

Research Article

Application of fractal modeling and delineation of hydrothermal alterations in the separation of Zn, Pb, Cu, and Ba anomalies in Varcheh 1: 100000 sheet (south of Arak)

Taher farhadinejad^{1*}, Farzane Mir², Seyed Vahid Shahrokhi³

1- Soil conservation and watershed management Department. Lorestan Agricultural and Natural Research and Education Center, AREEO, Khoramabad, Iran

2- Geology department, Science Faculty, Lorestan University

3- Department of Geology, Khoramabad Branch, Islamic Azad University, Khoramabad, Iran

Keywords: *Fractal, Concentration-number, Alteration, Aster, Arak*

1- Introduction

Mandelbrot (1983) introduced the fractal model as an important non-Euclidean method in geometry. Fractal modeling is a useful tool for classifying various natural phenomena, particularly geological features, such as anomalies and zoning minerals based on the relationship between the ore grade and their geometric spaces (Mandelbrot, 1983; Yasrebi and Hezarkhani, 2019; Zuo and Wang, 2020; Hassanpour and Afzal, 2013). Fractal methods evaluate relationships between all parameters, such as geochemical data and spatial distribution, without any data normalization. For this reason, fractal models are more exact and closer to reality (Carranza, 2009, 2010; Carranza et al., 2009; Carranza and Sadeghi, 2010; Afzal et al., 2013; Sadeghi et al., 2012; Nazarpour et al., 2015; Rahmati et al., 2015; Wang et al., 2011; Hosseini et al., 2015). The advantages of this method are based on its accuracy due to the elimination of geochemical data noise and the separation of anomalies of different levels based on their intensity (Farahmandfar et al., 2020; Saadati et al., 2020).

On the other hand, the best way to find alteration zones is to use satellite data processing. Chemical and mineralogical changes resulting from the alteration of rocks change the amount of energy reflected or absorbed in these rocks. Since these energies are different for different phenomena for one wavelength and reciprocally for a phenomenon at different wavelengths, by processing satellite data, it is possible to identify and investigate the presence or absence of indicator minerals of some alterations (Karimpour et al., 2012).

In this paper, stream sediment data of the 1: 100000 geological sheet of Varcheh in the south of Arak were analyzed using the fractal concentration-number (CN) method and with alteration zones and faults drawn using satellite images multispectral Aster sensor has been combined for mineral exploration (Fig. 1).

2- Material and methods

In this study, 1292 samples of stream sediments on the 1:100000 geological sheet of Varcheh in the south of Arak were surveyed by the Geological Survey & Mineral Explorations of Iran (GSI) for geochemical discoveries and analyzed by the ICP-MS method to detect 15 elements (Fig. 2).

* Corresponding author: farhadinejad@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2021.37471.2224

Received 2021-06-04

Accepted 2021-08-05

The fractal model can be used to classify the distribution of geochemical data without estimating or simulating geostatistical (Afzal et al., 2016, 2017). This approach is revealed as follows:

$$N (\geq\rho) \propto F\rho^{-D} \quad \text{equation 1}$$

$N (\geq\rho)$ and ρ represent the cumulative number of samples with content equal to or greater than ρ and regional variables (such as Cu values), respectively. F and D are the capacity constants and scaling agents, as fractal dimensions, for the regional variable distribution.

To identify the alterations in the 100,000 Varcheh sheet, the data of the Terra Satellite Aster sensor and the ETM⁺ sensor of Landsat 7 were used. After pre-processing the data and separating their absorption and reflectance bands, using band ratio and false-color composite (Moradi and Boomeri, 2017), alterations of iron oxide, kaolinite, propylitic and silica are identified and in the software ArcGIS 10.5 digits.

High-pass filters and specifically 3*3 (Directional) filters in ENVI 5.1 software have been used to draw edges, linear features, borders and fractures. For detection fractures in different directions, have been applied the filter angle of 45, 135 and 180. After applying the filter, transferred the image to ArcGIS 10.5 software and draw the output map of the fractures.

3- Results and discussion

The statistical parameters of Zn, Pb, Cu, and Ba, and the Q-Q plots and histograms for these 15 elements showed a right-skewed non-normal distribution (table.1, fig.1). In this case, the fractal method is among the best techniques for separating anomalies from the background (Jaafari et al., 2019). The element data were analyzed by the concentration-number (C-N) fractal method and then matched to alteration zones and faults plotted by ASTER multispectral imagery to detect minerals. The C-N fractal diagram was plotted for Zn, Pb, Cu, and Ba, and the most intensive anomalies for these elements have a grade greater than 524.8, 794.3, 223.9, and 944.1, respectively (Fig.4 and Fig.5).

The band ratio technique is one of the most practical techniques used to identify hydrothermal alterations such as iron oxide (Di Tommaso and Rubinstein, 2007). Therefore, by processing ETM⁺ images by the 3:1 band ratio method, areas with iron oxide were extracted (Figure 6).

Propylitic alteration using a color composite (RGB: 468) and band ratio $(B5 + B7) / B6$ of Aster imagery were separated. To extract the siliceous alteration from color composite RGB: 531, the thermal bands of the Aster sensor were used, which appear in red and pink (Moradi and Boomeri, 2017).

Integrating the anomaly maps for Zn, Pb, Cu, and Ba with iron oxide, Propylitic, argillic, and silicic alterations, fault maps, and regional fractures and the maps of mines and Varcheh mineral indices showed that the metal mines have mainly occurred in regions with a high fault fracture density (fig. 7 and fig. 8). However, mineral indices have rarely occurred in regions with a high fault density, presumably due to the circulation of fluids in fault-induced channels. The separated Pb and Zn anomalies are consistent and related to high fault and fracture density regions. They are also highly correlated with the silicic alteration plotted in the region. Integrating the prepared maps with the regional geological map indicated that Pb, Zn, and Ba mines have mainly occurred in Cretaceous limestone and sandstone and Jurassic Siltstone Formation. The separated anomalies overlap these Formations.

4- Conclusion

The C-N fractal diagram was plotted for Zn, Pb, Cu, and Ba, and the most intensive anomalies for these elements have a grade greater than 524.8, 794.3, 223.9, and 944.1, respectively.

Mineral indices have rarely occurred in regions with a high fault density, presumably due to the circulation of fluids in fault-induced channels. The separated Pb and Zn anomalies are consistent and related to high fault and fracture density regions. They are also highly correlated with the silicic alteration plotted in the region. Integrating the prepared maps with the regional geological map indicated that Pb, Zn, and Ba mines have mainly occurred in Cretaceous limestone and sandstone and Jurassic Siltstone Formation. The separated anomalies overlap these Formations.

Acknowledgments

Due to providing data on stream sediments in the region by the Geological Survey of Lorestan, the authors of the article express their gratitude and thanks to them.

References

- Afzal, P., Heidari, S.M., Ghaderi, M., Yasrebi, A.B., 2017. Determination of mineralization stages using correlation between geochemical fractal modeling and geological data in Arabshah sedimentary rock-hosted epithermal gold deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 91, 278–295. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.09.021>
- Afzal, P., Mirzaei, M., Yousefi, M., Adib, A., Khalajmasoumi, M., Zarifi, A.Z., Foster, P., 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* 119, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.03.009>
- Afzal, P., Harati, H., Fadakar Alghalandis, Y., Yasrebi, A.B., 2013. Application of Spectrum-Area Fractal Model to Identify of Geochemical Anomalies Based on Soil Data in Kahang Porphyry-Type Cu Deposit, Iran. *Geochemistry* 73(4), 533–543. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2013.08.001>
- 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* 35, 383–400. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.01.001>
- Carranza, E.J.M., 2010. From predictive mapping of mineral prospectivity to quantitative estimation of number of undiscovered prospects. *Resource Geology* 61, 30–51. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2010.00146.x>
- Carranza, E.J.M., Owusu, E., Hale, M., 2009. Mapping of prospectivity and estimation of number of undiscovered prospects for lode-gold, southwestern Ashanti Belt, Ghana. *Mineralium Deposita* 44, 915–938. <https://doi.org/10.1007/s00126-009-0250-6>
- Carranza E.J.M., Sadeghi M., 2010. Predictive mapping of prospectivity and quantitative estimation of undiscovered VMS deposits in Skellefte district (Sweden). *Ore Geology Reviews* 38, 219–241. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.02.003>
- Di Tommaso, I., Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews* 32(1), 275–90. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.004>
- Farahmandfar, Z., Jafari, M.R., Afzal, P., Ashja Ardalan, A., 2020. Description of gold and copper anomalies using fractal and stepwise factor analysis according to stream sediments in NW Iran. *Geopersia* 10(1), 135–148. <https://doi.org/10.22059/geope.2019.265535.648413>
- Hassanpour, S., Afzal, P., 2013. Application of concentration-number (C-N) multifractal modelling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 6, 957–970. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0396-2>
- Karimpour, M.H., Malekzadeh, A., Haidarian, M.R., 2012. Ore deposit exploration, geology, geochemistry, satellite and geophysics models, 2nd edition, Ferdowsi University of Mashhad p. 632
- Mandelbrot, B.B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman, San Francisco 468 p.
- Moradi, R., Boomeri, M., 2017. Remote sensing detection of altered zones associated with Cu-Mo mineralization in north of Zahedan, SE Iran using Landsat-8 data. *Yerbilimleri* 38(3), 275–294. <https://dergipark.org.tr/en/pub/yerbilimleri/issue/39251/462194>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.08.007>
- Rahmati, A., Afzal, P., Abrishamifar, S.A., Sadeghi, B., 2015. Application of concentration–number and concentration–volume fractal models to delineate mineralized zones in the Sheytoor iron deposit, Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 8(5), 2953–2965. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1330-1>

- Saadati, H., Afzal, P., Torshizian, H., Solgi, A., 2020. Geochemical exploration for lithium in NE Iran using the geochemical mapping prospectivity index, staged factor analysis, and a fractal model. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 20(4), 461. <https://doi.org/10.1144/geochem2020-020>
- Sadeghi, B., Moarefvand, P., Afzal, P., Yasrebi, A.B., Saein, L.D., 2012. Application of fractal models to outline mineralized zones in the Zaghia iron ore deposit, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 122, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.011>
- Wang, G., Zhang, S., Yan, C., Song, Y., Sun, Y., Li, D., Xu, F., 2011. Mineral potential targeting and resource assessment based on 3D geological modeling in Luanchuan region, China. *Computers & Geosciences* 37, 1976–1988. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.05.007>
- Yasrebi, A.B., Hezarkhani, A., 2019. Resources classification using fractal modelling in Eastern Kahang Cu-Mo porphyry deposit, Central Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 11, 56–67. <https://doi.org/10.30495/ijes.2019.544596>
- Zuo, R., Wang, J., 2020. ArcFractal: An ArcGIS Add-In for Processing Geoscience Data Using Fractal/Multifractal Models. *Natural Resources Research* 29, 3–12. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09513-5>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Farhadinejad, T., Mir, F., Shahrokhi, V., 2023. Application of fractal modeling and delineation of hydrothermal alterations in the separation of Zn, Pb, Cu, and Ba anomalies in Varcheh 1: 100000 sheet (south of Arak). *Adv. Appl. Geol.* 12(4), 945-963.

DOI: 10.22055/AAG.2021.37471.2224

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_17049.html

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

کاربرد مدل سازی فرکتالی و دگرسانی های گرمابی در تفکیک آنومالی های Ba و Cu, Pb, Zn در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ ورچه (جنوب اراک)

طاهر فرهادی نژاد*

استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم آباد، ایران

فرزانه میر

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه زمین شناسی دانشگاه لرستان

سید وحید شاهرخی

استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران

* Farhadinejad@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴

چکیده

مدل سازی فراکتال یک روش مفید برای طبقه بندی پدیده های مختلف طبیعی است. روش های فرکتالی روابط بین همه پارامترها مانند داده های ژئوشیمیایی و توزیع فضایی آنها را بدون هیچگونه بهنجارسازی داده ها ارزیابی می کند به همین دلیل مدلی دقیقتر است. در این مقاله ۱۲۹۲ نمونه رسوبات آبراهه ای ورقه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورچه در جنوب اراک، جهت اکتشافات ژئوشیمیایی برداشت شده و به روش ICP-MS برای ۱۵ عنصر تجزیه شده اند. بررسی پارامترهای آماری عناصر Ba و Cu, Pb, Zn و ترسیم هیستوگرام این عناصر نشان می دهد که دارای چولگی به راست هستند، که در این حالت روش فرکتالی یکی از بهترین روش های جداسازی آنومالی از زمینه می باشد. داده های عناصر با استفاده از روش فرکتال غلظت-تعداد (C-N) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و با پهنه های دگرسانی و گسل های ترسیم شده با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنجنده استر جهت اکتشاف مواد معدنی مطابقت داده شدند. نمودار فرکتال عیار-تعداد برای عناصر Ba و Cu, Pb, Zn ترسیم شده که شدیدترین محدوده ناهنجاری این عناصر بترتیب دارای عیار بیشتر از $524/8$ ، $794/3$ ، $223/9$ ، $944/1$ می باشند. تلفیق نقشه های ناهنجاری عناصر Ba و Cu, Pb, Zn با آلتراسیون های اکسید آهن، پروپلیتیک، آرزلیک و سیلیسی و نقشه گسل ها و شکستگی های منطقه با نقشه موقعیت معادن و اندیس های معدنی منطقه نشان می دهد که معادن فلزی عمدتاً در مناطق با تراکم گسل ها رخ داده اند. آنومالی های تفکیک شده سرب و روی همخوانی بسیار خوبی با هم داشته و ارتباط بالایی با دگرسانی سیلیسی منطقه دارند.

کلمات کلیدی: فراکتال، غلظت-تعداد، دگرسانی، استر، ورچه، اراک.

۱- مقدمه

شناسایی مقادیر آستانه عناصر کاربرد دارند. از دهه ۱۹۷۰ برای تفسیر داده های ژئوشیمیایی از تکنیک های ریاضی استفاده شده است (Khalili Heidari et al., 2013; Carranza, 2008; and Afzal, 2018; Nazarpour, 2018). با استفاده از این روش ها می توان میانگین، انحراف معیار و واریانس عناصر را در منطقه تشخیص داد (Hawkes and Webb, 1979; Li et al., 2003). در این روش ها حدود آستانه ای به نوع توزیع عناصر بستگی دارد، بنابراین در صورتیکه توزیع فراوانی به صورت نرمال باشد حدود آستانه ای آن برابر با جمع میانگین و ضرایب ۱ تا ۳

توضیح و ترسیم ناهنجاری های ژئوشیمیایی در منطقه می تواند اطلاعات مهمی برای درک سیستم های سنگ معدن فراهم کند (Nazarpour, 2018). روش های متداول در شناسایی و نقشه برداری از مناطق غنی شده در تحقیقات زمین شناسی، کانی شناسی، ژئوشیمیایی و سایر تحقیقات از اهمیت بالایی برخوردار هستند (Cox and Singer, 1986; Hitzman et al., 1992). روش های مبتنی بر آمار (Shayestehfar et al., 2006). روش های مبتنی بر آمار کلاسیک در تفکیک آنومالی های ژئوشیمیایی از زمینه و

(Ducart et al., 2016; Gahlan and Ghrefat, 2017). تکنیک‌های سنجش از دور به دو صورت برای اکتشاف مواد معدنی استفاده می‌شوند: آشکارسازی گسل‌ها، درزه‌ها و خطواره‌ها و همچنین ترسیم پهنه‌های دگرسانی گرمایی (Biranvand pour and hashim, 2012; Sabins, 1999;) Ranjbar et al., 2004; Kan et al., 2007; Sadeghi et al., 2013). بهترین روش برای پیدا کردن دگرسانی‌ها، کمک گرفتن از پردازش داده‌های ماهواره‌ای است. تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی حاصل از آلتراسیون سنگ‌ها، میزان انرژی منعکس شده و یا جذب شده در این سنگ‌ها را تغییر می‌دهد. با توجه به این که این انرژی‌ها در مورد پدیده‌های مختلف برای یک طول موج و متقابلاً برای یک پدیده در طول موج‌های گوناگون متفاوت است، با پردازش داده‌های ماهواره‌ای امکان شناسایی و بررسی حضور و یا عدم حضور کانی‌های شاخص برخی از دگرسانی‌ها نیز میسر می‌گردد (Karimpour et al., 2012).

در این مقاله داده‌های رسوبات آبراه‌های ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورچه در جنوب اراک با استفاده از روش فرکتال غلظت - تعداد (C-N) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و با پهنه‌های دگرسانی و گسل‌های ترسیم شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده چند طیفی استر جهت اکتشاف مواد معدنی مطابقت داده شده است.

۲- موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در جنوب شهر اراک، ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورچه می‌باشد، در استان مرکزی واقع شده است. این منطقه در پهنه تکتونیکی سندج- سیرجان قرار دارد (Stöcklin, 1968) و بخشی از کمربند فلزایی ملایر- اصفهان است که میزبان کانی‌سازی Pb-Zn، و همچنین بسیاری از کانسارهای آهن، منگنز و باریت است. قدیمیترین واحد چینه- شناسی شامل اسلیت و شیست‌های خاکستری تیره تا سیاه ژوراسیک و جوانترین واحد نیز توسط رسوبات و پادگانه آبرفتی کواترنری پوشیده شده است (Kholghi, 2004). شیل‌های آهکی خاکستری، تناوب مارن و سنگ آهک و سنگ آهک‌های توده‌ای ضخیم‌لایه بخش وسیعی از منطقه را در برمی‌گیرند. در شمال شرق و جنوب غرب ورچه، رخنمون‌هایی از سنگ‌های آذرین درونی بصورت توده‌های پراکنده گرانیات، گرانودیوریت، کوارتزدیوریت، دیوریت و گابرو برنزد دارند که هیبرید بوده و ادامه توده‌های نفوذی است که از همدان آغاز شده و تا گلپایگان

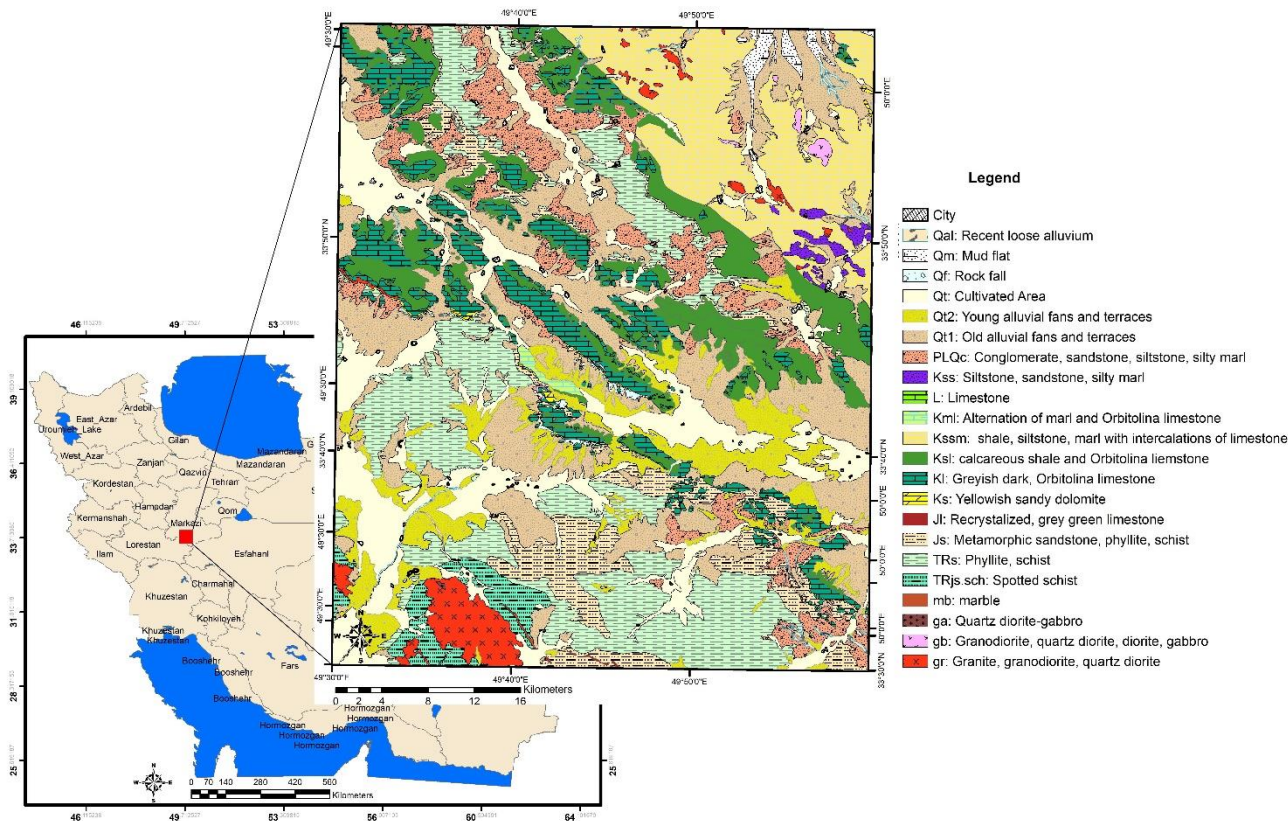
برابر انحراف معیار است (Ahrens, 1954; Li et al., 2003). با توجه به اینکه روش‌های آمار کلاستیک بر مبنای برخی کمیت‌ها مانند میانگین و انحراف معیار هستند، بنابراین قادر به تشخیص آنومالی‌ها با مقادیر بالای زمینه یا حتی آنومالی‌های ضعیف در مناطقی با ذخایر معدنی شناخته شده نیستند (Bai et al., 2010). Mandelbrot (۱۹۸۳) مدل فرکتال را به عنوان یک روش غیراقلیدسی مهم در هندسه مطرح کرد. مدل سازی فراکتال یک روش مفید برای طبقه‌بندی پدیده‌های مختلف طبیعی به ویژه برای ویژگی‌های زمین‌شناسی مانند ناهنجاری‌ها و پهنه‌بندی مواد معدنی بر اساس ارتباط درجه‌های سنگ معدن و فضاهای هندسی آنهاست (Zuo and Wang, 2020; Yasrebi and Hezarkhani, 2019; Daneshvar Saein, 2017; Mandelbrot, 1983). روش‌های فرکتالی روابط بین همه پارامترها مانند داده‌های ژئوشیمیایی و توزیع فضای آنها را بدون هیچگونه بهنجارسازی داده‌ها ارزیابی می‌کند به همین دلیل مدل‌ها دقیقتر و به واقعیت نزدیکتر هستند (Nazarpour et al., 2015; Afzal et al., 2013; Rahmati et al., 2015; Sadeghi et al., 2012; Afzal et al., 2011; Carranza, 2008, 2009, 2010; Carranza and Sadeghi, 2010; Carranza et al., 2009; Wang et al., 2011; Zuo et al., 2009a; Hosseini et al., 2015). مزایای این روش اساساً به صحت آن به دلیل از بین بردن نویز داده‌های ژئوشیمیایی و جداسازی ناهنجاری‌های سطوح مختلف بر اساس شدت آنها متکی است (Farahmandfar et al., 2020; Saadati et al., 2020).

چندین روش فرکتالی و مولتی فرکتالی از قبیل عیار- مساحت (Cheng et al., 1996)، طیف- مساحت (Agterberg et al., 1993) عیار- حجم (Afzal et al., 2011)، عیار-تعداد (Deng et al., 2010; Agterberg et al., 1983) در زمین‌شناسی و بخصوص در پردازش داده‌های ژئوشیمیایی توسعه یافته‌اند. بنابراین با تطبیق آنومالی‌ها با داده‌ها و نقشه زمین‌شناسی صحت این مدل‌سازی‌ها به خوبی مشخص شده است (Lima et al., 2003). از طرفی تکنیک سنجش از دور روش موثری برای اکتشاف مواد معدنی است (Ahmadfaraj et al., 2016) و داده‌های ماهواره‌ای از زمان راه‌اندازی لندست در سال ۱۹۷۲ به طور گسترده و موفقیت آمیز برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته است (Daneshfar et al., 2006; Ciampalini et al., 2013; Ali and Pour, 2014; Zhang et al., 2016;

بهره‌برداری قرار می‌گیرند از این معادن میتوان به سرب و روی عمارت، هفته، رباط پایین و بالا و آهن شمس‌آباد اشاره نمود.

ادامه می‌یابند (Sharokhi and Zarei sahamieh, 2013) (شکل ۱).

در محدوده منطقه، رخنمون‌هایی از مواد معدنی دیده می‌شوند که میزان ذخیره برخی از آنها قابل توجه است و مورد



شکل ۱- نقشه موقعیت و زمین‌شناسی منطقه ورچه.

Fig. 1. Location and geological map of the Varcheh area.

اساسی برای مدل‌های مختلف فراکتال است و از آن برای دسته‌بندی پدیده‌های مختلف طبیعی، به ویژه در علوم زمین‌شناسی استفاده می‌شود (Kouhestani et al., 2020). این می‌تواند برای طبقه‌بندی توزیع داده‌های ژئوشیمیایی بدون تخمین یا شبیه‌سازی زمین آماری مورد استفاده قرار گیرد (2016, 2017) (Afzal et al., 2013; Hassanpour and Afzal, 1983). این رویکرد به شرح

زیر آشکار می‌شود:

$$N(\geq p) \propto (rابطه ۱)$$

$N(\geq p)$ و p به ترتیب تعداد تجمعی از نمونه‌ها را با محتوای برابر یا بیشتر از p و متغیرهای منطقه‌ای (مانند مقادیر Cu) نشان می‌دهد. F و D ثابت ظرفیت و نماینده مقیاس‌سازی، به عنوان ابعاد فراکتال، برای توزیع متغیر منطقه‌ای مورد مطالعه

۳- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از ۱۲۹۲ نمونه آبراهه‌ای که توسط سازمان زمین‌شناسی ایران از محدوده برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی ورچه جهت اکتشافات ژئوشیمیایی برداشت شده (شکل ۲)، استفاده شده است این نمونه‌ها به روش ICP-MS برای ۱۵ عنصر تجزیه شده‌اند و داده‌های سنسورد با استفاده از حد تشخیص دستگاهی عناصر با ضریب ۳/۴ جایگزاری شدند (Hawkes and Webb, 1979).

۴- روش فرکتالی غلظت-تعداد (C-N)

مدل فراکتال C-N که توسط حسن‌پور و افضل (۲۰۱۳) مورد استفاده قرار گرفت، براساس مدل فراکتال Number-Size (Mandelbrot, 1983; Monecke et al.,) یافته است. (N-S) مدلی یک رویکرد (2005; Sadeghi et al., 2012).

۶- گسل‌ها و شکستگی‌ها

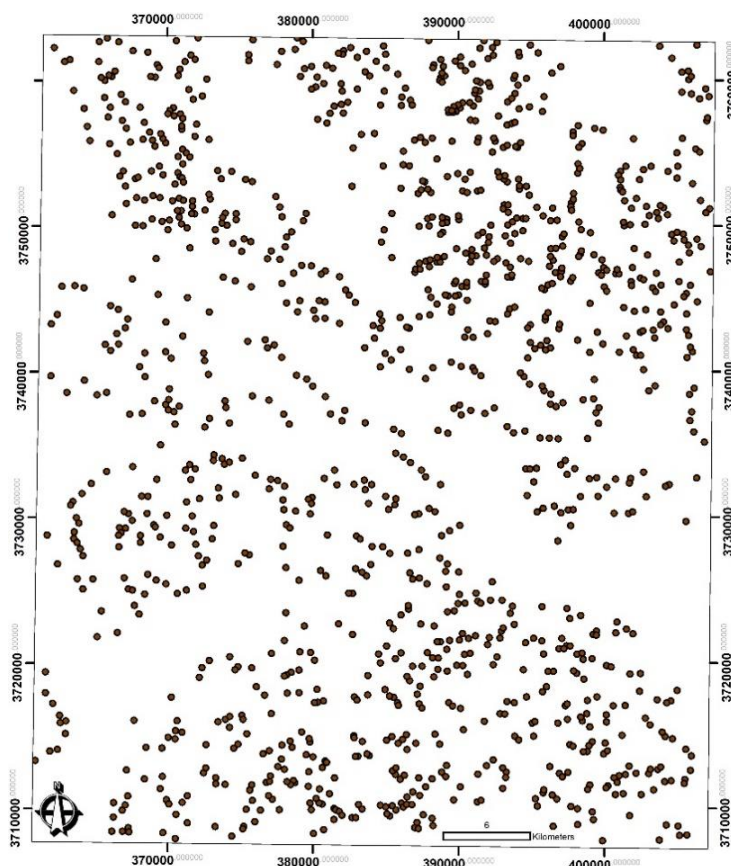
خطواره‌ها بر روی تصاویر ماهواره‌ای به راحتی قابل تشخیص نیستند. برخی از آنها با توجه به شرایط نوری، وجود پوشش گیاهی و آبراهه‌ها، راحت‌تر شناخته می‌شوند. اما دیگر عوارض را می‌توان با تکنیک‌های پردازش تصویر نشان داد. برای آشکارسازی این خطوط باید از فیلترهای ویژه‌ای استفاده کرد. به سبب اعمال فیلترها، در نتیجه بارزسازی راس‌ها و بافت‌های ویژه می‌توان تصویری مطلوب‌تر ایجاد کرد (Mirhosseini Moosavi and Almasian, 2012).

برای ترسیم لبه‌ها، عوارض خطی، مرزها و شکستگی‌ها از فیلترهای بالا گذر و مشخصاً فیلترهای ۳ در ۳ جهتی (Directional) در نرم افزار ENVI 5.1 استفاده شده است. برای وضوح شکستگی‌ها در جهت‌های مختلف زاویه فیلتر را ۴۵، ۱۳۵ و ۱۸۰ در نظر می‌گیریم. بعد از اعمال فیلتر، تصویر را به نرم افزار ArcGIS 10.5 انتقال داده و نقشه خروجی از شکستگی‌ها ترسیم می‌کنیم.

هستند. ابعاد فراکتال می‌تواند مقادیر مثبت، منفی، پیچیده یا فازی باشد (Farahmandfar et al., 2020; Afzal et al., 2018; Shamseddin Meigoony et al., 2014; Zuo et al., 2009b; Turcotte, 1997).

۵- دگرسانی

برای شناسایی دگرسانی‌های موجود در برگه یکصد هزار ورچه، از داده‌های سنجنده استر ماهواره ترا و سنجنده ETM^+ لندست ۷ استفاده شده است. پس از اعمال تصحیحات هندسی و اتمسفری روی داده‌های ماهواره‌ای، نمودار طیفی کانی‌های شاخص هر دگرسانی، از کتابخانه طیفی USGS نرم‌افزار 5.1 ENVI استخراج و به دامنه طیفی باندهای Aster و ETM^+ رسمیل (Resample) گردید و با تفکیک باندهای جذب و بازتاب آنها با استفاده از روش‌های نسبت‌های باندی و ترکیب رنگی دروغین (Moradi and Boomeri, 2017)، دگرسانی-های آرژیلیک، اکسید آهن، کائولینیت، پروپیلیتیک و سیلیسی شناسایی و در نرم افزار ArcGIS 10.5 رقومی شدند.



شکل ۲- موقعیت نقاط نمونه برداری آبراهه‌ای برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ ورچه

Fig. 2. Sampling locations of stream sediments of 1: 100000 varcheh sheet

۷- بحث و نتایج

۷-۱- داده‌های ژئوشیمیایی

بررسی پارامترهای آماری عناصر Zn, Pb, Cu و Ba و ترسیم نمودار Q-Q پلات و هیستوگرام این عناصر نشان می‌دهد که دارای توزیع نرمال نیستند و دارای چولگی به راست هستند (شکل ۳ و جدول ۱)، که در این حالت روش فرکتالی یکی از بهترین روش‌های جداسازی آنومالی از زمینه می‌باشد (Jafari et al., 2019).

با توجه به وجود کانسارهایی از عناصر Zn, Pb, Cu و Ba در منطقه این عناصر برای بررسی‌های آنومالی به روش فرکتالی عیار - تعداد انتخاب شدن و پس از ترسیم نمودارهای لگاریتمی عیار در مقابل فراوانی برای عناصر Zn, Pb, Cu و Ba جوامع ژئوشیمیایی برای هر یک مشخص شد و محدوده زمینه عناصر از آنومالی‌ها تفکیک گردید (شکل ۴).

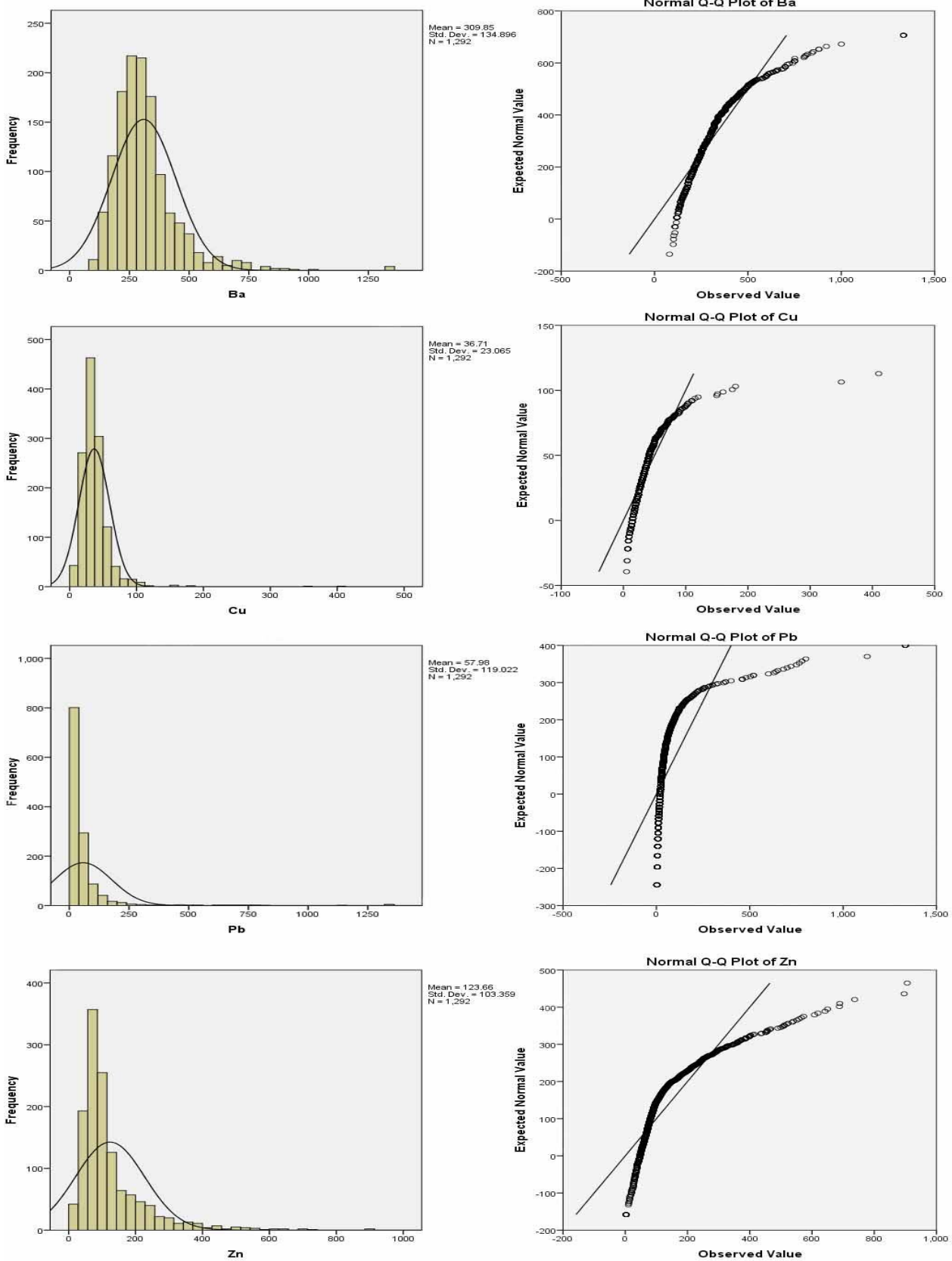
نمودار فرکتال عیار- تعداد برای عنصر Cu، نشانگر چهار نقطه شکست و پنج جامعه آماری مجزا از نظر ژئوشیمیایی، در محدوده ورچه می‌باشد (شکل ۴). جامعه اول، که شیبه نزدیک به خط افق دارد، در واقع زمینه مس در منطقه می‌باشد. بنابراین، می‌توان مقدار زمینه عنصر مس ppm ۲۸/۱۸ در نظر گرفت. جامعه دوم، که با رنگ خاکستری در نقشه توزیع ژئوشیمیایی نمایان شده است، عیار بین ۲۸/۱۸ تا ۵۹/۶ ppm را نشان می‌دهد (شکل ۵).

شدیدترین نوع آنومالی در منطقه مربوط به جامعه پنجم است که دارای عیار بالاتر از ۲۲۳/۹ ppm می‌باشد. نمودار عیار- تعداد عنصر Zn نشانگر سه نقطه شکست و چهار جامعه آماری مجزا از نظر ژئوشیمیایی می‌باشد (شکل ۴)، جامعه اول، که شیبه نزدیک به خط افق دارد، زمینه روی در منطقه می‌باشد. بنابراین، می‌توان مقدار زمینه عنصر روی ppm ۵۶/۲ در نظر گرفت. جامعه دوم دارای عیار بین ۵۶/۲ تا ۲۳۷/۱ ppm و ناهنجاری شدید روی دارای عیار ۵۲۴/۸ تا ppm ۹۰۱/۱ است و در نقشه توزیع ژئوشیمیایی با رنگ قرمز نشان داده شده است (شکل ۵). عنصر Ba نشانگر چهار نقطه شکست و پنج جامعه آماری مجزا از نظر ژئوشیمیایی می‌باشد، بر اساس نقاط شکست بدست آمده در این نمودار (شکل ۴)، توزیع جوامع ژئوشیمیایی مختلف عنصر Ba جامعه اول، که شیبه نزدیک به خط افق دارد، با عیار ppm ۱۹۹/۵ زمینه باریم در منطقه ورچه می‌باشد. شدیدترین آنومالی عنصر Ba را در منطقه دارای عیار بالاتر از ppm ۹۴۴/۱ می‌باشد (شکل ۵)، و در نهایت عنصر Pb دارای پنج نقطه شکست و شش جامعه آماری مجزا از نظر ژئوشیمیایی بوده (شکل ۴)، بر اساس نقاط شکست بدست آمده در این نمودار، زمینه سرب در این منطقه دارای عیار ppm ۱۶/۸ است و شدیدترین ناهنجاری سرب در منطقه دارای عیار بالاتر از ppm ۷۹۴/۳ می‌باشد (شکل ۵).

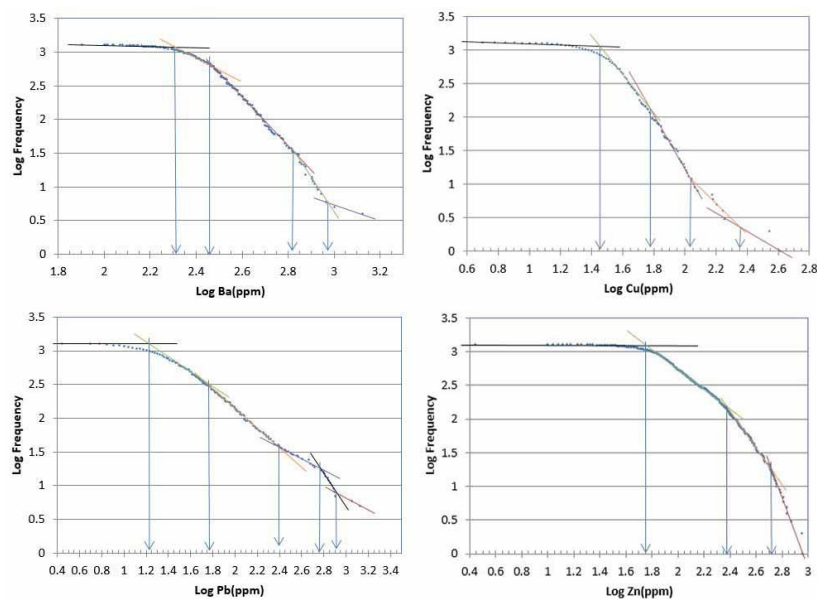
جدول ۱- داده‌های آماری نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای عناصر Zn, Pb, Cu و Ba.

Table 1. Statistical data of stream sediment samples of Zn, Pb, Cu, and Ba elements.

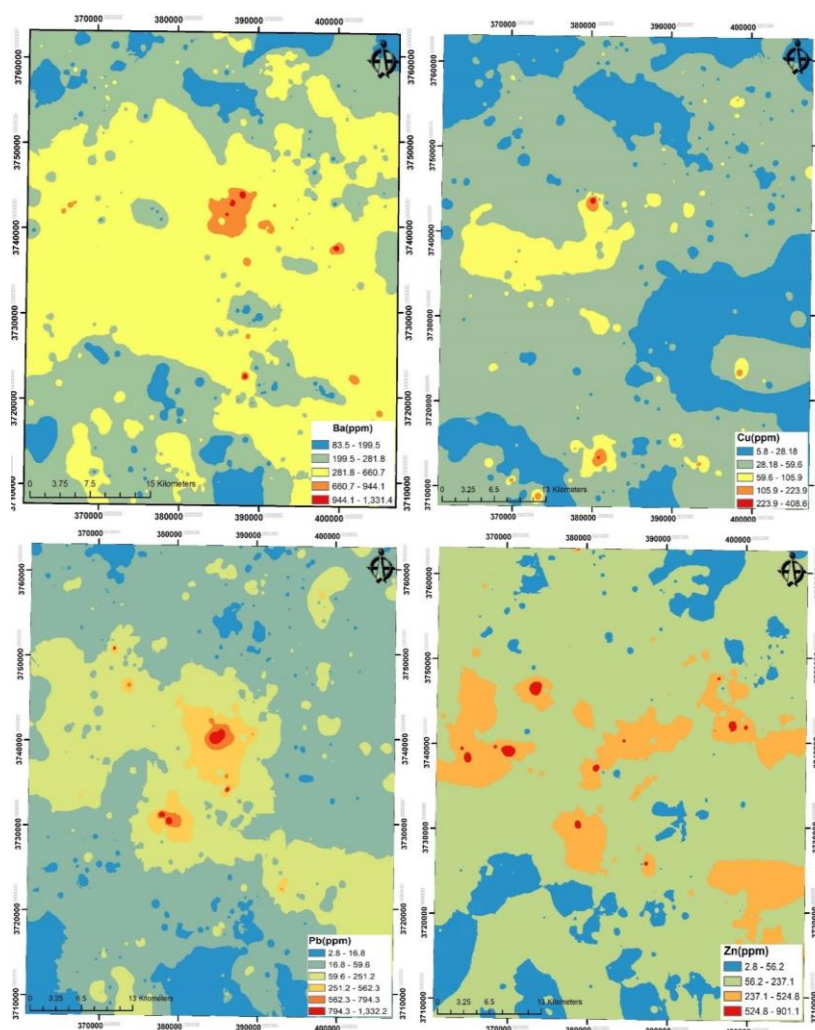
Statistics		Ba	Cu	Pb	Zn
N	Valid	1292	1292	1292	1292
	Missing	0	0	0	0
Mean		309.85	36.71	57.98	123.66
Median		290.00	33.00	30.00	90.00
Std. Deviation		134.896	23.065	119.022	103.359
Skewness		2.469	6.354	7.119	2.734
Std. Error of Skewness		0.068	0.068	0.068	0.068
Kurtosis		11.933	82.256	62.347	10.638
Std. Error of Kurtosis		0.136	0.136	0.136	0.136
Minimum		80	5	3	3
Maximum		1333	410	1333	906



شکل ۳- نمودار Q-Q و هیستوگرام عناصر Zn, Pb, Cu و Ba.
 Fig. 3. Q-Q plot and histogram of Zn, Pb, Cu and Ba elements.



شکل ۴- نمودار log-log فرکتالی عناصر Zn, Pb, Cu و Ba.
Fig. 4. Fractal log-log diagram of the elements Zn, Pb, Cu and Ba.



شکل ۵- نقشه آنومالی عناصر Zn, Pb, Cu و Ba.
Fig. 5. Anomaly map of Zn, Pb, Cu and Ba elements.

۷-۲- تفکیک دگرسانی‌های منطقه

۷-۲-۱- آلترسیون اکسید آهن

با توجه به اینکه سنجنده ETM^+ دارای یک باند در محدوده جذب (باند ۱) و یک باند در محدوده بازتاب بالای اکسیدهای آهن است (باند ۳)، انتظار می‌رود که مناطق با اکسید آهن را بهتر از سنجنده استر مشخص سازد (Hassani, 2013). از آنجا که تکنیک نسبت بانندی یکی از کاربردی‌ترین تکنیک‌هایی است که برای شناسایی کانی‌های دگرسانی گرمایی مانند آهن استفاده می‌شود (Di Tommaso and Rubinstein, 2007)، لذا با پردازش تصاویر ETM^+ به روش نسبت بانندی ۳ به ۱، محدوده‌های دارای اکسید آهن استخراج شدند (شکل ۶).

۷-۲-۲- دگرسانی پروپیلپتیک

با استفاده از ترکیب رنگی RGB (468)، داده‌های ماهواره‌ای استر، دگرسانی پروپیلپتیک به رنگ سبز تیره تا کم رنگ دیده می‌شود. همچنین از نسبت بانندی (B_5+B_7) برای تفکیک دگرسانی پروپیلپتیک استفاده شده است، به دلیل بازتابندگی پایین در باندهای ۵ و ۷ و بازتابندگی بالا در باند ۶، این دگرسانی به صورت پیکسل‌های تاریک دیده می‌شود (شکل ۶).

۷-۲-۳- دگرسانی آرژیلیک

به طور کلی، کانی‌های حاوی هیدروکسیل گسترده‌ترین محصولات دگرسانی هستند. فراوانی رس و سیلیکات ورقه‌ای نشان می‌دهد که دارای جذب زیاد در باند ۷ هستند و بازتاب بسیار بالایی در باند ۵ دارند (Rowan et al., 1977; Sabins, 1997; Drury, 2001)، بنابراین نسبت بانندی ۵ به ۷ در مناطقی با دگرسانی‌های حاوی کانی‌های هیدروکسیل مقادیر بسیار بالایی دارند (Ranjbar et al., 2004).

نسبت بانندی ۴ به ۹ داده‌های ماهواره‌ای استر برای به دست آوردن دگرسانی آرژیلیک به کار می‌رود که بخش روشن تصویر نشان دهنده این دگرسانی می‌باشد (شکل ۶).

۷-۲-۴- دگرسانی سیلیسی

برای استخراج دگرسانی سیلیسی از ترکیب رنگی ۵۳۱، باندهای حرارتی سنجنده استر استفاده شده است، که به رنگ قرمز و صورتی نمایان می‌شوند (Moradi and Boomeri, 2017).

۷-۳- گسل‌ها و شکستگی‌های ورچه

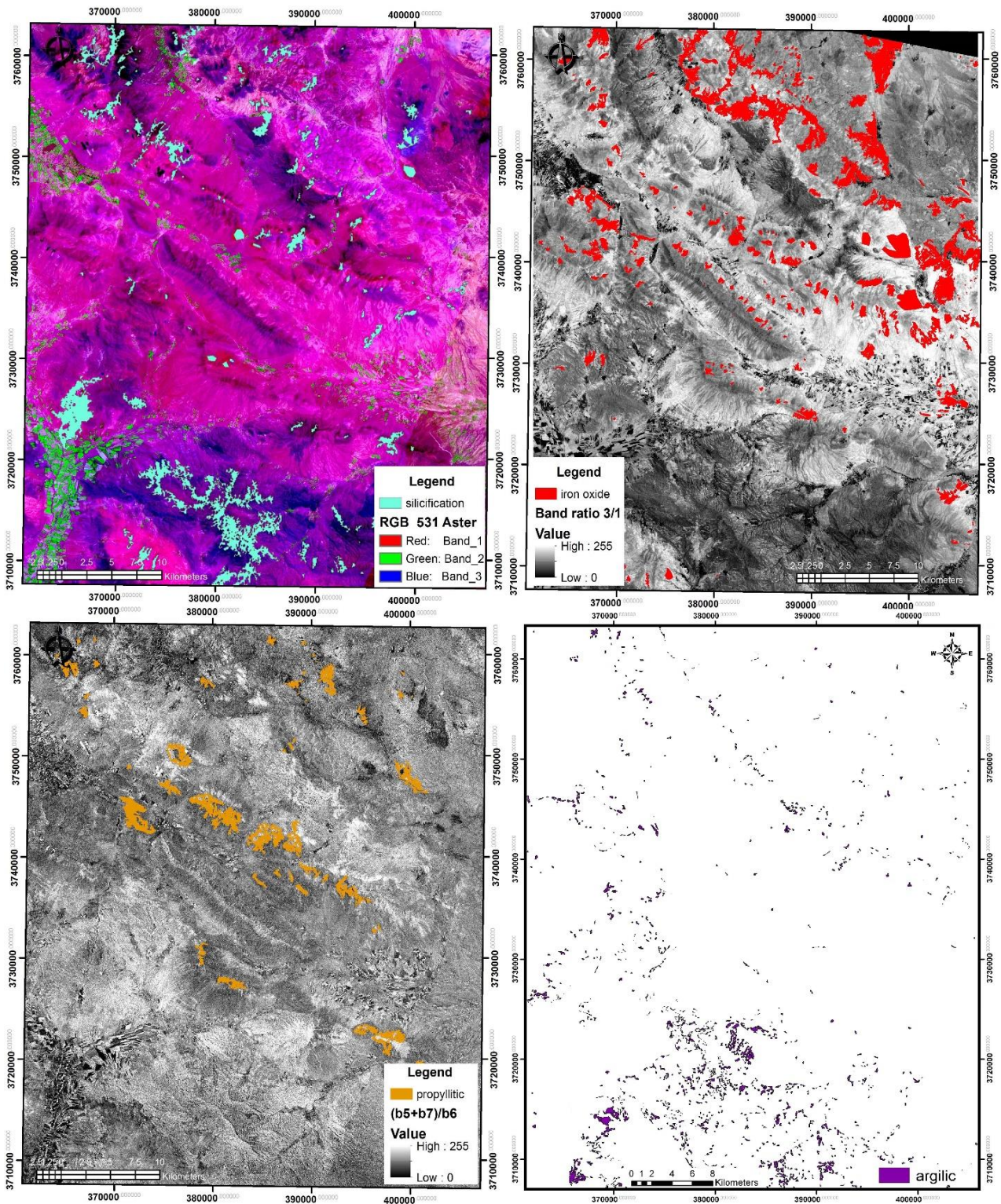
استفاده از فیلترهای High pass یا بالاگذر در شناسایی خطواره‌ها و مرزها کاربرد بسیاری دارد. استفاده از ترکیب رنگی RGB به تفکیک لیتولوژی و تفکیک بهتر گسل‌ها و آشکارسازی آن‌ها کمک قابل توجهی می‌کند.

برای ترسیم لبه‌ها، عوارض خطی، مرزها و شکستگی‌ها از فیلترهای بالا گذر و مشخصاً از فیلترهای جهتی (Directional) در نرم‌افزار ENVI 5.1 استفاده شده است. برای وضوح شکستگی‌های با روند شمال شرق- جنوب غرب، فیلتر جهتی با زاویه ۴۵ درجه و برای شکستگی‌های با روند شمال غرب- جنوب شرق زاویه ۳۱۵ درجه به باند ۸ داده‌های ماهواره‌ای لندست، سنجنده ETM^+ اعمال شده است (شکل ۷). برای کنترل شکستگی‌ها از مدل رقومی ارتفاع زمین و سه بعدی سازی ترکیب رنگی داده‌ها استفاده شده است. بعد از اعمال فیلتر برای هر تصویر ماهواره‌ای، آن‌ها را به نرم افزار ArcGIS 10.5 انتقال داده و شکستگی هر تصویر را ترسیم کرده و در نهایت یک نقشه شکستگی از تمام داده‌ها تهیه شده است (شکل ۷).

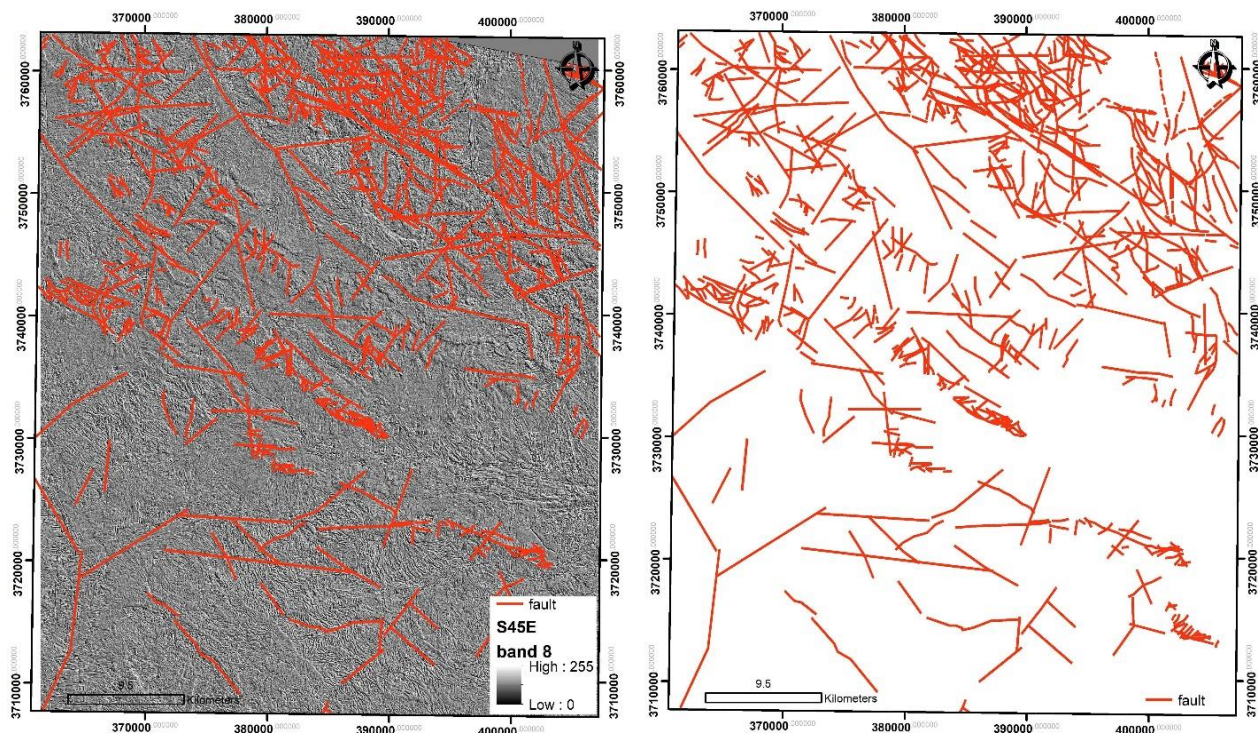
تلفیق نقشه‌های ناهنجاری عناصر Cu, Pb, Zn و Ba با دگرسانی‌های اکسید آهن، پروپیلپتیک، آرژیلیک و سیلیسی و نقشه گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه با نقشه موقعیت معادن و اندیس‌های معدنی منطقه ورچه نشان می‌دهد که معادن فلزی عمدتاً در مناطق با تراکم شکستگی گسل داده‌اند در حالیکه اندیس‌های معدنی در مناطق با ترکم گسل خیلی کم رخ داده‌اند که بنظر می‌رسد ناشی از چرخش سیالات در کانال‌های ایجاد شده ناشی از گسل‌ها باشد (شکل ۸).

برسی آنومالی‌های تفکیک شده سرب و روی همخوانی بسیار خوبی با هم دارند و در ارتباط با مناطق با تراکم بالای گسل‌ها و شکستگی‌ها هستند و همچنین ارتباط بالایی با دگرسانی سیلیسی ترسیم شده در منطقه دارند.

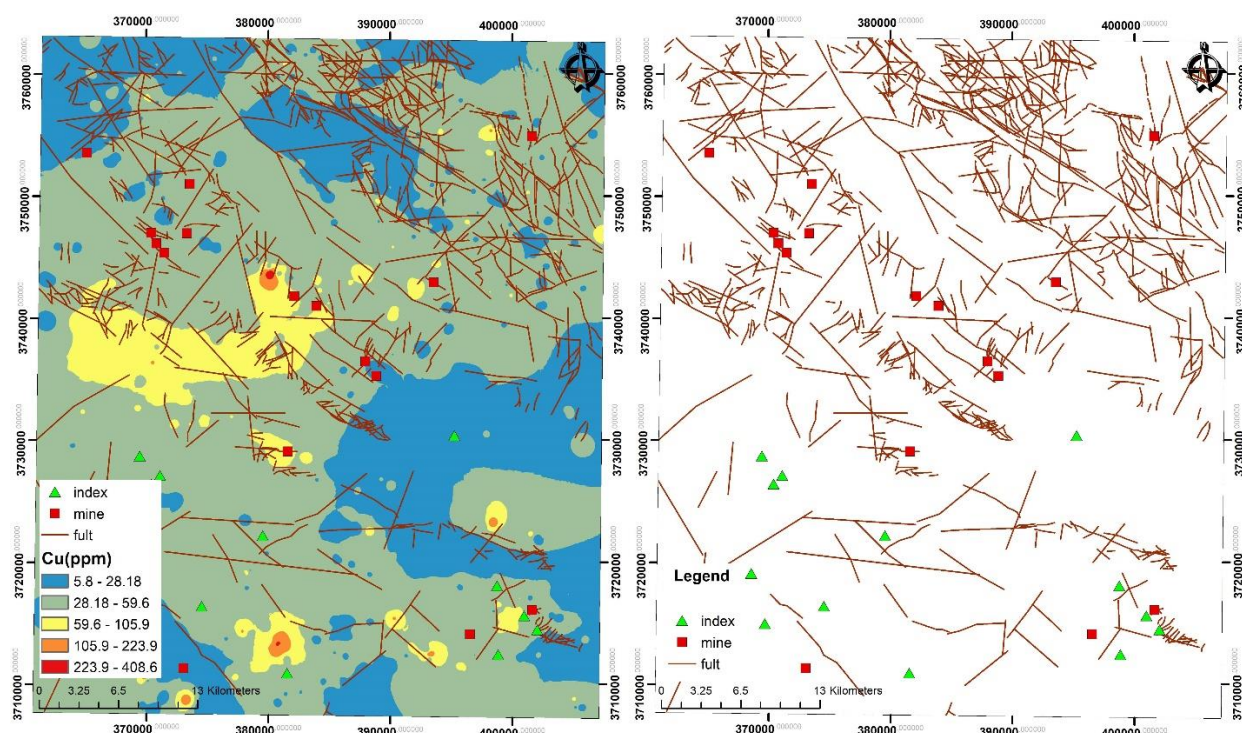
تلفیق نقشه‌های تهیه شده با نقشه زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد که عمدتاً معادن سرب و روی و باریت منطقه در سازندهای آهکی کرتاسه و ماسه‌سنگ و سیلت‌سنگ ژوراسیک رخ داده‌اند و آنومالی‌های تفکیک شده همپوشانی با این سازندها دارند.



شکل ۶- دگرسانی های اکسید آهن، پروپلیتیک، آرژیلیک و سیلیسی بر گه ۱:۱۰۰۰۰۰ ورچه.
 Fig. 6. Iron oxide, propylitic, argilic, and siliceous alterations of 1: 100000 varcheh sheet.



شکل ۷- فیلتر جهتی و نقشه گسل‌ها و شکستگی‌های برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ ورچه.
 Fig. 7. Directional filter and faults and fractures map of 1: 100000 Varcheh sheet.



شکل ۸- ارتباط گسل‌ها و شکستگی‌ها و کانه‌زایی در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ ورچه.
 Fig. 8. Relationship of faults, fractures, and mineralization in the 1: 100000 vrchek sheet.

۸- نتیجه‌گیری

مطالعه در محدوده نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ورچه کاربرد بالقوه روش فرکتالی عیار- تعداد را برای جداسازی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی عناصر Cu, Pb, Zn و Ba به عنوان ابزاری مفید

توصیف و ترسیم ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی می‌تواند اطلاعات مهمی برای درک بهتر کانی‌سازی در منطقه به ما بدهد. این

برگه ورچه از تمرکز نسبتاً بالایی برخوردار می‌باشد و دگرسانی پروپیلیتیک در مرکز و شمال شرق برگه گسترش دارد. استفاده از فیلترهای Highpass یا بالاگذر در شناسایی خطواره‌ها و مرزها کاربرد بسیاری دارد. استفاده از ترکیب رنگی RGB به تفکیک لیتولوژی و تفکیک بهتر گسل‌ها و آشکارسازی آنها کمک قابل توجهی کرده است. روند گسل‌های اصلی محدوده عمدتاً شمال غرب- جنوب شرق (NW-SE) و گسل-های فرعی روند شمالی- جنوبی دارند. تلفیق نقشه گسل‌های ترسیم شده با نقشه معادن و اندیس‌های معدنی نشان می‌دهد که معادن فلزی عمدتاً در مناطق با تراکم بالای گسل‌ها و شکستگی‌ها رخ داده‌اند در حالیکه اندیس‌های معدنی در مناطق با تراکم شکستگی‌های خیلی کم رخ داده‌اند که می‌تواند ناشی از کانال‌ها و مجراهای ایجاد شده و گردش سیالات توسط این گسل‌ها باشد.

تشکر و قدردانی

به موجب در اختیار قرار دادن داده‌های رسوبات آبراهه‌ای منطقه توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی نمایندگی لرستان نویسندگان مقاله مراتب قدردانی و تشکر خود را نسبت به ایشان ابراز می‌دارند.

برای اکتشافات ژئوشیمیایی آبراهه‌ای ارائه می‌دهد که دارای مزایایی مانند محاسبات آسان مقدار غلظت‌ها و حدود آستانه‌ای ناهنجاری‌ها با منشاء متفاوت است که معمولاً در مطالعات لیتوژئوشیمیایی استفاده می‌شود. شدیدترین ناهنجاری‌های مس، باریت، روی و سرب به ترتیب دارای عیار بیشتر از ppm ۲۳۳/۹ ، ۹۴۴/۱ ، ۵۲۴/۳ و ۷۹۴/۸ هستند. ناهنجاری‌های باریت، سرب و روی دارای همخوانی بالایی هستند بخصوص در بخش مرکزی منطقه که ناشی از همبستگی این عناصر می‌باشد. بررسی معادن فلزی منطقه نشان می‌دهد که سازندهای آهکی کرتاسه و ماسه‌سنگ و سیلت‌سنگ زوراسیک میزبان معادن فلزی منطقه بوده و ناهنجاری‌های تفکیک شده عناصر ارتباط بالایی با این سازندها دارند. توده‌های نفوذی منطقه که بروزدهای در شمال شرق و جنوب غرب منطقه دارند جزء ارتباط با برخی از ناهنجاری‌های تفکیک‌شده مس با ناهنجاری عناصر دیگر و همچنین ارتباطی با معادن موجود در منطقه ندارند.

پراکندگی دگرسانی سیلیسی در برگه یکصد هزار ورچه و بررسی معادن و اندیس‌های معدنی نشان می‌دهد که ارتباط نزدیکی بین این دگرسانی و معادن و اندیس‌های معدنی باریت، سرب و روی وجود دارد. دگرسانی اکسید آهن در شمال شرق

مراجع

- Afzal, P., Alghalandis, Y.F., Khakzad, A., Moarefvand, P., Omran, N.R., 2011. Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration* 108(3), 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.03.005>
- Afzal, P., Heidari, S.M., Ghaderi, M., Yasrebi, A.B., 2017. Determination of mineralization stages using correlation between geochemical fractal modeling and geological data in Arabshah sedimentary rock-hosted epithermal gold deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 91, 278–295. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.09.021>
- Afzal, P., Mirzaei, M., Yousefi, M., Adib, A., Khalajmasoumi, M., Zarifi, A.Z., Foster, P., 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* 119, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.03.009>
- Afzal, P., Harati, H., Fadakar Alghalandis, Y., Yasrebi, A.B., 2013. Application of Spectrum-Area Fractal Model to Identify of Geochemical Anomalies Based on Soil Data in Kahang Porphyry-Type Cu Deposit, Iran. *Geochemistry* 73(4), 533–543. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2013.08.001>
- Afzal, P., Jebeli, M., Pourkermani, M., Jafari Rad, A., 2018. Correlation between rock types and Copper mineralization using fractal modeling in Kushk-e-Bahram deposit, Central Iran. *Geopersia* 8, 131–141. <https://doi.org/10.22059/geope.2017.237332.648334>
- Agterberg, F.P., 1995. Multifractal modeling of the sizes and grades of giant and supergiant deposits. *International Geology Review* 37, 1–8. <https://doi.org/10.1080/00206819509465388>
- Agterberg, F.P., Cheng, Q., Wright, D.F., 1993. Fractal modeling of mineral deposits. In: Elbrond J, Tang, X (Eds.). 24th APCOM symposium proceeding, Montreal, Canada, 43–53.
- Ahmadfaraj, M., Mirmohammadi, M., Afzal, P., 2016. Application of fractal modeling and PCA method for hydrothermal alteration mapping in the Saveh area (Central Iran) based on ASTER multispectral data.

- International Journal of Mining and Geo-Engineering 50, 37–48.
<https://doi.org/10.22059/ijmge.2016.57307>
- Ahrens, L.H., 1954. The lognormal distribution of the elements (a fundamental law of geochemistry and its subsidiary). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 5, 49–73. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(54\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(54)90040-X)
- Ali, A., Pour, A., 2014. Lithological mapping and hydrothermal alteration using Landsat 8 data: A case study in Ariab mining district, red sea hills, Sudan. *International Journal of Basic Applied Sciences* 3, 199–208. <https://doi.org/10.14419/ijbas.v3i3.2821>
- Bai, J., Porwal, A., Hart, C., Ford, A., Yu, L., 2010. Mapping geochemical singularity using multifractal analysis: Application to anomaly definition on stream sediments data from Funin Sheet, Yunnan, China. *Journal of Geochemical Exploration* 104, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.09.002>
- Pour, A.B., Hashim, M., 2012. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Review*. 44, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.009>
- 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* 35, 383–400. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.01.001>
- Carranza, E.J.M., 2010. From predictive mapping of mineral prospectivity to quantitative estimation of number of undiscovered prospects. *Resource Geology* 61, 30–51. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2010.00146.x>
- Carranza, E.J.M., Owusu, E., Hale, M., 2009. Mapping of prospectivity and estimation of number of undiscovered prospects for lode-gold, southwestern Ashanti Belt, Ghana. *Mineralium Deposita* 44, 915–938. <https://doi.org/10.1007/s00126-009-0250-6>
- Carranza E.J.M., Sadeghi M., 2010. Predictive mapping of prospectivity and quantitative estimation of undiscovered VMS deposits in Skellefte district (Sweden). *Ore Geology Reviews* 38, 219–241. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.02.003>
- Carranza, E.J.M., 2008. *Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS*. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, Vol. 11, Elsevier, Amsterdam, 351 p.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., 1996. Multifractal modeling and spatial statistics. *Mathematical Geology* 28, 1–16. <https://doi.org/10.1007/BF02273520>
- Ciampalini, A., Garfagnoli, F., Antonielli, B., Moretti, S., Righini, G., 2013. Remote sensing techniques using Landsat ETM+ applied to the detection of iron ore deposits in Western Africa. *Arabian Journal Geosciences* 6, 4529–4546. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0725-0>
- Cox, D.P., Singer, D.A., 1986. Mineral deposit models. *U.S. Geological Survey Bulletin* 1693, 1–10. <https://doi.org/10.3133/b1693>
- Daneshfar, B., Desrochers, A., Budkewitsch, P., 2006. Mineral-potential mapping for MVT deposits with limited data sets using Landsat data and geological evidence in the Borden basin, Northern Baffin Island, Nunavut, Canada. *Natural Resources Research* 15, 129–149. <https://doi.org/10.1007/s11053-006-9020-7>
- Daneshvar Saein, L., 2017. Delineation of enriched zones of Mo, Cu and Re by concentration-volume fractal model in Nowchun Mo-Cu porphyry deposit, SE Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 9, 64–72.
- Deng, J., Wang, Q., Yang, L., Wang, Y., Gong, Q., Liu, H., 2010. Delineation and explanation of geochemical anomalies using fractal models in the Heqing area, Yunnan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration* 105, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.04.005>
- Di Tommaso, I., Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews* 32(1), 275–90. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.004>
- Drury, S., 2001. *Image interpretation in geology*. Cheltenham Malden: Nelson Thornes Blackwell Science, 290 p.
- Ducart, D.F., Silva, A.M., Toledo, C.L.B., Assis, L.M.d., 2016. Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province. *Brazilian Journal of Geology* 46, 331–349. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620160023>
- Farahmandfar, Z., Jafari, M.R., Afzal, P., Ashja Ardalan, A., 2020. Description of gold and copper anomalies using fractal and stepwise factor analysis according to stream sediments in NW Iran. *Geopersia* 10(1), 135–148. <https://doi.org/10.22059/geope.2019.265535.648413>

- Gahlan, H., Ghrefat, H., 2018. Detection of gossan zones in arid regions using Landsat 8 OLI data: Implication for mineral exploration in the eastern Arabian shield, Saudi Arabia. *Natural Resources Research* 27, 109–124. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9341-8>
- Hassanpour, S., Afzal, P., 2013. Application of concentration-number (C-N) multifractal modelling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 6, 957–970. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0396-2>
- Hawkes, H. E., Webb, J. S., 1979. *Geochemistry in mineral exploration*, 2nd eds. Academic Press, New York 657 p.
- Heidari, M., Ghaderi, M., Afzal, P., 2013. Delineating mineralized phases based on litho-geochemical data using multifractal model in Touzlar epithermal Au-Ag (Cu) deposit, NW Iran. *Applied Geochemistry* 31, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.12.014>
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., and Einaudi, M.T., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits: *Precambrian Research* 58, 241–287. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90121-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90121-4)
- Hassani, S.A., 2013. Litho-geochemical, stream sediments and hydrogeochemical studies using classical and fractal statistical methods in Alut 1:100000 sheet (Kurdistan). M.Sc. thesis. University of Islamic Azad University, Khoramabad (in Persian with English abstract).
- Hosseini, S.A., Afzal, P., Sadeghi, B., Sharmad, T., Shahrokhi, S.V., Farhadinejad, T., 2015. Prospection of Au mineralization based on stream sediments and litho-geo-chemical data using multifractal modeling in Alut 1:100,000 sheet, NW Iran. *Arabian Journal of Geoscience* 8, 3867–3879. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1436-5>
- Jaafari, M.A., Kananian, A., Nazarpour, A., 2019. Discrimination of Pb and Zn metals geochemical anomalies using classical statistical (Mean+nSTEV), singularity index, remote sensing and structural factors method in Khondob 1:100000 sheet, northern part of Malayer-Aligoudarz-Esfahan Zone. *Journal of Advanced Applied Geology* 9(3), 341–56. <https://doi.org/10.22055/aag.2019.28425.1937>
- Afzal, P., Jebeli, M., Pourkermani, M., Jafari Rad, A., 2018. Correlation between rock types and Copper mineralization using fractal modeling in Kushk-e-Bahram deposit, Central Iran. *Geopersia* 8, 131–141. <https://doi.org/10.22059/geope.2017.237332.648334>
- Kan, H., London, S.J., Chen, G., Zhang, Y., Song, G., Zhao, N., Jiang, L., Chen, B., 2007. Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in shanghai, China. *Environment International*. 33, 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.12.001>
- Karimpour, M.H., Malekzadeh, A., Haidarian, M.R., 2012. *Ore deposit exploration, geology, geochemistry, satellite and geophysics models*, 2nd edition, Ferdowsi University of Mashhad p. 632 (in Persian).
- Khalili, H., Afzal, P., 2018. Application of spectrum-volume fractal modeling for detection of mineralized zones. *Journal of Mining and Environment* 9, 371–378. <https://doi.org/10.22044/jme.2018.6285.1451>
- Kholghi, M., 2004. Geological map of the Varcheh 1:100000 sheet. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran.
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Afzal, P., Zaw, K., 2020. Classification of pyrite types using fractal and stepwise factor analyses in the Chah zard gold-silver epithermal deposit, Central Iran. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 20, 496–508. <https://doi.org/10.1144/geochem2020-031>
- Li, C., Ma, T., Shi, J., 2003. Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background. *Journal of Geochemical Exploration*, 77, 167–175. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(02\)00276-5](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00276-5)
- Lima, A., De Vivo, B., Cicchella, D., Cortini, M., Albanese, S., 2003. Multifractal IDW interpolation and fractal filtering method in environmental studies: An application on regional stream sediments of (Italy), Campania region, *Applied Geochemistry* 18, 1853–1865. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(03\)00083-0](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(03)00083-0)
- Mandelbrot, B.B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman, New York 468 p.
- Monecke, T., Monecke, J., Herzig, P.M., Gemmill, J.B., Monch, W., 2005. Truncated fractal frequency distribution of element abundance data: a dynamic model for the metasomatic enrichment of base and precious metals, *Earth and Planetary Science Letters* 232, 363–378. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.01.033>

- Moradi, R., Boomeri, M., 2017. Remote sensing detection of altered zones associated with Cu-Mo mineralization in north of Zahedan, SE Iran using Landsat-8 data. *Yerbilimleri* 38(3), 275–294. <https://dergipark.org.tr/en/pub/yerbilimleri/issue/39251/462194>
- Mirhosseini Moosavi, S., Almasian, M., 2012. Application of different image processing techniques on ETM+ images for study of Zendan-Minab fault system. *Journal of Earth* 24, 107–123 (in Persian with English abstract).
- Nazarpour, A., 2018. Application of C-A fractal model and exploratory data analysis (EDA) to delineate geochemical anomalies in the: Takab 1:25,000 geochemical sheet, NW Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 10, 173-180.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.08.007>
- Rahmati, A., Afzal, P., Abrishamifar, S.A., Sadeghi, B., 2015. Application of concentration–number and concentration–volume fractal models to delineate mineralized zones in the Sheytoor iron deposit, Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 8(5), 2953–2965. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1330-1>
- Ranjbar, H., Honarmand, M., and Moezifar, Z., 2004. Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM+ data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt. *Journal of Asian Earth Sciences* 24, 237–243. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.11.001>
- Rowan, L.C., Goetz, A.F.H., Ashley, R.P., 1977. Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images. *Geophysics* 42(3), 522–535. <https://doi.org/10.1190/1.1440723>
- Saadati, H., Afzal, P., Torshizian, H., Solgi, A., 2020. Geochemical exploration for lithium in NE Iran using the geochemical mapping prospectivity index, staged factor analysis, and a fractal model. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 20(4), 461. <https://doi.org/10.1144/geochem2020-020>
- Sabins, F.F., 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 14, 157–183. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4)
- Sabins, F.F., 1997. *Remote Sensing-Principles and Interpretation*, third ed. W.H. Freeman and Co, New York. 361p.
- Sadeghi B., Khalajmasoumi, M., Afzal, P., Moarefvand, P., Yasrebi, A.B., Wetherelt, A., Foster, P., Ziazarifi, A., 2013. Using ETM+ and ASTER sensors to identify iron occurrences in the Esfordi 1:100000 mapping sheet of Central Iran. *Journal of African Earth Sciences* 85, 103–114.
- Sadeghi, B., Moarefvand, P., Afzal, P., Yasrebi, A.B., Saein, L.D., 2012. Application of fractal models to outline mineralized zones in the Zaghia iron ore deposit, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 122, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.011>
- Shamseddin Meigoony, M., Afzal, P., Gholinejad, M., Yasrebi, A.B., Sadeghi, B., 2014. Delineation of geochemical anomalies using factor analysis and multifractal modeling based on stream sediments data in Sarajeh 1:100,000 sheet, Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 7, 5333–5343. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1074-3>
- Sharokhi, S.V., Zarei sahamieh, R., 2013. Geochemical and mineral chemistry study of granitoids north of Aligudarz, Astaneh and north of Boroujerd (west of Iran). *Journal of Earth* 8, 30. (in Persian with English abstract).
- Shayestehfar, M.R., Zarrabi, A., Sharafi, A., Yazdi, A., 2006. Petrology, petrography and mineralogical studies of “Choghart Iron Ore Mine”, Bafgh area, Iran. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, A578. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1072>
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: A review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52, 1229–1258.
- Turcotte, D.L., 1997. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge 398 p.
- Wang, G., Zhang, S., Yan, C., Song, Y., Sun, Y., Li, D., Xu, F., 2011. Mineral potential targeting and resource assessment based on 3D geological modeling in Luanchuan region, China. *Computers & Geosciences* 37, 1976–1988. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.05.007>
- Yasrebi, A.B., Hezarkhani, A., 2019. Resources classification using fractal modelling in Eastern Kahang Cu-Mo porphyry deposit, Central Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 11, 56–67. <https://doi.org/10.30495/ijes.2019.544596>

- Zhang, D., Cheng, Q., Agterberg, F., Chen, Z., 2016. An improved solution of local window parameters setting for local singularity analysis based on Excel VBA batch processing technology. *Computers and Geosciences* 88, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.12.012>
- Zuo, R., Wang, J., 2020. ArcFractal: An ArcGIS Add-In for Processing Geoscience Data Using Fractal/Multifractal Models. *Natural Resources Research* 29, 3–12. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09513-5>
- Zuo, R., Agterberg, F.P., Cheng, Q., Yao, L., 2009b. Fractal characterization of the spatial distribution of geological point processes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 11(6): 394–402. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.07.001>
- Zuo, R., Cheng, Q., Xia, Q., 2009a. Application of fractal models to characterization of vertical distribution of geochemical element concentration. *Journal of Geochemical Exploration* 102(1), 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.11.020>