵ مربوط به اعداد طیف توان بسیار بالا بوده که ناشی از سیگنال‌های ژئوشیمیایی با فرکانس‌های پایین می‌باشند. برخی از این کلاس‌های فرکانسی با فرآیند کانی‌سازی مرتبط هستند و برخی از فرکانس‌ها نیز ممکن است در اثر وجود مؤلفهٔ زمینه در داده‌ها ایجاد شده باشند. البته باید توجه داشت که فرکانس‌های پارامتر  $U$  عنصر مس با فرکانس‌های موجود در عیارهای مس متفاوت است به ویژه این‌که در روش آمارهٔ  $U$  یک هموارسازی در داده‌های خام نیز انجام می‌شود و در حقیقت طی فرآیند محاسبه مقادیر  $U$ ، یک سری از فرکانس‌های بالا از داده‌ها حذف خواهد شد. بنابراین فرکانس‌های خیلی بالایی که در نقشهٔ ژئوشیمیایی مس وجود دارد در نقشهٔ توزیع مقادیر  $U$  وجود نخواهد داشت و در صورتی که این فرکانس‌های خیلی بالا نویز ژئوشیمیایی باشند و در اثر خطای نمونه‌برداری یا خطای آنالیز حاصل شده باشند از داده‌ها در این

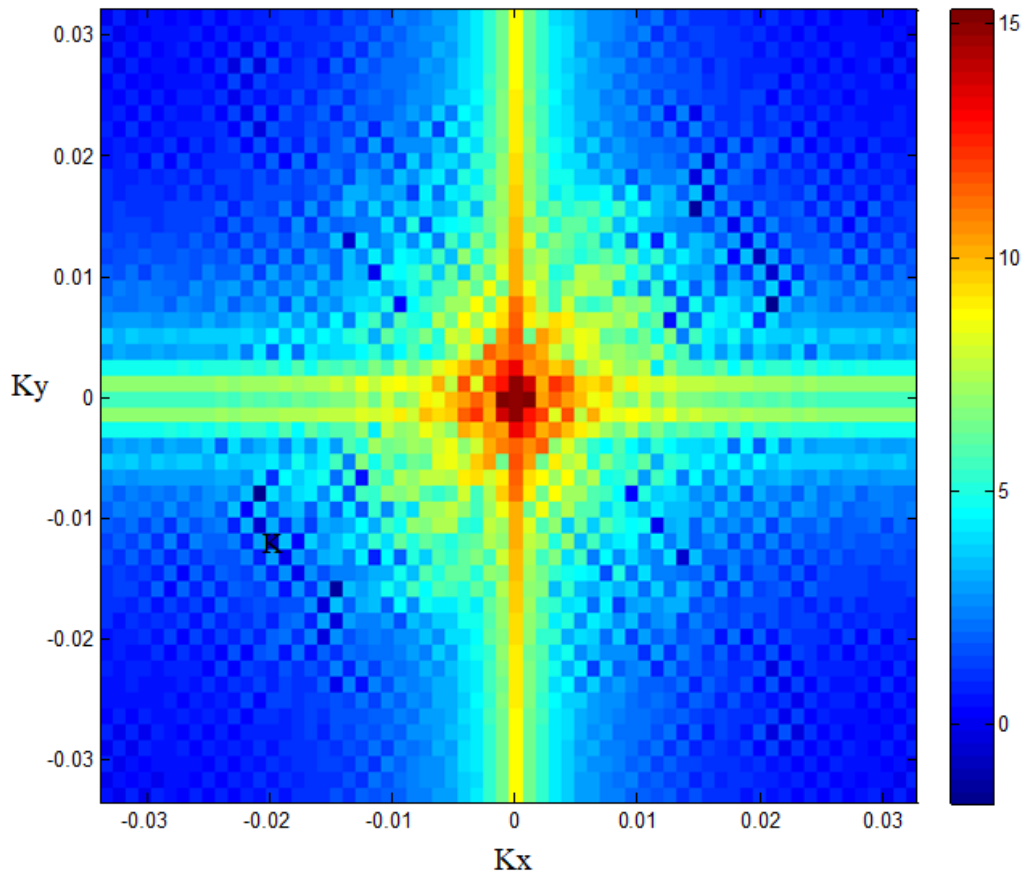
#### ۲-۴- مدل‌سازی فرکتالی طیف توان - مساحت آمارهٔ فضایی $U$

بعد از محاسبه مقادیر  $U$  برای تمام ۴۳ عنصر، نقشه توزیع  $U$  این عناصر ترسیم شد و ماتریس این مقادیر برای تمام عناصر تشکیل شد. در ادامه با استفاده از نرم افزار متلب، این ماتریس‌ها به صورت جداگانه برای هر عنصر، با استفاده از تبدیل فوریه دوبعدی به حوزه فرکانس تبدیل شدند. در این حوزه مقادیر طیف توان و اعداد موج در جهت‌های قائم و افقی مدنظر است. شکل ۳ نقشهٔ توزیع طیف توان مقادیر  $U$  عنصر مس را نشان می‌دهد. مقادیر طیف توان در این نقشه به صورت لگاریتمی است. محور افقی و محور قائم به ترتیب مقادیر اعداد موج افقی و قائم را در داده‌های آمارهٔ  $U$  نشان می‌دهند.

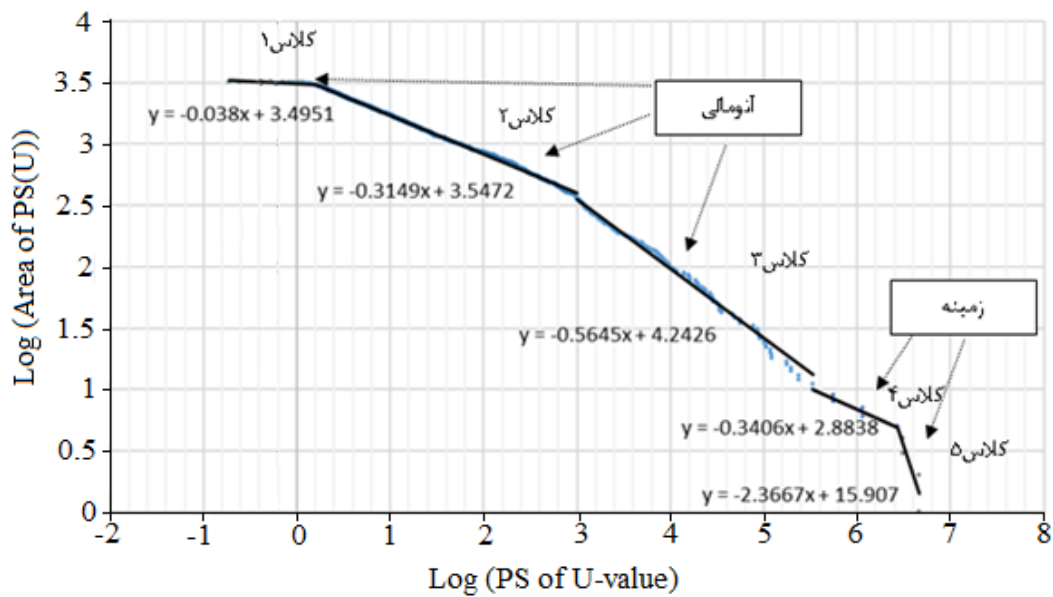
با افزایش عدد موج، مقادیر طیف توان کاهش و فرکانس افزایش می‌یابد و در اعداد موج کوچک مقادیر طیف توان افزایش یافته و فرکانس کاهش می‌یابد. بعد از انتقال داده‌ها به حوزه فرکانس، روش فرکتال روی اعداد طیف توان به دست آمده از پارامتر  $U$  برای عنصر مس انجام شد. این مدل فرکتال که برگرفته از روش فرکتالی طیف توان مساحت است برای اولین بار بر روی مقادیر  $U$  استفاده شد. بر اساس روش فرکتال،

تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده شد که در بخش بعدی به آن پرداخته می‌شود.

مرحله حذف خواهند شد. به‌منظور تعیین نحوه ارتباط این کلاس‌های فرکانسی با کانی‌سازی یا زمینه ژئوشیمیایی از روش



شکل ۳- نقشه توزیع لگاریتمی طیف توان آماره U برای عنصر مس



شکل ۴- نمودار فرکتالی طیف توان آماره U برای عنصر مس

جدول ۱- ویژگی های مربوط به کلاس های فرکانسی بدست آمده از روش فرکتالی طیف توان - مساحت آماره U عنصر مس

جامعه فرکانسی	حد آستانه ای پایین طیف توان	حد آستانه ای بالای طیف توان	فرکانس	تحلیل بر اساس روش فرکتال
کلاس ۱	-	۱/۵۸	بالا	آنومالی
کلاس ۲	۱/۵۸	۱۰۰۷	متوسط	آنومالی
کلاس ۳	۱۰۰۷	۵۶۶۷۱۲	متوسط	آنومالی
کلاس ۴	۵۶۶۷۱۲	۲۶۹۸۴۱۱	پایین	زمینه
کلاس ۵	۲۶۹۸۴۱۱	-	خیلی پایین	زمینه

#### ۳-۴- تعیین فاکتورهای کانی سازی با روش تحلیل مؤلفه های اصلی

عناصری که با فرآیندهای کانی سازی ارتباط دارند در حوزه فرکانس این ارتباط قابل تشخیص خواهد بود. فرکانس های موجود در نقشه توزیع مقادیر U برای عناصر کانی سازی و عناصر زمینه متفاوت هستند و با روش های آمار چند متغیره این تفاوت ها را می توان شناسایی کرد. به همین دلیل عناصر پاراژنز و مرتبط با کانی سازی رفتارهای فرکانسی مشابهی دارند که از این منظر می توان به اطلاعات خوبی در خصوص وضعیت کانی سازی دست یافت. در این بخش از روش تحلیل مؤلفه های اصلی جهت تحلیل چند متغیره مقادیر طیف توان پارامتر U استفاده شد. بنابراین در ابتدا ماتریس کلی شامل مقادیر طیف توان آماره U برای تمام عناصر تشکیل شد و کلاس های فرکانسی مختلف که قبلاً با روش فرکتال به دست آمده است با استفاده از فیلترهای مختلف از یکدیگر جدا شد و هر کلاس به صورت جداگانه ای تحلیل شد. کلاس های فرکانسی مختلف با استفاده از فیلترهای پایین گذر، میان گذر و بالاگذر بر اساس مقادیر حد آستانه ای از یکدیگر جدا شدند. برای تعیین وضعیت کانی سازی در کلاس های فرکانسی مختلف و مطالعه رفتار عناصر مرتبط با فرآیند کانی سازی در این کلاس ها، روش تحلیل مؤلفه های اصلی به صورت جداگانه روی این کلاس ها انجام گرفت. نتایج این روش برای مؤلفه های مختلف اصلی موجود در داده ها مربوط به کلاس های ۱، ۲، ۳ و ۵ در جداول (۲ و ۳) نشان داده شده است. این جداول، مؤلفه های اصلی استخراج شده از داده های هر کلاس را بر اساس میزان همبستگی عناصر نشان می دهد. عناصری که در این کلاس ها مرتبط با فرآیند کانی سازی باشند در مؤلفه کانی سازی ضرایب بالاتری را نشان می دهند. مؤلفه های اصلی مربوط به کانی سازی در هر یک از این کلاس ها قابل تشخیص خواهند بود. عنصر

مس در مؤلفه کانی سازی نقش مهمی دارد و از عناصر زمینه قابل تفکیک است. مقادیر بزرگتر از ۰/۵ به عنوان ملاکی برای مقادیر قابل اهمیت در نظر گرفته شد. در کلاس ۴ تمام عناصر در یک کلاس قرار گرفتند و روش تحلیل مؤلفه های اصلی نتوانسته است بین عناصر تفکیک و تمایز ایجاد کند که این نشان می دهد در این کلاس فرکانسی، مقادیر U عنصر مس با تمام عناصر دیگر رفتار مشابه داشته و مرتبط با زمینه ژئوشیمیایی است.

یکی از اهداف استفاده از روش تحلیل مؤلفه های اصلی کاهش بعد فضای ویژگی مورد نظر است که این مسئله بر اساس تشابه و همبستگی بین ویژگی های مختلف صورت می گیرد. همان طور که در جداول (۲ و ۳) مشاهده می شود تعداد ۴۳ ویژگی در این کلاس های فرکانسی به تعداد ۲، ۳ و ۴ فاکتور کاهش یافته است. این مقدار کاهش بعد فضای ویژگی در تحلیل داده ها یک نتیجه قابل قبول و مناسب محسوب شده که نشانه وجود اطلاعات مناسب در این داده های طیف توان پارامتر U است. این نتیجه مهم مستقیماً مربوط به ارتباطات خاص مقادیر U عناصر، در این مجموعه داده ها می شود.

عنصر مس در کلاس ۱، در مؤلفه سوم و با رفتاری کاملاً متمایز از سایر عناصر قرار گرفته است. این رفتار متمایز عنصر مس در توزیع پارامتر U نشانه وجود کانی سازی مس در این کلاس فرکانسی است. این کلاس را می توان جزء فرآیند کانی سازی در نظر گرفت و برای تعیین نقشه آنومالی از این فرکانس ها بهره برد. در کلاس ۲ که مربوط به فرکانس های متوسط است روش تحلیل مؤلفه های اصلی داده های طیف توان مقدار U عناصر مختلف را در ۴ مؤلفه جداگانه قرار داده است. مؤلفه ۴ به عنوان مؤلفه کانی سازی شامل عنصر مس می شود. همان طور که مشاهده می شود عنصر مس در هیچ یک از مؤلفه های دیگر نقش مهمی ندارد. با توجه به تمایز رفتاری



مقادیر U مس با سایر عناصر در این کلاس فرکانسی، این بازه فرکانسی آماره U نیز نقش تعیین کننده‌ای در تعیین محدوده دارند.

جدول ۲- نتایج روش مؤلفه‌های اصلی روی مقادیر طیف توان پارامتر آماره U در کلاس های ۱ و ۳ حاصل از روش فرکتال

مؤلفه کلاس ۳				مؤلفه کلاس ۳				مؤلفه کلاس ۱				مؤلفه کلاس ۱			
۳	۲	۱		۳	۲	۱		۳	۲	۱		۳	۲	۱	
۰/۳۴	۰/۷۴	۰/۵۵	Nb	-۰/۰۱	۰/۳۸	۰/۹۱	Au	-۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۹۸	Nb	-۰/۰۷	۰/۳۴	۰/۹۳	Au
۰/۴۰	۰/۷۱	۰/۵۵	Ni	۰/۰۰	۰/۵۲	۰/۷۸	Al	۰/۰۹	۰/۴۲	۰/۸۶	Ni	۰/۰۱	۰/۵۲	۰/۸۴	Al
۰/۳۰	۰/۵۱	۰/۷۹	P	۰/۴۵	۰/۷۵	۰/۴۲	Ca	-۰/۰۴	۰/۱۸	۰/۹۸	P	-۰/۰۲	۰/۲۴	۰/۹۷	Ca
۰/۰۲	۰/۵۶	۰/۵۳	Pb	۰/۱۷	۰/۳۳	۰/۹۲	Fe	۰/۰۱	۰/۴۱	۰/۹۱	Pb	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۹۸	Fe
۰/۰۰	-۰/۰۱	۰/۹۹	Rb	۰/۰۲	-۰/۰۱	۱/۰۰	K	-۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۹۸	Rb	-۰/۰۲	۰/۱۷	۰/۹۸	K
۰/۲۰	۰/۸۷	۰/۲۳	S	۰/۲۸	۰/۵۶	۰/۷۵	Mg	۰/۴۰	۰/۲۵	۰/۸۲	S	۰/۰۳	۰/۳۳	۰/۹۳	Mg
۰/۸۷	۰/۳۱	۰/۱۹	Sb	۰/۳۹	۰/۰۷	۰/۸۷	Na	۰/۰۲	۰/۸۲	۰/۵۵	Sb	-۰/۰۴	۰/۲۳	۰/۹۷	Na
۰/۱۸	۰/۲۹	۰/۹۲	Sc	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۹۸	Ag	۰/۱۰	۰/۲۹	۰/۹۴	Sc	-۰/۰۴	۰/۲۰	۰/۹۸	Ag
۰/۱۰	۰/۸۳	۰/۳۹	Sn	۰/۰۳	۰/۶۷	۰/۷۲	As	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۹۸	Sn	۰/۰۲	۰/۲۵	۰/۹۵	As
۰/۳۹	۰/۲۸	۰/۷۶	Sr	۰/۰۶	۰/۱۹	۰/۹۷	Ba	۰/۰۳	۰/۳۱	۰/۹۵	Sr	۰/۱۶	۰/۹۲	۰/۱۷	Ba
۰/۴۱	۰/۸۴	۰/۲۷	Te	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۹۹	Be	-۰/۰۳	۰/۱۶	۰/۹۸	Te	-۰/۰۴	۰/۲۵	۰/۹۶	Be
۰/۱۴	۰/۲۶	۰/۹۴	Th	۰/۱۹	۰/۴۰	۰/۸۸	Bi	۰/۰۵	۰/۹۰	۰/۴۰	Th	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۹۳	Bi
۰/۱۷	۰/۷۶	۰/۵۹	Ti	۰/۱۰	۰/۷۳	۰/۶۵	Cd	۰/۰۳	۰/۲۵	۰/۹۷	Ti	۰/۰۱	۰/۹۹	۰/۰۰	Cd
۰/۱۹	۰/۵۱	۰/۷۶	Tl	۰/۱۵	۰/۹۶	۰/۱۱	Ce	-۰/۰۳	۰/۱۸	۰/۹۸	Tl	-۰/۰۵	۰/۲۶	۰/۹۶	Ce
۰/۳۸	۰/۶۴	۰/۶۱	U	۰/۲۵	۰/۶۹	۰/۶۴	Co	-۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۹۸	U	۰/۰۱	۰/۳۷	۰/۹۲	Co
۰/۳۰	۰/۴۱	۰/۸۴	V	۰/۳۸	۰/۷۱	۰/۵۷	Cr	۰/۰۸	۰/۳۵	۰/۹۳	V	۰/۰۰	۰/۳۸	۰/۹۲	Cr
۰/۰۸	۰/۶۶	۰/۳۹	W	۰/۱۰	۰/۹۶	۰/۱۳	Cs	-۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۹۶	W	-۰/۰۲	۰/۲۳	۰/۹۷	Cs
۰/۲۷	۰/۹۲	۰/۰۹	Y	۰/۵۰	۰/۶۷	۰/۱۱	Cu	۰/۱۸	۰/۶۵	۰/۷۲	Y	-۰/۰۹۵	-۰/۱۶	۰/۰۹	Cu
۰/۱۵	۰/۹۶	۰/۱۶	Yb	۰/۱۶	۰/۹۲	۰/۱۴	La	۰/۲۱	۰/۵۸	۰/۷۶	Yb	-۰/۰۳	۰/۹۸	۰/۰۷	La
۰/۱۵	۰/۹۷	۰/۰۸	Zn	۰/۳۶	۰/۶۹	۰/۵۹	Li	۰/۱۲	۰/۳۸	۰/۹۱	Zn	۰/۰۹	۰/۳۹	۰/۸۶	Li
۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۶۳	Zr	۰/۰۶	۰/۹۴	۰/۲۴	Mn	۰/۰۲	۰/۲۵	۰/۹۴	Zr	۰/۲۲	۰/۴۹	۰/۸۲	Mn
				۰/۷۳	۰/۵۵	۰/۱۴	Mo					۰/۰۵	۰/۸۷	۰/۴۸	Mo

در کلاس فرکانسی ۵ که فرکانس‌های خیلی پایین را شامل می‌شود عنصر مس در مؤلفه اول همراه با بیشتر عناصر قرار گرفته است و مقادیر U عنصر مس رفتاری کاملاً مشابه با سایر عناصر از جمله عناصر زمینه دارد. در این کلاس فرکانسی عنصر مس از سایر عناصر متمایز نشده و به‌عنوان عنصر زمینه تشخیص داده می‌شود. فرکانس‌های این کلاس را می‌توان به عنوان زمینه ژئوشیمیایی در نظر گرفت و در نقشه آنومالی ژئوشیمیایی از داده‌های دیگر فیلتر کرد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است کلاس های ۱، ۲ و ۳ به‌عنوان

کلاس ۳ مربوط به فرکانس‌های متوسط است. در این کلاس، داده‌های فرکانسی مقادیر U عناصر، به ۳ مؤلفه تقسیم می‌شوند. عنصر مس در این فرکانس‌ها در دو مؤلفه ۲ و ۳ قرار گرفته است. در مولفه سوم عنصر مس همراه با مولیبدن بهتر توانسته است از سایر عناصر متمایز شود و این مولفه با واقعیت کانی‌سازی در منطقه انطباق بهتری دارد. بنابراین در این بازه فرکانسی نیز عنصر مس تمایز رفتاری با سایر عناصر نشان می‌دهد. این تمایز رفتاری نشان دهنده این است که فرکانس‌های آماره U کاملاً متأثر از فرآیندهای کانی‌سازی هستند.

آنومالی و کلاس‌های ۴ و ۵ به‌عنوان زمینه برای طیف توان پارامتر آماره U مربوط به عنصر مش تشخیص داده شدند.

جدول ۳- نتایج روش مولفه‌های اصلی روی مقادیر طیف توان پارامتر آماره U در کلاس‌های ۲ و ۵ حاصل از روش فرکتال

مؤلفه کلاس ۵		مؤلفه کلاس ۲		مؤلفه کلاس ۲				مؤلفه کلاس ۲							
۲	۱	۲	۱	۴	۳	۲	۱	۴	۳	۲	۱				
۰/۲۲	۰/۹۸	Nb	۰/۵۹	۰/۸۱	Au	۰/۰۶	۰/۲۳	۰/۰۵	۰/۶۹	Nb	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۱۴	۰/۹۵	Au
۰/۳۰	۰/۹۵	Ni	-۰/۸۹	-۰/۴۵	Al	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۹۸	Ni	۰/۱۸	۰/۵۸	۰/۶۷	۰/۱۲	Al
۰/۱۰	۱/۰۰	P	۰/۰۸	۱/۰۰	Ca	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۹۷	P	۰/۰۹	۰/۳۱	۰/۰۷	۰/۹۳	Ca
۰/۳۸	۰/۹۳	Pb	۰/۱۷	۰/۹۹	Fe	۰/۱۶	۰/۰۱	۰/۵۴	۰/۸۰	Pb	-۰/۰۴	-۰/۰۳	۰/۴۶	۰/۸۷	Fe
۰/۳۲	۰/۹۵	Rb	۰/۲۹	۰/۹۶	K	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۹۹	Rb	۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۹۹	K
۰/۶۴	-۰/۷۷	S	۰/۱۷	۰/۹۹	Mg	-۰/۲۳	۰/۱۰	۰/۹۱	۰/۲۵	S	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۲۰	۰/۹۸	Mg
۰/۶۸	-۰/۷۴	Sb	۱/۰۰	۰/۰۶	Na	۰/۱۶	۰/۰۵	۰/۳۹	۰/۸۴	Sb	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۹۸	Na
-۰/۱۱	۰/۹۹	Sc	۰/۴۵	۰/۸۹	Ag	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۲۴	۰/۹۷	Sc	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۱۹	۰/۹۷	Ag
-۱/۰۰	۰/۰۵	Sn	-۰/۲۰	۰/۹۸	As	-۰/۰۹	۰/۳۷	۰/۸۶	۰/۰۳	Sn	-۰/۰۴	۰/۱۱	۰/۳۲	۰/۹۱	As
۰/۲۶	۰/۹۷	Sr	۰/۲۷	۰/۹۶	Ba	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۹۷	Sr	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۲۴	۰/۹۷	Ba
۰/۸۵	۰/۵۳	Te	۰/۲۹	۰/۹۶	Be	۰/۴۵	۰/۳۱	۰/۴۲	۰/۵۴	Te	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۹۸	Be
۰/۲۶	۰/۹۷	Th	۰/۳۶	۰/۹۳	Bi	-۰/۰۱	-۰/۰۳	۰/۳۷	۰/۹۲	Th	۰/۰۳	۰/۱۲	۰/۳۷	۰/۹۰	Bi
۰/۱۳	۰/۹۹	Ti	۰/۸۵	۰/۵۳	Cd	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۱۹	۰/۹۷	Ti	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۹۶	Cd
۰/۲۰	۰/۹۸	Tl	-۰/۷۲	-۰/۷۰	Ce	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۳۰	۰/۹۵	Tl	۰/۰۷	۰/۸۴	۰/۳۶	۰/۰۴	Ce
۱/۰۰	۰/۰۵	U	۰/۱۰	۱/۰۰	Co	۰/۰۹	-۰/۰۴	۰/۵۸	۰/۷۹	U	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۹۸	Co
۰/۰۱	۱/۰۰	V	۰/۳۲	۰/۹۵	Cr	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۹۸	V	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۹۶	Cr
۰/۷۱	۰/۷۰	W	-۰/۹۲	-۰/۳۹	Cs	۰/۲۹	۰/۰۳	۰/۸۵	۰/۳۰	W	۰/۲۷	۰/۱۵	۰/۸۲	۰/۱۱	Cs
۰/۰۲	-۱/۰۰	Y	۰/۴۰	۰/۹۲	Cu	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۸۵	۰/۳۸	Y	۰/۶۷	۰/۲۶	۰/۲۹	۰/۲۶	Cu
-۰/۱۵	-۰/۹۹	Yb	۰/۷۲	-۰/۶۹	La	۰/۵۸	۰/۰۴	۰/۶۹	۰/۰۴	Yb	۰/۱۳	۰/۸۷	۰/۲۴	۰/۱۸	La
۰/۰۹	-۱/۰۰	Zn	۰/۲۳	۰/۹۷	Li	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۹۱	۰/۰۷	Zn	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۹۸	Li
۰/۳۷	۰/۹۳	Zr	-۰/۹۹	-۰/۱۳	Mn	۰/۱۰	۰/۲۹	۰/۱۰	۰/۸۹	Zr	-۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۹۳	۰/۱۹	Mn
			۰/۳۵	۰/۹۴	Mo						۰/۲۰	۰/۰۴	۰/۲۶	۰/۹۲	Mo

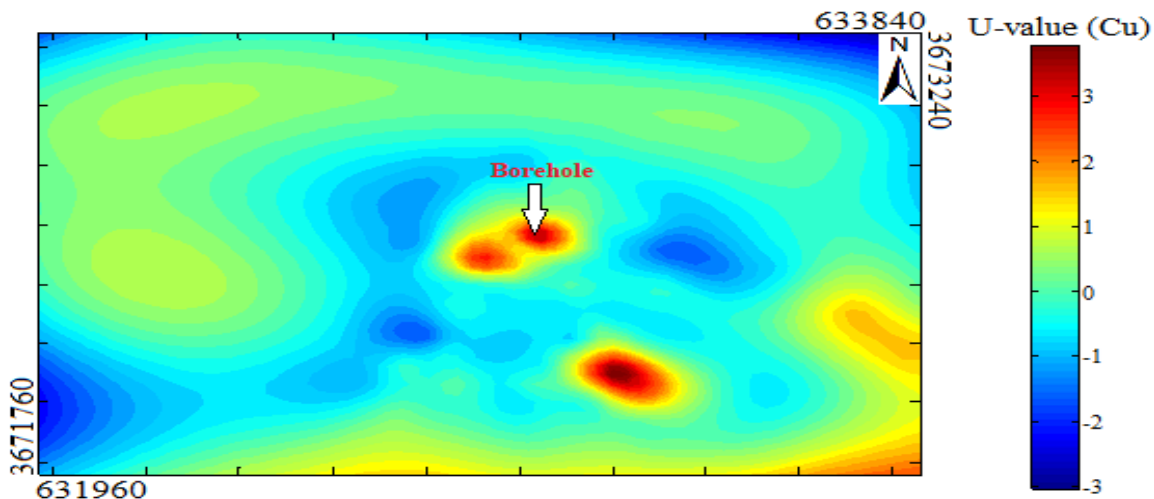
شد این دو کلاس فرکانسی اثر قوی از کانی‌سازی را نشان نمی‌دهند و بیشتر مرتبط با زمینه ژئوشیمیایی هستند. فرکانس‌هایی که مقدار طیف توان کمتر از ۵۶۶۷۱۲ دارند، به عنوان فرکانس‌های متأثر از فرآیند کانی‌سازی از سایر فرکانس‌ها جدا شده و با استفاده از تبدیل فوریه معکوس دو بعدی به حوزه مکان انتقال داده شدند. نقشه حاصل، نقشه آنومالی ژئوشیمیایی مربوط به این فرکانس‌ها است که در شکل (۵) نشان داده شده است. در این نقشه، فرکانس‌های زمینه ژئوشیمیایی حذف شده و محل آنومالی‌ها را به صورت محلی‌تر نشان داده شده‌اند. از این نقشه برای طراحی حفاری‌های عمیق در اکتشاف تفصیلی یا برداشت‌های ژئوفیزیکی می‌توان استفاده

#### ۴-۴- ترسیم نقشه آنومالی مقادیر طیفی آماره U با استفاده از تبدیل معکوس فوریه

بر اساس نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی، کلاس‌های فرکانسی ۱، ۲ و ۳ دارای اطلاعات مهم اکتشافی در مورد کانی‌سازی مس می‌باشند که به برای شناسایی عناصر کانی‌سازی و تهیه نقشه آنومالی ژئوشیمیایی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. بر اساس روش فرکتالی طیف توان-مساحت مقادیر U عنصر مس، فرکانس‌های آنومالی و زمینه از یکدیگر تفکیک شدند. با تفکیک این فرکانس‌ها از یکدیگر نقشه آنومالی بدست آمد. با استفاده از فیلتر بالاگذر، فرکانس‌های مربوط به کلاس ۴ و ۵ (فرکانس پایین) از داده‌ها حذف شدند. همان‌طور که بیان

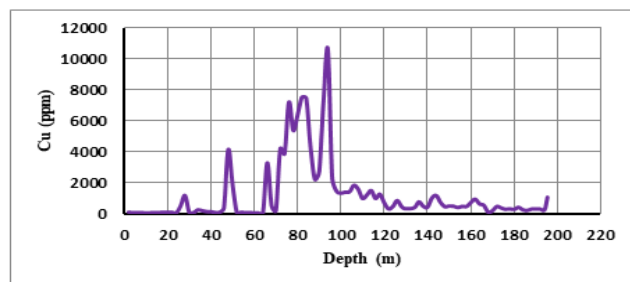
کرد. در این نقشه، دو آنومالی محلی و تفصیلی در مرکز و در جنوب مشاهده می‌شود. این آنومالی‌ها در مرکز سیستم پورفیری در منطقه ظفرقند جنوبی قرار گرفته‌اند. در محدوده آنومالی‌های ژئوشیمیایی به‌دست آمده، آلتراسیون فیلیک به صورت قوی در داخل سنگ‌های داسیت پورفیری و کوارتز دیوریت مشاهده می‌شود که در آن میزان کانی‌سازی اکسید آهن بویژه هماتیت و استوک ورک‌های حاوی کوارتز و اکسید آهن بالاست. هماتیت‌های حاصل از هوازدگی سولفیدها در این قسمت به صورت باکس‌ورک در زون آلتراسیون فیلیک مشاهده می‌شود. در محدوده آنومالی‌های ژئوشیمیایی مس میزان شدت میدان مغناطیسی بر اساس مطالعات ژئوفیزیکی که انجام شده پایین است. میزان پلاریزاسیون القایی روی آنومالی‌ها بالا بوده که وجود یک زون کانی‌سازی پنهان را نشان می‌دهد. تعداد ۴

حفاری مغزه‌ای در منطقه ظفرقند جنوبی انجام گرفته که در این حفاری‌ها دو زون سوپرژن و هیپوژن شناسایی شده‌اند. زون سوپرژن در طول ۳۲ متر دارای عیار متوسط ۰/۵ درصد مس و در طول ۶۰ متر دارای عیار متوسط ۱۴۰ گرم در تن مولیبدن می‌باشد. زون هیپوژن نیز دارای عیار متوسط مس ۰/۳ درصد در طول ۱۰۰ متر حفاری می‌باشد. حفاری شماره (۴) بر روی آنومالی مرکزی منطقه با عمق حدود ۲۰۰ متر انجام گرفته که در اعماق ۷۰ تا ۱۰۰ متر وجود یک کانی‌سازی پنهان و عمیق را نشان می‌دهد (شکل ۶). این حفاری به خوبی کیفیت آنومالی حاصل از روش فرکتال بر روی مقادیر U را در حوزه فرکانس نشان می‌دهد. در این حفاری زون کانی‌سازی در اعماق ۷۰ تا ۱۰۰ متر دارای عیار متوسط ۰/۴۷ درصد مس ۱۱۴ گرم بر تن مولیبدن می‌باشد.



شکل ۵- نقشه آنومالی مقادیر U مربوط به عنصر مس حاصل از فرکانس‌های کلاس‌های ۱، ۲ و ۳ روش فرکتال با استفاده از تبدیل معکوس فوریه

به‌گونه‌ای عمل می‌کند که تا حدودی هموارسازی بر روی داده‌ها انجام گرفته و فرکانس‌های خیلی بالا که ممکن است ناشی از خطای نمونه‌برداری یا آنالیز باشند را از بین می‌برد. مقادیر U برای تمام ۴۳ عنصر از جمله عنصر مس در منطقه محاسبه شد و با استفاده از روش تبدیل فوریه دوبعدی این مقادیر U به حوزه فرکانس انتقال یافت. با استفاده از روش فرکتال در حوزه فرکانس، مقادیر طیف توان به‌دست آمده از توزیع مقادیر U، بررسی شد. روش فرکتال این مقادیر طیف توان مقادیر U را در ۵ کلاس فرکانسی تفکیک کرد. برای تعیین مؤلفه‌های کانی‌سازی در هر یک از کلاس‌های فرکانسی، این کلاس‌ها بر اساس مقادیر حد آستانه‌ای حاصل از روش فرکتال به پنج کلاس تفکیک و با استفاده از فیلترهای مختلف از یکدیگر جدا شدند.



شکل ۶- تغییرات غلظت عناصر مس در اعماق مختلف و وجود زون کانی‌سازی عمیق در حفاری DDH04

##### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور تعیین مناطق آنومالی عنصر مس، ویژگی‌های طیفی آماره U مربوط به ۴۳ عنصر در منطقه کانی‌سازی مس پورفیری ظفرقند تحلیل شد. روش آماری U

## منابع

- [1] Bølviken, B., Stokke, P., Feder, J. and Jøssang, T., 1992, The fractal nature of geochemical landscapes. *Journal of Geochemical exploration*, 43: 91-109.
- [2] Cheng, Q., Agterberg, F. and Ballantyne, S., 1994, The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51: 109-130.
- [3] Cheng, Q., 1999, Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical exploration*, 65: 175-194.
- [4] Cheng, Q., Xu, Y. and Grunsky, E., 2000, Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation. *Natural Resources Research*, 9: 43-52.
- [5] Gonçalves, M.A., Mateus, A. and Oliveira, V., 2001, Geochemical anomaly separation by multifractal modelling. *Journal of Geochemical Exploration*, 72: 91-114.
- [6] Li, C., Ma, T. and Shi, J., 2003, Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background. *Journal of Geochemical Exploration*, 77: 167-175.
- [7] Lima, A., De Vivo, B., Cicchella, D., Cortini, M. and Albanese, S., 2003, Multifractal IDW interpolation and fractal filtering method in environmental studies: an application on regional stream sediments of (Italy), Campania region. *Applied geochemistry*, 18: 1853-1865.
- [8] Zuo, R., Cheng, Q. and Xia, Q., 2009, Application of fractal models to characterization of vertical distribution of geochemical element concentration. *Journal of Geochemical Exploration*, 102: 37-43.
- [9] Ghavami-Riabi, R., Seyedrahimi-Niaraq, M., Khalokakaie, R. and Hazareh, M., 2010, U-spatial statistic data modeled on a probability diagram for investigation of mineralization phases and exploration of shear zone gold deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 104: 27-33.
- [10] Afzal P, Khakzad A, Moarefvand P, Omran NR, Esfandiari B, Alghalandis YF (2010) Geochemical anomaly separation by multifractal modeling in Kahang (Gor Gor) porphyry system, Central Iran. *J Geochem Explor* 104:34-46.
- [11] Afzal P, Alghalandis YF, Khakzad A, Moarefvand P, Omran NR (2011) Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling. *J Geochem Explor* 108: 220-232.

کلاس‌های فرکانسی به‌صورت مجزا با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی که روشی چند متغیره و کارآمد برای تعیین فاکتورها و پدیده‌های مختلف کانی‌سازی و زمین‌شناسی است، مورد تحلیل قرار گرفتند. عنصر مس در کلاس‌های ۱، ۲ و ۳ که حاوی فرکانس‌های بالا و متوسط است، به‌صورت مناسبی از سایر عناصر تفکیک شد و در مؤلفه کانی‌سازی قرار گرفت. این نتایج نشان داد که فرآیند کانی‌سازی مس به‌طور قابل توجهی بر روی این کلاس‌های فرکانسی اثر گذاشته و نقشه توزیع مقادیر U عنصر مس در این طیف‌های فرکانسی با آنومالی ژئوشیمیایی ارتباط معناداری دارد. در کلاس‌های فرکانسی ۴ و ۵، رفتار عنصر مس در نقشه توزیع مقادیر U با رفتار سایر عناصر از جمله عناصر زمینه مشابه بود. بنابراین، در این کلاس‌ها این عنصر از سایر عناصر تفکیک نشد. این کلاس‌های فرکانسی خیلی متأثر از فرآیندهای کانی‌سازی نبوده و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان زمینه در نظر گرفت. بعد از تعیین ماهیت این کلاس‌های فرکانسی و نحوه ارتباط آن‌ها با زمینه و آنومالی ژئوشیمیایی، اقدام به جداسازی کلاس‌های ۱، ۲ و ۳ با استفاده از فیلتر بالاگذر از کلاس‌های ۴ و ۵ کرده و نقشه آنومالی این ۳ کلاس فرکانسی با استفاده از تبدیل معکوس فوریه دو بعدی بدست آمد. در نقشه حاصل از گروه‌های فرکانسی، دو آنومالی‌های محلی در مرکز و جنوب منطقه، به‌منظور انجام مطالعات اکتشافات تفصیلی معرفی شد. در محدوده آنومالی‌های ژئوشیمیایی به‌دست آمده، آلتراسیون فیلیک به‌صورت قوی در داخل سنگ‌های داسیت پورفیری و کوارتز دیوریت مشاهده می‌شود که در آن میزان کانی‌سازی اکسید آهن بویژه هماتیت و استوک ورک‌های حاوی کوارتز و اکسید آهن بالاست. یک حفاری عمیق که روی آنومالی به‌دست آمده از این روش که در اعماق حدود ۷۰ تا ۱۰۰ متر به زون کانی‌سازی برخورد کرده است. نتیجه این حفاری به‌خوبی تأیید کننده منطقه آنومالی حاصل از روش تحلیل طیفی مقادیر U را نشان می‌دهد.

## پی‌نوشت

- 1- Power Spectrum – Area Fractal (S-A fractal)
- 2- Principal Component Analysis (PCA)
- 3- U-Spatial Statistics Method
- 4- Moving Average
- 5- MATLAB
- 6- Generalized Scale Invariance (GSI)

lithochemical and geophysical data to identify the buried mineralized area in Cu-Au porphyry of Dalli-Northern Hill. *Arabian Journal of Geosciences*, 6: 4499-4509.

[22] Sadeghi, B., Moarefvand, P., Afzal, P., Yasrebi, A. B., Saein, L. D. (2012). Application of fractal models to outline mineralized zones in the Zaghia iron ore deposit, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 122, 9-19.

[23] Meigoony, M. S., Afzal, P., Gholinejad, M., Yasrebi, A. B., & Sadeghi, B. (2014). Delineation of geochemical anomalies using factor analysis and multifractal modeling based on stream sediments data in Sarajeh 1: 100,000 sheet, Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(12), 5333-5343.

[24] Zuo, R., Wang, J., Chen, G., & Yang, M. (2015). Identification of weak anomalies: A multifractal perspective. *Journal of Geochemical Exploration*, 148, 12-24.

[25] Zuo, R., & Wang, J. (2016). Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review. *Journal of Geochemical Exploration*, 164, 33-41.

[26] Hassani, H., Daya, A., & Alinia, F. (2009). Application of a fractal method relating power spectrum and area for separation of geochemical anomalies from background, *Aust J Basic Appl Sci*, 3(4), 3307-3320.

[27] Afzal, P., Harati, H., Fadakar Alghalandis, Y., Yasrebi, A.B., (2013). Application of spectrum-area fractal model to identify of geochemical anomalies based on soil data in Kahang porphyry-type Cu deposit, Iran. *Chemie der Erde/Geochemistry*, 73: 533- 543.

[28] Afzal, P., Heidari, S.M., Ghaderi, M., Yasrebi, A.B., (2017). Determination of mineralization stages using correlation between geochemical fractal modeling and geological data in Arabshah sedimentary rock-hosted epithermal gold deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 91: 278-295.

[29] Fyzollahi, N., Torshizian, H., Afzal, P., Jafari, M.R., (2018). Determination of lithium prospects using fractal modeling and staged factor analysis in Torud region, NE Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 189: 2-10.

[30] Shahi, H., Ghavami, R., Kamkar Rouhani, A. and Asadi Haroni, H., (2014). Identification of mineralization features and deep geochemical anomalies using a new FT-PCA approach. *Geopersia*, 4(2), pp.227-236.

[31] Shahi, H., Ghavami Riabi, R., Kamkar Ruhani, A. and Asadi Haroni, H., (2015).

[12] Yousefi, M. and Carranza, E.J.M., 2015, Prediction-area (P-A) plot and C-A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling. *Computers & Geosciences*, 79: 69-81.

[13] Ghannadpour, S.S. and Hezarkhani, A., 2016, Introducing 3D U-statistic method for separating anomaly from background in exploration geochemical data with associated software development. *Journal of Earth System Science*, 125: 387-401.

[14] Ghasemzadeh, S., Maghsoudi, A., Yousefi, M. and Mihalasky, M.J., 2019, Stream sediment geochemical data analysis for district-scale mineral exploration targeting: Measuring the performance of the spatial U-statistic and CA fractal modeling. *Ore Geology Reviews*: 103115.

[15] Liu, Y., Cheng, Q., Carranza, E.J.M. and Zhou, K., 2019, Assessment of geochemical anomaly uncertainty through geostatistical simulation and singularity analysis. *Natural Resources Research*, 28: 199-212.

[۱۶] حسنی پاک، ع.، ۱۳۸۰، تحلیل داده‌های اکتشافی،

انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

[۱۷] سیدرحیمی نیارق، م.م.، قوامی ریابی، ر.، خالوکاکایی،

ر.، هزاره، م.ر.، هندی، ر.، ۱۳۹۰، مقایسه نتایج حاصل از مدل-سازي داده‌های ژئوشیمیایی کانی‌سازی طلا بر روی نمودارهای احتمال و فرکتالی غلظت - مساحت (C-A) در جداسازی زیر جوامع، نشریه علمی پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، دوره اول، شماره دوم، ۳۱-۲۴ ص.

[18] Afzal, P., Mirzaei M., Yousefi, M., Adib, A., Khalajmasoumi, M., Zarifi, A.Z., Foster, P., Yasrebi, A.B., 2016. Delineation of geochemical anomalies based on stream sediment data utilizing fractal modeling and staged factor analysis. *Journal of African Earth Sciences*, 119, 139-149.

[19] Cheng, Q., Agterberg, F. and Bonham-Carter, G., 1996, A spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration*, 56: 183-195.

[20] Seyedrahimi-Niaraq, M., Hekmatnejad, A., (2020). The efficiency and accuracy of probability diagram, spatial statistic and fractal methods in the identification of shear zone gold mineralization: a case study of the Saqqez gold ore district, NW Iran, *Acta Geochimica*, DOI: 10.1007/s11631-020-00413-7.

[21] Darabi-Golestan, F., Ghavami-Riabi, R., Khalokakaie, R., Asadi-Haroni, H. and Seyedrahimi-Niaraq, M., 2013, Interpretation of

- [44] Brigham, E.O., (1974). The Fast Fourier Transform. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- [45] Cheng, Q., (2006). Multifractal modelling and spectrum analysis: Methods and applications to gamma ray spectrometer data from southwestern Nova Scotia, Canada. *Science in China Series D*, 49(3), 283-294.
- [46] Zuo, R. (2012). Exploring the effects of cell size in geochemical mapping, *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 357-367.
- Prediction of mineral deposit model and identification of mineralization trend in depth using frequency domain of surface geochemical data in Dalli Cu-Au porphyry deposit. *Journal of Mining and Environment*, 6(2), pp.225-236.
- [32] Shahi, H., Ghavami, R., Rouhani, A.K., Kahoo, A.R. and Haroni, H.A., (2015). Application of Fourier and wavelet approaches for identification of geochemical anomalies. *Journal of African Earth Sciences*, 106, pp.118-128.
- [33] Shahi, H., Ghavami, R. and Rouhani, A.K. (2016). Detection of deep and blind mineral deposits using new proposed frequency coefficients method in frequency domain of geochemical data, *Journal of Geochemical Exploration*, 162, pp.29-39.
- [34] Shahi, H., (2017). Prediction of dispersed mineralization zone in depth using frequency domain of surface geochemical data, *Journal of Mining and Environment*, 8(3), pp.433-446.
- [35] Cheng, Q., & Zhao, P. (2011). Singularity theories and methods for characterizing mineralization processes and mapping geo-anomalies for mineral deposit prediction, *Geoscience Frontiers*, 2(1), 67-79.
- [36] Zuo, R. (2011). Identifying geochemical anomalies associated with Cu and Pb-Zn skarn mineralization using principal component analysis and spectrum-area fractal modeling in the Gangdese Belt, Tibet (China). *Journal of Geochemical Exploration*, 111(1-2), 13-22.
- [37] Zuo, R., Carranza, E. J. M., & Cheng, Q. (2012). Fractal/multifractal modelling of geochemical exploration data.
- [38] Jolliffe, I.T., (2002). *Principal Component Analysis*, 2nd edn. Springer, New York, 547 NY. 487 pp.
- [39] Asadi Haroni, H. (2013). Preliminary exploration at Zafarghand Porphyry Copper Property, Central Iran, exploration report.
- [40] Asadi Haroni H. (2008). First Stage Drilling Report on Dalli Porphyry Cu-Au Prospect, Central Province of Iran, technical Report.
- [41] Akbarpour, A., Gholami, N., Azizi, H., Mohammad Torab, F., 2013. Cluster and R mode factor analyses on soil geochemical data of Masjed-Daghi exploration area, northwestern Iran, *Arab J Geosci*, 6:3397-3408.
- [42] Lin, Y.P., (2002). Multivariate geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil heavy metals. *Environ. Geol.* 42, 1-10.
- [43] Jennison, R.C., (1961). *Fourier Transforms and Convolutions*, Pergamon Press, NY.