

سینگولاریتی - ارزیابی کمی آنومالی‌های ژئوشیمیایی در کانسار کرور کرمان

سمانه صفری^۱، منصور ضیایی^{۲*}^۱ دکتری، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود s.sfari@yahoo.com
^۲ دانشیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود m.ziiai47@gmail.com

چکیده

ارزیابی آنومالی‌های ژئوشیمیایی پنهان در معادن فلزی از چالش‌های اساسی شاخه ژئوشیمی معادن است. در سال‌های گذشته مدل‌های مختلفی برای تیپ‌های مختلف کانی‌شناسی با روش زونالیت‌ها ارائه شده است که این مدل‌ها محدودیت‌هایی دارند. این تحقیق با توسعه روش زونالیت‌ها و ترکیب آن با روش سینگولاریتی، مدل جدید اکتشافی برای ارزیابی آنومالی‌ها ارائه کرده است. این روش برای تعیین غنی‌شدگی و تهی‌شدگی شاخص زونالیت‌ها برای ذخیره مس پورفیری کرور (باغ غلوم) در ناحیه جبال بارز به کار گرفته شده و نتایج به دست آمده با روش زونالیت‌ها و روش فرکتال مقایسه شده است. بدین منظور ۴۰۰ نمونه سنگ به صورت شبکه منظم ۱۰۰×۱۰۰ از منطقه برداشت و غلظت عناصر مس، سرب، روی، نقره، منگنز، کروم، نیکل، مولیبدن، قلع، وانادیوم، کبالت، باریوم، تنگستن، آرسنیک، بیسموت، جیوه، برلیوم و آنتیموان به روش اسپکترومتری نشری اندازه‌گیری شد. بر اساس روش زونالیت‌ها در صورتی که مقدار شاخص زونالیت‌ها $Pb^*/Zn/Cu^*Ag$ بزرگتر از ۱۰ باشد، آنومالی از نوع پنهان است. مقادیر سینگولاریتی شاخص زونالیت‌ها کوچکتر از ۲ نشان‌دهنده غنی‌شدگی شاخص زونالیت‌ها و معرف وجود آنومالی پنهان و مقادیر بزرگتر از ۲ تهی‌شدگی شاخص زونالیت‌ها را نشان می‌دهد. بخش شمالی منطقه با سینگولاریتی کوچکتر از ۲ و شاخص زونالیت‌ها بزرگتر از ۱۰ به عنوان آنومالی پنهان و آنومالی‌های بخش مرکزی و جنوب غرب از نوع دروغین ارزیابی شد که نتایج پژوهش‌های پیشین انجام شده در این منطقه آن را تأیید می‌کنند. روش فرکتال نیز با ارائه حد آستانه ۳۹۸ برای شاخص زونالیت‌ها همین نتیجه را داشت با این تفاوت که آنومالی به دست آمده از روش سینگولاریتی مساحت کمتری را نشان داد. برتری روش سینگولاریتی شاخص زونالیت‌ها نسبت به روش زونالیت‌ها این است که در این روش نیازی به دسترسی به بانک اطلاعات ذخایر مس پورفیری نیست و مزیت آن نسبت به روش سینگولاریتی، ضعف روش سینگولاریتی در اکتشاف ذخایر پنهان است.

کلمات کلیدی:

سینگولاریتی، شاخص زونالیت‌ها، آنومالی پنهان

۱- مقدمه

مقایسه فاکتورهای معرف در واقع نوعی مقایسه توصیفی است و مدل‌های ارائه شده نیز توصیفی‌اند و اکتشافی و کاربردی نیستند [۴]. مدل ژئوشیمی معادن بر مبنای پدیده‌های فیزیک و شیمیایی است که خود بر اساس منطق ریاضی بنا شده است. در این مدل با توجه به ثابت بودن روابط عناصر در هر یک از شرایط فیزیکی و شیمیایی کانی تیپ‌های مختلف کانی‌سازی، می‌توان قواعد و قوانین ریاضی را به کار گرفت و در نهایت به الگوهای کاربردی که کمتر تحت تاثیر تعبیر و تفسیرهای توصیفی قرار می‌گیرند، دست یافت [۲ و ۴].

در این مقاله یک مدل کمی با کمک روش جدید سینگولاریتی زونالیده برای تشخیص محل ذخایر پنهان ارائه شده است. روش سینگولاریتی برای تشخیص آنومالی‌های ضعیف به کار می‌رود و پژوهش‌های زیادی برای تشخیص آنومالی‌های ضعیف با این روش انجام شده است [۱۶-۵]. چنگ از روش سینگولاریتی برای پیش‌بینی ذخایر اسکارن قلع و ذخایر هیدروترمال پوشیده شده با مواد روباره در منطقه گیجو در چین استفاده کرد [۷]. وی برای این کار مقدار سینگولاریتی را برای عنصر قلع محاسبه کرد. در این مقاله نشان داده شده است که اعمال روش سینگولاریتی بر روی تک عنصر همیشه نتایج درستی برای اکتشاف ذخایر پنهان نخواهد داشت و اگر سینگولاریتی به جای تک عنصر بر روی شاخص زونالیده اعمال شود، نتایج بهتری به دست می‌آید. صفری و همکاران اولین بار این روش را در مقیاس ناحیه‌ای در منطقه جبال بارز اعمال کردند و منطقه کرور واقع در جنوب غرب جبال بارز را به عنوان منطقه حاوی پتانسیل برای کانی‌سازی پنهان معرفی کردند [۱۷]. در این مقاله مطالعات بر روی منطقه کرور متمرکز شده و برای اولین بار روش سینگولاریتی شاخص زونالیده در مقیاس محلی در منطقه کرور انجام شده است. منطقه مورد مطالعه در این مقاله منطقه معدنی کرور ۱ یا باغ غلوم واقع در کرمان است. مطالعات اکتشافی انجام شده پیشین در منطقه باغ غلوم نشان می‌دهد که دو آنومالی موجود در شمال غرب و شمال شرق منطقه از نوع کانی‌سازی پنهان است و آنومالی موجود در بخش مرکزی این منطقه از نوع کانی‌سازی

یکی از اهداف اصلی در اکتشافات ژئوشیمیایی پیدا کردن روشی برای تشخیص آنومالی‌های پنهان^۱ از آنومالی پراکنده دروغین و غیراقتصادی^۲ است [۱ و ۲]. انتخاب روش اکتشافی مناسب برای تشخیص این دو کانی‌سازی عمدتاً پیچیده است و از گذشته یکی از مهم‌ترین چالش‌های اکتشافی محسوب می‌شود. ژئوشیمی معادن می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در تشخیص ذخایر پنهان استفاده شود [۲ و ۳]. ژئوشیمی معادن، شاخه جدیدی از ژئوشیمی کاربردی محسوب می‌شود که فرآیندهای ژئوشیمیایی را از لحظه تشکیل ماده معدنی تا جدیدترین فرآیندهای ثانویه (مهاجرت عناصر ناشی از عملکردهای ساخت بشر) مطالعه می‌کند. این مهاجرت‌ها در سیستم‌های ژئوسفر (لیتوسفر - هیدروسفر - بیوسفر - اتمسفر و نئوسفر) زونالیده ژئوشیمیایی عناصر را از فرم میکرو (کانی‌ها) تا ماکرو (کانسارها) در میدان‌های ژئوشیمیایی ایجاد می‌کند. بر حسب ساز و کار مهاجرت (مکانیکی، فیزیکی شیمیایی، بیوژنی، تکنولوژیکی) سیستم‌ها و سدهای متفاوت ژئوشیمیایی سازنده سه نوع اصلی دورنمای ژئوشیمیایی^۳ آند، بنابراین بررسی و مطالعه ترمودینامیک فرآیندهای ژئوشیمیایی نقش اساسی را در درک این مهاجرت‌ها و ارائه مدل هر یک از این سیستم‌ها دارد [۲]. متأسفانه بسیاری از مدل‌ها و نمونه‌های استاندارد ارائه شده برای تیپ‌های مختلف کانی‌سازی جنبه مقایسه‌ای و توصیفی دارند که در بسیاری مواقع با وجود حضور اکثر فاکتورها و پدیده‌های لازم برای شناخت یک تیپ کانی‌سازی ویژه، اثری از کانی‌سازی اقتصادی دیده نمی‌شود. برای مثال در توصیف بسیاری از تیپ‌های پورفیری ضمن فراهم بودن عوامل و پدیده‌های زمین‌شناسی و ژنتیکی مانند نوع واحدهای سنگی، کانی‌سازی‌های سطحی، نوع آلتراسیون مناسب و تاییدکننده، ساختمان تکتونیکی، آنومالی‌های ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی، اثری از کانی‌سازی اقتصادی وجود ندارد. در چنین شرایطی

1- Blind mineralization

2- Zone dispersed mineralization

3- Geochemical landscape

پراکنده و غیراقتصادی است [۴].

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش سینگولاریتی

در روش سینگولاریتی با بررسی تغییرات غلظت عنصر با تغییر مساحت، تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر مشخص می‌شود (شکل ۱). رابطه فرکتالی بین این متغیرها از رابطه‌های ۱ و ۲ به دست می‌آید.

$$\mu(A) \propto A^{\frac{\alpha}{2}} \quad (1)$$

$$C(A) \propto A^{\frac{\alpha}{2}-1} \quad (2)$$

که در آن:

$\mu(A)$ مقدار کل فلز در سطح A

$C(A)$ چگالی فلز در مساحت A و برابر $\mu(A)/A$

α مقدار سینگولاریتی محلی

برای تعیین α مربع‌هایی با مرکز ثابت در اندازه‌های

$$\varepsilon_{i+1} = (2i-1) \varepsilon_i \quad \text{در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۳)}$$

$$\varepsilon_{min} = \varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \dots < \varepsilon_n = \varepsilon_{max} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (3)$$

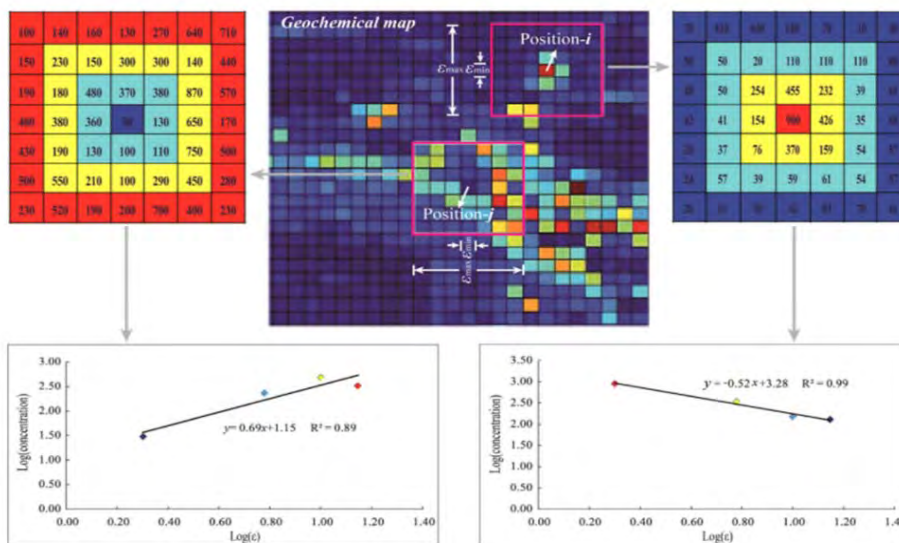
که در آن:

n برابر تعداد پنجره‌ها

ε_{min} کوچکترین سایز پیکسل

ε_{max} سایز بزرگترین پنجره

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 می‌دهند [۱۱]. سینگولاریتی یک ابزار مهم برای تشخیص غنی‌شدگی و تهی‌شدگی محلی عناصر در نقشه‌های دو بعدی ژئوشیمیایی برای تشخیص آنومالی‌های ژئوشیمیایی است. در واقع سینگولاریتی یک روش پنجره متحرک بر پایه ارتباط مولتی- فرکتالی بین چگالی فلز و مساحت مربوط به آن است که اولین بار توسط چنگ در سال ۲۰۰۶ مطرح شد [۱۸].



شکل ۱- مثالی از عملکرد روش پنجره متحرک در روش سینگولاریتی [۱۹]

به توده کانسار به کار رود. منطقه‌بندی قائم در هاله‌های نخستینی که به وسیله کانی‌سازی گرمایی تشکیل شده، نخستین بار توسط کابلوکوف و ورتپوف در کانسارهای اورانیوم شناخته شد. در کانسارهایی با شیب زیاد منطقه‌بندی محوری منطبق بر منطقه‌بندی قائم است و در کانسارهایی با شیب کم این منطقه‌بندی بر منطقه‌بندی افقی منطبق است [۲۶ و ۲۷]. برای محاسبه شاخص زونالیت، سالووف [۲۸] استفاده از تولید سطحی و گریگوریان [۲۷] استفاده از شاخص کانی‌سازی را پیشنهاد کردند.

در یک شبکه نمونه‌برداری سیستماتیک تولید خطی در طول یک نیمرخ و تولید سطحی به ترتیب از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شود.

$$M = \Delta x \left(\sum_{x=1}^n C_x - nC_0 \right) \quad (5)$$

$$P = 2l \sum_{i=1}^m M_i \quad (6)$$

که در آن:

M تولید خطی

P تولید سطحی

Δx فاصله بین نمونه‌ها در طول نیمرخ

C_x غلظت هر نمونه آنومال

n تعداد نمونه‌های آنومال

C_0 غلظت زمینه

$2l$ فاصله بین دو نیمرخ

m تعداد نیمرخ‌ها

شاخص زونالیت از نسبت تولید سطحی عناصر فوق کانساری (Pb,Zn) به تولید سطحی عناصر تحت کانساری (Cu×Ag) برای هر آنومالی بر اساس رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$K_p = \frac{P(Pb) \times P(Zn)}{p(Cu) \times p(Ag)} \quad (7)$$

برای به دست آوردن شاخص زونالیت با روش ارایه شده توسط گریگوریان یک ضریب برای هر عنصر در شاخص زونالیت ضرب

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 ϵi از رابطه ۳ به دست می‌آید. با لگاریتم‌گیری از رابطه ۳، ارتباط بین سایز پنجره (ϵi) و میانگین غلظت در هر پنجره ($\rho[A(\epsilon i)]$) به صورت رابطه ۴ و به صورت یک خط راست خواهد بود. در رابطه ۴، c مقداری ثابت است، شیب خط برازش شده برابر $\alpha - 2$ خواهد شد. در شکل ۱، پنجره حرکت می‌کند و به طور مشابه مقدار سینگولاریتی برای تمام نقاط موجود در منطقه محاسبه می‌شود.

$$\log C[A(\epsilon i)] = c + (\alpha - 2) \log \epsilon i \quad (4)$$

چنانچه با افزایش سایز پنجره غلظت میانگین افزایش یابد، شیب خط مثبت ($\alpha - 2 > 0$) نشان‌دهنده تهی‌شدگی در آن نقطه خواهد بود و برعکس شیب منفی خط ($\alpha - 2 < 0$) غنی‌شدگی را نشان می‌دهد. در نتیجه مقادیر سینگولاریتی کوچک‌تر از ۲ ($\alpha < 2$) غنی‌شدگی و مقادیر بزرگتر از ۲ ($\alpha > 2$) تهی‌شدگی را نشان می‌دهد. در مناطق معمولی مقادیر سینگولاریتی نزدیک به ۲ است و برای مناطق ناهنجار مقدار سینگولاریتی کوچک‌تر یا بزرگتر از ۲ خواهد بود. در جایی که α تقریباً برابر ۲ باشد به معنی است که سینگولاریتی ژئوشیمیایی در آن محل وجود ندارد [۵ و ۶]. پژوهشگران این روش را برای اکتشاف ذخایر مختلف شامل پلی‌متال [۱۲ و ۱۳] ذخایر طلای هیدروترمال [۱۴]، ذخایر قلع [۱۱] و کرومیت [۱۶] به کار بردند.

۲-۲- روش زونالیت

زون‌بندی هاله ژئوشیمیایی یک طبیعت فضایی و مفهوم جهتی است که می‌تواند با سه پارامتر بعد (فضا)، جهت و غلظت عنصر تعریف شود [۲۱]. در اطراف یک توده کانسار سه نوع منطقه - بندی هاله اولیه در جهت طولی، عرضی و محوری وجود دارد اما در عمل تاکید بر مطالعه منطقه‌بندی قائم هاله‌های اولیه است زیرا این نوع منطقه‌بندی اغلب در ارتباط با راستای جریان سیال کانه‌دار است [۲۵-۲۲] و می‌تواند به عنوان ملاکی برای تعیین موقعیت سطح فرسایش آنومالی‌های ژئوشیمیایی نسبت

به تعداد ۱۰ تا ۲۰ قطعه سنگ به وزن ۴ تا ۷ کیلوگرم از حواشی هر یک از ایستگاه‌ها آماده‌سازی شده و تجزیه عناصر مس، سرب، روی و نقره، منگنز، کروم، نیکل، مولیبدن، قلع، وانادیوم، کبالت، باریوم، تنگستن، آرسنیک، بیسموت، جیوه، برلیوم و آنتیموان به روش اسپکترومتری نشری در آزمایشگاه شرکت جیانگسی در چین انجام شده است. در این پژوهش عناصر مس، روی و نقره دارای عیار بیش از حد اندازه‌گیری آزمایشگاه به دست آمد که پیش‌پردازش داده‌ها و جایگزینی مقادیر سنسورد و خارج از ردیف با روش جایگزینی $\frac{4}{3}$ حد حساسیت برای مقادیر بزرگتر از حد حساسیت انجام شد.

۳- معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده باغ غلوم در فاصله حدود ۴۱ کیلومتری شرق جیرفت در فاصله حدود ۱۲٫۵ کیلومتری غرب روستای گمرکان در منطقه‌ای به نام سنگستان و در مختصات E ۶۱۵-۶۱۳ و N ۳۱۶۲-۳۱۶۰ قرار دارد. راه دسترسی آن از شهر عنبرآباد به روش زیر است:

- راه آسفالت عنبرآباد - دهنه گمرکان به طول ۲۵ کیلومتر
- راه خاکی گمرکان - مورچین - مردار به طول ۱۰ کیلومتر
- راه مورچین - سنگستان به طول ۴ کیلومتر (شکل ۲)

می‌شود. این ضریب به عنوان ضریب کانی‌سازی شناخته می‌شود. اگر کل نمونه‌های یک زون را برابر $\eta_a(\alpha)$ و تعداد نمونه‌های آنومال برابر $\eta_a(\alpha)_{ore}$ در نظر گرفته شود، نسبت بین این دو مقدار به عنوان ضریب کانی‌سازی شناخته می‌شود که به صورت رابطه ۸ است.

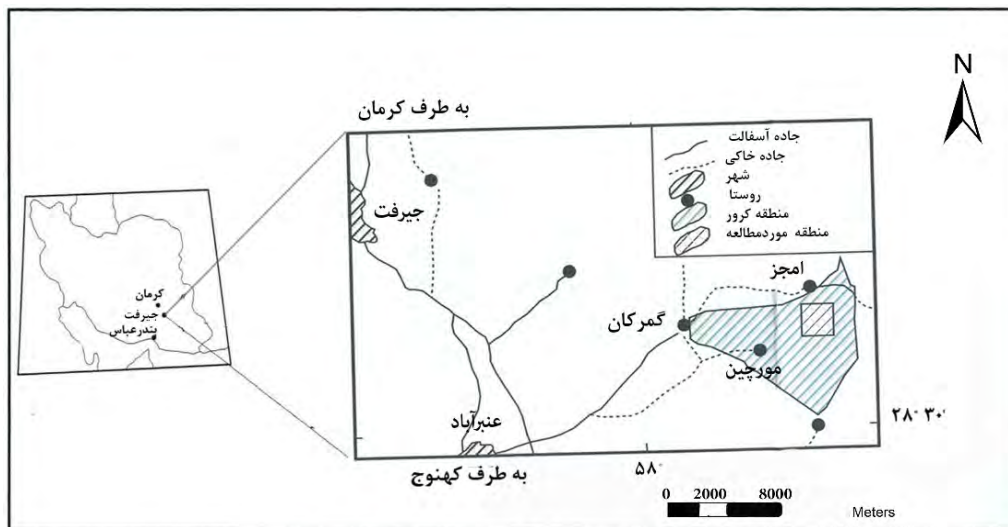
$$\eta(\alpha) = \frac{\eta_a(\alpha)_{ore}}{\eta_a(\alpha)} \quad (8)$$

که برابر با مقدار نمونه‌های آنومال مربوط به هر عنصر در هر کدام از زون‌ها نسبت به تعداد نمونه‌های موجود در زون تفکیک شده است. مقدار ضریب کانی‌سازی برای هر عنصر باید در میانگین غلظت آن عنصر (\overline{CA}) در هر آنومالی ضرب شود و در رابطه شاخص زونالیته قرار گیرد که به صورت رابطه ۹ خواهد شد.

$$K_c = \frac{\eta(\alpha)_{pb} \times \overline{CA}_{pb} \times \eta(\alpha)_{Zn} \times \overline{CA}_{Zn}}{\eta(\alpha)_{Cu} \times \overline{CA}_{Cu} \times \eta(\alpha)_{Ag} \times \overline{CA}_{Ag}} \quad (9)$$

۳-۲- نمونه برداری

با توجه به مساحت محدوده‌های اکتشافی باغ غلوم تقریباً چهارصد نمونه سنگ از شبکه نمونه‌برداری به صورت صد متر صد متر و در امتداد خط مینا شمالی - جنوبی برداشت شده است. کلیه نمونه‌ها پس از برداشت به وزن بین ۵ تا ۷ کیلوگرم



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه

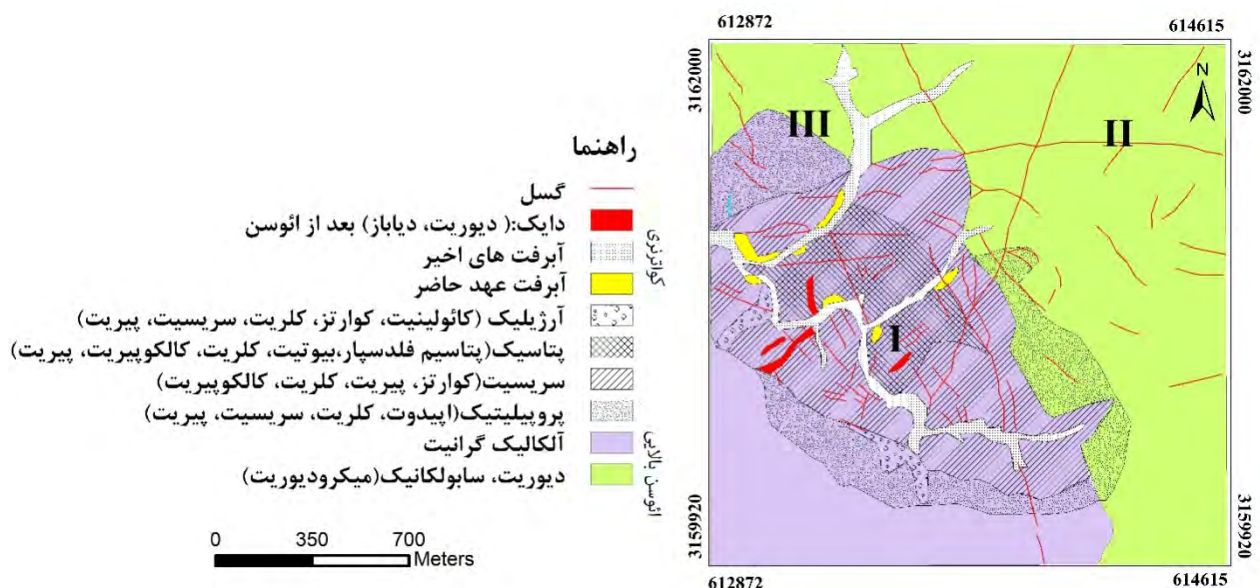
۴- زمین شناسی و آلتراسیون منطقه باغ غلوم

کانی‌سازی در منطقه باغ غلوم از نوع پورفیری و سنگ‌های گرانودیوریت، دیوریت، تونالیت و کوارتز مونزونیت در منطقه موجود است. در بخش غربی واحدهای آکالیک گرانیت، دیوریت و میکرودیوریت همراه با دایک‌های (دیوریتی) و یا بازی گسترش چشم‌گیری دارند. در نیمه شرقی محدوده اکتشاف سنگ‌های کمتر دگرسان شده از نوع دیوریت‌های آلتزه شده و میکرودیوریت گسترش زیادی دارند [۴].

سیستم‌های گسله حاکم در محدوده به ویژه در بخش غربی تمرکز دارند و به نظر می‌رسد که دایک‌های دیوریتی متعلق به فازهای بعدی است. اگر چه در سطح نقشه اکثر این دایک‌ها با گسل‌ها قطع شده است ولی در مقطع به نظر می‌رسد که این دایک‌ها هم‌روند با سیستم گسله‌اند (شکل ۳).

زون‌بندی آلتراسیون در تیپ‌های پورفیری کاملاً شناخته شده است، به طوری که منطقه پتاسیک در مرکز سپس فیلیک، منطقه رسی و در حاشیه، زون پروپیلیتیک قرار دارند. چنین آرایشی در محدوده اکتشافی باغ غلوم ملاحظه می‌شود. در بخش مرکزی نیمه غربی زون پتاسیک دارای گسترش

زیادی است، فلدسپات‌های پتاسیک، بیوتیت ثانویه، کلریت در این بخش همراه با کانیه‌های پیریت و کالکوپیریت مشاهده می‌شود. زون دگرسان آرژیلیک (رسی) نیز به صورت باریکه‌ای در حاشیه غربی هر دو محدوده نیز همراه با کائولینیت، کوارتز، کلریت، سربیسیت و پیریت دیده می‌شود. زون پروپیلیتیک به صورت کاملاً کلاسیک زون‌های آلتزه قبلی را در بر گرفته است. کانیه‌های اپیدوت، کلریت، سربیسیت و پیریت نیز در هر دو محدوده به مقدار زیادی متمرکز شده است. دگرسانی دیگری که در منطقه دیده شده است دگرسانی فیلیک است که در واقع همان دگرسانی سلیسی-پیریتی است. رخساره پیریتی و به عبارتی دیگر سلیسی-پیریتی با رس یا بدون رس که در اطراف سیستم پورفیری دیده می‌شود (شکل ۴). در پژوهش‌های پیشین به رخساره فیلیک و بخش سلیسی مرتبط با سیستم پورفیری نسبت داده شده است. سیمای عمومی آن لیمویی تیره رنگ تا قهوه‌ای مایل به زرد که عمدتاً از سلیس و پیریت با رس یا بدون رس تشکیل شده است.



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی و آلتراسیون منطقه مورد مطالعه [۴]

مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای آماری داده‌های مربوط به این عناصر در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای آماری عناصر سرب، روی، مس و نقره

| عناصر | ماکزیمم | مینیمم | میانگین | مد | انحراف معیار |
|-------|---------|--------|---------|-------|--------------|
| مس | ۱۷۸۵ | ۳٫۴ | ۲۱۰٫۸۶ | ۴۰٫۵ | ۲۷۶٫۷ |
| روی | ۹۹۵ | ۱۱ | ۸۷٫۶۷ | ۳۱ | ۱۲۶٫۳۹ |
| سرب | ۱۵۷۸٫۸ | ۴٫۴ | ۳۴٫۹ | ۱۴ | ۱۰۸٫۴ |
| نقره | ۴٫۷۴ | ۰٫۰۳۵ | ۰٫۲۸ | ۰٫۰۴۹ | ۰٫۳۵ |

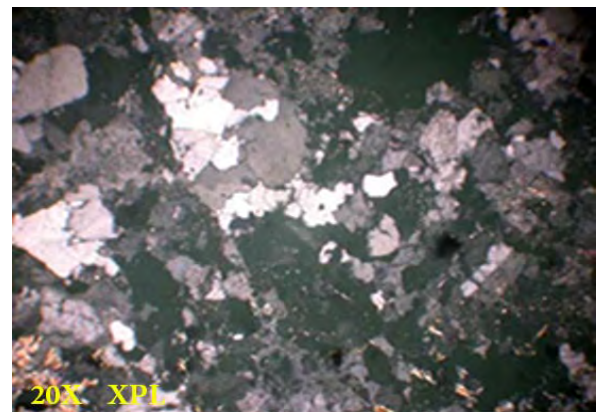
در ذخایر مس پورفیری عناصر سرب، روی و بیسموت در هاله‌های فوق کانساری و عناصر مس، مولیبدن و نقره در هاله‌های تحت کانساری بیشترین تمرکز را دارند [۳۰ و ۳۱]. ضیائی و همکاران در سال ۲۰۰۶ با مطالعه ۴ ذخیره مس پورفیری آکتوجی^۱ در قزاقستان، آسارل^۲ در بلغارستان، تکوت^۳ در ارمنستان و ذخیره سونگون در ایران عناصر 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 و محاسبه سه شاخص زونالیته $VZ1=Pb \times Zn / Cu \times Mo$ ، $VZ2=Pb \times Zn / Cu \times Ag$ و $VZ3=Pb \times Zn \times Bi / Cu \times Ag \times Mo$ مدلی برای تعیین سطح از فرسایش ذخایر پورفیری و تشخیص آنومالی پنهان ارائه دادند (شکل ۶) [۳۲ و ۳۳]. از آنجایی که در منطقه مورد مطالعه کانی‌سازی مس پورفیری از نوع دیوریتی و همراه با عناصر طلا و نقره است، عناصر سرب و روی به عنوان عناصر فوق کانساری و عناصر مس و نقره به عنوان عناصر تحت کانساری در این منطقه بررسی شدند.

نقشه پراکنندگی حاصلضرب عناصر فوق کانساری (Pb×Zn) و تحت کانساری (Cu×Ag) در شکل ۷ نشان داده شده است. بر این اساس ۳ آنومالی محلی در باغ غلوم تشخیص داده شد. برای تشخیص نوع آنومالی از سه روش زونالیته، سینگولاریتی و فرکتال استفاده شد و نتایج به دست آمده از آن‌ها با هم مقایسه شد.

میزبان این گونه دگرسانی سیلیسی-پیریتی سنگ‌های گرانودیوریتی تا دیوریت و بعضاً کوارتزدیوریت است که در میدان میکروسکوپ به شدت سیلیسی شده به طوری که سنگ بافت اولیه خود را از دست داده است و به دشواری می‌توان نام آن را مشخص کرد (شکل ۵). این دگرسانی به صورت هاله‌ای بیضی شکل با کشیدگی به سوی شمال غربی- جنوب شرقی است که در واقع نوعی همسویی با واحدهای ساختاری و عناصر تکنوتیکی را آشکار می‌سازد در ادامه به سوی جنوب منطقه گسترش دارد [۲۹ و ۴۰].



شکل ۴- ورود سیالات سیلیسی پیریتی در میان سنگ‌های گرانودیوریتی [۲۹]



شکل ۵- میکروکوارتز مونزونیت

۵- تحلیل نتایج

با توجه به هدف این پژوهش و محاسبه شاخص زونالیته در ذخایر مس پورفیری، تنها چهار عنصر سرب، روی، مس و نقره

1- Aktogy
2- Asarel
3- Tekhut

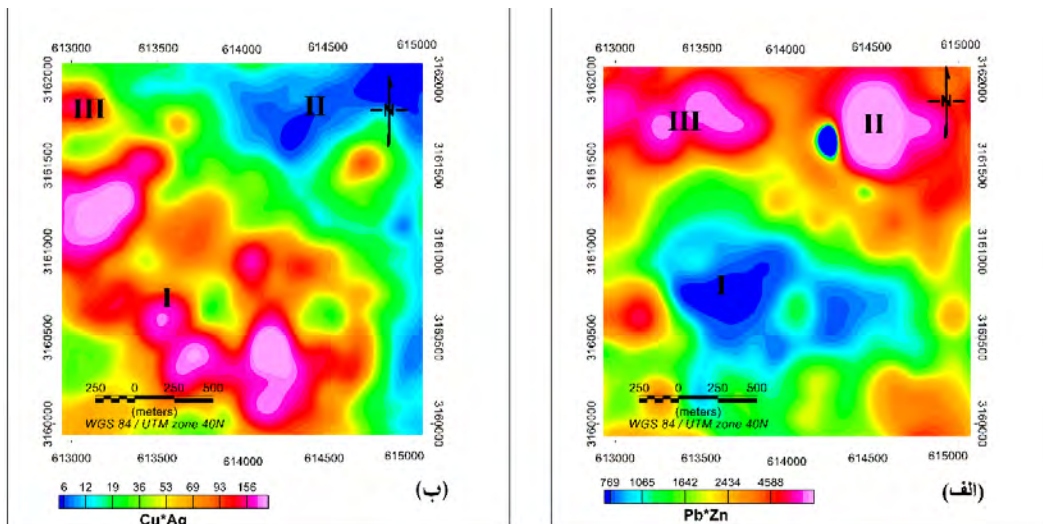
صورت مجزا محاسبه و مقدار شاخص زونالیتیه با دو روش سالووف و گریگوریان محاسبه شد (جدول‌های ۲ و ۳).

۵-۱- روش زونالیتیه

مقادیر تولید سطحی و ضریب کانی‌سازی برای هر آنومالی به

| Erosional surface | Vertical section | $Vz_1 = \frac{Zn \cdot Pb}{Cu \cdot Mo}$ | $Vz_2 = \frac{Zn \cdot Pb}{Cu \cdot Ag}$ | $Vz_3 = \frac{Zn \cdot Pb \cdot Bi}{Cu \cdot Mo \cdot Ag}$ |
|-------------------|-----------------------|--|--|--|
| | | Supra-ore I | >5 | >100 |
| 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(I)/Vz(VI) | 10000 | 10000 | 10000 |

شکل ۶- مدل شاخص زونالیتیه قائم برای ذخایر مس پورفیری بر پایه ذخایر مس پورفیری استاندارد در قزاقستان، بلغارستان، ارمنستان و ایران [۳۳]



شکل ۷- پراکندگی حاصلضرب عناصر، الف) فوق کانساری (Pb×Zn) در باغ غلوم و ب) تحت کانساری (Cu×Ag)

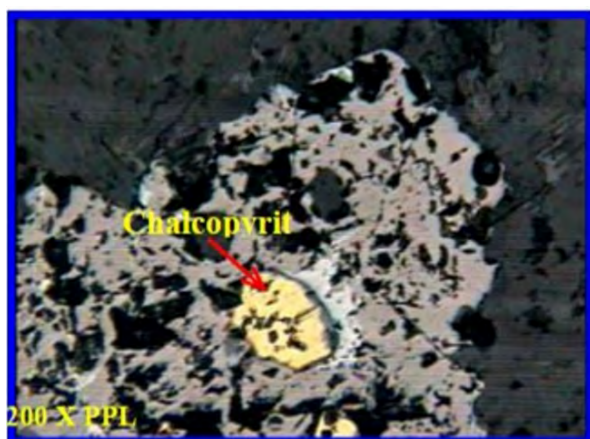
جدول ۲- مقادیر تولید سطحی (P) و شاخص زونالیتیه حاصل از آن (K_P) در هر آنومالی منطقه باغ غلوم

| منطقه | زون | P(Zn) | P(Pb) | P(Ag) | P(Cu) | K _P |
|--------|-----|-------|-------|-------|-------|----------------|
| کروم ۱ | I | 3398 | 2178 | 40 | 52649 | 3,5 |
| | II | 8678 | 2666 | 3 | 11523 | 597 |
| | III | 2753 | 2152 | 18 | 7203 | 146 |

جدول ۳- مقادیر ضریب کانی‌سازی (K)، میانگین غلظت آنومال (CA) و شاخص زونالیتیه حاصل از آن (K_C) در هر آنومالی منطقه باغ غلوم

| K _C | Cu | | Ag | | Pb | | Zn | | زون | منطقه |
|----------------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-----|--------|
| | K | CA | K | CA | K | CA | K | CA | | |
| ۴,۴ | ۰,۸ | ۳۳۱,۳ | ۰,۴۷ | ۰,۵۳ | ۰,۱۴ | ۹۲,۱ | ۰,۲ | ۱۰۷,۹ | I | کروم ۱ |
| ۵۴۹ | ۰,۴۳ | ۶۶۷,۳ | ۰,۲۱ | ۰,۵۲ | ۰,۲۱ | ۱۶۲,۱ | ۰,۹۷ | ۲۴۷,۲ | II | |
| ۱۵۵ | ۰,۲۵ | ۳۴۲,۳ | ۰,۶ | ۰,۸ | ۰,۶ | ۱۱۸,۳ | ۰,۸ | ۱۶۱,۷ | III | |

مقدار غلظت عناصر سرب و روی در این زون به ترتیب برابر ۲۷/۸ و ۴۹ گرم بر تن است. ارتفاع منطقه باغ غلوم از شرق به سمت غرب کم می‌شود. نوع کانی‌زایی مس با این ارتفاع رابطه عکس دارد. یعنی کانی‌زایی مس در شرق این منطقه دیده نمی‌شود ولی به طرف غرب سنگ گرانیت آلکالن وجود دارد که در متن آن بلورهای پیریت و کالکوپیریت به همراه فلدسپات پتاسیک به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۹).



شکل ۹- کالکوپیریت در مقطع میکروسکوپی نمونه‌گیری شده از زون ۱ منطقه کرور [۲۹]

کانه‌زایی به طرف غرب باغ غلوم در مسیر شکستگی‌ها و گسله‌ها کانی‌زایی مس به صورت مالاکیت است (شکل ۱۰) که به دلیل غلظت پایین مس اهمیت زیادی ندارد [۳۵]. با توجه به مطالعات کانی‌شناسی و پیمایش صحرایی به نظر می‌آید بخش غربی منطقه در زون پتاسیک قرار دارد (شکل ۲).

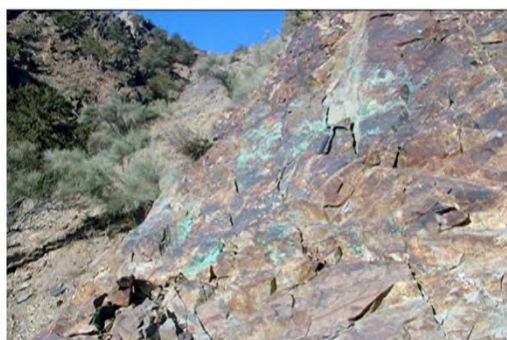


شکل ۱۰- مشاهده مالاکیت در منطقه کرور [۲۹]

برای تشخیص سطح از فرسایش از مدل ارایه شده برای ذخایر مس پورفیری [۳۳] استفاده شد (شکل ۶). مقدار شاخص زونالیته با روش سالووف (K_p) و روش گریگوریان (K_G) برای آنومالی محلی I به ترتیب برابر ۳/۵ و ۴/۴ به دست آمد (جدول ۲ و ۳). بر اساس مدل شکل ۶ سطح فرسایش این زون باید بر سطح کانی‌سازی اقتصادی منطبق باشد، در این صورت میانگین عیار مس و مولیبدن باید در مرز عیار اقتصادی ۰/۲ درصد برای مس و ۰/۰۰۴ درصد برای مولیبدن [۳۴] باشد، در صورتی که عیار مس در این زون ۲۷۳ گرم بر تن و عیار مولیبدن ۱۰ گرم بر تن و به مراتب کمتر از حد اقتصادی است، به همین دلیل آنومالی یاد شده در حد کانی‌سازی پراکنده است و احتمال ارتباط آن با کانی‌سازی پنهان ضعیف است زیرا مقادیر میانگین عناصر سرب و روی در آن (عناصر فوق کانساری) نیز مقادیر فوق‌العاده پایین در حد زمینه واحدهای سنگی محدوده اکتشاف (گرانیت و گرانودیوریت) است (شکل ۸).



شکل ۸- واحدهای سنگی گرانودیوریتی و دیوریتی در منطقه کرور



زونالیته در مقابل مساحت رسم شد. در منحنی این نمودار برای عنصر مس دو شکستگی اصلی مشاهده می‌شود که آن را به سه جامعه تقسیم می‌کند (شکل ۱۱- الف). اولین حد آستانه مس ۲۴۵ (لگاریتم ۲/۳۹) و دومین حد آستانه هم در مس ۱۴۱۲ (لگاریتم ۳/۱۵) قرار گرفته است. با توجه به مقادیر آستانه به دست آمده از این نمودار نقشه آنومالی مس در این منطقه رسم شد (شکل ۱۱- ب).

بر اساس نقشه به دست آمده قسمت‌های مرکزی و جنوب غربی منطقه و قسمت‌هایی از شمال شرق منطقه به عنوان آنومالی مس مشخص شدند.

نمودار فرکتال شاخص زونالیته بر حسب مساحت نیز رسم شد (شکل ۱۲ الف). نمودار سه جامعه را تفکیک کرد که اولین حد آستانه شاخص زونالیته ۳۹۸ (لگاریتم ۲/۶) و دومین حد آستانه معادل ۴۷۸۶ (لگاریتم ۳/۷) به دست آمد. نقشه شاخص زونالیته بر اساس حدود به دست آمده از نمودار فرکتال مطابق شکل ۱۲ ب رسم شد. بر اساس نتایج به دست آمده از روش فرکتال، آنومالی شاخص زونالیته در بخش شمالی منطقه باغ غلوم است و این بخش دارای پتانسیل آنومالی پنهان می‌باشد.

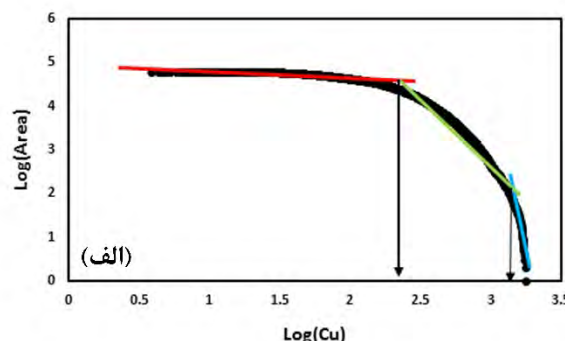
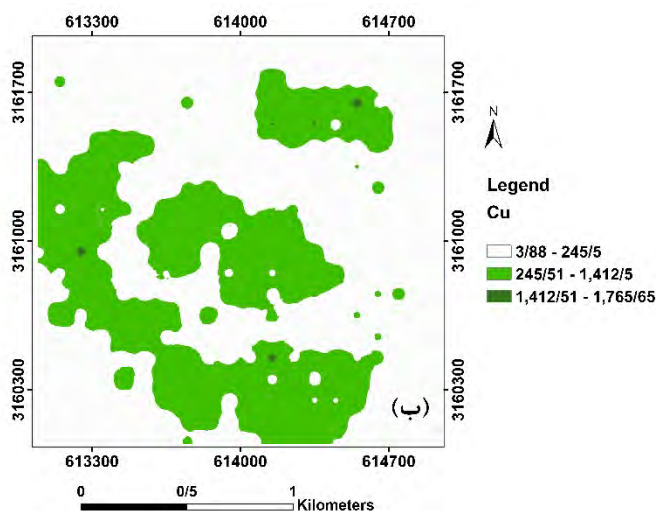
در واقع موقعیت زون شماره یک کرور (باغ غلوم) واقع در محدوده کانساری است ولی به دلیل نبود کانی‌سازی اقتصادی در سطح فعلی کانسار، این آنومالی می‌تواند در ارتباط با یک زون غنیشده و یا کانی‌سازی پراکنده باشد [۴] و به سمت شرق زون‌های آرژیلیکی و آلونیتی قابل شناسایی است [۳۵].

در آنومالی II از باغ غلوم مقدار شاخص زونالیته K_p ، K_c به ترتیب برابر ۵۹۷ و ۵۴۹ به دست آمد (جدول ۲ و ۳). بر اساس مدل ارائه شده در شکل ۶ این مقادیر نشان می‌دهند که سطح فرسایش در بالای کانی‌سازی قرار دارد و کانی‌سازی در این آنومالی از نوع پنهان است.

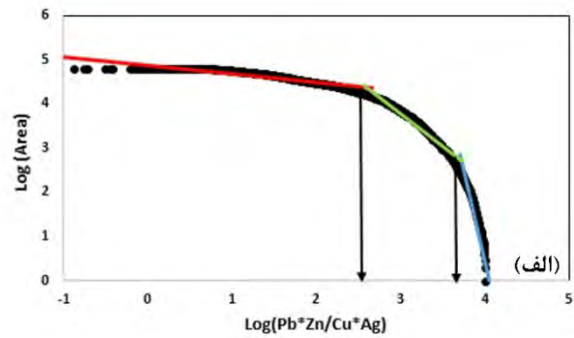
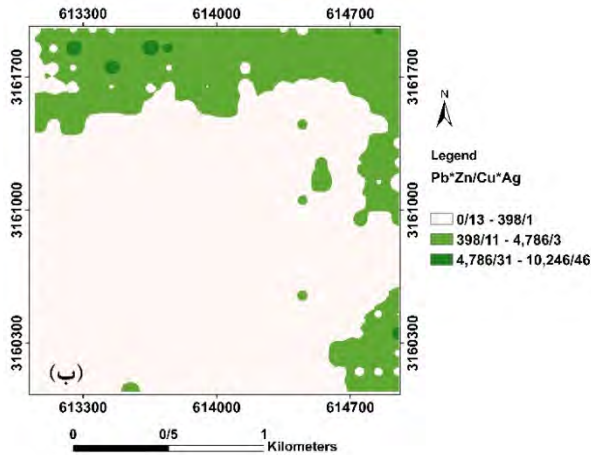
مقدار K_p ، K_c در آنومالی III باغ غلوم به ترتیب برابر ۱۴۶ و ۱۵۵ به دست آمد. مقادیر بزرگتر از ۱۰۰ برای این شاخص سطح فرسایش در بخش بالایی کانی‌سازی را نشان می‌دهند. سنگ‌های واقع در محدوده III شامل گرانیت‌های به شدت آلتره از نوع پروپیلیتیک است. محدوده آنومالی سرب و روی (آنومالی‌های II، III) واقع بر سنگ‌های دیوریت ساب‌ولکانیک و میکرودیوریت است.

۵-۲- روش فرکتال

برای اجرای روش فرکتال نمودار فرکتال عنصر مس و شاخص



شکل ۱۱- نقشه پتانسیل مطلوب مس در منطقه کرور با استفاده از روش فرکتال

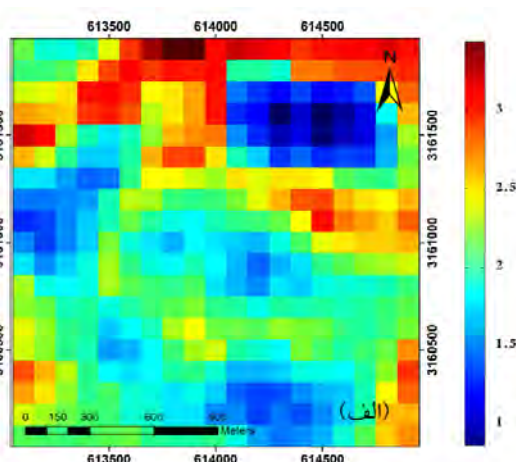
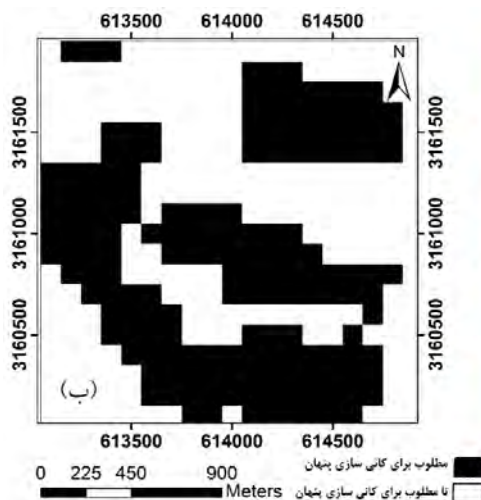


شکل ۱۲- نقشه شاخص زونالیته برای منطقه کرور با استفاده از روش فرکتال

۵-۳- روش سینگولاریتی

همان طور که در این نقشه‌ها مشاهده می‌شود، سینگولاریتی مس بخش مرکزی و شمال شرق را به عنوان ذخایر مس معرفی می‌کند. این نقشه تنها محل غنی‌شدگی آنومالی مس را نشان می‌دهد و در اینجا قادر نیست ذخایر پنهان را مکان‌یابی کند زیرا قسمت شمال غرب کرور را به عنوان منطقه غنی شده تشخیص نداده است و بخش مرکزی باغ غلوم را به عنوان غنی‌شدگی مس معرفی کرده است در صورتی که بر اساس گزارش برنا و سودی-شعار (۱۳۸۵) و روش زونالیته که در بخش قبل به آن پرداخته شد این بخش فاقد کانی‌سازی عمقی است [۴].

روش سینگولاریتی بر روی این منطقه پیاده شد. برای این کار ابتدا منطقه به صورت منظم شبکه‌بندی شده و مقادیر عناصر موجود برای هر نقطه با روش فاصله معکوس تخمین زده شد، سپس عملیات میانگین متحرک برای پنجره‌های سایزهای ۱×۱، ۳×۳، ۵×۵، ۷×۷، ۹×۹، ۱۱×۱۱ و ۱۳×۱۳ انجام شد و مقدار سینگولاریتی با کمک نرم‌افزار متلب برای هر پیکسل محاسبه شد. شکل‌های ۱۳ الف و ب به ترتیب نقشه سینگولاریتی عنصر مس و نقشه باینری آن را برای مقادیر کوچک‌تر از ۲ نشان می‌دهند.



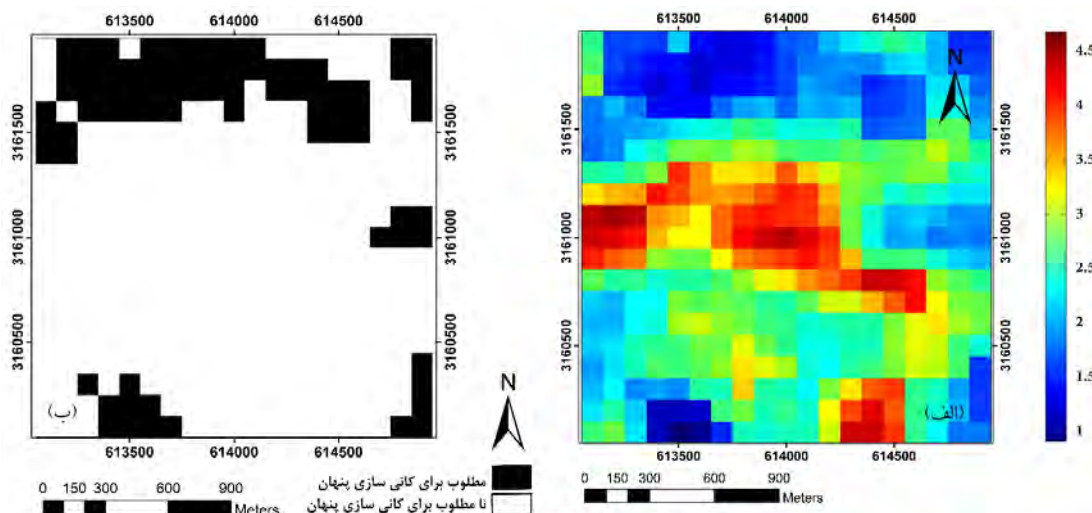
شکل ۱۳- الف) نقشه سینگولاریتی عنصر مس، ب) نقشه باینری آن برای مقادیر کوچک‌تر از ۲

آنومالی با مطالعات انجام شده پیشین [۴] و روش زونالیته مقایسه شد. بر اساس این مقایسه واضح است که مدل سینگولاریتی شاخص زونالیته بهتر از مدل سینگولاریتی عنصر مس است. نتایج نشان می‌دهد که سینگولاریتی شاخص زونالیته از سینگولاریتی تک عنصر برای محدود کردن و تمرکز اهداف اکتشافی ذخایر معدنی پنهان بهتر است.

بر اساس نقشه سینگولاریتی شاخص زونالیته (شکل ۱۴) مقدار سینگولاریتی در بخش شمالی منطقه کمتر از ۲ است که غنی‌شدگی شاخص زونالیته و وجود کانی‌سازی پنهان در این منطقه را نشان می‌دهد. مقادیر سینگولاریتی در بخش مرکزی باغ غلوم بزرگ‌تر از ۲ است و بیانگر تهی‌شدگی شاخص زونالیته در این منطقه است، بنابراین در بخش میانی کانی‌سازی پنهان وجود ندارد که پژوهش انجام شده با روش زونالیته و گزارش برنا و سودی‌شعار (۱۳۸۵) [۴] نیز همین نتیجه را نشان می‌دهد.

روش سینگولاریتی برای تشخیص آنومالی‌های ضعیف به کار می‌رود، چنانچه چنگ در سال ۲۰۱۲ برای تشخیص کانی‌سازی اسکارن قلع روش سینگولاریتی را بر عنصر قلع اعمال کرد [۷] اما اعمال روش سینگولاریتی بر روی تک عنصر مس همیشه قادر به تشخیص محل کانی‌سازی پنهان نیست از این رو برای اولین بار روش سینگولاریتی بر روی شاخص زونالیته (Pb×Zn/Cu×Ag) اعمال و نتایج به دست آمده با نتایج نقشه سینگولاریتی عنصر مس و پژوهش‌های پیشین مقایسه شد.

مدل سینگولاریتی عنصر مس نشان می‌دهد که مناطق با مطلوبیت بالا برای ذخایر پنهان عمدتاً در قسمت مرکزی و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه قرار دارند (شکل ۱۳) در حالی که مدل سینگولاریتی شاخص زونالیته عکس مدل سینگولاریتی مس را نشان می‌دهد (شکل ۱۴). برای بررسی صحت پیش‌بینی این دو نقشه مناطق به دست آمده به عنوان



شکل ۱۴- الف) نقشه سینگولاریتی شاخص زونالیته (Pb×Zn/Cu×Ag)، ب) نقشه باینری آن برای مقادیر کوچک‌تر از ۲

کیلومتر مربع است.

جدول ۴- مقایسه حد آستانه و مساحت روش‌های مختلف

| روش | حد آستانه Pb×Zn/Cu×Ag | مساحت (کیلومتر مربع) |
|-------------|-----------------------|----------------------|
| زونالیته | ۱۰ | ۱,۴۱ |
| سینگولاریتی | ۲ | ۰,۹۵ |
| فرکتال | ۳۹۸ | ۱,۲۹ |

۵-۴- مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف

برای مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف، مساحت آنومالی‌های به دست آمده از هر روش محاسبه شد (جدول ۴). مساحت آنومالی به دست آمده از روش‌های زونالیته، سینگولاریتی و فرکتال به ترتیب برابر ۱,۴۱، ۰,۹۵ و ۱,۲۹

برای اکتشاف آنومالی‌های پنهان اقتصادی‌اند. در این مقاله از تلفیق دو مدل کمی سینگولاریتی و روش زونالیتیه برای تشخیص محل حفاری در منطقه باغ غلوم در زون جبال بارز استفاده شد و نتایج به دست آمده با روش‌های زونالیتیه و روش فرکتال مقایسه شد. روش‌های سینگولاریتی و زونالیتیه به ترتیب برای تشخیص غنی‌شدگی و اکتشاف ذخایر پنهان استفاده می‌شوند. در واقع روش سینگولاریتی زونالیتیه محل غنی‌شدگی شاخص زونالیتیه را نشان می‌دهد. بر اساس روش زونالیتیه مناطقی با شاخص زونالیتیه $Pb \times Zn / Cu \times Ag$ بزرگتر از ۱۰ دارای آنومالی پنهان‌اند. در روش سینگولاریتی مقادیر کوچک‌تر از ۲ معرف غنی‌شدگی شاخص زونالیتیه است و روش فرکتال حد آستانه ۳۹۸ را برای آنومالی شاخص زونالیتیه $Pb \times Zn / Cu \times Ag$ نشان داد. هر سه روش به کار برده شده در این مقاله بخش شمالی این منطقه به عنوان زون مطلوب برای کانی‌سازی پنهان مشخص شد و بخش مرکزی این منطقه از نوع کانی‌سازی پراکنده معرفی شد. نتایج به دست آمده از این روش جدید با نتایج پژوهش‌های قبلی بر اساس روش زونالیتیه تطابق خوبی داشت. مزیت روش سینگولاریتی شاخص زونالیتیه نسبت به روش زونالیتیه این است که در برخلاف روش زونالیتیه نیازی به مقایسه با اطلاعات مناطق مشابه نیست و با در نظر گرفتن یک عدد به عنوان حد آستانه (عدد ۲) غنی‌شدگی و تهی‌شدگی را در منطقه مشخص می‌کند و مزیت آن نسبت به فرکتال معرفی محدوده دقیق‌تر با مساحت کمتر بود.

۷- منابع

- [1] Carranza, E.J.M., 2008- Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS. Handbook of exploration and environmental geochemistry, Elsevier, Amsterdam. Vol. 11, 368 pp.
- [2] Ziaii, M., Doulati, F., Ziaei, M., Soleymani, ali A., 2012- Neuro-fuzzy modeling based genetic algorithms for identification of geochemical anomalies in mining geochemistry. Applied Geochemistry, 27(3): 663-676.

همانطور که در نقشه‌های به دست آمده از روش‌های مختلف مشاهده شد در هر سه بخش شمالی منطقه باغ غلوم به عنوان آنومالی پنهان معرفی شد اما مساحت محدوده آنومالی در همه این روش‌ها اختلاف اندکی با یکدیگر داشته که در همه این روش‌ها زونالیتیه بیشترین سطح آنومالی را داشت در صورتی که روش سینگولاریتی با معرفی کمترین مساحت، روش دقیق‌تری برای تشخیص آنومالی است. برای تشخیص سطح فرسایش با روش زونالیتیه به یک مدل نیاز است که نتایج را بتوان با آن مقایسه کرد اما در روش جدید ارایه شده در این مقاله نیازی به چنین مدلی نیست و این روش به خوبی قادر است آنومالی پنهان در منطقه مورد نظر را مکان‌یابی کند. روش‌های ژئوشیمیایی گذشته در تشخیص آنومالی روش‌های قدرتمندی در شرایط زمین‌شناسی ساده‌اند اما در شرایط زمین‌شناسی پیچیده محدودیت دارند در مقابل روش سینگولاریتی نه تنها ابزار قدرتمندی برای تشخیص آنومالی است بلکه می‌تواند اثرات زمینه را در مقیاس منطقه‌ای کاهش دهد و اطلاعات مفیدی با در نظر گرفتن همسایگی کوچک در مکان فضایی خاص فراهم کند. روش‌های بالا طبیعت ترکیب داده‌های ژئوشیمیایی را در نظر نمی‌گیرند، بنابراین اثر تشخیص الگوهای ژئوشیمیایی در آن‌ها کاهش می‌یابد [۱۴].

طی تحقیقاتی که سان و همکاران در عملیات اکتشافات ژئوشیمیایی در منطقه معدنی طلا و مولیبدن در چین با روش‌های سینگولاریتی، C_A و $\bar{x} \pm 2s$ انجام دادند و نتایج به دست آمده را با هم مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که آنومالی مشخص شده با روش سینگولاریتی نه تنها بخش زیادی از آنومالی‌های شمال منطقه مورد بررسی را پوشش می‌دهد بلکه محل ذخایر طلای زیادی که کشف نشده بود و همچنین آنومالی‌های ضعیفی که در اطراف گسل‌های بخش جنوبی منطقه وجود داشت را مشخص کرد در صورتی که دو روش تست شده دیگر C_A و $\bar{x} \pm 2s$ نتوانستند این آنومالی‌ها را تشخیص دهند [۱۵].

۶- نتیجه‌گیری

مدل‌های کمی بر اساس قوانین و قواعد ریاضی، روشی مفید

- [11] Gonçalves, Mário A., et al. 2018. Using multifractal modelling, singularity mapping, and geochemical indexes for targeting buried mineralization: Application to the W-Sn Panasqueira ore-system, Portugal. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, 189: 42-53.
- [12] Wang, J., & Zuo, R. 2018. Recognizing geochemical anomalies via stochastic simulation-based local singularity analysis. *Journal of Geochemical Exploration*. 198: 29-40.
- [13] Xiao, F., Chen, J., Hou, W., Wang, Z., Zhou, Y., & Erten, O. 2018. A spatially weighted singularity mapping method applied to identify epithermal Ag and Pb-Zn polymetallic mineralization associated geochemical anomaly in Northwest Zhejiang, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 189, 122-137.
- [14] Chen, Xin, et al. 2018. Identifying potential Au-Pb-Ag mineralization in SE Shuangkoushan, North Qaidam, Western China: Combined log-ratio approach and singularity mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, 189: 109-121.
- [15] 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, pp. 21.
- [16] Liu, Y., Zhou, K., & Cheng, Q. 2017. A new method for geochemical anomaly separation based on the distribution patterns of singularity indices. *Computers & Geosciences*, 105, 139-147.
- [17] Safari, S. Ziaii, M, Ghoorchi, M., 2016- Integration of singularity and zonality methods for prospectivity map of blind mineralization. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 50(2): 189-194.
- [3] Pirajno, F., Bagas, L., 2008- A review of Australia's Proterozoic mineral systems and genetic models. *Precambrian Research*, 166 (1-4), 54-80.
- [4] برنا ب، سودی‌شعار پ، مشاور: شرکت توسعه علوم زمین، ۱۳۸۵، "گزارش زمین‌شناسی اکتشاف مقدماتی مس در منطقه کرور (زون جبال بارز) مقیاس ۱:۵۰۰۰"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [5] Cheng, Q. 2007- Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 32(1-2): 314-324.
- [6] Cheng, Q., & Agterberg, F.P. 2009- Singularity analysis of ore mineral and toxic trace elements in stream sediments. *Computers & Geosciences*, 35(2): 234-244.
- [7] Cheng, Q. 2012- Singularity theory and methods for mapping geochemical anomalies caused by buried sources and for predicting undiscovered mineral deposits in covered areas. *Journal of Geochemical Exploration*, 122: 55-70.
- [8] Lui, Y., Xia, Q., Cheng, Q., & Wang, Q. 2013- Application of singularity theory and logistic regression model for tungsten polymetallic potential mapping. *Nonlinear processes in geophysics*, 20:445-453.
- [9] Zuo, R., Xia, Q., & Zhang, D. 2013- A comparison study of the CA and S-A models with singularity analysis to identify geochemical anomalies in covered areas. *Applied Geochemistry* 33: 165-172.
- [10] Shuguang, Z., Kefa, Z., Yao, C., Jinlin, W., & Jianli, D. 2015- Exploratory Data Analysis and Singularity Mapping in Geochemical Anomaly Identification in Karamay, Xinjiang, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 154: 171-179.

- [26] Harraz, H.Z., 1995- Primary geochemical haloes, El Sid gold mine, Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 20(1): 61–71.
- [27] Beus, A.A., and Grigorian, S.V., 1977- *Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits*. Wilmette, Illinois, Applied Publishing Ltd., 287pp.
- [28] Solovov, A.P., 1987- *Geochemical Prospecting for Mineral Deposits*. Mir, Moscow, 288 pp. [V.V. Kuznetsov, Trans.; Engl. ed.
- [29] مقبلی دامنه، م.، (۱۳۹۲). مدلسازی و تخمین ذخیره معدن مس کرور واقع در شهرستان عنبرآباد. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [30] Ziaili, M., Pouyan, A.A., Ziaei, M., 2009- Neuro-fuzzy modelling in mining geochemistry: Identifications of geochemical anomalies, *Journal of Geochemical Exploration*, 100(1): 25-26.
- [31] Ziaili, M., Carranza, E.J.M., Ziaei, M., 2011- Application of geochemical zonality coefficients in mineral prospectivity mapping. *Computers & Geosciences*, 37(12): 1935–1945.
- [32] Ziaili, M., Ziaei, M., 2006. A 3D modelling approach for hidden copper porphyry for Exploration based on GIS technology. GIS in Geology Conference, Moscow.
- [33] Ziaili, M., 1996- *Litho-geochemical Exploration Methods for Porphyry Copper Deposit in Sungun, NW Iran*. Unpublished M.Sc. Thesis, Moscow State University (MSU), Moscow, 98 pp. (in Russian).
- [34] Shafiei, B., Haschke, M., & Shahabpour, J. 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita*, 44(3): 265.
- [18] Cheng, Q., 2006- GIS-based multifractal anomaly analysis for prediction of mineralization and mineral deposits. In: Harris, J. (Ed.), *GIS Applications in Earth Sciences*, Geological Association of Canada Special Paper, pp. 289–300.
- [19] Xiao, F., Chen, Z., Chen, J., Zhou, Y. 2016- A batch sliding window method for local singularity mapping and its application for geochemical anomaly identification. *Computers & Geosciences*, 90:189–201.
- [20] Zuo, R., Cheng, Q., Agterberg, F.P., 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.
- [21] Hamedani, M.L., 2012- *Orebody Modelling for Exploration: The Western Mineralisation, Broken Hill, NSW*. Natural Resources Research, 21(3): 325-345.
- [22] Li, H., Wang, Z.N., Li, F.G., 1995- Ideal models of superimposed primary halos in hydrothermal gold deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 55(1-3):329–336.
- [23] Li, H., Zhang, W.H., Chang, F.C., Zheng, T., Liu, B.L., Wang, Z.N., Tang, L., Liu, Z.C., Li, F.G., Wang, J.C., Guo, R.F., Geng, X.H., 1998- *Primary Halo Model for Buried Ore Prospecting of Large and Super-large Gold Deposits*. Metallurgical Industry Press, Beijing, 125 pp (in Chinese).
- [24] Li, H., Zhang, G.Y., Yu, B., 2006- Tectonic Primary Halo Model and the Prospecting Effect during Deep Buried Ore Prospecting in Gold Deposits. Geological Publishing House, Beijing, pp. 146 (in Chinese).
- [25] Chen, Y.Q., Zhao, P.D., 1998- Zonation in Primary Halos and Geochemical Prospecting Pattern for the Guilaizhuang Gold Deposit, Eastern China. *Nonrenewable Resources*, 7(1):37-44.

[۳۵] برنا ب، ۱۳۸۴. "گزارش زمین‌شناسی اکتشاف مقدماتی مس در منطقه کرور (زون جبال بارز) مقیاس ۱:۲۰۰۰۰"، مشاور: شرکت توسعه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.