

تجزیه و تحلیل داده‌های منطقه کرور با روش تکینگی به منظور تعیین بی‌هنجاری پنهان

سمانه صفری^{۱*}، منصور ضیایی^۲

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

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت: آذر ۱۳۹۶، پذیرش: دی ۱۳۹۸)

چکیده

تشخیص ذخایر پنهان همواره با مشکلات و محدودیت‌هایی مواجه است و از گذشته تاکنون روش‌های متعددی برای تشخیص این ذخایر به کار گرفته شده است که بیشتر این روش‌ها مبتنی بر بررسی زونالیت‌ه ژئوشیمیایی عناصر است. اما روش زونالیت‌ه با محدودیت‌هایی همراه است و کاربرد این روش نیازمند بانک اطلاعاتی قوی از ذخایر مشابه است. در این مقاله، از تلفیق روش زونالیت‌ه با روش تکینگی برای اکتشاف بی‌هنجاری پنهان مس پورفیری پنهان در منطقه کرور واقع در زون جبال بارز استفاده شده است. هدف از این پژوهش ارائه روش نوین در اکتشاف ذخایر پنهان است که محدودیت روش زونالیت‌ه را نداشته باشد. روش ارائه شده با ارائه عدد ۲ به عنوان معیار تشخیص کانی‌سازی پنهان به صورت مستقل بی‌هنجاری پنهان را تشخیص می‌دهد. بدین منظور چهارصد نمونه سنگ از شبکه نمونه برداری منظم به صورت صد متر در صد متر و در امتداد خط مبنا شمالی - جنوبی برداشت شده است. تکینگی قادر به تشخیص بی‌هنجاری‌های ضعیفی است که با روش‌های دیگر قابل تشخیص نیست. در قسمت غربی منطقه کرور کانی‌سازی پنهانی وجود دارد که بی‌هنجاری ضعیفی در سطح نشان می‌دهد. نتایج اعمال روش زونالیت‌ه نشان داد این روش قادر به تشخیص این بی‌هنجاری در بخش غرب منطقه نیست، اما اعمال روش تکینگی بر روی شاخص زونالیت‌ه به خوبی این بی‌هنجاری را تفکیک می‌کند و نتیجه خوبی برای تشخیص بی‌هنجاری پنهان نشان می‌دهد. تکینگی شاخص زونالیت‌ه کوچک‌تر از ۲ نشان دهنده این بی‌هنجاری پنهان است. داده‌های به دست آمده از گمانه‌های حفاری شده در منطقه نیز درستی نتایج این روش را تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی

تکینگی شاخص زونالیت‌ه، بی‌هنجاری پنهان، کرور، جبرفت

*عهده‌دار مکاتبات: s.safaris@yahoo.com

۱- مقدمه

در علم فیزیک عبارت تکین یا سینگولار به پدیده‌هایی اطلاق می‌شود که دارای شار شدید انرژی یا ماده در المان کوچک فضایی- زمانی باشند. تکینگی به عنوان یک ویژگی مهم در فرایندها یا سیستم‌های طبیعی غیرخطی در شاخه‌های مختلف علوم زمین مثل تشکیل ابرها، سیل، طوفان، رانش زمین و تشکیل ذخایر هیدروترمال است. از نقطه نظر کاربرد زمین‌شناسی، این ویژگی می‌تواند به عنوان یک پدیده خاص با مقدار بی‌هنجاری انرژی رها شده یا مواد تجمع یافته در فاصله زمانی- مکانی کوتاه تعریف شود. در فرایند 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 می‌دهند. همراه با کانی‌سازی هیدروترمال، فعالیت ماگما همراه با تخلیه و تجمع ماده معدنی است که با تعریف تکینگی مطابقت دارد. اضافه و کم شدن مواد از سنگ‌ها اغلب توزیع سینگولار غلظت فلزات را در سنگ میزبان به وجود می‌آورد [۱، ۲].

پژوهش‌های متعددی در زمینه تشخیص بی‌هنجاری‌های ضعیف با کمک روش تکینگی انجام شده است. این پژوهش‌ها در زمینه‌های مختلف و بر روی داده‌های ژئوفیزیکی [۳] و ژئوشیمیایی [۴-۱۲] انجام شده است و بی‌هنجاری‌های ضعیف با کمک روش تکینگی تشخیص داده شده‌اند. چنگ (۲۰۰۷) با معرفی روش تکینگی برای اکتشاف ذخایر معدنی پلی‌متال در چین از این روش استفاده کرد. مطالعات انجام شده پیشین در این منطقه تنها قسمت شرق را به عنوان منطقه مطلوب معرفی کرده بود، در صورتی که چنگ با روش تکینگی، بی‌هنجاری‌های جدیدی برای این نوع ذخیره را در قسمت غربی منطقه نیز شناسایی و معرفی کرد [۵]. سان و همکاران (۲۰۱۰) عملیات اکتشافات ژئوشیمیایی طلا و مولیبدن را در منطقه معدنی در چین با روش‌های تکینگی، C_A و $\pm 2s(x)$ انجام دادند و نتایج به دست آمده را با هم مقایسه کردند. نتیجه کار آنها نشان داد که بی‌هنجاری مشخص شده با روش تکینگی نه تنها بخش زیادی از بی‌هنجاری‌های شمال این منطقه را پوشش می‌دهد بلکه محل ذخایر طلای زیادی که کشف نشده بودند و همچنین

بی‌هنجاری‌های ضعیفی که در اطراف گسل‌های بخش جنوبی منطقه وجود داشت را مشخص کرد. در صورتی که دو روش تست شده دیگر (C_A و $\pm 2s(x)$) نتوانستند این بی‌هنجاری‌ها را تشخیص دهند [۹]. وانگ (۲۰۱۰) در پژوهشی با تلفیق لایه‌های اطلاعاتی به تهیه نقشه پتانسیل مطلوب ذخایر قلع در منطقه معدنی گجو پرداخت. وی برای این کار لایه‌های اطلاعاتی زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و دورسنجی را با روش‌های نشانگر با یکدیگر تلفیق و برای تهیه لایه ژئوشیمی از روش تکینگی استفاده کرد و لایه ژئوفیزیک را از روش مغناطیس‌هوایی و گرانی به دست آورد [۸]. چن و همکاران (۲۰۱۵) از روش تکینگی برای تشخیص بی‌هنجاری‌های گرانی پوشیده شده در جنوب چین استفاده کردند. آنها از روش تکینگی برای تشخیص لبه‌های ماده معدنی استفاده کردند و نتیجه کار را با نتایج به دست آمده از دو روش گرادیان کل و سیگنال تحلیلی مقایسه کردند و مشاهده کردند که روش تکینگی به دلیل حذف اثر زمینه توانایی بهتری برای تشخیص لبه‌ها دارد. تشخیص لبه با روش گرادیان کل کیفیت پایینی داشته و روش سیگنال تحلیلی در تشخیص لبه نویز زیادی را نشان می‌دهد [۳]. چن و چنگ (۲۰۱۶) برای اکتشاف ذخایر پلی‌متال واقع در چین برای تشخیص بی‌هنجاری‌های ضعیف پوشیده شده در سطح، روش تکینگی را بر روی Fe_2O_3 اعمال کردند. آنها در پژوهش خود روش جدیدی از تکینگی را با استفاده از تبدیل موجک ارائه دادند. بر اساس مطالعات ایشان، روش جدید بر پایه موجک نسبت به روش تکینگی معمولی بهتر می‌تواند بی‌هنجاری‌های ضعیف پنهان شده را تشخیص دهد [۱۰]. گونکالوس و همکاران (۲۰۱۹) برای اکتشاف کمر بند پیریت که توسط لایه ضخیمی از روبراره پوشیده شده است، از روش تکینگی استفاده کردند و چندین آنومالی شامل عناصر مس، روی و کبالت را با روند NW-SE به WNW-ESE شناسایی کردند [۱۱]. قاسم‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) روش تکینگی را برای تشخیص آنومالی‌های ژئوشیمیایی مس در جنوب ایران به کار بردند. آنها عوامل متعددی مثل توپوگرافی، پوشش گیاهی، سنگ میزبان و شرایط اقلیمی را بر رسوبات آبراهه‌ای در مقیاس منطقه مؤثر دانستند به همین دلیل استفاده از روش‌هایی چون تکینگی را ضروری دانسته و در پژوهشی که انجام دادند، این روش را در تشخیص آنومالی

غلظت هر نمونه آنومال، n تعداد نمونه‌های آنومال، C_0 غلظت زمینه، $2l$ فاصله بین دو پروفیل و m تعداد پروفیل‌ها است.

شاخص زونالیته از نسبت تولید سطحی عناصر فوق کانساری (Pb, Zn) به تولید سطحی عناصر تحت کانساری (Cu, Ag) برای هر بی‌هنجاری محاسبه می‌شود (رابطه ۳).

$$K_p = \frac{P(Pb) * P(Zn)}{P(Cu) * P(Ag)} \quad (3)$$

۲-۲- تکنیکی

فرض شده است μ (V) مقدار کل فلز در حجم V و $C(V)$ چگالی فلز در حجم V و برابر $\mu(V)/V$ باشد. رابطه فرکتالی بین این متغیرها را می‌توان به صورت رابطه‌های (۴) و (۵) بیان کرد:

$$\mu(V) = cV^{\alpha/3} \quad (4)$$

$$C(V) = cV^{\alpha/3-1} \quad (5)$$

در این رابطه‌ها α مقدار تکنیکی محلی است. به طور مشابه در فضای دوبعدی فرض می‌شود که $\mu(V)$ و $\rho(A) = \mu(A)/A$ به ترتیب مقدار کل فلز و چگالی فلز در سطح A باشند. بنابراین رابطه‌های (۴) و (۵) در دو بُعد به صورت رابطه‌های (۶) و (۷) خواهد شد:

$$\mu(A) = cA^{\alpha/2} \quad (6)$$

$$C(A) = cA^{\alpha/2-1} \quad (7)$$

در حالت دوبعدی برای تعیین α مربع‌هایی با مرکز ثابت در اندازه‌های $\varepsilon_{min}, \varepsilon_i = (2i-1) \varepsilon_{min}, \dots, \varepsilon_n = \varepsilon_{max} (i=1,2,3,\dots,n)$ در نظر گرفته می‌شود که در این رابطه n برابر تعداد پنجره‌ها، ε_{min} اندازه کوچک‌ترین پنجره و ε_{max} اندازه بزرگ‌ترین پنجره است. سپس مقدار میانگین غلظت مربوط به محدوده $A(\varepsilon_i) = \varepsilon_i^2$ محاسبه می‌شود. رابطه بین میانگین غلظت در هر پنجره و اندازه پنجره مطابق رابطه (۷) است. اگر از این رابطه لگاریتم گرفته شود، رابطه بین اندازه پنجره و میانگین غلظت در هر پنجره به صورت رابطه یک خط خواهد بود (رابطه ۸).

$$\text{Log } \rho[A(\varepsilon_i)] = c + (\alpha - 2) \log \varepsilon_i \quad (8)$$

در این رابطه c مقداری ثابت و $\alpha - 2$ شیب خط برازش شده است (شکل ۱). چنانچه با افزایش اندازه پنجره، غلظت میانگین افزایش یابد، شیب خط مثبت ($\alpha - 2 < 0$) نشان دهنده تهی‌شدگی در آن نقطه خواهد بود و برعکس شیب

با روش‌های آماره U و روش فرکتال عیار- مساحت مقایسه کردند [۱۲].

در این پژوهش برای تشخیص بی‌هنجاری‌های عمقی از روش تکنیکی استفاده شده است، ولی بر خلاف روش‌های پیشین که تکنیکی بر روی تک عنصر اعمال شده بود، در این مطالعه روش تکنیکی بر شاخص زونالیته اعمال شده است.

۲- روش مطالعه

۲-۱- زونالیته ژئوشیمیایی

زون‌بندی هاله ژئوشیمیایی یک طبیعت فضایی و مفهوم جهتی است که می‌تواند توسط سه پارامتر بُعد (فضا)، جهت و غلظت عنصر تعریف شود [۱۳]. در اطراف یک توده کانسار سه نوع منطقه‌بندی هاله اولیه در جهت طولی، عرضی و محوری وجود دارد، اما در عمل تأکید بر مطالعه منطقه‌بندی قائم هاله‌های اولیه است. زیرا این نوع منطقه‌بندی اغلب در ارتباط با راستای جریان سیال کانه‌دار است [۱۴-۱۶] و می‌تواند به عنوان ملاکی برای تعیین موقعیت سطح فرسایش آنومالی‌های ژئوشیمیایی نسبت به توده کانسار به کار رود. منطقه‌بندی قائم در هاله‌های نخستینی که با کانی‌سازی گرمایی تشکیل شده، نخستین بار توسط کابلوکوف و ورتیوف در کانسارهای اورانیوم شناخته شد. در کانسارهایی با شیب زیاد، منطقه‌بندی محوری منطبق بر منطقه‌بندی قائم و در کانسارهایی با شیب کم این منطقه‌بندی بر منطقه‌بندی افقی منطبق است [۱۷، ۱۸].

برای محاسبه شاخص زونالیته، سالووف [۱۹] استفاده از تولید سطحی و گریگوریان [۱۷] استفاده از شاخص کانی‌سازی را پیشنهاد کردند.

در یک شبکه نمونه‌برداری سیستماتیک تولید خطی در طول یک پروفیل و تولید سطحی به ترتیب از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌شود:

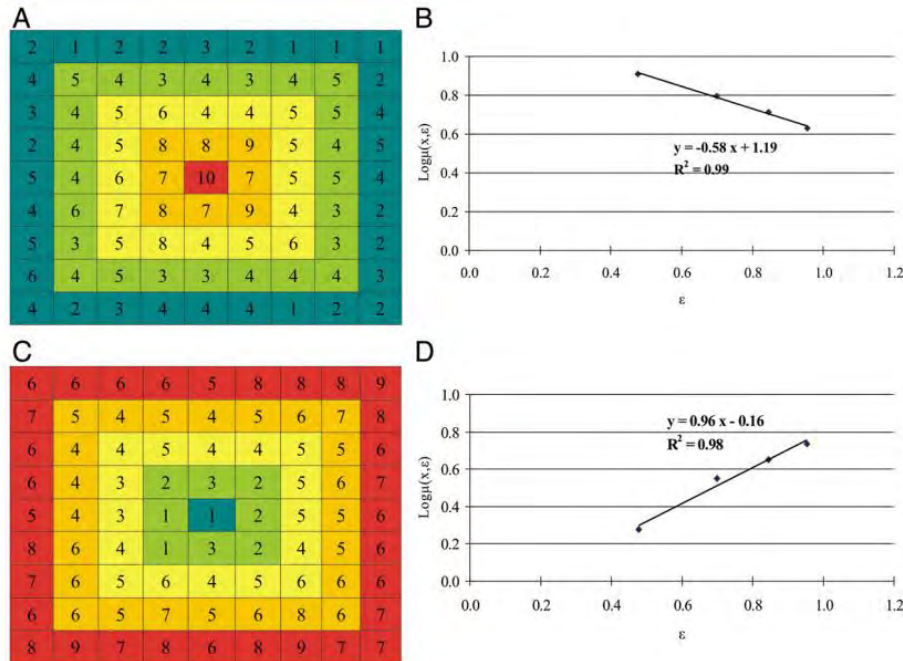
$$M = \Delta x \left(\sum_{x=1}^n C_x - nC_0 \right) \quad (1)$$

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

در این رابطه‌ها M و P به ترتیب تولید خطی و تولید سطحی، Δx فاصله بین نمونه‌ها در طول پروفیل، C_x

مناطق ناهنجار مقدار تکینگی کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از ۲ خواهد بود. پنجره حرکت می‌کند و به طور مشابه مقدار تکینگی برای تمام نقاط موجود در منطقه محاسبه می‌شود (شکل ۱).

منفی خط ($\alpha > 2$) غنی‌شدگی را نشان می‌دهد. در نتیجه مقادیر تکینگی کوچک‌تر از ۲ ($\alpha > 2$) غنی‌شدگی و مقادیر بزرگ‌تر از ۲ ($\alpha < 2$) تهی‌شدگی را نشان می‌دهد [۷]. در مناطق معمولی مقادیر تکینگی نزدیک به ۲ است و برای



شکل ۱: مثالی از میانگین پنجره متحرک. A و C پنجره‌هایی با اندازه‌های ۳*۳، ۵*۵، ۷*۷ و ۹*۹ به ترتیب برای تخمین غنی‌شدگی و تهی‌شدگی به کار برده شده. B, D ارتباط بین سایز پنجره‌ها و میانگین غلظت در هر پنجره برای شکل‌های A و C [۷].

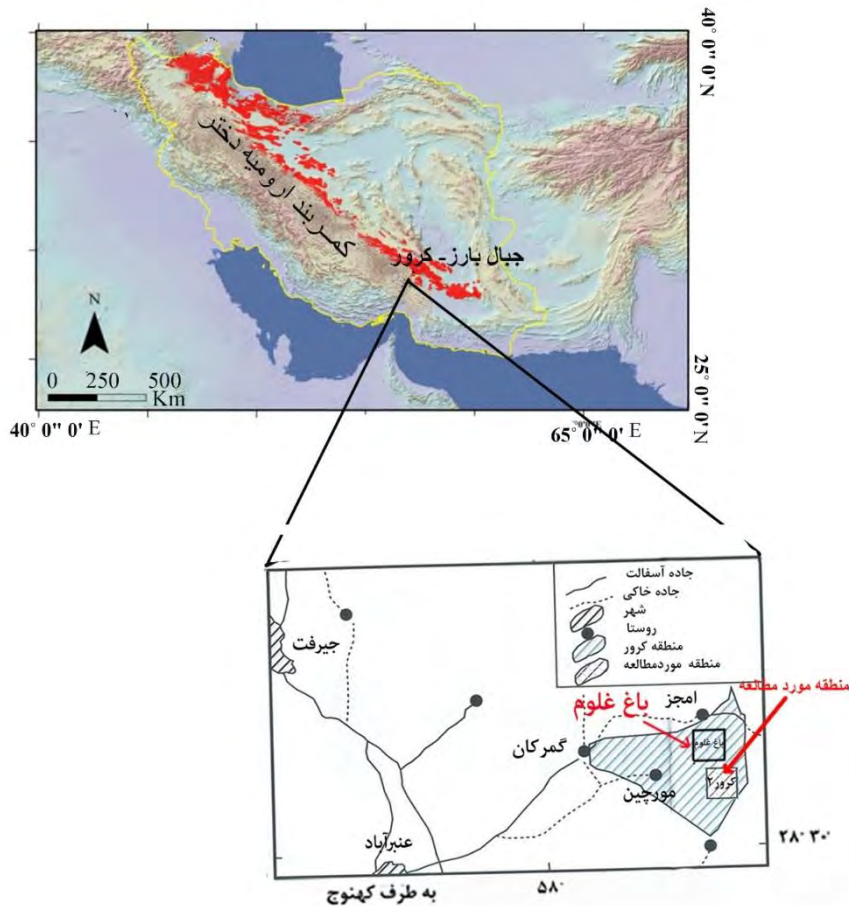
جاده عنبرآباد- کهنوج تا روستای رود فرق و کرور است (شکل ۲).

سنگ‌های این محدوده عبارتند از گرانیت در حاشیه غربی، سنگ‌های دیوریتی، میکرودیوریت همراه با دایک‌های گرانودیوریتی که بخش اعظم و تمامی نیمه غربی را پوشانیده‌اند (شکل ۳). رخنمون واحدهای گرانیتی عمدتاً در بخش شرقی مشاهده می‌شود و واحدهای دیوریتی در بخش جنوبی گسترش بیشتری دارند. کانی‌سازی مس در محدوده‌های دگرسانی کرور و باغ‌غلوم به شکل استوک ورک همراه با دگرسانی به صورت گسترده دیده می‌شود. مالاکیت کانه اصلی در بخش‌های سطحی است و کانه‌های سولفیدی مس مانند کالکوپیریت در منطقه وجود دارد [۲۰]. سیستم غسل حاکم بر محدوده تقریباً به صورت متقاطع و با دو روند کلی شمالی- جنوبی و شرقی- غربی است.

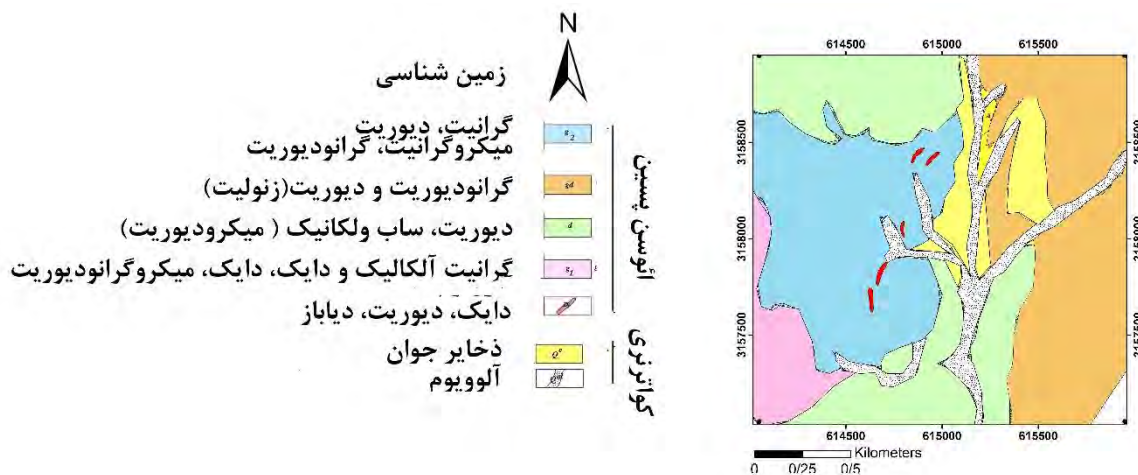
برای اعمال روش تکینگی منطقه به صورت منظم در فاصله‌های ۱۰۰ متری شبکه‌بندی شده و مقادیر غلظت و شاخص زونالیته برای هر یک از نقاط تخمین زده شد. سپس روش تکینگی برای پنجره‌هایی با اندازه‌های ۱۰۰×۱۰۰ متر، ۳۰۰×۳۰۰ متر، ۵۰۰×۵۰۰ متر، ۷۰۰×۷۰۰ متر، ۹۰۰×۹۰۰ متر، ۱۱۰۰×۱۱۰۰ متر و ۱۳۰۰×۱۳۰۰ متر برای شاخص زونالیته انجام شد.

۳- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

منطقه کرور ۲ در فاصله حدود ۴۳ کیلومتری شرق جیرفت، در فاصله ۷ کیلومتر شمال روستای رود فرق و در مختصات E ۵۷° ۹' ۵۸" تا ۵۸° ۱۱' ۷" و N ۳۲' ۶" ۲۸ تا ۲۸° ۳۳' ۸" قرار می‌گیرد. راه دسترسی آن از طریق



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه کرور و منطقه باغ غلوم



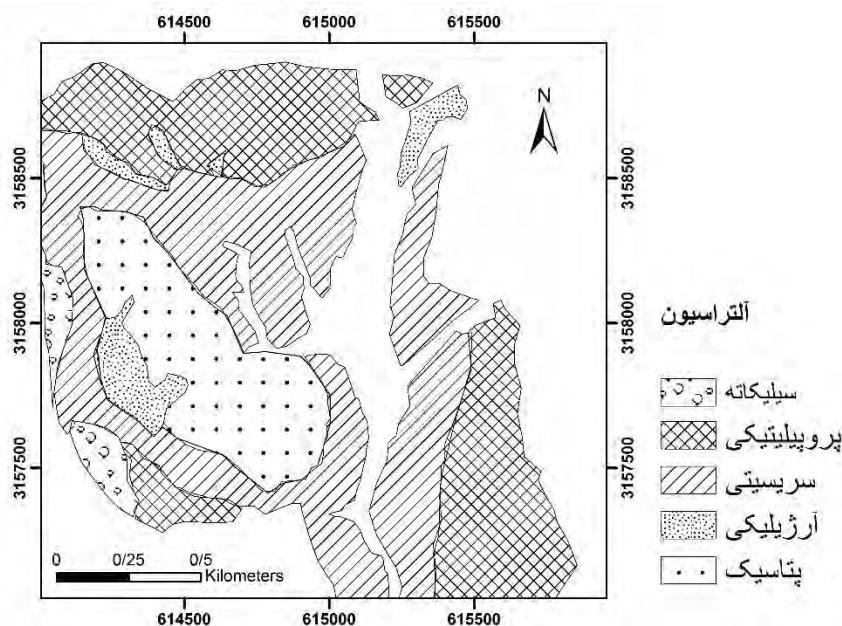
شکل ۳: نقشه زمین شناسی منطقه کرور ۲ [۲۱]

بی‌هنجاری‌های مس و مولیبدن بیشترین تمرکز را در این محدوده دارند [۲۰، ۲۱]. زون دگرسان آرژیلیک (رسی) نیز به صورت باریکه‌ای در حاشیه غربی هر دو محدوده شامل مجموعه کائولینیت، کوارتز، کلریت، سریسیت و پیریت دیده می‌شود [۲۰]. دگرسانی سریسیت همراه با کوارتز، کلریت و کانی‌های پیریت و کالکوپیریت به صورت حلقوی دور دگرسانی پتاسیک (مطابق ساختار کانسارهای

یکی از شاخصه‌های زمین‌شناسی منطقه حضور انواع مختلف دگرسانی مربوط به سیستم مس پورفیری است که در هر دو محدوده باغ‌غلوم و کرور ۲ حاکم است. در بخش مرکزی و به ویژه مرکزی غربی محدوده، دگرسانی پتاسیک انتشار زیادی دارد. کانی‌های شاخص این زون شامل فلدسپات‌های پتاسیک ثانویه، کلریت، بیوتیت ثانویه همراه با کانی‌های پراکنده پیریت و کالکوپیریت است.

پروپیلیتیکی به صورت یک نیم دایره حاشیه‌های شرقی، شمالی و شمال غرب محدوده را پوشانیده است در حاشیه غربی محدوده باریکه‌ای از دگرسانی سیلیسی به صورت کوارتز، اوپال و کالسدونی نیز وسعت چندین هکتار را پوشانیده است [۲۰]. زون پروپیلیتیکی، زون‌های دگرسان قبلی را در بر گرفته است. کانی‌های اپیدوت، کلریت، سریسیت و پیریت نیز در هر دو محدوده از تمرکز بالایی برخوردار هستند [۲۱] (شکل ۴).

پورفیری) را فرا گرفته است. دگرسانی‌های سریسیت، پروپیلیتیکی نیز در این منطقه اتفاق افتاده است. در بخش مرکزی منطقه سنگ‌های گرانیتی، دیوریتی، میکروگرانیتی شدیداً دگرسان شده و دگرسانی پتاسیک همراه با کانی‌سازی‌های پیریت، کالکوپیریت و مالاکیت بیشترین گسترش را دارند. بخش شرقی محدوده اکتشافی را واحدهایی از گرانودیوریت (gd) و دیوریت پوشانیده است و بخش‌های غربی و جنوبی آن تحت تأثیر دگرسانی‌های سریسیتی و پروپیلیتیکی واقع شده است. دگرسانی



شکل ۴: نقشه آلتراسیون کرور ۲۱ [۲۱]

است. عناصر کانی‌سازی شده در کانسار کرور مثل مس و گوگرد نیز در نمونه‌های گوسان غنی‌شدگی نشان می‌دهند [۲۲].

۴- بحث و بررسی

با توجه به مساحت محدوده‌های اکتشافی کرور ۲، تقریباً چهارصد نمونه سنگ از شبکه نمونه‌برداری به صورت صد متر در صد متر و در امتداد خط مبنای شمالی-جنوبی برداشت شده است. همچنین داده‌های ژئوشیمیایی در دو گمانه حفاری (BH13, BH22) واقع در منطقه نیز بررسی شد، که در گمانه ۱۳ تعداد ۲۰۵ نمونه از سطح تا عمق ۴۰۰ متری، نمونه‌برداری و تعداد ۲۲۵ نمونه از سطح تا عمق ۴۵۰ متری گمانه ۲۲ برداشت شده است. پس از برداشت به وزن ۴ الی ۷ کیلوگرم (به تعداد ۱۰ الی ۲۰ قطعه سنگ از حواشی هر یک از ایستگاه‌ها) آماده‌سازی

لازم به ذکر است که انتشار دایک‌های دیوریتی، میکرودیوریتی در محدوده دگرسانی پتاسیک و سریسیتی از تمرکز بیشتری برخوردار هستند (شکل ۳ و ۴) [۲۱]. پیریت در بخش‌های مختلف به صورت پراکنده وجود دارد. در بخش‌های آرژیلیکی کمتر دیده می‌شود ولی درون بخش‌های سیلیسی و بخش‌های پتاسیک مقدار پیریت آن فراوان‌تر است. گاه در سنگ، قالب‌های به جا مانده از پیریت را می‌توان مشاهده کرد که توسط اکسیدهای آهن پر شده است. در واقع در اثر فرایند هوازدگی و اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی آهن‌دار مثل پیریت، اکسیدهای آهن در قسمت بالایی متمرکز شده و گوسان تشکیل شده است. زون گوسان در منطقه کرور ۲ در محدوده دگرسانی فیلیک و زون میلونیتی توسعه یافته است. کانی‌های زون گوسان در کرور بیشتر شامل گوتیت، هماتیت، ژوراسیت، آلونیت، مسکویت و کانی‌های رسی

است. پارامترهای آماری داده‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

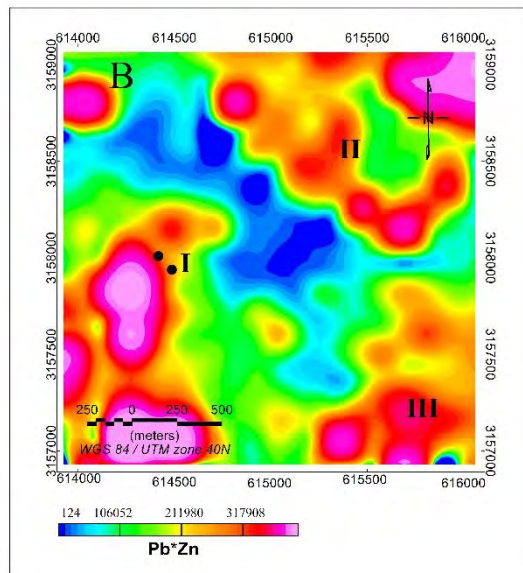
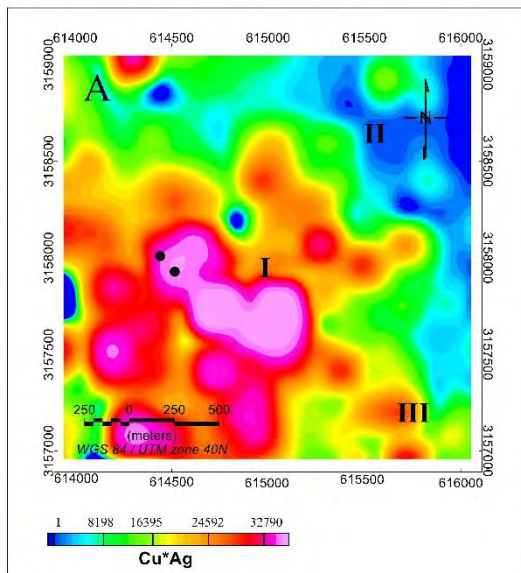
شده‌اند. نمونه‌ها توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور برداشت شده و تجزیه عناصر به روش اسپکترومتری نشری در آزمایشگاه شرکت جیانگسی در چین انجام شده

جدول ۱: پارامتر آماری داده‌های منطقه کرور ۲

انحراف معیار	مد	میانگین	پیشینه	کمینه	مس
۱۱۹۰/۳۸	۱۱۹/۱	۶۴۲/۱	۱۶۷۴۶	۱۰/۵	
۰/۵۹	۰/۱۲۶	۰/۴۱۹	۶/۶۴	۰/۰۲۹	نقره
۷۴/۸	۱۸/۷	۳۸/۶	۹۸۱/۱	۶/۸	سرب
۸۳/۷	۴۳	۹۳/۲	۵۲۳	۱۸	روی

در نظر گرفته شد. در قسمت شمال شرقی و جنوب غربی نیز عناصر فوق کانساری بیشترین تمرکز را دارند که به ترتیب به عنوان بی‌هنجاری‌های II و III در نظر گرفته شدند (شکل ۵).

با توجه به نقشه پراکندگی عناصر فوق کانساری و تحت کانساری در کرور ۲، سه بی‌هنجاری در این منطقه مشخص شد. در قسمت‌های مرکزی و جنوب غربی بیشترین تمرکز عناصر تحت کانساری وجود دارد که به عنوان بی‌هنجاری I



شکل ۵: پراکندگی حاصلضرب عناصر (A) تحت کانساری (B) فوق کانساری در کرور ۲

بر اساس این مدل، مقادیر شاخص زونالیته در آنومالی بی‌هنجاری I بیانگر این است که سطح بالایی کانی‌سازی فرسایش یافته است و سطح فرسایش به مرکز کانی‌سازی رسیده است. بر اساس پژوهش‌های پیشین توسط برنا و سودی شعار (۲۰۰۵) [۲۱]، بی‌هنجاری شماره یک مس به دلیل پایین بودن عیار سرب و روی و بالا بودن عیار مس و مولیبدن، می‌تواند بر سطح یک توده کانی‌سازی منطبق باشد ولی به دلیل پایین بودن عیار مس قاعدتاً نمی‌تواند معرف یک توده پورفیری با عیار مس اقتصادی در سطح باشد. بنابراین بی‌هنجاری در این بخش از نوع پراکنده است.

در آنومالی بی‌هنجاری I مقدار شاخص زونالیته $Pb*Zn/Cu*Ag$ برابر ۲/۴ است (جدول ۲). برای تعیین سطح فرسایش ماده معدنی با کمک شاخص زونالیته از مدل ارائه شده توسط ضیایی [۲۳] استفاده شد (شکل ۶).

جدول ۲: تولید سطحی و شاخص زونالیته در منطقه کرور ۲

K	P(Cu)	P(Ag)	P(Pb)	P(Zn)	Zone
۲/۴	۱۶۹۶۷۰	۶۱/۱	۳۲۴۶	۷۳۷	I
۸۴/۶	۱۷۷۲۶	۶/۵	۱۲۴۳	۷۸۴۳	II
۱۷/۹	۲۵۵۴۸	۸/۸	۱۹۱۵	۲۰۲۱	III

سطح فرسایش	مقطع عمودی	$Vz_1 = \frac{Zn * Pb}{Cu * Mo}$	$Vz_2 = \frac{Zn * Pb}{Cu * Ag}$	$Vz_3 = \frac{Zn * Pb * Bi}{Cu * Mo * Ag}$
I	بالای ماده معدنی	>5	>100	>1
II	بالای ماده معدنی	0.5-5	10-100	0.1-1
III	ماده معدنی	0.05-0.5	1-10	0.01-0.1
IV	ماده معدنی	0.005-0.05	0.1-1	0.001-0.01
V	پایین ماده معدنی	0.0005-0.005	0.01-0.1	0.0001-0.001
VI	پایین ماده معدنی	<0.0005	<0.01	<0.0001
	$Vz(I)/Vz(VI)$	10000	10000	10000

شکل ۶: مدل شاخص زونالیته قائم برای ذخایر مس پورفیری بر پایه ذخایر مس پورفیری استاندارد در قزاقستان، بلغارستان، ارمنستان و ایران [۲۳]

همان طور که در نقشه تکینگی شاخص زونالیته و نقشه باینری حاصل از آن مشاهده می‌شود، در نیمه شرقی منطقه مقادیر تکینگی پایین است و می‌توان گفت شاخص زونالیته در این بخش غنی شده و احتمال وجود ماده معدنی در عمق این قسمت وجود دارد (شکل ۸). که با نتایج به دست آمده از روش زونالیته در پژوهش‌های گذشته [۲۱] و نتایج به دست آمده از روش زونالیته تطابق دارد. در واقع در بخش شرقی منطقه بی‌هنجاری قوی وجود دارد که هر دو روش تکینگی و زونالیته این بی‌هنجاری را تشخیص داده‌اند.

در نیمه غربی منطقه شاخص زونالیته در بخش‌های نزدیک به مرکز تهی‌شدگی و در قسمت غربی غنی‌شدگی را نشان می‌دهد. روش تکینگی شاخص زونالیته بی‌هنجاری را در بخش غرب منطقه نشان می‌دهد که گمانه‌های حفاری ۲۲ و ۱۳ در این منطقه نیز وجود این بی‌هنجاری را تایید می‌کند در حالی که روش زونالیته قادر به تشخیص این بی‌هنجاری نبوده است.

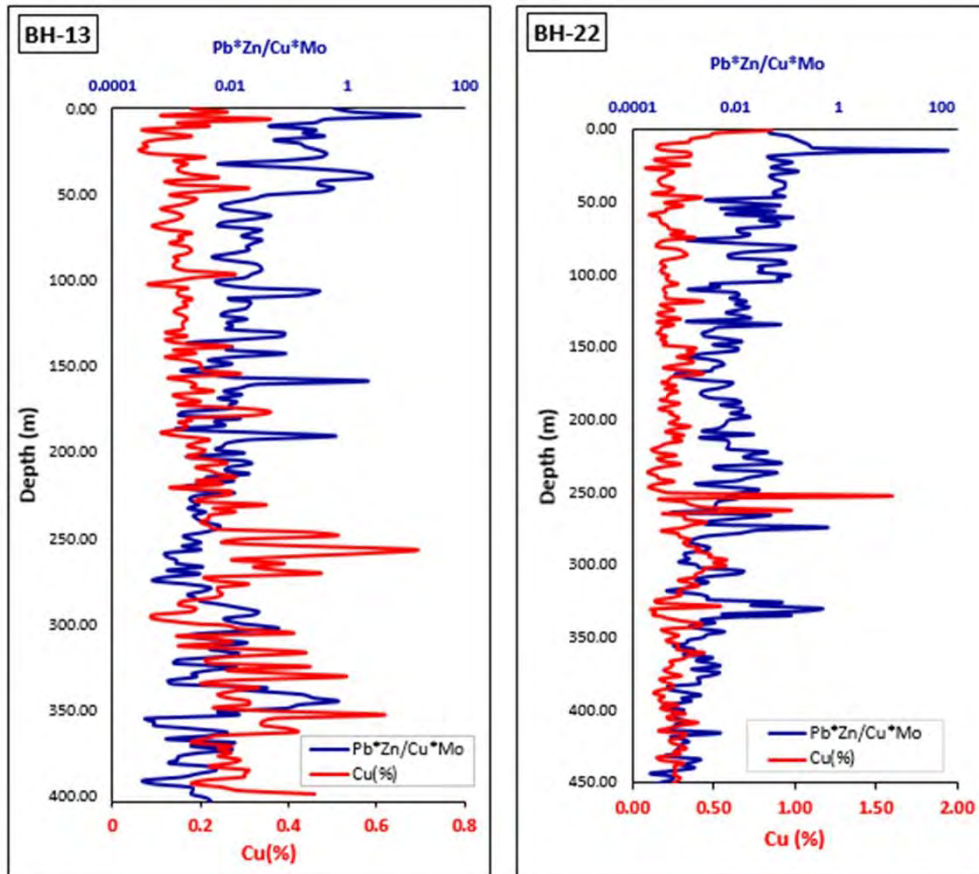
بنابراین روش تکینگی در این منطقه توانسته است بی‌هنجاری ضعیف پنهان در بخش غربی را که روش زونالیته قادر به تشخیص آن نبود، به خوبی تشخیص دهد. بر اساس نقشه باینری به دست آمده از محاسبه مقادیر تکینگی برای شاخص زونالیته، بخش شمال شرقی کرور ۲ به عنوان بی‌هنجاری جدید کانی‌سازی پنهان معرفی می‌شود.

در بی‌هنجاری II مقدار بزرگ‌تر از ۱۰ برای شاخص زونالیته، سطح فرسایش را در بالای کانی‌سازی نشان می‌دهد و کانی‌سازی در این بی‌هنجاری را از نوع پنهان معرفی می‌کند که با نتایج پژوهش‌های پیشین در این منطقه تطابق دارد. برنا و سودی شعار (۲۰۰۵) [۲۱] نیز این بی‌هنجاری در کرور ۲ را از نوع پنهان معرفی کردند.

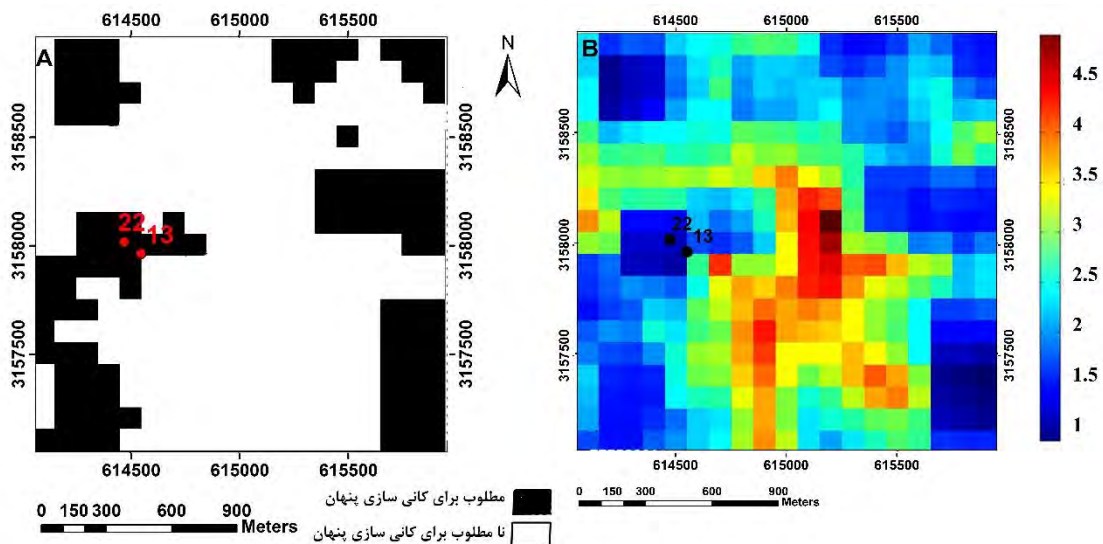
شاخص زونالیته $Pb*Zn/Cu*Ag$ در بی‌هنجاری III برابر ۱۷/۹ شد که این مقادیر معرف حضور کانی‌سازی پنهان در منطقه است. نتایج پژوهش پیشین [۲۱] نیز وجود بی‌هنجاری پنهان را در این منطقه نشان می‌دهد.

همان طور که مشاهده شد بر اساس روش زونالیته، در نیمه شرقی دو بی‌هنجاری پنهان در بخش شمالی و جنوبی وجود دارد و نیمه غربی کرور ۲ به عنوان بی‌هنجاری کاذب معرفی شد. در حالی که گمانه‌های ۱۳ و ۲۲ حفاری شده در نیمه غربی این منطقه وجود ماده معدنی را در عمق نشان می‌دهد (شکل ۷). تغییرات شاخص زونالیته

($Pb*Zn/Cu*Mo$) در این دو گمانه از سطح به عمق روند کاهشی دارد و بیشینه غلظت مس در عمق ۲۵۰ متری این دو گمانه مشاهده می‌شود که بیانگر این است که سطح فرسایش در بالای ماده معدنی است و ماده معدنی در عمق وجود دارد. بنابراین در نیمه غربی منطقه بی‌هنجاری ضعیفی از یک کانی‌سازی پنهان در عمق وجود دارد که روش زونالیته قادر به تشخیص آن نبوده است. از این رو برای تشخیص محل این بی‌هنجاری ضعیف و بی‌هنجاری‌های احتمالی دیگر در منطقه از روش تکینگی استفاده شد.



شکل ۷: تغییرات شاخص زونالیته $Pb*Zn/Cu*Mo$ و عنصر مس در گمانه‌های ۱۳ و ۲۲



شکل ۸: (A) نقشه باینری تکینگی شاخص زونالیته برای مقادیر کوچک‌تر از ۲، (B) نقشه تکینگی شاخص زونالیته

قرار گرفت. اما استفاده از این روش با محدودیت‌هایی مواجه است. برای استفاده از روش زونالیته نیاز به داشتن مدل ذخایر مشابه جهت مقایسه است و روش زونالیته به تنهایی و به صورت مستقل قادر به تشخیص آنومالی پنهان نیست. بررسی انجام شده در این پژوهش نشان داد در

۵- نتیجه‌گیری

از دیر باز تا کنون روش‌های متعددی برای اکتشاف ذخایر پنهان استفاده می‌شده است. پس از ارائه روش زونالیته، این روش به عنوان روشی کارآمد مورد استفاده

network to identify Ag-Au-Pb-Zn polymetallic mineralization associated geochemical anomaly in Pangxidong district. *Journal of Geochemical Exploration*, 203, 87-95.

[5] Cheng, Q., 2007. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Review*, 32(1), 314-324.

[6] Yilmaz, H., Yousefi, M., Parsa, M., Sonmez, F. N., & Maghsoodi, A. 2019. Singularity mapping of bulk leach extractable gold and- 80# stream sediment geochemical data in recognition of gold and base metal mineralization footprints in Biga Peninsula South, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 153, 156-172.

[7] Zuo, R., Cheng, Q., Agterberg, F. and Xia, Q., 2009. 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*, 101(3), 225-235.

[8] Wang, W. 2010. Application of spatial information fusion techniques in GeoDAS for mapping Sn mineralization associated intrusions in Gejiu ore district, Southern Yunnan, China. in: *Masters Abstracts International*, 176pp.

[9] Sun, X., Gong, Q., Wang, Q., Yang, L., Wang, C. and Wang, Z., 2010. Application of local singularity model to delineate geochemical anomalies in Xiong'ershan gold and molybdenum ore district, Western Henan province, China. *Journal of Geochemical Exploration*. 107(1), 21-29.

[10] Chen, G. and Cheng, Q., 2016. Singularity analysis based on wavelet transform of fractal measures for identifying geochemical anomaly in mineral exploration. *Computer & Geoscience*, 87, 56-66.

[11] Gonçalves, M. A., & Mateus, A. 2019. "Delimiting geochemical anomalies in the exploration of covered deposits with multifractal methods and using stream sediment data from the Iberian Pyrite Belt, Southwest Iberia". *Ore Geology Reviews*, 112, 103018.

[12] Ghasemzadeh, S., Maghsoudi, A., Yousefi, M., & 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*, 113, 103-115.

[13] Hamedani, M.L., 2012. Orebody modelling for exploration: the western mineralization, Broken Hill, NSW. *Natural Resources Research*, 21(3), 325-345.

صورتی که روش زونالیته و روش تکینگی با هم تلفیق شوند، با در نظر گرفتن عدد ۲ به عنوان حد آستانه، می‌توان بدون نیاز به مدل ذخایر مشابه به وجود آنومالی در عمق پی برد. در این پژوهش روش تکینگی به جای تک عنصر بر روی شاخص زونالیته داده‌های محدوده کرور اعمال شد. از آنجایی که روش تکینگی در تشخیص آنومالی‌های ضعیف توانا است، تلفیق آن نتایج مطلوب و مؤثری در تشخیص آنومالی پنهان در این منطقه داشت. چنانچه در این پژوهش مشاهده شد، بی‌هنجاری عمیق مس در بخش غرب منطقه وجود داشت که با روش زونالیته تشخیص داده نشد. اما با اعمال روش تکینگی بر روی شاخص زونالیته، این منطقه به خوبی تفکیک شد. چرا که روش تکینگی قادر است بی‌هنجاری‌های ضعیف را مشخص کند و اگر این فرایند بر روی شاخص زونالیته اعمال شود، محل بی‌هنجاری‌های ضعیف عمیق را به خوبی نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از نقشه‌های این روش با داده‌های دو گمانه حفاری موجود در منطقه اعتبار سنجی شد. عیار مس در گمانه‌های حفر شده در مناطقی که به عنوان بی‌هنجاری مس با این روش معرفی شدند، عیار بالا و اقتصادی مس را در عمق نشان دادند. بنابراین می‌توان گفت روش تکینگی شاخص زونالیته روشی مفید برای تشخیص بی‌هنجاری‌های پنهان در عمق است و بر خلاف روش زونالیته نیاز به استفاده از مدل و بانک اطلاعاتی از ذخایر مشابه ندارد و به صورت مستقل محل بی‌هنجاری پنهان را تفکیک می‌کند.

مراجع

[1] Cheng, Q. 2006. Singularity-generalized self-similarity-fractal spectrum (3S) models. *Earth Science-Journal of China University of Geoscience*, 31, 337-348.

[2] Turcotte, D.L., 1997. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, 412pp

[3] Chen, G., Cheng, Q., Zuo, R., Liu, T. and Xi, Y., 2015. Identifying gravity anomalies caused by granitic intrusions in Nanling mineral district, China: a multifractal perspective. *Geophysical Prospecting*, 63(1), 256-270

[4] Yu, X., Xiao, F., Zhou, Y., Wang, Y., & Wang, K. 2019. Application of hierarchical clustering, singularity mapping, and Kohonen neural

- [14] Li, H., Wang, Z. and Li, F., 1995. Ideal models of superimposed primary halos in hydrothermal gold deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 55(1-3), 329-336.
- [15] Li, H., Zhang, G. and Yu, B., 2006. Tectonic Primary Halo Model and the Prospecting Effect during Deep Buried Ore Prospecting in Gold Deposits, in, Geological Publishing House, Beijing.
- [16] Li, H., Zhang, W., Chang, F., Zheng, T., Liu, B., Wang, Z., Tang, L., Liu, Z., Li, F. and Wang, J., 1998 Primary Halo Model for Buried Ore Prospecting of Large and Super-large Gold Deposits, in, Metallurgical Industry Press, Beijing.
- [17] Beus, A.A and Grigorian, S.V., 1977. *Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits*. Applied Publishing Ltd.
- [18] Harraz, H. Z., 1995. Primary geochemical haloes, El Sid gold mine, Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 20(1):61-71.
- [19] Solovov, A. P. and Kuznetov, V., 1987. *Geochemical prospecting for mineral deposits*, Mir Publ. 282 pp.
- [20] Borna, B., 2004. "Primary exploration of copper in Kerver (Jebal Barez): scale 1:20000. National Iranian Copper Industries Company (NICICO) Reports". 151p (In Persian).
- [21] Borna, B., Sodishoar, P., 2005. "Primary exploration of copper in Kerver: scale 1:5000. National Iranian Copper Industries Company (NICICO) Reports", 70 p (In Persian).
- [22] Yousefi, J., Ranjbar, H., Dargahi, S., Taghizadeh, H., 2019." Mineralogy and geochemistry of gossan in Kerver porphyry copper deposit, Kerman copper belt, Iran", 10th symposium of Iranian society of economic geology. Esfahan.
- [23] Ziaii M., Carranza E. J. M. and Ziaei M. 2011. "Application of geochemical zonality coefficients in mineral prospectivity mapping" *Computer & Geoscience.*, 37, 12, pp. 1935.