

Research Article

Discrimination of geochemical anomalies using the C-N fractal method and remote sensing in the Sonajil Cu-porphyry, Heris, NW Iran

Gohar Farajpourkhazaei¹, Mohammad Yazdi^{1*}, Bahman Rahimzadeh¹, Shohreh Hassanpour²

1- Department of Geology of Mineral and water resources. Shahid Beheshti University

2- Department of geology. Payame Noor University. Tehran. Iran

Keywords: C-N fractal, geochemical anomalies, remote sensing, Cu-porphyry, Sonajil, Iran

1-Introduction

Today, geochemical explorations in Iran have concentrated on stream sediment settings and litho-geochemical, which play a crucial role in finding promising areas in the regional dimension in detailed explorations (Jafari et al., 2019). Although it is now well understood that geochemical data are characterized by their spatial distribution, traditional methods only emphasize the frequency distribution of elemental concentration and ignore spatial variability; in addition, conventional statistical techniques contain disadvantages like a rejection of outliers and normalization of raw data so that it is better to be replaced by modern techniques (Hassanpour and Afzal 2013; Afzal et al., 2017). In recent years, fractal statistical analysis methods have been considered efficient for separating geochemical anomalies from a background. The most important result from the statistical analysis of geochemical data is separating multiple anomaly communities and determining the background value for each element in the exploration area (Nazarpour et al., 2015; Zuo and Wang, 2016; Afzal et al., 2019; Mirzaie et al., 2020). In 1983, Mandelbrot introduced geometry and analyzed all natural processes, naming it fractal geometry (Mandelbrot, 1982). Cheng first used the number-size (N-S) and concentration-area (C-A) fractal models in the Canadian porphyry gold-copper deposit to separate anomalies from the background (Cheng et al., 1994). To reveal and prove that data distribution has a multifractal nature requires extensive computation. The C-N method seems equally applicable to all cases, which is probably rooted in the fact that geochemical distributions mostly satisfy the properties of a multifractal function (Hassanpour and Afzal, 2013; Hassanpour et al., 2022). The concentration's logarithmic area becomes fractured against the number and area, i.e., undergoes steep slope changes, indicating changes from background to anomalies with different grades and geological conditions (Agterberg et al., 1996). Generally, the geochemical data show a multifractal behavior, indicating existing changes such as geochemical, geological, alteration, and mineralization conditions (Zuo and Wang, 2016).

The present research aimed to separate the anomalies from the background for the copper using concentration-number (C-N) fractal, remote sensing, and ASTER satellite image processing to identify the copper mineralization-related altered regions in the Sonajil deposit.

2-Material and methods

In the present study, Queen's University Laboratory Canada used the copper density value in 1249 samples of the elements' rocks data in the framework of systematic geochemical explorations in 1:100000 plate to separate anomalies from the copper background. Then, the outliers were removed, and the data was normalized using the logarithm method.

B) Furthermore, it aimed to detect the thermal alterations in the Sonajil copper deposit. The related data used are ASTER estimator data from the TERRA satellite. Before using the data, they should be prepared for entering the processing stage. The preprocessing operations for preparing the data in the study area include radiometric and QUAC atmospheric corrections.

* Corresponding author: m-yazdi@sbu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2024.44380.2392

Received: 2023-02-15

Accepted: 2024-03-17

3-Results and discussions

Table 1 contains statistical properties such as the number of samples in the region for the copper's geochemical data and maximum, minimum, mean, and standard deviation. The copper's concentration-number fractal indicates five different geochemical populations in the study area. The distribution of different geochemical communities of the copper (Figure 1) has been determined based on the fracture points achieved from the logarithmic diagram of copper's concentration number (Figure 2). The first community with a slope close to the horizon shows a concentration range of 8.4-160 ppm, the background value in the concerned area. The second and third communities express a concentration range of 170-1600 ppm, the average value anomaly in the region. The fourth community shows a high anomaly limit in the region by showing a concentration range of 1700-5600 ppm. The fifth population, the slope of which approximates the vertical line, represents the most severe anomaly in the region (higher than 5700 ppm).

Table 1. The statistical Values for Cu in the host rocks of the Sonajil deposit

Metal	Number	Min	Max	Mean	Ave	Var	Stev	Skew	Kurt
Cu (ppm)	1964	7.1	21200	72.95	240.57	914864.8	956.4857	12.29	211.87

Additionally, the threshold limit achieved from the concentration-number fractal method for the copper is shown in Table 2. In the concentration-number fractal obtained from copper, the fractal dimension increases from the first population to the second one (Figure 2), indicating an increased concentration, pixels (pixels' value), the area surrounded in the areas with mineralization, which is reduced with more speed than non-mineralized regions. The geochemical range obtained for copper based on the concentration-number fractal method is related to the region's lithology (lower to middle Eocene volcanic rocks), playing a role in forming anomalies.

Table 2. Separating anomaly from Cu background based on Concentration-Number (C-N) fractal method.

Metal	Concentration range (C-N)	Geochemical interpretation
Cu (ppm)	8.4-160	Background
	170-1600	Medium anomaly
	1700-5600	High anomaly
	5700 >	Strong anomaly

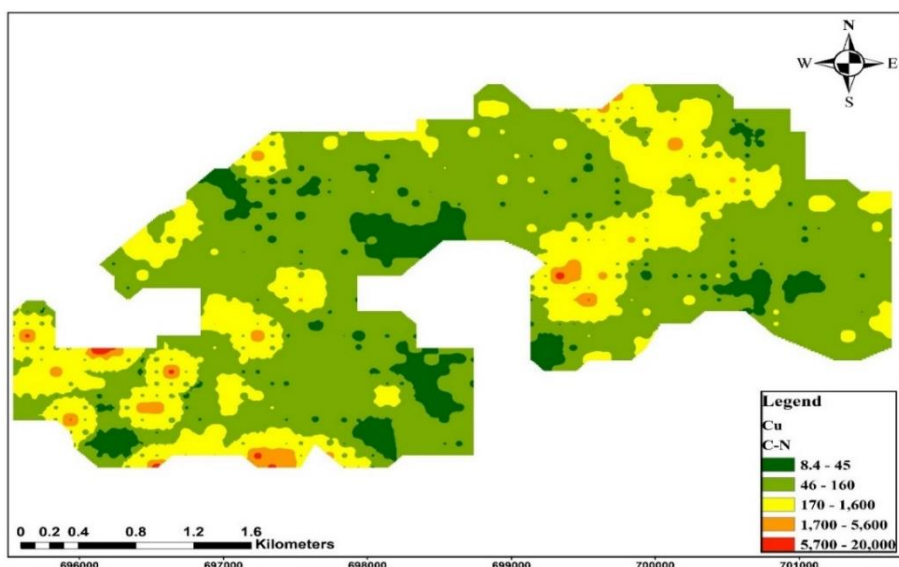


Fig 1. The copper's comprehensive geochemical distribution map is based on the concentration-number (C-N) fractal method used in the study area.

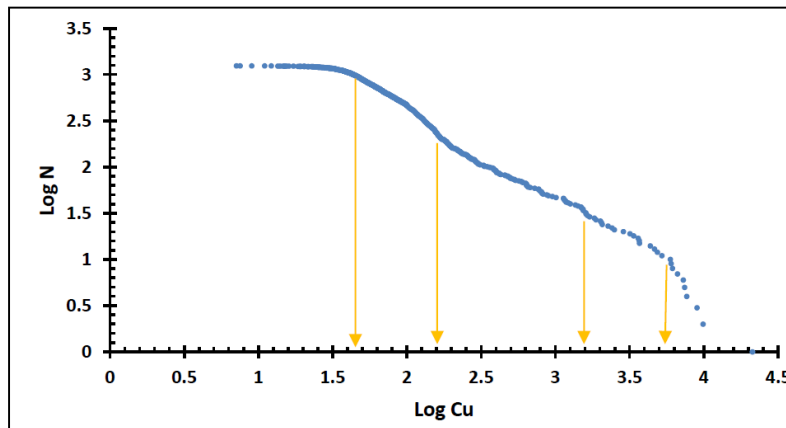


Fig 2. The copper's Concentration-Number (C-N) logarithmic diagram in the study region

The hydrothermal alteration is the most critical factor in suggesting the regions to identify new mineralization, and ASTER data have an appropriate condition concerning this estimator's ability to separate hydrothermal alterations in the infrared range of short wavelengths (Rowan et al., 2003). Considering the zoning of the alteration regions, mainly iron oxides, and the argillic, phyllic, and propylitic alterations, the images with three visible and near-infrared bands (VNIR) and short-wavelength infrared images (SWIR), in which the characteristic minerals of the altered regions are primarily differentiated in terms of spectral reflections, were used, respectively. As shown in Figure 3, the colorful mixture of RGB:468 results in argillic and propylitic alterations becoming pink and brown, respectively. The Band Ratio method is one of the standard methods in image processing, which removes topographic and shading effects, reduces a series of noises, and specifies a difference between illuminated grades, that is a digital method for multispectral image processing, consisting of dividing pixels of an image or a spectral band with corresponding pixels in another image or band (Goetz et al., 1983). Since some minerals such as limonite, goethite, and hematite are in the region, the band ratios can be used to detect iron oxides. Therefore, the detection can be made using ASTER images and band ratios. Besides, the B3/B1 band ratio was used for iron detection. The iron minerals in band 3 have more reflections and absorptions in band 1 (Babaahmadi, 2009).

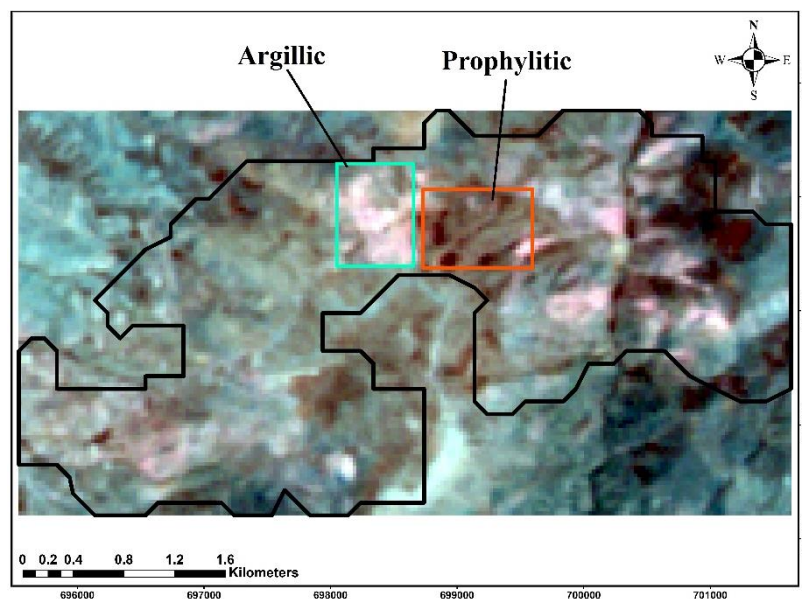


Figure 3. Detecting the argillic and propylitic alterations using the RGB:468 band combination, where pink and brown colors represent argillic and propylitic alterations, respectively

4-Conclusion

The present study aims to separate anomalies from the background and identify dominant hydrothermal alterations in the Sonajil copper deposits using the stream deposit data and ASTER images. The anomalies resulted from the concentration-number fractal method showed a higher copper concentration in the southern and southwest parts of the deposit, which can be due to the existence of the mother rock of Eocene basalt andesite that has a high potential in the formation of copper deposits in the region. Generally, each geochemical population obtained from concentration-number multifractal methods shows its distribution. The asynchronous behavior in different geochemical settings and geological populations are related to the region's geological complexes, such as lithological units (basalt andesite and paleocene andesite and trachyte), being considered as the dominant lithology in the region, as well as the faults and hydrothermal alterations which play a role in forming the anomalies. This feature is due to the fractal nature of element distribution in the nature.

In the studies conducted by the researcher to identify the alterations in the study area related to copper mineralization, it was found that the phyllic, argillic, and propylitic alterations regarding the Sonajil copper deposit are regarded as one of the most significant alterations. Using remote sensing and ASTER satellite images showed that argillic alteration dominates the phyllic, argillic, and propylitic alterations and covers a broader area of the regarded deposit, overlapping with the Eocene basaltic andesitic lithological unit. As shown in the result, it is evident that the argillic alteration could cover well the anomalies related to the concentration-number fractal-obtained copper, indicating the significance and influential role of this alteration in forming the Sonajil copper deposit in the region.

References

- Afzal, P., Yasrebi, A. B., Saein, L. D. and Panahi, S., 2017b. Prospecting of Ni mineralization based on geochemical exploration in Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 181: 294-304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.10.003>.
- Afzal, P., Yasrebi, A.B., Saein, L.D., Panahi, S., 2017. Prospecting of Ni mineralization based on geochemical exploration in Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 181, 294-304. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.10.003>.
- Afzal, P., Yousefi, M., Mirzaei, M., Ghadiri-Sufi, E., Ghasemzadeh, S., Daneshvar Saein, L., 2019. Delineation of podiform-type chromite mineralization using geochemical mineralization Prospectively index (GMPI) and staged factor analysis in Balvard area (southern Iran). *Journal of Mining and Environment* 10, 705–715. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.8107.1678>.
- Baba Ahmadi, A. 1999. *Applications of Remote Sensing (RS) in Geology*. Tehran: Avaye Qalam.
- Hassanpour, S., 2010. Metallogenesis and mineralization of copper-gold deposits in Arsbaran magmatic zone, East Azarbaijan, Northwest Iran. PhD Thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University.
- Hassanpour, S., Senemari, S., Roomi, N., 2022. Delineation of mineralization zones by multivariate fractal and zonality modeling in south of the Sungun and Kighal porphyry systems, NW, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 15(8), 703. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09845-2>.
- Jaafari, M.A., Kananian, A., Nazarpour, A., 2019. Discrimination of Pb and Zn metals geochemical anomalies using classical statistical (Mean+ nSTEVE), Singularity Index, remote sensing and structural factors method in Khondob 1: 100000 sheet, northern part of Malayer-Aligoudarz-Esfahan zone. *Advanced Applied Geology* 9(3), 341-356. <https://doi.org/10.22055/AAG>.
- Mandelbrot, B.B., Mandelbrot, B.B., 1982. *The fractal geometry of nature*, Times Books New York, 468 P.
- Mirzaie, M., Afzal, P., Adib, A., Rahimi, E. and Mohammadi, Gh., 2020. Detection of zones based on ore and gangue using fractal and multivariate analysis in Chah Gaz iron ore deposit, Central Iran. *Journal of Mining and Environment* 11(2), 454-466. <https://doi.org/10.22044/JME.2020.9111.1801>.
- 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.2015.06.001>.

- Rowan, L.C., Hook, S.J., Abrams, M.J., Mars, J.C., 2003. Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Economic Geology* 98(5), 1019-1027. <https://doi.org/10.2113/98.5.1019>.
- Zuo, R., Wang, J., 2016. Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review. *Journal of Geochemical Exploration* 164, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.04.010>.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Farajpourkhazaei, G., Yazdi, M., Rahimzadeh, B., Hassanpour, S., 2024. Discrimination of Geochemical Anomalies using the C-N fractal method and remote sensing in the Sonajil Cu-porphyry. *Adv. Appl. Geol.* 14(2), 485- 505.

DOI: 10.22055/aag.2024.44380.2392

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_19145.html

©2024 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

جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی فلز مس با استفاده از روش فرکتال عیار-تعداد (C-N) و سنجش از دور در کانسار مس پورفیری سوناجیل؛ هریس، شمال غرب ایران

گوهر فرج پور خزاعی

گروه زمین شناسی دانشگاه شهید بهشتی، تهران

محمد یزدی

گروه زمین شناسی دانشگاه شهید بهشتی، تهران

بهمن رحیم زاده

گروه زمین شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

شهره حسن پور

گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

* m-yazdi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹

چکیده

کانسار مس پورفیری سوناجیل در ۱۵ کیلومتری شرق شهرستان هریس در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. منطقه اهر با جای گیری در بخش فلز زایی کمربند ماگمایی ارسباران و وجود منابع غنی مس در این مناطق، از اهمیت بالایی برخوردار است. واحدهای سنگی موجود در منطقه شامل توف و آندزیت می‌باشد که به شدت دگرسان شده‌اند. کانه‌زایی مس اغلب از نوع پورفیری تا گرمایی با منشأ مختلف و تحت تاثیر کنترل های ساختاری در منطقه گزارش شده است. تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی ابزار قدرتمند برای آشکارسازی مناطق ناهنجار عناصر می‌باشد. برای دستیابی به این موضوع از روش هندسی فرکتال عیار-تعداد که موقعیت فضایی و الگوی توزیع داده‌های ژئوشیمیایی را مدنظر قرار می‌دهد استفاده شده است. در جوامع ژئوشیمیایی حاصل از تجزیه فلز مس در ۱۲۲۴ نمونه سنگ مقدار کمینه و بیشینه عیار برای فلز مس به ترتیب ۱۶۰ ppm و ۵۶۰۰ ppm می‌باشد. با استفاده از مطالعات سنجش از دور و پردازش تصاویر ماهواره‌ای ASTER به بارزسازی دگرسانی‌های گرمایی منطقه پرداخته شد. از محدوده امواج مرئی تا مادون قرمز موج کوتاه (VNIR-SWIR) تصاویر ASTER برای شناسایی دگرسانی‌ها استفاده شده است. نتایج نشان داد دگرسانی آرژیلیک در مقایسه با سایر دگرسانی‌های منطقه از وسعت بیشتری برخوردار بوده و با گسترش کانی سازی در کانسار مس سوناجیل همراهی خوبی دارد. نتایج بررسی های ژئوشیمیایی نشان داد که عیار فلز مس در جنوب و جنوب غربی افزایش پیدا می‌کند. معمولاً شدت ناهنجاری های ژئوشیمیایی مس در نزدیکی ساختارهای زمین شناسی مانند گسل‌ها و مناطق برشی افزایش یافته است. کنترل صحرایی موید احتمال قوی از وجود ذخایر معدنی مس در این نقاط است.

واژه‌های کلیدی: فرکتال عیار-تعداد، آنومالی ژئوشیمیایی، دگرسانی، کانی سازی مس، سوناجیل، شمال غرب ایران

۱-مقدمه

کانسارهای مس پورفیری از طرف داخل به طرف خارج شامل: پتاسیک ← فیلیک ← رسی ← پروپیلتیک است (Meyer and Hemle, 1967). این ترتیب مکانی در مناطق دگرسانی مربوط به نوعی از کانسارهای مس پورفیری، موسوم به مدل لوول و گیلبرت است (Khoei, 1999) و در مدل دیگر که به مدل دیوریت موسوم است مناطق دگرسان از داخل به خارج شامل: پتاسیک ←

با توجه به گوناگونی کانسارهای مس، مطالعه نحوه تشکیل و محیط زایشی آن‌ها در پی جویی معدنی مس و بهره‌برداری مناسب از این ذخایر دارای اهمیت فراوانی است. سیستم‌های میزبان مس پورفیری از گسترده‌ترین توزیع‌کننده گونه‌های کانی‌زایی در مرز ورقه‌های همگرا هستند (Sillitoe, 2010). معمولاً دگرسانی در

لیتوزئوشیمیایی متمرکز شده‌اند که در اکتشاف‌های تفصیلی نقش مهمی در یافتن مناطق امیدبخش در ابعاد منطقه‌ای دارند. مهمترین نتایج حاصل از تحلیل آماری داده‌های ژئوشیمیایی جدایش جوامع گوناگون بی‌هنجاری از یکدیگر و تعیین میزان زمینه برای هر عنصر در منطقه مورد اکتشاف است (Nazarpour et al., 2015). در سال ۱۹۸۳ ماندلبورت نوعی هندسه را معرفی کرد که بر اساس آن تمام فرآیندهای موجود در طبیعت را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و آن هندسه را فرکتال نامید (Mandelbort, 1983). برای اولین بار چنگ، برای جداسازی آنومالی از زمینه از روش فرکتال عیار-تعداد (C-N) و عیار-مساحت (C-A) در کانسار مس-طلای پورفیری کانادا استفاده کرد (Cheng et al., 1994). نمودار لگاریتمی عیار در برابر تعداد و مساحت در نقاطی دچار شکست می‌شود یا به عبارتی تغییر شیب تند می‌دهد که این تغییر شیب بیانگر تغییر از زمینه به آنومالی‌های درجات مختلف و تغییرات در شرایط زمین‌شناسی است (Agterberg et al., 1996). به‌طور کلی داده‌های زمین‌شیمیایی رفتار مولتی‌فرکتالی یا چند فرکتالی از خود نشان می‌دهند که این امر بیانگر وجود تغییراتی نظیر تغییر در شرایط زمین‌شیمیایی، زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی است (Zuo et al., 2016).

در سال‌های اخیر، فناوری سنجش از دور، اطلاعات ارزشمندی را در زمینه اکتشاف مواد معدنی فراهم ساخته است. داده‌های ماهواره‌ای با ثبت نتایج حاصل از تصویربرداری در محدوده‌های مختلف طیف الکترومغناطیس، به‌طور گسترده‌ای در زمین‌شناسی و اکتشاف معدن بکار گرفته شده‌اند. در این میان ساختارهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، نوع لیتولوژی و انواع دگرسانی را می‌توان به عنوان مهمترین لایه‌های قابل استخراج در تصاویر ماهواره‌ای دانست. استفاده از تصاویر و اطلاعات ماهواره‌ای در نقشه‌های زمین‌شناسی، بهبود کیفی نقشه‌ها و تهیه نقشه‌های موضوعی (Baba Ahmadi, 1999)، مانند زون‌های دگرسانی، واحدهای سنگی، خطواره‌ها و الگوی شکستگی در تهیه نقشه پتانسیل معدنی بسیار مثر ثمر

پروپیلستیک است (Shahabpour, 2005). از نظر محیط زمین ساختی سیستم‌های مس پورفیری به‌طور عمده در کمان‌های ماگمایی تولید می‌شوند که این محیط‌ها طیف وسیعی از محیط‌های فشارشی را به‌صورت منطقه‌بندی به‌وجود می‌آورند (Tosdal and Richards, 2001).

با توجه به قرار گرفتن نواحی اهر و هریس در بخش فلزازی طارم-قره‌داغ و وجود منابع غنی مس در این مناطق، این بخش پس از بررسی‌های مقدماتی زمین‌شناسی به عنوان منطقه امیدبخش مورد مطالعه قرار گرفت (Hezarkhani, 2003). در این منطقه توده گرانیتوئیدی نفوذی منبع احتمالی سیال‌های گرمایی برای کانی‌سازی و دگرسانی است (Hezarkhani, 2007). منطقه سوناجیل در فاصله ۱۷ کیلومتری خاور هریس در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. وجود کانی‌سازی مس و دگرسانی شدید گرمایی در این منطقه تا حدودی اثبات شده است. کانسار سوناجیل دارای ویژگی‌های یک توده مس پورفیری بوده و دگرسانی‌های فیلیک، پروپیلستیک و آرژیلیک و کانی‌سازی سولفیدی، سولفوسالتی و اکسیدی در آن گسترش دارند (Aghazadeh, 2014). کانسار سوناجیل دارای ویژگی‌های یک توده مس پورفیری بوده و دگرسانی‌های فیلیک، پروپیلستیک و آرژیلیک و کانی‌سازی سولفیدی، سولفوسالتی و اکسیدی در آن گسترش دارند (Aghazadeh, 2014).

تشخیص مناطق دارای بی‌هنجاری ژئوشیمیایی از زمینه، مهم ترین هدف در مطالعات ژئوشیمیایی اکتشافی است. در این مورد از روش‌های کلاسیک بسیار استفاده شده است (Jafari et al., 2019). با وجود موفقیت‌های فراوان در اکتشاف، این روش‌ها دارای نقایصی همچون شرط پیروی از توزیع نرمال، حذف تعدادی از داده‌ها به عنوان خارج از زده، عدم توجه به توزیع فضایی داده‌ها و نیز عدم توجه به شکل هندسی بی‌هنجاری هستند. در سال‌های اخیر روش‌های تحلیل آماری فرکتال به عنوان ابزاری کارآمد در جداسازی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی از زمینه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. امروزه اکتشافات ژئوشیمیایی به‌ویژه در ایران بر روی رسوبات آبراهه‌ای و مطالعات

۲- زمین شناسی

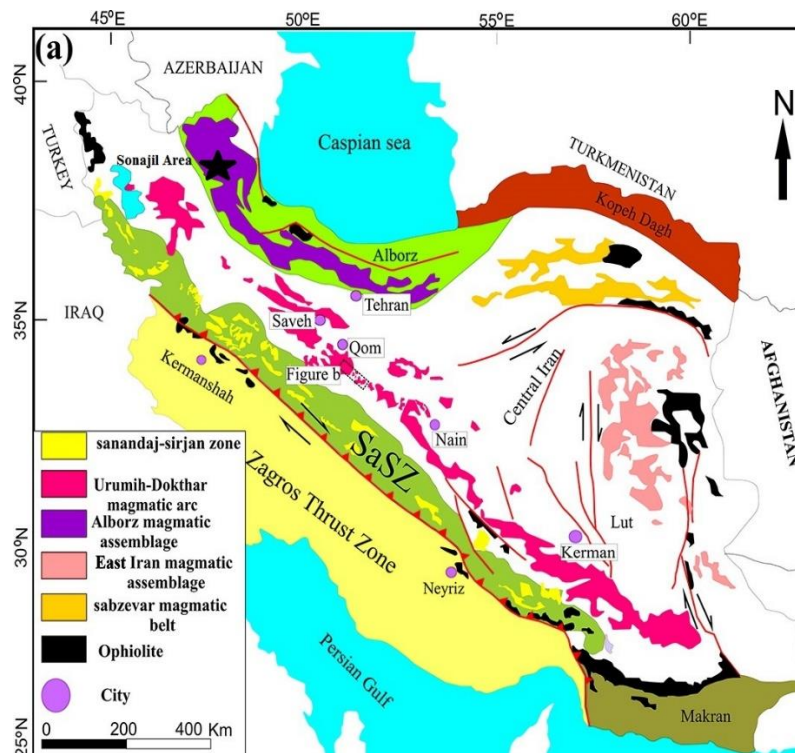
۲-۱- زمین شناسی عمومی

محدوده سوناجیل در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ آهر و در ۱۷ کیلومتری جنوب شرقی شهر هریس در شمال شرقی شهرستان تبریز، در بخشی از کمربند فلزایی ماگمایی ارسباران قرار دارد (Babakhani et al., 1976). همچنین بر پایه رده بندی واحدهای ساختاری ایران، این منطقه بخشی از پهنه البرز-آذربایجان به شمار می رود (Nabavi, 1976) (شکل ۱). زون ماگمایی ارسباران در شمال غرب ایران در بخش جنوبی زون فرورانشی قفقاز کوچک قرار گرفته است (Hassanpour and Moazzen., 2017). در این زون فلزایی تاکنون کانسارها و رخدادهای معدنی اقتصادی تا غیر اقتصادی پورفیری متنوعی گزارش شده است (Hassanpour, 2010).

در زون فلزایی-ماگمایی ارسباران، قدیمی ترین واحدهای سنگی شامل ردیف های رسوبی آتشفشانی دگرگونی می باشند؛ که در زیر سنگ های آهکی آتشفشانی کرتاسه بالایی قرار گرفته اند (Babakhani et al., 1990). بیش از نیمی از رخنمون های زون ماگمایی-فلزایی ارسباران را سنگ های نفوذی و فعالیت های آتشفشانی تریاری به همراه رخساره های رسوبی تشکیل می دهند. فعالیت های آتشفشانی نوع آندزیتی که از کرتاسه پسین آغاز شده، به طور متناوب تا کواترنر ادامه یافته اند. واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن و الیگوسن، توده های نفوذی کم عمق الیگوسن-میوسن پیشین، واحدهای نیمه آتشفشانی انتهای میوسن، فوران های آتشفشانی سبلان در میوسن پایانی-پلیوسن و سرانجام جریان های آگنی بازال، توالی چین های زون ماگمایی-فلزایی ارسباران را طی ۸۰ میلیون سال، از اواخر کرتاسه-پالئوژن تا نئوژن-کواترنری تشکیل داده اند. مراحل تکامل تکتونیکی و ماگمایی این زون ماگمایی ناشی از بسته شدن و فرورانش صفحه اقیانوسی در طول زمان کرتاسه فوقانی تا ائوسن، سپس برخورد بین صفحات اقیانوسی قاره ای و کوتاه شدگی و ضخیم شدگی پوسته ای ناشی از رژیم تکتونیکی فشارشی می باشد (Hasanpour, 2010).

بوده و از نظر وقت و هزینه نیز بسیار مقرون به صرفه است (Crosta, 1991; Loughlin, 2003). در زمینه کاربرد روش های سنجش از دور در شناسایی زون های دگرسانی برای اکتشاف ذخایر معدنی، مانند طلا، مس، سرب، روی، کروم و ... اثبات شده است. در این میان شناسایی و تفکیک نواحی پتانسیل مس با استفاده از داده های سنجش از دور کمتر مورد بررسی و توجه قرار گرفته است. بدین جهت، هدف اصلی از پردازش تصاویر ماهواره ای در این پژوهش شناسایی مناطق دگرسانی مس در کانسار سوناجیل با استفاده از داده های (VNIR+SWIR) سنجنده ASTER است که می تواند شرایط را برای اکتشاف کانسارهای مس فراهم کند و منجر به کاهش هزینه ها و سهولت در امر پی جویی این کانسارها شود (Crosta, 2003).

داده های مورد استفاده در این مطالعه مربوط به سنجنده ASTER هستند. این سنجنده متشکل از ۱۴ باند شامل ۳ باند مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR)، ۶ باند مادون قرمز کوتاه (SWIR) و ۵ باند مادون قرمز حرارتی (TIR) با قدرت تفکیک مکانی به ترتیب ۱۵، ۳۰ و ۹۰ متر، قادر به اندازه گیری طیف های انعکاسی است. پهنای عرضی این سنجنده ۶۰ کیلومتر است. هدف از این مقاله، جداسازی آنومالی از زمینه برای فلز مس با استفاده از روش فرکتال عیار-تعداد (C-N)، دورسنجی و پردازش تصاویر ماهواره ای ASTER برای شناسایی بخش های دگرسان شده مرتبط با کانه زایی مس در کانسار سوناجیل است. برای این منظور از نمونه های سنگی برداشت شده در منطقه مورد مطالعه به منظور اکتشافات ژئوشیمیایی استفاده شد سپس برای مطالعات دورسنجی انواع دگرسانی های مرتبط با کانه زایی مس و همچنین روش های نظیر ترکیب رنگی، نسبت باندی و ... برای جداسازی انواع دگرسانی ها (اکسید آهن، آرژیلیک، فلیک و پروپیلیتیک) استفاده شد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه زمین شناسی ساختاری ایران (Stöcklin, 1968; Alavi, 1994)
 Fig. 1. Geological map of the main tectonic domains in Iran (Stöcklin 1968; Alavi, 1994).

اؤوسن زیرین، فرآیندهای ماگمایی کمابیش گسترده بوده- اند. ترکیب سنگ‌های ماگمایی در این زمان بیشتر حد واسط هستند. در اؤوسن میانی، فرآیندهای آتشفشانی گسترش و فعالیت بیشتری پیدا کرده‌اند. فرآورده‌های آن به صورت گدازه‌های بازیک با ترکیب آکالی‌بازالت، بازالت، گدازه‌های کراتوفیری و اسپیلیتی و سری سنگ‌های گدازه- ای میانه تا اسیدی با ترکیب تراکیت، لاتیت، تراکی‌آندزیت و داسیت و آذرآواری‌های توفی و نهشته‌های آذرآواری جریانی گاه با بافت ایگنمبریتی نمود پیدا کرده‌اند (Crosta, 2003; Loughlin, 1991). این فعالیت آتشفشانی، در پایان اؤوسن و در آغاز الیگوسن تا اندازه‌ای آرامش می‌یابد و حوضه دریایی اؤوسن پایانی جای خود را به حوضه‌های رسوبی قاره‌ای و نیمه قاره‌ای می‌دهد. فعالیت آتشفشانی زیردریایی نیز جای خود را به مجموعه‌های نیمه- آتشفشانی، گدازه‌ها و آذرآواری‌های خشکی و یا دریای کم- ژرفا می‌دهد (Nabavi, 1976).

توالی نهشته‌های اؤوسن در دره خاوری این محدوده با ستبرای چشمگیر بیش از ۱۰۰۰ متر دیده می‌شود. نفوذ

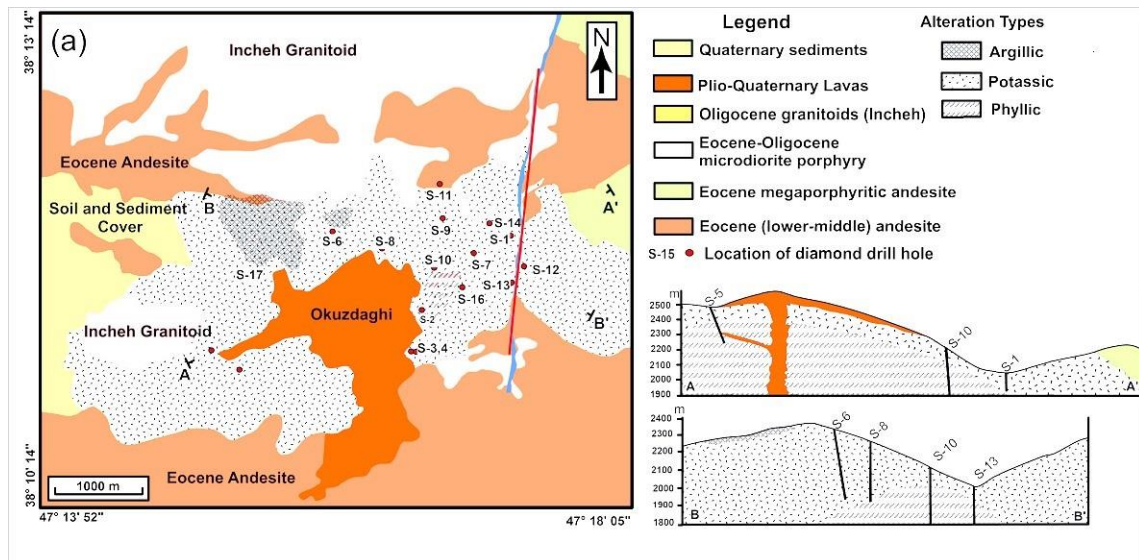
۲-۲- زمین شناسی کانسار مس پورفیری سوناجیل

کانسار مس پورفیری سوناجیل در ۱۵ کیلومتری شرق شهرستان هریس در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. نهشته‌های سنوزوئیک رخنمون‌های دیده شده در این محدوده را می‌سازند. با توجه به نقشه زمین شناسی منطقه (شکل ۲) رخنمون‌های سنگی در این محدوده عبارتند از: ۱- نهشته‌های آتشفشانی-رسوبی اؤوسن؛ ۲- توده‌های آذرین درونی الیگو-میوسن؛ ۳- سنگ‌های آتشفشانی کواترنری. در این محدوده، نهشته‌های آتشفشانی-رسوبی اؤوسن گسترش بیشتری دارند و نزدیک به ۵۰ درصد رخنمون‌های سنگی در این محدوده را دربرگرفته‌اند. این نهشته‌ها در بخش‌های شمالی، خاوری و جنوبی محدوده سوناجیل رخنمون دارند و در بردارنده توالی بزرگی از نهشته‌های آتشفشانی-رسوبی هستند که در محیط دریایی و قاره‌ای برجای گذاشته شده‌اند (Mahdavi and Amini, 1989). زمان اؤوسن اوج فرآیندهای ماگمایی در این منطقه است. ردیف‌های آتشفشانی اؤوسن در منطقه به بخش‌های زیرین، میانی و بالایی رده‌بندی می‌شوند. در

دارند. زمان جایگیری آن‌ها نیز الیگومیوسن دانسته شده است (Aghazadeh et al., 2011). توده‌های یادشده عامل اصلی کانی‌زایی پورفیری در منطقه هستند و در پی چرخش سیال‌های پدیدآمده از آن‌ها، کانی‌زایی‌های گوناگونی درون توده‌ها و سنگ‌های همراه پدید آمده‌اند (Aghazadeh, 2014). بیشتر این توده‌ها در بخش‌های مرکزی و شمالی این منطقه رخمون یافته‌اند. در بخش‌های مرکزی این محدوده، سنگ‌های آتشفشانی بازالتی کواترنری رخمون دارند. این سنگ‌ها جوان‌ترین رخمون‌های سنگی منطقه را می‌سازند. این سنگ‌ها با سبزی متغیر از چندین متر تا چندین ده متر به صورت پوششی روی سنگ‌های کهن‌تر جای گرفته‌اند (Asiabanha and Foden, 2012).

توده‌های آذرین درونی و فرآیندهای زمین‌شناختی بهم-ریختگی توالی نهشته‌های ائوسن را در پی داشته‌اند. واحدهای نهشته‌های توفی بیشتر در بخش‌های شمالی و جنوبی محدوده رخمون دارند. نهشته‌های آذرآواری و رسوبی با توالی از سنگ‌های گدازه‌ای بازالتی و آندزیت بازالتی و آندزیتی پوشیده شده‌اند. توالی از گدازه‌های بازالتی روی نهشته‌های یادشده دیده می‌شوند که در بخش‌های بالای خود همراهانی از ایگنمبریت و سنگ‌های آذرآواری و رسوبی دارند. سنگ‌های آندزیتی روی این نهشته‌ها دیده می‌شوند و در بخش‌های بالای خود نهشته‌های آذرآواری به صورت میان‌لایه دارند (Hezarkhani, 2008).

نهشته‌های ائوسن با توده‌های آذرین درونی و دایک‌های فراوانی قطع می‌شوند و این توده‌ها دامنه ترکیبی متنوع



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی کانسار مس سوناجیل همراه برش‌های عرضی و موقعیت محدوده مورد مطالعه در شمال غرب ایران (Hosseinzadeh, 2008)

Fig. 2. Simplified geological and alteration map of the Sonajil area on which the pattern of boreholes is pinpointed (modified from Hosseinzadeh, 2008)

سنگی است. در این مطالعه برای جداسازی آنومالی از زمینه فلز مس، از مقادیر غلظت فلز مس در ۱۲۴۹ نمونه سنگ-های منطقه که در چارچوب اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ اهر که توسط آزمایشگاه دانشگاه کوپینز کانادا مورد تجزیه قرار گرفت، استفاده شد. موقعیت نمونه‌های برداشت شده در (شکل ۳) ارائه شده است. سپس نقاط پرت حذف و داده‌ها به روش

۳- مواد و روش‌ها

مراحل انجام مطالعه حاضر به شرح زیر است:

الف) با توجه به این که ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ اهر در پهنه فلز زایی ارسباران قرار دارد و وجود منابع غنی مس در این منطقه اثبات شده است هدف اصلی این پژوهش جداسازی آنومالی از زمینه با استفاده از روش فرکتال عیار-تعداد (C-N) با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی نمونه‌های

آزمون شاپیرو و ویلک (Shapiro and Wilk, 1965) و نمودارهای Q-Q هستند، که در این پژوهش از نمودارهای Q-Q استفاده شده است. نمودارهای Q-Q تک عنصری که از نمونه‌های سنگی ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ آهر برای فلز مس بدست آمده‌اند، می‌توانند در مشخص کردن نقاط شکست جمعیت‌های ژئوشیمیایی و ثابت کردن دقت روش‌های انجام داده شده مفید واقع شوند (Cheng et al. 1994). بدین صورت که اگر پس از رسم نمودار تمام داده‌ها روی خط مماس شوند، نشان دهنده نرمال بودن داده‌ها است (Liu et al. 2019). در این مطالعه نمودارهای Q-Q توسط نرم‌افزار SPSS برای فلز مس در منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. مطابق شکل ۴ فلز مس چندین جمعیت ژئوشیمیایی را نشان می‌دهند که گواه بر فرآیندهای مختلف زمین‌شناختی و ژئوشیمیایی می‌باشد.

لگاریتم‌گیری به‌هنگار شدند. پارامترهای آماری مهم برای داده‌های ژئوشیمیایی عنصر مس در (جدول ۱) ارائه شده است.

ب) هدف دیگر مطالعه حاضر بارزسازی دگرسانی‌های گرمابی در کانسار مس سوناجیل است. داده‌های مورد استفاده برای این امر داده‌های سنجنده ASTER از ماهواره TERRA است. پیش از استفاده از داده‌ها باید آن‌ها را برای ورود به مرحله پردازش آماده ساخت. عملیات پیش‌پردازش برای آماده‌سازی داده‌های منطقه مورد مطالعه، مشتمل بر تصحیح رادیومتریکی و تصحیح اتمسفریک QUAC است.

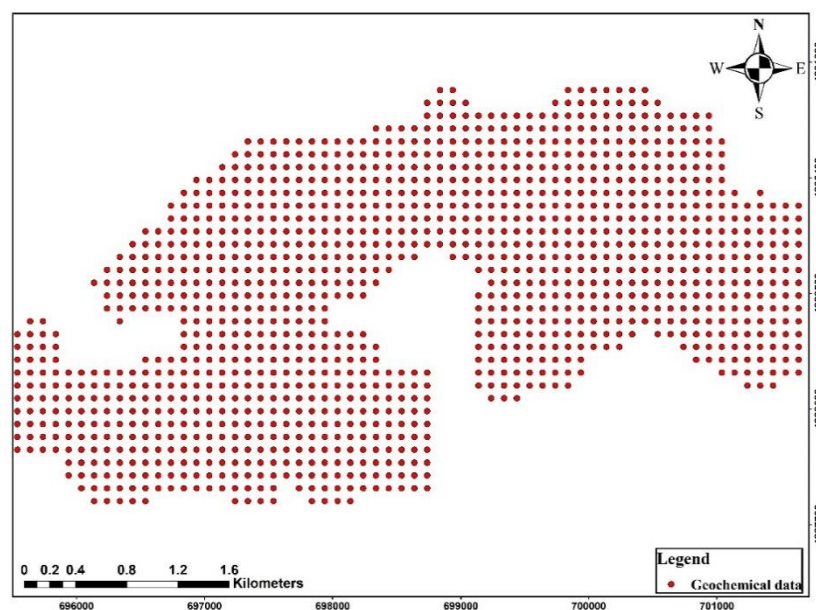
۳-۱- نرمال‌سازی داده‌ها

استفاده از برخی روش‌های آماری، منوط بر نرمال بودن تابع توزیع متغیرهای مورد استفاده است. به همین علت، قبل از استفاده از روش‌ها، آزمون نرمال بودن داده‌های خام باید انجام شوند. رایج‌ترین این روش‌ها،

جدول ۱- محاسبه پارامترهای آماری برای داده‌های ژئوشیمیایی مس در کانسار سوناجیل.

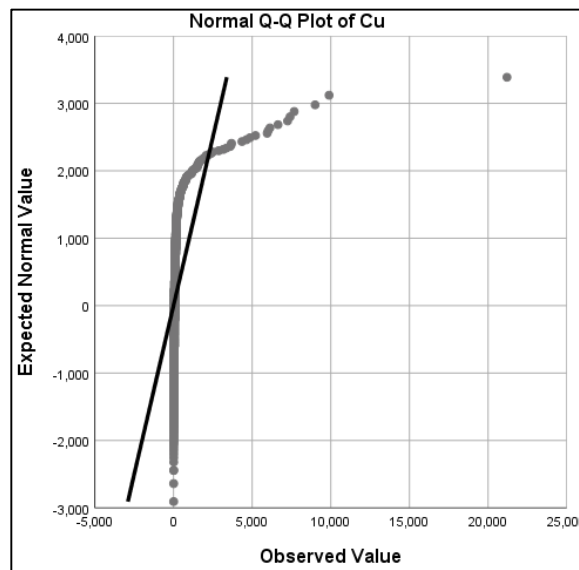
Table 1. Calculating the statistical parameters for the copper's geochemical data in the Sonajil deposit.

Metal	Min	Max	Mean	Ave	Var	Stev	Skew	Kurt
Cu (ppm)	7.1	21200	72.95	240.57	914864.8	956.4857	12.29	211.87



شکل ۳- موقعیت نمونه‌های برداشت شده در کانسار سوناجیل.

Fig. 3. The position of stream sediments samples in Sonajil area.



شکل ۴- نمودار Q-Q داده‌های خام ژئوشیمیایی فلز مس در کانسار سوناچیل که نشان‌دهنده‌ی چندین جمعیت ژئوشیمیایی می‌باشند.
Fig. 4. Q-Q diagram of Cu geochemical data in Sonajil area, indicating multiple geochemical populations

۳-۲- فرکتال عیار-تعداد (C-N)

در این پژوهش برای اکتشافات ژئوشیمیایی و جداسازی آنومالی از زمینه از روش فرکتالی عیار-تعداد (C-N) استفاده شده است. روش فرکتالی عیار-تعداد بر اساس رابطه معکوس بین عیار و فراوانی تجمعی هر عیار و عیارهای بالاتر از آن است. این روش بر اساس (رابطه ۱) معرفی می‌شود (Deng et al., 2010):

$$N(\geq C) \propto p^{-\beta} \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه ۱، C و N به ترتیب غلظت و فراوانی عیار عنصر مورد نظر می‌باشند، همچنین، $N(\geq C)$ برابر با تعداد نمونه‌هایی است که دارای عیار مساوی و یا بالاتر از C هستند و p برابر عیار و β برابر بُعد فرکتال است (Afzal et al., 2017). مزیت این روش این است که قبل از تخمین و با داده‌های خام محاسبات را انجام می‌دهد. به عبارتی، در این روش، داده‌ها نیاز به پردازش و تخمین ندارند (Cheng et al., 1997).

در روش‌هایی نظیر آمار کلاسیک و MAD، تفسیر و پردازش داده‌ها بر اساس غلظت و عیار داده‌های برداشت شده می‌باشد و موقعیت نمونه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود به همین علت احتمال دارد که بعضی از محدوده‌های معرفی شده توسط این روش‌ها به‌عنوان آنومالی کاذب باشند

درحالی که حد آستانه به دست آمده از مدل‌های فرکتالی، فراوانی مربوط به داده‌های ورودی (عیار عناصر مختلف) را نشان می‌دهد و مشخصات فضایی و هندسی منعکس شده توزیع را نیز بر اساس مدل فرکتالی عیار-تعداد و عیار-مساحت مشخص می‌سازد (Afzal et al., 2017; Hassanpour et al., 2022). در استفاده از روش‌های مولتی‌فرکتالی برای جداسازی آنومالی‌های زمین‌شیمیایی، نیازی به حذف مقادیر خارج از رده نیست، در واقع به علت ماهیت فرکتالی داده‌های زمین‌شیمیایی، به طور خودکار این داده‌ها کنار گذاشته می‌شوند؛ این امر روش‌های مولتی‌فرکتال را از روش‌هایی مثل آمار کلاسیک متمایز کرده و سبب گشته تا این روش از دقت و کارایی بالاتری برخوردار باشند (Cheng et al., 1997).

۳-۳- خصوصیات داده‌های ASTER

سنجنده ASTER که در سال ۱۹۹۹ روی ماهواره TERRA نصب شد، با داشتن قدرت تفکیکی مکانی و طیفی به نسبت مناسب، تأثیرات چشمگیری بر مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی گذاشته است و با دارا بودن سنجنده‌های تخصصی که بر پایه نیازهای زمین‌شناسی و اکتشافی طراحی و ساخته شده است، با داشتن قدرت تفکیک طیفی مناسب در محدوده فرسوخ بازتابی که بیشتر کانی‌ها در آن دارای نمودار جذب طیفی هستند،

تصویر، زمین مرجع شدند. در ابتدای کار با در دست داشتن داده‌های خام تصاویر سنجنده ASTER ماهواره TERRA، این پیش‌پردازش‌های لازم بر روی این تصاویر صورت گرفت و از آنجایی که تصاویر در سنجش از دور، نقشه نیستند، دارای مقیاس و سیستم تصویر نیستند (Alavipanah, 2009)؛ لذا زمانی که نیاز است در قالب نقشه یا در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به کار گرفته شوند، بایستی آن‌ها را به شیوه مناسبی دارای مقیاس و سیستم تصویر نمود.

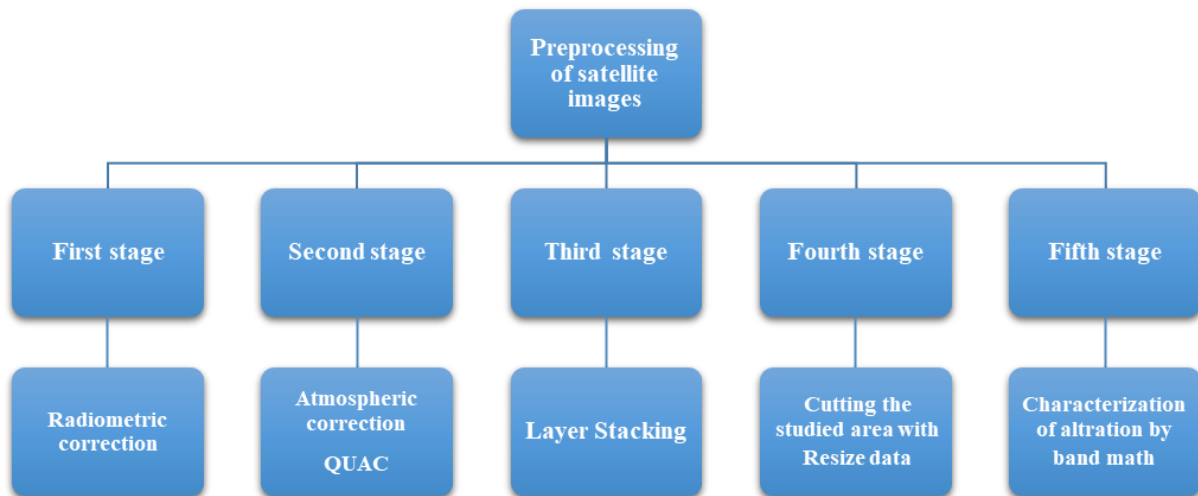
مرحله پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌های سنجنده شامل اعمال تصحیحات اتمسفریک و رادیومتریک می‌باشد. تصحیح رادیومتری از مهم‌ترین پیش‌پردازش‌های تصاویر ماهواره‌ای بشمار می‌آید و جز اولین مرحله در بررسی‌های دورسنجی است. تصحیحات رادیومتری به منظور کالیبره نمودن فاصله بین زمین و خورشید و همچنین تغییراتی که در اثر تغییر فصول در حین تصویربرداری به وجود می‌آید انجام می‌شود (Rouskov et al., 2005). تصحیح رادیومتریکی عواملی که بر روی امواج الکترومغناطیسی رسیده به سنجنده اثر منفی گذاشته است را حذف و نرمال سازی می‌کند. هر عاملی که بر روی انرژی رسیده به سنجنده به گونه‌ای اثر بگذارد که انرژی رسیده با انرژی منتشر شده از سطح یکسان نباشد به عنوان یک خطای رادیومتریکی شناخته می‌شود. مهم‌ترین عوامل ایجادکننده خطاهای رادیومتریکی زمین، اتمسفری و سنجنده است. تصحیح اتمسفری عبارت است از فرآیند حذف اثر جذب و پخش اتمسفری از روی امواج الکترومغناطیسی رسیده به سنجنده. در تصحیح اتمسفری می‌توان اثر پخش و جذب امواج الکترومغناطیسی از روی باندهای بازتابی را حذف کرد تا از این طریق بازتاب‌های طیفی به درستی تصحیح شده و امکان انجام پردازش‌های طیفی نیز در گام‌های بعدی فراهم شود (El Janati, 2019). در نهایت تصویر ASTER حاصل شده آماده هرگونه پردازش و تجزیه و تحلیل شد (شکل ۵).

امکان تفکیک انواع دگرسانی‌ها را فراهم کرده است (Rouskov et al., 2005). افزون بر آن، این سنجنده با داشتن پنج باند طیفی در محدوده فرسرخ حرارتی، تنها سنجنده Multi Thermal به شمار می‌آید؛ که تفکیک واحدهای سنگی و استخراج پهنه‌های دگرسانی با استفاده از آن امکان‌پذیر است (Ranjbar et al., 2003). در این مطالعه از یک برگه داده آستر که از نوع B_Level مربوط به سال ۲۰۰۵ است استفاده شد.

استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ASTER، پردازش و تفسیر آن‌ها به دو روشی چشمی و طیفی منجر به شناسایی دگرسانی‌های گرمایی مرتبط با کانی‌زایی مس شد. از پردازش طیفی که به مطالعه رفتار کانی‌ها و سنگ‌ها در مقابل انرژی الکترومغناطیس می‌پردازد برای شناسایی دگرسانی‌های گرمایی استفاده شد. به‌عنوان نمونه از روش عملیات جبری که به صورت محاسبات ساده نسبت دو باند تا عبارات جبری پیچیده بوده و روشی ساده و کارا در شناسایی انواع دگرسانی‌ها است استفاده شد و ترکیب‌های زیر برای داده‌های آستر بدست آمد (Sabins, 1999).

۳-۴- پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

اطلاعات ماهواره‌ای در ابتدا دارای خطاهای مختلف هندسی و رادیومتریک هستند زیرا تصاویری که توسط سنجنده ماهواره‌ای تهیه می‌شود ممکن است هنگامی که امواج از خورشید به سطح زمین تابیده می‌شود، هنگام انعکاس به دلیل گرد و غبار، مه و وضعیت توپوگرافی منطقه، انعکاس مطلوبی صورت نپذیرد و تصاویر ثبت شده وضوح لازم را نداشته باشند، یا اینکه خطاها متأثر از وضعیت ماهواره، سنجنده، خطاهای هنگام ثبت، انتقال و دیگر موارد ناشی از آن باشد. به منظور دریافت اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای لازم است پیش از استفاده از آن‌ها پیش‌پردازش‌های رادیومتری و هندسی بر روی تصاویر خام صورت گیرد (El Janati, 2019). به منظور استفاده صحیح از داده‌ها، تصاویر هر دو سنجنده با استفاده از تصویری از منطقه که دارای مختصات صحیح بود، با روش تصحیح هندسی تصویر به



شکل ۵- فلوچارت آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای.

Fig. 5. Flowchart of preparation of satellite images.

میدهد. جمعیت پنجم که شیب آن نزدیک به خط عمود است، نشان‌دهنده شدیدترین نوع بی‌هنجاری در منطقه است (بزرگتر از ۵۷۰۰ ppm). همچنین حد آستانه‌های بدست آمده از روش فرکتال عیار-تعداد برای فلز مس در (جدول ۲) مشخص شده است. در مدل فرکتالی عیار-تعداد بدست آمده برای فلز مس، بعد فرکتال از جمعیت اول به جمعیت چهارم افزایش پیدا می‌کند (شکل ۶) که نشان‌دهنده افزایش عیار، پیکسل‌ها (ارزش پیکسل‌ها)، مساحت احاطه شده در مناطق همراه با کانه‌زایی با سرعت بیشتری نسبت به مناطق فاقد کانه‌زایی کاهش می‌یابد. محدوده ژئوشیمیایی بدست آمده برای فلز مس که از روش فرکتال عیار-تعداد به دست آمده است با لیتولوژی منطقه (سنگ‌های آتشفشانی ائوسن زیرین تا میانی) که در شکل گرفتن بی‌هنجاری‌ها نقش دارند در ارتباط می‌باشد.

۴- نتایج و بحث

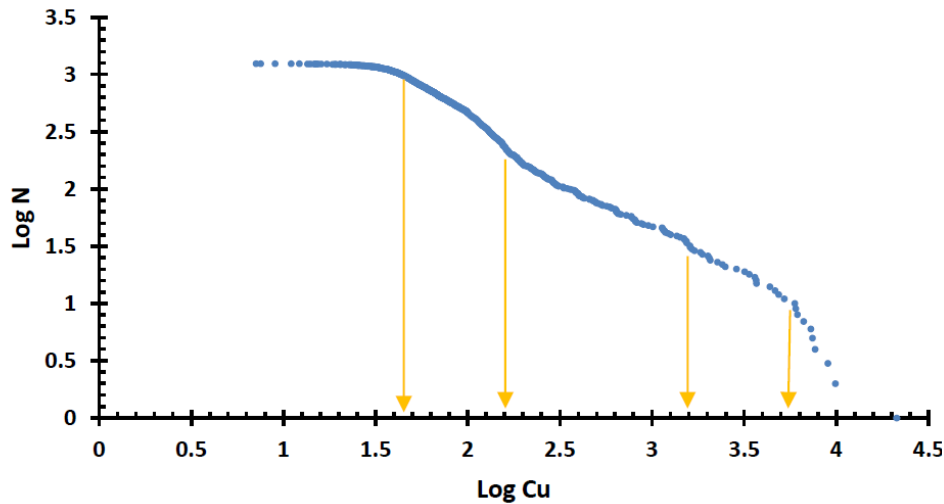
۴-۱- نتایج حاصل از فرکتال عیار-تعداد

منحنی فرکتال عیار-تعداد فلز مس، نشانگر پنج جمعیت ژئوشیمیایی مختلف در منطقه مورد مطالعه است. بر اساس نقاط شکست به دست آمده در نمودار لگاریتمی عیار-تعداد فلز مس (شکل ۶)، توزیع جوامع ژئوشیمیایی مختلف فلز مس در (شکل ۷) مشخص شده است. جامعه اول با شیب نزدیک به خط افقی، دامنه عیار بین ۸/۴ تا ۱۶۰ ppm را نشان می‌دهد که مقدار زمینه فلز مس در منطقه مورد نظر می‌باشد. جامعه دوم و سوم دامنه عیار بین ۱۷۰ تا ۱۶۰۰ ppm را بیان می‌کند که این مقدار در واقع حد متوسط بی‌هنجاری را در منطقه نشان می‌دهد. جامعه چهارم با نشان دادن دامنه عیار بین ۱۷۰۰ تا ۵۶۰۰ ppm حد بی‌هنجاری بالا را در منطقه نشان

جدول ۲- جداسازی بی‌هنجاری از زمینه فلز مس بر اساس روش فرکتال عیار-تعداد (C-N)

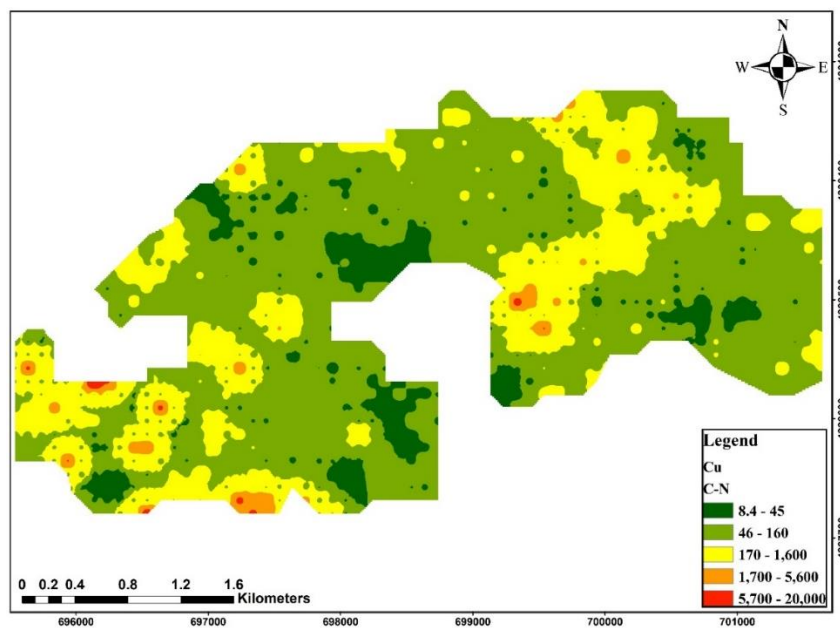
Table 2. Separating anomaly from Cu background based on Concentration-Number (C-N) fractal method.

Metal	Concentration range (C-N)	Geochemical interpretation
	8.4-160	Background
Cu (ppm)	170-1600	Medium anomaly
	1700-5600	High anomaly
	5700 >	Strong anomaly



شکل ۶- نمودار لگاریتمی عیار-تعداد فلز مس در منطقه مورد مطالعه.

Fig. 6. The Cu Concentration-Number (C-N) logarithmic diagram in the study area.



شکل ۷- نقشه توزیع جوامع ژئوشیمیایی فلز مس بر اساس روش فرکتال عیار-تعداد در منطقه مورد مطالعه.

Fig. 7. The Cu comprehensive geochemical distribution map based on Concentration-Number (C-N) fractal method in the study area.

به توانایی‌های این سنجنده برای تفکیک دگرسانی‌های گرمابی در محدوده فرسوخ طول موج‌های کوتاه دارند (Rowan et al., 2003). در راستای پهنه‌بندی مناطق دگرسانی به‌ویژه اکسیدهای آهن از تصاویر دارای سه باند مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR) و برای دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک از تصاویر مادون قرمز با

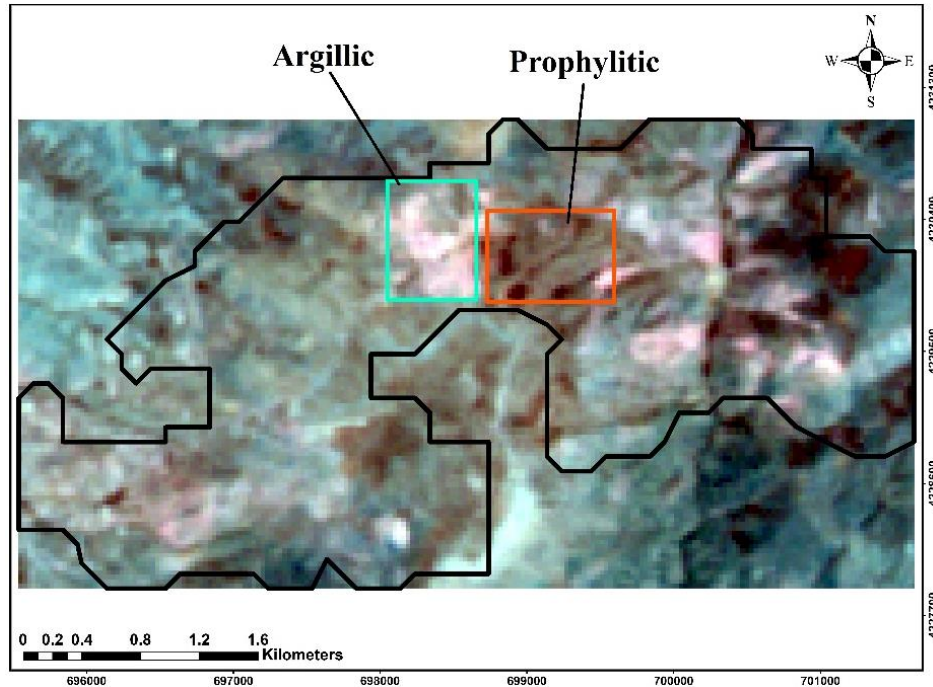
۴-۲- بارزسازی مناطق دگرسان

برای بارزسازی و استخراج دگرسانی‌ها در کانسار مس سوناجیل از ترکیب رنگی و روش نسبت باندی (Band Ratio) استفاده شده است. دگرسانی گرمابی مهمترین عامل در پیشنهاد مناطق برای شناسایی کانی‌سازی‌های جدید است و داده‌های ASTER شرایط مناسبی را با توجه

(شکل ۹). کانی‌های آهن‌دار در باند ۳ بازتاب زیاد و جذب زیادی در باند ۱ دارند (Baba Ahmadi, 1999). در شکل ۹ پیکسل‌های با رنگ روشن نمایانگر کانی‌های آهنی هستند.

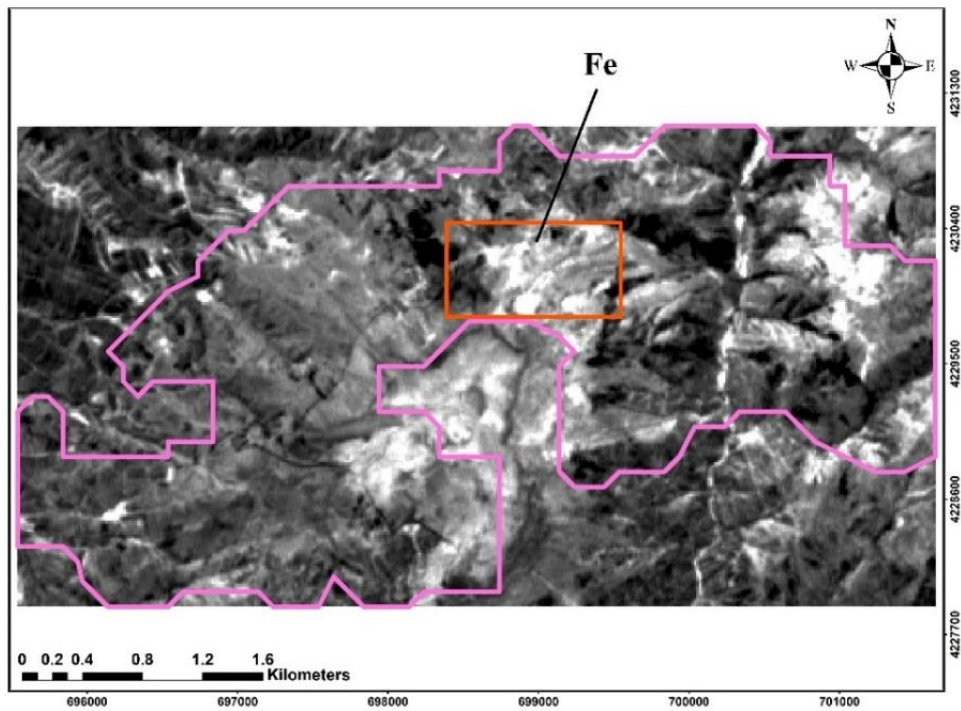
در دگرسانی فیلیک که کانی‌هایی از قبیل پلاژیوکلاز، کوارتز، سریسیت و سولفیدهایی مثل: پیریت، کالکوپیریت و مقادیر اندکی تتراندريت و تنانتیت را شامل می‌شود از نسبت باندی $(B5 + B7) / (B6)$ استفاده شده است (شکل ۱۰). دگرسانی آرژیلیک که عموماً کانی‌های رسی مثل: کائولینیت، مونتورینیت، ایلیت و پیروفیلیت در آن وجود دارد از نسبت باندی $(B4 + B7) / (B6)$ برای بارسازی آن استفاده شد (شکل ۱۱). در دگرسانی پروپیلیتیک که کانی‌های گروه Mg-OH مانند: اپیدوت، کلریت را شامل می‌شود، از نسبت باندی $(B7 + B9) / (B8 * 2)$ به دلیل انعکاس کم این گروه از کانی‌ها در باند ۸ و انعکاس نسبتاً بالا در باند ۷ و ۹ (Hewdon et al., 2005) برای بارسازی استفاده شد (شکل ۱۲).

طول موج کوتاه SWIR که در آن کانی‌های شاخص مناطق آتره بیشترین تمایز را از نظر میزان بازتاب طیفی خواهند داشت، استفاده شد (Azizi et al., 2010). با ترکیب رنگی RGB:468 استر دگرسانی‌های آرژیلیک به رنگ صورتی و دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ قهوه‌ای مشخص شده است (شکل ۸). روش نسبت باندی (Band Ratio)، یکی از روش‌های رایج در پردازش تصویر است که باعث از بین بردن اثرات توپوگرافی و سایه‌ها، کاهش یک‌سری از نویزها و اختلاف بین درجات روشنایی شده و مرزها را مشخص‌تر می‌کند. نسبت‌گیری باندی، یک روش رقومی پردازش تصاویر چند طیفی است که شامل تقسیم پیکسل‌های یک تصویر یا یک باند طیفی به پیکسل‌های متناظر آن در تصویر باند دیگر است (Goetz et al, 1983). با توجه به حضور کانی‌هایی نظیر لیمونیت، گوتیت و هماتیت در منطقه، می‌توان از نسبت‌های باندی برای آشکارسازی اکسیدهای آهن استفاده کرد. از این رو با استفاده از تصاویر ASTER و بهره‌گیری از نسبت باندی می‌توان آشکارسازی کرد. نسبت باندی $(B3 / B1)$ نیز برای آشکارسازی آهن استفاده شد



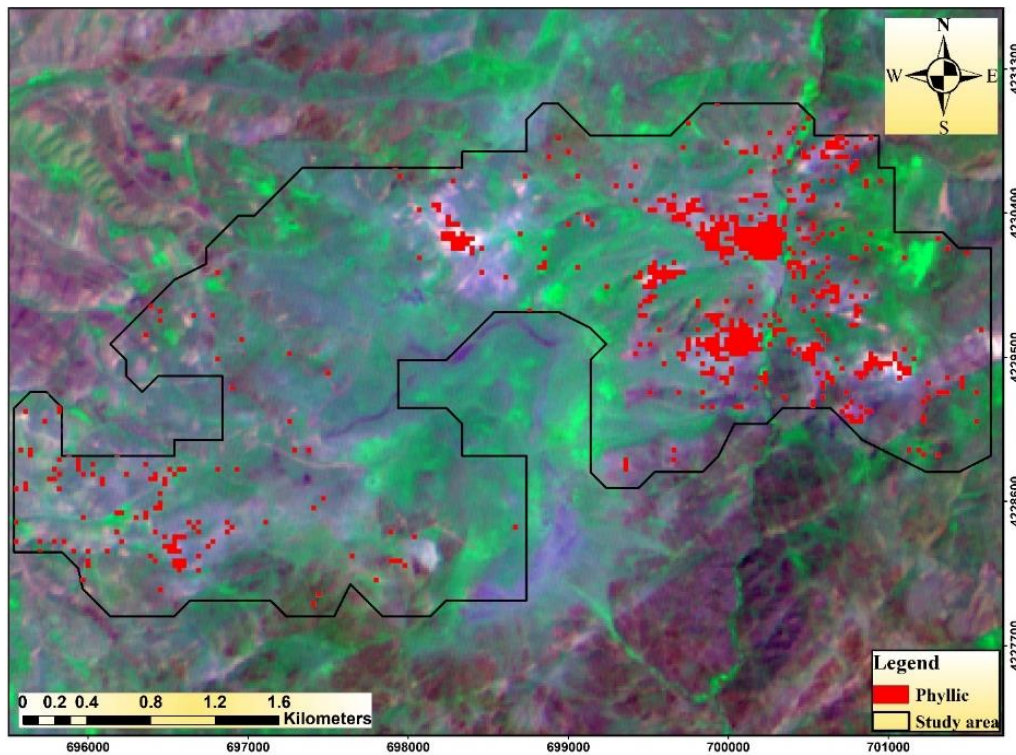
شکل ۸- بارسازی دگرسانی آرژیلیک و پروپیلیتیک با استفاده از ترکیب باندی RGB:468؛ در این شکل رنگ صورتی نمایانگر دگرسانی آرژیلیک و رنگ قهوه‌ای نمایانگر دگرسانی پروپیلیتیک است.

Fig. 8. Detecting the argillic and propylitic alterations using the RGB:468 band combination, where pink and brown colors represent argillic and propylitic alterations, respectively



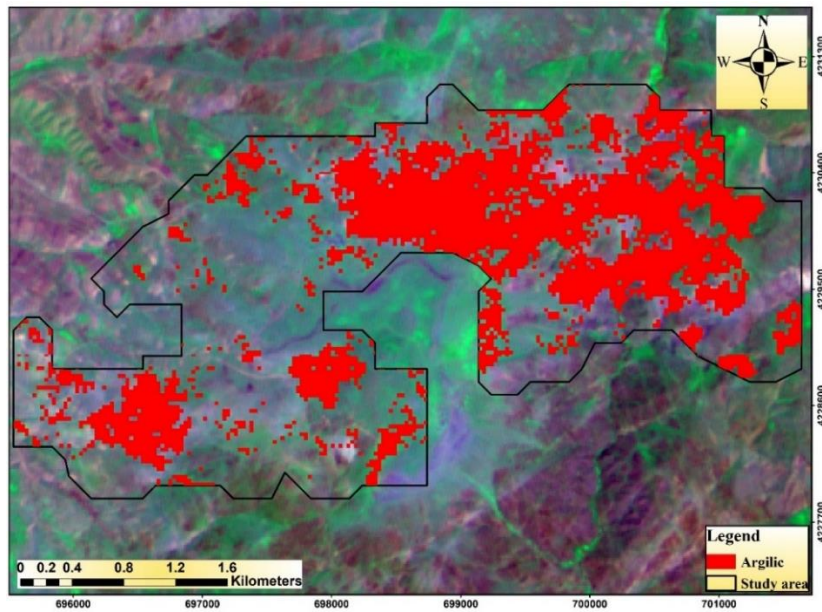
شکل ۹- بازسازی اکسیدهای آهن با استفاده از نسبت بانندی (B3/B1)؛ پیکسل‌های روشن نمایانگر اکسیدهای آهن می‌باشند.

Fig. 9. Detecting iron oxides using the (B3/B1) band ratio, the illuminated pixels show iron oxides

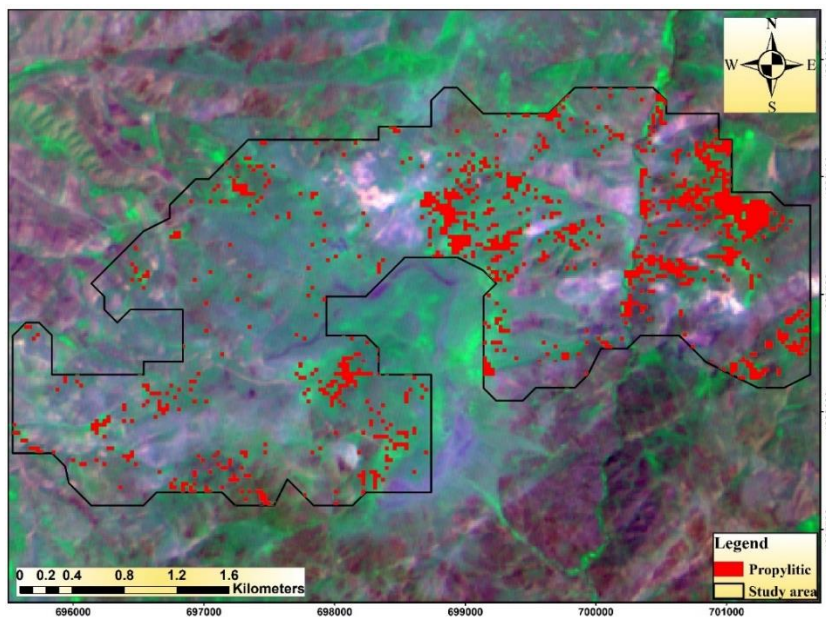


شکل ۱۰- بازسازی دگرسانی فیلیک با استفاده از نسبت بانندی (B5+B7)/(B6) در منطقه مورد مطالعه.

Fig. 10. Detecting the phyllic alterations using the (B5+B7)/(B6) band ratio in the study area



شکل ۱۱- بارزسازی دگرسانی آرژیلیک با استفاده از نسبت باندی $(B4+B7)/(B6)$ در منطقه مورد مطالعه.
 Fig. 11. Detecting the argillic alteration using the $(B4+B7)/(B6)$ band ratio in the study area



شکل ۱۲- بارزسازی دگرسانی پروپیلیتیک با استفاده از نسبت باندی $(B7+B9)/(B8*2)$ در منطقه مورد مطالعه.
 Fig. 12. Detecting the propylitic alteration using the $(B7+B9)/(B8*2)$ band ratio in the study area

۵- نتیجه گیری

فراکتال عیار-تعداد نشان داد که عیار فلز مس در بخش جنوبی و جنوب غربی کانسار بیشتر است که می تواند به علت وجود سنگ مادر آندزیت بازالیت ائوسن باشد که پتانسیل بالایی در تشکیل ذخایر مس در منطقه دارد. بطور کلی هرکدام از جمعیت های زمین شیمیایی که از روش

در این پژوهش با استفاده از داده های ژئوشیمیایی نمونه های سنگی و تصاویر استر به جداسازی آنومالی از زمینه و شناسایی دگرسانی های گرمایی غالب در کانسار مس سوناجیل پرداختیم. آنومالی های حاصل از روش

پروپلیتیک، دگرسانی غالب منطقه آرژیلیک می‌باشد و وسعت بیشتری از کانسار مورد نظر را دربر گرفته است که بیشتر با واحد سنگی‌شناسی آندزیت بازالت ائوسن همپوشانی نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۶ و ۹ کاملاً مشخص است که دگرسانی آرژیلیک توانسته آنومالی‌های مربوط به فلز مس بدست آمده از روش فرکتال عیار-تعداد را بخوبی پوشش دهد و این نشان‌دهنده اهمیت و نقش بسیار زیاد دگرسانی آرژیلیک در تشکیل کانسار مس سوناجیل در منطقه است.

در نهایت برای صحت‌سنجی دگرسانی بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER، موقعیت داده‌های لیتوژئوشیمیایی برداشت شده از رگه‌های پرعیار بهره گرفته شد. با بررسی تحلیل فضایی و روند نمونه‌های پرعیار برداشت شده، مشخص شد داده‌های پرعیار انطباق مناسبی با دگرسانی‌های بارزسازی شده (به خصوص دگرسانی آرژیلیک) از تصاویر ماهواره‌ای دارند که این نشان از دقت قابل قبول داده‌های مورد استفاده و یک کلید اکتشافی در کانسار مس سوناجیل است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت ملی صنایع مس ایران به خاطر پشتیبانی در انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند. همچنین از آزمایشگاه زمین‌شیمی دانشگاه کوپینز، کانادا برای انجام آنالیزها تشکر و قدردانی می‌شود.

های مولتی‌فراکتال عیار-تعداد به دست آمده‌اند، توزیع مختص به خود را نشان می‌دهند. رفتار غیرهمسان عناصر در محیط‌های ژئوشیمیایی مختلف و همچنین جمعیت‌های زمین-شیمیایی مختلف با کمپلکس‌های زمین‌شناختی منطقه از قبیل واحدهای لیتولوژی (آندزیت بازالت و آندزیت و تراکی آندزیت پالئوسن) که لیتولوژی غالب منطقه به حساب می‌آید و همچنین گسل‌ها و دگرسانی‌های گرمایی که در شکل گرفتن آنومالی‌ها نقش دارند در ارتباط می‌باشند؛ که این ویژگی به علت ماهیت فراکتالی توزیع عناصر در طبیعت است. گسل‌ها و خطواره‌ها از طریق ایجاد شکستگی و درزه‌ها در واحدهای آندزیت بازالت منطقه سبب می‌شوند که آب‌های جوی پس از شستشوی مواد از مسیر خود باردار شده و توسط سیالات درون سنگ‌ها حمل شوند. این آب‌ها عناصر را در لایه آندزیت بازالتی ته‌نشست می‌دهند و همین علت سبب ایجاد تغییر در شرایط زمین‌شناسی منطقه و تغییر در نمودارهای لگاریتمی فلزات مورد نظر شده است.

در بررسی‌های انجام شده برای شناسایی دگرسانی‌های منطقه مورد مطالعه در ارتباط با کانی‌زایی مس به این نتیجه رسیدیم که دگرسانی‌های فلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک در ارتباط با کانسار مس سوناجیل جزء مهم‌ترین دگرسانی‌ها هستند. از نسبت‌های باندی و ترکیب باندی برای جداسازی واحدهای دگرسانی استفاده شد. با استفاده از دورسنجی و تصاویر ماهواره‌ای ASTER مشخص شد از بین دگرسانی‌های غالب منطقه شامل: فلیک، آرژیلیک و

مراجع

- Afzal, P., Yasrebi, A.B., Saen, L.D., Panahi, S., 2017. Prospecting of Ni mineralization based on geochemical exploration in Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 181, 294-304. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.10.003>.
- Aghazadeh, M., 2014. Geological map of Sonajeel porphyry copper deposit and surrounding area with 1:5000 scale. Kumeh Madaneh Pars Company (in Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105251>.
- Aghazadeh, M., Castro, A., Badrzadeh, Z., Vogt, K., 2011. Post-collisional polycyclic plutonism from the Zagros hinterland: The Shaivar Dagh plutonic complex, Alborz belt, Iran. *Geological Magazine* 148: 980-1008. <http://dx.doi.org/10.1017/s0016756811000380>.
- Agterberg, F.P., Cheng, Q., Brown, A., Good, D., 1996. Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet batholith, Manitoba. *Computers & Geosciences* 22(5), 497-507. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(95\)00117-4](https://doi.org/10.1016/0098-3004(95)00117-4).
- Alavipanah, S.K., 2012. Principles of modern remote sensing and interpretation of satellite images and aerial photographs. Tehran: University of Tehran Printing and Publishing Institute.

- Asiabanha, A. Foden, J., 2012. Post-collisional transition from an extensional volcano-sedimentary basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. *Lithos* 148, 98-111. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.014>
- Azizi, H., Tarverdi, M.A., Akbarpour, A., 2010. Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran. *Advances in Space Research* 46(1), 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.03.014>.
- Baba Ahmadi, A. 1999. *Applications of Remote Sensing (RS) in Geology*. Tehran: Avaye Qalam.
- Babakhani, A. R., Lesquyer, J. L., Rico, R., 1976. Ahar Quadrangle (scale 1:250,000). Geological Survey of Iran, Tehran, Iran 62: 547-562 <https://doi.org/10.2478/v10096-011-0039-2>.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration* 51(2), 109-130. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2)
- Cheng, Q., Ping, Q., Kenny, F., 1997. Statistical and fractal analysis of surface stream patterns in the Oak Ridges Moraine, Ontario, Canada. In *Proceedings of the International Association of Mathematical Geology Meeting, Barcelona*. 1, 280-286. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00112-6](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00112-6).
- Costa, A.P., De Souza Filho, C.R., Azevedo, F., Brodie, C., 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing* 24(21), 4233-4240. <https://doi.org/10.1080/0143116031000152291>
- 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(3), 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.04.005>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.12.002>.
- Goetz, A.F., Rock, B.N., Rowan, L.C., 1983. Remote sensing for exploration; an overview. *Economic Geology* 78(4), 573-590. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.4.573>.
- Hassanpour, S., 2010. Metallogenesis and mineralization of copper-gold deposits in Arsbaran magmatic zone, East Azarbaijan, Northwest Iran. PhD Thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University.
- Hassanpour, S., Senemari, S., Roomi, N., 2022. Delineation of mineralization zones by multivariate fractal and zonality modeling in south of the Sungun and Kighal porphyry systems, NW, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 15(8), 703. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09845-2>.
- Hewson, R.D., Cudahy, T.J., Mizuhiko, S., Ueda, K., Mauger, A.J., 2005. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment* 99(1-2), 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.04.025>.
- Hezarkhani, A., 2003. Exploration of Sonajil copper deposit, Iranian company of copper, northwestern report exploration 21(81), 31-36. <https://doi.org/10.22071/gsj.2011.54200>.
- Hezarkhani, A., 2007. Hydrothermal Evolution in Sonajil Porphyry Copper System (East Azarbaijan Province, Iran): The History of an Uneconomic Deposit. *Journal of International Geology Review*, Stanford-USA. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0453-x>.
- 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. *Advanced Applied Geology* 9(3), 341-356. <https://doi.org/10.22055/AAG>.
- Khoei, N., Qurbani, M., Tajbakhsh, P., 1999. *Tehran: Copper Deposits in Iran*. Organization of Geology and Mineral Explorations of Iran.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.11.012>.

- Loughlin, W.P., 1991, Principal component analysis for alteration mapping, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57, 1163-1169. <https://doi.org/10.1080/01431160600905003>.
- Mahdavi, M.A., Amini Fazl, A., 1989. Geological Map of Ahar Quadrangle (scale 1:100,000). Geological Survey of Iran, Tehran Iran 8: 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100109>.
- Mandelbrot, B.B., Mandelbrot, B.B., 1982. The fractal geometry of nature, Times Books New York, 468 P.
- Meyer, C., Hemley, J., 1967, Wall rock alteration, *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*: New York, Holt, Rinehart and Winston 31, 166-235.
- Nabavi, M. H. 1976. An Introduction to the Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- 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.jaesx.2022.100109>.
- Rouskov, K., Popov, K., Stoykov, S., Yamaguchi, Y., 2005, June. Some applications of the remote sensing in geology by using of ASTER images. In scientific conference "SPACE, ECOLOGY, SAFETY" with Int. Participation. 167-173. <https://doi.org/10.22055/AAG>.
- Rowan, L.C., Hook, S.J., Abrams, M.J., Mars, J.C., 2003. Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Economic Geology* 98(5), 1019-1027. <https://doi.org/10.2113/98.5.1019>.
- 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).
- Shahabpour, J., 2005. Economic geology. Kerman: Bahonar Kerman University.
- Shapiro, S.S., Wilk, M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3/4): 591-611. <https://doi.org/10.2307/2333709>.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper system, Society of Economic Geologist, inc. *Economic geology* 105: 3-41. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>.
- Tosdal, R.M., Richards, J.P., 2001. Magmatic and structural controls on the development of porphyry Cu ± Mo ± Au deposits: *Reviews in Economic Geology* 14, 157-181. <https://doi.org/10.5382/SP.24.01>.
- Ranjbar, H., Shahriari, H. and Honarmand, M, 2003, Comparison of ASTER and ETM+ data for exploration of porphyry copper mineralization: A case study of Sar Cheshmeh areas, Kerman, Iran. 8, 673-596. <https://doi.org/10.22067/econg.v10i1.53510>.
- Zuo, R., Wang, J., 2016. Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review. *Journal of Geochemical Exploration* 164, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.04.010>.