



Imam Khomeini International University
Vol. 10, No. 2, Summer 2025



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Lithogeochemical Exploration, Alteration and Gold Mineralogy in the Sonajil-Heris Low-Sulfide Epithermal Deposit, East Azerbaijan

Askari S.M.¹, Khaleghi F.^{2*}, Advay M.³, Alavi Hashjin G.⁴

1- Ph.D Student, Dept. of Mining Engineering, Islamic Azad University, Ahar Branch, Ahar, Iran

2- Associate Professor, Dept. of Geology, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

3- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Islamic Azad University, Ahar Branch, Ahar, Iran

4- Assistant Professor, Dept. of Geology, Natural Sciences Faculty, Tabriz University, Tabriz, Iran

Received: 24 Dec. 2023

Accepted: 29 Dec. 2024

Abstract: The epithermal part of copper-gold porphyry deposits are important due to their high grade, low exploitation costs and the presence of precious elements. The main rock outcrops in the area from old to new include Eocene volcanoclastic deposits, Oligo-Miocene intrusive bodies and Quaternary deposits. The Sonajil area is known as a site of porphyry deposit and copper mining, but the characteristics, style and origin of the mineralization of its epithermal part has not been described in the scientific literature. On the basis of results achieved from studying satellite images and field and laboratory controls, the presence of kaolinite, quartz, alunite and hydroxyl minerals, has been confirmed, which are the indicator of phyllic, propylitic, argillic, siliceous and tourmalinization in the epithermal part. The Interpretation of the stream sediments geochemistry, data analysis and lithology along with classical statistical methods, grade-number and grade-area fractal models showed that the grade-number fractal method with a high reliability coefficient is the most effective for separating the epithermal part from the porphyry mineralization in the region, which has been used as the basis for the interpretation of the maps. The maximum values of Au element anomaly are consistent with epithermal-related siliceous veins in the western part of the area and the lowest anomaly is related to the northeast of the deposit. According to the results of geometallurgical studies in Canada's ActLab laboratory, the occurrence of gold mineral is accompanied by quartz less than ten microns in size. Therefore, the origin of gold mineralization in the Sonajil deposit belongs to epithermal deposits. The presence of colloform texture, hydrothermal breccia's along with the geochemical correlation of elements and principle component statistical analysis results are all consistent with features of low sulfidation epithermal deposits.

Keywords: Epithermal Gold, Lithogeochemistry, Fractal, Sonajil, Geometallurgy.

How to cite this article

Askari, S. M., Khaleghi, F., Advay, M., and Alavi Hashjin, G. (2025). "Lithogeochemical exploration, alteration and gold mineralogy in the Sonajil-Heris low-sulfide epithermal deposit, East Azerbaijan". Journal of Mineral Resources Engineering, 10(2): 21-52.

DOI: 10.30479/jmre.2025.19751.1676

*Corresponding Author Email: fazel_khaleghi@iaut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

The epithermal gold deposits of Arasbaran zone are mostly in the form of siliceous-sulfide veins and veinlets in calc-alkaline volcanic and pyroclastic host rocks with an acidic to intermediate composition [1]. Gold deposition occurs in hydrothermal environments under the control of boiling, sulfidation, oxidation, cooling and fluid mixing phenomena and bisulfide (HS^-) and chloride (Cl^-) ligands are very effective in transferring this precious metal. In this article, classical and fractal statistical indices were used to prepare geochemical anomaly maps under the cover of lithogeochemical discoveries on a scale of 1:5000, and its purpose is to identify the areas of high potential with the possibility of epithermal gold mineralization in the western part of Sonajil deposit, which is located in the northwest of Iran.

MATERIALS AND METHODS

In order to be acquainted with the geochemical abundance of gold and associated elements in rock outcrops and associated alterations in the region, the results of lithogeochemical sampling and stream sediments from the west of the Sonajil area were used. In order to identify the rock type and mineralogy of the ore, thin and polished sections have been prepared and studied. 59 samples from copper mineralized outcrops (porphyry and epithermal) and gold-bearing epithermal systems have been sent to the laboratory for gold and ICP analysis. Geometallurgical studies have also been conducted at an accredited laboratory (Act Lab) in Canada. In order to evaluate mineralization, a number of samples were taken from outcrops with different alterations and analyzed for XRD mineralogical studies. A total of 1248 surface and deep samples were analyzed for geochemical analysis of major, minor, and trace elements (44 elements) using the ICP-AU method at the AMDEL laboratory in Australia. In preparing geochemical anomaly maps of the area in ArcGIS, only 10 important geochemical and pathfinder elements in epithermal gold (Ag, As, Au, Bi, Mo, Hg, Fe, Cu, Pb, Sb) were selected from 44 elements.

Geological units in the Sonajil region based on the 1:5000 geological-mining map, the Cenozoic deposits mainly include 1) Eocene volcanic-sedimentary deposits, 2) Oligo-Miocene intrusive masses, and 3) Quaternary volcanic rocks. Shoshonitic intrusive bodies in the Arasbaran region are associated with various mineralization in the region, including porphyry and epithermal, and these bodies usually have high Au content [2]. The Sonajil porphyry was the oldest intrusive body during Tertiary magmatism in the region. At the same time, the main epithermal mineralization factor is located in the western part of the deposit.

FINDINGS AND DISCUSSION

Based on the results of conducted studies and all available evidences, the accumulation of gold in the Sonajil deposit have occurred in relation to key factors. Faults, the nature of the host rock, hydrothermal alteration, and the composition and type of fluids were among the factors that played a role in the deposition of metal ores.

In order to determine the characteristics of fluids controlling mineralization, micro thermometric studies of fluid intercalations on Sonajil silica veins were used. Based on the petrography of the studied samples, five types of fluid interlayers can be distinguished, which in the order of frequency, include, three-phase fluid media (L+V+S), two-phase liquid-rich (L+V), two-phase gas-rich (V+L), single-phase gas (V), and single-phase liquid (L) media. According to the results of thermometry of fluid intermediate loads, salinity values range from 4% by weight of sodium chloride equivalent to more than 55% by weight of sodium chloride equivalent, and homogenization temperatures range from 180°C to 540°C. The Inclusions without the salt-daughter phase exhibit low salinity in the range of 4 to 12% weight equivalent of sodium chloride. These values are in complete agreement with those reported from many of the world's major porphyry copper deposits.

The epithermal mineralization system occurred in a silicic vein aligned with a northwest-southeast trending fault in the western part of the Sonajil range. Based on the results of analyses conducted on 32 taken samples, the gold content ranged from "below the detection limit of the device" to about "4.7 ppm." The highest copper and silver grades are 1.2 percent and 12 grams per ton, respectively. No specific enrichment is seen in the analyses for the elements lead, molybdenum, and antimony. Based on the gold assay results of taken samples, the vein can be divided into three zones: 1, 2, and 3.

The silica vein was formed as a result of fluid circulation processes within the fracture system with a

northwest-southeast trend. The presence of various types of shear, colloform, and cauliflower textures are the characteristic of low-sulfide environments in epithermal gold deposits [3,4]. The structure and textures related to the boiling stage (sponge texture and lattice texture) as well as the mineralogical and geochemical paragenesis indicate that the mineralization system is epithermal. The existence of correlation between copper and gold in this vein confirms this interpretation.

In this research, after collecting all geochemical data of the Sonajil region, non-structural (statistical) and structural (fractal) methods were used to separate the anomaly from the background.

Geological modeling of deposits, especially gold deposits, where even very small changes in grade can be significant, play a very important role in evaluating resources and reserves and creating a suitable estimation environment for geostatistical surveys [5]. The unusual distribution of the geochemical population of target elements is consistent with epithermal mineralization. Since the data distribution was not normal in the multivariate statistical study, factor analysis was used to interpret the variability of the data and the factors affecting them. Based on the Principal Components Analysis (Principal Components) research using SPSS software in the Sonajil deposit, factor 1, with special eigenvalues of 2.08, explains more than 46% of the variability of the data. Since the elements gold, silver, arsenic, antimony, bismuth, and copper are present in this factor, it is attributed to epithermal type mineralization. Factor 2 accounts for about 1.5% of the especial eigenvalues and explains 25% of the variability in the data. Since the elements arsenic, bismuth, and copper are present in this factor, this factor is attributed to the presence of sulfosalt minerals, including tetrahedrite, etc. (sulfide with arsenic-like metals and copper-bearing minerals).

For producing a geochemical map, first, logarithmic data were estimated using the IDW method in ArcMap software; after ranking the element data, a map of the anomalous areas of Cu and Au elements was drawn using the classical statistical method in the Sonajil deposit (Figures 1A and 1B).

In the fractal model, which shows the anomalous regions resulting from the concentration-area and concentration-number methods of the elements Au Cu, in (Figures 2A and 2B), the highest Au anomaly corresponds to the silica veins attributed to epithermal in the western part of the Sonajil deposit, and the lowest anomaly is related to the northeast of the study area. Accordingly, the anomalies obtained in these methods are also consistent with the anomalies obtained in the classical statistical method and the only difference between them is that in the concentration-number method, one rank (Class) is further separated. Due to the high accuracy of the maps drawn in separating mineralization communities and separating various anomalies from the background, fractal maps have been used to introduce promising mineral areas in Sonajil.

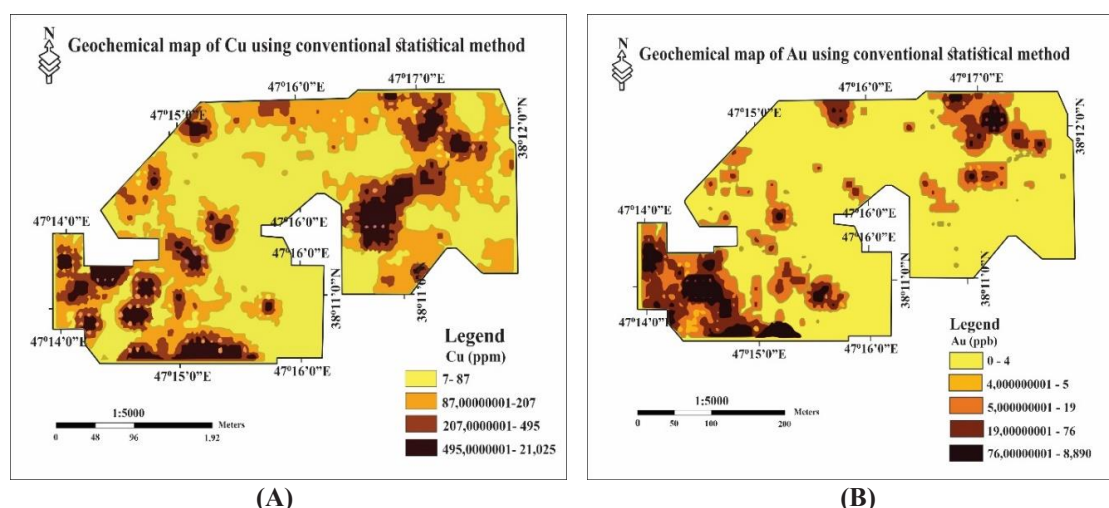


Figure 1. A: Geochemical map of Cu, B: Au using classical statistics method in Sonajil

CONCLUSIONS

The host rock of gold mineralization in the west of the Sonajil deposit is often carbonate, sedimentary, or as a replacement in siliceous limestone. Gold mineralization occurs mainly in the form of silicic veinlets and veins on the margins of the massive and disseminated grains. Analysis of ore samples shows that the

average gold grade in the silica vein is appropriate and around 2 ppm. Mineralization in the western part of the range has been mainly associated with the greater density of faulting as a conduit for mineralizing fluids in epithermal gold. Therefore, there is a genetic connection between fluids, magmatism, and tectonics in Sonajil. Reasons include: sedimentary, carbonate and volcanic host rock, strong structural control of mineralization (fault), phyllic, propylitic, argillic, silicic, and tourmalinization alterations with sulphidization, elemental paragenesis of Au, Ag, As, and Sb, and the occurrence of gold mineralization (in the form of platinum-containing electrum compounds) and in the form of association with quartz less than ten microns in pyrite, causing the Sonajil deposit to have similarities with the Carlin type; However, the lack of observation of realgar and orpiment minerals, the presence of hydrothermal breccias, colloform, spongy and canine tooth textures, and other evidence from the current study indicate that gold mineralization in the Sonajil area is of the low- sulfidation epithermal type.

Reanalysis of the results of geochemical data using classical statistical methods, concentration-number and concentration-area fractal models showed that the concentration-number fractal method has the highest resolution in the region, and the interpretation of the maps is based on the results of this method. As observed, the highest Au anomaly corresponds to the silica vein attributed to epithermal in the western part of the Sonajil deposit, and the lowest anomaly is related to the northeast of the study area. Therefore, the results obtained from fractal methods are more reliable not only in surface but also in subsurface studies. Considering the alteration halos and mineralizations observed at the surface and the analysis of anomaly maps using the fractal method, confirms the presence and high potential of the West Sonajil region from a gold perspective.

Various types of vapor-rich, liquid-rich, halite-rich, and single-phase gas interlayers are found in mineralization zone samples in most porphyry deposits of the Sonajil region and they are considered as signs of the formation of hypersaline fluids due to boiling. In the upper levels of the epithermal system, gold mineralization has occurred as a result of the collapse of the ore-bearing structure, which has led to the production of gold-bearing hydrothermal breccias. Given the nature of gold mineralization in Sonajil, which is consistent with the low-sulfidation epithermal type. It was not possible to observe gold in polished sections, but for the first time, by using the MLA advanced analysis method while seeing gold, the shape, size, way of engagement and its composition were determined.

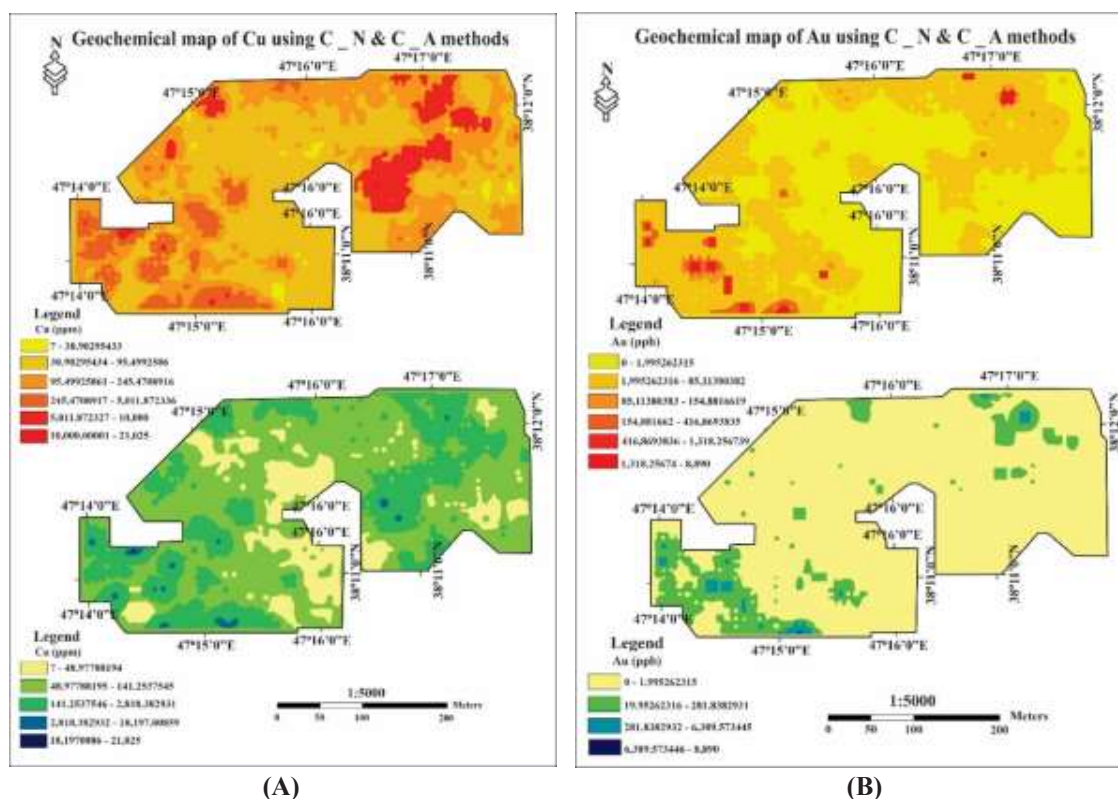


Figure 2. A: Geochemical map of Cu, B: Au using concentration -area and concentration -number methods in Sonajil

REFERENCES

- [1] Rahmani, Sh., Zamanian, H., and Zarei Sahamieh, R. (2019). “*Geochemical characteristics of igneous host rocks associated of Lubin-Zardeg epithermal gold deposit, NW of Iran*”. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 29 (114): 289-302.
- [2] Ramezani, T., Maanijou, M., and Alipour, S. (2018). “*The main effective factors on the mineralization of Sonajil porphyry-epithermal copper-gold deposit, using remote sensing, mineralogical and geochemical studies*”. Iranian Journal of Geology, 48(12): 63-79.
- [3] Ngang, T. C., Emmanuel Suh, C., Wagner, T., Bafon, T. G., Fusswinkel, T., and Vishiti, A. (2024). “*Epithermal Ag–Au mineralization at Galim-Legalgorou, Cameroon Volcanic Line: insights from alteration mineralogy and mineral chemistry of electrum and sphalerite*”. International Journal of Earth Sciences, 113: 1285-1301.
- [4] Sillitoe, H. R., and Hedenquist, J. W. (2003). “*Linkage between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious- metal deposits*”. Society of Economic Geologist, Special Publication, 10: 315-343.
- [5] Carranza, E. J. M. (2011). “*Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values*”. Journal of Geochemical Exploration, 110: 167- 185.



اکتشافات لیتوژئوشیمیایی، دگرسانی و کانی‌شناسی طلا در کانسار اپی‌ترمال کم سولفید سوناجیل - هریس آذربایجان شرقی

سیده مهیا عسکری^۱، فاضل خالقی^۲، مهران ادوای^۳، غفور علوی هاشجین^۴

۱- دانشجوی دکترا، گروه معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر، اهر

۲- دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز

۳- استادیار، گروه معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر، اهر

۴- استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۳

چکیده

بخش اپی‌ترمال ذخایر مس-طلا پورفیری به دلیل عیار بالا، هزینه‌های بهره‌برداری ناچیز و وجود عناصر گرانبها حائز اهمیت هستند. رخنمون‌های سنگی اصلی در محدوده از قدیم به جدید شامل نهشته‌های ولکانو کلاستیک ائوسن، توده‌های نفوذی البگو-میوسن و نهشته‌های کوارتزی است. منطقه سوناجیل به عنوان کانسار پورفیری و معدنکاری مس شناخته می‌شود، ولی در متون علمی، مشخصات، نوع و منشأ کانی‌سازی بخش اپی‌ترمال معرفی نشده است. با توجه به نتایج پردازش تصاویر ماهواره‌ای، کنترل‌های صحرایی و آزمایشگاهی، وجود شاخص‌های کائولینیت، کوارتز، آلونیت و کانی‌های هیدروکسیل‌دار تایید شده است که مبین دگرسانی‌های فیلیک، پروپیلیتیک، آرژیلی، سیلیسی و تورمالین‌زایی در بخش اپی‌ترمال واقع در غرب محدوده است. تحلیل داده‌های ژئوشیمی آبراهه‌ای و لیتولوژی همراه با روش‌های آمار کلاسیک، مدل فرکتالی عیار-تعداد و عیار-مساحت نشان داد که روش فرکتالی عیار-تعداد با ضریب اطمینان بالا، بیشترین کارایی برای تفکیک بخش اپی‌ترمال از کانی‌سازی پورفیری را دارد که مبنای تفسیر نقشه‌ها قرار گرفته است. حداکثر مقادیر ناهنجاری عنصر طلا منطبق با رگه‌های سیلیسی وابسته به اپی‌ترمال در بخش غربی محدوده و کمترین ناهنجاری مربوط به شمال شرقی کانسار مس پورفیری است. طبق نتایج مطالعات ژئوتالورژی در آزمایشگاه معتبر کانادا (ActLab) رخداد کانی طلا (به صورت ترکیب حاوی پلاتین) و به شکل همراهی با کوارتز در اندازه کمتر از ده میکرون است. بدین ترتیب، منشأ کانی‌زایی طلای سوناجیل به کانسارهای اپی‌ترمال تعلق دارد. وجود بافت کلوform، برش‌های گرمایی به همراه همبستگی ژئوشیمیایی عناصر و نتایج تحلیل آماری مولفه‌های اصلی، همگی با ویژگی‌های نهشته‌های اپی‌ترمال سولفیداسیون کم مطابقت دارند.

کلمات کلیدی

طلای اپی‌ترمال، ژئوشیمی سنگی، فرکتال، سوناجیل، ژئوتالورژی.

استناد به این مقاله

عسکری، س. م.، خالقی، ف.، ادوای، م.، علوی هاشجین، غ.؛ ۱۴۰۴، "اکتشافات لیتوژئوشیمیایی، دگرسانی و کانی‌شناسی طلا در کانسار اپی‌ترمال کم سولفید سوناجیل - هریس آذربایجان شرقی". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دهم، شماره ۲، ص ۵۲-۲۱.

DOI: 10.30479/jmre.2025.19751.1676



۱- مقدمه

طلا عنصری است که در طیف وسیعی از رسوبات ماگمایی-هیدروترمال مانند اپی ترمال، مزوترمال، کارلین و پورفیری وجود دارد [۱]. در ایران پهنه‌های اصلی فلززایی ذخایر اپی ترمال بیشتر در کمربند آتشفشانی-ماگمایی ارومیه-دختر، پهنه ارسباران، کمان تروند-چاه شیرین و پهنه ایران مرکزی قرار دارند که همگی در سنگ‌های آتشفشانی با سن ائوسن تا پلیوسن تشکیل شده‌اند [۲]. ذخایر طلای اپی ترمال زون ارسباران غالباً به صورت رگه‌ها و رگچه‌های سیلیسی-سولفیدی در سنگ‌های میزبان آتشفشانی و آذرآواری کالک آلکالن با ترکیب اسیدی تا حد واسط قرار دارند [۳]. عمق تشکیل کنسارهای اپی ترمال کمتر از ۱٫۵ کیلومتر و دمای تشکیل آن‌ها کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است [۴]. فاستر اشاره کرده که در طول عمر زمین دو دوره عمده برای کانی‌سازی طلا وجود داشته است: ۱) ذخایر کوارتز رگه‌های مزوترمال آرکئن (۲) ذخایر اپی ترمال، مزوترمال و مرتبط با توده نفوذی مزوزوئیک تا کواترنری، بنابراین فاستر ذخایر اصلی طلا را شامل ذخایر تیپ اپی ترمال، تیپ کوهزائی و تیپ مرتبط با توده نفوذی می‌داند [۵]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که همه ذخایر طلای ایران در حالت کلی متعلق به یکی از سه تیپ اشاره شده هستند. کانی‌سازی طلا در محیط‌های زمین‌ساختی متفاوتی رخ می‌دهد که مهم‌ترین آنها شامل موارد زیر است: ۱) پهنه‌های فروانش به صورت سامانه‌های پورفیری (Au, Cu-Au, Cu-Mo-Au)، اپی ترمال سولفیداسیون پایین-سولفیداسیون بالا، چشمه‌های آبگرم، اپی ترمال نوع کارلین، سولفید توده‌ای نوع کوروکو و نوع اسکارنی است [۶، ۷]؛ ۲) پهنه‌های برخورد قاره‌ای به صورت محصول جانبی برخی از کنسارهای Sn-W پورفیری و نوع رگه‌ای در کمربندهای کوهزایی با سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای و نفوذی‌های مرتبط [۸]؛ ۳) پهنه‌های گسترش اقیانوسی همراه با سولفیدهای توده‌ای نوع قبرسی [۹]. تهنشینی طلا در محیط‌های گرمابی تحت کنترل پدیده‌های جوشش، سولفیداسیون، اکسیداسیون، سردشدگی و اختلاط سیال رخ می‌دهد و لیگندهای بی‌سولفیدی (HS^-) و کلریدی (Cl^-)، در انتقال این فلز گرانبها بسیار موثر هستند. عناصر فلزی در ذخایر معدنی با سرشت احیایی (سولفید) و اکسیدی (سولفات) پدیدار می‌شوند که در میان آنها، لیگندهای سولفیدی در سیال قدرت انحلال طلا و مس را با پدید آوردن کمپلکس‌های فلز-سولفید پایدار افزایش می‌دهند [۱۰]. در این مقاله برای تهیه نقشه‌های ناهنجاری

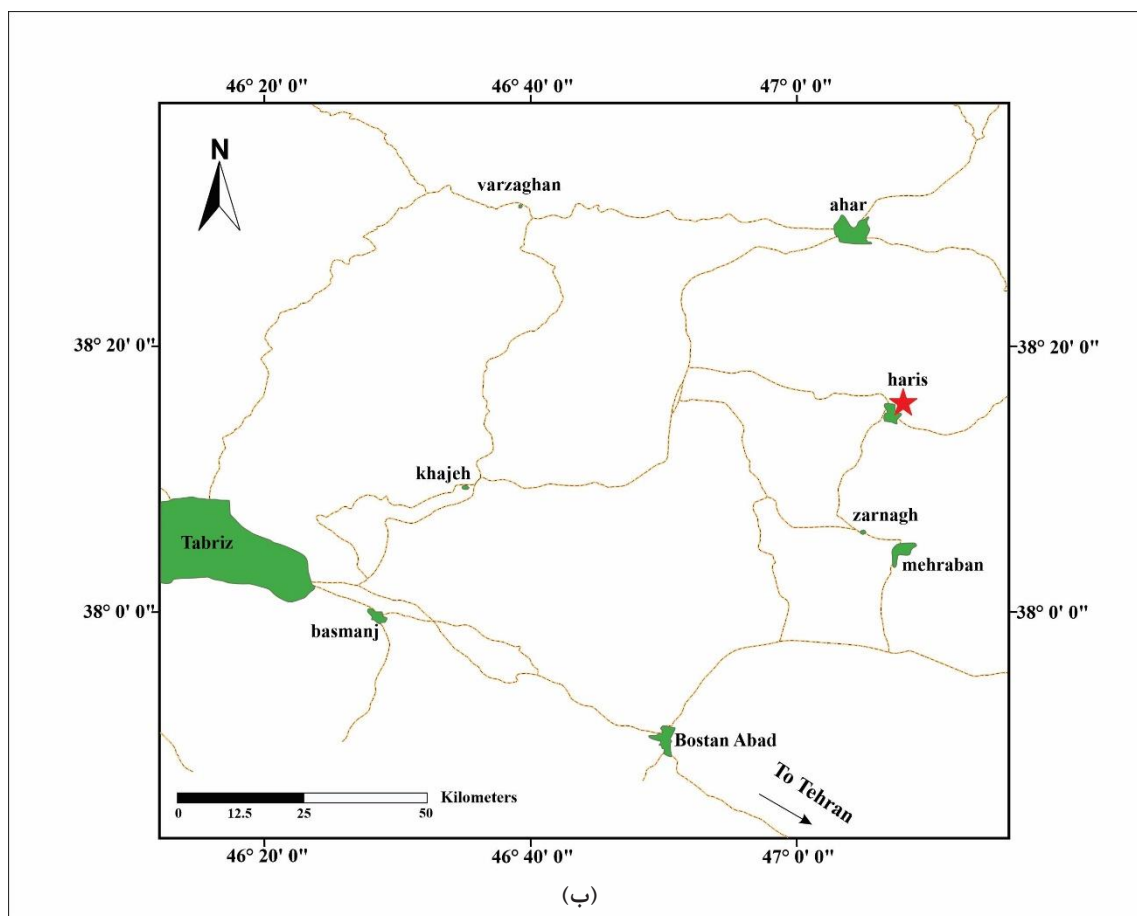
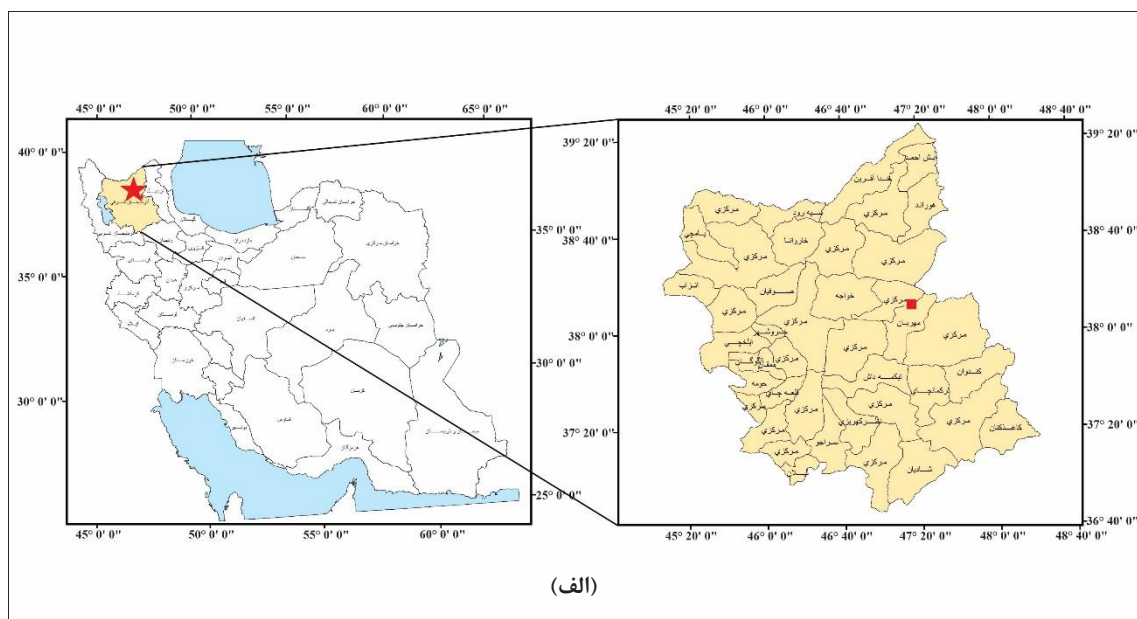
ژئوشیمی از شاخص‌های آمار کلاسیک و فرکتال تحت پوشش اکتشافات لیتوژئوشیمیایی در مقیاس ۱:۵۰۰۰، استفاده شده و هدف آن شناسایی نواحی دارای پتانسیل بالا با احتمال وجود کانی‌سازی اپی ترمال طلا در بخش غربی کنسار سوناجیل بوده است.

۲- مواد و روش

برای آگاهی از فراوانی ژئوشیمیایی طلا و عناصر همراه در رخنمون‌های سنگی و دگرسانی‌های همراه در منطقه، نمونه‌برداری لیتوژئوشیمیایی و رسوبات آبراهه‌ای در طی ۱۲ روز و با برداشت بیش از ۲۰ تراورس و لاگینگ ۱۷ گمانه اکتشافی تقریباً در غرب محدوده سوناجیل برای بررسی‌های آزمایشگاهی توسط شرکت کاوشگران در سال ۱۳۸۵ صورت گرفته است (شکل ۱). تعداد ۷۱ نمونه مقطع نازک و ۱۱ نمونه مقطع صیقلی برداشت، تهیه و مطالعه شده است. همچنین تعداد ۵۹ نمونه از رخنمون‌های با کانی‌زایی مس (پورفیری و اپی ترمال) و سیستم‌های اپی ترمال طلا دار برای آنالیز طلا و ICP برداشت و مطالعات ژئومتالورژی در آزمایشگاه معتبر (*ActLab*) کانادا انجام گرفته است. برای ارزیابی کانی‌زایی از رخنمون‌های با دگرسانی‌های مختلف نیز تعداد ۲۴ نمونه برای مطالعات کانی‌شناسی XRD برداشت و آنالیز شد. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی (نمونه‌های سطحی و عمقی) شامل جمعا ۱۲۴۸ نمونه است که جهت آنالیز عناصر اصلی، فرعی و کمیاب به روش ICP OES به آزمایشگاه *AMDEL* در استرالیا برای ۴۴ عنصر (Ag, Al, As, Au, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Hg, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Sn, Sr, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr) انجام گرفته است. در تهیه نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی محدوده در ArcGIS از بین ۴۴ عنصر فقط ۱۰ عنصر مهم ژئوشیمیایی و ردیاب در طلای اپی ترمال (Ag, As, Au, Bi, Mo, Hg, Fe, Cu, Pb, Sb) انتخاب شد.

۲-۱- معرفی منطقه سوناجیل

محدوده سوناجیل به مرکزیت دهکده مخروبه "جنگل" از توابع شهرستان هریس، استان آذربایجان شرقی در شمال غرب کشور واقع است. مختصات حدودی مرکز محدوده "۳۸°۱۰'۲۹" عرض شمالی و "۴۷°۱۵'۲۹" طول شرقی بوده که در ۱۷ کیلومتری مستقیم شهر هریس واقع شده است.



شکل ۱: الف) موقعیت جغرافیایی منطقه سوناجیل، ب) نقشه راه‌های دسترسی به محدوده مطالعاتی سوناجیل

مساحت محدوده بالغ بر ۳۷/۵۶ کیلومترمربع است. محدوده اکتشافی در دامنه جنوبی ارتفاعات قوشا داغ قرار دارد که با راستای شرقی-غربی قرار گرفته‌اند و منتهی‌الیه شرقی آن‌ها به کوه سبلان می‌رسند. بلندترین نقطه ارتفاعی منطقه با ارتفاع ۲۵۹۴ متر در کوه اکوز داغی و پست‌ترین نقطه محدوده اکتشافی با ارتفاع ۱۸۰۰ متر در بخش جنوبی محدوده و در بستر رودخانه براغوش قرار دارند (شکل ۱-الف). راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه از جاده تبریز-اهر منشعب شده و بعد از رسیدن به شهر هریس می‌توان از طریق جاده آسفالت هریس-هقیق و جاده خاکی به طول حدود ۵ کیلومتر (هوایی) به منطقه دسترسی پیدا کرد (شکل ۱-ب).

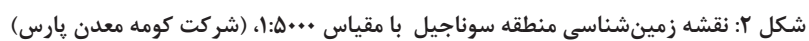
۲-۲- زمین‌شناسی محدوده اکتشافی سوناجیل

در نقشه‌های تهیه شده از محدوده مورد مطالعه توسط سازمان زمین‌شناسی کشور (نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ اهر) توده پورفیری و اپی‌ترمال سوناجیل مورد شناسایی قرار نگرفته و این توده در این نقشه‌ها به عنوان بخش دگرسان شده واحدهای ولکانیک آئوسن معرفی شده بودند. رخنمون‌های موجود در محدوده اکتشافی بر اساس نقشه زمین‌شناسی-معدنی ۱:۵۰۰۰ محدوده سوناجیل، عمدتاً نهشته‌های مربوط به سنوزوئیک را تشکیل می‌دهند. رخنمون‌های سنگی موجود در محدوده را می‌توان از قدیم به جدید به انواع، نهشته‌های آتشفشانی-رسوبی آئوسن، توده‌های نفوذی الیگو-میوسن و سنگ‌های آتشفشانی کواترنری تقسیم‌بندی کرد. نهشته‌های آتشفشانی-رسوبی آئوسن در حدود ۵۰ درصد رخنمون‌های سنگی موجود در محدوده را در بخش‌های شمالی، شرقی و جنوبی به خود اختصاص داده‌اند. نهشته‌های آئوسن به وسیله توده‌های نفوذی و دایک‌های متعددی قطع می‌شوند که زمان جایگیری آن‌ها را می‌توان به الیگو-میوسن نسبت داد. بر اساس ویژگی‌های ژئوشیمیایی این توده‌ها به انواع قدیمی کالک آلکالن (گابرو، دیوریت و کوارتز دیوریت تا گرانودیوریت) و جدید شوشونیتی (مونزوگابرو، مونزودیوریت، کوارتز مونزودیوریت، مونزونیت، کوارتز مونزونیت و سینیت تا نفلین سینیت) تقسیم‌بندی شده است. توده‌های نفوذی شوشونیتی در منطقه ارسباران در ارتباط با انواع کانی‌زایی‌های موجود در منطقه از جمله پورفیری و اپی‌ترمال هستند. توده پورفیری سوناجیل قدیمی‌ترین توده نفوذی در طی ماگماتیسم ترشیری در منطقه بوده و دارای دگرسانی شدید، ترکیب سنگ‌شناسی خاص و پیچیدگی زمین‌شناسی است. همچنین در نفوذی‌های

شوشونیتی میزان Au بالا است [۱۱]. در بخش‌های مرکزی جوان‌ترین رخنمون‌های سنگی محدوده اکتشافی، سنگ‌های آتشفشانی مربوط به کواترنری رخنمون دارند که این سنگ‌ها ضخامت متغیر (تا چند ده متر) دارند. عامل اصلی کانی‌زایی اپی‌ترمال در بخش غربی کانسار واقع است. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که سنگ‌های درونگیر توده اپی‌ترمال سوناجیل شامل تناوبی از نهشته‌های ولکانیک و ولکانو-کلاستیک آئوسن است که از قدیم به جدید شامل واحد توف، لاپیلی توف، توفیت با میان لایه‌های سنگ‌های رسوبی و آندزیتی که به وسیله دایک‌ها و توده‌های نفوذی قطع شده‌اند که در تشکیل دایک‌های فوق گسل اصلی منطقه با روند شمال شرقی-جنوب غربی نقش اصلی را بازی کرده است. توده‌های یاد شده عامل اصلی کانی‌زایی اپی‌ترمال و دگرسانی‌های مرتبط با آن در منطقه هستند. (E^a)؛ واحد آندزیت تا آندزیت بازالتی با لایه‌های میانی پیروکلاستیک که در اثر عملکرد سیالات هیدروترمال مربوط به رگه سیلیسی انواع آلتراسیون‌ها در این واحد رخ داده است که سیستم‌های شکستگی و نیز گسل‌ها در این امر تأثیر فراوانی داشته است. (E_r)؛ واحد توف و پیروکلاستیک با میان لایه‌های بازالتی بالشی که عمده سنگ‌های رخنمون یافته در این واحد شامل توف، لاپیلی توف، آگلومرا و برش به همراه سنگ‌های رسوبی ریزدانه (ماسه‌سنگ توفی و سیلتستون توفی) هستند. شیب و امتداد لایه‌های مربوط به این واحد به شدت تحت تأثیر سیستم تکنونیک منطقه قرار دارد. (M^s)؛ واحد رسوبی میوسن شامل ماسه‌سنگ، سیلتستون و مارن گچ‌دار که در داخل نهشته‌ها گاهی قطعات سنگ‌های آذرین نیز مشاهده می‌شوند. تراس‌های جوان پادگانه‌های آبرفتی (Q^t)؛ توده‌های نفوذی شامل میکرومونزوسینیت و تراکی آندزیت (Mms)، مونزودیوریت و گرانودیوریت (Sp)، دیوریت و کوارتز مونزودیوریت (Md) و دایک‌های دیوریتی-آندزیتی (Di) در کانسار سوناجیل است. آخرین فعالیت ماگمایی در محدوده سوناجیل مربوط به فعالیت آتشفشانی تراکی آندزیت بازالتی تا تراکی آندزیتی اکوز داغی با سن پلیو-کواترنری است (شکل ۲).

۲-۳- عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی

توجه به عوامل کنترل‌کننده تشکیل و تمرکز ماده معدنی برای ارایه الگویی برای شناسایی و اکتشاف کانسارهای مشابه در مناطقی که زمین‌شناسی همانندی دارند، از مهم‌ترین جنبه‌های مطالعه هر کانسار است. بر پایه مطالعات انجام شده و شواهد موجود، تمرکز طلا در کانسار سوناجیل در ارتباط با



عامل‌های کلیدی رخ داده است. گسل‌ها، ماهیت سنگ میزبان، دگرسانی گرمایی و ترکیب و نوع سیالات از عواملی بودند که در ته‌نشست کانه‌های فلزی نقش داشته‌اند.

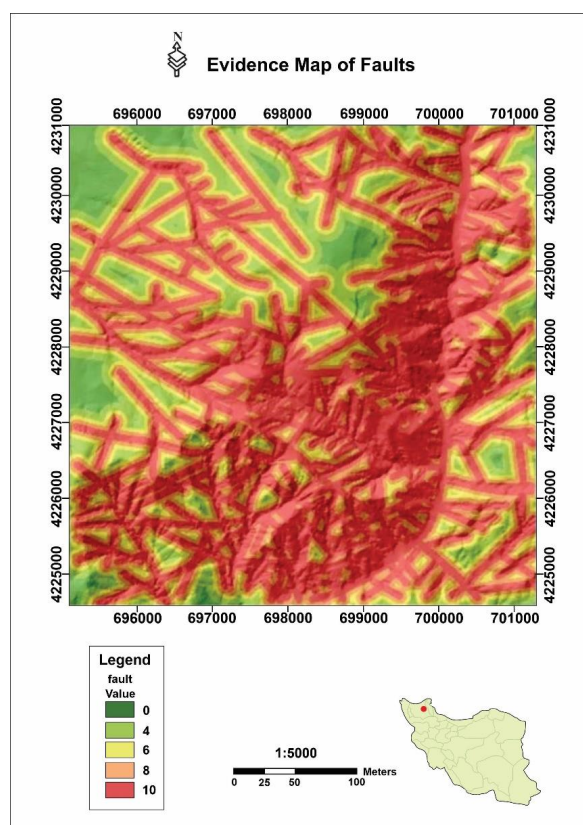
۲-۳-۱- گسل‌ها: از کاربردهای سنجش از راه دور، مطالعه گسلش و خطواره‌ها است. در کل، عارضه‌های خطی به وسیله حاشیه‌هایی با اختلاف روشنایی در تصویر ایجاد می‌شود که ممکن است به سختی قابل شناسایی باشد. مطالعه این خطواره‌ها به طور موفقیت‌آمیزی در مطالعه سامانه‌های کانه‌ساز، اکتشافات معدنی و نفتی و مطالعات آب زیرزمینی کاربرد داشته است [۱۲]. مورد مطالعه در زون البرز-آذربایجان [۱۳] قرار دارد که بخشی از کمربند آلپ-همالیا است. این منطقه به دلیل سرگذشت پیچیده تکتونو-ماگمایی طی باز و بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس (پالئوزوئیک) و نفوتتیس (سنوزوئیک)، همواره بستر مناسبی برای تشکیل کانسارهای فلزات پایه و قیمتی ذخایر اپی‌ترمال و پورفیری است [۱۴]. در طی حرکات مختلف تکتونیک و نیز در دوره‌های مختلف ماگماتیسم، شکستگی‌های متعددی در یک محیط سیستم فشارشی در منطقه ایجاد شده و توسعه یافته‌اند چرا که از زمان ائوسن به بعد منطقه در رژیم فشارشی بوده است. گسل اصلی منطقه با راستای شمال‌شرق- جنوب‌غرب با عبور از بخش میانی محدوده اکتشافی توپوگرافی را به بخش‌های شمالی- غربی و جنوبی- شرقی تقسیم‌بندی می‌کند. از نظر مورفولوژی می‌توان واحدهای کوهستانی، تپه‌ماهوری و مناطق دشتگون را تفکیک کرد. در تفکیک واحدهای ژئومورفیک محدوده مورد بررسی تنوع لیتولوژیک و مهم‌تر از همه تکتونیک فشاری، نقش عمده‌ای دارند. گسل‌های غالب در بخش اپی‌ترمال را شکستگی‌های برشی با روندهای شمال‌غرب- جنوب‌شرق و شمال‌شرق- جنوب‌غرب در منطقه تشکیل می‌دهند که در جابه‌جایی بلوک‌ها، ایجاد ماگماتیسم و جایگزینی توده‌های نفوذی نقش بارزی داشته است، بنابراین توده‌های موجود که بخشی از آن‌ها بارور هستند به وسیله سیستم‌های گسلی تشکیل شده‌اند. به طوری که دایک‌های فراوان دیابازی منطقه عمدتاً روند غالب شمال‌شرقی- جنوب‌غربی را دارند که نشانگر فعالیت طولانی مدت این گسل حداقل از زمان ائوسن است. ایجاد ولکانیسم کواترنری نیز در ارتباط با عملکرد گسل شمال‌شرقی- جنوب‌غربی قابل توجیه است به طوری که محل تلاقی دو گسل با روندهای شمال‌غرب- جنوب‌شرق و شمال‌شرق- جنوب‌غرب در منطقه می‌تواند معبر عبور ماگما باشد که زون ضعیف پوسته‌ای است. در نتیجه در زمان کواترنری

از محل تلاقی این دو گسل، ماگماتیسم بازالتی رخ داده است. همچنین در بالآمدگی بخش غربی محدوده نقش بارزی داشته‌اند. این بالآمدگی سبب رخداد کانی‌زایی در سطح شده است. بخش غربی محدوده به لحاظ کانی‌زایی رگه‌ای اپی‌ترمال و پلوتونیسم و دگرسانی‌های مربوطه، پتانسیل زیادی دارد. این بخش از محدوده در واقع به صورت پنجره تکتونیک عمل کرده است. گسترش بخش جنوب‌شرق و جنوبی رگه اپی‌ترمال به وسیله گسل شمال‌غرب- جنوب‌شرق کنترل می‌شود. در محل گسل شمال‌شرق- جنوب‌غرب چرخش سیالات سبب اثر بر سولفیدها شده و در نتیجه دگرسانی آرژیلی گسترده‌ای ایجاد شده است. گسترش گسل‌ها سبب ایجاد فضاهای مناسب برای انتقال حجم کافی سیال‌های کانه‌دار از منشا ماگماهای ژرف‌تر احتمالاً آندزیت و کانی‌سازی اپی‌ترمال در بخش پوسته‌ای کم ژرف‌تر است. کانی‌سازی طلا در کانسار سوناجیل منطبق با این بخش‌های گسلی و برشی رخ داده است. همچنین میانگین روند گسلش در معدن سوناجیل ۸۶٫۶ درجه است [۱۱]، ولی میزان گسلش در بخش غربی که به محدوده طلادار اپی‌ترمال مربوط می‌شود بیشتر است و این ممکن است در گردش سیالات این ناحیه تاثیر گذاشته باشد و در کانه‌زایی طلای اپی‌ترمال این بخش از معدن موثر بوده است (شکل ۳).

۲-۳-۲- ماهیت سنگ میزبان: در سامانه‌های اپی‌ترمال فلزات گرانبها، ماهیت سنگ میزبان معمولاً از نظر نفوذپذیری و گسترش بخش‌های کانه‌دار اهمیت دارد. گاه ترسیب طلای پراکنده در سیالات حاوی طلا آنقدر سرعت دارد که به تمرکزات اقتصادی از طلا منجر می‌شوند. فرآیند ته‌نشست به وسیله متغیرهایی مانند دما، فشار، شیمی و اختلاط سیالات موثر واقع می‌شوند [۱۵]. اگر سنگ میزبان کانی‌زایی از نوع گدازه باشد، این سنگ‌ها به دلیل نفوذپذیری پایین به عنوان مانع برای جریان سیال‌های گرمایی رفتار می‌کنند، مانع از پخش شدن سیال‌ها و بنابراین سبب افزایش عبار کانی‌زایی در گسل‌ها و برش‌ها می‌شوند. اگر سنگ در برگیرنده ماده معدنی به طور چیره از سنگ‌های آذرآواری تشکیل شده باشد، بنابراین نفوذپذیری این سنگ‌ها سبب حرکت سیال در جهات مختلف و پخش شدن ماده معدنی در کل سنگ‌ها و در نتیجه پایین آمدن عبار ماده معدنی و تمرکز کم کانه‌ها در برش‌ها و گسل‌ها می‌شوند [۱۶]. در صورتی که ترکیب نسبتاً بازیک سنگ نفوذی و در نتیجه کاهش میزان سیالات و تراکم گسلش در بخش غربی در کانه‌زایی طلای اپی‌ترمال این بخش از محدوده موثر بوده است.

پیشرفته آلونیت، دیاسپور، توپاز، کروندم، دومرتیریت، پیریت و ژونیاثیت است. همچنین کلسیت، کلریت و اپیدوت کانی‌های دگرسانی پروپلیتیک هستند [۱۱].

در محدوده اکتشافی سوناجیل دگرسانی‌های مختلفی در ارتباط با فعالیت‌های گسلی و چینه‌شناسی تشکیل شده است که دگرسانی‌های پتاسیک و فلیک در ارتباط با سیستم کانی‌زایی پورفیری و فرآیند دگرسانی سیلیسی نیز در ارتباط با سیستم کانی‌زایی اپی‌ترمال رگه‌ای در محدوده رخ داده است. در این مقاله صرفاً کانی‌زایی اپی‌ترمال مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در بخش‌های مختلف منطقه دگرسانی آرژیلی رخ داده است که ثانویه و یا سوپرژن بوده و ارتباطی با سیستم‌های کانی‌زایی رخ داده در منطقه ندارد ولی ممکن است شاخص وجود سولفید اولیه در منطقه باشد. طبق نتایج آنالیز XRD، کانی‌های اصلی شامل کوارتز، اورتوکلاز، آلبیت، ایلیت، مسکویت، کائولینیت، میکا، ناترولونیت و به مقدار کمتر کانی‌های فرعی کائولینیت، ایلیت، هماتیت، اورتوکلاز، آلبیت، مسکویت، اوژیت، تورمالین، مونت موریلونیت، پیروفیلیت، زونیت و به مقدار جزئی هماتیت، پیروفیلیت، اوژیت و مگنتیت، آلونیت هستند. تمرکز دگرسانی فلیک و آرژیلیک در غرب و جنوب‌غرب در توده بازالتی اکوز داغی به وضوح دیده می‌شود. همان‌طور که گفته شد، منطقه غرب با کانه‌زایی اپی‌ترمال مرتبط است. بخش اپی‌ترمال معدن سوناجیل در منطقه تمرکز زون فلیک اتفاق افتاده است. زون فلیک محیط مناسبی برای انتقال سیال کانه‌زا به یک محیط اپی‌ترمال را فراهم می‌کند. همچنین تراکم نسبتاً بیشتر گسلش در منطقه غربی معدن به سیالات کانه‌ساز اجازه عبور و تشکیل کانه‌زایی اپی‌ترمال و ته‌نشست فلزات گرانبها را می‌دهد. کانی‌های مهم این دگرسانی در کانسار سوناجیل شامل سریسیت، کوارتز، پیریت، پیروفیلیت، دیکیت و کائولینیت است (شکل ۴-الف). دگرسانی آرژیلیک به طور گسترده با وجود کانی‌های رسی از جمله کائولینیت و نیز کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن مشخص می‌شود (شکل ۴-ب). دگرسانی آرژیلیک ثانویه در رخنمون‌های مشاهده شده در اثر عملکرد محلول‌های پایین‌رو در سیستم شکستگی‌ها و لایه‌بندی سنگ‌ها، همراه با گسترش زون‌های دگرسانی کوارتز-سریسیت گسترش یافته‌اند (شکل ۴-ج). دگرسانی آرژیلیک بر حسب شدت شستشوی کاتیون‌های آلکالین به دو نوع آرژیلیک پیشرفته و آرژیلیک حد واسط قابل تقسیم است. گسترش دگرسانی آرژیلیک پیشرفته در منطقه نشان می‌دهد که اسیدپته سیال

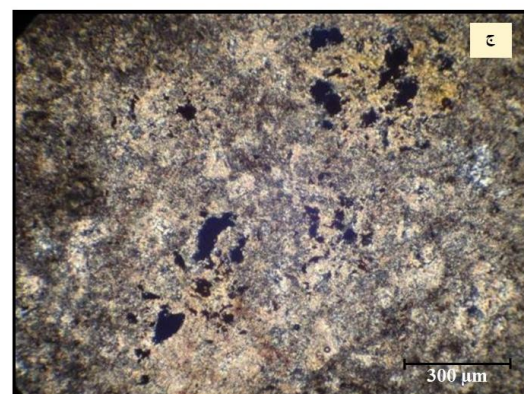
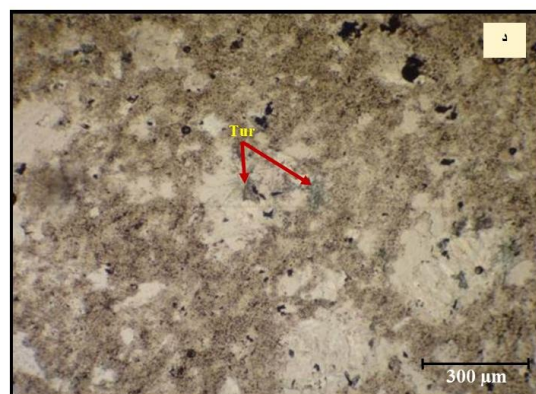
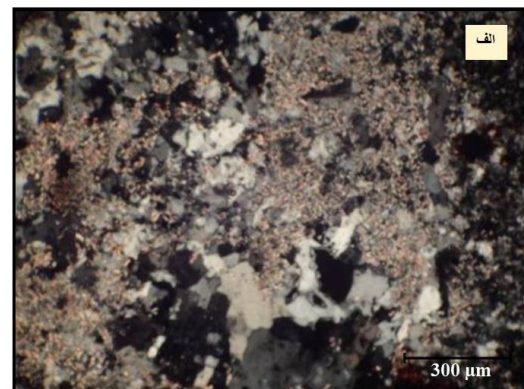
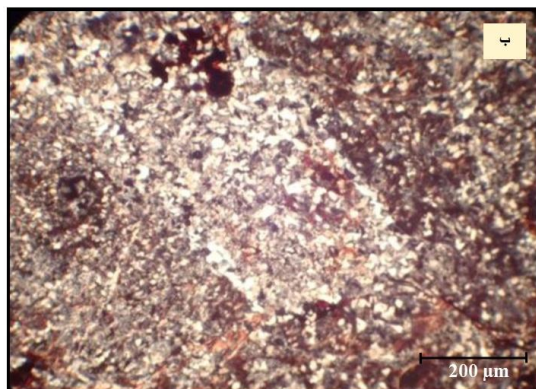


شکل ۳: نقشه گسل محدوده سوناجیل با مقیاس ۱:۵۰۰۰، (شرکت کومه معدن پارس)

۲-۳-۳- دگرسانی گرمابی: یکی از ویژگی‌های کانسارهای اپی‌ترمال گسترش وسیع پهنه‌های دگرسانی در اطراف رگه‌های کانه‌زا است [۴]. زون‌های دگرسانی از لحاظ ژنتیکی ارتباط خاصی با زون‌های کانی‌سازی دارند. به طور کلی کانسارهای اپی‌ترمال، هاله‌های عظیمی از مجموعه‌های زون‌بندی دگرسانی دارند که مربوط به بخش بالایی این سیستم‌ها در سطح است [۱۷]. شکل توزیع و تمرکز کانی‌های دگرسانی نشانگر الگوی تجمع کانی‌شناسی مرتبط با دگرسانی اپی‌ترمالی در سیستم‌های کانی‌سازی پورفیری است [۱۸]. با توجه به نتایج پردازش تصاویر ماهواره‌ای و کاربرد ترکیب رنگی کاذب، الگوی دگرسانی منطقه سوناجیل بر اساس کانی‌های معین شناسایی شدند. بر طبق طیف کانی‌های کتابخانه USGS، انعکاس بیشتر کانی‌های AL-OH مانند مسکویت، کائولینیت، مونت موریلونیت و ایلیت (کانی‌های دگرسانی فلیک و آرژیلیک) است و انعکاس قابل توجه کانی‌های Mg-OH دار از قبیل اپیدوت و کلریت (کانی‌های زون پروپلیتیک) است [۱۷]. رایج‌ترین کانی‌های آرژیلیک

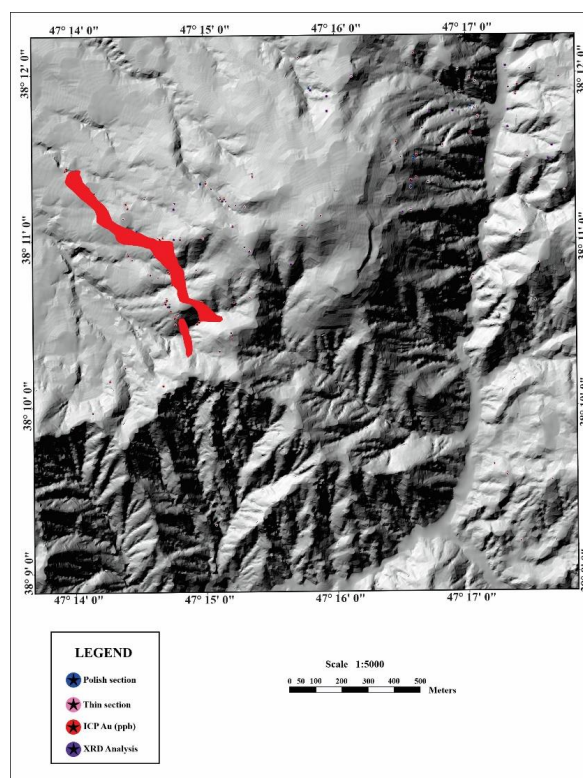
مجزا در حاشیه رگه سیلیسی واقع در بخش غربی محدوده دیده می‌شود (شکل ۵). در اثر توسعه رگه هیدروترمال در بخش‌های حاشیه و در سنگ‌های میزبان فرآیند سیلیسی شدن رخ داده است. در اثر عملکرد محلول‌های هیدروترمال سیلیس به متن سنگ تنیده و باعث تغییر ماهیت سنگ شده است. هر چند که این فرآیند در بخش شرقی رگه که فرادیواره است با گسترش بیشتری رخ داده است. فرآیند تورمالینی شدن عمدتاً در توده میکرومونوزوسینیتی و همچنین مونوزوسینیتی در زون‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلی مشاهده شده که احتمالاً رخداد تورمالین‌زایی به دلیل وجود محلول‌های حاوی بور (B) بوده است. شدت این فرآیند در زون دگرسانی آرژیلی بیشتر است (شکل ۴-د). جایگیری بخش اپی‌ترمال سوناجیل با توسعه دگرسانی‌های عمدتاً سیلیسی و تورمالین‌زایی در سنگ درون‌گیر سیلیس‌دار واحد آندزی‌بازالتی و میکرومونوزوسینیت همراهی دارد، اما وجود لایه بازالتی کواترنری نقش کنترلی در

کانه‌زا بالا بوده و با افت دما به علت تبدیل SO_2 به سولفید و سولفات بیشتر شده است [۱۱]. از طرفی دیگر آندزیتی بودن سنگ میزبان نیز در سولفیدزدایی سیال به وسیله آهن و در نتیجه مصرف کمپلکس سولفیددار و ته‌نشست پراکنده سولفیدها قبل از رسیدن به محیط مناسب موثر بوده است. در دگرسانی آرژیلیک پیشرفته کاتیون‌های آلکالن به صورت کامل از محیط شسته می‌شوند. کانی‌های شاخص این نوع دگرسانی شامل کائولینیت، دیکیت، پیروفیلیت، دیاسپور و گاهی سریسیت، کوارتز، توپاز، تورمالین و آلونیت است. در دگرسانی آرژیلیک حد واسط، شستشو به طور کامل انجام نشده و هنوز مقادیری از یون‌های کلسیم، منیزیم و پتاسیم در سنگ، به صورت کانی‌های مونت موریلونیت، ایلیت، هیدرومیکا و کلریت همراه با کائولینیت یا بدون آن وجود دارند. این کانی‌ها عمدتاً از تجزیه پلاژیوکلازها ایجاد شده‌اند. دگرسانی سیلیسی علاوه بر این که همراه با زون‌های دگرسانی فیلیک رخ داده، به طور



شکل ۴: الف) تصاویر مقاطع پتروگرافی از گسترش کوارتز - سریسیت در اثر دگرسانی فیلیک، نور پلاریزه (نمونه SJP-036)، ب) نمایی از توسعه کوارتز و فلدسپار بر روی فنوکریست فلدسپار در تراکی آندزیت با دگرسانی کوارتز - سریسیت و آرژیلی در مقاطع نازک، نور پلاریزه (نمونه SJP-003)، ج) نمایی از دگرسانی گسترده کوارتز - سریسیتی و آرژیلی در مونوزوسینیت، نور پلاریزه (نمونه SJP-027)، د) نمایی از تورمالین‌زایی (Tur) در سنگ‌های میکرومونوزوسینیتی و با دگرسانی فیلیک و آرژیلی، نور معمولی (نمونه SJP-001 TS)

۴ درصد وزنی معادل کلروسدیم تا بیش از ۵۵ درصد وزنی معادل کلروسدیم و مقادیر دماهای همگن شدن در بازه دمایی ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد تا ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. با توجه به نمودارهای تجمعی، بیشترین فراوانی شوری‌ها برابر ۴۰ تا ۴۵ درصد وزنی معادل کلرورسدیم در میانبارهای دارای فاز دختر هالیت‌دار است. میانبارهای فاقد فاز نوزاد نمک، شوری پایینی در محدوده‌ای از ۴ تا ۱۲ درصد وزنی معادل کلرورسدیم را نشان می‌دهند. بالاترین دماهای همگن شدن در مجموعه دماهای همگن شدن میانبارهای سیال مطالعه شده، در نمودارهای تجمعی پراکندگی وسیعی دارد. بالاترین دماهای همگن شدن در مجموعه میانبارهای سیال حاوی فاز نوزاد هالیت ۳۰۰ تا ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده گردید که اغلب با انحلال فاز نمک نوزاد به مایع همگن می‌شود. انحلال هالیت در دماهایی بالاتر از همگن شدن فاز بخار، نشانگر به دام افتادن در فشارهای زیاد است. همچنین بالاترین دماهای همگن شدن در میانبارهای غنی از مایع در محدوده دمای بین ۲۶۰ تا ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد است. چگالی میانبارهای سیال مطالعه شده با بیشترین فراوانی برای سه فازها در دامنه 1.1 g/cm^3 تا 0.9 g/cm^3 و برای دو فازهای غنی از مایع در بازه حدود ۰.۷ تا ۰.۹۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب قرار دارند. این مقادیر تشابه کاملی با مقادیر گزارش شده از بسیاری ذخایر مهم مس پورفیری دنیا دارند [۱۲، ۷، ۶]. به طور کلی میانبارهای سیال با شوری بالا و حاوی فازهای نوزاد هالیت و اپاک همزیست با انواع میانبارهای کم چگال غنی از بخار که در اغلب نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود به عنوان محصول جدایش فازی در میدان مایع + بخار از مسیر تحول سیالات ماگمایی- گرمایی سیستم‌های تیپیک مرتبط با نفوذی به ویژه ذخایر پورفیری در نظر گرفته می‌شود. وقوع جوشش معمولاً منجر به تولید گروهی از میانبارهای سیال با شوری بالا و میانبارهای غنی از بخار با شوری کم که در دماهای مشابه همگن می‌شوند در کنار هم شده و با روندی از کاهش دما متناظر با افزایش شناخته می‌شود. با بررسی و پلات داده‌های میانبارهای سیال منطقه مورد مطالعه بر روی نمودار شوری TH_{final} که محدوده‌های تیپیک ذخایر مرتبط با نفوذی مشتمل بر انواع پورفیری، اسکارن و اپی‌ترمال در آن مشخص شده‌اند [۱۹]، مشاهده می‌شود که محدوده‌های دمای همگن شدن نهایی میانبارهای سیال و شوری آنها در دامنه مقادیر تیپیک میانبارهای سیال ذخایر پورفیری قرار گرفته و در مراحل پایانی تحول سیالات ماگمایی- گرمایی روند مشخصی

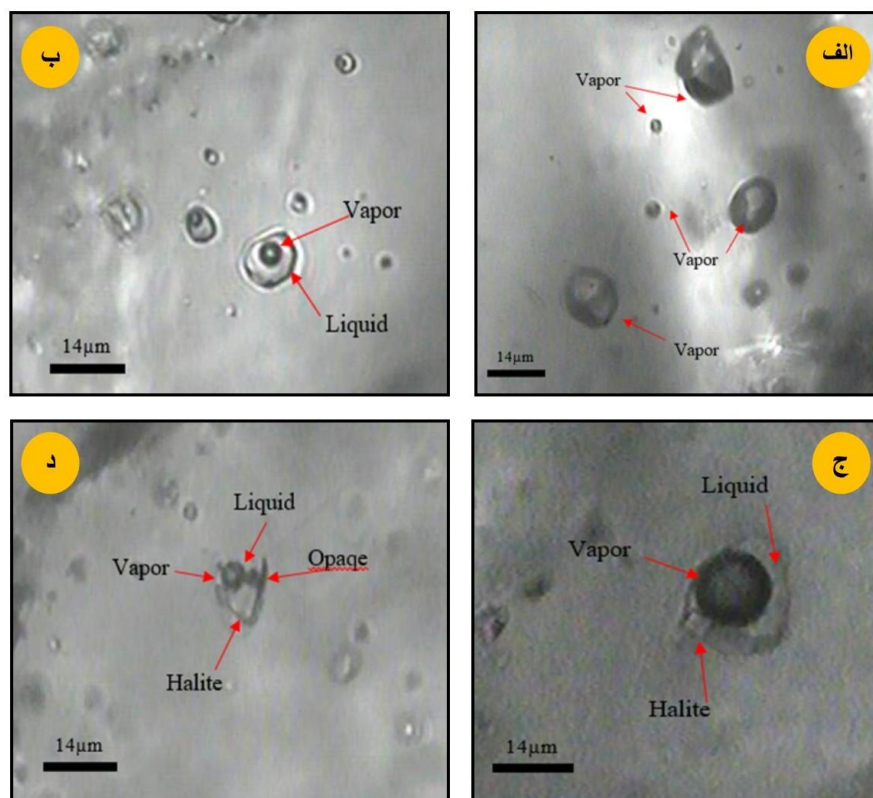


شکل ۵: نمایی از توسعه سیلیسی شدن در حاشیه رگه سیلیسی در غرب ارتفاعات اکوز داغی

فرسایش شدید غرب محدوده و حذف کامل کانی‌زایی پورفیری در منطقه مطالعاتی را ایفا کرده است. در کانسار سوناجیل وجود شاخص‌های کائولینیت، کوارتز، آلونیت و کانی‌های هیدروکسیل‌دار که مبین دگرسانی‌های فیلیک، پروپیلیتیک، آرژیلی، سیلیسی و تورمالین‌زایی در بخش اپی‌ترمال هستند، به همراه کانی‌سازی سولفیدی و اکسیدی مورد تایید قرار گرفته است. این مناطق در واقع زون‌های مستعد برای کانی‌سازی اپی‌ترمال در منطقه هستند.

۲-۳-۴- عوامل ترمودینامیکی حرارت، فشار و ترکیب سیالات

با توجه به پتروگرافی و مطالعات میکروترمومتری میانبارهای سیال بر روی رگه‌های سیلیسی سوناجیل، مشخصات سیالات کنترل‌کننده کانی‌زایی به صورت اجمالی توصیف می‌گردد. در نمونه‌های مورد مطالعه، پنج نوع میانبار سیال قابل تشخیص است که به ترتیب فراوانی شامل میانبارهای سیال سه فازی (L+V+S)، دو فازه غنی از مایع (L+V)، دو فازه غنی از گاز (V+L)، تک فاز گاز (V) و تک فاز مایع (L) است (شکل ۶). طبق نتایج ترمومتری میانبارهای سیال، مقادیر شوری برابر



شکل ۶: انواع سیالات درگیر در نمونه رگه‌های سیلیسی سوناجیل؛ الف) سیالات تک فاز بخار با ابعاد نسبتاً بزرگ و واجد شکل منفی بلور کوارتز، ب) سیالات درگیر دو فاز غنی از مایع، ج) سیالات درگیر دو فاز غنی از بخار همراه با سیالات تک فاز گازی، د) سیال درگیر ۳ فاز حاوی کانی‌های نوزاد هالیت و اپک در کنار سیالات درگیر تک فاز بخار

سنگ‌های کانی‌سازی شده طلا دار را تشکیل می‌دهند [۲۰]. برای تفکیک سنگ‌های برشی از دیگر سنگ‌های متاسوماتیکی اولیه نام سیلیسی شده انتخاب شده است. سیلیسی شدن نشان می‌دهد که برش هیدروترمال مشابه با ذخایر اپی ترمال کم سولفید [۷] تحت محلول‌های هیدرولیکی فشار بالا به وجود آمده است. مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد که در بین دانه‌های برشی قطعات شیشه‌های آتشفشانی و آندزیتی وجود دارند که تحت دگرسانی سریسیتی و سیلیسی دگرسان شده‌اند. اغلب قطعات گرد شده بوده و ماتریکس سنگ بافت لایه‌بندی جریان دارد که از کوارتز و مقدار کمی سریسیت تشکیل شده، لیکن در حالت کلی سنگ بافت دندان سگی دارد (شکل ۱۱-الف).

۲-۴- کانی‌سازی طلای اپی ترمال در رگه‌های سیلیسی سوناجیل

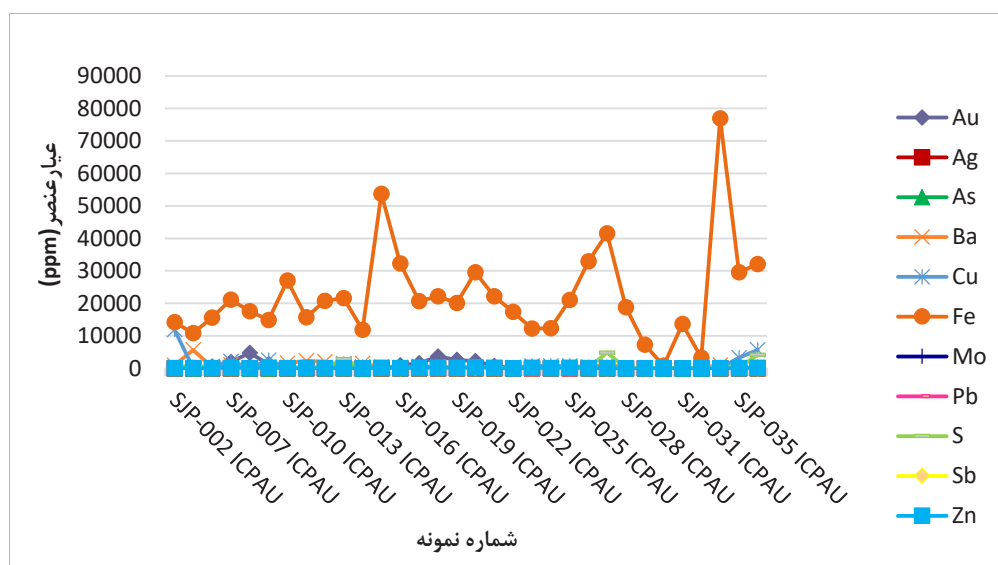
از عصر برنز، کانه‌های رگه‌ای چند فلزی منابع مهم فلزات گرانبها و نوع اصلی کانی برای فلزات پایه مختلف هستند [۱۷].

به سمت محدوده‌های دما-شوری پایین‌تر حاصل از سرد شدن و اختلاط با آب‌های سرد خارجی نشان می‌دهد. در این نمودار تغییرات شوری میانبارهای سیال اشباع از هالیت در برابر دمای همگن شدن نهایی، روندی خطی از کاهش شوری با نسبتی ثابت به وجود آورده‌اند که در اغلب سیستم‌های پورفیری چنین نسبت‌های ثابتی از شوری گزارش شده است.

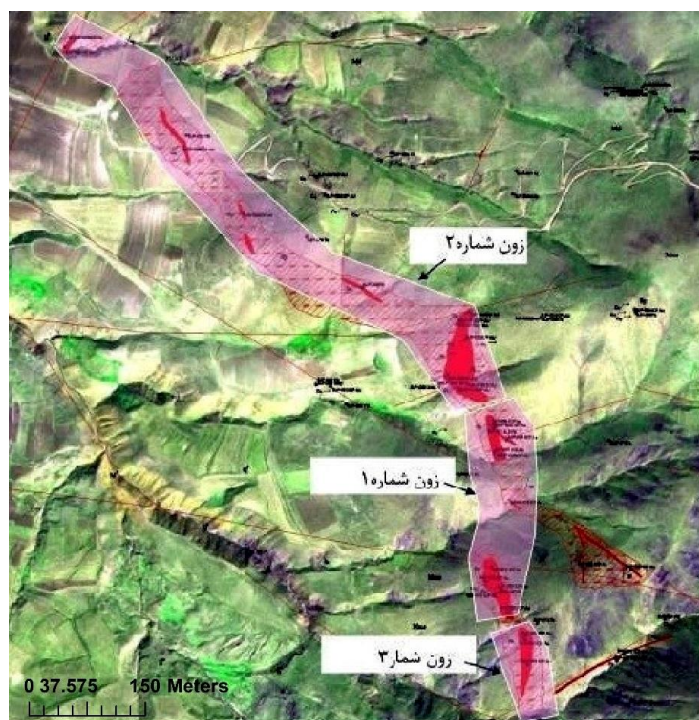
در محدوده سوناجیل سه بخش کانی‌زایی شناسایی شده و اکتشافات اولیه و داده‌های ژئوشیمیائی نشان می‌دهد که کانی‌زایی در زون شرقی نسبتاً کم عیار است، لیکن در بخش جنوب‌غربی کانی‌سازی طلا وجود دارد. بخش اپی ترمال در ۴/۵ کیلومتری جنوب‌غربی کانی‌سازی مس پورفیری قرار دارد که متعاقب زون سیستم پورفیری تشکیل شده است و گسترش آن شامل دویخش است، بنابراین کانسنگ برشی بعد از تشکیل کانسار مس پورفیری تحت فرآیندهای متاسوماتیکی به همراه دگرسانی کوارتز-سریسیت و کوارتز سریسیت-کلریت به وجود آمده است. بعد از این سنگ‌های دگرسانی دما متوسط،

کشف شد [۲۳]. سیستم کانی‌سازی اپی‌ترمال در رگه سیلیسی همسو با روند گسل شمال‌غرب- جنوب‌شرق در بخش غربی محدوده سوناجیل رخ داده است. هر چند که رگه‌های سیلیسی کوچکی نیز در شرق و جنوب‌شرق معدن دیده می‌شوند ولی عیار خاصی را نشان نداده است. طول زون سیلیسی حاوی رگه سیلیسی به بیش از ۲۳۵۰ متر و عرض متوسط آن به حدود ۳۰۰ متر می‌رسد. رگه سیلیسی در این زون به صورت جدا از هم دیده می‌شود. در بخش‌هایی طول رگه بیش از ۴۰۰ متر بوده و بیشینه عرض آن نیز به حدود ۸۰ متر می‌رسد. بر اساس نتایج آنالیزهای انجام شده از ۳۲ نمونه برداشت شده، دامنه عیار طلا از "کمتر از حد تشخیص دستگاه" تا حدود "۴۷ ppm" بوده است. تعداد ۸ نمونه عیار بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ ppb و تعداد ۱۰ نمونه عیار بیش از ۰٫۵ ppm دارند که از این تعداد ۷ نمونه عیار بیش از ۱٫۲ ppm نشان می‌دهند. میزان عیار مس در نمونه‌های برداشت شده از رگه نیز قابل توجه است. بالاترین میزان عیار مس با عیار ۱٫۲ درصد و در برخی نمونه‌ها میزان عیار مس بیش از ۰٫۸ درصد بوده است. میزان نقره در نتایج آنالیز پایین است و بالاترین میزان نقره در دو نمونه در حدود ۱۲ ppm می‌باشد. در برخی از نمونه‌های آنالیز شده میزان باریم نیز بالا (بالای یک درصد) است. نتایج آنالیز نمونه‌های برداشت شده در نمودار شکل ۷ ارائه شده است. برای عناصر سرب و مولیبدن و آنتیموان غنی‌شدگی خاصی در آنالیزها دیده نمی‌شود. همچنان که در شکل ۸ نیز مشاهده

کانسارهای اپی‌ترمال در اثر چرخش سیالات گرمایی و حرارت توده نفوذی در فاصله تا حدود یک کیلومتری در بالای کانسارهای پورفیری و در سیستم‌های مجزایی تشکیل می‌شوند. معمولاً کانسارهای اپی‌ترمال کانی‌سازی‌هایی از عناصر پایه دارند و در این بین کانی‌سازی طلا در این نوع کانسارها اهمیت ویژه‌ای دارد. سیال‌های کانه‌دار در ذخایر Au-Ag به همراه فلزهای پایه، شوری متوسط بین ۵-۱۴/۴ دارند و کانسنگ در قسمت‌های ژرف‌تر، بین ۴۰۰-۱۰۰۰ متر زیر سطح آب زیرزمینی، تشکیل می‌شوند [۲۱]. در سامانه‌های اپی‌ترمال، همیافتی کوارتز- پیریت به عنوان ملاکی برای غنی‌شدگی اولیه طلا قلمداد می‌شود [۲۲]. عناصر طلا و آرسنیک به صورت جفت عنصری و با ظرفیت‌های مختلف می‌توانند در ترکیب شیمیایی پیریت ذخایر گوناگون مشارکت کنند. بر این اساس بیشینه جانشینی طلا در ساختار پیریت به محتوای آرسنیک آن بستگی دارد [۱۰]. در محدوده اکتشافی سوناجیل سیستم رگه‌ای اپی‌ترمال از کانی‌سازی مس و طلا رخ داده است، بنابراین هدف اصلی، دستیابی به الگوی توزیع غیرخطی در رگه‌های سیلیسی و بررسی رابطه آنها با افزایش عیار طلا در کوارتزهای رگه‌ای بخش اپی‌ترمال غرب معدن سوناجیل است. همبستگی ویژه قوی بین شدت رگچه کوارتز و میزان فلز در بیشتر ذخایر مس پورفیری به ویژه در انواع غنی از طلا وجود دارد [۱]. بر اساس پی‌جویی‌های متعددی که در این منطقه صورت گرفته در طی اکتشاف ۴/۳ تن طلا در بخش اپی‌ترمال



شکل ۷: نمودار عنکبوتی آنالیزهای برداشت شده از رگه سیلیسی با کانی‌زایی طلا و مس سوناجیل



شکل ۸: زون بندی تفکیکی رگه سیلیسی بر اساس نتایج عیارسنجی طلا



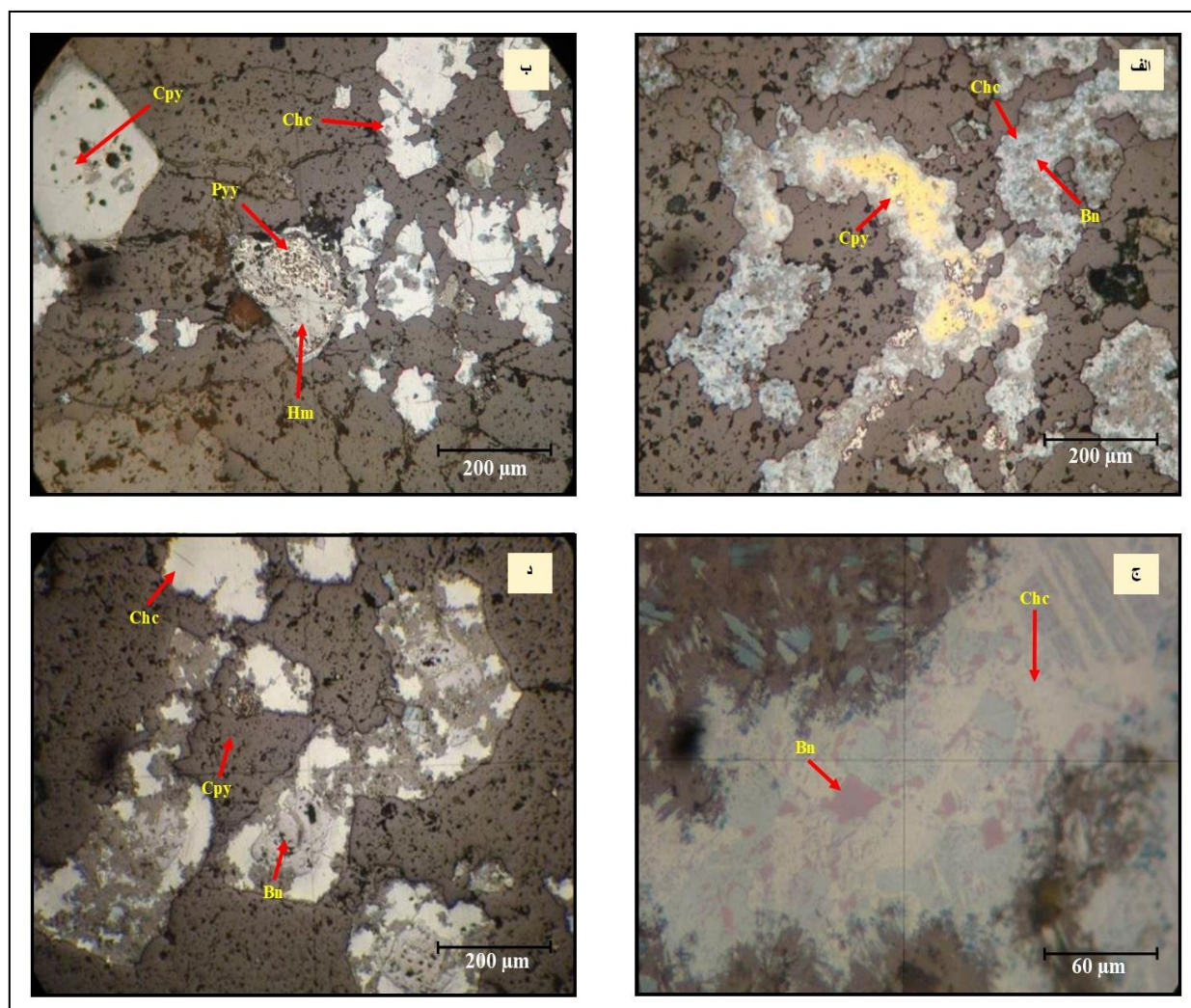
شکل ۹: نمایی از بخش جنوب شرقی زون شماره ۱ کانی سازی رگه سیلیسی، در بخش اپی ترمال دید به سمت شمال

برداشت شده از بخش شمال غربی حاکی است که میزان دامنه عیارهای طلا بین ۰/۵ تا ۴/۷ ppm در تغییر است. متوسط عیار طلا برای نمونه های اخذ شده نیز مناسب و در حدود ۲ ppm است. در این زون بر اساس مشاهدات صحرایی کانی زایی مس نیز وجود داشته و در نمونه های آنالیز شده نیز دامنه مس بین ۱۲۴ تا ۲۵۰۰ ppm در تغییر است. متوسط عیار مس در نمونه ها نیز برابر ۷۴۶ ppm است. در سطح کانی زایی مس به صورت کالکوپیریت، بورنیت و کالکوسیت و نئوتسیت

می شود، گسل خوردگی و تکتونیک نقش مهمی در تشکیل و نیز تحول رگه داشته است. همان طور که اشاره شد این رگه با روند سیستم شکستگی شمال غرب- جنوب شرق همسو بوده، بنابراین گسل اصلی مزبور که از نزدیک این رگه می گذرد در تشکیل و تکامل آن نقش برجسته ای ایفا کرده است. این رگه در برخی موارد به دلیل عملکرد گسل ها روند شمالی- جنوبی به خود می گیرد. این امر به ویژه در بخش های میانی و جنوب شرقی بارزتر است. البته به دلیل پوشش رسوبات کواترنری، گاه رگه اصلی در سطح دیده نمی شود که احتمالاً در زیر رسوبات کواترنری مدفون شده است. شیب عمومی رگه یاد شده به سمت شرق و شمال شرق حدود ۷۰ درجه همسو با شیب گسل اصلی با روند شمال غرب- جنوب شرق است که در بخش هایی در اثر عوامل تکتونیکی حالت نزدیک به قائم به خود می گیرد. بر اساس نتایج عیارسنجی طلای نمونه های برداشت شده می توان رگه را به سه زون ۱، ۲ و ۳ تقسیم بندی کرد (شکل ۸). زون شماره ۱ دارای طول حدود ۵۰۰ متر و عرض حدود ۴۰ متر در بخش میانی و به سمت جنوب شرق زون سیلیسی قرار گرفته است. افراز کانی زایی در سطح حدود ۱۵۰ متر است. این زون کانی زایی سیلیسی در محل تپه قلعه به وسیله گسلی به دو بخش تقسیم شده است (شکل ۹). نتایج آنالیز نمونه های

می‌شود. زون شماره ۲ در بخش شمال‌غربی زون سیلیسی از محل دشت تا نزدیک ارتفاعات قلعه ادامه دارد. طول این زون که در بخش‌های مختلف آن رگه سیلیسی رخنمون دارد به بیش از ۱۵۰۰ متر و عرض آن نیز در حدود ۱۰۰ متر است. نمونه‌های مختلفی از این زون برای عیارسنجی طلا و مس برداشت شده است. بخش جنوب‌شرقی این زون و نزدیک زون ۱ برای کانی‌سازی مس مناسب است و بیشتر شامل سولفید به صورت کالکوسیت و کوولین و همچنین کربنات‌های مس غنی شده است. در این زون در بخش‌های منتهی‌الیه شمال‌غربی زون‌های سیلیسی غنی از اکسید و هیدروکسیدهای آهن دیده

و همچنین کربنات‌های مس شامل آزوریت و مالاکیت دیده می‌شود که گاه عرض این زون مس‌دار در داخل سیستم رگه سیلیسی بیش از ۳ متر است (شکل ۱۰-الف). بر اساس نتایج مطالعات انجام شده در نمونه‌های مورد مطالعه در این زون کانه‌های کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، کوولین و پیریت و همچنین اکسید و هیدروکسیدهای آهن تایید شده است (شکل ۱۰-ب). بر اساس آنالیزهای انجام گرفته می‌توان عنوان کرد که این زون گسترش و حجم و عیار مناسبی برای کانی‌زایی طلا و مس دارد. در این زون سیستم‌های سیلیسی، برشی و همچنین بافت‌های مرتبط باجوشش (Boiling) دیده



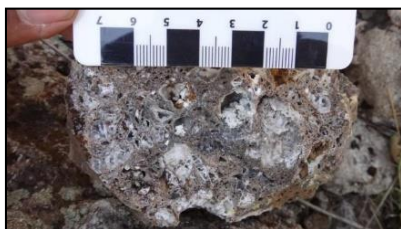
شکل ۱۰: الف) تصاویر مقاطع مینرالوگرافی متشکل از کانی‌های بورنیت، کالکوپیریت، مالاکیت و کالکوسیت و کوولین در حاشیه آنها (نمونه SJP-002)، ب) تصویر مقطع صیقلی که در آن پیریت، کالکوپیریت به وسیله کالکوسیت و کوولین و همچنین هماتیت جایگزین شده است (نمونه SJP-003)، ج) نمایی از جانشینی بورنیت به وسیله کالکوسیت و کوولین همراه با اکسید و هیدروکسیدهای آهن، (تصویر از نمونه SJP-011)، د) نمایی از بلورهای کالکوپیریت و بورنیت که بر روی آنها کالکوسیت و کوولین تشکیل شده است (نمونه SJP-001)

می‌شود (شکل ۱۰-ج). در نمونه‌های برداشت شده از این زون و از رگه سیلیسی برای عیارسنجی، میزان عیار طلا پایین‌تر از زون ۱ است. دامنه عیارهای به دست آمده برای طلا بین ۶ تا ۲۱۱ ppb بوده است. متوسط عیارهای طلا در نمونه‌های اخذ شده ۱۰۴ ppb است. میزان دامنه مس بسیار متغیر بوده و از ۱/۱ درصد تا ۶۵ ppm در تغییر است. در مطالعات مقاطع صیقلی از این بخش، کانی‌های کالکوپیریت و پیریت به همراه کالکوسیت و کوولین مشاهده شده است (شکل ۱۰-د). در این بخش میزان باریت در برخی نمونه‌ها بالا بوده است (حدود ۱ درصد) که این یکی از وجوه تمایز ژئوشیمیایی این زون، از زون شماره ۱ است. زون شماره ۳ در منتهی‌الیه جنوب‌شرقی زون سیلیسی قرار دارد. طول این زون ۲۵۰ متر است که از رگه سیلیسی شیری رنگ با عرض متوسط ۳۰ متر تشکیل شده است. گسترش جنوب‌شرقی رگه به وسیله گسل اصلی محدوده با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق محدود می‌شود. از این زون نمونه‌هایی برای عیارسنجی برداشت شده است. میزان عیار طلا در این نمونه‌ها بین ۷۹ تا ۲۷۲ ppb در تغییر است. این میزان عیار در مقایسه با بخش میانی رگه (زون ۱) پایین بوده ولی در کل زمینه رگه برای طلا عیار بالایی دارد. همچنین میزان مس نیز بین ۲۶۲ تا ۷۶۸ ppm در تغییر است که زمینه بالایی برای مس در این بخش است، هرچند عیار اقتصادی برای مس محسوب نمی‌شود.

۳- یافته‌ها و بحث

با توجه به این که رگه سیلیسی در اثر فرآیندهای چرخش سیالات در داخل سیستم شکستگی با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق پدید آمده است، بنابراین چندین مرحله از بازشدگی و چرخش سیالات با ترکیب متمایز را تحمل کرده

است، به طوری که در مرحله اول سیلیس‌های شیری با ترکیب کلسدونی و چرت در شکاف ناشی از حرکات تکتونیکی و در گسلی با این راستا تشکیل شده‌اند، سپس چرخش سیالات و همچنین حرکات تکتونیکی باعث برشی شدن رگه اولیه و زایش نسل دوم سیلیس شده است که در این مرحله انواع بافت‌های برش، کلئوفرمی، گل کلمی (مشخصه محیط‌های با سولفید پایین در ذخایر طلای اپی‌ترمال [۶، ۷]) ایجاد شده‌اند (شکل ۱۱-الف) که در سطح این سولفیدها با اکسید و هیدروکسیدهای آهن جایگزین شده است. همچنین در مرحله نهایی این مرحله کانه‌های مس در سیستم شکستگی‌ها تشکیل شده‌اند که عمدتاً شامل بورنیت و کالکوپیریت بوده‌اند. در مرحله بعدی سیالات با ترکیب متفاوت در رگه چرخش کرده‌اند که در این مرحله علاوه بر برشی شدن ماتریکس کربنات بر جای گذاشته شده است که این مرحله برای کانی‌زایی مناسب نبوده و نمونه‌های برداشت شده از بخش‌های کربناته عیار مناسبی برای طلا ارایه نداده‌اند. در مرحله نهایی دوباره با چرخش سیالات غنی از سیلیس با برشی شدن بخش‌های کربناته و همچنین برجای گذاشته شدن سیلیس در بین آن‌ها مشخص می‌شود (شکل ۱۱-ب). در این مرحله نیز کانه‌های مس بر جای گذاشته شده است. با مشاهده سیلیس شیری رنگ به نظر می‌رسد فاقد عیار مناسبی برای طلا بوده است هر چند که زمینه طلا در این مرحله از کانی‌زایی نیز بالا بوده است. ساخت و بافت‌های برجای گذاشته از سیستم هیدروترمالی موثر در ایجاد رگه سیلیسی نشانگر آن است که رگه در یک سیستم اپی‌ترمال تشکیل شده است. در بخش‌های میانی رگه، ساخت و بافت‌های مربوط به مرحله جوشش دیده می‌شود که موجب کاهش دمای ناگهانی سیال کانه‌دار و در نتیجه ته‌نشست عناصر فلزی و طلا شده است، بنابراین میزان عیار طلا بالا است. این



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱۱: الف) نمایی از بافت دندان سگی و کلئوفرمی در رگه سیلیس، ب) نمایی از نسل‌های مختلف سیلیس‌زایی در رگه با قطعات برشی سیلیس اولیه در متن سیلیسی نسل دوم، ج) نمایی از بافت LATTICE و اسفنجی ناشی از جوشش در رگه سیلیس در بخش‌های مرکزی و زون شماره ۱

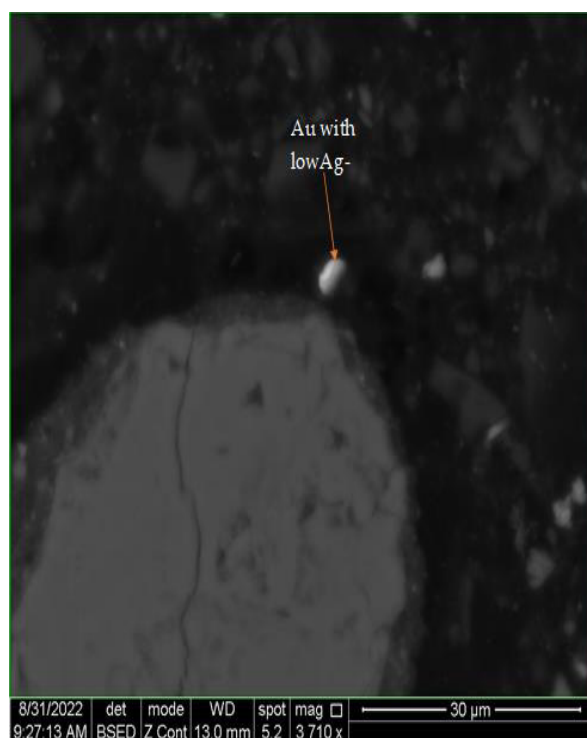
برای بررسی و مقایسه دقیق ویژگی‌های کانی‌سازی طلا در محدوده سوناجیل، مشخصاتی مانند سنگ میزبان، دگرسانی، خصوصیات سیال و نظایر آن با انواع کانسارهای اپی‌ترمال مقایسه گردید (جدول ۱). همان‌طور که مشخصات کانی‌سازی طلا در کانسار سوناجیل نشان می‌دهد، این کانی‌سازی بیشترین شباهت را با ویژگی‌های کانسارهای اپی‌ترمال - کارلین از نظر دگرسانی، ژئوشیمیایی و رخداد کانی طلا به شکل همراهی با کوارتز در اندازه کمتر از ده میکرون نشان می‌دهد. آنالیز تصویری کانی‌شناسی نمونه رگه سیلیسی طلا دار همراه با طیف‌های EDX از ذرات طلا در این نمونه (شکل ۱۲-الف و ب) نحوه رخداد طلا را با ترکیب آلیاژ طلا- نقره- پلاتین (احتمالاً الکتروم به همراه پلاتین) عمدتاً به صورت ذرات آزاد چسبیده به کوارتز (پال) آشکار کرد.

از آنجا که رخداد کانی‌های رآلگار و اورپیمنت در ذخایر کارلین معمول است ولی در کانسار سوناجیل تاکنون مشاهده نشده است، بنابراین ژئز کانسار از نوع سولفید پایین استنباط می‌گردد.

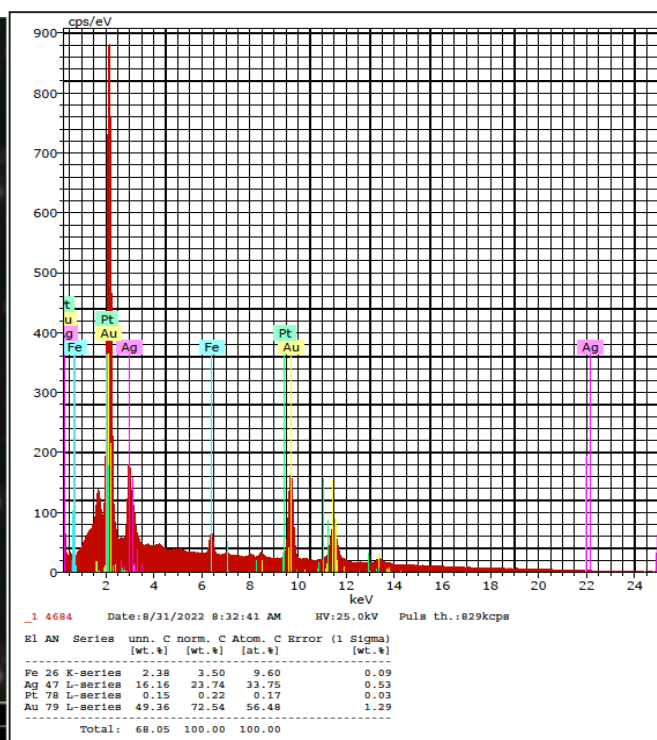
ساخت و بافت‌ها شامل بافت اسفنجی و Lattice texture است که در مرحله جوشش از جایگزینی کلسیت به وسیله سیلیس ایجاد شده‌اند (شکل ۱۱-ج). همچنین پاراژنز کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی نیز نشان‌دهنده این است که سیستم کانی‌زایی از نوع اپی‌ترمال است. وجود همبستگی بین مس و طلا در این رگه موید این امر است.

۳-۱- ژئز کانی‌زایی

بخش اعظمی از تولیدات جهانی طلا از مس- طلای پورفیری و ذخایر تیپ کارلین به دست می‌آید [۲۴]. در کل ذخایر تیپ کارلین به وسیله موارد زیر مشخص می‌گردند: (۱) کنترل‌کننده قوی ساختاری کانه‌زایی، به وسیله گسل‌ها و چین‌ها؛ (۲) سنگ میزبان رسوبی کربناتی از فاسیس‌های گوناگون $\pm$ سنگ‌های آتشفشانی؛ (۳) دگرسانی‌های دگرناسیون، آرژیلیتی شدن، سیلیسی‌شدن و سولفیدی شدن؛ (۴) طلای ساب میکرون (0.2 میکرومتر $<$) در ارتباط با پیریت، پیریت‌آرسنیک‌دار و آرسنوپیریت؛ (۵) آنومالی ژئوشیمیایی Au, Ag, As, Sb, Hg و Tl [۲۴].



(ب)



(الف)

شکل ۱۲: الف) طیف‌های EDX از فازهای کانیایی شناسایی شده برای طلا در نمونه رگه، ب) تصاویر الکترون برگشتی (Back Scatter) از فازهای کانیایی طلا در نمونه رگه اپی‌ترمال

جدول ۱: ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژنتیکی انواع مختلف کانسارهای اپی‌ترمال و مقایسه آن با کانسار مس - طلای سوناجیل (طلای اپی‌ترمال) [۳۰، ۲۹، ۲۴]

ویژگی‌ها	کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین	کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون حدواسط	کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا	کانسارهای کارلین	کانسار سوناجیل (بخش طلادار)
جایگاه زمین‌ساختی	محیط‌های کشتی قاره‌ای، جزایر کمائی، نزدیک محیط‌های پشت کمان	کمان‌های قاره‌ای، جزایر کمائی کشتی	حواشی کمان‌های قاره‌ای کشتی و فشارشی	کمان ماگمایی و شروع کشت	حواشی کمان‌های قاره‌ای، جزایر کمائی
کنترل‌کننده‌های ساختاری	گسل‌های کشتی تا راستالغز	گسل‌های کشتی تا راستالغز	محل برخورد ساختارهای متقاطع، گسل‌های به موازات کمان، دیاتریم و برش‌های هیدروترمال	گسل‌های معکوس و عادی با شیب زیاد همراه با چین‌های هم‌شیب ناودیس	گسل‌های نرمال و عمدتاً پر شیب و گسل‌های تراستی
سنگ‌های آذرین مرتبط با کانی‌زایی	کالک آلکان، ریولیت- بازالت (بایمودال)	کالک آلکان، آندزیت، ریوداسیت و به طور موضعی ریولیت	کالک آلکان، آندزیت، ریوداسیت	گرانودیوریت همراه با دایک‌های پورفیری با ترکیب حدواسط	کالک آلکان - آندزیت - مونزونیت - سبیت
سنگ میزبان	دم‌ها، ولکانی کلاستیک‌ها، واحد‌های رسوبی	گدازه، پیروکلاستیک	گدازه، پیروکلاستیک، واحد‌های پورفیری	سنگ آهک دولومیتی کربن‌دار، سیلتستون نازک لایه، شیل با میان‌لایه‌های آهکی ± سنگ‌های آذرین	دم‌ها و توده‌های نفوذی بازالتی، ولکانی کلاستیک‌ها، واحد‌های رسوبی
عناصر فلزی اصلی (فرعی)	طلا - نقره (سرب)، روی، مس، مولیبدن، استینیت، جیوه)	نقره - طلا - روی - سرب - مس (استینیت، آرسنیک، مولیبدن، جیوه)	مس - طلا - نقره (آرسنیک، روی، سرب، بیس‌موت، تنگستن، قلع)	طلا (نقره، آرسنیک، آنتیموان، جیوه، تیتانیوم، فلوئور، باریم، روی، سرب)	طلا (آرسنیک، آنتیموان، جیوه، نقره، روی، تیتانیوم، مس، سرب، باریم، تنگستن)
شکل کانسار	رگه‌ای، استوک‌ورکی، برشی، دانه پراکنده	رگه‌ای، برشی، استوک‌ورکی	جانشینی، برشی، رگه‌ای، توده‌ای	رگه و رگچه‌ای	رگه‌ای، رگچه‌ای، ذرات افشان،
ژرفای پیدایش ذخیره	از سطح زمین (صفر) تا ۲ کیلومتر	از سطح زمین (صفر) تا ۲ کیلومتر	از سطح زمین (صفر) تا ۲ کیلومتر	عموماً بیشتر از ۲ کیلومتر	عمق زیاد ۴-۶ کیلومتر
کانی‌شناسی کانسنگ	الکتروم، آکانتیت، سولفوسالت نقره (اسفالریت، گالن، تنانتیت، کالکوپریت)	الکتروم، آکانتیت، سولفوسالت نقره، اسفالریت، گالن، سلنید، تلورید	انارژیت، بورنیت، کالکوپریت، طلای آزاد، پیریت، کوولیت، اسفالریت	پیریت طلادار افشان، مارکاسیت، آرسنو پیریت، ارپیمنت، رآلگار، استینیت، باریت	پیریت، انارژیت، کالکوزیت، کوولیت، بورنیت، طلا، الکتروم، اسفالریت، گالن، کالکوپریت، تترایدیریت
کانی‌های باطله	کوارتز، کلسدونی، کلسیت، آدولاریا، کلریت	کوارتز، کلسدونی، کلسیت، کربنات‌های منگنز، باریت، آدولاریا	کوارتز، آلونیت، کائولینیت، کلریت	سیلیس توده‌ای بی شکل (ژاسپروید)، کوارتز، کلسیت.	کوارتز، آلونیت، کائولینیت
بافت کانی‌ها	پوسته‌ای، کلوform، کوکاد، شانه‌ای، جانشینی کربناتی	پوسته‌ای، کلوform، کوکاد، شانه‌ای، جانشینی کربناتی	کوارتز حفره‌ای، رگه‌ای، برشی، توده‌ای	جانشینی، شکافه پرکن	شانه‌ای، لایه‌ای متقارن، جانشینی، برشی

جدول ۱ (ادامه): ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژنتیکی انواع مختلف کانسارهای اپی‌ترمال و مقایسه آن با کانسار مس - طلای سوناجیل (طلای اپی‌ترمال) [۳۰،۲۹،۲۴]

ویژگی‌ها	کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین	کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا	کانسارهای کارلین	کانسار سوناجیل (بخش طلا دار)
دگرسانی	رسی، سیلیسی (سیلیس اوپالی و سینتر)، کربناتی	سرسییتی، رسی، سیلیسی، پروپیلیتی	کلسیت‌زدایش، سیلیسی، رسی، تحرک مجدد کربن و شستشوی اسیدی	فیلیک، آرژیلی، سیلیسی و تورمالین‌زایی
کانی‌های کلیدی پدید آمده از دگرسانی	ایلیت / اسمکتیت - آدولاریا (معمولاً حضور دارد)	سرسیت (آدولاریا عموماً حضور ندارد) پیروفیلیت و دیکیت	ایلیت، کائولینیت، دیکیت و اسکتیت	کائولینیت، کوارتز، آلونیت و کانی‌های هیدروکسیل‌دار
ویژگی‌های سیال	آب‌های جوی (احیایی - نزدیک به خنثی)	آب‌های جوی و ماگمایی (نزدیک به خنثی و احیایی)	منبع سیالات هیدروترمال آب‌های زیرزمینی می‌باشند (فاقد منشأ آذرین)	آب‌های (جوی و ماگمایی)
سن	میوسن	میوسن	سیلورین - دوونین تا ترشیری میانی	میوسن

۳-۲- اکتشافات ژئوشیمی و کانه‌زایی در محدوده اکتشافی

یکی از روش‌های کشف ذخایر معدنی، اکتشافات ژئوشیمیایی است که در بهینه‌سازی هزینه‌های اکتشافی و راهنمایی برای شناسایی مناطق پتانسیل‌دار نقش موثری دارد [۲۵]. همچنین از اهداف اکتشاف ژئوشیمیایی دست‌یابی به تمرکز غیرعادی عناصری است که در ارتباط با کانی‌سازی باشند. توزیع آماری عناصر اصلی در طبیعت عادی است. در شرایطی که سنگ‌ها تحت تاثیر دگرسانی و کانی‌سازی قرار گرفته باشند، این توزیع از حالت عادی خارج گشته و به شکل غیرعادی درمی‌آید [۱۴]. یکی از متداول‌ترین روش‌های اکتشاف ناحیه‌ای، نمونه‌برداری از رسوبات آبراهه‌ای است که روشی قدرتمند و ارزان قیمت برای تعیین و شناسایی مناطق امیدبخش کانی‌سازی در اکتشافات مواد معدنی و به ویژه طلا به شمار می‌رود و به عنوان ابزار اکتشافی موثر برای اکتشاف کانسارهای اپی‌ترمال در بیشتر نقاط جهان به کار رفته است [۲۶]. رسوبات آبراهه‌ای که حاصل تخریب فیزیکی و شیمیایی لیتولوژی‌های موجود، کانی‌سازی، زون‌های دگرسانی و احتمالاً آلودگی در منطقه مورد بررسی است، در واقع نمونه ترکیبی از مواد فرسایش یافته از سنگ‌های بالادست حوضه آبریز

هستند، بنابراین وجود ناهنجاری در این رسوبات از وجود یک منبع پرعیار در بالادست آنها حکایت می‌کند [۲۷]. اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای روشی موثر برای شناسایی مناطق ناهنجار به ویژه در مراحل اولیه اکتشاف ذخایر کشف نشده رخنمون‌دار و پنهان است. شناسایی ناهنجاری‌های با اهمیت در اکتشافات ژئوشیمیایی، بر اساس داده‌های حاصل از تجزیه نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای و تعیین غلظت عناصر، برای تولید لایه شاهد ژئوشیمیایی و تلفیق آن با سایر لایه‌های اکتشافی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی یک تیپ ذخیره مشخص، بسیار مهم است [۲۸]. عناصر آرسنیک، آنتیموان، بیسموت و نقره برای شناسایی کانی‌زایی طلای اپی‌ترمال بسیار مفید هستند. هاله‌های این عناصر می‌تواند بیش از چند کیلومتر در اطراف کانسارهای اپی‌ترمال گسترش یابند. این هاله‌ها در واقع بر اساس مهاجرت عناصر در رسوبات آبراهه‌ای ایجاد می‌شوند [۲۲]. منطقه‌بندی ژئوشیمیایی عناصر یاد شده و همچنین ارتباط میان کانی‌زایی عناصر پایه و طلای اپی‌ترمال با کانی‌زایی مس پورفیری در بسیاری از نواحی دنیا گزارش شده است [۲۹،۴]. علاوه بر اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای، انجام مطالعات لیتوژئوشیمیایی به عنوان یک ابزار اکتشافی با

۳-۲-۱- روش آمار کلاسیک

تجزیه و تحلیل داده‌ها در ژئوشیمی اکتشافی اغلب تجربی بوده است و این امر به علت خصلت اساساً عددی این داده‌ها و نبود مدل‌های ریاضی لازم جهت توصیف نوع منبع، چگونگی تفریق، مهاجرت، ته‌نشست و تمرکز عناصر در سنگ‌ها است. از این‌رو داده‌های ژئوشیمیایی در معرض تجزیه و تحلیل آماری قرار می‌گیرند [۳۴]. مدل‌سازی زمین‌شناسی کانسارها به ویژه کانسارهای طلا که تغییرات عیار در حد بسیار ناچیز هم می‌تواند قابل توجه باشد، نقش بسیار مهمی در ارزیابی منابع و ذخایر و ایجاد فضای مناسب تخمین جهت بررسی‌های زمین‌آماري ایفا می‌کنند [۲۸]. در اکتشافات ژئوشیمیایی، یک ناهنجاری نمی‌تواند در حد وجود مقادیر غیرعادی زیاد از یک عنصر و یا عناصر موجود در محیط‌های نمونه‌برداری شده باشد، بلکه ناهنجاری ژئوشیمیایی مرتبط با کانی‌سازی بر اساس میزان انحراف داده‌های ژئوشیمیایی از یکسری مقادیر ناحیه‌ای که تحت عنوان مقدار زمینه نامیده می‌شود، شناخته و مشخص می‌گردد.

اولین مرحله برای پردازش داده‌های خام، ابتدا داده‌های سنسورد و خارج از ردیف تعیین و اصلاح گردید. این مقادیر گاه به علت وجود خطاهای تجربی مانند خطای آنالیز در داده‌ها و گاه هم به دلیل ناهمگنی‌های موجود در جامعه داده‌های اکتشافی بروز می‌کند. از طرفی وجود چنین داده‌هایی، باعث توزیع غیرنرمال داده‌ها می‌گردد. پس با توجه به نیاز توزیع نرمال در بررسی‌های آماری، این داده‌ها نیز اصلاح گردید. در این پژوهش برای اصلاح داده‌ها از روش کاهش بزرگترین مقدار به یکی قبل از آن استفاده شده است. این تصحیح ساده، با توجه به نتایج قابل قبول از محاسبات پیچیده هم جلوگیری می‌کند [۳۵]. البته نرمال کردن داده‌ها موجب تغییر ماهیت داده‌ها می‌شود. اکثر روش‌های آماری (به جز روش‌های غیرپارامتری) فرض نرمال بودن داده‌ها را به همراه دارند. در بررسی داده‌پردازی تک‌متغیره با تکیه بر آمار کلاسیک به صورت توصیفی (جدول پارامترهای آماری) و نمودارهای گرافیکی (هیستوگرام‌ها و سایر نمودارها)، اولین گام در مسیر داده‌پردازی است که حاوی اطلاعات سودمندی برای ادامه مسیر اکتشاف ژئوشیمیایی است. این مرحله به عنوان مقدمه‌ای بر داده‌پردازی دومتغیره و چندمتغیره محسوب شده است. در جدول ۲ پارامترهای آماری محاسبه شده مربوط به داده‌های ژئوشیمیایی سوناجیل از جمله ماکزیمم، مینیمم، واریانس،

بررسی توزیع و فراوانی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب موجود در توده‌های سنگی و معرفی ناهنجاری‌ها، مطالعه ترکیب و توزیع هاله‌های ژئوشیمیایی اولیه و توسعه مدل منطقه‌بندی، در اکتشاف کانی‌سازی‌های پنهان و تشخیص عمق کانی‌سازی سودمند است [۲۵]. در منطقه مطالعاتی اکتشافات ژئوشیمیایی بر اساس سنگ و رسوبات آبراهه‌ای در خلال پی‌جویی‌های ژئوشیمیایی از محدوده‌های ناهنجاری انجام شد.

روش‌های جداسازی ناهنجاری از زمینه شامل روش‌های غیرساختاری و ساختاری است. در روش‌های غیرساختاری مبنای کار محاسبه پارامترهای آماری مربوط به کل منطقه است که با استفاده از پارامترهای مختلف و مقادیر حول میانگین بدون در نظر گرفتن موقعیت فضایی نقاط و جداسازی جوامع انجام می‌گیرد [۳۱]. در مقابل روش‌های ساختاری، ارتباط فضایی نمونه‌ها و یا موقعیت آن‌ها را نسبت به هم در تعیین حد جدایش جوامع در نظر می‌گیرد. همچنین مساحت نواحی نهایی ناهنجار معرفی شده به وسیله این روش به مراتب کمتر از روش‌های سنتی تعیین نواحی ناهنجار است که این امر سبب کاهش قابل ملاحظه هزینه‌های اکتشافی در مراحل آتی می‌گردد، اما به طور کلی توانایی عمده این روش، در آسانی درک، اجرا و قابلیت محاسبه کمی دقیق مقادیر آستانه ناهنجار است [۳۲]. روش‌های ساختاری به روش‌های غیرساختاری برتری دارد، زیرا در روش‌های ساختاری مختصات نقاط در تعیین ناهنجاری‌ها تاثیرگذارند و وجود چند نمونه ناهنجار در کنار یکدیگر می‌تواند موجب تقویت آن‌ها شود. برعکس وجود یک نمونه ناهنجار در بین جامعه‌ای از نمونه‌های زمینه از اهمیت آن می‌کاهد. این همان اثری است که باید در تفسیر ناهنجاری‌ها مورد توجه قرار گیرد [۳۳]. در این پژوهش پس از جمع‌آوری کلیه داده‌های ژئوشیمی منطقه سوناجیل و آماده‌سازی داده‌ها، برای انجام پردازش‌های آماری از روش‌های تک‌متغیره و چندمتغیره استفاده شده است. در نهایت با استفاده از نتایج به دست آمده، نقشه توزیع ژئوشیمیایی زون اپی‌ترمال تولید شده است. در مرحله بعد با استفاده از روش فرکتال، نقشه‌های ناهنجاری عناصر طلا و مس در محدوده اپی‌ترمال سوناجیل ترسیم و جوامع ناهنجاری به تفکیک تعیین مکان گشته، نتایج این دو روش مقایسه شده و نواحی مستعد اکتشاف معرفی شده‌اند. تاکید می‌شود که دیتابیس مورد استفاده، تلفیقی از تمام داده‌های معتبر موجود بوده است.

است [۱۴]. توزیع غیرعادی جمعیت ژئوشیمیایی عناصر یاد شده با کانی سازی اپی ترمال همخوانی دارد. در بررسی آماری چند متغیره اگر توزیع داده ها نرمال نباشد باید از روش آنالیز فاکتوری برای تفسیر تغییرپذیری داده ها و عوامل موثر در آنها استفاده کرد. این روش ها نسبت به توزیع داده ها حساس نیستند [۳۴]. در این تحقیق آنالیز مولفه های اصلی (Principal components) با نرم افزار SPSS انجام گرفته است که نتایج آن در کانسار سوناجیل در جدول ۳، ارایه گردیده است. بر این اساس در کانسار سوناجیل؛ نتیجه آمار فاکتوری، دو فاکتور ۱ و ۲ تغییرپذیری داده ها را توجیه می کند. عامل ۱، با مقادیر ویژه ۲/۸۰ بیش از ۴۶٪ تغییرپذیری داده ها را توجیه می کند از آنجا که عناصر طلا، نقره، آرسنیک، آنتیموان، بیسموت و مس در این عامل حاضرند، بنابراین این عامل به کانی سازی نوع اپی ترمال نسبت داده می شود. عامل ۲، حدود ۱/۵٪ مقادیر

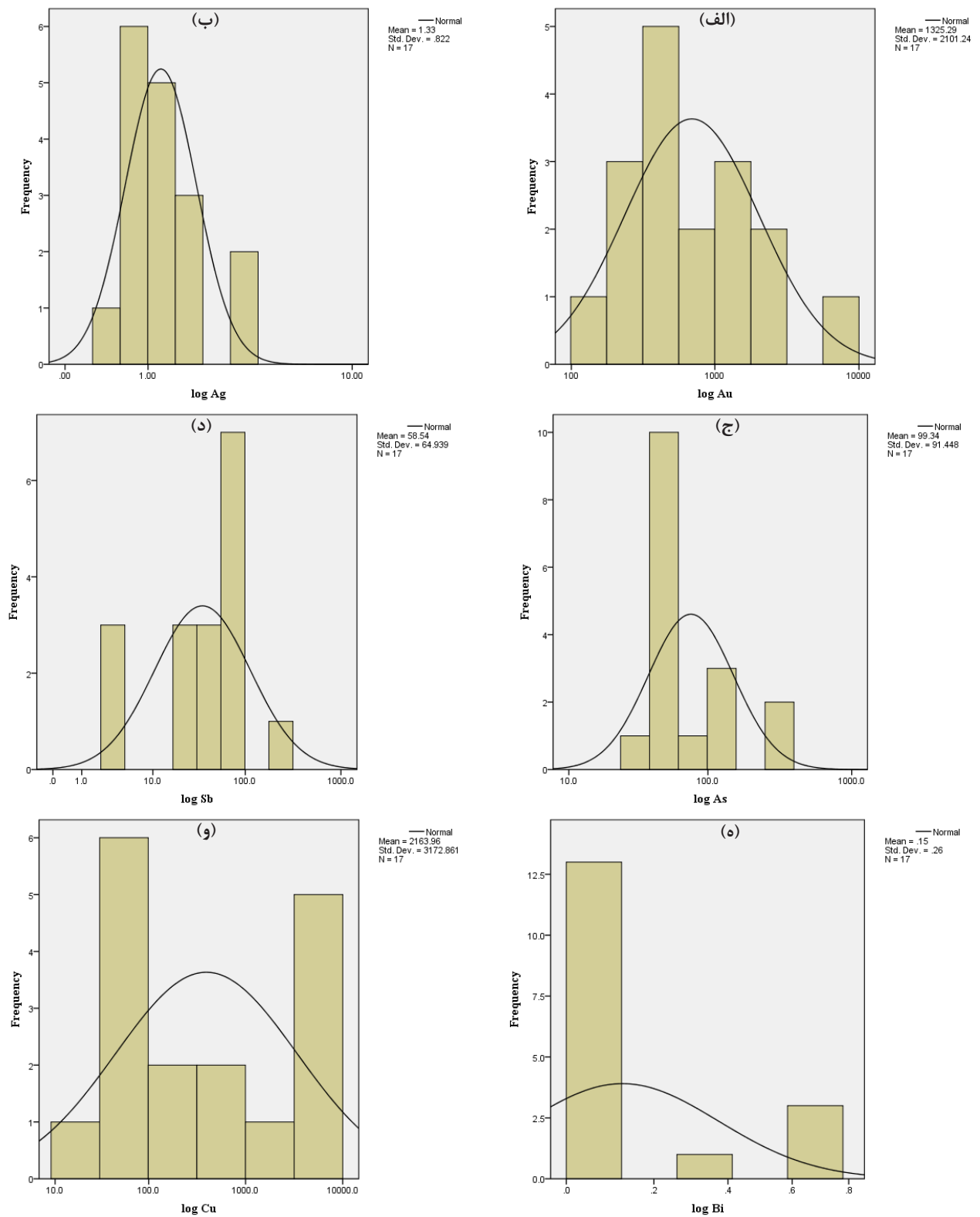
میان، میانگین، مد، خطای استاندارد میانگین، انحراف معیار، کشیدگی و چولگی ارایه گردیده است. با استفاده از پارامترهای آماری، چولگی و کشیدگی می توان به نرمال بودن یا لاگ نرمال بودن جوامع پی برد. هرچه این دو مقدار به ترتیب به صفر و ۳ نزدیکتر باشند، آن جامعه نرمال تر خواهد بود. چنانچه این کشیدگی به سمت راست بوده و چولگی مثبت باشد نشان دهنده فرآیندهای دگرسانی و کانی سازی است، اما اگر کشیدگی به سمت چپ بوده و چولگی منفی باشد نشان دهنده فرآیندهای ویژه ای مانند تهی شدگی عنصرها در پی فرآیندهای فروشست است. هیستوگرام داده های لگاریتمی نمونه های ژئوشیمیایی طلا، نقره، آرسنیک، آنتیموان، بیسموت و مس محدوده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. اگر منحنی پراکندگی آماری داده های زمین شیمی متقارن و زنگوله ای شکل باشد، نشانگر نبود ارتباط با پدیده های دگرسانی، کانی سازی و نظایر آن

جدول ۲: پارامترهای آماری محاسبه شده داده های ژئوشیمیایی بخش اپی ترمال سوناجیل

عناصر پارامتر	طلا	نقره	آرسنیک	آنتیموان	بیسموت	مس
میانگین	۱۳۲۵/۲۹	۱/۳۳۱۸	۹۹/۳۳۵	۵۸/۵۳۵	۰/۱۴۷	۲۱۶۳/۹۶۵
میان	۴۸۸/۰۰	۱/۰۸۰۰	۵۷/۸۰۰	۴۹/۹۰۰	۰/۰۰۰	۲۰۲/۰۰۰
مد	۱۴۲	۰/۴۷	۴۶/۲	۲/۹	۰/۰	۲۸/۵
انحراف معیار	۲۱۰۱/۲۴۵	۰/۸۲۲۰۸	۹۱/۴۴۸۴	۶۴/۹۳۸۵	۰/۲۶۰۱	۳۱۷۲/۸۶۰۶
واریانس	۴۴۱۵۲۳۰/۲۲۱	۰/۶۷۶	۸۳۶۲/۸۱۹	۴۲۱۷/۰۱۱	۰/۰۶۸	۱۰۰۶۷۰۴۴/۶۷۹
مینیمم	۱۴۲	۰/۴۷	۳۸/۵	۲/۹	۰/۰	۲۸/۵
ماکزیمم	۸۸۹۰	۳/۴۸	۳۵۳/۰	۲۸۵/۰	۰/۷	۹۸۹۰/۰
مجموع	۲۲۵۳۰	۲۲/۶۴	۱۶۸۸/۷	۹۹۵/۱	۲/۵	۳۶۷۸۷/۴
چارک ۲۵	۳۴۲/۵۰	۰/۸۰۵۰	۴۶/۷۰۰	۲۱/۶۵۰	۰/۰۰۰	۵۴/۷۵۰
چارک ۵۰	۴۸۸/۰۰	۱/۰۸۰۰	۵۷/۸۰۰	۴۹/۹۰۰	۰/۰۰۰	۲۰۲/۰۰۰
چارک ۷۵	۱۴۱۵/۰۰	۱/۵۵۰۰	۱۳۶/۰۰۰	۷۰/۴۵۰	۰/۲۰۰	۴۱۱۵/۰۰۰

جدول ۳: نتایج آنالیز فاکتوری به روش مولفه های اصلی داده های ژئوشیمیایی سوناجیل

مولفه	مقادیر ویژه اولیه		مولفه ماتریس	مولفه	
	مجموع	درصد واریانس	درصد تجمعی	۱	۲
طلا	۲/۸۱۳	۴۶/۸۸۹	۴۶/۸۸۹	آنتیموان	۰/۹۲۱
نقره	۱/۵۵۲	۲۵/۸۷۲	۷۲/۷۶۰	طلا	۰/۸۹۷
آرسنیک	۰/۷۷۲	۱۲/۸۶۱	۸۵/۶۲۱	نقره	۰/۷۴۸
آنتیموان	۰/۴۲۴	۷/۰۷۱	۹۲/۶۹۲	آرسنیک	۰/۶۰۷
بیسموت	۰/۳۳۵	۵/۵۸۸	۹۸/۲۸۰	بیسموت	-
مس	۰/۱۰۳	۱/۷۲۰	۱۰۰/۰۰۰	مس	۰/۴۶۹
				مجموع	۲/۸۱۳
					۱/۵۵۲



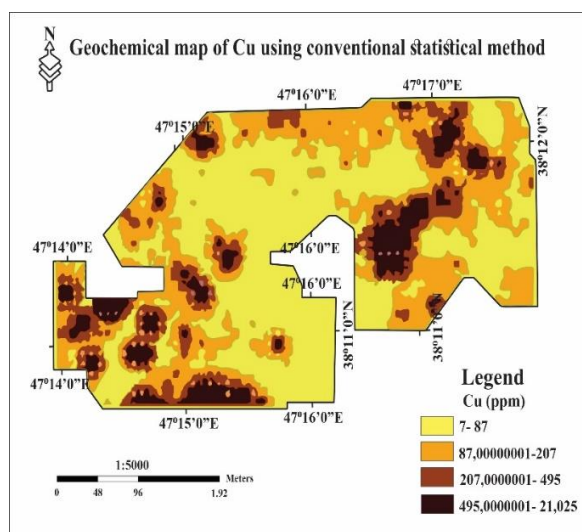
شکل ۱۳: هیستوگرام عناصر الف (Au، ب) Ag، ج) As، د) Sb، ه) Bi، و) Cu در بخش اپی ترمال سوناجیل (که چولگی عناصر (به استثناء مس) به سمت راست است).

توجه به توزیع فضایی داده‌ها و نیز عدم توجه به شکل هندسی ناهنجاری‌ها بوده [۳۶] و توانایی بیان بیشتر پیچیدگی‌های موجود در طبیعت را ندارند [۳۱]، بنابراین دانشمندان برای بیان این پیچیدگی‌ها به هندسه خود طبیعت یا همان هندسه فرکتال روی آوردند. پروفیسور ماندلبروت برای اولین بار در سال ۱۹۸۳ هندسه فرکتال را بنیان نهاد [۳۷]. در دو دهه اخیر، روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتال با توجه به خصوصیتی مانند استفاده از تمام داده‌های واقعی، در نظر گرفتن شکل هندسی در برگزیده عیارهای گوناگون و توجه به نوع توزیع داده‌ها، از بهترین روش‌ها در جدایش ناهنجاری ژئوشیمیایی از زمینه با ضریب اطمینان بالا هستند [۳۳]. به طور کلی داده‌های ژئوشیمیایی رفتار مولتی فرکتالی دارند که بیانگر تغییرات ژئوشیمیایی، دگرسانی، کانی‌سازی و به دنبال آن مراحل غنی‌شدگی یک عنصر است [۳۸]. از آنجا که ساز و کار ناحیه‌بندی بافتی ذخایر اپی ترمال یک فرآیند پیچیده و در عین حال مرتبط با پدیده‌های زمین‌شناختی است، بنابراین در عمل نیازمند دستیابی به الگوی توزیع غیرخطی داده‌ها و تحلیل مکانی آنها به روش فرکتال هستیم [۳۹]. به طور کلی وجود ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی باعث افزایش بعد فرکتال متغیرهای ژئوشیمیایی می‌شود و بر این اساس می‌توان مراحل مختلف توزیع عناصر را بر اساس اختلاف در بعد فرکتالی جدا کرد. به این‌صورت جامعه ناهنجاری، حد آستانه و زمینه در یک منطقه شناسایی می‌شود. روش‌های مختلفی برای تعیین بُعد

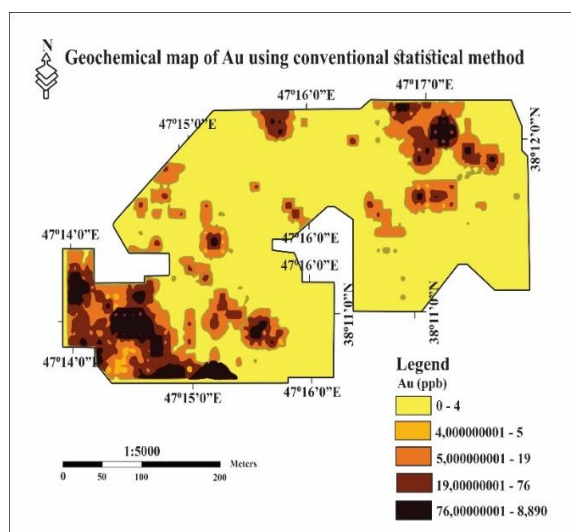
ویژه را به خود اختصاص داده و ۲۵٪ تغییرپذیری داده‌ها را توجیه می‌کند. از آنجا که عناصر آرسنیک، بیسموت و مس در این عامل حاضرند، بنابراین این عامل به وجود کانی‌های سولفاسالتی از جمله تتراهیدریت و نظایر آن (سولفید با شبه‌فلزات آرسنیک و کانی‌های مس‌دار) نسبت داده می‌شود. با توجه به تنوع لیتولوژی، کثرت عوامل ناهمگن‌ساز، تعدد پارامترهای دخیل در کانی‌سازی، نحوه مهاجرت و جایگیری عناصر و نظایر آن، نحوه توزیع نمونه‌ها باید در نقشه طراحی به گونه‌ای باشد که حوضه‌ای از منطقه فاقد اطلاعات نباشد [۳۵]. نقشه‌ها که نتایج برداشت‌ها، تحلیل‌ها و تخمین‌ها را نشان می‌دهند با استفاده از داده‌های لگاریتمی عناصر و به صورت نقشه‌های طیفی ترسیم شده‌اند، بنابراین برای تولید نقشه ابتدا تخمین داده‌ها با استفاده از روش IDW در نرم‌افزار ArcMap انجام شده، سپس داده‌های عنصر مورد نظر رتبه‌بندی گردیده و در نهایت ناهنجاری‌های آن عنصر مشخص شده است. پس از بررسی مقدماتی، نقشه مناطق ناهنجار عناصر Cu, Au با استفاده از روش آمار کلاسیک در کانسار سوناجیل ترسیم گردیده است (شکل ۱۴-الف و ب).

۳-۲-۲- روش فرکتال

استفاده از روش‌های غیرساختاری که مبتنی بر آمار کلاسیک است؛ دارای نقایصی از قبیل شرط تبعیت از توزیع نرمال، حذف تعدادی از داده‌ها به عنوان خارج از ردیف، عدم



(ب)



(الف)

شکل ۱۴: نقشه ژئوشیمیایی عناصر الف (Au، ب) Cu با استفاده از روش آمار کلاسیک در سوناجیل

فرکتالی الگوهای ژئوشیمیایی برای جدایش ناهنجاری از زمینه به کار برده شده است که از آن جمله می‌توان به مدل‌های عیار- حجم، عیار- مساحت، عیار- محیط، طیف توان- مساحت، عیار- فاصله و عیار- تعداد اشاره کرد. از طرفی با توجه به اینکه توزیع تمرکز عناصر ناهمگن و نامنظم است، در بسیاری از مطالعات از مدل‌های فرکتالی عیار-مساحت و عیار-تعداد به عنوان یکی از قدرتمندترین مدل‌ها برای جدایش جوامع ناهنجاری از زمینه به طور گسترده استفاده شده است [۲۷]. این جوامع به دلیل ماهیت فرکتالی توزیع عناصر در طبیعت با ساختارهای زمین‌شناسی منطقه از قبیل واحدهای سنگ‌شناسی، گسل‌ها، دگرسانی‌ها، ژئوشیمی و کانی‌شناسی در ارتباط هستند. اعتبارسنجی روش‌های فرکتالی غالباً بر اساس انطباق نقشه‌های زمین‌شناسی با ناهنجاری‌ها بوده است [۱۹].

روش فرکتالی عیار- مساحت (C-A)، توسط چنگ در سال ۱۹۹۴ مطرح گردیده است. در این مدل میزان مساحتی که هر عیار در منطقه مورد مطالعه اشغال می‌کند، مورد نظر است که با افزایش عیار عنصر، میزان مساحت اشغالی به وسیله آن عنصر کاهش می‌یابد. رابطه مورد استفاده در این روش به صورت رابطه ۱ است.

$$A(\mu \geq X_0) = F \cdot X_0^\alpha \quad (1)$$

که در آن:

$A(\mu \geq X_0)$: مساحت تجمعی محصور شده به وسیله خطوط هم‌عیاری است که عیار متناظر آن‌ها بزرگتر یا مساوی X_0 است.

α : پارامتری مرتبط با بعد خط هم‌عیار است.

در یکسری داده ژئوشیمیایی با دو گروه فرکتالی متصل با همدیگر مواجه هستیم. یک گروه زمینه و گروه دیگر ناهنجاری است. در اینجا برای جدایش جامعه ناهنجار، غلظتی بحرانی که در محدوده آن بعد فرکتال تغییر می‌کند یعنی از بعد کمتر زمینه به بعد بیشتر ناهنجاری تغییر می‌کند، حد آستانه‌ای نام دارد، بنابراین ابتدا با استفاده از لگاریتم عیار عناصر (محور x) و لگاریتم مساحت (محور y) نمودار تمام لگاریتمی عنصر مورد نظر رسم می‌گردد. از آنجا که مدل‌های فرکتالی نوعی روابط نمایی بین این پارامترها برقرار می‌کند، بنابراین نمودار آن‌ها در دستگاه مختصات تمام لگاریتمی به صورت خط راست درمی‌آید. در اینصورت پس از رسم نمودار عیار- مساحت (C-A)، مرز بین خطوط دارای عیاری است که تغییر جامعه

(حدود آستانه‌ای) را نشان می‌دهد. در نتیجه حد آستانه‌ای به راحتی از روی نقطه تقاطع دو خط قابل قرائت است [۳۵]. لازم به ذکر است که به طور کلی در این نمودارها، شکست اول معرف جدایش جوامع زمینه محلی و زمینه ناحیه‌ای و شکست دوم معرف حد آستانه‌ای و شکست سوم نیز معرف ناهنجاری است [۳۲]. با رسم منحنی عیار- مساحت در سوناجیل، داده‌های عنصر Au با ۳ شکست به ۴ جامعه و عنصر Cu با ۴ شکست به ۵ جامعه تقسیم گردیده‌اند (شکل ۱۵-الف). در منحنی لگاریتمی عیار- مساحت می‌توان به این نکته پی برد که متناسب با بالا رفتن عیار طلا، بعد فرکتالی عیار در مقابل مساحت کاهش پیدا می‌کند که این نکته اساس و پایه روش‌های زمین‌آماری از جمله روش فرکتالی عیار- مساحت برای تفکیک جوامع زمین‌شیمیایی است [۴۰]. نمودارهای لگاریتمی حاصل از روش عیار- مساحت بیانگر تغییر در شرایط زمین‌شناسی و به ویژه کانی‌سازی است [۲۷].

روش فرکتالی عیار- تعداد (C-N)، به صورت شاخه‌ای از مدل عیار- مساحت (C-A) توسط موآ و همکاران در سال ۲۰۰۴، برای تعیین زمینه و عیارهای حد آستانه ناهنجاری پیشنهاد شده است. در این روش تفاوت‌های زمین‌شناسی در نمودار تمام لگاریتمی (Log-Log) حاصل از روش‌های فرکتالی C-A, C-N, ... نشان داده می‌شوند. بر روی نمودار انفعال بین خط مستقیم و عیار مربوط به آن، به عنوان حد آستانه برای جدایش عیار به صورت اجزاء مختلف استفاده می‌گردد که نشان‌دهنده فاکتورهای مسبب اختلاف مثل اختلاف زمین‌شناسی و فرآیندهای ژئوشیمیایی هستند [۲۷]. رابطه کلی این روش به شرح رابطه ۲ است:

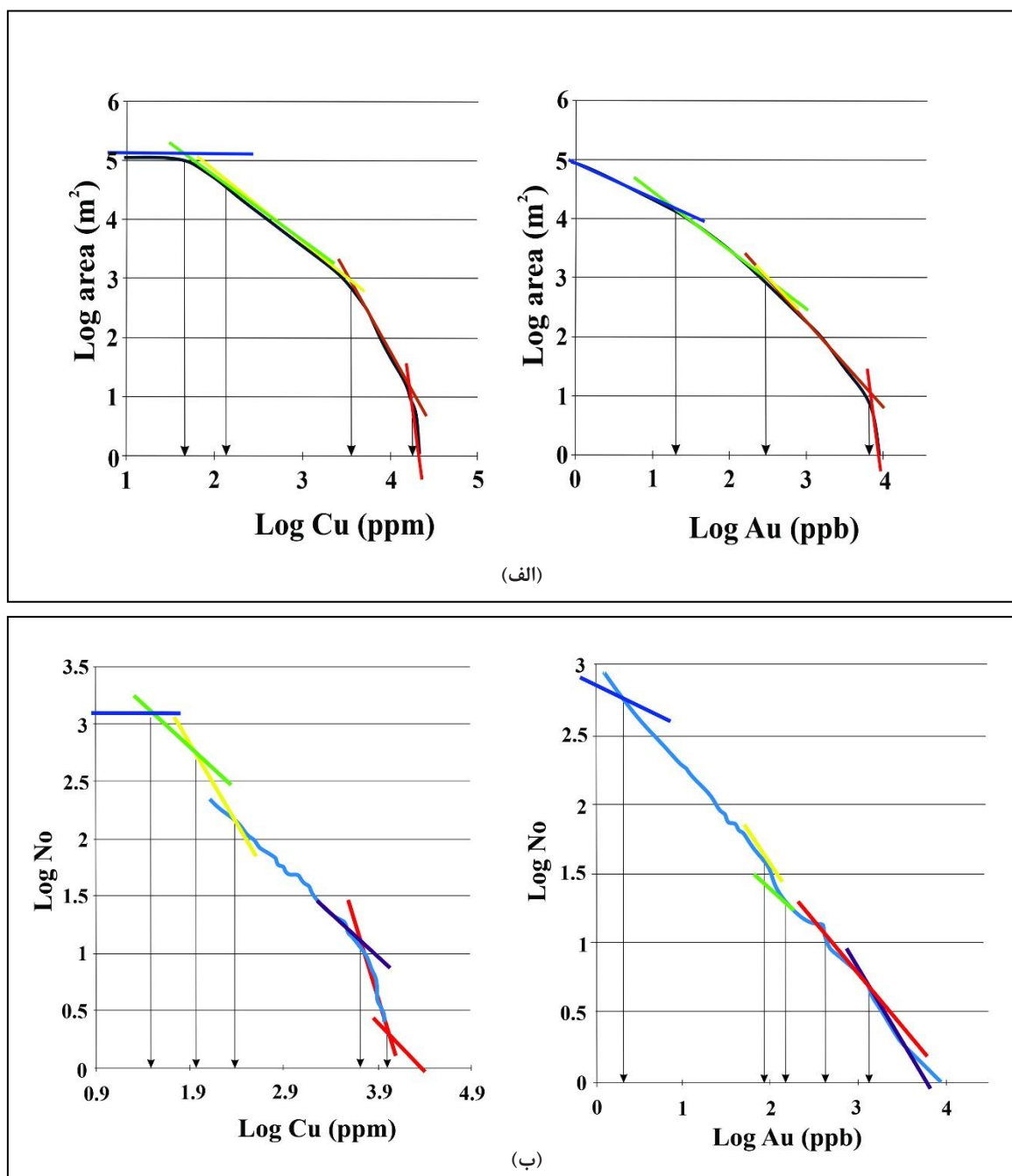
$$N(\geq \rho) \propto \rho^{-\beta} \quad (2)$$

که در آن:

$N(\geq \rho)$: تعداد نمونه‌ها با عیار بزرگتر از عیار ρ

ρ : عیار عناصر

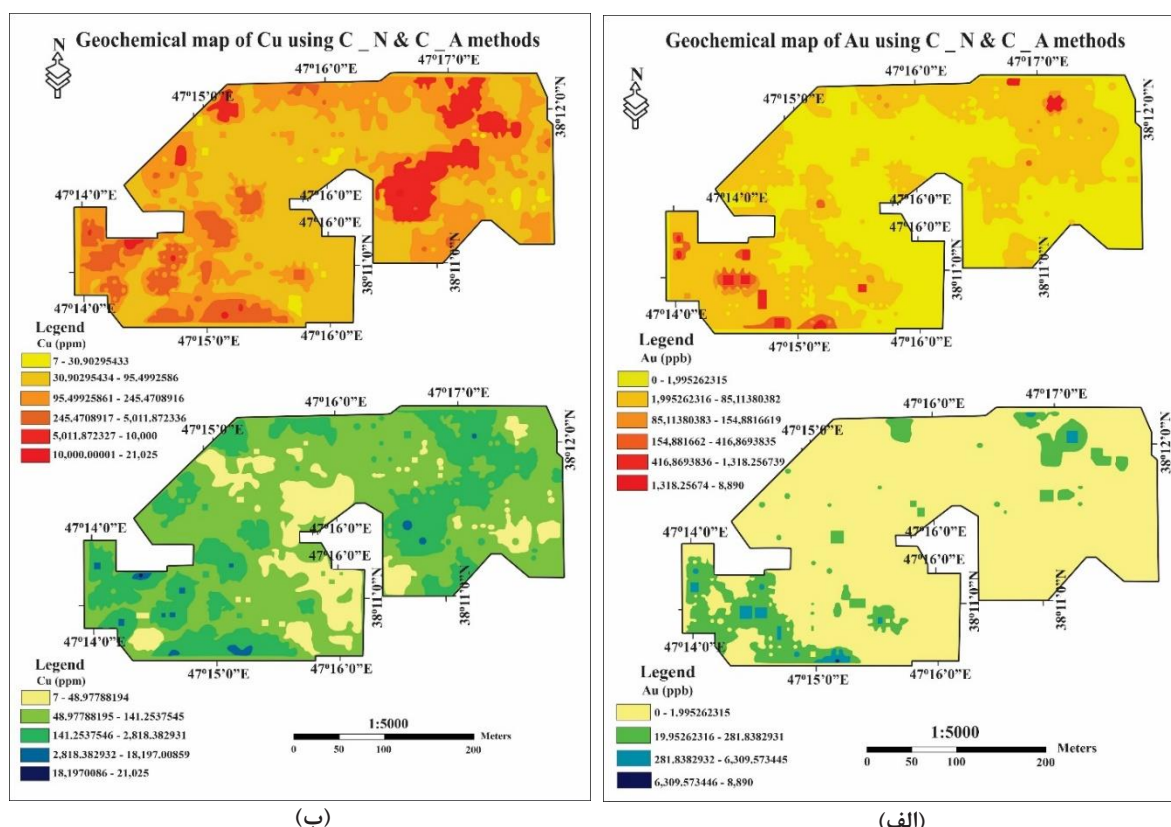
β : بعد فرکتالی را نشان می‌دهند. در محدوده سوناجیل، داده‌های عناصر Cu, Au با ۵ شکست به ۶ جامعه تفکیک شده است (شکل ۱۵-ب). با تاملی مختصر در منحنی لگاریتمی عیار- تعداد می‌توان به این نکته پی برد که متناسب با بالا رفتن عیار طلا، بعد فرکتالی عیار در مقابل تعداد کاهش پیدا می‌کند که این نکته اساس و پایه روش فرکتالی عیار- تعداد برای تفکیک جوامع زمین‌شیمیایی است [۳۷]. جهت ارایه نقشه حاصل از نتایج روش عیار- مساحت و



شکل ۱۵: الف) نمودار لگاریتمی عناصر Cu, Au با استفاده از روش عیار-مساحت در سوناجیل، ب) نمودار لگاریتمی عناصر Cu, Au با استفاده از روش عیار-تعداد در سوناجیل

تمیز شده، به وسیله نرم افزار ArcMap بسته به نوع داده‌ها، با استفاده از روش IDW، نقشه درونیابی شده رسم گردیده است و در نهایت مناطق ناهنجار حاصل از روش عیار-مساحت و عیار-تعداد عناصر Cu, Au در معدن سوناجیل، نشان داده شده است (شکل ۱۶-الف و ب). همان‌طور که مشخص است

عیار-تعداد که نشانگر جدایش ناهنجاری از زمینه است، ابتدا نقشه کنتروری و یا نقشه شبکه‌بندی شده منطقه اکتشافی تهیه شد. پس از رسم نقشه شبکه‌بندی داده‌ها، برای هر سلول عیاری وجود دارد که بر این اساس رتبه‌بندی گردید. در این تحقیق نیز پس از تعیین حدود آستانه‌ای و جوامع



شکل ۱۶: نقشه ژئوشیمیایی عناصر الف (Au، ب) Cu با استفاده از روش‌های عیار - مساحت و عیار - تعداد در سوناجیل

است. دگرسانی‌های فیلیک، پروپیلیتیک، آرژیلی، سیلیسی و تورمالین‌زایی در بخش اپی‌ترمال همراه با کانی‌سازی سولفیدی و اکسیدی در سطح تایید شده است. کائولینیت، کوارتز، آلونیت و کانی‌های هیدروکسیل‌دار مهم‌ترین کانه‌های میزبان طلا هستند. بافت کانی‌ها در اپی‌ترمال از نوع پرکننده فضاهای خالی (شانه‌ای و لایه‌ای متقارن) و در سنگ‌های کربناته و توف‌ها به صورت جانشینی است. تجزیه نمونه‌های کانسنگ نشان می‌دهد که عیار میانگین طلا در رگه سیلیسی مناسب و در حدود ۲ ppm است. کانه‌زایی در بخش غربی محدوده عمدتاً در ارتباط با تراکم بیشتر گسلش به عنوان معبر سیالات کانه‌زا در طلای اپی‌ترمال بوده است، بنابراین ارتباط ژنتیکی بین سیالات با ماگماتیسم و زمین‌ساخت در سوناجیل وجود دارد. هر چند با وجود سنگ میزبان رسوبی کربناتی و آتشفشانی، کنترل‌کننده قوی ساختاری کانه‌زایی گسل، دگرسانی‌های فیلیک، پروپیلیتیک، آرژیلی، سیلیسی و تورمالین‌زایی همراه با سولفیدی‌شدن، پاراژنر عنصری Au، Ag، As، Sb، و رخداد کانی طلا (به صورت ترکیب الکتروم حاوی پلاتین) و به شکل همراهی با کوارتز در اندازه کمتر از ده میکرون

بیشترین ناهنجاری عنصر Au منطبق با رگه‌های سیلیسی منتسب به اپی‌ترمال در بخش غربی کانسار سوناجیل و کمترین ناهنجاری مربوط به شمال‌شرق محدوده مطالعاتی است. بر این اساس ناهنجاری‌های به دست آمده در این روش‌ها نیز با ناهنجاری‌های به دست آمده در روش آمار کلاسیک همخوانی دارد و تنها اختلاف آن‌ها این است که در روش عیار - تعداد یک رتبه (Class) بیشتر تفکیک شده است و این عامل باعث تفکیک جزئی‌تر ناهنجاری‌ها گردیده است. با توجه به دقت بسیار بالای نقشه‌های ترسیم شده به وسیله این مدل در تفکیک جوامع کانی‌سازی و جدایش ناهنجاری‌های مختلف از زمینه، برای معرفی مناطق امیدبخش معدنی در سوناجیل از نقشه‌های فرکتال استفاده شده است.

۳- نتیجه‌گیری

سنگ میزبان کانی‌زایی طلا در غرب کانسار سوناجیل اغلب کربناته، رسوبی و یا به صورت جانشینی در سنگ آهک سیلیسی است. کانه‌زایی طلا عمدتاً به صورت رگه-رگچه‌ای سیلیسی و نیز به صورت رگه در حاشیه توده و ذرات افشان

مجموعه‌هایی از میانبارهای سیال در اغلب ذخایر پورفیری رایج بوده و به عنوان نشانه‌هایی از تشکیل سیالات فوق شور در اثر وقوع جوشش در نظر گرفته می‌شود. نحوه همگن شدن میانبارهای سیال هالیت‌دار که برخی با انحلال نهایی هالیت و برخی با ناپدید شدن فاز بخار رخ می‌دهد نشان‌دهنده به دام افتادن این سیالات در میدان‌های پایداری مایع فاقد بخار و حاوی بخار است که از نظریه جوشش حمایت می‌کند. (۵) در ترازهای بالاتر سیستم اپی‌ترمال، کانی‌زایی طلا به عنوان نتیجه فروپاشی ساختار دارای کانه به وجود آمده است که به تولید برش‌های هیدروترمال حاوی طلا منجر شده است. باتوجه به ماهیت کانه‌زایی طلا در سوناجیل که با تیپ اپی‌ترمال کم سولفید همخوانی دارد، امکان مشاهده طلا در مقاطع صیقلی معمولی فراهم نبود ولی اولین بار با به کارگیری روش آنالیز پیشرفته MLA ضمن رویت طلا، شکل، اندازه، نحوه درگیری و ترکیب آن مشخص گردید.

۴- سپاس‌گزاری

بدینوسیله از مسوولان محترم شرکت عقاب طلایی ارسباران، شرکت کومه معدن و سایر دست‌اندرکاران محدوده سوناجیل به خاطر همکاری در بازدید صحرایی و ارائه اطلاعات فنی تشکر و سپاسگزاری می‌گردد. از آقای دکتر قبادی که امکانات آنالیز MLA را در آزمایشگاه ژئومتالورژی Actlab کانادا فراهم کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Heidari, S. M., Afzal, P., Ghaderi, M., and Sadeghi, B. (2021). "Detection of mineralization stages using zonality and multifractal modeling based on geological and geochemical data in the Au-(Cu) intrusion-related Gouzal-Bolagh deposit, NW Iran". Ore Geology Reviews, 139: 104561.
- [2] Heidari, S. M., Afzal, P., and Sadeghi, B. (2022). "Miocene tectono-magmatic events and gold/poly-metal mineralizations in the Takab-Delijan belt, NW Iran". Geochemistry, 83: 125944.
- [3] رحمانی، ش.، زمانیان، ح.، زارعی سهامیه، ر.؛ ۱۳۹۸؛ "ویژگی ژئوشیمیایی سنگ‌های آذرین مرتبط با کانسار طلای اپی‌ترمال لوبین - زرده، شمال غرب ایران". سال بیست و نهم، شماره ۱۱۴، ص ۲۸۶-۳۰۲.
- [4] Simmons, S. F., White, N. C., and John, D. A. (2005). "Geological characteristics of epithermal precious and base-metal deposits". In: Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., and Richards, J. P.

در پیریت که مهم‌ترین کانی سولفیدی حامل طلا در ذخایر تیپ کارلین است شباهت‌هایی با تیپ اخیر دارد؛ ولی عدم مشاهده کانی‌های رآلگار و اورپیمان، وجود برش‌های گرمایی، بافت کلوفر، بافت اسفنجی و دندان سگی و سایر مستندات مطالعه کنونی دلالت بر آن دارد که کانی‌سازی طلا در محدوده سوناجیل از نوع اپی‌ترمال سولفید پایین است. تحلیل مجدد بر روی نتایج آنالیز ژئوشیمیایی داده‌ها با روش‌های آمار کلاسیک، مدل فرکتالی عیار-تعداد و عیار-مساحت نشان داد که روش فرکتالی عیار-تعداد بیشترین تفکیک را در منطقه دارد که تفسیر نقشه‌ها بر اساس نتایج این روش است. همان‌طور که ملاحظه شد، بیشترین ناهنجاری عنصر Au منطبق با رگه سیلیسی منتسب به اپی‌ترمال در بخش غربی کانسار سوناجیل و کمترین ناهنجاری مربوط به شمال شرق محدوده مطالعاتی است، بنابراین نتایج به دست آمده از روش‌های فرکتالی نه تنها در سطح و در مطالعات زیرسطحی نیز اعتبار بیشتری دارد. با توجه به هاله‌های دگرسانی و نیز کانی‌زایی‌های مشاهده شده در سطح و آنالیز نقشه‌های ناهنجاری با روش فرکتالی نشانگر وجود و پتانسیل بالای منطقه غرب سوناجیل از دیدگاه طلاست. بررسی‌های آماری تک متغیره و چند متغیره از جمله تحلیل مولفه‌های اصلی داده‌های ژئوشیمی با سایر روش‌های استفاده شده در پژوهش همخوانی دارد.

در مورد شرایط تشکیل کانه در کانسار سوناجیل، به ترتیب موارد زیر نتیجه‌گیری می‌شود: (۱) هر دو نوع کانسار مس پورفیری و اپی‌ترمال طلا در معدن سوناجیل در ارتباط با توسعه تدریجی کمپلکس نئوژن پسین ماگماتیک-پلوتونیک هستند. (۲) کانی‌های مس پورفیری در زون بیرونی کنتاکت پروکسیمال توده ماگمایی در حال سرد شدن تشکیل می‌شوند، تقریباً ده‌ها سال پس از نفوذ، به علت سرد شدن تدریجی حرارت محلول هیدروترمال و ثابت نگه‌داشتن میدان حرارتی اطراف توده نفوذی، تشکیل شده است. در این مرحله حدود ۵۰ درصد از سنگ‌های ماگمایی متبلور شده بودند. (۳) نهشته‌ها در شرایط نیمه‌تعادلی اتفاق می‌افتد که در طول فرآیند کلی سرد شدن سیال هیدروترمال باقی مانده است. به همین دلیل است که کانسار مس پورفیری با توالی عظیم عمودی و افقی توده مشخص می‌شود که در پس زمینه آنها مس کم عیار وجود دارد. (۴) انواع مختلفی از میانبارهای سیال غنی از بخار، غنی از مایع و میانبارهای هالیت‌دار و تک فاز گاز از نمونه‌های زون کانه‌زایی منطقه سوناجیل یافت می‌شود. چنین

- [۱۶] حسین زاده، ق.؛ ۱۳۸۷؛ "مطالعات زمین‌شناسی، ژئوشیمی، سیالات درگیر، کانی‌سازی، دگرسانی و ژنز کانسار مس پورفیری سوناجیل شرق هریس (استان آذربایجان شرقی)". رساله دکتری، دانشگاه تبریز، ۲۱۱ صفحه.
- [17] Noori, L., Beiranvandpour, A., Askari, G., Taghipour, N., Pradhan, B., Lee, C.-W., and Honarmand, M. (2019). "Comparison of Different Algorithms to Map Hydrothermal Alteration Zones Using ASTER Remote Sensing Data for Polymetallic Vein-Type Ore Exploration: Toroud – Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran". *Journal of Remote Sensing*, (11)5: 495. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11050495>.
- [18] Berlianto, B. (2003). "Detection and mapping of hydrothermal alteration pattern related to copper-gold porphyry in kashmar-khaf belt, North east Iran". M. S. Thesis, ITC, Netherlands.
- [19] Wilkinson, J. J. (2001). "Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits". *Lithos*, 55(1-4): 229-272.
- [20] Chitalin, A. F., Baksheev, L. A., and Nikolaev, Yu. N. (2024). "Porphyry Copper and Epithermal Gold–Silver Mineralization of the Baimka Ore Zone, Western Chukotka, Russia". *Geology of ore deposits*, 66: 21-41.
- [21] Albinson, T., Norman, D. I., Cole, D., and Chomiak, B. (2001). "Controls on formation of low- sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constrains from fluid inclusion and stable isotope data". *Society of Economic Geologist, Special Publication*, 8: 1-32.
- [22] Asli, B., Mokhtari, M. A. A., and Jamali, H. (2023). "Geology, geochemistry, fluid inclusion data, stable isotope characteristics, and ore genesis of the Barout Aghaji gold deposit, NW Zanjan, Iran". *Journal of Asian Earth Sciences*: X, 9: 100139.
- [۲۳] سازمان نظام مهندسی معدن؛ ۱۳۹۵؛ "گزارش پایانی اکتشاف محدوده سوناجیل در مقیاس ۱/۵۰۰۰". ۱۹۶ صفحه.
- [24] Hofstra A. H., and Cline J. S. (2000). "Characteristics and models for Carlin-type gold deposits". *Reviews in Economic Geology*, 13: 163-220.
- [25] Kylie, P. (2007). "Application of lithogeochemistry to gold exploration in the St Ives goldfield, Western Australia". *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 7(2): 99-108.
- [۲۶] احمدی، ف.، محمدپور، م.؛ ۱۳۹۷؛ "بررسی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌های جهت تعیین کانه‌زایی طلای پهنه برشی منطقه آلود در استان کردستان". فصلنامه علمی پژوهشی زمین‌شناسی محیط‌زیست، سال دوازدهم، شماره ۴۴، ص ۳۵-۱۹.
- [۲۷] دایا، ع. ا.، مرادی، ر.؛ ۱۳۹۷؛ "مقایسه مدل‌های فرکتالی عیار-تعداد (C-N) و عیار-مساحت (C-A) در جداسازی (Eds.), *Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume: 1905-2005*, Littleton, CO, U.S.A.: Society of Economic Geologists, 485-522.
- [5] Foster, R. P. (Ed.) (1996). "Gold Metallogeny and Exploration". London: Chapman and Hall, pp. 432.
- [6] Sillitoe, H. R., and Hedenquist, J. W. (2003). "Linkage between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits". *Society of Economic Geologist, Special Publication*, 10: 315-343.
- [7] Ngang, T. C., Emmanuel Suh, C., Wagner, T., Bafon, T. G., Fusswinkel, T., and Vishiti, A. (2024). "Epithermal Ag–Au mineralization at Galim-Legalgorou, Cameroon Volcanic Line: insights from alteration mineralogy and mineral chemistry of electrum and sphalerite". *International Journal of Earth Sciences*, 113: 1285-1301.
- [8] Goldfarb, R. J., Groves, D. I., and Gardoll, S. (2001). "Orogenic gold and geologic time: a global synthesis". *Ore Geology Reviews*, 18: 1-75.
- [9] Singer, D. A. (1986). "Descriptive model of Cyprus massive sulfide". In: Cox, D. P., and Singer, D. A. (Eds.), *Mineral deposit models: U.S. Geological Survey Bulletin* 1693, pp. 131.
- [10] Wang, Q. F., Deng, J., Liu, H., Yang, L. Q., Wan, L., and Zhang, R. Z. (2010). "Fractal models for ore reserve estimation". *Ore Geology Reviews*, 37: 2-14.
- [۱۱] رضانی، ط.، معانی جو، م.، علیپور، س.؛ ۱۳۹۷؛ "مطالعه عوامل مؤثر بر کانه‌زایی معدن مس-طلای پورفیری-اپیترمال سوناجیل، با استفاده از مطالعات سنجش از دور، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی". فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال دوازدهم، شماره ۴۸، ص ۷۹-۶۳.
- [12] Pivetta, C. P., Benedini, L., Marcos, P., Cocola, M. A., Virginia Barros, M., Gregori, D., Strazzere, L., Costa dos Santos, A., and Geraldés, M. C. (2024). "Characterization of Arroyo Verde Epithermal Deposit: Paragenesis, Mineral Geochemistry, Geochronology and Fluid Inclusions in Lower Chon Aike Volcanism, Argentina". *Geochemistry and Mineral Deposits*, 35: 62-84.
- [۱۳] نبوی، م. ح.؛ ۱۳۵۵؛ "دیباجه‌ای بر زمین‌شناسی ایران". انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- [14] Rose, A. W., and Burt, D. M. (1979). "Hydrothermal alteration in Barnes, H. L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*". New York, USA, John Wiley and Sons, 173-235.
- [15] Pirajno, F. (2009). "Hydrothermal Processes and Mineral Systems". Springer, Berlin, pp. 1250.

[۳۳] هزارخانی، ا.، سلجوقی، ب. ش.؛ ۱۳۹۵؛ "مدلسازی فرکتال و چندفرکتال داده‌های ژئوشیمیایی". انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[۳۴] حسنی پاک، ع.؛ ۱۳۸۷؛ "اصول اکتشافات ژئوشیمیایی". چاپ ششم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

[۳۵] یزدی، ز.؛ ۱۳۹۱؛ "بررسی کانه‌زایی مس در ورقه یکصد هزارم چهارگنبند". پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

[36] Davis, J. C. (2002). "Statistics and data analysis in Geology". 3th Ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 342-353.

[37] Mao, Z., Peng, S., Lai, J., Shao, Y., and Yang, B. (2004). "Fractal study of geochemical prospecting data in south area of Fenghuanshan copper deposit, Tongling Anhui". Journal of Earth Science and Environment, 26: 11-14.

[۳۸] زمیاد، م.، افضل، پ.، پورکرمانی، م.، نوری، ر.، جعفری، م.؛ ۱۴۰۰؛ "ترکیب روش‌های دورسنجی و فرکتالی برای شناسایی دگرسانی‌ها در محدوده تیرکا، شمال‌خاوری ایران". فصلنامه علمی علوم زمین، دوره سی و یکم، شماره ۴، ص ۶۸-۵۷.

[۳۹] مهرنیا، س.؛ ۱۳۹۶؛ "بررسی نقش توزیع فرکتالی سیلیس در تحولات بافتی و کانه‌زایی طلا در منطقه راوند استان قزوین". فصلنامه زمین‌شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، سال یازدهم، شماره ۴۳، ص ۲۶-۱۵.

[40] Cheng, Q., Agterberg, F. P., and Ballantyne, S. B. (1994). "The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods". Journal of Geochemical Exploration, 51(2): 109-130.

بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی از زمینه در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ سیاه رود، شمال غرب ایران". نشریه (علمی-پژوهشی) روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۱۶، ص ۹۴-۸۷.

[28] Carranza, E. J. M. (2011). "Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values". Journal of Geochemical Exploration, 110: 167-185.

[29] Sinclair, W. D. (2007). "Porphyry deposits". In: Goodfellow, W. D. (Ed.), Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, 223-243.

[۳۰] صادقی، س.، یزدی، م.، رسا، ا. و جانثاری، م.؛ ۱۴۰۰؛ "منشأیابی نهشته‌های پلاستی کواترنر با بهره‌گیری از مطالعات دورسنجی و ژئوشیمی در محدوده زواریان، جنوب غرب قم، مرکز ایران". فصلنامه کواترنری ایران (علمی-پژوهشی)، دوره هفتم، شماره ۲ و ۱، ص ۶۴۹-۶۲۹.

[31] Cheng, Q., Agterberg, F. P., and Carter, G. F. (1996). "A Spatial Analysis Method for Geochemical Anomaly Separation". Journal of Geochemical Exploration, 65: 175-194.

[32] Hosseini, S. A., Keshavarz Faraj Khah, N., Kianoush, P., Afzal, P., Ebrahimabadi, A., and Shirinabadi, R. (2023). "Integration of fractal modeling and correspondence analysis reconnaissance for geochemically high-potential promising areas, NE Iran". Results in Geochemistry, 10: 100026.