



## Research Article

### Comparison of concentration-area (C-A) fractal method and singularity index in separation of geochemical anomalies of Cu element in Malayer-Aligudarz-Esfahan metallogenic zone

Mohamad Amin jafari<sup>1</sup>, Ali Kananian<sup>1\*</sup> , Ahad Nazarpour<sup>2</sup>

1-Department of Petrology, Faculty of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

2-Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Islamic Azad University, Ahwaz Branch, Ahwaz, Iran

Received: 02 Jan 2020 Accepted: 07 Jul 2020

## Extended Abstract

### Introduction

Malayer-Aligudarz-Esfahan metal belt with a length of more than 400 km and a width of 90 km is located in the active zone of Sanandaj-Sirjan and is the largest lead and zinc metal belt in Iran. Considering that one of the most important metals with Pb and Zn zones is Cu, in this study, in order to separate geochemical anomalies from background anomaly of the Cu metal, we used fractal methods of concentration-area (C-A) and Singularity Index (SI).

### Materials and Methods

#### Multifractal

Fractal and multifractal models have also been applied to separate anomalies from background values. These methods are gradually being adopted as an effective and efficient means to analyze spatial structures in metallic geochemical systems. 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. Fractal/multi-fractal models consist of the frequency distribution and the spatial self-similar or self-affine characteristics of geochemical variables and 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.

#### Singularity Index (SI)

The Singularity technique is another important method developed for fractal/multifractal modeling of geochemical data. It is defined as the characterization of the anomalous behaviors 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:

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

The Singularity Index is a powerful tool to identify weak anomalies, but it is influenced by the selection of the window size.

**Citation:** Jafari, M.A. et al, 2020. Comparison of concentration-area (C-A) fractal method and singularity index in ..., *Res. Earth. Sci.* 11(3), (21-34) DOI: 10.52547/esrj.11.3.21

\* Corresponding author E-mail address: Kananian@ut.ac.ir





### Results and Discussion

In general, 19974 stream sediment geochemical samples were analyzed using the ICP-MS and XRF method. The geochemical anomalies of the Cu metal were separated using fractal methods concentration-area (C-A) and according to the fitting line Cu metal on the logarithmic graph. The singularity index was estimated through a large window and mainly reflects regional changes but it does not focus on the local weak anomalies. In maps derived from fractal method of concentration-area (C-A), the North-West and South-East parts of the zone showed the highest anomaly. In maps that were obtained from the Singularity Index method, the hidden anomalies are better represented and there is a good overlap between the anomalies and the current position of the Cu deposits in the target zone.

### Conclusion

By matching the anomalies obtained from both methods with the geological map of the target area, it was determined that the obtained anomalies showed high overlap with the cretaceous limestone unit in the region. So this unit can be a good guide of exploration for identifying elements such as Pb, Zn and Cu in this area.

**Keywords:** Fractal, Concentration-Area, Singularity index, Cu, Malayer-Aligudarz-Esfahan.



## مقایسه روش فرکتال عیار-مساحت (C-A) و شاخص سینگولاریتی در جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی عنصر مس در زون فلززایی ملایر- الیگودرز-اصفهان

محمدامین جعفری<sup>۱</sup>، علی کنعانیان<sup>۱\*</sup>، احد نظرپور<sup>۲</sup>

۱- گروه پترولوژی، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، اهواز، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۲

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۴/۱۷

### چکیده

کمریند فلززایی ملایر-الیگودرز-اصفهان با طولی افزون بر ۴۰۰ کیلومتر و عرض ۹۰ کیلومتر بزرگترین کمریند فلززایی سرب و روی در ایران است. با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین فلزات همراه با زون‌های سرب و روی، مس می‌باشد، در این پژوهش، به منظور جدایش جوامع آنومالی ژئوشیمیایی از زمینه این فلز از روش‌های فرکتال عیار-مساحت (C-A) و شاخص سینگولاریتی (SI) استفاده شده است. لذا تجزیه و تحلیل ۱۹۹۷۴ نمونه از رسوبات آبراهه‌ای با استفاده از روش‌های نام برده در زون فلززایی ملایر-الیگودرز-اصفهان، منجر به تفکیک مناطق آنومال عنصر مس گردید. در نقشه‌های حاصل از مدل فرکتال عیار-مساحت (C-A)، قسمت‌های شمال غرب و جنوب شرق زون بیشترین میزان آنومالی را از خود نشان می‌دهد. در نقشه‌های حاصل از روش شاخص سینگولاریتی (SI)، آنومالی‌های پنهان بهتر نمایش داده شده و انطباق خوبی بین آنومالی‌ها و موقعیت فعلی معادن مس در زون مورد نظر وجود دارد. با تطبیق آنومالی‌های به دست آمده از هر دو روش با نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد نظر، مشخص گردید که آنومالی‌های به دست آمده هم‌پوشانی بالایی با واحد آهک کرتاسه در منطقه نشان می‌دهد و لذا این واحد می‌تواند راهنمای اکتشافی مناسبی برای پی‌جویی عناصری نظیر سرب، روی و مس در این منطقه محسوب شود.

**واژه‌های کلیدی:** فرکتال، عیار-مساحت، شاخص سینگولاریتی، مس، ملایر-الیگودرز-اصفهان.

## مقدمه

روش فرکتال عیار-تعداد و عیار-مساحت در کانسارهای مس-طلای پورفیری کانادا استفاده کرد. به این صورت که نمودار لگاریتمی عیار در برابر تعداد یا مساحت در نقاطی دچار شکست می‌شود و تغییر شیب می‌دهد که این تغییر شیب بیانگر تغییر از زمینه به آنومالی‌های درجات مختلف و تغییر در شرایط زمین‌شناسی منطقه بوده و با استفاده از نقاط شکست نمودار لگاریتمی، می‌توان به جدایش جوامع آنومالی پرداخت (Agterberg et al, 1996). تغییر از جامعه‌ای به جامعه‌ای دیگر نشان دهنده تغییر در شرایط زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی است. این توانایی منحصر به فرد به علت ماهیت فرکتالی توزیع عناصر در طبیعت است (Carranza, 2009). این مسئله سبب می‌شود که نیازی به حذف مقادیر خارج از ردیف نباشد زیرا به علت ماهیت فرکتالی داده‌ها، به‌طور خودکار این داده‌ها خنثی می‌شوند (Goncalves et al, 2001). روش‌های فرکتالی براساس تفاوت جوامع آنومالی و زمینه بنا شده‌اند. از مزایای این روش، ارائه تعبیر زمین‌ساختی و توجه به ماهیت توزیع فضایی داده‌ها است (Nazarpour et al, 2016). روش دیگر استفاده شده در این مقاله، روش شاخص سینگولاریتی است که امروزه این روش به علت آشکارسازی آنومالی‌های پنهان که سایر روش‌ها نظیر آمار کلاسیک و فرکتال قادر به شناسایی آن‌ها نیستند و آن‌ها را زمینه در نظر می‌گیرند طرفداران زیادی پیدا کرده است (قدیمی، ۱۳۹۴). چنگ و آکتربرگ (Cheng and Agterberg, 2005) نشان دادند رسوبات آبراهه‌ای در مجاور ذخایر کانسنگ می‌توانند خواص سینگولار داشته باشند، بنابراین سینگولاریتی را برای تعیین مناطقی که از خود آنومالی نشان

در ایران کمربندهای متالوژن سرب و روی به چهار گروه تقسیم می‌شوند: ۱-کمربند ملایر-الیگودرز-اصفهان. ۲-کمربند یزد-انارک. ۳-کمربند البرز مرکزی. ۴-کمربند طبس-پشت‌بام (شکل ۱) (Rajabi et al, 2012). کمربند فلززایی ملایر-الیگودرز-اصفهان که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است در زون پرتکاپوی سنندج-سیرجان واقع شده است. مواد معدنی فلزی در این زون شامل: سرب، روی، مس و ... می‌باشد (Delavar et al, 2012). جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی از زمینه، برای عناصر گوناگون از مهم‌ترین بخش‌های یک پروژه اکتشافی است (Hassanpour et al, 2013). شاید بتوان گفت که مهم‌ترین نتایج حاصل از تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی، جدایش جوامع گوناگون آنومالی (ممکن، احتمالی و قطعی) از یکدیگر و نیز تعیین زمینه برای هر عنصر در منطقه مورد اکتشاف می‌باشد. به عبارتی، در صورت عدم تعیین درست زمینه هر عنصر در هر منطقه، میزان آنومالی‌ها در آن منطقه دچار نوسان شده و سبب خطاهای اساسی در برآورد محدوده‌های امیدبخش برای ادامه عملیات اکتشافی می‌شود (Nazarpour et al, 2016). جهت شناسایی آنومالی‌های ژئوشیمیایی و جداسازی آنومالی از زمینه برای رسوبات آبراهه‌ای روش‌های مختلفی وجود دارد. در این مطالعه از دو روش فرکتال عیار-مساحت (C-A) و روش شاخص سینگولاریتی (Singularity Index) جهت جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی عنصر مس در زون ملایر-الیگودرز-اصفهان استفاده شده است. برای اولین بار چنگ و همکاران (Cheng et al, 1994)، برای جداسازی آنومالی از زمینه از

شمال غرب-جنوب شرق 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 زون در موقعیت زمین‌ساختی پشت کمانی جای دارد و در نتیجه فرورانش اقیانوس نوتتیس به زیر صفحه ایران ایجاد شده است و مهم‌ترین کمربند فلززایی سرب و روی ایران از نوع سدکس (Sedex) و نوع MVT (مس‌سی‌سی‌پی با میزبان رسوبی) به شمار می‌رود (Rajabi et al, 2013). کانسارهای سدکس به همه کانسارهای سرب و روی با میزبان شیلی، ماسه‌سنگی سیلتستونی و یا جانسینی‌های کربناته درون توالی تخریبی گفته می‌شود و کانسارهای MVT، کانسارهایی هستند که در سکوه‌های کربناته تشکیل می‌شوند (مغفوری و همکاران، ۱۳۹۶). در زون ملایر-الیگودرز-اصفهان پدیده‌های تکتونیکی بزرگ مقیاس وجود دارد که از لحاظ جایگاه تکتونیکی، حوضه‌های فورلندی یکی از اصلی‌ترین مناطق تشکیل کانسارها محسوب می‌شود. فاکتورهایی مانند شیب فرورانش، ساختار حرارتی فرو رونده و الگوی کنوکسیونی در استونسفر، همگی بر روی حوضه فورلندی تأثیرگذار هستند (Leach et al, 2001). این زون به علت مشابه بودن شرایط زمین‌شناسی در تشکیل کانسارهای سرب و روی با کانسارهای مس، میزبان تعداد زیادی از کانسارهای مس نیز می‌باشد (شکل ۲) (Ghasemi et al, 2006). زمین-ساخت کشتی کرتاسه زیرین سبب تشکیل حوضه‌های فرازمین و فروزمین در این زون شده است که بسیاری از کانسارهای سرب، روی، مس و ... با میزبان کربناته در حوضه‌های فروزمینی حاصل، نهشته شده‌اند (Movahednia et al, 2017). مهم‌ترین واحد

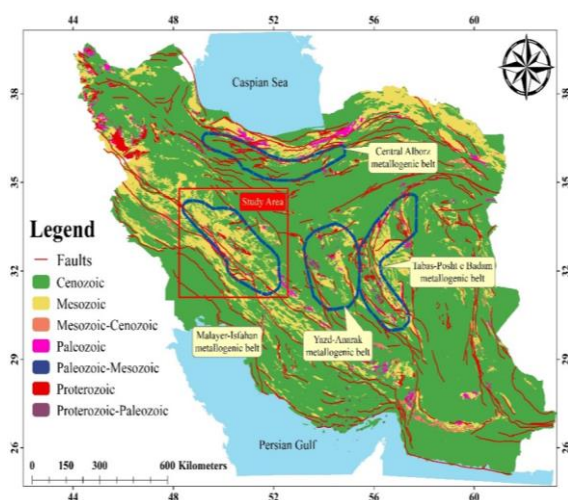
می‌دهند پیشنهاد دادند و عنوان نمودند که از این روش می‌توان برای پیش‌بینی مناطق امیدبخش کانساری استفاده کرد. چنگ و ژائو (Cheng and Zhao, 2011) نشان دادند که آنومالی‌های ژئوشیمیایی براساس تئوری سینگولاریتی می‌تواند برای توصیف و پیش‌بینی فرآیندهای کانی‌زایی غیرخطی نیز مورد استفاده قرار گیرد. زو (Zuo, 2014) روش‌های فرکتال و مولتی فرکتال عیار-مساحت، طیف-مساحت و شاخص سینگولاریتی را برای شناسایی آنومالی‌های ضعیف در ناحیه پلی‌متالیک آهن کائوبولنگ چین به کار گرفت و نشان داد که روش‌های فرکتالی عیار-مساحت و طیف-مساحت برای شناسایی آنومالی‌های ضعیف محدودیت داشته و آنومالی‌ها بین زمینه پنهان می‌شوند و از طریق وزن‌دهی به شیوه معکوس فاصله مشخص نمی‌شوند، اما روش شاخص سینگولاریتی ابزاری مفید برای شناسایی آنومالی‌های ضعیف است (Zuo, 2014). مهم‌ترین کاربرد نتایج حاصل از این پژوهش مشخص شدن نقاط آنومالی عنصر مس به عنوان یکی از عناصر همراه با فلزات سرب و روی در زون فلززایی ملایر-الیگودرز-اصفهان با استفاده از دو روش فرکتال عیار-مساحت (C-A) و شاخص سینگولاریتی (SI) است که هرکدام از روش‌ها با توجه به ویژگی‌های خود آنومالی را مشخص کرده و در پایان با توجه به انطباق بین مناطق آنومالی به دست آمده و همچنین اندیس‌ها و کانسارهای موجود در زون، میزان کارایی هر کدام از روش‌ها مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

#### منطقه مورد مطالعه

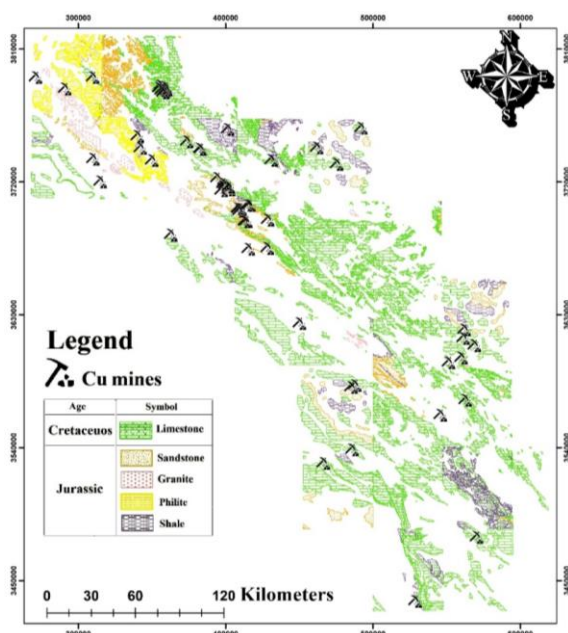
زمین‌شناسی منطقه: کمربند فلززایی ملایر-الیگودرز-اصفهان یک زون دگرگونی با راستای

(شکل ۳). در این زون، کانه‌سازی کانسارها و نشانه‌های معدنی به‌صورت چینه‌کران، لایه‌ای، عدسی و رگه‌ای هستند و اغلب میزبان آن‌ها دولومیت، آهک و ماسه‌سنگ هستند. همچنین کانسارهای تشکیل شده در این زون از ترکیب کانی‌های اسفالریت، گالن، پیریت، کالکوپیریت و به‌صورت مزوترمال می‌باشند (Rajabi et al, 2012).

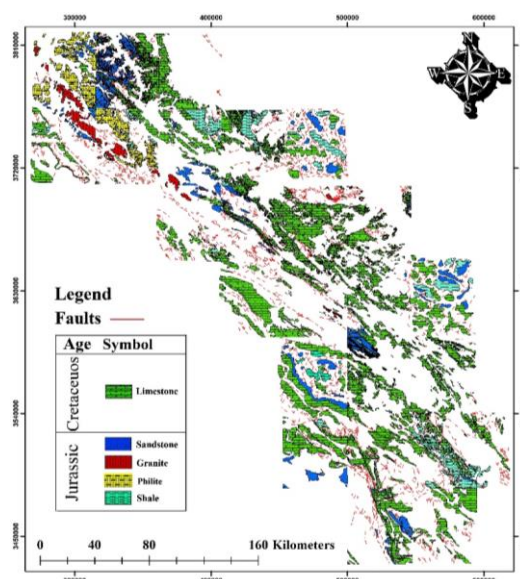
سنگی در این زون به علت دارا بودن پتانسیل فراوان در تشکیل فلزات سرب و روی، واحد آهک کرتاسه می‌باشد که ترکیب لیتولوژی آن سنگ-آهک اسلیتی، اسلیت آهکی، ماسه‌سنگ آمونیت‌دار است و پتانسیل بالایی در تشکیل سرب، روی و مس از خود نشان می‌دهد (Karimpour et al, 2017). سایر واحدهای زمین-شناسی موجود در این زون شامل ماسه‌سنگ، شیل، گرانیت و فیلیت‌های ژوراسیک می‌باشد



شکل ۱: موقعیت کمربندهای متالوژن سرب و روی در ایران (Rajabi et al, 2012).



شکل ۲: موقعیت معادن مس در زون ملایر-الیگودرز-اصفهان (Rajabi et al, 2012).

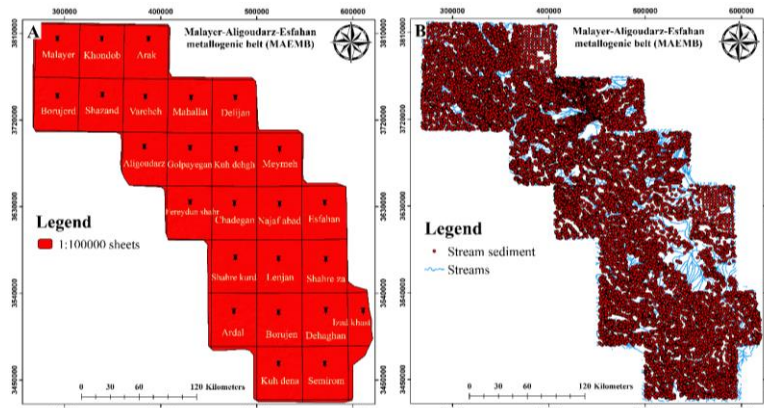


شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی زون ملایر-الیگودرز-اصفهان (Rajabi et al, 2012).

### مواد و روش‌ها

جهت بررسی توزیع ژئوشیمیایی عنصر مس در زون ملایر-الیگودرز-اصفهان از نمونه رسوبات آبراهه‌ای به تعداد ۱۹۹۷۴ از عمق ۴۰ سانتی-متری آبراهه‌ها و با تجزیه به روش ICP-MS از ۲۵ ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ شامل ورقه‌های الیگودرز، اراک، اردل، بروجن، بروجرد، چادگان، دهقان، دلیجان، اصفهان، فریدون‌شهر، گلپایگان، ایزدخواست، خنداب، کوه‌دق، کوه‌دنا، محلات، ملایر، میمه، نجف‌آباد، ریزلجان، سمیرم،

شهرکرد، شازند، شهرضا و ورچه که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور تهیه شده‌اند استفاده شده است (شکل ۴ A). موقعیت نمونه‌های برداشت شده در (شکل ۴ B) ارائه شده است. از این داده‌ها مقدار زمینه و آنومالی ژئوشیمیایی عنصر مس برداشت شده‌اند که با استفاده از روش فرکتال عیار-مساحت و شاخص سینگولاریتی به جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی عنصر مس در منطقه مورد نظر پرداخته شد.

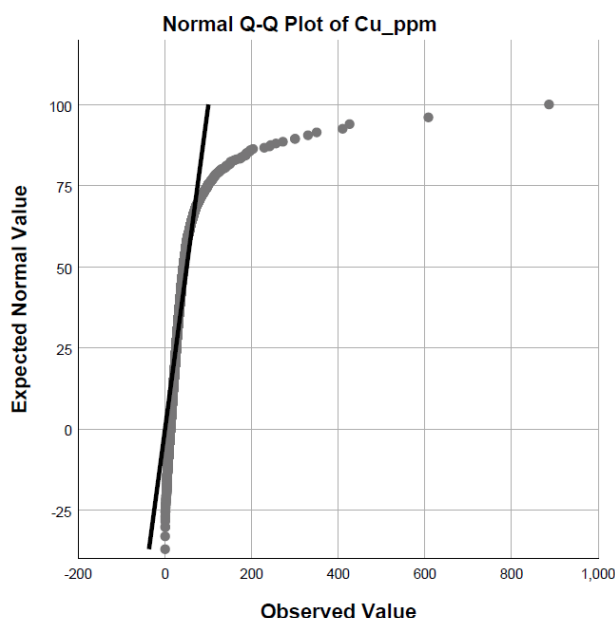


شکل ۴: (A) ورقه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ تشکیل دهنده زون ملایر-الیگودرز-اصفهان. (B) موقعیت رسوبات آبراهه‌ای برداشت شده در زون مورد نظر.

## آنالیز داده‌ها

استفاده از برخی روش‌های آماری، منوط 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. رایج-ترین این روش‌ها، آزمون S-Shapiro-Wilk (S-Shapiro-Wilk) و نمودارهای (Shapiro and Wilk, 1965) W-Q هستند، که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نمودارهای Q-Q تک عنصری، می‌توانند در مشخص کردن نقاط شکست جمعیت‌های ژئوشیمیایی و ثابت کردن دقت روش‌های انجام داده شده مفید واقع شوند. بدین صورت که اگر پس از رسم نمودار تمام داده‌ها روی خط مماس شوند، نشان دهنده نرمال بودن داده‌ها است (Liu et al, 2017). که در این حالت روش‌های آمار کلاسیک از دقت بالایی برخوردار بوده و آنومالی کاذب کمتری از خود نشان می‌دهند (Nazarpour et al, 2015). در صورتی که داده‌ها روی خط مماس نباشند گواه بر

این است که داده‌ها نرمال نیستند. در این مطالعه جهت بررسی داده‌ها نمودار Q-Q توسط نرم‌افزار SPSS برای فلز مس (شکل ۵) و محاسبه پارامترهای آماری برای فلز مس و فلزات ردیاب همراه با آن (سرب و روی) تهیه گردید (جدول ۱). عنصر مس (شکل ۵) چندین جمعیت ژئوشیمیایی را نشان می‌دهند که گواه بر فرآیندهای مختلف زمین‌شناختی و ژئوشیمیایی می‌باشد. بنابراین با توجه به نرمال نبودن داده‌ها و مطابق آنچه گفته شد استفاده از روش‌های فرکتالی و شاخص سینگولاریتی (SI) برای جدایش آنومالی‌های ژئوشیمیایی دقت نتایج ما را نسبت به روش‌های آمار کلاسیک افزایش می‌دهد (Zuo et al, 2009). برای بررسی میزان پراکندگی فلز مس در زون ملایر-الیگودرز-اصفهان نقشه درونیابی این فلز (شکل ۶) و فلزات ردیاب همراه با آن یعنی سرب (شکل ۷) و روی (شکل ۸) با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد.

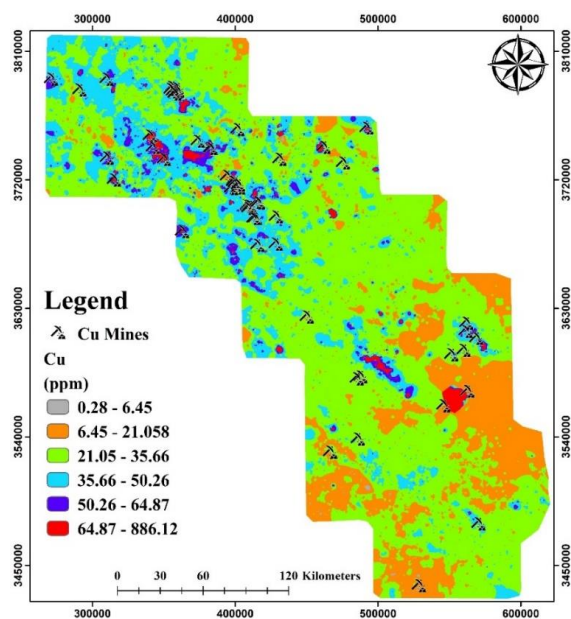


شکل ۵: نمودار Q-Q داده‌های خام ژئوشیمیایی که نشان دهنده چندین جمعیت ژئوشیمیایی می‌باشند.

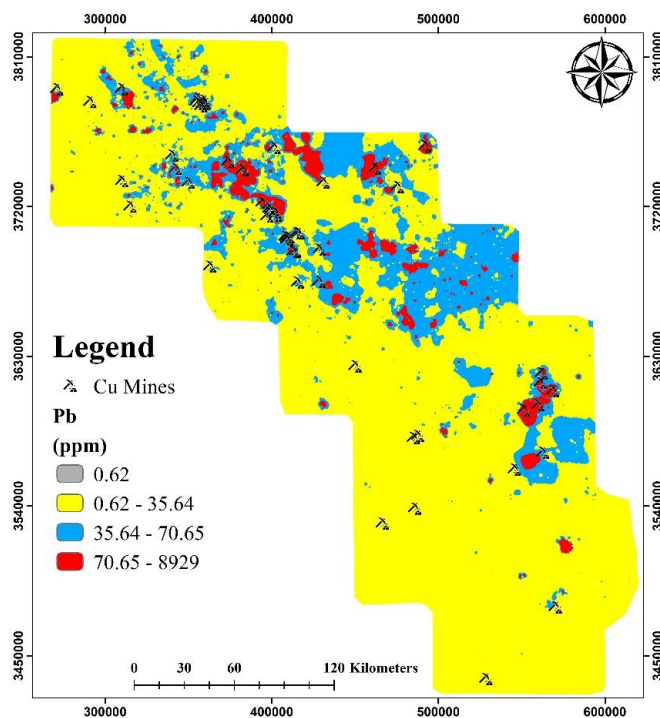


جدول ۱: محاسبه پارامترهای آماری برای فلزات مس، سرب و روی در منطقه مورد مطالعه.

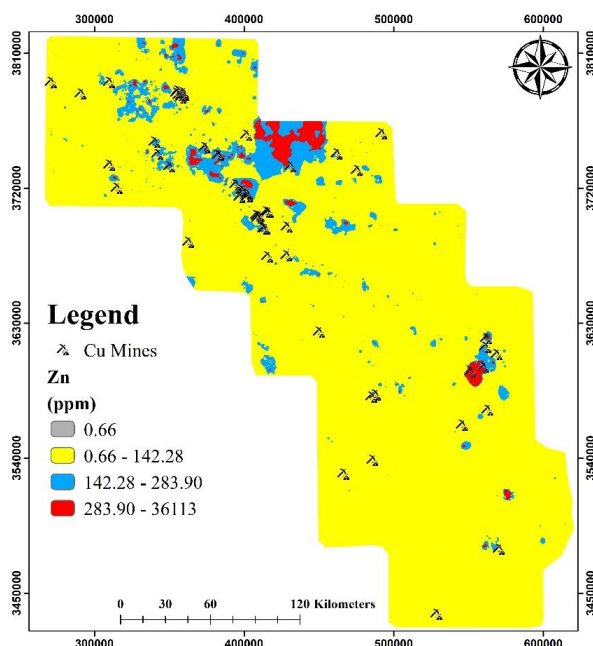
عنصر (ppm)	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	واریانس
مس (Cu)	۰/۲۸	۸۸۶	۳۱/۵۱	۱۷/۱۲	۲۹۳/۲۵
سرب (Pb)	۰/۶۲	۸۹۲۹	۳۱/۳۷	۱۲۱/۹۵	۱۴۸/۷۴
روی (Zn)	۰/۶۶	۳۶۱۱۳	۱۰۰/۷۰	۳۵۲/۷۳	۱۲۴۴۲۱/۵۷



شکل ۶: نقشه درون‌یابی (IDW) فلز مس (Cu) در زون ملایر-الیگودرز-اصفهان.



شکل ۷: نقشه درون‌یابی (IDW) فلز سرب (Pb) در زون ملایر-الیگودرز-اصفهان.



شکل ۸: نقشه درون‌یابی (IDW) فلز روی (Zn) در زون ملایر- الیگودرز- اصفهان.

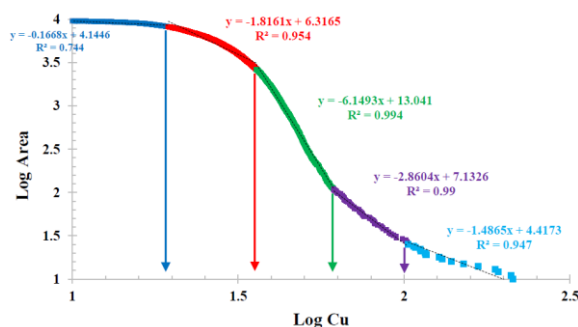
### نتایج

جدایش آنومالی از زمینه با استفاده از روش فرکتالی عیار-مساحت (C-A) روش فرکتالی عیار-مساحت مبتنی بر میزان مساحتی است که هر عیار خاص در منطقه مورد مطالعه اشغال نموده است (Afzal et al, 2016). هرچه عیار عنصر افزایش یابد میزان مساحت اشغالی توسط آن کاهش می‌یابد. اگر مقدار هر کانتر  $\rho$  در نظر گرفته شود، می‌توان یک معادله توانی را مطابق رابطه ۱ ارائه نمود (Cheng et al, 1996).

رابطه ۱)

$$A(>\rho) \propto \rho^{(-D)}$$

مقدار  $D$  در حقیقت نمایانگر بعد فرکتالی مربوط به دامنه‌های متفاوت  $\rho$  را نشان می‌دهد. با ترسیم تغییرات مساحت در برابر عیار، در نمودار لگاریتمی، می‌توان بعد هر جامعه را از طریق شیب خط برازش به آن محاسبه کرد (نظرپور، ۱۳۹۵). براساس مدل فرکتالی عیار-مساحت، نمودار لگاریتمی عنصر مس در (شکل ۹) به نمایش درآمده است.



شکل ۹: نمودار فرکتالی عیار-مساحت عنصر مس برای منطقه موردنظر.

$(r_i)$  (به شکل مربع) برای اندازه‌گیری تراکم غلظت  $(C)$  حول یک موقعیت خاص  $(Z_i)$  استفاده شد. مقدار سینگولاریتی برای پنجره‌های کوچک مجاور هم براساس رابطه ۲ به دست می‌آید (Zuo et al, 2015):

رابطه ۲)

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

در رابطه فوق  $X$  نشان دهنده غلظت عنصر،  $c$  مقدار ثابت،  $\alpha$  شاخص سینگولاریتی،  $\varepsilon$  اندازه فاصله نرمال شده و  $E$  بعد اقلیدسی می‌باشد (آگتبرگ، ۲۰۱۲). شاخص سینگولاریتی از شیب خط مستقیم برازش شده با جفت داده‌های  $c$  و  $\varepsilon$  در نمودار لگاریتمی تخمین زده می‌شود (Cheng, 2007). در این روش دو نوع آنومالی ضعیف و قوی مشخص می‌شود که براساس داده‌های ژئوشیمیایی برداشت شده و با استفاده از نرم‌افزار Matlab باید مطابق مراحل زیر عمل کرد: ۱) موقعیتی روی نقشه با تعدادی از پنجره-های متغیر  $A(r)$  (مربع شکل)  $r_{min}=r_1 < r_2 < \dots < r_n=r_{max}$  در نظر گرفته می‌شود و محاسبه میانگین غلظت  $C[A(r_i)]$  برای هر اندازه پنجره روی نقشه محاسبه می‌شود.

۲) برای پیاده کردن داده‌های  $C[A(r_i)]$  ( $i=1, \dots, n$ ) و  $r_i$  در یک نمودار لگاریتمی از رابطه ۳ استفاده می‌کنیم (Wang et al, 2018):

رابطه ۳)

$$\log C[A(r_i)] = C + (2 - \alpha) \log(r)$$

مقدار  $2 - \alpha$  را می‌توان از شیب خط راست به دست آورد. ۳- تکرار کردن روش‌های نام برده برای تمام قسمت‌های نقشه ژئوشیمیایی. برای یک نقشه ژئوشیمیایی، مقدار  $\alpha$  (شاخص سینگولاریتی) نزدیک به ۲ یک توزیع نرمال را نشان می‌دهد. درحالی که مناطقی با سینگولاریتی مثبت ( $\alpha > 2$ ) تهی‌شدگی و

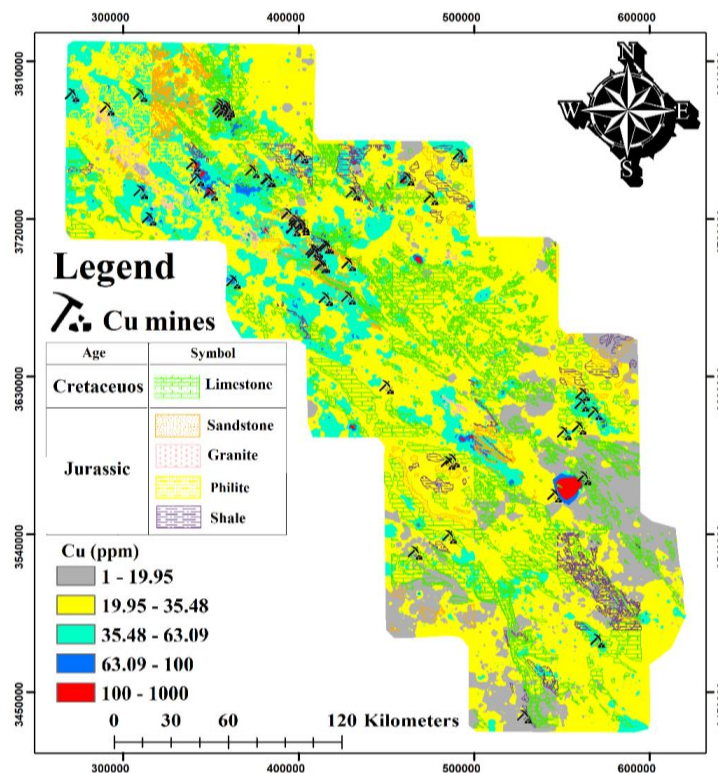
براساس نقاط شکست به دست آمده از نمودار لگاریتمی عیار-مساحت عنصر مس در (شکل ۹)، توزیع جوامع ژئوشیمیایی مختلف عنصر مس در (شکل ۱۰) تعیین گردید. جامعه اول و دوم با شیبی نزدیک به خط افق، دامنه عیار بین ۱۹/۹۵ تا ۳۵/۴۸ ppm و همچنین مقدار زمینه عنصر مس را در منطقه نشان می‌دهد. جمعیت سوم که مقدار آنومالی متوسط عنصر مس را نشان می‌دهد دارای دامنه عیار بین ۳۵/۴۸ تا ۶۳/۰۹ ppm است. جامعه چهارم نمایانگر دامنه عیار بین ۶۳/۰۹ تا ۱۰۰ ppm و مقدار آنومالی بالا در منطقه است. جمعیت آخر که شیب آن نزدیک به خط عمود است، بیشترین نوع آنومالی را در منطقه نشان می‌دهد و دارای عیار بالاتر از ۱۰۰ ppm است. حد آستانه‌های ژئوشیمیایی عنصر مس (Cu) براساس روش فرکتال عیار-مساحت در (جدول ۲) مشخص شده است. محدوده ژئوشیمیایی عنصر مس که از روش عیار-مساحت به دست آمده است با لیتولوژی کربناته (آهک‌های کرتاسه) که در شکل گرفتن آنومالی‌ها نقش دارند در ارتباط می‌باشد. بعد فرکتال به دست آمده از این نمودار به نحوی بیان کننده میزان مساحت داده‌های موجود می‌باشد (نظرپور و همکاران، ۲۰۱۵).

جدایش آنومالی از زمینه با استفاده از روش شاخص سینگولاریتی (Singularity Index)

تکنیک سینگولاریتی یکی دیگر از پیشرفت‌های مهم برای مدل‌سازی فرکتالی و مولتی-فرکتالی برای داده‌های ژئوشیمیایی به حساب می‌آید (قدیمی و همکاران، ۱۳۹۶). سینگولاریتی قادر به تخمین زدن غلظت فلزات از طریق مشاهده پنجره‌های کوچک مجاور هم است. جهت تخمین سینگولاریتی، از تعدادی پنجره‌ها

دست و پایین دست منطقه نیز در نظر گرفته می‌شوند. تولید این مربع‌های کوچک آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا به مربع بهینه برسد، زمانی به این امر دست پیدا می‌کند که بی‌هنجاری‌های به دست آمده با اندیس‌ها و نشانه‌های معدنی منطقه همپوشانی بالایی نشان دهد. در این پژوهش مقدار  $\alpha$  (شاخص سینگلاریتی) برای عنصر مس، در حدود ۲ می‌باشد (شکل ۱۱).

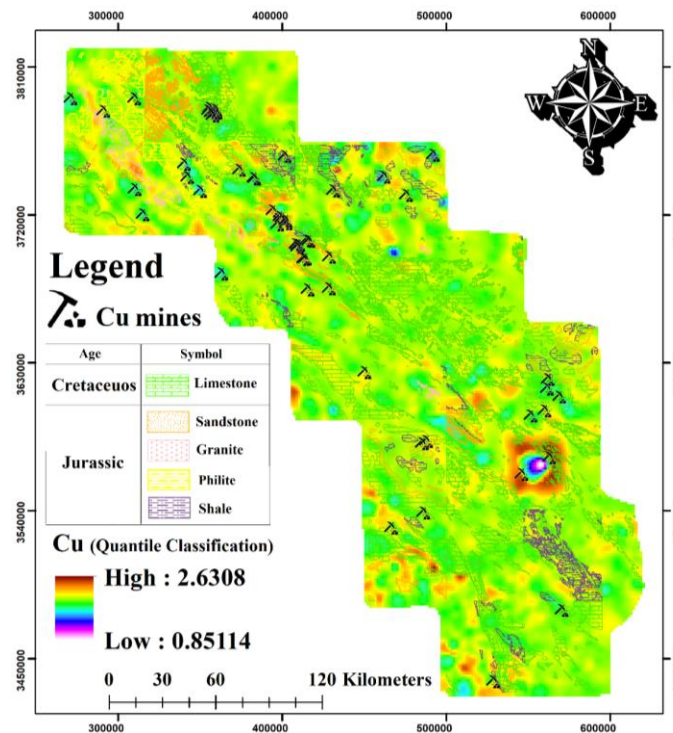
سینگلاریتی منفی ( $\alpha < 2$ ) غنی‌شدگی غلظت عناصر در منطقه مورد نظر را نشان می‌دهد (Tan et al, 2018). در این روش، سینگلاریتی یک ماتریس سطر با ستون برابر را ایجاد می‌کند و منطقه مورد مطالعه را به یک سری مربع‌های کوچک تقسیم‌بندی می‌کند سپس غلظت میانگین مربع‌ها را به عنوان غلظت تخمینی در نظر می‌گیرد. در این حالت آثار بالا



شکل ۱۰: نقشه توزیع جوامع ژئوشیمیایی عنصر مس براساس روش فرکتال عیار-مساحت (C-A) در زون موردنظر.

جدول ۲: توزیع جوامع ژئوشیمیایی عنصر مس براساس روش فرکتال عیار-مساحت (C-A) در منطقه موردنظر.

توزیع جوامع ژئوشیمیایی	دامنه عیار	عنصر
زمینه	۱۹/۹۵ - ۳۵/۴۸	مس (Cu)
آنومالی متوسط	۳۵/۴۸ - ۶۳/۰۹	
آنومالی بالا	۶۳/۰۹ - ۱۰۰	
آنومالی شدید	> ۱۰۰	



شکل ۱۱: نقشه توزیع ژئوشیمیایی عنصر مس براساس روش شاخص سینگولاریتی (SI) در زون موردنظر.

### نتیجه گیری

از نقشه‌های درون‌یابی فلزات سرب و روی (شکل - های ۷ و ۸) مشخص شد نقاطی که به عنوان آنومالی برای فلزات سرب و روی به دست آمده است با نقاط آنومال به دست آمده برای فلز مس و همچنین جایگاه برخی از معادن مس موجود در زون ملایر-الیگودرز-اصفهان هم‌پوشانی بالایی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در بعضی از کانسارها، فلزات مس، سرب و روی به صورت همزمان تشکیل می‌شود می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که دسترسی به نقاط آنومال یکی از این سه فلز در منطقه مورد مطالعه در صورت امکان می‌تواند گواه حضور فلزات دیگر در آن منطقه نیز می‌باشد. مقایسه انطباق آنومالی‌های به دست آمده از دو روش به کار گرفته شده و از طرفی کانسارها و اندیس‌های موجود، نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که شاخص سینگولاریتی (SI) نسبت به روش فرکتال عیار-مساحت (C-A)

عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد. روش شاخص سینگولاریتی (SI) بر خلاف روش فرکتال عیار-مساحت (C-A)، در مناطقی که ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده (Complex geological setting) وجود دارد قادر به شناسایی آنومالی‌های ضعیف است. در نقشه‌های به دست آمده از روش سینگولاریتی، آنومالی‌های پنهان بهتر شناسایی شده و همچنین قسمت‌های زمینه، تهی‌شده و غنی‌شده کاملاً مشخص شده‌اند و آنومالی‌های مشخص شده انطباق خوبی با جایگاه معادن مس منطقه موردنظر دارند. به‌طور کلی در استفاده از روش سینگولاریتی این نکته ضروری است که باید بهترین پنجره مورد استفاده قرار بگیرد زیرا اندازه هر پنجره در نتیجه‌ی سینگولاریتی اثر مستقیم دارد. نقشه-های حاصل از هر دو روش فرکتال عیار-مساحت و شاخص سینگولاریتی در جداسازی آنومالی‌ها نشان داد در جنوب‌شرق و شمال‌غرب منطقه مورد

بالایی نشان می‌دهد و همچنین احتمال مناطق امیدبخش کانساری در این نقاط بالا است.

-مغفوری، س.، حسین زاده، م.ر.، رجبی، ع. و عظیم زاده، ا.م.، ۱۳۹۶. کانسار دره زنجیر؛ نمونه-ای از کانسارهای روی-سرب با میزبان کربناته (MVT) در توالی رسوبی کرتاسه پیشین، حوضه جنوب یزد، فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، شماره ۲۶(۱۰۳)، ص ۱۳-۲۸.

-نظرپور، ا.، ۱۳۹۵. کاربرد مدل‌های فرکتال عیار-تعداد و عیار-مساحت در جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی در کانسار طلا زرشوران، شمال غرب ایران، مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۱۰(۲۰)، ص ۳۵-۴۸.

مطالعه، عنصر مس بیشترین میزان آنومالی را دارا می‌باشد که با واحد آهک کرتاسه منطقه انطباق

## منابع

-قدیمی، ز.، ۱۳۹۴. استفاده از روش سینگولاریتی در تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی منطقه خمین به کمک داده‌های رسوبات آبراهه-ای. پایان‌نامه دوره کارشناسی‌ارشد، مهندسی معدن گرایش اکتشافات، دانشگاه صنعتی اراک.

-قدیمی، ف.، قدیمی، ز. و قمی، م.، ۱۳۹۶. تعیین بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای معدن سرب و روی سنگل شمال خمین با استفاده از روش شاخص سینگولاریتی، مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۱۱(۲۲)، ص ۱۱۹-۱۳۱.

-Afzal, P., Mirzaei, M., Yousefi, M., Adib, A., Khalajmasoumi, M., Zarifi, A.Z. and Yasrebi, A.B., 2016. Delineation of geochemical anomalies based on stream sediment data utilizing fractal modeling and staged factor analysis, *Journal of African Earth Sciences*, v. 119, p. 139-149.

-Agterberg, F.P., Cheng, Q., Brown, A. and Good, D., 1996. Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet batholith, Manitoba. *Computers & Geosciences*, v. 22(5), p. 497-507.

-Agterberg, F.P., 2012. Multifractals and geostatistics, *Journal of Geochemical Exploration*, v. 122, p. 113-122.

-Carranza, E.J.M., 2009. Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features, *Ore Geology Reviews*, v. 35(3-4), p. 383-400.

-Cheng, Q., Agterberg, F.P. and Ballantyne, S.B., 1994. The separation

of geochemical anomalies from background by fractal methods, *Journal of Geochemical Exploration*, v. 51(2), p. 109-130.

-Cheng, Q. and Agterberg, F.P., 1996. Multifractal modeling and spatial statistics, *Mathematical Geology*, v. 28(1), p. 1-16.

-Cheng, Q., 2007. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China, *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 314-324.

-Cheng, Q. and Zhao, P., 2011. Singularity theories and methods for characterizing mineralization processes and mapping geo-anomalies for mineral deposit prediction, *Geoscience Frontiers*, v. 2(1), p. 67-79.

-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*, v. 118, p. 98-110.
- 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*, v. 37(2), p. 186-194.
- Ghasemi, A. and Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran), *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 26(6), p. 683-693.
- Goncalves, M.A., Mateus, A. and Oliveira, V., 2001. Geochemical anomaly separation by multifractal modelling, *Journal of Geochemical Exploration*, v. 72(2), p. 91-114.
- 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*, v. 6(3), p. 957-970.
- Karimpour, M.H., Shafaroudi, A.M., 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*, v. 9(2), p. 267-294.
- 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*, v. 36(8), p. 711-740.
- Liu, Y., Zhou, K. and Cheng, Q., 2017. A new method for geochemical anomaly separation based on the distribution patterns of singularity indices, *Computers & Geosciences*, v. 105, p. 139-147.
- 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. p. 249-264.
- 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*, v. 148, p. 60-70.
- 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*, v.168, p. 150-162.
- 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*, v. 54(14), p. 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*, v. 60(2), p. 197-216.
- Tan, Q.P., Wang, X., Xia, Y., Liu, Q. and Zhou, J., 2018. Identifying ore-related anomalies using singularity mapping of stream sediment geochemical data, a case study of Pb mineralization in the Qinling region, China, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 18(3), p. 177-184.
- Shapiro, S.S. and Wilk, M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples), *Biometrika*, v. 52(3/4), p. 591-611.
- Wang, J. and Zuo, R., 2018. Identification of geochemical anomalies

through combined sequential Gaussian simulation and grid-based local singularity analysis, Computers and geosciences, v. 118, p. 52-64.

-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, v. 101(3), p. 225-235.

-Zuo, R., 2014. Identification of weak geochemical anomalies using robust neighborhood statistics coupled with GIS in covered areas, Journal of Geochemical Exploration, v. 136, p. 93-101.

-Zuo, R., Wang, J., Chen, G. and Yang, M., 2015. Identification of weak anomalies: A multifractal perspective, Journal of Geochemical Exploration, v. 148, p. 12-24.