



مقاله پژوهشی

شناسایی کانه‌زایی سرب و روی بر اساس بررسی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه در کمر بند فلز زایی ملایر-اصفهان

محمد امین جعفری^۱، علی کنعانیان^{۱*} و احد نظر پور^۲

(۱) دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۴، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۹

چکیده

کمر بند فلز زایی ملایر-اصفهان با روند شمال غربی-جنوب شرقی بزرگ‌ترین و مهم‌ترین کمر بند کانه‌زایی سرب و روی نوع MVT موجود در ایران به‌شمار می‌رود که بیش از ۱۷۰ کانسار با توانایی معدنی بسیار بالا در آن شناسایی شده است. مهم‌ترین بحث در تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی تعیین حد مقدار زمینه برای هر عنصر در منطقه مورد بررسی و جدا کردن زمینه از بی‌هنجاری‌های عنصر مربوطه است. هدف از این پژوهش، بررسی کانه‌زایی و جداسازی بی‌هنجاری ژئوشیمیایی فلزات سرب و روی با استفاده از روش‌های آمار کلاسیک^۱، انحراف مطلق از میانه^۲، روش‌های مولتی‌فرکتال عیار-تعداد^۳ و عیار-مساحت^۴، شاخص سینگولاریتی^۵ و نمودار شواهد وزنی^۶ در منطقه مورد بررسی است. به‌طور کلی در مجموع ۱۹۹۴۶ نمونه ژئوشیمیایی از رسوبات آبراهه‌ای که توسط روش ICP-MS و XRF مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته، استفاده شده است. ابتدا از طریق روش آمار کلاسیک و انحراف مطلق از میانه با محاسبه مؤلفه‌های آماری به جداسازی جوامع ژئوشیمیایی پرداخته شد. پس از آن با استفاده از روش‌های فرکتالی عیار-تعداد و عیار-مساحت و با توجه به خط برازش هر فلز بر روی نمودارهای لگاریتمی و همچنین با استفاده از روش سینگولاریتی و تلفیق آن با نمودار شواهد وزنی، بی‌هنجاری ژئوشیمیایی دو فلز سرب و روی در منطقه مورد بررسی تفکیک شدند. روش فرکتال عیار-مساحت نشان داد که مقدار کمینه و بیشینه عیار برای فلز سرب به ترتیب ۲۵/۱۱ ppm و ۱۴۱/۲۵ ppm و برای فلز روی ۶۳/۰۹ ppm و ۴۴۶/۶۸ ppm است که بیانگر عیار بیشتر فلز روی در این منطقه است. در نقشه‌های حاصل از روش شاخص سینگولاریتی، دقت بالاتر این روش نسبت به سایر روش‌ها، آشکار سازی بی‌هنجاری‌های پنهان و همچنین انطباق بالای بی‌هنجاری‌ها و موقعیت کانسارهای سرب و روی موجود در پهنه مورد نظر مشخص شد. به‌طور کلی نتایج این روش‌ها نشان داد عیار فلزات سرب و روی در جنوب شرق و شمال غرب منطقه مورد بررسی، بیشترین میزان بی‌هنجاری را دارا هستند و در این مناطق احتمال وجود مناطق امیدبخش کانساری بسیار بالاست.

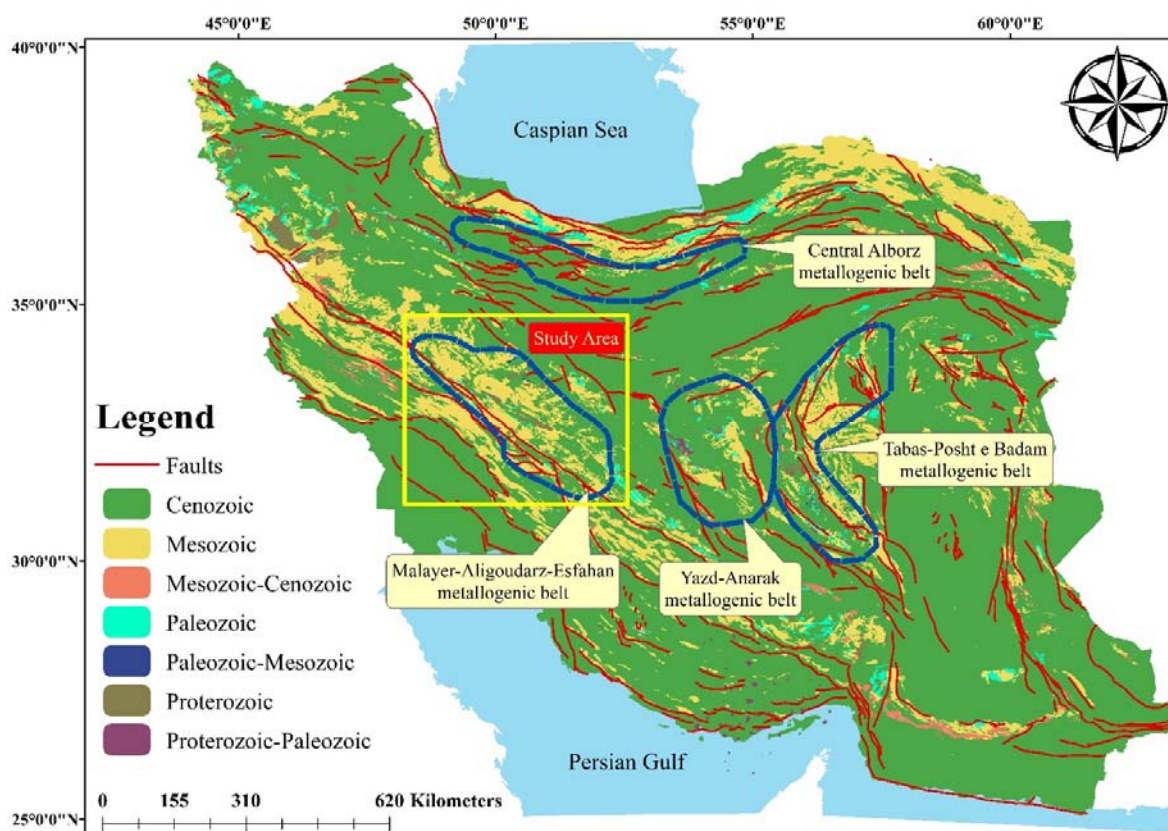
واژه‌های کلیدی: بی‌هنجاری ژئوشیمیایی، آمار کلاسیک، مولتی‌فرکتال، شاخص سینگولاریتی (SI)، سرب و روی، کانسارهای نوع MVT، کمر بند فلز زایی ملایر-اصفهان

1. Mean+nStandard Deviation (Mean+nSTEV)
2. Median Absolute Deviation (MAD)
3. Concentration-Number (C-N)
4. Concentration-Area (C-A)
5. Singularity Index (SI)
6. Weight of Evidence (WofE)

مقدمه

تاکنون بیش از ۳۰۰ کانسار سرب و روی با میزان رسوبی در ایران گزارش شده است که در این میان حدود ۲۸۵ مورد در سنگ‌های کربناتی و بقیه در سنگ‌های تخریبی، در دوره‌های مختلفی تشکیل شده‌اند (Rajabi et al., 2012). کمرندهای ملایر-اصفهان، یزد-انارک، البرز مرکزی و طبس-پشت‌بادام بیشترین و مهم‌ترین کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی ایران را در خود جای داده‌اند که در (شکل ۱) مشخص شده است (Momenzadeh, 1976). کمرند فلزایی

ملایر-اصفهان در پهنه پرتکاپوی سندج-سیرجان واقع شده است و دارای توان معدنی فلزی و غیرفلزی بالایی است. مواد معدنی فلزی در این منطقه شامل: سرب، روی، طلا، مس، نقره، کادمیوم و آهن است (Delavar et al., 2012). این پهنه بزرگ‌ترین و مهم‌ترین کمرند سرب و روی موجود در ایران است و دارای بیش از ۱۲۰ رخداد سرب و روی است که اغلب لایه کران و به‌طور عمده به سنگ‌های آهکی، دولومیتی، شیلی و گاه ماسه‌سنگی محدود می‌شوند (Momenzadeh et al., 1979).



شکل ۱. موقعیت کمرندهای کانزایی سرب و روی در ایران و جایگاه پهنه ملایر-اصفهان

Fig. 1. Position of metallogenic belt of Pb and Zn in Iran and location of Malayer-Isfahan zone

ژئوشیمیایی برای جدایش جوامع مختلف از یکدیگر و نیز تعیین حد آستانه برای هر عنصر در منطقه مورد اکتشاف استفاده می‌شود (Afzal et al., 2017a). به عبارتی در صورت عدم

امروزه داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای اهمیت زیادی در بررسی‌های اکتشافی به‌خصوص برای شناسایی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی و مناطق امیدبخش معدنی دارند. از داده‌های

تعیین مقادیر زمینه هر عنصر در هر منطقه، میزان بی‌هنجاری‌ها در آن منطقه دچار نوسان شده و موجب بروز خطاهای بزرگ در ارزیابی محدوده‌های امیدبخش برای ادامه عملیات اکتشافی می‌شود (Nazarpour et al., 2015). استفاده از رسوبات آبراهه‌ای برای اکتشاف در مقیاس‌های کوچک و به‌طور کلی در مراحل اولیه اکتشاف که شامل مرحله پتانسیل‌یابی و پی‌جویی است، استفاده می‌شود. استفاده از این روش در هر شرایط اقلیمی جواب‌گو خواهد بود؛ بنابراین روشی مفید در اکتشاف کانسارهای فلزی است (Lima, 2018).

از گذشته تا به امروز از روش‌های گوناگونی برای جداسازی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی استفاده شده است. روش‌هایی که پژوهشگران همچنان از آن در حال استفاده هستند، روش آمار کلاسیک که مبتنی بر میانگین و انحراف معیار داده‌ها عمل می‌کند و روش انحراف مطلق از میانه است (Nazarpour et al., 2016). این روش‌ها دارای نواقصی از قبیل حذف تعدادی از داده‌ها به‌عنوان خارج از ردیف (روش انحراف مطلق از میانه کمتر)، عدم توجه به توزیع فضایی داده‌ها، شرط پیروی از توزیع نرمال و نیز عدم توجه به شکل هندسی بی‌هنجاری‌هاست (Reimann and Caritat, 2017). چون بسیاری از رخدادهای زمین‌شناسی از قوانین هندسه اقلیدسی پیروی نمی‌کنند و با توجه به محدودیت‌های روش آمار کلاسیک و انحراف مطلق از میانه که در ادامه به آن پرداخته شده و همچنین برای بالاتر بردن دقت کار و به حداقل رساندن خطا در شناسایی مناطق امیدبخش برای فلزات سرب و روی در منطقه مورد بررسی از روش‌های مولتی‌فرکتال عیار-تعداد، عیار-مساحت و شاخص سینگولاریتی استفاده شده است.

در سال ۱۹۸۳ ماندلبورت (Mandelbort, 1983) نوعی هندسه را معرفی کرد که بر اساس آن تمام فرایندهای موجود در طبیعت را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و آن هندسه را فرکتال نامید. برای نخستین‌بار، چنگ (Cheng et al., 1994)، برای جداسازی بی‌هنجاری از زمینه از روش فرکتال عیار-تعداد و

عیار-مساحت در کانسار مس-طلائی پورفیری کانادا استفاده کرد. نمودار لگاریتمی عیار در برابر تعداد و مساحت در نقاطی دچار شکست می‌شود یا به عبارتی تغییر شیب تند می‌دهد که این تغییر شیب نشان‌دهنده تغییر از زمینه به بی‌هنجاری‌های درجات مختلف و تغییرات در شرایط زمین‌شناسی است (Agterberg et al., 1996). به‌طور کلی داده‌های ژئوشیمیایی رفتار مولتی‌فرکتالی یا چند فرکتالی از خود نشان می‌دهند که این امر بیانگر وجود تغییراتی نظیر تغییر در شرایط ژئوشیمی، زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی است. لذا می‌توان از این روش برای جداسازی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی از زمینه استفاده کرد (Zuo and Wang, 2016).

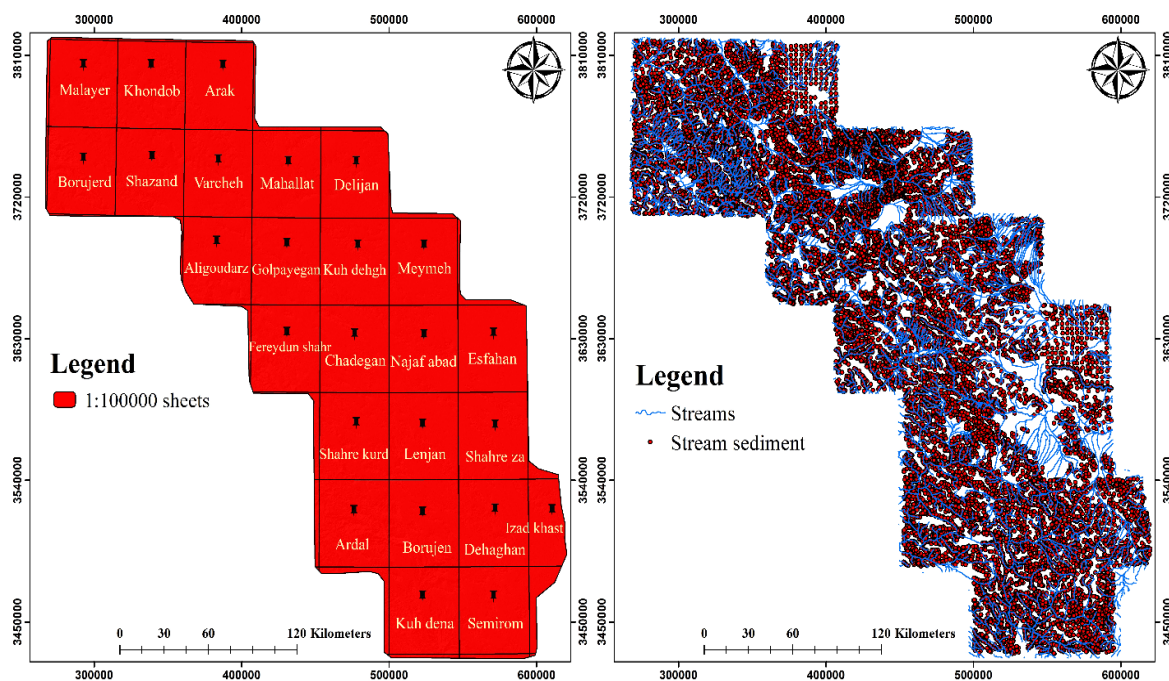
یکی دیگر از روش‌هایی که امروزه برای جداسازی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی مورد توجه قرار گرفته، روش شاخص سینگولاریتی است. آشکارسازی بی‌هنجاری‌های پنهان و ضعیف^۱ که سایر روش‌ها قادر به شناسایی آن نیستند، این روش را نسبت به سایر روش‌ها متمایز می‌کند. برای نخستین‌بار چنگ و آگتربرگ (Cheng and Agterberg, 2009) نشان دادند، رسوبات آبراهه‌ای در مجاور ذخایر کانسنگ می‌توانند خواص سینگولار داشته باشند. بنابراین سینگولاریتی را برای تعیین مناطقی که از خود بی‌هنجاری نشان می‌دهند، پیشنهاد دادند و عنوان کردند که از این روش می‌توان برای پیش‌بینی مناطق امیدبخش کانساری استفاده کرد. چنگ و ژائو (Cheng and Zhao, 2011) نشان دادند که بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی بر اساس تئوری سینگولاریتی می‌تواند برای توصیف و پیش‌بینی فرایندهای کانی‌زایی غیرخطی نیز مورد استفاده قرار گیرد. ژو (Zuo, 2014b) روش‌های فرکتال و مولتی‌فرکتال عیار-مساحت، طیف-مساحت و شاخص سینگولاریتی را برای شناسایی بی‌هنجاری‌های ضعیف در ناحیه پلی‌متالیک آهن کائوبولنگ چین به کار گرفت و نشان داد که روش‌های فرکتالی عیار-مساحت و طیف-مساحت برای شناسایی بی‌هنجاری‌های ضعیف محدودیت داشته و بی‌هنجاری‌ها بین زمینه پنهان می‌شوند

رسوبات آبراهه‌ای به تعداد ۱۹۹۴۶ از عمق ۴۰ سانتی‌متری آبراهه‌ها و با تجزیه به روش‌های ICP-MS و XRF و حد تشخیص ۰/۰۶ ppm برای فلز سرب و ۰/۰۸ ppm برای فلز روی از ۲۵ ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ شامل ورقه‌های الیگودرز، اراک، اردل، بروجن، بروجرد، چادگان، دهاقان، دلیجان، اصفهان، فریدون‌شهر، گلپایگان، ایزدخواست، خُنداب، کوه‌دق، کوه‌دنا، محلات، ملایر، میمه، نجف‌آباد، ریزنجان، سمیرم، شهرکرد، شازند، شهرضا و ورجه که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور برداشت شده‌اند، استفاده شده است (شکل ۲-۱). موقعیت نمونه‌های برداشت شده در شکل ۲-۱ ارائه شده است. از این داده‌ها مقدار زمینه و بی‌هنجاری ژئوشیمیایی فلزات سرب و روی برداشت شده‌اند که توانستیم با استفاده از روش‌های آمار کلاسیک، انحراف مطلق از میانه، مولتی‌فرکتال عیار-تعداد، عیار-مساحت و شاخص سینگلاریتی به جداسازی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی فلزات سرب و روی در منطقه مورد بررسی بپردازیم.

و از طریق وزن‌دهی به شیوه معکوس فاصله مشخص نمی‌شوند؛ اما روش شاخص سینگلاریتی ابزاری مفید برای شناسایی بی‌هنجاری‌های ضعیف است (Jafari et al., 2018). هدف از انجام این پژوهش، جداسازی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی و بررسی کانه‌زایی فلزات سرب و روی در کمربند فلززایی ملایر-اصفهان با استفاده از روش‌های کلاسیک، مولتی‌فرکتال عیار-تعداد، عیار-مساحت و شاخص سینگلاریتی است که هر کدام از روش‌ها با توجه به ویژگی‌های خود نقاط دارای پتانسیل را مشخص کرده و در پایان با توجه به انطباق بین مناطق امیدبخش به دست آمده و همچنین اندیس‌ها و کانسارهای سرب و روی موجود در منطقه مورد بررسی، میزان کارایی هر کدام از روش‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

روش مطالعه

در این پژوهش برای جداسازی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی فلزات سرب و روی در کمربند فلززایی ملایر-اصفهان از نمونه



شکل ۲. A: ورقه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ تشکیل‌دهنده پهنه ملایر-اصفهان و B: موقعیت رسوبات آبراهه‌ای برداشت شده در پهنه ملایر-اصفهان

Fig. 2. A: 1:100000 sheets forming the Malayer-Isfahan zone. B: Position of the stream sediments in the Malayer-Isfahan zone.

زمین‌شناسی منطقه

بسیاری از کانسارهای سرب و روی موجود در کمرندهای فلززایی موجود در ایران در دوره‌های مختلفی از زمان‌های زمین‌شناسی تشکیل شده‌اند؛ به‌طوری‌که از زمان پروتروژئیک بالایی تا زمان کرتاسه پسین این کانسارها گسترش نشان می‌دهند. با توجه به سن سنگ‌های رسوبی میزبان کانسارهای سرب و روی ایران، مهم‌ترین افق‌های میزبان این کانسارها عبارتند از (Boveiri konari et al., 2017):

الف) پروتروژئیک بالایی: کانسار انگوران (Daliran et al., 2013)،

ب) کامبرین: کانسارهای چاه میر، کوشک، زیرگان در حوضه بافق، این کانسارها از نوع کانسارهای سرب و روی با میزبان رسوبات شیلی و سیلتستونی غنی از مواد آلی از نوع Selwyn-Type SEDEX هستند (Rajabi et al., 2012 and 2015)،

ج) اردوویسین: مانند کانسارهای ازبک کوه و سیب‌زار (Momenzadeh et al., 1979)،

د) کربونیفر: قلعه معدن (Rajabi et al., 2012)، پرمین، از کانسارهای سرب و روی با میزبان رسوبات پرمین می‌توان به کانسار کوه سرمه در پهنه زاگرس و کانسار دونا در پهنه البرز اشاره کرد. این کانسارها از نوع کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناته یا نوع MVT معرفی شده‌اند (Liaghat et al., 2000)،

ه) تریاس: بیشتر کانسارهای سرب و روی با میزبان رسوبات تریاس در کمرند فلززایی طبس-پشت بادام مرکزی گسترده شده‌اند. از ویژگی‌های شاخص این کانسارها غنی بودن آنها از فلوئور است و به کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناته غنی از فلوئور معروف هستند. از جمله کانسارهای این دوره زمانی می‌توان به کانسارهای شش رودبار، پاچی میانا و کمرپشت اشاره کرد (Rajabi et al., 2012)،

و) ژوراسیک: کانسارهای گل‌زرد و بابا قله در کمرند ملایر-اصفهان از جمله کانسارهای نوع CD هستند که درون رسوبات

تخریبی ژوراسیک تشکیل شده‌اند (Momenzadeh, 1976)،

ز) کرتاسه: این گروه از کانسارها که شامل بیشترین ذخایر سرب و روی ایران می‌شوند، بیشتر در توالی کربناته (همراه با کمی سنگ‌های تخریبی) کرتاسه پیشین (همانند ایرانکوه، مهدی‌آباد، وحین، عمارت، موچان، آهنگران) و گاه در توالی کرتاسه پسین (مانند رضاآباد، شهرمیرزا، نخلک و خانجار رشم) تشکیل شده‌اند (Rajabi et al., 2012). کانسارهای سرب و روی با میزبان توالی رسوبی کرتاسه به‌طور قابل توجهی در کمرند فلززایی ملایر-اصفهان (منطقه مورد بررسی) در این پژوهش و یزد-انارک تشکیل شده‌اند (Wilkinson, 2014).

کمرند فلززایی ملایر-اصفهان، یک پهنه دگرگونی با راستای شمال‌باختر-جنوب‌خاور است که بخش عمده‌ای از استان‌های مرکزی، اصفهان و همدان و بخش کمتری از استان‌های لرستان و چهارمحال و بختیاری را دربر می‌گیرد (Ehya et al., 2010). این پهنه در موقعیت زمین‌ساختی پشت‌کمانی جای دارد و در نتیجه فروانش اقیانوس نوتیس به زیر صفحه ایران ایجاد شده است و مهم‌ترین کمرند فلززایی سرب و روی ایران از نوع MVT (مس‌سی‌سی‌پی با میزبان رسوبی) و Sedex (کمتر) به‌شمار می‌رود (Rajabi et al., 2013). کانسارهای Sedex به همه کانسارهای سرب و روی با میزبان شیلی، ماسه‌سنگی سیلتستونی و یا جانشینی‌های کربناته درون توالی تخریبی گفته می‌شود و کانسارهای MVT، کانسارهایی هستند که در سکوه‌های کربناته تشکیل می‌شوند (Karimpour et al., 2019؛ Zhai et al., 2019).

در پهنه ملایر-اصفهان پدیده‌های زمین‌ساختی بزرگ مقیاس وجود دارد که از لحاظ جایگاه زمین‌ساختی، حوضه‌های فورلندی یکی از اصلی‌ترین مناطق تشکیل کانسارها محسوب می‌شود (Momenzadeh, 1976). عامل‌هایی مانند شیب فروانش، ساختار حرارتی فرورونده و الگوی کنوکسیونی در استونسفر، همگی بر روی حوضه فورلندی تأثیرگذار

هستند (Leach et al., 2001). کمر بند فلز زایی ملایر-اصفهان دارای ناپیوستگی‌های متعدد در دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک است که در قسمت شمال و مرکز ایران دیده می‌شود. آنچه که موجب تشخیص این ناحیه از مرکز و شمال ایران است، این است که این پهنه در اشغال واحدهای اسلیتی و ماسه‌سنگی دگرگونی ژوراسیک و توالی‌های کربناته-شیل-مارن کرتاسه است. به دلیل تأثیر فازهای کوه‌زایی لارامید توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی متعددی در لاین طبقات ژوراسیک-کرتاسه ترزیق شده است (Yarmohammadi et al., 2016).

زمین‌ساخت کششی کرتاسه زیرین سبب تشکیل حوضه‌های فرازمین و فروزمین در این پهنه شده است که بسیاری از کانسارهای سرب، روی و نقره با میزبان کربناته در حوضه‌های فروزمینی حاصل، نهشته شده‌اند (Movahednia et al., 2017). مهم‌ترین واحد سنگی در این پهنه به علت دارا بودن توانایی فراوان در تشکیل فلزات سرب و روی، واحد آهک کرتاسه است که ترکیب لیتولوژی آن سنگ آهک اسلیتی، اسلیت آهکی، ماسه‌سنگ آمونیت‌دار است و توانایی بالایی در تشکیل فلزات سرب و روی از خود نشان می‌دهد (Karimpour et al., 2017). مطابق نقشه زمین‌شناسی (شکل ۳)، سایر واحدهای زمین‌شناسی موجود در این پهنه شامل ماسه‌سنگ (ژوراسیک-کرتاسه)، شیل (ژوراسیک-کرتاسه)، گرانیت (تریاس) و فیلیت‌های (تریاس-ژوراسیک) است. در این پهنه، کانه‌سازی سرب و روی به صورت لایه‌ای، عدسی و رگه‌ای هستند و اغلب میزبان آن‌ها دولومیت، آهک و ماسه‌سنگ هستند.

کانی‌سازی در بیشتر کانسارهای پهنه ملایر-اصفهان مشترک است و از اسفالریت، گالن، بیتومن، دولومیت غنی از آهن، کوارتز، باریت و مقدار کمی پیریت تشکیل شده است. انواع اصلی دگرسانی‌های موجود در این پهنه هم دولومیتی شدن، دولومیتی شدن غنی از آهن، آنکریت و سیلیسی شدن است که شیل و ماسه‌سنگ سیلیس بیشتری تولید می‌کند؛ به‌طوری‌که

فرایند سیلیسی شدن با این واحد در ارتباط است. درون شیل، کانی‌هایی مانند کلریت با محلول‌های حاوی گوگرد و اکسید داده و پیریت رسوب می‌کند (Karimpour and Sadeghi, 2018).

برای تعیین ویژگی‌های بارز کانی‌سازی سرب و روی در کمر بند فلز زایی ملایر-اصفهان، چهار ذخیره معدنی شاخص مورد بررسی قرار گرفت که عبارتند از: کانسار آهنگران با پتانسیل معدنی سرب، روی، نقره و آهن (Momenzadeh et al., 1979)، مجموعه معدنی ایرانکوه با پتانسیل معدنی سرب، روی، نقره و آهن (Hosseini-Dinani and Aftabi, 2016؛ Karimpour and Sadeghi, 2018)، کانسار عمارت با پتانسیل معدنی سرب و روی (Momenzadeh et al., 1979) و کانسار موجان با پتانسیل معدنی سرب و روی. با توجه به سنگ میزبان که اغلب آواری (شیل و ماسه‌سنگ) و کربناته (آهک و آهک دولومیتی) متعلق به کرتاسه هستند (Rajabi et al., 2012)، ویژگی‌های زمین‌شناسی معادن نام برده شده به صورت کامل در جدول ۱ ارائه شده است.

نرمالایز کردن داده‌ها

استفاده از برخی روش‌های آماری، بسته بر نرمال بودن تابع توزیع متغیرهای مورد استفاده است. به همین علت، قبل از استفاده از روش‌ها، آزمون نرمال بودن داده‌های خام باید انجام شوند (Wang and Zuo, 2015). رایج‌ترین این روش‌ها، آزمون شاپیرو و ویلک^۱ (Shapiro and Wilk, 1965) و نمودارهای Q-Q^۲ هستند که در این پژوهش از نمودارهای Q-Q استفاده شده است.

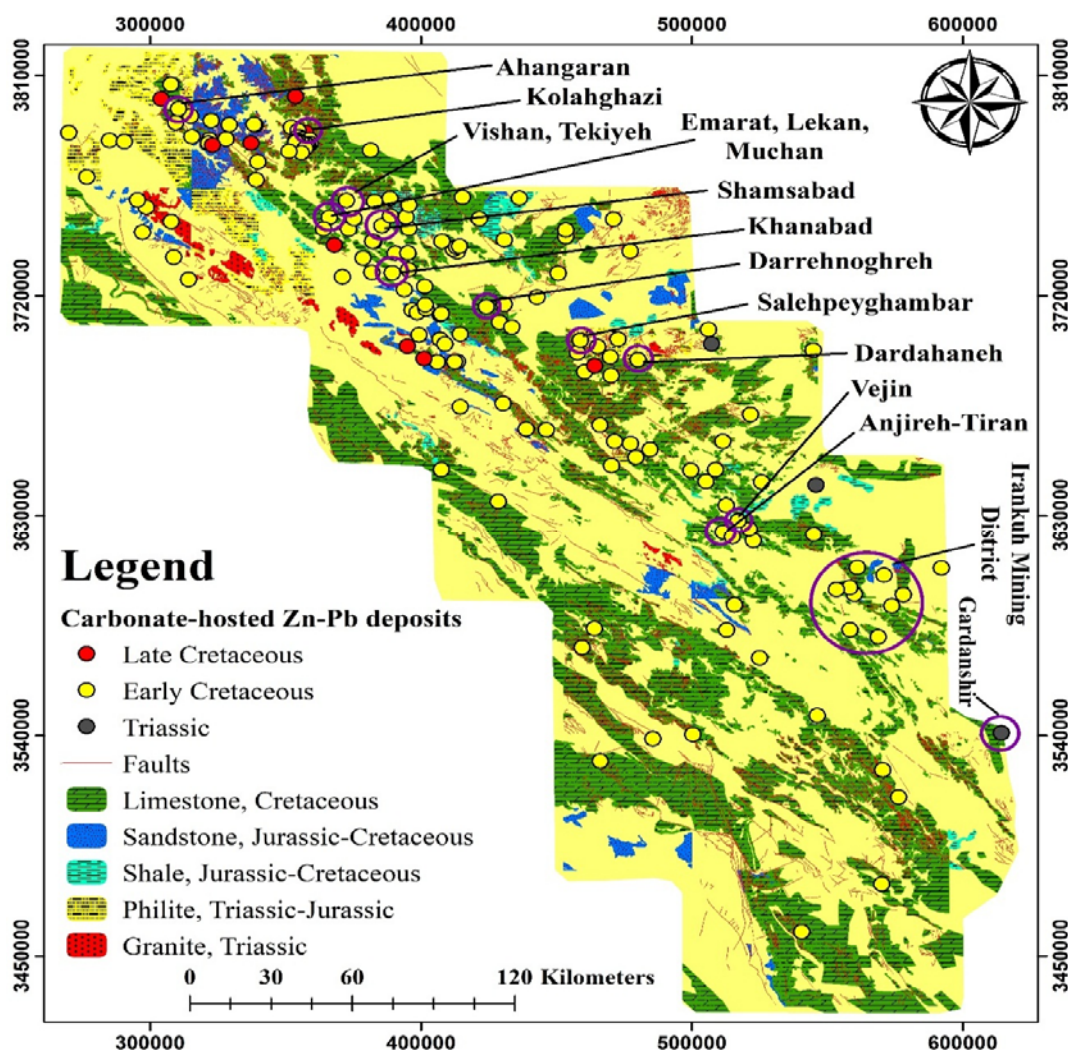
نمودارهای Q-Q تک عنصری که از رسوبات آبراهه‌ای پهنه ملایر-اصفهان برای فلزات سرب و روی به دست آمده‌اند، می‌تواند در مشخص کردن نقاط شکست جمعیت‌های ژئوشیمیایی و ثابت کردن دقت روش‌های انجام داده شده مفید واقع شوند (Cheng et al., 1994).

1. Shapiro and Wilk (S-W)

2. Quantile-Quantile Plots (Q-Q)

۴) فلزات سرب و روی چندین جمعیت ژئوشیمیایی را نشان می‌دهند که بر فرایندهای مختلف زمین‌شناختی و ژئوشیمیایی دلالت دارد. بنابراین با توجه به نرمال‌نبودن داده‌ها و مطابق آنچه گفته‌شد، استفاده از روش‌های مولتی‌فرکتالی و شاخص سینگلاریتی برای جدایش بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی دقت نتایج ما را نسبت به روش‌های آمار کلاسیک و انحراف مطلق از میانه افزایش می‌دهد (Zuo et al., 2009).

بدین صورت که اگر پس از رسم نمودار تمام داده‌ها روی خط مماس شوند، نشان‌دهنده نرمال‌بودن داده‌هاست (Liu et al., 2017). در این حالت استفاده از روش آمار کلاسیک و انحراف مطلق از میانه از دقت بالاتری برخوردار بوده و بی‌هنجاری کاذب کمتری از خود نشان می‌دهد. در صورتی که داده‌ها روی خط مماس نباشند، گواه بر این است که داده‌ها نرمال نیستند (Nazarpour et al., 2015). در این پژوهش، نمودارهای Q-Q توسط نرم‌افزار SPSS برای فلزات سرب و روی منطقه مورد بررسی تهیه‌شد. مطابق (شکل



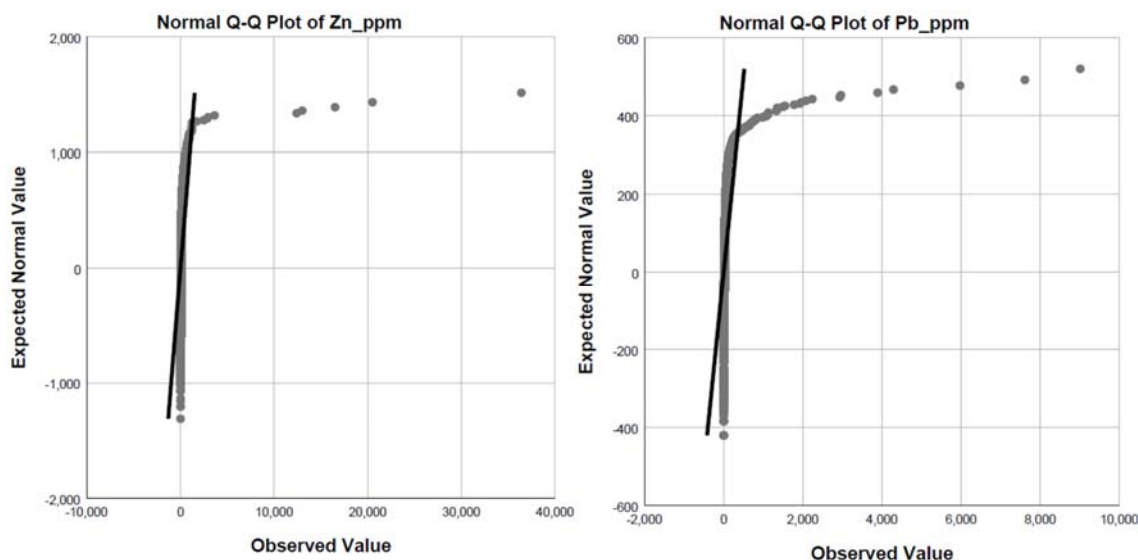
شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی کمربند فلززایی ملایر-اصفهان (Rajabi et al., 2012)

Fig. 3. Geological map of Malayer-Isfahan metallogenic belt (Rajabi et al., 2012).

جدول ۱. کانسارهای شاخص سرب و روی با سنگ میزبانه کربناته در پهنه ملایر-اصفهان (Momenzadeh et al., 1979؛ Rajabi et al., 2012)

Table 1. Major Cretaceous-hosted Zn-Pb deposits of Malayer-Isfahan Zone (Momenzadeh et al., 1979؛ Rajabi et al., 2012).

Deposits Feature	Ahangaran	Emarat	Irankuh Mining district	Muchan
Host rock	Dolomite, Sandstone	Limestone, Shale	Carbonate rock	Limestone
Host rock age	Early cretaceous	Early cretaceous	Early cretaceous	Early cretaceous
Alteration	Dolomite, Silica	Silica, Dolomite	Dolomite, Silica	Silica, Dolomite
Mineralization (Main)	Galena, Pyrite, Chalcopyrite, Pyrrhotite, Hematite	Sphalerite, Galena, Pyrite, Chalcopyrite	Sphalerite, Galena, Pyrite, Marcasite	Sphalerite, Galena, Pyrite, Chalcopyrite
Mineralization (Secondary)	Sphalerite, Marcasite, Chalcocite, Magnetite	Quartz, Calcite, Dolomite, Hematite	Dolomite, Ankerite, Quartz, Iron oxide and manganese	Baryte, Calcite, Dolomite, Hematite
Metal elements	Pb, Zn, Ag, Fe	Pb, Zn	Pb, Zn, Ag, Fe	Pb, Zn
Mineralization style	Stratiform	Stratiband	(Stratiform) Epigenetics, in faults	Stratiband
Size (Mt)	1.52 (Pb=3.7%)	10 (Pb=6%, Zn=2.2%)	20 (Pb=11%, Zn=2.5%)	0.1 (Pb=7%, Zn=1.7%)



شکل ۴. نمودار Q-Q داده‌های خام ژئوشیمیایی فلزات سرب و روی در پهنه ملایر-اصفهان که نشان‌دهنده چندین جمعیت ژئوشیمیایی است.

Fig. 4. Q-Q diagrams are geochemical raw data of Pb and Zn metals in Malayer-Isfahan zone representing several geochemical populations.

روش‌های جداسازی بی‌هنجاری از زمینه

(۱) روش آمار کلاسیک

روش آمار کلاسیک روشی نسبتاً قدیمی است که به روش غیر ساختاری معروف است و فقط مقدار اندازه‌گیری شده برای هر داده مورد توجه قرار می‌گیرد و موقعیت مکانی نمونه در نظر گرفته نمی‌شود (Nazarpour et al., 2015). یعنی در واقع اصول محاسبات آماری در این روش در یک چهارچوب مشخص و استاندارد قرار می‌گیرد و محاسبات و عملیات‌ها فقط بر روی مقدار اندازه‌گیری شده، انجام می‌شود (Hassanpour

and Afzal, 2013). مطابق تجزیه و تحلیل آماری معمولاً میانگین را زمینه، میانگین + انحراف معیار را حد آستانه، میانگین + دو برابر انحراف معیار را به‌عنوان بی‌هنجاری احتمالی و میانگین + سه برابر انحراف معیار را بی‌هنجاری ممکن در نظر می‌گیرند (Hashemi Marand et al., 2018). در این پژوهش با استفاده از روش آماری کلاسیک، پس از محاسبه مؤلفه‌های آماری (جدول ۲) برای فلزات مورد نظر، مقادیر زمینه، حد آستانه و بی‌هنجاری در سطوح احتمالی، ممکن و قطعی محاسبه شده است.

جدول ۲. محاسبه مؤلفه‌های آماری برای فلزات سرب و روی در پهنه ملایر-اصفهان

Table 2. Calculation of statistical parameters for Pb and Zn metals in the Malayer-Esfahan zone

Metals	Min	Max	Mean	Median	σ^2	σ
Pb (ppm)	0.62	8930	31.39	20	121.95	14874
Zn (ppm)	0.66	36114	100.70	80.23	352.73	124421.57

به‌عنوان مقدار زمینه در نظر گرفت (Hassanpour and Afzal, 2013). با توجه به مطالب گفته‌شده در بالا و مؤلفه‌های آماری محاسبه‌شده، تفکیک جوامع بی‌هنجاری از زمینه برای فلزات سرب و روی در کمربند ملایر-اصفهان با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و تکنیک وزندهی به شیوه معکوس^۱ (Mehrnia, 2016) مطابق شکل ۵ انجام شد.

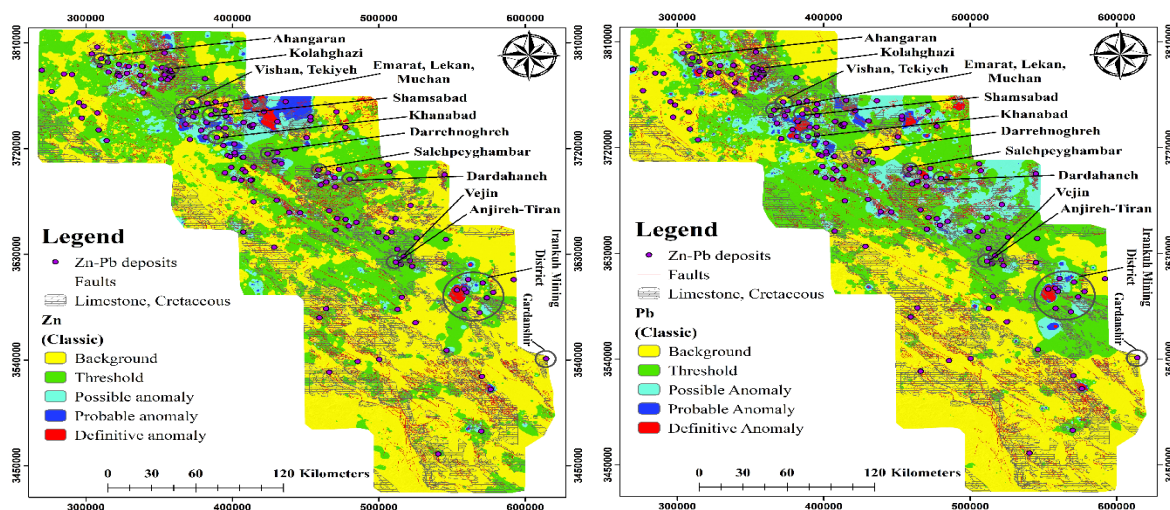
پس از محاسبه مؤلفه‌های آماری (جدول ۲)، تقسیم‌بندی جوامع ژئوشیمیایی برحسب مقدار میانگین و انحراف معیار برای فلزات سرب و روی مطابق جدول ۳ به‌دست آمد. با استفاده از آن می‌توانیم به جداسازی بی‌هنجاری‌های سرب و روی در منطقه مورد بررسی بپردازیم. در اینجا مقدار میانگین برای فلزات سرب ۳۱/۹۳ ppm و روی ۱۰۰/۷۰ ppm است که می‌توان آن را

جدول ۳. تقسیم‌بندی جوامع ژئوشیمیایی برحسب مقدار میانگین و انحراف معیار (آمار کلاسیک) برای فلزات سرب و روی در پهنه ملایر-اصفهان

Table 3. Geochemical communities divided by mean and standard deviation (classical statistics) for Pb and Zn metals in the Malayer-Isfahan zone

Metal	Background	Threshold	Possible anomaly	Probable anomaly	Definitive anomaly
Pb (ppm)	Min-Mean= 31.39	Mean+SDEV= 153.35	Mean+2SDEV= 275.30	Mean+3SDEV= 397.26	≥ 397.26
Zn (ppm)	Min-Mean= 100.70	Mean+SDEV= 435.44	Mean+2SDEV= 806.176	Mean+3SDEV= 1158.91	≥ 1159.91

1. Inverse Distance Weighted (IDW)



شکل ۵. نقشه توزیع جوامع ژئوشیمیایی فلزات سرب و روی بر اساس روش آمار کلاسیک در پهنه ملایر-اصفهان

Fig. 5. Distribution map of geochemical communities of Pb and Zn metals based on classical statistical method in the Malayer-Isfahan zone

رابطه ۲: $N (\geq C) \propto p^{-\beta}$

در رابطه ۲، N و C به ترتیب غلظت و فراوانی عیار عنصر موردنظر است، همچنین، $N (\geq C)$ برابر با تعداد نمونه‌هایی است که دارای عیار مساوی و یا بالاتر از C هستند و p برابر عیار و β برابر بعد فرکتال است (Afzal et al., 2017b). برتری این روش این است که قبل از تخمین و با داده‌های خام محاسبات را انجام می‌دهد. به عبارتی، در این روش، داده‌ها نیاز به پردازش و تخمین ندارند (Cheng et al., 1997). بر اساس مدل‌های فرکتالی عیار-تعداد، نمودارهای لگاریتمی برای فلزات سرب و روی در شکل ۷ ترسیم شده است.

منحنی فرکتال عیار-تعداد برای فلز سرب، نشان‌دهنده شش جمعیت ژئوشیمیایی مختلف در کمربند فلززایی ملایر-اصفهان است. بر اساس نقاط شکست به‌دست آمده در نمودار لگاریتمی عیار-تعداد فلز سرب (شکل ۷)، توزیع جوامع ژئوشیمیایی مختلف فلز سرب در شکل ۸ مشخص شده است. جامعه اول و دوم با شیب نزدیک به خط افق، دامنه عیار بین ۲۵/۱۱ تا ۷۹/۴۳ ppm را نشان می‌دهد که مقدار زمینه فلز سرب در منطقه موردنظر است. جامعه سوم و چهارم نیز دامنه عیار بین ۲۲۳/۸۷ تا

۲) روش انحراف مطلق از میانه

نخستین بار توکی (Tukey, 1977)، داده کاوی اکتشافی را برای آنالیز و تفسیر داده‌های تک متغیره‌ای که از الگوی توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند، معرفی کرد. نمودار جعبه‌ای و روش انحراف مطلق از میانه از روش‌های تحلیل اکتشافی داده‌ها به‌شمار می‌روند که برای جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی از زمینه، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Carranza, 2009).

این روش نسبت به روش آمار کلاسیک حساسیت کمتری نسبت به وجود داده‌های خارج از ردیف از خود نشان نمی‌دهد (Zuo, 2014a). جدایش بی‌هنجاری از زمینه با استفاده از این روش با رابطه ۱ و مطابق جدول ۴ و شکل ۶ محاسبه شده است:

رابطه ۱: $MAD = \text{median} [| \bar{X}_i - \text{median} (\bar{X}_i) |]$

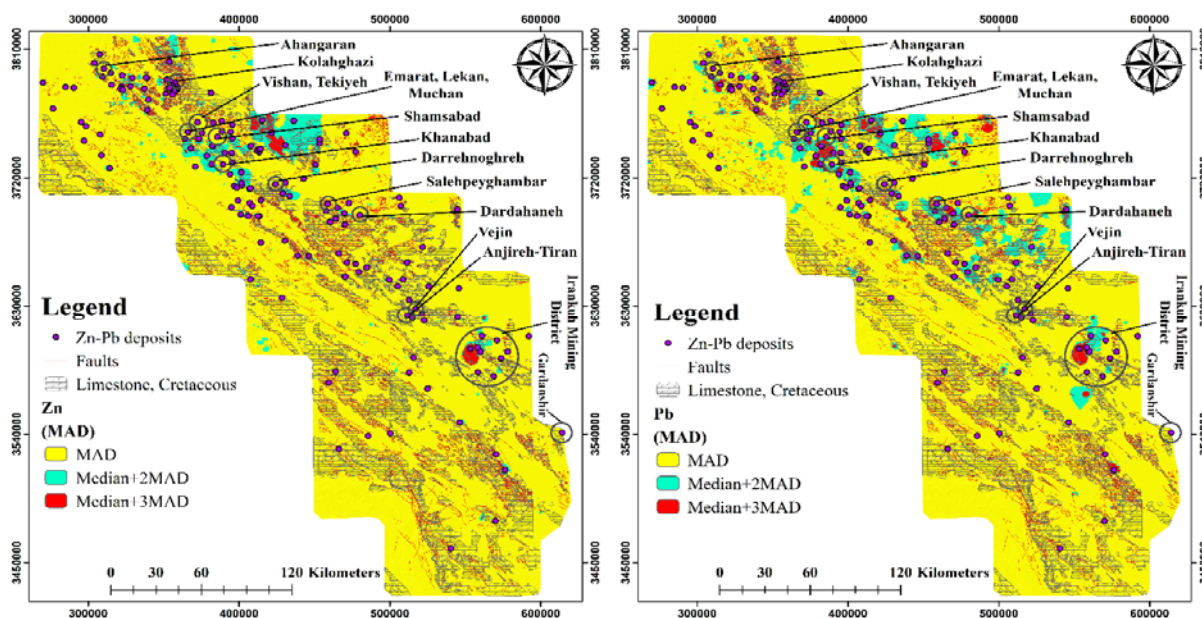
۳) روش فرکتال عیار-تعداد

روش فرکتالی عیار-تعداد بر اساس رابطه معکوس بین عیار و فراوانی تجمعی هر عیار و عیارهای بالاتر از آن است. این روش بر اساس رابطه ۲ معرفی می‌شود (Deng et al., 2010):

۵۶/۲۳ تا ۱۱۲/۲۰ ppm و همچنین مقدار زمینه فلز سرب را در منطقه نشان می‌دهد. جمعیت سوم که مقدار بی‌هنجاری متوسط فلز روی را نشان می‌دهد، دارای دامنه عیار بین ۱۱۲/۲۰ تا ۵۰۱/۱۸ ppm است. جامعه چهارم نشان‌دهنده دامنه عیار بین ۵۰۱/۱۸ تا ۷۹۴/۳۲ ppm و مقدار بی‌هنجاری بالا در منطقه است. جمعیت آخر که شیب آن نزدیک به خط عمود است، بیشترین نوع بی‌هنجاری را در منطقه نشان می‌دهد و دارای عیار بالاتر از ۷۹۴/۳۲ ppm است. همچنین حد آستانه‌های به‌دست آمده از روش فرکتال عیار-تعداد برای فلزات سرب و روی در جدول ۵ مشخص شده است.

۵۶۲/۳۴ ppm را بیان می‌کند که این مقدار در واقع حد متوسط بی‌هنجاری را در منطقه نشان می‌دهد. جامعه پنجم با نشان‌دادن دامنه عیار بین ۵۶۲/۳۴ تا ۸۹۱/۲۵ ppm حد بی‌هنجاری بالا را در منطقه نشان می‌دهد. جمعیت ششم که شیب آن نزدیک به خط عمود است، نشان‌دهنده شدیدترین نوع بی‌هنجاری در منطقه و دارای عیار بالاتر از ۸۹۱/۲۵ ppm است.

بر اساس نقاط شکست به‌دست آمده از نمودار لگاریتمی عیار-تعداد فلز روی (شکل ۷) که میزان تغییر در لیتولوژی منطقه مورد بررسی را بیان می‌کند و نمودار دچار شکست می‌شود، توزیع جوامع ژئوشیمیایی مختلف فلز روی در شکل ۸ تعیین شده است. جامعه اول و دوم با شیبی نزدیک به خط افق، دامنه عیار بین



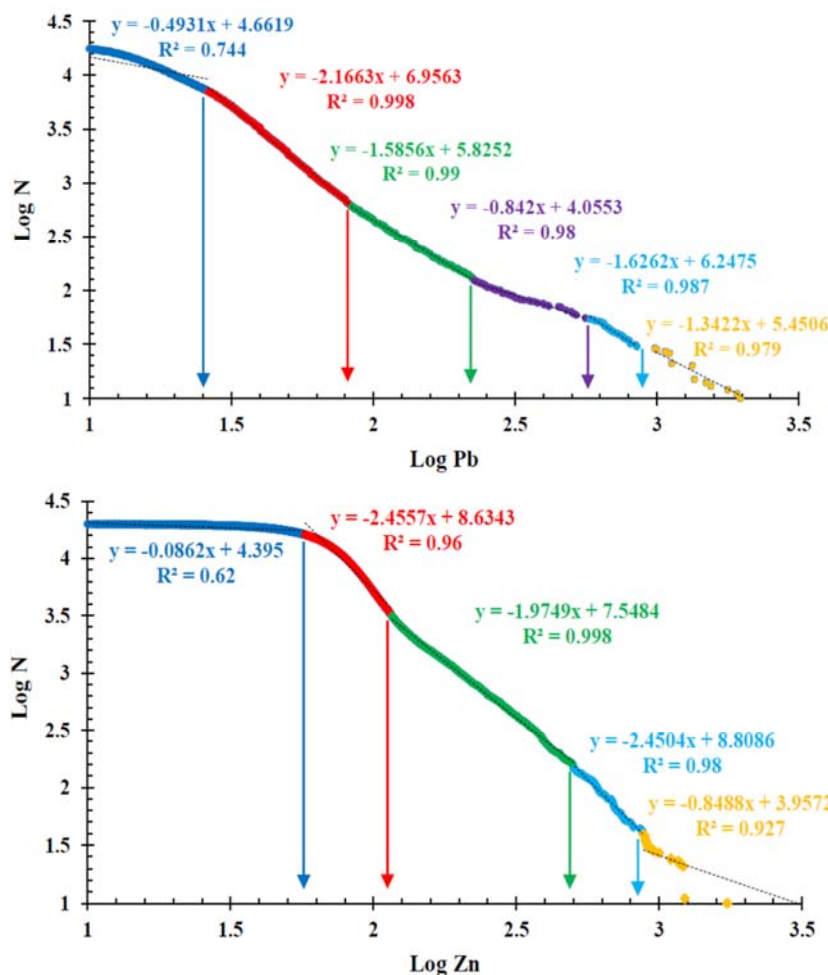
شکل ۶. نقشه توزیع جوامع ژئوشیمیایی فلزات سرب و روی بر اساس روش انحراف مطلق از میانه در پهنه ملایر-اصفهان

Fig. 6. Distribution map of geochemical communities of Pb and Zn metals based on classical statistical method MAD in the Malayer-Isfahan zone

جدول ۴. تقسیم‌بندی جوامع ژئوشیمیایی بر اساس روش انحراف مطلق از میانه در پهنه ملایر-اصفهان

Table 4. Division of geochemical communities based on the MAD method in the Malayer-Isfahan zone

Metal	Background	Threshold	Anomaly
Pb (ppm)	MAD = 53.83	Median + 2MAD = 127.66	Median + 3MAD = 181.49
Zn (ppm)	MAD = 180.14	Median + 2MAD = 440.53	Median + 3MAD = 620.68



شکل ۷. نمودار لگاریتمی عیار-تعداد فلزات سرب و روی در پهنه ملایر-اصفهان

Fig. 7. Logarithmic graph concentration-number (C-N) of Pb and Zn metals in the Malayer-Isfahan zone

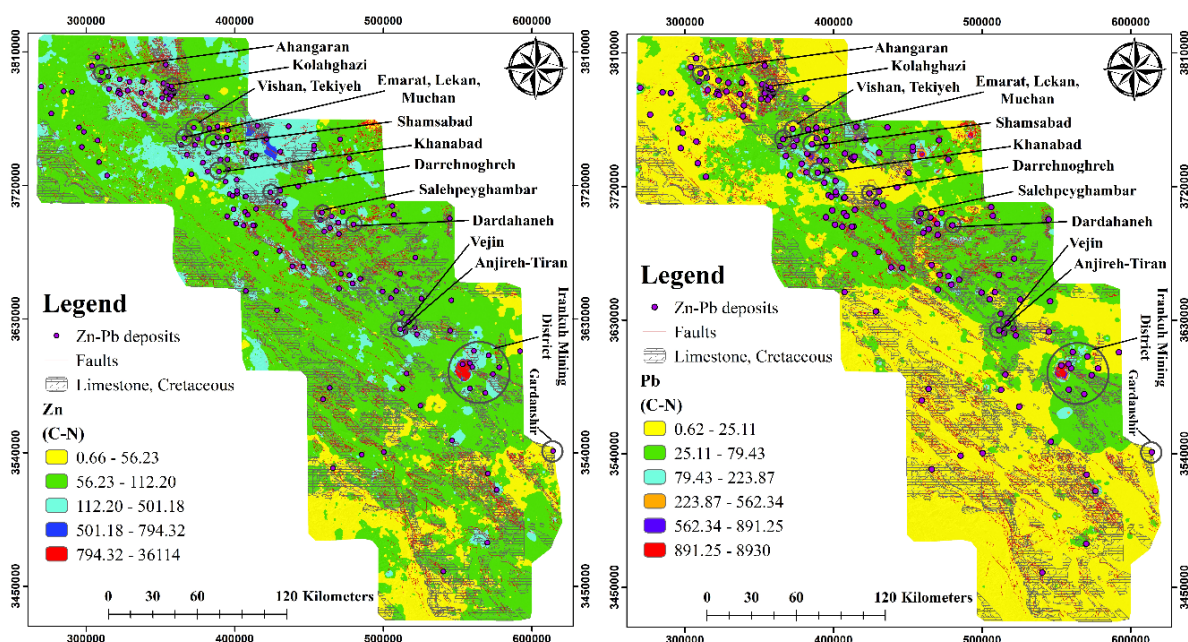
پنجمین جمعیت ژئوشیمیایی و برای فلز روی از جمعیت اول به چهارمین جمعیت ژئوشیمیایی افزایش پیدا می‌کند (شکل ۷) که نشان‌دهنده افزایش عیار، پیکسل‌ها (ارزش پیکسل‌ها)، مساحت احاطه‌شده در مناطق همراه با کانده‌زایی با سرعت بیشتری نسبت به مناطق بدون کانده‌زایی کاهش می‌یابد. محدوده ژئوشیمیایی به‌دست آمده برای فلزات سرب و روی که از روش عیار-تعداد به‌دست آمده است، با لیتولوژی کربناته (آهک‌های کرتاسه) که در شکل گرفتن بی‌هنجاری‌ها نقش دارند، در ارتباط است (شکل ۸).

علت متفاوت بودن تقسیم‌بندی روش‌های مولتی‌فرکتالی با روش‌های کلاسیک، مشکل اساسی روش آمار کلاسیک و انحراف مطلق از میانه است که فقط یک حد آستانه تعیین و مقدار آنومالی و زمینه از هم تفکیک می‌شود. به‌طوری‌که این روش‌ها جمعیت‌های ژئوشیمیایی مختلف را نادیده گرفته و یا به بروز خطا در جداسازی آنومالی منجر می‌شود؛ درحالی‌که روش‌های مولتی‌فرکتالی با جداسازی و تفکیک جمعیت‌های ژئوشیمیایی باعث می‌شود که آنومالی‌های متوسط، بالا و شدید از مقدار زمینه جدا شود (جدول ۵). در مدل فرکتالی عیار-تعداد به‌دست آمده برای فلز سرب، بعد فرکتال از جمعیت اول به

جدول ۵. جداسازی بی‌هنجاری از زمینه فلزات سرب و روی بر اساس روش فرکتال عیار-تعداد در پهنه ملایر-اصفهان

Table 5. Separation of geochemical anomalies from background of Pb and Zn metals based on concentration-number (C-N) fractal method in the Malayer-Isfahan zone

Metal	Concentration range (C-N)	Geochemical interpretation
Pb (ppm)	25.11-79.43	Background
	223.87-562.34	Medium anomaly
	562.34-891.25	High anomaly
	891.25 >	Strong anomaly
Zn (ppm)	56.23-112.20	Background
	112.20-501.18	Medium anomaly
	501.18-794.32	High anomaly
	794.32 >	Strong anomaly



شکل ۸. نقشه توزیع جوامع ژئوشیمیایی فلزات سرب و روی بر اساس روش فرکتال عیار-تعداد در پهنه ملایر-اصفهان

Fig. 8. Distribution map of geochemical communities of Pb and Zn metals based on concentration-number (C-N) fractal in the Malayer-Isfahan zone

معادله توانی را مطابق رابطه ۳ ارائه کرد (Cheng and Agterberg, 1996).

$$A(>p) \propto p^{-(D)} \quad \text{رابطه ۳:}$$

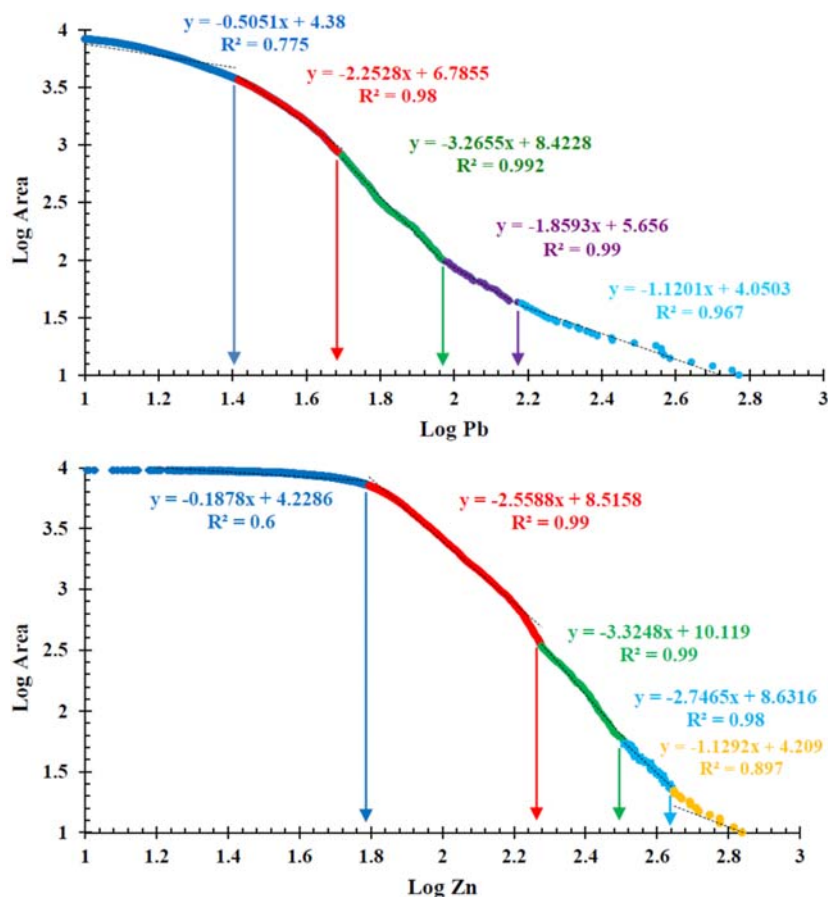
مقدار D در حقیقت نشان دهنده بعد فرکتالی مربوط به دامنه‌های متفاوت p را نشان می‌دهد. با ترسیم تغییرات مساحت در برابر عیار، در نمودار لگاریتمی، می‌توان بعد هر جامعه را از طریق

۴) روش فرکتال عیار-مساحت

روش فرکتالی عیار-مساحت مبتنی بر میزان مساحتی است که هر عیار خاص در منطقه مورد بررسی اشغال کرده است (Ghezelbash and Maghsoudi, 2018). هرچه عیار عنصر افزایش یابد میزان مساحت اشغالی توسط آن کاهش می‌یابد. اگر مقدار هر کانتور p در نظر گرفته شود، می‌توان یک

بر اساس مدل فرکتالی عیار-مساحت، نمودار لگاریتمی فلزات سرب و روی در شکل ۹ ارائه شده است.

شیب خط برازش به آن محاسبه کرد (Nazarpour et al., 2015).



شکل ۹. نمودار لگاریتمی عیار-مساحت فلزات سرب و روی در پهنه ملایر-اصفهان

Fig. 9. Logarithmic graph concentration-area (C-A) of Pb and Zn metals in the Malayer-Isfahan zone

بی‌هنجاری بالا در منطقه است. جمعیت آخر که شیب آن نزدیک به خط عمود است، بیشترین نوع بی‌هنجاری را در منطقه نشان می‌دهد و دارای عیار بالاتر از ۱۴۱/۲۵ ppm است. بر اساس نقاط شکست به‌دست آمده از نمودار لگاریتمی عیار-مساحت فلز روی (شکل ۹)، توزیع جوامع ژئوشیمیایی مختلف فلز روی در شکل ۱۰ تعیین شده است. جامعه اول و دوم با شیبی نزدیک به خط افق، دامنه عیار بین ۶۳/۰۹ تا ۱۷۷/۸۲ ppm و همچنین مقدار زمینه فلز روی را در منطقه نشان می‌دهد. جمعیت

بر اساس نقاط شکست به‌دست آمده از نمودار لگاریتمی عیار-مساحت فلز سرب در شکل ۹، توزیع جوامع ژئوشیمیایی مختلف این فلز در شکل ۱۰ تعیین شد. جامعه اول و دوم با شیبی نزدیک به خط افق، دامنه عیار بین ۲۵/۱۱ تا ۵۰/۱۱ ppm و همچنین مقدار زمینه فلز سرب را در منطقه نشان می‌دهد. جمعیت سوم که مقدار بی‌هنجاری متوسط فلز سرب را نشان می‌دهد، دارای دامنه عیار بین ۵۰/۱۱ تا ۸۹/۱۲ ppm است. جامعه چهارم نشان‌دهنده دامنه عیار بین ۸۹/۱۲ تا ۱۴۱/۲۵ ppm و مقدار

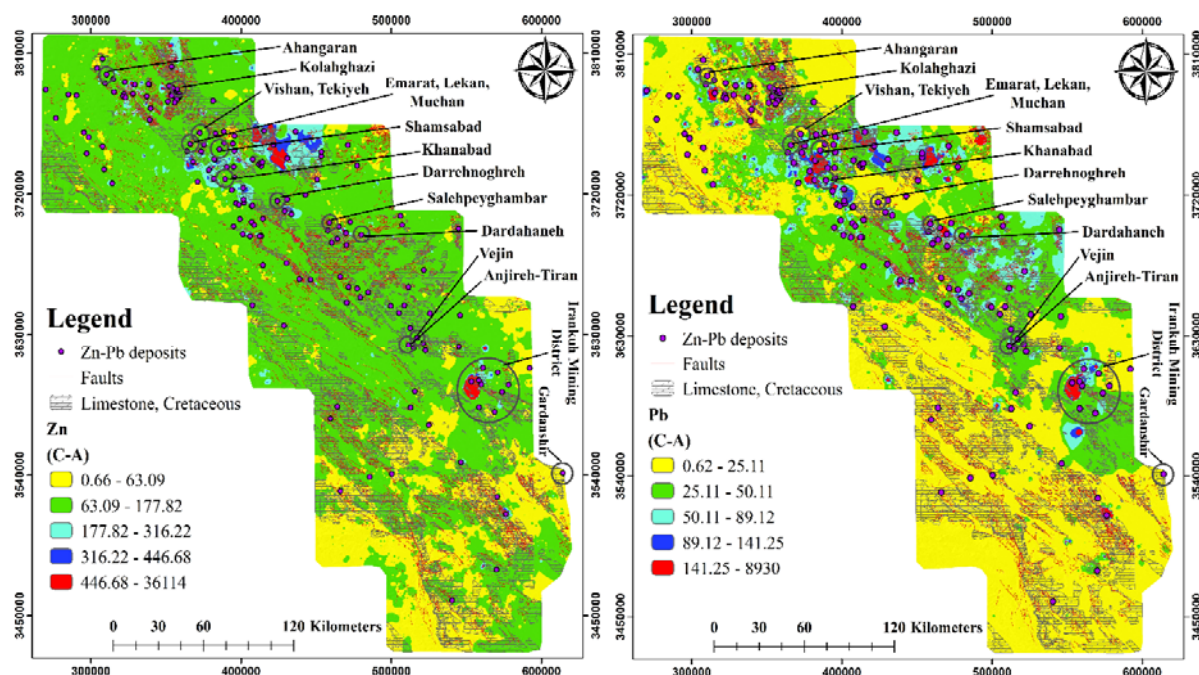
سوم که مقدار بی‌هنجاری متوسط فلز روی را نشان می‌دهد دارای دامنه عیار بین ۱۷۷/۸۲ تا ۳۱۶/۲۲ ppm است. جامعه چهارم نشان‌دهنده دامنه عیار بین ۳۱۶/۲۲ تا ۴۴۶/۶۸ ppm و مقدار بی‌هنجاری بالا در منطقه است. جمعیت آخر که شیب آن نزدیک به خط عمود است، بیشترین نوع بی‌هنجاری را در منطقه نشان می‌دهد و دارای عیار بالاتر از ۴۴۶/۶۸ ppm است. همچنین حد آستانه‌های ژئوشیمیایی فلزات سرب و روی بر اساس روش فرکتال عیار-مساحت در جدول ۶ مشخص شده است. جمعیت ژئوشیمیایی اول به‌دست آمده برای فلز سرب، با آنچه که از مدل فرکتال عیار-تعداد به‌دست آمده، سازگار است. آستانه جمعیت دوم از معادل آنچه در مدل عیار-تعداد به‌دست آمده، بیشتر است که نشان‌دهنده این است که مدل عیار-مساحت، مساحت بزرگ‌تری با عیار بالاتر نشان می‌دهد. در مدل عیار-مساحت بعد فرکتال از جمعیت اول به چهارمین جمعیت ژئوشیمیایی افزایش پیدا می‌کند (شکل ۹) که نشان‌دهنده افزایش عیار، پیکسل‌ها (ارزش پیکسل‌ها)، مساحت احاطه‌شده در مناطق همراه با کانه‌زایی است که با سرعت بیشتری نسبت به مناطق بدون کانه‌زایی کاهش می‌یابد.

جمعیت ژئوشیمیایی اول به‌دست آمده برای فلز روی با آنچه که از مدل فرکتال عیار-تعداد به‌دست آمده، سازگار است. آستانه جمعیت دوم از معادل آنچه در مدل عیار-تعداد به‌دست آمده، کمتر است که نشان‌دهنده این است که مدل عیار-مساحت، مساحت کوچک‌تری را با عیار بالاتر نشان می‌دهد. در مدل عیار-مساحت به‌دست آمده برای فلز روی مانند فلز سرب بعد فرکتال، از جمعیت اول به چهارمین جمعیت ژئوشیمیایی افزایش پیدا می‌کند (شکل ۹) که نشان‌دهنده افزایش عیار، پیکسل‌ها (ارزش پیکسل‌ها)، مساحت احاطه‌شده در مناطق همراه با کانه‌زایی است که با سرعت بیشتری نسبت به مناطق بدون کانه‌زایی کاهش می‌یابد. بعد فرکتال محاسبه‌شده از مدل‌های عیار-تعداد و عیار-مساحت باهم متفاوت هستند که تأییدکننده توزیع ناهمسان عیار در منطقه مورد بررسی است. محدوده ژئوشیمیایی به‌دست آمده برای فلزات سرب و روی که از روش عیار-مساحت به‌دست آمده است، مانند روش عیار-تعداد با واحد آهک کرتاسه که در شکل گرفتن بی‌هنجاری‌ها نقش دارند، در ارتباط است (شکل ۱۰).

جدول ۶. تعیین حد آستانه‌ای فلزات سرب و روی بر اساس روش فرکتال عیار-مساحت در پهنه ملایر-اصفهان

Table 6. Determination of the threshold of Pb and Zn metals based on concentration-number (C-A) fractal method in the the Malayer-Isfahan zone

Metal	Concentration range (C-A)	Geochemical interpretation
Pb (ppm)	25.11-50.11	Background
	50.11-89.12	Medium anomaly
	89.12-141.25	High anomaly
	141.25 >	Strong anomaly
Zn (ppm)	63.09-177.82	Background
	177.82-316.22	Medium anomaly
	316.22-446.68	High anomaly
	446.68 >	Strong anomaly



شکل ۱۰. نقشه توزیع جوامع ژئوشیمیایی فلزات سرب و روی بر اساس روش فرکتال عیار-مساحت در پهنه ملایر-اصفهان

Fig. 10. Distribution map of geochemical communities of Pb and Zn metals based on concentration-area (C-A) fractal in the Malayer-Isfahan zone

اقلیدسی است (Agterberg, 2012). شاخص سینگولاریتی از شیب خط مستقیم برازش شده با جفت داده‌های ϵ و C در نمودار لگاریتمی تخمین زده می‌شود (Cheng, 2007). در این روش دو نوع بی‌هنجاری ضعیف و قوی مشخص می‌شود که بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی برداشت شده و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB باید مطابق مراحل زیر عمل کرد (Zuo et al., 2015):

(۱) موقعیتی روی نقشه با تعدادی از پنجره‌های متغیر $A(r)$ (مربع شکل) $r_{min}=r_1 < r_2 < \dots < r_n=r_{max}$ در نظر گرفته می‌شود و میانگین غلظت $C[A(r_i)]$ برای هر اندازه پنجره روی نقشه محاسبه می‌شود و

(۲) برای پیاده کردن داده‌های $C[A(r_i)]$ و r_i (i=1,...,n) در یک نمودار لگاریتمی از رابطه ۵ استفاده می‌کنیم (Wang and Zuo, 2018):

۵) روش شاخص سینگولاریتی

روش شاخص سینگولاریتی یکی دیگر از پیشرفت‌های مهم برای مدل‌سازی فرکتالی و مولتی فرکتالی داده‌های ژئوشیمیایی به حساب می‌آید (Sun et al., 2010).

سینگولاریتی قادر به تخمین زدن غلظت فلزات از طریق مشاهده پنجره‌های کوچک مجاور هم است. برای تخمین سینگولاریتی، از تعدادی پنجره‌ها (r_i) (به شکل مربع) برای اندازه‌گیری تراکم غلظت (عیار) (C) حول یک موقعیت خاص (Z_i) استفاده می‌شود (Xiao et al., 2018). مقدار سینگولاریتی برای پنجره‌های کوچک مجاور هم بر اساس رابطه ۴ به دست می‌آید (Zuo et al., 2015):

$$X = c \cdot \epsilon^{(\alpha - E)} \quad \text{رابطه ۴:}$$

در رابطه ۴، X نشان‌دهنده غلظت عنصر، C مقدار ثابت، α شاخص سینگولاریتی، ϵ اندازه فاصله نرمال شده و E بعد

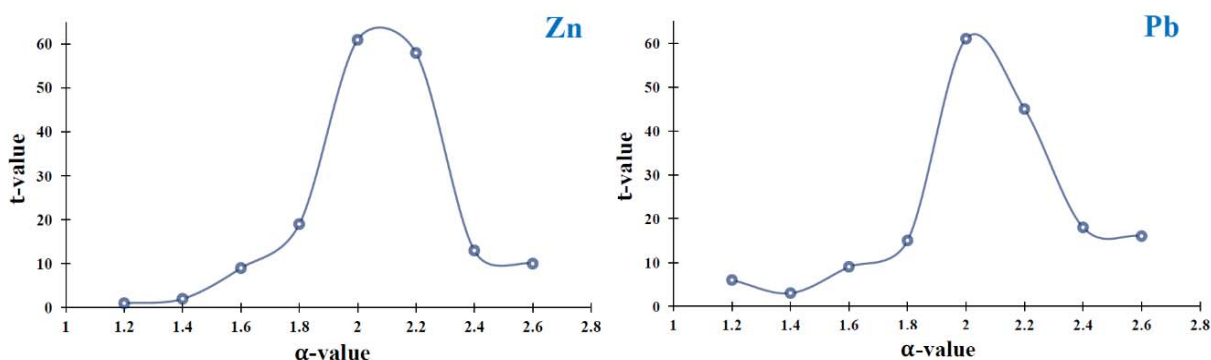
رابطه ۵: $\log C[A(r)] = C + (2 - \alpha) \log(r)$

مقدار $2 - \alpha$ را می‌توان از شیب خط راست به‌دست آورد.

۳) تکرار کردن روش‌های نام‌برده برای تمام قسمت‌های نقشه ژئوشیمیایی (Xiao et al., 2018).

برای یک نقشه ژئوشیمیایی، مقدار α (شاخص سینگولاریتی) نزدیک به ۲، توزیع نرمالی را نشان می‌دهد. درحالی‌که مناطقی با سینگولاریتی مثبت ($\alpha > 2$)، تهی‌شدگی و سینگولاریتی منفی ($\alpha < 2$)، غنی‌شدگی غلظت عناصر در منطقه موردنظر را نشان می‌دهد (Liu et al., 2019). در این روش، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، سینگولاریتی یک ماتریس سطر با ستون برابر را ایجاد می‌کند و منطقه مورد بررسی را به یک دسته مربع‌های کوچک تقسیم‌بندی می‌کند. سپس غلظت میانگین مربع‌ها را به‌عنوان غلظت تخمینی در نظر می‌گیرد. در این حالت، آثار بالادست و پایین‌دست منطقه نیز در نظر گرفته می‌شوند (Kananian et al., 2018). تولید این مربع‌های کوچک آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا به مربع بهینه برسد، زمانی به این امر دست پیدا می‌کند که بی‌هنجاری‌های به‌دست آمده با اندیس‌ها و نشانه‌های معدنی منطقه هم‌پوشانی بالایی نشان‌دهند (Xiao et al., 2018). در این روش برخلاف روش‌های آمار کلاسیک، انحراف مطلق از میانه و مولتی‌فرکتال عیار تعداد و عیار-مساحت، خروجی یک عدد با بازه کوچک است که این عدد همان ضریب سینگولاریتی (α) است (Sun

et al., 2010). بر اساس گفته چنگ (Cheng, 2007)، حد آستانه معمول در روش سینگولاریتی $\alpha = 1/96$ است. نمودار شواهد وزنی، مقدار سینگولاریتی (α) را در برابر مقدار t که در ارتباط با رخنمون‌های معدنی است، نشان می‌دهد (شکل ۱۲) (Zuo, 2014b). مقدار t از رابطه $C/S(C)$ با استفاده از نمودار شواهد وزنی به‌دست آمده است؛ جایی که $C = W^+ - W^-$ و $S(C)$ انحراف معیار C باشد. W^+ و W^- زمانی که مدل‌های اثبات شده‌ای باشند (به‌عنوان مثال بی‌هنجاری‌ها)، مقادیر وزن‌هایی هستند که از W^+ زمانی که یک رخنمون معدنی وجود داشته باشد و از W^- زمانی که رخنمون معدنی وجود نداشته باشد، استفاده می‌شود (Sun et al., 2010). t در واقع تعداد کانسارهای مربوط به عنصر مورد بررسی را نمایش می‌دهد و (α) مقدار سینگولاریتی به‌دست آمده مربوط به هر عنصر است. این نمودار بیان‌کننده این موضوع است که در کدام مقدار از بی‌هنجاری‌های به‌دست آمده از روش سینگولاریتی (α)، هم‌پوشانی بیشتری با کانسارهای سرب و روی موجود در منطقه وجود دارد (Zuo, 2014b). چنان‌که از نمودار شواهد وزنی (شکل ۱۱) پیداست، برای هر دو فلز سرب و روی مقدار α (شاخص سینگولاریتی) ۲ به‌دست آمده است که این مقدار بیانگر بیشترین میزان انطباق کانسارهای سرب و روی در کمربند فلزایی ملایر-اصفهان است.

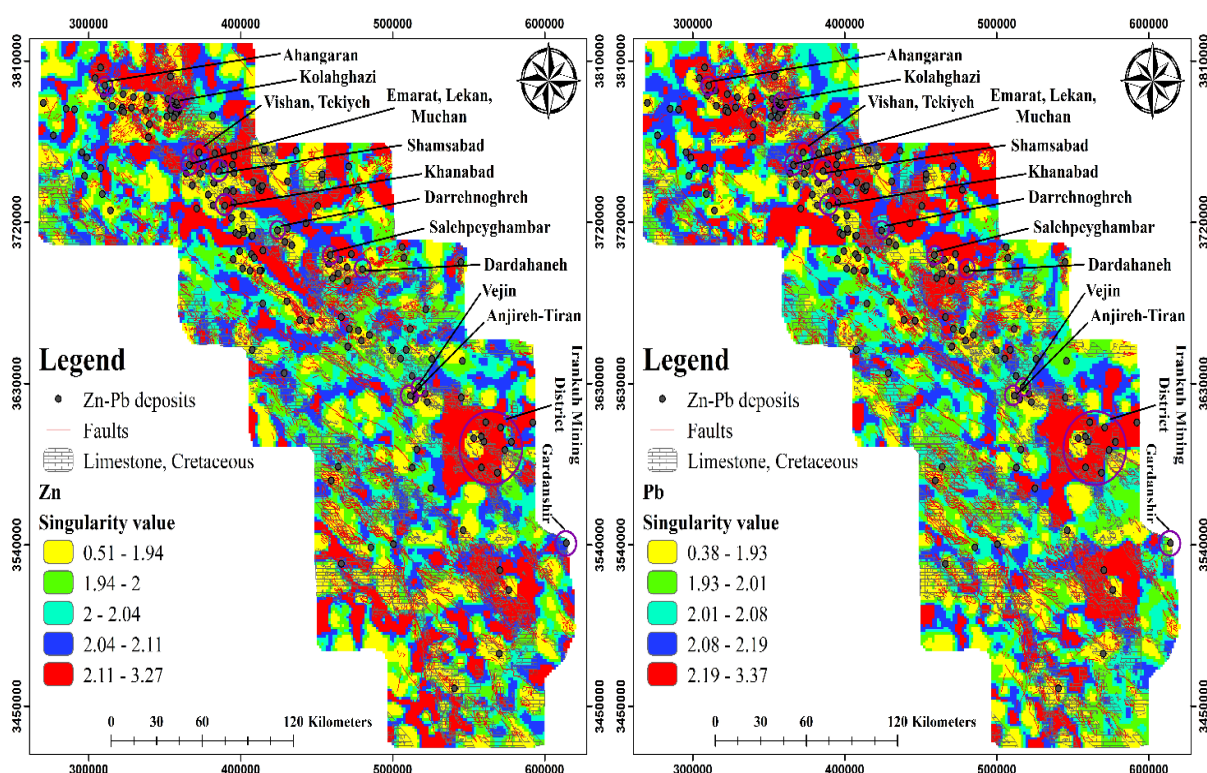


شکل ۱۱. نمودار T-Value فلزات سرب و روی برای بی‌هنجاری‌های به‌دست آمده از روش شاخص سینگولاریتی در پهنه ملایر-اصفهان

Fig. 11. T-Value graph for Pb and Zn metals for the anomalies obtained from the Singularity Index method in the Malayer-Isfahan zone

موجود در منطقه مورد بررسی را پوشش می‌دهد. همچنین در نقشه‌های به‌دست آمده از روش شاخص سینگولاریتی مشاهده می‌شود که جنوب شرق و شمال غرب منطقه مورد بررسی، بیشترین میزان بی‌هنجاری را داراست (شکل ۱۲).

علت تشابه این نمودار برای هر دو فلز این است که کانسارهای سرب و روی اغلب با یکدیگر تشکیل می‌شوند و شرایط تشکیل مشابهی دارند. در این پژوهش، حد آستانه به‌دست آمده از روش شاخص سینگولاریتی (α) مطابق نمودار شواهد وزنی برای فلزات سرب و روی ۲ است که بیشتر کانسارهای سرب و روی



شکل ۱۲. نقشه ژئوشیمیایی فلزات سرب و روی بر اساس روش شاخص سینگولاریتی در پهنه ملایر-اصفهان

Fig. 12. Geochemical map of Pb and Zn metals based on the method of Singularity Index (SI) in the Malayer-Isfahan zone

در روش آمار کلاسیک و انحراف مطلق از میانه، تفسیر و پردازش داده‌ها بر اساس غلظت و عیار داده‌های برداشت‌شده، است و موقعیت نمونه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. به همین علت احتمال دارد که بعضی از محدوده‌های معرفی شده توسط این روش‌ها به عنوان بی‌هنجاری کاذب باشند؛ درحالی که حد آستانه به‌دست آمده از مدل‌های فرکتالی، فراوانی مربوط به داده‌های ورودی (عیار عناصر مختلف) را نشان می‌دهد و مشخصات

مقایسه پراکندگی بی‌هنجاری‌های فلزات سرب و روی با استفاده روش‌های انجام‌شده

در این پژوهش برای جداسازی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی فلزات سرب و روی در کمر بند فلززایی ملایر-اصفهان از روش آمار کلاسیک، انحراف مطلق از میانه، مدل‌های فرکتالی عیار-تعداد و عیار-مساحت و روش شاخص سینگولاریتی استفاده شده است.

فضایی و هندسی منعکس شده توزیع را نیز بر اساس مدل فرکتالی عیار-تعداد و عیار-مساحت مشخص می‌سازد. در نتیجه با مقایسه بین مقادیر به دست آمده از آمار کلاسیک، انحراف مطلق از میانه، روش‌های مولتی فرکتالی و شاخص سینگولاریتی و همچنین بی‌هنجاری‌های معرفی شده توسط هریک از روش‌های یادشده، توانمندی روش سینگولاریتی در تعیین حدود آستانه دقیق، کاهش هزینه‌های اکتشافی و نتایج دقیق‌تر اثبات شد.

بی‌هنجاری‌های حاصل از روش آمار کلاسیک و انحراف مطلق از میانه بی‌هنجاری کاذب بیشتری نسبت به روش‌های فرکتالی عیار-تعداد و عیار-مساحت از خود نشان می‌دهند که این به علت توزیع نرمال، حذف تعدادی از داده‌ها به عنوان خارج از ردیف و عدم توجه به توزیع فضایی داده‌هاست. در تفکیک جوامع بی‌هنجاری برای فلزات سرب و روی، در هر دو روش فرکتالی عددهای بزرگ‌تر و محدوده‌های کوچک‌تری را نسبت به روش آمار کلاسیک و انحراف مطلق از میانه از خود نشان می‌دهد که علت این است که روش فرکتال، ساختار فضایی داده‌ها را نیز مورد توجه قرار می‌دهد؛ در حالی که در روش آمار کلاسیک و انحراف مطلق از میانه این چنین نیست. روش‌های آمار کلاسیک، انحراف مطلق از میانه و مولتی فرکتالی عیار-تعداد و عیار-مساحت در مناطقی نتایج بهتری از خود نشان می‌دهد که بی‌هنجاری زمینه ساده باشد؛ یا به عبارتی خیلی شدید نباشد. اما در مناطقی که ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده و آلتراسیون‌های شدید وجود داشته باشد، این روش در شناسایی بی‌هنجاری‌های شدید، دچار مشکل می‌شود (Zuo, 2014b). در این حالت باید منطقه مورد بررسی را به مناطق کوچکی تقسیم کرد. سپس هر بخش را به صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار داد. حتی در این حالت هم امکان دارد نتایج مطلوب به دست نیاید. زمانی که منطقه مورد بررسی از لایه‌های رسوبی و یا از پوشش گیاهی شدید پوشیده شده باشد، این روش‌ها قادر به شناسایی بی‌هنجاری‌ها در این مناطق

نیست. به طور کلی روش‌های نام‌برده شده برخلاف روش شاخص سینگولاریتی در شناسایی بی‌هنجاری‌های شدید از دقت بالایی برخوردار نیستند. روش شاخص سینگولاریتی در مقایسه با سایر روش‌ها بی‌هنجاری‌های پنهان و دقیق بیشتری که مطابق با ساختارهای زمین‌شناسی منطقه هستند را برای ما مشخص می‌کند. برعکس سایر روش‌های یادشده، در مناطقی که ساختارهای زمین‌شناسی و لیتولوژی متعدد هستند، قادر به شناسایی بی‌هنجاری‌های ضعیف است که در این حالت باید از روش‌های دو بعدی استفاده کرد. به طور کلی در استفاده از روش سینگولاریتی این نکته حائز اهمیت است که برای این روش باید بهترین پنجره مورد استفاده قرار بگیرد؛ زیرا اندازه هر پنجره در نتیجه سینگولاریتی اثر مستقیم دارد.

در جدول ۷ که به خطای نوع ۱^۱ و خطای نوع ۲^۲ معروف است، حد آستانه‌های به دست آمده برای روش‌های آمار کلاسیک، انحراف مطلق از میانه، روش‌های مولتی فرکتال عیار-تعداد و عیار-مساحت و شاخص سینگولاریتی برای فلزات سرب و روی در پهنه فلز زایی ملایر-اصفهان مشخص شده و همچنین نشان داده شده است که کانسارها، نسب به بی‌هنجاری‌ها و زمینه به دست آمده در چه شرایطی قرار دارند (Sun et al., 2010). مطابق این جدول، دقت بالاتر روش سینگولاریتی کاملاً مشهود است؛ به طوری که در بی‌هنجاری‌های به دست آمده از مجموع ۱۷۳ کانسار و لندیس معدنی سرب و روی، برای فلز سرب ۴۵ درصد و فلز روی ۴۷ درصد کانسار و اندیس‌های معدنی در خارج از بی‌هنجاری در حد آستانه مشخص شده ($\alpha = 2$)، وجود دارد و همچنین با مقایسه میزان درصد بی‌هنجاری به دست آمده برای هر دو فلز سرب و روی در این روش (شاخص سینگولاریتی) با سایر روش‌ها نشان می‌دهد که بی‌هنجاری‌های پنهان و ضعیف در پهنه مورد نظر کاملاً آشکار شده‌اند.

1. Type 1 error

2. Type 2 error

جدول ۷. تعیین درصد کانسارهای شناخته شده سرب و روی در خارج از بی‌هنجاری‌های به دست آمده با روش‌های مختلف در پهنه ملایر-اصفهان

Table 7. Percentages of the known Zn-Pb deposits outside the anomalies determined by different methods in the Malayer-Isfahan zone

Metal		Mean+ $n\sigma$	MAD	C-N	C-A	SI
Pb	Threshold value	153.2 (ppm)	127.6 (ppm)	223.8 (ppm)	89.1 (ppm)	$\alpha(2)$
	Deposits outside anomalies (Total Zn-Pb deposits = 173)	107	128	140	138	79
	Percentage of deposits outside anomalies	62%	74%	81%	80%	45%
	Deposits inside anomalies (Total Zn-Pb deposits = 173)	66	45	33	35	94
	Percentage of deposits inside anomalies	38%	26%	19%	20%	55%
	Percentage of anomalies	16%	4%	3.06%	5.27%	70%
	Percentage of background	84%	96%	96.94%	94.73%	30%
Zn	Threshold value	435.4 (PPM)	440.5 (PPM)	501.1 (PPM)	316.2 (PPM)	$\alpha(2)$
	Deposits outside anomalies (Total Zn-Pb deposits = 173)	110	160	167	159	81
	Percentage of deposits outside anomalies	63%	92%	96%	92%	47%
	Deposits inside anomalies (Total Zn-Pb deposits = 173)	63	13	6	14	92
	Percentage of deposits inside anomalies	37%	8%	4%	8%	53%
	Percentage of anomalies	7%	2.7%	1.5%	3.1%	71%
	Percentage of background	93%	97.3%	98.5%	96.9%	29%

نتیجه‌گیری

نقشه‌های به دست آمده از روش سینگولاریتی، بی‌هنجاری‌های ضعیف و پنهان بهتر شناسایی شده و همچنین قسمت‌های زمینه، تهی شده و غنی شده کاملاً مشخص شده‌اند و بی‌هنجاری‌های مشخص شده انطباق خوبی با کانسارها و اندیس‌های معدنی سرب و روی موجود در منطقه مورد نظر دارند. نقشه‌های حاصل از هر پنج روش به کار گرفته شده (به خصوص روش شاخص سینگولاریتی) در جداسازی بی‌هنجاری‌های فلزات سرب و روی

مقایسه انطباق بی‌هنجاری‌های به دست آمده از پنج روش به کار گرفته شده و از طرفی کانسارها و اندیس‌های موجود، نشان‌دهنده این موضوع است که روش شاخص سینگولاریتی نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. با استفاده از نمودار شواهد وزنی توانستیم حد آستانه را برای فلزات سرب و روی ($\alpha = 2$) بر اساس روش سینگولاریتی به دست آوریم. در

(۱۲) با معادن شاخص سرب و روی پهنه ملایر-اصفهان، از جمله: کلاه قاضی، ویشان، امارت، موچان، آهنگران، خان‌آباد، شمس‌آباد به‌خصوص منطقه معدنی ایرانکوه واقع در ورقه ۱۰:۱۰۰۰۰۰ اصفهان (جنوب شرق پهنه ملایر-اصفهان) انطباق بسیار بالایی را نشان می‌دهد.

نشان‌داد که جنوب شرق و شمال غرب منطقه مورد بررسی، بیشترین میزان بی‌هنجاری را دارا است. بی‌هنجاری‌های به‌دست آمده از روش‌های مورد استفاده، انطباق بالایی با آهک‌های کرتاسه، دگرسانی‌های کربناتی و سیلیسی منطقه نشان می‌دهد. همچنین مناطق امیدبخش حاصل از روش سینگولاریتی (شکل

References

- Afzal, P., Ahmadi. K. and Rahbar. K., 2017a. Application of fractal-wavelet analysis for separation of geochemical anomalies. *Journal of African Earth Sciences*, 128: 27–36.
- Afzal, P., Yasrebi, A.B., Saein, L.D. and Panahi, S., 2017b. Prospecting of Ni mineralization based on geochemical exploration in Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 181: 294–304.
- Agterberg, F.P., 2012. Multifractals and geostatistics. *Journal of Geochemical Exploration*, 122: 113–123.
- Agterberg, F.P., Cheng, Q., Brown, A. and Good, D., 1996. Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet batholith, Manitoba. *Computers and Geosciences*, 22(5): 497–507.
- Boveiri Konari, M., Rastad, E. and Peter, J., 2017. A sub-seafloor hydrothermal syn-sedimentary to early diagenetic origin for the Gushfil Zn-Pb-(Ag-Ba) deposit, south Esfahan, Iran. *Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 194: 61–90.
- Carranza, E.J.M., 2009. Mapping of anomalies in continuous and discrete fields of stream sediment geochemical landscapes. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 10: 171–187.
- 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: 314–324.
- Cheng, Q. and Agterberg, F.P., 1996. Multifractal modeling and spatial statistics. *Mathematical Geology*, 28(1): 1–16.
- Cheng, Q. and Agterberg, F.P., 2009. Singularity analysis of ore-mineral and toxic traceelements in stream sediments, *Computers and Geosciences*, 35: 234–244.
- Cheng, Q., 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.
- Cheng, Q., Ping, Q. and Kenny, F., 1997. Statistical and fractal analysis of surface stream patterns in the Oak Ridges Moraine, Ontario, Canada. In *Proceedings of the International Association of Mathematical Geology Meeting*, University of Barcelona, Barcelona, Spain.
- Cheng, Q. and 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.
- Daliran, F., Pride, K., Walther, J., Berner, Z.A. and Bakker, R. J., 2013. The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: evidence for a two stage, hypogene zinc sulfide–zinc carbonate mineralization. *Ore Geology Reviews*, 53: 373–402.
- Delavar, S.T., Afzal, P., Borg, G., Rasa, I., Lotfi, M. and Omran, N.R., 2012. Delineation of mineralization zones using concentration–volume fractal method in Pb–Zn carbonate hosted deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 118: 98–110.
- Deng, J., Wang, Q., Yang, L., Wang, Y., Gong, Q. and Liu, H., 2010. Delineation and explanation of geochemical anomalies using fractal models in the Heqing area, Yunnan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 105(3): 1–16.

- 95-105.
- Ehya, F., Lotfi, M. and Rasa, I., 2010. Emarat carbonate-hosted Zn-Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(2): 186–194.
- Ghezelbash, R. and Maghsoudi, A., 2018. Comparison of U-spatial statistics and C-A fractal models for delineating anomaly patterns of porphyry-type Cu geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran. *Comptes Rendus Geoscience*, 350(4): 180–191.
- Hashemi marand, G., Jafari. M., Afzal. P. and Khakzad. A., 2018. Determination of relationship between silver and lead mineralization based on fractal modeling in Mehdiabad Zn-Pb-Ag deposit, Central Iran. *Journal of Earth Sciences*, 27(106): 111–118.
- Hassanpour, S. and 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.
- Hosseini-Dinani, H. and Aftabi, A., 2016. Vertical lithogeochemical halos and zoning vectors at Goushfil Zn-Pb deposit, Irankuh district, southwestern Isfahan, Iran: Implications for concealed ore exploration and genetic models. *Ore Geology Reviews*, 72: 1004–1021.
- Jafari, M.A., Kananian, A., Nazarpour, A. and Ghasemi, S., 2018. Comparison of concentration-area (C-A) fractal models and singularity index to separation Pb and Zn geochemical anomalies in the Arak 1:100000 geochemical sheet. The First National Conference of Iranian Geological Remote Sensing Society, 1(1): 210–215. (in Persian with English abstract)
- Kananian, A., Jafari, M.A. and Nazarpour, A., 2018. Discrimination of Pb and Zn geochemical anomalies using classical, multifractal (C-N) and (C-A) and singularity index statistical methods in Arak 1:100000 sheet. *Journal of Advanced Applied Geology*, 8(29): 63–74. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Alaminia, Z., Sevieri, A. and Stern, C., 2019. New hypothesis on time and thermal gradient of subducted slab with emphasis on dolomitic and shale host rocks in formation of Pb-Zn deposits of Irankuh-Ahangaran belt. *Journal of Economic Geology*, 10(2): 677–706. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Sevieri, A.E., Shabani, S. and Allaz, J.M., 2017. mineral chemistry, and ore-fluid conditions of Irankuh Pb-Zn mining district, south of Isfahan. *Journal of Economic Geology*, 9(2): 267–294. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H. and Sadeghi, M., 2018. Dehydration of hot oceanic slab at depth 30–50 km: KEY to formation of Irankuh-Emarat PbZn MVT belt, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 194: 88–103.
- Leach, D.L., Bradley, D., Lewchuk, M.T., Symons, D.T., de Marsily, G. and Brannon, J., 2001. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time: implications from recent age-dating research. *Mineralium Deposita*, 36(8): 711–740.
- Liaghat, S., Moore, F. and Jami, M., 2000. The Kuh-e-Surmeh mineralization, a carbonate-hosted Zn-Pb deposit in the simply folded belt of the Zagros Mountains, SW Iran. *Mineralium Deposita*, 35(1): 72–78.
- Lima, A., 2008. Evaluation of geochemical background at regional and local scales by fractal filtering technique: case studies in selected Italian areas. In: B. De Vivo, H.E. Belkin and A. Lima, (Editors), *Environmental Geochemistry: Site Characterization, Data Analysis, Case Histories*, Elsevier, Amsterdam, pp. 135–152.
- Liu, Y., Zhou, K. and Cheng, Q., 2017. A new method for geochemical anomaly separation based on the distribution patterns of singularity indices. *Computers and Geosciences*, 105: 139–147.
- Liu, Y., Xia, Q. and Carranza, E.J.M., 2019. Integrating sequential indicator simulation and singularity analysis to analyze uncertainty of geochemical anomaly for exploration targeting of tungsten polymetallic mineralization, Nanling belt, South China. *Journal of Geochemical Exploration*, 197: 143–158.
- Mandelbrot, B.B., 1983. *The fractal geometry of nature*. Freeman, San Francisco, 495 pp.
- Mehrnia, S.R., 2016. Application of Fractal Technique for Analysis of Geophysical – Geochemical Databases in Tekieh Pb-Zn Ore Deposit (SE of Arak). *Journal of Economic Geology*, 8(2): 325–342. (in Persian with

- English abstract)
- Momenzadeh, M., 1976. Stratabound lead–zinc ores in the lower Cretaceous and Jurassic sediments in the Malayer–Esfahan district (west central Iran), lithology, metal content, zonation and genesis. Ph.D. thesis, University of Heidelberg, Heidelberg, Germany, 300 pp.
- Momenzadeh, M., Shafighi, S., Rastad, E. and Amstutz, G., 1979. The Āhangarān lead-silver deposit, SE-Malāyer, West Central Iran. *Mineralium Deposita*, 14(3): 323–341.
- Movahednia, M., Rastad, E., Rajabi, A. and Choulet, F., 2017. Mineralogy, geochemistry and genetic processes of supergene non-sulphide ore of the Ab-Bagh Sedimentary-Exhalative (SEDEX-type) Zn-Pb deposit, Sanandaj-Sirjan zone. *Journal of Geoscience*, 26(103): 249–264. (in Persian with English abstract)
- Nazarpour, A., Paydar, G.R. and Carranza, E.J.M., 2016. Stepwise regression for recognition of geochemical anomalies: Case study in Takab area, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 168: 150–162.
- Nazarpour, A., Sadeghi, B. and Sadeghi, M., 2015. Application of fractal models to characterization and evaluation of vertical distribution of geochemical data in Zarshuran gold deposit, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 148: 60–70.
- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2012. Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn–Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, 54(14): 1649–1672.
- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2013. Metallogeny of Permian–Triassic carbonate-hosted Zn–Pb and F deposits of Iran: a review for future mineral exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 60(2): 197–216.
- Rajabi, A., Rastad, E., Canet, C. and Alfonso, P., 2015. The early Cambrian Chahmir shale-hosted Zn–Pb deposit, Central Iran: an example of vent-proximal SEDEX mineralization. *Mineralium Deposita*, 50(5): 571–590.
- Reimann, C. and de Caritat, P., 2017. Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil. *Science of the Total Environment*, 578: 633–648.
- Shapiro, S.S. and Wilk, M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4): 591–611.
- Sun, X., Gong, Q., Wang, Q., Yang, L., Wang, C. and Wang, Z., 2010. Application of local singularity model to delineate geochemical anomalies in Xiong'ershan gold and molybdenum ore district, Western Henan province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 107(1): 21–29.
- Tukey, J.W., 1977. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, Reading, 688 pp.
- Wang, J. and Zuo, R., 2015. A MATLAB-based program for processing geochemical data using fractal/multifractal modeling. *Earth Science Informatics*, 8(4): 937–947.
- Wang, J. and Zuo, R., 2018. Identification of geochemical anomalies through combined sequential Gaussian simulation and grid-based local singularity analysis. *Computers and Geosciences*, 118: 52–64.
- Wilkinson, J.J., 2014. Sediment-Hosted Zinc-Lead Mineralization: Processes and Perspectives. H. Holland and K. Turekian (Editors), *Treatise on Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, pp. 219–249.
- Xiao, F., Chen, J., Hou, W., Wang, Z., Zhou, Y. and 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.
- Yarmohammadi, A., Rastad, E., and Rajabi, A., 2016. Geochemistry, fluid inclusion study and genesis of the sediment-hosted Zn-Pb ($\pm$ Ag $\pm$ Cu) deposits of the Tiran basin, NW of Esfahan, Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 193(2): 183–203.
- Zhai, D., Liu, J., Cook, N.J., Wang, X., Yang, Y., Zhang, A. and Jiao, Y., 2019. Mineralogical, textural, sulfur and lead isotope constraints on the origin of Ag-Pb-Zn mineralization at Bianjiadayuan, Inner Mongolia, NE China. *Mineralium Deposita*, 54(1): 47–66.
- Zuo, R., 2014a. Identification of geochemical anomalies associated with mineralization in the Fanshan district, Fujian, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 139: 170–176.

- Zuo, R., 2014b. Identification of weak geochemical anomalies using robust neighborhood statistics coupled with GIS in covered areas. *Journal of Geochemical Exploration*, 136: 93–101.
- Zuo, R., Cheng, Q., Agterberg, F.P. and Xia, Q., 2009. Application of singularity mapping technique to identify local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, western China. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(3): 225–235.
- Zuo, R. and Wang, J., 2016. Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review. *Journal of Geochemical Exploration*, 164: 33–41.
- Zuo, R., Wang, J., Chen, G. and Yang, M., 2015. Identification of weak anomalies: A multifractal perspective. *Journal of Geochemical Exploration*, 148: 12–24.



Prospecting of Zn-Pb mineralization based on stream sediments geochemical exploration in the Malayer-Isfahan metallogenic belt

Mohammad Amin Jafari¹, Ali Kananian^{1*} and Ahad Nazarpour²

1) School of Geology, College of Sciences, University of Tehran, Tehran, Iran

2) Department of Geology, Ahvaz Branch Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Submitted: Apr. 24, 2019

Accepted: Nov. 30, 2019

Keywords: Geochemical anomaly, Classical statistical, Multifractal, Singularity Index, Pb and Zn, MVT-type deposits, Malayer-Isfahan metallogenic belt

Introduction

Separation of geochemical anomalies from the background has always been a major concern of exploration geochemistry. The search for methods that can make this analysis quantitative and objective aims not only at the reduction of but also at providing an automatic routine in exploration, assisting the interpretation and production of geochemical maps (Nazarpour et al., 2015). The Malayer-Isfahan metallogenic belt with the north-west-south-east trend is the largest and most important Pb-Zn belt of MVT type in Iran (Rajabi et al., 2012). In this study, separation of Pb and Zn geochemical anomalies was performed using the methods named further in the study area.

Materials and methods

1. Classical statistics

Various statistical methods have been used to process geochemical data in order to determine threshold values. Statistical quantities, such as the mean, standard deviation (SDEV) and percentiles, have been used to define thresholds for separating anomalies from the background. For example, geochemical anomalies have been defined as values greater than a threshold value defined as the 75th or 85th percentile, and Mean+SDEV or Mean+nSDEV (Nazarpour et al., 2015).

The boxplot and median+2MAD techniques of the EDA approach have been widely used to separate geochemical anomalies from the background. In exploratory data analysis (EDA) of geochemical

exploration data, the median+2MAD value was originally used to identify extreme values and serve as a threshold for further inspection of large data sets (Carranza, 2009). The MAD ($| \bar{X}_i - median(\bar{X}_i) |$) is the median of absolute deviations of individual dataset values (X_i) from the median of all dataset values (Tukey, 1977).

2. Multifractal models

Fractal and multifractal models have also been applied to separate anomalies from background values. These methods are gradually being adopted as effective and efficient means to analyze spatial structures in metallic geochemical systems (Cheng et al., 1994). The concentration-number (C-N), concentration-area (C-A) multifractal methods have been used for delineation and description of relations among mineralogical, geochemical and geological features based on surface and subsurface data (Nazarpour et al., 2015). Fractal/multi-fractal models consist of frequency distribution and spatial self-similar or self-affine characteristics of geochemical variables. These fractal/multifractal models have been demonstrated to be effective tools for decomposing geological complexes and mixed geochemical populations and to recognize weak geochemical anomalies hidden within strong geochemical background (Cheng et al., 1994).

3. Singularity Index (SI)

The Singularity technique is another important

*Corresponding author Email: kananian@ut.ac.ir

process for fractal/multifractal modeling of geochemical data (Zuo et al., 2015). This technique is defined as the characterization of the anomalous behavior of singular physical processes that often result in anomalous amounts of energy release or material accumulation within a narrow spatial–temporal interval. The Singularity can be estimated from observed element concentration within small neighborhoods based on the following equation (Cheng, 2007):

$$(1) X = c \cdot \varepsilon^{\alpha-E}$$

The Singularity Index is a powerful tool to identify weak anomalies, but it is influenced by the selection of the window size. (Zuo et al., 2015).

Results and Discussion

In this study, a total of 19946 stream sediment geochemical samples were analyzed using the ICP-MS and XRF methods. In the maps derived from the Singularity Index (SI) the higher accuracy of this method compared to other applied methods was employed. Therefore, the hidden and weak anomalies are better represented, and a better overlap with limestone as the major host rock of Pb and Zn deposits (MVT type) in the study area were observed. A comparison among all of the applied methods indicates that the concentration of Pb and Zn increased toward the and south east and northwest parts, respectively. In these regions there is a high potential for the occurrence of promising mining areas. Moreover, the obtained Pb and Zn anomalies have a good correlation with the exposure of limestone in the study area.

References

- Carranza, E.J.M., 2009. Mapping of anomalies in continuous and discrete fields of stream sediment geochemical landscapes. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 10: 171–187.
- Cheng, Q., 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.
- 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: 314–324.
- Nazarpour, A., Sadeghi, B. and Sadeghi, M., 2015. Application of fractal models to characterization and evaluation of vertical distribution of geochemical data in Zarshuran gold deposit, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 148: 60–70.
- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2012. Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn–Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, 54(14): 1649–1672.
- Tukey, J.W., 1977. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, Reading, 688 pp.
- Zuo, R., Wang, J., Chen, G. and Yang, M., 2015. Identification of weak anomalies: A multifractal perspective. *Journal of Geochemical Exploration*, 148: 12–24.