

Discrimination of geochemical anomalies of Pb and Zn metals using the classical statistical (Mean+nSTEV), Singularity Index, remote sensing and structural factors method in Khondab 1:100000 sheet, northern part of the Malayer-Aligoudarz-Esfahan zone

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

1- School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

2- School of Geology, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Keywords: Geochemistry, Classical statistical, Singularity Index, Pb and Zn, Khondab

1-Introduction

Separation of geochemical anomalies from background has always been a major concern in geochemical exploration (Nazarpour, 2018). The Malayer-Aligoudarz-Esfahan 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). Khondab 1:100000 geological sheet as a high potential area is located in the north of Malayer-Aligoudarz-Esfahan Pb-Zn metallogenic belt. Various statistical methods have been used to process geochemical data in order to determine threshold values. In this study, classic statistical Mean+2SDEV), Singularity Index (SI) analysis, remote sensing, weight of evidence (WofE) and structural analysis methods, have been applied to separate geochemical anomalies from background of the Pb and Zn metals in the study area.

2-Methodology

2-1-Classical statistics

Statistical quantities, such as the mean, standard deviation (SDEV) and percentiles, have been used to define threshold for separating anomalies from background. For example, geochemical anomalies have been defined as values greater than a threshold defined as the 75th or 85th percentile, and Mean+SDEV or Mean+2SDEV (Nazarpour et al., 2015).

2-2- Singularity Index

The singularity technique is another important progress for fractal/multifractal modeling of geochemical data (Zuo et al., 2012). 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 (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. When applying this method, one should use different window sizes to process the geochemical data and find an appropriate window size which can highlight the interesting results (Zuo et al., 2012).

* Corresponding author: kananian@ut.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2019.28425.1937

Received 2019-01-29

Accepted 2019-05-17

3-Remote sensing

The use of remote sensing techniques is valuable particularly in mapping hydrothermally altered minerals that have distinct absorption features and its capability in hydrothermal alteration and mineralization has been documented by a number of studies (Hunt, 1979). In this study, we were able to obtain, using the tracer satellite images and using the band ratios technique, to obtain carbonate and silica alteration zones in the study area for Pb and Zn mineralization.

4- Results and discussion

Threshold values obtained using applied methods were used to map the spatial distribution of element concentrations. These interpolated maps were produced by means of inverse distance weighted (IDW) method (Nazarpour et al., 2016). The classic statistical method (Mean+nSTEV) indicates that the threshold values for the Pb and Zn metals 30.75 ppm and 153.18 ppm, respectively. Maps derived from the Singularity Index (SI) hidden and weak anomalies are better represented and overlap with limestone lithology as the major host rock of Pb and Zn deposits (MVT type) in the study area. Moreover, the anomalies obtained from SI model indicated more accurate overlap with the Pb and Zn deposits. The results of applied methods, indicated that The singularity index method has a higher accuracy. Also, indicates the higher concentration of Zn in area of study. Results also indicated highest anomalies of Pb and in south and northeast, northeast and center of the region, respectively, where with higher probability of the presence of MVT deposits. Moreover, the obtained anomalies show a high correlation with the Cretaceous limestone lithological units and fault zone of the region, which are directly related to the Pb and Zn mineralization.

References

- Carranza, E. J. M., Zuo, R., Cheng, Q., 2012. Fractal/multifractal modelling of geochemical exploration data. *Journal of Geochemical Exploration* 122, 1-3.
- 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.
- Hutkinson, O.S., 1983. *Economic Deposits and their Relation to Tectonic Setting*, Maomillan Press, London, P: 365.
- Nazarpour, A., Paydar, G. R., 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., 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., 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, 1649-1672.

جداسازی آنومالی‌های زمین‌شیمیایی فلزات سرب و روی با استفاده از روش آماری کلاسیک (Mean+nSTEV)، شاخص سینگلاریتی، سنجش از دور و عوامل ساختاری در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خُنداب؛ بخش شمالی زون ملایر-الیگودرز-اصفهان

محمدامین جعفری

دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

علی کنعانیان*

دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

احد نظریور

گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۰۹

*Kananian@ut.ac.ir

چکیده

ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خنداب در قسمت شمالی کمربند فلززایی ملایر-الیگودرز-اصفهان یکی از با پتانسیل‌ترین ورقه‌های موجود در کشور برای تشکیل کانسارهای سرب و روی می‌باشد. در این مطالعه از روش آمار کلاسیک، شاخص سینگلاریتی، سنجش از دور، نمودار شواهد وزنی (WofE) و تجزیه و تحلیل ساختاری برای جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی از زمینه برای فلزات سرب و روی در منطقه مورد مطالعه بکار گرفته شد. به طور کلی در مجموع از ۲۰۰۶ نمونه ژئوشیمیایی از رسوبات آبراهه‌ای که توسط روش ICP-MS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته استفاده شده است. روش آمار کلاسیک (Mean+nSTEV) نشان می‌دهد که مقادیر آستانه برای فلزات سرب و روی به ترتیب ۳۰/۷۵ ppm و ۱۵۳/۱۸ ppm است. در نقشه‌های بدست آمده از روش شاخص سینگلاریتی (SI) آنومالی‌های ضعیف و پنهان بهتر نمایش داده شده و همپوشانی بهتری با سنگ آهک به عنوان سنگ میزبان در ذخایر سرب و روی (نوع MVT)، تراکم گسل‌ها و دگرسانی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، نشان می‌دهد. علاوه بر این، آنومالی‌های بدست آمده از این روش همپوشانی بالایی با کانسارها و معادن سرب و روی موجود در منطقه نشان می‌دهند. بطور کلی در این مطالعه مشخص گردید که عیار فلز سرب در جنوب و شمال شرق و عیار فلز روی در شمال شرق و مرکز محدوده بیشترین میزان آنومالی را از خود نشان می‌دهند که در این مناطق احتمال وجود مناطق کانساری از نوع MVT بسیار بالا است. از طرفی آنومالی‌های بدست آمده با واحدهای آهک کرتاسه و گسلش منطقه که در کانه‌زایی سرب و روی ارتباط مستقیمی دارد، انطباق بالایی را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: زمین‌شیمی، آمار کلاسیک، شاخص سینگلاریتی، سرب و روی، خنداب

مقدمه

توجه به توزیع فضایی داده‌ها، شرط تبعیت از توزیع نرمال و نیز عدم توجه به شکل هندسی آنومالی‌ها می‌باشد (Reimann and de Caritat, 2017). در عین حال چون بسیاری از رخداد‌های زمین‌شناسی از قوانین هندسه اقلیدسی پیروی نمی‌کنند؛ به همین دلیل باید از روش‌های دیگری برای توصیف رخداد‌های موجود در طبیعت استفاده کرد (Nazarpour et al., 2016). با توجه به محدودیت‌های روش آمار کلاسیک که در ادامه به آن پرداخته شده و همچنین برای بالاتر بردن دقت کار و به حداقل رساندن خطا در شناسایی مناطق آنومال در منطقه مورد نظر از روش نوین شاخص سینگلاریتی (Singularity Index) که امروزه طرفداران زیادی پیدا کرده استفاده شده است. آشکارسازی آنومالی‌های پنهان که سایر روش‌ها قادر به شناسایی آن نیستند این روش را نسبت به روش‌های مولتی‌فرکتالی و آمار کلاسیک متمایز می‌کند (Kananian et

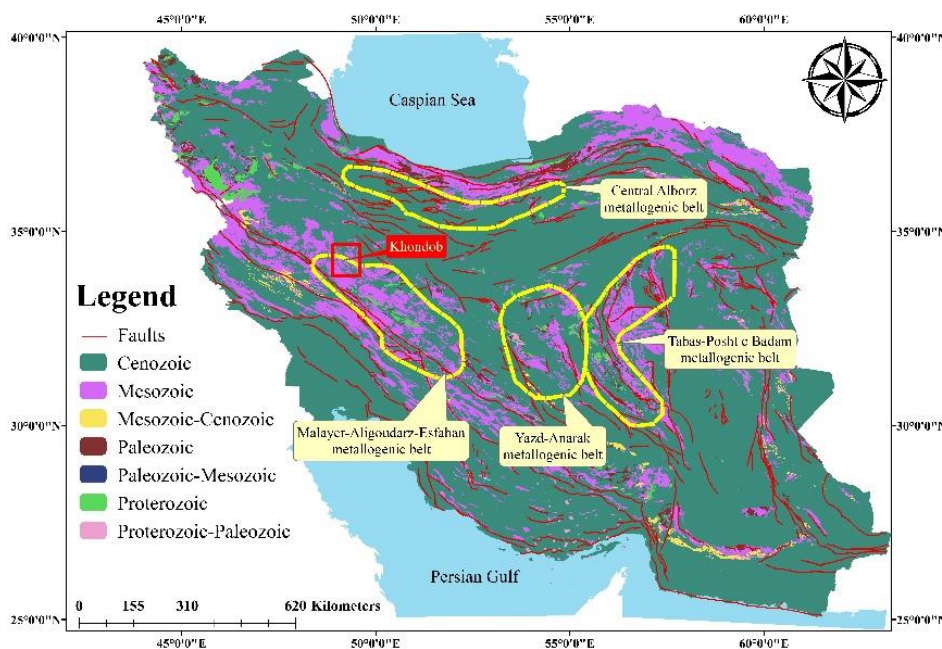
روش اکتشافات زمین‌شیمیایی رسوبات آبراهه‌ای یکی از متداول‌ترین روش‌ها در جداسازی آنومالی‌های زمین‌شیمی و اکتشافات مواد معدنی است (Nazarpour et al., 2015). از این روش برای اکتشاف در مقیاس‌های کوچک و به طور کلی در مراحل اولیه اکتشاف که شامل مرحله پتانسیل‌یابی و پی‌جویی می‌باشد، استفاده می‌شود. استفاده از این روش در هر شرایط اقلیمی جوابگو خواهد بود بنابراین روشی مفید در اکتشاف کانسارهای فلزی می‌باشد (Lima, 2018). از گذشته تا به امروز از روش‌های گوناگونی برای جداسازی آنومالی‌های زمین‌شیمیایی استفاده شده است. یکی از روش‌هایی که محققان همچنان از آن در حال استفاده می‌باشند روش آمار کلاسیک (Mean+nSTEV) می‌باشد که بر اساس میانگین و انحراف معیار داده‌ها عمل می‌کند (Nazarpour et al., 2016). این روش دارای نواقص و کاستی‌هایی از قبیل حذف تعدادی از داده‌ها به عنوان خارج از ردیف، عدم

۱۷۰ کانسار با پتانسیل معدنی بسیار بالا در آن شناسایی شده است (Ehya et al., 2010). زون فلززایی ملایر-الیگودرز-اصفهان در موقعیت زمین‌ساختی پشت کماتی جای دارد و در نتیجه فرورانش اقیانوس نئوتتیس به زیر صفحه ایران ایجاد شده است (Rajabi et al., 2012). کانی‌سازی سرب و روی در کمربند ملایر-الیگودرز-اصفهان در گوشه‌ی باختری استان مرکزی، به‌عنوان بخشی از زون سنندج-سیرجان، در پایه‌ی سنگ آهک‌های کرتاسه‌ی پایین انباشته‌هایی از سرب و روی وجود دارد که به‌عنوان یک نوار کانه‌دار از جنوب اصفهان آغاز و تا استان مرکزی ادامه می‌یابد (Karimpour, 2002). کانسارهای سرب و روی عمارت-اراک، کانسار سرب خوگان و کانسار سرب لکان از جمله کانسارهای قابل توجه در این استان است (Rahimpour, 1991).

ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خنداب با قرار گرفتن بخش جنوبی آن به عنوان شمال کمربند ملایر الیگودرز اصفهان (شکل ۱) معادن سرب و روی زیادی با سنگ میزبان کربناته (واحد آهک کرتاسه) را در خود جای داده است (Ghorbani, 2002). معادن موجود در ورقه خنداب عمدتاً از نوع MVT بوده (می‌سی‌سی‌پی با میزبان رسوبی) بوده که کانسارهای زیادی از جمله کانسار آهوان گردل‌کوه با پتانسیل معدنی سرب و مس، کانسار بصری با پتانسیل معدنی سرب، نقره و آهن به عنوان عنصر فرعی (Yaaghobpour, 2002). کانسار کله‌بید با پتانسیل معدنی سرب، روی و طلا و سایر کانسارهای دیگر است (Radfar and Kohansal, 2003). مهمترین کاربرد نتایج حاصل از این پژوهش مشخص شدن نقاط آنومالی فلزات سرب و روی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خنداب با استفاده از روش آمار کلاسیک، شاخص سینگولاریتی، سنجش از دور و عوامل ساختاری است.

(al., 2018). برای اولین بار Cheng و Agterberg (۲۰۰۹) نشان دادند رسوبات آبراهه‌ای در مجاور ذخایر کانسنگ می‌توانند خواص سینگولار داشته باشند، بنابراین سینگولاریتی را برای تعیین مناطقی که از خود آنومالی نشان می‌دهند پیشنهاد دادند و عنوان نمودند که از این روش می‌توان برای پیش‌بینی مناطق امیدبخش کانساری استفاده کرد (Cheng and Agterberg, 2009). Zhao و Cheng (۲۰۱۱) نشان دادند که آنومالی‌های زمین‌شیمیایی بر اساس تئوری سینگولاریتی می‌تواند برای توصیف و پیش‌بینی فرآیندهای کانی‌زایی غیرخطی نیز مورد استفاده قرار گیرد (Cheng and Zhao, 2011). Zuo (۲۰۱۴) روش‌های فرکتال و مولتی‌فرکتال عیار-مساحت، طیف-مساحت و شاخص سینگولاریتی را برای شناسایی آنومالی‌های ضعیف در ناحیه پلی-متالیک آهن کائوبولنگ چین بکار 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 (IDW) فاصله مشخص نمی‌شوند، اما روش شاخص سینگولاریتی ابزاری مفید برای شناسایی آنومالی‌های ضعیف (Weak Anomaly) است (Zuo, 2014).

استان مرکزی به عنوان بخشی از نوار ماگمایی ارومیه-بزمان و زون سنندج-سیرجان، توان معدنی (فلزی و غیرفلزی) در خور توجهی دارد. از همین‌رو، معدنکاری در این استان سابقه‌ی دیرینه دارد، به‌طوری که در حال حاضر در ۳۵ معدن غیرفلزی، ۵۶ معدن مصالح ساختمانی و ۹ معدن فلزی، بهره‌برداری صورت می‌گیرد (Jamaliyan, 2002). در ایران کمربند فلززایی ملایر-الیگودرز-اصفهان با طولی افزون بر ۴۰۰ کیلومتر و عرض ۹۰ کیلومتر بزرگترین کمربند فلززایی سرب و روی در ایران است که بیش از



شکل ۱- جایگاه کمربند ملایر-الیگودرز-اصفهان و منطقه مورد مطالعه (Rajabi et al., 2012).

Fig. 1. Malayer-Aligoudarz-Isfahan belt and study area location (Rajabi et al., 2012).

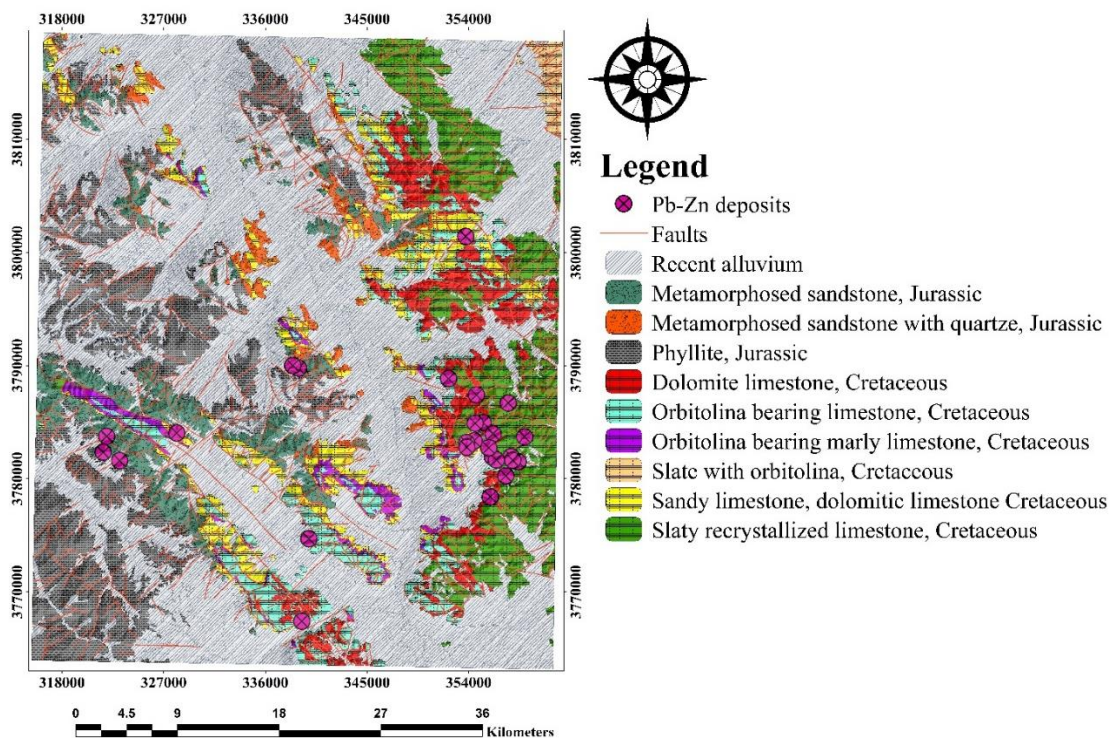
زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خنداب در بخش جنوب خاوری چهارگوش دویست و پنجاه هزارم همدان قرار گرفته است. خنداب در شمال باختر شهرستان اراک جای دارد (شکل ۱) (Radfar and Kohansal, 2003). رخنمون های سنگی در ورقه خنداب با روند عمومی شمال باختر-جنوب خاور به گونه ای یکنواخت در سراسر آن گسترش یافته است. با این وجود گستردگی آن ها به گونه ای است که سنگ های رسوبی کرتاسه بیشتر در نیمه خاوری محدوده و سنگ های رسوبی ژوراسیک در نیمه باختری آن دیده می-شوند (Majidi and Amidi, 1990). همچنین برونزد سنگ های نفوذی در بخش میانی از نیمه خاوری این ورقه جای دارند. سایر نقاط از رسوب های کواترنر تشکیل شده است (Rahimpour, 1991). بر پایه تقسیم بندی پهنه های ساختاری توسط Stocklin (۱۹۶۸) منطقه مورد مطالعه در پهنه پرتکاپوی سندج-سیرجان واقع شده است (Stocklin, 1968). زون سندج-سیرجان یک زون پرتحرک در حاشیه ایران مرکزی و در مجاورت تراست زاگرس است که فازهای کوهزایی، دگرگونی و ماگماتیسم مهمی را تحمل نموده که مهمترین آن ها فاز کوهزایی، دگرگونی و ماگماتیسم لارامید است (Alavi, 1994).

در ورقه مورد مطالعه شکستگی ها در چهره گسله های فشاری، کششی و راستالغز شکل گرفته است. گسله های فشاری با روند اصلی شمال باختری- جنوب خاوری نسبت به گروه های دیگر مهم تر بوده و بیشترین اثر را بر حالت ریخت شناسی منطقه داشته اند. همچنین محور چین های منطقه با روند

گسله های فشاری نزدیک است (Eghlimi, 2000). بر اساس نقشه زمین-شناسی (شکل ۲) ترکیب سنگ شناسی موجود در ورقه خنداب از فیلیت های ژوراسیک، سنگ آهک اسلیتی و سنگ آهک دولومیتی است. با بررسی نقشه زمین شناسی ورقه خنداب می توان چنین نتیجه گرفت که واحدهای آهک کرتاسه لیتولوژی غالب در منطقه بشمار می آیند.

ورقه خنداب از نظر دارا بودن کانه های فلزی و غیرفلزی شرایط بسیار خوبی را دارا می باشد. کانه های فلزی در این منطقه شامل سرب، روی، طلا، آهن، مس و نقره و کانه های غیرفلزی شامل سیلیس و سنگ های ساختمانی است (Ghorbani, 2002). مطالعات صورت گرفته در معادن سرب و روی موجود در این منطقه در (جدول ۱) ارائه شده است. با توجه به نقشه زمین-شناسی منطقه و همچنین ویژگی های کانسارهای سرب و روی موجود در ورقه خنداب می توان چنین نتیجه گرفته که واحدهای آهک کرتاسه به علت دارا بودن پتانسیل فراوان در تشکیل فلزات سرب و روی در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است (Rajabi et al., 2013). به این علت که وجود رژیم تکنونیک کششی کرتاسه زیرین سبب تشکیل حوضه های فرازمین و فروزمین در کمربند فلزایی ملایر-الیگودرز-اصفهان شده است و در نتیجه بسیاری از کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناته در حوضه های فروزمینی نهشته شده اند (Mahdavi and Rahimi, 2010).



شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه.

Fig. 2. Geological map of the study area.

جدول ۱- ویژگی‌های معادن شاخص در ورقه خنداب.

Table 1. Characteristics of index mine in the Khondob sheet.

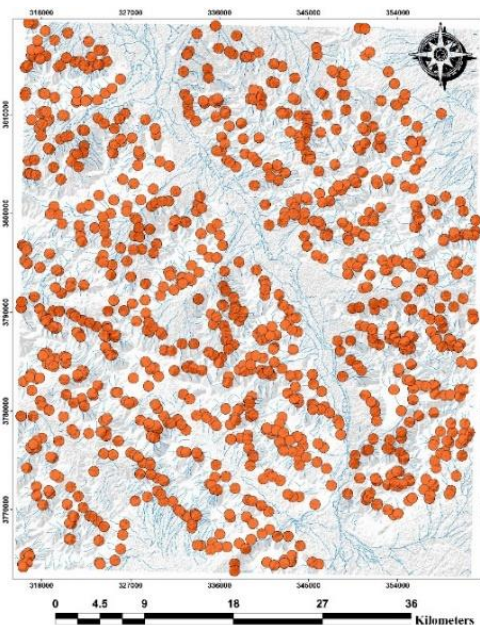
Deposits Feature	Ahvan gerdel kuh	Nabi dar	Basari	Kolahbid	Baneh	Darreh melki
Host rock	Limestone, Marn	Sandstone	Limestone	Philite, Slate, Sandstone	Limestone	Dolomite
Host rock age	Cretaceous	Cretaceous	Cretaceous	Jurassic	Cretaceous	Cretaceous
Alteration	Dolomite, Silica	Calcite, Dolomite	Dolomite, Silica, Calcite	Silica, Dolomite	Silica, Calcite	Calcite, Dolomite
Metal elements	Ba, Zn, Ag	Pb, Fe, Cu, Au	Pb, Ag, Fe	Pb, Zn, Au, Ag	Pb, Zn, Cu	Pb, Zn, Fe
Mineralization style	Stratiform	Stratiband	(Stratiform) Epigenetics, in faults	Stratiband	Stratiform	Stratiform
Refrences	(Yaaghoubpour, 2002)	(Radfar and Kohansal, 2003)	(Ghorbani, 2002)	(Yaaghoubpour, 2002)	(Rahimpour, 1991)	(Radfar and Kohansal, 2003)

مواد و روش‌ها

روش مطالعه

جهت بررسی توزیع زمین‌شیمیایی عناصر سرب و روی در ورقه خنداب از نمونه رسوبات آبراه‌های به تعداد ۲۰۰۶ نمونه از عمق ۴۰ سانتی‌متری آبراه‌ها و با تجزیه به روش ICP-MS که توسط سازمان

زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور تهیه شده‌اند استفاده شده است. موقعیت نمونه‌های برداشت شده در (شکل ۳) ارائه شده است. از این داده‌ها مقدار زمینه و آنومالی زمین‌شیمیایی فلزات سرب و روی برداشت شده‌اند که توانستیم با استفاده از روش آمار کلاسیک و شاخص سینگولاریتی به جداسازی آنومالی‌های زمین‌شیمیایی این فلزات در منطقه مورد نظر بپردازیم.



شکل ۳- موقعیت رسوبات آبراه‌های برداشت شده در منطقه مورد مطالعه.

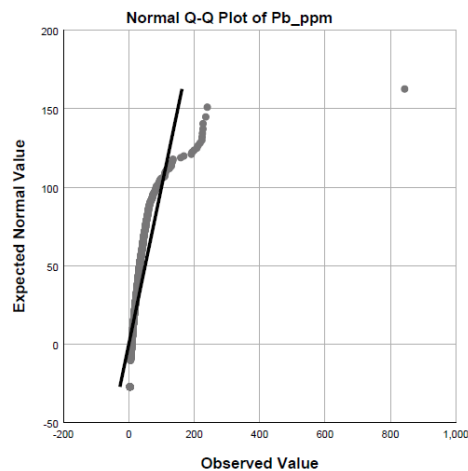
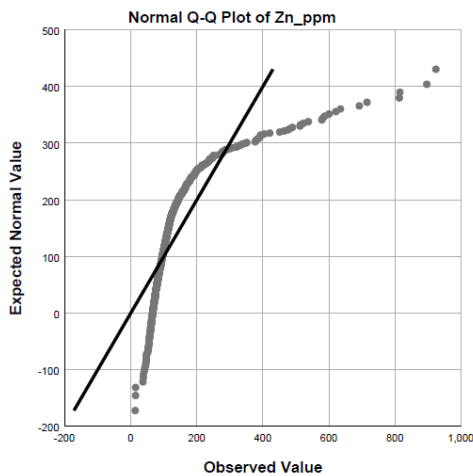
Fig. 3. Position of the stream sediments in study area.

نرمالایز کردن داده‌ها

روش‌ها، آزمون Shapiro-Wilk (S-W) و نمودارهای Q-Q هستند، که در این پژوهش از نمودارهای Q-Q استفاده شده است. نمودارهای Q-Q تک عنصری،

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. رایج‌ترین این

زمین شیمیایی در منطقه مطالعاتی می‌باشد. بنابراین با توجه به نرمال نبودن داده‌ها و مطابق آنچه گفته شد، استفاده از روش شاخص سینگولاریتی برای جدایش آنومالی‌های زمین‌شیمیایی دقت نتایج ما را نسبت به روش آمار کلاسیک افزایش می‌دهد (Zuo et al., 2009). همچنین در بعضی از مناطق مشاهده می‌شود که نمونه‌برداری بیشتری صورت گرفته که با مقایسه با نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۲) مشخص می‌شود که درون آهک‌های کرتاسه منطقه هستند که پتانسیل بالایی در تشکیل کانسارهای سرب و روی از نوع MVT دارند. نتایج پژوهش‌های اخیر نشان داده در مناطقی که کمپلکس‌های زمین‌شناسی وجود نداشته باشد روش آمار کلاسیک از دقت بالاتری برخوردار بوده و آنومالی کاذب کمتری را نسبت به مناطقی که ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی وجود دارد از خود نشان می‌دهند.



شکل ۴- نمودار Q-Q داده‌های خام زمین‌شیمیایی که نشان دهنده چندین جمعیت زمین‌شیمیایی می‌باشند.

Fig. 4. Q-Q diagrams are geochemical raw data representing several geochemical populations.

روش‌ها

آمار کلاسیک (Mean+nSTEV):

سولووف (۱۹۸۵) روش آماری میانگین+انحراف معیار را برای جداسازی آنومالی از زمینه معرفی کرد. مطابق تجزیه و تحلیل آماری معمولاً میانگین + انحراف معیار را بیشترین زمینه، میانگین + دو برابر انحراف معیار را به عنوان آنومالی احتمالی و میانگین + سه برابر انحراف معیار را آنومالی قطعی در نظر می‌گیرند (Hashemi marand et al., 2018). در این پژوهش با استفاده از روش آماری کلاسیک، پس از محاسبه میانگین و انحراف معیار برای فلزات مورد نظر، مقادیر بیشترین زمینه و آنومالی در سطوح احتمالی و قطعی محاسبه گردیده است.

روش شاخص سینگولاریتی (Singularity Index):

تکنیک شاخص سینگولاریتی (SI) یکی دیگر از پیشرفت‌های مهم برای مدلسازی فرکتالی و مولتی‌فرکتالی برای داده‌های زمین-شیمیایی به حساب می‌آید (Ghadimi et al., 2017). سینگولاریتی قادر به تخمین زدن غلظت فلزات از طریق مشاهده پنجره‌های کوچک مجاور هم است. جهت تخمین سینگولاریتی، از تعدادی پنجره‌ها (r_i) (به شکل مربع) برای اندازه‌گیری تراکم غلظت (C) حول یک موقعیت خاص (Z_i)

استفاده می‌شود (Kananian et al., 2018). مقدار سینگولاریتی برای پنجره‌های کوچک مجاور هم بر اساس رابطه ۱ بدست می‌آید (Jafari et al., 2018b)

$$X = c \cdot \varepsilon^{(a-E)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه ۱ X نشان دهنده غلظت عنصر، c مقدار ثابت، α شاخص سینگولاریتی، ε اندازه فاصله نرمال شده و E بعد اقلیدسی می‌باشد (Agterberg, 2012). شاخص سینگولاریتی از شیب خط مستقیم برازش شده با جفت داده‌های c و ε در نمودار لگاریتمی تخمین زده می‌شود (Cheng, 2007). در این روش دو نوع آنومالی ضعیف و قوی مشخص می‌شود که بر اساس داده‌های زمین‌شیمیایی برداشت شده و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB باید مطابق مراحل زیر عمل کرد: 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. ۲- برای پیاده کردن داده‌های $C[A(r_i)]$ و $(i=1, \dots, n)$ در یک نمودار لگاریتمی از رابطه ۲ استفاده می‌کنیم (Jafari et al., 2018a):

$$\log C[A(r_i)] = C + (2 - \alpha) \log(r) \quad \text{رابطه (۲)}$$

مربع بهینه برسد، زمانی به این امر دست پیدا می‌کند که آنومالی‌های بدست آمده با اندیس‌ها و نشانه‌های معدنی منطقه همپوشانی بالایی نشان دهد (Xiao et al., 2018).

نتایج و بحث

روش‌های تعیین آنومالی

جدایش آنومالی از زمینه با استفاده از روش آمار کلاسیک (Mean+nSTEV)

در این روش مهم‌ترین پارامترهای آماری از قبیل میانگین، انحراف معیار و ... که در تجزیه و تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد محاسبه شده است (جدول ۲).

مقدار $\alpha - 2$ را می‌توان از شیب خط راست بدست آورد. ۳- تکرار کردن روش‌های نام برده برای تمام قسمت‌های نقشه زمین‌شیمیایی. برای یک نقشه زمین‌شیمیایی، مقدار α (شاخص سینگولاریتی) نزدیک به ۲ یک توزیع نرمال را نشان می‌دهد. درحالی که مناطقی با سینگولاریتی مثبت ($\alpha > 2$) تهی‌شدگی و سینگولاریتی منفی ($\alpha < 2$) غنی‌شدگی غلظت عناصر در منطقه مورد نظر را نشان می‌دهد (Liu et al., 2019). در این روش، با استفاده از نرم افزار MATLAB، سینگولاریتی 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 (Jafari et al., 2018a). در این حالت آثار بالا دست و پایین دست منطقه نیز در نظر گرفته می‌شوند. تولید این مربع‌های کوچک آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا به

جدول ۲. محاسبه پارامترهای آماری برای عناصر سرب و روی در ورقه خنداب.

Table 2. Calculation of statistical parameters for Pb and Zn metals in the Khondob sheet.

Metals	Min	Max	Mean	Median	Std	Var
Pb (ppm)	3.75	843.40	22.83	30.75	40.80	1665
Zn (ppm)	13.61	923.81	106.33	129.22	93.43	8729

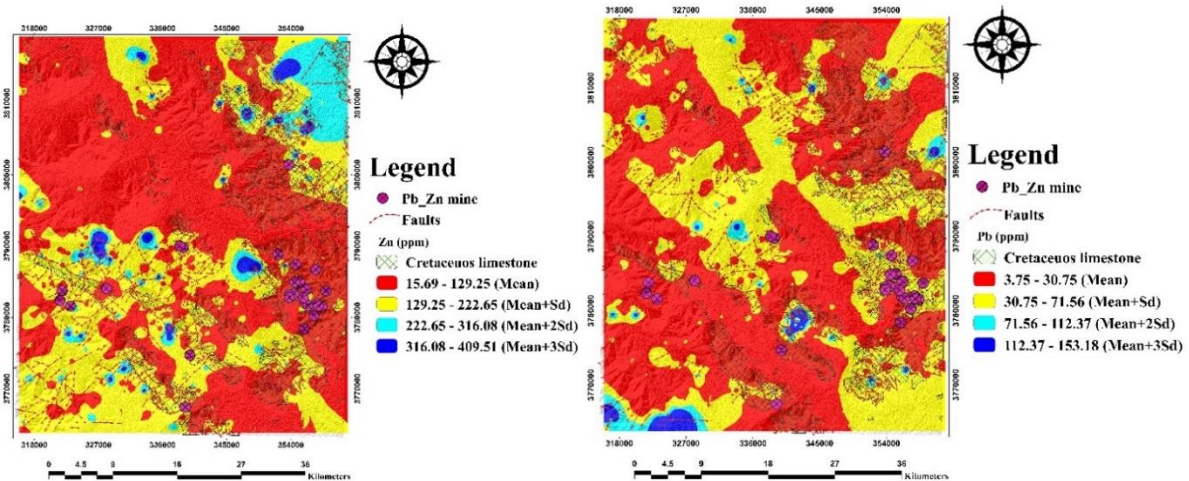
نیاز داریم که مطابق جدول (۲) برای هر دو عنصر سرب و روی محاسبه گردید (Nazarpour et al., 2015). با توجه به مطالب گفته شده در بالا و پارامترهای آماری محاسبه شده، تفکیک جوامع آنومالی از زمینه برای فلزات سرب و روی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خنداب با استفاده از نرم افزار ArcGIS مطابق شکل ۵ انجام شد. بر اساس نقشه‌های بدست آمده از روش آمار کلاسیک، برای فلز سرب، قسمت‌های شمال‌شرق و جنوب منطقه بصورت پراکنده و برای فلز روی، قسمت مرکز و شمال‌شرق منطقه بیشترین میزان آنومالی را نشان می‌دهند.

پس از محاسبه پارامترهای آماری (جدول ۲)، تقسیم‌بندی جوامع زمین‌شیمیایی برحسب مقدار میانگین و انحراف معیار برای فلزات سرب و روی مطابق جدول ۳ بدست آمد. با استفاده از این جدول (جدول ۳) می‌توانیم به جداسازی آنومالی‌های زمین‌شیمیایی عناصر مورد نظر در ورقه خنداب بپردازیم. در اینجا با توجه به عدم تبعیت داده‌ها از حالت نرمال، که در واقع نشان دهنده عملکرد فرآیندهای زمین‌شناختی در منطقه می‌باشد، نمی‌توان مقدار میانگین عناصر سرب ۳۰/۷۵ ppm و روی ۱۲۹/۲۵ ppm را به عنوان مقدار زمینه در نظر گرفت (Nazarpour et al., 2016). بنابراین جهت محاسبه حد آستانه آنومالی فلزات مورد نظر، به انحراف معیار

جدول ۳- تقسیم‌بندی جوامع زمین‌شیمیایی برحسب مقدار میانگین و انحراف معیار (آمار کلاسیک) برای فلزات سرب و روی.

Table 3. Geochemical communities divided by mean and standard deviation (classical statistics) for Pb and Zn metals.

Metals	Low Background	High Background	Possible Anomaly	Definitive Anomaly
Pb (ppm)	Mean=30.75	Mean+STEV=71.56	Mean+2STEV=112.37	Mean+3STEV=153.18
Zn (ppm)	Mean=129.25	Mean+STEV=222.65	Mean+2STEV=316.08	Mean+3STEV=409.51



شکل ۵- نقشه توزیع جوامع زمین‌شیمیایی فلزات سرب و روی بر اساس روش آمار کلاسیک (Mean+nSTEV) در ورقه خنداب.

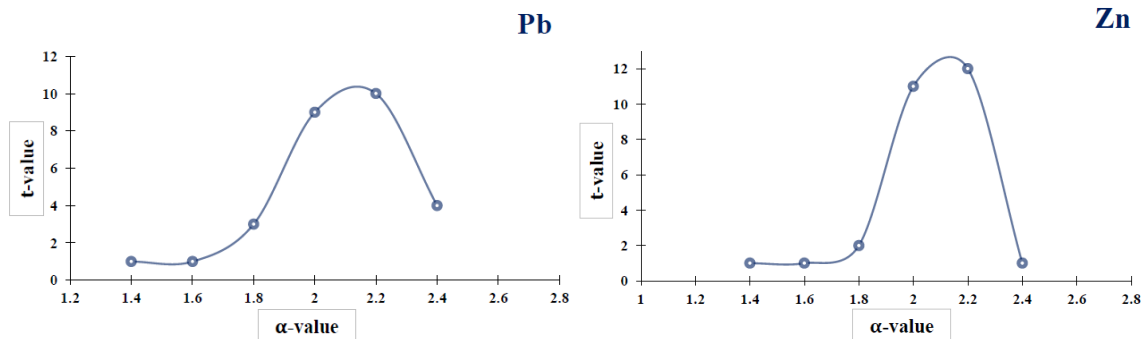
Fig. 5. Distribution map of geochemical communities of Pb and Zn metals based on classical statistical method in the Khondob sheet.

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

مربوط به هر عنصر می‌باشد. این نمودار بیان کننده این موضوع می‌باشد که در کدام مقدار از آنومالی‌های بدست آمده از روش سینگولاریتی (α)، همپوشانی بیشتری با کنسارهای سرب و روی موجود در منطقه وجود دارد. (Kananian et al., 2018).

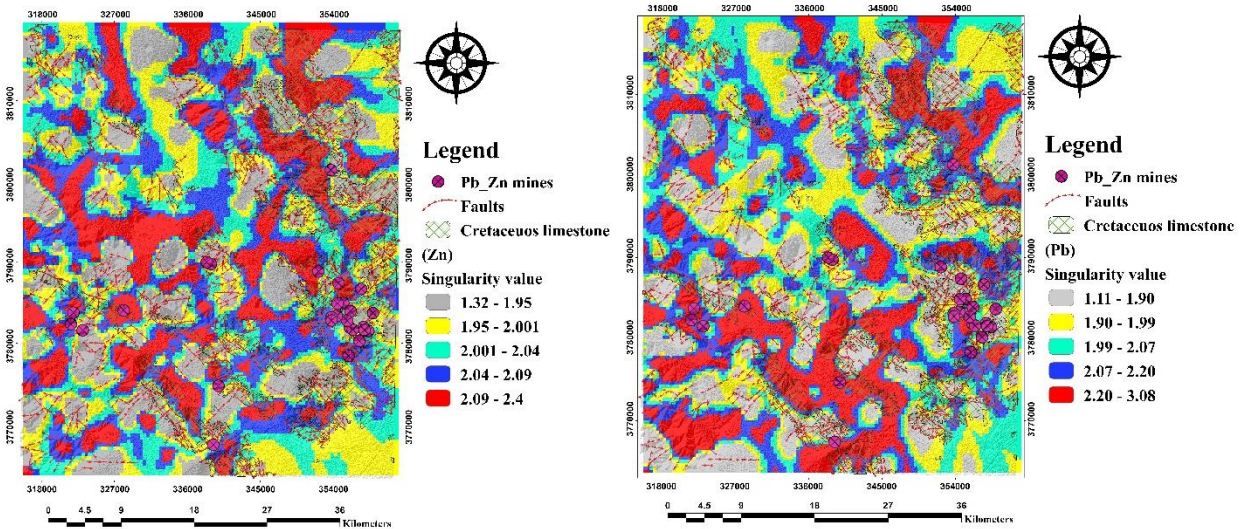
همانطور که از نمودار پیداست برای هر دو عنصر سرب و روی مقدار α (شاخص سینگولاریتی) $2/1$ به دست آمده است که این مقدار بیانگر بیشترین میزان انطباق کنسارهای سرب و روی در ورقه $1:100000$ خنداب است. علت تشابه این نمودار برای هر دو عنصر این است که کنسارهای سرب و روی عمدتاً با یکدیگر تشکیل می‌شوند و شرایط تشکیل مشابهی دارند. در این پژوهش حد آستانه بدست آمده از روش شاخص سینگولاریتی (α) مطابق نمودار T-Value برای فلزات سرب و روی $2/1$ می‌باشد که تمام معادن موجود در منطقه مورد نظر را پوشش می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود برای فلز سرب، جنوب و شمال شرق محدوده و برای فلز روی شمال-شرق و مرکز محدوده بیشترین میزان آنومالی را نشان می‌دهد (شکل ۷).

در روش شاخص سینگولاریتی بر خلاف روش آمار کلاسیک، خروجی یک عدد با بازه کوچک است که این عدد همان ضریب سینگولاریتی (α) است (Sun et al., 2010). بر اساس گفته Cheng (۲۰۰۷) حد آستانه معمول در روش سینگولاریتی $\alpha = 1/96$ می‌باشد (Cheng, 2007). نمودار شواهد وزنی (T-Value)، مقدار سینگولاریتی (α) را در برابر مقدار t که در ارتباط با رخنمون‌های معدنی است، را نشان می‌دهد (شکل ۶). مقدار t از رابطه C/S(C) با استفاده از روش شواهد وزنی (WofE) (Weight of evidence) به دست آمده است. جایی که $C = W^+ - W^-$ و S(C) انحراف معیار (SDEV) C باشد. W^+ و W^- زمانی که مدل‌های اثبات شده‌ای باشند (به عنوان مثال آنومالی‌ها) مقادیر وزن‌هایی هستند که از W^+ زمانی که رخنمون معدنی وجود داشته باشد و از W^- زمانی که رخنمون معدنی وجود نداشته باشد استفاده می‌شود (Agterberg et al., 1990). در واقع تعداد معادن و کنسارهای مربوط به هر عنصر را نمایش می‌دهد و (α) مقدار سینگولاریتی بدست آمده



شکل ۶- نمودار T-Value عناصر سرب و روی برای آنومالی‌های بدست آمده از روش شاخص سینگولاریتی در ورقه خنداب.

Fig. 6. T-Value graph for Pb and Zn metals for the anomalies obtained from the Singularity Index method in the Khondob sheet.



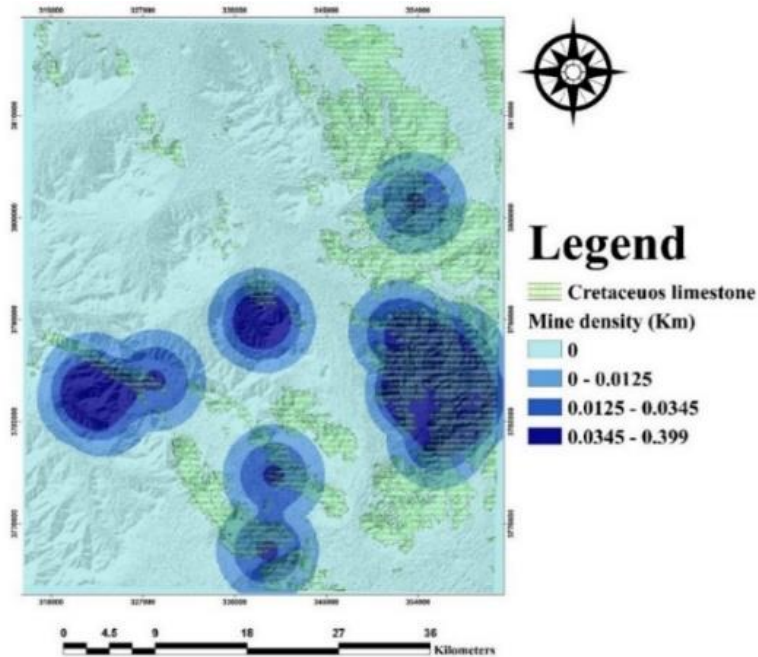
شکل ۷- نقشه زمین‌شیمیایی فلزات سرب و روی بر اساس روش شاخص سینگولاریتی (SI) در ورقه خنداب.

Fig. 7. Geochemical map of Pb and Zn metals based on the method of Singularity Index (SI) in the Khondob sheet.

بررسی انطباق معادن، گسل‌ها و دگرسانی‌ها با واحد آهک کرتاسه و ارتباط آن با کانه‌زایی سرب و روی

تراکم معادن سرب و روی موجود در قسمت شرق و جنوب‌شرقی ورقه خنداب پوشش ۱۰۰٪ با واحد آهک‌های کرتاسه منطقه نشان می‌دهند. در سایر مناطق (جنوب و جنوب‌غرب) نیز انطباق نسبی بین تراکم کانسارها و آهک‌های کرتاسه وجود دارد.

تراکم معادن، کانسارها و نشانه‌های معدنی سرب و روی موجود در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خنداب انطباق بالایی با واحدهای آهک کرتاسه منطقه نشان می‌دهد که این می‌تواند دلیلی بر اهمیت این واحد زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه باشد. همچنین با استناد به شکل ۸ می‌توان چنین نتیجه گرفت



شکل ۸- نقشه تراکم معادن سرب و روی در ورقه خنداب.

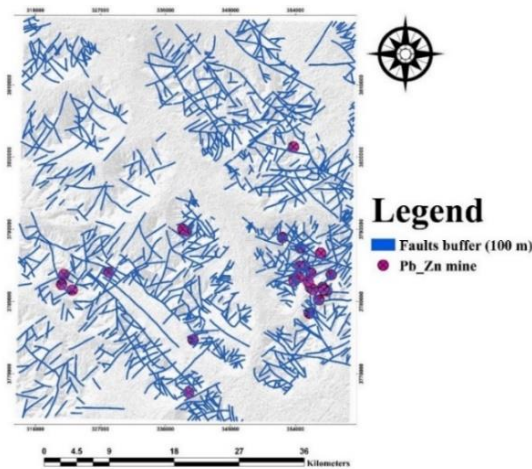
Fig. 8. Map of Pb and Zn mines density in the Khondob sheet.

گسل‌ها

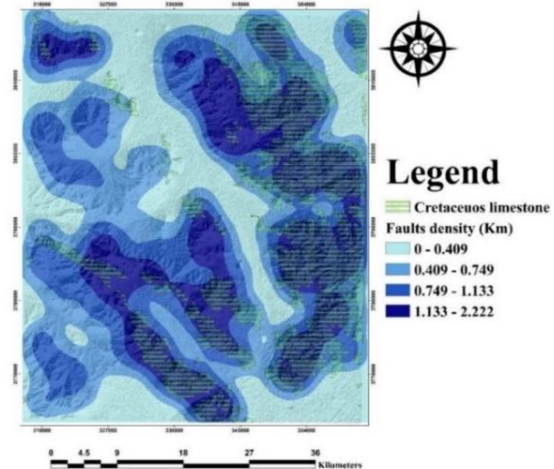
داشته و یکی از عوامل اصلی کانی‌زایی سرب و روی در این منطقه به حساب می‌آید. بافر ۱۰۰ متری گسل‌های منطقه نشان دهنده این موضوع می‌باشد که تا فاصله ۱۰۰ متری گسل‌های منطقه، تمام معادن پوشش داده می‌شوند و همچنین بیانگر ارتباط کانی‌سازی با گسلش منطقه نیز است (شکل ۱۰). با نگاهی به نتایج حاصل از دیاگرام گل‌سرخ (رُز دیاگرام) گسل‌های منطقه (شکل ۱۱) که تعیین کننده روند گسل‌ها در یک منطقه می‌باشند مشخص شد که گسل‌های غالب منطقه دارای دو روند اصلی می‌باشند: ۱- شمال-شرق-جنوب‌غرب با امتداد N30E تا N60E که روند غالب گسل‌های منطقه بشمار می‌آیند. ۲- شمال‌غرب-جنوب‌شرق با امتداد N120E تا N145E. همچنین نتایج حاصل از آنالیز فرای ۲۸ اندیس معدنی سرب و روی (شکل ۱۲) که در بررسی پراکندگی کانسارها و اندیس‌های معدنی شناخته شده نقش اساسی دارد، نشان داد که علاوه بر روند اصلی شمال-شرق-جنوب‌غرب، یک روند فرعی شمال‌غرب-جنوب‌شرق در منطقه قابل مشاهده است (Mahdavi et al., 2010). با توجه به همخوانی روندهای بدست آمده از روش آنالیز فرای با روند گسل‌های منطقه، نقش کنترل‌های گسلی در تشکیل کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناته در ورقه خنداب کاملاً مشهود است. علاوه بر آن کانه‌زایی در گسل‌ها با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب و شمال‌غرب-جنوب‌شرق تشکیل شده است.

یکی از عوامل کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه با توجه به نوع و ماهیت تشکیل ماده معدنی گسل‌ها هستند که ممکن است کانی‌زایی در امتداد آن‌ها صورت گرفته باشد. بطور کلی ارتباط تنگاتنگی بین تشکیل کانسارهای MVT و پدیده‌های تکتونیکی بزرگ مقیاس وجود دارد. از لحاظ جایگاه تکتونیکی، حوضه‌های فورلندی یکی از اصلی‌ترین مناطق تشکیل این کانسارها محسوب می‌شود. فاکتورهایی مانند شیب فرورانش، ساختار حرارتی صفحه فرورونده و الگوی کنوکسیون در استنوسفر، همگی بر روی حوضه فورلندی تأثیر می‌گذارند (Leach et al., 2001). با فرورفتن پوسته اقیانوسی، گسل‌های نرمال ایجاد شده و پیشانی برآمده به سمت قاره حرکت می‌کند. در تصادم‌هایی که در عرض‌های جغرافیایی پایین اتفاق می‌افتد پیشانی برآمده به وسیله کربنات‌های نواحی کم عمق دریا پوشیده می‌شوند (Leach et al., 2001). چنین شرایطی در زون سنندج-سیرجان که منطقه مورد نظر بخشی از آن به حساب می‌آید سبب کانه‌زایی سرب و روی نوع MVT شده است. معمولاً کانه‌سازی کانسارها و نشانه‌های معدنی در این مناطق، اغلب چینه‌کران هستند و به صورت لایه‌ای، رگه‌ای و عدسی شکل دیده می‌شوند (Mahdavi et al., 2010).

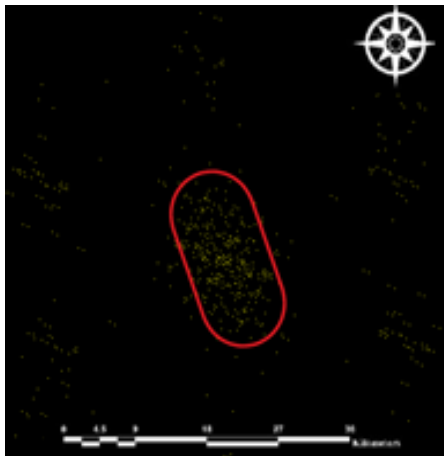
با توجه به شواهد موجود در منطقه و همچنین تراکم گسل‌ها (شکل ۹) می‌توان چنین نتیجه گرفت که گسل‌های موجود در قسمت جنوب و جنوب-شرق ورقه خنداب با تراکم بین ۱/۱۳ تا ۲/۲۲ کیلومتر بیشترین تراکم را



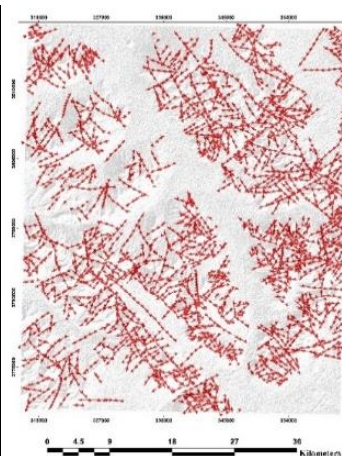
شکل ۱۰- بافر ۱۰۰ متری گسل‌های ورقه خنداب.
Fig. 10. 100 meter buffer faults of Khondab sheet.



شکل ۹- نقشه تراکم گسل‌های موجود در ورقه خنداب.
Fig. 9. Fault density map in the Khondab sheet



شکل ۱۲- آنالیز فرای مربوط به گسل‌های منطقه.
Fig. 12. Analyze Fry faults in study area.



شکل ۱۱- نمودار گل سرخی گسل‌های ورقه خنداب.
Fig. 11. Radiogram faults Khondob sheet.

Rose diagrams of the main faults

Azimuth Values Derived from Polylines in 'Faults'

N = 1,487

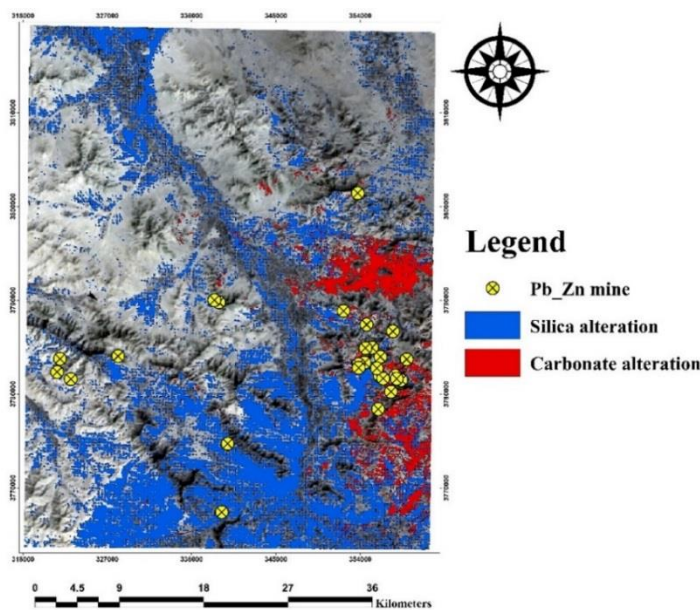


دگرسانی

در تشکیل نهشته‌های سرب و روی معمولاً دگرسانی‌های کربناته (دولومیتی شدن) و سیلیسی (ژاسپروئیدی) نقش اساسی دارند (Hutkinson, 1983). دگرسانی دولومیتی در کانسارهای سرب و روی تیپ MVT دیده می‌شود. در این فرآیند، سنگ میزبان (سنگ آهک) به دولومیت تبدیل می‌شود که سنگی کاملاً مناسب برای واکنش با محلول‌های کانه‌ساز و تشکیل کانسار است، زیرا دولومیت‌ها به علت ترکیب شیمیایی خاص خود قابلیت واکنش با محلول‌های کانه‌ساز را به خوبی دارند. از طرفی، پدیده دولومیتی شدن سنگ آهک با افزایش تخلخل همراه است که خود عامل تسهیل کننده‌ای برای گردش محلول‌ها است (El Janati, 2019). Park و McDiarmid (۱۹۷۵) بر این باورند که کانی‌سازی در سنگ‌های آهکی، هیچگاه بدون دولومیتی شدن پیشین امکان‌پذیر نیست. سیلیسی شدن از دگرسانی‌های اصلی و مهم در کمر بند فلز زایی ملایر- الیگودرز- اصفهان بشمار می‌آید که ارتباط تنگاتنگی با کانی‌سازی سرب و روی دارد (Rajabi et al., 2012). دگرسانی سیلیسی، به طور عمده بستگی به ترکیب سنگ دارد و چنانچه سنگ درونگیر، لیتولوژی مناسبی مانند آهک و بخصوص دولومیت داشته باشد، این دگرسانی گسترش بیشتری خواهد داشت (Liu et al., 2018). بر اساس گفته Lovering (۱۹۷۲) سیلیسی شدن سنگ‌های آهکی می‌تواند نتیجه‌ی انحلال کربنات و ته‌نشست هم‌زمان سیلیس در بطن سنگ و یا پرشدگی حفره‌ها و شکستگی-ها با سیلیس یا تلفیقی از هر دو رویداد باشد (Lovering, 1972). در منطقه مورد نظر سیلیکای مورد نیاز برای این دگرسانی را می‌توان به ماسه-سنگ‌های ژوراسیک نسبت داد. در این مطالعه از روش نسبت باندی که یکی از رایج‌ترین پردازش تصاویر ماهواره‌ای است برای بارزسازی دگرسانی‌ها

استفاده شده است (Sabins, 1999). این روش تقسیم کردن دو باند بر همدگر است. باندی که میزان تابش از هدف مورد بررسی در آن بیشتر است، در صورت و باند دیگر که پدیده جذب برای همان هدف در آن بالاتر است، در مخرج قرار می‌گیرد (El Janati, 2019). با بکارگیری این روش، می‌توان اثرات توپوگرافی و سایه‌ها را در تصویر کاهش داد و نیز اختلاف بین درجات روشنایی را آشکار کرد و نیز برای جدا کردن مرز واحدهای سنگی و تشخیص سنگ‌ها به کار می‌رود (Rouskov et al., 2005). تصویر استفاده شده در این پژوهش متعلق به سنجد Aster ماهواره Terra می‌باشد که با ادغام باند (VINR+SWIR) با بهره‌گیری از نرم افزار ENVI پردازش گردید. برای بارزسازی دگرسانی سیلیسی از نسبت باندی (B13) / (B12) و دگرسانی کربناته (B9+B9) / (B7) استفاده شده است (Liu et al., 2018). همانطور که در شکل ۱۳ و نقشه زمین-شناسی منطقه مشخص است در تمامی مناطق (بخصوص قسمت جنوب-شرق) ورقه خنداب دگرسانی‌های سیلیسی و کربناته کاملاً با معادن سرب و روی و آهک‌های کرتاسه منطقه همپوشانی داشته که این خود نشان دهنده نقش دگرسانی‌های سیلیسی و کربناته در کانه‌سازی سرب و روی می‌باشد. همچنین مشخص شد دگرسانی غالب منطقه از نوع سیلیسی و پس از آن کربناتی است.

با بررسی نقشه تراکم معادن، گسل‌ها، واحد آهک کرتاسه و دگرسانی-های (کربناتی و سیلیسی) بدست آمده در منطقه به این نکته پی خواهیم برد که این عوامل همپوشانی بسیار بالایی با یکدیگر دارند که می‌توانیم از آن به عنوان راهنمای اکتشافی مناسبی برای پی‌جویی عناصری نظیر سرب، روی، مس، نقره و آهن در این منطقه استفاده نماییم.



شکل ۱۳- شناسایی آلتراسیون‌های سیلیسی و کربناته با استفاده از تصویر ASTER در ورقه خنداب.

Fig. 13. Identification of silica and carbonate alternations using ASTER image in Khondob sheet.

مقایسه پراکندگی فلزات سرب و روی با استفاده از روش آمار

کلاسیک (Mean+nSTEV) و شاخص سینگولاریتی

در این مطالعه جهت جداسازی آنومالی‌های زمین‌شیمیایی فلزات سرب و روی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خنداب از روش آمار کلاسیک و شاخص سینگولاریتی (SI) استفاده گردیده است. در روش آمار کلاسیک، تفسیر و پردازش داده‌ها بر اساس غلظت و عیار داده‌های برداشت شده می‌باشد. به همین علت احتمال دارد که بعضی از محدوده‌های معرفی شده توسط این روش به‌عنوان آنومالی کاذب باشند. آنومالی‌های حاصل از روش آمار کلاسیک گستردگی بیشتری نسبت به روش شاخص سینگولاریتی از خود نشان می‌دهد که این به علت توزیع نرمال، حذف تعدادی از داده‌ها به عنوان خارج از ردیف و عدم توجه به توزیع فضایی داده‌ها می‌باشد. روش آمار کلاسیک در مناطقی نتایج بهتری از خود نشان می‌دهد که آنومالی زمینه ساده باشد یا به عبارتی خیلی شدید نباشد اما در مناطقی که ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده و آلتراسیون‌های زمین‌شیمیایی وجود داشته باشد (همانند منطقه مورد مطالعه)، این روش در شناسایی آنومالی‌های شدید دچار مشکل می‌شود (Carranza et al., 2012). در این حالت باید منطقه مورد مطالعه را به مناطق کوچکی تقسیم‌بندی نماییم سپس هر بخش را با استفاده از روش آمار کلاسیک به صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار دهیم. بطور کلی روش آمار کلاسیک در شناسایی آنومالی‌های ضعیف و پنهان از دقت بالایی برخوردار نیست. روش شاخص سینگولاریتی در مقایسه با روش

آمار کلاسیک آنومالی‌های پنهان و دقیق بیشتری که مطابق با ساختارهای زمین‌شناسی منطقه (آهک‌های کرتاسه) هستند را برای ما مشخص می‌کند. برعکس روش کلاسیک، در مناطقی که ساختارهای زمین‌شناسی و لیتولوژی متعدد هستند، قادر به شناسایی آنومالی‌های ضعیف است که در این حالت باید از روش‌های دو بعدی استفاده کرد. بطور 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 نتیجه‌ی سینگولاریتی اثر مستقیم دارد. در جدول ۴ که به خطای نوع ۱ (Type 1 error) و خطای نوع ۲ (Type 2 error) معروف است حد آستانه‌های بدست آمده برای دو روش آمار کلاسیک و شاخص سینگولاریتی برای فلز سرب مشخص شده و همچنین نشان داده شده که معادن، نسب به آنومالی‌ها و زمینه بدست آمده در چه شرایطی قرار دارند (Sun et al., 2010). مطابق این جدول دقت بالاتر روش سینگولاریتی کاملاً مشهود است به طوری که در آنومالی‌های بدست آمده از این روش فقط ۲ معدن در خارج از آن قرار گرفته و آنومالی کاذب، بطور چشمگیری کم است در حالی که در آنومالی‌های بدست آمده از روش آمار کلاسیک ۱۴ معدن از مجموع ۲۸ معدن سرب و روی موجود در ورقه خنداب در خارج از آنومالی قرار گرفته، این در حالی است که آنومال کاذب بیشتری را نشان می‌دهد (جدول ۴).

جدول ۴- درصد ذخایر شناخته شده فلز سرب در خارج از آنومالی‌های بدست آمده با روش‌های تعیین شده.

Table 4. Percentages of the known Pb deposits outside the anomalies determined by different methods.

Pb	Mean+nSTEV	SI
Threshold value	112.37 (ppm)	2.1(α)
Deposits outside anomalies (Total Zn-Pb deposits = 173)	14	2
Percentage of deposits outside anomalies	50%	8%
Percentage of anomalies	77%	42%
Percentage of background	23%	58%
Proportion of background over which deposits are located and the total background	1.07%	0.45%

نتیجه‌گیری

دارند. نقشه‌های حاصل از هر دو روش آمار کلاسیک و شاخص سینگولاریتی در جداسازی آنومالی‌های فلز سرب نشان داد که در شمال شرق و جنوب منطقه مورد مطالعه، بیشترین میزان آنومالی را دارا می‌باشد، برای فلز روی نیز، شمال شرق و مرکز منطقه بیشترین میزان آنومالی را نشان می‌دهد. آنومالی‌های بدست آمده از هر دو روش انطباق بالایی با آهک‌های کرتاسه منطقه، دگرسانی‌های سیلیسی و کربناتی (دولومیتی) و همچنین گسل‌های با راستای شمال شرق-جنوب غرب نشان می‌دهد لذا این سه عامل نقش اساسی در کانه‌زایی سرب و روی در ورقه خندان دارند.

مقایسه انطباق آنومالی‌های بدست آمده از دو روش بکار گرفته شده و از طرفی کانسارها و اندیس‌های موجود، نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که شاخص سینگولاریتی نسبت به روش آمار کلاسیک عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. با استفاده از نمودار شواهد وزنی (WofE) توانستیم حد آستانه را برای فلزات سرب و روی ($\alpha = 2/1$) بر اساس روش سینگولاریتی بدست آوریم. در نقشه‌های به دست آمده از روش سینگولاریتی، آنومالی‌های ضعیف (Weak Anomaly) و پنهان بهتر شناسایی شده و همچنین قسمت‌های زمینه، تهی شده و غنی شده کاملاً مشخص شده‌اند و آنومالی‌های مشخص شده انطباق خوبی با جایگاه معادن سرب و روی منطقه مورد نظر

منابع

- Agterberg, F. P., 2012. Multifractals and Geostatistics. *Journal of Geochemical Exploration* 122, 113-122.
- Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., Wright, D. F., 1990. Statistical pattern integration for mineral exploration. In *Computer applications in resource estimation*, 1-21.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211-238.
- Carranza, E. J. M., Zuo, R., Cheng, Q., 2012. Fractal/multifractal modelling of geochemical exploration data. *Journal of Geochemical Exploration* 122, 1-3.
- 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., Agterberg, F. P., 2009. Singularity analysis of ore-mineral and toxic trace elements in stream sediments. *Computers & Geosciences* 35, 234-244.
- Cheng, Q., Zhao, P., 2011. Singularity theories and methods for characterizing mineralization processes and mapping geo-anomalies for mineral deposit prediction. *Geoscience Frontiers* 2, 67-79.
- Eghlimi, B., 2000. Description of the Hamedan geological map on a scale of 1:100000. Geological survey and mineral explorations of Iran (GSI), Ministry of mines and metal industries.
- Ehya, F., Lotfi, M., 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, 186-194.
- El Janati, M., 2019. Application of remotely sensed ASTER data in detecting alteration hosting Cu, Ag and Au bearing mineralized zones in Taghdout area, Central Anti-Atlas of Morocco. *Journal of African Earth Sciences* 151, 95-106.
- Ghadimi, F., Ghadimi, Z., Ghomi, M., 2017. Determination of geochemical anomalies of stream sediments in Pb-Zn Songol mine of north Khomein by using Singularity index mapping. *Journal of New Finding in Applied Geology* 11, 119-131.

- Ghorbani, M., 2002. An introduction to Iranian Economic Geology, 1st edition, Geological survey and mineral explorations of Iran (GSI), Tehran, p. 469.
- Hashemi marand, G., Jafari. M., Afzal. P., 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, 111-118.
- Hutkinson, O.S., 1983. *Economic Deposits and their Relation to Tectonic Setting*, Maomillan Press, London, P: 365.
- Jafari, M. A., Kananian, A., Nazarpour, A. Ghasemi, S., 2018a. 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*.
- Jafari, M. A., Kananian, A., Nazarpour, A., 2018b. Comparison exploratory data analysis (EDA) method and Singularity Index to separation Cu element geochemical anomalies in the Malayer-Aligoudarz-Esfahan zone. *The First National Conference National Knowledge Based Research in Earth Sciences 1*, 210-215.
- Jamaliyan, M., 2002. The role of carbonate host rock in lead and zinc deposits of Rabat zone (Khomein-Arak). M.Sc. Thesis. Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 190 pp.
- Kananian, A., Jafari, M. A. 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. *Advanced Applied Geology* 8, 63-74.
- Karimpour, M. H., 2002. *Applied Economic Geology*, 1st edition, Publication Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, p. 173.
- Leach, D. L., Bradley, D., Lewchuk, M. T., Symons, D. T., de Marsily, G., Brannon, J., 2001. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time: implications from recent age-dating research. *Mineralium Deposita* 36, 711-740.
- Lima, A., 2008. Evaluation of geochemical background at regional and local scales by fractal filtering technique: case studies in selected Italian areas. In: De Vivo, B., Belkin, H.E., Lima, A. (Editors), *Environmental Geochemistry: Site Characterization, Data Analysis, Case Histories*, Elsevier, Amsterdam, pp. 135-152.
- Liu, L., Feng, J., Han, L., Zhou, J., Xu, X., Liu, R., 2018. Mineral mapping using space borne Tiangong- 1 hyperspectral imagery and ASTER data: A case study of alteration detection in support of regional geological survey at Jintanzi- Malianquan area, Beishan, Gansu Province, China. *Geological Journal* 53, 372-383.
- Liu, Y., Xia, Q., 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.
- Liu, Y., Zhou, K., Cheng, Q., 2017. A new method for geochemical anomaly separation based on the distribution patterns of singularity indices. *Computers & Geosciences* 105, 139-147.
- Lovering, T. G., 1972. Jasperoid in the United States; its characteristics, origin, and economic significance, 710.
- Mahdavi, A., Rahimi, B., 2010. Carbonate Hosted Pb-Zn Deposits in Malayer-Isfahan Belt and Their Relation with Fault Structures, Application of Fry Analysis. *The first conference of the Iranian Economic Geology Society*, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- Majidi, B., Amidi, S. M., 1990. Description of the Hamedan geological map on a scale of 1:250000. Geological survey and mineral explorations of Iran (GSI), Ministry of mines.
- Nazarpour, A., Paydar, G. R., 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., 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.
- Park Jr, C. F., MacDiarmid, R. A., 1975. *Ore deposits*, P. 529.
- Radfar, J., Kohansal, R., 2003. Description of the Arak geological map on a scale of 1:100000. Geological survey and mineral Explorations of Iran (GSI), Ministry of mines and metal industries.
- Rahimpour, B., 1991. Study of lead and zinc deposits of south of Arak (Emarat). M.Sc. Thesis. Tehran University, 187 pp.

- Rajabi, A., Rastad, E., 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, 1649-1672.
- Rajabi, A., Rastad, E., 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, 197-216.
- Reimann, C., 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.
- Rouskov, K., Popov, K., Stoykov, S., Yamaguchi, Y., 2005. Some applications of the remote sensing in geology by using of ASTER images. In Scientific Conf. “SPACE, ECOLOGY, SAFETY” with Int. Participation, pp. 167-173.
- Sabins, F. F., 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 14, 157-183.
- Shapiro, S. S., Wilk, M. B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52, 591-611.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG bulletin* 52, 1229-1258.
- Sun, X., Gong, Q., Wang, Q., Yang, L., Wang, C., 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.
- Xiao, F., Chen, J., Hou, W., Wang, Z., Zhou, Y., Erten, O., 2018. A spatially weighted singularity mapping method applied to identify epithermal Ag and Pb-Zn polymetallic mineralization associated geochemical anomaly in Northwest Zhejiang, China. *Journal of Geochemical Exploration* 189, 122-137.
- Yaaghobpour, E., 2002. *Economic Geology*, 1st edition, Publication of Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran, p. 114.
- Zuo, R., 2014. Identification of geochemical anomalies associated with mineralization in the Fanshan district, Fujian, China. *Journal of Geochemical Exploration* 139, 170-176.
- Zuo, R., Cheng, Q., Agterberg, F. P., Xia, Q., 2009. Application of singularity mapping technique to identify local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, western China. *Journal of Geochemical Exploration* 101, 225-235.
- Zuo, R., Wang, J., Chen, G., Yang, M., 2015. Identification of weak anomalies: A multifractal perspective. *Journal of Geochemical Exploration* 148, 12-24.