

Original Research Paper

Geology, mineralogy, geochemistry of sulfide ores and galena mineral in the Chah-Nar Pb-Zn deposit, SW Baft (Southern Sanandaj-Sirjan zone)

Mahdi Ghorbani-Dehnavi¹, Azadeh Malekzadeh-Shafaroudi^{1*}, and Mohammad Hassan Karimpour¹¹ Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2023 February 01

Accepted: 2023 May 31

Available online: 2023 September 23

Keywords:

Pb-Zn deposit

Ore Geochemistry

Galena

Chah-Nar

Sanandaj-Sirjan zone

ABSTRACT

Chah-Nar Pb-Zn deposit is located south of Rutchun plain, 110 km SW Baft, within Sanandaj-Sirjan Zone. Mineralization occurs at calitic-dolomitic marble of Rutchun complex as epigenetic with structural control. Paragenetic minerals are galena and minor sphalerite and pyrite associated with quartz, and minor calcite and dolomite, as gangue minerals. These minerals show veinlets, open space filling, breccia, and disseminated textures. Galena can be seen in the form of coarse grain crystal and cuboctahedral texture and fine grain crystal. Silicification and carbonatization are the most important alteration zones. Galena chemistry indicates galena is Ag, As, Cd and Zn -rich and Sn, Bi-poor. Sb/Bi ratio in galena is close to 3, which is indicator of low temperature deposits. Host rock type, stratabound and epigenetic mineralization, postsedimentary fault controlling, texture, ore types and gangue minerals, and lack of significant correlation between mineralization and igneous activities, chemistry of galena, indicate that Chah-Nar deposit is similar to MVT deposits, although it has some differences with this deposits type.

1. Introduction

A wide variety of Zn-Pb deposits have been reported along the Sanandaj-Sirjan zone (SSZ) in Iran. In this zone, Zn-Pb deposits are typically classified into two groups, i.e., SEDEX and MVT. Mazar-Rutchun (Rechan) mining area is considered as one of the Zn-Pb mining areas in southern Sanandaj-Sirjan zone. There are 5 Zn-Pb deposits and signs named Se-Chah, Chah-Sarbi, Zardbazi-Dar, Chah-Nar and Chah-Sorb Arjamand and several iron mineral signs are located in this mining area, which were mined in the past. The Chah-Nar Zn-Pb deposit (56° 17' 58" longitude and

28° 35' 51" latitude) is situated about 110 km southwest of the Baft in Kerman Province. In this research, the geological, mineralogical, geochemical characteristics of sulfide ore and galena mineral in Chah-Nar deposit have been studied.

2. Research methodology


At the beginning of this research, an integrated geological map 1:50000 of Mazar-Rutchun (Figure 2) and a stratigraphic column of the area were prepared. The second step of field surveys included

* Corresponding author: Azadeh Malekzadeh-Shafaroudi; E-mail: shafaroudi@um.ac.ir

Citation:

Ghorbani-Dehnavi, M., Malekzadeh-Shafaroudi, A., and Karimpour, M. H., 2023. Geology, mineralogy, geochemistry of sulfide ores and galena mineral in the Chah-Nar Pb-Zn deposit, SW Baft (Southern Sanandaj-Sirjan zone). Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(3), 129, 243-266. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.383871.2059>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2023.383871.2059

 dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.11.2



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

a more detailed investigation of each mining area and included sampling of rock units, ore veins, tunnels and other mining works, and finally preparation of 1:5000 geological map of mines in the region, including the abandoned Chah-Nar mine. In the next step, from the collected samples (45 samples), 13 thin sections, 5 polished thin sections and 14 polished sections were studied for lithology and mineralogy. Based on the results of microscopic studies, 18 samples of galena mineral and ore, 8 samples of carbonate host rock and non-mineralized schists, 2 samples of mafic igneous bodeis, were selected and analyzed by XRF, XRD and ICP-OES methods (in the laboratory of the GSI) and ICP-MS (in the Zarazma laboratory).

3. Results

Mazar-Rutchun (Rechan) mining area is located in the southern part of Sanandaj- Sirjan zone (Fig 1-a). The stratigraphy of the region, in order of age from old to new, includes: Gol-e-Gohar, Rutchun and Khabar metamorphic complexes (of Paleozoic age), Permian metamorphosed carbonates, Jurassic-Cretaceous meta flysch, Cretaceous marbles (Koh-e-Khabar), Eocene-Oligocene flysch and Quaternary sediments (Fig 2). The Gol-e-Gohar complex (unit Pz_2) contains gneiss, micaschist, amphibolite and a little metamorphosed ultramafic lava of probable Cambrian age and has been intruded by mafic intrusive bodies (Fig 3-a).

Rutchun complex (unit Pz_3) is the host complex for lead, zinc and iron mineralization in the region. From the stratigraphy point of view, this complex is under the Khabar complex (Middle-Upper Devonian?) and lied on the Gol-e-Gohar complex.

Metamorphosed carbonate rocks (dolomitic and calcitic marbles) of Rutchun complex (Pz_3^d and Pz_3^m), which host Pb-Zn deposits in the region, are seen in brown and light to dark gray colors and they often alternate with metamorphosed sedimentary and volcanic rocks (Pz_3^{sch} unit) (Fig 3-b).

The Gol-e-Gohar and Rutchun complexes are intruded by microdiorite, monzodiorite, microgabbro and diabasic dikes (Figure 3-c). Quartz and calcitic veins have cut most of the Rutchun complex units (Fig 3-d, e). Based on the 1:5000 geological map prepared from the abandoned Pb-Zn Chah-Nar mine (Fig 4), the geological units are as follows.

- Schist and slate units of Rutchun complex

Slate, phyllite, and schist of Rutchun complex (Pz_3^{sch} unit) are known as metapelites rocks that have undergone metamorphism from green schist to amphibolite facies (Fig 5-a). The dominant texture of the schist is lepidoblastic (Fig 5-b).

- Dolomitic marble of Rutchun complex

The metamorphosed impure carbonate rocks include calcitic, dolomitic and a small amount of ankrite marble (Fig 5-a). Dolomitic marble contains calcite and dolomite and subordinate of opaque and muscovite minerals.

- Calcitic marble of Rutchun complex

In different samples, this unit consists of calcite (80 to 95%), quartz (3 to 15%), muscovite (1 to 3%), opaque mineral (0 to 3%) and chlorite (0 to 3%)(Fig 5-e and d). Calcite crystals with a maximum diameter of up to 9 mm, with thin to thick twin blades (type I and II) that are not perpendicular to each other (Fig 5-e), make up the bulk of the rock. In these samples, cubic crystals of opaque mineral can be seen (Fig 5-c and e). muscovite are visible in the triple junction of calcite crystals (Fig 5-e). Calcite and calcite-quartz veins and veinlets from 1 mm to several centimeters have cut the calcitic and dolomitic marble (Fig 5-f).

- Microdiorite intrusive bodies

In Chah-Nar mine, igneous bodies in the form of apophysis and dykes are exposed in schist and marble (Fig 5-g). This microdiorite bodies contain hornblende, plagioclase, quartz, epidote minerals (Fig 5-h).

Silicification can be seen up to several tens of meters from the ore veins. This alteration has given a dark appearance to the host rock (Figure 6-a). Although the carbonate alteration is very limited and insignificant, it appears as calcitic alteration and a small amount of dolomitization (Fig 6-b and c).

3.1. Mineralization

In Chah-Nar mine, 6 exploitation tunnels are more than 550 meters long in total. A trench was mined upstream of tunnel B (Figure 7-a), which follows a high-grade vein with a length of more than 50 meters and a thickness between 1 and 3 meters (Figure 7-b, c). The main vein is located in the $N70^\circ E$, $15^\circ NW$ fault zone. This vein has been exploited in tunnels A and B (Figure 4). At the beginning of the E-B tunnel, the ore vein can be traced with the coordinates $N75^\circ E$, 90° (Figure 7-d and e). Between the N and E tunnels, a very large ancient mining was observed in the $N065^\circ E$, $85^\circ NW$ fault (Figure 7-f). Primary sulfide minerals include galena (up to 95%) and small amounts of sphalerite and pyrite (Table 1).

The main gangue mineral is quartz, and subordinated calcite and dolomite. Galena can be observed from the size of 20 microns to more than 15 mm (Figures 8-a,b). Galena occurs mainly as open space-filling, matrix between breccia pieces and small veinlets. Sulfides occur mainly as veinlets, replacements, open space-filling, or cement in the marble breccia (Figures 7-b, c, d and e). Pyrite is observed as disseminated forms in the silicified marble and in the form of veins and veinlets along with quartz-galena veins (Figure 8-b and c). Sphalerite is often occur as inclusions in pyrite and galena and its formation is earlier than these two minerals (Figure 8-c and d). The transformation of galena pits into spearhead is evident due to tectonic stresses (Figure 8-e). At the Chah-Nar deposit, the near-surface parts of ore veins are oxidized to non-sulfide ores. Cerussite and anglesite are formed at the edge of galena (Figure 8-e, f) as well as goethite and hematite as a result of pyrite oxidation (Figure 8-g, h). Non sulfide zinc minerals (smithsonite and hemimorphite) are also common in supergene ore (Figure 9-a,

b and c). Gossan contains iron oxide and hydroxides, including hematite, goethite (Table 2) (Figure 9-c, d and e). Paragenesis sequence of ores and minerals in Chah-Nar Pb-Zn deposit is shown in Figure 10.

-Geochemistry of Ore sulfide

In addition to lead and zinc, there are other valuable elements such as silver and cadmium in the ore (Table 2). The correlation coefficient of some elements in the primary ore is shown in Table 3.

-Geochemistry of galena

Galena in Chah-Nar deposit shows a high enrichment of Ag and As to a lesser degree of enrichment of Cd, Sb, and Zn and conversely depletion of Bi (Table 4). The correlation coefficient of some elements in galena is shown in Table 5.

4. Discussion and conclusion

Chah-Nar Pb-Zn deposit is epigenetically formed in the marbles of the Rutchun complex (with a possible age of Upper Cambrian-Silurian). Primary ore mineral includes galena, sphalerite, pyrite and quartz. These minerals show vein- veinlets, open space filling, berrecia, and disseminated textures. The most important elemental characteristics of sulfide ore and its accompanying gangue in Chah-Nar deposit are very high concentrations of lead (in the form of galena) and Si (quartz as the main gangue mineral). This coexistence has not been reported in any of the known carbonate hosted Pb-Zn deposits, because in most of the mentioned deposits, carbonatization (especially dolomitization) of the host rock is considered as the most important alteration. Mineralization does not show a clear relationship associated with igneous activities.

There are rare elements such as silver and cadmium in the ore. The maximum concentration of Ag is 220 and its mean is 76 ppm. This element does not show a clear correlation with other ore-forming elements. Sb concentration in Chah-Nar ore is low and varies from 0.5 to 25 ppm. Bi concentration changes from 0.3 to 43 ppm. The low concentration of this element can indicate the non-magmatic origin of the ore fluid. Si is the main alteration product and hydrothermal fluid, and its concentration varies from 4.5 to more than 32% in ore. Si shows negative correlation with Zn, Cd and Ca and positive correlation with Sb and Bi (Table 3).

Galena with a cubic crystal habit is rarely pure in nature and often hosts rare elements such as Ag, Sb, Bi, As, Cd, Se, Sn, Hg, Ga, In and Tl (Qian, 1987; George et al. , 2015, 2016; Ye et al., 2016). Galena in Chah-Nar deposit shows enrichment of elements such as As, Ag and Cd. The highest concentration of trace elements in galena samples is respectively related to As (with an average of 358 and a maximum concentration of 556 ppm) and Ag (with an average of 123 and a maximum concentration of 156 ppm). Galena from skarn deposits is distinctly enriched in Bi but depleted in Sb, with high Bi/Sb ratios (Li et al., 2022). This characteristic most likely results from the high mineralization temperature of

this type of deposit (Grant et al., 2015). Galena in CD deposits is characterized by moderate Bi content and relatively high Sn content. On the contrary, galena formed in low-temperature deposits, such as epithermal and MVT, has low Bi but high Sb contents (Li et al., 2022). The geochemistry of galena shows its formation in low temperature conditions. This features are somewhat similar to MVT and Irish-type deposits. The low content of Se and Bi rule out the volcanic origin and high temperature for this deposit. The concentration of Sb, the Sb/Bi ratio and the very low concentration of Bi and Se in the Chah-Nar deposit show that their origin is unrelated to igneous activities. Unlike SEDEX deposits, the concentration of tin (George et al., 2015) in the galena of Chah-Nar deposit is very low. Cd has a relatively high concentration (66 ppm) and has a high correlation coefficient with Zn (Table 5). Fernandez and Izard (2005), consider the quantity and quality of Cd occurrence in galena under the control of Zn concentration and the presence of sphalerite in galena; Because Cd has a great tendency to concentrate in sphalerite as a substitute for Zn and form greenockite (CdS). Therefore, the high values of Cd can be related to the presence of inclusions of sphalerite in galena.

In Table 6, the genetic characteristics of this deposit are compared with MVT, SEDEX and Irish-type deposits. Mineralization in Chah-Nar deposit is epigenetic. This basic feature of Chah-Nar deposit is similar to MVT type deposits and it distinguishes this deposit from SEDEX and Irish-type deposits. Alteration in Chah-Nar deposit is mainly of silicification type and this feature is the main difference between this deposit and MVT type deposits. Most likely, siliceous ore fluids acted in the form of sulfide complex during regional metamorphism through dehydration of Rutchun complex (especially schist, phyllite and slate rocks). According to Table 2, the concentration of Pb, Zn, and S in schist (Rutchun complex) is 344, 152, and 639 ppm, respectively. This rock can be considered as a source of Pb and Zn. According to evidence such as tectonic setting, type of host rock, geometry of ore deposit, ore textures and structures, geochemical characteristics of sulfide ore and galena, although Chah-Nar deposit has similarities with MVT type deposits, but this deposit can be considered as MVT type deposit.

Acknowledgment

This study was supported by a grant from Research Foundation of Ferdowsi University of Mashhad (Iran) (Project No. 41179.3, date: 22 June 2016) and it is part of the achievements of the first author's Ph.D thesis. We are grateful to Dr. Mohammad Salehi Tinoni, Mohsen Jarjandipour and Dr. Ahmed Rashidi Bashrabadi who helped in different field operations. The sincere cooperation of Mr. Ali Rashidi (The manager of Geology and Mineral Explorations of Kerman) in support of field operations is worthy of appreciation. We are grateful to the respected reviewers who played a significant role in the scientific improvement of the article.

بررسی زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی کانسنگ سولفیدی و کانی‌گالن در کانسار سرب و روی چاه‌نار، جنوب باختر شهرستان بافت (پهنه سنندج - سیرجان)

مهدی قربانی‌ده‌نوی^۱، آزاده ملک‌زاده شفارودی^{۱*} و محمدحسن کریم‌پور^۱^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

کانسار سرب و روی چاه‌نار در جنوب دشت روتشون (رچان) و ۱۱۰ کیلومتری جنوب باختر شهرستان بافت و در پهنه سنندج - سیرجان واقع شده است. کانی‌سازی به شکل دیرزادی درون مرمهای کلسیتی - دولومیتی کمپلکس روتشون تشکیل شده و دارای کنترل ساختاری است. همبزرایی کانیایی شامل گالن و مقادیر کمی پیریت و اسفالریت است و با کانی‌های باطله کوارتز و مقادیر ناچیزی کلسیت و دولومیت، بافت‌های رگه - رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی، برشی و پراکنده همراهی می‌شود. گالن به صورت درشت‌بلور و بافت کوبواکتهدرال و ریزبلور دیده می‌شود. سیلیسی شدن و کربناتی شدن، مهم‌ترین دگرسانی‌های سنگ میزبان هستند. شیمی کانه گالن نشان می‌دهد که گالن به‌طور نسبی از نقره، آرسنیک، روی و کادمیم غنی و از بیسموت و قلع فقیر است. نسبت Sb/Bi در کانی‌گالن نزدیک ۳ است که ویژگی کانسارهای دما پایین است. نوع سنگ میزبان، دیرزاد و چینه‌کران بودن کانسار، جایگیری رگه‌های معدنی در گسل‌های پس از رسوب‌گذاری، بافت و ساخت و نوع کانه‌ها و کانی‌های باطله، عدم ارتباط معنی‌دار کانی‌سازی با فعالیت‌های آذرین و شیمی کانی‌گالن، بیانگر تشکیل کانسار چاه‌نار در شرایطی مشابه با کانسارهای نوع MVT است، هر چند اختلافاتی را نیز با این رده کانساری دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

کانسار سرب و روی

زمین‌شیمی کانسنگ

گالن

چاه‌نار

سنندج - سیرجان

۱- پیش‌نوشتار

به دیگر مناطق معدنی این پهنه ساختاری (از جمله انگوران (Zhuang et al., 2019); Annels et al., 2003)، آهنگران (Maanijou et al., 2020)، عمارت (Ehya et al., 2010)، ایرانکوه (کریم‌پور، ۱۳۹۶) و چاه‌تلخ سیرجان (Rezaeian et al., 2013)) به میزان بسیار کمتری مورد توجه پژوهش‌گران علوم زمین قرار گرفته است. مهم‌ترین دلیل مطالعات اندک اکتشافی در این ناحیه، قرارگیری این منطقه معدنی در میانه پارک ملی حیات وحش خَبر و عدم اجازه هرگونه فعالیت معدنی و اکتشافی از اوائل دهه ۱۳۶۰ شمسی است. ۵ کانسار و نشانه معدنی سرب و روی به نام سه‌چاه، چاه‌سرب، زردبازی‌در، چاه‌نار و چاه‌سرب ارجمند و چندین نشانه معدنی آهن در این منطقه معدنی قرار دارند که از گذشته‌های دور و نزدیک استخراج شده‌اند (شکل ۲). در این منطقه توزیع گسترده‌ای از سرباره‌های حاصل از ذوب کانسنگ این معادن در مجاورت رودخانه‌های فصلی مشاهده می‌شود که گویای رونق معدن‌کاری در گذشته است.

ذخایر سرب و روی با میزبان رسوبی از جمله بزرگ‌ترین ذخایر تأمین‌کننده سرب و روی در جهان هستند. این ذخایر بیشتر در سنگ‌های کربناتی (نوع ایرلندی و نوع دره می‌سی‌سی‌پی) و آواری - کربناتی (ذخایر نوع Sedex) گزارش شده‌اند (Goodfellow and Lydon, 2007; Leach et al., 2010; Wilkinson, 2014). ایران به دلیل حضور گسترده سرزمین‌های کربناتی و آواری، انواع مختلفی از ذخایر سرب و روی با میزبان رسوبی نهشته شده و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از ذخایر سرب و روی در کلاس جهانی ایران می‌توان به کانسارهای انگوران (Zhuang et al., 2019); Annels et al., 2003)، مهدی‌آباد (Maghfouri et al., 2021)، ایرانکوه (کریم‌پور، ۱۳۹۶) و نخلک (Jazi et al., 2016) اشاره کرد. پهنه دگرگونی سنندج - سیرجان، به‌عنوان بخشی از کمربند کوهزایی آلپ - هیمالیا، محیط مناسبی برای رخداد ذخایر سرب و روی است. منطقه معدنی مزار - روتشون (رچان) به‌عنوان یکی از مناطق معدنی سرب و روی در پهنه سنندج - سیرجان قلمداد می‌شود (شکل ۱- a و b)، ولی نسبت

* نویسنده مسئول: آزاده ملک‌زاده شفارودی؛ E-mail: shafaroudi@um.ac.ir

ماخذنگاری:

قربانی‌ده‌نوی، م.، ملک‌زاده شفارودی، آ.، و کریم‌پور، م. ح.، ۱۴۰۲، بررسی زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی کانسنگ سولفیدی و کانی‌گالن در کانسار سرب و روی چاه‌نار، جنوب باختر شهرستان بافت (پهنه سنندج - سیرجان). فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳(۳)، ۱۲۹-۲۴۳. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.383871.2059>

doi: 10.22071/gsj.2023.383871.2059



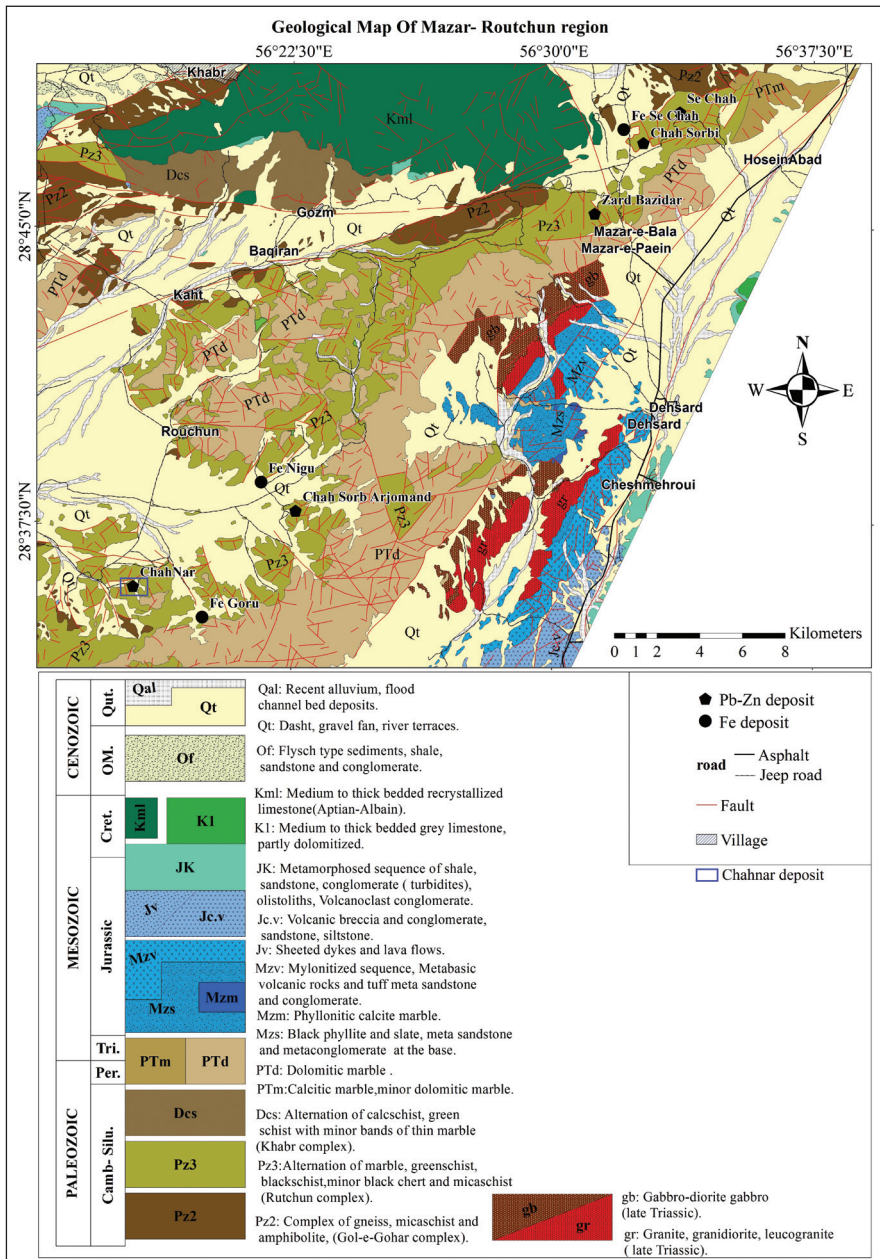
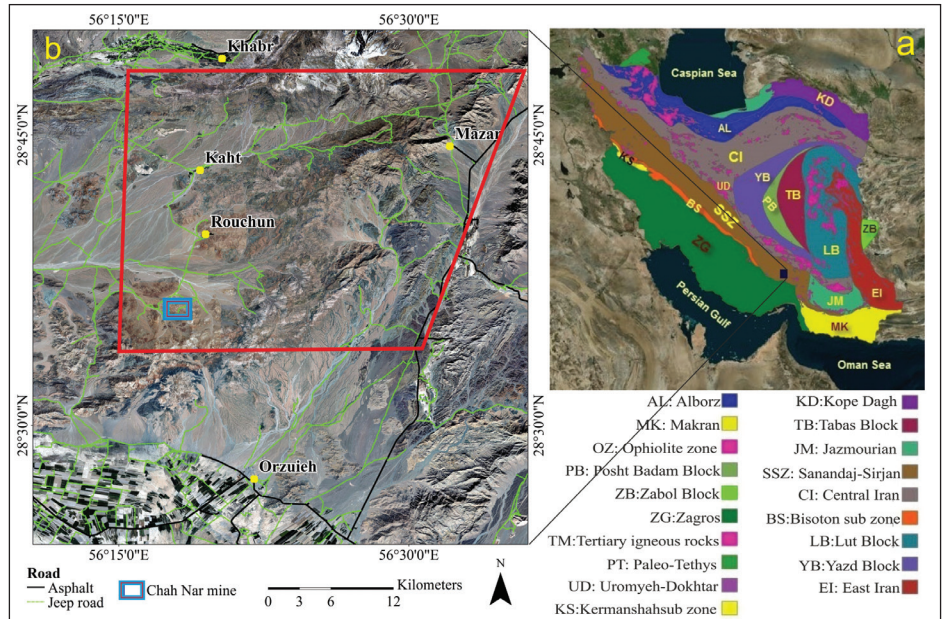
doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.11.2

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شکل ۱- a) تقسیمات پهنه‌های ساختاری ایران (Sahandi and Soheili, 2014) و فرارگیری منطقه مزار- روتشون در پهنه سنندج- سیرجان. (b) موقعیت جغرافیایی ناحیه مزار- روتشون (چندضلعی قرمز رنگ- شکل ۲) و کانسار سرب و روی چاه‌نار (مستطیل آبی رنگ).

Figure 1- a) Structural zones of Iran (Sahandi and Soheili, 2014) and the location of the Mazar-Rutchun region in the Sanandaj-Sirjan zone. b) The geographical location of the Mazar-Rutchun region (red polygon, Figure 2) and the Chah-Nar Pb-Zn deposit (blue rectangle).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ساده شده ناحیه مزار- روتشون (با تغییرات از Roshan Ravan et al., 1997; Nazemzadeh and Rashidi, 2007).

Figure 2. Simplified geological map of Mazar-Rutchun region (modified after Roshanravan et al., 1997; Nazemzadeh and Rashidi, 2007).

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- زمین‌شناسی

از دیدگاه تقسیم‌بندی زمین‌شناسی ایران زمین، منطقه معدنی مزار- روتشون (رچان) در پهنه ساختاری سندج- سیرجان قرار گرفته است (شکل ۱-ا). بر پایه محجل و همکاران (Mohajjel et al., 2003) و محجل و فرگوسن (Mohajjel and Ferguson, 2014) پهنه سندج- سیرجان در موقعیت زمین‌ساختی پشت کمانی قرار دارد و در نتیجه فرورانش اقیانوس تیس جوان به زیر صفحه ایران، ایجاد شده است (Ghasemi and Talbot, 2006). چینه‌شناسی منطقه معدنی مزار- روتشون به ترتیب سن از قدیم به جدید شامل: کمپلکس (مجموعه یا همتافت) گل‌گهر، کمپلکس روتشون و کمپلکس خَبر (به سن پالئوزویک)، کربنات‌های دگرگون شده پرمین، متافلیش‌های ژوراسیک- کرتاسه، مرمهرای کرتاسه (کوه خبر)، فلیش‌های اتوسن- الیگوسن و رسوبات کواترن می‌باشد (شکل ۲).

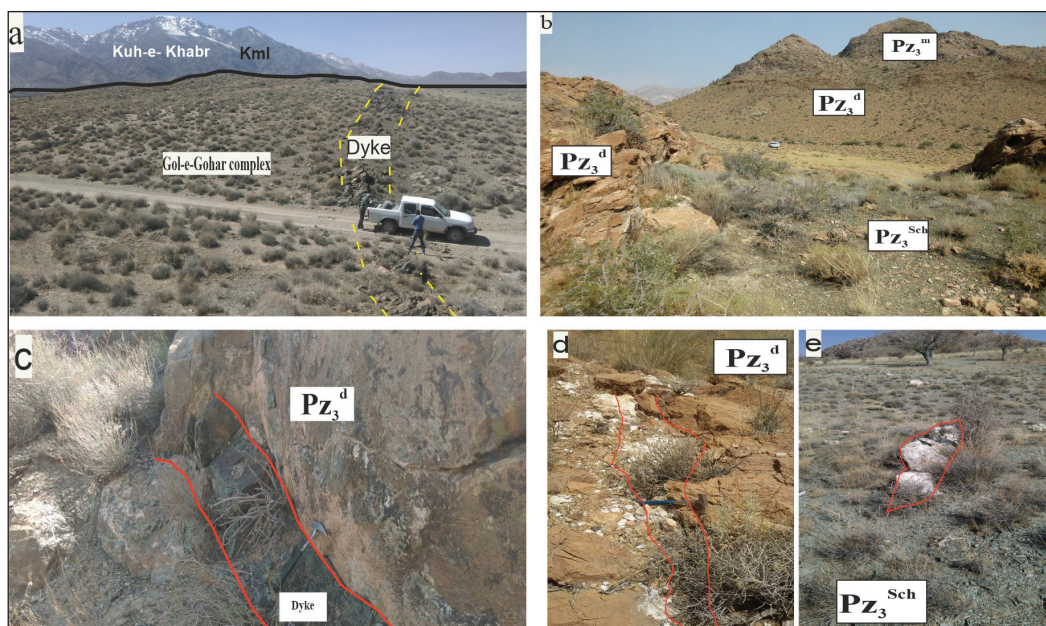
مجموعه سنگ‌های کمپلکس گل‌گهر (واحد Pz₂)، دربردارنده گنیس، میکاشیست، آمفیولیت و کمی گدازه اولترامافیک دگرگون‌شده به سن احتمالی کامبرین بوده و حاصل دگرگونی ردیفی رسوبی- آتشفشانی است که همزمان یا با اندکی تأخیر مورد هجوم توده‌های نفوذی مافیک احتمالاً در حال تفریق قرار گرفته است (شکل ۳-ا). کمپلکس روتشون (واحد Pz₃) به‌عنوان مجموعه میزبان کانی‌سازی سرب و روی و آهن در منطقه است. این مجموعه از نظر چینه‌شناختی در زیر کمپلکس خبر متعلق به دونین میانی- بالایی؟ و بر روی کمپلکس گل‌گهر (به سن کامبرین) قرار گرفته است. در کمپلکس روتشون تناوب مرم، شیست سبز، شیست سیاه، میکاشیست، چرت سیاه و تغییر رخساره شدید سنگ‌شناسی در جهت افقی و عمودی دیده می‌شود و فراوانی شیست سیاه و چرت سیاه در ارتباط مستقیم با گدازه‌های بازالتی دگرگون‌شده (شیست سبز و آمفیولیت) است. از مهم‌ترین ویژگی‌های دگرگونی در این مجموعه، ظهور کانی استروئید در بخش زیرین آن در میکاشیست‌ها است (Roshan Ravan et al., 1997). سنگ‌های کربناتی دگرگون‌شده (مرمرهای دولومیتی، آنکریتی و کلسیتی)، کمپلکس روتشون (Pz₃^d و Pz₃^m) که میزبان کانسارهای روی-سرب منطقه می‌باشند، به رنگ‌های قهوه‌ای نارنجی و خاکستری روشن تا تیره دیده می‌شوند و اغلب با سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی دگرگون‌شده (واحد Pz₃^{sch}) در تناوب می‌باشند. بافت مرمرها گرانوبلاستیک است و دارای برگراری مشخص هستند. در کالک‌شیست‌های این واحد معمولاً مقادیری مسکویت و کوآرتز دیده می‌شود. مرمهرای یادشده اغلب بخش‌های به نسبت مرتفع منطقه را تشکیل داده و ستبرای آنها از کمتر از ۱ متر تا بیش از ۵۰۰ متر در تغییر است. این مرمرها اغلب دولومیتی و گاهی کلسیتی هستند و در میان تناوب غیرکربناته آنها شیست سبز و کلریت شیست دیده می‌شود که گویای فعالیت‌های آذرین در زمان تشکیل آنها است (شکل ۳-ب). در برخی نمونه‌های این مرم، بلورهای اکسید آهن (تا قطر ۱ سانتی‌متر) دیده می‌شود و باعث رنگ قهوه‌ای سنگ‌ها شده است. به احتمال فراوان، این بلورها جانشین پیریت‌های اولیه باشند. اشکال حاصل از چین‌خوردگی خمشی- جریانی و خمشی- برشی در مرمرها قابل مشاهده است. چرت‌های سیاه دگرگون‌شده نیز به‌صورت لایه‌های با ستبرای کم با گسترش محدود، در بخش جنوبی منطقه دیده می‌شوند. اغلب سنگ‌های مجموعه (کمپلکس) گل‌گهر و روتشون توسط دایک‌هایی با ترکیب میکرودیوریت، مونزدیوریت، میکروگابرو تا دایباز قطع شده‌اند (شکل ۳-ج). همچنین بیشتر واحدهای کمپلکس روتشون توسط رگه‌های کوآرتزی و کلسیتی قطع شده‌اند. رگه‌ها و بودین‌های کوآرتزی تراوشی به رنگ سفید با ستبرای کمتر از ۱ سانتی‌متر تا بیش از ۵ متر درون شیست و مرم این واحد دیده می‌شوند (شکل ۳-د و e). به دلیل یافت شدن فسیل‌های مربوط به دونین میانی در اولین افق‌های واحد Dcs (از کمپلکس خَبر) که مستقیماً بر روی بالاترین افق‌های شیستی کمپلکس گل‌گهر قرار گرفته‌اند، می‌توان تصور نمود که حد بالایی کمپلکس روتشون تا سیلورین بالایی نیز برسد (Roshan Ravan et al., 1997).

کانسار چاه‌نار با مختصات جغرافیایی طول خاوری ۵۸° ۱۷' ۵۶ و عرض شمالی ۵۱° ۳۵' ۲۸ در ۱۰ کیلومتری جنوب روستای روتشون (رچان)، ۵۵ کیلومتری شمال‌باختر شهر آرزوئی و ۱۱۰ کیلومتری جنوب‌باختر شهر بافت قرار دارد (شکل ۱-ب). نخستین نظریه در مورد نحوه تشکیل کانسارهای سرب و روی منطقه را مرحوم صفری لنگرودی (۱۳۷۱) ارائه کرده است. وی کانه‌زایی منطقه را چینه کران و از نوع دیرزاد، پس از رخداد دگرگونی ناحیه‌ای و مرتبط با ماگماتیسم فلیسیک منطقه دانسته است و اشاره دارد که توده‌های بازیگ تا حدواسط همراه با کانسارها بر اثر پدیده‌های سنگ‌شناختی (پترولوژیکی) مانند هضم، از توده‌های فلیسیک منتج شده‌اند (صفری لنگرودی، ۱۳۷۱). قربانی‌ده‌نوی (۱۳۹۶) در قالب بررسی زمین‌شناسی و منابع معدنی شهرستان بافت، به معرفی اجمالی معادن متروکه سرب و روی منطقه مزار- روتشون پرداخته است. با توجه به تنوع کانی‌سازی سرب و روی و آهن در ناحیه مزار- روتشون و عدم وجود داده‌های اکتشافی کافی بایستی در این ناحیه مطالعات اکتشافی بیشتری صورت پذیرد. در این پژوهش سعی شده است ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی کانسنگ سولفیدی و کانی گالن در کانسار چاه‌نار مورد بررسی قرار گیرد و اطلاعات جدیدی در مورد این منطقه اکتشافی ارائه شود. بررسی ویژگی‌های این کانسار می‌تواند راهنمای خوبی جهت اکتشاف سرب و روی در ناحیه مزار- روتشون و سایر مناطق هم‌جوار باشد.

۳-۲- روش پژوهش

ناحیه مزار- روتشون دربردارنده بخشی از گستره دو ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خَبر (Roshan Ravan et al., 1997) و بزار یا ده‌سرد (Nazemzadeh and Rashidi, 2007) است. ضمن بررسی دفتری، تناقضاتی در عناوین واحدهای زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی (لیتولوژی) و سن آنها، در مرز دو ورقه یاد شده وجود داشت، بدین جهت در آغاز این پژوهش با پیمایش صحرایی در ناحیه مزار- روتشون، نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰۰ یکپارچه (شکل ۲) و ستون چینه‌شناسی منطقه به‌عنوان گام عملیاتی اول پژوهش تهیه گردید. روابط چینه‌شناسی واحدهای سنگی در راهنمای شکل ۲ آمده است.

گام دوم برداشت‌های صحرایی، شامل بررسی دقیق‌تر هر محدوده معدنی بود و شامل نمونه‌برداری از واحدهای سنگی و بخش‌های کانه‌دار، برداشت تونل‌ها و دیگر آثار معدن‌کاری، برداشت‌های زمین‌شناسی و زمین‌شناسی ساختاری و در نهایت، تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ از معادن منطقه از جمله کانسار چاه‌نار بوده است (شکل ۳). در مرحله بعد، از نمونه‌های برداشت‌شده از کانسار چاه‌نار (۴۵ نمونه)، شمار ۱۳ مقطع نازک، ۵ مقطع نازک صیقلی و ۱۴ مقطع صیقلی برای بررسی سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری تهیه شد. سپس، بر پایه نتایج مطالعات میکروسکوپی، شمار ۱۸ نمونه از کانسنگ و کانی گالن، ۸ نمونه از سنگ میزبان کربناته و شیست‌های فاقد کانی‌سازی، ۲ نمونه از توده‌های آذرین مافیکی در محدوده معدنی، انتخاب شد و برای بررسی کانی‌شناسی، تعیین مقادیر اکسیدهای اصلی، فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی به روش‌های XRF، XRD و ICP-OES (در آزمایشگاه شرکت زرآزما) آنالیز شد. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها توسط خردکننده فولادی تا اندازه حدود ۴ میلی‌متر خرد شده و سپس به کمک هاون آگاتی تا اندازه ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر شدند. مقدار LOI نمونه‌ها با قرارگیری حدود ۲ گرم پودر سنگ در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۲ ساعت به دست آمد. برای تجزیه عناصر اصلی به روش XRF، قرصی به وزن حدود ۴ گرم تهیه شد. در روش تجزیه ICP-MS، برای تعیین عناصر کمیاب و کمیاب خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه در ترکیب لیتم متابورات/تتراپورات ذوب شده و سپس در اسید نیتریک حل می‌شود.



شکل ۳- تصاویر صحرایی از واحدهای سنگی کمپلکس‌های گل‌گهر و روتشون. (a) گنیس و شیست کمپلکس گل‌گهر که به وسیله دایک میکرودیوریتی قطع شده‌اند. سنگ آهک مرمری شده کوه خبر (K_{ml}) نیز در تصویر مشخص است. (b) تناوبی از توالی آتشفشانی- رسوبی کمپلکس روتشون با حضور شیست سبز (Pz^{sch}) در زیر و مرمر دولومیتی و مرمر کلسیتی بر روی آن (Pz^d و Pz^m). (c) دایک دیابازی که به درون مرمر دولومیتی کمپلکس روتشون نفوذ کرده است. (d و e) رگه‌های کوارتزی موجود در مرمر دولومیتی و شیست کمپلکس روتشون. رگه‌های کوارتزی درون شیست‌ها در اثر فرایندهای زمین‌ساختی بعدی، اغلب شکل بودین به خود گرفته‌اند.

Figure 3. Field photos of the rock units from the Gol-Gohar and Rutchun complexes. a) Gneiss and schist of the Gol-Gohar complex cut by a microdiorite dyke. The marbleized limestone of Khabar mountain (K_{ml}) unit is also visible in the picture. b) Alternation of volcanic-sedimentary sequence of Rutchun complex with the presence of green schist (Pz^{sch}) at below and dolomitic and calcitic marbles on top (Pz^d and Pz^m). c) diabasic dyke intruded into the dolomitic marble of Rutchun complex. d,e) Quartz veins in dolomitic marble and schist of Rutchun complex. As a result of the subsequent tectonic processes, the quartz veins in the schist have often taken the form of boudin.

این توده‌های نفوذی را به احتمال بعد از کرتاسه بالایی دانسته‌اند، اما ابراهیم‌نژاد و همکاران (Ebrahimnejad et al., 2020) بر پایه روش سن‌سنجی Sm/Nd سن تریاس بالایی (۲۲۰ میلیون سال) را برای توده‌های نفوذی فلسیک این ناحیه به دست آورده‌اند. گروه دوم توده‌های نفوذی دربردارنده تعداد بسیار زیادی توده‌های مافییک تا حدواسط با ترکیب میکرودیوریت، میکروگابرو، مونزونیت، مونزودیوریت و دیاباز هستند که اغلب به شکل دایک و گاهی به شکل آپوفیز درون سنگ‌های مختلف کمپلکس‌های گل‌گهر و روتشون نفوذ کرده‌اند.

زمین‌شناسی کانسار چاه‌نار

بر پایه یافته‌های حاصل از پیمایش‌های صحرایی، مطالعات میکروسکوپی و زمین‌شیمیایی و نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ تهیه‌شده از کانسار سرب و روی چاه‌نار (شکل ۴)، واحدهای زمین‌شناسی پیرامون این کانسار به شرح زیر هستند.

– **واحد شیست و اسلیت کمپلکس روتشون:** اسلیت، فیلیت و شیست کمپلکس روتشون (واحد Pz^{sch}) به‌عنوان سنگ‌های رسی- نیمه‌رسی دگرگون شده‌ای شناخته می‌شوند که درجه دگرگونی از رخساره شیست سبز تا آمفیبولیت را تحمل کرده‌اند. در ستون چینه‌نگاری محدوده کانسار چاه‌نار، میکاشیست و اسلیت سیاه رنگ رخمون دارند (شکل ۵-ا). این سنگ‌ها در حد درجات پایین رخساره شیست سبز دگرگون

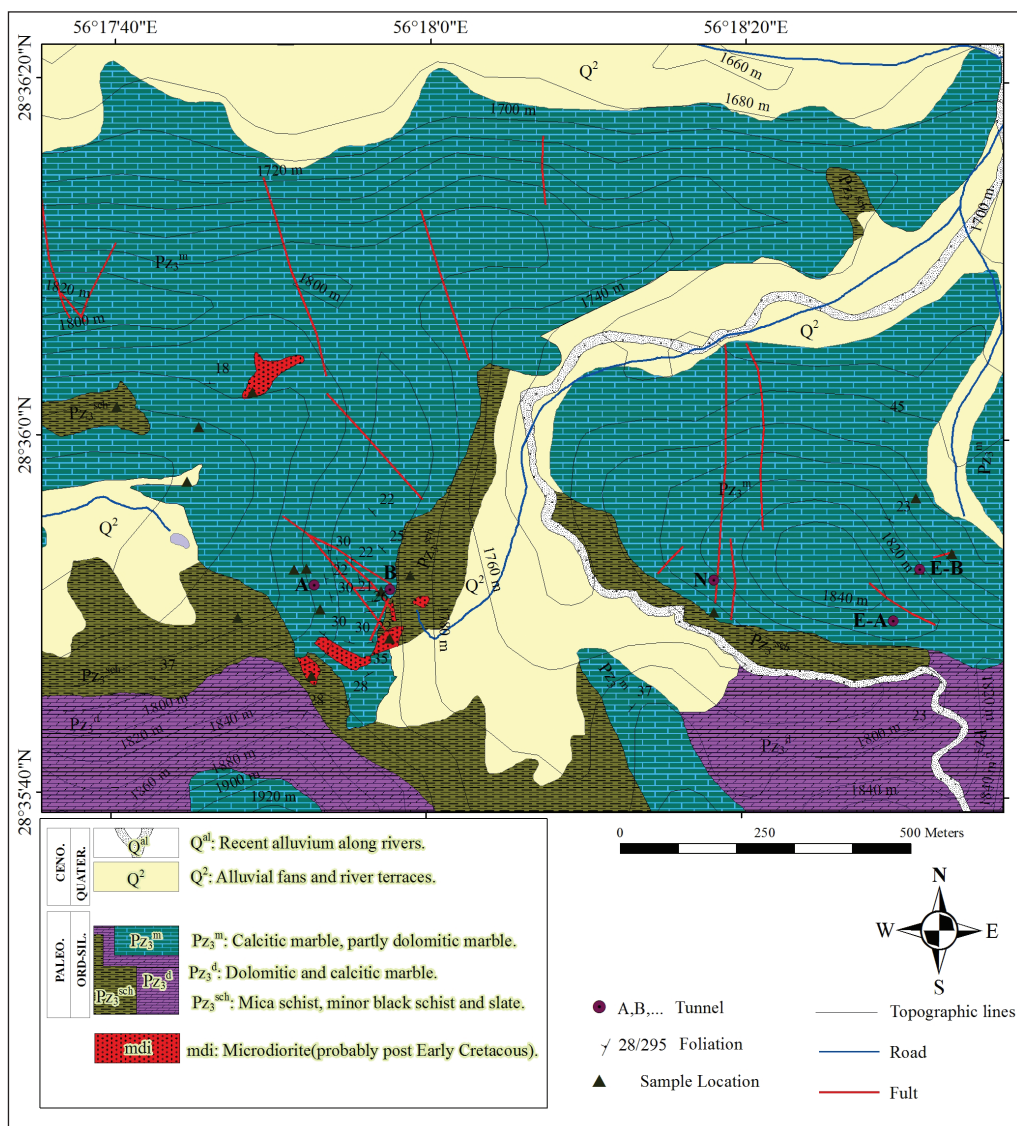
به اعتقاد روشن‌روان و همکاران (Roshan Ravan et al., 1997) واحدهای کمپلکس خبر، دربردارنده مجموعه‌ای از مرمر دولومیتی، مرمر کلسیتی، کالک شیست، اسلیت، فیلیت و شیست سبز می‌باشند که سن مجموعه آنها از دونین میانی تا کرینفر زیرین است. در شمال‌باختری روستای مزار و در حاشیه دامنه خاوری کوه خبر، در متن سنگ آهکی بلورین متناسب به دونین کمپلکس خبر، نشانه‌های آشکاری از سنگ‌واره مشاهده شده که به‌طور طبیعی به‌واسطه تأثیر پدیده دگرگونی، در نمونه دستی قابل شناسایی نبوده است. بر پایه مجموعه میکروفسیل‌های یافت‌شده، سن سنگ آهکی بلورین کمپلکس خبر آپتین- آلبین است (نوازی و همکاران، ۱۳۷۹). بر این اساس، می‌توان بخش عمده‌ای از توالی کربناتی جوان کمپلکس خبر را به کرتاسه زیرین نسبت داد (شکل ۲) و سن دونین را تنها برای بخش زیرین آن (گری‌واک دگرگون‌شده و کالک شیست واحد Dcs) می‌توان پذیرفت.

توده‌های نفوذی در ناحیه مطالعاتی را می‌توان به دو گروه تقسیم‌بندی کرد. گروه نخست را توده‌های نفوذی مافییک تا فلسیک (گابرو تا لوکوگرائیت) که به شکل استوک و باتولیت‌های کوچک تظاهر دارند، دربرمی‌گیرد. توده‌های آذرین نفوذی ده‌سرد مهم‌ترین توده‌های این گروه می‌باشند (شکل ۲). این توده‌های نفوذی با رخداد‌های زمین‌ساختی در بخشی از پیکره خود دچار دگرریختی کاتاکلاستیک و میولیتی شده است. ناظم‌زاده و رشیدی (Nazemzadeh and Rashidi, 2007) سن

- **مرمر کلسیتی کمپلکس روتشون:** همبرزایی کانیایی این واحد دربردارنده کلسیت+ کوارتز ± مسکوویت ± کلریت ± کانی کدر و درجه دگرگونی رخساره شیبست سبز می‌باشد. این همبرزایی کانیایی در نمونه‌های مختلف، از کلسیت (۸۵ تا ۹۵ درصد)، کوارتز (۳ تا ۱۰ درصد)، مسکوویت (۱ تا ۳ درصد)، کانی کدر (۰ تا ۳ درصد) و کلریت (۰ تا ۳ درصد) تشکیل شده است (شکل ۵- e و d). بافت مرمر از ریز تا درشت‌بلور در تغییر است و اغلب بلورهای آن فاقد جهت برگوارگی مشخصی می‌باشد. بلورهایی کلسیت با بیشینه قطر تا ۹ میلی‌متر، با تیغه‌های ماکلی نازک تا ستر (نوع I و II) غیر عمود بر هم (شکل ۵- e)، بخش عمده سنگ را تشکیل می‌دهند. در برخی نمونه‌های مرمر کلسیتی، بلورهای مکعبی شکلی از کانی کدر (احتمالاً پیریت) دیده می‌شود (شکل ۵- c و e). بلورهای کوارتز با بیشینه درازای ۴ میلی‌متر، دیده می‌شوند و خاموشی موجی نشان می‌دهند. درشت‌بلورهای کوارتز در متن سنگ قابل مشاهده هستند (شکل ۵- d و e). ریزبلورهای مسکوویت در محل اتصال سه گانه بلورهای کلسیت و گاهی بر روی آن قابل مشاهده هستند (شکل ۵- e). ریزبلورهای مسکوویت و کلریت در مرمر، به احتمال زیاد ناشی از ناخالصی رسی در سنگ مادر هستند. نظر به حضور این حجم از بلورهای کلسیت، این سنگ در گروه مرمر نیمه‌متبلور کلسیتی قرار می‌گیرد.

شده‌اند. شیبست دانه متوسط خاکستری- سبز رنگ، در زیر میکروسکوپ از بلورهای بیوتیت (۳۵ درصد)، کوارتز (۳۰ درصد)، اپیدوت (۱۰ درصد)، کانی کدر (۱۰ تا ۱۵ درصد)، مسکوویت (۵ تا ۱۰ درصد) و کلریت (۲ تا ۵ درصد) تشکیل شده است. بلورهای قهوه‌ای رنگ بیوتیت (تا طول یک سانتی‌متر)، سبب توسعه شیبستزیت SI در این سنگ شده‌اند (شکل ۵- b). بلورهای کوارتز دیگر کانی اصلی سنگ بوده و اشکال حاصل از دگرشکلی و تبلور مجدد (کشیدگی در جهت SI و خاموشی موجی) را نشان می‌دهند. بافت چیره این سنگ، لپیدوبلاستیک است (شکل ۵- b). اسلیت سیاه‌رنگ شامل یک‌سری سنگ بسیار ریزدانه تیره رنگ با کلیواژ اسلیتی است و کانی‌های آن شامل گرافیت، سریسیت، کوارتز و کلریت است. رگه‌های کوارتزی و به‌ندرت کوارتز+ کلسیت با ستریای از ۱ میلی‌متر تا چند ده سانتی‌متر، شیبست و اسلیت کمپلکس روتشون را قطع کرده‌اند.

- **مرمر دولومیتی کمپلکس روتشون:** در کمپلکس روتشون سنگ‌های کرنباتی ناخالص دگرگون‌شده دربردارنده مرمر کلسیتی، مرمر دولومیتی و به میزان ناچیزی مرمر آنکریتی هستند (شکل ۵- a). این سنگ‌ها در حد درجات پایین رخساره شیبست سبز دگرگون شده‌اند. مرمر دولومیتی دربردارنده کانی‌های اصلی کلسیت و دولومیت و به میزان ناچیزی کانی کدر و مسکوویت می‌باشد.



شکل ۴- نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ کانسار سرب و روی چاه‌نار.

Figure 4. Geological map, scale: 1:5000, of the Chah-Nar Pb-Zn deposit.

معدنی، سه تونل دیگر وجود دارد. در تونل E-A (شکل ۴) رگه کانه‌دار با مختصات $N110^{\circ}E, 22^{\circ}SW$ درون دو تونل فرعی به درازای حدود ۱۵ متر استخراج گردیده است. از ابتدای تونل E-B که درازای ۶۳ متر دارد، رگه کانه‌دار با مختصات $N75^{\circ}E, 90^{\circ}$ قابل تعقیب است (شکل ۶-d و e). بین تونل‌های E و N یک معدن کاری باستانی بسیار بزرگ در سطح گسلی با مختصات $N065^{\circ}E, 85^{\circ}NW$ وجود دارد (شکل ۶-f)، هر چند در سطح زمین آثار معدن کاری از جمله دپوی ماه معدنی و باطله دیده نمی‌شود و یافتن محل این کار معدنی دشوار می‌باشد، اما سطح مقطع درون این کنده کاری در حدود ۴۵ متر درازا، ۸ متر عرض و در نقاطی تا بیش از ۲۰ متر ارتفاع دارد (شکل ۶-f).

از منظر کانی‌شناسی، کانسار چاه‌نار همانند دیگر کانسارهای سرب و روی کانی‌شناسی ساده‌ای دارد (Xue et al., 2007). کانی‌های سولفیدی اولیه این کانسار شامل گالن (تا ۹۵ درصد) و مقادیر کمی اسفالریت و پیریت می‌باشد (جدول ۱). بر پایه مطالعات نمونه‌های دستی و مشاهدات میکروسکوپی ساخت و بافت‌های کانسنگ، می‌توان نسل‌های مختلف کانیایی را از یکدیگر تفکیک کرد. بر این اساس، کانی‌های پیریت و گالن در دو مرحله یا دو نسل و اسفالریت در یک مرحله تشکیل شده‌اند. کانی‌های نسل اول، همگی ریزبلور هستند و کانی‌های نسل دوم، درشت‌بلور بوده و در رگه-رگچه‌ها تمرکز دارند. حضور سولفیدها در اندازه‌های ریز و درشت می‌تواند به سرعت متفاوت اختلاط شاره‌های کانه‌ساز نسبت داده شود (Ghazban et al., 1994). گالن فراوان‌ترین کانه در کانسار چاه‌نار است و به صورت بی‌شکل تا شکل‌دار و از اندازه ۲۰ میکرون تا بیش از ۱۵ میلی‌متر (شکل ۷-a و b) تشکیل شده است. بلورهای گالن از نوع ترکیبی مکعبی هستند (شکل ۷-a و b). گالن درشت‌بلور به صورت پرکننده فضای خالی و گالن ریزبلور اغلب به صورت برشی سیمان بین قطعات سنگ میزبان را پر کرده است.

گالن و اسفالریت، اغلب به صورت رگه و رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی، سیمان و جانشینی در سنگ میزبان دیده می‌شوند (شکل ۷-b و e). پیریت به صورت دانه‌پراکنده در سنگ میزبان مرمر سیلیسی شده و به صورت رگه و رگچه‌ای همراه با رگه‌های کوارتز-گالن‌دار قرار دارد (شکل ۷-b تا d). اسفالریت اغلب به صورت ادخال درون کانی‌های پیریت و گالن حضور دارد و به نوعی تقدم در تشکیل نسبت به این دو کانی را نشان می‌دهد (شکل ۷-c و d). تغییر شکل چاله‌های مثلی (Pits) گالن به شکل سرنیزه‌ای برائر تنش‌های زمین‌ساختی نیز آشکار است (شکل ۷-e). حضور پیریت و عدم حضور کالکوپیریت نشانه مقادیر بسیار پایین مس در محلول کانه‌دار است و این موضوع با مقادیر پایین مس در نتایج آنالیز کانسنگ نیز تأیید می‌شود.

کانه‌زایی در کانسار چاه‌نار را می‌توان به سه مرحله پیش از کانی‌سازی، کانی‌سازی اصلی و مرحله پس از کانی‌سازی تقسیم‌بندی کرد. در مرحله اول ریزبلورهای کوارتز و به میزان ناچیزی پیریت به صورت پراکنده در متن سنگ میزبان (به احتمال در مراحل پایانی دیاژنز سنگ میزبان؟) نهشته شده‌اند. مرحله دوم دربردارنده فاز اصلی کانی‌سازی سولفیدی است و پس از سنگ‌شدگی میزبان و به صورت اپی‌ژنتیک و در سطوح شکستگی و گسل، برشی، اشکال جانشینی و پرکننده فضای خالی رخ داده است. این مرحله با تشکیل گالن، اسفالریت، پیریت به همراه باطله‌های کوارتز، کلسیت و به میزان ناچیزی دولومیت مشخص می‌شود. در مرحله سوم، رگه-رگچه‌های کلسیتی و به‌ندرت کوارتز فازه‌های کانیایی پیشین را قطع کرده‌اند. این موضوع در بحث دگرسانی تشریح می‌گردد.

عوامل زیادی از جمله کانی‌شناسی اولیه کانسنگ، سنگ‌شناسی سنگ میزبان، عوامل ساختاری، رژیم آب و هوایی و موقعیت سطح ایستایی و نوسان آن در ایجاد فرایند برون‌زاد در کانسارهای سرب و روی با میزبان رسوبی دخیل هستند (Jeffrey, 2001). مرحله برون‌زاد در کانسار چاه‌نار دارای گسترش محدودی است و در این مرحله، کانی‌های سولفیدی به کانی‌های غیرسولفیدی سرب و روی و

بر پایه ریخت‌شناسی ماکل‌های کلسیت (Burkhard, 1993)، و حضور کلسیت (نوع I و II)، دمای دگرگون‌شدن این مرمر بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که با رخساره شیبست سبز مطابقت دارد. رگه و رگچه‌های کلسیتی و کلسیتی-کوارتزی به ستبرای ۱ میلی‌متر تا چند سانتی‌متر، مرمر کلسیتی و دولومیتی کمپلکس روتشون را قطع کرده‌اند. قرارگیری بلورهای کلسیت به صورت تعادلی در کنار یکدیگر، بافت گرانوبلاستیک را در رگه‌ها نشان می‌دهد (شکل ۵-f).

- توده‌های نفوذی میکرودیوریتی: توده‌های نفوذی به رنگ سبز تیره، با ترکیب شیمیایی حدواسط تا بازیک (میکرودیوریت، دیوریت، مونزودیوریت و دیاباز)، در ناحیه مزار-روتشون به صورت آپوفیز و دایک، واحدهای دگرگونی کمپلکس‌های گل‌گهر و روتشون را قطع کرده‌اند. در ترکیب کانی‌شناسی آنها هورنبلند، پیروکسن، پلاژیوکلاز، بیوتیت، فلدسپات، اولیوین و گاهی کوارتز دیده می‌شود. در کانسار چاه‌نار، توده‌های آذرین به شکل آپوفیز درون شیبست و در مرز شیبست و مرمر و به صورت دایک و آپوفیز درون مرمر کمپلکس روتشون بروزند دارند (شکل ۵-g). دایک‌های دیابازی، دربردارنده پلاژیوکلاز به صورت بلورهای شکل‌دار با ابعاد کمتر از ۱ میلی‌متر، دارای ماکل و آثار تجزیه به سریسیت و اپیدوت است. الیوین به صورت ریز بلورهای شکسته دیده می‌شود و به‌ندرت بقایای پیروکسن‌های تجزیه‌شده قابل مشاهده است. لابلای کانی‌های یاد شده را مجموعه‌های ثانویه شامل اپیدوت، کلریت، کلسیت، ریزبلورهای بی‌شکل کوارتز، لوکوکسن و اکسید آهن پر می‌کنند. در آپوفیزهای میکرودیوریتی، پلاژیوکلاز به صورت بلورهای شکل‌دار و متقاطع، دارای ماکل و به‌شدت اپیدوتی شده است. هورنبلند قهوه‌ای به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و گاهی بی‌شکل است و اغلب آثار تجزیه به کلریت را نشان می‌دهد (شکل ۵-h). کانی‌های ثانویه سنگ را اپیدوت، کلریت، کوارتز و ذرات کدر تشکیل می‌دهند و کانی‌های فرعی آن شامل بلورهای آپاتیت و کانی‌های کدر هستند. با توجه به عدم شواهد دگرگونی در دایک‌ها و آپوفیزهای منطقه، سن احتمالی نفوذ آنها بایستی پس از کرتاسه پسین در نظر گرفته شود.

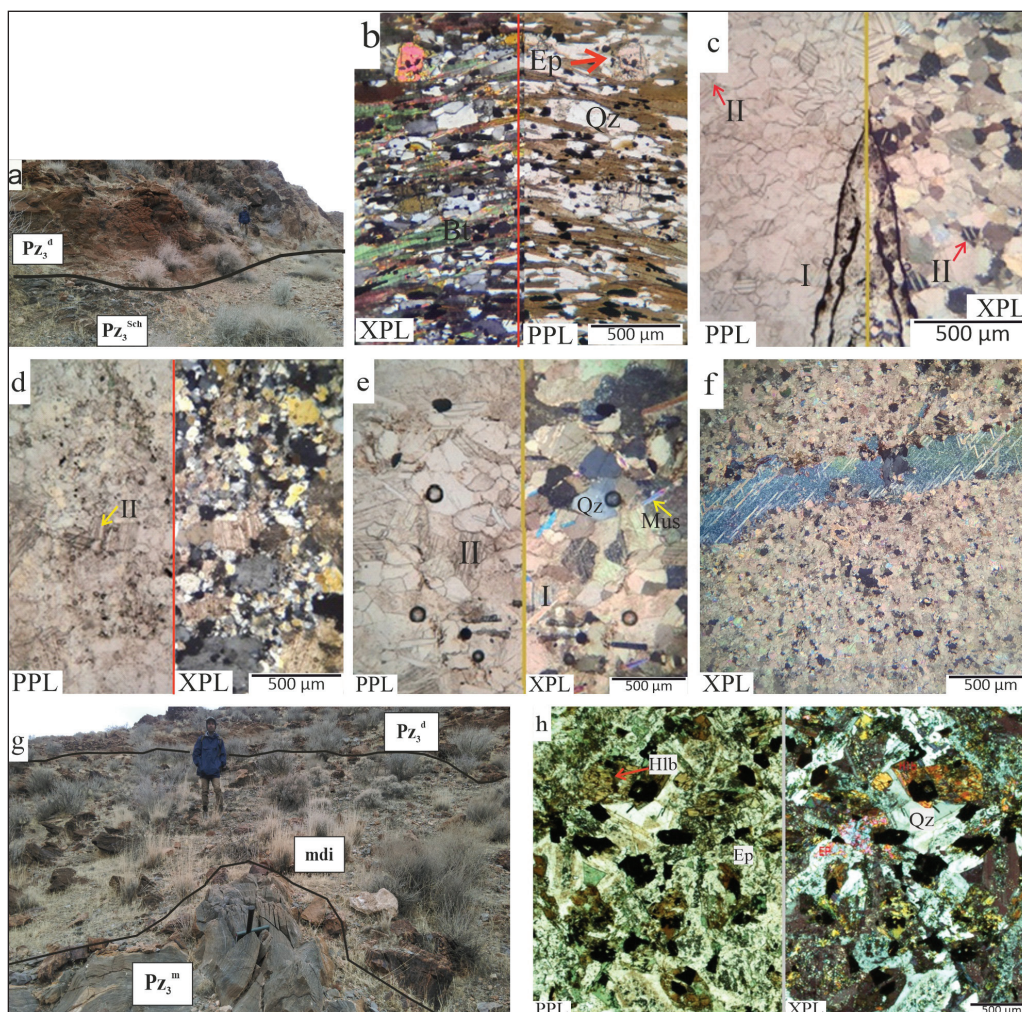
۳-۲- کانی‌سازی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده کانی‌سازی در کانسار چاه‌نار را می‌توان سنگ میزبان کربناتی و کنترل ساختاری نام برد. بخش عمده ماده معدنی درون شکستگی و گسل‌ها نهشته شده است. معدن کاری در چاه‌نار به شکل زیرزمینی انجام شده است. ۶ تونل حفر شده، در مجموع بیش از ۵۵۰ متر درازا دارند و تونل A به‌عنوان طولانی‌ترین آنها حدود ۱۸۰ متر درازا دارد. افزون بر تونل‌ها، ترائشه‌ای در بالادست تونل B (شکل ۶-a) حفر شده که رگه‌ای بر عیار با طول بیش از ۵۰ متر و ستبرای بین ۱ تا ۳ متر را دنبال می‌کند (شکل ۶-b و c). آن‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، مرمرهای واحد Pz_3^d و Pz_3^m در ناحیه چاه‌نار دگرسان شده و توسط توده‌های نفوذی متعددی مورد هجوم قرار گرفته‌اند. هیچگونه شاهد مستقیمی از ارتباط توده‌های نفوذی و کانی‌سازی دیده نمی‌شود و توده‌های نفوذی در خارج از محدوده کانی‌سازی هم برون‌زدهای قابل توجهی دارند. احتمال این که این توده‌ها به‌عنوان شار حرارتی در فرایند کانی‌سازی عمل کرده باشند، دور از ذهن نیست. همچنین مرمرهای محدوده کانسار توسط گسل‌های مختلفی قطع شده‌اند که برخی از گسل‌ها مرتبط با کانی‌سازی هستند. مهم‌ترین گسل مرتبط با کانی‌سازی در این ناحیه، گسل بخش میانی کانسار با روند تقریبی خاوری-باختری است. افزون بر این، گسل‌هایی با روند شمالی-جنوبی و شمال باختری-جنوب خاوری نیز این ناحیه را تحت تأثیر قرار داده‌اند (شکل ۴).

رگه اصلی معدن، درون زون گسلی با مختصات $N70^{\circ}E, 15^{\circ}NW$ قرار دارد. این رگه در تونل‌های A و B (شکل ۴) مورد استخراج و بهره‌برداری قرار گرفته است. درون تونل A، رگه دیگری با مختصات $N95^{\circ}E, 72^{\circ}NE$ استخراج شده است. در متراژ ۲۴ تونل B دو تونل فرعی بر روی رگه کانه‌دار $N44^{\circ}E, 36^{\circ}NW$ که حدود ۱ متر ستبرای دارد، معدن کاری صورت پذیرفته است. در بخش خاوری منطقه

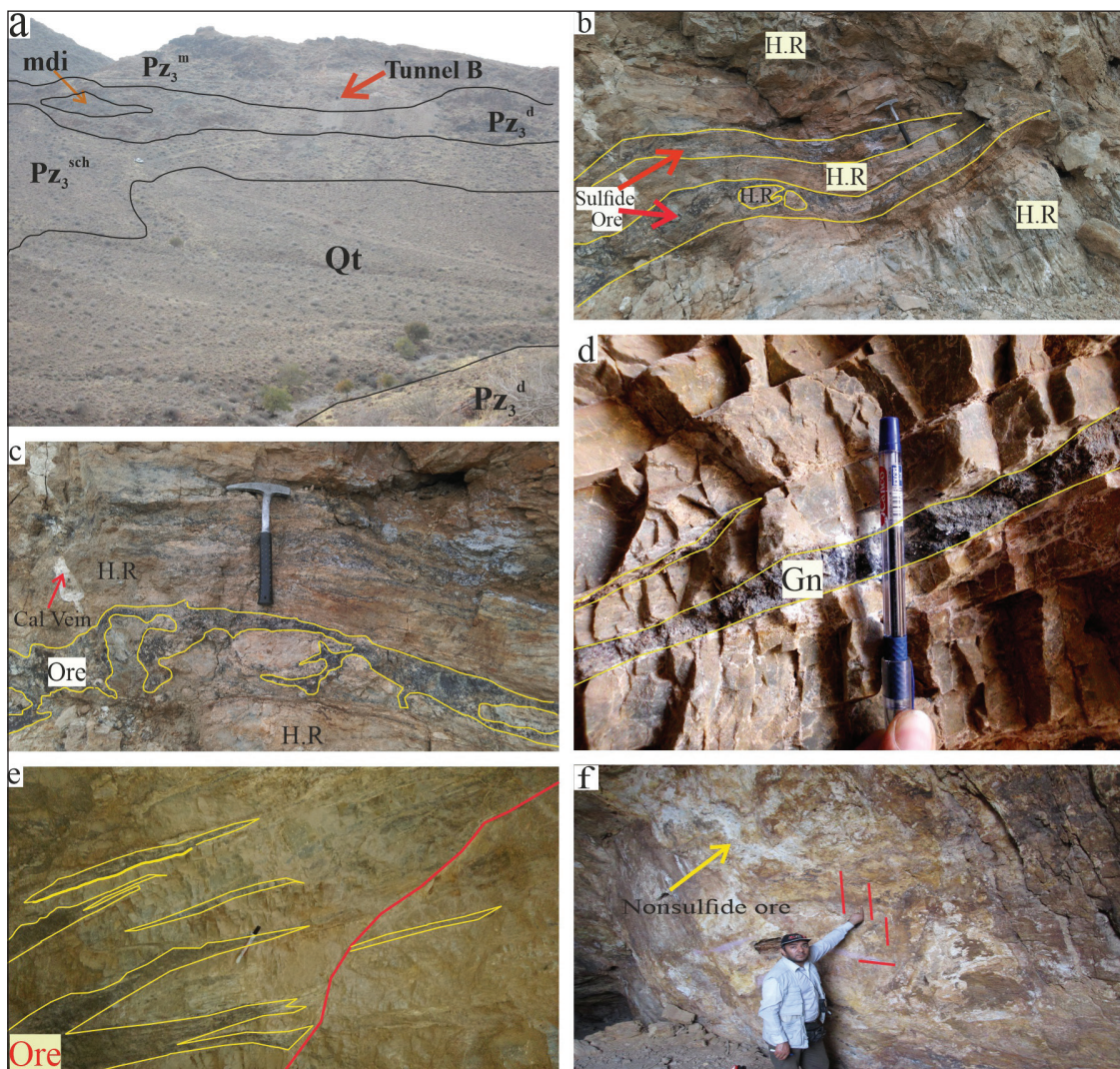
می‌دهد که سروزیت و آنکلیزیت در حاشیه گالن (شکل ۷- e, f) و گوتیت و هماتیت در اثر اکسایش کانی پیریت، تشکیل شده‌اند (شکل ۷- g, h).

کانی‌های اکسید و هیدروکسید آهن تبدیل شده‌اند. کانسنگ غیر سولفیدی در محل تقاطع گسل‌ها و درزه‌ها گسترش بیشتری نشان می‌دهد. مطالعات کانه‌نگاری نشان



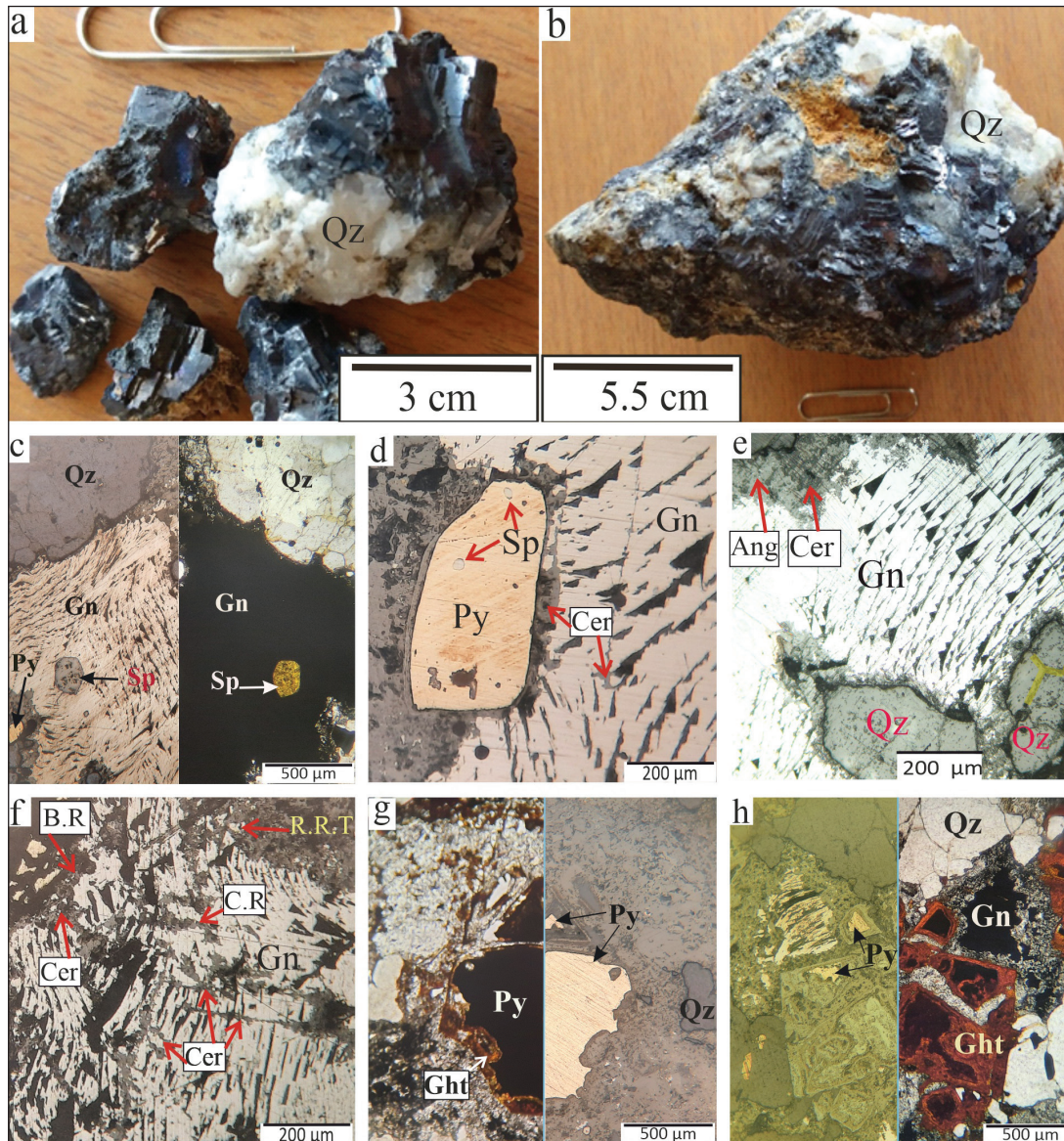
شکل ۵- تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از واحدهای مختلف کمپلکس روتشون در محدوده کانسار چانار. (a) حضور شیست واحد Pz_3^{sch} در زیر مرمر دولومیتی Pz_3^d . (b) تصویر میکروسکوپی آینه‌ای (سمت راست، نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL و سمت چپ، نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از شیست واحد Pz_3^{sch} . کانی‌های بیوتیت، کوارتز، اپیدوت و کانی کدر در تصویر مشخص می‌باشند. (c) تصویر میکروسکوپی آینه‌ای مرمر کلسیتی به نسبت خالص (سمت راست، نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL و سمت چپ، نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) واحد Pz_3^m با بلورهای کلسیت با تیغه‌های ماکلی نازک تا ستر (نوع I و II) و رگه کلسیتی و اکسید آهنی. (d) تصویر میکروسکوپی آینه‌ای مرمر کلسیتی با حضور بلورهای کلسیت همراه با کمی کوارتز و کانی کدر (نمونه CN-A2). (e) تصویر میکروسکوپی آینه‌ای از مرمر کلسیتی ناخالص دربردارنده بلورهای کلسیت با تیغه‌های ماکلی نازک تا ستر (نوع I و II) غیر عمود بر هم، کوارتز و مسکوویت. (f) رگه کلسیتی در مرمر کلسیتی (نمونه CN-A2). (g) بروزند توده آذرین میکرودیوریتی (mdi) به شکل آپوفیز بین مرمرهای کلسیتی (Pz_3^m) و دولومیتی (Pz_3^d). (h) تصویر میکروسکوپی آینه‌ای از میکرودیوریت (سمت راست، نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL و سمت چپ، نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) دربردارنده کانی‌های هورنبلند، کوارتز، اپیدوت (نمونه CN-B3). مخفف کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010): بیوتیت: Bi، کلسیت: Cal، اپیدوت: Ep، هورنبلند: Hbl، مسکوویت: Mus، کوارتز: Qz.

Figure 5. Field photos and photomicrographs of different units from the Rutchun complex around the Chah-Nar deposit. a) The presence of schist (Pz_3^{sch}) under the dolomitic marble (Pz_3^d). b) Mirror photomicrograph (right side XPL and left side PPL) of schist (Pz_3^{sch}). c) Mirror photomicrograph of calcitic marble (Pz_3^m) with thin to thick twin blades (type I and II) and calcite and iron oxide vein (right side XPL and left side PPL). d) Mirror photomicrograph of calcitic marble (Pz_3^m) with the presence of calcite, some quartz and opaque minerals. e) Mirror photomicrograph of impure calcitic marble (Pz_3^m) Contains thin to thick (type I and II) non-perpendicular calcite twin blades, quartz and muscovite. f) Calcite marble with calcite vein (sample CN-A2). g) Outcrop of microdiorite igneous bodies (mdi) in the form of apophysis, intruded to calcitic (Pz_3^m) and dolomitic (Pz_3^d) marbles. h: Mirror photomicrographs of microdiorite (right side XPL and left side PPL), contains hornblende, quartz and epidote minerals (sample CN-B3). Mineral Abbreviations after Whitney and Evans (2010), Bi: Biotite, Cal: Calcite, Ep: Epidote, Hbl: Hornblende, Mus: Muscovite, Qz: Quartz.



شکل ۶- کانی سازی در کانسار چاه‌نار. (a) نمایی دور از دهانه تونل B در بخش شمالی کانسار چاه‌نار که درون مرمر کمپلکس روتشون حفر شده است. به حضور توده آذرین میکرودیوریتی توجه شود. (b) رگه‌های کانه‌دار سولفیدی (به‌طور غالب گالن) درون مرمرهای دگرسان (H.R: Host rock)، ترانشه حفر شده در بالادست تونل B. (c) ساخت پرکننده فضای خالی و پرشی کانسنگ سولفیدی در ترانشه معدنی. به حضور قطعاتی از سنگ میزبان درون بخش کانه‌دار دقت شود. (d) گالن متوسط تا درشت‌بلور درون سیستم درزه سنگ میزبان. (e) نفوذ محلول کانه‌دار در شکستگی‌های تقریباً موازی سنگ میزبان. گسل پس از کانی‌سازی موجب جابه‌جایی رگه‌های کانه‌دار شده است. (f) معدن‌کاری باستانی در سطح گسل N065°E, 85°NW در بخش خاوری کانسار چاه‌نار.

Figure 6. Mineralization in the Chah-Nar deposit. a) A distant view of the entrance of tunnel B in the northern part of the Chah-Nar deposit, which was drilled into the marble of Rutchun complex. Pay attention to the presence of microdiorite apophysis. b) Sulfide veins (mainly galena (Gn)) in altered marbles (H.R: Host rock), trench dug upstream of tunnel B. c) Open space filling and breccia textures of sulfide ore in the mining trench, fragments of the host rock can be seen inside the ore vein. d) Medium- to coarse-grained galena within the joint system of the host rock. e) Ore veins deposited in almost parallel fractures of the host rock. Post-mineralization fault has caused the displacement of mineralized veins. f) Ancient mining on the fault plane N065°E, 85°NW in the eastern part of Chah-Nar deposit.



شکل ۷- بلورشناسی و کانی‌شناسی کانسنگ. (a و b) انواع رخ و جداشدگی در گالن به صورت بلورهای مکعبی. (c) تصویر میکروسکوپی آینه‌ای از کانسنگ سولفیدی (گالن، اسفالریت و پیریت) به همراه کانی باطله کوارتز. (سمت چپ نور بازتابی و سمت راست نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL). (d) حضور اسفالریت به صورت ادخال در پیریت در کنار گالن. گالن به دلیل فرایند جفت گالوانیک (گالن- پیریت) در حال اکسید شدن به آنگلیزیت و سروزیت است (نور بازتابی). (e و f) بافت‌های جانشینی کناره‌ای (B.R)، جانشینی در راستای رخ (C.R) و جانشینی برجای مانده (R.R.T) گالن توسط سروزیت و آنگلیزیت (نور بازتابی). (g) تصویر میکروسکوپی آینه‌ای (سمت راست نور بازتابی و سمت چپ نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) جانشینی گوئیت و هماتیت از حاشیه پیریت. (h) بافت کلوپورمی گوئیت که در اثر هوازدگی پیریت تشکیل شده است. سپر گالن (Galena Armoring) که از کانی‌های سروزیت و آنگلیزیت تشکیل شده و مانع از هوازدگی کامل گالن در فرایند جفت گالوانیکی شده است (سمت چپ نور بازتابی و سمت راست نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL). بافت جانشینی برجای مانده: R.R.T، بافت جانشینی در امتداد رخ: C.R و بافت جانشینی از حاشیه (کناره‌ای): B.R.

Figure 7. Crystallography and mineralogy of ore. a and b) cleavage and separation in galena in the form of cube crystals in the Chah-Nar deposit. c) Mirror microscopic image of sulfide ore (galena, sphalerite and pyrite) along with quartz gangue mineral. (left side of reflected light and right side of PPL transmitted light). d) Sphalerite as an inclusion in the pyrite next to the galena. Galena is being oxidized to anglesite and cerusite due to the process of galvanic coupling (galena-pyrite) (reflected light). e and f) Boundary replacement (B.R), cleavage replacement (C.R) and replacement relic textures (R.R.T) of galena by cerusite and anglesite (reflected light). g) Mirror microscopic image (right side reflected light and left side PPL transmitted light) of goethite and hematite replacement from pyrite margin. h) goethite cloform texture formed by weathering of pyrite. Galena armoring, which consists of cerusite and anglesite, has prevented complete weathering of galena in the galvanic coupling process (left side reflected light and right side PPL transmitted light). B.R: Boundary replacement; C.R: Cleavage replacement; R.R.T: Replacement relic texture.

جدول ۱ - کانی‌های تشکیل دهنده انواع کانسنگ در کانسار چاه‌نار که به روش XRD شناسایی شده‌اند.

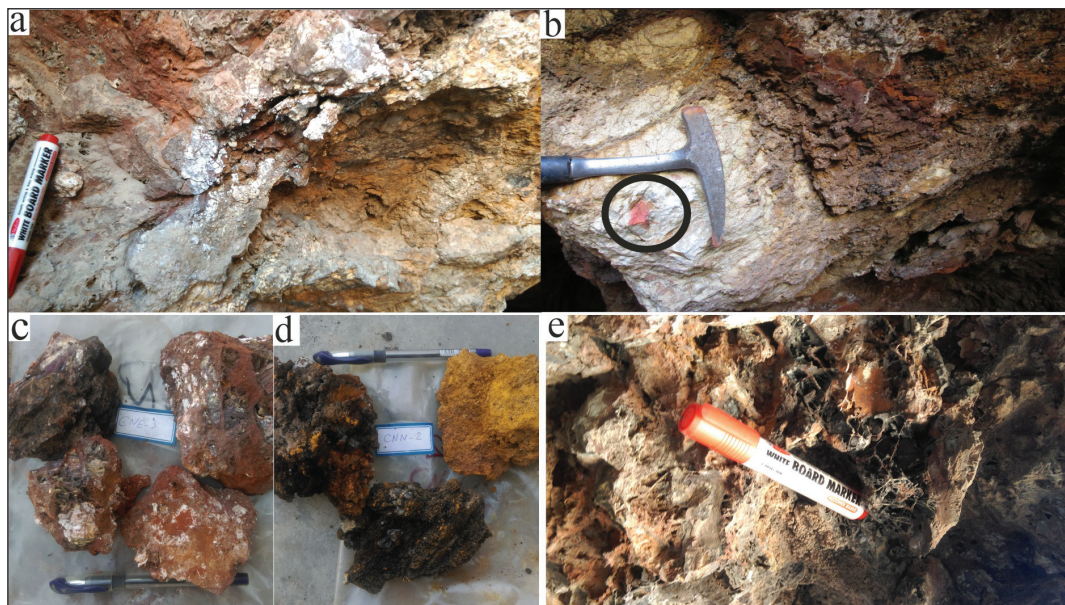
Table 1. Minerals in various types of ores in the Chah-Nar deposit, which have been identified by XRD method.

Sample No.	Ore type	Minerals	
		Major (> 10%)	Minor (< 10%)
CNA-7	Sulfide Ore	Gn, Qz	Ang, Cer
CNA-11	Sulfide Ore	Gn, Qz, Ang	Py, Gth
CNA-12	Sulfide Ore	Gn, Qz, Ang, Cer	Py, Mas
CNB-2	Sulfide Ore	Qz, Gn, Cer, Dl	Smt, Cal
CNB-6	Sulfide Ore	Qz, Gn, Cer	Dl, Smt, Hmp, Mnr
CNE-1	Sulfide Ore	Qn, Qz, Dl	Cer, Hmp, Smt, Mnr
CNC-1	Non Sulfide Ore	Qz, Hmp	Ill
CNE-4	Non Sulfide Ore	Qz, Hmp, Mnr, Dl	Cal, Hem, Gn
CNA-1	Non Sulfide Ore	Qz, Hem, Gth	Gn, Hmp
CNN-1	(Gossan (Boxwork texture	Qz, Gth	Hem, Hmp
CNN-2	(Gossan (Boxwork texture	Qz, Gth, Hem	Cal
CNE-3	(Gossan (Boxwork texture	Qz, Gth, Hem	Cal, Psm

Abbreviations after Siivola and Schmid (2007) (Ang: Angelesite, Cer, Cerussite, Cal: Calcite, Dl: Dolomite, Gn: Galena, Gth, Goethite, Hem: Hematite, Hmp: Hemimorphite, HR: Host Rock, Ill, Illite, Mas: Massicot, Mnr: Minrcordite, Psm: Psilomelane, Py: Pyrite, Qz: Quartz, Smt: Smithsonite, Sp: Sphalerite).

کرده است. بخش‌های اکسید شده (یا هوازده) گوسان‌مانند نه تنها در سطح رگه‌های سولفیدی اولیه، بلکه درون حفره‌های مرتبط با گسل نیز تشکیل شده‌اند. بخش گوسان کانسار دربردارنده اکسید و هیدروکسیدهای آهن از جمله هماتیت و گوتیت (جدول ۲) است (شکل ۸- c و d).

هرچند در مطالعات میکروسکوپی آشکارا دگرسانی اسفالریت دیده نمی‌شود، اما واکنش و قرمز شدن کانسنگ غیرسولفیدی (شکل ۸- a و b) با محلول معرف روی (Zinc Zap) و نتایج آنالیز کانی‌شناسی XRD (جدول ۱) همی مورفیت و اسمیت‌زونیت را به‌عنوان کانی فرعی (حاصل از دگرسانی اسفالریت) مشخص



شکل ۸- کانسنگ برون‌زاد در کانسار چاه‌نار. a و b) کانسنگ غیرسولفیدی روی و سرب (اسمیت‌زونیت، سروزیت و همی مورفیت) در دهانه تونل E که در اثر واکنش با محلول نشانگر Zinc Zap به رنگ قرمز در آمده است. c) کانسنگ غیرسولفیدی (روی و سرب) اخرائی رنگ. d) اکسید-هیدروکسیدهای آهن (لیمونیت، گوتیت، هماتیت) به‌صورت کلاهیگ آهنی (گوسان). e) ساخت جعبه‌ای (Boxwork) در بخش سطحی کلاهیگ آهنی (گوسان).

Figure 8. Supergene ore in Chah-Nar deposit. a and b) Zinc and lead nonsulfide ore (smithsonite, cerussite and hemimorphite) at the entrance of tunnel E. It has turned red due to reaction with Zinc Zap indicator solution. c) Nonsulfide ore (zinc and lead) ocher color. d) iron oxide-hydroxides (goethite, limonite hematite) in the form of iron cap (Gossan). e) Boxwork texture in an iron cap (Gossan).

جدول ۲- ترکیب عنصری در ۱۰ نمونه کانسنگ سولفیدی و نمونه‌های دایک، کربنات سیلیسی شده و شیت در کانسار چاه‌نار (تمامی مقادیر بر اساس گرم در تن، به جز Al, Ca, Fe, Si که درصد وزنی است).

Table 2. Elemental composition in 10 sulfide ore samples, dyke, silicified carbonate and schist samples in the Chah-Nar deposit(all values are in ppm, except for Al, Ca, Fe, Si, which are wt.%).

	Element	Ag	Al	Ca	Cd	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Pb	S
Sample type	DL (ppm)	0.1	0.01%	0.01%	0.1	1	0.01%	100	100	5	100	1	50
Sulphide ore	CNA-07	64.9	0.20	0.06	18.3	31	3.41	314	264	9	100	409500	70600
Sulphide ore	CNA-08	62.9	0.11	0.23	7.1	28	2.33	405	286	434	286	348650	31700
Sulphide ore	CNA-09	50.7	0.49	0.18	16.4	485	6.42	288	900	192	233	174320	8401
Sulphide ore	CNA-10	31	0.25	0.23	23.3	46	2.08	845	683	37	125	167500	9493
Sulphide ore	CNA-11	49.4	0.14	0.03	6.7	47	7.34	141	120	11	121	329300	49500
Sulphide ore	CNA-12	56.6	0.12	0.03	8.4	28	2.55	100	116	13	100	370100	57500
Sulphide ore	CNB-02	108	0.04	5.8	289.8	166	0.28	100	3510	247	115	295900	10234
Sulphide ore	CNB-05	73.2	0.16	9.28	439.41	104	1.11	508	4210	370	320	253000	28300
Sulphide ore	CNB-06	220	0.07	6.3	433.4	152	0.79	100	4095	316	100	260500	9430
Sulphide ore	CNE-01	44.1	0.09	15.02	1097.2	60	0.53	100	6925	394	105	115800	2555
	Mean	76.08	0.16587	3.716	234.001	114.7	2.684	290.1	2110.9	202.3	160.5	272457	27771
Dyke	CNB-3	0.75	8.15	4.77	0.65094	21	8.39	7471	31970	1262	29674	40	238
Dyke	CNN-3	0.75	8.87	4.42	0.63697	4	7.95	6580	30580	1131	31250	34	237
Si-Marble	CN-M-1	0.60	0.09	5.02	0.4	153	1.5	117	29100	483	75	138	522
schist	CNA-06	0.10	6.43	2.08	4.5	192	11.45	29219	2630	1112	25798	344	639

	Element	P	Si	Sr	Ti	Zn	As	Ba	Bi	Cu	Mo	Sb	V
Sample type	DL (ppm)	10	0.01%	1	10	1	0.1	1	0.1	1	0.1	0.5	1
Sulphide ore	CNA-07	257	17.38	148.5	10	1950	30.4	37	0.4	31	0.9	1.6	12
Sulphide ore	CNA-08	35	25.49	71.9	10	479	28.3	127	0.3	28	1.6	5.6	10
Sulphide ore	CNA-09	60	32.39	105.4	12	2504	11.5	179	43.4	485	1.8	25.6	11
Sulphide ore	CNA-10	284	32.2	106.9	45	1975	25.2	84	0.3	46	1.7	5	14
Sulphide ore	CNA-11	42	18.25	118.3	11	1048	40.6	43	0.4	47	1.2	2	11
Sulphide ore	CNA-12	84	19.31	131.8	10	441	19.6	51	0.3	28	1.2	2.3	11
Sulphide ore	CNB-02	19	12.68	256.3	13	29200	18.9	11	0.3	166	0.4	0.5	13
Sulphide ore	CNB-05	283	16.03	136.9	10	12691	14.8	102	0.4	104	1.2	0.5	12
Sulphide ore	CNB-06	29	15.46	176.1	10	33900	30.8	16	0.3	152	0.8	0.5	14
Sulphide ore	CNE-01	24	4.55	187.2	10	54500	13.8	37	0.3	60	0.8	2.3	16
	Mean	111.7	19.374	143.93	14.1	13868.8	23.39	68.7	4.64	114.7	1.16	4.59	12.4
Dyke	CNB-3	3161	23.37	362	12590	147	0.75	243	>0.1	21.32	0.8115	>0.5	313
Dyke	CNN-3	4101	24.12	270.58	12500	149	0.75	220	>0.1	3.915	0.4	>0.5	206
Si-Marble	CN-M-1	253	34.82	46.4	7.5	606	567.25	27	0.1	153	0.1	0.5	6
schist	CNA-06	936	25.06	391.7	17600	152	2.8	710	0.1	192	0.4	0.5	146

(جدول ۱ و شکل ۷-۱). دیگر کانی‌ها را به‌ویژه سروزیت، اسمیت‌زونیت و هماتیت همراهی می‌کنند. هماتیت کمتر از گوتیت مشاهده می‌شود. بر اساس مطالعات کانی‌شناسی، نمونه‌های کلاهیک نارس هستند. توالی همبازی کانه‌ها و کانی‌ها در کانسار چاه‌نار در شکل ۹ آمده است.

۳-۳- دگرسانی سنگ میزبان

ماهیت کانیایی سنگ میزبان نقش مهمی در مهاجرت و فعل و انفعالات زمین‌شیمیایی سیال کانه‌دار در کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان کربناتی دارد

کانسنگ غیرسولفیدی در نواحی سطحی زرد تا قرمز (کانسنگ منطقه قرمز) و در مناطقی به رنگ سفید (کانسنگ منطقه سفید- شکل ۸-۸)، به‌صورت پرکننده حفرات، اکسیدهای جعبه‌ای (Boxwork oxides) (شکل ۸-۸) و ساختارهای پوسته‌ای (crustiform) در حفره‌های کارستی ظاهر می‌شوند. به‌طور کلی، کانی‌های غیرسولفیدی اصلی (مرحله برون‌زاد) در کانسار چاه‌نار شامل سروزیت، آنگلزیت، اسمیت‌زونیت، همی‌مورفیت، ماسیکوت (PbO) و مینرکوردیت (CaZn(CO₃)₂) است (جدول ۱). گوتیت فراوان‌ترین کانی کلاهیک‌های اکسیدی است که در بیشتر نمونه‌های سطحی مشاهده می‌شود

در مجاورت رگه‌های کانه‌دار، مقدار $\text{SiO}_2=74\%$ اندازه‌گیری شده که بیانگر شدت بسیار زیاد سیلیسی شدن سنگ مرمر است. نتایج کانی‌شناسی به روش XRD نمونه‌های کانسنگ سولفیدی (جدول ۱) نیز بیانگر حضور کوارتز به عنوان کانی باطله اصلی به همراه کانی‌های سولفیدی است. فقدان حضور کلسیت و دولومیت به عنوان فاز اصلی کانی باطله در نتایج مطالعات آشکار است. دگرسانی سیلیسی به صورت ریزدانه در متن سنگ و رگه و رگچه‌ای دیده می‌شود (شکل ۷-e، c، h). در مقاطع میکروسکوپی، کوارتزهای ریزبلور در زمینه سنگ میزبان و کانسنگ (شکل ۷-e، c، h) و متوسط تا درشت‌بلور در رگه-رگچه‌های سیلیسی همراه با فاز کانی‌زایی سولفیدی (شکل ۷-a، b) تشکیل شده است. فقدان حضور دولومیت‌های ثانویه (زین اسبی، گرمایی و...) یکی از تفاوت‌های اساسی نوع دگرسانی در کانسار چاه‌نار با کانسارهای نوع MVT می‌باشد (Velasco et al., 2003; Wilkinson, 2014). دگرسانی کربناتی هرچند بسیار محدود و ناچیز است، اما به صورت رگه-رگچه کلسیتی (شکل ۵-f) و به میزان بسیار ناچیزی دولومیتی شدن نمود دارد. در برخی موارد، رگه-رگچه‌های درشت‌بلور کلسیت جوان (فاز پس از کانی‌سازی)، کانی‌سازی و سنگ میزبان را قطع کرده‌اند (شکل ۱۰-b و c).

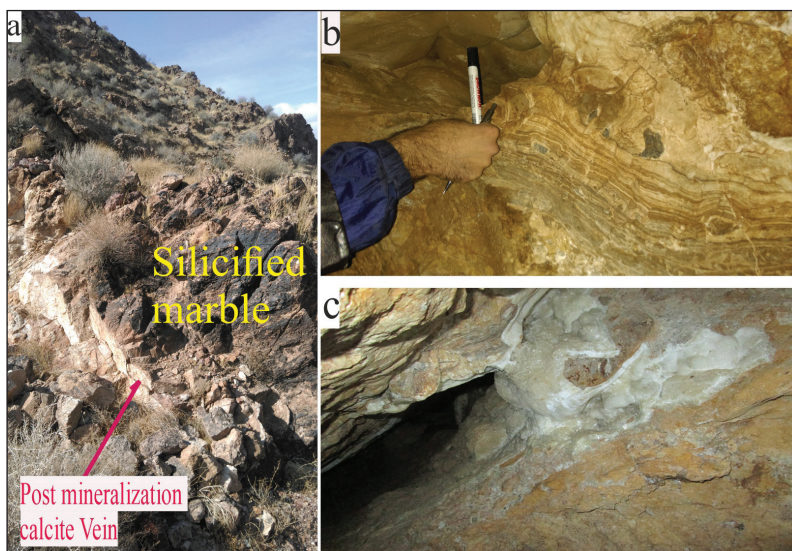
Leach et al., 2005; Kesler, 2005; Ruffell et al., 1998; Vandeginste et al., 2007). در کانسار چاه‌نار، مرمر کلسیتی-دولومیتی کمپلکس روتشون (واحد Pz_3^m)، سنگ میزبان کانی‌زایی است و حدود ۲۰ درصد از کل توالی چینه‌شناسی منطقه (و بیش از ۵۰ درصد توالی چینه‌شناسی محدوده معدن) را تشکیل داده است (شکل ۴). سنگ‌های کربناته به سبب انحلال‌پذیری و واکنش‌پذیری بالا، می‌توانند حتی در حالی که در قسمت کوچکی از ستون چینه‌نگاری منطقه وجود دارند، به‌عنوان یک افق مناسب جهت کانی‌سازی عمل نمایند (Evans, 1993). در محدوده کانی‌زایی، مرمر کلسیتی-دولومیتی، به‌شدت دگرسان شده (شکل ۱۰-a)، توسط توده‌های نفوذی (آپوفیز و دایک) متعددی مورد تهاجم قرار گرفته (شکل ۵-g) و به‌وسیله گسل‌های مختلفی قطع شده است (شکل ۴).

سیلیسی شدن در کانسار چاه‌نار به‌طور گسترده در سنگ میزبان دیده شده و تا چندین ده متر از رگه‌های کانه‌دار هم قابل مشاهده است (شکل ۶-a). این دگرسانی سیمای تیره به سنگ میزبان داده و سطح سنگ را قهوه‌ای بسیار تیره تا مشکی کرده است (شکل ۱۰-a). در آنالیز یک نمونه از سنگ میزبان دگرسان (نمونه CN-M-1)

Minerals	Pre- Mineralization	Hydrothermal Mineralization period		Supergene oxidation
		Early	Late	
Quartz	—————	—————	—————	
Pyrite	—————		—————	
Galena		—————	—————	
Sphalerite		—————		
Calcite	—————		—————	
Dolomite	—————		—————	
Angelesite				—————
Cerussite				—————
Hemimorphite				—————
Massicot				—————
Minrecordite				—————
Smithsonite				—————
Goethite				—————
Hematite				—————

شکل ۹- توالی همبرزایی کانه‌ها و کانی‌ها در کانسار سرب و روی چاه‌نار.

Figure 9. Paragenetic sequence of ores and minerals in the Chah-Nar Pb-Zn deposit.



شکل ۱۰- انواع دگرسانی سنگ میزبان در کانسار چاه‌نار. (a) سیلیسی شدن مرمر دولومیتی در مجاورت رگه کانه‌دار. (b و c) دو نما از رگه‌های کلسیتی که پس از فاز کانی‌سازی تشکیل شده‌اند (تونل‌های B و E).

Figure 10. Host rock alteration in the Chah-Nar deposit. a) Intense silicification of dolomitic marble near the ore vein. b,c) Two views of post-mineralization calcite veins (tunnels B and E).

۳-۴- زمین‌شیمی کانسنگ سولفیدی اولیه

نتایج تجزیه‌های شیمیایی رگه‌های معدنی کانسار چاه‌نار، نشان داد افزون پرسرب و روی، عناصر ارزشمند دیگری مانند نقره و کادمیم نیز در ماده معدنی حضور دارند. نتایج تجزیه شیمیایی برخی از عناصر مهم کانه‌ساز که با استفاده از روش دستگاهی (AAS و ICP-MS) مورد تجزیه قرار گرفته‌اند، در جدول ۲ آورده شده‌اند. ضریب همبستگی محاسبه شده بین غلظت عناصر سنگ‌ساز، کانه‌ساز و کمیاب در کانسنگ سولفیدی اولیه کانسار چاه‌نار در جدول ۳ آمده است. برخی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی عناصر در زیر آمده است.

- سرب: بیشترین غلظت را در نمونه‌های کانسنگ دارد و مقدار آن از ۱۰ تا بیش از ۴۰ درصد در تغییر است. سرب بیشترین همبستگی را با گوگرد ($R^2=0/86$) نشان می‌دهد (جدول ۳) و بیانگر حضور کانی گالن به‌عنوان کانه اصلی در کانسار است. سرب همبستگی متوسطی با آرسنیک (۰/۵۸) دارد. همبستگی منفی سرب با کلسیم (۰/۵۵-) نشانگر حضور چیره سرب در قالب سولفید و سولفات است تا کربنات سرب.

- روی: پس از سرب، بیشترین غلظت را با میانگینی حدود ۱/۳ درصد در کانسنگ نشان می‌دهد (جدول ۲). روی با Ca (۰/۹۰)، V (۰/۸۲) و Cd (۰/۴۱) همبستگی مثبت بالایی نشان می‌دهد و برعکس با سرب (۰/۵۲-) و گوگرد (۰/۶-) همبستگی منفی نشان می‌دهد. این موضوع با پدیده هوازگی سطحی و تبدیل اسفالریت به کانه‌های غیرسولفیدی به‌ویژه اسمیت‌زونیت (کربنات روی) قابل توجیه است. این موضوع در نتایج XRD هم تأیید شد (جدول ۱).

- نقره: نقره یکی از عناصر کمیابی است که غنی‌شدگی بالایی در کانسنگ دارد. بیشترین غلظت نقره ۲۲۰ و میانگین آن ۷۶ گرم در تن است. این عنصر همبستگی آشکاری با دیگر عناصر کانسار ساز نشان نمی‌دهد (جدول ۳)، هر چند انتظار می‌رود مقادیر این عنصر ارتباط مثبتی با سرب در کانی گالن داشته باشد.

- آنتیموان: غلظت آنتیموان در کانسنگ چاه‌نار پایین بوده و از ۰/۵ تا ۲۵ گرم در تن در تغییر است. این عنصر با Cu (۰/۸۴)، Ba (۰/۸۰) و Bi (۰/۹۷) همبستگی مثبت بالایی نشان می‌دهد. این همبستگی حضور احتمالی مقادیر بسیار ناچیز کانی‌های سولفوسالت را تداعی می‌کند.

- بیسموت: تغییرات غلظت بیسموت از ۰/۳ تا ۴۳ گرم در تن است. در کانسار سرب و روی رگه‌ای با میزان شیبست-گری وک ترامونیت (Terramonte) در کشور پرتغال (Neiva et al., 2015) و کانسارهای اسکارن سرب و روی از جمله کانسار رووای (Ruwai) اندونزی (Dana et al., 2022) به‌دلیل وجود سیالات گرمایی مرتبط با توده‌های آذرین مقادیر بالایی از بیسموت را نشان می‌دهند. در ترکیب کانی‌شناسی کانسار رووای، سولفوسالت و سولفوآرسنید و بیسموت طبیعی گزارش شده است. مقادیر پایین این عنصر می‌تواند منشأ غیرماگمایی سیال کانه‌دار را نشان دهد.

- باریم: غلظت باریم در کانسنگ چاه‌نار پایین بوده و از ۱۱ تا ۱۷۹ گرم در تن در تغییر است. غلظت این عنصر بر خلاف اغلب کانسارهای سرب و روی با میزان کربناتی از جمله نوع ایرلندی و MVT بسیار پایین می‌باشد.

- سیلیسیم: به‌عنوان اصلی‌ترین محصول دگرسانی و سیال گرمایی بوده و مقادیر آن از ۴/۵ تا بیش از ۳۲ درصد در کانسنگ متغیر است. Si با عناصر Zn (۰/۷۶-)، Cd (۰/۷۶-) و Ca (۰/۷۶-) همبستگی منفی و با Sb (۰/۹۷) و Bi (۰/۵۳) همبستگی مثبت نشان می‌دهد (جدول ۳). دلیل ارتباط منفی سیلیسیم با روی را به فرایند اکسیداسیون برون‌زاد و تشکیل کربنات روی به جای اسفالریت نسبت می‌دهند. چنین مقادیر بالایی از سیلیسیم به‌عنوان کانی باطله در کانسارهای سرب و روی با میزان کربناتی گزارش نشده است. این مقادیر مشابه کانسارهای رگه‌ای سرب و روی مانند کانسار ترامونیت (Terramonte) است (Neiva et al., 2015).

جدول ۳- ضریب همبستگی اسپرمن محاسبه‌شده بین غلظت عناصر سنگ‌ساز، کانه‌ساز و کمیاب در کانسنگ سولفیدی کانسار چاه‌نار.

Table 3. Spearman's correlation coefficient calculated between the concentration of rock-forming, ore-forming and trace elements in the sulfide ore of the Chah-Nar deposit.

	Ag	Ca	Cd	Cu	Fe	Mg	Pb	S	Si	Zn	As	Ba	Bi	Sb	V
Ag	1.00														
Ca	0.22	1.00													
Cd	0.19	0.98	1.00												
Cu	0.12	-0.06	-0.07	1.00											
Fe	-0.39	-0.63	-0.58	0.34	1.00										
Mg	0.34	0.98	0.96	0.04	-0.65	1.00									
Pb	0.11	-0.55	-0.58	-0.41	0.17	-0.59	1.00								
S	-0.23	-0.52	-0.52	-0.47	0.37	-0.62	0.86	1.00							
Si	-0.29	-0.76	-0.76	0.37	0.49	-0.73	-0.03	-0.01	1.00						
Zn	0.41	0.90	0.93	0.01	-0.62	0.94	-0.52	-0.60	-0.77	1.00					
As	0.21	-0.47	-0.42	-0.49	0.34	-0.46	0.55	0.48	0.05	-0.32	1.00				
Ba	-0.43	-0.32	-0.34	0.55	0.42	-0.33	-0.26	-0.16	0.73	-0.50	-0.38	1.00			
Bi	-0.16	-0.24	-0.22	0.93	0.54	-0.18	-0.36	-0.28	0.53	-0.21	-0.45	0.72	1.00		
Sb	-0.28	-0.33	-0.29	0.85	0.56	-0.28	-0.37	-0.28	0.65	-0.30	-0.40	0.81	0.97	1.00	
V	0.22	0.73	0.79	-0.12	-0.59	0.77	-0.66	-0.58	-0.51	0.83	-0.23	-0.50	-0.27	-0.31	1.00

این عناصر کمیاب، دارای کلارک کمتر از ۱۰۰ گرم در تن در پوسته زمین بوده (Levinson, 1980) و ذخایر قابل توجهی از این عناصر در پوسته زمین تشکیل نشده است و به‌طور عمده به‌صورت فرعی در ساختار کانه‌های سولفیدی تمرکز یافته‌اند (Hall and Heyl, 1968; Qian, 1987; Hagni, 1996; Song and Tan, 1996;)

۳-۵- زمین‌شیمی کانی گالن

گالن با ساختار بلوری کوییک به‌ندرت در طبیعت به‌صورت خالص بوده و اغلب میزان عناصر کمیابی چون $Ag, Sb, Bi, As, Cd, Se, Sn, Hg, Ga, In$ و Tl است (Qian, 1987; George et al., 2015, 2016; Ye et al., 2016).

گالن در کانسار چاه‌نار، غنی‌شدگی بالایی از Ag و As به میزان کمتری غنی‌شدگی از Zn، Cd، Sb و برعکس تهی‌شدگی از Bi (جدول ۴) را نشان می‌دهد. بیشترین غلظت عناصر کمیاب در نمونه‌های گالن به ترتیب مربوط به آرسنیک (با میانگین ۳۵۸ و بیشینه غلظت ۵۵۶ گرم در تن) و نقره (با میانگین ۱۲۳ و بیشینه غلظت ۱۵۶ گرم در تن) و کمترین مقدار مربوط به تالیم (با میانگین ۲/۸ گرم در تن)، سلنیم (با میانگین ۲/۹ گرم در تن) و بیسموت (با میانگین ۸/۲ گرم در تن) به‌دست آمد (جدول ۴). غلظت روی و مس در گالن دامنه گسترده‌ای از مقادیر کم تا نسبتاً زیاد را به نمایش گذاشته است. نکته قابل توجه، مقادیر بالای روی و تا حدودی آهن و مس در نمونه‌های گالن درشت‌بلور نسبت به ریزبلور می‌باشد (جدول ۴). به باور گنورگ و همکاران (George et al., 2015) این غلظت بالا ناشی از حضور اذخال‌های میکروسکوپی پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت است.

بررسی زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی کانسنگ سولفیدی و کانی گالن (Ye et al., 2011; George et al., 2015; Li et al., 2022) فیزیکی‌شیمیایی انحصاری و کاربرد خاص این عناصر، استحصال آنها به‌صورت محصول جانبی (By-product) از فراوری کانه‌های سولفیدی میزبان مقرون به صرفه و ارزشمند است (George et al., 2015). اگرچه عوامل ذاتی یا درونی (از جمله حالت اکسیداسیون و شعاع یونی) نسبت به عوامل خارجی (مانند سنگ میزبان، منابع فلز، سولفیدهای هم‌زیست، فشار، دما و شرایط ردوکس) تعیین‌کننده جایگیری عناصر کمیاب درون کانی میزبان سولفیدی (مانند پیریت، اسفالریت و گالن) می‌باشند، اما عوامل خارجی مانند دما ممکن است نقش مهمی در جداسازی عنصری ایفا می‌کنند (Keith et al., 2016; Large et al., 2009; Pfaff et al., 2011; Ye et al., 2011; Zhao et al., 2021; Li et al., 2022). به نظر می‌رسد می‌توان از ویژگی‌های عناصر کمیاب در گالن برای نشان دادن نوع تپ کانه‌زایی استفاده کرد (Li et al., 2022).

جدول ۴- غلظت برخی عناصر (بر حسب گرم در تن، به جز سرب و گوگرد) در نمونه‌های گالن کانسار چاه نار.

Table 4. Concentration of elements (in ppm, except for lead and sulfur) in galena samples of the Chah-Nar deposit.

Element	Ag	As	Bi	Cd	Cu	Fe	P	Pb %	S %	Sb	Se	Sn	Sr	Tl	Zn	Sb/Bi	Type
D.L (ppm)	0.1	0.1	0.1	0.1	1	100	10	10	5	0.5	0.5	0.1	1	0.1	1		
CN-B-7	156.8	260.37	1.8	97	106	1150	94	85.99	13.38	9.1	9.24	0.8	21.2	6.31	1812	5.06	1
CN-B-7-1	107.4	240.22	1.9	95	94	632	174	86.18	13.39	8.8	2.79	0.8	22.5	5.26	1405	4.63	1
CN-G-1	111.7	556.43	12.8	51	6	241	69	86.35	13.43	27.3	0.5	2.1	23.6	1.19	5	2.13	2
CN-G-2	102.2	271.77	11.1	39.9	10	835	70	86.32	13.42	11.9	0.58	2.6	23.9	1.14	9	1.07	2
CN-G-3	133.4	489.16	9.2	50.6	9	543	77	85.72	13.39	25	0.5	1.5	50.3	1.48	50	2.72	2
CN-G-4	115.3	436.12	16.1	47.19	11	535	71	86.13	13.37	20	0.52	0.9	32.7	1.28	18	1.24	2
CN-G-5	120.3	387.1	10.8	60.8	42	612	92	86.21	13.41	16.7	2.07	0.9	29.1	2.2	541	1.55	1
CN-G-6	141.3	226.14	1.6	85	85	1035	84	85.66	13.27	8.3	7.04	0.7	20.2	4.12	1652	5.19	1
Min	102.2	226.1	1.6	39.9	6.0	241.0	69.0	85.7	13.3	8.3	0.5	0.7	20.2	1.1	5.0	1.1	
Max	156.8	556.4	16.1	97.0	106.0	1150.0	174	86.4	13.4	27.3	9.2	2.6	50.3	6.3	1812.0	5.2	
Mean	123.6	358.4	8.2	65.8	45.4	697.9	91.4	86.1	13.4	15.9	2.9	1.3	27.9	2.9	686.5	2.9	
Clark	0.07	1.8	10	0.2	55	46500	930	14	370	0.2	0.05	0.05	375	0.45	83		

Type: 1=Coarse-grained galena 2= Fine- to medium-grained galena.

اپی‌ترمال محتوای مس نسبتاً بالایی دارد و با این پارامتر از کانسارهای MVT متمایز می‌شود. این تمایز احتمالاً به تفاوت در سیالات گرمایی بین دو نوع کانسار نسبت داده می‌شود، اولی به‌طور کلی در ارتباط با محلول گرمایی ماگمایی است در حالی که دومی با شورابه‌های حوضه‌ای مرتبط است (Wind et al., 2020; Li et al., 2022). با این وجود، نشانه‌های عناصر کمیاب گالن در کانسارهای سرب- روی نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) به‌طور محدود گزارش شده است (Ye et al., 2016; Li et al., 2020; Li et al., 2022). تقسیم‌شدن عناصر بین کانی گالن و کانی‌های سولفیدی همراه آن و فاکتورهای کنترل‌کننده آن نیاز به تأیید بیشتری از کانسارهای دمایی پایین دارد (Wei et al., 2021).

حضور فلزات کمیاب در گالن به صورت ۱- جانشینی عنصری فلز کمیاب به جای سرب در ساختار بلوری گالن و یا به‌صورت محلول جامد، ۲- اذخال جامد یا ترکیب کانی‌شناسی ویژه آن عنصر کمیاب و ۳- همراهی فلز کمیاب با اذخال‌های کانی بیگانه حامل این عناصر مانند اسفالریت، تتراهدیریت و کالکوپیریت (به‌صورت اذخال یا محلول جامد) در شبکه بلوری گالن مطرح شده است (Betkhe and Barton, 1971; Foord et al., 1988; Lueth et al., 2000; Chutas et al., 2008; Renock and Becker, 2011; George et al., 2015; Li et al., 2022).

ضریب همبستگی اسپیرمن به منظور یافتن روابط میان عناصر، برای نمونه‌های گالن محاسبه گردید. ضریب همبستگی خطی (r) به‌دست آمده با استفاده از روش اسپیرمن، بین غلظت عناصر نشان داد که همبستگی مثبت معناداری بین برخی از جفت عناصر در گالن برقرار است (جدول ۵). قوی‌ترین همبستگی مثبت بین زوج عناصر Se-Zn و Sb-As، Sb-Bi، Zn-Cd، Cd-Tl، Cu-Ti، Cu-Zn برقرار است.

گالن در کانسارهای اسکارن با مقادیر Bi بالا و Sb پایین مشخص می‌شود، در حالی که گالن در کانسارهای گرمایی از Sb غنی شده و محتوای مس نسبتاً بالا دارد و از Bi تهی می‌باشد. به‌طور کلی Bi در سیالات با دمای بالا انتقال می‌یابد، در حالی که Sb در شرایط دمایی پایین تر متحرک است (Tooth et al., 2013; Grant et al., 2015; Cave et al., 2020; Li et al., 2022). در کانسارهای رسوبی-بروندمی (SEDEX)، گالن به‌طور معمول غنی از Sn و حاوی مقادیر متوسطی از Bi است (Tooth et al., 2013; George et al., 2015, 2016; Leng et al., 2019; Wind et al., 2020; Cave et al., 2020; Li et al., 2022). برعکس، گالن در کانسارهای دمایی پایین، مانند کانسارهای اپی‌ترمال و MVT، دارای Bi کم اما Sb زیاد است. مقایسه کانسارهای اپی‌ترمال و MVT نشان می‌دهد که گالن در کانسارهای

به‌جای Pb و یا محلول جامد در ساختار تتراهدردیت-تنانتیت باشد. در همه نمونه‌ها غلظت آنتیموان بیشتر از بیسموت اندازه‌گیری شده و نسبت Sb/Bi نزدیک به ۳ می‌باشد. نسبت Sb/Bi در گالن می‌تواند نشان‌دهنده شرایط کانی‌سازی باشد به‌طوری که نسبت کمتر از ۰/۶ بیانگر شرایط دما و فشار بالا و نسبت بیش از ۶ تا ۱۳ نشان‌دهنده شرایط دما و فشار پایین باشد (Malakhov, 1968). نسبت Sb/Bi در کانسارهای رسوبی بسیار بالا بوده و این مسئله به‌دلیل دمای پایین تشکیل گالن دانسته شده‌است. این نسبت در کانسارهای نوع MVT در جنوب‌خاور میسوری و ایلینویز-کنتاکی به‌ترتیب ۳/۴ و ۵/۸ می‌باشد (Hall and Heyl, 1968). از سوی دیگر، لوفتوس-هیلزو سولومن (Loftus-Hills and Solomon, 1967) مقدار زیاد Se در کانی‌های سولفیدی را مربوط به خاستگاه آتشفشانی و ارتباط آنها با فرایندهای کانی‌سازی دمابالا می‌دانند. غلظت بالای Sb، نسبت Sb/Bi و غلظت بسیار اندک Bi و Se در کانسار چاه‌نار، عدم ارتباط منشأ آنها با فعالیت‌های آذرین در منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. غلظت مس از ۶ تا ۱۰۶ گرم در تن در تغییر است و میانگینی حدود ۴۵ گرم در تن دارد. این مقدار حتی از کلارک عنصر مس هم پایین‌تر است و می‌تواند دلیلی بر جدایش ژنتیکی این کانسار از کانسارهای گرمابی (چند فلزی) که منشأ محلول کانه‌دار آنها ماگمایی است، باشد. غلظت قلع در گالن کانسار چاه‌نار بر خلاف کانسارهای نوع SEDEX (George et al., 2015) بسیار پایین است. Cd با میانگین ۶۶ گرم در تن، غلظت بالایی دارد و ضریب همبستگی بالایی را با Zn در گالن نشان می‌دهد (جدول ۵). فرناندز و ایزارد (Fernandez and Izard, 2005) کمیت و کیفیت رخداد Cd در گالن را تحت کنترل غلظت Zn و حضور اسفالریت در گالن می‌دانند؛ زیرا Cd تمایل زیادی به تمرکز در اسفالریت به‌صورت جانشین Zn و تشکیل گرتینوکیت (CdS) دارد. بر این اساس، مقادیر بالای Cd در گالن را می‌توان به حضور ادخال‌های میکرونی از اسفالریت در گالن مربوط دانست.

مس و روی در گالن به‌طور عموم ناشی از حضور ادخال‌های میکروسکوپی پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت در نظر گرفته شده است (George et al., 2015). سازوکار جانشینی ساده عنصری یا دو عنصری به‌جای Pb برای عناصر Bi, Hg, Cd, Ag و به‌صورت $Pb^{2+} \leftrightarrow (Cd, Hg)^{+2}$ یا $Pb^{2+} \leftrightarrow Ag^{+} + (Bi, Sb)^{3+}$ مطرح شده است (George et al., 2015). As با میانگین غلظت ۳۵۸ گرم در تن فراوان‌ترین عنصر کمیاب در گالن کانسار چاه‌نار است. یکی از ابزارهای آماری برای تعیین نوع و درجه رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر تحلیل همبستگی است. ضریب همبستگی، دو متغیره بوده و شدت رابطه و نوع آن (معکوس یا مستقیم) را نشان می‌دهد (Swan et al., 1995). با توجه به ضریب همبستگی مثبت بالای این عنصر با Sb و Bi می‌توان حضور As را به‌صورت سولفوسالت توجیه کرد. سری محلول جامد جوردانیت-ژئوکورنیت (jordanite-geocronite) با فرمول $Pb_{14}(As_{6.4}Sb_{0.2})_6S_{23} - Pb_{14}(As_{4.2}Sb_{2.4})_6S_{23}$ (Mořlo et al., 2008) ارائه شده، شاید یکی از محتمل‌ترین ترکیبات شیمیایی توجیه‌کننده حضور آرسنیک در گالن چاه‌نار باشد. انواع آنتیموان‌دار این سری با فرمول $Pb_{14}(Sb)_6S_{23}$ (schulzite) نام دارد. همبستگی منفی As با Cu و Fe حضور این عنصر در کانی‌هایی چون آرسنوپیریت و کالکوپیریت به‌صورت ادخال در گالن را منتفی می‌کند. Ag با میانگین غلظت ۱۲۳ گرم در تن یکی از فراوان‌ترین عناصر کمیاب در گالن‌های مورد بررسی است. حضور Ag در گالن به‌صورت جانشینی ساده به‌جای Pb با توجه به نزدیکی شعاع یونی آنها به یکدیگر (۱/۲۶ آنگستروم برای Ag و ۱/۲۰ آنگستروم برای Pb) امکان‌پذیر است. کانی‌های نقره‌دار معمول به شکل ادخال در گالن شامل نقره خالص، آکانتیت و آرژانتیت (Ag_2S)، سولفوسالت‌های نقره مانند پیر آرژریریت (Ag_3SbS_2) و یا به‌صورت محلول جامد در ساختار تتراهدردیت-تنانتیت هستند (Lueth et al., 2000; Cook et al., 2007). با توجه به جدول ضریب همبستگی، به احتمال زیاد مهم‌ترین عوامل حضور Ag در گالن کانسار چاه‌نار، جانشینی ساده

جدول ۵- ضریب همبستگی اسپیرمن برای داده‌های گالن کانسار چاه‌نار.

Table 5. Spearman's correlation coefficient for galena data of the Chah-Nar deposit.

	Ag	As	Bi	Cd	Cu	Fe	Sb	Se	Sr	Tl	Zn
Ag	1.00										
As	0.22	1.00									
Bi	-0.01	0.83	1.00								
Cd	0.70	-0.13	-0.31	1.00							
Cu	0.70	-0.22	-0.34	0.99	1.00						
Fe	0.77	-0.17	-0.08	0.73	0.79	1.00					
Sb	0.19	1.00	0.82	-0.17	-0.26	-0.18	1.00				
Se	0.88	-0.09	-0.21	0.87	0.91	0.87	-0.13	1.00			
Sr	0.42	0.73	0.61	0.04	0.00	0.15	0.76	0.09	1.00		
Tl	0.73	-0.14	-0.29	0.98	0.98	0.78	-0.19	0.91	0.07	1.00	
Zn	0.74	-0.22	-0.36	0.98	0.99	0.81	-0.26	0.94	-0.01	0.97	1.00

۴- بحث

روابط می‌توان تاحدودی به محیط و فرایندهای مؤثر در تشکیل کانسار پی برد (Hedenquist et al., 2000).

مهم‌ترین شاخصه‌های عنصری کانسنگ سولفیدی و باطله همراه آن در کانسار چاه‌نار، غلظت بسیار بالای سرب (به‌صورت گالن) و سیلیسیم (کوارتز به‌عنوان کانی باطله اصلی) است. این هم‌نشینی در هیچ یک از کانسارهای شناخته شده سرب و

در کانسارهای گرمابی جهت بررسی منشأ احتمالی، مطالعه عناصر در سنگ میزبان و کانه‌ها بسیار اهمیت دارد، چرا که این عناصر در کانسارهای مختلف از خود اختلافاتی را بروز می‌دهند که می‌توان از این اختلافات در تعیین منشأ احتمالی آنها استفاده کرد. در مطالعات زمین‌شیمی، نحوه پراکندگی عناصر مختلف در ماده معدنی و ارتباط و همبستگی این عناصر با یکدیگر مدنظر است. با بررسی این

بروندمی- رسوبی یا نوع SEDEX؛ و (۲) کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی یا MVT. در جدول ۶ ویژگی‌های ژنتیکی این کانسار با کانسارهای نوع MVT، SEDEX و ایرلندی مقایسه شده است. سنگ میزبان کانه‌زایی در چاه‌نار مشابه کانسارهای نوع MVT و نوع ایرلندی است و با اغلب کانسارهای بروندمی- رسوبی شباهت چندانی ندارد. زمان کانه‌زایی در کانسار چاه‌نار پس از سنگ‌شدگی سنگ میزبان و به صورت اپی ژنتیک است. این ویژگی اساسی در کانسار چاه‌نار به مانند کانسارهای نوع MVT است و این کانسار را از کانسارهای رسوبی- بروندمی و نوع ایرلندی متمایز می‌کند. دگرسانی در کانسار چاه‌نار به‌طور چیره از نوع سیلیسی‌شدن است و این ویژگی وجه تمایز بنیادی این کانسار با کانسارهای نوع MVT است.

روی با میزبان رسوبی و اختصاصاً کانسارهای با میزبان کربناته گزارش نشده است، چرا که در اغلب کانسارهای یادشده، کربناتی‌شدن (به ویژه دولومیتی شدن) سنگ میزبان به عنوان مهم‌ترین دگرسانی قلمداد می‌شود. گالن در کانسار چاه‌نار غنی‌شدگی از عناصری چون آرسنیک، نقره و کادمیم نشان می‌دهد. این ویژگی تا حدودی مشابه کانسارهای نوع MVT و ایرلندی است. مقادیر پایین سلنیم و بیسموت خاستگاه آتشفشانی و دمای بالا را برای این کانسار منتفی می‌نماید. برای تعیین نوع کانی‌زایی در کانسار چاه‌نار، می‌توان ویژگی‌های شاخص این کانسار را با کانسارهای سرب و روی با میزبان رسوبی مقایسه کرد. بر پایه ویلکسینسون (Wilkinson, 2014) کانسارهای سرب و روی با میزبان رسوبی طبق شاخص کانساری و ژنتیکی در دو گروه کلی تقسیم‌بندی می‌شوند: (۱) کانسارهای نوع

جدول ۶- مقایسه ویژگی‌های اصلی کانسار سرب و روی چاه‌نار با ذخایر سرب و روی متصاعدی- رسوبی، نوع ایرلندی و نوع دره می‌سی‌سی‌پی (Leach et al., 2005; Wilkinson, 2003, 2014).

Table 6. Comparison of principal characteristics of the Chah-Nar Pb-Zn deposit with SEDEX, Irish-type, and MVT deposits (Leach et al., 2005; Wilkinson, 2003, 2014).

	SEDEX	Irish-type	MVT	Chahnar deposit
Host rock	Shales, carbonates, calcareous/organic-rich siltstones	Non-argillaceous carbonates within mixed carbonate-siliciclastic succession	Mainly dolostone and limestone, rarely sandstone	Calcitic and dolomitic marble
Ore minerals	Sphalerite, galena, pyrite, pyrrhotite, marcasite, minor sulfosalts, chalcopyrite	Sphalerite (low Fe), galena, pyrite, marcasite, minor sulfosalts, chalcopyrite	Sphalerite, galena, pyrite, marcasite, minor sulfosalts	Galena, pyrite, sphalerite
Gangue minerals	Calcite, siderite, dolomite, ankerite, and quartz. Barite is common to absent	Dolomite, calcite, quartz. Barite is common, locally economic. Fluorite is extremely rare	Dolomite, calcite. Barite is minor to absent and fluorite is rare	Quartz, calcite is minor and dolomite is rare
Texture	Bedding-parallel, fine-grained, layered, and banded textures with or without coarser-grained brecciated, veined, fragmental, or chaotic textures	Dominated by massive sulfide but highly variable and complex textures. Mostly replacement, common veins and locally open-space filling	Coarsely crystalline to fine-grained, massive to disseminated. Replacement and open-space filling.	Coarsely crystalline to fine-grained, massive. open-space filling and replacement.
Trace metal content	Cu, As, Cd, Sb, Tl, Hg, Se, Bi, Ge, Ni	Cu, Cd, Ag, As, Ni, Co	Cu, Co, Ni, Ag, Sb, Cd, Ge, Ga, In	As, Cd, Ag, Sb
Timing of mineralization	Syngenetic and/or during early diagenesis in unlithified to lithified sediment	Mostly during diagenesis, in partly and wholly lithified sediments. Minor syngenetic component	Epigenetic, tens to hundreds of millions years after host-rock deposition	Epigenetic
Associated igneous activity	No direct association with igneous activity, but tuffs related to synchronous distal volcanism may be present	Close spatial and temporal association with volcanic activity in Limerick province	Not associated with igneous activity	Unclear relationship associated with igneous activity
Ore fluid	Low to high temperature (70–300°C) infiltrated or connate, variably evaporated seawater	Low to moderate-temperature (70–280 °C) infiltrated partially evaporated seawater	Mostly low-temperature (90–150 °C) connate bitter brines or evaporite dissolution brines	Hydrothermal fluids (metamorphic source?)

کانی‌زایی نیز حضور دارند، هر چند احتمال این که این دسته از توده‌های آذرین به‌عنوان یک موتور حرارتی در چرخش سیالات گرمایی عمل کرده باشند، دور از ذهن نیست.

به احتمال زیاد، محلول‌های کانه‌دار سیلیسی طی فرایند دگرگونی ناحیه‌ای از طریق آب‌زدایی (Dehydration) کمپلکس روتشون و به‌ویژه سنگ‌های شیست، فیلیت و اسلیت در قالب کمپلکس سولفیدی عمل کرده‌اند. طبق جدول ۲ غلظت

ارتباط مشخصی بین فعالیت‌های آذرین منطقه و کانی‌سازی دیده نمی‌شود. توده‌های آذرین استوک‌مانند گابرویی و گرانیتی شمال ده‌سرد (شکل ۲) به سن تریاس پسین بوده، در حالی که کانی‌سازی پس از آخرین رخداد دگرگونی (کرتاسه پسین) که سبب دگرگونی سنگ آهک کوه خیر (کرتاسه پیشین) شده، رخ داده است. شواهد صحرایی بیانگر این است که دایک‌ها و آپوفیزهای میکرودیوریتی و دیابازی نیز ارتباط مشخصی با کانی‌سازی نشان نمی‌دهند و در خارج از محدوده

جانیشینی مستقیم به جای سرب یا محلول جامد، مهم‌ترین فرایندهای رخداد عناصر در گالن می‌باشد.

- عملکرد فرایند برونزاد بر روی کانی‌های اولیه باعث تشکیل کانی‌های سروزیت، اسمیت‌زونیت، همی‌مورفیت، گوتیت و هماتیت شده است و در برخی موارد گوسان نارس هم بر روی کانسنگ اولیه مشاهده می‌شود.

- جایگاه زمین‌ساختی، ساخت و بافت، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی کانسنگ سولفیدی و کانی گالن در کانسار چاه‌نار نشانگر آن است که این کانسار، بیشترین شباهت ژئری را با کانسارهای نوع MVT دارد، هر چند برخی تفاوت‌های ژنتیکی را با این رده کانساری نیز نشان می‌دهد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح شماره ۳/۴۱۱۷۹ مورخ ۱۳۹۵/۴/۱ انجام شده است و بخشی از دستاوردهای رساله دکتری نگارنده اول می‌باشد. از آقایان دکتر محمد صالحی تینونی، مهندس محسن جرجندی پور و دکتر احمد رشیدی بشرآبادی که در برداشت‌های مختلف عملیات صحرایی یاری نمودند، سپاسگزاریم. همکاری صمیمانه آقای مهندس علی رشیدی (مدیرکل زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کرمان) در بحث پشتیبانی عملیات صحرایی شایسته تقدیر است. از داوران محترمی که در ارتقای علمی مقاله نقش بسزایی داشتند، سپاسگزاریم.

عناصر سرب، روی و گوگرد در شیبست فاقد کانی‌سازی به ترتیب ۳۴۴، ۱۵۲ و ۶۳۹ گرم در تن است که این مقادیر چندین برابر کلارک عناصر یادشده در شیل (سنگ مادر شیبست) می‌باشد. در این شیبست، غلظت سیلیسیم ۲۵٪ است. کمپلکس روتشون (واحد Pz_3^{sch}) (شکل ۲ و ۴) که دربردارنده شیبست، اسلیت، فیلیت و مرمر می‌باشد را می‌توان به‌عنوان منبع تأمین فلزات سرب و روی و همچنین گوگرد به‌شمار آورد.

۵- نتیجه‌گیری

آنچه می‌توان از پژوهش زمین‌شناسی و زمین‌شیمی در کانسار سرب و روی چاه‌نار به عنوان نتیجه‌گیری نهایی ارائه کرد عبارتند از:

- کانسار چاه‌نار درون مرمرهای کمپلکس روتشون (با سن احتمالی کامبرین بالایی - سیلورین)، به‌صورت دیرزاد تشکیل شده است و سنگ‌شناسی سنگ میزبان و کنترل ساختاری دو پارامتر مهم در نهشت این کانسار می‌باشد.
- ماده معدنی با ساخت و بافت‌های برشی، پرکننده فضای خالی، رگه-رگچه‌ای، جانیشینی و دانه‌پراکنده دارای گالن، اسفالریت و پیریت و کوارتز است.
- کانسنگ سولفیدی غنی از سرب بوده و مقادیر روی و دیگر عناصر کانسارساز در آن به نسبت پایین می‌باشد. زمین‌شیمی گالن بیانگر، غنی‌شدگی این کانی از Ag و As به میزان کمتری غنی‌شدگی از Zn، Cd، Sb و برعکس تهی‌شدگی از Bi است.

کتابنگاری

- صفری لنگرودی، م.، ۱۳۷۱، خاستگاه کانسارهای سرب و روی با بستر کربناته در منطقه سه چاه- روتشون (جنوب غرب بافت- استان کرمان). پایان نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شیراز، ۴۰۰ ص.
- قربانی ده‌نوی، م.، ۱۳۹۶، اطلس زمین‌شناسی و منابع معدنی شهرستان بافت، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۶۱ ص.
- کریم‌پور، م.ح.، ملک‌زاده‌شفارودی، آ.، اسماعیلی سویری، ع.، شعبانی، س.، الاز، ج. و استرن، ج.، ۱۳۹۶، زمین‌شناسی، کانی‌سازی، شیمی کانی‌ها، شیمی و منشأ محلول کانه‌دار در ناحیه معدنی سرب و روی ایرانکوه، جنوب اصفهان، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۹، شماره ۲، ص ۲۶۷-۲۹۴.
- نوازی، م.، ناظم‌زاده‌شعاعی، م. و عزیزان، ح.، ۱۳۷۹، یافته‌های نوین پالئوتولوژیکی در سنگ‌های دگرگونه زون سندج- سیرجان (جنوب بافت)، گزارش مقدماتی، مدیریت زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی جنوب‌خاوری؛ ۱۰ ص.

References

- Annels, A.E, O'Donovan, G., and Bowles, M., 2003. New ideas concerning the genesis of the Angouran Zn-Pb deposit, NW Iran. Abstracts of the 26th Mineral Deposits Studies Group, University of Leicester, Leicester, pp 11-12.
- Bethke, P.M., and Barton, P.B., 1971. Distribution of some minor elements between coexisting sulfide minerals. *Econ. Geol.* 66 (1), 140-163. DOI: 10.2113/gsecongeo.66.1.140.
- Burkhard, M., 1993, Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review. *Journal of Structural Geology* 15: 351-368. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(93\)90132-T](https://doi.org/10.1016/0191-8141(93)90132-T).
- Cave, B., Lilly, R., and Barovich, K., 2020. Textural and geochemical analysis of chalcopyrite, galena and sphalerite across the Mount Isa Cu to Pb-Zn transition: Implications for a zoned Cu-Pb-Zn system. *Ore Geol Rev* 124. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103647>.
- Chutas, N.I., Kress, V.C., Ghiorso, M.S., and Sack, R.O., 2008. A solution model for high-temperature PbS-AgSbS₂-AgBiS₂ galena. *Am Mineral* 93 (10), 1630-1640. <https://doi.org/10.2138/am.2008.2695>.
- Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Wagner, T., and Stanley, C.J., 2007. Minerals of the system Bi-Te-Se-S related to the tetradymite archetype: Review of classification and compositional variation. *The Canadian Mineralogist*, 45(3): 665-708. <http://dx.doi.org/10.2113/gscanmin.45.4.665>.
- Dana, C.D.P., Agangi, A., Idrus, A., Lai, C.-K., and Simbolon, D.R., 2022. Bi-Ag-Sulfosalts and Sulfoarsenides in the Ruwai Zn-Pb-Ag Skarn Deposit, Central Borneo, Indonesia. *Minerals*, 12, 1564. <https://doi.org/10.3390/min12121564>.

- Ebrahimnejad, M., Arvin, M., and Dagahi, S., 2020. Petrogenesis of Dehsard felsic rocks in the southwest of Kerman, Iran: Inference for the evolution of Sanandaj-Sirjan zone, *Journal of African Earth Sciences* 172, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103978>.
- Ehya, F., Lotfi, M., and Rasa, I. 2010. Emarat carbonate-hosted Zn–Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study, *Journal of Asian Earth Sciences* 37, 186–194, <https://doi.org/10.1016/j.jseaeas.2009.08.007>.
- Evans, A.M., 1993. *Ore Geology and Industrial Minerals: An Introduction*. Blackwell Scientific Publication, 390 p.
- Fernandez, P.F.J., and Izard, M.A., 2005. Trace element content in galena and sphalerite from ore deposits of the Alcudia Valley mineral field (Eastern Sierra Morena, Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, 86(1): 1–25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.03.001>.
- Foord, E.E., Shawe, D.R., and Conklin, N.M., 1988. Coexisting galena, PbSs and sulfosalts: evidence for multiple episodes of mineralization in the Round Mountain and Manhattan gold districts, Nevada. *The Canadian Mineralogist*, 26(2): 355–376.
- George, L., Cook, N.J., Ciobanu, C.L., and Wade, B.P., 2015. Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study. *Am. Mineral* 100 (2–3), 548–569. <https://doi.org/10.2138/am-2015-4862>.
- George, L.L., Cook, N.J., Ciobanu, C.L., 2016. Partitioning of trace elements in co-crystallized sphalerite–galena–chalcopyrite hydrothermal ores. *Ore Geol. Rev.* 77, 97–116. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.02.009>.
- Ghasemi, A., and Talbot, C. J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran): *Journal of Asian Earth Sciences*, V. 26, p. 683–693. <https://doi.org/10.1016/j.jseaeas.2005.01.003>.
- Ghazban, F., McNutt R. H., and Schwarcz, H. P., 1994. Genesis of sediment- hosted Zn-Pb-Ba deposits in the Irankuh district, Esfahan Area, West- Central Iran, *Economic Geology*, 89, 1262-1278. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.6.1262>.
- Ghorbani Dehnavi, M., 2016. *Atlas of geology and mineral resources of Baft city, Geological Survey of Iran., 161 p (In Persian)*.
- Goodfellow, W.D., and Lydon, J.W., 2007. Sedimentary exhalative (SEDEX) deposits, in 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 5, p. 163-183.
- Grant, H.L., Layton-Matthews, D., and Peter, J.M., 2015. Distribution and controls on silver mineralization in the Hackett River Main Zone, Nunavut, Canada: An Ag-and Pb-enriched archaic volcanogenic massive sulfide deposit. *Econ. Geol.* 110 (4), 943–982. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.4.943>.
- Hagni, R., 1996. Mineralogy and significance of bornite ores in the Viburnum trend, southeast Missouri Lead district. In: D.F. Sangster (Editor), Carbonate-hosted Lead-Zinc deposits. Special Publication No. 4, Society of Economic Geology, USA, pp. 611–630.
- Hall, W. E., and Heyl, A. V., 1968. Distribution of minor elements in ore and host rock, Illinois-Kentucky fluorite district and Upper Mississippi Valley zinc-lead district, *Economic Geology*(63) 655- 670. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.63.6.655>.
- Hedenquest, J.W., Arribas, A., and Urien, G., 2000. Exploration for Epithermal Gold Deposits. SEC; *Rmiezos* 13, 245-277.
- Jazi, M.A., Karimpour, M.H., and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2016. Nakhlak carbonate-hosted Pb(Ag) deposit, Isfahan province, Iran: a geological, mineralogical, geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope study, *Ore Geology Reviews* 80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.010>.
- Jeffrey C. A., 2001. Supergene processes in galena-replacement mineralization from the Longstone Edge vein system, Derbyshire, *Proceedings of the Yorkshire geological society* 53, 197-206. <https://doi.org/10.1144/pygs.53.3.197>.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Esmaili Sevieri, A., Shabani, S., Allaz, J., and Stern, J., 2018. *Geology, mineralization, mineral chemistry, and chemistry and source of ore fluid of Irankuh Pb-Zn mining district, south of Isfahan, Journal of Economic Geology, Vol. 9, No. 2, (in Persian with English abstract)*. <https://doi.org/10.22067/econg.v9i2.64930>.
- Keith, M., Haase, K.M., Klemm, R., Krumm, S., and Strauss, H., 2016. Systematic variations of trace element and sulfur isotope compositions in pyrite with stratigraphic depth in the Skouriotissa volcanic-hosted massive sulfide deposit, Troodos ophiolite, Cyprus. *Chem. Geol.* 423, 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.12.012>.
- Kesler, S.E., 2005. Ore- Forming Fluids. *Elements* 1, 13-18.
- Large, R.R., Danyushevsky, L., Hollit, C., Maslennikov, V., Meffre, S., Gilbert, S., Bull, S., Scott, R., Emsbo, P., Thomas, H., 2009. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits. *Econ Geol* 104 (5), 635–668. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.5.635>.

- Leach, D.L., Sangster, D.F., Kelley, K.D., Large, R.R., Garven, G., Allen, C.R., Gutzmer, J., and Walters, S., 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits: a global perspective. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 561-608 .
- Leach, D.L., Bradley, D.C., Huston, D., Pisarevsky, S.A., Taylor, R.D., and Gardoll, S.J., 2010. Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits in Earth History. *Economic Geology* 105, 593–625. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.593>.
- Leng, C.B., Wang, W., Ye, L., Zhang, X.-C., 2019. Genesis of the late Ordovician Kukaazi Pb-Zn deposit in the western Kunlun orogen, NW China: New insights from in-situ trace elemental compositions of base metal sulfides. *J Asian Earth Sci* 184. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2019.103995>.
- Levinson, A. A., 1980. *Introduction to Exploration Geochemistry*, Applied Publication Company, 924.
- Li, Z., Ye, L., Hu, Y., Wei, C., Huang, Z., Yang, Y., and Danyushevsky, L., 2020. Trace elements in sulfides from the Maozu Pb-Zn deposit, Yunnan Province, China: Implications for trace-element incorporation mechanisms and ore genesis. *Am. Mineral.* 105 (11), 1734–1751. <https://doi.org/10.2138/am-2020-6950>.
- Li, G., Zhao, Z., Wei, J., and Ulrich, T., 2022. Trace element compositions of galena in an MVT deposit from the Sichuan-Yunnan-Guizhou metallogenic province, SW China: Constraints from LA-ICP-MS spot analysis and elemental mapping, *Ore Geology Reviews* 150, 105-123. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105123>.
- Loftus-Hills, G., and Solomon, M., 1967. Cobalt, Nickel and Selenium in Sulfides as Indicators of Ore Genesis, *Mineralium Deposita* 2, 228—242. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00201918>.
- Lueth, V.W., Megaw, P.K.M., Pingitore, N.E., and Goodell, P.C., 2000. Systematic variation in galena solid-solution compositions at Santa Eulalia, Chihuahua, Mexico. *Economic Geology*, 95(8): 1673–1687. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.95.8.1673>.
- Maanijou, M., Tale Fazel, E., Hayati, S., Mohseni, H., and Vafaei, M., 2020. Geology, fluid inclusions, C–O–S–Pb isotopes and genesis of the Ahangaran Pb–Ag (Zn) deposit, Malayer-Esfahan Metallogenic Province, western Iran, *Journal of Asian Earth Sciences* 195, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2020.104339>.
- Maghfouri, S., Hoseinzadeh, M.R., Lents, D.R., Tajeddin, H.A., Mahdavinia, M., and Sharifi, A., 2021. Nature of ore-forming fluids in the Mehdiabad world-class sub-seafloor replacement SEDEX-type Zn-Pb-Ba-(Cu-Ag) deposit, Iran; constraints from geochemistry, fluid inclusions, and O-C-Sr isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences* 207, 104654. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2020.104654>.
- Malakhov, A. A., 1968. Bismuth and antimony in galenas as indicators of some conditions of ore formation, *Geochemistry International* 7, 1055-1068.
- Mořlo, Y., Makovicky, E., Mozgova, N.N., Jambor, J.L., Cook, N., Pring, A., Paar, W., Nickel, E.H., Graeser, S., Karup-Moller, S., Balic-Žunic, T., Mumme, W.G., Vurro, F., Topa, D., Bindi, L., Bente, K., and Shimizu, M., 2008. Sulfosalt systematics: a review. Report of the sulfosalt subcommittee of the IMA Commission on ore mineralogy, *Eur. J. Mineral*, no. 20, pp. 7–46. <http://dx.doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1778>.
- Mohajjel, M., and Fergusson, C. L., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, Vol. 56, No. 3, 263–287. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2013.853919>.
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L., and Sahandi, M. R., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 21, p. 397–412. [http://dx.doi.org/10.1016/S1367-9120\(02\)00035-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00035-4).
- Navazi, M., Nazemzadeh Shuai, M., and Azizan, H., 2001. *New paleontological findings in metamorphosed rocks of Sanandaj-Sirjan zone (south of Baft), preliminary report, geological and mineral explorations of Iran (southeast territory); 10 p (In Persian)*.
- Neiva, A.M.R., Moura, A., and Carvalho, P.C.S., 2015. Metallogenesis at the Terramonte Pb–Zn–Ag quartz vein, Portugal: Geological, mineralogical and geochemical evidences, *Ore Geology Reviews*, 71, 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.04.023>.
- Nazemzadeh, M., and Rashidi, A., 2007. Geological map of Iran, 1:100000 series, sheet 7347-Bazar (Dehsard), *Geol.Surv.Iran*.
- Pfaff, K., Koenig, A., Wenzel, T., Ridley, I., Hildebrandt, L.H., Leach, D.L., and Markl, G., 2011. Trace and minor element variations and sulfur isotopes in crystalline and colloform ZnS: Incorporation mechanisms and implications for their genesis. *Chem. Geol.* 286 (3–4), 118–134. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.04.018>.
- Qian, X., 1987. Trace elements in galena and sphalerite and their geochemical significance in distinguishing the genetic types of Pb–Zn ore deposits, *Chinese Journal of Geochemistry* 6: 177–190. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02872218>.

- Rezaeian, A., Rasas, I., Amiri, A., and Jafari, M.R., 2013. Stable isotope (O and C) geochemistry of non-sulfide Zn-Pb deposits; case study: Chah-Talkh non-sulfide Zn-Pb deposit (Sirjan, south of Iran), *Arabian Journal of Geosciences* 7(6), <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-013-0862-0>.
- Renock, D., and Becker, U., 2011. A first principles study of coupled substitution in galena. *Ore Geology Reviews*, 42(1): 71–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.04.001>.
- Roshan Ravan, J., Nazemzadeh, M., and Azizan, H., 1997. Geological map of Iran, 1:100000 series, sheet 7247-Khabr, Geol.Surv.Iran.
- Ruffell, A.H., Moles, N.R., and Parnell, J., 1998. Characterization and prediction of sediment hosted ore deposits using sequence stratigraphy. *Ore Geology Reviews*, 12: 207-223. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00029-2).
- Safari Langroudi, M., 1992, *Genesis of carbonate-hosted Pb-Zn deposits in Sechah-Rutchun region (southwest of Baft, Kerman province)*. Msc. thesis, Shiraz University, 400 p (In Persian).
- Sahandi, M.R., and Soheili, M., 2014. Geological and structural zonation map of Iran, scale:1:1000000, Geol.Surv.Iran (GSI).
- Siivola, J., and Schmid, R., 2007. List of Mineral Abbreviations; Recommendations by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks. Available at: www.bgs.ac.uk/scmr/home.html.
- Song, X., and Tan, H., 1996. Geochemical characteristics of the Fankou Pb-Zn deposits, Northern Guangdong, South China. In: D.F. Sangster (Editor), Carbonate-hosted Lead-Zinc deposits. Special Publication No. 4, Society of Economic Geology, USA, pp. 350–355. ISBN: 978-1-629496-22-1.
- Swan, A.R.H., Sndilands, M., and McCabe, P., 1995. Introduction to geological data analysis. Back Will Science, p. 146.
- Tooth, B., Etschmann, B., Pokrovski, G.S., Testemale, D., Hazemann, J.-L., Grundler, P. V., and Brugger, J., 2013. Bismuth speciation in hydrothermal fluids: An X-ray absorption spectroscopy and solubility study. *Geochim. Cosmochim. Acta* 101, 156–172. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.10.020>.
- Vandeginste, V., Swennen, R., Gleeson, S.A., Ellam, R.M., Osadetz, K., and Francois, R., 2007. Geochemical constraints on the origin of the Kiking Horse and Monarch Mississippi Valley-type lead-zinc ore deposits, southeast British Columbia, Canada. *Mineralium Deposita*, 42: 913-935. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-007-0142-6>.
- Velasco, F., Herrero, J. M., Yusta, I., Alonso, J. A., Seebold, I., and Leach, D., 2003. Geology and Geochemistry of the Reocin Zinc-Lead Deposit, Basque-Cantabrian Basin, Northern Spain. *Economic Geology*, 98, 1371–1396. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.98.7.1371>.
- Wei, C., Ye, L., Hu, Y., Huang, Z., Danyushevsky, L., and Wang, H., 2021. LA-ICP-MS analyses of trace elements in base metal sulfides from carbonate-hosted Zn-Pb deposits, South China: A case study of the Maoping deposit. *Ore Geol. Rev.* 130(2):103945. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103945>.
- Wilkinson, J. J., 2003. Wilkinson JJ (2003) On diagenesis, dolomitisation and mineralisation in the Irish Zn-Pb orefield. *Mineralium Deposita* 38: 968–983. DOI: 10.1007/s00126-003-0387-7
- Wilkinson, J. J., 2014. Sediment-hosted zinc-lead mineralization: processes and perspectives. *Treatise on Geochemistry* 2nd edition, p. 219-249. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01109-8>.
- Wind, S.C., Schneider, D.A., Hannington, M.D., and McFarlane, C.R.M., 2020. Regional similarities in lead isotopes and trace elements in galena of the Cyclades Mineral District, Greece with implications for the underlying basement. *Lithos* 366–367. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105559>.
- Whitney, D.L., and Evans, B.W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals, *American Mineralogist*, 95, 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.
- Xue, C., Zeng, R., Liu, S., Chi, G., Qing, H., Chen, Y., Yang, J., and Wang, D., 2007. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, South China. *Ore Geology Reviews* 31, 337–359. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.04.007>.
- Ye, L., Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Yuping, L., Qian, Z., Tiegeng, L., Wei, G., Yulong, Y., and Danyushevskiy, L., 2011. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study. *Ore Geol. Rev.* 39 (4), 188–217. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.03.001>.
- Ye, L., Li, Z.L., Hu, Y.S., Huang, Z.L., Zhou, J.X., Fan, H.F., and Danyushevskiy, L., 2016. Trace elements in sulfide from the Tianbaoshan Pb-Zn deposit, Sichuan Province, China: A LA-ICPMS study. *Acta Petrol Sin* 32 (11), 3377–3393 (in Chinese with English abstract).

- Zhao, Z., Wei, J., Liang, S., and Gao, T., 2021. Sulfide remobilization and trace element redistribution during metamorphism and deformation at the Xitianshan Pb-Zn deposit, NW China. *Ore Geol Rev* 136. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104170>.
- Zhuang, L., Song, Y., Liu, Y., Fard, M., and Hou, Z., 2019. Major and trace elements and sulfur isotopes in two stages of sphalerite from the world-class Angouran Zn-Pb deposit, Iran: Implications for mineralization conditions and type, *Ore Geology Reviews*, 109, 184-200. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.009>.