

## Mineralization, structure and texture and genesis of Halab gold occurrence, southwest of Dandy, Zanjan Province

Rahimeh Nafisi<sup>1</sup>, Hossein Kouhestani<sup>1\*</sup>, Mir Ali Asghar Mokhtari<sup>1</sup>, Martiya Sadeghi<sup>2</sup>

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

2-Department of Mineral Resources, Economic Geology Division, Geological Survey of Sweden, Uppsala, Sweden

**Keywords:** Au mineralization, Takab–Takht-e-Soleyman–Angouran, Sanandaj–Sirjan, Halab, Zanjan

### 1-Introduction

Halab Au occurrence, 120 km southwest of Zanjan, is located in the Sanandaj–Sirjan Zone and is part of the Takab–Takht-e-Soleyman–Angouran Metallogenic Zone (TTAMZ). TTAMZ is one of the essential metallogenic zones in Iran (Daliran, 2008). The Zarshouran Au deposit (Daliran et al., 1999, 2002; Mehrabi et al., 1999; Asadi et al., 1999, 2000), Aghdarreh Sb–Au deposit (Daliran, 2008), and Angouran Zn–Pb deposit (Daliran et al., 1999, 2013; Gilg et al., 2006; Boni et al., 2007; Zhuang et al., 2019) along with some Fe, Pb–Zn, Au, Cu and Mn mineralization were found within this zone. Apart from small scale geological maps of the area, i.e., 1:250,000 geological map of Takab (Alavi and Omid, 1976) and 1:100,000 geological map of Takab (Fonoudi and Hariri, 1999) and several unpublished exploration reports (Karbasi, 2015; IMIDRO, 2017), before this research no work had been done on Au mineralization at Halab. The present paper provides an overview of the geological framework, the mineralization characteristics, and the results of the geochemical study of the Halab Au occurrence with an application to the ore genesis. Identification of these characteristics can be used as a model for exploration of this type of Au mineralization in this area and other parts of the TTAMZ.

### 2-Methodology

Detailed fieldwork has been carried out at different scales in the Halab area. 26 polished-thin and thin sections from host rocks and mineralized samples were studied by conventional petrographic and mineralogical methods at the University of Zanjan. Also, a total of 6 samples from barren host rocks and ore samples at the Halab Au occurrence were analyzed by Fire Assay and ICP–MS for gold, trace elements, and REE compositions, respectively, at Applied Geosciences Research Center of Geological Survey of Iran, Karaj, Iran.

### 3- Results and discussion

The host rocks at the Halab area consist of Precambrian deformed metamorphic sequence (equal to Kahar Formation; Fonoudi and Hariri, 1999) that are unconformably overlain by dolomitic marbles of Jangoutaran. The metamorphic sequence composed of mafic (actinolite schist, hornblende schist and epidote biotite actinolite schist), pelitic (garnet muscovite biotite schist and muscovite biotite schist), and felsic (albite quartz schist, biotite albite quartz schist, and biotite amphibole albite quartz schist) schist units intercalated with mylonitic rhyolite, pyroxinite, marble, and quartzite. These rocks are metamorphosed in amphibolite and greenschist facieses. Geochemically, mafic schist shows similar composition to basalt, basaltic andesite, and trachy-basalt, while felsic schist shows rhyolitic composition (Nafisi, 2018).

Mineralization in the Halab Au occurrence occurs as NE-trending foliation-parallel Au-bearing banded, laminated, and lens-shaped zone hosted by actinolite schists. It reaches up to 200 m in length and 50 m in width and is generally dipping to the SE at 80°. Mineralization also occurs as disseminated and vein-veinlet within

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

DOI: 10.22055/AAG.2020.29775.1995

Received 2019-05-31

Accepted 2020-02-06 22

pyroxenite. Au grade of mineralized samples ranges from 1.63 to 8 gr/t (Karbasi, 2015; IMIDRO, 2017). The actinolite and silica types of hydrothermal alteration of the host rocks are close to the ore zone, while the chlorite alteration is envelope the actinolite and silica alteration. Based on mineralogical studies, arsenopyrite, pyrite, sphalerite, chalcopyrite, pyrrhotite, and gold are the main ore minerals in the Halab occurrence. Goethite, along with rare azurite, formed as supergene minerals. Quartz, actinolite, clinopyroxene, chlorite, and calcite present as gangue mineral at Halab. The ore minerals show banded, laminated, disseminated, vein-veinlets, brecciated, vug infill, colloform, replacement, and relict textures. Based on the mineral assemblages, ore textures, and crosscutting relationships, the ore-forming process at Halab can be divided into four stages: 1- syn-deposition, 2- syn-metamorphism–syn-deformation, 3- hydrothermal, and 4- supergene. Gold occurs as free gold inclusions in arsenopyrite in the hydrothermal stage. Chondrite-normalized REE patterns of barren actinolite schist host rocks and the mineralized samples indicate that mineralized samples are depleted in REE.

#### 4-Conclusions

The geological, mineralogical, geochemical, textural, and structural characteristics of the Halab occurrence reveals that primary mineralization at Halab occurs as sub-economic stratiform and startabound, laminated and disseminated Zn–Cu mineralization coeval with the deposition of the volcano-sedimentary units in rifted continental arc setting. This primary Zn–Cu mineralization is comparable with metamorphosed and deformed laminated and disseminated parts of the Besshi type massive sulfide deposits. Gold mineralization at the Halab occurrence is related to a late hydrothermal phase, which is thought to be the result of Miocene magmatism in the TTAMZ. This hydrothermal phase led to the formation of several precious metals mineralizations such as Zarshouran, Aghdarreh, Arabshah, Chichaklou, Ay Qalasi, Arpachy, Aq Otagh, and Bayche Bagh in the TTAMZ.

#### Acknowledgments

This research was made possible by the grant of the office of vice-chancellor for research and technology, the University of Zanjan. We acknowledge their support. Journal of Advanced Applied Geology reviewers and editors are also thanked for their constructive suggestions on improvement of manuscript.

#### References

- Alavi, M., Amidi, M., 1976. Geological map of Takab, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Asadi, H.H., Voncken, J.H.L., Kühnel, R.A., Hale, M., 1999. Invisible gold at Zarshuran, Iran. *Economic Geology* 94, 1367–1374.
- Asadi, H.H., Voncken, J.H.L., Kühnel, R.A., Hale, M., 2000. Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran. *Mineralium Deposita* 5, 656–671.
- Boni, M., Gilg, H.A., Balassone, G., Schneider, J., Allen, C.R., Moore, F., 2007. Hypogene Zn carbonate ores in the Angourandeposit, NW Iran. *Mineralium Deposita* 42, 799–820.
- Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran, hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita* 43, 383–404.
- Daliran, F., Hofstra, A.H., Walther, J., Stüben, D., 2002. Aghdarreh and Zarshuran SRHDG deposits, Takab region, NW Iran. *GSA Annual Meeting, Abstract with Programs, Session 63-8*.
- Daliran, F., Pride, K., Walther, W., Berner, Z.A., Bakker, R.J., 2013. The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: evidence for a two stage, hypogene zinc sulfide–zinc carbonate mineralization. *Ore Geology Reviews* 53, 373–402.
- Daliran, F., Walther, J., Stüben, D., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization in the North Takab geothermal field, NW Iran. In: Stanley, C.J. et al. (Eds.): *Mineral Deposits: Processes to Processing*. Proceed. 5th bienn. SGA Meeting and 10th Quadr. IAGOD Meeting, pp. 837-840.
- Fonoudi, M., Hariri, A., 1999. Geological map of Takab, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Gilg, H.A., Boni, M., Balassone, G., Allen, C.R., Banks, D., Moore, F., 2006. Marble-hosted sulphide ores in the Angouran Zn (Pb–Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex. *Mineralium Deposita* 41, 1–16.
- Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization (IMIDRO), 2017. Final exploration report of Angouran zone. Ministry of Industry, Mine and Trade, Zanjan Province, Zanjan, p. 250.
- Karbasi, A., 2015. Halab Pb–Zn exploration report. Ministry of Industry, Mine and Trade, Zanjan Province, Zanjan, p. 154.
- Mehrabi, B., Yardley, B.W.D., Cam, J.R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita* 34, 673–696.

- Nafisi, R., 2018. Geology, geochemistry and genesis of Halab Au mineralization, southwest of Zanzan. Unpublished M.Sc. thesis, University of Zanzan, Zanzan.
- Zhuang, L., Song, Y., Liu, Y., Fard, M., 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.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Nafisi, R., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Sadeghi, M., 2021. Mineralization, structure and texture and genesis of Halab gold occurrence, southwest of Dandy, Zanzan Province. *Adv. Appl. Geol.* 10(4), 488-513.

DOI: 10.22055/AAG.2020.29775.1995

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_15343.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_15343.html?lang=en)

## کانه‌زایی، ساخت و بافت و ژنز رخداد معدنی طلای حلب، جنوب‌باختر دندی، استان زنجان

رحیمه نفیسی

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

حسین کوهستانی\*

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

میر علی اصغر مختاری

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

ماریا صادقی

بخش زمین‌شناسی اقتصادی، سازمان زمین‌شناسی سوئد، اوپسالا، سوئد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۷

\*kouhestani@znu.ac.ir

### چکیده

کانه‌زایی در رخداد معدنی حلب به صورت یک پهنه سیلیسی-سولفیدی طلادار درون توالی شیست‌های مافیک پرکامبرین رخ داده است. آرسنوپیریت، اسفالریت، پیریت، کالکوپیریت، پیروتیت و طلا، کانی‌های معدنی و کوارتز، اکتینولیت، کلینوپیروکسن و کلریت، کانی‌های باطله در حلب هستند. بافت کانسنگ شامل نواری، لامینه‌ای، دانه‌پراکنده، رگچه‌ای، برشی، شکافه پُرکن، گل کلمی، جانشینی و بازماندی است. دگرسانی‌ها شامل اکتینولیتی، سیلیسی و کلریتی شدن است. چهار مرحله کانه‌زایی در حلب قابل تفکیک است. کانه‌زایی طلا مربوط به مرحله گرمایی (مرحله سوم) هم‌زمان با تشکیل آرسنوپیریت می‌باشد. نتایج مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد کانه‌زایی در حلب ابتدا به صورت کانه‌زایی غیراقتصادی روی-مس با ژئومتری نواری-لامینه‌ای، دانه‌پراکنده و چینه‌سان-چینه‌کران هم‌زمان با فعالیت‌های آتشفشانی - رسوبی تشکیل شده است که طی فرایندهای دگرگونی-دگرشکلی بعدی، رونقش شده است. مقایسه ویژگی‌های این کانه‌زایی اولیه با انواع کانسارهای روی-مس نشان می‌دهد این کانه‌زایی معادل دگرگون-دگرشکل‌شده بخش‌های لایه‌ای و افشان کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد نوع بشی است. کانه‌زایی طلا در ارتباط با یک فاز گرمایی تأخیری در ارتباط با نفوذ فازهای ماگمایی میوسن در پهنه تکاب - تخت‌سلیمان - انگوران می‌باشد. بررسی پهنه‌های دگرسانی در واحدهای دگرگونه پرکامبرین که ارتباط فضایی نزدیکی با فازهای ماگمایی میوسن دارند، کاربرد فراوانی در اکتشاف این تیپ از کانه‌زایی‌های طلا در پهنه کانه‌دار تکاب - تخت‌سلیمان - انگوران دارد.

کلمات کلیدی: کانه‌زایی طلا، تکاب - تخت‌سلیمان - انگوران، سندرچ - سیرجان، حلب، زنجان

### مقدمه

رخداد معدنی طلای حلب در فاصله ۱۰۰ کیلومتری جنوب‌باختر زنجان و ۲۶ کیلومتری جنوب‌باختر دندی با مختصات  $36^{\circ} 24' 00''$  تا  $36^{\circ} 28' 02''$  طول خاوری و  $36^{\circ} 30' 17''$  عرض شمالی قرار دارد. این رخداد معدنی در جنوب - جنوب‌باختر کانسار روی - سرب انگوران (Daliran et al., 1999, 2013; Gilg et al., 2006; Boni et al., 2007) واقع شده و بخشی از پهنه کانه‌دار تکاب - تخت‌سلیمان - انگوران (Daliran et al., 2002; Daliran, 2008) می‌باشد. از دیدگاه فلززایی، این پهنه کانه‌دار یکی از مناطق مهم فلززایی در ایران محسوب می‌شود که علاوه بر انگوران، میزبان انواع مهمی از کانسارهای دیگر مانند طلا-آرسنیک زرشوران (Mehrabi et al., 2002; Daliran et al., 2000; Asadi et al., 1999)، طلا-آنتیموان آغ‌دره (Daliran, 2008)، طلا-آرسنیک-آنتیموان عربشاه (Heidari et al., 2017; Najafzadeh et al., 2017)

Mohammadi Niaei et al., 2017)، سرب و روی آی‌قلعه‌سی (Mohammadi et al., 2015)، سرب-روی-طلای آرپاچای (Talebi et al., 2017)، مس-طلای آغ‌اتاق (Rahmati et al., 2017) کانی‌سازی‌های متعدد آهن مانند میانج (Pourmohamad et al., 2019)، گورگور (Mohamadi et al., 2014)، حلب ۱ و ۲ (Feridooni et al., 2016; Tofighi, 2017; Tofighi et al., 2019)، کوسج (Ghaderi, 2019; Ghaderi et al., 2020)، علم‌کندی (Nouri et al., 2017, in press) و کورکورا (Maanijou and Salemi, 2014) می‌باشد.

رخداد معدنی طلای حلب یکی از کانه‌زایی‌های تشکیل‌شده در پهنه کانه‌دار تکاب - تخت‌سلیمان - انگوران می‌باشد که در راستای فعالیت‌های اکتشافی انجام‌شده بر روی کانه‌زایی‌های روی-سرب و آهن حلب (Karbasi, 2015) و مطالعات اکتشافی پهنه انگوران توسط IMIDRO (۲۰۱۷) شناسایی شده است. هرچند اطلاعات سودمندی شامل نقشه‌های زمین‌شناسی و محتوای طلای نمونه‌های

سیرجان واقع شده و بخشی از ورقه ۱:۱۰۰,۰۰۰ زمین‌شناسی تکاب (Fonoudi and Hariri, 1999) می‌باشد. براساس مطالعات صحرایی انجام‌شده در قالب تهیه نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۲۰,۰۰۰ منطقه حلب (شکل ۱)، واحدهای سنگی موجود در این رخداد معدنی شامل تناوب شیست‌های مافیک، شیست‌های پلیتی و شیست‌های فلسیک با میان‌لایه‌هایی از ریولیت میلونیتی، کالک شیست، کوارتزیت، مرمر و پیروکسنیت می‌باشد (شکل ۲a). در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ تکاب (Fonoudi and Hariri, 1999)، این مجموعه دگرگونی به پرکامبرین منتسب شده و محصول دگرگونی (رخساره شیست سبز تا آمفیبولیت) سازند کهر در نظر گرفته شده است. روند عمومی لایه‌بندی و برگ‌وارگی واحدهای سنگی منطقه عمدتاً شمال‌باختر - جنوب‌خاور با شیب به سمت شمال‌خاور است. دولومیت‌های مرمری‌شده موسوم به مرمرهای جان‌گوتاران با مرز تراستی بر روی توالی واحدهای دگرگونی یادشده قرار گرفته‌اند (شکل ۲b).

**شیست‌های مافیک:** این گروه سنگی از مهم‌ترین واحدهای شیستی موجود در منطقه و میزبان رخداد معدنی طلای حلب می‌باشند. براساس مطالعات سنگ‌نگاری، شیست‌های مافیک شامل انواع هورنبلند شیست، اکتینولیت شیست و اپیدوت بیوتیت اکتینولیت شیست می‌باشند. نتایج مطالعات زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد سنگ مادر شیست‌های مافیک از نوع بازالت، آندزیت بازالتی و تراکی بازالت است (Nafisi, 2018). هورنبلند شیست‌ها عمدتاً از هورنبلند به همراه مقداری کوارتز، فلدسپار، اپیدوت و کانی کدر تشکیل شده و فابریک نماتوبلاستیک و پورفایرولاستیک نشان می‌دهند. برخی هورنبلندها با چندرنگی سبز تا متمایل به آبی در نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای مشخص هستند. این گروه هورنبلندها به دو صورت بلورهای درشت (تا ۳ میلی‌متر) حاوی ادخال‌های کوارتز (شکل ۳a) و بلورهای کوچک باریک و کشیده در راستای برگ‌وارگی سنگ مشاهده می‌شوند (شکل ۳b). ادخال‌های کوارتز دارای جهت‌یابی متفاوت با برگ‌وارگی غالب سنگ هستند. این موضوع نشان می‌دهد که بلورهای درشت حاوی ادخال، طی فاز اول دگرگونی و دگرشکلی منطقه تشکیل شده و بلورهای بدون ادخال موجود در راستای برگ‌وارگی فعلی سنگ، مربوط به فاز دوم دگرگونی و دگرشکلی هستند. هورنبلندهایی که در مرحله اول دگرگونی و دگرشکلی به‌وجود آمده‌اند، به‌صورت مایل نسبت به برگ‌وارگی سنگ قرار گرفته‌اند (شکل ۳a). هورنبلندهای با چندرنگی سبز کمرنگ تا پررنگ در نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای نیز دارای ۲ نسل شامل بلورهای درشت حاوی ادخال‌های کوارتز و بلورهای کوچک‌تر هم‌راستا با برگ‌وارگی مشاهده می‌شوند (شکل ۳c). این گروه از هورنبلندها نیز مربوط به فازهای اول (بلورهای درشت حاوی ادخال‌های کوارتز) و دوم (بلورهای موجود در راستای برگ‌وارگی فعلی سنگ) دگرگونی می‌باشند. کوارتز به‌صورت بلورهای کوچک حاوی خاموشی موجی در فضای بین هورنبلندها حضور دارد. در مجاورت با هورنبلندهای درشت نسل اول، بلورهای کوارتز با بافت سایه فشاری تشکیل شده است.

سطحی از عملیات اکتشافی اولیه در محدوده رخداد معدنی طلای حلب به‌دست آمده است (IMIDRO, 2015; Karbasi, 2015)، اما در این مطالعات، به کانی‌شناسی، ساخت و بافت، نوع کانه‌زایی و ساز و کار تشکیل آن توجه چندانی نشده است. در پژوهش حاضر، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمیایی این رخداد معدنی مورد بررسی قرار گرفته و تیپ کانه‌زایی و خاستگاه آن تعیین شده است. این نتایج می‌تواند اطلاعات سودمندی را جهت درک منشأ و شناخت عوامل کنترل‌کننده سایر کانه‌زایی‌های طلا در پهنه کانه‌دار تکاب - تخت‌سلیمان - انگوران ارائه داده و برای اکتشاف ذخایر جدید سودمند باشد.

## روش مطالعه

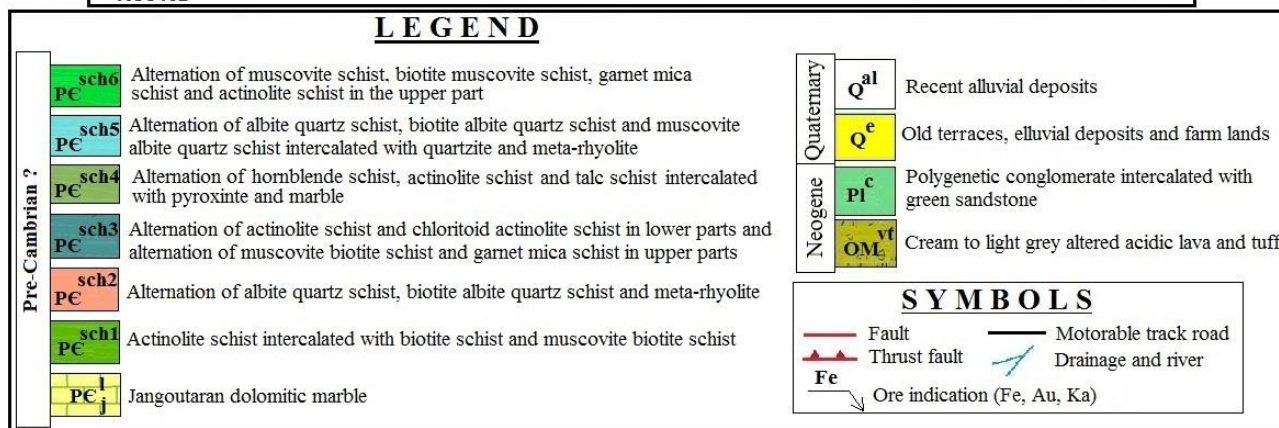
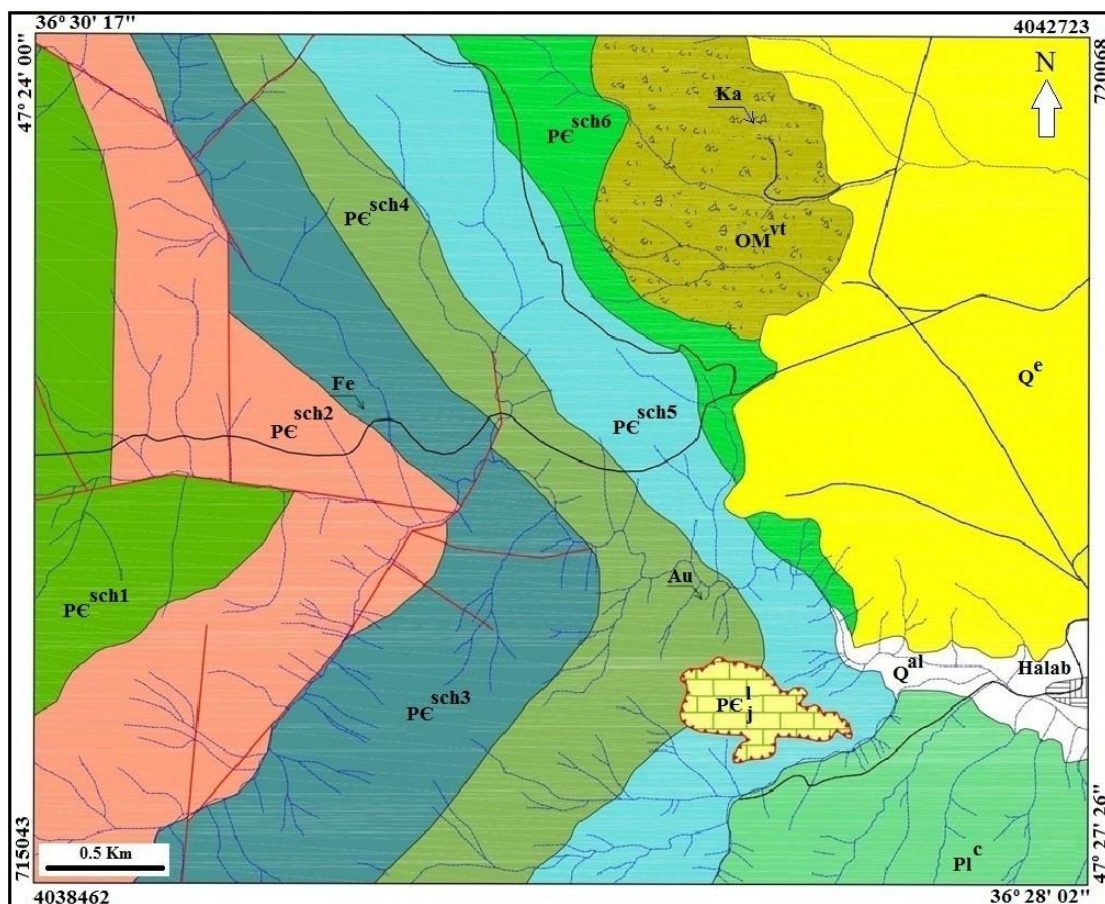
این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی می‌باشد. مطالعات صحرایی شامل شناسایی واحدهای سنگی و رخنمون‌های کانی‌سازی و نمونه‌گیری از آنها برای مطالعات آزمایشگاهی بوده است. در این راستا، علاوه بر انجام مطالعات صحرایی و تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۰,۰۰۰، بیش از ۶۰ نمونه برداشت گردید. از این بین، ۱۲ مقطع نازک و ۱۴ مقطع نازک - صیقلی برای مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت، تهیه و مورد مطالعه قرار گرفت. سپس به‌منظور انجام مطالعات زمین‌شیمیایی، تعداد ۵ نمونه کانه‌دار و ۱ نمونه سنگ میزبان فاقد کانه‌زایی برای بررسی تغییرات عناصر کمیاب و کمیاب خاکی و عناصر معدنی به روش ICP-MS و اندازه‌گیری طلا به روش Fire Assay در آزمایشگاه مرکز پژوهش‌های کاربردی علوم زمین در کرج آنالیز شد. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها توسط خردکننده فولادی تا اندازه حدود ۵ مش خردایش شده و سپس توسط آسیاب تنگستن کاربید به مدت ۲ دقیقه تا اندازه حدود ۲۰۰ مش پودر شدند. پس از پودر کردن هر نمونه، ماسه‌های کوارتزی آسیاب گردید تا میزان آلودگی به حداقل برسد. سپس، میزان ۲۰ گرم از پودر نمونه‌ها برای تعیین میزان عناصر کمیاب و کمیاب خاکی به آزمایشگاه ارسال و آنالیز گردید. برای تعیین میزان عناصر کمیاب خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه در لیتیم متابرات/تترابرات ذوب و سپس در اسید نیتریک حل گردید. میزان دقت برای عناصر کمیاب و کمیاب خاکی بین ۳ تا ۵ درصد بوده است. در روش Fire Assay، برای اندازه‌گیری میزان طلا، به‌صورت جداگانه حدود ۳۰ گرم از هر نمونه تا دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب گردید تا طلا از سرباره جدا شده و جذب ملغمه سربی شود. در مرحله بعد، سرب حذف و طلا و نقره در ملغمه نقره‌ای جدا شدند. در پایان، ملغمه نقره‌ای با استفاده از تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه) محلول‌سازی شده و میزان طلا به روش ICP-MS قرائت گردید.

## بحث و بررسی

### زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی

در تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌ساختی - رسوبی ایران (Stöcklin, 1968)، رخداد معدنی طلای حلب در بخش شمالی پهنه سندانج -





شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه حلب.

Fig. 1. Geological map of the Halab area.

اکتینولیت شیست‌ها از اکتینولیت، پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار و کوارتز همراه با مقداری بیوتیت، کلینوپیروکسن، اسفن، کلریت، سربیسیت، کلسیت و کانی‌های کدر تشکیل شده و دارای فابریک‌های نماتوبلاستیک و گرانوبلاستیک می‌باشند. برگ‌وارگی در این سنگ‌ها معمولاً ضعیف است. اکتینولیت کانی عمده (فراوانی حدود ۵۰-۴۰ درصد) در اکتینولیت شیست‌ها بوده و ابعاد آن گاه تا ۵ میلی‌متر می‌رسد (شکل

فلدسپارها با فراوانی کمتر در همراهی با کوارتز مشاهده می‌شوند. فلدسپارها دارای منطقه‌بندی شیمیایی در بخش‌های مرکزی و حاشیه‌ای می‌باشند. اپیدوت (با فراوانی حدود ۲ درصد) به صورت بلورهای کوچک بی‌شکل و با برجستگی زیاد در فضای بین هورنبلندها مشاهده می‌شود. کانی‌های کدر ریزبلور با فراوانی حدود ۲ درصد در راستای برگ‌وارگی سنگ و در همراهی با بخش‌های غنی از هورنبلند حضور دارند.

برگ‌وارگی در این سنگ‌ها حاصل جهت‌یافتگی کانی‌های ورقه‌ای بیوتیت، مسکوویت و کلریت است. گارنت‌ها به‌صورت بلورهای درشت (تا ۲ میلی‌متر) ایزوتروپ و با فراوانی کمتر از ۵ درصد حضور داشته و حاوی ادخال‌هایی از کوارتز و آلکالی فلدسپار هستند (شکل ۳g). جهت‌یابی ادخال‌های موجود در گارنت‌ها با برگ‌وارگی سنگ هم‌راستا نیست که این امر حاکی از تشکیل پورفیروبلاست گارنت قبل از دگرگونی و دگرشکلی سنگ می‌باشد. دورزدن برگ‌وارگی سنگ اطراف بلورهای گارنت نیز این مطلب را تأیید می‌کند. در برخی نقاط، بلورهای گارنت فابریک انکلوزیونی S شکل دارند که بیانگر تشکیل گارنت هم‌زمان با دگرگونی و دگرشکلی می‌باشد. رشد کوارتز در حاشیه بلورهای درشت گارنت سبب تشکیل فابریک سایه فشاری در این سنگ‌ها شده است. بیوتیت با فراوانی ۲۰ تا ۲۵ درصد و مسکوویت با فراوانی حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد، برگ‌وارگی سنگ را به‌وجود آورده‌اند. برخی از بلورهای بیوتیت فابریک میکاماهی نشان می‌دهند (شکل ۳h). بلورهای مسکوویت، دارای منطقه‌بندی شیمیایی شامل بی‌رفرنزانس نارنجی و زرد در بخش‌های حاشیه‌ای و رنگ آبی در مرکز هستند. کوارتز به‌صورت بلورهای بی‌شکل در ابعاد کمتر از ۰/۲ میلی‌متر با فراوانی حدود ۳۰ درصد در این سنگ‌ها حضور دارد. ویژگی بارز کوارتزها، خاموشی موجی و مرزهای مضرسی است که نشان‌دهنده عدم تعادل ترمودینامیکی این کانی با محیط اطراف تحت تأثیر تنش و فشارهای دینامیکی است (Yardley et al., 1997). مجموعه کوارتز و آلکالی فلدسپار به‌صورت باندهای کوارتز - فلدسپاری به موازات برگ‌وارگی سنگ مشاهده می‌شوند. در برخی نقاط، تجمعات کوارتز - فلدسپاری حالت عدسی شکل دارند.

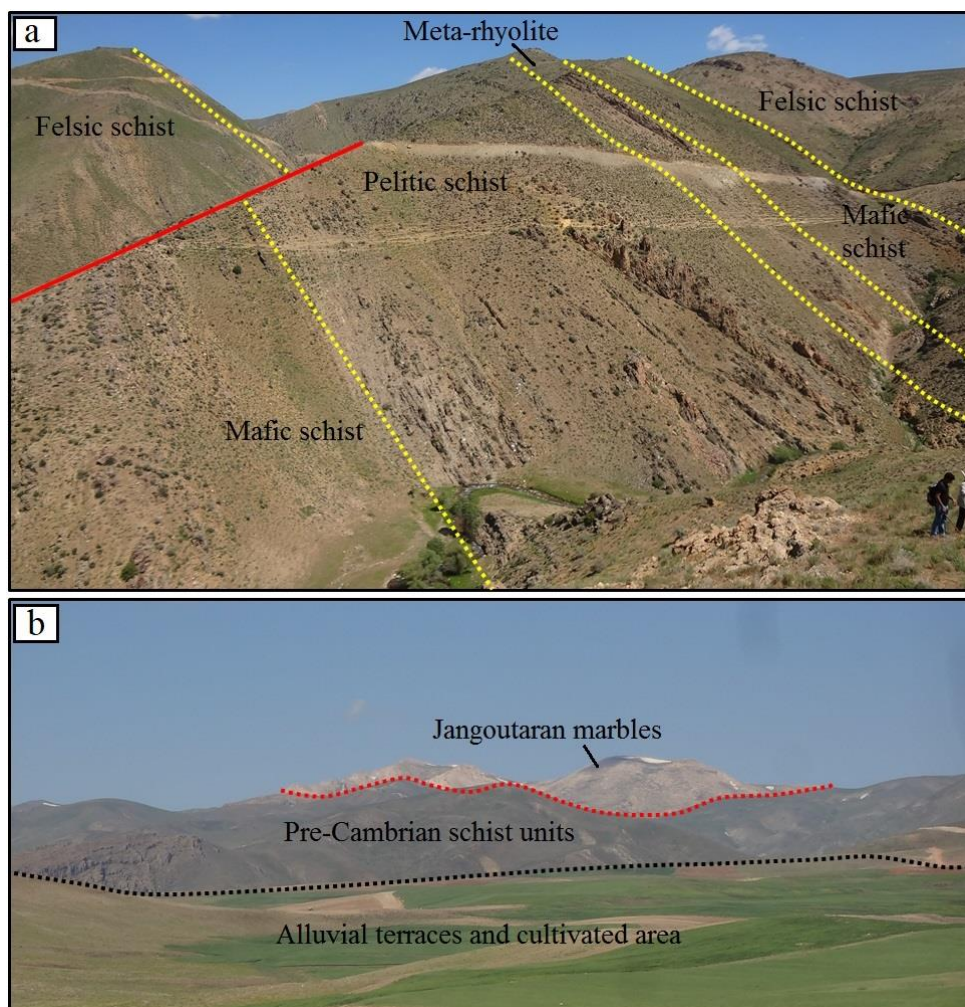
مسکوویت بیوتیت شیست‌ها از باندها و عدسی‌های کوارتز - فلدسپاری و باندهای غنی از کانی‌های ورقه‌ای بیوتیت و مسکوویت تشکیل شده‌اند (شکل ۳i). این سنگ‌ها دارای فابریک‌های لپیدوبلاستیک و گرانوبلاستیک بوده و متشکل از کانی‌های بیوتیت، مسکوویت، کوارتز و آلکالی فلدسپار به همراه مقادیری کلریت، پلاژیوکلاز، گارنت، اسفن و کانی‌های کدر هستند. بیوتیت و مسکوویت (در مجموع با فراوانی حدود ۴۵ درصد) کانی‌های غالب در این سنگ‌ها هستند که به‌صورت بلورهای ورقه‌ای (ابعاد تا ۱/۵ میلی‌متر) حضور دارند. کوارتز و فلدسپار به‌صورت باندها و عدسی‌های کوارتز - فلدسپاری حضور داشته و ابعاد آنها عمدتاً کمتر از ۰/۳ میلی‌متر است. فراوانی این دو کانی در مجموع حدود ۵۵ درصد می‌باشد. در برخی از نمونه‌ها، پلاژیوکلاز با ماکل نوری نیز قابل مشاهده است. اسفن به‌صورت بلورهای شکل‌دار در برخی نمونه‌ها با فراوانی محدود وجود دارد. کانی‌های کدر ریز در همراهی با بخش‌های میکائی با فراوانی کمتر از ۲ درصد حضور دارند.

d۳). در داخل برخی از اکتینولیت‌ها، بقایایی از کلینوپیروکسن‌های اولیه مشاهده می‌شود (شکل ۳e) که این امر نشان می‌دهد اکتینولیت محصول دگرگونی پسروده کلینوپیروکسن بوده است. برخی بلورهای اکتینولیت حالت رشته‌ای نشان می‌دهند. پلاژیوکلازها (با فراوانی حدود ۲۰ درصد) عموماً به سرسیت و گاه کلسیت دگرسان شده‌اند. این کانی‌ها معمولاً به‌صورت درشت‌بلور بوده و منطقه‌بندی شیمیایی نشان می‌دهند به‌صورتی که در مرکز رنگ تداخلی خاکستری و در حاشیه به رنگ سفید دیده می‌شوند. کوارتز و آلکالی فلدسپار به‌صورت بلورهای بی‌شکل و عمدتاً با خاموشی موجی و با بافت گرانوبلاستیک حضور دارند. بیوتیت با فراوانی حداکثر ۵ درصد در جهت برگ‌وارگی سنگ مشاهده شده و عموماً به کلریت دگرسان شده است. بلورهای بی‌شکل اسفن با فراوانی کمتر از ۱ درصد به‌صورت پراکنده و با برجستگی بالا در این سنگ‌ها دیده می‌شوند.

اپیدوت بیوتیت اکتینولیت شیست‌ها از اکتینولیت، پلاژیوکلاز، بیوتیت، اپیدوت و کوارتز به همراه کلریت و کانی‌های کدر تشکیل شده و فابریک غالب در آنها لپیدوبلاستیک و نامتوبلاستیک است. اکتینولیت به‌صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار و گاه رشته‌ای حضور داشته و همراه با بیوتیت، برگ‌وارگی سنگ را تشکیل داده‌اند (شکل ۳f). فراوانی اکتینولیت حدود ۳۰ درصد است. بیوتیت‌ها به‌صورت بلورهای ورقه‌ای کشیده در راستای برگ‌وارگی سنگ حضور دارند. فراوانی بیوتیت در حدود ۲۰ درصد بوده و ابعاد ورقه‌های آن گاه تا ۳ میلی‌متر می‌رسد. بیوتیت‌ها معمولاً به کلریت دگرسان شده‌اند. اپیدوت‌ها (با فراوانی حدود ۱۰ درصد) در راستای برگ‌وارگی سنگ و در بین بیوتیت‌ها و اکتینولیت‌ها به‌صورت بلورهای کوچک با برجستگی زیاد حضور دارند (شکل ۳g). پلاژیوکلازها با فراوانی حدود ۳۰ درصد، دیگر کانی عمده است که به‌صورت باندهای کوارتز - فلدسپاری در راستای برگ‌وارگی سنگ حضور دارند. این کانی‌ها به‌صورت درشت‌بلور بوده و منطقه‌بندی شیمیایی شامل رنگ تداخلی خاکستری در مرکز و رنگ سفید و روشن‌تر در حاشیه نشان می‌دهند. کوارتز به‌صورت بلورهای بی‌شکل با خاموشی موجی حضور دارد. فراوانی کوارتز تا ۱۰ درصد می‌رسد. کانی‌های کدر (با فراوانی حدود یک درصد) به‌صورت بلورهای بی‌شکل هم‌راستا با برگ‌وارگی سنگ مشاهده می‌شوند.

**شیست‌های پلیتی:** براساس مطالعات سنگ‌نگاری، این مجموعه سنگی متشکل از گارنت مسکوویت بیوتیت شیست و مسکوویت بیوتیت شیست می‌باشند. گارنت مسکوویت بیوتیت شیست‌ها از گارنت، بیوتیت، مسکوویت، کوارتز و آلکالی فلدسپار تشکیل شده و کلریت، زیرکن و کانی‌های کدر به‌عنوان کانی‌های فرعی در آنها حضور دارند. این سنگ‌ها فابریک‌های لپیدوبلاستیک، پوئی کیلوبلاستیک و پورفیروبلاستیک داشته و بخش‌های کوارتز - فلدسپاری آنها دارای فابریک گرانوبلاستیک است.





شکل ۲- (a) نمایی از توالی شیست‌های مافیک، پلیتی و فلسیک در منطقه حلب (دید به سمت شمال) و (b) نمایی از توالی شیستی (پراکامبرین) همراه با مرم‌های جان‌گوتاران به صورت تراست شده بر روی آنها در منطقه حلب (دید به سمت باختر).

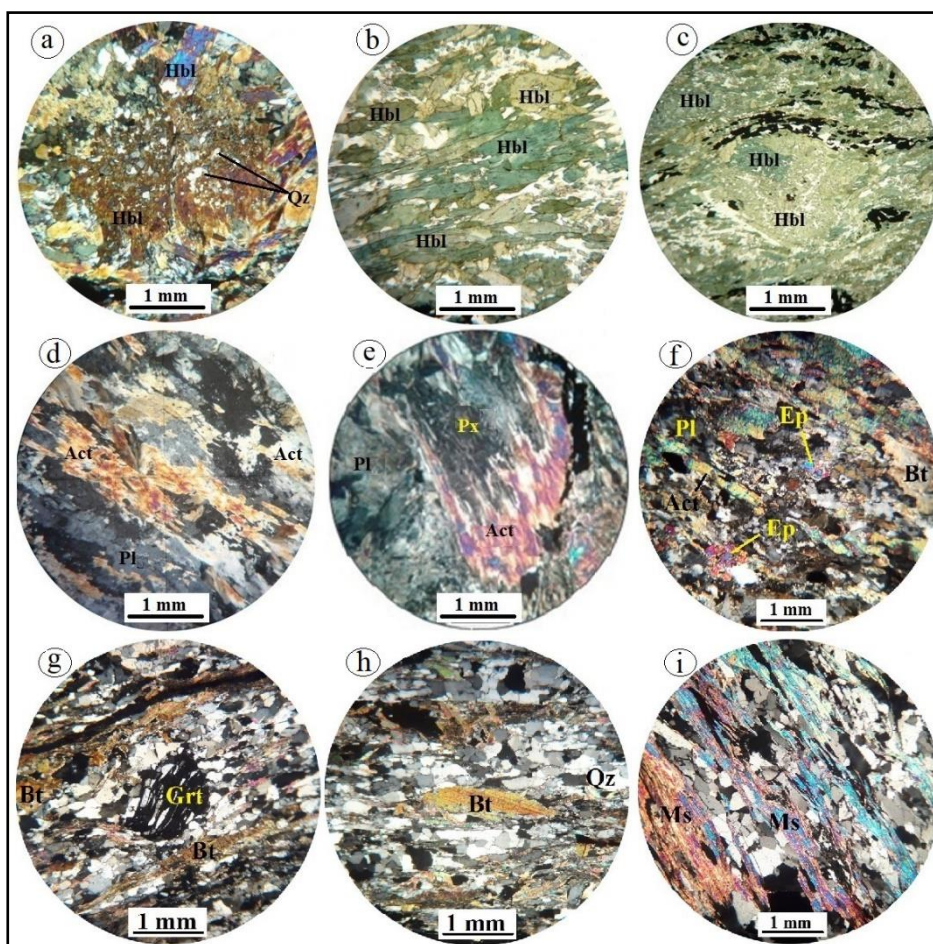
Fig. 2. (a) A view from the alternation of mafic, pelitic and acidic schists in the Halab area (view to the north), and (b) A view from schist units (Pre-Cambrian) thrust by Jangoutaran marbles in the Halab area (view to the west).

غالب تشکیل دهنده این سنگ‌ها می‌باشند که دارای مرزهای مضرسی و خاموشی موجی هستند. فراوانی این دو کانی به بیش از ۸۰ درصد می‌رسد. پلاژیوکلاز با فراوانی کمتر از ۱۰ درصد در بین کوارتز و آلکالی فلدسپارها مشاهده می‌شود. این کانی‌ها عمدتاً به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند (شکل ۴b).

بیوتیت آلبیت کوارتز شیست‌ها از کانی‌های کوارتز، آلکالی فلدسپار، بیوتیت، پلاژیوکلاز، کلریت و کانی‌های کدر تشکیل شده و دارای برگ‌وارگی مشخص متشکل از لامینه‌های کانی‌های بیوتیت و کلریت و باندهای کوارتز - فلدسپار می‌باشند (شکل ۴c). فابریک این سنگ‌ها لپیدوبلاستیک و گرانوبلاستیک است. بیوتیت با فراوانی حدود ۲۰ درصد، به صورت بلورهای ورقه‌ای باریک و کشیده حضور دارد.

**شیست‌های فلسیک:** براساس مطالعات سنگ‌نگاری، شیست‌های فلسیک متشکل از آلبیت کوارتز شیست، بیوتیت آلبیت کوارتز شیست و بیوتیت آمفیبول آلبیت کوارتز شیست می‌باشند. نتایج مطالعات زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد این مجموعه سنگی محصول دگرگونی توفها و گدازه‌های ریولیتی می‌باشند (Nafisi, 2018). آلبیت کوارتز شیست‌ها دارای برگ‌وارگی حاصل از توالی باندهای کوارتز - فلدسپاری سالم با بخش‌های خرد شده می‌باشند که بخش‌های خرد شده به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند (شکل ۴a). کانی‌شناسی این سنگ‌ها شامل کوارتز، آلکالی فلدسپار و پلاژیوکلاز به همراه کانی‌های فرعی هیدروکسیدهای آهن و کانی‌های کدر بوده و فابریک‌های گرانوبلاستیک و کاتاکلاستیک نشان می‌دهند. کوارتز و آلکالی فلدسپار (آلبیت) کانی





شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی (b و c در نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای PPL و بقیه در نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از واحدهای سنگی در منطقه حلب؛ (a) بلور هورنبلند مربوط به فاز اول دگرگونی با فابریک پوئیکلوبلاستیک و متقاطع با برگ‌وارگی سنگ و دارای ادخال‌های کوارتز در هورنبلند شلیست‌ها، (b) بلورهای باریک و کشیده هورنبلند مربوط به فاز دوم دگرگونی در راستای برگ‌وارگی در هورنبلند شلیست‌ها، (c) درشت‌بلور هورنبلند مربوط به فاز اول دگرگونی در هورنبلند شلیست‌ها که برگ‌وارگی بلورهای کوچک هورنبلند مربوط به فاز دوم دگرگونی آنرا دور زده است، (d) بلورهای اکتینولیت در راستای برگ‌وارگی در اکتینولیت شلیست‌ها، (e) بلور پیروکسن در اکتینولیت شلیست‌ها که از حاشیه‌ها در حال تبدیل شدن به اکتینولیت می‌باشد، (f) بلورهای اپیدوت و بیوتیت در راستای برگ‌وارگی در اپیدوت بیوتیت اکتینولیت شلیست‌ها. اپیدوت در بین بلورهای اکتینولیت و بیوتیت دیده می‌شوند، (g) پورفیروبلاست گارنت حاوی ادخال‌های کوارتز در گارنت مسکوویت بیوتیت شلیست‌ها. رشد کوارتزها در سایه وانتشی گارنت نیز در تصویر دیده می‌شود، (h) بیوتیت با فابریک میکاماهی در گارنت مسکوویت بیوتیت شلیست‌ها و (i) تناوب باندهای کوارتز- فلدسپاری و میکایی در مسکوویت بیوتیت شلیست‌ها. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. Act: اکتینولیت، Bt: بیوتیت، Ep: اپیدوت، Grt: گارنت، Hbl: هورنبلند، Ms: مسکوویت، Pl: پلاژیوکلاز، Px: پیروکسن، Qz: کوارتز).

Fig. 3. Photomicrographs (transmitted XPL, b and c in PPL) of rock units in the Halab area; (a) Hornblende crystal with poikiloblastic fabric and quartz inclusions crosscutting the foliation of hornblende schist which was formed during the first phase of metamorphism, (b) Thin crystals of hornblende parallel to foliation of hornblende schist which were formed during the second phase of metamorphism, (c) Foliation of fine-grained hornblendes of the second phase of metamorphism around the coarse-grained hornblende of the first phase of metamorphism in hornblende schist, (d) Actinolite crystals along the foliation of actinolite schists, (e) Pyroxene crystal which is replacing by actinolite from margins in actinolite schist, (f) Actinolite along with biotite forming the foliation of epidote biotite actinolite schist. Epidote is observed between actinolite and biotite minerals, (g) Garnet porphyroblast with quartz inclusions in garnet biotite muscovite schist. Pressure shadow of quartz around the garnet is also present, (h) Biotite with mica fish fabric in garnet biotite muscovite schist and (i) Alternation of quartz-feldspar and mica bands in muscovite biotite schist. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Act: actinolite, Bt: biotite, Ep: epidote, Grt: garnet, Hbl: hornblende, Ms: muscovite, Pl: plagioclase, Px: pyroxene, Qz: quartz).

**پیروکسنیت:** پیروکسنیت‌ها به صورت یک باند مشخص به پهنای حدود ۳ متر در بین اکتینولیت شیت‌ها و در مجاورت با بخش کانه‌زایی در رخداد معدنی طلای حلب رخمون دارند. این سنگ‌ها تماماً از پیروکسن تشکیل شده و کانی‌های کدر فضای بین آنها را پر کرده‌اند (شکل ۴g). پیروکسن‌ها عمدتاً از نوع کلینوپيروکسن با مقدار کمی ارتوپيروکسن می‌باشند. ابعاد طولی پیروکسن‌ها تا ۳ میلی‌متر می‌رسد. برگ‌وارگی ضعیفی در نتیجه جهت‌یابی پیروکسن‌ها در مقاطع میکروسکوپی قابل مشاهده است. کانی‌های کدر (عمدتاً از نوع پیریت همراه با مقدار کمی کالکوپیریت و مگنتیت) بیشتر به صورت پُرکننده فضای خالی بین پیروکسن‌ها حضور داشته و گاه به حالت رگچه‌ای و قطع‌کننده برگ‌وارگی سنگ نیز دیده می‌شوند.

**مرمر:** مرمرها عمدتاً از کلسیت (فراوانی حدود ۹۵ درصد) تشکیل شده و دارای برگ‌وارگی ضعیف و فابریک گرانوبلاستیک می‌باشند (شکل ۱۴h). ابعاد بلورهای کلسیت تا ۱ میلی‌متر می‌رسد. در برخی از نمونه‌ها، باندها و تجمعات عدسی‌شکل از کانی‌های ورقه‌ای مسکوویت نیز در راستای برگ‌وارگی سنگ دیده می‌شود. ابعاد بلورهای مسکوویت تا ۲ میلی‌متر می‌رسد. فراوانی مسکوویت‌ها کمتر از ۳ درصد می‌باشد. کوارتزهای کوچک با خاموشی موجهی به مقدار محدود در فضای بین کلسیت‌ها پراکنده بوده و عمدتاً در همراهی با بخش‌های حاوی مسکوویت دیده می‌شوند.

**کوارتزیت:** این سنگ‌ها عمدتاً متشکل از کوارتز همراه با مقداری آلکالی فلدسپار و مسکوویت بوده و برگ‌وارگی ضعیفی را نشان می‌دهند (شکل ۱۴i). کوارتزیت‌ها دارای فابریک عمده گرانوبلاستیک در بخش‌های کوارتز - فلدسپاری بوده و در محل حضور مسکوویت‌ها، فابریک لپیدوبلاستیک نشان می‌دهند. کوارتز و آلکالی فلدسپار به صورت بلورهای بی‌شکل با مرزهای مضرسی و گاه با خاموشی موجهی می‌باشند. ابعاد کوارتز و آلکالی فلدسپارها کمتر از ۰/۵ میلی‌متر است. مسکوویت به صورت ورقه‌های باریک و کشیده (با طول کمتر از ۱/۵ میلی‌متر)، با فراوانی حدود ۵ درصد حضور دارد. مقدار کمی کانی کدر به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در فضای بین کوارتز - فلدسپارها مشاهده می‌شود.

به‌طور کلی، با توجه به توالی شیت‌های مافیک، فلسیک و پلیتی در منطقه حلب می‌توان گفت که در حوضه تشکیل این سنگ‌ها، فعالیت ماگمایی دوگانه (اسیدی و بازیک) حاکم بوده و فعالیت‌های ماگمایی در یک حوضه رسوبی به صورت متناوب انجام شده است.

### کانه‌زایی و دگرسانی

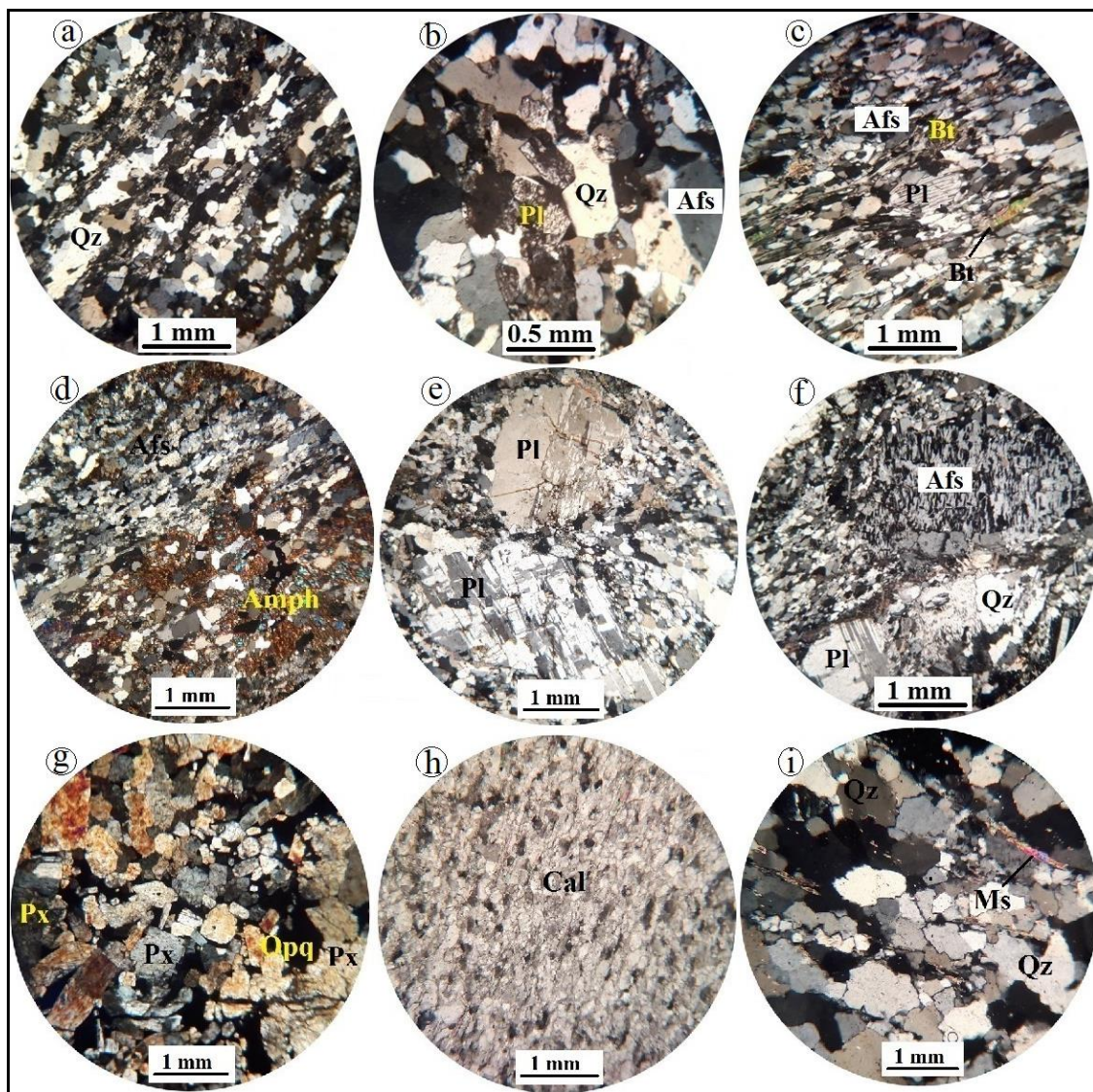
براساس مطالعات صحرایی، کانه‌زایی طلا در رخداد معدنی حلب در پهنه‌ای به درازای ۲۰۰ متر و پهنای ۵۰ متر به صورت کانه‌زایی سولفیدی طلا‌دار درون توالی شیت‌های مافیک رخ داده است (شکل ۱۵d). روند عمومی پهنه کانه‌دار شمال‌خاور - جنوب‌باختر با شیب حدود ۸۰ درجه به سمت جنوب‌خاور می‌باشد.

طول بلورهای بیوتیت تا ۱/۵ میلی‌متر می‌رسد. کوارتز با فراوانی حدود ۴۵ درصد، فراوان‌ترین کانی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها است که به صورت بلورهای بی‌شکل و گاه با حالت کشیده در راستای برگ‌وارگی سنگ ردیف شده‌اند. کوارتزها عمدتاً دارای خاموشی موجهی هستند. آلکالی فلدسپار با فراوانی حدود ۳۰ درصد، دیگر کانی غالب سنگ است که همراه با کوارتز، بافت گرانوبلاستیک سنگ را به وجود آورده‌اند. پلاژیوکلاز با ماکل‌های نواری مشخص، با فراوانی کمتر از ۵ درصد در همراهی با کوارتز - فلدسپار حضور دارد (شکل ۴c). کلریت به صورت بلورهای ورقه‌ای نسبتاً درشت (دارای طول بیشینه ۳ میلی‌متر) در همراهی با بیوتیت‌ها و در امتداد برگ‌وارگی سنگ حضور دارند. فراوانی کلریت‌ها کمتر از ۲ درصد است.

بیوتیت آمفیبول آلیت کوارتز شیت‌ها دارای برگ‌وارگی مشخص حاصل از باندهای کوارتز - فلدسپار و آمفیبول به همراه بیوتیت هستند (شکل ۴d). کانی‌شناسی این سنگ‌ها شامل کوارتز، آلکالی فلدسپار، آمفیبول و بیوتیت به همراه کانی‌های فرعی اسفن، مسکوویت و کانی‌های کدر بوده و فابریک گرانوبلاستیک، لپیدوبلاستیک و نماتوبلاستیک را نشان می‌دهند. آمفیبول‌ها به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار و گاه رشته‌ای حضور داشته و برگ‌وارگی سنگ را در همراهی با بیوتیت تشکیل داده‌اند. فراوانی آمفیبول به حدود ۲۰ درصد می‌رسد. بیوتیت دیگر کانی این سنگ‌ها است که با فراوانی محدود به صورت بلورهای ورقه‌ای کشیده در راستای برگ‌وارگی سنگ حضور دارند. بیوتیت‌ها اغلب به کلریت دگرسان شده‌اند. کوارتز و آلکالی فلدسپار با فراوانی حدود ۷۵ درصد، کانی‌های عمده بیوتیت آمفیبول آلیت کوارتز شیت‌ها را تشکیل می‌دهند. آلکالی فلدسپارها با شدت‌های ضعیف به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند. در برخی نقاط، تجمعات کوارتز - فلدسپار به صورت عدسی‌شکل در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود. اسفن به صورت بلورهای بی‌شکل با برجستگی زیاد، در راستای برگ‌وارگی سنگ مشاهده می‌شود.

**ریولیت میلیونیتی:** این سنگ‌ها متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و آلکالی فلدسپار در زمینه کوارتز - فلدسپاری ریزبلور بوده و فابریک پورفیروکلاستیک و کاتاکلاستیک نشان می‌دهند (شکل ۴e و ۴f). بلورهای درشت پلاژیوکلاز با ماکل‌های دوتایی و نواری مشخص می‌شوند که عمدتاً در راستای برگ‌وارگی سنگ قرار گرفته‌اند. برخی از بلورهای پلاژیوکلاز دارای ماکل‌های خمیده و ناقص هستند (شکل ۴f). وجود این نوع ماکل در پلاژیوکلازها می‌تواند بیانگر عملکرد تنش در حین تبلور و یا بعد از تبلور این کانی‌ها باشد (Shelley, 1993). ابعاد بلورهای پلاژیوکلاز تا ۴ میلی‌متر می‌رسد. آلکالی فلدسپارها نیز به صورت درشت‌بلور حضور داشته و آثار بافت پرتیتی اولیه در آنها دیده می‌شود (شکل ۴f). ابعاد بلورهای آلکالی فلدسپار به حدود ۲/۵ میلی‌متر می‌رسد. کوارتز عمدتاً در زمینه دانه‌ریز سنگ در همراهی با آلکالی فلدسپار به صورت بلورهای بی‌شکل حضور داشته و بیشتر خاموشی موجهی نشان می‌دهد.





شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از واحدهای سنگی در منطقه حلب؛ (a) تناوب باندهای کوارتز- فلدسپار و بخش‌های آرژیلی‌شده در آلبیت کوارتز شیست‌ها، (b) بلورهای درشت پلاژیوکلاز با دگرسانی به کانی‌های رسی در آلبیت کوارتز شیست‌ها، (c) ورقه‌های کشیده بیوتیت در زمینه‌ای از کوارتز- فلدسپار دارای جهت‌یافتگی در بیوتیت آلبیت کوارتز شیست‌ها، (d) برگ‌وارگی حاصل از باندهای آمفیبول و کوارتز- فلدسپار در بیوتیت آمفیبول آلبیت کوارتز شیست‌ها، (e) فابریک پورفیروکلاستیک و کاتاکلاستیک در ریولیت میلونیتی، (f) درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز با ماکل خمیده و آلکالی فلدسپار با بافت پرتیتی در ریولیت میلونیتی، (g) بلورهای شکل‌دار کلینوپیروکسن به همراه کانی‌های کدر دانه‌پراکنده در پیروکسنیت، (h) فابریک گرانوبلاستیک با برگ‌وارگی ضعیف در مرمر و (i) گسترش برگ‌وارگی ضعیف در کوارتزیت‌ها. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. Afs: آلکالی فلدسپار، Amph: آمفیبول، Bt: بیوتیت، Cal: کلسیت، Ms: مسکوویت، Opq: مسکوویت، Pl: پلاژیوکلاز، Px: پیروکسن، Qz: کوارتز.

Fig. 4. Photomicrographs (transmitted cross polarized-light, XPL) of rock units in the Halab area; (a) Alternation of quartz-feldspatic bands and argillized portions in albite quartz schists, (b) Plagioclase crystals with argillic alteration in albite quartz schists, (c) Stretched crystals of biotite within the oriented quartz-feldspar matrix in biotite albite quartz schist, (d) Schistosity of amphibole and quartz-feldspatic bands in biotite amphibole albite quartz schist, (e) Porphyroclastic and cataclastic fabrics in mylonitic rhyolite, (f) Coarse-grained plagioclase and alkali feldspar with curved twin and perthitic texture, respectively, in mylonitic rhyolite, (g) Euhedral clinopyroxene crystals along with disseminated opaque minerals in pyroxenite, (h) Granoblastic fabric along with weak schistosity in marble and (i) Weak schistosity extension in quartzite. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Afs: alkali feldspar, Amph: amphibole, Bt: biotite, Cal: calcite, Ms: muscovite, Opq: opaque minerals, Pl: plagioclase, Px: pyroxene, Qz: quartz).

همچنین، پیریت با بافت گل کلمی داخل پیروتیت وجود دارد (شکل d۷). پیریت به صورت ادخال درون کالکوپیریت نیز دیده می شود (شکل c۷). این امر بیانگر تبلور زودتر پیریت نسبت به کالکوپیریت در توالی پاراژنزی می باشد. با این وجود، ادخال هایی از کالکوپیریت داخل پیریت نیز مشاهده می شود که این امر می تواند نشانگر هم زمانی نهشته شدن آنها باشد. در برخی نقاط، بلورهای پیریت با حاشیه های خرد شده مشاهده می شود که برگ وارگی سنگ آنها را دور زده و بلورهای کوارتز در سایه فشاری آن تشکیل شده اند. این امر می تواند نشان دهنده هم زمانی تشکیل این نوع پیریت ها با کانی های سنگ میزبان و قبل از فرایند دگرگونی و دگرشکلی باشد. برخی از بلورهای پیریت در نتیجه دگرسانی برون زاد به گویت تبدیل شده و گاه بافت بازماندی را به وجود آورده اند.

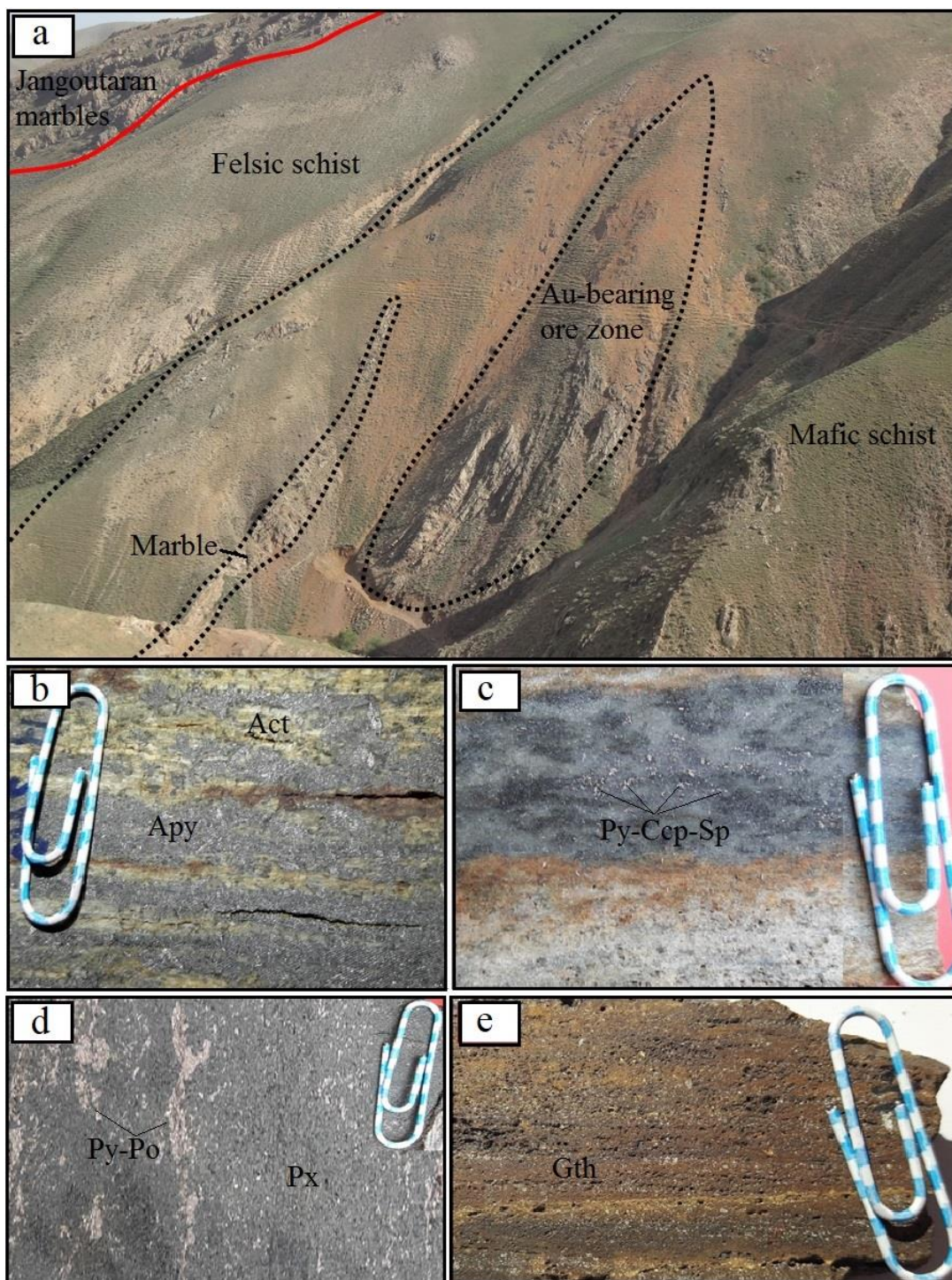
کالکوپیریت عموماً به صورت بلورهای بی شکل با بافت دانه پراکنده در همراهی با پیریت در فضای بین بلورهای سنگ میزبان حضور دارد (شکل c۷). این امر می تواند نشان دهنده هم زمانی تشکیل کالکوپیریت با کانی های سنگ میزبان باشد. کالکوپیریت بیشتر به صورت ادخال در متن آرسنوپیریت ها مشاهده می شود (شکل b۷ و f). در برخی نقاط، ادخال هایی از پیریت در داخل کالکوپیریت دیده می شود (شکل c۷). کالکوپیریت با بافت رگچه ای نیز در نمونه ها دیده می شود (شکل e۷). اسفالریت به صورت بلورهای ریز دانه پراکنده و پُرکننده فضای بین کانی های سیلیکاته سنگ میزبان در راستای برگ وارگی دیده می شود (شکل g۷). در داخل اسفالریت ها، بلورهای پیریت و گاه کالکوپیریت به صورت ادخال وجود دارند که نشان دهنده تشکیل آنها قبل از تبلور اسفالریت است (شکل g۷). بعضی از اسفالریت ها حالت عدسی شکل داشته و در راستای برگ وارگی سنگ ردیف شده اند (شکل h۷). این امر نشان دهنده حضور اسفالریت در متن سنگ قبل از فرایند دگرگونی و دگرشکلی می باشد. پیروتیت به صورت بلورهای بی شکل با بافت دانه پراکنده در همراهی با پیریت، مگنتیت و کالکوپیریت قابل مشاهده است. این کانی ها حاوی ادخال هایی از پیریت های بی شکل و گل کلمی (شکل d۷) و کالکوپیریت هستند که بیانگر تشکیل آنها بعد از پیریت و کالکوپیریت می باشد. همچنین، این کانی از حاشیه جایگزین بلورهای مگنتیت شده است (شکل i۷). مگنتیت کانی اولیه موجود در واحدهای پیروکسنیتی است که به صورت بلورهای بی شکل دانه پراکنده و پُرکننده فضای بین کانی های سنگ میزبان حضور دارد (شکل i۷). شواهد بافتی بیانگر اینست که این کانی هم زمان با کانی های سیلیکاته سنگ های میزبان از ماگمای مادر تبلور شده است. ابعاد بلورهای مگنتیت کمتر از ۰/۵ میلی متر می باشد. پیریت و پیروتیت در حاشیه مگنتیت رشد کرده و گاه پیریت به صورت رگچه ای مگنتیت را قطع کرده است. این موضوع بیانگر تشکیل پیریت و پیروتیت بعد از مگنتیت می باشد. علاوه بر این، مگنتیت به صورت بلورهای عدسی شکل و کشیده در متن اکتینولیت سیست ها و به موازات برگ وارگی آنها حضور دارد (شکل j۷). این موضوع بیانگر تشکیل مگنتیت قبل از رخداد دگرگونی و حاکی از تغییر شکل آن طی فرایند دگرگونی می باشد.

کانه زایی سولفیدی طلا دار در این رخداد معدنی به صورت دانه پراکنده، نواری، لامینه ای و عدسی شکل (شکل b۵ و c) درون واحدهای اکتینولیت سیستی رخ داده است. بخش دیگری از کانه زایی به صورت دانه پراکنده و رگچه ای درون واحد پیروکسنیتی موجود در توالی شیست های مافیک قابل مشاهده است (شکل d۵). در برخی نقاط، در نتیجه فرایندهای برون زاد، هیدروکسیدهای آهن از دگرسانی بخش های سولفیدی تشکیل شده است (شکل e۵). عیار طلا در نمونه های سطحی برداشت شده از بخش های کانه دار بین ۱/۶۳ تا ۸ گرم در تن متغیر بوده است (Karbasi, 2015; IMIDRO, 2017). براساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی، دگرسانی گرمایی در رخداد معدنی طلای حلب شامل انواع دگرسانی های سیلیسی، اکتینولیتی و کلریتی می باشد که در این بین، دگرسانی های سیلیسی و اکتینولیتی منطبق بر بخش های کانه دار می باشند. دگرسانی سیلیسی در رخداد معدنی طلای حلب به صورت بخش های غنی از کوارتز همراه با کانه زایی و رگچه های تأخیری کوارتزی می باشد (شکل a۶ و b). دگرسانی اکتینولیتی همراهی نزدیکی با کانی های معدنی (پیریت، کالکوپیریت و آرسنوپیریت) دارد. این دگرسانی به صورت حضور بلورهای رشته ای اکتینولیت در تجمعات عدسی شکل همراه با کانه زایی قابل مشاهده است (شکل c۶). دگرسانی کلریتی گسترش محدودی در رخداد معدنی طلای حلب داشته و بیشتر به صورت تجمعات بی شکل و رگچه های کلریتی تأخیری در واحدهای سنگی میزبان کانه زایی و در مجاورت با تجمعات کانه زایی قابل مشاهده است (شکل d۶). جایگزینی کلریت به جای کانی های مافیک در واحد اکتینولیت سیستی کانه دار نیز در ارتباط با این دگرسانی می باشد.

### کانی شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

آرسنوپیریت، اسفالریت، پیریت، کالکوپیریت، پیروتیت، طلا و به میزان خیلی کمتر مگنتیت، کانی های معدنی اصلی در رخداد معدنی طلای حلب هستند. گویت به همراه مقدار محدودی آزوریت، طی فرایندهای برون زاد تشکیل شده اند. آرسنوپیریت فراوان ترین کانی سولفیدی در رخداد معدنی طلای حلب است که عموماً به صورت بلورهای خود شکل دانه پراکنده در راستای برگ وارگی و یا متقاطع با آن دیده می شود (شکل a۷). اندازه بلورهای آرسنوپیریت تا ۷ میلی متر هم می رسد. در برخی نقاط، بلورهای آرسنوپیریت، به دلیل عملکرد تنش های بعدی، خرد شده و بافت پرشی نشان می دهند. بیشتر بلورهای آرسنوپیریت حاوی ادخال هایی از کانی های سیلیکاته سنگ میزبان می باشند (شکل a۶). این موضوع نشان می دهد آرسنوپیریت ها بعد از این کانی ها رشد کرده اند. در برخی نقاط، ادخال هایی از بلورهای بی شکل پیریت و کالکوپیریت در داخل آرسنوپیریت قابل مشاهده است (شکل b۷). این امر بیانگر تبلور این کانی ها قبل از آرسنوپیریت در توالی پاراژنزی می باشد. پیریت به صورت بلورهای ریز تا درشت شکل دار تا بی شکل با بافت های دانه پراکنده و پُرکننده فضای بین کانی های سیلیکاته و رگچه ای مشاهده می شود (شکل c۷ تا e). در برخی نقاط، ادخال هایی از پیریت در داخل آرسنوپیریت مشاهده می شود (شکل b۷).

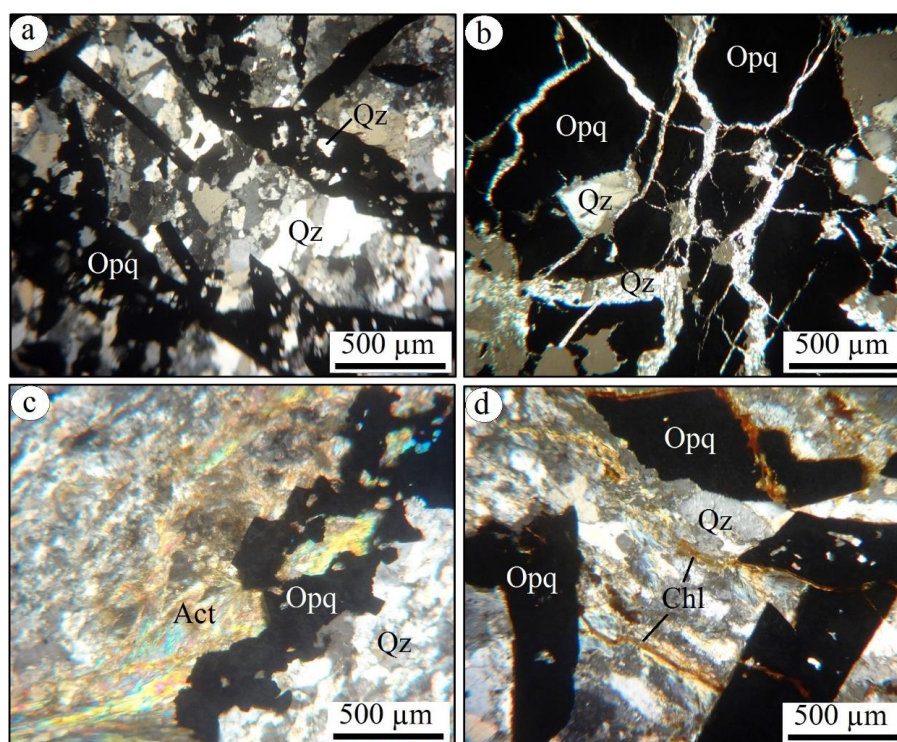




شکل ۵- (a) نمایی از پهنه کانه‌زایی طلا در رخداد معدنی حلب درون واحد شیست‌های مافیک (دید به سمت جنوب‌باختر)، (b و c) کانه‌زایی سولفیدی به صورت نواری و دانه‌پراکنده در اکتینولیت شیست‌ها، (d) کانه‌زایی سولفیدی به صورت رگچه‌ای و دانه‌پراکنده در پیروکسنیت و (e) گوتیت حاصل از دگرسانی برون‌زاد سولفیدها. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. Act: اکتینولیت، Apy: آرسنوپیریت، Ccp: کالکوپیریت، Gth: گوتیت، Po: پیروتیت، Px: پیروکسن، Py: پیریت، Sp: اسفالریت.

Fig. 5. (a) A view of Au-bearing ore zone hosted by mafic schist unit at the Halab Au occurrence (looking southwest), (b and c) Disseminated and laminated sulfide mineralization within actinolite schist, (d) Disseminated and veinlet of sulfide mineralization within pyroxenite and (e) Goethite formed during supergene alteration of sulfide minerals. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Act: actinolite, Apy: arsenopyrite, Ccp: chalcopyrite, Gth: goethite, Po: pyrrhotite, Px: pyroxene, Py: pyrite, Sp: sphalerite).





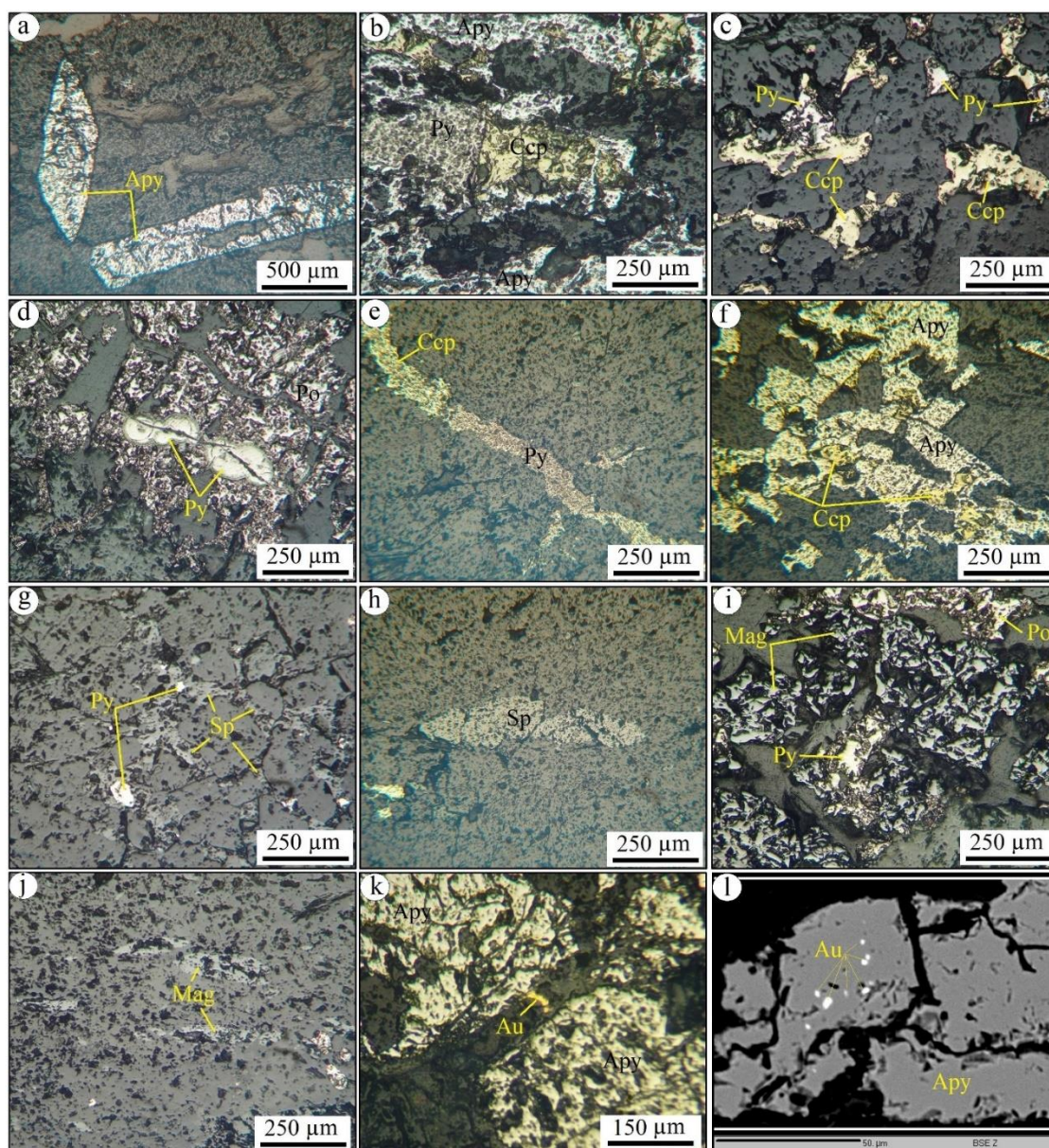
شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از انواع دگرسانی در رخداد معدنی طلای حلب. (a) دگرسانی سیلیسی به صورت بخش‌های کوارتزی همراه با کانی‌های کدر، (b) دگرسانی سیلیسی به صورت رگچه‌های تأخیری کوارتزی قطع‌کننده کانی‌های کدر، (c) دگرسانی اکتینولیتی به صورت رگچه اکتینولیتی همراه با کانی‌های کدر و (d) رگچه‌های کلریتی در دگرسانی کلریتی. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Act: اکتینولیت، Chl: کلریت، Opq: کانی‌های کدر، Qz: کوارتز).

Fig. 6. Photomicrographs (transmitted cross polarized-light, XPL) of hydrothermal alteration types in the Halab Au occurrence. (a) Silica alternation as quartz components along with opaque minerals, (b) Silica alternation as late quartz veinlets crosscutting opaque minerals, (c) Actinolite alteration as actinolite veinlet along with opaque minerals and (d) Chlorite veinlets in chlorite alteration. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Act: actinolite, Chl: chlorite, Opq: opaque minerals, Qz: quartz).

رگچه‌های تأخیری کانه‌زایی سولفیدی را قطع کرده است (شکل ۶b). اکتینولیت دومین کانی باطله فراوان در رخداد معدنی طلای حلب می‌باشد. این کانی عمدتاً به صورت باندهایی در واحد اکتینولیت شیستی متمرکز بوده و همراهی نزدیکی با کانی‌های سولفیدی دارد (شکل ۶c). بلورهای اکتینولیت به صورت رشته‌ای تا نیمه‌شکل‌دار بوده و در راستای برگ‌وارگی سنگ ردیف شده‌اند. در برخی نقاط، رگچه‌های اکتینولیتی تأخیری، واحدهای میزبان را قطع کرده‌اند. کلینوپیروکسن دیگر کانی باطله در رخداد معدنی طلای حلب می‌باشد که در واحد پیروکسنیتی همراهی نزدیکی با کانه‌زایی دارد. در این واحد سنگی، فضای بین بلورهای شکل‌دار پیروکسن توسط کانی‌های کدر پُر شده است. کلریت به صورت رگچه‌ای حضور داشته و عموماً کانی‌های کدر را قطع کرده است (شکل ۶d). این موضوع نشان می‌دهد که کلریت بعد از کانی‌های کدر تشکیل شده است.

طلا به صورت ذرات کوچک طلای آزاد در فضای شکستگی‌های آرسنوپیریت و یا به صورت ادخال درون بلورهای آرسنوپیریت قابل مشاهده است (شکل ۱k و ۱l). گوتیت‌ها حاصل فرایندهای درون‌زاد کانه‌های سولفیدی اولیه (پیریت و کالکوپیریت) هستند که از حاشیه‌ها و مرز شکستگی‌ها جانشین آنها شده‌اند. گوتیت‌ها به صورت رگچه‌ای و پُرکننده فضای خالی با بافت جانشینی و گل‌کلمی در قالب کانی‌های سولفیدی و در امتداد شکستگی‌ها دیده می‌شوند. آزوریت محصول دگرسانی برون‌زاد کالکوپیریت بوده و بیشتر در مسیر شکستگی‌ها مشاهده می‌شود. براساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی انجام‌شده، کوارتز، اکتینولیت، کلینوپیروکسن، به همراه مقدار کمی کلریت، کانی‌های باطله در رخداد معدنی طلای حلب هستند. کوارتز به‌عنوان مهم‌ترین کانی باطله، به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار هم‌زمان با کانه‌زایی تشکیل شده است. این کانی به صورت باندهای کوارتز-فلدسپاتی در واحدهای سنگی میزبان و پُرکننده فضای بین کانی‌های کدر حضور دارد (شکل ۶a). همچنین، کوارتز به صورت





شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی (نور بازتابی) و SEM از انواع مواد معدنی در رخداد معدنی طلای حلب؛ (a) بلورهای شکل‌دار آرسنوپیریت، (b) ادخال‌های پیریت و کالکوپیریت داخل آرسنوپیریت، (c) ادخال‌های پیریت داخل کالکوپیریت، (d) بلورهای پیریت با بافت گل‌کلمی داخل پیروتیت، (e) رگچه پیریت-کالکوپیریت قطع‌کننده برگ‌وارگی سنگ میزبان، (f) ادخال‌های کالکوپیریت داخل آرسنوپیریت، (g) اسفالریت دانه‌پراکنده حاوی ادخال‌های پیریت، (h) بلور کشیده و عدسی‌شکل اسفالریت در راستای برگ‌وارگی سنگ میزبان، (i) بلورهای مگنتیت و پیریت با بافت دانه‌پراکنده، (j) بلورهای کشیده و عدسی‌شکل مگنتیت در راستای برگ‌وارگی در اکتینولیت شیست‌ها، (k) طلای آزاد در مسیر شکستگی‌های آرسنوپیریت و (l) تصویر BSE از ادخال‌های ریز طلای آزاد داخل آرسنوپیریت. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. Apy: آرسنوپیریت، Au: طلا، Ccp: کالکوپیریت، Mag: مگنتیت، Po: پیروتیت، Py: پیریت، Sp: اسفالریت.

Fig. 7. Photomicrographs (reflected light) and SEM image of ore minerals at the Halab Au occurrence; (a) Euhedral arsenopyrite crystals, (b) Arsenopyrite with pyrite and chalcopyrite inclusions, (c) Chalcopyrite with pyrite inclusions, (d) Pyrite inclusion with colloform texture within pyrrhotite, (e) Pyrite-chalcopyrite veinlet crosscutting foliation of host rock, (f) Arsenopyrite with chalcopyrite inclusions, (g) Disseminated sphalerite along with pyrite inclusions, (h) Elongated and lens-shaped sphalerite parallel to foliation of host rock, (i) Disseminated magnetite and pyrite crystals, (j) Elongated and lens-shaped magnetite parallel to foliation of host rock, (k) Free gold along cracks of arsenopyrite and (l) BSE image of fine-grained free gold inclusions within arsenopyrite. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Apy: arsenopyrite, Au: gold, Ccp: chalcopyrite, Mag: magnetite, Po: pyrrhotite, Py: pyrite, Sp: sphalerite).

رگچه‌های اکتینولیتی و کوارتزی قطع‌کننده برگ‌وارگی نیز در این مرحله تشکیل شده‌اند. در نتیجه عملکرد سیالات گرمابی این مرحله، طلای موجود در شبکه آرسنوپیریت آزاد و به‌صورت طلای آزاد در مسیر شکستگی‌ها و ادخال درون آرسنوپیریت تشکیل شده است. در مراحل انتهایی کانه‌زایی در این مرحله، رگچه‌های کلریتی مجموعه مراحل قبلی را قطع می‌کنند. کانه‌زایی مرحله چهارم مربوط به فرایندهای برون‌زاد بوده و سبب تشکیل آزوریت و گوتیت به‌صورت جانیشینی و پُرکننده فضاهای خالی شده است. توالی پاراژنتیک مواد معدنی و باطله به همراه بافت و فابریک آنها در رخداد معدنی طلای حلب در شکل ۸ نشان شده است.

### زمین‌شیمی

هدف از این مطالعات، تعیین غنی‌شدگی و تهی‌شدگی‌های عنصری مرتبط با کانه‌زایی در واحدهای میزبان و پهنه کانه‌دار است. نتایج تجزیه‌های شیمیایی به‌دست آمده از نمونه‌های رخداد معدنی طلای حلب در جدول ۱ آورده شده است. بررسی نتایج آنالیزهای شیمیایی نشان می‌دهد عیار طلا در نمونه‌های اکتینولیت شیستی حاوی آرسنوپیریت، پیریت، کالکوپیریت و گاه اسفالریت بین ۲۳۰ میلی‌گرم در تن تا ۵/۹۱ گرم در تن متغیر است (جدول ۱). نمونه اکتینولیت شیستی حاوی پیریت، اسفالریت و کالکوپیریت و فاقد آرسنوپیریت دارای عیار ۴۹/۸ میلی‌گرم در تن طلا بوده و نمونه گوتیت نیز دارای عیار برابر با ۹/۱۲ میلی‌گرم در تن است. نمونه پیروکسنیت حاوی مگنتیت و پیریت و مقدار کمی آرسنوپیریت و کالکوپیریت نیز عیار ۱۷/۳ میلی‌گرم در تن را نشان می‌دهد.

### الگوی توزیع عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در پهنه‌های کانه‌دار

الگوی عناصر کمیاب خاکی برای بخش‌های کانه‌دار در رخداد معدنی طلای حلب که نسبت به کندریت (McDonough and Sun, 1995) به‌هنگار شده‌اند، در شکل ۹ نشان داده شده است. براساس این شکل، بخش عمده نمونه‌های کانه‌دار و اکتینولیت شیست بدون کانه‌زایی یک الگوی غنی از عناصر LREE همراه با الگوی مسطح در عناصر HREE، آنومالی منفی Eu و نسبت تقریباً بالای LREE/HREE ( $LaN/YbN=4.32-26.26$ ) را نشان می‌دهند. نمونه مربوط به کانسنگ گوتیتی، الگوی نامنظم در HREE دارد (شکل ۹). این نمونه از پایین‌ترین غنی‌شدگی در عناصر کمیاب خاکی در مقایسه با دیگر نمونه‌های کانه‌دار برخوردار است. الگوی متفاوت و تهی‌شدگی نسبی REE در نمونه گوتیتی می‌تواند نتیجه دگرسانی برون‌زاد و خروج این عناصر از کانسنگ اولیه باشد. در نمودار عناصر کمیاب به‌هنگار شده به کندریت (McDonough and Sun, 1995) نیز بخش عمده نمونه‌های کانه‌دار و همچنین نمونه اکتینولیت شیست بدون کانه‌زایی یک الگوی غنی‌شده در عناصر (Ba, Th, U) و LREE (La و Ce) همراه با آنومالی منفی در عناصر HFSE (ظایر Ta, Nb, Zr, Hf و Ti) را نشان می‌دهند (شکل ۹). در این نمودار نیز نمونه گوتیتی الگوی تقریباً متفاوت با دیگر نمونه‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۹).

مطالعات صحرایی و میکروسکوپی انجام‌شده نشان می‌دهد که بافت ماده معدنی در رخداد معدنی طلای حلب از نوع نواری، لامینه‌ای، دانه‌پراکنده، رگچه‌ای، پرشی، پُرکننده فضای خالی، گل‌کلمی، جانیشینی و بازماندی است. بافت نواری بافت غالب در این رخداد معدنی بوده و شامل باندهای غنی از کانی‌های سولفیدی (آرسنوپیریت به همراه مقداری پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت) با ضخامت یک میلی‌متر تا ۵ سانتی‌متر است (شکل ۱۰b). پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و پیروتیت به همراه مگنتیت در فضای بین کانی‌های سیلیکاته تشکیل‌دهنده سنگ به‌صورت پراکنده حضور دارند (شکل‌های ۱۰c و ۱۰d). بافت رگچه‌ای سولفیدی (شکل‌های ۱۰e و ۱۰f) و کوارتزی، اکتینولیتی و کلریتی (شکل ۱۰b تا ۱۰d) می‌باشد. قطع‌شدن کانه‌زایی سولفیدی توسط رگچه‌های کوارتزی متعدد، باعث تشکیل بافت پرشی شده است. بافت گل‌کلمی در برخی از بلورهای پیریت قابل مشاهده است (شکل ۱۰d). بافت‌های جانیشینی، بازماندی و پُرکننده فضای خالی در نتیجه فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند.

### مراحل کانه‌زایی و توالی پاراژنتی

با توجه به مطالعات صحرایی و میکروسکوپی و بر مبنای روابط بافتی موجود بین کانه‌ها و کانی‌ها، مراحل کانی‌سازی در رخداد معدنی طلای حلب به چهار مرحله قابل تفکیک است. مرحله اول کانه‌زایی هم‌زمان با تشکیل سنگ میزبان رخ داده است. در این مرحله، توالی آتشفشانی- رسوبی با ماهیت آتشفشانی دوگانه در یک محیط کششی داخل کمان ماگمایی تشکیل شده است (Nafisi, 2018; Nafisi et al., 2019). کانه‌زایی سولفیدی متشکل از کانی‌های پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت هم‌زمان با تشکیل توالی آتشفشانی- رسوبی منطقه و به‌صورت سیمان سولفیدی بین کانی‌های سیلیکاته، نواری و دانه‌پراکنده هم‌روند با لایه‌بندی واحدهای میزبان تشکیل شده است. کانه‌زایی مگنتیت به‌صورت دانه‌پراکنده در واحد پیروکسنیتی نیز در این مرحله تشکیل شده است. مرحله دوم کانه‌زایی هم‌زمان با فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی منطقه رخ داده است. بودین‌شدگی و کشیدگی بلورهای مگنتیت و اسفالریت، رشد سایه واتنشینی بلورهای کوارتز در اطراف بلورهای پیریت و دوزدن برگ‌وارگی اطراف بلورهای مگنتیت و پیریت همراه با تبلور مجدد بلورهای کوارتز در این مرحله رخ داده است. جانیشینی اکتینولیت به‌جای پیروکسن در نتیجه دگرگونی پسروده نیز در این مرحله رخ داده است.

مرحله سوم کانه‌زایی به‌صورت گرمابی و بعد از فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی رخ داده است. این مرحله از کانه‌زایی در رخداد معدنی طلای حلب با تشکیل کانه‌زایی آرسنوپیریت- طلا همراه می‌باشد. در این مرحله، آرسنوپیریت‌های شکل‌دار به‌صورت موازی تا متقاطع با برگ‌وارگی سنگ میزبان تشکیل شده و ادخال‌هایی از کانی‌های سیلیکاته میزبان را در خود به دام انداخته‌اند. کانه‌زایی پیریت، کالکوپیریت و پیروتیت به‌صورت نواری و دانه‌پراکنده در بین کانی‌های سنگ میزبان و رگچه‌های متقاطع با برگ‌وارگی سنگ میزبان و



	Syndeposition	Synmetamorphism-syndeformation	Hydrothermal	Supergene
Arsenopyrite	_____	_____	_____	
Pyrite	_____	_____	_____	
Chalcopyrite	_____	_____	_____	
Sphalerite	_____	_____	_____	
Pyrrhotite	_____	_____	_____	
Magnetite	_____	_____	_____	
Gold			_____	
Azurite				_____
Goethite				_____
Quartz	_____	_____	_____	
Pyroxene	_____	_____	_____	
Actinolite		_____	_____	
Chlorite			_____	
Laminated	_____		_____	
Banded	_____		_____	
Disseminated	_____		_____	
Vein-veinlet			_____	
Brecciated			_____	
Colloform			_____	
Replacement				_____
Relict				_____
Crenulation				_____
Starin shadow-boudinage				_____

شکل ۸- توالی پاراژنزی، ساخت و بافت و فابریک کانی‌های معدنی و باطله در رخداد معدنی طلای حلب.

Fig. 8. Paragenetic scheme showing the structure and texture and fabric of gangues and ore minerals at the Halab Au occurrence.

### تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در پهنه‌های کانه‌دار

LREE همراه با تهی‌شدگی در بقیه عناصر کمیاب خاکی قابل را نشان می‌دهد.

بر اساس شکل ۱۰b، همه نمونه‌های کانه‌دار (به غیر از نمونه گوتیتی) در مقایسه با اکتینولیت شیبست فاقد کانه‌زایی از عناصر  $\text{Bi}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Cu}$  و  $\text{Co}$  غنی‌شدگی نشان می‌دهند. همچنین، همه نمونه‌های کانه‌دار در مقایسه با اکتینولیت شیبست فاقد کانه‌زایی از عناصر  $\text{Th}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Hf}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{U}$  و  $\text{Y}$  تهی‌شده هستند. تهی‌شدگی بخش عمده عناصر (به غیر از  $\text{Cu}$ ،  $\text{Pb}$ ،  $\text{Zn}$  و  $\text{Nb}$ ) در نمونه گوتیتی را می‌توان محصول شستشوی عناصر مزبور طی فرایند برون‌زاد در نظر گرفت. عنصر  $\text{Nb}$  در همه نمونه‌های حاوی آرسنوپیریت تهی‌شدگی نشان می‌دهد در حالیکه در نمونه اکتینولیت شیبست حاوی پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت و فاقد آرسنوپیریت، غنی‌شدگی ضعیفی از این عنصر مشاهده می‌شود (شکل ۱۰b). این موضوع می‌تواند بیانگر خروج  $\text{Nb}$  از سنگ میزبان اکتینولیت شیبستی در حین تشکیل آرسنوپیریت باشد. وجود غنی‌شدگی ضعیف عناصر  $\text{Ta}$ ،  $\text{Nb}$ ،  $\text{Sc}$ ،  $\text{Th}$  و  $\text{U}$  در نمونه اکتینولیت شیبست حاوی پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت همراه با تهی‌شدگی این عناصر در نمونه‌های اکتینولیت شیبست حاوی آرسنوپیریت (شکل ۱۰b) نیز می‌تواند بیانگر خروج عناصر مزبور در حین تشکیل آرسنوپیریت در این سنگ‌ها باشد. نمونه پیروکسنیتی حاوی مگنتیت، پیروتیت، پیریت و کالکوپیریت، غنی‌شدگی در عناصر  $\text{Cu}$ ،  $\text{Bi}$ ،  $\text{Pb}$ ،  $\text{Ni}$  و  $\text{Co}$  و تهی‌شدگی در بقیه عناصر را نشان می‌دهد (شکل ۱۰b).

به‌منظور نمایش تحرک عناصر در پهنه‌های دگرسانی و کانه‌زایی در رخداد معدنی طلای حلب، میانگین داده‌های مربوط به نمونه‌های کانه‌دار بر داده‌های مربوط به اکتینولیت شیبست فاقد کانه‌زایی به‌هنجار شد (شکل ۱۰) تا عناصر کم یا اضافه‌شده به سنگ طی کانه‌زایی مشخص گردد. 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 شکل ۱۰a، غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های کانه‌دار نسبت به اکتینولیت شیبست فاقد کانه‌زایی نشان داده شده است. به‌طوریکه در این شکل دیده می‌شود همه نمونه‌های کانه‌دار حاوی آرسنوپیریت و نمونه گوتیتی در مقایسه با اکتینولیت شیبست فاقد کانه‌زایی از عناصر کمیاب خاکی تهی شده‌اند. نمونه اکتینولیت شیبست حاوی پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت و فاقد آرسنوپیریت، غنی‌شدگی ضعیفی از همه عناصر کمیاب خاکی نشان می‌دهد. همچنان‌که قبلاً گفته شد، آرسنوپیریت عمدتاً به‌صورت بلورهای شکل‌دار در راستای برگ‌وارگی و یا متقاطع با آن تشکیل شده و حاوی ادخال‌هایی از کانی‌های سیلیکانه سنگ میزبان می‌باشد. این موضوع بیانگر تشکیل آن بعد از برگ‌وارگی سنگ میزبان و بعد از دگرگونی و دگرشکلی است. بر این اساس می‌توان گفت که در حین تشکیل آرسنوپیریت، بخش عمده عناصر کمیاب خاکی از سنگ میزبان شسته شده و از محیط خارج شده‌اند. نمونه پیروکسنیتی حاوی مگنتیت، پیروتیت، پیریت و کالکوپیریت، غنی‌شدگی جزئی از عناصر

جدول ۱- نتایج آنالیزهای شیمیایی نمونه‌های کانهدار در رخدادهای طلا در حلب. داده‌های طلا بر حسب میلی‌گرم در تن و بقیه داده‌ها بر حسب گرم در تن هستند.

Table 1. Geochemical data for mineralized samples from the Halab Au occurrence. Au data in ppb and rest in ppm.

	Ha-19	Ha-20	Ha-26	Ha-31	Ha-34	Ha-35	Ha-36	Ha-37	Ha-44
Au	9.12	49.80	----	230.0	17.30	5910	1660	1460	4940
Ba	65.8	110	1590	545	108	57.9	361	735	409
Be	0.20	2.20	1.82	0.54	2.59	0.28	0.83	1.20	1.30
Bi	0.10	0.82	0.71	0.64	1.33	40.3	31.5	17.7	18.8
Cd	0.20	0.21	0.42	0.10	0.41	0.19	0.19	0.25	0.13
Ce	2.08	64.7	51.0	9.97	78.1	3.13	41.0	40.6	42.3
Co	10.7	9.11	12.2	8.31	113	292	133	44.5	97.0
Cs	0.20	0.39	1.56	0.38	0.25	0.15	0.23	0.41	0.28
Cu	297	561.0	79.4	852.0	540	260	572.6	372.5	222.0
Dy	297	8.38	3.78	1.27	2.53	0.33	2.45	4.06	2.52
Er	0.09	5.16	2.36	0.85	1.32	0.23	1.22	2.05	1.62
Eu	0.05	1.53	1.35	0.27	0.67	0.05	0.52	0.96	0.59
Ga	6.31	29.2	12.7	4.85	11.1	2.29	5.45	10.6	9.16
Gd	0.16	8.12	4.50	1.20	4.02	0.42	3.05	4.28	2.99
Hf	0.22	0.62	0.96	0.17	0.49	0.25	0.30	0.40	0.30
Ho	0.05	1.79	0.85	0.30	0.47	0.09	0.44	0.80	0.54
In	0.09	0.29	0.60	0.07	0.69	0.87	0.36	0.79	0.39
La	1.32	35.4	30.3	5.53	54.9	3.19	23.5	25.6	22.6
Lu	0.05	0.54	0.42	0.14	0.41	0.05	0.22	0.20	0.24
Mn	1736	826	670	168	1704	750	530	457	529
Mo	0.30	0.97	1.18	2.16	0.35	1.44	0.96	1.60	1.37
Nb	16.1	21.8	10.5	4.76	6.08	2.79	3.94	9.36	4.81
Nd	0.92	30.6	24.1	5.45	33.5	2.78	20.8	22.5	19.9
Ni	5.19	8.91	25.4	19.2	54.9	9.60	18.1	11.8	19.4
Pb	17.5	45.3	10.7	69.8	18.3	28.96	29.3	18.2	14.1
Pr	0.26	7.81	6.63	1.27	9.38	0.70	5.15	5.69	4.98
Rb	14.5	12.4	48.9	20.0	15.0	13.2	26.2	41.1	32.3
Sc	0.79	9.48	7.07	4.43	4.31	1.51	3.58	6.50	5.25
Sm	0.18	7.59	5.48	1.56	4.31	0.54	3.70	4.97	3.37
Sn	2.55	8.68	5.59	0.97	6.17	3.06	5.07	9.68	7.24
Sr	77.2	206	215	110	113	79.9	138	148	164
Ta	0.70	1.00	0.49	0.14	0.40	0.43	0.53	0.94	0.80
Tb	0.05	1.36	0.60	0.21	0.45	0.06	0.45	0.71	0.42
Th	1.68	18.5	9.28	2.99	2.69	0.53	6.82	7.17	7.02
Ti	1135	4702	2910	1483	1214	597	890	2503	1184
Tm	0.05	0.77	0.37	0.15	0.20	0.05	0.18	0.29	0.26
U	0.18	5.97	2.07	0.98	0.87	0.45	1.29	1.60	1.59
W	0.78	2.09	1.28	0.44	0.76	0.84	2.39	1.23	1.69
Y	1.12	46.0	22.0	7.21	11.4	2.06	10.3	18.7	13.2
Yb	0.08	3.80	2.12	0.87	1.42	0.17	1.07	1.46	1.40
Zn	59.8	642.0	53.6	58.1	47.0	245.7	353.6	47.3	68.8
Zr	5.61	11.9	27.1	1.01	10.3	7.26	6.86	7.46	7.74
(La/Yb) <sub>N</sub>	11.21	6.33	9.71	4.32	26.26	12.75	14.92	11.91	10.97

Ha-19: Goethite ore; Ha-20: Actinolite schist with chalcopyrite, sphalerite and pyrite mineralization; Ha-26: Fresh and barren host actinolite schist; Ha-34: Pyroxenite with magnetite, pyrite and arsenopyrite mineralization; Ha-31, Ha-35 and H-36: Actinolite schist with chalcopyrite, sphalerite, pyrite and arsenopyrite mineralization; Ha-37: Actinolite schist with chalcopyrite, pyrite and arsenopyrite mineralization; Ha-44: Arsenopyrite ore.

### تیپ کاندهایی در رخدادهای طلا حلب

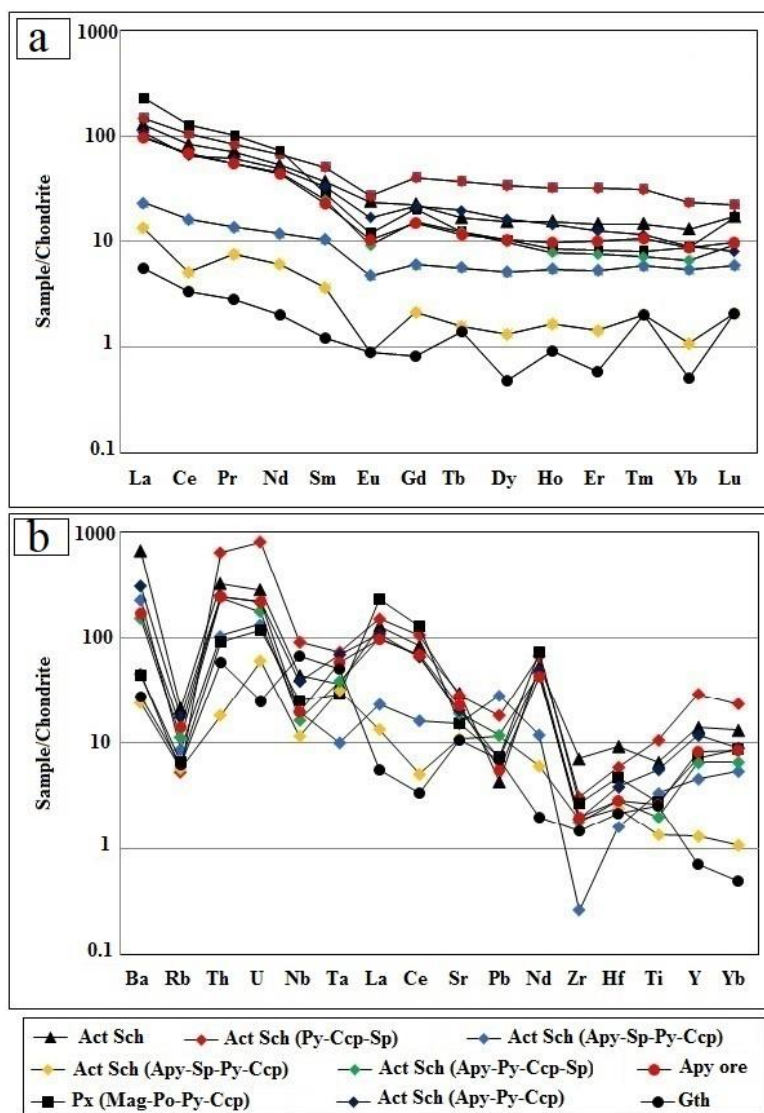
افشان کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد (Slack et al., 2001; Stix et al., 2003; Franklin et al., 2005; Gibson et al., 2007; Goodfellow, 2007) طبقه‌بندی کرد. شواهد این مقایسه به شرح زیر است:

۱- وجود مقادیر بالای سنگ‌های آتشفشانی مافیک و فلسیک دگرگون شده (شیست‌های فلسیک و مافیک) در توالی با واحدهای رسوبی تخریبی دگرگون شده (شیست‌های پلیتی) در منطقه حلب بیانگر وجود یک حوضه کششی در حال نشست و خروج مواد آتشفشانی مافیک و فلسیک هم‌زمان با رسوب‌گذاری مواد آواری می‌باشد (Nafisi et al., 2019).

نتایج مطالعات زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، ساخت و بافت و کاندهنگاری نشان می‌دهد کاندهایی در رخدادهای طلا در ابتدا به صورت کاندهایی غیراقتصادی روی-مس با ژئومتری لایه‌ای-نواری، دانه‌پراکنده و چینه‌سان-چینه‌کران هم‌زمان با فعالیت‌های آتشفشانی-رسوبی درون یک حوضه کششی داخل کمانی تشکیل شده است که طی فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی بعدی مورد رونق‌دهی قرار گرفته است (Nafisi, 2018; Nafisi et al., 2019). مقایسه شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ساخت و بافتی این کاندهایی اولیه با انواع کانسارهای روی-مس نشان می‌دهد که این کاندهایی را می‌توان معادل دگرگون و دگرشکل شده بخش‌های لایه‌ای و

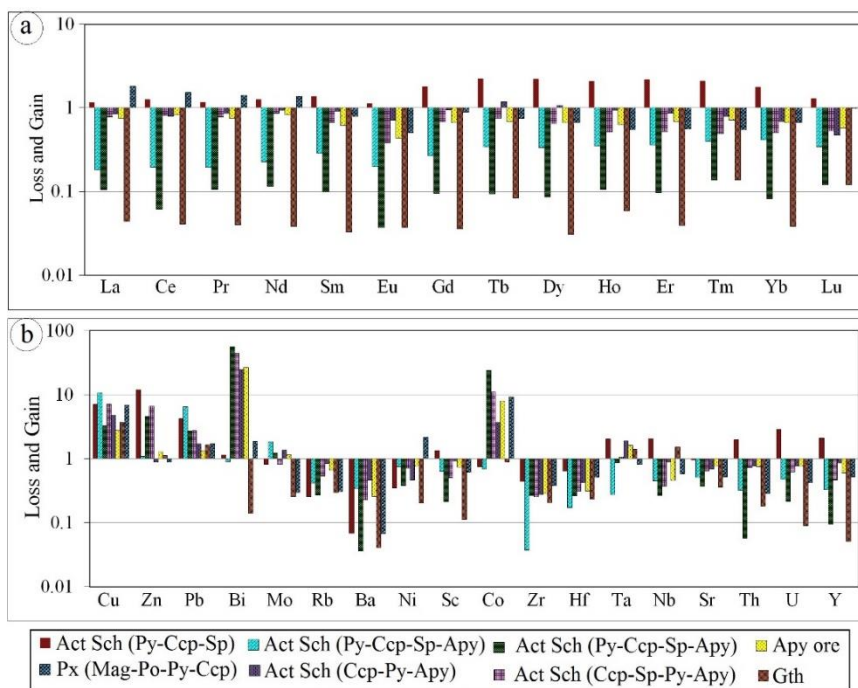
کشتی داخل صفحه قاره‌ای است (Shinjo and Kato, 2000; Peccerillo et al., 2003). نتیجه مطالعات زمین‌شیمیایی شیست‌های مافیک و فلسیک منطقه حلب نیز تشکیل آنها را در یک محیط کشتی داخل کمانی تأیید کرده است (Nafisi et al., 2019).

اعتقاد Chongying و همکاران (۱۹۹۵)، وجود توالی‌های ضخیم آتشفشانی- رسوبی از ویژگی‌های محیط‌های کشتی و ریفی می‌باشد. حضور هم‌زمان سنگ‌های آتشفشانی فلسیک و مافیک در توالی با رسوبات آواری بیانگر ماگماتیسم دوگانه در این منطقه می‌باشد (Nafisi et al., 2019). ماگماتیسم دوگانه از ویژگی‌های ماگماتیسم‌های موجود در مناطق



شکل ۹- (a) الگوی عناصر کمیاب خاکی به‌هنگار شده به کندریت (McDonough and Sun, 1995) برای نمونه‌های کانه‌دار و اکتینولیت شیست بدون کانه‌زایی در رخداد معدنی طلای حلب و (b) الگوی عناصر کمیاب به‌هنگار شده به کندریت (McDonough and Sun, 1995) برای نمونه‌های کانه‌دار و اکتینولیت شیست بدون کانه‌زایی در رخداد معدنی طلای حلب. علائم اختصاری از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. Act Sch: اکتینولیت شیست، Apy: آرسنوپیریت، Ccp: کالکوپیریت، Gth: گوتیت، Mag: مگنتیت، Po: پیروتیت، Py: پیریت، Px: پیروکسنیت، Sp: اسفالریت.

Fig. 9. (a) Chondrite-normalized (McDonough and Sun, 1995) REE patterns for the mineralized samples and barren host actinolite schist in the Halab Au occurrence and (b) Chondrite-normalized (McDonough and Sun, 1995) trace elements patterns for the mineralized samples and barren host actinolite schist in the Halab Au occurrence. Abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Act Sch: actinolite schist, Apy: arsenopyrite, Ccp: chalcopyrite, Gth: goethite, Mag: magnetite, Po: pyrrhotite, Py: pyrite, Px: pyroxenite, Sp: sphalerite).



شکل ۱۰- (a) نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی طلای حلب که نسبت به داده سنگ میزبان اکتینولیت شیست فاقد کانه‌زایی (نمونه H-26، جدول ۱) به‌هنجار شده‌اند و (b) نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی طلای حلب که نسبت به داده سنگ میزبان اکتینولیت شیست فاقد کانه‌زایی (نمونه H-26، جدول ۱) به‌هنجار شده‌اند. علائم اختصاری از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Act Sch: اکتینولیت شیست، Apy: آرسنوپیریت، Ccp: کالکوپیریت، Gth: گوتیت، Mag: مگنتیت، Po: پیروتیت، Py: پیریت، Px: پیروکسنیت، Sp: اسفالریت).

Fig. 10. (a) Loss and gain histogram of REE for mineralized samples at Halab Au occurrence, normalized against data of barren host actinolite schist (sample H-26, Table 1) and (b) Loss and gain histogram of trace elements for mineralized samples at Halab Au occurrence, normalized against data of barren host actinolite schist (sample H-26, Table 1). Abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Act Sch: actinolite schist, Apy: arsenopyrite, Ccp: chalcopyrite, Gth: goethite, Mag: magnetite, Po: pyrrhotite, Py: pyrite, Px: pyroxenite, Sp: sphalerite).

نشانه تشکیل این نهشته‌ها بر روی کف دریا و هم‌زمان با رسوب‌گذاری مواد آواری و مواد آتشفشانی است (Slack et al., 2001; Stix et al., 2003; Gibson et al., 2007).

۴- ساخت و بافت ماده معدنی در رخداد معدنی طلای حلب به‌صورت لامینه‌ای، نواری (تناوب کانی‌های سولفیدی و سیلیکاته)، دانه‌پراکنده و گاه شکافه پُرکن و پرشی می‌باشد. این بافت‌ها از بافت‌های معمول در کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد هستند (Gibson et al., 2007). وجود نوارهای سولفیدی چینه‌سان و بین‌لایه‌ای با توالی آتشفشانی دگرگون‌شده در کانسار سولفید توده‌ای تیپ بشی در نامیبیا را نشانه منشأ برون‌دمی زبردیابی برای این کانسار دانسته‌اند (Klemd et al., 1987).

با توجه به مطالب فوق چنین استنباط می‌شود که کانه‌زایی در رخداد معدنی طلای حلب به‌صورت اولیه در نتیجه فعالیت‌های آتشفشانی زبردیابی در یک حوضه کششی داخل کمانی و از نوع سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد همراه با فعالیت‌های گرمایی- برون‌دمی تشکیل شده است. در مرحله بعد، کانه‌زایی مزبور همراه با سنگ‌های درون‌گیر متحمل دگرگونی و دگرشکلی شده است. تاکنون تقسیم‌بندی‌های متعددی و براساس

۲- محیط‌های ریفت درون قاره‌ای توسط گسل‌های نرمال هم‌زمان با فعالیت‌های آتشفشانی کنترل می‌شوند. این گسل‌ها، علاوه بر خروج مواد آتشفشانی، معبری مناسب برای ورود سیالات گرمایی به کف دریا هستند (Gibson et al., 1999). خروج مواد آتشفشانی- آذرآواری و سیالات گرمایی به کف دریا از طریق این گسل‌ها، شرایط مناسبی را برای تشکیل نهشته‌های سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد فراهم می‌کنند (Gibson et al., 1999; Stix et al., 2003).

۳- کانه‌زایی سولفیدی در رخداد معدنی طلای حلب به‌صورت چینه‌سان و چینه‌کران با ژئومتری نواری و لامینه‌ای هم‌روند با برگ‌وارگی شیست‌های مافیک رخ داده است. در برخی نقاط، تحت تأثیر فرایندهای دگرگونی- دگرشکلی بعدی، ساختارهای بودین‌شدگی و رشد در سایه فشار در کانی‌های سولفیدی دیده می‌شود. این امر بیانگر حضور کانی‌های سولفیدی قبل از فرایندهای دگرگونی- دگرشکلی در شیست‌های مافیک بوده و نشان می‌دهد کانی‌های سولفیدی و سنگ‌های میزبان تاریخچه دگرگونی و دگرشکلی یکسانی را پشت سر گذاشته‌اند. چینه‌کران و چینه‌سان بودن توده‌های معدنی از خصوصیات بارز نهشته‌های سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد و



بایمودال- مافیک (تیپ آبی-تی بی یا نوراندا) تقسیم بندی کرده اند. مقایسه ویژگی های زمین شناسی، کانی شناسی و ساخت و بافت ماده معدنی در این رخداد معدنی با انواع کانسارهای سولفید توده ای آتشفشان زاد نشان می دهد کانه زایی اولیه روی- مس در رخداد معدنی طلای حلب شباهت زیادی با کانسارهای تیپ بشی دارد (جدول ۲).

فاکتورهای مختلف برای نهشته های سولفید توده ای آتشفشان زاد ارائه شده است. Franklin و همکاران (۲۰۰۵) این کانسارها را براساس محتوای سنگ میزبان و محیط تکتونیکی به پنج تیپ: ۱- مافیک (تیپ قبرس)، ۲- پلیتیک- مافیک (تیپ بشی)، ۳- بایمودال- فلسیک (تیپ کروکو)، ۴- سیلیسی کلاستیک- فلسیک (تیپ بتورست) و ۵-

جدول ۲- مقایسه ویژگی های اصلی رخداد معدنی طلای حلب با انواع کانسارهای سولفید توده ای.

Table 2. Comparison of main characteristics of the Halab Au occurrence with different types of massive sulfide deposits.

	Mafic (Cyprus)	Pelitic-mafic (Besshi)	Bimodal- mafic (Abitibi)	Bimodal- felsic (Kuroko)	Siliciclastic- felsic (Bathurst)	Gold-rich VMS deposit	Halab Au occurrence
Tectonic setting	Mature intra- oceanic backarcs	Sedimented mid-ocean ridges, transforms or backarcs	Rifted oceanic arcs	Continental margin arcs and related backarcs	Mature epicontinental backarc, continental mature backarc	Rifted oceanic arcs, continental backarc, rifted continental arc	Rifted continental arc
Lithological units	Dominantly mafic flows, felsic flows/ domes, mafic sills and dikes, minor argillite and chert (Ophiolitic assemblages)	Mafic sills, subordinate flows with argillite, carbonaceous argillite, minor chert and trace to absent felsic volcanic facies	Dominantly mafic flows, felsic flows/ domes, subordinate felsic/mafic volcaniclastic rocks and terrigenous sedimentary rocks	Felsic flows/ domes, volcaniclastic rocks with mafic flows and sills and terrigenous sediments	Siliciclastic rocks, felsic volcaniclastic rocks with subordinate flows/domes with mafic flows and sills and minor sedimentary rocks	Pyroclastic rocks with felsic flows, andesitic basalt, basalt and terrigenous sedimentary rocks	Metamorphosed and deformed mafic/ felsic flows and terrigenous sediments
Ore mineralogy	Py, Ccp, Sp ± Au	Py, Ccp, Sp, Po, Mag, Gn, Brt	Ccp, Gn, Sp, Ttr	Ccp, Py, Sp, Ttr, Gn ± Au	Py, Ccp, Sp, Gn, Po, Apy, Ttr	Py, Ccp, Sp, Au, Bn, Apy, Tnt,	Apy, Py, Ccp, Sp, Po, Mag
Gangue minerals	Qz, Act, Chl	Qz, Act, Chl, Cal, Ser	Qz, Act, Chl, Cal, Ser	Brt, Qz, Ser, Chl	Qz, Chl, Ser, Cal, Brt	Qz, Ser, And, Ky, Prl, St	Qz, Act, Chl
Major elements	Cu-Zn	Zn-Cu	Zn-Cu	Zn-Pb-Cu	Zn-Pb-Cu	Cu-Zn-Pb- Au-Ag	Au (Zn-Cu)
Alteration assemblages	Chl	Chl, Ser, Qz	Ser, Chl	Ser	Ser	Ser, Qz	Qz, Act, Chl
Reference	Gibson et al. (1999), Slack et al. (2001), Stix et al. (2003), Franklin et al. (2005), Gibson et al. (2007), Goodfellow (2007)					Poulsen et al. (2000), Dube et al. (2007), Langevinet et al. (2013)	This study, Nafisi (2018)

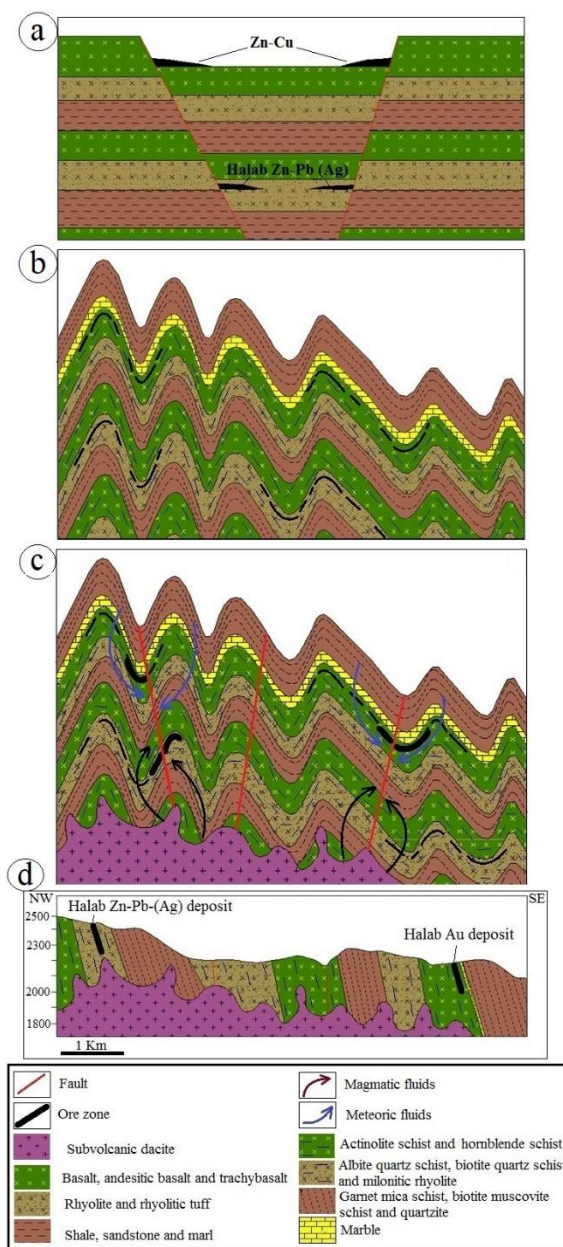
تکاب- تخت سلیمان- انگوران که به تشکیل کانه‌زایی‌های متعدد فلزات گران‌بها در این پهنه منجر شده است، سیالات گرمایی فاز ماگمایی مزبور منجر به تشکیل کانه‌زایی طلا در منطقه حلب و بر روی کانه‌زایی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد اولیه شده است.

### مدل تشکیل رخدادهای معدنی طلای حلب

بر اساس نتایج به‌دست آمده از مشاهدات صحرایی، مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری، ساخت و بافت و روابط پاراژنتیک کانی‌ها و کانه‌ها در رخداد معدنی طلای حلب، مراحل تکوین و تکامل این رخداد معدنی را می‌توان به‌صورت توالی زیر خلاصه کرد (شکل ۱۱):

مرحله نخست شامل تشکیل توالی سنگ‌های آتشفشانی فلسیک و مافیک (ماگماتیسیم دوگانه) و سنگ‌های رسوبی پلیتی در یک محیط کششی داخل کمان ماگمایی (Nafisi et al., 2019) همراه با تشکیل کانه‌زایی‌های سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد (روی- سرب- نقره و روی- مس) در دو افق مجزا می‌باشد (شکل ۱۱a). ژئومتری صفحه‌ای و چین‌سان ماده معدنی و وجود بافت‌های لامینه‌ای و نواری و دانه‌پراکنده ماده معدنی و هم‌راستا بودن آن با برگ‌وارگی واحدهای میزبان، نشان‌دهنده تنش‌های معدنی هم‌زمان با تشکیل واحدهای میزبان طی فعالیت‌های آتشفشانی- برون‌دومی زبرداری است. در مرحله دوم، توالی آتشفشانی- رسوبی منطقه طی فازهای کوهزایی سیمین و لارامید، متحمل دگرشکلی و دگرگونی ناحیه‌ای تا رخساره‌های آمفیبولیت و شیست سبز شده (Fonoudi and Hariri, 1999) و کانه‌زایی اولیه مورد رونق‌دهی قرار گرفته است (شکل ۱۱b). وجود ساختارهای چین‌خورده در واحدهای میزبان همراه با ساختارهای سیگما و بودین‌شدگی، رشد در سایه فشار و دورزدن برگ‌وارگی اطراف بلورهای دانه‌پراکنده پیریت موجود در سنگ‌های میزبان بیانگر عملکرد دگرشکلی و دگرگونی بعد از تشکیل کانه‌زایی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد اولیه است. در مرحله سوم، یکسری توده‌های نیمه‌آتشفشانی داسیتی به داخل مجموعه دگرگونه و دگرشکل شده پهنه تکاب- تخت سلیمان- انگوران نفوذ کرده و منجر به تشکیل کانه‌زایی‌های متعدد فلزات پایه- گران‌بها شده است. به نظر می‌رسد در نتیجه نفوذ توده‌های نیمه‌آتشفشانی داسیتی موجود در منطقه چیچکلو واقع در بخش باختری منطقه حلب و عملکرد سیالات گرمایی مرتبط با این توده‌ها، کانه‌زایی طلا در رخداد معدنی طلای حلب بر روی کانه‌زایی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد اولیه هم‌پوشان شده باشد (شکل ۱۱c). از شواهد این رخداد می‌توان به حضور بلورهای آرسنوپیریت شکل‌دار حاوی ادخال‌هایی از کانی‌های سیلیکاته سنگ میزبان اشاره کرد که به‌صورت هم‌روند با برگ‌وارگی سنگ میزبان و متقاطع با آن تشکیل شده و دورزدن برگ‌وارگی اطراف بلورهای آرسنوپیریت مشاهده نمی‌شود. این موضوع نشانگر تشکیل آرسنوپیریت‌های طلا‌دار بعد از رخداد دگرگونی و دگرشکلی است. مرحله چهارم با بالآمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرآیندهای هوازگی و فرسایش همراه بوده و ریخت‌شناسی امروزی منطقه حاصل شده است که همراه با مرحله برون‌زاد می‌باشد (شکل ۱۱d).

حضور ادخال‌های فراوان کانی‌های سیلیکاته سنگ میزبان در بلورهای شکل‌دار آرسنوپیریت بیانگر تشکیل آرسنوپیریت بعد از فرایند دگرگونی و دگرشکلی است. این موضوع نشان می‌دهد این کانی‌ها به‌صورت هم‌زمان با تشکیل سنگ میزبان و/یا طی فرایند دگرگونی و دگرشکلی تشکیل نشده و مربوط به یک فعالیت گرمایی جوان‌تر می‌باشند. ویژگی‌های زمین‌شیمی نمونه‌های برداشت‌شده از بخش‌های حاوی تمرکزهای بالای آرسنوپیریت نیز متفاوت از بخش‌های فاقد آرسنوپیریت است که این موضوع نیز می‌تواند بیانگر تفاوت زمان تشکیل آرسنوپیریت با کانه‌زایی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد اولیه در منطقه باشد. از طرف دیگر، نتایج مطالعات EPMA توسط Nafisi (۲۰۱۸) نشان داد که کانه‌زایی طلا در رخداد معدنی طلای حلب با تشکیل آرسنوپیریت همراه است. بر این اساس، می‌توان اظهار داشت کانه‌زایی طلا در این رخداد معدنی در ارتباط با یک فاز گرمایی تأخیری می‌باشد. کانه‌زایی‌های متعدد گرمایی مربوط به نفوذ در پهنه کانه‌دار تکاب- تخت سلیمان- انگوران تشکیل شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به کانسارهای طلا- آرسنیک زرشوران، طلا- آنتیموان آغ‌دره، طلا- آرسنیک- آنتیموان عربشاه، سرب- روی- طلای چیچکلو، سرب- روی- نقره آی‌قلعه‌سی، کانه‌زایی سرب- روی- طلای آراپاچای، کانه‌زایی مس- طلای آغاتاق و کانسار مس (طلا- کبالت) بایچه‌باغ اشاره کرد. مجموعه کانه‌زایی‌های مزبور در ارتباط با توده‌های اسیدی نیمه‌آتشفشانی مربوط به میوسن در نظر گرفته شده‌اند (Mehrabi et al., 1999; Daliran, 2008; Heidari et al., 2015). در کانسار روی- سرب (نقره) حلب (Karami, 2018; Karimi et al., in press) که در فاصله حدود ۵ کیلومتری شمال‌باختر رخداد معدنی طلای حلب و در داخل توالی دگرگونه این منطقه واقع شده است، شواهدی از دگرگونی مجاورتی و هاله اسکارنوفیدی همراه با کانه‌زایی آهن قابل مشاهده است. هرچند رخنمونی از توده نفوذی در کانسار روی- سرب (نقره) حلب دیده نمی‌شود اما در فاصله هوایی حدود ۷/۵ کیلومتری جنوب‌باختر این کانسار، توده‌های نیمه‌آتشفشانی داسیتی در منطقه چیچکلو رخنمون دارند که عامل کانه‌زایی سرب- روی- طلای چیچکلو می‌باشند (Daliran, 2008). به نظر می‌رسد که عملکرد سیالات گرمایی مشتق از بخش‌های عمقی این توده‌های نفوذی موجب دگرگونی حرارتی و تشکیل هاله اسکارنوفیدی در کانسار روی- سرب (نقره) حلب شده باشد. رخداد معدنی طلای حلب نیز در فاصله هوایی حدود ۹ کیلومتری توده‌های داسیتی نیمه‌آتشفشانی منطقه چیچکلو واقع شده است. با توجه به ویژگی‌های ساخت و بافتی کانه‌زایی طلا در رخداد معدنی حلب، شاید بتوان عملکرد سیالات گرمایی مشتق از بخش‌های عمقی توده‌های اسیدی مزبور را در تشکیل این کانه‌زایی مؤثر دانست. به‌طور کلی، با توجه به ویژگی‌های صحرایی، ساخت و بافت، کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی در رخداد معدنی طلای حلب می‌توان کانه‌زایی غیراقتصادی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد در این رخداد معدنی را معادل دگرگون و دگرشکل شده بخش‌های لایه‌ای و افشان کانسارهای سولفید توده‌ای تیپ بشی در نظر گرفت. در نتیجه عملکرد فازهای ماگمایی جوان در پهنه



شکل ۱۱- تصویر شماتیک از مراحل تکامل کانه‌زایی در رخداد معدنی طلای حلب؛ (a) تشکیل توالی آتشفشانی- رسوبی منطقه در یک محیط ریفتی داخل کمانی. کانه‌زایی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد اولیه به صورت لامینه‌های چینه‌سان هم‌زمان با توالی مزبور تشکیل شده است، (b) چین‌خوردگی واحدهای میزبان همراه با توسعه ساختارهای سیگما و بودین‌شدگی، رشد در سایه فشار و دوزدن برگ‌وارگی غالب سنگ اطراف بلورهای پیریت طی رخداد دگرشکلی و دگرگونی ناحیه‌ای، (c) نفوذ توده نیمه‌آتشفشانی داسیتی به‌داخل واحدهای دگرگون و دگرشکل‌شده و تشکیل کانه‌زایی گرمایی (آرسنوپیریت + طلا) به‌صورت هم‌پوشان بر روی کانه‌زایی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد اولیه و (d) بالآمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش.

Fig. 11. Schematic representation of mineralization evolution stages at the Halab Au occurrence; (a) Formation of volcano-sedimentary units of the area within a continental rifted arc. Primary volcanogenic massive sulfide mineralization occurs as stratiform laminates contemporaneous with host strata, (b) Folding of host units and development of  $\delta$ -type structure, boudinage, pressure-shadow and surrounding of main foliation around pyrite porphyroclasts during deformation and regional metamorphism, (c) Dacitic subvolcanic plutons intruded into the deformed and metamorphosed rock units. Intrusion of these plutons caused formation of hydrothermal mineralization (arsenopyrite- gold) which is overprinted the primary volcanogenic massive sulfide mineralization and (d) Regional exhumation and development of weathering and erosion processes.



## نتیجه گیری

کانه‌زایی در رخدادهای معدنی حلب در ابتدا به صورت کانه‌زایی غیراقتصادی روی-مس با ژئومتری چینه‌سان-چینه‌کران هم‌زمان با فعالیت‌های آتشفشانی-رسوبی درون یک حوضه کششی داخل کمائی تشکیل شده است که طی فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی بعدی مورد رونقشی قرار گرفته است. مقایسه شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ساخت و بافتی این کانه‌زایی اولیه با انواع کانسارهای روی-مس نشان می‌دهد که این کانه‌زایی را می‌توان معادل دگرگون و دگرشکل‌شده بخش‌های لایه‌ای و افشان کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد نوع بشی طبقه‌بندی کرد. کانه‌زایی طلا در این رخداد معدنی در ارتباط با یک فاز گرمایی تأخیری تشکیل شده و کانه‌زایی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد اولیه را رونقش کرده است. این فاز گرمایی نتیجه عملکرد توده‌های اسیدی نیمه‌آتشفشانی میوسن در پهنه تکاب - تخت‌سلیمان - انگوران می‌باشد که به تشکیل کانه‌زایی‌های متعدد فلزات گران‌بها مانند

زرشوران، آغ‌دره، عربشاه، چیچکلو، آی‌قلعه‌سی، آریاچای، آغاتاق و بایچه‌باغ در این پهنه فلززایی منجر شده است. از این رو، بررسی واحدهای سنگی در نزدیکی توده‌های اسیدی نیمه‌آتشفشانی میوسن از نظر اکتشاف کانه‌زایی فلزات گران‌بها در پهنه کانه‌دار تکاب - تخت‌سلیمان - انگوران حائز اهمیت می‌باشد. تعمیم این شواهد به مناطق مشابه در این پهنه و سایر مناطق مشابه در پهنه سنندج - سیرجان می‌تواند به شناسایی این نوع از کانه‌زایی‌ها منجر گردد.

## قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش تشکر می‌نمایند. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از سردبیر و داوران محترم مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته به‌خاطر راهنمایی‌های علمی که منجر به غنای بیشتر مقاله حاضر گردیده است، تشکر نمایند.

## منابع

- Asadi, H.H., Voncken, J.H.L., Kühnel, R.A., Hale, M., 2000. Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran. *Mineralium Deposita* 5 (7), 656–671.
- Boni, M., Gilg, H.A., Balassone, G., Schneider, J., Allen, C.R., Moore, F., 2007. Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran. *Mineralium Deposita* 42 (8), 799–820.
- Chongying, R., Weihua, L., Zhijvn, Z., Mingqin, H., Haoshou, C., 1995. Rifting cycle and storeyed texture of copper deposits and their geochemical evolution in Kangdian region. *CNKI* 38 (5), 606–612.
- 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.
- Daliran, F., Hofstra, A.H., Walther, J., Stüben, D., 2002. Aghdarreh and Zarshuran SRHDG deposits, Takab region, NW Iran. Annual Meeting, Geological Society of America (GSA), Denver, USA.
- Daliran, F., Pride, K., Walther, W., Berner, Z.A., Bakker, R.J., 2013. The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: Evidence for a two stage, hypogene zinc sulfide-zinc carbonate mineralization. *Ore Geology Reviews* 53, 373–402.
- Daliran, F., Walther, J., Stüben, D., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization in the North Takab geothermal field, NW-Iran. In: C.J., Stanley, et al. (Eds.), *Mineral Deposits: Processes to Processing. Proceed. 5<sup>th</sup> Bienn. SGA Meeting and 10th Quadr. IAGOD Meeting*, pp. 837–840.
- Dubé, B., Gosselin, P., Mercier-Langevin, P., Hannington, M., Galley, A., 2007. Gold-rich volcanogenic massive sulphide deposits. In: W.D., Goodfellow (Editor), *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, pp. 75–94.
- Feridooni, Z., Azimzadeh, A.M., Kouhestani, H., Moayyed, M., Marangi, H., 2016. Study of magnetite/ hematite mineralization in Halab Fe deposit with using petrography and geochemistry of silicic inclusions. 8<sup>th</sup> Symposium of Iranian Society of Economic Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran. (In Persian with English abstract)
- Fonoudi, M., Hariri, A., 1999. Geological map of Takab, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Franklin, J.M., Gibson, H.L., Jonasson, I.R., Galley, A.G., 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits. In: J.W., Hedenquist, J.F.H., Thompson, R.J., Goldfarb and J.P., Richards (Editors), *Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume*, pp. 523–560.
- Ghaderi, Z., 2019. Geology, geochemistry and genesis of Kousaj iron mineralization, SW Zanjan. Unpublished MSc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 74 pp. (In Persian with English abstract)
- Ghaderi, Z., Kouhestani, H., Tofighi, F., 2020. Geology, geochemistry and genesis of the Kosaj Fe occurrence, Takab-Takht-e-Soleiman-Angouran metallogenic zone, SW Zanjan. *Advanced Applied Geology* 10 (3), 294–313 (In Persian with extended English abstract).

- Gibson, H.L., Allen, R.L., Riverin, G., Lane, T.E., 2007. The VMS model: Advances and application to exploration targeting. In Proceedings of Exploration 7, 713–730.
- Gibson, H.L., Morton, R.L., Hudak, G.J., 1999. Submarine volcanic processes, deposits, and environments favorable for the location of volcanic-associated massive sulfide deposits. Reviews in Economic Geology 8, 13–51.
- Gilg, H.A., Boni, M., Balassone, G., Allen, C.R., Banks, D., Moore, F., 2006. Marble-hosted sulphide ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: Interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex. Mineralium Deposita 41(1), 1–16.
- Goodfellow, W.D., 2007. Metallogeny of the Bathurst Mining Camp, northern New Brunswick. In: W.D., Goodfellow (Editor), Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, pp. 449–469.
- Heidari, M., Ghaderi, M., Kouhestani, H., 2017. Arabshah epithermal Au mineralization within sedimentary host rock, SE Takab, NW Iran. Scientific Quarterly Journal, Geosciences 27(105), 265–282. (In Persian with English abstract)
- Heidari, S.M., Daliran, F., Paquette, J.L., Gasquet, D., 2015. Geology, timing, and genesis of the high sulfidation Au (-Cu) deposit of Touzlar, NW Iran. Ore Geology Reviews 65, 460–486.
- Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization (IMIDRO), 2017. Final exploration report of Angouran zone. Ministry of Industry, Mine and Trade, Zanjan Province, Zanjan, Iran, 250 pp. (In Persian)
- Karami, F., 2018. Geology, geochemistry and genesis of Halab Zn-Pb (Ag) deposit (SW Zanjan). Unpublished MSc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 122 pp. (In Persian with English abstract)
- Karami, F., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Azimzadeh, A.M., in press. Halab deposit, southwest of Zanjan: Volcanogenic massive sulfide Zn-Pb (Ag) mineralization in the Takab-Takht-e-Soleyman-Angouran metallogenic zone. Journal of Economic Geology (In Persian with extended English abstract)
- Karbasi, A., 2015. Halab Pb-Zn exploration report. Ministry of Industry, Mine and Trade, Zanjan Province, Zanjan, Iran, 154 pp. (In Persian)
- Klemd, R., Maiden, K.J., Okrusch, M., 1987. The Matchless copper deposit, southwest Africa/ Namibia: a deformed and metamorphosed massive sulphide deposit. Economic Geology 82 (3), 587–599.
- Langevin, P.M., McNicoll, V., Allen, R.L., Blight, J.H.S., Dubé, B., 2013. The Boliden gold-rich volcanogenic massive sulfide deposit, Skellefte district, Sweden: new U-Pb age constraints and implications at deposit and district scale. Mineralium Deposita 48 (4), 485–504.
- Maanijou, M., Salemi, R., 2014. Mineralogy, chemistry of magnetite and genesis of Korkora-1 iron deposit, east of Takab, NW Iran. Journal of Economic Geology 6 (2), 355–374. (In Persian with extended English abstract)
- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. Composition of the Earth. Chemical Geology 120 (3-4), 223–253.
- Mehrabi, B., Yardley, B.W.D., Cam, J.R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. Mineralium Deposita 34 (7), 673–696.
- Mohamadi, Z., Ebrahimi, M., Kouhestani, H., 2014. The Goorgoor Fe occurrence, NE of Takab: A metamorphosed volcano-sedimentary mineralization in the Sanandaj-Sirjan zone. Advanced Applied Geology 4 (13), 20–32. (In Persian with English abstract)
- Mohammadi Niaei, R., Daliran, F., Nezafati, N., Ghorbani, M., Sheikh Zakariaei, J., Kouhestani, H., 2015. The Ay Qalasi deposit: An epithermal Pb-Zn (Ag) mineralization in the Urumieh-Dokhtar Volcanic Belt of northwestern Iran. Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry) 192 (3), 263–274.
- Nafisi, R., 2018. Geology, geochemistry and genesis of Halab Au mineralization, southwest of Zanjan. Unpublished MSc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 152 pp. (In Persian with English abstract)
- 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)
- Najafzadeh, M., Ebrahimi, M., Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H., 2017. The Arabshah occurrence: An epithermal Au-As-Sb Carlin type mineralization in the Takab-Angouran-Takht-e-Soleyman metallogenic zone, western Azerbaijan. Advanced Applied Geology 6 (22), 61–76. (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., in press. Geochemistry and petrogenesis of the Alamkandi granitoid and Fe skarn (west of Mahneshan, Zanjan province). *Journal of Economic Geology* (In Persian with extended English abstract)
- Peccerillo, A., Barberio, M.R., Yirgu, G., Ayalew, D., Barbieri, M., Wu, T.W., 2003. Relationships between mafic and peralkaline silicic magmatism in continental rift settings: a petrological, geochemical and isotopic study of the Gedesma Volcano, Central Ethiopian Rift. *Journal of Petrology* 44 (11), 2003–2032.
- Poulsen, K.H., 2000. Geological classification of Canadian gold deposits. *Bulletin of Geological Survey of Canada* 540, 1–106.
- Pourmohamad, F., Kouhestani, H., Azimzadeh, A.M., Nabatian, Gh. and Mokhtari, M.A.A., 2019. Mianaj iron occurrence, southwest of Zanjan: Metamorphosed and deformed volcano-sedimentary type of mineralization in Sanandaj–Sirjan zone. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 28 (111), 161–174 (In Persian with English abstract)
- Rahmati, N., Mokhtari, M.A.A., Ebrahimi, M., Nabatian, Gh., 2017. Geology, mineralogy, structure and texture of Agh-Otagh base-precious metal mineralization, North Takab. *Petrology* 8 (30), 157–180 (In Persian with English abstract).
- Shelley, D., 1993. *Igneous and metamorphic Rock under the microscope*. Chapman and Hall, London, 445 pp.
- Shinjo, R., Kato, Y., 2000. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism in the Okinawa Trough, an incipient back arc basin. *Lithos* 54 (3-4), 117–137.
- Slack, J.F., Offield, T.W., Woodruff, L.G., Shanks, W.C., 2001. Geology and geochemistry of Besshi-type massive sulfide deposits of the Vermont copper belt. *U.S. Society of Economic Geologists, Guidebook Series* 35, 193–211.
- Stix, J., Kennedy, B., Hannington, M., Gibson, H., Fiske, R., Mueller, W., Franklin, J.M., 2003. Caldera-forming processes and the origin of submarine volcanogenic massive sulfide deposits. *Geology* 31(4), 375–378.
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: A review. *American Association of Petroleum Geologists* 52 (7), 1229–1258.
- Talebi, L., Mokhtari, M.A.A., Ebrahimi, M. and Kouhestani, H., 2017. The Arpachay mineralization occurrence, north of Takab: An epithermal base metal mineralization in the Takab–Angouran–Takht-e-Soleyman metallogenic zone. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 16 (104), 281–296.
- Tofighi, F., 2017. Geology and petrology of metamorphic host rocks of Halab Fe mineralization (SW Dandi, Zanjan) with considering geochemistry and genesis of mineralization. Unpublished MSc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran. (In Persian with English abstract)
- Tofighi, F., Mokhtari, M.A.A., Izadyar, J., Kouhestani, H., 2019. Geology and genesis of Halab 2 Fe occurrence in Takab–Takht-e-Soleiman–Anguoran metallogenic zone. *Advanced Applied Geology* 8 (27), 44–59 (In Persian with extended English abstract)
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95 (1), 185–187.
- Yardley, B.W.D., MacKenzie, W.S., Guilford, C., 1997. *Atlas of metamorphic rocks and their textures*. Longman Scientific and Technical, London, 1200 pp.