

## شناسایی زون‌های کانی‌سازی عمیق و زون‌های فرسایش یافته با استفاده از آنومالی‌های فرکانسی ژئوشیمیایی و مقایسه آن با روش زونالیته

حسین مهدیان‌فر\*

استادیار گروه مهندسی معدن، مجتمع آموزش عالی گناباد  
(دریافت: مهر ۱۳۹۷، پذیرش: تیر ۱۳۹۹)

### چکیده

تمایز زون‌های کانی‌زایی فرسایش یافته از مناطق کانی‌سازی پنهان یکی از چالش‌های مهم در اکتشاف ذخایر معدنی است. روش زونالیته ژئوشیمیایی و مدل‌های آلتراسیونی روش‌های سنتی هستند که به منظور اکتشاف ذخایر عمیق به ویژه کانی‌سازی‌های مس پورفیری و طلای رگه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه ابتدا با استفاده از روش فرکتالی عیار-مساحت حد آستانه آنومالی را برای عناصر موثر در محاسبه شاخص‌های زونالیته در منطقه تنورچه مورد استفاده قرار گرفته است و در ادامه ۴ شاخص مهم زونالیته بر روی داده‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این روش‌های سنتی، با استفاده از تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی در حوزه فرکانس نیز می‌توان به اطلاعات مفیدی در این زمینه دست یافت. با تحلیل آنومالی‌های فرکانسی در روش ضرایب فرکانسی عناصر می‌توان در خصوص ذخایر عمیق و زون‌های فرسایش یافته اظهار نظر نمود. در این مطالعه پتانسیل کانی‌سازی عمیق در یکی از بخش‌های منطقه کانی‌سازی مس و طلای کاشمر با استفاده از روش ضرایب فرکانسی عناصر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به دست آمده با روش زونالیته و اطلاعات گمانه‌های اکتشافی عمیق مورد مقایسه قرار گرفته است. روش ضرایب فرکانسی عناصر عدم وجود زون کانی‌سازی قابل توجه در عمق به ویژه برای عنصر مس را نشان می‌دهد. نتایج روش ضرایب فرکانسی عناصر بر خلاف روش زونالیته به خوبی به وسیله نتایج حفاری‌های عمیق مورد تایید قرار گرفته است.

### کلمات کلیدی

آنومالی فرکانسی، تبدیل فوریه، کانی‌سازی پنهان، زون فرسایش یافته، روش فرکتال

\*عهده‌دار مکاتبات: [hssn.shahi@gmail.com](mailto:hssn.shahi@gmail.com)

## ۱- مقدمه

شناسایی و تمایز بین زون‌های کانی‌سازی عمیق و زون‌های کانی‌سازی فرسایش یافته یکی از مباحث مهم در اکتشافات معدنی است. این موضوع با لحاظ مواردی از قبیل نوع آلتراسیون، نوع کانی‌سازی و نحوه تهی‌شدگی و غنی‌شدگی هاله‌های ژئوشیمیایی مورد تحقیق و بررسی قرار می‌گرفته است [۱]. با توجه به اینکه ویژگی‌های ژئوشیمیایی هاله‌های اولیه ذخایر معدنی قابل استخراج است می‌توان با استفاده از آنها اطلاعات اکتشافی مناسبی از ذخایر معدنی به دست آورد [۲]. روش زونالیت‌ه ژئوشیمیایی که بر اساس توزیع عناصر در هاله‌های ژئوشیمیایی استوار است به عنوان معیاری جهت شناسایی کانی‌سازی‌های عمیق و کانی‌سازی‌های فرسایش یافته مورد استفاده قرار گرفته است [۳-۸].

با استفاده از حوزه فرکانس داده‌های ژئوشیمیایی نیز می‌توان اطلاعات مناسبی در خصوص وجود یا عدم وجود ذخیره در اعماق مختلف به دست آورد. اطلاعات اکتشافی جدید و مفیدی در حوزه فرکانس داده‌های ژئوشیمیایی وجود دارند که در حوزه مکان قابل دستیابی نیستند [۹]. محققین مختلفی از تبدیل فوری و حوزه فرکانس برای تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی استفاده کرده‌اند. برخی از محققین روش فرکتال را در حوزه فرکانس داده‌های ژئوشیمیایی جهت جدایش آنومالی از زمینه مورد استفاده قرار داده‌اند [۱۰-۱۳]. در این روش که روش فرکتالی طیف توان- مساحت نامیده می‌شود، داده‌های ژئوشیمیایی که در حوزه مکان قرار دارند با استفاده از تبدیلات فوری دو بُعدی به حوزه فرکانس منتقل می‌شوند [۱۴-۱۶]. در حوزه فرکانس این عمل با اندازه‌گیری طیف توان انجام می‌شود. این روش از ویژگی خود متشابهی در حوزه فرکانس جهت تعیین و جدایش الگوهای مختلف استفاده می‌کند [۲۰-۲۱]. از ترکیب روش تحلیل مولفه‌های اصلی و روش فرکتالی طیف توان- مساحت نیز جهت جدایش آنومالی استفاده شده است [۲۱].

کانی‌سازی‌های موجود در اعماق مختلف فرکانس‌های ژئوشیمیایی مختلفی در سطح زمین ایجاد می‌کنند از این رو یک رابطه‌ای بین عمق ذخایر معدنی و طول موج‌ها و فرکانس‌های ایجاد شده در نقشه توزیع ژئوشیمیایی عناصر

کانی‌سازی در سطح وجود دارد. این مسئله به طور مستقیم در ارتباط با فرایند مهاجرت ژئوشیمیایی عناصر است. سیگنال‌های ژئوشیمیایی فرکانس پایین می‌توانند متأثر از مولفه زمینه ژئوشیمیایی و مولفه کانی‌سازی عمیق باشند [۲۲-۲۴]. بر اساس رابطه بین عمق کانی‌سازی و نوع فرکانس‌های عناصر کانی‌سازی موجود در داده‌های ژئوشیمیایی سطحی، روش ضرایب فرکانسی عناصر<sup>۱</sup> ارائه و به صورت موفقیت‌آمیزی جهت شناسایی زون‌های کانی‌سازی عمیق مورد استفاده قرار گرفته است [۲۳، ۲۴].

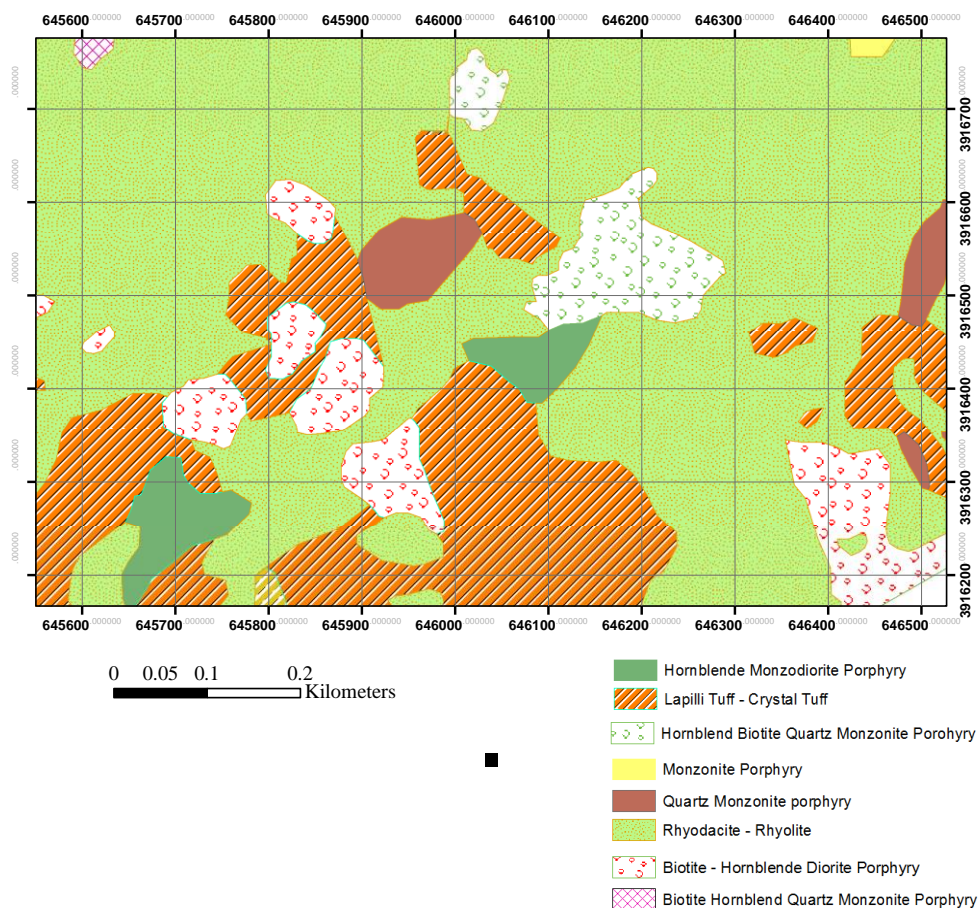
در این مطالعه پتانسیل کانی‌سازی بخش جنوبی منطقه کانی‌سازی مس و طلائی تنورچه در اعماق مختلف با استفاده از روش زونالیت‌ه و ضرایب فرکانسی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. روش زونالیت‌ه برای ذخایر معدنی خاص با شاخص‌های زونالیت‌ه خاص مورد استفاده قرار گرفته است ولی روش ضرایب فرکانسی دارای قابلیت‌های بالاتر و محدودیت کمتری جهت شناسایی کانسارهای پنهان است [۲۴]. روش ضرایب فرکانسی می‌تواند روند تغییرات کانی‌سازی در عمق را بدون نیاز به حفاری گمانه تا حدودی پیش‌بینی کند و احتمال وجود یا عدم وجود کانی‌سازی عمیق را نشان دهد. این روش بر مبنای میزان شدت آنومالی فرکانسی در باندهای مختلف بویژه فرکانس‌های پایین استوار است. آنومالی‌های فرکانسی در این روش نشان دهنده اهمیت و نقش فرایند کانی‌سازی و وجود آنومالی‌های ژئوشیمیایی در حوزه مکان هستند. به همین دلیل در این روش به دنبال دستیابی به آنومالی‌های فرکانسی در فرکانس‌های پایین، بر روی نمودار ضرایب فرکانسی عناصر کانی‌سازی هستیم [۲۳، ۲۴].

## ۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده اکتشافی تنورچه در ۵۵ کیلومتری شمال شرق شهرستان کاشمر در استان خراسان رضوی و بر روی نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ توپوگرافی تربت حیدریه قرار دارد. این منطقه بر روی کمربند ولکانوپلوتونیک خواف- درونه با سن تریشری منطبق بر حاشیه جنوبی فعال صفحه قاره‌ای اوراسیا بوده و در یک زون فرورانش پوسته اقیانوسی- قاره‌ای قرار گرفته است. یکی از ویژگی‌های ناحیه‌ای بارز این کمربند وجود اندیس‌های معدنی متنوع شامل مس، طلا و آهن است. موقعیت و شرایط زمین‌شناسی و شواهد

در میان این مجموعه ولکانیکی توده‌های گرانودیوریت، دیوریت و کوارتز پورفیری با اشکال استوک و دایک و ... نفوذ کرده‌اند. تنوع توده‌های نفوذی رخنمون یافته بیانگر فازهای چندگانه فعالیت ماگمایی از جمله نفوذ دایک‌های دیوریتی عقیم بعد از کانی‌سازی است. مهم‌ترین توده نفوذی تفریق یافته و ظاهر شده، استوک‌های کوارتز پورفیری است. این توده نفوذی شامل کوارتزهای چشمی گرد و درشت، بیوتیت آتره شده (اولیه) همراه با فلدسپات در یک خمیره سیلیسی ریزدانه است. همچنین در این نفوذی‌ها آثاری از ذرات پیریت پراکنده مشاهده می‌شود [۲۵]. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

کانی‌سازی در این کمر بند مؤید پتانسیل کانی‌سازی با ارزش و قابل توجه در آن است. لیتولوژی محدوده تنورچه و نواحی اطراف غالباً شامل ولکانوکلاستیک‌ها و گدازه‌های اسیدی تا متوسط با سن ائوسن است. این مجموعه ولکانیکی توسط توده‌های نفوذی متنوعی با سن الیگوسن-میوسن عمدتاً با ترکیب گرانودیوریت، کوارتز مونزونیت، دیوریت قطع شده‌اند. منطقه تنورچه به وسعت تقریباً ۴ کیلومترمربع از نظر کانی‌سازی طلای رگه‌ای و مس پورفیری مورد بررسی قرار گرفته است. زمین‌شناسی تنورچه شامل مجموعه‌ای از ولکانیک‌های آندزیتی و ریولیتی است.



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

و مقادیر کمی اپیدوت در میان مجموعه‌های ولکانیکی به خوبی گسترش یافته است. اکتینولیت در مناطق نزدیک توده‌های نفوذی مشاهده گردید. آلتراسیون فیلیک در بخش شمالی منطقه در میان واحدهای ولکانیکی و توده‌های نفوذی کوارتز پورفیری گسترش دارد. این آلتراسیون بر مبنای حضور سریسیت و بقایای پیریت

### ۳- آلتراسیون و کانی‌سازی

آلتراسیون گسترده هیدروترمالی سنگ‌های ولکانیکی میزبان در منطقه وجود دارد. آلتراسیون هیدروترمال این منطقه دارای تنوعی از آلتراسیون پروپلتیک، آرژلیک و سریسیتیک است. آلتراسیون پروپلتیک شامل کلریت فراوان

آمده برای این شاخص‌ها، می‌توان در خصوص وضعیت عمقی کانی‌سازی و سطح فرسایش اظهار نظر نمود [۲۶]. در این مطالعه علاوه بر این سه شاخص، یک شاخص زونالیته دیگر نیز بر اساس توالی منطقه‌بندی عناصر در کانسارهای طلای رگه‌ای نیز به دست آمده و مورد استفاده قرار گرفته که به صورت (Ag.Pb.Zn/Co.Mo.Ni) است. با توجه به رابطه موجود بین عناصر تحت کانساری و فوق کانساری، شاخص زونالیته برای کانسارهای مختلف به دست می‌آید [۲۸].

به این منظور نیاز به محاسبه یک سری از پارامترهای توزیع عناصر بویژه مقادیر زمینه و حد آستانه آنومالی ژئوشیمیایی است. لذا در ادامه تخمین مقدار زمینه و حد آستانه‌ای برای برخی عناصر که از لحاظ ژنتیکی با کانسار تحت پی‌جویی در ارتباط بوده و در شاخص‌های زونالیته به کار می‌روند، انجام گرفته است. در این مطالعه جهت تعیین جوامع ژئوشیمیایی و محاسبه مقادیر حد آستانه آنومالی عناصر از روش فرکتالی عیار-مساحت استفاده شده است. یکی از روش‌های مهم ساختاری که در اکتشافات ژئوشیمیایی استفاده می‌شود روش فرکتال است. فرآیندهای رخ داده در طبیعت را نمی‌توان با هندسه اقلیدسی مورد بررسی قرار داد. بسیاری از این فرآیندها به خصوص فرآیندهای مرتبط با علوم زمین از بُعدهای منظم هندسه اقلیدسی تبعیت نمی‌کنند، به همین سبب باید از هندسه دیگری برای توصیف رخدادهای موجود در طبیعت بهره برد [۲۹]. توزیع فضایی اغلب عناصر در محیط ژئوشیمیایی نتیجه فرآیندهای مختلف زمین‌شناسی، تکتونیکی و کانی‌زایی است. این فرآیندها دارای مشخصات خود تشابهی هستند از این رو دارای بعد فرکتالی خواهند بود [۳۰].

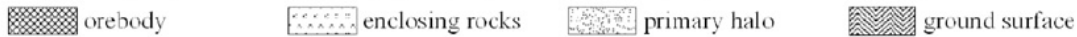
یکی از روش‌های فرکتال که در ژئوشیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد روش فرکتالی عیار-مساحت است. این روش ابتدا توسط چنگ و همکاران مورد استفاده قرار گرفت [۳۱]. در روش فرکتال عیار-مساحت، بُعد فرکتال الگوی ژئوشیمیایی بر مبنای میزان مساحتی که هر عیار در منطقه مورد مطالعه اشغال می‌کند تعیین می‌گردد. هرچه عیار عنصر افزایش پیدا کند میزان مساحت اشغال توسط آن عنصر کاهش می‌یابد. بنا به تعریف، اساس این روش بر مبنای محاسبه غلظت‌های مختلف عنصر و مقدار مساحت متناظر با این غلظت‌ها است.

ریزدانه پراکنده، مشخص می‌شود. کانی‌سازی تیپ پورفیری در استوک نفوذی و سنگ‌های اطراف آن به صورت پیریتی شدن ظاهر شده است. کانی سولفیدی سیستم منحصراً به صورت پیریت مشاهده می‌گردد و این کانی غالباً به لیمونیت ثانویه به همراه مقادیری ژاروسیت اکسید شده است. مقادیر کمی مالاکیت در بخش جنوب غرب منطقه مورد مطالعه در داخل شکستگی‌ها و در میان ولکانیک‌های آلتزه همراه با مقادیر ناچیزی بقایای کالکوپیریت دانه‌ریز پراکنده در متن ظاهر شده است. برش‌های هیدروترمالی و رگچه‌های پر شده با سیلیس مرحله تأخیری و وجود باکس‌ورک‌های درشت اکسید آهن ثانویه ناشی از تخریب سولفیدهای اولیه آهن نیز به صورت معمول دیده می‌شود. رگچه‌های کوارتز استوک‌ورک و نیمه موازی همراه با حاشیه‌های اکسید آهن ثانویه در زون آلتراسیون فیلیک وجود دارد. نتایج فعالیت‌های اکتشافی انجام شده احتمال وجود پتانسیل اقتصادی کانی‌سازی طلای نوع رگه‌ای و یا استوک‌ورک و مس پورفیری را نشان می‌دهد. پرشدگی‌های سیلیس در درزه‌ها و آنومالی‌های قوی طلا در نمونه‌های سنگی همراه با تعدادی نمونه با عیار اقتصادی بالا در منطقه مشاهده شده است [۲۵].

#### ۴- روش زونالیته

برای بررسی وضعیت سطح از فرسایش در بخش جنوبی منطقه تنورچه، روش زونالیته بر روی داده‌های ژئوشیمیایی انجام گرفته است. شاخص‌های زونالیته بر مبنای وضعیت قرارگیری هاله‌های ژئوشیمیایی عناصر فوق کانساری و تحت کانساری تعیین می‌شوند از این جهت شاخص‌های مختلفی بر اساس نوع کانی‌سازی قابل تعریف خواهند بود. شاخص‌های زونالیته به صورت چند عنصری بهتر می‌توانند سطح فرسایش کانی‌سازی را نشان دهند. این شاخص‌های چند عنصری بر اساس منطقه‌بندی و توالی عناصر ژئوشیمیایی از سطح به عمق محاسبه می‌شوند. یکی از انواع کانی‌سازی‌ها که شاخص‌های زونالیته برای آن تعریف شده و مورد استفاده قرار گرفته، کانی‌سازی مس پورفیری است. سه شاخص مهمی که برای این نوع کانی‌سازی در کشورهای قزاقستان، بلغارستان، ارمنستان و ایران با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مدل با استفاده از مقادیر به دست

Erosional surface	Vertical section	$Vz_1 = \frac{Zn * Pb}{Cu * Ag}$	$Vz_2 = \frac{Zn * Pb}{Cu * Mo}$	$Vz_3 = \frac{Zn * Pb * Bi}{Cu * Mo * Ag}$
		Supra-ore	I	>100
Upper ore	II	100 - 10	5 - 0.5	1 - 0.1
Ore	III	10 - 1	0.5 - 0.05	0.1 - 0.01
Ore	IV	1 - 0.1	0.05 - 0.005	0.01 - 0.001
Lower ore	V	0.1 - 0.01	0.005 - 0.0005	0.001 - 0.0001
Sub-ore	VI	<0.01	<0.0005	<0.0001
	Contrast $Vz(I)/Vz(VI)$	10,000	10,000	10,000



شکل ۲: مدل زونالیته ژئوشیمیایی عمودی بدست آمده برای ذخایر مس پورفیری بر اساس ذخایر مس پورفیری استاندارد در کشورهای قزاقستان، بلغارستان، ارمنستان و ایران [۲۶، ۲۷]

### ۵- تبدیل فوریه و حوزه فرکانس داده‌های ژئوشیمیایی

حقیقی  $R(K_x, K_y)$  و یک قسمت موهومی  $I(K_x, K_y)$  است. تبدیلات فوریه شبیه سری‌های فوریه به دو روش  $\sin$  -  $\cos$  و دامنه- فاز نمایش داده می‌شوند. طیف فاز تابع به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود [۳۳، ۳۴]:

$$\varphi(K_x, K_y) = \tan^{-1} \left[ \frac{I(K_x, K_y)}{R(K_x, K_y)} \right] \quad (3)$$

### ۶- بحث

در این مطالعه جهت بررسی وضعیت عمقی کانی‌سازی مس و طلا در قسمت جنوبی منطقه اکتشافی تنورچه که به عنوان یکی از قسمت‌های با پتانسیل در مراحل مختلف اکتشاف سطحی شناسایی شده است روش سنتی زونالیته و مدل آلتراسیونی با روش ضرایب فرکانسی عناصر مقایسه شده است. وضعیت کانی‌سازی در منطقه و شدت بالای عیارهای نمونه‌های ژئوشیمیایی سطحی به ویژه عنصر طلا و از طرفی مدل آلتراسیون‌های موجود در این قسمت از منطقه، نوید بخش یک زون کانی‌سازی عمیق است.

شدت بالای آلتراسیون‌های سیلیسی، سریسیت، آرزلیک، پروپلیتیک به همراه کانی‌سازی‌های کوارتز، پیریت، کالکوپیریت و اکسیدهای آهن این گمان را تقویت می‌کند.

با توجه به وضعیت کانی‌سازی، آلتراسیونی و زمین‌شناسی ناحیه‌ای و محلی، احتمال وجود کانی‌سازی تیپ مس پورفیری همراه با طلای رگه‌ای در این منطقه وجود دارد. علاوه بر بررسی وضعیت آلتراسیون‌ها، جهت تحلیل وضعیت عمقی کانی‌سازی در این قسمت از منطقه، داده‌های ژئوشیمیایی سطحی مورد تحلیل قرار گرفت. در

برای انتقال داده‌های ژئوشیمیایی از حوزه مکان به فرکانس از روش‌های تبدیل فوریه دو بُعدی استفاده می‌شود. مسائلی که شامل متغیرهای فضایی هستند می‌توانند با روش تبدیلات فوریه مورد بررسی و تحلیل قرار گیرند. خیلی از متغیرهای فضایی می‌توانند به وسیله توابعی به شکل  $f(x,y,z)$  نمایش داده شوند. به منظور امکان استفاده از روش‌های فوریه در این حالت‌ها باید نظریه فوریه برای توابع چند متغیره تعمیم داده شود. این امر با در نظر گرفتن متغیرهای مستقل جدا از هم، انجام می‌شود. اگر  $f$  تابعی با دو متغیر مستقل باشد، در این صورت تبدیل فوریه دو بُعدی آن به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$F_2 f(\alpha, \beta) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i\alpha x} dx \right\} e^{-i\beta y} dy \quad (1)$$

نتیجه تابعی از فرکانس‌های زاویه‌ای در جهت  $x$  و  $y$  (آلفا و بتا) است. در نهایت تبدیل فوریه دو بُعدی را به صورت رابطه (۲) می‌توان بیان کرد [۳۲].

$$F(K_x, K_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cos(K_x x + K_y y) dx dy - i \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \sin(K_x x + K_y y) dx dy \quad (2)$$

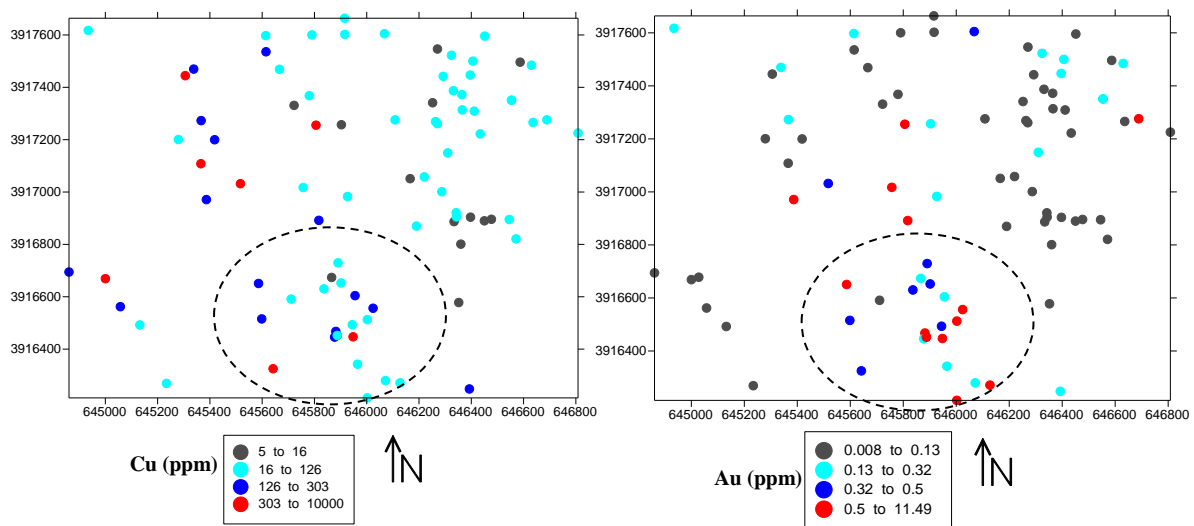
در این رابطه  $f(x, y)$  تابع مربوط به سیگنال در حوزه مکان و  $K_x$  و  $K_y$  مقادیر عدد موج در جهت‌های  $x$  و  $y$  هستند. بنابراین تابع  $f(x, y)$  در حوزه مکان (مانند نقشه توزیع ژئوشیمیایی عناصر) می‌تواند به تابع  $F(K_x, K_y)$  در حوزه فرکانس تبدیل شود. این تابع شامل یک قسمت

عیار مس و طلا در آنها نسبتاً بالا است. اطلاعات آماری اولیه برخی عناصر در جدول ۱ ارائه شده است. نقشه محل نمونه‌های ژئوشیمیایی همراه با مقادیر طلا و مس نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.

مراحل مختلف اکتشافی در محدوده تنورچه نمونه‌های مختلفی از منطقه برداشت گردیده است. تعداد ۱۰۳ نمونه لیتوژئوشیمیایی واقع در محدوده تنورچه و از محل آلتراسیون‌ها و کانی‌سازی‌ها برداشت شده‌اند که بخشی از این نمونه‌ها در قسمت جنوبی منطقه واقع شده‌اند و میزان

جدول ۱: اطلاعات آماری اولیه برخی عناصر در منطقه تنورچه

	Au	Cu	Mo	Pb	Zn
Mean	0.34	250.04	16.99	537.66	106.41
Median	0.09	41.00	9.00	58.50	38.00
Mode	0.03	20.00	2.00	14.00	13.00
Std. Deviation	1.14	1125.73	25.35	1175.11	170.11
Variance	1.31	1267259.20	642.78	1380882.08	28938.02
Skewness	8.34	7.15	4.26	3.45	2.88
Kurtosis	77.96	54.46	24.05	13.47	10.08
Minimum	0	5.00	1.00	4.00	1.67
Maximum	11.48	10000	196.00	7354.00	1070

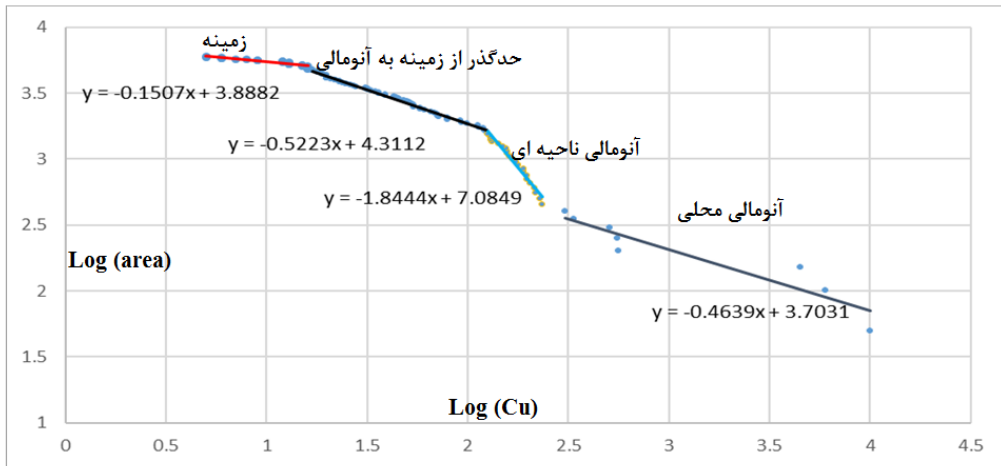


شکل ۳: موقعیت مکانی نمونه‌های ژئوشیمیایی و مقادیر عیار مس و طلا

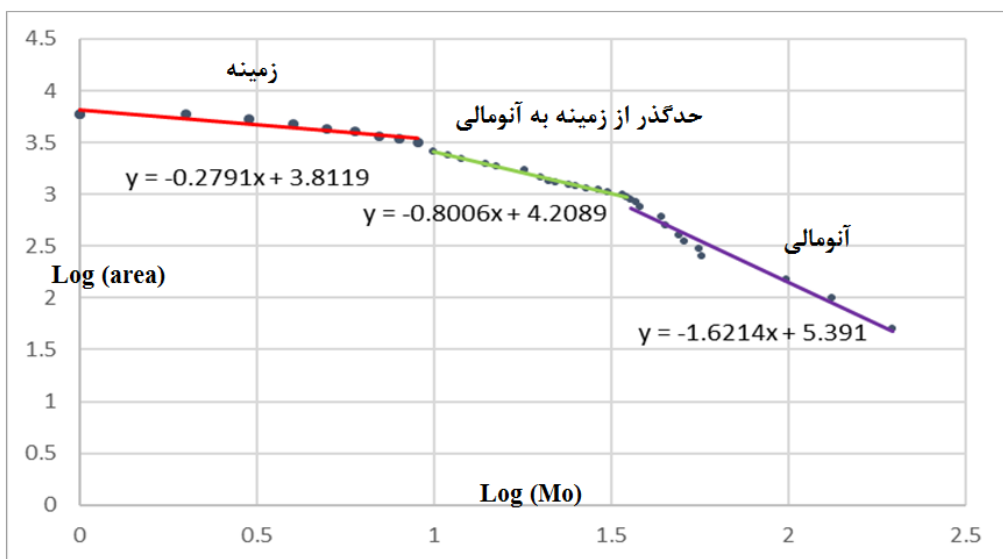
فرکتالی عیار- مساحت یک روش مناسب و مرسوم است از این روش جهت تعیین جوامع ژئوشیمیایی استفاده گردید. حد آستانه آنومالی و مقدار زمینه برای عناصر موثر در محاسبه شاخص زونالیته شامل عناصر مس، مولیبدن، نقره، سرب، روی، کبالت، بیسموت و نیکل با استفاده از روش فرکتال بدست آمده است. این نتایج در جدول ۲ بیان شده است. نمودار فرکتالی عیار- مساحت و انواع جوامع ژئوشیمیایی برای عناصر مس و مولیبدن در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

### ۶-۱- نتایج روش زونالیته

با توجه به مشخصات کانی‌زایی، آلتراسیونی، زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی، احتمال وجود تیپ‌های کانی‌سازی مس پورفیری و طلائی رگه‌ای در این محدوده وجود دارد. بر این اساس از چند شاخص زونالیته بر روی داده‌های ژئوشیمیایی برای پیش‌بینی وضعیت سطح فرسایش استفاده شده است. برای محاسبه شاخص‌های ژئوشیمیایی باید مقادیر حد آستانه‌ای آنومالی را تعیین و نمونه‌های آنومال را جدا نماییم. روش‌های مختلفی برای تعیین حد آستانه آنومالی وجود دارد. با توجه به اینکه روش



شکل ۴: نمودار فرکتالی عیار- مساحت و جوامع ژئوشیمیایی عنصر مس



شکل ۵: نمودار فرکتالی عیار- مساحت و جوامع ژئوشیمیایی عنصر مولیبدن

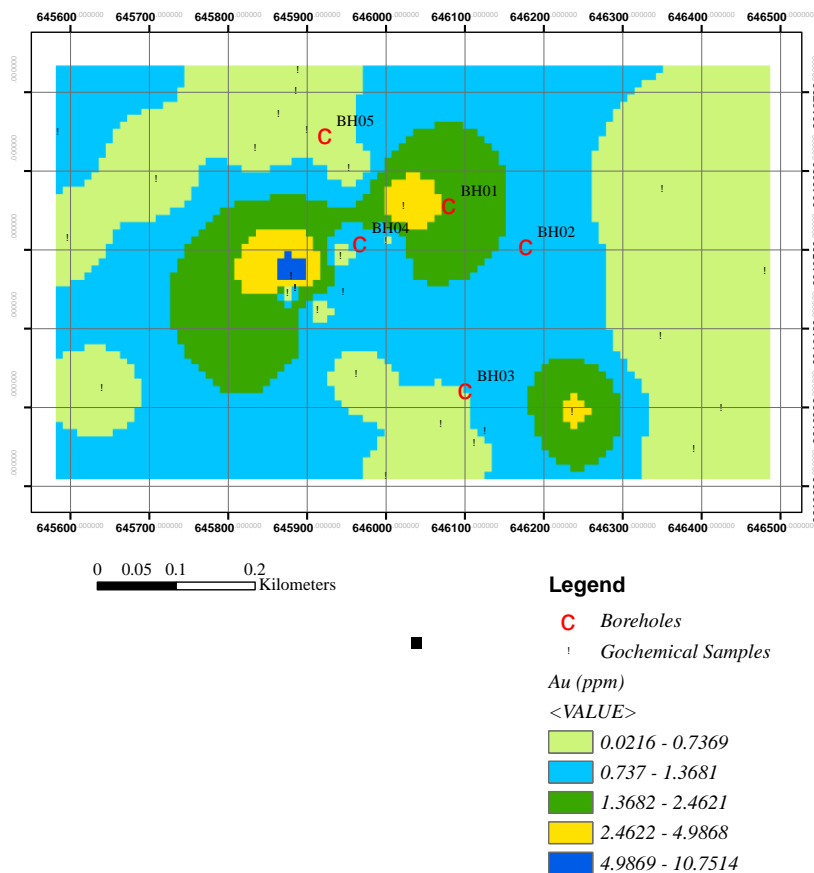
جدول ۲: حد آستانه آنومالی و مقدار زمینه برای عناصر مختلف بر اساس روش فرکتال

	Ag	Zn	Pb	Co	Ni	Mo	Cu	Bi
حد آستانه آنومالی (PPM)	۳/۲	۲۷۱	۴۴۰	۱۰	۱۳	۳۶	۱۲۶	۳۳
مقدار زمینه (PPM)	۰/۶	۸۰	۱۰۷	۴	۳	۱۰	۱۶	۲۰

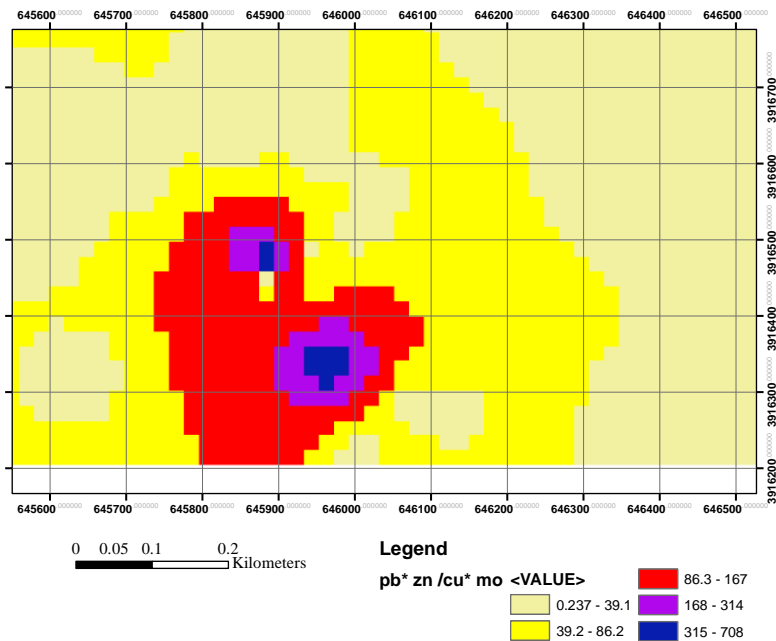
برای این چهار شاخص در جدول ۳ بیان شده است. تمام این شاخص‌ها مقدار بالایی را نشان می‌دهند به گونه‌ای که نشان دهنده یک زون کانی‌سازی عمیق در این محدوده هستند. در این قسمت، آنومالی عناصر فوق کانساری بالا و مقادیر عناصر تحت کانساری پایین بوده است که این نتیجه را تقویت می‌کند. در این محدوده در سطح زمین، مقادیر طلا بالا بوده و مقدار متوسط عیار طلا در نمونه‌های سطحی در این بخش به ۱/۳۵ گرم در تن رسیده است (شکل ۳ و ۶). تعداد ۵ گمانه با عمق نسبتاً بالا در این

در ادامه سه شاخص زونالیته که برای کانی‌سازی مس پورفیری در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است در منطقه به کار گرفته شده است (جدول ۳). این شاخص‌ها در شکل ۲ نیز نشان داده شده است. علاوه بر این شاخص‌ها، یک شاخص عنصری بر اساس توالی منطقه‌بندی عناصر در تیپ طلای رگه‌ای تعیین و استفاده شد که به صورت (Ag.Pb.Zn/Co.Mo.Ni) است. بعد از حذف نمونه‌های زمینه و مولفه سنژنتیک شاخص‌های زونالیته مورد محاسبه قرار گرفته‌اند. مقدار به دست آمده

محدوده حفاری شده است که کانی‌سازی قابل توجهی را نشان نمی‌دهند. نقشه درون‌یابی شده مربوط به شاخص زونالیت‌ها مس پورفیری برای نمونه‌های مختلف در شکل ۷ ترسیم شده است.



شکل ۶: نقشه توزیع ژئوشیمیایی عنصر طلا در منطقه و محل گمانه‌های حفاری شده



شکل ۷: نحوه توزیع و مقادیر شاخص زونالیت‌ها برای کانی‌سازی تپ مس پورفیری در منطقه



جدول ۳: شاخص‌های زونالیت به کار گرفته شده در منطقه و مقادیر به دست آمده برای این شاخص‌ها

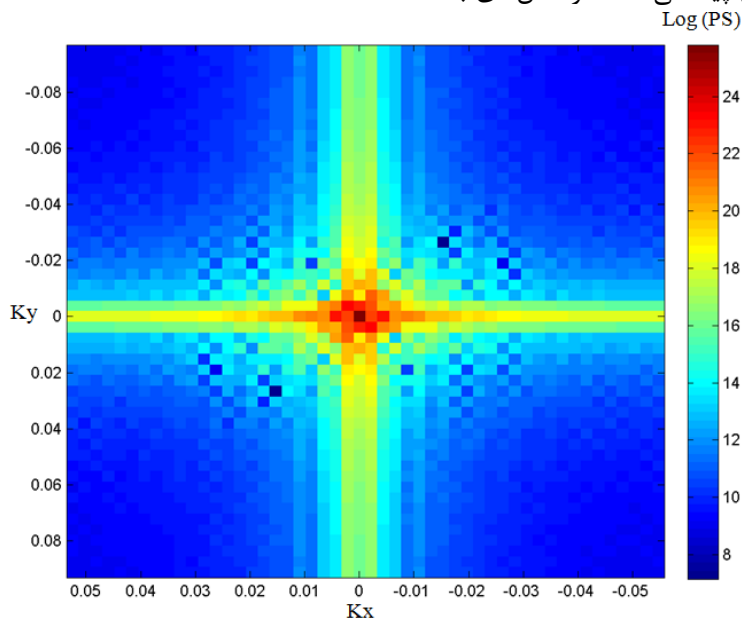
	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4
	Pb.Zn/Cu.Mo	Pb.Zn/Cu.Ag	Pb.Zn.Bi/Cu.Mo.Ag	Ag.Pb.Zn/Co.Mo.Ni)
مقدار شاخص در محدوده	۳۸	۲۵۵	۱۸۶	۱۷۸

در داده‌های ژئوشیمیایی تغییرات شدید در داده‌ها را نشان می‌دهند و فرکانس‌های کوچک تغییرات ملایم‌تر و کوچک‌تر را نمایش می‌دهند.

تبدیل فوریه دو بُعدی بر روی تمام عناصر به صورت مجزا با استفاده از نرم‌افزار متلب صورت گرفته است. سپس با توجه به مقادیر اعداد موج در جهت‌های مختلف فیلترهای مختلفی طراحی گردید. فیلترها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که بتوان فرکانس‌های مختلف موجود در داده‌ها را در بازه‌های متفاوتی از هم تفکیک کرد. تعداد ۸ فیلتر که باندهای مختلف فرکانسی را ایجاد می‌کند در جدول ۴ نشان داده شده است. فیلترها به صورت یک معادله عنوان می‌شوند که این معادله در تابع توزیع فرکانسی عناصر ضرب شده و برخی از فرکانس‌ها را حذف و برخی از آنها را باقی می‌گذارند در نتیجه اعمال این فیلترها باندهای فرکانسی مختلف با فرکانس‌های مشخص تولید می‌شوند.

## ۲-۶- ضرایب فرکانسی عناصر و آنومالی‌های فرکانسی ژئوشیمیایی

با استفاده از روش ضرایب فرکانسی عناصر می‌توان رفتار فرکانسی عناصر کانی‌سازی را در باندهای فرکانسی مختلف مورد بررسی قرار داد و در خصوص وضعیت کانی‌سازی در عمق اظهار نظر کرد. در این روش ابتدا با استفاده از تبدیل فوریه دو بُعدی نقشه توزیع ژئوشیمیایی تمام عناصر به حوزه فرکانس انتقال پیدا می‌کند. شکل ۸ نقشه توزیع فرکانسی عنصر مس در منطقه را نشان می‌دهد. محور افقی و قائم به ترتیب مقادیر اعداد موج در جهت‌های افقی و قائم را نشان می‌دهند. در این نقشه طیف توان مربوط به فرکانس‌های مختلف موجود در داده‌های ژئوشیمیایی ترسیم شده است. اعداد موج با مقدار فرکانس نسبت مستقیم دارند و در قسمت‌هایی که مقدار عدد موج به صفر نزدیک می‌شود فرکانس‌ها کوچک‌تر خواهند شد که در این قسمت‌ها مقدار دامنه این سیگنال‌ها که طیف توان را تشکیل می‌دهند، افزایش پیدا می‌کنند. فرکانس‌های بالا



شکل ۸: نقشه توزیع طیف توان عنصر مس

جدول ۴: فیلترهای طراحی شده و باندهای فرکانسی به دست آمده از آنها

باند فرکانسی	معادله فیلتر طراحی شده
باند ۱	$G(k_x, k_y) = \begin{cases} 1 &  k_x  \text{ and }  k_y  \leq 0.0025 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
باند ۲	$G(k_x, k_y) = \begin{cases} 1 &  k_x  \text{ and }  k_y  \leq 0.005 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
باند ۳	$G(k_x, k_y) = \begin{cases} 1 &  k_x  \text{ and }  k_y  \leq 0.01 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
باند ۴	$G(k_x, k_y) = \begin{cases} 1 &  k_x  \text{ and }  k_y  \leq 0.02 \text{ and } \left\{ \begin{array}{l} 0.01 \leq  k_x  \leq 0.02 \\ \text{OR} \\ 0.01 \leq  k_y  \leq 0.02 \end{array} \right\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
باند ۵	$G(k_x, k_y) = \begin{cases} 1 &  k_x  \text{ and }  k_y  \leq 0.03 \text{ and } \left\{ \begin{array}{l} 0.02 \leq  k_x  \leq 0.03 \\ \text{OR} \\ 0.02 \leq  k_y  \leq 0.03 \end{array} \right\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
باند ۶	$G(k_x, k_y) = \begin{cases} 1 &  k_x  \text{ and }  k_y  \leq 0.04 \text{ and } \left\{ \begin{array}{l} 0.03 \leq  k_x  \leq 0.04 \\ \text{OR} \\ 0.03 \leq  k_y  \leq 0.04 \end{array} \right\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
باند ۷	$G(k_x, k_y) = \begin{cases} 1 &  k_x  \text{ and }  k_y  \leq 0.05 \text{ and } \left\{ \begin{array}{l} 0.04 \leq  k_x  \leq 0.05 \\ \text{OR} \\ 0.04 \leq  k_y  \leq 0.05 \end{array} \right\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
باند ۸	$G(k_x, k_y) = \begin{cases} 1 &  k_x  \geq 0.05 \text{ and }  k_y  \geq 0.08 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

عناصر، برای هر باند فرکانسی ماتریسی به دست می‌آید که برای تمام عناصر فرکانس‌های مشابه را شامل می‌شود. با بررسی رفتار فرکانسی عناصر کانی‌سازی در باندهای فرکانسی مختلف می‌توان اطلاعات مفیدی از وضعیت کانی‌سازی عناصر به دست آورد. در مرحله بعد، برای بررسی وضعیت عناصر در باندهای مختلف از روش تحلیل

این فیلترها به صورت مجزا بر روی نقشه فرکانسی تمام عناصر اعمال می‌شوند. با توجه به جدول ۴، میزان فرکانس‌ها در باندهای فرکانسی از باند ۱ به سمت باند ۸ افزایش می‌یابند. در نتیجه باند ۸ بزرگ‌ترین فرکانس‌ها و باند ۱ کوچک‌ترین فرکانس‌ها را شامل می‌شوند. بعد از اعمال فیلترهای مختلف بر روی داده‌های حوزه فرکانس

آمده از مرحله قبل به صورت مجزا انجام شده است. در هر کدام از این حالت‌ها نتایج متنوعی به ویژه در تعداد فاکتورها به دست می‌آید. در این نتایج حاصل از باندهای فرکانسی، عموماً عنصر طلا و مس رفتار مشابهی نداشته و با یکدیگر همراه نیستند که این امر می‌تواند نشان دهنده وجود دو فاز کانی‌زایی در این منطقه باشد.

نتایج حاصل از باندهای فرکانسی ۳، ۴ و ۷ در جدول ۵ قابل مشاهده است.

مولفه‌های اصلی استفاده شده است. این روش می‌تواند میزان تاثیر عناصر مرتبط با کانی‌سازی را در فاکتورهای مختلف مورد بررسی قرار دهد. میزان شدت کانی‌سازی و ارتباط بین عناصر کانی‌سازی با یکدیگر را می‌توان با این روش مورد کنکاش قرار داد. با اعمال روش تحلیل مولفه‌های اصلی بر روی باندهای فرکانسی، می‌توان اهمیت کانی‌سازی در این باندهای فرکانسی را برآورد کرد. در همین راستا این روش بر روی ۸ باند فرکانسی به دست

جدول ۵: نتایج روش تحلیل مولفه‌های اصلی (Rotated component matrix) در باندهای فرکانسی ۳، ۴ و ۷

باند فرکانسی ۳		باند فرکانسی ۴				باند فرکانسی ۷						
Component		Component				Component						
1	2	1	2	3	4	1	2	3	4			
Au	0.69	0.65	Au	0.04	0.00	0.68	0.56	Au	0.39	0.56	0.63	-0.11
Al	0.65	0.71	Al	0.77	0.59	0.10	-0.09	Al	0.95	0.29	0.09	0.03
As	0.88	0.40	As	0.40	0.84	0.08	0.24	As	0.79	0.55	0.25	-0.12
Ba	0.92	0.36	Ba	0.48	0.39	0.68	0.10	Ba	0.64	0.39	0.25	0.49
Ca	0.95	0.31	Ca	0.88	-0.09	0.24	0.29	Ca	0.65	0.09	0.05	0.72
Ce	0.96	0.29	Ce	0.31	0.81	0.38	0.19	Ce	0.39	0.83	0.21	0.32
Co	0.94	0.32	Co	0.37	0.39	0.60	0.27	Co	0.54	0.32	0.74	0.24
Cr	0.88	0.46	Cr	0.35	0.39	0.66	0.12	Cr	0.24	0.25	0.93	0.10
Cu	0.93	0.34	Cu	0.26	0.85	0.28	0.27	Cu	0.64	0.71	0.29	-0.06
Fe	0.95	0.30	Fe	0.28	0.62	0.05	0.62	Fe	0.72	0.54	0.41	-0.11
K	0.46	0.80	K	0.67	0.63	0.14	-0.12	K	0.92	0.36	0.16	0.04
La	0.95	0.29	La	0.30	0.80	0.42	0.18	La	0.37	0.85	0.16	0.33
Mg	0.76	0.64	Mg	0.90	0.30	0.22	0.18	Mg	0.91	0.24	0.18	0.28
Mn	0.94	0.33	Mn	0.31	-0.01	0.84	0.22	Mn	0.44	0.08	0.57	0.68
Mo	0.81	0.48	Mo	0.29	0.37	0.24	0.79	Mo	0.23	0.96	0.14	0.09
Na	0.47	0.82	Na	0.85	0.46	0.20	0.01	Na	0.94	0.25	0.06	0.23
Ni	0.82	0.53	Ni	0.33	0.40	0.66	0.10	Ni	0.20	0.19	0.95	0.08
P	0.94	0.35	P	-0.05	0.36	0.22	0.78	P	0.07	0.22	0.96	0.12
Pb	0.49	0.69	Pb	0.38	0.13	0.22	0.80	Pb	0.39	0.88	0.16	0.03
S	-0.07	0.88	S	0.10	0.16	0.88	0.22	S	-0.08	-0.03	0.99	0.07
Sc	0.86	0.48	Sc	0.90	0.34	0.21	0.11	Sc	0.90	0.25	0.23	0.27
Sr	0.82	0.51	Sr	-0.08	0.08	0.50	0.65	Sr	-0.11	0.70	0.16	0.67
Ti	0.56	0.80	Ti	0.91	0.32	0.20	0.14	Ti	0.94	0.27	0.14	0.17
V	0.75	0.64	V	0.83	-0.03	0.36	0.33	V	0.68	0.11	0.50	0.50
Y	0.88	0.46	Y	0.85	0.45	0.14	0.02	Y	0.95	0.29	0.07	0.09
Zn	0.92	0.36	Zn	0.11	0.82	0.04	0.42	Zn	0.37	0.90	0.16	0.00

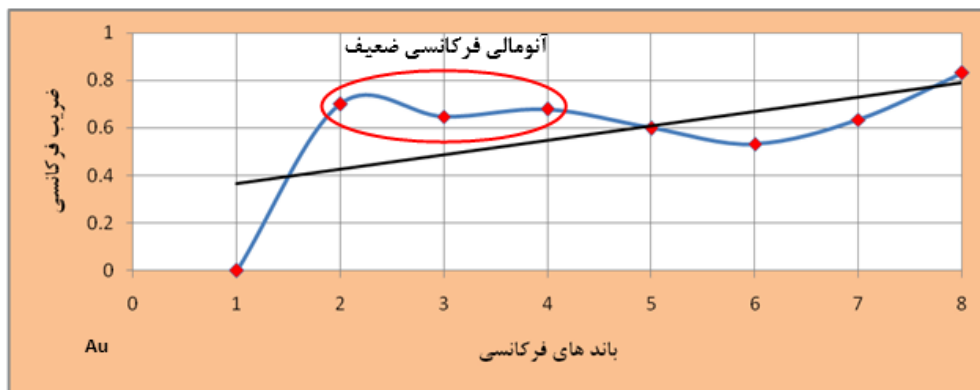
شدت پایین در این باند فرکانسی است. با توجه به اینکه فاکتور ۱ بیشترین واریانس داده‌ها را نشان می‌دهد و مجموعه متنوعی از عناصر در آن جای می‌گیرند این فاکتور

در باند فرکانسی ۳، عناصر در ۲ فاکتور قرار گرفته‌اند. در این باند فرکانسی عناصر کانی‌سازی به خوبی از سایر عناصر متمایز نشده‌اند. این نشانه‌ای بر وجود کانی‌سازی با

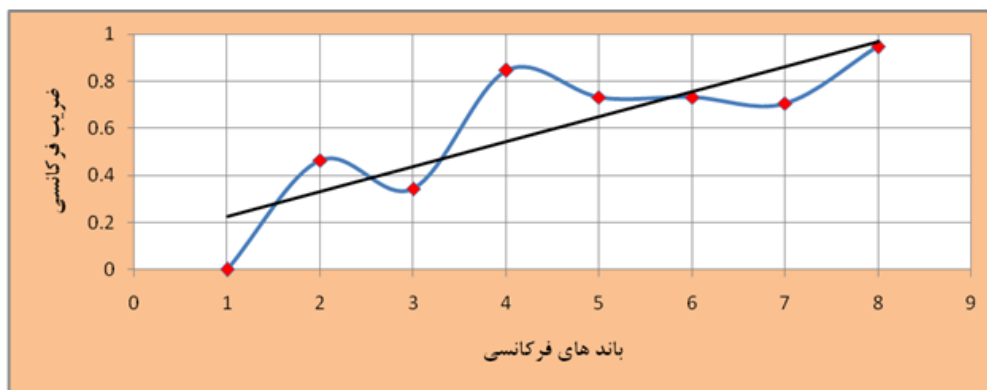
عناصر کانی‌سازی را می‌توانند به نحو مطلوب‌تری از سایر عناصر جدا کنند. این مسئله در این بخش از منطقه تنورچه به خوبی در نتایج مشاهده نمی‌شود که احتمال وجود یک زون کانی‌سازی فرسایش یافته را تقویت می‌کند. بعد از تحلیل نتایج تمام باندهای فرکانسی و نتایج تحلیل مولفه‌های اصلی و شناسایی و تحلیل مولفه‌ها و فاکتورهای کانی‌سازی به دست آمده، نمودار ضرایب فرکانسی عناصر رسم شده است. این نمودار بر اساس ضرایب مؤثر در فاکتور کانی‌سازی برای عناصر مس و طلا در باندهای فرکانسی مختلف رسم می‌شود. در این نمودارها (شکل ۹ و ۱۰) در محور افقی، باندهای فرکانسی به ترتیب از فرکانس‌های پایین به فرکانس‌های بالا (۸ تا ۱) قرار گرفته و در محور قائم مقادیر ضرایب عناصر در جدول حاصل از روش تحلیل مولفه‌های اصلی قرار می‌گیرند. این ضرایب تحت عنوان ضرایب فرکانسی عناصر نامیده می‌شوند. شدت بالای ضرایب فرکانسی عناصر کانی‌سازی، نشان دهنده اهمیت کانی‌سازی در آن باند خواهند بود.

با مقادیر زمینه مرتبط است. با در نظر گرفتن عدد ۰/۶ به عنوان معیار، عنصر طلا در دو فاکتور ۱ و ۲ و عنصر مس در فاکتور اول دیده می‌شوند. در باندهای ۴ و ۷ عنصر طلا و مس هیچ ارتباطی با یکدیگر نشان نمی‌دهند. در این باند فرکانسی نیز عناصر کانی‌سازی به خوبی از سایر عناصر جدا نشده‌اند. با این وجود عنصر مس در فاکتور ۲ و عنصر طلا در باند ۳ قرار گرفته‌اند و این فاکتورها را می‌توان به عنوان فاکتور کانی‌سازی در نظر گرفت. در باند فرکانسی ۷ نیز عناصر طلا و مس با یکدیگر ارتباطی نداشته و عنصر مس در فاکتورهای ۱ و ۲ و عنصر طلا در فاکتور ۳ قرار دارند. در این باند فرکانسی، فاکتور ۳ و فاکتور ۲ به ترتیب فاکتورهای کانی‌سازی طلا و مس خواهند بود. معمولاً با افزایش عدد موج در باندهای فرکانسی، تعداد فاکتورهای به دست آمده از روش تحلیل مولفه‌های اصلی نیز افزایش می‌یابد. به ویژه در باندهای فرکانسی بالا این امر به خوبی مشهود است.

در صورتی که کانی‌سازی عمیق و قابل توجهی در اعماق بیشتر وجود داشته باشد باندهای فرکانسی پایین



شکل ۹: نمودار ضرایب فرکانسی عنصر طلا در باندهای فرکانسی مختلف



شکل ۱۰: نمودار ضرایب فرکانسی عنصر مس در باندهای فرکانسی مختلف

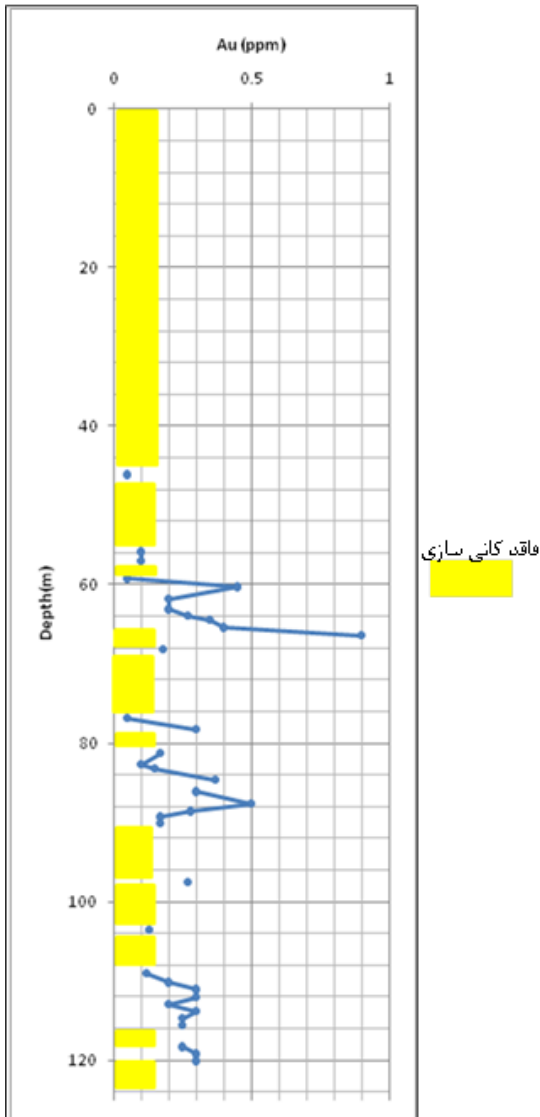
در صورتی که عنصر کانی‌سازی در این باندها ضعیف باشد رفتار مشابه با سایر عناصر به ویژه با عناصر زمینه خواهد داشت و در نتیجه مقدار ضریب فرکانسی آن در مولفه کانی‌سازی پایین خواهد بود. به همین ترتیب وجود ضرایب فرکانسی پایین برای عناصر در نمودار ضرایب فرکانسی، دال بر عدم وجود کانی‌سازی مناسب است.

در شکل ۹ و ۱۰، یک روند نزولی از باند ۸ به سمت باند ۱ مشاهده می‌شود. ذخایری که در اعماق زیادتر بوده و در فرایند مهاجرت ژئوشیمیایی به خوبی نتوانسته‌اند به سطح مهاجرت کنند در سطح زمین تغییرات شدیدی در نقشه توزیع ژئوشیمیایی ایجاد نمی‌کنند و در نتیجه تنها فرکانس‌های ژئوشیمیایی کوچکی در سطح زمین ایجاد می‌کنند و اثرات آنها در فرکانس‌های پایین قابل شناسایی خواهد بود. از این رو این نوع کانی‌سازی‌های عمیق را باید در باندهای فرکانسی پایین جستجو کرد. در نمودار ضریب فرکانسی عناصر در صورتی که ضرایب فرکانسی عناصر کانی‌سازی در باندهای یا فرکانس پایین مقادیر بالا و قابل توجهی داشته باشند احتمال وجود کانی‌سازی عمیق زیاد خواهد بود و در صورتی که این ضرایب دارای مقادیر بالایی نباشند احتمال وجود کانی‌سازی عمیق، پایین خواهد بود. نمودار ضرایب فرکانسی عناصر این تغییرات را از باندهای فرکانس بالا تا باندهای با فرکانس پایین نشان می‌دهد.

### ۶-۳- مقایسه روش زونالیته و روش ضرایب فرکانسی

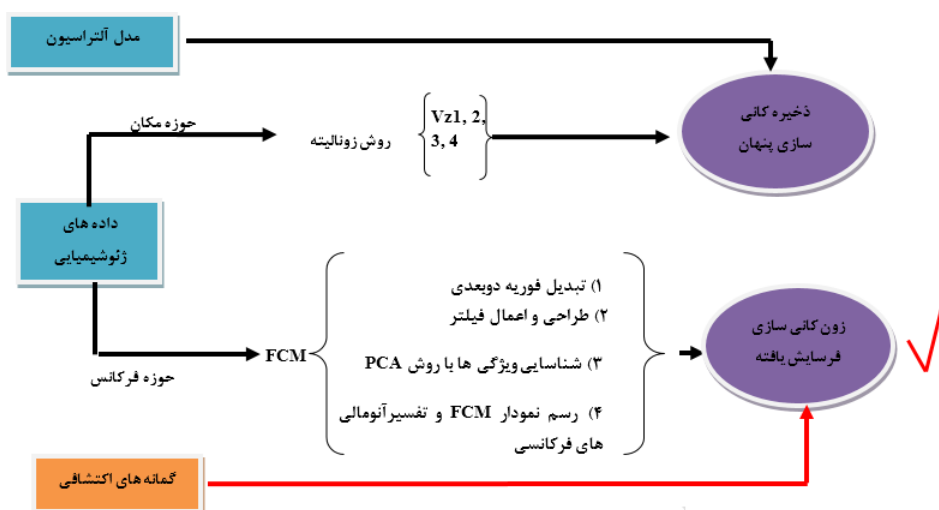
همان طور که مشاهده می‌شود در روش ضرایب فرکانسی، نمودارها از فرکانس بالا به سمت فرکانس پایین روند کاهشی نشان می‌دهند. در باندهای فرکانسی پایین، مقادیر ضرایب عناصر پایین و نقش این عناصر کمتر است. کاهش مقادیر ضرایب از باندهای فرکانسی بالا به سمت باندهای فرکانس پایین نشان دهنده احتمال وجود یک زون کانی‌سازی فرسایش یافته در این بخش از منطقه است. بر این اساس و با توجه به نتایج روش ضرایب فرکانسی عناصر، در اعماق احتمال وجود کانی‌سازی مس و طلا پایین است. تعداد ۵ گمانه عمیق حفر شده در منطقه نتایج روش ضرایب فرکانسی عناصر را تایید می‌کند. در این گمانه‌ها که به صورت عمیق حفر شده‌اند هیچ گونه کانی‌سازی قابل توجهی از مس و طلا در اعماق مشاهده نشده است. نتایج عیار طلا در حفاری شماره ۴ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. وجود چنین نتایجی در این حفاری‌ها می‌تواند نشانه

وجود یک زون فرسایش یافته در این بخش از منطقه باشد. با وجود اینکه عیارهای نمونه‌های طلا در سطح تا ۱۱ گرم بر تن هم می‌رسد ولی در اعماق کانی‌سازی اقتصادی مشاهده نمی‌شود. نتایج روش ضرایب فرکانسی عدم وجود کانی‌سازی عمیق را به خوبی نشان می‌دهد که این مهم به وسیله نتایج گمانه‌ها تایید می‌شود. در نمودار ضریب فرکانسی عنصر طلا، یک آنومالی کوچک فرکانسی به ویژه در باندهای فرکانسی ۲، ۳ و ۴ دیده می‌شود که مقادیر ضرایب فرکانسی آنها کمتر از ۰/۸ است. این آنومالی ضعیف فرکانسی در باندهای فرکانسی با فرکانس پایین می‌تواند دلیل وجود یک کانی‌سازی ضعیف در عمق باشد که این قسمت از نمودار نیز توسط نتایج گمانه‌ها به خوبی تایید می‌شود. در برخی از این گمانه‌ها در عمق، یک کانی‌زایی ضعیف از طلا دیده می‌شود. در گمانه ۴ نیز این مسئله به خوبی دیده می‌شود و در اعماق بیشتر از ۶۰ متر عیارهای در حد چند دهم گرم در تن برای طلا دیده می‌شود. نمودار ضرایب فرکانسی عنصر مس هیچ گونه آنومالی فرکانسی در باندهای فرکانس پایین نشان نمی‌دهد و روند نمودار به سمت این باندها کاملاً نزولی است. این نشانه عدم وجود کانی‌سازی مس در عمق است. در حفاری‌های انجام شده اثر قابل توجهی از کانی‌سازی مس مشاهده نشده است. حفاری ۴ به عنوان یکی از این حفاری‌ها، کانی‌سازی مس را در اعماق نشان نداده است. انطباق نتایج روش ضرایب فرکانسی با واقعیت‌های کانی‌سازی در عمق اهمیت این روش را نشان می‌دهد به ویژه اینکه شواهد سطحی و آتراسیونی منطقه و از طرفی روش زونالیته احتمال وجود کانی‌سازی عمیق مس و طلا در این منطقه را نشان می‌دهند. و به همین جهت حفاری‌های زیادی نیز در این بخش صورت گرفته است. در شکل ۱۲، فلوجارت مربوط به مقایسه روش‌های استفاده شده جهت شناسایی وضعیت کانی‌سازی عمیق در منطقه شامل روش ضرایب فرکانسی، زونالیته، آتراسیون و نتایج حفاری‌های عمیق ترسیم شده است. نتایج حفاری‌ها به خوبی با نتایج روش ضرایب فرکانسی تطابق دارد. نتایج روش FCM نشان می‌دهد احتمالاً در منطقه با یک زون فرسایش یافته مواجه هستیم و احتمال وجود کانی‌سازی در عمق بسیار پایین است. با استفاده از روش ضرایب فرکانسی عناصر که بر روی داده‌های ژئوشیمیایی سطحی صورت می‌گیرد به خوبی و بدون نیاز به انجام حفاری‌های عمیق و داده‌های اکتشافی



شکل ۱۱: وضعیت کانی‌سازی و توزیع عیار طلا در گمانه BH04

عمقی می‌توان در خصوص وجود کانی‌سازی عمیق یا وجود زون فرسایش یافته اظهار نظر نمود. این روش می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای هزینه‌ها و ریسک عملیات معدنی را کاهش دهد. روش زونالیته و مدل آلتراسیونی موجود در سطح زمین احتمال بالایی برای وجود کانی‌سازی عمیق در این منطقه پیش‌بینی می‌کنند. شاخص‌های به دست آمده نشان می‌دهد که با یک کانسار پنهان رو برو هستیم. بر اساس شاخص زونالیته، وضعیت آلتراسیونی و مقادیر عیار عناصر مس و طلا در سطح و سایر ویژگی‌های اکتشافی، تعداد ۵ حفاری عمیق در این بخش انجام گرفته است. هیچ یک از این حفاری‌ها به کانی‌سازی قابل توجهی در عمق برخورد نکرده‌اند. وضعیت توزیع عیاری حفاری BH2 در شکل ۱۱ ترسیم شده است. این حفاری در مرکز منطقه و با عمق ۳۸۴ متر انجام گرفته است. مطالعات انجام شده در این منطقه نشان داد برخی شاخص‌های زونالیته به خوبی نمی‌تواند برای همه مناطق به طور یکسان مورد استفاده قرار گیرد. روش زونالیته در مناطقی که توالی منطقه‌بندی ژئوشیمی عناصر از حالت منظم خارج شده به ویژه در مناطقی که چند فاز کانی‌سازی به وجود آمده است نمی‌تواند به خوبی وضعیت سطح فرسایش را پیش‌بینی کند. تنوع توده‌های نفوذی رخنمون یافته در این منطقه و از طرفی ارتباط ضعیف بین عناصر طلا و مس می‌تواند بیانگر فازهای چندگانه فعالیت ماگمایی و کانی‌سازی در منطقه باشد.



شکل ۱۲: فلوجارت مربوط به روش‌های استفاده شده برای شناسایی وضعیت کانی‌سازی عمیق در منطقه مورد مطالعه (نتایج روش FCM با نتایج حفاری‌های عمیق مطابقت دارد)

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای ارزیابی وضعیت کانی‌سازی عمیق در قسمت جنوبی منطقه کانی‌سازی مس و طلائی تنورچه، روش جدید ضرایب فرکانسی عناصر مورد استفاده قرار گرفته و آنومالی‌های فرکانسی حاصل از این روش مورد تحلیل قرار گرفته‌اند و نتایج این روش با نتایج روش زونالیت‌ه ژئوشیمیایی مورد مقایسه قرار گرفته است. در روش زونالیت‌ه، چهار شاخص معروف زونالیت‌ه شامل  $(Ag.Pb.Zn/Co.Mo.Ni)$  برای تیپ طلائی رگه‌ای و شاخص‌های  $(Pb.Zn/Cu.Mo)$  و  $(Pb.Zn/Cu.Ag)$  و  $(Pb.Zn.Bi/Cu.Mo.Ag)$  برای تیپ مس پرفیری مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس نتایج زونالیت‌ه منطقه مورد نظر دارای شاخص‌های زونالیت‌ه بالایی برای تیپ مس پورفیری و طلائی رگه‌ای است و بر اساس این روش احتمال وجود ذخایر پنهان در این قسمت وجود دارد. شدت بالای آلتراسیون‌های آرژیلیت، سرسیت و پروپلتیک نیز این گمان را تقویت می‌کند. روش ضرایب فرکانسی عناصر، آنومالی فرکانسی قابل توجهی را نشان نمی‌دهد از اینرو احتمال وجود کانی‌سازی عمیق در منطقه بر اساس این روش بسیار پایین است. تعداد ۵ گمانه عمیق در این بخش از منطقه حفاری شده که فاقد هر گونه کانی‌سازی قابل توجهی در عمق است. نتایج روش فرکانسی عناصر بر خلاف روش زونالیت‌ه هماهنگی قابل توجهی با نتایج حفاری‌ها دارد. در نمودار ضرایب فرکانسی عناصر، عنصر طلا در باندهای فرکانس پایین، آنومالی فرکانسی ضعیفی نشان می‌دهد در حالی که عنصر مس فاقد هر گونه آنومالی در این باندهای فرکانسی است. این مطلب در نتایج حفاری‌ها به خوبی دیده می‌شود و در نتایج حفاری‌ها، وضعیت کانی‌سازی طلا در عمق به مقدار ضعیف دیده می‌شود در حالی که کانی‌سازی مس بسیار ضعیف‌تر از طلا است.

## مراجع

- [1] Carranza, E.J.M., Sadeghi, M. (2012). Primary geochemical characteristics of mineral deposits - Implications for exploration, *Ore Geology Reviews* 45.1-4
- [2] Kekelia, S.A., Kekelia, M.A., Kuloshvili, S.I., Sadradze, N.G., Gagnidze, N.E., Yaroshevich, V.Z., Asatiani, G.G., Doebrich, J.L., Goldfarb, R.J., Marsh, E.E. (2008). Gold deposits and occurrences of the Greater Caucasus, Georgia Republic: their genesis and prospecting criteria. *Ore Geol. Rev.* 34, 369-386.
- [3] Grigorian, S.V. (1985). Secondary Lithochemical Halos in Prospecting for Hidden Mineralization. Nedra Publishing House, Moscow.
- [4] Grigorian, S.V. (1992). Mining Geochemistry. Nedra Publishing House, Moscow.
- [5] Beus, A.A., Grigorian, S.V. (1977). Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits. Applied Publishing Ltd., Wilmette, Illinois. 287 p.
- [6] Distler, V.M., Yudovskaya, M.A., Mitrofanov, G.L., Prokof'ev, V.Y., Lishnevskii, E.N. (2004). Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geol. Rev.* 24, 7-44.
- [7] Gundobin, G.M. (1984). Peculiarities in the zoning of primary halos. *J. Geochem. Explor.* 21, 193-200.
- [8] Ziaili, M., Carranza, E.J.M., Ziaei, M. (2011). Application of geochemical zonality coefficients in mineral prospectivity mapping. *Comput. Geosci.* 37, 1935-1945.
- [9] Shahi, H. (2017). Prediction of dispersed mineralization zone in depth using frequency domain of surface geochemical data. *Journal of Mining and Environment*, 8(3), pp.433-446.
- [10] Cao, L., Cheng, Q. (2012). Quantification of anisotropic scale invariance of geochemical anomalies associated with Sn-Cu mineralization in Gejiu, Yunan Province, China, *Geochemical Exploration* 122, 47-54.
- [11] Cheng, Q., Zhao, P. (2011). Singularity theories and methods for characterizing mineralization processes and mapping geo-anomalies for mineral deposit prediction. *Geoscience Frontiers*, 2(1), 67-79.
- [12] Cheng, Q., Xu, Y., Grunsky, E. (2000). Integrated Spatial and Spectrum Method for Geochemical Anomaly Separation, *Natural Resources Research*, Vol. 9, No.1.
- [13] Cheng, Q. (1999). Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration* 65, 175-194.
- [14] Hassani, H., Daya, A., Alinia, F. (2009). Application of a fractal method relating power spectrum and area for separation of geochemical anomalies from background. *Aust J Basic Appl Sci*, 3(4), 3307-3320

- [27] Ziiai, M. (1996). Lithochemical Exploration Methods for Porphyry Copper Deposit in Sungun, NW Iran. Unpublished M.Sc. Thesis, Moscow State University (MSU), Moscow, 98 pp. (in Russian).
- [28] Ziiai, M., Pouyan, A.A., Ziaei, M. (2009). Neuro-fuzzy modelling in mining geochemistry: Identifications of geochemical anomalies, *Journal of Geochemical Exploration* 100, 25-26.
- [29] Davis, J.C., (2002), *Statistics and Data Analysis in Geology*, 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., New York, 550pp.
- [30] Hassanpour, S., & Afzal, P. (2013). Application of concentration–number (C–N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(3), 957-970.
- [31] Cheng, Q., Agterberg, F. P., Ballantyne, S. B. (1994). The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2), 109-130.
- [32] Dobrin, M.B. and Savit, C.H. (1998). *Geophysical prospecting*: McGraw-Hill Book Co., New York, 867 P.
- [33] Bhattacharyya, B.K. (1966). Continuous spectrum of the total-magnetic-field anomaly due to a rectangular prismatic body. *Geophysics*. 31 (1): 97121.
- [34] Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. (2002). *Digital image processing*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ. 793 P.
- [15] Zuo, R., Wang, J. (2015). Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review. *Journal of Geochemical Exploration*.
- [16] Zuo, R., Carranza, E.J.M., Cheng, Q. (2012). Fractal/multifractal modelling of geochemical exploration data. *Journal of Geochemical Exploration* 122, 1-3.
- [17] Zuo, R., Xia, Q., Zhang, D. (2013). A comparison study of the C-A and S-A models with singularity analysis to identify geochemical anomalies in covered areas. *Applied Geochemistry* 33, 165-172.
- [18] Wang, J., Zuo, R. (2015). A MATLAB-based program for processing geochemical data using fractal/multifractal modeling. *Earth Science Informatics*, 1-11.
- [19] Zuo, R. (2011). Decomposing of mixed pattern of arsenic using fractal model in Gangdese belt, Tibet, China. *Applied Geochemistry* 26, S271-S273.
- [20] Wang, H., Zuo, R. (2015). A comparative study of trend surface analysis and spectrum–area multifractal model to identify geochemical anomalies. *Journal of Geochemical Exploration*, 155, 84-90.
- [21] Zuo, R. (2011). Identifying geochemical anomalies associated with Cu and Pb–Zn skarn mineralization using principal component analysis and spectrum–area fractal the Gangdese Belt, Tibet (China). *J. Geochemical Exploration*. 111, 13-22.
- [22] Shahi, H., Ghavami, R., Kamkar Rouhani, A., Asadi-Haroni, H. (2014). Identification of mineralization features and deep geochemical anomalies using a new FT-PCA approach, *Journal of Geopersia*, 4 (2), 101-110.
- [23] Shahi, H., Ghavami Riabi, R., Kamkar Rouhani, A. and Asadi Haroni, H. (2015). Prediction of mineral deposit model and identification of mineralization trend in depth using frequency domain of surface geochemical data in Dalli Cu-Au porphyry deposit. *Journal of Mining and Environment*, 6(2), pp.225-236.
- [24] Shahi, H., Ghavami, R., & Rouhani, A. K. (2016). Detection of deep and blind mineral deposits using new proposed frequency coefficients method in frequency domain of geochemical data. *Journal of Geochemical Exploration*.
- [25] Zarmehr Company. (2004). exploration report of Tnurcheh Au –Cu mineralization area, in Persian.
- [26] Ziiai, M., Carranza, E. J. M., & Ziaei, M. (2011). Application of geochemical zonality coefficients in mineral prospectivity mapping. *Computers & geosciences*, 37(12), 1935-1945.

---

<sup>1</sup> Frequency coefficients method (FCM)