

Research Article

## Geology, mineralization, geochemistry, and skarnization processes in the Qaradash Pb–Zn occurrence (NW Zanjan)

Fatemeh Rezaei<sup>1</sup>, Javad Izadyar<sup>1</sup>, Mir Ali Asghar Mokhtari<sup>1</sup>, Hossein Kouhestani<sup>1\*</sup>

1- Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

**Keywords:** *Geochemistry, skarnification processes, Pb–Zn mineralization, Qaradash, Zanjan.*

### 1- Introduction

The Qaradash area is part of the Takab–Takht-e Soleyman–Angouran subzone. As part of the Sanandaj–Sirjan zone, this subzone is chiefly composed of Precambrian and Paleozoic regional metamorphic rocks (i.e., different types of schists, amphibolite, gneiss, and marble) that locally intruded by Mesozoic (middle-late Triassic) granodiorites (Babakhani and Ghalamghash, 1996; Fonoudi and Hariri, 1999). This event mostly caused contact metamorphic aureole, especially in marble units that are locally accompanied by Fe (i.e., Alamkandi and Qinarjeh) and Pb–Zn (i.e., Alamkandi and Qozlou) mineralization. Several previous studies have characterized the regional and contact metamorphic rocks of the Takab area and there are valuable data about thermodynamic conditions of the formation of these rocks (e.g., Hajialioghli et al., 2007a, b, 2010; Saki, 2010; Saki et al., 2011; Moazzen et al., 2013; Sarkhoshi et al., 2014; Bakhshizad and Ghorbani, 2016). Moreover, some of the Fe and Pb–Zn skarn deposits of this area were studied during the past decades (e.g., Qazvinizadeh, 2005; Daliran, 2008; Fallah Karimi, 2011; Nouri, 2018; Nouri et al., 2017, 2021). The Qaradash occurrence is one of the Pb–Zn mineralization that formed in the contact metamorphic aureole in the Takab–Takht-e Soleyman–Angouran subzone. This occurrence is located 105 km northwest of Zanjan, near the Alamkandi Cr mineralization (Ahrabian Fard et al., 2021a, b). Although there are ancient mining activities in the area, however, no detailed studies have been conducted on the skarnoid aureole and Pb–Zn mineralization of the Qaradash occurrence. In this paper, we investigate the geology, mineralogy, structure and texture, geochemistry, and skarnification processes of the Qaradash occurrence to constrain the type of mineralization and its geological evolution history. Due to the wide exposure of marble units within the regional metamorphic strata of the Takab–Takht-e Soleyman–Angouran subzone, the results of this research may have implications for the recognition of similar skarnoid aureole and Pb–Zn mineralization in this subzone and other parts of the Sanandaj–Sirjan zone.

### 2- Material and methods

Detailed fieldwork has been carried out at different scales in the Qaradash area. A total of 40 samples were collected from various parts of the skarnoid aureole and ore zone. The samples were prepared for thin (n=14) and polished-thin (n=10) sections in the laboratory of the University of Zanjan, Zanjan, Iran. Representative 16 samples from the skarnoid aureole and ore zone were analyzed for major, rare and rare earth elements using XRF (n=5) and ICP–MS (n=11) in the Zarazma Analytical Laboratories, Tehran, Iran.

\* Corresponding author: kouhestani@znu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2022.38235.2240

Received 2021-08-12

Accepted 2022-02-23

### 3- Results and discussions

The geological units exposed in the Qaradash area are Paleozoic metamorphic rocks include alternation of amphibolite and amphibole schist with biotite schist and marble interlayers (Mt<sup>am</sup> unit), Marble (mb unit), peridotite-serpentinite and serpentine schist complex (Ub unit), and gneissic granite (gr unit). In the middle part of the area, skarnoid aureole (Sk unit) was formed within the marble units. Microscopic studies reveal that the skarnoid aureole in Qaradash is composed of garnet hornfels, garnet-pyroxene hornfels, pyroxene hornfels, epidote-garnet-pyroxene hornfels, epidote hornfels, and marble subzones. Pb–Zn mineralization at Qaradash occurred as quartz-sulfide vein-veinlets within skarnoid aureole. There are some late quartz-hematite vein-veinlets that normally cut across quartz-sulfide veins. The ore zone can be traced 200 m along the strike and up to 15 m in width. Ancient mining activities were observed locally in the ore zone. The hydrothermal alteration includes decarbonatization, actinolization-epidotization, carbonatization, and silicification. The ore minerals at Qaradash are pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite, and hematite. Goethite, malachite, and azurite are the supergene assemblages. The gangue minerals include garnet, clinopyroxene, calcite, quartz, epidote, chlorite, and actinolite. Ore minerals display disseminated, vein-veinlet, brecciated, replacement, and relict textures.

Similar Chondrite-normalized rare elements and REE patterns (McDonough and Sun, 1995) of ore and skarnoid aureole sub-zones samples indicate that they are genetically related. Based on mineralogical and textural studies, skarnification processes in the Qaradash occurrence can be divided into 2 stages including (1) prograde metasomatic stage and (2) retrograde metasomatic stage. Pb–Zn mineralization occurred during the retrograde metasomatic stage. Based on mineralogical and textural evidence, the prograde metasomatic stage was formed simultaneously at 430–550 °C and  $fO_2$  was equal to  $10^{-23}$  to  $10^{-26}$  (e.g., Einaudi, 1982). According to the mineralogical complex of the early retrograde stage, it seems that metasomatic fluids had  $fS_2 \approx 10^{-6.5}$  (e.g., Einaudi, 1982).

### 4- Conclusion

Based on field evidence as well as ore geology, skarnoid aureole sub-zones, marble host rock, structure and texture, and paragenetic sequences, we conclude that the Qaradash occurrence is a calcic Pb–Zn skarn mineralization.

### 5- References

- Ahrabian Fard, P., Nabatian, G., Mokhtari, M.A.A., Honarmand, M., Kouhestani, H., 2021a. Mineral chemistry and chromite mineralization in the Qaranaz-Alamkandi area, west Zanzan. *Journal of Economic Geology* 12(4), 585–610 (In Persian with extended English abstract). <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v12i4.79535>
- Ahrabian Fard, P., Nabatian, G., Mokhtari, M.A.A., Honarmand, M., Kouhestani, H., 2021b. Application of electron microprobe studies in determining genesis of chromite mineralization in the Qaranaz-Alamkandi area, west of Zanzan. *Advanced Applied Geology* 11(2), 198–224 (In Persian with extended English abstract). <https://10.22055/aag.2020.30512.2025>
- Babakhani, A.R., Ghalamghash, J., 1996. Geological map of Takht-e-Soleyman, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Bakhshizad, F., Ghorbani, Gh., 2016. Geochemistry, Geochronology and Tectonic Setting of Metamorphic Rocks from the Zanzan-Takab Region. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 25(97), 361–374 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22071/gsj.2015.41537>
- Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran, hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita* 43(4): 383–404. <https://10.1007/s00126-007-0167-x>

- Einaudi, M.T., 1982. General features and origin of skarns associated with porphyry copper plutons. In: Titley S.R., (Ed.), *Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 185–209.
- Fahhal Karimi, Z., 2011. Mineralogy and geochemistry of Qinarjeh Fe index (northeast of Takab, West Azerbaijan province). Unpublished MSc. Thesis, Urmia University, Urmia. (In Persian with English abstract)
- Fonoudi, M., Hariri, A., 1999. Geological map of Takab, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Hajialioghli, R., Moazzen, M., Droop, G.T.R., Oberhansli, R., Bousquet, R., Jahangiri, A. and Ziemann, M., 2007a. Serpentine polymorphs and P-T evolution of meta-peridotites and serpentinites in the Takab area, NW Iran. *Mineralogical Magazine* 71(2), 155–174. <https://doi.org/10.1180/minmag.2007.071.2.203>
- Hajialioghli, R., Moazzen, M., Jahangiri, A., Droop, G.T.R., Bousquet, R. and Oberhänsli R., 2007b. Petrogenesis of meta-peridotites in the Takab area, NW Iran. *Goldschmidt Conference Abstracts, Cologne, Germany*, A370.
- Hajialioghli, R., Moazzen, M., Jahangiri, A., Oberhänsli, R., Mocek, B. and Altenberger, U., 2010. Petrogenesis and tectonic evolution of metaluminous sub-alkaline granitoids from the Takab Complex, NW Iran. *Geological Magazine* 148(2), 250–268. <https://doi.org/10.1017/S0016756810000683>
- McDonough, W.F, Sun, S.S., 1995. Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120, 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Moazzen, M., Hajialioghli, R., Möller, A., Droop, G.T.R., Oberhänsli, R., Altenberger, U. and Jahangiri, A., 2013. Oligocene partial melting in the Takab metamorphic complex, NW Iran: Evidence from in situ U-Pb geochronology. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 24(3), 217–228.
- Nouri, F., 2018. Petrology and geochemistry of Alamkandi granitoid (west of Mahneshan) with considering genesis of Fe mineralization. Unpublished MSc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan. (In Persian with English abstract)
- Nouri, F., Mokhtari, M.A.A., Izadyar, J., Kouhestani, H., 2017. Geological and mineralogical characteristics of Alamkandi Fe deposit, west of Zanjan. 35<sup>th</sup> National Congress on Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. (In Persian with English abstract)
- Nouri, F., Mokhtari, M.A.A., Izadyar, J., Kouhestani, H., 2021. Geochemistry and petrogenesis of the Alamkandi granitoid body and Fe skarn (west of Mahneshan, Zanjan province). *Journal of Economic Geology* 13(3), 507–536 (in Persian with extended English abstract). <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i3.86285>
- Qazvinizadeh, A.M., 2005. Genesis of Alamkandi Pb–Zn deposit, Zanjan Province. Unpublished MSc. Thesis, University of Kharazmi, Tehran, Iran, 150 pp. (In Persian with English abstract)
- Saki, A., 2010. Proto-Tethyan remnants in northwest Iran: Geochemistry of the gneisses and metapelitic rocks. *Gondwana Research* 17(4), 704–714. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.08.008>
- Saki, A., Moazzen, M., Oberhänsli, R., 2011. P–T evolution of the Precambrian Metamorphic Complex, NW Iran: a study of metapelitic rocks. *Geological Journal* 46(1), 10–25. <https://doi.org/10.1002/gj.1236>
- Sarkhoshi, A., Moazzen, M., Izadyar, J., 2014. Mineral chemistry and P-T estimation of formation of garnet schists, Mount Argon, Angoran Mine. *Quarterly Iranian Journal of Geology* 10(38), 47–57 (In Persian with English abstract).

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Rezaei. F, Izadyar. J, Mokhtari.A.A, Kouhestani. H, 2023. Geology, mineralization, geochemistry, and skarnization processes in the Qaradash Pb–Zn occurrence (NW Zanjan), Adv. Appl. Geol. 12(4), 589 – 616.

DOI: 10.22055/AAG.2022.38235.2240

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_17404.html](https://aag.scu.ac.ir/article_17404.html)

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

## زمین شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمی و مراحل اسکارن‌زایی در رخدادهای معدنی سرب- روی قره‌داش (شمال‌باختر زنجان)

فاطمه رضایی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

جواد ایزدی‌ار

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

میر علی اصغر مختاری

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

حسین کوهستانی\*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

\*kouhestani@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۴

### چکیده

مجموعه سنگی موجود در منطقه قره‌داش واحدهای دگرگونی به سن پالئوزوئیک است. کانه‌زایی سرب- روی به صورت رگه- رگچه‌های کوارتز- سولفیدی و دانه‌پراکنده درون هاله اسکارنوئیدی موجود در میان‌لایه‌های مرمری رخ داده و طولی حدود ۲۰۰ متر و پهنایی تا ۱۵ متر دارد. هاله اسکارنوئیدی شامل زیرپهنه‌های گارنت هورنفلس، گارنت پیروکسن هورنفلس، پیروکسن هورنفلس، اپیدوت گارنت پیروکسن هورنفلس، اپیدوت هورنفلس و مرمر می‌باشد. پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت و هماتیت کانه‌های معدنی و گارنت، کلینوپیروکسن، کلسیت، کوارتز، اپیدوت، کلریت و اکتینولیت کانی‌های باطله در رخدادهای معدنی قره‌داش هستند. گوتیت، مالاکیت و آزوریت در اثر فرایندهای بروززاد تشکیل شده‌اند. ساخت و بافت کانسنگ از نوع دانه‌پراکنده، رگه- رگچه‌ای، برشی، جان‌شینی، بازماندی و پُرکننده فضاهای خالی است. فرایند اسکارن‌زایی در دو مرحله اصلی متاسوماتیک پیشرونده و دگرسانی پسرورنده رخ داده است که کانه‌زایی سرب- روی در مرحله پسرورنده تشکیل شده است. شواهد بافتی و کانی‌شناسی سنگ‌های زیرپهنه گارنت پیروکسن هورنفلس بیانگر تشکیل همزمان گارنت و کلینوپیروکسن می‌باشد. با توجه به نمودار درجه حرارت- فوگاسیته اکسیژن، این کانی‌ها در محدوده دمایی ۵۵۰-۴۳۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۰-۲۶-۱۰-۲۳  $fO_2 =$  تشکیل شده‌اند. با توجه به مجموعه کانی‌شناسی مرحله پسرورنده پیشین (پیریت، کوارتز و کلسیت)، سیال متاسوماتیسم‌کننده در این مرحله احتمالاً حداکثر دارای  $fS_2 = 10^{-6/15}$  بوده است. با توجه به شواهد صحرایی، مجموعه کانی‌شناسی زیرپهنه‌های اسکارنوئیدی، سنگ میزبان مرمری، ساخت و بافت و توالی پاراژنزی، کانه‌زایی سرب و روی در رخدادهای معدنی قره‌داش از نوع کانسارهای اسکارن کلسیمی سرب- روی است.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شیمی، مراحل اسکارن‌زایی، کانه‌زایی سرب- روی، قره‌داش، زنجان

## ۱- مقدمه

منطقه قرداش بخشی از زیرپهنه تکاب- تخت سلیمان- انگوران است. این زیرپهنه به عنوان بخشی از پهنه سنندج- سیرجان به طور عمده از سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای (عمدتاً شامل انواع شیست‌ها، آمفیبولیت، گنایس و مرمر) به سن پرکامبرین و پالئوزوئیک تشکیل شده است که در برخی مناطق، توده‌های گرانیتوئیدی مزوزوئیک (تریاس میانی- بالایی) به داخل آنها نفوذ کرده‌اند (Babakhani and Ghalamghash, 1996; Fonoudi and Hariri, 1999). نفوذ این توده‌ها اغلب سبب ایجاد هاله‌های دگرگونی مجاورتی در بخش‌های مرمری توالی دگرگونی ناحیه‌ای شده است که بعضاً با کانه‌زایی‌های آهن (مانند کانسارهای علم‌کندی و قینرجه) و به میزان کمتر سرب- روی (مانند کانسارهای علم‌کندی و قوزلو) همراه می‌باشد (Qazvinizadeh, 2005; Daliran, 2008; Fallah Karimi, 2011; Nouri et al., 2017, 2021). تاکنون مطالعات متعددی در ارتباط با سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای و به میزان کمتر سنگ‌های دگرگونی مجاورتی این منطقه انجام شده و نتایج مهمی در خصوص شرایط ترمودینامیکی تشکیل آنها به دست آمده است (Hajjaliooghi et al., 2007a, b, 2010; Saki, 2010; Saki et al., 2011; Moazzen et al., 2013; Sarkhoshi et al., 2014; Bakhshizad and Ghorbani, 2016). علاوه بر این، کانسارهای آهن و سرب و روی اسکارنی یادشده نیز در قالب پایان‌نامه‌های دانشگاهی و پروژه‌های تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته و اطلاعات ارزشمندی در ارتباط با زمین‌شناسی و کانه‌زایی آنها منتشر شده است (Qazvinizadeh, 2005; Fallah Karimi, 2011; Nouri, 2018; Nouri et al., 2021). رخداد معدنی قره‌داس یکی از کانه‌زایی‌های سرب- روی تشکیل شده در هاله‌های دگرگونی مجاورتی (اسکارنوئیدی) در زیرپهنه تکاب- تخت سلیمان- انگوران می‌باشد که در فاصله ۱۰۵ کیلومتری شمال‌باختر زنجان و در مجاورت کانه‌زایی کرومیت علم‌کندی (Ahrabian Fard et al., 2021a, b) واقع شده است. علی‌رغم وجود آثار فعالیت‌های استخراجی قدیمی در این رخداد معدنی، تاکنون هیچ پژوهش علمی بر روی هاله اسکارنوئیدی و کانه‌زایی سرب- روی آن انجام نشده است. در پژوهش حاضر، زمین‌شناسی، کانه‌زایی، ساخت و بافت، زمین‌شیمی و مراحل اسکارن‌زایی در این

رخداد معدنی بررسی شده است. با توجه به گسترش زیاد واحدهای مرمری در توالی دگرگونی ناحیه‌ای زیرپهنه تکاب- تخت سلیمان- انگوران، نتایج این پژوهش می‌تواند معیارهای کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی برای شناسایی هاله‌های اسکارنوئیدی در این زیرپهنه را معرفی کرده و در اکتشاف پتانسیل‌های معدنی و کانه‌زایی‌های سرب و روی در این هاله‌ها مفید واقع شود.

## ۲- روش مطالعه

این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی می‌باشد. در مطالعات صحرایی، ضمن تهیه نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ منطقه، بخش‌های مختلف هاله اسکارنوئیدی و کانه‌زایی شناسایی و از آنها ۴۰ نمونه برای مطالعات آزمایشگاهی برداشت شد. از این بین، تعداد ۱۴ عدد مقطع نازک و ۱۰ عدد مقطع نازک- صیقلی برای مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت، تهیه و مطالعه شد. سپس، برای انجام مطالعات زمین‌شیمیایی و اندازه‌گیری عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی، تعداد ۱۶ نمونه از هاله اسکارنوئیدی (تمامی زیرپهنه‌ها) و بخش‌های کانه‌دار انتخاب و به روش‌های XRF (۵ نمونه) و ICP-MS (۱۱ نمونه) در شرکت زرآما در تهران مورد تجزیه قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها توسط سنگ‌شکن تا اندازه حدود ۵ مش (۴ میلی‌متر) خرد شده و سپس با استفاده از آگات تا اندازه حدود ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر شدند. پس از آماده‌سازی، میزان ۲۰ گرم از پودر نمونه‌ها به آزمایشگاه‌های مربوطه ارسال و تجزیه شد. مقدار LOI نمونه‌ها با نگهداری پودر سنگ‌ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت به دست آمد. برای تجزیه به روش XRF برای عناصر اصلی، قرصی از نمونه‌های پودر شده تهیه شد. برای تعیین میزان عناصر کمیاب و کمیاب خاکی توسط دستگاه ICP-MS، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه در لیتیم متابورات/تترابورات ذوب و سپس در اسید نیتریک حل گردید. برای تعیین میزان فلزات پایه، به صورت جداگانه حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه در تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه سانتی‌گراد) حل گردید. نتایج تجزیه‌های شیمیایی به دست آمده از نمونه‌های رخداد معدنی قره‌داس در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

## ۳- زمین‌شناسی

در تقسیم‌بندی پهنه‌های رسوبی- ساختری ایران (Alavi, 1994)، منطقه قره‌داس در زیرپهنه کاملاً دگرشکل شده از پهنه

درون توالی دگرگونی واحد Mtam قرار گرفته و بعضاً صخامت آن به حدی است که می‌توان آنرا به صورت واحدی مجزا تفکیک کرد (شکل b1 و b2 و c). واحد Ub شامل توده‌های نسبتاً بزرگی از سنگ‌های پریدوتیتی، سرپانتینیتی و سرپانتین شیبستی است که با ارتباطی گسله درون واحد Mtam رخنمون دارند (شکل b1 و a2). ابعاد طولی این توده‌ها کمتر از ۳۰۰ متر بوده و پهنای آنها تا ۱۰۰ متر می‌رسد. آثار کانه‌زایی کرومیت به صورت عدسی شکل و رگه-رگچه‌ای در داخل این سنگ‌ها قابل مشاهده است (Ahrabian Fard et al., 2021a, b).

واحد gr شامل گرانیات گنایسی بیوتیت و فلدسپات‌دار است که با روند شمال‌باختری-جنوب‌خاوری در بخش‌های شمالی تا خاور منطقه قره‌داش گسترش دارد (شکل b1 و a2). در بیشتر بخش‌ها، ساختارهای چشمی و میگماتییتی و همچنین رگه‌های کوارتز-فلدسپاتی در این سنگ‌ها قابل مشاهده است (شکل d2). در برخی نقاط، بیگانه‌های قطعاتی از سنگ‌های واحد Mtam در داخل گرانیات‌های گنایسی مشاهده می‌شود (شکل e2). این موضوع می‌تواند بیانگر تزریق گرانیات گنایسی به داخل واحد Mtam باشد. واحد gr در نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ تکاب (Alavi and Amidi, 1976) با عنوان کمپلکس دگرگونی گنایس دوه‌یاتافی معرفی شده است. واحد Sk بخش‌های هورنفلسی و اسکارنوئیدی واحد mb بوده (شکل b2) و سنگ میزبان کانه‌زایی سرب-روی منطقه می‌باشد. راستای کلی این واحد، شمال‌باختری-جنوب‌خاوری بوده و طولی تا ۳۰۰ متر و پهنایی تا ۵۰ متر دارد.

سنندج-سیرجان (Mohajjel, 1997) واقع شده است (شکل a1). براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ تهیه‌شده از این منطقه (شکل b1)، واحدهای سنگی موجود شامل توالی آمفیبولیت و آمفیبول شیبست با میان‌لایه‌های بیوتیت شیبست و مرمر (واحد Mtam)، مرمر (واحد mb)، مجموعه پریدوتیت-سرپانتینیت و سرپانتین شیبست (واحد Ub) و گرانیات گنایسی شده (واحد gr) مربوط به پالئوزوئیک هستند. در بخش مرکزی منطقه، هاله اسکارنوئیدی (واحد Sk) درون واحد مرمری تشکیل شده است.

بخش عمده منطقه از واحد Mtam تشکیل شده است (شکل b1 و a2). این مجموعه دگرگونی در نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ تکاب (Alavi and Amidi, 1976) با عنوان کمپلکس آمفیبولیت علم‌کندی معرفی شده است. واحد Mtam، به شدت دگرگون و دگرشکل بوده و در آن رگه و رگچه‌های نازک گرانیات و سیلیس و ساخت‌های میگماتییتی قابل مشاهده است. در برخی نقاط، رخنمون‌هایی از واحد Ub در واحد Mtam دیده می‌شود که بعضاً به تالک دگرسان شده‌اند. به اعتقاد باباخانی و قلمقاش (Babakhani and Ghalamghash, 1996)، این مجموعه دگرگونی همراه با سنگ‌های اولترامافیک دگرگون‌شده واحد Ub، بقایای پوسته اقیانوس پالئوتتیس (پالئوزوئیک بالایی) هستند. واحد mb از مرمرهای سفید تا کرم‌رنگ تشکیل شده است. این واحد عموماً به صورت میان‌لایه

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی برای نمونه‌های هاله اسکارنوئیدی در رخداد معدنی قره‌داش. مقادیر بر حسب درصد وزنی می‌باشند.

Table 1. Geochemical data of major elements for skarnoid aureole samples from the Qaradash occurrence. All data are in wt.%.

S.N.	Rock type	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	LOI	Total
A-15	Ep Horn	36.74	19.15	23.15	14.31	0.09	0.97	0.19	0.09	0.04	0.36	0.09	4.77	99.95
A-18	Grt-Px Horn	35.87	6.92	31.69	18.39	0.01	1.03	0.52	0.09	0.11	<0.01	0.11	5.27	100.02
A-21	Mb	5.09	1.06	51.68	0.61	0.08	0.42	0.06	0.11	0.06	0.09	0.05	40.6	99.91
A-24	Ep-Grt-Px Horn	46.42	7.92	23.57	11.88	0.01	7.27	0.30	0.36	0.02	<0.01	0.14	1.99	99.89
A-28	Grt-Px Horn	40.19	5.2	30.67	19.36	<0.01	1.36	0.56	0.09	0.08	<0.01	0.21	2.25	99.99

Ep Horn: epidote hornfels; Grt-Px Horn: garnet-pyroxene hornfels; Mb: marble; Ep-Grt-Px Horn: epidote-garnet-pyroxene hornfels

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای نمونه‌های هاله اسکارنوئیدی و کانه‌دار در رخداد معدنی قره‌داش. مقادیر بر حسب گرم در تن (ppm) می‌باشند.

Table 2. Geochemical data of rare and rare earth elements for skarnoid aureole and mineralized samples from the Qaradash occurrence. All data are in ppm.

S.N.	Rock type	Ag	Ba	Bi	Co	Cr	Cu	Hf	Nb	Ni	Pb	S	Sc	Se
A-6	Grt Horn	0.1	16	<0.1	6	14	12	<0.5	3.4	1	7	50	<0.5	0.78
A-15	Ep Horn	<0.1	362	0.6	9.1	12	4	<0.5	4	7	8	1545	1	0.6
A-18	Grt-Px Horn	0.6	8	<0.1	16.8	26	9	0.61	2.5	17	16	69	4	0.88
A-21	Mb	0.1	54	0.4	2.4	8	5	<0.5	1.6	6	116	294	1.7	1.05
A-24	Ep-Grt-Px Horn	0.2	37	0.3	32.1	548	180	0.61	2.9	86	22	208	22	1.52
A-28	Grt-Px Horn	0.4	4	0.2	27.1	69	68	0.58	4.8	57	19	137	4.4	1.24
A-22	Qz-Ccp	79.9	11	14.1	82.5	26	>5%	<0.5	2.3	266	1302	>3%	1.5	42.16
A-30	Ccp-Gn	329.2	4	1229.1	406.5	30	>5%	<0.5	2	14	>3%	>3%	0.8	415.65
A-32	Gn-Sp	235.4	4	369.4	268.1	16	576	<0.5	1.3	29	>3%	>3%	1.3	116.72
A-33	Gn-Ccp	317.7	4	498.4	271.1	22	43234	<0.5	1.3	17	>3%	>3%	1	77.99
A-34	Qz	0.61	6	0.6	5.2	34	48	<0.5	1.1	7	21	227	<0.5	1.35
S.N.		Sn	Sr	Ta	Te	Th	Ti	Tm	U	V	W	Y	Zn	Zr
A-6	Grt Horn	1.6	51.9	0.54	0.61	4.98	272	0.13	0.2	58	3	11.9	29	7
A-15	Ep Horn	2.6	675.5	1.62	0.69	3.33	438	<0.1	1.4	270	1.2	<0.5	41	20
A-18	Grt-Px Horn	3.1	47.5	0.34	0.26	2.94	634	0.31	0.4	145	3	20.8	52	28
A-21	Mb	0.2	789.1	0.22	1.99	1.37	99	<0.1	0.2	18	1.1	7.2	184	<5
A-24	Ep-Grt-Px Horn	1.3	280.2	0.38	1.56	2.17	876	0.36	2.4	197	<1	23.7	112	17
A-28	Grt-Px Horn	1.2	18.4	0.41	0.72	2.91	1393	0.32	0.1	88	9.9	21.3	90	24
A-22	Qz-Ccp	0.8	9.6	0.27	12.53	1.81	218	<0.1	0.5	18	1.3	0.8	690	5
A-30	Ccp-Gn	0.5	10	0.24	171.35	1.67	281	<0.1	0.4	20	2.5	<0.5	>3%	<5
A-32	Gn-Sp	0.4	25.4	0.2	69.72	1.84	<10	<0.1	0.8	28	1.4	3.6	>3%	<5
A-33	Gn-Ccp	0.3	19.6	0.2	110.01	1.21	<10	<0.1	0.2	19	1.1	1.2	>3%	<5
A-34	Qz	0.7	48	0.19	4.29	1.17	<10	<0.1	0.1	13	<1	<0.5	25	<5
S.N.		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Er	Yb	Lu	
A-6	Grt Horn	13	11	1.88	6.7	1.14	<0.1	2.1	0.28	1.74	1	0.6	0.14	
A-15	Ep Horn	2	17	<0.05	<0.5	<0.02	0.33	0.89	<0.1	0.21	<0.05	<0.05	<0.1	
A-18	Grt-Px Horn	16	13	3.11	11.5	1.89	0.34	2.58	0.4	2.64	2.04	2	0.3	
A-21	Mb	6	4	0.97	4.4	0.79	0.15	1.65	0.19	1.11	0.57	0.2	<0.1	
A-24	Ep-Grt-Px Horn	5	7	0.81	3.5	1.3	0.76	2.44	0.48	3.35	2.67	2.4	0.38	
A-28	Grt-Px Horn	12	10	2.77	11.3	2.13	0.12	2.76	0.47	2.97	2.32	2	0.29	
A-22	Qz-Ccp	3	<1	0.68	2.7	0.38	<0.1	1.24	<0.1	0.45	<0.05	<0.05	<0.1	
A-30	Ccp-Gn	4	<1	0.8	3.1	0.35	<0.1	1.18	<0.1	0.41	<0.05	<0.05	<0.1	
A-32	Gn-Sp	4	2	0.8	3.4	0.58	<0.1	1.47	0.14	0.78	0.31	<0.05	<0.1	
A-33	Gn-Ccp	1	<1	0.23	1.1	0.15	<0.1	1.16	<0.1	0.48	0.9	<0.05	<0.1	
A-34	Qz	2	<1	0.19	0.8	<0.02	<0.1	0.95	<0.1	0.2	<0.05	<0.05	<0.1	

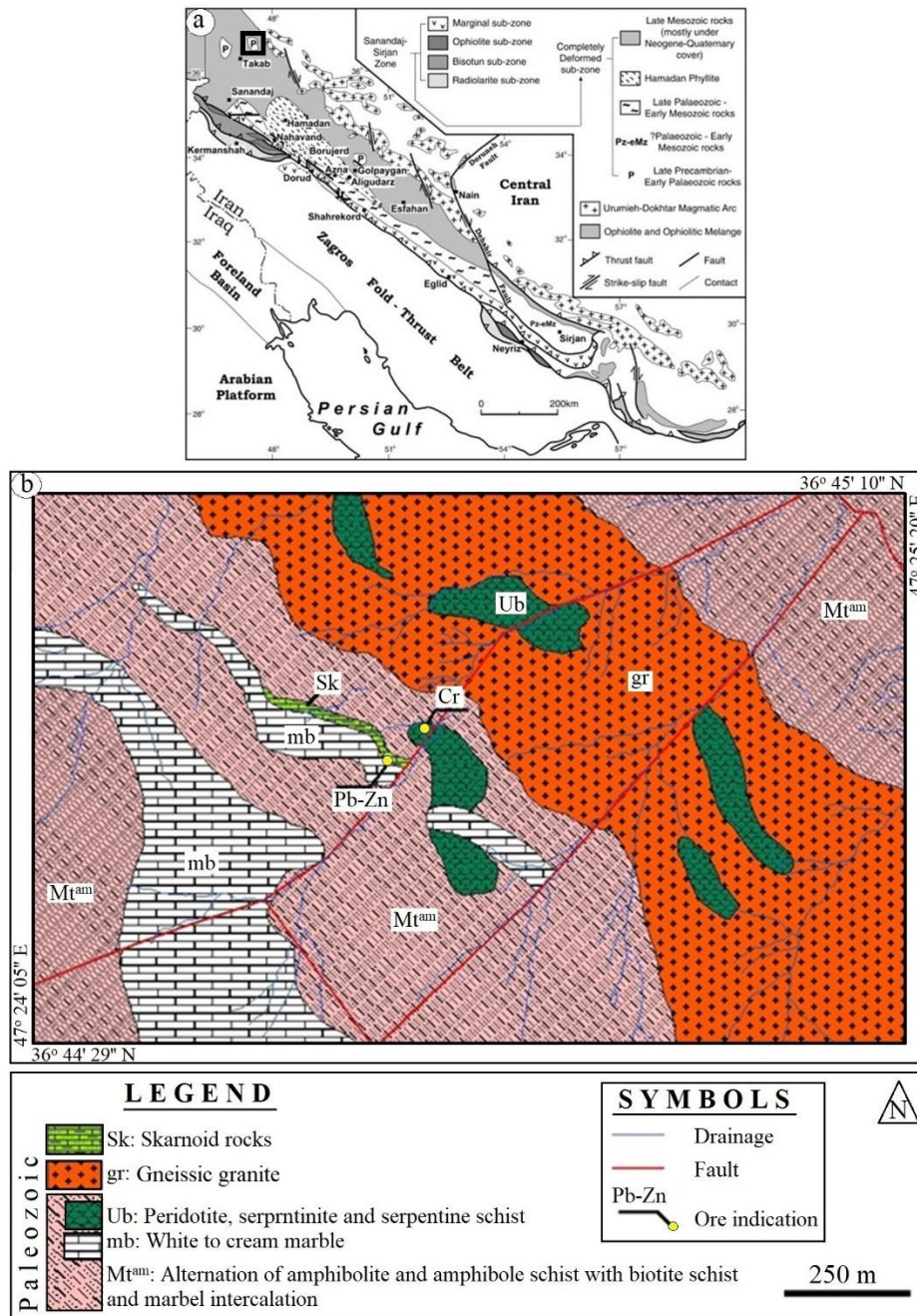
Grt Horn: garnet hornfels; Ep Horn: epidote hornfels; Grt-Px Horn: garnet-pyroxene hornfels; Mb: marble; Ep-Grt-Px Horn: epidote-garnet-pyroxene hornfels; Qz-Ccp: quartz-chalcopyrite vein; Ccp-Gn: chalcopyrite-galena ore; Gn-Sp: galena-sphalerite ore; Gn-Ccp: galena-chalcopyrite ore; Qz: barren quartz vein

#### ۴- سنگ‌شناسی هاله اسکارنوئیدی

براساس مطالعات سنگ‌شناسی، هاله اسکارنوئیدی شامل زیرپهنه‌های گارنت هورنفلس، گارنت پیروکسن هورنفلس، پیروکسن هورنفلس، گارنت پیروکسن اپیدوت هورنفلس، اپیدوت هورنفلس و مرمر می‌باشد. گارنت هورنفلس‌ها از بلورهای درشت گارنت در همراهی با مقداری اپیدوت، کلسیت، کلریت، کوارتز و کانی‌های کدر تشکیل شده‌اند. بلورهای گارنت (فراوانی بیش از ۸۰ درصد)، اغلب شکل‌دار، آنیزوتروپ و دارای منطقه‌بندی بوده (شکل ۳a) و ابعاد آنها تا ۵

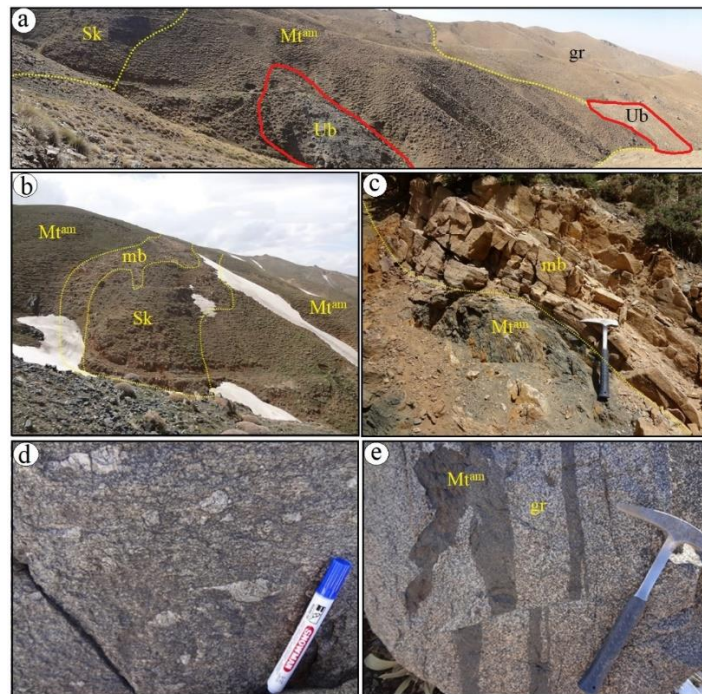
میلی‌متر نیز می‌رسد. اپیدوت (فراوانی حدود ۱۰ درصد) به صورت بلورهای بی‌شکل در فضای بین گارنت‌ها دیده شده و ابعادی تا ۱/۵ میلی‌متر دارند (شکل ۳b). کلسیت با فراوانی حدود ۱۰ درصد، در فضای بین گارنت‌ها و اپیدوت‌ها حضور دارد. برخی از بلورهای کلسیت دارای ماکل‌های نواری و رومبوندی می‌باشند (شکل ۳c). کلریت به صورت بلورهای ریز تأخیری دیده شده و شکستگی‌ها را پر کرده است. کانی‌های کدر (از نوع هماتیت) به صورت بلورهای ورقه‌ای داخل رگچه‌ها و در مسیر شکستگی‌ها حضور دارند (شکل ۳c).





شکل ۱- (a) موقعیت منطقه مورد مطالعه (مربع مشکی) در زیرپهنه کاملاً دگرشکل شده از پهنه ساندج- سیرجان (با تغییرات از Mohajjel, 1997) و (b) نقشه زمین شناسی رخداد معدنی سرب- روی قره داش.

**Fig. 1.** (a) Location of the study area (black square) in the completely deformed sub-zone of Sanandaj-Sirjan zone (modified from Mohajjel, 1997) and (b) Geological map of the Qaradash Pb-Zn occurrence.



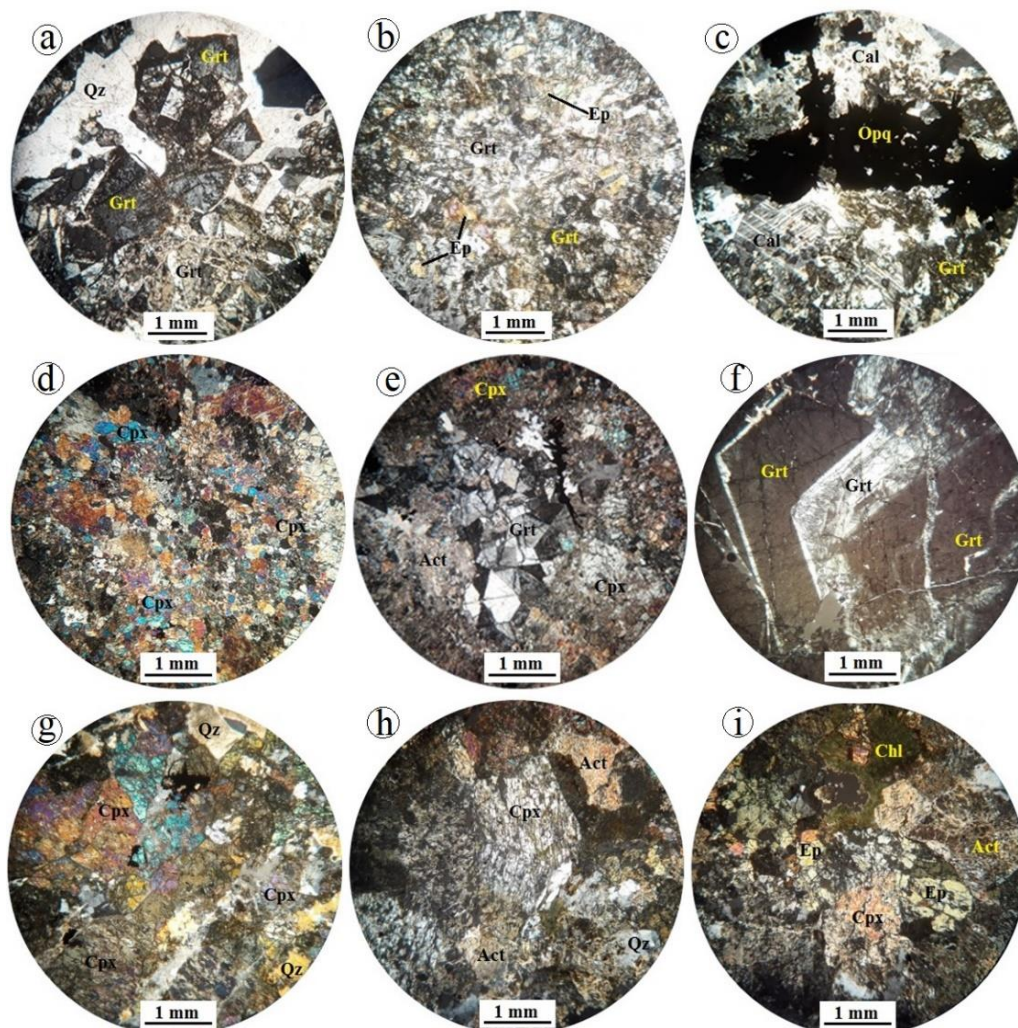
شکل ۲- (a) نمایی از واحدهای  $Mt^{am}$  و gr در منطقه قره داش (دید به سمت شمال باختر). رخنمون‌های واحد Ub درون واحد  $Mt^{am}$  و واحد اسکارنوئیدی (Sk) نیز در تصویر دیده می‌شود، (b) نمایی از میان لایه‌های مرمری (mb) درون واحد  $Mt^{am}$  و هاله اسکارنوئیدی (Sk) تشکیل شده در آنها (دید به سمت باختر)، (c) نمایی نزدیک از واحد mb درون واحد  $Mt^{am}$ ، (d) نمایی نزدیک از ساختار چشمی کوارتز-فلدسپاتی در گرانیت گنایسی (gr) و (e) نمایی نزدیک از بیگانه قطعات واحد  $Mt^{am}$  درون واحد گرانیت گنایسی.

Fig. 2. (a) View of  $Mt^{am}$  and gr units in the Qaradash area, looking to the northwest. Exposures of Ub unit within the  $Mt^{am}$  unit as well as skarnoid unit (Sk) are also observed, (b) View of marble interlayers (mb) within the  $Mt^{am}$  unit and skarnoid unit (Sk) that formed from them, looking to the west, (c) Close view of mb unit within the  $Mt^{am}$  unit, (d) Close view of quartz-feldspar augen fabric in the gneissic granite (gr) and (e) Close view of enclaves of  $Mt^{am}$  unit within the gneissic granite unit.

کدر در مسیر شکستگی‌ها و در فضای بین کلینوپیروکسن‌ها دیده می‌شوند. کلسیت به صورت اولیه در فضای بین بلورهای گارنت، کلینوپیروکسن و کوارتز و همچنین به صورت رگچه‌های تأخیری قطع کننده سنگ حضور دارد. اپیدوت‌ها به صورت بلورهای بی‌شکل تا شکل دار دیده می‌شوند. کلریت فضای بین کلینوپیروکسن‌ها را پر کرده است. پیروکسن هورنفلس‌ها عمدتاً از کلینوپیروکسن به همراه مقادیر کمی اکتینولیت، اپیدوت، کلسیت، کوارتز و کانی‌های کدر تشکیل شده‌اند. کلینوپیروکسن‌ها با فراوانی حدود ۸۰ درصد و ابعاد تا ۲ میلی‌متر، کانی عمده سنگ هستند (شکل ۳g) که با درجات مختلفی به اکتینولیت، کلسیت، کلریت و کانی‌های کدر دگرسان شده‌اند. بقایای کلینوپیروکسن‌ها در داخل اکتینولیت و کلریت قابل مشاهده است (شکل ۳h). بلورهای اپیدوت با فراوانی

گارنت پیروکسن هورنفلس‌ها از کانی‌های اصلی کلینوپیروکسن و گارنت به همراه کانی‌های فرعی کلسیت، اکتینولیت، کلریت، اپیدوت، کوارتز، آلکالی فلدسپات و کانی‌های کدر می‌باشند. بلورهای کلینوپیروکسن (فراوانی حدود ۵۰ درصد) به صورت شکل دار تا نیمه شکل دار حضور داشته و با درجات متفاوتی به اکتینولیت و کلسیت دگرسان شده‌اند (شکل ۳d). گارنت‌ها (فراوانی حدود ۴۰ درصد) به صورت بلورهای شکل دار و آنیزوتروپ با ابعاد تا یک میلی‌متر دیده شده و گاه منطقه‌بندی نشان می‌دهند (شکل ۳e و f). برخی از بلورهای گارنت از بخش مرکزی به کلسیت، اپیدوت و گاه کلریت دگرسان شده‌اند. بلورهای بی‌شکل کوارتز و آلکالی فلدسپات فراوانی قابل توجهی داشته و در برخی نقاط به صورت رگچه‌ای سنگ را قطع کرده‌اند. کانی‌های





شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی در منطقه قره‌داش. (a) بلورهای گارنت دارای منطقه‌بندی در گارنت هورنفلس‌ها، (b) بلورهای اپیدوت در فضای بین گارنت‌ها در گارنت هورنفلس‌ها، (c) بلورهای کلسیت همراه با رگچه‌های کانی‌های کدر در گارنت هورنفلس‌ها، (d) تجمع بلورهای کلینوپیروکسن با دگرسانی به اکتینولیت در گارنت پیروکسن هورنفلس‌ها، (e) بلورهای گارنت در فضای بین کلینوپیروکسن‌های دگرسان‌شده در گارنت پیروکسن هورنفلس‌ها، (f) درشت‌بلور گارنت دارای منطقه‌بندی در گارنت پیروکسن هورنفلس‌ها، (g) درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن در پیروکسن هورنفلس‌ها، (h) بقایای کلینوپیروکسن داخل اکتینولیت در پیروکسن هورنفلس‌ها و (i) بلورهای اپیدوت در بین بلورهای کلینوپیروکسن در پیروکسن هورنفلس‌ها. علائم اختصاری کانی‌ها از Withney و Ewans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. Act: اکتینولیت، Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Cpx: کلینوپیروکسن، Ep: اپیدوت، Grt: گارنت، Opq: کانی کدر، Qz: کوارتز)

Fig. 3. Photomicrographs (transmitted light, XPL) of skarnoid aureole sub-zones in the Qaradash area. (a) Zonal garnet crystals in garnet hornfels, (b) Epidote crystals among the garnets in garnet hornfels, (c) Calcite crystals along with opaque veinlets in the garnet hornfels, (d) Aggregate of clinopyroxene crystals that altered to actinolite in garnet-clinopyroxene hornfels, (e) Garnet crystals among the altered clinopyroxenes in garnet-clinopyroxene hornfels, (f) Zonal coarse-grained garnet in garnet-clinopyroxene hornfels, (g) Coarse-grained clinopyroxene crystals in pyroxene hornfels, (h) remnants of clinopyroxene crystals within actinolite in pyroxene hornfels and (i) Epidote crystals among the clinopyroxenes in pyroxene hornfels. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Act: actinolite, Cal: calcite, Chl: chlorite, Cpx: clinopyroxene, Ep: epidote, Grt: garnet, Opq: Opaque mineral, Qz: quartz).

اپیدوت و گاه کلینوپیروکسن و هورنبلند تشکیل شده‌اند. کلسیت‌ها (فراوانی بین ۸۵ تا ۹۵ درصد) به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار با ابعاد تا ۱/۵ میلی‌متر در راستای برگ‌وارگی سنگ ردیف شده‌اند (شکل f۴). این کانی‌ها دارای ساخت نواری و رومبئودری هستند. کوارتز و آلکالی فلدسپات‌ها به صورت درشت‌بلورهای عدسی‌شکل با ابعاد تا ۴ میلی‌متر در سنگ حضور دارند. اپیدوت با ابعاد کمتر از یک میلی‌متر در بین بلورهای کلسیت و در راستای برگ‌وارگی کشیده شده‌اند. کلینوپیروکسن‌ها به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار با ابعاد کمتر از یک میلی‌متر قابل مشاهده هستند. هورنبلندها به صورت بلورهای کشیده و عدسی‌شکل و ابعاد حدود ۱/۵ میلی‌متر در راستای برگ‌وارگی ضعیف سنگ دیده می‌شوند.

#### ۵- کانه‌زایی و دگرسانی

کانه‌زایی سرب- روی در منطقه قره‌داش درون هاله اسکارنوئیدی (واحد Sk) رخ داده و طولی حدود ۲۰۰ متر و پهنایی تا ۱۵ متر دارد (شکل a۵). آثار معدن‌کاری‌های قدیمی بر روی پهنه کانه‌دار به صورت یک تونل ریزش کرده در حاشیه آبراهه دیده شده (شکل b۵) و دپوی کوچکی از مواد معدنی استخراج شده در کنار آن قابل مشاهده است. براساس مشاهدات صحرایی، کانه‌زایی سرب- روی به صورت رگه- رگچه‌های کوارتزی سولفیددار و دانه‌پراکنده در متن هاله اسکارنوئیدی (عموماً زیرپهنه‌های اپیدوت گارنت پیروکسن هورنفلس، پیروکسن هورنفلس و مرمر) تشکیل شده است (شکل c۵ و d). یکسری رگه- رگچه‌های تأخیری کوارتز- هماتیستی (شکل e۵) و کلسیتی کانه‌زایی سولفیدی و زیرپهنه‌های اسکارنوئیدی میزبان را قطع کرده‌اند.

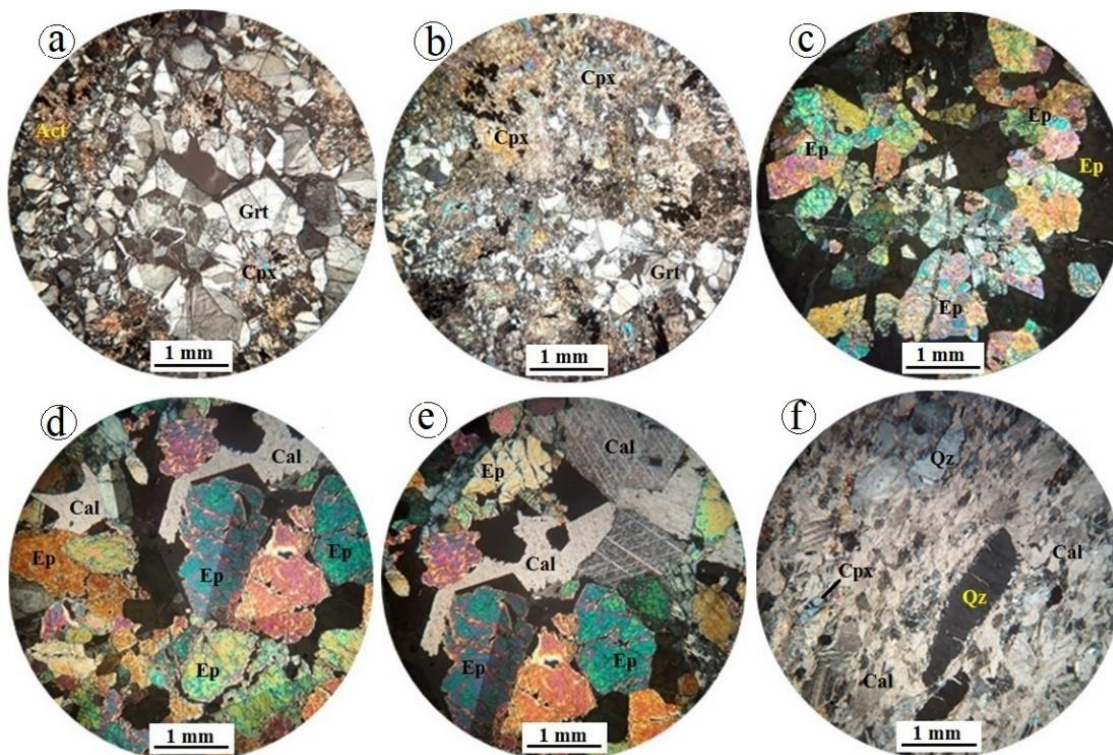
براساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی انجام‌شده، انواع دگرسانی در رخداد معدنی سرب- روی قره‌داش شامل کربن‌زدایی، اکتینولیتی- اپیدوتی‌شدن، کربناتی‌شدن و سیلیسی‌شدن می‌باشند. در این بین، دگرسانی‌های اکتینولیتی- اپیدوتی و سیلیسی منطبق بر بخش‌های کانه‌دار هستند. کربن‌زدایی محصول انحلال کلسیت در مرمرها در اثر ورود سیالات گرمایی بوده و نقش مهمی در ایجاد فضاهای خالی و افزایش نفوذپذیری سنگ میزبان دارد (Berger and Bagby, 1991). پس از این دگرسانی، کانی‌های کالک‌سیلیکاته (گارنت و

حدود ۱۰-۱۵ درصد در بین بلورهای کلینوپیروکسن مشاهده می‌شوند (شکل i۳). کوارتز به صورت رگه- رگچه‌ای دیده می‌شود. بلورهای کلسیت به مقدار محدود در فضای بین کلینوپیروکسن‌ها و به صورت رگچه‌ای دیده می‌شوند. کانی‌های کدر اغلب بی‌شکل بوده و گاه به حالت رگچه‌ای در حاشیه رگه- رگچه‌های کوارتزی دیده می‌شوند.

براساس مطالعات میکروسکوپی، اپیدوت گارنت پیروکسن هورنفلس‌ها از کانی‌های اصلی گارنت، کلینوپیروکسن و اپیدوت به همراه کانی‌های فرعی اکتینولیت، کلسیت، کوارتز و کانی‌های کدر تشکیل شده‌اند. گارنت‌ها (فراوانی حدود ۴۰ درصد) به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار دیده شده و عمدتاً دارای ساخت پروانه‌ای و منطقه‌بندی هستند (شکل a۴). این کانی‌ها به دو حالت قابل مشاهده هستند: ۱- درشت‌بلورهای ایزوتروپ همراه با بلورهای اپیدوت و ۲- بلورهای آنیزوتروپ با ابعاد کوچک‌تر که با کلینوپیروکسن همراه هستند. در برخی نقاط، بلورهای گارنت به اپیدوت دگرسان شده‌اند. کلینوپیروکسن‌ها با فراوانی حدود ۴۰ درصد و ابعاد تا حدود ۱/۵ میلی‌متر اغلب به اکتینولیت، کلسیت و کانی‌های کدر دگرسان شده‌اند (شکل b۴). اپیدوت‌ها (فراوانی حدود ۱۵ درصد) به صورت بلورهای ریز بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار در فضای بین گارنت‌های ایزوتروپ و کلینوپیروکسن‌ها حضور دارند (شکل c۴). ابعاد اپیدوت‌هایی که از دگرسانی بلورهای گارنت تشکیل شده‌اند تا یک میلی‌متر می‌رسد. در برخی نقاط، رگچه‌های کلسیتی تأخیری این سنگ‌ها را قطع کرده‌اند. کانی‌های کدر با فراوانی حدود ۳ درصد غالباً به صورت تجمعات بی‌شکل، همراه با بلورهای کلینوپیروکسن دگرسان شده دیده می‌شوند. اپیدوت هورنفلس‌ها از اپیدوت به همراه مقداری کلسیت، کانی‌های کدر و کلریت تشکیل شده‌اند. اپیدوت‌ها با فراوانی بیش از ۸۰ درصد و ابعاد تا ۴ میلی‌متر، به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار، گاه با ساخت دوتایی دیده می‌شوند (شکل d۴). کلسیت به صورت بلورهای بی‌شکل با ساخت نواری دیده شده و بیشتر فضای بین اپیدوت‌ها را پر کرده است (شکل e۴). کانی‌های کدر (هماتیت) به صورت بلورهای بی‌شکل ورقه‌ای در بین بلورهای کلسیت حضور دارند. کلریت فضای بین اپیدوت‌ها و شکستگی‌ها را پر کرده است. مرمرها از کلسیت همراه با مقادیر اندکی کوارتز، آلکالی فلدسپات،

همچنین به صورت حضور کلسیت در فضای بین اپیدوت‌ها و رگچه‌های تأخیری کلسیتی در زیرپهنه‌های هورنفلسی مختلف مشاهده می‌شود (شکل ۳ d و e). دگرسانی سیلیسی به صورت رگچه‌های کوارتز- سولفیدی و کوارتز- هماتیسی در منطقه قره‌داش قابل مشاهده است.

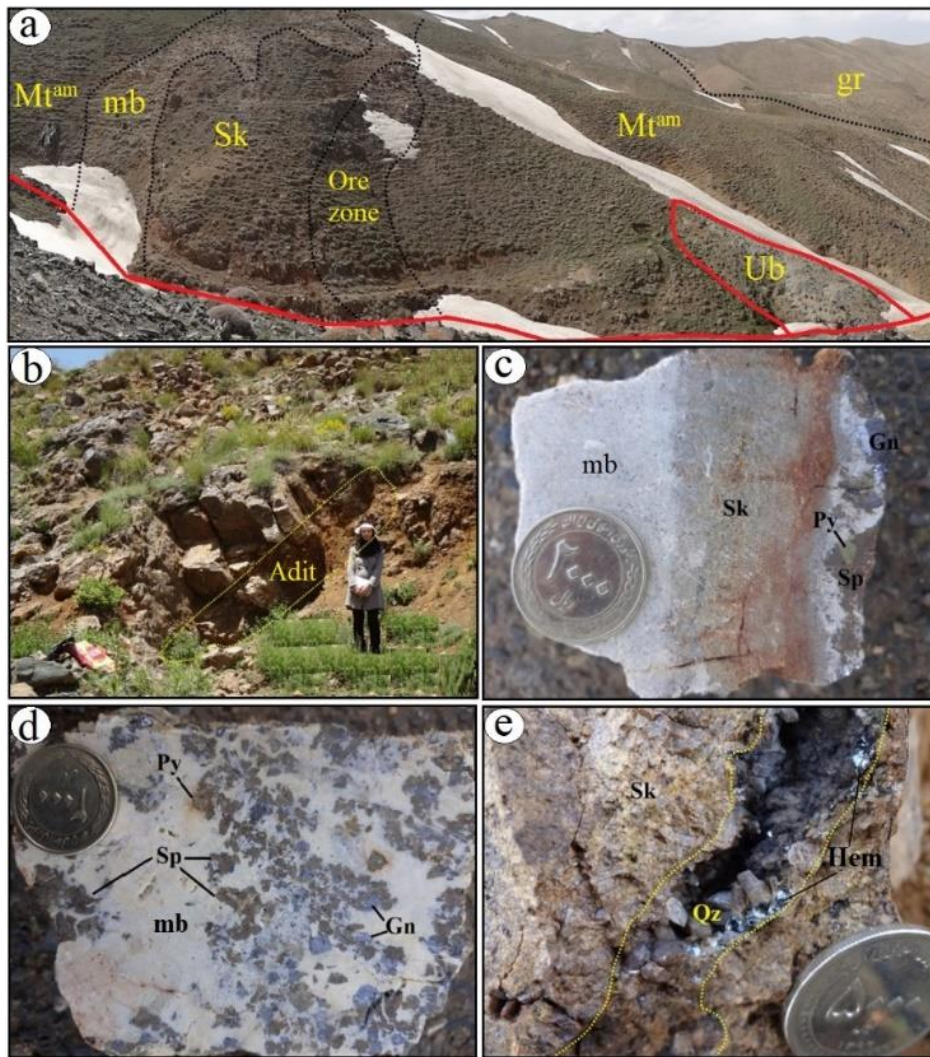
کلینوپیروکسن) در مرمها تشکیل می‌شوند. دگرسانی اکتینولیتی- اپیدوتی محصول تبدیل کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب (گارت و کلینوپیروکسن) به کانی‌های کالک‌سیلیکاته آبدار طی مراحل اسکارن‌زایی هستند (شکل‌های ۳ b, d, e و h و a۴). دگرسانی کربناتی محصول دگرسانی گارت و به‌ویژه کلینوپیروکسن به کلسیت است (شکل ۳ c). این دگرسانی



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی در منطقه قره‌داش. (a) بلورهای گارت دارای منطقه‌بندی همراه با کلینوپیروکسن‌های اکتینولیتی‌شده در اپیدوت گارت پیروکسن هورنفلس‌ها، (b) بلورهای کلینوپیروکسن همراه با بلورهای گارت آنیزوتروپ در اپیدوت گارت پیروکسن هورنفلس‌ها، (c) درشت‌بلورهای اپیدوت شکل‌دار در اپیدوت گارت پیروکسن هورنفلس‌ها، (d) تجمع بلورهای اپیدوت در اپیدوت هورنفلس‌ها، (e) کلسیت با ماکل نواری در بین اپیدوت‌ها در اپیدوت هورنفلس‌ها و (f) بلورهای عدسی‌شکل کوارتز همراه با کلینوپیروکسن در بین بلورهای کلسیت در مرمها. علائم اختصاری کانی‌ها از Withney و Ewans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. Act: اکتینولیت، Cal: کلسیت، Cpx: کلینوپیروکسن، Ep: اپیدوت، Grt: گارت، Qz: کوارتز)

Fig. 4. Photomicrographs (transmitted light, XPL) of skarnoid aureole sub-zones in the Qaradash area. (a) Zonal garnet crystals along with clinopyroxenes that altered to actinolite in epidote-garnet-pyroxene hornfeldes, (b) Clinopyroxene crystals along with anisotropic garnet crystals in epidote-garnet-pyroxene hornfeldes, (c) Coarse-grained idiomorphic epidote crystals in epidote-garnet-pyroxene hornfeldes, (d) Aggregate of epidote crystals in epidote hornfeldes, (e) Calcite with twin lamellae among the epidotes in epidote hornfeldes and (f) Lens-shaped quartz crystals along with clinopyroxene among the calcite crystals in marbles. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Act: actinolite, Cal: calcite, Cpx: clinopyroxene, Ep: epidote, Grt: garnet, Qz: quartz)





شکل ۵- تصاویر صحرایی و نمونه دستی از کانه‌زایی سرب- روی در رخداد معدنی قره‌داش. (a) نمایی از توالی سنگی منطقه قره‌داش و موقعیت پهنه کانه‌دار در حاشیه هاله اسکارنوئیدی (دید به سمت باختر)، (b) نمایی از تونل قدیمی حفر شده بر روی پهنه کانه‌دار (دید به سمت جنوب‌باختر)، (c) نمونه دستی نشان‌دهنده موقعیت کانه‌زایی سولفیدی نسبت به هاله اسکارنوئیدی و مرمر، (d) نمونه دستی از کانه‌زایی سولفیدی (گالن، اسفالریت و پیریت) با بافت دانه‌پراکنده و (e) نمایی نزدیک از رگه کوارتز- هماتیته درون هاله اسکارنوئیدی. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Gn: گالن، Hem: هماتیت، Py: پیریت، Qz: کوارتز، Sp: اسفالریت)

Fig. 5. Field and hand specimens of Pb-Zn mineralization in the Qaradash occurrence. (a) Views of rock strata in the Qaradash area and location of the ore zone in contact of skarnoid aureole, looking to the west, (b) View of the ancient adit excavated in the ore zone, looking to the southwest, (c) Hand specimen displays location of sulfide mineralization regard to skarnoid aureole and marble, (d) Hand specimen of sulfide (Galena, sphalerite and pyrite) mineralization with disseminated texture and (e) Close view of quartz-hematite vein within the skarnoid aureole. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Gn: galena, Hem: hematite, Py: pyrite, Qz: quartz, Sp: sphalerite)

#### ۶- کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

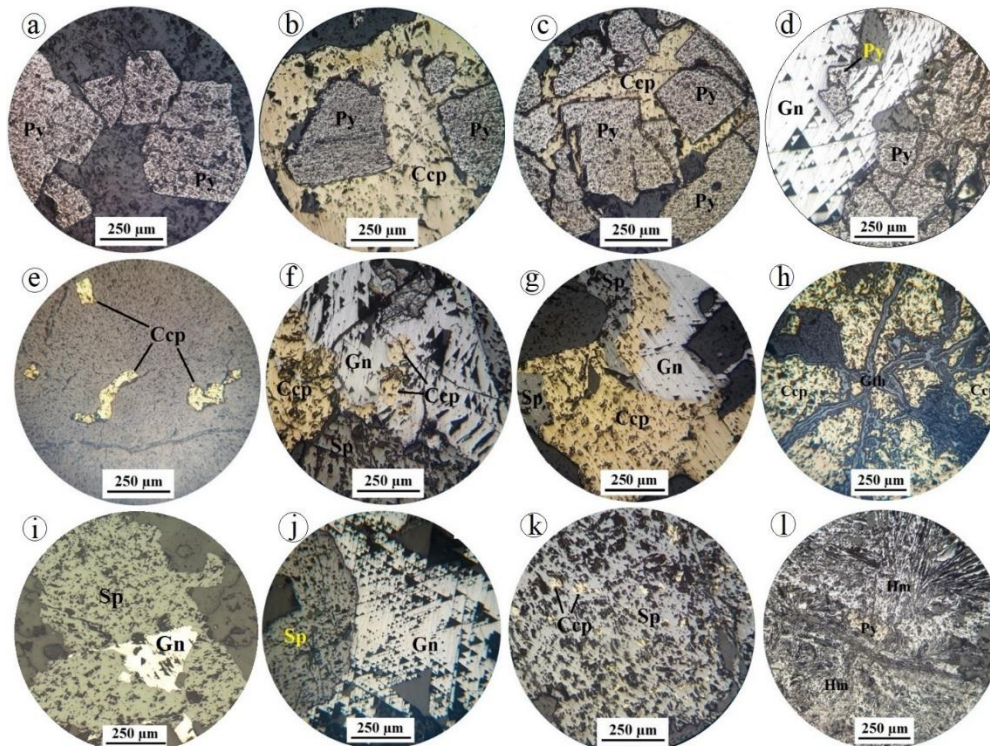
کلسیت، کوارتز، اپیدوت، کلریت و اکتینولیت کانی‌های باطله در رخداد معدنی قره‌داش هستند. گوتیت، مالاکیت و آزوریت در اثر فرایندهای برونزاد تشکیل شده‌اند. براساس این مطالعات،

براساس مطالعات کانه‌نگاری، پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت و هماتیت کانه‌های معدنی و گارنت، کلینوپیروکسن،

z۶). حاشیه برخی از اسفالریت‌ها دارای ادخال‌های فراوان کالکوپیریت بوده و بیماری کالکوپیریتی (Bortnikov et al., 1991; Bente and Doering, 1993; Lepetit et al., 2003) نشان می‌دهند (شکل k۶). هماتیت معمولاً به صورت بلورهای تیغه‌ای (اسپیکولاریت) شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار تا اندازه ۱ میلی‌متر در رگه‌های کوارتز-هماتیتی حضور داشته و کانی‌های سولفیدی را قطع کرده است (شکل l۶). گوتیت، مالاکیت و آزوریت و در نتیجه دگرسانی برون‌زاد کانی‌های پیریت و کالکوپیریت تشکیل شده‌اند.

گارت به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار دیده شده و عمدتاً ایزوتروپ و گاه ایزوتروپ هستند. در برخی از بخش‌ها، منطقه‌بندی در بلورهای گارت قابل مشاهده است (شکل‌های a۳ و f و a۴). گارت بعضاً به کلسیت و اپیدوت دگرسان شده است. کلینوپیروکسن‌ها عمدتاً به اکتینولیت و کلسیت دگرسان شده‌اند (شکل‌های d۳ و h و a۴). این کانی‌ها به صورت ادخال داخل گارت‌ها نیز دیده می‌شوند که بیانگر تبلور آنها قبل از گارت می‌باشد. اپیدوت کانی غالب در اپیدوت هورنفلس‌ها می‌باشد (شکل d۴ و e) که به صورت بلورهای درشت در متن سنگ و یا بلورهای ریز حاصل از دگرسانی گارت در نمونه‌ها قابل مشاهده هستند. کلسیت به صورت بلورهای شکل‌دار تا بی‌شکل مشاهده می‌شود (شکل‌های e۳ و d۴ و e). برخی از بلورهای کلسیت دارای ماکل نواری هستند. بلورهای این کانی در فضای بین دیگر کانی‌ها نظیر گارت، اپیدوت و کلینوپیروکسن حضور دارند. در نتیجه دگرسانی کانی‌های گارت و کلینوپیروکسن، کلسیت‌های ریزبلور ایجاد شده است. علاوه بر این، رگچه‌های تأخیری کلسیت، کانی‌های تشکیل شده در مراحل قبلی را قطع کرده‌اند. کوارتز دیگر کانی باطله در رخدادهای معدنی قره‌دش است که همراهی نزدیکی با کانه‌زایی سرب و روی دارد. کوارتز به صورت بلورهای شکل‌دار و درشت و بلورهای ریز با بافت رگه-رگچه‌ای در نمونه‌ها قابل مشاهده است. رگه-رگچه‌های کوارتزی عمدتاً همراه با گالن و اسفالریت می‌باشند. اکتینولیت و کلریت در نتیجه دگرسانی بلورهای درشت کلینوپیروکسن، حاصل شده است.

ساخت و بافت کانسنگ در رخدادهای معدنی قره‌دش از نوع دانه‌پراکنده، رگه-رگچه‌ای، جانشین و بازماندی است. پیریت به صورت بلورهای درشت تا ریز شکل‌دار تا بی‌شکل با بافت دانه‌پراکنده در بخش‌های کانه‌دار حضور دارد. در برخی از بخش‌ها، پیریت به صورت ادخال‌های کوچک و بزرگ داخل کالکوپیریت و گالن دیده می‌شود (شکل a۶ و b). این امر نشانگر تبلور پیریت قبل از کالکوپیریت و گالن در توالی پاراژنزی می‌باشد. علاوه بر این، شکستگی‌های پیریت معمولاً توسط کالکوپیریت پر شده است (شکل c۶) که این موضوع نیز تقدم تبلور پیریت نسبت به کالکوپیریت را نشان می‌دهد. اما در برخی دیگر از نقاط، کالکوپیریت و گالن هم‌زمان با پیریت تشکیل شده‌اند (شکل d۶). کالکوپیریت به صورت بلورهای ریز تا درشت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با بافت دانه‌پراکنده در نمونه‌های کانه‌دار حضور دارد (شکل e۶). در برخی از بخش‌ها، کالکوپیریت به صورت ادخال داخل گالن دیده می‌شود (شکل f۶) که این امر بیانگر تبلور کالکوپیریت قبل از گالن در توالی پاراژنزی می‌باشد. اما در برخی دیگر از نقاط، کالکوپیریت هم‌زمان با گالن و اسفالریت تشکیل شده است (شکل g۶). در بخش اصلی زون کانه‌دار، کالکوپیریت توسط گوتیت جانشین شده و به‌طور محلی بافت بازماندی نشان می‌دهد (شکل h۶). گالن به صورت بلورهای درشت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار دیده شده و اندازه آن گاه تا ۱ سانتی‌متر نیز می‌رسد. در توالی پاراژنزی، گالن معمولاً دارای ادخال‌های پیریت و کالکوپیریت است (شکل d۶ و f) و در مقابل، خود به صورت ادخال داخل اسفالریت دیده می‌شود (شکل i۶). این امر بیانگر توالی تبلوری پیریت <<< کالکوپیریت <<< گالن <<< اسفالریت در توالی پاراژنزی می‌باشد. با این وجود، در برخی از بخش‌ها، هم‌رشدی گالن با کالکوپیریت و اسفالریت در نمونه‌ها قابل تشخیص است (شکل f۶ و g). اسفالریت به صورت بلورهای درشت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار دیده می‌شود. اسفالریت‌ها اندکی بعد از گالن تشکیل شده و دارای ادخال‌هایی از گالن هستند (شکل i۶) اما در برخی موارد، این کانی‌ها هم‌رشدی نشان می‌دهند (شکل



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی (نور بازتابی) از کانه‌های موجود در رخداد معدنی قره‌داش. (a) بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار پیریت با بافت دانه‌پراکنده، (b) ادخال‌های پیریت داخل کالکوپیریت، (c) جانشینی کالکوپیریت به جای پیریت در امتداد شکستگی‌ها، (d) ادخال پیریت داخل گالن. هم‌رشدی گالن و پیریت نیز در تصویر دیده می‌شود، (e) بلورهای ریز و بی‌شکل کالکوپیریت با بافت دانه‌پراکنده، (f) ادخال‌های کالکوپیریت داخل گالن. هم‌رشدی گالن، کالکوپیریت و اسفالریت نیز در تصویر دیده می‌شود، (g) هم‌رشدی گالن، کالکوپیریت و اسفالریت، (h) دگرسانی کالکوپیریت به گوتیت و تشکیل بافت بازماندی، (i) ادخال گالن در اسفالریت، (j) هم‌رشدی گالن و اسفالریت، (k) ادخال‌های ریز کالکوپیریت در اسفالریت و (l) بلورهای تیغه‌ای هماتیت که بلورهای پیریت را قطع کرده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. Ccp: کالکوپیریت، Gn: گالن، Gth: گوتیت، Hem: هماتیت، Py: پیریت، Sp: اسفالریت

Fig. 6. Photomicrographs (reflectel light) of ore mineralogy at the Qaradash occurrence. (a) Subhedral to euhedral crystals of pyrite with disseminated texture, (b) Pyrite inclusions within chalcopyrite, (c) Replacement of pyrite by chalcopyrite within cracks, (d) Pyrite inclusions within galena. Intergrowth of galena and pyrite is also observed, (e) Fine-grained euhedral crystals of chalcopyrite with disseminated texture, (f) Chalcopyrite inclusions within galena. Intergrowth of galena, chalcopyrite and sphalerite is also observed, (g) Intergrowth of galena, chalcopyrite and sphalerite, (h) Alteration of chalcopyrite to goethite and formation of relict texture, (i) Galena inclusions within sphalerite, (k) Fine-grained inclusions of chalcopyrite within sphalerite and (l) Bladed crystals of hematite that crosscutting pyrite grains. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Ccp: chalcopyrite, Gn: galena, Gth: goethite, Hem: hematite, Py: pyrite, Sp: sphalerite)

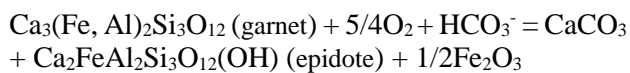
## ۷- مراحل اسکارن‌زایی

نفوذی با ترکیب گرانیتوئیدی در مناطق مجاور این منطقه مانند علم‌کندی (فاصله هوایی حدود ۵ کیلومتر) قابل مشاهده است که به داخل توالی دگرگونی پالئوزوئیک نفوذ کرده و منجر به ایجاد هاله‌های دگرگونی مجاورتی در سنگ‌های میزبان و کانه‌زایی آهن شده‌اند (Nouri, 2018; Nouri et al., 2017, 2021). در نتیجه

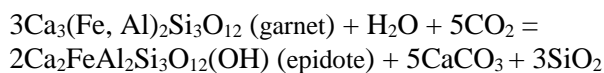
واکنش‌های شیمیایی و مجموعه کانی‌شناسی تشکیل شده در پهنه اسکارنی، به ماهیت سنگ مادر، ترکیب شیمیایی توده نفوذی، ترکیب سیالات و شرایط دما و فشار بستگی دارد. در منطقه قره‌داش، رخنمون توده نفوذی قابل مشاهده نیست، اما توده‌های



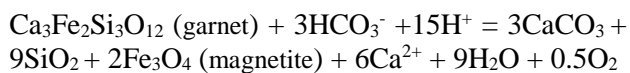
شکستگی‌ها و ریزشکستگی‌های کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب، بخشی از این کانی‌ها که در مرحله پیشرونده تشکیل شده‌اند، توسط کانی‌های کالک‌سیلیکات آب‌دار (مانند اپیدوت و اکتینولیت)، سولفیدها (مانند پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت) و کربنات (کلسیت) جانشین می‌شوند. در طول این مرحله، گارنت به مجموعه اپیدوت، کلسیت و کوارتز و پیروکسن به اکتینولیت، کلسیت و کانی‌های کدر دگرسان می‌شوند. رایج‌ترین کانی دگرسانی در این مرحله، اپیدوت است. افزایش محلی اکسیژن نقش مهمی در تشکیل اپیدوت در این مرحله دارد (Perkins et al., 1986; Berman et al., 1985).



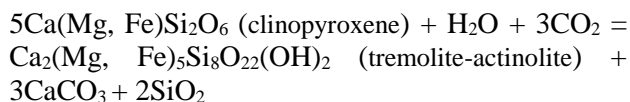
در محل شکستگی‌ها و در مناطقی که محلول‌های گرمابی غنی از  $\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{CO}_2$  حضور دارند، اپیدوت در نتیجه ناپایداری گارنت طی واکنش زیر تشکیل می‌شود:



مجموعه کانی‌شناسی کوارتز + کلسیت + مگنتیت بر اثر دگرسانی گارنت توسط واکنش زیر در مرحله دگرسانی پسروده پیشین تولید می‌شود (Einaudi, 1982).



در این مرحله، ترمولیت- اکتینولیت در اثر دگرسانی کلینوپیروکسن‌ها تشکیل می‌شوند (Deer et al., 1992):



حضور بلورهای ریز کانی‌های سولفیدی و اکتینولیت در کلینوپیروکسن‌ها و گارنت‌ها بیانگر تشکیل کانی‌های سولفیدی بعد از کلینوپیروکسن و گارنت در مرحله دگرگونی پسروده می‌باشد.

#### ۷-۲-۲- مرحله پسروده پسین

در این مرحله، مجموعه کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب و آب‌دار تشکیل شده در مراحل قبلی، توسط سیالات نسبتاً دما پایین، مجدداً دگرسان شده و به مجموعه کانی‌شناسی بسیار ریزبلور

این امر، سنگ‌های کربناته به مرمر و اسکارن تبدیل شده‌اند. معمولاً در اثر تزریق توده‌های آذرین به یک منطقه، ابتدا در نتیجه شار حرارتی، دگرگونی ایزوشیمیایی در سنگ‌های درون‌گیر رخ می‌دهد. از آنجاییکه در منطقه قره‌داش رخنمون توده نفوذی دیده نمی‌شود، به نظر می‌رسد این مرحله از دگرگونی مجاورتی در این منطقه تشکیل نشده است. براساس مطالعات کانی‌شناسی و بافتی می‌توان فرایند اسکارن‌زائی در منطقه قره‌داش را به دو مرحله زیر تقسیم کرد:

#### ۷-۱- مرحله دگرسانی پیشرونده (متاسوماتیک)

جدایش فاز سیال از توده‌های نفوذی در حال تبلور و نفوذ و مهاجرت این سیالات به سنگ‌های دربرگیرنده، سبب تحرک و جابه‌جایی عناصر بین دو گرادایان متفاوت شیمیایی و حرارتی شده و واکنش‌های مناسب ایجاد می‌شود (Meinert, 1992). دگرسانی متاسوماتیک، با واکنش‌های کربن‌زدائی همراه است. این مرحله معمولاً باعث افزایش حجم در سنگ میزبان می‌شود. این فرایند همراه با شکستگی‌های تکتونیکی، سبب می‌شود معابری برای ورود سیالات به‌داخل سنگ‌های درون‌گیر ایجاد شود. سیالات ماگمایی با دمای بالا (حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد)، باعث متاسوماتیسم پیشرونده می‌شوند (Meinert, 1992). این دگرسانی که با تحرک عناصر در مقیاس بزرگ همراه است، موجب ظهور کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب (گارنت‌ها با ترکیب گروسولار- آندرادیت و کلینوپیروکسن‌ها با ترکیب دیوپسید) شده است. در این مرحله، حجم قابل ملاحظه‌ای از مرمرها توسط کانی‌های کالک‌سیلیکاته بی‌آب، در اثر وارد شدن  $\text{SiO}_2$ ، Fe و Mg از سیال گرمابی به‌داخل مرمرها همراه با واکنش‌های کربن‌زدائی در مرمر، به اسکارن تبدیل شده است. وجود بلورهای کلینوپیروکسن در داخل و در فضای بین بلورهای گارنت، بیانگر تبلور کلینوپیروکسن قبل و یا به‌صورت هم‌زمان با گارنت در این مرحله می‌باشد.

#### ۷-۲- مرحله دگرسانی پسروده

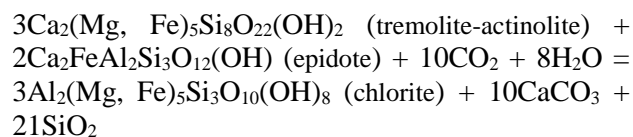
براساس مطالعات کانی‌شناسی و بافتی، مرحله پسروده به دو مرحله مجزا ولی پیوسته قابل تفکیک است:

#### ۷-۲-۱- مرحله پسروده پیشین

طی این مرحله، در اثر ورود سیالات گرمابی دما پایین‌تر و فرایندهای آب‌گیری، کربن‌گیری و سولفیدزایی در امتداد

وجود بلورهای کلینوپیروکسن با دگرسانی به کلسیت و اکتینولیت در داخل و در فضای بین بلورهای گارنت، بیانگر تبلور کلینوپیروکسن قبل و یا هم‌زمان با گارنت است. ۳- حضور کانی‌های سولفیدی به صورت پُرکننده فضای بین بلورهای گارنت و کلینوپیروکسن بیانگر تشکیل گارنت و پیروکسن قبل از تشکیل کانی‌های سولفیدی است. ۴- گارنت توسط مجموعه کلسیت، اپیدوت و کانی‌های کدر و همچنین کلینوپیروکسن توسط اکتینولیت، کلسیت و کمی کلریت در مرحله دگرگونی پسرونده جانشین شده‌اند. ۵- وجود ادخال‌های پیریت داخل کالکوپیریت و گالن و همچنین وجود کالکوپیریت در مسیر شکستگی‌های پیریت نشان می‌دهد که پیریت قبل از کالکوپیریت و گالن تشکیل شده است. ۶- وجود ادخال‌های کالکوپیریت داخل گالن نشانگر تبلور کالکوپیریت قبل از گالن است. ۷- وجود ادخال گالن داخل اسفالریت نشان‌دهنده تبلور گالن قبل از اسفالریت می‌باشد. ۸- گوتیت، مالاکیت و آزوریت محصول دگرسانی برونزاد، پیریت و کالکوپیریت هستند. ۹- رگه-رگچه‌های تأخیری کوارتزی-هماتیته و کلسیتی، کانه‌ها و کانی‌های مراحل قبلی را قطع کرده‌اند. بر این اساس، توالی پاراژنزی کانی‌ها و کانه‌های موجود در رخداد معدنی سرب- روی قره‌دش در شکل ۷ نشان داده شده است.

متشکل از کانی‌های رسی، کلریت و کوارتز دگرسان شده‌اند. دگرسانی در این مرحله در امتداد شکستگی‌ها صورت گرفته است. تشکیل کلریت، کلسیت و کوارتز از کانی‌های اپیدوت و ترمولیت- اکتینولیت ممکن است در نتیجه واکنش کربن‌گیری زیر رخ داده باشد (Deer et al., 1992).



کلسیم و سیلیس خارج شده از کانی‌های کالک‌سیلیکاته به صورت بلورهای درشت‌تر از بلورهای سنگ اولیه، فضاهای خالی و یا شکستگی‌های سنگ متاسوماتیک را پُر می‌کنند.

#### ۸- توالی پاراژنزی

شواهد متعددی برای ترسیم توالی پاراژنتیک کانی‌ها در رخداد معدنی سرب- روی قره‌دش در نظر گرفته شده است که مهم‌ترین آنها عبارتند از: ۱- حضور کانی‌های سولفیدی ریزبلور در داخل بلورهای کلینوپیروکسن و گارنت در همراهی با کانی‌هایی مانند اکتینولیت و کلریت بیانگر تشکیل کانی‌های سولفیدی بعد از کلینوپیروکسن و گارنت و در مرحله دگرگونی پسرونده می‌باشد. ۲-

شکل ۷- توالی پاراژنزی مواد معدنی و باطله در رخداد معدنی سرب- روی قره‌دش.

Minerals	Metasomatic alteration			Supergene
	Prograde	Retrograde		
		Early	Late	
Garnet	██████████			
Cliopyroxene	██████████			
Pyrite		██████████		
Chalcopyrite		██████████		
Galena		██████████		
Sphalerite		██████████		
Hematite			██████████	
Epidote	██████████			
Actinolite	██████████			
Calcite	██████████			██████████
Chlorite		██████████		
Quartz	██████████		██████████	
Malachite				██████████
Azurite				██████████
Goethite				██████████

Fig. 7. Paragenetic sequences of ore and gangue minerals at the Qaradash Pb-Zn occurrence.

## ۹- بحث و بررسی

### ۹-۱- الگوی توزیع عناصر کمیاب و کمیاب خاکی

الگوی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای نمونه‌های مربوط به زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی و کانه‌دار که نسبت به کندریت (McDonough and Sun, 1995) بهنجار شده‌اند، در شکل ۸ نشان داده شده است. براساس این شکل، نمونه‌های کانه‌دار دارای الگوی مشابهی هستند که می‌تواند بیانگر ارتباط زایشی آنها باشد. دو نمونه مربوط به کانسنگ حاوی کالکوپیریت- گالن و رگه کوارتزی حاوی کالکوپیریت دارای آنومالی مثبت ضعیف در Ti هستند (شکل ۸a). همه نمونه‌های کانه‌دار دارای آنومالی مثبت مشخصی در Pb بوده و رگه کوارتزی فاقد کانه‌زایی، آنومالی مثبت کوچکی را از Pb نشان می‌دهد (شکل ۸a). نمونه‌های مربوط به زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی نیز دارای الگوی تقریباً مشابهی از عناصر کمیاب هستند (شکل ۸b). این شباهت‌ها می‌تواند بیانگر تشکیل این زیرپهنه‌ها در ارتباط با یک فرایند از سنگ مادر اولیه خود (مرمر) باشد. نمونه مربوط به اپیدوت هورنفلس دارای آنومالی مثبت شاخص در عناصر Ba, Th, U, Ta, Sr می‌باشد (شکل ۸b). در نمونه مرمر نیز غنی‌شدگی و آنومالی مثبت مشخصی در عناصر Sr و Pb در مقایسه با دیگر عناصر دیده می‌شود (شکل ۸b).

در الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت (McDonough and Sun, 1995) نیز نمونه‌های کانه‌دار الگوی مشابهی دارند (شکل ۸c) که می‌تواند بیانگر ارتباط زایشی آنها باشد. نمونه مربوط به رگه کوارتزی فاقد کانه‌زایی، تهی‌شدگی بیشتری از عناصر کمیاب خاکی سبک (به‌ویژه عنصر Sm) در مقایسه با دیگر نمونه‌ها نشان می‌دهد (شکل ۸c). نمونه‌های مربوط به زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی نیز دارای الگوی مشابهی از عناصر کمیاب خاکی می‌باشند (شکل ۸d). بخش عمده این نمونه‌ها دارای یک الگوی مسطح همراه با آنومالی منفی Eu و Ce هستند. نمونه مربوط به اپیدوت هورنفلس الگوی متفاوتی با دیگر نمونه‌ها نشان می‌دهد (شکل ۸d). این نمونه بر خلاف دیگر نمونه‌ها آنومالی مثبت Ce و Eu دارد (شکل ۸d). نمونه اپیدوت گارنت پیروکسن هورنفلس فاقد آنومالی منفی Ce و Eu است (شکل ۸d). این تغییرات در الگوی عناصر کمیاب خاکی نمونه‌های

اپیدوت هورنفلس و اپیدوت گارنت پیروکسن هورنفلس را می‌توان به ترکیب کانی‌شناسی سنگ میزبان و احتمالاً شستشوی این عناصر طی فرایند دگرگونی پسروده مرتبط دانست.

### ۹-۲- تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر

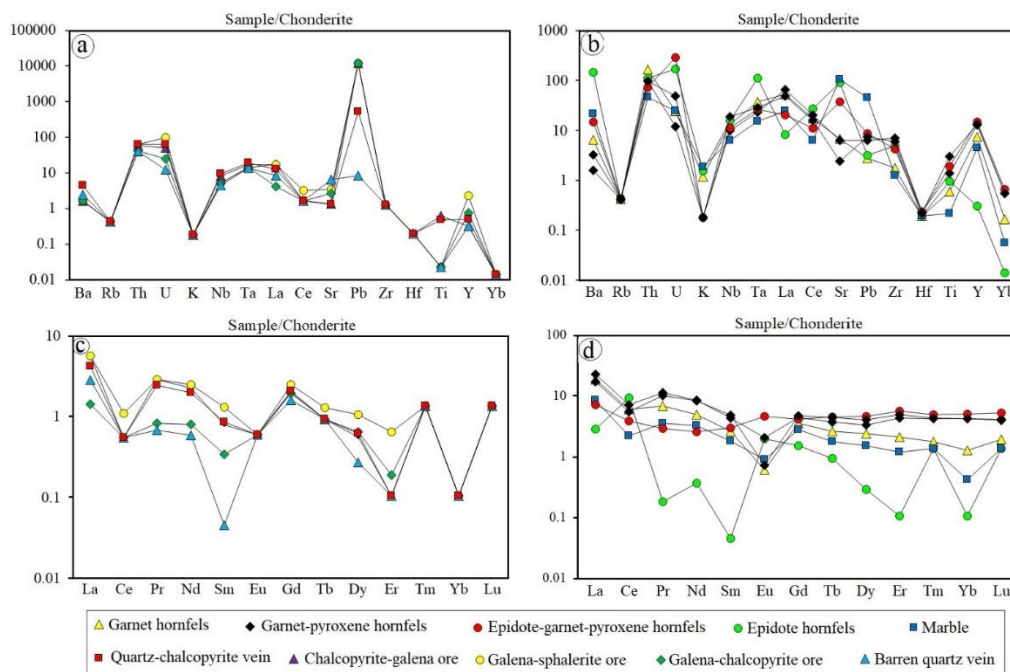
برای نمایش تحرک عناصر در رخداد معدنی قره‌دانش، داده‌های مربوط به نمونه‌های برداشت‌شده از زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی و بخش‌های کانه‌دار بر داده‌های مربوط به مرمر فاقد کانه‌زایی بهنجار شد (شکل ۹) تا عناصر تهی‌شده یا غنی‌شده به سنگ طی فرایندهای اسکارن‌زایی و کانه‌زایی مشخص شود. قابل ذکر است که این روش نیمه‌کمی بوده و برای تعیین میزان کمی تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر، به محاسبات موازنه جرم نیاز است که در این پژوهش انجام نشده است.

در نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی اکسیدهای عناصر اصلی (شکل ۹a)، همه نمونه‌های برداشت‌شده از زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی در مقایسه با مرمر فاقد کانه‌زایی از اکسیدهای  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$  و  $\text{TiO}_2$  غنی و از اکسیدهای  $\text{CaO}$  و  $\text{K}_2\text{O}$  تهی شده‌اند. این غنی‌شدگی می‌تواند بیانگر ورود عناصر از طریق سیالات گرمایی به داخل مرمر و جایگزینی آنها به جای  $\text{CaO}$  طی فرایند اسکارن‌زایی باشد. نمونه مربوطه به اپیدوت هورنفلس و اپیدوت گارنت پیروکسن هورنفلس در اکسید  $\text{P}_2\text{O}_5$  تهی‌شدگی داشته و نمونه‌های گارنت پیروکسن هورنفلس در این اکسید غنی‌شدگی نشان می‌دهند. اکسید  $\text{Na}_2\text{O}$  در نمونه اپیدوت گارنت پیروکسن هورنفلس غنی‌شدگی و در دیگر نمونه‌ها تهی‌شدگی ضعیفی را نشان می‌دهد.

نمونه‌های برداشت‌شده از زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی در مقایسه با مرمر فاقد کانه‌زایی از عناصر U, Th, Nb, Ta, Co, Cr, V, Ni, Ag و Cu غنی‌شدگی و از عناصر Ba, Sr, Pb, Zn, S و Te تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۹b). نمونه مربوط به اپیدوت هورنفلس در عناصر Ba و S نیز دارای غنی‌شدگی است. نمونه‌های کانه‌دار در مقایسه با مرمر فاقد کانه‌زایی از عناصر Co, Cr, Ni, Ag, Cu, Cd, Pb, Zn, S, Se و Te غنی و از عناصر Ba و Sr تهی شده‌اند (شکل ۹c). این نمونه‌ها غنی‌شدگی جزئی از عناصر Th و U نسبت به مرمر فاقد کانه‌زایی نشان می‌دهند (شکل ۹c). نمونه مربوط به رگه کوارتزی فاقد کانه‌زایی از عناصر

اپیدوت گارنت پیروکسن هورنفلس نیز به غیر از عناصر Pr، La و Nd، در بقیه عناصر کمیاب خاکی غنی شده است (شکل d۹). نمونه مربوط به زیرپهنه اپیدوت هورنفلس از بیشتر عناصر کمیاب خاکی به غیر از Ce، Eu، Tm و Lu تهی شدگی نشان می‌دهد (شکل d۹). نمونه‌های کانه‌دار در مقایسه با مرمر فاقد کانه‌زایی از همه عناصر کمیاب خاکی تهی شده‌اند (شکل e۹). این تهی شدگی در نمونه مربوط به رگه کوارتزی فاقد کانه‌زایی از شدت بیشتری برخوردار است.

Ba، Th، U، Nb، Cd، Pb، Zn و S تهی شدگی و از عناصر Co، Cr، Ni، Ag، Cu و Se غنی شدگی نشان می‌دهد (شکل c۹). در مقایسه با مرمر فاقد کانه‌زایی، نمونه‌های برداشت شده از زیرپهنه‌های گارنت هورنفلس و گارنت پیروکسن هورنفلس از همه عناصر کمیاب خاکی غنی شده‌اند (شکل d۹). این موضوع می‌تواند بیانگر ورود عناصر کمیاب خاکی از طریق سیالات گرمایی به داخل مرمر طی فرایند اسکارن‌زایی باشد. نمونه مربوط به زیرپهنه

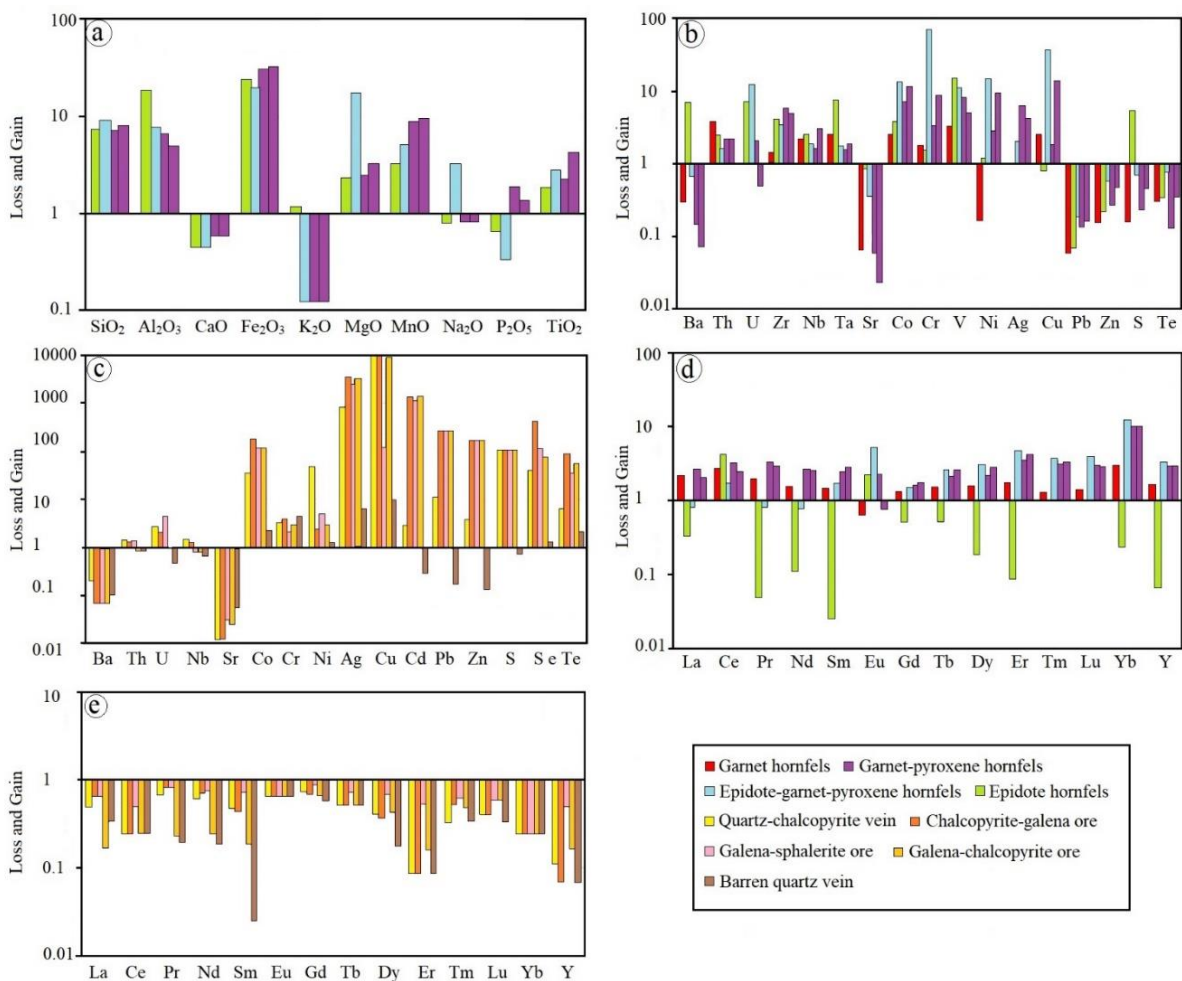


شکل ۸- (a) الگوی عناصر کمیاب بهنجار شده به کندریت برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی قره‌داش، (b) الگوی عناصر کمیاب بهنجار شده به کندریت برای نمونه‌های زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی در رخداد معدنی قره‌داش، (c) الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی قره‌داش و (d) الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت برای نمونه‌های زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی در رخداد معدنی قره‌داش. داده‌های کندریت از مک‌دوناف و سان (McDonough and Sun, 1995) اقتباس شده است.

Fig. 8. (a) Chondrite-normalized rare elements pattern for the ore samples in the Qaradash occurrence, (b) Chondrite-normalized rare elements pattern for the skarnoid aureole sub-zones samples in the Qaradash occurrence, (c) Chondrite-normalized rare earth elements pattern for the ore samples in the Qaradash occurrence and (d) Chondrite-normalized rare earth elements pattern for the skarnoid aureole sub-zones samples in the Qaradash occurrence. Chondrite data are from McDonough and Sun (1995).

پتروژنیکی بررسی کرد. فرایند اسکارن‌زایی متاسوماتیک بعد از فرایندهای دگرگونی و متاسوماتیک دو جانبه (مرحله پیشرونده)، با هجوم و تراوش سیالات داغ از جانب توده نفوذی به‌داخل شکستگی‌ها و ریزشکستگی‌های پهنه مرمر آغاز شده است. این سیالات حاوی Si، Zn، Pb و Mg با اکتسیویته بالا و در شرایط

۳-۹- شرایط فیزیکوشیمیایی فرایندهای اسکارن‌زایی با توجه به سیستم باز خروج و ورود سیالات، واکنش‌های دگرگونی در اسکارن‌ها بسیار متنوع است. براساس پارائزهای موجود در این سنگ‌ها، می‌توان واکنش‌های احتمالی را پیش‌بینی کرده و براساس آنها، محدوده تقریبی فشار و دما را با استفاده از شبکه‌های



شکل ۹- (a) نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر اصلی برای نمونه‌های مربوط به زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی در رخداد معدنی قره‌دش که نسبت به نمونه مرمر فاقد کانه‌زایی (نمونه A-21، جدول ۱) به‌نجار شده‌اند، (b) نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های مربوط به زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی در رخداد معدنی قره‌دش که نسبت به نمونه مرمر فاقد کانه‌زایی (نمونه A-21، جدول ۲) به‌نجار شده‌اند، (c) نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی قره‌دش که نسبت به نمونه مرمر فاقد کانه‌زایی (نمونه A-21، جدول ۲) به‌نجار شده‌اند، (d) نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های مربوط به زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی در رخداد معدنی قره‌دش که نسبت به نمونه مرمر فاقد کانه‌زایی (نمونه A-21، جدول ۲) به‌نجار شده‌اند و (e) نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی قره‌دش که نسبت به نمونه مرمر فاقد کانه‌زایی (نمونه A-21، جدول ۲) به‌نجار شده‌اند.

Fig. 9. (a) Loss and gain histogram of major elements in the skarnoid aureole sub-zones samples in the Qaradash occurrence that normalized against barren marble sample (sample A-21, Table 1), (b) Loss and gain histogram of rare elements in the skarnoid aureole sub-zones samples in the Qaradash occurrence that normalized against barren marble sample (sample A-21, Table 2), (c) Loss and gain histogram of rare elements in the ore sample in the Qaradash occurrence deposit that normalized against barren marble sample (sample A-21, Table 2), (d) Loss and gain histogram of rare earth elements in the skarnoid aureole sub-zones samples in the Qaradash occurrence that normalized against barren marble sample (sample A-21, Table 2) and (e) Loss and gain histogram of rare earth elements in the ore samples in the Qaradash occurrence that normalized against barren marble sample (sample A-21, Table 2).

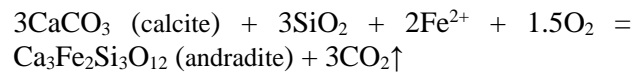
توسط اینودی (Einaudi, 1982) برای این فرایند پیشنهاد شده است:

اکسیدان بوده، سبب دگرسانی کربن‌زدائی و تشکیل کانی‌های بدون آب (مانند گارنت و کلینوپیروکسن) شده‌اند. واکنش زیر

(1982)، نمودار شکل ۱۰a دمای کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را برای دگرسانی پیروکسن (هدنبرژیت) معرفی می‌کند. در جریان این مرحله،  $Ca^{2+}$  به‌طور پیوسته از کالک‌سیلیکات‌های بی‌آب خارج و به‌صورت کانی‌های کربناته در محل تثبیت می‌شود. در دماهای بیشتر از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد، حتی در حالت فوگاسیته بالای سولفور، آندرادیت پایدار است (شکل ۱۰b)، اما در دماهای کمتر از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد، آندرادیت به مجموعه کوارتز + کلسیت + پیریت تجزیه می‌شود (شکل ۱۰c). با کاهش فوگاسیته سولفور ( $S_2 < 10^{-6}$ )، چنین سیالی می‌تواند مجموعه کوارتز + کلسیت + مگنتیت را تولید کند (شکل ۱۰c). از آنجاییکه در مجموعه کانی‌شناسی مرحله پسرونده پیشین منطقه قره‌داش فقط کانی پیریت همراه با کوارتز و کلسیت حضور دارد، لذا احتمالاً سیال متاسوماتیسم‌کننده، در این مرحله حداکثر دارای  $fS_2 = 10^{-6/5}$  بوده است (شکل ۱۰c). در این شرایط،  $fO_2$  نیز در حدود  $10^{-24/5}$  برآورد می‌شود (شکل ۱۰c).

#### ۹-۴- تیپ کانه‌زایی

باتوجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی و کانی‌شناسی و براساس تقسیم‌بندی‌های Cox و Singer (۱۹۸۶) و Dill (۲۰۱۰)، رخداد معدنی قره‌داش در گروه کانسارهای اسکارن سرب و روی قرار می‌گیرد. این ذخایر توسط محلول‌های گرمابی مشتق‌شده از توده‌های نفوذی که در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌ها مهاجرت می‌کنند، تشکیل می‌شوند. از خصوصیات مهم این کانسارها می‌توان بالا بودن درصد پیروکسن، تشکیل ذخیره در زیرپهنه پیروکسن، بالا بودن مقدار منگنز و عدم ارتباط مستقیم اسکارن با توده‌های نفوذی را نام برد. شواهد صحرایی و مطالعات سنگ‌شناسی سنگ مادر مرمری و مجموعه کانی‌شناسی زیرپهنه‌های هاله اسکارنوئیدی نشان می‌دهند که براساس تقسیم‌بندی اینودی و همکاران (Einaudi et al., 1981)، کانه‌زایی سرب و روی در رخداد معدنی قره‌داش از نوع کانسارهای اسکارن کلسیمی سرب-روی است. در جدول ۳ ویژگی‌های اصلی رخداد معدنی قره‌داش با کانسارهای اسکارن سرب و روی و کانسار اسکارنی انجرد در شمال‌باختر ایران مقایسه شده است.

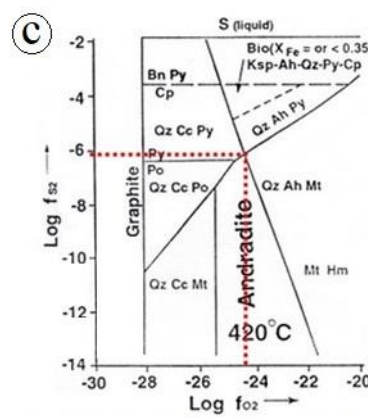
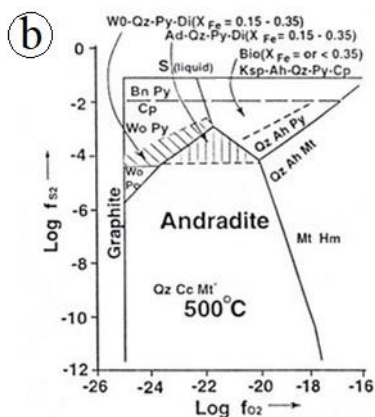
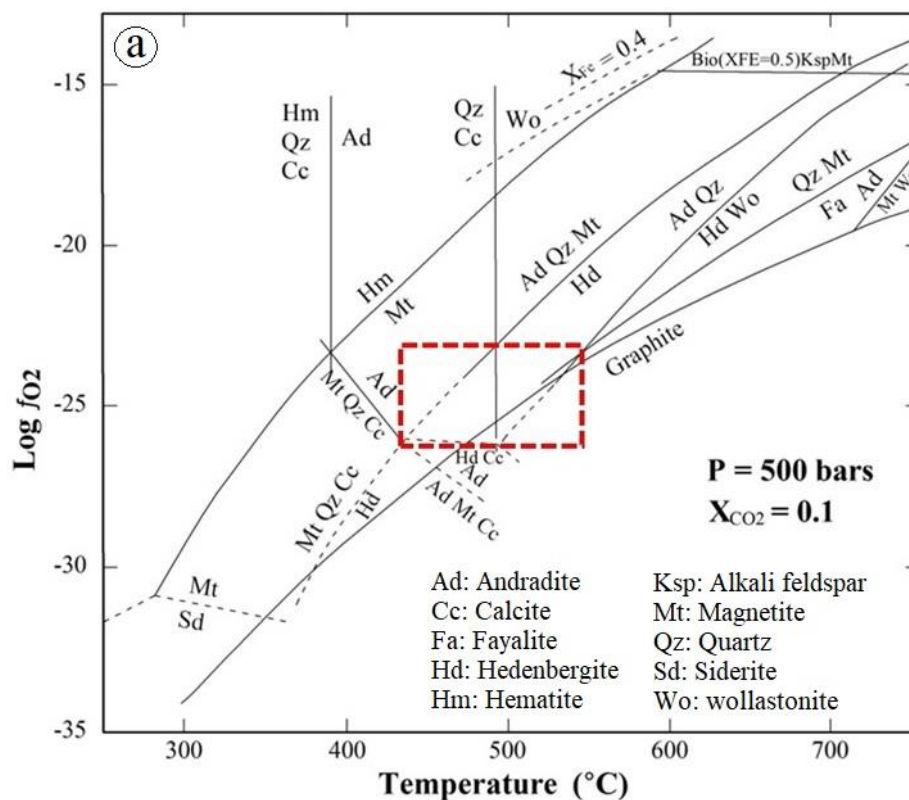


از آنجاییکه تمامی کانی‌های موجود در هاله‌های اسکارنوئیدی منطقه قره‌داش در سیستم Ca-Fe-Si-C-O-H قرار می‌گیرند، از نمودار شکل ۱۰a برای تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی احتمالی تشکیل اسکارنوئیدهای این منطقه استفاده شده است. این نمودار برای فشار ۰/۵ کیلوبار و  $XCO_2=0.1$  توسط اینودی (Einaudi, 1982) طراحی شده است.

آندرادیت در دمای ۷۰۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و  $10^{-26}$ - $10^{-16}$   $fO_2$  پایدار است (شکل ۱۰b). این کانی در دمای بالاتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد توسط مجموعه ولاستونیت + مگنتیت و در دمای بالاتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و با حضور کوارتز (بسته به  $fO_2$ ) توسط مجموعه هدنبرژیت + ولاستونیت جایگزین می‌شود. در منطقه قره‌داش، عدم حضور ولاستونیت در همراهی با گارنت‌ها می‌تواند بیانگر تشکیل گارنت و کلینوپیروکسن در دماهای کمتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد توسط محلول‌های متاسوماتیسم‌کننده باشد (شکل ۱۰b). علاوه بر این، جانشینی آندرادیت توسط مجموعه کلسیت و کوارتز، بیانگر دمای حدود ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد برای واکنش یادشده می‌باشد (شکل ۱۰a). وجود هم‌رشدی و مرز بلوری سالم بین گارنت‌ها و پیروکسن‌ها و عدم حضور بافت جانشینی در آنها می‌تواند دال بر تشکیل همزمان آنها در محدوده دمایی ۵۵۰-۴۳۰ درجه سانتی‌گراد و  $10^{-26}$ - $10^{-22}$   $fO_2$  باشد. چنین سیالی تا دماهای حدود ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۱۰b) می‌تواند در تعادل با مجموعه کالک‌سیلیکاته بی‌آب تشکیل شده در مرحله پیش‌رونده باشد.

در دمای کمتر از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد، سیالات با مجموعه کالک‌سیلیکاته بی‌آب موجود در هاله اسکارنوئیدی در تعادل نبوده و شروع به دگرسانی کرده‌اند (شکل ۱۰a). با کاهش دما و افزایش  $fO_2$ ، گارنت‌ها به مجموعه اپیدوت + کوارتز + کلسیت و کلینوپیروکسن به مجموعه ترمولیت-اکتینولیت + کوارتز + کلسیت تجزیه شده‌اند. با در نظر گرفتن اینکه  $XCO_2$  در محیط‌های اسکارنی عموماً ۰/۱ یا کمتر است (Einaudi, )





Stability field of K-silicate alteration in the pluton  
 Stability field of pyroxene and clinopyroxene in the skarn  
 Stability field of clinopyroxene and garnet in the skarn

Ad: Andradite    Di: Digenite    Py: Pyrite  
 Ah: Anhydrite    Hd: Hedenbergite    Qz: Quartz  
 Bio: Biotite    Hm: Hematite    S: Sulfur  
 Bn: Bornite    Ksp: Alkali feldspar    Wo: Wollastonite  
 Cc: Calcite    Mt: Magnetite  
 Cp: Chalcopyrite    Po: Pyrrhotite

شکل ۱۰- (a) نمودار  $fO_2$  در مقابل درجه حرارت در فشار سیال ۵۰۰ بار و  $X_{CO_2} = 0.1$  برای سیستم Ca-Fe-Si-C-O-H (Einaudi, 1982). محدوده دمایی تشکیل مجموعه گارنت + کلینوپیروکسن در هاله اسکارنوئیدی منطقه قره‌داش با کادر قرمز بر روی نمودار مشخص شده است. (b و c) نمودارهای  $fO_2$  در مقابل  $fS_2$  برای پایداری آندرادیت بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و  $X_{CO_2} = 0.1$  (Einaudi, 1982) در هاله اسکارنوئیدی منطقه قره‌داش.

Fig. 10. (a)  $fO_2$  vs. T diagram in  $P_{fluid} = 500$  bar and  $X_{CO_2} = 0.1$  for Ca-Fe-Si-C-O-H system (Einaudi, 1982). Temperature range for garnet + clinopyroxene formation in the Qaradash skarnoid aureole indicated on diagram by red box. (b and c)  $fO_2$  vs.  $fS_2$  diagrams for andradite stability in  $T = 400-600$  °C and  $X_{CO_2} = 0.1$  (Einaudi, 1982) in the Qaradash skarnoid aureole.

جدول ۳- مقایسه ویژگی‌های اصلی رخداد معدنی قره‌داش با کانسارهای اسکارن سرب- روی و کانسار انجرد.

Table 3. Comparison of main characteristics of the Qaradash occurrence with Pb-Zn skarn deposits and Anjerd deposit.

	Qaradash	Pb-Zn skarn	Anjerd
Host rock	Paleozoic marble	Limestone, dolomite	Late Cretaceous shale and carbonate strata
Ore Minerals	Gn, Sp, Ccp, Py, Hem	Sp, Gn, Py, Po, Mag, Ccp, Apy	Mag, Gn, Sp, Ccp, Py
Gangue minerals	Px, Grt, Ep, Act, Qz, Cal	Px, Grt, Ep, Act, Cal	Px, Grt, Ep, Act, Qz, Cal
Ore texture	Vein-veinlet, disseminated, replacement, relict	Vein-veinlet, disseminated, replacement	Vein-veinlet, disseminated, replacement, vug infill, relict
Alteration	Decarbonatization, actinolization-epidotization, carbonatization, silicification	Silica, intermediate argillic, carbonatization, propylitic	actinolization- epidotization, carbonatization, silicification
References	This study	Cox and Singer (1986), Dill (2010)	Mollai et al., (2009), Hassanpour (2013)

Abbreviations: Act: actinolite, Apy: arsenopyrite, Cal: calcite, Ccp: chalcopyrite, Ep: epidote, Gn: galena, Grt: garnet, Hem: hematite, Mag: magnetite, Po: pyrrhotite, Px: pyroxene, Py: pyrite, Qz: quartz, Sp: sphalerite. All mineral abbreviations from Whitney and Evans (2010).

#### ۹-۵- الگوی تشکیل

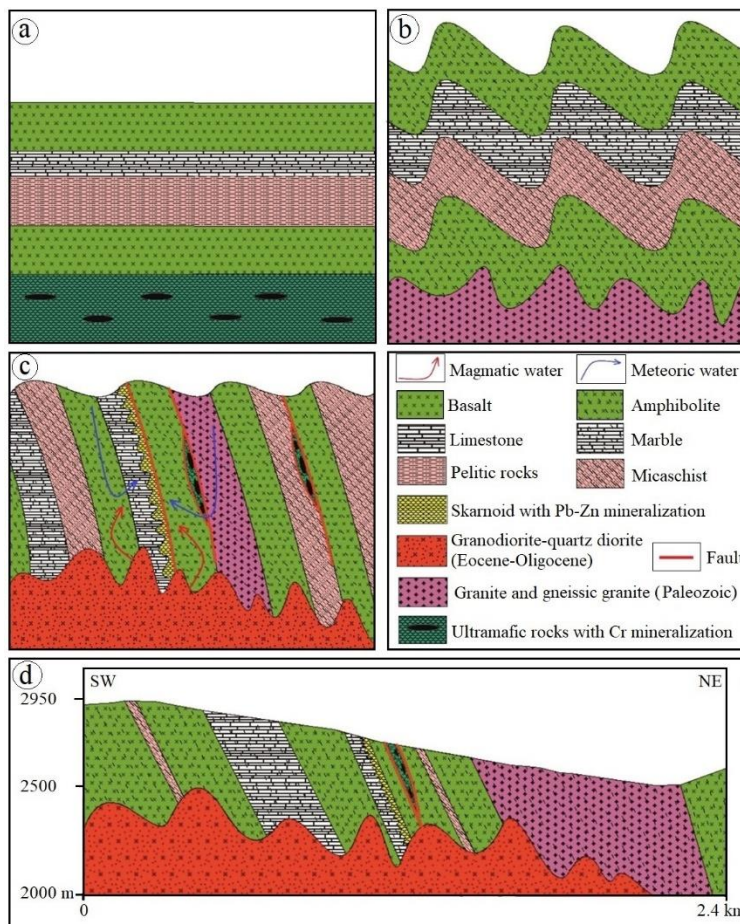
علم‌کندی) به داخل توالی دگرگونی نفوذ کرده است (شکل ۱۱c). این توده‌ها در منطقه قوزلو (شمال علم‌کندی) به ائوسن بالایی- الیگوسن (۴۲-۲۶ میلیون سال) منتسب شده‌اند (Moazzen et al., 2013). نفوذ این توده‌ها، هاله‌های اسکارنی و کانه‌زایی آهن در منطقه علم‌کندی (Nouri, 2018; Nouri et al., 2021) را ایجاد کرده‌اند. در فاصله دورتر، مهاجرت محلول‌های گرمابی مشتق‌شده از توده‌های مزبور در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌ها سبب تشکیل هاله اسکارن‌نوییدی در منطقه قره‌داش شده است. روند مشابه الگوی بهنجار شده عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در زیرپهنه‌های هاله اسکارن‌نوییدی و بخش‌های کانه‌دار بیانگر ارتباط زایشی بین کانه‌زایی سرب- روی و هاله اسکارن‌نوییدی می‌باشد. مرحله چهارم با بالآمدگی منطقه و فرایندهای هوازدگی و فرسایش مشخص می‌شود که شکل امروزی منطقه را به وجود آورده است.

#### ۱۰- نتیجه‌گیری

رخداد معدنی سرب - روی قره‌داش درون هاله اسکارن‌نوییدی موجود در میان لایه‌های مرمری توالی دگرگونی پالئوزوئیک تشکیل شده است. با توجه به شواهد صحرایی، مجموعه کانی‌شناسی زیرپهنه‌های اسکارن‌نوییدی، سنگ میزبان مرمری، ساخت و بافت و توالی پاراژنز، کانه‌زایی سرب و روی در این

براساس نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی، مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و روابط پاراژنزی کانی‌ها و کانه‌ها در رخداد معدنی قره‌داش، مراحل تکوین و تکامل این رخداد معدنی را می‌توان به صورت یک توالی چهار مرحله‌ای خلاصه کرد (شکل ۱۱). در مرحله نخست، توالی آتشفشانی- رسوبی مربوط به پالئوزوئیک بالایی در یک محیط کششی (Nafisi et al., 2019; Karami et al., 2021) تشکیل شده است (شکل ۱۱a). در بخش تحتانی این توالی، واحد اولترامافیک حاوی کانه‌زایی کرومیت است (Ahrabian Fard et al., 2021a, b). در مرحله دوم، توالی آتشفشانی- رسوبی یادشده تحت تأثیر چین خوردگی و دگرگونی ناحیه‌ای قرار گرفته و سنگ‌های دگرگونی مانند آمفیبولیت، آمفیبول شیست، بیوتیت شیست و میکاشیست با میان‌لایه‌های مرمر تشکیل شده‌اند (شکل ۱۱b). همزمان با چین خوردگی، توده گرانیتوئیدی به داخل توالی آتشفشانی- رسوبی نفوذ کرده و همراه با واحدهای مزبور دگرگون شده و به گرانیت گنایسی تبدیل شده است. در حین فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی، توده‌های اولترامافیک دارای کانه‌زایی کرومیت به صورت عدسی شکل در بین توالی دگرگونی جای‌گیری کرده‌اند. در مرحله سوم، یکسری توده‌های گرانیتوئیدی کوچک (نظیر توده گرانودیوریتی





شکل ۱۱- نمایی شماتیک نشان دهنده تاریخچه تکامل زمین شناسی و تشکیل رخداد معدنی سرب - روی قره داش. برای توضیح به متن مراجعه شود.

Fig. 11. Schematic model showing the geological evolution history and formation of the Qaradash Pb-Zn occurrence. See text for details.

رخداد معدنی قره داش در دو مرحله دگرگونی پیشرونده و پسرونده رخ داده و تشکیل کانه زایی سرب و روی با مرحله دگرگونی پسرونده همراه بوده است. مطالعات کانی شناسی و ساخت و بافت کانی ها حاکی از اینست که مرحله دگرگونی پیشرونده در محدوده دمایی ۴۳۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی گراد و  $fO_2 = 10^{-23} - 10^{-26}$  رخ داده است. با توجه به مجموعه کانی شناسی مرحله پسرونده پیشین (پیریت، کوارتز و کلسیت)، سیال متاسوماتیسم کننده در رخداد معدنی قره داش احتمالاً حداکثر دارای  $fS_2 = 10^{-6/5}$  بوده است. با توجه به گسترش زیاد واحدهای مرمری در توالی دگرگونی ناحیه ای زیرپهنه تکاب- تخت سلیمان- انگوران، نتایج این پژوهش می تواند در شناسایی هاله های اسکارنوئیدی و کانه زایی های مشابه در این زیرپهنه و سایر بخش های پهنه سندرچ- سیرجان که

رخداد معدنی از نوع کانسارهای اسکارن کلسیمی سرب- روی است. هاله اسکارنوئیدی در رخداد معدنی قره داش شامل زیرپهنه های گارنت هورنفلس، گارنت پیروکسن هورنفلس، پیروکسن هورنفلس، اپیدوت گارنت پیروکسن هورنفلس، اپیدوت هورنفلس و مرمر می باشد. شباهت روند الگوی بهنجارشده عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در نمونه های زیرپهنه های مختلف هاله اسکارنوئیدی بیانگر تشکیل آنها طی یک فرایند از سنگ مادر اولیه (مرمر) است. علاوه بر این، شباهت الگوی بهنجارشده این عناصر در نمونه های کانه دار و نمونه های هاله اسکارنوئیدی نشان دهنده زایش آنها در ارتباط با محلول های گرمابی مشتق شده از توده های نفوذی ائوسن بالایی- الیگوسن (۲۶-۴۲ میلیون سال) در منطقه تکاب- تخت سلیمان- انگوران می باشد. مراحل اسکارن زایی در

زمین شناسی مشابهی دارند، مفید واقع شود.

### قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش تشکر می‌نمایند. همچنین نویسندگان بر خود لازم

### مراجع

- Ahrabian Fard, P., Nabatian, G., Mokhtari, M.A.A., Honarmand, M., Kouhestani, H., 2021a. Mineral chemistry and chromite mineralization in the Qaranaz-Alamkandi area, west Zanjan. *Journal of Economic Geology* 12(4), 585–610 (in Persian with extended English abstract). <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v12i4.79535>
- Ahrabian Fard, P., Nabatian, G., Mokhtari, M.A.A., Honarmand, M., Kouhestani, H., 2021b. Application of electron microprobe studies in determining genesis of chromite mineralization in the Qaranaz-Alamkandi area, west of Zanjan. *Advanced Applied Geology* 11(2), 198–224 (in Persian with extended English abstract). <https://10.22055/aag.2020.30512.2025>
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2)
- Alavi, M., Amidi, M., 1976. Geological map of Takab, scale 1:250000. Geological Survey of Iran.
- Babakhani, A.R., Ghalamghash, J., 1996. Geological map of Takht-e-Soleyman, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Bakhshizad, F., Ghorbani, Gh., 2016. Geochemistry, Geochronology and Tectonic Setting of Metamorphic Rocks from the Zanjan-Takab Region. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 25(97), 361–374 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22071/gsj.2015.41537>
- Bente, K., Doering, T., 1993. Solid-state diffusion in sphalerites: An experimental verification of the chalcopyrite disease. *European Journal of Mineralogy* 5, 465–478. <https://10.1127/ejm/5/3/0465>
- Berger, B.R., Bagby, W.C., 1991. The geology and origin of Carlin type gold deposits. In: Foster, R.P. (Ed.), *Gold Metallogeny and Exploration*. Blackie, Glasgow, pp. 210–243.
- Berman, R.G., Brown, T.H., Greenwood, H.J., 1985. An internally consistent thermodynamic database for minerals in the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ . Atomic Energy of Canada Technical Report TR-337, p. 62.
- Bortnikov, N.S., Genkin, A.D., Dobrovolskaya, M.G., Muravitskaya, G.N., Filiminova, A.A., 1991. The nature of chalcopyrite inclusions in sphalerite: Exsolution, coprecipitation, or disease. *Economic Geology* 86, 1070–1082. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.4.1191>
- Cox, D.P., Singer, D.A., 1986. Mineral deposit models. *US Geological Survey Bulletin* 1693, p. 379.
- Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran, hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita* 43(4): 383–404. <https://10.1007/s00126-007-0167-x>
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1992. An introduction to the rock forming minerals. Longman Scientific and Technical, p. 696.
- Dill H.G. 2010. The chessboard classification scheme of mineral deposits: mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews* 100(1–4), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.011>
- Einaudi, M.T., 1982. General features and origin of skarns associated with porphyry copper plutons. In: Titley S.R., (Ed.), *Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 185–209.
- Einaudi, M.T., Meinert, L.D., Newberry, R.J., 1981. Skarn deposits. In: Skinner B.J., (Ed.), *75<sup>th</sup> Anniversary Volume, Economic Geology Publishing Company, Texas*, pp. 317–391. <https://doi.org/10.5382/AV75.11>
- Fallah Karimi, Z., 2011. Mineralogy and geochemistry of Qinarjeh Fe index (northeast of Takab, West Azerbaijan province). MSc. Thesis, Urmia University, Urmia (In Persian with English abstract).

- Fonoudi, M., Hariri, A., 1999. Geological map of Takab, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Hajialioghli, R., Moazzen, M., Droop, G.T.R., Oberhansli, R., Bousquet, R., Jahangiri, A., Ziemann, M., 2007a. Serpentine polymorphs and P-T evolution of meta-peridotites and serpentinites in the Takab area, NW Iran. *Mineralogical Magazine* 71(2), 155–174. <https://10.1180/minmag.2007.071.2.203>
- Hajialioghli, R., Moazzen, M., Jahangiri, A., Droop, G.T.R., Bousquet, R., Oberhansli, R., 2007b. Petrogenesis of meta-peridotites in the Takab area, NW Iran. *Goldschmidt Conference Abstracts, Cologne, Germany, A370.*
- Hajialioghli, R., Moazzen, M., Jahangiri, A., Oberhansli, R., Mocek, B., Altenberger, U., 2010. Petrogenesis and tectonic evolution of metaluminous sub-alkaline granitoids from the Takab Complex, NW Iran. *Geological Magazine* 148(2), 250–268. <https://doi.org/10.1017/S0016756810000683>
- Hassanpour, Sh., 2013. The alteration, mineralogy and geochronology (SHRIMP U–Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) of copper-bearing Anjerd skarn, north of the Shayvar Mountain, NW Iran. *International Journal of Earth Sciences* 102(3), 687–699. <https://10.1007/s00531-012-0819-7>
- Karami, F., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Azimzadeh, A.M., 2021. The Halab deposit, SW Zanjan: Volcanogenic massive sulfide Zn–Pb (Ag) mineralization, Takab–Takht-e-Soleyman–Angouran metallogenic district. *Journal of Economic Geology* 13(1), 165–192 (In Persian with extended English abstract). <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i1.76448>
- Lepetit, P., Bente, K., Doering, T., Luckhaus, S., 2003. Crystal chemistry of Fe-containing sphalerites. *Physics and Chemistry of Minerals* 30, 185–191. <https://doi.org/10.1007/s00269-003-0306-6>
- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120, 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Meinert, L.D., 1992. Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada* 19(4), 145–162. <https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/article/view/3773>
- Moazzen, M., Hajialioghli, R., Möller, A., Droop, G.T.R., Oberhansli, R., Altenberger, U. and Jahangiri, A., 2013. Oligocene partial melting in the Takab metamorphic complex, NW Iran: Evidence from in situ U–Pb geochronology. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 24(3), 217–228.
- Mohajjel, M., 1997. Structure and Tectonic Evolution of Paleozoic-Mesozoic rocks, Sanandaj–Sirjan zone, Western Iran. Ph.D. thesis, University of Wollongong, Wollongong.
- Mollai, H., Yaghubpur, A., Attar, R.S., 2009. Geology and geochemistry of skarn deposits in the northern part of Ahar batholith, East Azarbaijan, NW Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 1, 15–34.
- Nafisi, R., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Sadeghi, M., 2019. Geochemistry and tectonomagmatic setting of protolite rocks of meta-volcanics in the Halab metamorphic complex (SW Dandy, Zanjan Province). *Journal of Economic Geology* 11(2), 211–235 (in Persian with extended English abstract). <https://doi.org/10.22067/ECONG.V11I2.68167>
- Nouri, F., 2018. Petrology and geochemistry of Alamkandi granitoid (west of Mahneshan) with considering genesis of Fe mineralization. MSc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan (In Persian with English abstract).
- Nouri, F., Mokhtari, M.A.A., Izadyar, J., Kouhestani, H., 2017. Geological and mineralogical characteristics of Alamkandi Fe deposit, west of Zanjan. 35<sup>th</sup> National Congress on Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (In Persian with English abstract).
- Nouri, F., Mokhtari, M.A.A., Izadyar, J., Kouhestani, H., 2021. Geochemistry and petrogenesis of the Alamkandi granitoid body and Fe skarn (west of Mahneshan, Zanjan province). *Journal of Economic Geology* 13(3), 507–536 (In Persian with extended English abstract). <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i3.86285>
- Perkins, E.H., Brown, T.H., Berman, R.G., 1986. PTX-SYSTEM: Three programs for calculation of pressure-temperature-composition phase diagrams. *Computers and Geosciences* 12(6), 749–755. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(86\)90028-2](https://doi.org/10.1016/0098-3004(86)90028-2)
- Qazvinizadeh, A.M., 2005. Genesis of Alamkandi Pb–Zn deposit, Zanjan Province. MSc. thesis, University of Kharazmi, Tehran (In Persian with English abstract).
- Saki, A., 2010. Proto-Tethyan remnants in northwest Iran: Geochemistry of the gneisses and metapelitic rocks. *Gondwana Research* 17(4), 704–714. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.08.008>

- Saki, A., Moazzen, M., Oberhänsli, R., 2011. P–T evolution of the Precambrian Metamorphic Complex, NW Iran: a study of metapelitic rocks. *Geological Journal* 46(1), 10–25. <https://doi.org/10.1002/gj.1236>
- Sarkhoshi, A., Moazzen, M., Izadyar, J., 2014. Mineral chemistry and P-T estimation of formation of garnet schists, Mount Argon, Angoran Mine. *Quarterly Iranian Journal of Geology* 10(38), 47–57 (In Persian with English abstract).
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>