

استفاده از روش فرکتالی طیف توان در تهیه نقشه‌های آنومالی ژئوشیمیایی کانسار طلا- آنتیموان ساری‌گونای کردستان

حمید گرانیان^۱، سید حسن طباطبایی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

(دریافت ۱۳۹۸/۰۲/۳۰، پذیرش ۱۳۹۸/۰۶/۱۶)

چکیده

تفکیک الگوهای ژئوشیمیایی که به صورت غنی‌شدگی - تهی‌شدگی عناصر، خود را نشان می‌دهند، یکی از مسایل مهم در تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی محسوب می‌شود. استفاده از روش فرکتالی طیف توان به دلیل انتقال داده‌ها از حوزه مکان به فرکانس، امکان تفکیک چنین داده‌هایی را میسر می‌سازد. با پیاده‌سازی الگوریتم طیف توان - مساحت بر روی نتایج آنالیز طلا و آنتیموان نمونه‌های ژئوشیمیایی محیط خاکی در منطقه اکتشافی ساری‌گونای، برای هر عنصر سه نقشه‌های نویز، آنومالی و زمینه تهیه شده است. داده‌های نقشه‌های نویز معادل ۵ تا ۶ درصد دامنه تغییرات داده‌های اولیه را شامل شده است و نشان‌دهنده خطاهای نمونه‌برداری و آنالیز و تغییرات سریع ناشی از توزیع عناصر در سنگ‌های مختلف است. نقشه‌های آنومالی که دامنه تغییرات آن مشابه دامنه تغییرات داده‌های اولیه است، نشان‌دهنده مکان‌های با عبارهای بالا و موقعیت دقیق آنومالی ژئوشیمیایی سطحی است. در حالی که نقشه‌های زمینه که حدود ۱۲ تا ۱۸ درصد دامنه تغییرات داده‌های اولیه را شامل می‌شوند، نشان‌دهنده روند کلی تغییرات عیار در منطقه مطالعاتی و موقعیت تقریبی آنومالی ژئوشیمیایی است. از نقشه آنومالی که مرکز کانی‌زایی را نشان می‌دهد برای طراحی حفاری‌های اولیه و از نقشه زمینه که محدوده کانی‌زایی را نشان می‌دهد برای طراحی شبکه حفاری در فازهای اکتشافی مقدماتی و تفصیلی می‌توان استفاده کرد. نقشه‌های آنومالی و زمینه نواحی کانسار ساری‌گونای، آق‌داغ و یک ناحیه جدید را برای اکتشاف طلا و نواحی کانسار ساری‌گونای، آق‌داغ و محدوده گسل بین دو کانسار را برای اکتشاف آنتیموان پیشنهاد کرده‌اند.

کلمات کلیدی

مدلسازی فرکتالی، طیف توان، آنومالی ژئوشیمیایی، فیلتر کردن نقشه‌های ژئوشیمیایی، کانسار طلای اپی‌ترمال ساری‌گونای.

۱- مقدمه

روش فرکتالی فقط برای تهیه نقشه آنومالی یا تعیین داده‌های خارج از ردیف است. در حالی که در این مقاله سعی شده است از روش فرکتالی طیف توان برای تفکیک داده‌های ژئوشیمیایی به سه دسته نوپز، آنومالی و زمینه و تهیه یک نقشه برای هر دسته و همچنین برتری این روش در حذف نوپز از داده‌ها استفاده شود. در ادامه ضمن بررسی و تفسیر هر کدام از این دسته داده‌ها (نقشه‌ها)، کاربرد آن‌ها در پیشنهاد بهترین محدوده‌ها برای طراحی شبکه حفاری گمانه مورد توجه قرار می‌گیرد.

محدوده مورد مطالعه به وسعت 5200×4200 متر از دو کانسار طلا- آنتیموان اپی‌ترمال ساری‌گونای و آق‌داغ تشکیل شده است که قدمت بهره‌برداری شدادی از این محدوده برای آنتیموان به دهه ۱۹۲۰ بر می‌گردد ولی اکتشاف سیستماتیک در این محدوده برای طلا بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۴ توسط کارشناسان شرکت ریوتینتو انجام شده است [۲۸]. مطالعات انجام گرفته شامل مطالعات ژئوشیمیایی سطحی در کل محدوده و شبکه حفاری گمانه‌ای بر روی کانسار ساری‌گونای است. در این مقاله از اطلاعات ژئوشیمیایی سطحی و روش فرکتالی طیف- توان مساحت استفاده شده است، تا ضمن شناسایی آنومالی‌های ژئوشیمیایی سطحی محل‌های پیشنهادی برای طراحی شبکه حفاری گمانه در کل محدوده و برای فازهای مختلف اکتشافی پیشنهاد شود.

۲- روش فرکتالی طیف توان- مساحت

با توجه به ماهیت ریاضیات فرکتالی، امکان کاربرد این شاخه از علوم هم در هندسه اکتشافی و هم در پردازش عددی داده‌های اکتشافی میسر است [۲۹]. در هندسه اکتشافی باید از ویژگی‌های هندسه فرکتال استفاده کرد. فرکتال از دید هندسی به شیئی گفته می‌شود که دارای سه ویژگی دارا بودن خاصیت خود متشابهی (همسانگردی) یا خودالحاقی (ناهمسانگردی)، پیچیده بودن در مقیاس خرد و دارا بودن بعد غیر صحیح باشد [۳۱،۳۰]. اگر توزیع داده‌های اکتشافی از یک تابع توانی تبعیت کند، امکان مدلسازی داده‌ها با روابط فرکتالی نیز میسر خواهد شد. ویژگی مهم توابع توانی تغییرناپذیری نسبت به مقیاس است [۱۵،۱۴]. قانون توانی فرکتالی به شکل رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$M(\delta) \propto \delta^{D_T-D} \quad (1)$$

که در آن:

$M(\delta)$: تابعی از مقیاس اندازه‌گیری پارامتر δ (نیز پارامتر

توالی رویدادهای مختلف زمین‌شناسی در پوسته زمین منجر به ایجاد چندین رویداد غنی‌شدگی-تهی‌شدگی عنصری می‌شود که نتیجه این فرآیندها، الگوهای پراکندگی ژئوشیمیایی عناصر مختلف است. شناسایی و تفکیک این الگوها یکی از نکات کلیدی در پردازش داده‌های ژئوشیمیایی محسوب می‌شود. در صورتی که این الگوها ساختارهای ساده‌ای داشته باشند، از روش‌های تعیین آستانه بر اساس توزیع فراوانی داده‌ها می‌توان آن‌ها را شناسایی و تفکیک کرد. روش‌هایی همچون میانگین \pm دو برابر انحراف معیار [۱] یا میان \pm دو برابر انحراف مطلق از میان [۲]، نمودار جعبه‌ای [۳]، نمودار احتمال [۴] و سایر روش‌های آنالیز تک متغیره و چند متغیره [۵،۶] جزو این گروه محسوب می‌شوند.

از آنجا که معمولاً در پوسته قاره‌ای چندین رویداد زمین‌شناسی در طول تشکیل یک کانسار اتفاق می‌افتد، بنابراین الگوهای ژئوشیمیایی عناصر ساختارهای پیچیده و خوشه‌ای مانند دارند [۷،۸]. برای تعیین آستانه ژئوشیمیایی به منظور شناسایی و تفکیک این الگوها، نه تنها توزیع فراوانی عناصر بلکه همبستگی فضایی بین آن‌ها نیز باید مورد توجه قرار گیرد [۹،۱۰]. بنابراین برای نیل به این هدف باید از روش‌های پیچیده‌تری مانند میانگین متحرک [۱۱]، شبکه عصبی [۱۲] و روش‌های فرکتالی [۱۳-۱۷] استفاده کرد. کاربرد روش‌های فرکتالی در اکتشافات ژئوشیمیایی اولین بار توسط بولویکن و همکارانش در سال ۱۹۹۲ مطرح شد [۱۸]. ولی مدل فرکتالی عیار- مساحت آقای چنگ و همکارانش اولین مدل فرکتالی پیشنهادی برای تفکیک الگوهای ژئوشیمیایی است [۱۴]. در طول دو دهه گذشته مدل‌های فرکتالی متعددی برای تعیین آستانه آنومالی‌های ژئوشیمیایی مطرح شده است که مدل فرکتالی طیف توان یکی از این مدل‌ها است.

مدل فرکتالی طیف توان- مساحت اولین بار توسط آقای چنگ و همکارانش در سال ۲۰۰۰ برای تفکیک آنومالی ژئوشیمیایی نمونه‌های خاکی در منطقه مودیک اندونزی پیشنهاد شد [۱۹]. پس از آن از این مدل در مطالعات ژئوشیمیایی محیط‌زیستی [۱۶]، پردازش تصاویر ماهواره‌ای [۲۰]، تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی [۲۴-۲۱]، تعیین زون‌های هیپوزن و سوپرژن کانسار مس پورفیری [۲۵]، آنالیز بافت [۲۶] و حتی مدلسازی مسایل شهری [۲۷] نیز استفاده شده است. نکته مهم و مشترک در این مطالعات استفاده از این

$$PS = \|F(u, v)\| = Re^2(u, v) + Im^2(u, v) \quad (4)$$

مدل فرکتالی طیف توان- مساحت بر اساس یک رابطه توانی بین مساحت‌های مجموعه داده‌ها شامل عددهای موج با چگالی طیف انرژی بالاتر از یک مقدار طیف توان در حوزه فرکانس به شکل رابطه ۵ است [۱۹]:

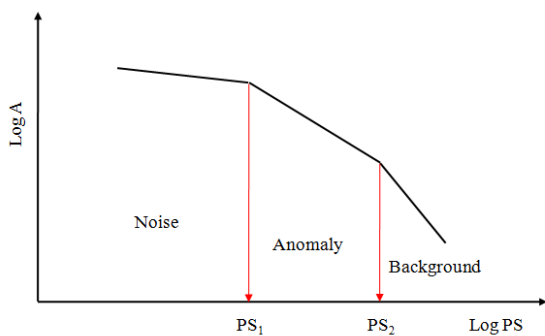
$$A(\geq PS) \propto PS^{-2/\beta} \quad (5)$$

که در آن:

A : نشان‌دهنده مساحت محاط شده با کنتور طیف توان برابر PS

β : نمای مقیاس‌بندی آنیزوتروپی است.

در صورت رسم داده‌های طیف توان برحسب مساحت در یک نمودار تمام لگاریتمی و برازش داده‌ها با خطوط مستقیم، امکان بررسی چند فرکتالی توزیع داده‌ها میسر خواهد بود. اگر تعداد خطوط مستقیم برازش داده شده به ترتیب یک، دو و بیشتر از دو باشد، داده‌ها دارای توزیع مونوفرکتال، بای فرکتال و مولتی فرکتال است. در اکثر داده‌های ژئوشیمیایی به دلیل برداشت نمونه از محیط‌های زمینی و آنومالی و داشتن خطاهای نمونه‌برداری و آنالیز، حالت مولتی فرکتالی در توزیع داده‌ها دیده می‌شود. بنابراین نمودار لگاریتمی طیف توان برحسب مساحت مانند شکل ۱ خواهد بود.



شکل ۱: نمودار طیف- توان مساحت در داده‌های مولتی فرکتالی

مطابق شکل ۱، مقادیر با طیف توان کمتر از PS_1 دارای عدد موج‌های کمتر و فرکانس بالاتر نشان‌دهنده جامعه نویز، مقادیر با طیف توان کمتر از PS_2 و بیشتر از PS_1 دارای عدد موج‌های و فرکانس متوسط نشان‌دهنده جامعه آنومالی و مقادیر طیف توان بیشتر از PS_2 دارای عدد موج‌های بالاتر

اندازه‌گیری مانند عیار، ضخامت و نظایر آن است).

D : بعد فرکتالی

D_T : بعد توپولوژی [۱۳] است.

هاله‌های ژئوشیمیایی نتیجه فرآیندهای مختلف زمین‌شناسی‌اند که باعث پراکندگی و تغییرات فضایی عناصر شیمیایی در سنگ‌ها و رسوبات می‌شوند [۳۳، ۳۲]. این تغییرات فضایی در مقیاس مختلف الگوی خوشه‌بندی شده دارد که از مدل‌های چند فرکتالی تبعیت می‌کنند [۳۴، ۱۹]. به طور کلی مقیاس تغییرات فضایی می‌تواند توسط مطالعه تغییرات در میدان فرکانس با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی مشخص شود. یک روش استاندارد برای تحلیل این سری‌ها، استفاده از تبدیل فوریه بر روی آن‌ها است. با استفاده از تبدیل فوریه می‌توان داده‌های مکانی از حوزه فضا را به حوزه فرکانس انتقال داد. به عبارتی، تغییرات عیار برای تمامی موقعیت‌های مکانی داده‌های ورودی با استفاده از این تبدیل، به جنس فرکانس (نوسانات در گستره زمان) تبدیل می‌شوند. این انتقال برای داده‌های گسسته با استفاده از تبدیل فوریه سریع به رابطه ۲ انجام می‌گیرد:

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (2)$$

که در آن:

$F(u, v)$: طیف فوریه

u و v : متغیرهای فرکانس (عدد موج)

$f(x, y)$: پارامتر اندازه‌گیری

x و y : متغیرهای مکانی است.

برای محاسبه طیف فوریه، شبکه نمونه‌برداری باید منظم باشد. بنابراین در صورت داشتن یک شبکه نمونه‌برداری نامنظم (که در اکثر پروژه‌های اکتشافی این حالت دیده می‌شود)، می‌توان به روش‌های درونیابی شبکه داده‌ها را منظم کرد [۳۵، ۱۹]. طیف فوریه به دست آمده از رابطه ۲ به صورت مختلط و به شکل رابطه ۳ است:

$$F(u, v) = Re(u, v) + jIm(u, v) \quad (3)$$

که در آن:

$Re(u, v)$: بخش‌های حقیقی

$Im(u, v)$: بخش‌های موهومی طیف فوریه است.

طیف توان (PS) نیز از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

با استفاده از عکس تبدیل فوریه سریع طیف خروجی این نقشه‌ها مجدد از حوزه فرکانس به حوزه مکان بر می‌گردد، سپس امکان تفسیر ژئوشیمیایی نقشه‌ها امکان پذیرتر خواهد بود.

۳- زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی

زون سنندج- سیرجان به صورت یک کمربند دگرگونی- ماگمایی با طول بیش از ۱۵۰۰ کیلومتر و پهنای ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر با محور شمال غربی- جنوب شرقی قرار دارد. این زون از سمت جنوب غربی به زون چین خورده- راندگی زاگرس و از سمت شمال غربی به کمربند ماگمایی ارومیه- دختر محدود می‌شود (شکل ۲- الف). شواهد زمین‌شناسی نشان می‌دهد که این زون در حاشیه اتصال دو ابر قاره اوراسیا و گندوانا قرار دارد [۳۹]. فرآیندهای ماگمایی و تکتونیک به وجود آمده از حین نزدیک شدن، برخورد و اتصال دو قاره باعث تشکیل کانی‌زایی پلی متال در این زون شده است [۴۰].

محدوده مورد مطالعه در حاشیه شرقی زون سنندج-

و فرکانس کمتر نشان‌دهنده جامعه زمینه است [۳۷، ۳۶]. از مقادیر PS_1 و PS_2 به عنوان آستانه برای طراحی فیلتر در مرحله بعد استفاده می‌شود. برای تهیه نقشه‌های نویز، آنومالی و زمینه به ترتیب از سه فیلتر پایین‌گذر (H_1)، میان‌گذر (H_2) و بالاگذر (H_3) به شکل رابطه ۶ استفاده می‌شود:

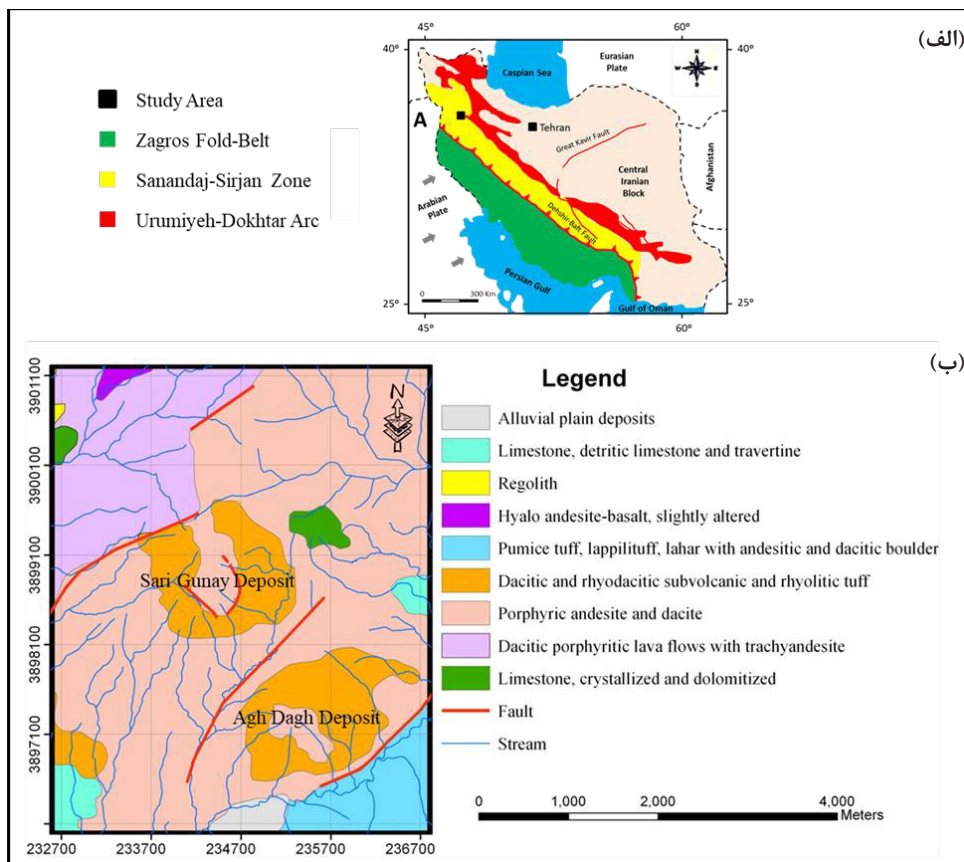
$$H_1(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{if } PS < PS_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$H_2(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{if } PS_1 \leq PS \leq PS_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$H_3(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{if } PS > PS_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

طیف خروجی نقشه‌های نویز، آنومالی و زمینه در حوزه فرکانس نیز از ضرب فیلترها در طیف فوریه و به صورت رابطه ۷ به دست می‌آید [۳۸]:

$$G_i(u, v) = H_i(u, v) \times F(u, v) \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

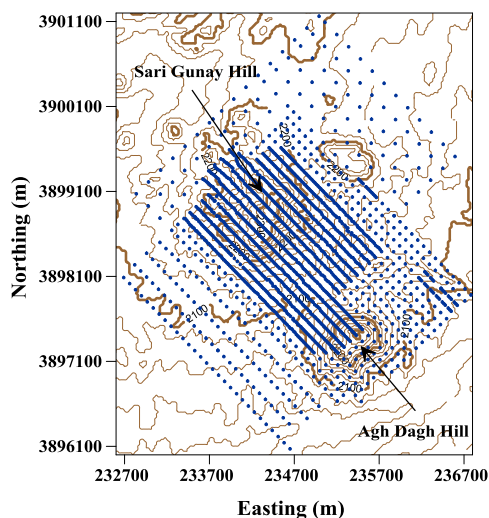


شکل ۲: الف) موقعیت زون سنندج- سیرجان و ب) نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی

فلدسپار پتاسیک است. فاز دوم کانی‌سازی در دمای پایین‌تر و همراه با آلتراسیون محدودتری رخ داده است. در این فاز سیلیسی‌فیکاسیون محلی و همچنین تبدیل سرسیت تشکیل شده در فاز اول به فنژیت و تشکیل پیریت آرسنیک‌دار به صورت پراکنده در اطراف ذرات پیریت پروفیروبلاستیکی فاز اول دیده می‌شود [۴۲، ۴۱]. کانی‌سازی طلا در هر دو فاز کانی‌سازی انجام گرفته است. در فاز اول به صورت انکلوزیون در کانی پیریت و در فاز دوم به صورت محلول جامد در ترکیب پیریت آرسنیک‌دار یافت می‌شود. آلتراسیون‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک مهمترین آلتراسیون‌های سطحی و آلتراسیون‌های پتاسیک، ایلیت و آلونیت نیز مهمترین آلتراسیون‌های زیر سطحی در منطقه‌اند [۴۳].

۴- داده‌های ژئوشیمیایی

در محدوده مطالعاتی ۱۸۶۸ نمونه ژئوشیمیایی از محیط خاکی از نیمرخ‌هایی به فاصله‌های ۱۰۰ متری و با فاصله نمونه‌برداری ۲۵ تا ۱۰۰ متری برداشت شده است (شکل ۳). این نمونه‌ها برای ۴۶ عنصر به روش ICP-MS و عنصر طلا به روش Fire Assay آنالیز شده‌اند (نمونه‌برداری‌ها و آنالیزها به وسیله شرکت زرکوه انجام شده است). در این مقاله فقط از نتایج آنالیز عنصر طلا و آنتیموان نمونه‌ها استفاده شده است. در جدول ۱ پارامترهای آماری و حد حساسیت این عناصر نشان داده شده است. مطابق داده‌های این جدول، مقدار



شکل ۳: نقشه پراکندگی نمونه‌های ژئوشیمیایی محیط خاکی (دایره‌های آبی) بر روی نقشه توپوگرافی منطقه مطالعاتی

سیرجان و نزدیک کمان ماگمایی ارومیه- دختر قرار دارد (شکل ۲- الف). کانی‌سازی طلا- آنتیموان در این ناحیه در دو کانسار سولفیداسیون پایین ساری‌گونای در بخش شمال غربی و آق‌داغ در بخش جنوب شرقی (شکل ۲- ب) تشکیل شده است. کانی‌زایی در این دو کانسار مرتبط با توده نفوذی ساب‌ولکانیکی بوده است که در کمپلکس ولکانیکی ساب‌آلکانل پتاسیم بالا متعلق به میوسن میانی و در اثر فرورانش پوسته اقیانوسی و در شرایط محیط حاشیه‌های همگرای قاره‌ای تشکیل شده‌اند [۲۸].

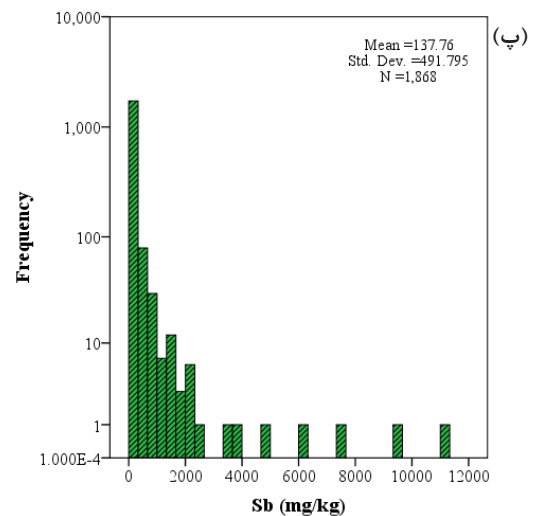
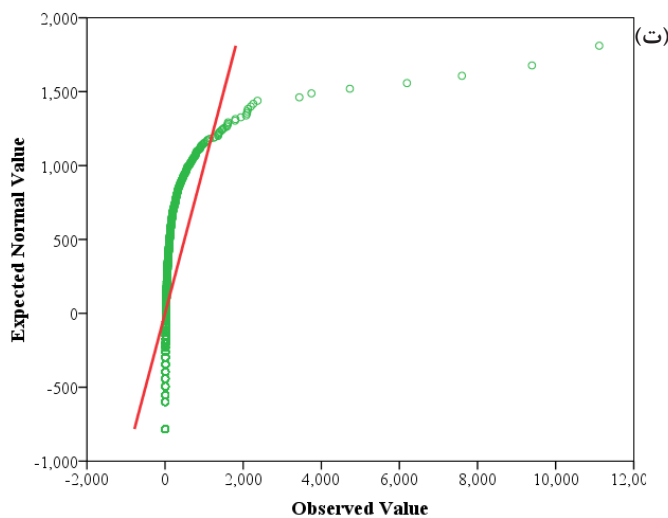
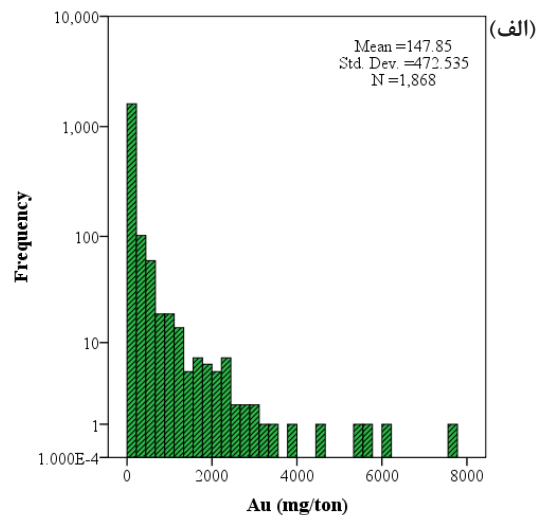
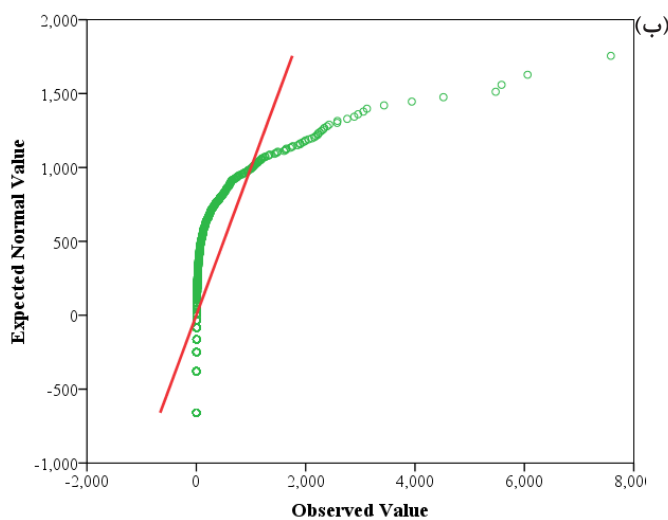
سنگ‌های آهکی دولومیتی شده با سن ژوراسیک سنگ بستر منطقه را تشکیل می‌دهد (شکل ۲- ب). این سنگ‌ها به وسیله ولکانیک‌های آندزیتی و پیروکلاستیک‌های الیگومیوسن تا پلیستوسن پوشانده شده‌اند. سنگ‌های داسیت پورفیری که در بخش شمال غربی منطقه مشاهده می‌شود، قدیمی‌ترین واحد ولکانیکی منطقه مطالعاتی است. سنگ‌های آندزیت- داسیت پورفیری به دلیل داشتن مقداری کانی بیوتیت و هورنبلند با واحد داسیت پورفیری تفاوت دارد. این واحد سنگی بیشترین گسترش را در محدوده اطراف دو کانسار در منطقه دارد (شکل ۲- ب). دو توده حلقه‌ای شکل شامل ساب‌ولکانیک‌های داسیت و ریوداسیتی و توف‌های ریولیتی در دو ناحیه، یکی واحدهای خرد شده حلقه‌ای شکل در دامنه‌های ساری‌گونای و دیگری در دامنه‌های آق‌داغ، سنگ‌های آندزیت- داسیت پورفیری منطقه را قطع کرده‌اند. کانی‌سازی طلا بیشتر در این واحد سنگی مشاهده می‌شود. قسمت‌هایی از منطقه مطالعاتی در بخش‌های شمال غربی و جنوب شرقی را توف‌های پومیسسی، لاپلی توف، آندزیت- بازالت هیلا و رگولیت‌ها تشکیل می‌دهند که این واحدهای پوششی در نتیجه فوران‌های سیستم ولکانیکی تشکیل شده‌اند. رخنمون‌هایی از آهک، کنگلومرا و آبرفت‌ها با سن پلیوسن پسین تا کواترنری نیز در بخش‌های از منطقه وجود دارد [۴۱، ۲۸].

محدوده مورد مطالعه را مجموعه‌ای از رگه‌های پراکنده به شکل عدسی‌های کوچکی از مواد معدنی مختلف تشکیل داده است. از مهم‌ترین کانی‌های موجود در منطقه می‌توان کانی‌هایی همچون پیریت، استیبینیت، اریمننت، گالن، رالگار و کانی‌های قهوه‌ای آهن (گوتیت و لیمونیت) نام برد. کانی‌سازی در این محدوده شامل دو فاز سیستم هیدروترمالی است. فاز اول کانی‌سازی شامل یک سیستم پورفیری مزوترمال بزرگ همراه با آلتراسیون پتاسیک، سرسیت و کوارتز- تورمالین-

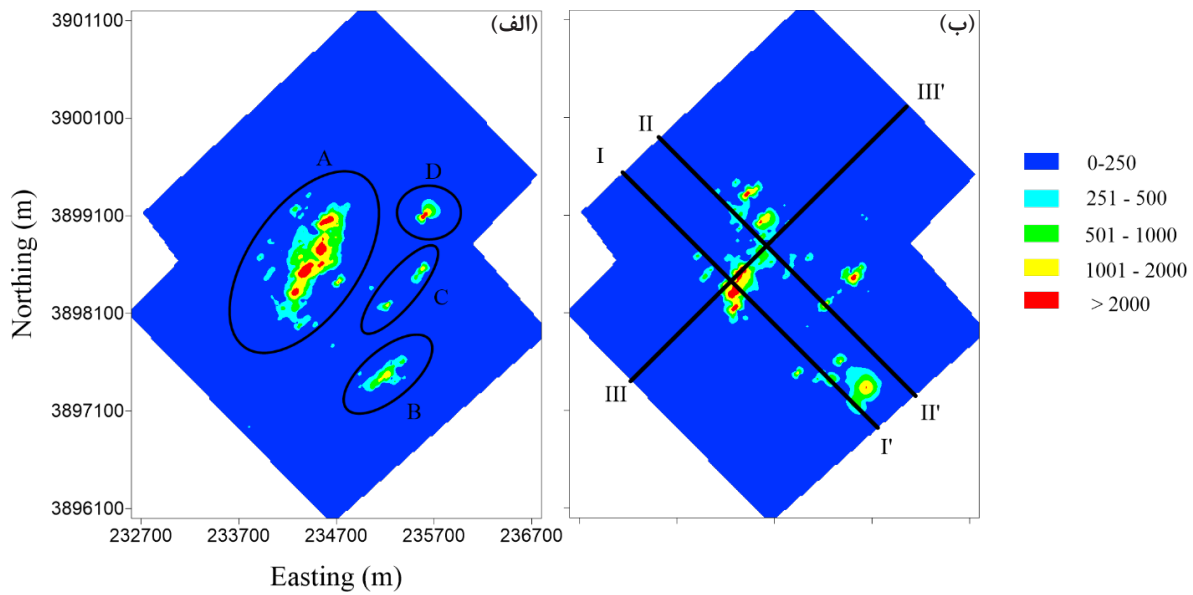
انحراف معیار دو عنصر از مقدار میانگین آن‌ها بیشتر است که این موضوع دلالت بر وجود مقادیر آنومالی ژئوشیمیایی در داده‌ها است. مقادیر بالای چولگی مثبت و کشیدگی نیز برای هر دو عنصر نشان‌دهنده نامتقارن بودن توزیع داده‌ها و عدم تبعیت توزیع آن‌ها از توزیع نرمال برای هر دو عنصر است. بررسی نوع توزیع داده‌ها فراوانی نما و نمودار چندک-چندک آن‌ها نیز در شکل ۴ ترسیم شده است. نمودارهای شکل ۴ نشان‌دهنده چند جامعه‌ای بودن توزیع داده‌ها برای عناصر طلا و آنتیموان است. تعداد جوامع برای هر دو عنصر حداقل ۳ عدد است. برای تفکیک جوامع آماری و تعیین محدوده آنومالی‌های ژئوشیمیایی، در این مقاله از روش فرکتالی طیف توان-مساحت استفاده شده است.

جدول ۱: پارامترهای آمار توصیفی عناصر طلا و آنتیموان حاصل از نتایج آنالیز نمونه‌های ژئوشیمیایی

Parameters	Au (mg/ton)	Sb (mg/kg)
Mean	۱۴۷٫۸	۱۳۷٫۸
Median	۱۴	۳۸
Mode	۲	۲٫۵
MAD	۱۲	۲۸
Std. Deviation	۴۷۲٫۵	۴۹۱٫۸
Skewness	۷٫۴	۱۳٫۸
Kurtosis	۷۶٫۸	۲۴۷٫۲
Minimum	۱٫۱	۲٫۵
Maximum	۷۵۸۰٫۰	۱۱۱۱۵٫۰
Detection Limit	۲٫۲	۵



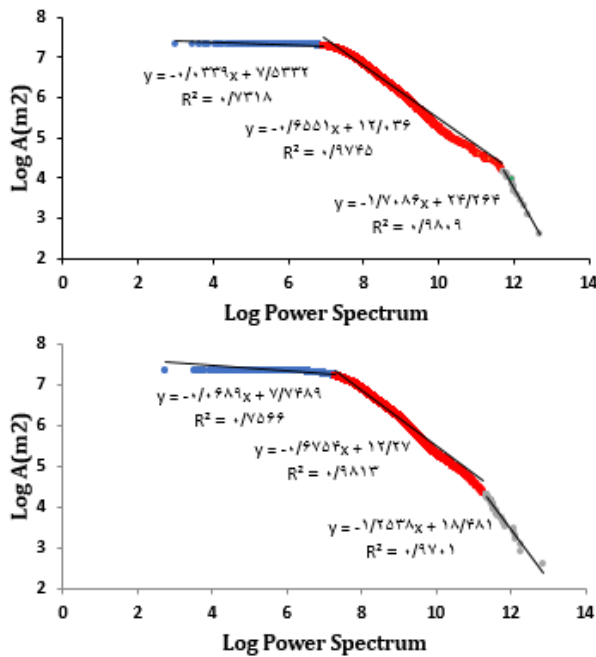
شکل ۴: هیستوگرام (الف) فراوانی طلا، (ب) آنتیموان، (پ) نمودار چندک-چندک طلا و (ت) آنتیموان نمونه‌های ژئوشیمیایی



شکل ۵: نقشه کنتوری پراکندگی الف) عناصر طلا و ب) آنتیموان در منطقه مطالعاتی (واحدها برابر اعداد جدول ۱ است).

۵- تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی

در شکل ۵ نقشه کنتوری پراکندگی عناصر طلا و آنتیموان در منطقه مطالعاتی نشان داده شده است. بیشترین مقدار و وسعت پراکندگی برای هر دو عنصر بر روی محدوده کانی‌زایی کانسار ساری‌گونای قرار دارد (محدوده A در شکل ۵). محدوده این پراکندگی برای عنصر طلا از آنتیموان بزرگتر است. محدوده B در شکل ۵ نشان‌دهنده تمرکز طلا در یال شمال غربی تپه آق‌داغ و آنتیموان در یال جنوب شرقی این تپه در نمونه‌های ژئوشیمیایی محیط خاکی است. وسعت و میزان تمرکز طلا و آنتیموان در نمونه‌های محیط خاکی بر روی محدوده کانی‌زایی کانسار آق‌داغ از کانسار ساری‌گونای کوچکتر است. این مطلب می‌تواند نشان‌دهنده کوچک بودن کانی‌زایی در کانسار آق‌داغ نسبت به کانسار ساری‌گونای باشد. دو محدوده دیگر از تمرکز این عناصر در نمونه‌های سطحی در شکل ۵ قابل مشاهده است که محدوده C ناشی از کانی‌زایی در راستای گسل بین دو کانسار (شکل ۲-ب) و محدوده D یک ناحیه جدید است که در این مقاله معرفی شده است. میزان کانی‌زایی طلا در محدوده D از میزان کانی‌زایی آنتیموان بیشتر است (شکل ۵). با به کار بردن الگوریتم طیف توان- مساحت بر روی نمونه‌های ژئوشیمیایی محدوده مطالعاتی، نمودار این مدل مولتی‌فرکتالی برای عناصر طلا و آنتیموان به دست آمده است که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. به دلیل یکسان



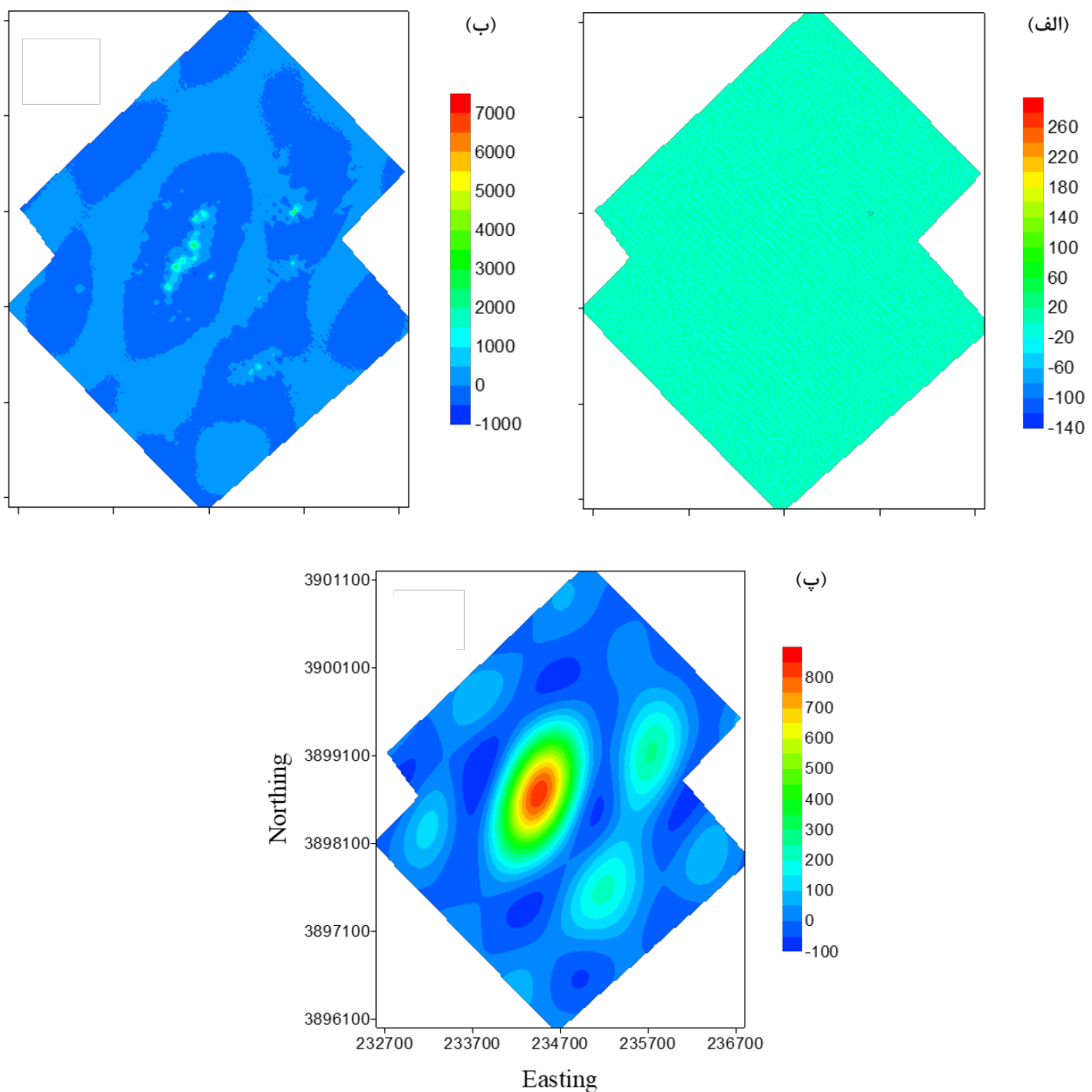
شکل ۶: نمودار طیف توان- مساحت برای عنصر طلا (شکل بالایی) و آنتیموان (شکل پایینی) (نقاط آبی جامعه نويز، نقاط قرمز جامعه آنومالی و نقاط خاکستری جامعه زمينه است).

بودن تقریبی، میزان پراکندگی این دو عنصر در محدوده مطالعاتی، نمودارهای مولتی‌فرکتالی طیف توان- مساحت آن‌ها نیز تقریباً مشابه است. آستانه‌های برای عنصر طلا در لگاریتم

است. بخشی از این تغییرات تصادفی را می‌توان به خطاهای نمونه‌برداری و آنالیز نسبت داد. همچنین بخشی دیگر از این تغییرات را می‌توان ناشی از فعالیت‌های زمین‌زاد در پراکنده کردن عناصر در سنگ‌های مختلف دانست. مقدار این تغییرات در نقشه‌های نویز با توجه به اعداد مقیاس بار آنها نسبت به نقشه‌های آنومالی برای عنصر طلا حدود ۵ درصد و برای عنصر آنتیموان نیز حدود ۶ درصد است. این مقادیر کم خود دلالت بر نویز بودن و تصادفی بودن آنها است.

طیف توان ۷،۲۴ و ۱۱،۶۱ و برای آنتیموان در لگاریتم طیف توان ۷،۴۵ و ۱۰،۷۳ به دست آمده است. از این آستانه‌ها برای طراحی فیلتر و سپس تهیه نقشه‌های نویز، آنومالی و زمینه استفاده شده است. در شکل‌های ۷ و ۸ این نقشه‌ها برای عناصر به ترتیب طلا و آنتیموان نشان داده شده است.

نقشه‌های نویز به دست آمده در شکل‌های ۷-الف و ۸-الف نشان‌دهنده پراکندگی تصادفی عناصر طلا و آنتیموان است. بنابراین نقشه کنترولی آنها فاقد کنترول‌های منظم

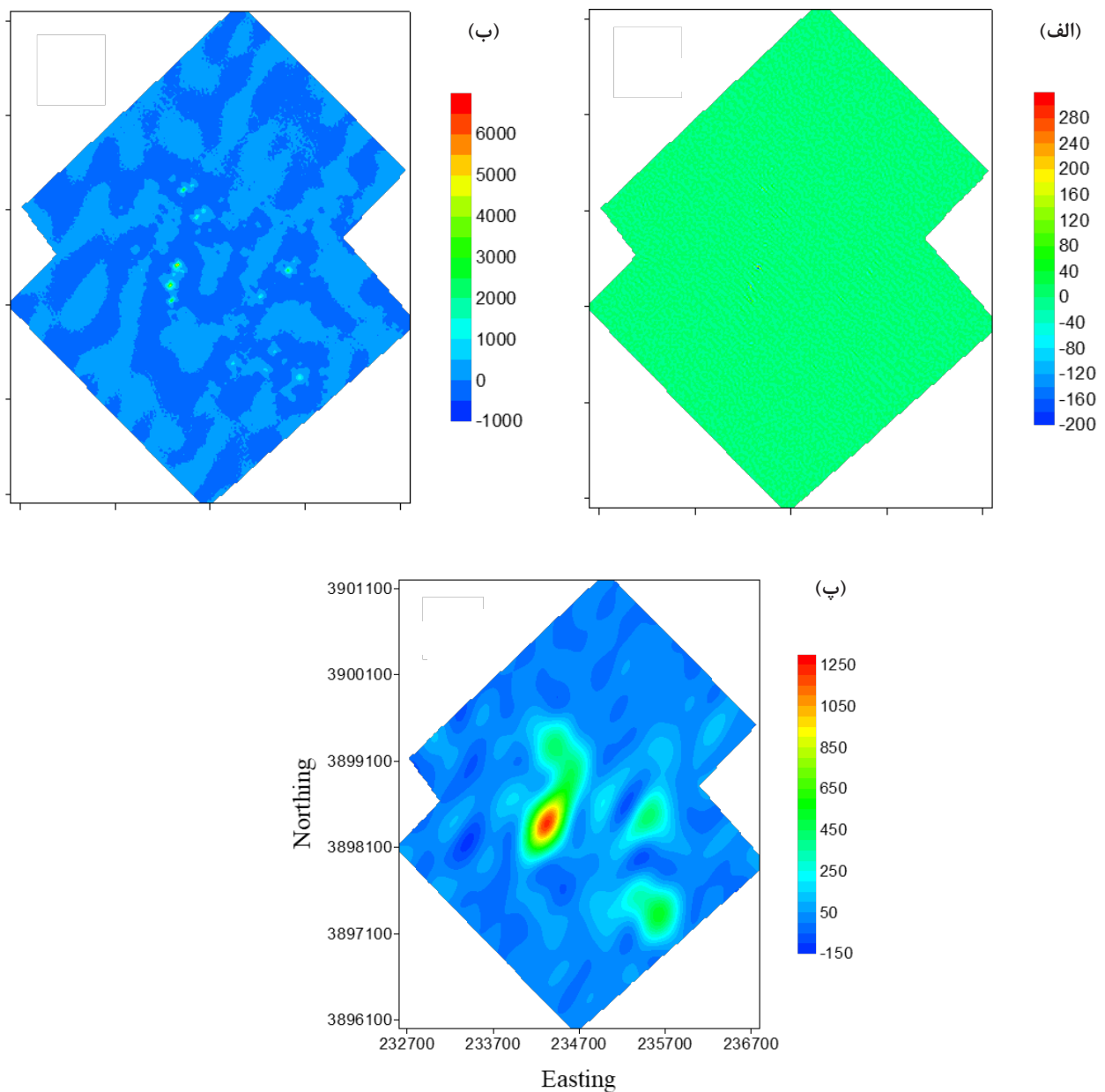


شکل ۷: نقشه پراکندگی (الف) نویز، (ب) آنومالی و (پ) زمینه طلا به دست آمده به روش طیف توان - مساحت

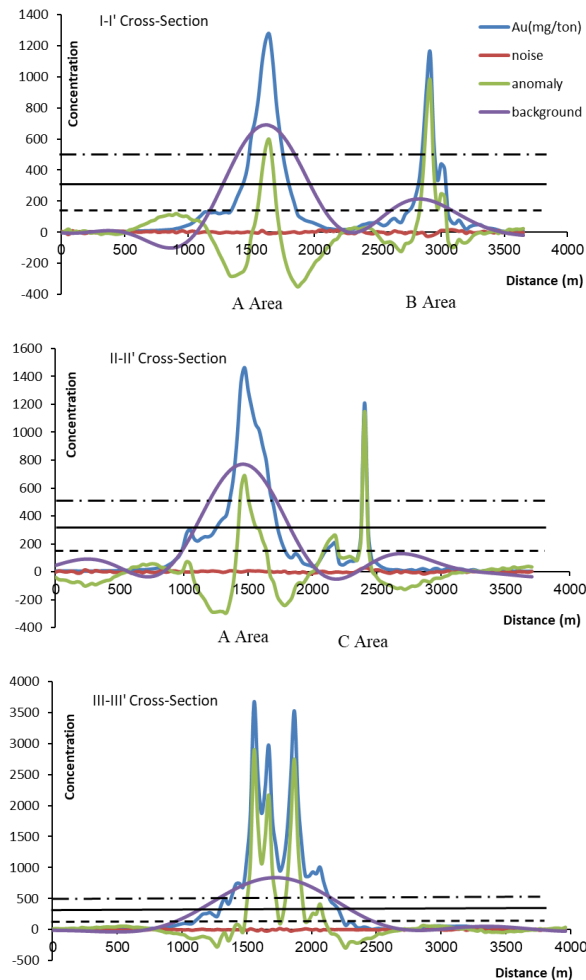
این دامنه به علت درونیایی اولیه برای انتقال داده‌ها از حوزه مکان به حوزه فرکانس است. بنابراین نقشه‌های آنومالی به دست آمده به روش فرکتالی طیف توان - مساحت نشان‌دهنده موقعیت دقیق نواحی آنومالی‌های ژئوشیمیایی سطحی در منطقه مطالعاتی خواهند بود.

نقشه‌های زمینه برای عناصر طلا و آنتیموان نشان داده شده در شکل‌های ۷-ب و ۸-پ نیز نشان‌دهنده روند کلی تغییرات عیار در منطقه مطالعاتی است. در این نقشه‌ها علاوه

شکل‌های ۷-ب و ۸-ب نقشه‌های آنومالی‌اند. در این نقشه‌ها نواحی کانی‌زایی A، B و C نشان داده شده در شکل ۵ قابل مشاهده است ولی وسعت این نواحی کانی‌زایی در شکل‌های ۷-ب و ۸-ب به ترتیب از شکل‌های ۵-الف و ۵-ب کوچکتر است زیرا نقشه‌های آنومالی نشان‌دهنده موقعیت محل‌های با عیارهای بالا (بالتر از یک آستانه) است. دامنه تغییرات عیار طلا و آنتیموان در نقشه‌های آنومالی حدوداً برابر دامنه تغییرات عیار در جدول ۱ است. کم شدن ناچیز



شکل ۸: نقشه پراکندگی الف) نوبز، ب) آنومالی و پ) زمینه آنتیموان به دست آمده به روش طیف توان - مساحت



شکل ۹: مقاطع تغییرات عیار طلا در نقشه‌های پراکندگی نوپز، آنومالی و زمینه در سه راستای مختلف (خط چین معادل آستانه ۱۵۰، خط ممتد معادل آستانه ۳۲۰ و خط نقطه معادل آستانه ۵۱۰)

منحنی‌های نوپز در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان‌دهنده مقادیری با فرکانس بالا است. مقدار این نوپز (منحنی‌های قرمز رنگ) در مقاطع، نسبت به مقادیر آنومالی (منحنی‌های سبز رنگ) و زمینه (منحنی‌های بنفش رنگ) بسیار ناچیز بوده و بخش کوچکی از تغییرات را شامل می‌شود. بنابراین این بخش را می‌توان واقعا نوپز نامید. در حالی که منحنی‌های آنومالی ترسیم شده در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان‌دهنده بخشی از داده‌ها با فرکانس متوسط است. این منحنی‌ها توانسته‌اند نواحی کانی‌زایی طلا A و B را در مقطع I-I'، A و C در مقطع II-II' و محدوده کانی‌زایی طلا A در مقطع III-III' در شکل ۹ را به خوبی مدلسازی کنند. همچنین کانی‌زایی آنتیموان در

بر روند مقادیر زمینه، روند مقادیر آنومالی‌های مهم نیز نشان داده شده است. نواحی کانی‌زایی A، B و C نشان داده شده در شکل ۵، در این نقشه‌ها نیز قابل مشاهده است ولی وسعت این نواحی کانی‌زایی در شکل‌های ۷- پ و ۸- پ به ترتیب از شکل‌های ۵- الف و ۵- ب بزرگتر است زیرا نقشه‌های زمینه نشان‌دهنده روند کلی تغییرات عیار در منطقه مطالعاتی است. دامنه تغییرات عیار در این نقشه‌ها از نقشه‌های آنومالی (شکل‌های ۷- ب و ۸- ب) و داده‌های اولیه (جدول ۱) کمتر است. مقدار این دامنه برای طلا ۱۲ درصد و برای آنتیموان ۱۸ درصد دامنه عیار در نقشه‌های آنومالی است.

ساختارهای حلقوی نشان داده شده در نقشه‌های آنومالی و زمینه در شکل‌های ۷ و ۸ به علت تبدیل تابع عیار به مجموعه‌ای از توابع کسینوسی و سینوسی با انتقال سریع فوریه است. این ساختارها مربوط به بخش‌های کم عیار نقشه‌ها است.

۶- بحث

تعیین موقعیت آنومالی‌های سطحی و به تبع آن مشخص شدن محدوده حدودی کانسار در سطح زمین مهمترین هدف انجام فعالیت‌های ژئوشیمیایی است. نتیجه این فعالیت‌ها طراحی بهینه شبکه حفاری است. مقدار عیار هر نمونه ژئوشیمیایی از سه بخش نوپز، زمینه و آنومالی تشکیل شده است. جدا کردن مقادیر نوپز و زمینه از مقدار آنومالی کمک شایانی در تعیین موقعیت واقعی آنومالی ژئوشیمیایی می‌کند. در بخش قبل نشان داده شد که روش فرکتالی طیف توان-مساحت قادر به تفکیک این مقادیر است. در این روش مقادیر اولیه هر نمونه به سه مقدار نوپز، زمینه و آنومالی تفکیک شده و برای هر یک می‌توان نقشه تجزیه شده‌ای از پراکندگی آن در سطح زمین تهیه کرد. برای بررسی تغییرات مقادیر عیار طلا و آنتیموان در نقشه‌های اولیه (نقشه‌های کنوری؛ شکل ۵) و نقشه‌های تجزیه شده (نقشه‌های نوپز، زمینه و آنومالی؛ شکل‌های ۷ و ۸) در راستاهای مختلف سه مقطع انتخاب شده (شکل ۵- ب) و منحنی‌های آن‌ها در شکل ۹ برای طلا و شکل ۱۰ برای آنتیموان ترسیم شده است.

شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که مقادیر عیار طلا و آنتیموان در روش طیف توان-مساحت به سه مقدار نوپز، آنومالی و زمینه تجزیه شده است (رابطه ۸):

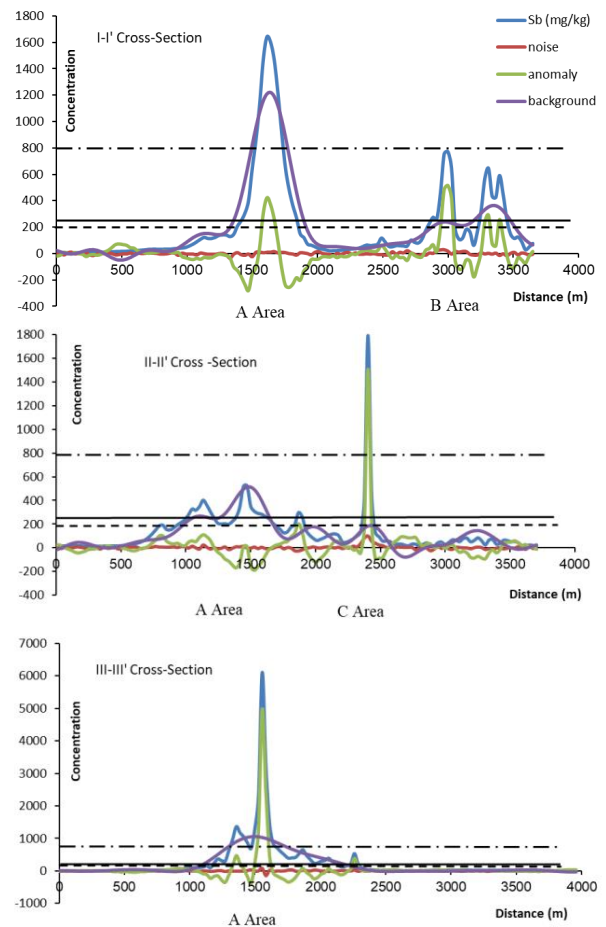
$$Au \text{ or } Sb = \text{noise} + \text{anomaly} + \text{background} \quad (8)$$

منطبق کردن این منحنی‌ها به مجموعه‌ای از توابع سینوسی و کسینوسی در روش طیف توان، در دو طرف تمامی پیک‌های منحنی‌های آنومالی، ظهور مقادیر منفی برای عیارها دیده می‌شود. اگر چه مقادیر منفی برای عیارها از نظر ژئوشیمی مفهوم حقیقی ندارد (مقادیر منفی در مقیاس بارهای شکل‌های ۷ و ۸ و در محور لایه‌های شکل‌های ۹ و ۱۰) ولی در اینجا این مقادیر منفی مفهوم ریاضی داشته و مطابق رابطه ۸ ناشی از تفکیک منحنی تغییرات عیار نسبت به فاصله (که یک مفهوم ژئوشیمیایی دارد) با روش تبدیل فوریه به سه موج سینوسی-کسینوسی (که یک مفهوم فیزیکی دارد) است. نتیجه این کار ایجاد پیک برای مقادیر زمینه در این نواحی است. بنابراین منحنی‌های آنومالی (منحنی‌های سبز) در شکل‌های ۹ و ۱۰ تعیین‌کننده موقعیت دقیق آنومالی‌های واقعی ژئوشیمیایی در منطقه مطالعاتی خواهند بود.

منحنی‌های زمینه (منحنی‌های بنفش رنگ در شکل‌های ۹ و ۱۰) نشان‌دهنده روند کلی تغییرات عیار در هر مقطع است. این منحنی‌ها نشان‌دهنده بخش فرکانس پایین در داده‌ها است. این منحنی‌ها توانسته‌اند محدوده‌های کانی‌زایی طلا A و B را در مقطع I-I'، A در مقطع II-II' و در مقطع III-III' در شکل ۹ را به خوبی مدل‌سازی و از بخش زمینه ژئوشیمیایی تفکیک کنند. همچنین محدوده‌های کانی‌زایی آنتیموان A و B را در مقطع I-I'، A و C در مقطع II-II' و A در مقطع III-III' به خوبی به وسیله این منحنی‌ها ضمن تفکیک از زمینه ژئوشیمیایی مدل‌سازی نیز شده است.

در منحنی‌های زمینه، ایجاد پیک‌هایی هموارتر با کشیدگی کمتر نسبت به منحنی‌های آنومالی (منحنی‌های سبز رنگ) در محل‌های با عیارهای نسبتاً بالا (منحنی‌های آبی رنگ) دیده می‌شود. به جز در ناحیه C در مقطع II-II' در شکل ۹ که پیک زمینه نسبت به پیک عیار کمی جابه‌جایی به سمت شرق نشان می‌دهد که توجیه این مساله نیز در رابطه ۸ نهفته است. همچنین این منحنی‌ها تغییرات سینوسی-کسینوسی ملایمی در نواحی با عیار پایین (زمینه ژئوشیمیایی) دارند. بنابراین منحنی‌های زمینه ضمن مشخص کردن نواحی زمینه ژئوشیمیایی قادر به مشخص کردن محدوده‌های تقریبی از موقعیت نواحی دارای آنومالی ژئوشیمیایی‌اند.

برای تعیین آستانه و تفکیک آنومالی ژئوشیمیایی بر روی نقشه‌های آنومالی و زمینه طلا و آنتیموان (شکل‌های ۷-ب، ۷-پ، ۸-ب و ۸-پ)، از روش فرکتالی عیار-مساحت استفاده



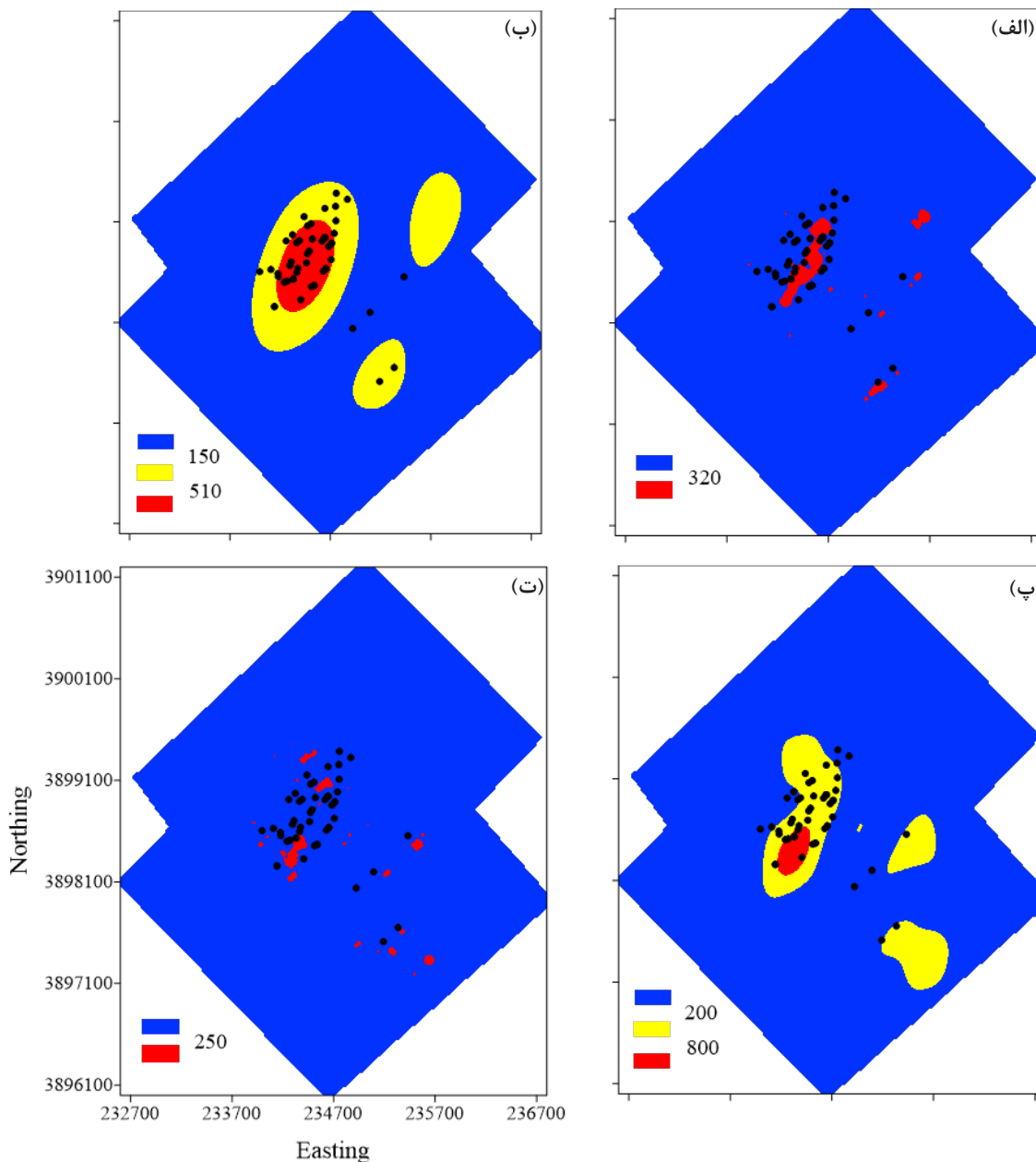
شکل ۱۰: مقاطع تغییرات عیار آنتیموان در نقشه‌های پراکندگی نوزب، آنومالی و زمینه در سه راستای مختلف (خط چین، خط ممتد و خط نقطه به ترتیب معادل آستانه ۲۵۰، ۲۰۰ و ۸۰۰ است).

نواحی A و B را در مقطع I-I'، C در مقطع II-II' و محدوده کانی‌زایی A در مقطع III-III' نیز به خوبی با این منحنی‌ها نشان داده و مقادیر آن مدل‌سازی شده است.

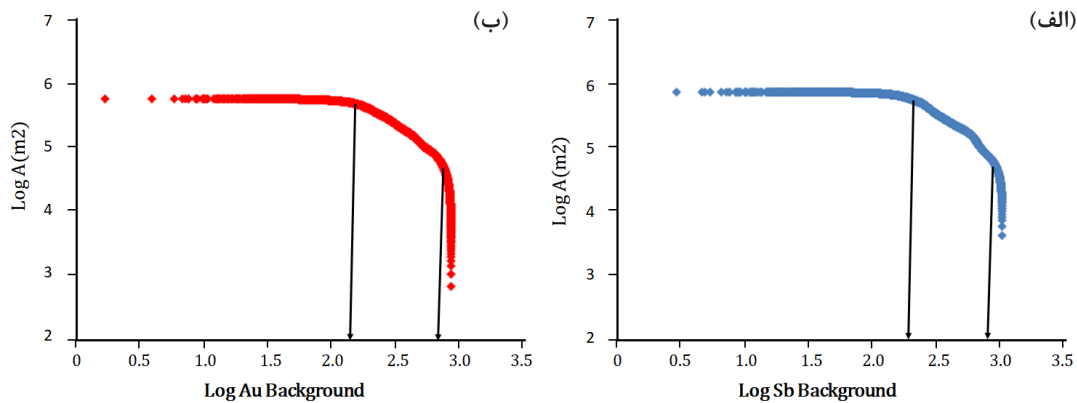
بیشترین مقدار تغییرات متعلق به مقادیر آنومالی (منحنی‌های سبز) است (شکل‌های ۹ و ۱۰). در تمامی مقاطع، پیک منحنی‌های آنومالی بر پیک منحنی‌های عیار (منحنی‌های آبی رنگ) کاملاً منطبق است. به جز در ناحیه A متعلق به مقطع II-II' در شکل ۱۰ که در این ناحیه مقادیر آنومالی منفی است در حالی که مقادیر عیار آنتیموان دارای پیک مثبت است. علت این تفاوت در کوچک بودن پیک عیار آنتیموان است که در روش طیف توان به جای نسبت دادن به مقادیر آنومالی به مقادیر زمینه نسبت داده شده است (به منحنی بنفش در این ناحیه توجه شود). همچنین به دلیل

پایاده کردن روش فرکتالی عیار- مساحت بر روی داده‌های نقشه‌های زمینه منجر به شناسایی دو آستانه شده است (شکل ۱۲). آستانه اول متعلق به محدوده‌هایی است که دارای عیار نسبتاً بالایی باشند و آستانه دوم (که از آستانه اول بزرگتر است) متعلق به محدوده‌هایی است که علاوه بر بالا بودن عیار دارای گسترش قابل ملاحظه‌ای نیز باشند. به عنوان مثال آستانه اول در نقشه زمینه طلا ۱۵۰ و آستانه دوم ۵۱۰ است.

شده است. آستانه ۳۲۰ برای تفکیک آنومالی ژئوشیمیایی در نقشه آنومالی طلا به دست آمده که موقعیت نواحی با عیار بیش از آن در شکل ۱۱- الف نشان داده شده است. در این شکل نواحی کانی‌زایی A، B، C و D به خوبی نمایان است. بیشترین وسعت کانی‌زایی متعلق به محدوده کانسار ساری‌گونای (ناحیه A) و بعد از آن متعلق به محدوده کانسار آق‌داغ (ناحیه B) است.



شکل ۱۱: نقشه‌های کلاسه‌بندی شده الف) نقشه آنومالی طلا، ب) زمینه طلا، پ) آنومالی آنتیموان و ت) زمینه آنتیموان به همراه موقعیت گمانه‌های اکتشافی (نقاط سیاه) در منطقه مطالعاتی



شکل ۱۲: منحنی فرکتالی عیار- مساحت زمینه الف) آنتیموان طلا و ب) طلا

شبکه حفاری کامل‌تری است (شکل ۱۱-ب)، همخوانی بالایی دارد. بنابراین این محدوده‌ها (شکل‌های ۱۱-ب و ۱۱-ت) می‌توانند در طراحی شبکه حفاری تکمیلی در کانسار ساری‌گونای و حفاری در فاز اکتشافی تفصیلی در کانسار آق‌داغ و محدوده‌های پیشنهادی C و D استفاده شوند.

۷- نتیجه‌گیری

در ابتدا با استفاده از تبدیل فوریه سریع داده‌های ژئوشیمیایی از حوزه مکان به حوزه زمان (یا فرکانس) انتقال داده می‌شود. سپس با پیاده کردن الگوریتم طیف توان- مساحت بر روی داده‌های حوزه فرکانس، می‌توان داده‌ها را به سه بخش نویز (داده‌های فرکانس بالا)، آنومالی (داده‌های فرکانس متوسط) و زمینه (داده‌های فرکانس پایین) تفکیک کرد. به کار بردن عکس تبدیل فوریه سریع مجدداً داده‌ها از حوزه زمان به حوزه مکان برگشت داده می‌شود که نتیجه آن تهیه سه نقشه نویز، آنومالی و زمینه است.

دامنه داده‌ها در نقشه نویز حدود ۵ تا ۶ درصد دامنه داده‌های اولیه است و این بخش از داده‌ها نشان‌دهنده خطاهای نمونه‌برداری و آنالیز و تغییرات سریع عیار در سنگ‌های مختلف است. دامنه داده‌ها در نقشه آنومالی حدوداً برابر دامنه داده‌های اولیه است. این نقشه نشان‌دهنده مکان‌هایی با عیارهای بالای طلا و آنتیموان است. بنابراین در این نقشه موقعیت دقیق و واقعی آنومالی‌های ژئوشیمیایی سطحی نمایان است (شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب). در شکل ۱۱-الف موقعیت آنومالی‌های واقعی ژئوشیمیایی طلا بر روی محدوده‌های کانی‌زایی کانسار ساری‌گونای (ناحیه A)، آق‌داغ (ناحیه B)، گسل بین دو

مطابق مقطع I-I' در شکل ۹ آستانه اول قادر به شناسایی نواحی کانی‌زایی A و B است در حالی که آستانه دوم فقط آنومالی ژئوشیمیایی در ناحیه A را مشخص می‌کند. در شکل ۱۱-ب موقعیت آنومالی‌های ژئوشیمیایی طلا که در نقشه زمینه طلا قابل شناسایی‌اند، نشان داده شده است. مطابق شکل آستانه اول قادر به شناسایی نواحی کانی‌زایی A، B، C و D است (البته در این شکل دو ناحیه کانی‌زایی C و D در هم ادغام شده‌اند)، در حالی که آستانه دوم فقط آنومالی ژئوشیمیایی در محدوده A را نشان می‌دهد (محدوده قرمز رنگ در شکل ۱۱-ب).

روش فرکتالی عیار- مساحت آستانه ۲۵۰ را برای نقشه آنومالی آنتیموان و دو آستانه ۲۰۰ و ۸۰۰ را برای نقشه زمینه آنتیموان (شکل ۱۲) برآورد کرده است. مطابق شکل ۱۱-ب محدوده‌های کانی‌زایی A، B و C به صورت پچ‌های کوچک و پراکنده قابل تشخیص‌اند. همین محدوده‌ها در شکل ۱۱-ت به صورت نواحی گسترده‌تری مشخص شده‌اند. به طوری که آستانه اول آنومالی‌های ژئوشیمیایی در محدوده‌های کانسار ساری‌گونای، آق‌داغ و اطراف گسل بین دو کانسار نشان می‌دهد (محدوده‌های زرد رنگ) و آستانه دوم یک آنومالی ژئوشیمیایی در جنوب تپه ساری‌گونای مشخص کرده است (محدوده قرمز رنگ).

در محدوده کانسارهای ساری‌گونای، آق‌داغ و گسل بین این دو کانسار به ترتیب ۲، ۴۶ و ۳ گمانه حفاری شده است. موقعیت این گمانه‌ها در شکل‌های ۱۱ نشان داده شده‌اند. محدوده‌های پیشنهادی به دست آمده از مدلسازی فرکتالی با این شبکه حفاری، به ویژه در کانسار ساری‌گونای که دارای

که کانی‌زایی آنتیموان به صورت نامتقارن و بیشتر در یال جنوبی تپه به وجود آمده است.

- کانی‌زایی طلا در محدوده کانسار آق‌داغ در یال شمال غربی و کانی‌زایی آنتیموان در یال جنوب شرقی این تپه قابل مشاهده است.

- بعد از این دو محدوده، بهترین ناحیه کانی‌زایی طلا متعلق به ناحیه D و برای آنتیموان متعلق به ناحیه C است.

۸- سپاس‌گزاری

از شرکت معدنی زرکوه، مالک کانسار طلای ساری‌گونای به دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های اکتشافی تشکر و قدردانی می‌شود.

۹- مراجع

- [1] Galuszka, A. (2007). "A review of geochemical background concepts and an example using data from Poland". *Environmental Geology*, 52(5): 861-870.
- [2] Reimann, C., Filzmoser, P., and Garrett, R. G. (2005). "Background and threshold: critical comparison of methods of determination". *Science of the Total Environment*, 346: 1-16.
- [3] Tukey, J. W. (1977). "Exploratory Data Analysis". Addison-Wesley, Reading, MA, pp. 688.
- [4] Sinclair, A. J. (1991). "A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry: probability plots revisited". *Journal of Geochemical Exploration*, 41(1): 1-22.
- [5] Govett, G. J. S., Goodfellow, W. D., Chapman, A., and Chork, C. Y. (1975). "Exploration geochemistry distribution of elements and recognition of anomalies". *Mathematical Geology*, 7: 415-446.
- [6] Miesch, A. T. (1981). "Estimation of the geochemical threshold and its statistical significance". *Journal of Geochemical Exploration*, 16: 49-76.
- [7] Pirajno, F. (2009). "Hydrothermal Processes and Mineral Systems". Springer, pp. 1273.
- [8] 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: 314-324.
- [9] Albanese, S., De Vivo, B., Lima, A., and Cicchella, D. (2007). "Geochemical background and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania

کانسار (ناحیه C) و ناحیه جدید D نشان داده شده است. همین موقعیت نیز در شکل ۱۱- پ برای آنومالی‌های واقعی ژئوشیمیایی آنتیموان قابل مشاهده است (به جز ناحیه D). تفاوت عمده بین نواحی کانی‌زایی طلا و آنتیموان در این دو شکل، پیوسته بودن کانی‌زایی طلا در محدوده کانسار ساری‌گونای و ناپیوسته بودن کانی‌زایی آنتیموان در محدوده کانسار آق‌داغ و کانی‌زایی طلا در بخش شمال غربی آق‌داغ و آنتیموان بیشتر در بخش جنوب شرقی محدوده آق‌داغ است. از این نقشه می‌توان برای طراحی حفاری‌های اولیه استفاده کرد تا امکان برخورد گمانه با ماده معدنی در زیر زمین افزایش یابد. دامنه داده‌ها در نقشه زمینه ۱۲ تا ۱۸ درصد داده‌های اولیه است. این نقشه نشان‌دهنده روند کلی تغییرات عیار در منطقه مطالعاتی است. در این نقشه ضمن نشان دادن مناطق زمینه، مناطقی با عیار متوسط تا بالا و گسترش قابل ملاحظه نیز قابل مشاهده است. بنابراین در صورت استفاده از روش‌های تعیین آستانه بر روی داده‌های این نقشه دو آستانه قابل محاسبه خواهد بود. مناطقی با عیار کمتر از آستانه اول نشان‌دهنده زمینه ژئوشیمیایی (مناطق آبی رنگ در شکل‌های ۱۱- ب و ۱۱- ت)، مناطقی با عیار بین دو آستانه نشان‌دهنده آنومالی‌های ژئوشیمیایی احتمالی (مناطق زرد رنگ در شکل‌های ۱۱- ب و ۱۱- ت) و مناطقی با عیار بیشتر از آستانه دوم نشان‌دهنده آنومالی‌های ژئوشیمیایی قطعی (مناطق قرمز رنگ در شکل‌های ۱۱- ب و ۱۱- ت) است. نواحی آنومالی ژئوشیمیایی قطعی به عنوان محدوده طراحی شبکه حفاری در فاز اکتشافی مقدماتی و نواحی آنومالی ژئوشیمیایی احتمالی به عنوان محدوده طراحی شبکه حفاری در فاز اکتشافی تفصیلی پیشنهاد می‌شود.

در شکل ۱۱- ب محدوده کانسار ساری‌گونای (ناحیه A) به عنوان اولویت اول حفاری در دو فاز مختلف و محدوده‌های کانسار آق‌داغ (ناحیه B) و ناحیه D به عنوان اولویت دوم حفاری برای اکتشاف طلا پیشنهاد شده است. در شکل ۱۱- ت نیز محدوده کانسار ساری‌گونای به عنوان اولویت اول و محدوده کانسار آق‌داغ و گسل بین دو کانسار (ناحیه C) به عنوان اولویت دوم برای اکتشاف آنتیموان پیشنهاد شده است. از مقایسه بین دو شکل ۱۱- ب و ۱۱- ت سه تفاوت عمده به شرح زیر قابل مشاهده است:

- کانی‌زایی طلا در محدوده کانسار ساری‌گونای به صورت متقارن و بیشتر در مرکز کانسار اتفاق افتاده است. در صورتی

- 14: 293–303.
- [21] Hassani, H., Daya, A., and Alinia, F. (2009). "Application of a fractal method relating power spectrum and area for separation of geochemical anomalies from background". Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(4): 3307-3320.
- [22] Cheng, Q., Xia, Q., Li, W., Zhang, S., Chen, Z., Zuo, R., and Wang, W. (2010). "Density/area power-law models for separating multi-scale anomalies of ore and toxic elements in stream sediments in Gejiu mineral district, Yunnan Province, China". Biogeosciences, 7: 3019–3025.
- [23] Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P., and Rashidnejad Omran, N. (2010). "Application of Power Spectrum-Area fractal model to separate anomalies from background in Kahang Cu-Mo Porphyry Deposit, Central Iran". Archives of Mining Sciences, 55: 389-401.
- [24] Afzal, P., Harati, H., Fadakar Alghalandis, Y., and Yasrebi, A. B. (2013). "Application of spectrum-area fractal model to identify of geochemical anomalies based on soil data in Kahang porphyry-type Cu deposit, Iran". Chemie der Erde/Geochemistry, 73: 533– 543.
- [25] Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., and Asadi Haroni, H. (2012). "Application of power-spectrum-volume fractal method for detecting hypogene, supergene enrichment, leached and barren zones in Kahang Cu porphyry deposit, Central Iran". Journal of Geochemical Exploration, 112: 131-138.
- [26] Florindo, J. B., and Bruno, O. M. (2012). "Fractal descriptors based on Fourier spectrum applied to texture analysis". Physica A, 391: 4909–4922.
- [27] Hua, S., Cheng, Q., Wang, L., and Xu, D. (2013). "Modeling land price distribution using multifractal IDW interpolation and fractal filtering method". Landscape and Urban Planning, 110: 25-35.
- [28] Richards, J. P., Wilkinson, D., and Ullrich, T. (2006). "Geology of the Sari Gunay epithermal gold deposit, Northwest Iran". Economic Geology, 101(8): 1455-1496.
- [29] Dimri, V. P. (2005). "Fractal Behaviour of the Earth System". Springer, pp. 208.
- [30] Mandelbrot, B. B. (2001). "Fractals, Encyclopedia of Physical Science and Technology". 3rd Edition, Academic Press, 6: 185-207.
- [31] Lopes, R., and Betrouni, N. (2009). "Fractal and multifractal analysis: A review". Medical Image region (Italy)". Journal of Geochemical Exploration, 93: 21–34.
- [10] Geranian, H., Mokhtari, A. R., and Cohen, D. R. (2013). "A comparison of fractal methods and probability plots in identifying and mapping soil metal contamination near an active mining area, Iran". Science of the Total Environment, 463-464: 845–854.
- [11] Cheng, Q., Agterberg, F. P., and Bonham-Carter, G. F. (1996). "A spatial analysis method for geochemical anomaly separation". Journal of Geochemical Exploration, 56(3): 183-195.
- [12] Sun, X., Deng, J., Gong, Q. J., Wang, Q. F., Yang, L. Q., and Zhao, Z. Y. (2009). "Kohonen neural network and factor analysis-based approach to geochemical data pattern recognition". Journal of Geochemical Exploration, 13: 6-16.
- [13] Bai, J., Porwal, A., Hart, C., Ford, A., and Yu, L. (2010). "Mapping geochemical singularity using multifractal analysis: Application to anomaly definition on stream sediments data from Funin Sheet, Yunnan, China". Journal of Geochemical Exploration, 104: 1-11.
- [14] Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., and Ballantyne, S. B. (1994). "The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods". Journal of Geochemical Exploration, 51(2): 109–130.
- [15] Cheng, Q. (1995). "The perimeter-area fractal model and its application to geology". Mathematical Geology, 27: 69–82.
- [16] Lima, A., De Vivo, B., Cicchella, D., Cortini, M., and Albanese, S. (2003). "Multifractal IDW interpolation and fractal filtering method in environmental studies: an application on regional stream sediments of (Italy)". Campania region, Applied Geochemistry, 18: 1853–1865.
- [17] 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: 21-29.
- [18] BÖlviken, B., Stokke, P. R., Feder, J., and JÖssang, T. (1992). "The fractal nature of geochemical landscapes". Journal of Geochemical Exploration, 43: 91-109.
- [19] Cheng, Q., Xu, Y., and Grunsky, E. (2000). "Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation". Natural Resources Research, 9: 43-51.
- [20] Cheng, Q. (2007). "Multifractal imaging filtering and decomposition methods in space, Fourier frequency, and eigen domains". Nonlinear Processes in Geophysics,

- [38] Gonzalez, R. C., and Woods, R. E. (2009). "Digital Image Processing Using MATLAB". 2nd Edition, Gatesmark Publishing, pp. 827.
- [39] Alavi, M. (1994). "Tectonics of Zagros Orogenic belt of Iran, new data and interpretation". Tectonophysics, 229: 211-238.
- [40] Moosavi, S. A., Heidari, S. M., Rastad, E., Esfahaninejad, M., and Rashidnejad Omran, N. (2008). "A brief review of mineral deposit types and geodynamic settings related to Neotethys in Iran". Geosciences, 17(1): 132-142.
- [41] Wilkinson, L. D. (2005). "Geology and mineralization of the Sari Gunay gold deposits, Kordestan province Iran". Rio-Tinto Ltd Technical Report, pp. 158.
- [42] Granian, H., Tabatabaei, S. H., Asadi, H. H., and Carranza, E. J. M. (2015). "Multivariate regression analysis of lithochemical data to model subsurface mineralization: a case study from the Sari Gunay epithermal gold deposit, NW Iran". Journal of Geochemical Exploration, 148: 249-258.
- [43] Asadi, H. H., Kianpouryan, S., Lua, Y. J., and McCuaig, T. C. (2014). "Exploratory data analysis and C-A fractal model applied in mapping multi-element soil anomalies for drilling: A case study from the Sari Gunay epithermal gold deposit, NW Iran". Journal of Geochemical Exploration, 145: 233-241.
- Analysis, 13: 634-649.
- [32] Anderson, D. L. (2007). "The New Theory of the Earth". Cambridge University Press, pp. 400.
- [33] Goldberg, I. S., Abramson, G. Y., and Los, V. L. (2003). "Depletion and enrichment of primary haloes: their importance in the genesis of and exploration for mineral deposits". Geochemistry: Exploration Environment Analysis, 3: 281-293.
- [34] Panahi, A., and Cheng, Q. (2004). "Multifractality as a measure of spatial distribution of geochemical patterns". Mathematical Geology, 36(7): 827-846.
- [35] Babak, O., and Deutsch, C. V. (2009). "Statistical approach to inverse distance interpolation". Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 23: 543-553.
- [36] Xu, Y., and Cheng, Q. (2001). "A fractal filtering technique for processing regional geochemical maps for mineral exploration". Geochemistry: Exploration Environment Analysis, 1: 147-156.
- [37] Cheng, Q., Xia, Q., Li, W., Zhang, S., Chen, Z., Zuo, R., and Wang, W. (2010). "Density/area power-law models for separating multi-scale anomalies of ore and toxic elements in stream sediments in Gejiu mineral district, Yunnan Province, China". Biogeosciences, 7: 3019-3025.



Imam Khomeini International University
Vol. 5, No. 1, Spring 2020, pp. 4-7



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI: 10.30479/jmre.2019.10721.1265

Application of Power Spectrum Fractal Method to Model Geochemical Anomalies in Sari Gunay Epithermal Au-Sb Deposit, Kordestan Province

Geranian H.^{1*}, Tabatabaei S.H.²

1- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran
h.geranian@birjandut.ac.ir

2- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
tabatabaei@cc.iut.ac.ir

(Received: 20 May 2019, Accepted: 07 Sep. 2019)

Abstract: Identification of geochemical anomaly patterns, which indicate the enrichment and depletion of elements, is an important issue in the interpretation of geochemical data. The use of the power spectrum-area fractal method allows the better separation of geochemical populations that is due to transformation of the data from spatial domain to frequency domain. By implementing this method on the dataset of Au and Sb element contents obtained from chemical analysis of soil samples taken Sari Gunay exploration zone, three models including noise, anomaly and background maps were prepared for each element. The data of the noise maps constitute 5-6 percent of the primary data variation range and indicate sampling and analysis errors and rapid changes due to the distribution of elements in different rocks. Anomaly maps those variation range is similar to the variation range of initial data, represent enrichment locations and precise positioning of surface geochemical anomalies. However, background maps that cover about 12-18 percent of the variation range of primary data indicate the general trend of the concentration variations in the study area and the approximate location of geochemical anomalies. Anomaly map that shows the mineralization centre can be used to design a preliminary drilling network and the background map that shows the mineralization area, can be used to design drilling network in preliminary and detailed exploration phases. Anomaly and background maps have proposed Sari Gunay and Agh Dagh deposits areas and a new area for gold exploration. Besides, they have suggested Sari Gunay and Agh Dagh deposits areas and the fault area between two deposits for antimony exploration.

Keywords: Fractal modelling, Power spectrum, Geochemical anomaly, Filtering of geochemical maps, Sari Gunay epithermal gold deposit.

INTRODUCTION

Separation of geochemical patterns such as background, anomaly and noise maps is one of the important issues in the interpretation of geochemical data. Power spectrum-area fractal method through transformation the data set from spatial domain to frequency domain and robustness to outlier data can undertake this subject. Results of applying this method on the geochemical data of the Sari Gunay exploration zone

showed that the noise and background maps constitute, respectively, 5-6 and 12-18 percent of the primary data variation range and anomaly map represent high-concentration locations and precise positioning of surface geochemical anomalies.

METHODS

The power spectrum-area fractal method was first proposed by Cheng et al. [1]. It comprises the following steps [2,3]:

- 1- Preparing a regular sampling map by using of one of the interpolation methods.
- 2- Using of fast Fourier transformation in order to transform the data map from spatial domain to frequency domain.
- 3- Calculating Fourier spectrum of frequency map and drawing the power spectrum-area fractal plot.
- 4- Fitting the plot with multi straight lines and obtain thresholds of the plot as frequency filters.
- 5- Calculating spectrum background, anomaly and noise maps by multiply frequency domain map to the frequency filters.
- 6- Using of inverse fast Fourier transformation in order to back the maps to the space domain.

FINDINGS AND ARGUMENT

In this study, Au and Sb contents in 1868 soil samples in Sari Gunay exploration zone have been used as a data set. Figure 1 and 2 show the sample locations and contour maps of data in the study area. By implementing the power spectrum- area fractal method on the data set, three geochemical models namely, noise, anomaly and background maps were prepared for each element. The noise maps indicate sampling and analysis errors and rapid changes due to the distribution of elements in different rocks. Anomaly maps represent high-enrichment locations and precise positioning of surface geochemical anomalies. However, background maps indicate the general trend of the concentration variations in the study area and the approximate location of geochemical anomalies.

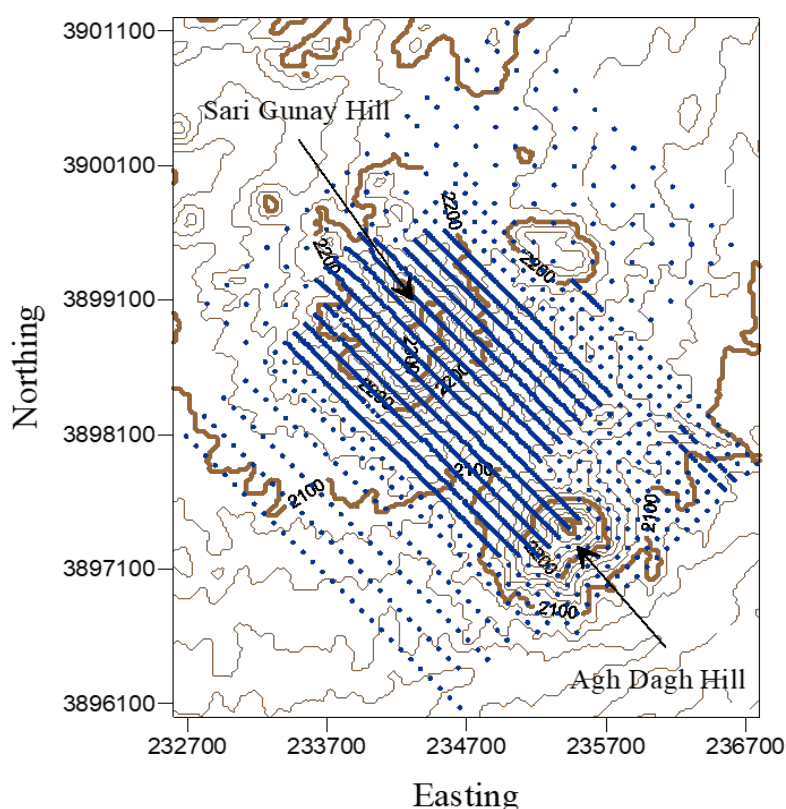


Figure 1. Locations of geochemical samples (blue dots) overlain on a topography map of the study area

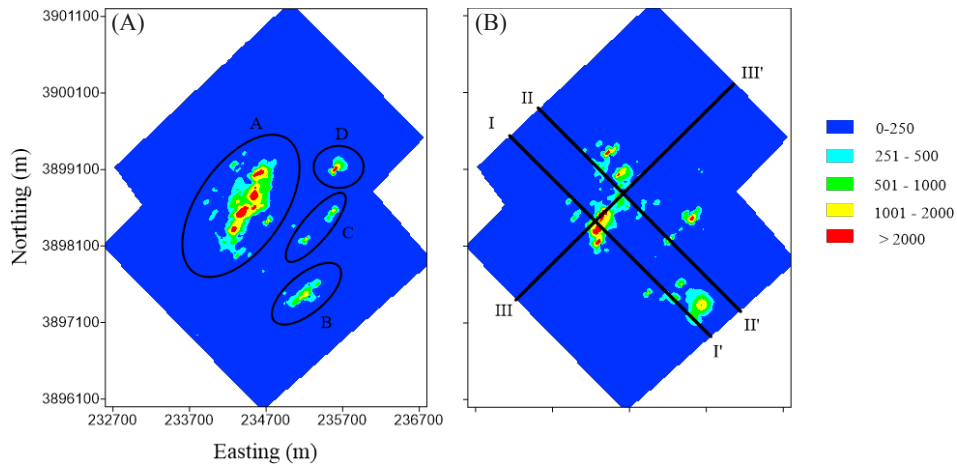


Figure 2. Contour maps of A: Au and B: Sb analysis in the study area

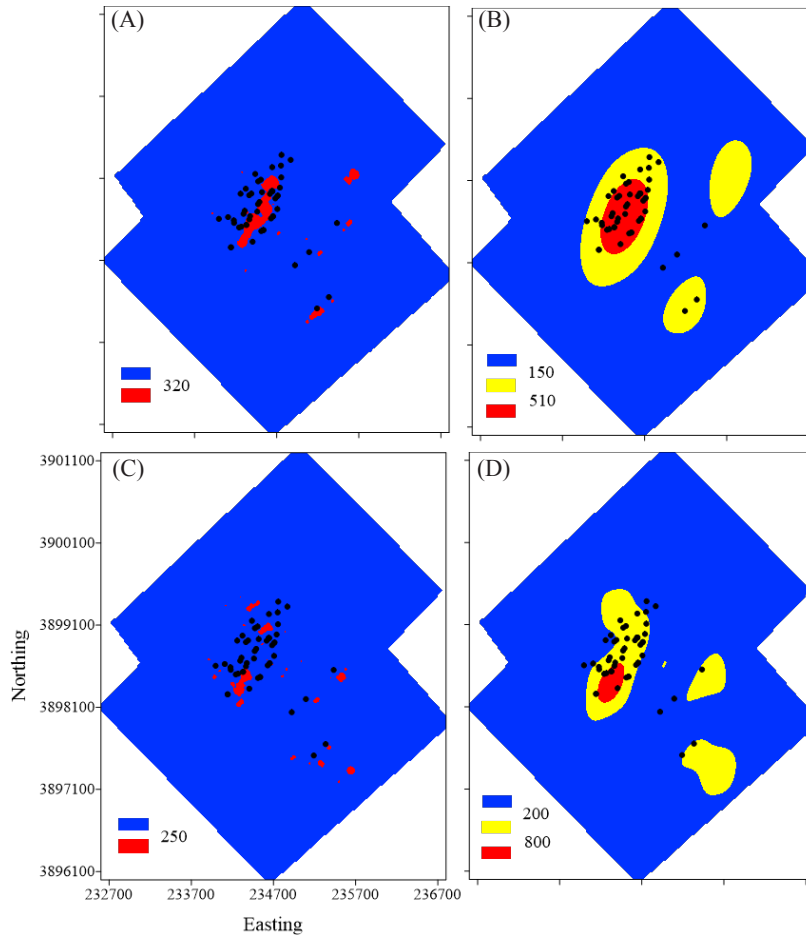


Figure 3. Classified maps of A: Au anomaly, B: Au background, C: Sb anomaly, and D: Sb background with recommended areas for further exploratin in the study area

CONCLUSIONS

The map of geochemical anomaly that shows the mineralization centre can be used to design a preliminary drilling network and the background map that shows the mineralization area, can be used to design drilling network in preliminary and detailed exploration phases. Anomaly and background maps have proposed

Sari Gunay and Agh Dagh deposits areas and a new area for gold exploration (Figure 3). Besides, they have suggested Sari Gunay and Agh Dagh deposits areas and the fault area between two deposits for antimony exploration.

REFERENCES

- [1] Cheng, Q., Xu, Y., and Grunsky, E. (2000). "Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation". *Natural Resources Research*, 9: 43-51.
- [2] Xu, Y., and Cheng, Q. (2001). "A fractal filtering technique for processing regional geochemical maps for mineral exploration. *Geochemistry*". *Exploration Environment Analysis*, 1: 147– 156.
- [3] Cheng, Q., Xia, Q., Li, W., Zhang, S., Chen, Z., Zuo, R., and Wang, W. (2010). "Density/area power-law models for separating multi-scale anomalies of ore and toxic elements in stream sediments in Gejiu mineral district, Yunnan Province, China". *Biogeosciences*, 7: 3019–3025.