

## بررسی و تهیه نقشه پتانسیل مطلوب کانی سازی پنهان مس-طلا دار پورفیری ورقه های یکصد هزارم بصیران و کودگان

منصور ضیایی<sup>۱\*</sup>، علی شبانی<sup>۱</sup>، مهرداد سلیمانی منفرد<sup>۱</sup>، عارف شیرازی<sup>۲</sup>، سیدامیرعلی حامدی<sup>۲</sup>

۱- گروه معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

\*عهده‌دار مکاتبات: [m.ziaii47@gmail.com](mailto:m.ziaii47@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

DOI: [10.22034/ANM.2023.18917.1568](https://doi.org/10.22034/ANM.2023.18917.1568)

این نسخه "پذیرفته شده پیش از انتشار" مقاله است که در نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، پس از طی فرآیند داوری، برای چاپ، قابل پذیرش تشخیص داده شده است. این نسخه پس از اعلام پذیرش و قبل از فرآیند ویراستاری به صورت آنلاین منتشر می‌شود. مقاله پس از طی فرآیند آماده سازی و انتشار نهایی، از نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار خارج و در شماره‌ای مشخص در وب سایت نشریه منتشر می‌شود. صفحه آرایی و ویراستاری فنی باعث ایجاد تغییرات صوری در مقاله خواهد شد.

### چکیده

این مطالعه در کمربند متالوژنی قلعه زری - ده سلم متعلق به ورقه اصلی بصیران و کودگان صورت پذیرفت. نقشه پتانسیل مطلوب خاص ذخایر پنهان مس طلا دار پورفیری با استفاده از داده های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه ای، ساختاری، زمین شناسی و پراگندگی اندیس ها تهیه شد. از روش های ترکیبی زونالیته ژئوشیمیایی، سینگلاریتی و سلسله مراتبی فازی (AHP) استفاده گردید.

در این تحقیق از روش کلان داده های ژئوشیمیایی برای ارزیابی منظرهای ژئوشیمیایی خشک و کویری جهت آشکار سازی آنومالی های پنهان و عمیق که دگرسانی ضعیف دارند استفاده گردید از ۵۲۰۰ کیلومتر مربع ۴۹۰ کیلومتر پتانسیل دار جدا شد و ۱۷ اندیس از ۲۲ اندیس کانی سازی شده در مناطق پتانسیل دار واقع شده اند

### کلمات کلیدی

زونالته، مس-طلا پورفیری، بصیران، کودگان، تلفیق سلسله مراتبی، AHP

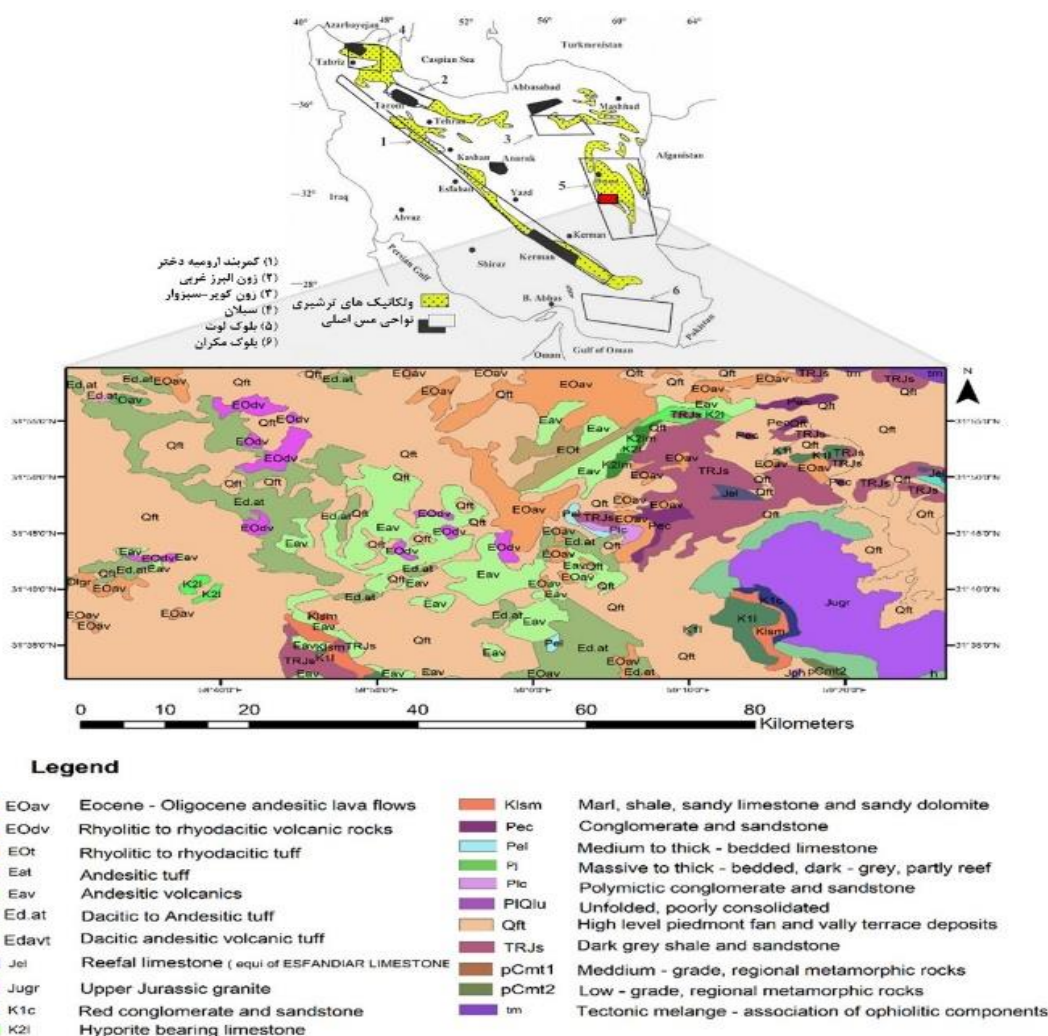
مس در منطقه معدنی واقع در غرب چین روش سینگولاریتی را بکار بردند. در نقشه‌ی پراکندگی‌های ژئوشیمیایی، آنومالی‌های ضعیف در زیر مجموعه‌هایی از این منطقه را به دلیل زمینه بالا در مناطق مجاور تشخیص داده نشد. از این رو آن‌ها با بکارگیری از روش سینگولاریتی توانستند اثر زمینه را حذف کرده و همچنین آنومالی ضعیف را در بخش‌هایی با مقدار زمینه‌ی بالا مشخص کنند [۱۰]. لیو و همکاران (۲۰۱۴) ذخیره‌ی مس اسکارنی را که در ایالت انهوی چین در عمق ۸۰۰ متری از سطح زمین واقع شده است مطالعه کردند. در این پژوهش با نمونه برداری از سطح و عمق و با ایجاد شبکه ۵۰ متر در ۲۰۰ متر سه بعدی منظم با مشاهده‌ی تغییرات غلظت عناصر از سطح به سمت ماده‌ی معدنی در عمق، گزارش کردند که عیار مس و نقره از عمق ۲۰۰ متری به سمت ماده‌ی معدنی افزایش و غلظت سرب و آرسنیک با فاصله گرفتن از سطح کاهش می‌یابد [۱۱]. صفری و ضیایی (۲۰۱۸) با مطالعه در منطقه‌ی کرور استان کرمان با استفاده از شاخص زونالیت و روش تکینگی (سینگولاریتی) آنومالی‌های ضعیف مس در منطقه را شناسایی کردند [۱۱]. از این رو، این مطالعه، پیشبردی را برای تجمیع کلیدهای اکتشافی و تلفیقی به منظور نقشه‌ای واحد اکتشافی ارائه می‌نماید.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

بلوک لوت با طول حدودی ۹۰۰ کیلومتر در بخش شرقی ایران قرار دارد که مرز شرقی آن را گسل نهبندان و حوضه فلیش شرو ایران و مرز غربی آن را گسل نایبند و بلوک طبس مشخص کرده‌اند. مرز شمالی این بلوک به فروافتادگی جنوب کاشمر و مرز جنوبی آن به فرونشست جازموریان بسته می‌شود. منطقه مورد مطالعه شامل منطقه بصیران، میغان، قلعه زری و کودگان در شمال دهسلم و در جنوب این کمربند قرار دارد. در شکل ۱ منطقه قرارگیری این محدوده و همچنین نقشه ساده شده زمین‌شناسی، شرح داده شده است [۱۲].

این منطقه در نواحی شرقی بلوک لوت واقع شده است. مهم‌ترین ویژگی شرق لوت که آن را از دیگر بخش‌های خرد قاره ایران مرکزی جدا میکند، وجود حجم عظیم ماگماتیسم ترشیاری، به ویژه سنگ‌های آتشفشانی است که با داشتن ضخامتی در حدود ۲۰۰۰ متر بیش از نیمی از بلوک لوت را می‌پوشاند. وجود فعالیت ماگمایی گستره

با افزایش تقاضا برای مواد اولیه، ارائه راهکارهای موثر برای اکتشاف مواد معدنی از ضروریات علوم زمین قلمداد می‌شود. روش‌های متنوع دوربرد و زمینی مانند سنجش از دور و انواع روش‌های ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی برای شناسایی ذخایر استفاده می‌شوند [۱۹]. ژئوشیمی از گام‌های اصلی یک فرآیند اکتشافی است. از شاخص‌های اصلی ژئوشیمی اکتشافی، شناسایی ذخایر پنهان و الگوهای مهاجرت شیمیایی است [۱]. بر همین اساس روش‌های اکتشافی ژئوشیمیایی به منظور شناسایی ذخایر با عمق بالا دست‌خوش پیچیدگی‌های فراوان شده است [۵]. ژئوشیمی معدن شاخه‌ای از ژئوشیمی کاربردی محسوب می‌شود که فرآیندهای ژئوشیمیایی را از لحظه تشکیل ماده معدنی تا جدیدترین فرآیندهای ثانویه (مهاجرت عناصر ناشی از عمل پدیده‌های ساخت بشر) مطالعه می‌کند [۶]. این مهاجرت‌ها در سیستم‌های ژئوسفر (لیتوسفر-هیدروسفر-بیوسفر-اتمسفر و ژئوسفر) زونالیت و ژئوشیمیایی عناصر را از فرم میکرو (کانی‌ها) تا ماکرو (کانسارها) در میدان‌های ژئوشیمیایی ایجاد می‌کند. بر حسب ساز و کار مهاجرت (مکانیکی، فیزیکوشیمیایی، بیوژنی، تکنولوژیکی) سیستم‌ها و سدهای متفاوت ژئوشیمیایی سازنده انواع اصلی دورنمای ژئوشیمیایی‌اند. بنابراین بررسی مطالعه ترمودینامیک فرآیندهای ژئوشیمیایی نقش اساسی را در درک این مهاجرت‌ها و آرایه مدل هر یک از این سیستم‌ها دارد [۷]. ذخایر پورفیری جزو اصلی‌ترین منابع تامین مس، مولیبدن، طلا و نقره در جهان است. همچنین فلزهای جانبی عمدتاً در ذخایر پورفیری یافت می‌شود [۸]. هاله‌های اولیه ذخایر معدنی که در نتیجه فعل و انفعالات بین سنگ میزبان و سیال کانی ساز بوجود می‌آید، با تهی‌شدگی یا غنی‌شدگی عناصر و فلزات و یا آلتراسیون‌ها مشخص می‌شوند [۹]. همواره ارائه مدلی کارآمد جهت شناسایی کانی‌زایی‌های پنهان مرتبط با ذخایر پورفیری چالشی اساسی در مناطق با پتانسیل کانی‌زایی مس بوده است. منطقه بصیران-کودگان که از نواحی با احتمال کانی‌زایی فلزی بالا، با توجه به وجود رخدادهای معدنی متعدد در منطقه، نیازمند شناسایی نواحی مستعد اکتشاف مس برای مطالعات دقیق‌تر است. این منطقه که در بلوک لوت و زون سیستان واقع است می‌تواند رفتار ژئوشیمیایی خود را با روش زونالیت برای پرسپکتیو اکتشافی در مرحله پی‌چویی نشان دهد. زو و همکاران (۲۰۰۹) [۱۰] برای تشخیص ذخایر



شکل ۱ موقعیت منطقه ی مورد مطالعه در شرق ایران و نقشه زمین شناسی بصیران و کودگان با مقیاس یکصد هزارم

براساس این پردازش‌ها، اطلاعات مربوط به داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه ای در بخش‌هایی که احتمال کانی‌سازی بیشتری وجود داشت، بی‌هنجاری عناصر مس، روی، سرب، قلع، تنگستن و طلا و در جنوب غرب نیز بی‌هنجاری‌های قلع، تنگستن، روی، سرب و آهن شناسایی شده است [۱۵، ۱۷]. محدوده بصیران و کودگان در ۳۰۰ کیلومتری جنوب جنوب غربی بیرجند بخشی از مجموعه ماگماتیسم ترشیاری است که میزبان کانی‌سازی‌های ایپ‌ترمال شده است. مطابق شکل (۱) زمین‌شناسی محدوده شامل سنگ‌های رسوبی و دگرگون شده کرتاسه و واحدهای آتشفشانی ائوسن است که مورد نفوذ توده‌های مونزونیتی تا دیوریتی با سن ائوسن تا الیگوسن قرار گرفته‌اند ترسیم شده. پردازش تصویر ماهواره ای همچنین کانی‌های کائولینیت، سرسیت، کوارتز، کلریت آهن دار، کلریت منیزیم دار و اپیدوت را بارز کرده است [۱۵، ۱۸].

با ویژگی‌های ژئوشیمیایی متفاوت در نقاب مختلف باعث شده است تا بلوک لوت پتانسیل بسیار مناسبی برای تشکیل انواع کانی‌سازی‌های فلزی و غیر فلزی داشته باشد [۱۳، ۱۴]. منطقه مورد مطالعه در شمال شرقی بلوک لوت و از بخش غربی کمربند متالوژنی قلعه زری-دهسلم می‌باشد که ورق یکصد هزار بصیران و کودگان را در بر می‌گیرد. در این منطقه سنگ‌های نفوذی و نیمه نفوذی حد واسط تا اسیدی در واحدهای آتشفشانی ائوسن الیگوسن نفوذ کرده و از مناطق امیدبخش برای کانی‌سازی است. شناسایی مناطق احتمالی کانی‌سازی به کمک پردازش تصاویر ماهواره‌ای، وجود دگرسانی‌های پروپیلیتیک، آرژیلیک، سرسیتیک و تشکیل اکسیدهای آهن را در منطقه نشان می‌دهد [۱۵، ۱۶].

کانسار به غلظت این عناصر در قسمت‌های پایینی کانسار به دست می‌آید [۱۰].

به منظور تعدیل پارامترهای سین‌زنتیک درهاله‌های ژئوشیمیایی و جداسازی بخش مطلوب از بخش نامطلوب، سالوف و گریگوریان از شاخص زونالیته و شاخص کانی سازی استفاده نمودند [۲۲]. در شبکه سیستماتیک نمونه برداری تولید خطی در یک پروفیل طولی از (رابطه ۱) و تولید سطحی آن از (رابطه ۲) پیروی می‌کند.

$$M = \Delta x \left( \sum_{x=1}^n C_x - nC_0 \right) \quad (1)$$

$$P = 2l \sum_{i=1}^m M_i \quad (2)$$

در این روابط  $M$  و  $P$  به ترتیب تولید خطی و تولید سطحی،  $\Delta x$  فاصله بین نمونه‌ها در طول پروفیل،  $Cx$  غلظت هر نمونه آنومال،  $n$  تعداد نمونه‌های آنومال،  $C$  غلظت زمینه  $2l$  فاصله بین دو پروفایل و  $m$  تعداد پروفایل‌ها است. شاخص زونالیته از نسبت تولید سطحی عناصر فوق کانساری به تولید سطحی عناصر تحت کانساری در هر آنومالی موجود به وسیله‌ی (رابطه ۳) و (رابطه ۴) به دست می‌آید.

$$k_{P_1} = \frac{P(Pb) \times P(Zn)}{P(Cu) \times P(Mo)} \quad (3)$$

$$k_{P_2} = \frac{P(Pb) \times P(Zn)}{P(Cu) \times P(Ag)} \quad (4)$$

به منظور استحصال شاخص زونالیته به روش گریگوریان بایستی ضریبی تحت عنوان ضریب کانی سازی برای هر عنصر در شاخص زونالیته ضرب شود. اگر کل نمونه‌های یک زون برابر  $\eta_a(a)$  و تعداد نمونه‌های آنومالی برابر  $\eta_a(a)Ore$  در نظر گرفته شود نسبت بین این دو شاخص به عنوان ضریب کانی سازی معرفی می‌شود که مطابق رابطه (۵) می‌باشد.

$$\eta(\alpha) = \frac{\eta_a(\alpha)ore}{\eta_a(\alpha)} \quad (5)$$

این ضریب برابر با مقدار نمونه‌های آنومال مربوط به هر عنصر در هر کدام از زون‌ها نسبت به تعداد نمونه‌های موجود در زون تفکیک شده می‌باشد. مقدار ضریب کانی سازی برای هر عنصر باید در میانگین غلظت آن عنصر ( $CA$ ) در هر آنومالی ضرب شود و در فرمول شاخص زونالیته رابطه (۶) و (۷) قرار گیرد.

ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی از عناصر مس، سرب، روی و آرسنیک در کلیه آبراهه‌های منطقه مشاهده می‌شود. آثار کانی سازی نیز در برخی مناطق وجود دارد. با نفوذ واحدهای نیمه عمیق به داخل سنگ‌های آتشفشانی و کربناته به شدت آثره شده و ناهنجاری‌های زمین‌شناسی ایجاد شده و کانی‌سازی‌های مختلف در آن شکل گرفته است [۱۳، ۱۹].

### ۳- روش‌شناسی

#### ۳-۱- تئوری زونالیته

زون‌بندی هاله ژئوشیمیایی یک طبیعت فضایی و مفهومی جهت‌ی است که می‌توان با سه پارامتر بعد (فضا)، جهت و غلظت عنصر تعریف شود [۲۰]. در اطراف یک توده کانسار سه نوع طبقه‌بندی هاله اولیه در جهت طولی، عرضی و محوری وجود دارد. در کانسارهایی با شیب زیاد منطقه‌بندی محوری منطبق بر منطقه‌بندی قائم است و در کانسارهایی با شیب کم بر منطقه‌بندی افقی منطبق می‌باشد [۲۱]. بئوس و گریگوریان چندین روش تجربی را برای منطقه‌بندی کمی هاله‌های ژئوشیمیایی در مقطع محوری معرفی کردند. یکی از روش‌هایی که در پژوهش‌های زمین‌شناسی استفاده می‌شود بررسی میانگین نسبت غلظت به عنوان تابعی از عمق در مقطع عمودی است [۲۱]. روش دیگر محاسبه تولید خطی است که به دلیل گسترده تر بودن داده‌های سطحی به این روش توجه بیشتری شده است و با کاربرد آن هاله‌ها به طور بارزتری مشخص می‌شوند. استفاده از قدرت تولید خطی به جای نسبت مقدار میانگین عناصر اولین بار توسط سوچوانوف<sup>۱</sup> برای مطالعه منطقه‌بندی‌ها در مقاطع عرضی پیشنهاد شد. در این روش عرض هاله‌های ژئوشیمیایی در اعماق مختلف در نظر گرفته می‌شود [۳۴].

#### ۳-۲- زونالیته ژئوشیمیایی

در ژئوشیمی اکتشافی قابل اطمینان ترین ملاک برای تشخیص هاله‌های اولیه فوق کانساری، سطح فرسایش نهشته و عمق احتمالی آن از طریق منطقه‌بندی اندیس‌های کانسار است. منطقه‌بندی عنصری براساس محاسبه شاخص زونالیته به کار می‌رود (شکل ۳) شاخص زونالیته از نسبت غلظت عناصر معرف در قسمت‌های بالایی

<sup>۱</sup> Sochevanov

روش سینگولاریتی با بررسی تغییرات غلظت عنصر با تغییر مساحت، تهی شدگی و غنی شدگی عناصر مشخص می‌شود در (شکل ۲) رابطه فرکتالی بین این متغیرها از رابطه‌های زیر به دست می‌آید.

$$\mu(A) = aA^{\frac{a}{2}} \quad (۸)$$

$$C(A) = aA^{\frac{a}{2}-1} \quad (۹)$$

که در آن :

$\mu(A)$  مقدار کل فلز در سطح  $A$

$C(A)$  چگالی فلز در مساحت  $A$

$a$  مقدار سینگولاریتی محلی

$$KC1 = \frac{\eta(a)Pb \times \overline{CAPb} \times \eta(a)Zn \times \overline{CAZn}}{\eta(a)Cu \times \overline{CACu} \times \eta(a)Mo \times \overline{CAMo}} \quad (۶)$$

$$KC2 = \frac{\eta(a)Pb \times \overline{CAPb} \times \eta(a)Zn \times \overline{CAZn}}{\eta(a)Cu \times \overline{CACu} \times \eta(a)Ag \times \overline{CAAg}} \quad (۷)$$

ضیایی و کارنزا در مطالعات شاخص مدلی را به منظور تشخیص تغییرات روند این شاخص نسبت عمق طراحی نمودند که در ادامه شرح داده شده است [۶].

### ۳-۳- روش تکینگی (سینگولاریتی)

برای تعیین  $\alpha$  مربع‌هایی با مرکز ثابت در اندازه‌های  $\epsilon_i = (2i-1) \epsilon_{min}$  در نظر گرفته می‌شود.

$$\epsilon_{min} = \epsilon_1 < \epsilon_2 < \dots < \epsilon_n \quad (۱۰)$$

$$= \epsilon_{max}(i = 1, 2, 3, \dots n)$$

که در آن :

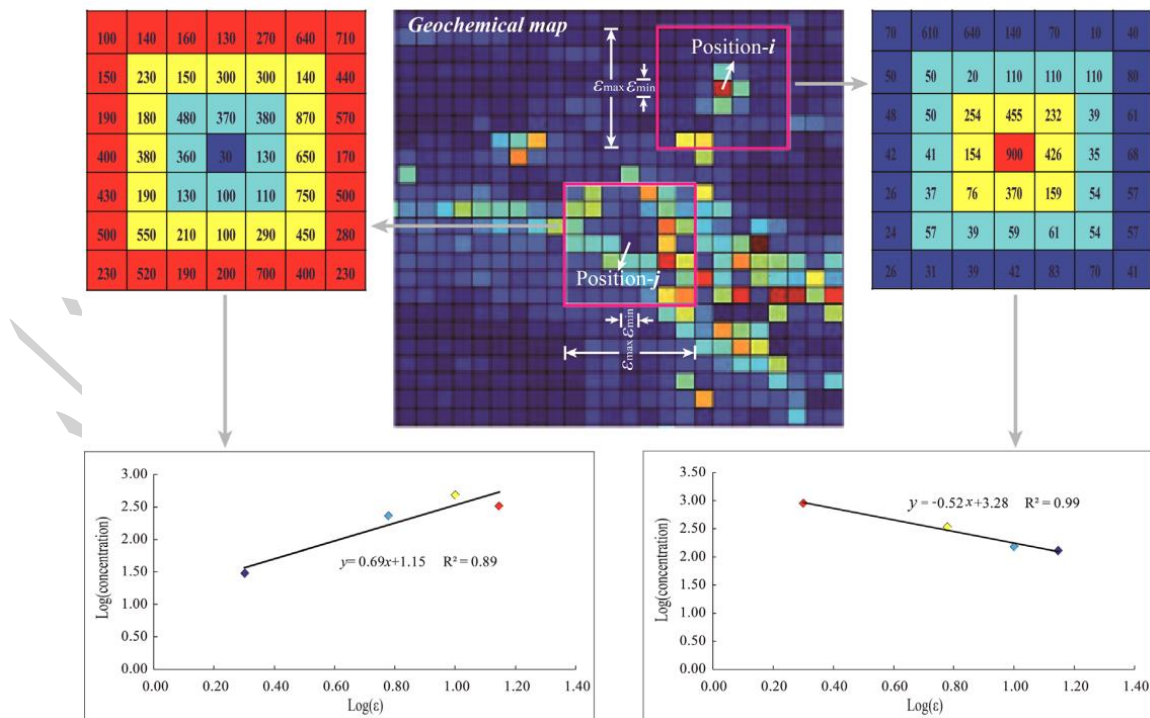
$N$  برابر تعداد پنجره‌ها

$\epsilon_{min}$  کوچکترین اندازه پنجره

$\epsilon_{max}$  سایز بزرگترین پنجره

سپس مقدار  $\rho[A(\epsilon_i)]$  مربوط به محدوده  $A(\epsilon_i) = \epsilon_i^2$  محاسبه می‌شود. نمودار لگاریتمی-ارتباط خطی بین  $\rho[A(\epsilon_i)]$  و  $\epsilon_i$  از

سینگولاریتی به عنوان یک ویژگی مهم در فرآیندها یا سیستم‌های طبیعی غیرخطی در شاخه‌های مختلف علوم زمین مانند تشکیل ابرها، سیل، طوفان، رانش زمین و تشکیل ذخایر هیدروترمال است که از نقطه نظر کاربرد زمین‌شناسی می‌تواند به عنوان یک پدیده خاص با مقدار آنومالی انرژی رها شده یا مواد تجمع یافته در فاصله زمانی- مکانی کوتاه تعریف شود. در فرآیند کانی‌سازی معمولاً مقدار زیادی عناصر فلزی در مدت زمان کوتاه (در مقایسه با مقیاس زمانی زمین‌شناسی) و در محدوده کوچکی (نسبت به گسترش زمین) رخ- پایه ارتباط مولتی- فرکتالی بین چگالی فلز و مساحت مربوط به آن است که اولین بار توسط چنگ در سال ۲۰۰۶ مطرح شد [۲۴].



شکل ۲ عملکرد پنجره متحرک در روش سینگولاریتی

چنانچه با افزایش سایز پنجره غلظت میانگین افزایش یابد، شیب خط مثبت ( $0 < 2a$ ) تهی شدگی را نشان میدهد. همچنین مقادیر ( $0 < 2a$ ) بیانگر غنی شدگی در آن نقطه می‌باشد. (شکل ۲) مثالی از میانگین پنجره متحرک با پنجره‌هایی با اندازه  $3 \times 3$ ،  $5 \times 5$  و  $7 \times 7$  (متر) برای تخمین غنی شدگی و تهی شدگی به کار برده شده. نمودارهای مشخص شده در (شکل ۲) نیز گویای ارتباط بین سایز پنجره‌ها و میانگین غلظت در هر پنجره است [۲]

(رابطه ۱۰) بدست می‌آید. با گرفتن لگاریتم از (رابطه ۱۰) رابطه بین سایز هر پنجره و میانگین غلظت آن به صورت (رابطه ۱۱) خواهد بود. که در این رابطه،  $C$  مقداری ثابت است، شیب خط برازش شده برابر  $a-2$  خواهد شد. در (شکل ۲) پنجره حرکت می‌کند و به طور مشابه مقدار سینگولاریتی برای تمام نقاط موجود در منطقه محاسبه می‌شود.

$$\log C[A(\epsilon i)] = C + (a - 2) \log \epsilon i \quad (11)$$

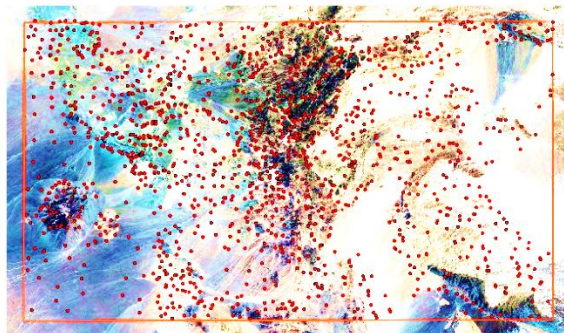
Erosional surface		Vertical section	$V_{z1} = \frac{Zn \times Pb}{Cu \times Mo}$	$V_{z1} = \frac{Zn \times Pb}{Cu \times Mo}$	$V_{z1} = \frac{Zn \times Pb \times Bi}{Cu \times Mo \times Ag}$
Supra-ore	I		>5	>100	>1
Upper-ore	II		5-0.5	100-10	1-0.1
Ore	III		0.5-0.05	10-1	0.1-0.01
Ore	IV		0.05-0.005	1-0.1	0.01-0.001
Lower ore	V		0.005-0.0005	0.1-0.01	0.001-0.0001
Sub-ore	VI		<0.0005	<0.01	<0.0001
Contrast Vz(1)/Vz(2)			10000	10000	10000

شکل ۳ مدل شاخص زونالیته قائم برای ذخایر مس پورفیری بر پایه ذخایر مس پورفیری استاندارد در قزاقستان، بلغارستان، ارمنستان و ایران [۱،۳۶]

#### ۴- تحلیل نتایج

##### ۴-۱- پیش پردازش داده ها

در این پژوهش، تعداد ۱۴۲۸ نمونه از رسوبات آبراهه‌ای به منظور شناسایی نواحی پتانسیل دار معدنی در خراسان جنوبی شامل تعداد ۸۹۳ نمونه رسوبات آبراهه‌ای برگه بصیران و همچنین تعداد ۵۳۵ نمونه رسوبات آبراهه‌ای برگه کودگان مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۳)



شکل ۳ پراکنده‌گی نقاط برداشت شده

جدول ۱- پارامترهای اماری عناصر مورد بررسی (ppm)

انحراف معیار	میانگین	مینیمم	ماکزیمم	عنصر
0.7	0.4	0.1	16.96	Bi
0.2	0.7	0.3	3.3	Mo
0.1	0.13	0.01	1.7	Ag
8.7	17.14	0.15	70	Pb
8.5	19.53	0.09	171	Cu
14.8	68.7	0.14	140.4	Zn

نمونه های برداشت شده اغلب از رسوبات ابراهه‌ای توسط سازمان زمین شناسی و بهره‌برداران معادن در منطقه برداشت شده است.

به هدف جاگزینی داده‌های سنسورد در نرم‌افزار SPSS چارک های اول و سوم شناسایی شد و داده‌های خارج از این بازه در صورت انطباق با برآورد چگالی کرنل KDE شناسایی و اصلاح شد. همچنین هیستوگرام تک متغیره داده های خام عناصر مهم در شاخص‌های زونالیته مطابق (شکل ۵) محاسبه و ترسیم شد.

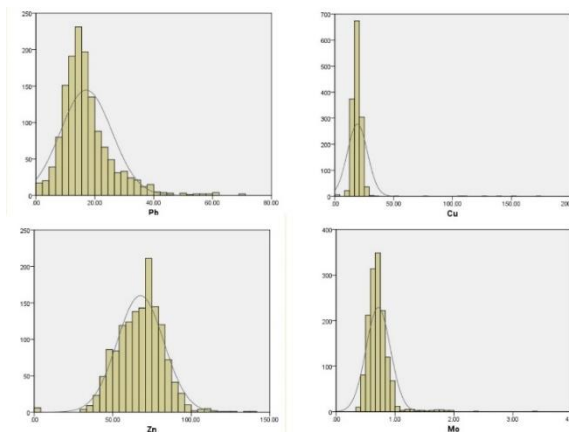
با نظر به اهداف این پژوهش میزان غلظت شش عنصر مس، مولیبدن، سرب، روی، نقره و بیسموت مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای اماری این عناصر در (جدول ۱) قید شده است.

ضیائی و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۱،۲۶] با مطالعه ۴ ذخیره مس- طلا پورفیری آکتوجی در قزاقستان، آسارل در بلغارستان، تکوت در ارمنستان و ذخیره سونگون در ایران عناصر سرب، روی و بیسموت را به عنوان عناصر فوق کانساری و مس، مولیبدن و نقره را عناصر تحت عنصری در این دسته از ذخایر معرفی کردند. با توجه به عناصر فوق کانساری و تحت کانساری با  $VZ_3 = Pb \times Zn \times Bi / Cu \times Ag \times Mo$  (شکل ۳) [۱] می‌توان پتانسیل کانی زایی پورفیری و همچنین احتمال وجود ذخایر در عمق را برآورد نمود. مقادیر بالای شاخص زونالیته وجود ماده معدنی در عمق را نشان می‌دهد و مقدار پایین آن نشان از فرسایش ماده معدنی دارد [۱].

نقشه‌ی پراکندگی عناصر تاثیر گذار در شاخص‌های زونالیته در دو ورق یکصد هزار بصیران و کودگان (شعاع ۵۰ کیلومتری معدن قلعه زری) در ادامه شرح داده شده است.

به منظور تعیین حد آستانه آنومالی عناصر در منطقه مورد بررسی از روش نمودار تمام لگاریتمی عیار مساحت استفاده شده است. به طور کلی می‌توان عنوان کرد که روش فرکتالی عیار - مساحت یک تکنیک پایه‌ای برای مدلسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی است [۵]. توزیع مولتی‌فرکتالی مربوط به عیارهای عناصر می‌تواند به معنای راهی برای تعیین کمی حدود آستانه‌ای و جوامع زمینه و آنومالی تلقی شود. در روش عیار- مساحت روابط نمایی بین عیار و مساحت تجمعی متناظر، که بیانگر بعد فرکتالی الگوهای مورد بررسی می‌باشد، مورد توجه واقع شده است. برای به کار بردن روش فرکتالی عیار - مساحت ابتدا لازم است نقشه توزیع پراکندگی عنصر مورد نظر رسم گردد سپس براساس فاصله بین نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای نقشه کنترلی عنصر مربوطه شبکه بندی گردد تا مقادیر عیار و مساحت هر خط تراز قابل محاسبه باشد. برای محاسبه عیار هر شبکه روش‌های مختلفی همچون عکس مجذور فاصله، کریجینگ و... برای درون یابی داده‌ها وجود دارد که بسته به نوع داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای تهیه نقشه پراکندگی تهیه شده در این مطالعات از روش زمین آماری کریجینگ در محیط نرم افزاری Arc map استفاده شده است. حال پس از رسم نقشه شبکه بندی داده‌ها عیار هر شبکه و مساحت محصور در آن شبکه مشخص است. چنانچه بخواهیم روش نمودار لگاریتمی عیار - مساحت را برای عنصر مورد نظر محاسبه کنیم باید عیارهای لگاریتمی شده را به صورت صعودی به نزولی مرتب کنیم. در میان عیارهای تکراری فقط یک عیار به همراه مجموع مساحت همه سلول‌هایی که آن عیار را دارند در جدول باقی می‌ماند. سپس لازم است برای هر عیار معین

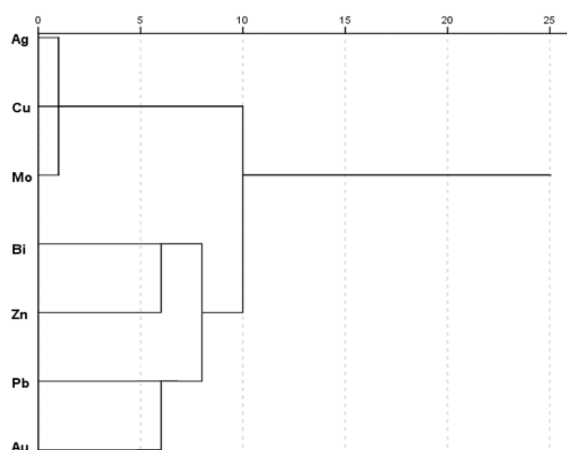


شکل ۴- هیستوگرام تک متغیر عناصر سرب، روی، مس و مولیبدن

داده‌های مربوط به عناصر سرب، روی، مس، مولیبدن، بیسموت، طلا و نقره در نرم‌افزار SPSS به روش Distribution نرمال سازی شد. سپس به منظور سهولت در برخی محاسبات داده‌ها به شکل استاندارد تبدیل شد.

#### ۲-۴- پردازش و بررسی

نمودار تجزیه و تحلیل خوشه بندی سلسله مراتبی (HCA) در رابطه با عناصر Cu, Sn, Mo, Pb, Zn, Au, Ag ترسیم شد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، نمودار رابطه مستقیم Mo, Cu, Ag را به عنوان یک شاخه، Bi, Zn, Pb و Au را به عنوان شاخه دیگر نشان می‌دهد.

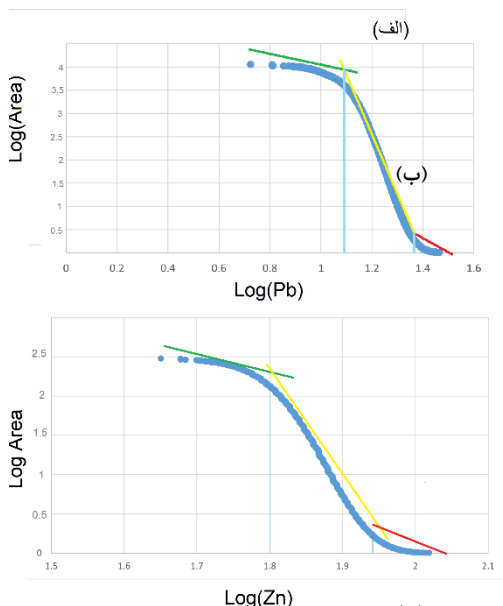


شکل ۵- دندوگرام تحلیل خوشه بندی سلسله مراتبی

در ذخایر مس پورفیری عناصر سرب، روی و بیسموت درهاله‌های فوق کانساری و عناصر مس، مولیبدن و نقره درهاله‌های تحت کانساری بیشترین غلظت را دارند [۲۵].

از لایه پراکندگی عنصر مس به عنوان یکی از پارامترهای وزن دهی در روش سلسله مراتبی AHP استفاده شده است.

حد آنومالی در عناصر موثر در شاخص‌های زونالیته شامل سرب و روی نیز به وسیله نمودار تمام لگاریتمی عیار-مساحت مطابق شکل ۹ محاسبه شد. همچنین تمامی محاسبات بر روی داده‌های نرمال شده صورت گرفته است.



شکل ۸- الف) تعیین حد آنومالی عناصر سرب ب) تعیین حد آنومالی عناصر روی

پس از ترسیم نمودارهای شکل ۸، جداول حد غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر سرب و روی مطابق جدول ۳ بدست آمد.

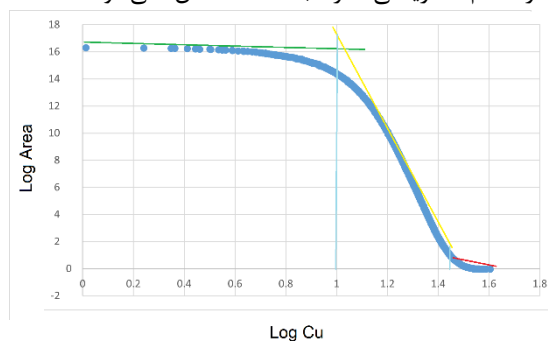
جدول ۳- حد غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر سرب و روی

Log (Pb)	استانده	Log (Zn)	استانده
تهی‌شدگی	$X < 1.1$	تهی‌شدگی	$X < 1.8$
زمینه	$1.1 < X < 1.38$	زمینه	$1.8 < X < 1.95$
غنی‌شدگی	$1.38 < X$	غنی‌شدگی	$1.95 < X$

حد آنومالی در عناصر موثر در شاخص‌های زونالیته شامل سرب و روی نیز به وسیله نمودار تمام لگاریتمی عیار-مساحت مطابق شکل ۱۰ محاسبه و ترسیم شد. همچنین تمامی محاسبات بر روی داده‌های نرمال شده صورت گرفته است

مطابق شکل ۱۰ نقشه توزیع ژئوشیمیایی مقادیر غنی از عنصر سرب از جنوب تا مرکز امتداد داشته و آنومالی‌های پراکنده در شرق و غرب دیده می‌شود. همچنین غنی‌شدگی قوی

لگاریتم مساحت‌ها به صورت تجمعی محاسبه شوند. پس از انجام این محاسبات می‌توان نمودار لگاریتمی عیار را در برابر لگاریتم مساحت تجمعی ترسیم نمود، با توجه به اساس تئوری فرکتالی هرچه عیار بیش تر باشد مساحت کمتری را اشغال می‌کند و هر چه مقدار عیار کمتر باشد مساحت اشغال شده بیش تر می‌شود. در نهایت براساس نقاط شکست مطابق شکل ۷ و شکل ۹ بر روی نمودار تمام لگاریتمی هر جامعه مشخص می‌شود [۲۷].



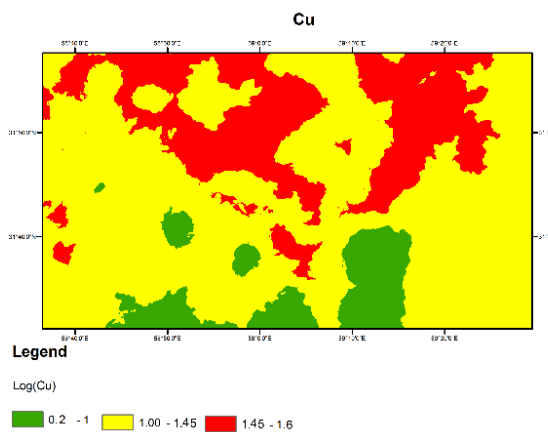
شکل ۶ تعیین حد زمینه و آنومالی عنصر مس به وسیله نمودار تمام لگاریتمی عیار-مساحت

جدول ۲- حد غنی‌شدگی، زمینه، تهی‌شدگی عنصر

Log (Cu)	استانده
تهی‌شدگی	$X < 1$
زمینه	$1 < X < 1.45$
غنی‌شدگی	$1.45 < X$

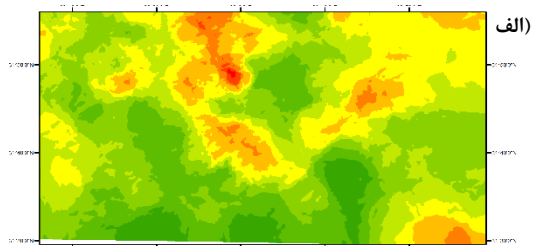
مس

با توجه به مقادیر حد آنومالی بدست آمده در نمودار شکل ۷، جدول ۲ بدست آمد و نقشه‌ی پراکندگی عنصر مس با روش کریجینگ مطابق شکل ۸ ترسیم شد.

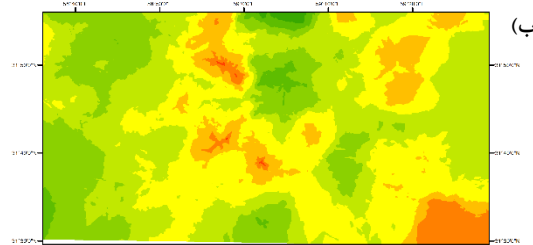


شکل ۷ نقشه‌ی پراکندگی عنصر مس





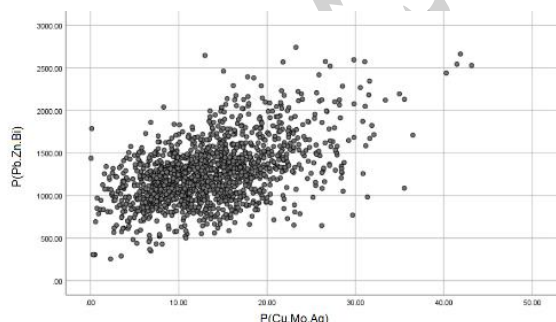
Legend  
P(Cu, Mo, Ag)  
4.168 - 6.857    9.546 - 12.23    14.92 - 17.61    20.30 - 22.99  
6.857 - 9.546    12.23 - 14.92    17.61 - 20.30    22.99 - 25.68



Legend  
P(Pb, Zn, Bi)  
1.970 - 2.178    1.554 - 1.762    1.138 - 1.346    722.5 - 930.4  
1.762 - 1.970    1.346 - 1.654    930.4 - 1.138    514.5 - 722.5

شکل ۱۱ الف) نقشه‌ی پراکندگی شاخص‌های تحت کانساری  
ب) نقشه‌ی پراکندگی شاخص‌های تحت کانساری

مناطق دارای آنومالی در هر دو شاخص فوق و تحت کانساری گویای غنی‌شدگی عناصر سرب، روی، مس، نقره، بیسموت می‌باشند. به تفسیری نشانه‌های عوامل کانی‌زایی در این نواحی مشهود می‌باشد.

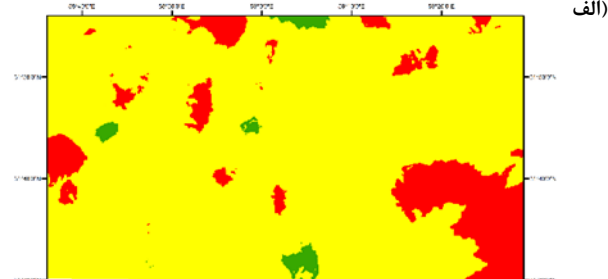


شکل ۱۲ نمودار همبستگی شاخص فوق و تحت کانساری پیرسون

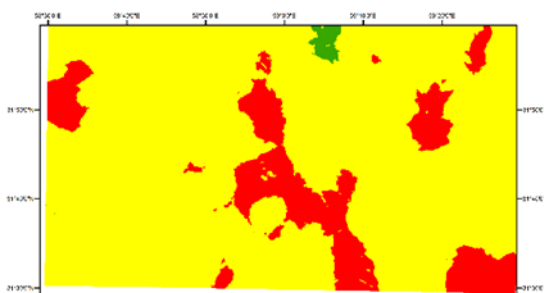
جدول ۴ شاخص همبستگی پیرسون در شاخص‌های فوق و تحت کانساری

		up	sub
up	Pearson Correlation	1	.525**
	Sig. (2-tailed)		.000
	N	1428	1428
sub	Pearson Correlation	.525**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	1428	1428

عنصر سرب و روی در مناطق جنوب شرقی منطقه مشاهده شد. با توجه به وجود همبستگی سرب و روی در دندوگرام تحلیل خوشه‌بندی سلسله مراتبی محاسبه شده. وجود آنومالی مشترک این دو عنصر در برخی مناطق مرکزی و غربی و جنوب شرقی مشاهده شد که گویای صحت دندوگرام ترسیم شده می‌باشد.



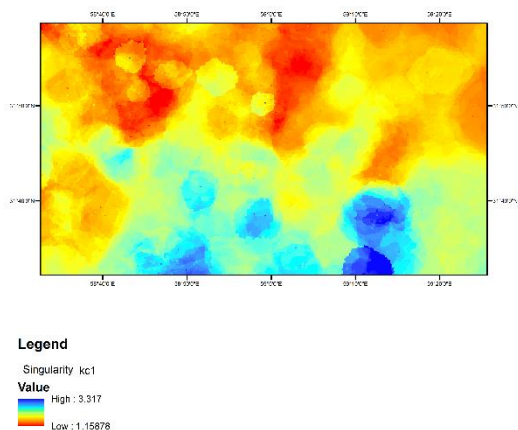
Legend  
Log(Zn)  
1.73 - 1.8    1.80 - 1.9    1.90 - 2



Legend  
Log(Pb)  
0.460 - 1.1    1.1 - 1.38    1.38 - 1.5

شکل ۱۰ الف) نقشه پراکندگی عنصر روی ب) نقشه پراکندگی عنصر سرب

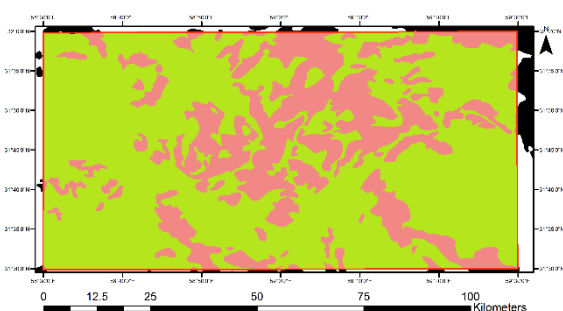
به منظور محاسبه شاخص فوق کانساری از داده‌های استاندارد و نرمال شده سرب و روی و بیسموت استفاده شد همچنین برای محاسبه‌ی شاخص تحت کانساری، داده‌های استاندارد و نرمال شده‌ی مس و مولیبدن و نقره بکار گرفته شد. خروجی محاسبات در ۸ دسته کلاسه بندی شد و نقشه پراکندگی شاخص‌های فوق کانساری و تحت کانساری در محیط نرم‌افزاری GIS مطابق شکل ۱۱ ترسیم شد.



شکل 14 نقشه حاصل از روش تکنیکی (سینگولاریتی) بر اساس تولید سطحی شاخص

روش سینگیولاریتی بر روی تولید سطحی  $KPI$  در برکه یکصد هزار بصیران و کودگان مطابق شکل 14 بدست آمد. با توجه به میانگین 400 متری فواصل نمونه برداری پنجره‌هایی به مساحت 2500 متر مربع وزن گذاری شده به گونه‌ای که به طور متوسط در هر پنجره 1 نقطه دارای مقادیر وزن دهی در اختیار باشد. نقشه بدست آمده برای مقادیر سینگیولاریتی بالا تر از 2 در شکل 14 گویای پتانسیل کانی‌زایی پورفیری می‌باشد.

از نقشه روش تکنیکی (سینگیولاریتی) به عنوان یکی از پارامتر های وزن‌دهی در روش سلسله مراتبی  $AHP$  استفاده شد.

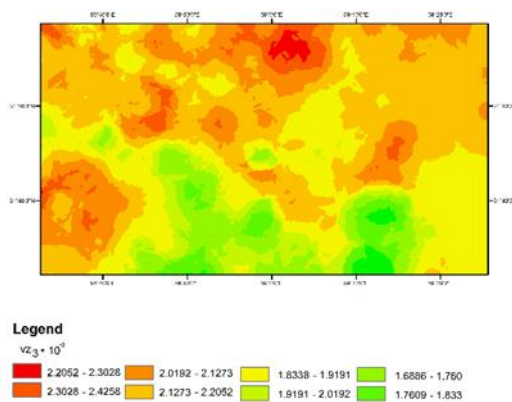


شکل 15 نقشه زمین‌شناسی دارای پتانسیل میزبانی ذخایر پورفیری

با استفاده از نقشه زمین‌شناسی مربوط به ورقه بصیران و کودگان که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی تهیه شده و همچنین با به کارگیری نرم‌افزار  $GIS$  واحدهای مختلف زمین‌شناسی به صورت دستی دیجیت شده و به صورت فایل شیپ تهیه شده است. در بسیاری از کانسارهای مس-طلا پورفیری، به صورت ژنتیکی با ماگماهای کالک‌آلکالن حد واسط تا فلسیک در

نمودار همبستگی پیرسون مطابق شکل 12 نشان می‌دهد ضریب همبستگی پیرسون در رابطه با شاخص های فوق و تحت کانساری مطابق جدول 4 معادل 0/52 بدست آمد. ضرایب بین 0/4 و 0/6 را همبستگی متوسط پیرسون در نظر گرفته می‌شود [28]. به دلیل وجود نواحی دارای غنی‌شدگی مشترک در دو شاخص مورد بررسی از نقشه تلفیقی پراکندگی شاخص های فوق و تحت کانساری به عنوان یکی از پارامتر های وزن‌دهی در روش سلسله مراتبی  $AHP$  استفاده می‌شود.

به منظور تشخیص سطح فرسایش از مدل ارائه شده زونالیته برای ذخایر مس-طلا پورفیری به روش برای گریگوریان - ضیایی استفاده شد [1]. نقشه‌ی پراکندگی شاخص زونالیته در 8 بازه کلاسه بندی و مطابق شکل 13 ترسیم شد.



شکل 13 نقشه‌ی پراکندگی شاخص زونالیته

شاخص زونالیته از جنوب به شمال در منطقه‌ی مورد بررسی افزایش می‌یابد، افزایش شاخص زونالیته بیانگر بالارفتن احتمال کانی‌زایی پنهان در عمق می‌باشد همچنین کاهش شاخص زونالیته در مناطق جنوبی بیانگر بالا بودن سطح فرسایش در زون کانی‌زایی می‌باشد. از نقشه‌ی پراکندگی شاخص زونالیته به عنوان یکی از پارامتر های وزن‌دهی در روش سلسله مراتبی  $AHP$  استفاده شد.

کانی‌زایی مس-طلا پورفیری شرح داده شد.



شکل ۱۷ ساختار سلسله مراتبی برای تعیین زون‌های دارای پتانسیل مس-طلا پورفیری

محاسبه‌ی وزن نسبی عوامل موثر در تعیین مناطق آنومالی دار در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، عوامل به صورت زوجی با بیشترین نقشی است که عوامل در داخل لایه ایفا می‌کنند. در وزن‌دهی معیارها از قضاوت‌های شفاهی که به صورت مقایسه‌ای بین عوامل صورت می‌گیرد، استفاده می‌شود. این قضاوت‌ها توسط ساعتی [۳۲،۳۴] به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تبدیل شده که در جدول ۴ آمده است.

شکل ۴ مقادیر ترجیحات برای مقایسه زوجی عوامل موثر

Concept	Numerical rating
Extremely more important	9
Very strongly more important	7
Strongly more important	5
Moderately more important	3
Equally important	1
Intermediate values	2,4,6,8

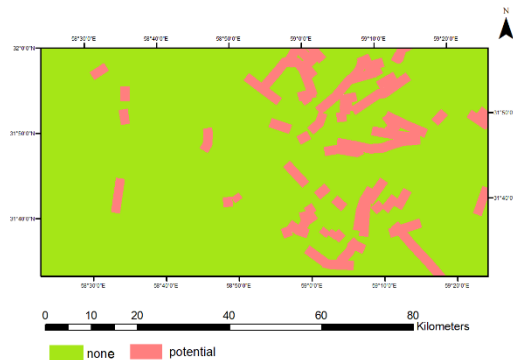
جدول ۵ ماتریس مقایسه زوجی برای معیارهای زمین‌شناسی (شاخص M1)

	زمین‌شناسی	تکتونیک	وزن
زمین‌شناسی	۱	۱	۰/۵
تکتونیک	۱	۱	۰/۵

جدول ۶ ماتریس مقایسه زوجی برای شاخص‌های فوق و تحت کانساری (شاخص M2)

قوس‌های آتشفشانی- ماگمایی در بالای زون‌های فرورانش فعال تشکیل می‌شوند [۲۹]. توده‌های نفوذی الیگومیوسن می‌تواند میزان کانسارهای مس-مولیبدن و مس-طلا پورفیری باشد [۳۰]. بنابراین لایه اطلاعاتی شاهد مربوط به فاصله از توده‌های نفوذی الیگو-میوسن مطابق شکل ۱۵ به عنوان یک لایه برای تلفیق نهایی در مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی مس-طلا پورفیری مورد استفاده قرار گرفت.

کانی‌زایی مس-طلا پورفیری به صورت ساختاری توسط گسل‌ها و شکستگی‌ها کنترل می‌شود و تعدادی از گسل‌ها و شکستگی‌ها می‌توانند راهنمای اکتشافی مناسبی باشند. یکی از فاکتورهای هوازگی و غنی‌شدگی در کانسارهای مس-طلا پورفیری، گسل‌ها و شکستگی‌ها هستند؛ به طوریکه محلول‌های ماگمایی-هیدروترمال از طریق گسل‌ها و شکستگی‌ها بالا می‌آیند و باعث غنی‌شدگی کانی‌زایی مس-طلا پورفیری می‌شوند [۲۹، ۱۸]. نقشه پیوسته چگالی گسل نیز می‌تواند به عنوان یک لایه شاهد اطلاعاتی مناسب برای مدل‌سازی نهایی کانی‌زایی مس-طلا پورفیری مورد استفاده قرار گیرد [۳۱] (شکل ۱۶).



شکل ۱۶ نقشه گسل‌های اصلی با چگالی موثر تا فواصل ۵۰۰ متر

### ۳-۴- تلفیق و یکپارچه سازی نتایج

«فرآیند تحلیلی سلسله مراتبی» (Analytical Hierarchy Process) یا به اختصار AHP، ابزاری ریاضی برای حل مسئله‌هایی است که در سال ۲۰۰۰ میلادی توسط توماس<sup>۲</sup> معرفی شد. روش AHP پس از درک ساختار یک مسئله و مواجه شدن با موانع واقعی مدیران هنگام محاسبه برآیند شاخص‌های موثر در تصمیم‌گیری، ایجاد شد. در حقیقت AHP، ساختاری برای حل مسائلی است که باید به صورت تحلیلی حل شوند و شکلی لایه لایه دارند [۳۲، ۳۳].

شکل ۱۷ ساختار سلسله‌مراتبی برای تعیین زون مستعد

<sup>۲</sup> Thomas Saaty

اندیس‌های معدنی شامل پیشکارهای استخراجی، ترانسه و نقاط حفاری شده اکتشافی و رخنمون‌های سطحی حاوی کانی‌های دارای مس از جمله مالاکیت، آزوریت، کالکوپیریت، کالکوزیت، پیروتین و بورنیت می‌باشد.

ماتریس درهم ریختگی و ضریب توافق کاپا [۳۵،۳۷] برای نقشه پتانسیل معدنی در مقابل داده‌های میدانی (رخدادهای معدنی) محاسبه شد. مقایسه نقشه پتانسیل معدنی با داده‌های میدانی با استفاده از رویکرد ماتریس درهم ریختگی

و ضریب توافق کاپا تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد؛ در این بررسی دقت کلی برای کلاس‌های پتانسیل بالا، متوسط و پایین به ترتیب ۹۲، ۷۳ و ۸۲ درصد و ضریب کاپا ۰/۷۱ محاسبه شد که حاکی از توافق قابل توجه میان دو ارزیاب است (جدول ۸). صحت تولیدکننده تعداد نمونه‌های طبقه بندی شده صحیح یک کلاس را نشان می‌دهد که بر تعداد کل نمونه‌های مرجع کلاس (کل ستون) تقسیم می‌شود؛ مقدار صحت تولیدکننده، احتمال طبقه بندی صحیح داده‌های میدانی را مطابق مدل پتانسیل معدنی نشان می‌دهد [۳۶]. صحت کاربر که از تقسیم تعداد نمونه‌های طبقه بندی شده به صورت صحیح در یک کلاس بر تعداد کل نمونه‌هایی که در کلاس طبقه بندی شده‌اند (کل ردیف) حاصل می‌شود، درصد صحت احتمال وجود نمونه‌ای از نقشه پتانسیل معدنی

جدول ۶ ماتریس درهم ریختگی مدل پتانسیل معدنی در مقابل داده‌های میدانی طبقه بندی شده را بر روی زمین نشان می‌دهد. بیشترین صحت تولیدکننده ۸۳ درصد به دست آمده است.

#### ۵- نتیجه گیری

وزن	تحت کانساری	فوق کانساری
۰/۵	۱	۱
۰/۵	۱	۱

جدول ۸ ماتریس درهم ریختگی مدل پتانسیل معدنی در مقابل داده‌های میدانی (رخدادهای مس) معدنی محاسبه شد. مقایسه نقشه پتانسیل معدنی با داده‌های میدانی با استفاده از رویکرد ماتریس درهم ریختگی

وزن دهی	زونالیته	سینگولاریتی	پراکندگی مس	M2	M1
۰/۵۲	۴	۴	۴	۳	۱
۰/۱۹	۲	۲	۲	۱	۰/۳۳
۰/۱	۱	۱	۱	۰/۵	۰/۲۵
۰/۱	۱	۱	۱	۰/۵	۰/۲۵
۰/۱	۱	۱	۱	۰/۵	۰/۲۵

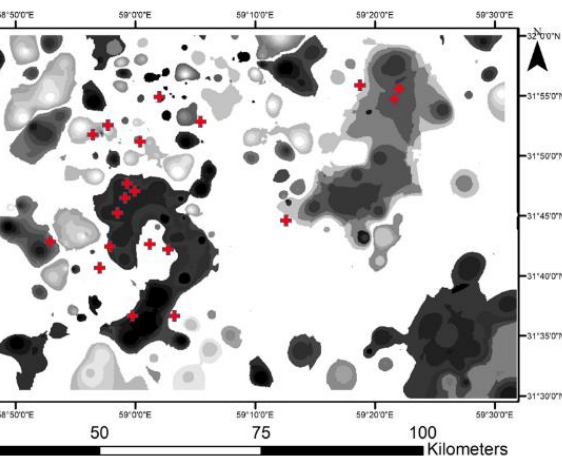
همپوشانی لایه مربوط به نقشه پراکندگی شاخص فوق کانساری و تحت کانساری به عنوان یکی از زیر معیارهای تحلیل سلسله‌مراتبی به کار گرفته شد. با استفاده از زیر معیارهای جدول ۵ و جدول ۶ که به ترتیب شاخص‌های  $M1$  و  $M2$  نام‌گذاری شد، وزن دهی معیارهای اصلی در جدول ۷ شرح داده شد.

پس از تعیین وزن اولیه با توجه به مؤلفه‌های مؤثر در تعیین وزن‌های آنومالی و وزن‌های نهایی به دست آمده برای هر یک از این ضوابط، در این مرحله لازم است تا این لایه‌ها با هم تلفیق و بر اساس مدل‌های مناسب، کل محدوده از نظر میزان آنومالی رتبه‌بندی شود؛ به طوری که هرچه در خروجی نهایی، دامنه عدد بالاتری به دست آید به معنای آنومالی دار بودن منطقه است. در بین گروه‌های مورد بررسی، زمین‌شناسی و تکتونیک ۰/۵۲، همپوشانی شاخص فوق و تحت کانساری ۰/۱۹ و پراکندگی عنصر مس و روش تکینگی (سینگولاریتی) و شاخص زونالیته هر کدام ۰/۱ در نظر گرفته شد. و نقشه حاصل از تلفیق این گروه‌ها در محیط GIS با توجه به وزن‌های محاسبه شده مطابق شکل ۱۸ است.

در نقشه خروجی تلفیق لایه‌ها (شکل ۱۹) مناطق دارای پتانسیل کانی‌زایی را به صورت طیف امتیازدهی ۰ تا ۱۰۰ نمایان شد و با استفاده از متغیرهای کمی و عددی، نقشه کیفی پتانسیل کانی‌زایی مس در منطقه بدست آمد.

#### ۴-۴- اعتبار سنجی مدل پتانسیل معدنی

به منظور اعتبار سنجی این پژوهش از ۲۲ اندیس فعالیت شناخته شده معدنی منطقه استفاده شده است. (شکل ۱۸)



نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن		نقاط کنترل میدانی (رخداد‌های مس)			
کلاس‌ها	پتانسیل بالا	پتانسیل متوسط	پتانسیل پایین	مجموع	صحت کاربر (%)
پتانسیل بالا	۵	۰	۰	۵	۱۰۰
پتانسیل متوسط	۰	۴	۲	۶	۶۶
پتانسیل پایین	۱	۱	۹	۱۱	۸۲
مجموع	۶	۵	۱۱	۲۲	
صحت تولید کننده (%)	۸۳	۸۰	۸۲		
<b>صحت کلی</b>					<b>۰/۷۱ = ضریب توافق کاپا</b>
پتانسیل بالا	پتانسیل متوسط	پتانسیل پایین			
۹۲	۷۳	۸۲			

منطقه بصیران-کودگان از مناطقی با پتانسیل کانی‌زایی مس در بلوک لوت و زون ساختاری سیستان است. این امر با حضور رخداد های مس نمود بارزی میابد. در این پژوهش با تلفیق شاخص‌های زونالیته و روش تکینگی (سینگولاریتی) و همچنین بهره‌گیری از اطلاعات زمین‌شناسی و زمین ساختاری به روش فرایند تحلیلی سلسله مراتبی *AHP* به عنوان یک روش تصمیم گیری چند معیاره برای کانی‌زایی مس-طلا پورفیری تهیه شد. در نقشه نهایی حاصل از تلفیق داده های مورد استفاده، مساحت ۴۹۰ کیلومتر مربع دارای احتمال بالای ۵۰ درصد از طیف امتیازدهی خروجی نقشه تلفیق *AHP* مورد شناسایی قرار گرفت مقایسه آنومالی‌های حاصل شده از روش *AHP* با رخداد‌های کانی‌زایی مس موجود در منطقه، حاکی از ارتباط فضایی مثبت این رخدادها با آنومالی‌های به‌دست آمده است. اعتبارسنجی مدل پتانسیل معدنی مس در منطقه، با استفاده از ۲۲ اندیس معدنی شناخته شده مرتبط با کانی‌زایی مس (به عنوان داده های میدانی) و به کارگیری روش ماتریس درهم‌ریختگی و ضریب توافق کاپا استفاده شد.

صحت کلی نواحی پرتانسیل، پتانسیل متوسط و پتانسیل کم در این مطالعه به ترتیب ۹۲ درصد، ۷۳ درصد و ۸۲ درصد برآورد شد و همچنین ضریب توافق کاپا ۰/۷۱ محاسبه گردید که نشان از مطلوبیت مدل پتانسیل معدنی مس ارائه شده دارد. مدل نهایی کانی‌زایی مس-طلا پورفیری حاصل شده، می‌تواند برای مطالعات اکتشافی دقیق تر در محدوده مطالعاتی مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود با طراحی شبکه منظم نمونه برداری ژئوشیمیایی در محدوده های شناسایی شده، اکتشافات عمومی منطقه گسترش داده شود. محدوده مورد مطالعه در برکه های یکصدهزارم بصیران و کودگان واقع شده و کانسار های پراکنده مس رگه‌ای در بسیاری از نواحی مورد بررسی یافت شده است. از جمله اصلی ترین ذخایر مس رگه ای منطقه می‌توان به معدن مس قلعه‌زری اشاره نمود همچنین معدن طلای هیرد در شمال شرق محدوده مورد نظر حاوی مقادیر مس نیز می‌باشد.

12. Iran, G.S. *Geochemical map report for Basiran and Kodegan 1:100,000 Map*; 1992.
  13. Malekzadeh, A.; Karimpour, M.; Mazaheri, S. *Geology, alteration, mineralization and geochemistry of MA-II region, Maherabad porphyry copper-gold prospect area, South Khorasan province. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy inpress* 2010.
  14. Ghorbani, M. *The economic geology of Iran. Mineral deposits and natural resources. Springer* 2013, 1-450.
  15. Maghfouri, S.; Hosseinzadeh, M.R. *The early Cretaceous Mansourabad shale-carbonate hosted Zn-Pb (-Ag) deposit, central Iran: An example of vent-proximal sub-seafloor replacement SEDEX mineralization. Ore Geology Reviews* 2018, 95, 20-39.
  16. Ghorbani, M. *Lithostratigraphy of Iran; Springer: 2019.*
  17. Ghorbani, M. *Metallogenic and mining provinces, belts and zones of Iran. In The economic geology of Iran; Springer: 2013; pp. 199-295.*
  18. Ghorbani, M. *A summary of geology of Iran. In The economic geology of Iran; Springer: 2013; pp. 45-64.*
  19. Shabani, A.; Ziaii, M.; Shirazy, A.; Shirazi, A. *Multi-Dimensional Data Fusion for Mineral Prospectivity Mapping (MPM) Using Fuzzy-AHP Decision-Making Method, Kodegan-Basiran Region, East Iran. Minerals* 2022, 12.
  20. Hamedani, G.; Ahsanullah, M. *Characterizations of Weibull geometric distribution. Journal of Statistical Theory and Applications* 2011, 10, 581-590.
  21. Xunde, H.; Dingyuan, Z. *Geochemical zoning pattern of the Yinyan tin deposit. Journal of Geochemical Exploration* 1989, 33, 109-119.
  22. Solovov, A.P.; Kuznetov, V. *Geochemical prospecting for mineral deposits; Mir Publ.: 1987.*
  23. Gonçalves, M.A.; Mateus, A.; Pinto, F.; Vieira, R. *Using multifractal modelling, singularity mapping, and geochemical indexes for targeting buried mineralization: Application to the W-Sn Panasqueira ore-*
- ۶- منابع
1. Ziaii, M. *Lithogeochemical exploration methods for porphyry copper deposit in Sungun, NW Iran. Unpublished M. Sc. Thesis, Moscow State University (MSU), Moscow* 1996, 98.
  4. Malekzadeh, A., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., 2010b. *Geology, alteration, mineralization and geochemistry of MA-II region, Maherabad porphyry copper-gold prospect area, South Khorasan province. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 639-654*
  5. Carranza, E.J.M. *Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS; Elsevier: 2008.*
  6. Ziaii, M.; Carranza, E.J.M.; Ziaei, M. *Application of geochemical zonality coefficients in mineral prospectivity mapping. Computers & geosciences* 2011, 37, 1935-1945.
  7. Cooke, D.; Hollings, P.; Wilkinson, J.; Tosdal, R. *Geochemistry of porphyry deposits. 2014.*
  8. Ziaii, M.; Ardejani, F.D.; Ziaei, M.; Soleymani, A.A. *Neuro-fuzzy modeling based genetic algorithms for identification of geochemical anomalies in mining geochemistry. Applied geochemistry* 2012, 27, 663-676.
  9. Goldberg, I.; Abramson, G.Y.; Los, V. *Depletion and enrichment of primary haloes: their importance in the genesis of and exploration for mineral deposits. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 2003, 3, 281-293.
  10. Zuo, R.; Cheng, Q.; Agterberg, F.; Xia, Q. *Application of singularity mapping technique to identify local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, western China. Journal of Geochemical Exploration* 2009, 101, 225-235.
  11. Safari, S.; Ziaii, M.; Ghoorchi, M. *Integration of singularity and zonality methods for prospectivity map of blind mineralization. International Journal of Mining and Geo-Engineering* 2016, 50, 189-194.

35. Story, M.; Congalton, R.G. Accuracy assessment: a user's perspective. *Photogrammetric Engineering and remote sensing* 1986, 52, 397-399.
36. Lillesand, T.; Kiefer, R.; Chipman, J. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons Inc. New York 1994.
- system, Portugal. *Journal of Geochemical Exploration* 2018, 189, 42-53.
24. Cheng, Q.; Harris, J. GIS-based multifractal anomaly analysis for prediction of mineralization and mineral deposits. *Development of GIS in Geosciences. Special volume of GAC/MAC 2006*, 289-300.
25. Xiao, F.; Chen, Z.; Chen, J.; Zhou, Y. A batch sliding window method for local singularity mapping and its application for geochemical anomaly identification. *Computers & geosciences* 2016, 90, 189-201.
26. Ziari, M.; Pouyan, A.A.; Ziari, M. Geochemical anomaly recognition using fuzzy C-means cluster analysis. *Wseas transactions on systems* 2006, 5, 2424-2429.
27. Solovov A. P. and Kuznetov V. (1987), "Geochemical prospecting for mineral deposits", Mir Publ
28. Berman, J.J. *Data simplification: taming information with open source tools*; Morgan Kaufmann: 2016.
29. John, D.A.; Ayuso, R.; Barton, M.; Blakely, R.; Bodnar, R.; Dilles, J.; Gray, F.; Graybeal, F.; Mars, J.; McPhee, D. Porphyry copper deposit model. Chapter B of *Mineral deposit models for resource assessment: US Geological Survey Scientific Investigations Report* 2010, 169.
30. Hezarkhani, A. Petrology of the intrusive rocks within the Sungun porphyry copper deposit, Azerbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 2006, 27, 326-340.
31. Zuo, R.; Xia, Q.; Zhang, D. A comparison study of the C-A and S-A models with singularity analysis to identify geochemical anomalies in covered areas. *Applied geochemistry* 2013, 33, 195-212.
32. Saaty, R.W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical modelling* 1987, 9, 161-176.
33. Congalton, R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment* 1991, 37, 35-46.
34. Sochevanov, N.N. 1983: Selection of elements for calculation of the sequences of geochemical zoning in ore deposits Pages 166-168 1983