

## Geology, geochemistry and genesis of the Kosaj Fe occurrence, Takab–Takht-e-Soleiman–Angouran metallogenic zone, SW Zanjan

Zahra Ghaderi Piraghom<sup>1</sup>, Hossein Kouhestani<sup>1\*</sup>, Farkhondeh Tofighi<sup>1</sup>

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

**Keywords:** Iron mineralization, Volcano-sedimentary, Kosaj, Zanjan, Takab–Takht-e-Soleyman–Angouran

### 1-Introduction

Kosaj Fe occurrence, 100 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 most important 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. Aside from small scale geological maps of the area, i.e., 1:250,000 geological maps of Takab (Alavi and Omid, 1976) and 1:100,000 geological maps of Takht-e-Soleyman (Babakhani and Ghalamghash, 1996) and several unpublished exploration reports (Rostami, 2014), before this research no work had been done on Fe mineralization at Kosaj. The present paper provides an overview of the geological framework, the mineralization characteristics, and the geochemical features of the Kosaj Fe occurrence with an application for the ore genesis. Identification of these characteristics can be used as a model for exploring this type of Fe mineralization in this area and other parts of the TTAMZ.

### 2-Methodology

Detailed fieldwork has been carried out at different scales of the Kosaj area. 34 polished-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 seven samples of barren host rock and ore samples at the Kosaj Fe occurrence were analyzed by XRF and ICP-MS for major and trace elements and REE compositions, at Zarazma laboratory, Tehran, Iran.

### 3- Results and discussion

The host rocks at the Kosaj area consist of Precambrian deformed metamorphic sequence (equal to Kahar Formation, Babakhani and Ghalamghash, 1996) unconformably overlain by dolomitic marbles of Jangoutaran. The metamorphic sequence composed of mafic (garnet-amphibole schist and actinolite-hornblende schist), pelitic (garnet-muscovite-biotite schist, garnet-biotite-muscovite schist, garnet-biotite schist, biotite-muscovite schist, and muscovite schist), and felsic (quartz schist) schist units intercalated with marble and quartzite. These rocks are metamorphosed in amphibolite and greenschist facies.

Mineralization at Kosaj occurs as NW-SE-trending lens-shaped bodies and layers parallel to the foliation of muscovite schist and actinolite-hornblende schist units. It reaches up to 100 m in length and 20 m in width and is generally dipping to the NE at 40 to 80°. Fe mineralization occurs as alternations of magnetite-quartz and magnetite-actinolite bands in the outcrops, which are parallel to the foliation of host rocks. The average Fe (t) grade of mineralized samples is 38.75 (Rostami, 2014). Three stages of mineralization can be distinguished at Kosaj. The first stage is related to pre-metamorphism and pre-deformation processes and is formed concurrently with the volcano-sedimentary host rocks. This stage is recognized as stratiform and strata-bound lenses, laminated and disseminated crystals of magnetite-quartz and magnetite-actinolite bands parallel to host rocks foliation. The second stage is syn-metamorphism and syn-deformation. It is recognized by folding magnetite-quartz and magnetite-actinolite bands,  $\sigma$  microfabric, boudinage, elongation of magnetite crystals, quartz

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

DOI: 10.22055/AAG.2020.30531.2026

Received 2019-08-01

Accepted 2020-02-06

pressure shadows surrounding of foliation around magnetite crystals, and recrystallization of quartz and magnetite crystals. Brecciated magnetite-quartz vein-veinlets recognize Stage-3.

#### 4-Conclusions

Actinolitization, silicification, and martitization are the main hydrothermal alteration types at Kosaj. Based on mineralography, magnetite is the primary ore mineral at Kosaj, accompanied by minor pyrite. Hematite and goethite are supergene minerals. Quartz and actinolite present as gangue mineral at Kosaj. The ore minerals show disseminated, laminated, banded, lenticular, massive, vein-veinlet, and replacement textures. The Chondrite-nonmineralized REE pattern of host rocks and the mineralized samples indicate that mineralized samples are depleted in REE.

The geological, mineralogical, geochemical, textural, and structural characteristics of the Kosaj Fe occurrence reveal that it is comparable with metamorphosed and deformed volcano-sedimentary type of iron deposits. The lenticular shaped and banded-laminated forms of Fe mineralization parallel to host rocks foliation along with similar folding of host units and magnetite-quartz and magnetite-actinolite bands indicated that Fe mineralization at Kosaj was contemporaneous with the formation of volcano-sedimentary units. Recognition of these characteristics can be used as exploration tools to explore this type of Fe mineralization at TTAMZ.

#### Acknowledgments

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

#### 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.
- Babakhani, A.R., Ghalamghash, J., 1996. Geological map of Takht-e-Soleyman, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- 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, 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. 5thbienn. SGA Meeting and 10th Quadr. IAGOD Meeting, pp. 837-840.
- 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.
- Mehrabi, B., Yardley, B.W.D., Cam, J.R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita* 34, 673-696.
- Rostami, H., 2014. Kosaj Fe exploration report. Ministry of Industry, Mine and Trade, Zanjan Province, Zanjan, Iran, 139 pp. (In Persian)
- 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:

Ghaderi Piraghoum, Z., Kouhestani, H., Tofighi, F., 2020. Geology, geochemistry and genesis of the Kosaj Fe occurrence, Takab-Takht-e-Soleiman-Angouran metallogenic zone, SW Zanjan. *Adv. Appl. Geol.* 10(3), 294-313.

DOI: 10.22055/AAG.2020.30531.2026

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_15340.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_15340.html?lang=en)

## زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و ژنز رخداد معدنی آهن کوسج، پهنه فلززایی تکاب - تخت‌سلیمان - انگوران،

## جنوب‌باختر زنجان

زهرا قادری پیراقوم

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

حسین کوهستانی\*

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

فرخنده توفیقی

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۷

\*kouhestani@znu.ac.ir

## چکیده

رخداد معدنی آهن کوسج در پهنه فلززایی تکاب-تخت‌سلیمان-انگوران واقع شده است. کانه‌زایی آهن در کوسج به صورت عدسی‌شکل و لایه‌ای درون واحدهای مسکوویت شیبستی و اکتینولیت هورنبلند شیبستی (معادل سازند کهر) رخ داده است. کانی‌های معدنی شامل مگنتیت همراه با میزان اندکی پیریت بوده و کوارتز و اکتینولیت کانی‌های باطله هستند. بافت کانسنگ شامل دانه‌پراکنده، نواری و لامینه‌ای، توده‌ای، عدسی‌شکل، رگه-رگچه‌ای و جانیشینی است. سه مرحله کانه‌زایی در رخداد معدنی کوسج قابل تفکیک است. مرحله اول کانه‌زایی به صورت مگنتیت‌های دانه-پراکنده، لایه‌ای - لامینه‌ای و عدسی‌های چین‌ه‌سان و چین‌کران متشکل از تناوب نوارهای مگنتیت-کوارتز و مگنتیت-اکتینولیت هم‌رند با برگوارگی واحدهای میزبان مشاهده می‌شود. مرحله دوم کانه‌زایی با چین‌خوردگی نوارهای کانه‌دار، تشکیل ریزساختارهای سیگما، بودین‌شدگی و کشیدگی در بلورهای مگنتیت، رشد سایه‌فشاری کوارتز و دور زدن برگ‌وارگی در اطراف بلورهای مگنتیت و تبلور مجدد بلورهای کوارتز و مگنتیت مشخص می‌شود. کانه‌زایی مرحله سوم با رگه و رگچه‌های مگنتیتی-کوارتزی پرشی مشخص می‌شود. دگرسانی‌ها شامل سیلیسی، اکتینولیتی و هماتیتی است. بررسی الگوی تغییرات عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت در سنگ‌های میزبان فاقد کانه‌زایی و بخش‌های کانه‌دار بیانگر تهی-شدگی این عناصر در بخش‌های کانه‌دار است. ویژگی‌های رخداد معدنی کوسج با کانسارهای آهن نوع آتشفشانی-رسوبی دگرگون و دگرشکل‌شده قابل مقایسه است.

کلمات کلیدی: کانه‌زایی آهن، آتشفشانی-رسوبی، کوسج، زنجان، تکاب-تخت‌سلیمان-انگوران

## مقدمه

(1996) واقع شده‌اند. پژوهش‌های اخیر انجام‌شده بر روی کانسارهای گورگور (Mohamadi et al., 2014)، حلب ۱ (Feridooni, 2017)، حلب ۲ (Tofighi et al., 2019) و میانج (Pourmohamad et al., 2019)، تیپ کانه‌زایی آهن در این رخداد‌های معدنی را آتشفشانی-رسوبی دگرگون و دگرشکل‌شده معرفی کرده است. این کانه‌زایی‌ها ژئومتری لایه‌ای و عدسی-شکل دارند و با برگوارگی واحدهای شیبستی میزبان خود هم‌رند می‌باشند. رخداد معدنی کوسج یکی از کانی‌سازی‌های آهن موجود در منطقه حلب است که ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی مشابهی با دیگر کانه‌زایی‌های آهن موجود در این منطقه دارد. با وجود انجام مطالعات اکتشافی سیستماتیک در این رخداد معدنی (Rostami, 2014) تاکنون مطالعه علمی دقیقی بر روی آن انجام نشده است. در این مقاله، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمیایی رخداد معدنی آهن کوسج بررسی و تیپ کانه‌زایی و مدل تشکیل آن تعیین شده است. مطالعه دقیق این نوع کانه‌زایی‌ها می‌تواند عوامل کلیدی توزیع زمانی و مکانی برای اکتشاف کانه‌زایی‌های مشابه را در پهنه فلززایی تکاب-تخت‌سلیمان-انگوران معرفی کند و به‌عنوان الگوی اکتشافی مورد استفاده قرار دهد.

رخداد معدنی آهن کوسج در فاصله ۱۰۰ کیلومتری جنوب‌باختر زنجان قرار گرفته و بخشی از منطقه دگرگونی حلب در پهنه کانه‌دار تکاب-تخت‌سلیمان-انگوران می‌باشد. از دیدگاه فلززایی این پهنه یکی از ایالت‌های فلززایی مهم در ایران محسوب می‌شود. کانسارهای طلای زرشوران (Daliran et al., 1999, 2002; Mehrabi et al., 1999; Asadi et al., 1999, 2000)، آق‌دره (Daliran, 2008) و تولار (Heidari et al., 2015a, b; Heidari et al., 2013) همراه با کانسارهای سرب و روی انگوران (Daliran et al., 1999, 2013; Gilg et al., 2006; Boni et al., 2019; Shirkhani, 2007; Zhuang et al., 2019; et al., 2007) سرب-روی-نقره آی‌قلعه‌سی (Mohammadi Niaei, 2015; Mohammadi et al., 2015) و رخداد معدنی طلای حلب (Nafisi et al., 2015) در این منطقه قرار دارند. مطالعات اکتشافی انجام‌شده طی سال‌های اخیر در منطقه حلب منجر به شناسایی رخدادها و آنومالی‌های متعددی از کانه‌زایی‌های آهن در این بخش از پهنه تکاب-تخت‌سلیمان-انگوران شده است. از مهم‌ترین این کانه‌زایی‌ها می‌توان به رخداد‌های معدنی گورگور، حلب ۱، حلب ۲، میانج و کوسج اشاره کرد که همگی درون توالی سنگ‌های دگرگونی معادل سازند کهر (Babakhani and Ghalamghash, 2019)

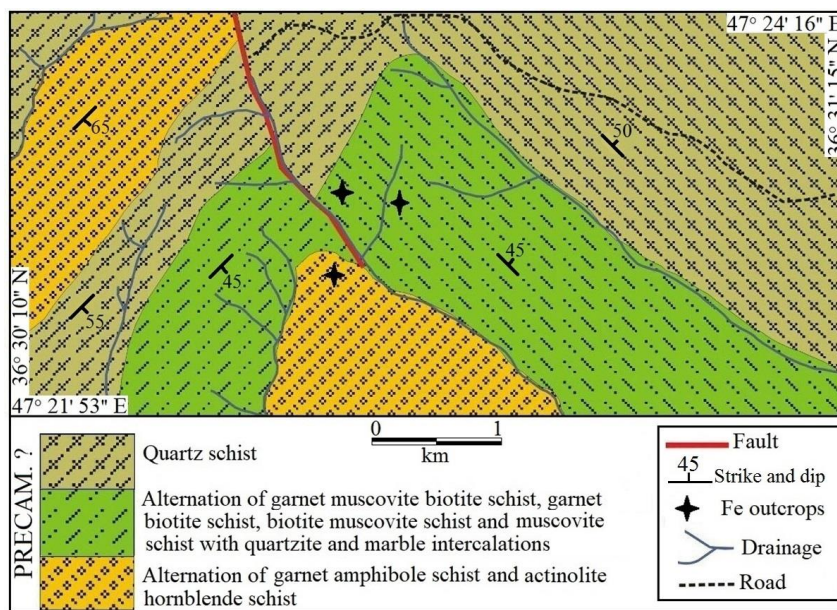
## روش کار

این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی می‌باشد. مطالعات صحرایی شامل شناسایی عدسی‌های آهن و چگونگی ارتباط آنها با سنگ‌های میزبان و نمونه‌گیری از آنها برای مطالعات آزمایشگاهی بوده است. در این راستا، علاوه بر انجام مطالعات صحرایی و تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰، بیش از ۴۰ نمونه از واحدهای سنگی میزبان و رخنمون‌های کانی‌سازی برداشت شد. از این بین، تعداد ۲۲ مقطع نازک و ۱۲ مقطع نازک- صیقلی برای مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت، تهیه و مطالعه گردید. سپس به منظور انجام مطالعات زمین‌شیمیایی و اندازه‌گیری عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی، تعداد ۳ نمونه از سنگ- های میزبان و ۴ نمونه از بخش‌های کانه‌دار انتخاب و به روش‌های XRF و ICP-MS در آزمایشگاه شرکت زرآما در تهران آنالیز شد.

## زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه کوسج

در تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌ساختی- رسوبی ایران (Stocklin, 1968)، رخداد معدنی آهن کوسج در بخش شمالی پهنه سندانج- سیرجان واقع شده و بخشی از ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی تخت‌سلیمان (Babakhani and Ghalamghash, 1996) می‌باشد. براساس مطالعات

صحرایی انجام‌شده در قالب تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ منطقه کوسج (شکل ۱) و با توجه به ستون سنگ‌شناسی تهیه شده از این منطقه (شکل ۲)، واحدهای سنگی منطقه کوسج شامل ردیفی از شیست‌های پلیتی، مافیک و فلسیک همراه با میان‌لایه‌هایی از مرمر و کوارتزیت به سن پرکامبرین (معادل سازند کهر) هستند که در حد رخساره شیست سبز تا آمفیبولیت دگرگون شده‌اند (Babakhani and Ghalamghash, 1996). روندهای عمومی برگوارگی واحدهای سنگی منطقه عمدتاً شمال‌باختر- جنوب‌خاور با شیب به سمت شمال‌خاور (N20W/45NE) می‌باشد. براساس ستون سنگ‌شناسی منطقه (شکل ۲)، واحدهای سنگی موجود از قدیم به جدید شامل تناوب گارنت آمفیبول شیست و اکتینولیت هورنبلند شیست، تناوب گارنت مسکوویت شیست، گارنت بیوتیت شیست، بیوتیت مسکوویت شیست و مسکوویت شیست با میان‌لایه‌های کوارتزیت و مرمر و در نهایت کوارتز شیست است. دولومیت‌های مرمری‌شده موسوم به مرمرهای جان‌گوتاران بر روی توالی واحدهای دگرگونه قبلی رانده شده‌اند (شکل ۳). زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی این واحدها به شرح زیر است.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ منطقه کوسج.

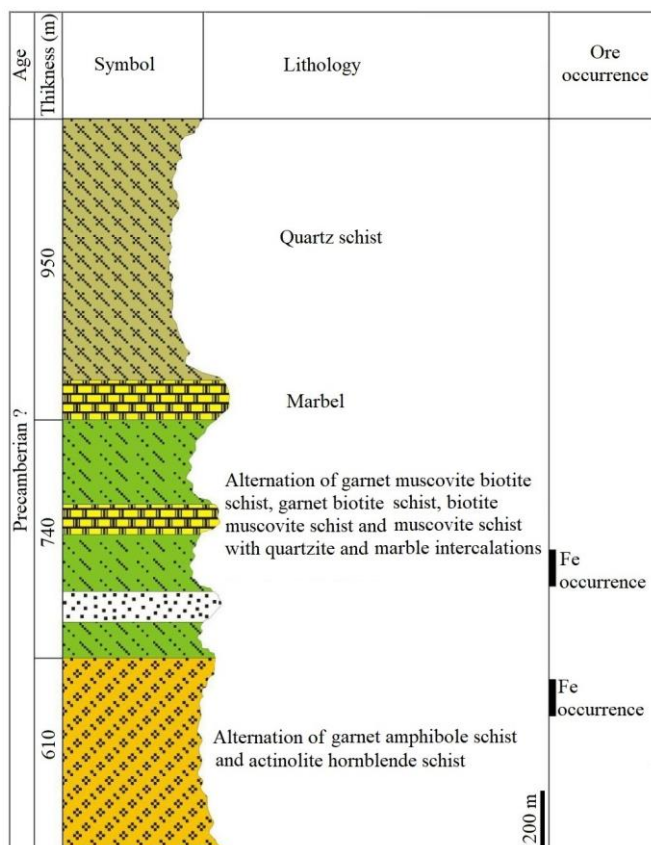
Fig. 1. Geological map (scale, 1:20000) of the Kosaj area.

اول،  $S_1$ ) با فابریک خمیده می‌باشند (شکل ۲a و b). این فابریک نشان‌دهنده چرخش بلور و تشکیل هم‌زمان آن با فرایند دگرشکلی مرحله اول می‌باشد. با توجه به ادخال‌های کوارتز و آلکالی فلدسپار درون گارنت با فابریک خمیده و زاویه‌دار نسبت به برگوارگی خارجی ( $S_2$ )، تشکیل این گارنت‌ها را می‌توان قبل تا هم‌زمان با دگرشکلی مرحله اول در نظر گرفت. گارنت‌ها اغلب ساختار سایه‌فشاری نامتقارن با دنباله‌هایی از جنس کوارتز نشان می‌دهند. وجود حاشیه‌های سایه‌فشاری از بلورهای کوارتز، دورزدن برگوارگی نسل دوم ( $S_2$ ) اطراف بلورهای گارنت و چرخش بلور و خوردگی حاشیه‌های آن از شواهد تشکیل پوئی‌کیولاست گارنت قبل از فرایند دگرشکلی مرحله دوم در سنگ‌های گارنت مسکوویت بیوتیت شیستی می‌باشد. بلورهای بیوتیت که

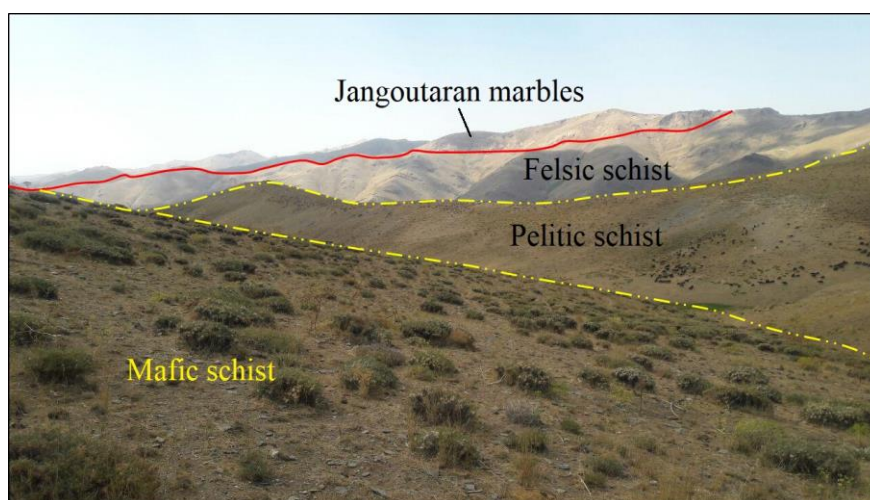
شیست‌های پلیتی: این گروه سنگی از مهم‌ترین واحدهای شیستی موجود در منطقه و میزبان بخشی از کانه‌زایی آهن منطقه می‌باشند. براساس مطالعات سنگ‌نگاری، شیست‌های پلیتی شامل انواع گارنت مسکوویت بیوتیت شیست، گارنت بیوتیت مسکوویت شیست، گارنت بیوتیت شیست، بیوتیت مسکوویت شیست و مسکوویت شیست می‌باشند. گارنت مسکوویت بیوتیت شیست‌ها دارای فابریک‌های پورفیروبلاستیک، پوئی‌کیولوبلاستیک، لپیدوبلاستیک و گرانوبلاستیک می‌باشند. از نظر کانی‌شناسی، این سنگ‌ها از بیوتیت، مسکوویت، گارنت، کوارتز، آلکالی فلدسپار و کلریت تشکیل شده‌اند. پورفیروبلاست‌های گارنت به صورت بلورهای خودشکل و نیمه‌خودشکل بوده و اغلب دارای ادخال‌هایی از جنس کوارتز و آلکالی فلدسپار (برگوارگی نسل

S<sub>2</sub> سنگ قرار گرفته‌اند (شکل d۴). تشکیل این بیوتیت‌ها بعد از دگرشکلی مرحله دوم می‌باشد. بلورهای مسکوویت با منطقه‌بندی شیمیایی مشخص در بخش‌های مرکزی و حاشیه، از دیگر کانی‌های تشکیل‌دهنده برگوارگی S<sub>2</sub> سنگ هستند (شکل a۴). بلورهای کوارتز با خاموشی موجی و مرزهای مرضی در همراهی با بلورهای ناهم‌بعد آکالی فلدسپار فابریک گرانوبلاستیک سنگ را تشکیل داده‌اند.

اغلب به صورت بلورهای سبز و قهوه‌ای بی‌شکل تا نیمه‌خودشکل با ابعاد حدود ۱ میلی‌متر دیده می‌شوند، در این سنگ به دو نسل قابل تفکیک هستند. بیوتیت‌های نسل اول شامل بلورهایی هستند که برگوارگی S<sub>2</sub> سنگ را تشکیل داده‌اند (شکل c۴). این بیوتیت‌ها بعضاً به کلریت دگرسان شده‌اند. این نسل از بیوتیت هم‌زمان با دگرشکلی مرحله دوم تشکیل شده‌اند. بیوتیت‌های نسل دوم به صورت درشت‌بلورهای خودشکل بوده و بر روی برگوارگی



شکل ۲- ستون سنگ‌نگاری عمومی رخداد معدنی آهن کوسج براساس پیمایش‌های صحرائی انجام شده.  
 Fig. 2. General lithological column of the Kosaj Fe occurrence based on field works.



شکل ۳- نمایی از توالی شیست‌های مافیک، پلیتی و فلسیک در منطقه کوسج که با ارتباطی گسله (تراستی) توسط ممرهای جان‌گوتاران پوشیده شده‌اند (دید به سمت باختر).  
 Fig. 3. A view from the alternation of mafic, pelitic and felsic schists in the Kosaj area thrust by Jangoutaran marbles (view to the west).

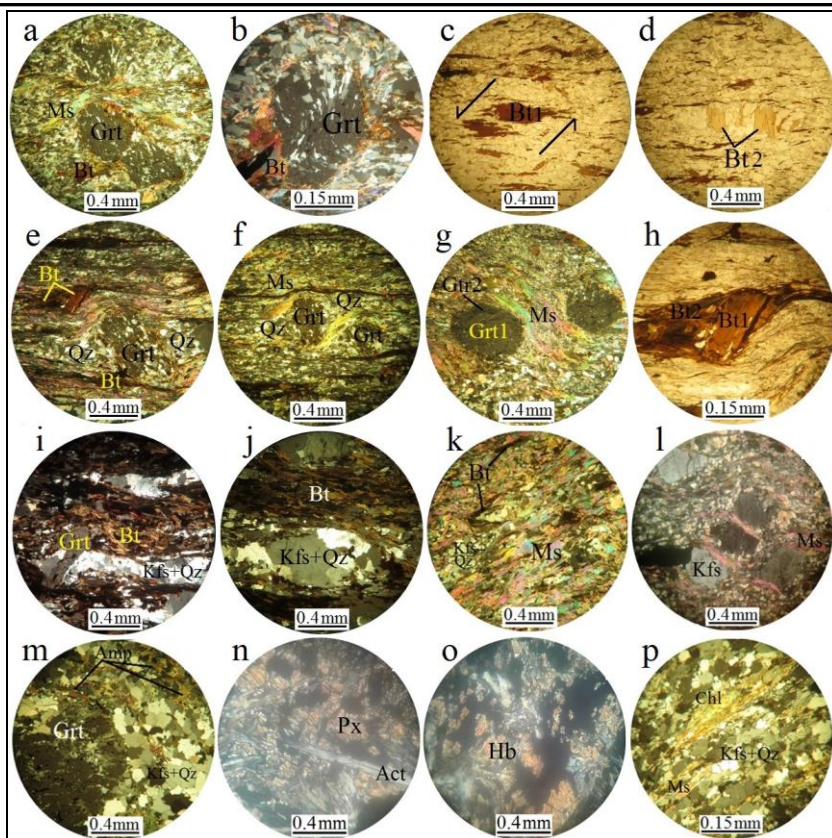
نسبت به مسکوویت و در همراهی با این کانی در راستای برگراری سنگ قابل شناسایی است. کوارتز و آلکالی فلدسپار زمینه سنگ را تشکیل داده و فابریک گرانوبلاستیک را به وجود آورده‌اند. مسکوویت شیبته‌ها دارای فابریک‌های لپیدوبلاستیک و گرانوبلاستیک بوده و از بلورهای کوارتز، آلکالی فلدسپار، مسکوویت و کانی‌های کدر تشکیل شده‌اند. بلورهای کوارتز دارای خاموشی موجی و مرزهای مضرسی می‌باشد. آلکالی فلدسپارها در این سنگ‌ها دارای ابعاد متوسط تا درشت بوده و در بخش‌هایی ساختار سیگما از خود نشان می‌دهند که برگراری سنگ آنها را دور زده است (شکل ۱۴). مسکوویت‌ها دارای منطقه‌بندی شیمیایی مشخص هستند به‌طوری‌که در مرکز رنگ تداخلی صورتی و در حاشیه رنگ تداخلی زرد را از خود نشان می‌دهند. این کانی‌ها در راستای برگراری سنگ و در بین بلورهای دانه‌ای کوارتز و آلکالی فلدسپار حضور دارند.

**شیبته‌های بازیگ:** این توالی شامل گارنت آمفیبول شیبته و اکتینولیت هورنبلند شیبته می‌باشد. شواهد میکروسکوپی حاکی از اینست که این مجموعه سنگی محصول دگرگونی توف‌ها و گدازه‌هایی با ماهیت بازیگ می‌باشد. فابریک‌های موجود در گارنت آمفیبول شیبته‌ها شامل پورفیروبلاستیک، نماتوبلاستیک و گرانوبلاستیک می‌باشد. گارنت آمفیبول شیبته‌ها از کانی‌های آمفیبول، گارنت، کوارتز، آلکالی فلدسپار و کانی‌های کدر تشکیل شده‌اند (شکل ۱۴). آمفیبول‌های موجود در این سنگ‌ها تغییر رنگ نارنجی، بنفش تا سبز داشته و در برخی بخش‌ها، دارای رخ‌های لوزی-شکل واضحی هستند که نشان‌دهنده ترکیب هورنبلندی آنها می‌باشد. پورفیروبلاست‌های گارنت به‌صورت بلورهای بسیار درشت در این سنگ‌ها دیده می‌شوند. بلورهای کوارتز و آلکالی فلدسپار به‌صورت ناهم بعد در این سنگ‌ها حضور دارند. اکتینولیت هورنبلند شیبته‌ها دارای فابریک غالب نماتوبلاستیک بوده و کانی‌های تشکیل‌دهنده آنها شامل هورنبلند، اکتینولیت، پیروکسن و اسفن می‌باشد (شکل ۱۴ و ۱۵). درشت‌بلورهای بی-شکل پیروکسن در نور عبوری پلاریزه متقاطع به رنگ تداخلی نارنجی و در نور معمولی گرمی رنگ با برجستگی بسیار بالا دیده می‌شوند. دو نوع آمفیبول در این سنگ‌ها قابل شناسایی می‌باشد. آمفیبول‌های نوع اکتینولیت که به‌صورت درشت‌بلورهای خودشکل و نیمه‌خودشکل سوزنی دیده می‌شوند. گروه دیگر آمفیبول‌های موجود در این سنگ‌ها از نوع هورنبلند می‌باشند که به‌صورت بلورهای بی‌شکل رخ‌دار و چندرنگی قابل شناسایی هستند.

**شیبته‌های اسیدی:** این توالی شامل کوارتز شیبته‌ها می‌باشد. شواهد میکروسکوپی حاکی از اینست که این مجموعه سنگی محصول دگرگونی توف‌های اسیدی می‌باشد. کوارتز شیبته‌ها دارای فابریک‌های گرانوبلاستیک و لپیدوبلاستیک بوده و از کانی‌های کوارتز، آلکالی فلدسپار، مسکوویت و کلریت تشکیل شده‌اند (شکل ۱۴). بیش از ۹۰ درصد این سنگ‌ها از کوارتز و آلکالی فلدسپار تشکیل شده است. تحت تأثیر تنش و فشارهای دینامیکی، مرز دانه‌های کوارتز اغلب مضرسی شده (Yardly, 1990) و خاموشی موجی نشان می‌دهند. بلورهای ریز مسکوویت با فراوانی بسیار اندک در بین بلورهای کوارتز و آلکالی فلدسپار حضور دارند. کلریت از دیگر کانی‌های تشکیل‌دهنده این کوارتز شیبته‌ها می‌باشد.

گارنت بیوتیت مسکویت شیبته‌ها از گارنت، مسکوویت، بیوتیت، کوارتز و آلکالی فلدسپار تشکیل شده و دارای فابریک‌های پورفیروبلاستیک، پوئی-کلیوبلاستیک، لپیدوبلاستیک و گرانوبلاستیک می‌باشند. پورفیروبلاست‌های گارنت در این سنگ‌ها به‌صورت نیمه‌خودشکل حضور داشته و دارای ادخال-هایی از کوارتز و آلکالی فلدسپار هستند (شکل ۱۴ و ۱۵). برگراری داخلی گارنت‌ها نسبت به برگراری خارجی سنگ زاویه دارد. وجود حاشیه‌های سایه‌فشاری از بلورهای کوارتز، دورزدن برگراری نسل دوم اطراف بلورهای گارنت (شکل ۱۴ و ۱۵) و چرخش بلور از شواهد تشکیل پورفیروبلاست‌های گارنت قبل از فرایند دگرشکلی مرحله دوم در این سنگ‌ها است. برخی از بلورهای گارنت دو مرحله رشد را نشان می‌دهند (شکل ۱۴). در مرحله نخست، بلورهای کاملاً شکل‌دار تشکیل شده است. رشد این گارنت‌ها هم‌زمان با مرحله اول دگرگونی و دگرشکلی می‌باشد. گارنت‌های مرحله دوم که با مرزی مشخص از گارنت‌های مرحله اول جدا می‌شوند، هم‌زمان با تشکیل برگراری غالب سنگ (مرحله دوم دگرگونی و دگرشکلی) تشکیل شده‌اند اما پیش از آنکه این برگراری به‌طور کامل پدیدار شود، رشد بلور در این مرحله پایان یافته و در نتیجه، برگراری پورفیروبلاست‌های گارنت را دور زده است. بلورهای صفحه‌ای بیوتیت در گارنت بیوتیت مسکوویت شیبته‌ها به دو نسل قابل تفکیک می‌باشند (شکل ۱۴). نسل اول شامل بیوتیت‌هایی است که به‌صورت خودشکل و متقاطع با برگراری غالب سنگ ( $S_2$ ) بوده و برگراری آنها را دور می‌زند. رشد این بیوتیت‌ها هم‌زمان با مرحله اول دگرگونی و دگرشکلی می‌باشد. نسل دوم بیوتیت‌ها به‌صورت خودشکل و نیمه‌خودشکل در راستای برگراری سنگ تشکیل شده و بیوتیت‌های نسل اول را دور می‌زنند. این بیوتیت‌ها هم‌زمان با تشکیل برگراری غالب سنگ (مرحله دوم دگرگونی و دگرشکلی) و بعد از بیوتیت‌های نسل اول تشکیل شده‌اند. بلورهای مسکوویت با منطقه‌بندی شیمیایی مشخص در بخش‌های مرکزی و حاشیه در راستای برگراری غالب سنگ ( $S_2$ ) تشکیل شده‌اند (شکل ۱۴ و ۱۵). این بلورها معمولاً به رنگ‌های تداخلی سبز تا صورتی دیده می‌شوند. بلورهای دانه‌ای کوارتز با خاموشی موجی و مرزهای مضرسی اغلب در همراهی با بلورهای آلکالی فلدسپار با فابریک گرانوبلاستیک در سنگ قابل شناسایی می‌باشند.

گارنت بیوتیت شیبته‌ها دارای فابریک‌های پورفیروبلاستیک، لپیدوبلاستیک و گرانوبلاستیک بوده و کانی‌های تشکیل‌دهنده آنها شامل بیوتیت، گارنت، کوارتز، آلکالی فلدسپار، اسفن و کانی‌های کدر می‌باشد (شکل ۱۴ و ۱۵). بلورهای خودشکل و نیمه‌خودشکل بیوتیت که به رنگ تداخلی سبز تا سبز تیره در نور عادی قابل شناسایی می‌باشند، کانی اصلی این سنگ‌ها است. این بلورها در راستای برگراری سنگ تشکیل شده و در بخش‌هایی بلورهای گارنت را دور می‌زنند (شکل ۱۴). گارنت به‌صورت پورفیروبلاست‌های بی‌شکل با فراوانی اندک حضور دارد. بلورهای کوارتز در همراهی با آلکالی فلدسپارها به‌صورت دانه‌ای و یا نواری کنار هم قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴ و ۱۵). بیوتیت مسکوویت شیبته‌ها از کانی‌های مسکوویت، بیوتیت، کوارتز، آلکالی فلدسپار و کانی‌های کدر تشکیل شده و دارای فابریک‌های لپیدوبلاستیک و گرانوبلاستیک می‌باشند (شکل ۱۴). بلورهای مسکوویت با منطقه‌بندی شیمیایی مشخص در بخش‌های مرکزی و حاشیه در این سنگ‌ها، برگراری سنگ را تشکیل می‌دهند. بیوتیت با فراوانی کمتر



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی (c, d و h در نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL و بقیه در نور عبوری پلاریزه مقاطع، XPL) از واحدهای سنگی در منطقه کوسج. (a) درشت‌بلورهای خودشکل گارنت با فابریک‌های انکلوژیونی مستقیم و پورفیروبلاستیک در گارنت مسکوویت بیوتیت شیست‌ها، (b) فابریک انکلوژیونی خمیده در پورفیروبلاست گارنت در گارنت مسکوویت بیوتیت شیست‌ها، (c) بیوتیت نسل اول با فابریک میکاماهی در گارنت مسکوویت بیوتیت شیست‌ها، (d) بلورهای بیوتیت نسل دوم در گارنت مسکوویت بیوتیت شیست‌ها که برگوارگی سنگ را قطع کرده‌اند، (e) فابریک‌های پورفیروبلاستیک، پوئی‌کیلوبلاستیک و لپیدوبلاستیک در گارنت بیوتیت مسکوویت شیست‌ها، پورفیروبلاست گارنت دارای ادخال‌هایی از جنس کوارتز و آلکالی فلدسپار بوده و برگوارگی داخلی گارنت با برگوارگی خارجی سنگ زاویه می‌سازد، (f) ساختار سایه فشاری گارنت با دنباله‌هایی از جنس کوارتز در گارنت بیوتیت مسکوویت شیست‌ها، (g) پورفیروبلاست‌های گارنت نسل اول و دوم در گارنت بیوتیت مسکوویت شیست‌ها، (h) بلورهای بیوتیت نسل اول و دوم با فابریک پورفیروبلاستیک و لپیدوبلاستیک در گارنت بیوتیت مسکوویت شیست‌ها، (i) فابریک‌های پورفیروبلاستیک، لپیدوبلاستیک و گرانوبلاستیک در گارنت بیوتیت شیست‌ها، (j) عدسی کوارتز-فلدسپاتی با فابریک گرانوبلاستیک در گارنت بیوتیت شیست‌ها، (k) فابریک‌های لپیدوبلاستیک و گرانوبلاستیک در بیوتیت مسکوویت شیست‌ها، (l) دور زدن برگوارگی سنگ در اطراف بلورهای فلدسپات در مسکوویت شیست‌ها، (m) بلورهای تشکیل‌دهنده و فابریک‌های پورفیروبلاستیک، نامتوبلاستیک و گرانوبلاستیک در گارنت آمفیبول شیست‌ها، (n) درشت‌بلورهای پیروکسن و اکتینولیت سوزنی‌شکل در اکتینولیت هورنبلند شیست‌ها، (o) بلورهای بی‌شکل هورنبلند در اکتینولیت هورنبلند شیست‌ها و (p) فابریک‌های گرانوبلاستیک و لپیدوبلاستیک در کوارتز شیست‌ها. علائم اختصاری کلی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Act): اکتینولیت، (Amp): آمفیبول، (Bt): بیوتیت، (Chl): کلریت، (Grt): گارنت، (Hb): هورنبلند، (Kfs): آلکالی فلدسپار، (Ms): مسکوویت، (Px): پیروکسن، (Qz): کوارتز.

Fig 4. Photomicrographs (c, d and h in transmitted PPL, and the rest in XPL) of rock units in the Kosaj area. (a) Euhedral garnet phenocryst with direct inclusion and porphyroblastic fabrics in garnet-muscovite-biotite schist, (b) Curved inclusion fabric within garnet phenocryst in garnet-muscovite-biotite schist, (c) Stage 1 biotite (Bt1) with mica fish fabric in garnet-muscovite-biotite schist, (d) Stage 2 biotite (Bt2) crosscutting the foliation of garnet-muscovite-biotite schist, (e) Porphyroblastic, poikiloblastic and lepidoblastic fabrics in garnet-biotite-muscovite schist. Garnet porphyroblast has quartz and alkali feldspar inclusions, and internal foliation of garnet makes angle with external foliation of the rock, (f) Pressure shadow fabric of quartz around the garnet in garnet-biotite-muscovite schist, (g) Stage 1 and 2 garnet porphyroblasts (Grt1 and Grt2) in garnet-biotite-muscovite schist, (h) Stage 1 and 2 biotite with porphyroblastic and lepidoblastic fabrics in garnet-biotite-muscovite schist, (i) Porphyroblastic, lepidoblastic and granoblastic fabrics in garnet-biotite schist, (j) Quartz-feldspar lens with granoblastic fabric in garnet-biotite schist, (k) Lepidoblastic and granoblastic fabrics in biotite-muscovite schist, (l) Surrounding of foliation around the feldspar crystals in muscovite schist, (m) Rock-forming minerals along with porphyroblastic, nematoblastic and granoblastic fabrics in garnet-amphibole schist, (n) Pyroxene and needle-shaped actinolite phenocrysts in actinolite-hornblende schist, (o) Granoblastic and lepidoblastic fabrics in quartz schist. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Act: actinolite, Amp: amphibolite, Chl: chlorite, Grt: garnet, Hb: hornblende, Kfs: alkali feldspar, Ms: muscovite, Px: pyroxene, Qz: quartz).

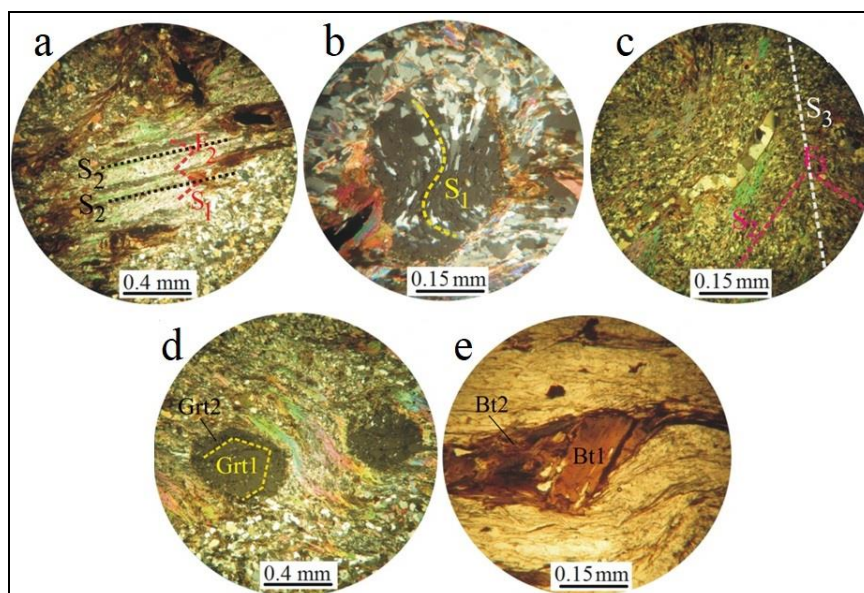
### دگرشکلی

مرحله از دگرشکلی را می‌توان به صورت برگوارگی نسل اول ( $S_1$ ) در یال چین‌های جناغی نسل دوم ( $F_2$ ) (شکل ۵a) و به صورت فابریک انکلوژیونی  $S_1$  مستقیم تا خمیده در گارنت‌های موجود در گارنت میکاشیست‌ها (شکل ۵b) مشاهده کرد. با توجه به هم‌زمانی این مرحله از دگرشکلی با دگرگونی،

با توجه به نتایج مطالعات ریزساختاری، سه مرحله دگرشکلی در واحدهای شیستی منطقه کوسج قابل شناسایی است. دگرشکلی مرحله اول، قدیمی‌ترین دگرشکلی موجود در منطقه می‌باشد. شواهد ریزساختاری مرتبط با این

اظهار داشت که بخش‌هایی مرکزی این بلورها نیز هم‌زمان با دگرشکلی مرحله اول تشکیل شده‌اند. شواهد ریزساختاری مرتبط با دگرشکلی مرحله دوم به صورت گسترش برگوارگی نسل دوم ( $S_2$ ) در سنگ‌های منطقه قابل شناسایی است (شکل c5). این برگوارگی محصول چین‌خوردگی برگوارگی نسل اول ( $S_1$ ) می‌باشد که سبب تشکیل چین‌های نسل دوم ( $F_2$ ) شده است (شکل a5). رشد بخش‌های حاشیه‌ای پورفیروبلاست‌های خودشکل گارنت (گارنت نسل دوم) در گارنت بیوتیت مسکوویت شیست‌ها هم‌زمان با این مرحله از دگرشکلی است (شکل d5) اما قبل از آنکه برگوارگی ( $S_2$ ) به طور کامل پدیدار شود، رشد بلور پایان یافته و در نتیجه، برگوارگی، پورفیروبلاست‌ها را دور زده است. رشد بلورهای بیوتیت، مسکوویت، کلریت، کوارتز و آلکالی فلدسپارهای موجود در راستای برگوارگی سنگ ( $S_2$ ) نیز هم‌زمان با دگرشکلی مرحله دوم رخ داده است. تشکیل برگوارگی نسل سوم ( $S_3$ ) و چین‌های کنگره‌ای نسل سوم ( $F_3$ ) از شواهد ریزساختاری مرتبط با دگرشکلی مرحله سوم در سنگ‌های منطقه کوسج می‌باشند (شکل c5).

برخی از پورفیروبلاست‌ها از جمله گارنت، بیوتیت و آلکالی فلدسپار در این مرحله به صورت هم‌زمان با دگرشکلی مرحله اول رشد کرده‌اند. پورفیروبلاست‌های گارنت موجود در واحدهای شیستی منطقه دارای ادخال‌هایی از فابریک انکلوژیونی خمیده کوارتز و آلکالی فلدسپار می‌باشند (شکل b5) که اصطلاحاً فابریک گلوله برفی نیز به آنها اطلاق می‌شود. این فابریک نشان‌دهنده چرخش بلور و تشکیل هم‌زمان آن با دگرشکلی مرحله اول می‌باشد (Barker, 1991). از آنجاییکه بلورهای گارنت دارای ادخال‌های برگوارگی  $S_1$  هستند که با حالت خمیده و زاویه زیاد نسبت به برگوارگی خارجی ( $S_2$ ) قرار گرفته‌اند، می‌توان اظهار داشت که این بلور هم‌زمان با دگرشکلی مرحله اول تشکیل شده است. بخش هسته گارنت‌های شکل‌دار (گارنت نسل اول) موجود در گارنت بیوتیت مسکوویت شیست‌ها نیز هم‌زمان با دگرشکلی مرحله اول تشکیل شده‌اند (شکل d5). دور زدن برگوارگی غالب سنگ ( $S_2$ ) در اطراف بیوتیت‌های نسل اول نشان می‌دهد این نسل از بیوتیت‌ها نیز هم‌زمان با دگرشکلی مرحله اول تشکیل شده‌اند (شکل e5). با توجه به منطقه‌بندی شیمیایی در آلکالی فلدسپارها و مسکوویت‌ها می‌توان



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی (e در نور پلاریزه صفحه ای، PPL و بقیه نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از شواهد ریزساختاری مرتبط با رخداد دگرشکلی‌ها در منطقه کوسج، (a) برگوارگی نسل اول ( $S_1$ ) در یال چین‌های نسل دوم ( $F_2$ ) و گسترش برگوارگی نسل دوم ( $S_2$ ), (b) فابریک انکلوژیونی خمیده در ادخال‌های کوارتزی درون پوئی کیلوبلاست گارنت، (c) برگوارگی نسل دوم ( $S_2$ ) در یال چین‌های نسل سوم ( $F_3$ ) و گسترش برگوارگی نسل سوم ( $S_3$ ), (d) رشد دو مرحله‌ای گارنت هم‌زمان با مراحل مختلف دگرشکلی در منطقه کوسج. گارنت نسل اول (بخش مرکزی) هم‌زمان با دگرشکلی مرحله اول و گارنت نسل دوم (بخش حاشیه‌ای) هم‌زمان با دگرشکلی دوم تشکیل شده‌اند و (e) رشد درشت‌بلور بیوتیت نسل اول هم‌زمان با دگرشکلی مرحله اول و دور زدن بیوتیت نسل دوم اطراف آن هم‌زمان با گسترش برگوارگی نسل دوم ( $S_2$ ). علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (BT1: بیوتیت نسل اول، BT2: بیوتیت نسل دوم، Grt1: گارنت نسل اول، Grt2: گارنت نسل دوم).

Fig. 5. Photomicrographs (e is in PPL, and the other photos are in transmitted light, XPL) of microfabrics related to deformation events at the Kosaj area. (a) Stage 1 ( $S_1$ ) foliation in the edge of stage 2 folds ( $F_2$ ) and development of stage 2 foliation ( $S_2$ ), (b) Curved inclusion fabric in quartz inclusions within garnet poikiloblast, (c) Stage 2 ( $S_2$ ) foliation in the edge of stage 3 folds ( $F_3$ ) and development of stage 3 foliation ( $S_3$ ), (d) Two-step growth of garnet accompanied with different stages of deformation events at the Kosaj area. Stage 1 garnet (central part) is formed contemporaneous with stage 1 deformation, while stage 2 garnet (marginal part) is formed during stage 2 deformation, (e) Growth of stage 1 biotite phenocryst contemporaneous with stage 1 deformation that is surrounded by stage 2 biotite during development of stage 2 foliation ( $S_2$ ). Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (BT1: stage 1 biotite, BT2: stage 2 biotite, Grt1: stage 1 garnet, Grt2: stage 2 garnet).

### کانه‌زایی و دگرسانی

سنگی عمدتاً به صورت تناوب نوارهای مگنتیت-کوارتز و مگنتیت-اکتینولیت قابل مشاهده بوده و از برگوارگی واحدهای میزبان تبعیت می‌کند. در بخش‌های شمالی منطقه، کانه‌زایی آهن به صورت عدسی شکل هم‌روند با

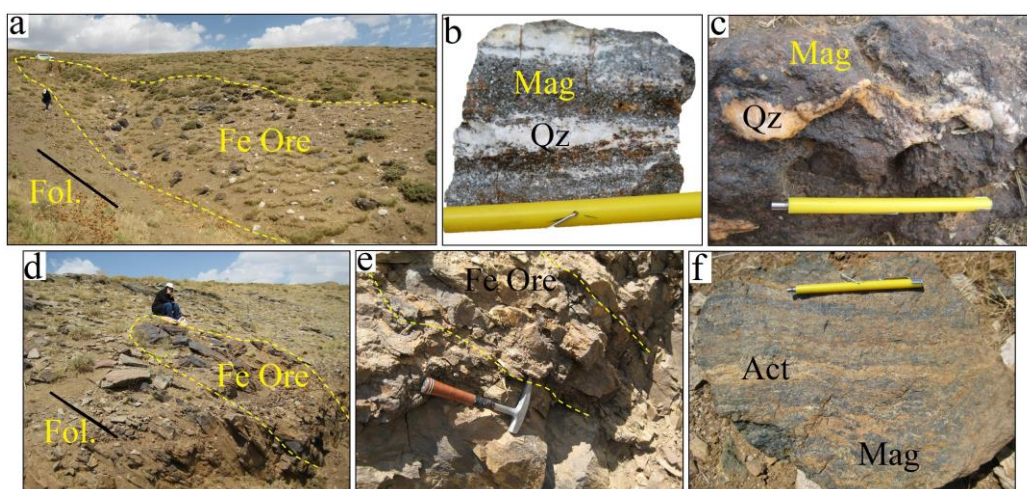
براساس مطالعات صحرائی انجام‌شده، کانه‌زایی آهن در رخداد معدنی کوسج به صورت عدسی‌شکل و لایه‌ای درون واحدهای مسکوویت شیستی و اکتینولیت هورنبلند شیستی رخ داده است. کانی‌سازی آهن در رخنمون‌های



لایه کانه‌دار در این بخش حدود ۵۰ متر درازا و ۲ متر پهنا داشته و امتداد آن همانند بخش شمالی، شمال‌باختر- جنوب‌خاور با شیب حدود ۴۰ درجه به سمت شمال‌خاور می‌باشد (شکل ۶e). کانه‌زایی آهن در رخنمون‌های سنگی این بخش شامل تناوب نوارهای مگنتیت و اکتینولیت با ساخت نواری می‌باشد (شکل ۶f). ستبرای نوارهای مگنتیتی- اکتینولیتی به‌طور معمول از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر متغیر است. ضخامت نوارهای مگنتیتی گاه تا ۱۰ سانتی‌متر می‌رسد. این نوارها نیز به موازات برگوارگی واحدهای میزبان دیده شده و همانند این واحدها، پارامترهای دگرریختی مانند چین‌خوردگی را نشان می‌دهند. براساس مطالعات Rostami (۲۰۱۴) مقدار ذخیره آهن در رخداد معدنی کوسج ۷۶۰۰۰ تن با عیار متوسط ۳۸/۸۵ درصد آهن کل می‌باشد.

برگوارگی واحدهای مسکوویت شیستی رخ داده است. رخنمون اصلی کانه‌زایی در این بخش حدود ۱۰۰ متر درازا و ۲۰ متر پهنا داشته و امتداد آن شمال‌باختر- جنوب‌خاور با شیب حدود ۴۵ درجه به سمت شمال‌خاور می‌باشد (شکل ۶a).

کانه‌زایی آهن در رخنمون‌های سنگی این بخش شامل تناوب نوارهای مگنتیت- کوارتز با ساخت لامینه‌ای می‌باشد (شکل ۶b). ستبرای نوارهای مگنتیت- کوارتز به‌طور معمول از چند میلی‌متر تا ۵ سانتی‌متر متغیر است. ضخامت نوارهای مگنتیتی به‌ندرت تا ۲۰ سانتی‌متر می‌رسد. این نوارها به موازات برگوارگی واحدهای میزبان دیده شده و همانند این واحدها، پارامترهای دگرریختی مانند چین‌خوردگی را نشان می‌دهند (شکل ۶c). در بخش جنوبی منطقه، کانه‌زایی آهن به‌صورت عدسی و لایه‌ای شکل درون واحد اکتینولیت هورنبلند شیستی رخ داده است (شکل ۶d و ۶e). رخنمون

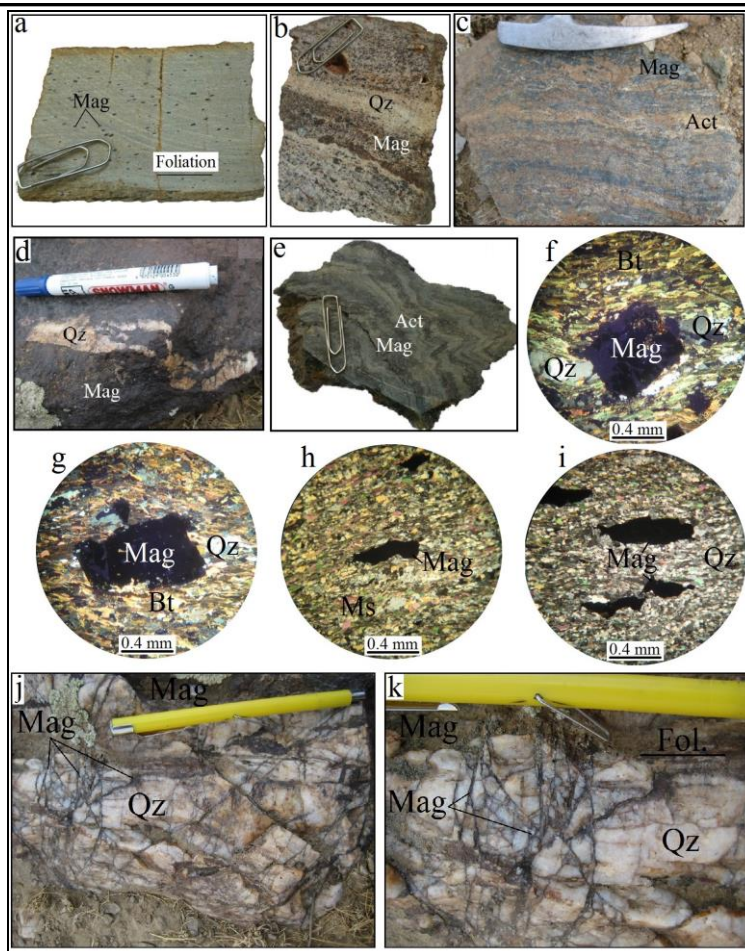


شکل ۶- (a) نمای از رخنمون کانه‌زایی آهن در بخش شمالی رخداد معدنی کوسج. کانه‌زایی آهن به‌صورت عدسی شکل و هم‌روند با برگوارگی واحدهای مسکوویت شیستی میزبان رخ داده است (دید به سوی شمال‌خاور)، (b) نمای نزدیک از کانه‌زایی آهن در بخش شمالی رخداد معدنی کوسج به‌صورت تناوب نوارهای مگنتیت و کوارتز، (c) چین‌خوردگی در نوارهای مگنتیت و کوارتز، (d و e) نمای از رخنمون کانه‌زایی آهن در بخش جنوبی رخداد معدنی کوسج. کانه‌زایی آهن به‌صورت عدسی شکل (d) و لایه‌ای (e) هم‌روند با برگوارگی واحدهای اکتینولیت هورنبلند شیستی میزبان رخ داده است. دید در تصویر d به سوی شمال‌خاور است و (f) نمای نزدیک از کانه‌زایی آهن در بخش جنوبی رخداد معدنی کوسج به‌صورت تناوب نوارهای مگنتیت و اکتینولیت. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Act: اکتینولیت، Mag: مگنتیت، Qz: کوارتز).

Fig. 6. (a) A view of Fe mineralization in the northern part of the Kosaj occurrence. Fe mineralization occurred as lenticular shape parallel to foliation of host muscovite schist units (view to the northeast), (b) Close view of Fe mineralization in the northern part of the Kosaj occurrence as alternation magnetite and quartz bands, (c) Folding of magnetite and quartz bands, (d and e) A view of Fe mineralization in the southern part of the Kosaj occurrence. Fe mineralization occurred as lenticular shape (d) and layer (e) parallel to foliation of host actinolite-hornblende schist units (in d, view to the northeast), and (f) Close view of Fe mineralization in the southern part of the Kosaj occurrence as alternation magnetite and actinolite bands. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Act: actinolite, Mag: magnetite, Qz: quartz).

مگنتیت- کوارتز و مگنتیت- اکتینولیت (شکل ۶d و ۶e)، ایجاد ریز ساختار- هابی مانند ساختار سیگما، رشد سایه‌فشاری کوارتز در اطراف بلورهای مگنتیت، دور زدن برگوارگی در اطراف بلورهای مگنتیت (شکل ۶f و ۶g)، بودین‌شدگی و کشیدگی در بلورهای مگنتیت (شکل ۶h و ۶i) و تبلور مجدد بلورهای کوارتز و مگنتیت در این مرحله رخ داده است. مرحله سوم کانه‌زایی به‌صورت رگه و رگچه‌های مگنتیتی- کوارتزی برشی قابل مشاهده است (شکل ۶j و ۶k). ضخامت رگه و رگچه‌های این مرحله بیشینه تا ۱ سانتی‌متر می‌رسد. با توجه به عدم وجود آثار دگرشکلی شکل‌پذیر و دگرگونی، احتمالاً کانه‌زایی مرحله سوم پس از فرایندهای مزبور تشکیل شده است. این مرحله از کانه‌زایی با فراوانی مگنتیت مشخص شده و نوارهای مگنتیتی- کوارتزی موجود در بخش شمالی منطقه را قطع کرده است.

براساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی انجام‌شده، سه مرحله کانه‌زایی در رخداد معدنی آهن کوسج قابل تفکیک است. مرحله اول کانه‌زایی قبل از رخدادهای دگرگونی و دگرشکلی و هم‌زمان با تشکیل واحدهای آتشفشانی- رسوبی میزبان رخ داده است. این مرحله از کانه‌زایی شامل مگنتیت‌های دانه‌پراکنده، لایه‌ای- لامینه‌ای و عدسی‌های چین‌ه‌سان و چین‌کران متشکل از تناوب نوارهای مگنتیت- کوارتز و مگنتیت- اکتینولیت هم‌روند با برگوارگی واحدهای میزبان مشاهده می‌شود (شکل ۶a تا ۶c). مگنتیت کانی‌شناسی اصلی این مرحله را تشکیل می‌دهد که با اندکی پیریت همراهی می‌شود. اکتینولیت محصول فرایندهای دگرگونی و دگرسانی می‌باشد که جانشین پیروکسن و هورنبلند شده است. کانه‌زایی مرحله دوم حین فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی منطقه رخ داده است. چین‌خوردگی نوارهای



شکل ۷- مراحل کانه‌زایی در رخداد معدنی آهن کوسج. (a) مرحله اول کانه‌زایی به صورت مگنتیت‌های دانه‌پراکنده هم‌روند با برگوارگی واحدهای مسکوویت شیستی، (b و c) مرحله اول کانه‌زایی به صورت تناوب نوارهای مگنتیت- کوارتز (b) و مگنتیت- اکتینولیت (c)، (d و e) چین‌خوردگی در نوارهای مگنتیت- کوارتز (d) و مگنتیت- اکتینولیت (e) طی مرحله دوم کانه‌زایی، (f و g) رشد در سایه فشار بلورهای کوارتز اطراف بلورهای مگنتیت و تشکیل ساختار سیگما طی مرحله دوم کانه‌زایی. در هر دو تصویر، دور زدن برگوارگی اطراف بلورهای مگنتیت نیز قابل مشاهده است، (h و i) بودین‌شدگی و کشیدگی در بلورهای مگنتیت طی مرحله دوم کانه‌زایی و (j و k) مرحله سوم کانه‌زایی به صورت رگه و رگچه‌های پرشی مگنتیتی- کوارتزی که نوارهای مگنتیتی- کوارتزی قبلی کانه‌زایی را قطع کرده‌اند. تصاویر میکروسکوپی در نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL، تهیه شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Act: اکتینولیت، Bt: بیوتیت، Mag: مگنتیت، Ms: مسکوویت، Qz: کوارتز).

Fig. 7. Mineralization stages in the Kosaj Fe occurrence. (a) Stage 1 mineralization as disseminated magnetite parallel to foliation of muscovite schist units, (b and c) Stage 1 mineralization as alternation of magnetite-quartz (b) and magnetite-actinolite (c) bands, (d and e) Folding of magnetite-quartz (d) and magnetite-actinolite (e) bands during stage 2 mineralization, (f and g) Pressure shadow growth of quartz around magnetite that formed  $\delta$  microfabric during stage 2 mineralization. Surrounding of foliation around magnetite crystals are also observed in both figures, (h and i) Boudinage and elongation of magnetite crystals during stage 2 mineralization, (j and k) Stage 3 mineralization as brecciated magnetite-quartz vein-veinlets crosscutting magnetite-quartz bands of previous mineralization stages. Photomicrographs are taken in transmitted light, XPL. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Act: actinolite, Bt: biotite, Mag: magnetite, Ms: muscovite, Qz: quartz).

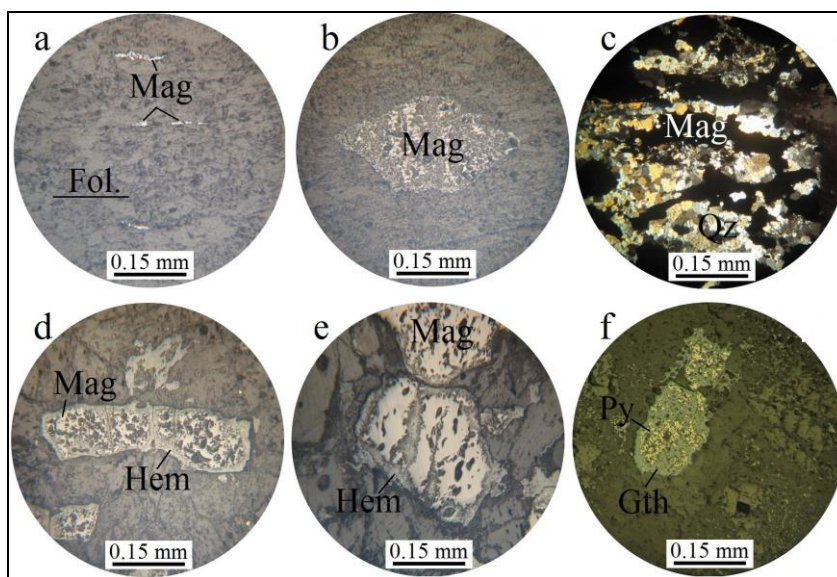
اندازه‌ای شدید است که مگنتیت به‌طور کامل توسط هماتیت جانشین شده است. در اغلب نمونه‌هایی که دچار دگرسانی هماتیتی شده‌اند، مگنتیت ابتدا از حاشیه‌ها به هماتیت و سپس به اکسیدهای آبدار و ثانویه آهن تبدیل شده است. طی دگرسانی اکتینولیتی، کانی‌های مافیک اولیه سنگ (نظیر پیروکسن و هورنبلند) به آمفیبول‌های ثانویه نظیر اکتینولیت تبدیل شده‌اند. این دگرسانی در منطقه کوسج به‌صورت نوارهای مگنتیتی- اکتینولیتی در بخش‌های جنوبی منطقه قابل مشاهده است. دگرسانی سیلیسی در مرحله سوم کانه‌زایی و به‌صورت رگه- رگچه‌های مگنتیتی- کوارتزی دیده می‌شود. اکسیدهای آبدار و ثانویه آهن تقریباً در بیشتر نمونه‌های رخداد معدنی کوسج قابل مشاهده هستند. در این بین، گویت فراوان‌ترین اکسید آهن آب- دار در نمونه‌های مطالعه شده می‌باشد.

براساس نتایج مطالعات صحرایی و میکروسکوپی، دگرسانی در منطقه کوسج از وسعت چندانی برخوردار نیست. بر اساس این مطالعات، دگرسانی- های هماتیتی (مارتیتی شدن) و اکتینولیتی همراه با میزان اندکی دگرسانی سیلیسی و تشکیل اکسیدهای آهن آبدار، مهم‌ترین دگرسانی‌های موجود در بخش‌های کانه‌دار هستند. مارتیتی شدن نوع خاصی از پدیده جانشینی است که در آن مگنتیت از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها به هماتیت دگرسان می‌شوند (Craig and Vaughan, 1994). این دگرسانی در دمای بالا (حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد)، شرایط اسیدی و فشار جزئی اکسیژن رخ می‌دهد (Kato et al., 2007; Lanza et al., 2008). مارتیتی شدن در نمونه‌های منطقه کوسج حاصل جانشینی هماتیت به‌جای مگنتیت از حاشیه- ها و در امتداد سطوح ضعف و رخ‌ها می‌باشد. شدت این دگرسانی بعضاً به

## کانی شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

مطالعات کانه نگاری نشان دهنده کانی شناسی ساده معدنی در رخداد معدنی آهن کوسج می باشد. براساس این مطالعات، مگنتیت کانی اصلی ماده معدنی است که با اندکی پیریت همراهی می شود. هماتیت و گوتیت در اثر فرایندهای برون زاد تشکیل شده اند. براساس این مطالعات، کوارتز و اکتینولیت کانی های اصلی باطله در این رخداد معدنی می باشند. مطالعات صحرایی و میکروسکوپی انجام شده نشان می دهد که بافت ماده معدنی در رخداد معدنی کوسج از نوع دانه پراکنده، نواری و لامینه ای، توده ای، عدسی-شکل، رگه- رگچه ای و جانیشینی می باشد. طی فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی ریزساختارهایی مانند ساختار سیگما، چین خوردگی، بودین شدگی و رشد در سایه فشار ایجاد شده است.

براساس مطالعات ساختی و بافتی، مگنتیت های موجود در بخش های کانه دار را می توان به سه نسل تفکیک کرد. مگنتیت های نسل اول به صورت پورفیروکلاست های درشت شکل دار تا نیمه شکل دار در اندازه های متغیر (گاه تا ۵ میلی متر) دیده می شوند. این مگنتیت ها اغلب به موازات برگورگی سنگ میزبان بوده (شکل ۸a) و آثار بودین شدگی و ساختارهای سیگما در آنها قابل مشاهده است (شکل های fV تا i و b۸). رشد بلورهای کوارتز در سایه واتنشی این مگنتیت ها و دور زدن برگورگی در اطراف آنها نشان می دهد که مگنتیت های نسل اول قبل از فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی در سنگ های میزبان خود حضور داشته اند (Passchier and



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی (تصویر C در نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL و بقیه تصاویر در نور بازتابی) از کانه های موجود در رخداد معدنی کوسج. (a) بلورهای کشیده مگنتیت نسل اول به موازات برگورگی واحد میزبان، (b) بلور درشت مگنتیت نسل اول با ساختار سیگما، (c) مگنتیت های نسل دوم به صورت بلورهای درشت بی شکل در نوارهای مگنتیتی-کوارتزی، (d و e) بلورهای درشت خودشکل تا نیمه خودشکل مگنتیت نسل دوم که از حاشیه ها و در امتداد شکستگی ها به هماتیت دگرسان شده است و (f) بلور درشت پیریت نیمه-خودشکل که از حاشیه ها به گوتیت دگرسان شده است. علائم اختصاری کانی ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Gth: گوتیت، Hem: هماتیت، Mag: مگنتیت، Py: پیریت، Qz: کوارتز).

Fig. 8. Photomicrographs (c in transmitted light, XPL, and the rest in reflectel light) of ore mineralogy at the Kosaj occurrence. (a) Elongated stage 1 magnetite crystals parallel to foliation of host rock, (b) Coarse-grained stage 1 magnetite crystal with  $\delta$  microfabric, (c) Anhedral coarse-grained stage 2 magnetite crystals in magnetite-quartz bands, (d and e) Coarse-grained euhedral to subhedral magnetite crystals altered to hematite along boundaries and cracks, and (f) Coarse-grained subhedral pyrite crystal altered to hematite along boundaries. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Gth: goethite, Hem: hematite, Mag: magnetite, Py: pyrite, Qz: quartz).

قابل تفکیک است (شکل ۹). مرحله اول با حضور عدسی ها، نوارها و لامینه های مگنتیتی- کوارتزی و مگنتیتی- اکتینولیتی مشخص می شود. این

براساس مطالعات انجام شده در مقیاس صحرایی، نمونه دستی و میکروسکوپی، توالی پارائزنی کانی ها در رخداد معدنی کوسج به سه مرحله

منطقه رخ داده و طی آن ساختارهایی مانند چین خوردگی در نوارهای کانه‌دار و ساختار سیگما، رشد در سایه واتنشی و بودین‌شدگی در بلورهای مگنتیت ایجاد شده است. مرحله سوم با تشکیل کوارتز و مگنتیت‌های نسل سوم به- صورت رگه- رگچه‌ای مشخص می‌شود. در مرحله برون‌زاد، کانی‌هایی مانند هماتیت و گوتیت با بافت جانیشینی تشکیل شده‌اند.

مرحله هم‌زمان با تشکیل واحدهای آتشفشانی- رسوبی منطقه و قبل از فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی می‌باشد. مگنتیت به‌صورت بلورهای نیمه-خودشکل، بی‌شکل تا خودشکل و به‌صورت دانه‌پراکنده، نواری و لامینه‌ای تا توده‌ای درون واحدهای میزبان و نوارهای مگنتیتی دیده می‌شود. اکتینولیت محصول فرایندهای دگرگونی و دگرسانی می‌باشد که جانشین پیروکسن و هورنبلند شده است. مرحله دوم هم‌زمان با فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی

|                 |                | Stage 1 | Stage 2 | Stage 3 | Supergene |
|-----------------|----------------|---------|---------|---------|-----------|
| <b>Ore</b>      | Magnetite      | █       |         |         |           |
|                 | Pyrite         | █       |         |         |           |
|                 | Hematite       |         |         |         | █         |
|                 | Goethite       |         |         |         | █         |
| <b>Gangue</b>   | Quartz         | █       |         |         |           |
|                 | Actinolite     |         | █       |         |           |
| <b>Textures</b> | Disseminated   | █       |         |         |           |
|                 | Banded         | █       |         |         |           |
|                 | Laminated      | █       |         |         |           |
|                 | Massive        | █       |         |         |           |
|                 | Lens-shaped    | █       |         |         |           |
|                 | Vein-veinlet   |         |         | █       |           |
|                 | Replacement    |         |         |         | █         |
| <b>Fabric</b>   | Folding        |         | █       |         |           |
|                 | δ-type         |         | █       |         |           |
|                 | Boudinage      |         | █       |         |           |
|                 | Strain shadows |         | █       |         |           |

شکل ۹- توالی پاراژنتیک، ساخت و بافت و فابریک کانی‌های معدنی و باطله در رخداد معدنی آهن کوسج.

Fig. 9. Paragenetic scheme showing the structure and texture and fabric of gangue and ore minerals at the Kosaj Fe occurrence.

نتایج آنالیزهای شیمیایی سنگ‌های میزبان و پهنه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی آهن کوسج در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

### بحث و بررسی

### داده‌های زمین‌شیمی سنگ‌های میزبان و پهنه‌های کانه‌دار

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی برای نمونه‌های رخداد معدنی آهن کوسج، داده‌ها بر حسب درصد وزنی هستند.

Table 1. Geochemical data of major elements for samples of the Kosaj occurrence. All data in ppm.

|              | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | BaO   | CaO   | Fe(t) | K <sub>2</sub> O | MgO   | MnO   | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | LOI   | SO <sub>3</sub> |
|--------------|------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------------------|-------------------------------|------------------|-------|-----------------|
| <b>K-10</b>  | 71.49            | 14.04                          | <0.05 | 0.38  | 2.7   | 0.92             | 2.05  | <0.05 | 4.9               | 0.07                          | 0.55             | 1.74  | <0.05           |
| <b>K-13a</b> | 48.63            | 4.45                           | <0.05 | 17.01 | 7.39  | <0.05            | 8.2   | 0.11  | 2.09              | 2.95                          | 4.24             | 1.45  | 0.24            |
| <b>K-13b</b> | 19.19            | 3.1                            | <0.05 | 2.98  | 49.26 | <0.05            | 3.46  | 0.35  | 1.26              | 0.15                          | 0.38             | <0.05 | <0.05           |
| <b>K-23a</b> | 98.69            | <0.05                          | <0.05 | 0.05  | 0.77  | <0.05            | <0.05 | <0.05 | <0.05             | 0.06                          | <0.05            | 0.1   | <0.05           |
| <b>K-23b</b> | 1.6              | 0.4                            | <0.05 | <0.05 | 69.41 | <0.05            | 0.16  | 0.29  | <0.05             | <0.05                         | 0.24             | <0.05 | 0.13            |
| <b>K-24</b>  | 0.94             | 0.52                           | <0.05 | <0.05 | 68.94 | 0.16             | 0.29  | 0.22  | <0.05             | <0.05                         | 0.26             | <0.05 | <0.05           |
| <b>K-26</b>  | 66.63            | 17.1                           | 0.13  | 3.61  | 7.25  | 0.81             | <0.05 | <0.05 | 0.21              | 0.07                          | 0.34             | 2.07  | <0.05           |

K-10: Barren host muscovite schist, K-13a: Barren host actinolite-hornblende schist, K-13b: Laminated magnetite from magnetite-actinolite bands, K-23a: Laminated quartz from magnetite-quartz bands, K-23b: Laminated magnetite from magnetite-quartz bands, K-24: Massive magnetite, and K-26: Muscovite schist with disseminated magnetite.

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای نمونه‌های رخداد معدنی آهن کوسج، داده‌ها بر حسب گرم در تن می‌باشد.

Table 2. Geochemical data of rare and rare earth elements for samples of the Kosaj occurrence. All data in ppm.

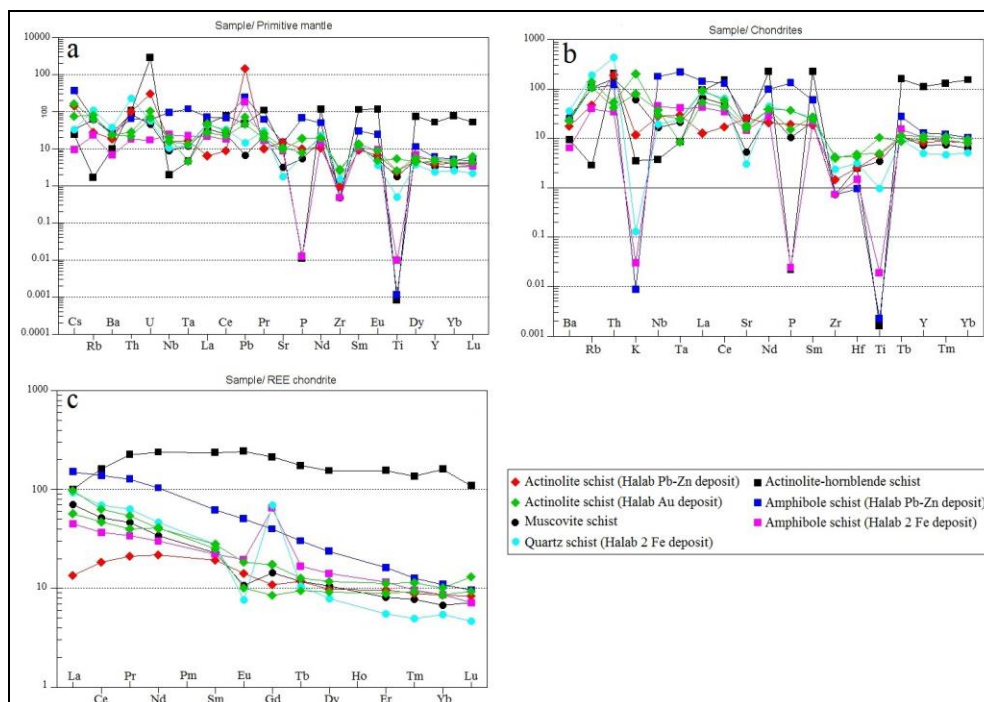
|       | Ag    | As   | Ba   | Cd   | Ce   | Co    | Cr   | Cs   | Cu    | Dy    | Er    | Eu    | Gd    | Hf    |
|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K-10  | <0.1  | 16.2 | 188  | 0.1  | 42   | 7.6   | 44   | 0.7  | 4     | 3.4   | 1.7   | 0.79  | 3.71  | <0.5  |
| K-13a | <0.1  | 11.3 | 65   | 0.04 | 131  | 9.3   | 14   | <0.5 | 7     | 49.87 | 32.74 | 17.09 | 55.32 | <0.5  |
| K-13b | 1.6   | 4.3  | 274  | <0.1 | 2    | 15.1  | 33   | <0.5 | 23    | 3.79  | 2.1   | 1.05  | 3.12  | <0.5  |
| K-23a | 0.3   | 5.2  | 10   | 0.2  | 2    | <1    | 9    | <0.5 | 22    | 0.61  | <0.05 | <0.1  | <0.05 | <0.5  |
| K-23b | 0.2   | 2.4  | 31   | 0.2  | 2    | 4.1   | 9    | <0.5 | 228   | 0.58  | <0.05 | <0.1  | <0.05 | <0.05 |
| K-24  | 0.5   | 9.7  | 166  | <0.1 | 1    | 7.2   | 17   | 0.5  | 225   | 182   | 0.73  | 0.2   | -     | <0.5  |
| K-26  | <0.1  | 1    | 2167 | <0.4 | 39   | 2.3   | 8    | 2    | 6     | 2.96  | 1.12  | 1.74  | 2.73  | <0.5  |
|       | La    | Li   | Lu   | Mo   | Nb   | Nd    | Ni   | Pb   | Pr    | Rb    | S     | Sb    | Sc    | Se    |
| K-10  | 22    | 21   | 0.23 | <0.1 | 5.8  | 20.5  | 28   | <1   | 5.69  | 37    | 53    | 1     | 7.3   | 0.65  |
| K-13a | 31    | 8    | 3.52 | <0.1 | 1.3  | 143   | 5    | 7    | 27.58 | <1    | <50   | <0.5  | 19.3  | 8.1   |
| K-13b | 1     | 1    | 0.26 | <0.1 | 9.8  | 7.2   | 6    | 156  | 1.71  | <1    | 417   | 2     | 3.5   | <0.5  |
| K-23a | 1     | <1   | <0.1 | <0.1 | 1.3  | <0.5  | 3    | <10  | 0.46  | <1    | <50   | 0.7   | <0.5  | <0.5  |
| K-23b | <1    | <1   | <0.1 | <0.1 | 3.8  | <0.5  | 5    | 6    | 0.18  | <1    | 291   | 1.1   | 0.5   | <0.5  |
| K-24  | 2     | <1   | <0.1 | <0.1 | 1.9  | 2     | 9    | 12   | 0.91  | <1    | 297   | 2.1   | 1     | 0.58  |
| K-26  | 21    | 23   | 0.12 | <0.1 | 12.7 | 17.7  | 3    | 3    | 5.15  | 208   | 52    | 0.5   | 4.9   | <0.5  |
|       | Sm    | Sn   | Sr   | Ta   | Tb   | Th    | Tm   | U    | V     | W     | Y     | Yb    | Zn    | Zr    |
| K-10  | 4.44  | 1.4  | 63   | 0.43 | 0.56 | 6.94  | 0.25 | 0.9  | 58    | 1     | 14.3  | 1.4   | 25    | 5     |
| K-13a | 45.93 | 1.1  | 195  | 0.17 | 8.28 | 8.74  | 4.42 | 57.1 | 127   | <1    | 222.6 | 33.6  | 39    | <5    |
| K-13b | 2.95  | 7.8  | 88   | 0.55 | 0.63 | 0.29  | 0.33 | 3.8  | 370   | 1.9   | 16.5  | 1.9   | 31    | 17    |
| K-23a | 0.33  | 0.8  | 5    | 0.13 | <0.1 | <0.1  | <0.1 | 0.1  | 8     | <1    | 2.4   | <0.05 | 38    | <5    |
| K-23b | 0.92  | 5.2  | 8    | 0.2  | <0.1 | <0.1  | <0.1 | 0.2  | 237   | <1    | 2.6   | 0.2   | 175   | 17    |
| K-24  | 0.92  | 5.2  | 8    | 0.17 | 0.23 | <0.1  | 0.14 | 1.3  | 145   | <1    | 7.1   | 0.7   | 95    | 17    |
| K-26  | 3.94  | 8.4  | 89   | 1.22 | 0.49 | 26.23 | 0.18 | 1.1  | 20    | 2.1   | 11.2  | 0.5   | 16    | 16    |

K-10: Barren host muscovite schist, K-13a: Barren host actinolite-hornblende schist, K-13b: Laminated magnetite from magnetite-actinolite bands, K-23a: Laminated quartz from magnetite-quartz bands, K-23b: Laminated magnetite from magnetite-quartz bands, K-24: Massive magnetite, and K-26: Muscovite schist with disseminated magnetite.

### ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های میزبان

الگوهای چند عنصری نمونه‌های اکتینولیت هورنبلند شیبستی و مسکوویت شیستی منطقه کوسج که نسبت به گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995) بهنجار شده‌اند، در شکل ۱۰a نشان داده شده است. براساس این شکل، نمونه‌های منطقه کوسج نیز همانند دیگر نمونه‌های منطقه حلب از عناصر LILE غنی‌شدگی نشان می‌دهند. غنی‌شدگی از عناصر LILE می‌تواند در ارتباط با نقش مواد پوسته‌ای در ناحیه منشأ یا در حین صعود از میان گوشته باشد (Wilson, 1989). نمونه اکتینولیت هورنبلند شیبستی از عناصر Rb و Nb تهی و از عناصر U, Pr, Nd, Sm, Eu, Dy و Yb غنی شده است. نمونه مسکوویت شیبستی الگوی مشابهی با نمونه کوارتز شیبست آهن حلب ۲ نشان داده و از عناصر LILE غنی و از عناصر HFSE (نظیر Ta و Ti) تهی شده است (شکل ۱۰a). هر دو نمونه همانند سایر نمونه‌های ناحیه حلب در عنصر Zr آنومالی منفی نشان می‌دهند. آنومالی منفی عنصر Zr می‌تواند در ارتباط با تفریق و جدایش این عنصر طی فرایندهای ماگمایی باشد. الگوهای عناصر کمیاب بهنجار شده به کندریت (Thompson, 1982) نیز روندی مشابه با الگوی عناصر کمیاب بهنجار شده به گوشته اولیه دارند (شکل ۱۰b). در این نمودار، نمونه اکتینولیت هورنبلند شیبستی دارای آنومالی مثبت عناصر Nd, Sm و Tb می‌باشد. این نمونه همانند نمونه آمفیبول شیبست آهن حلب ۲ دارای آنومالی منفی مشخصی نسبت به عنصر P است. نمونه مسکوویت شیبستی همانند کوارتز شیبست آهن حلب ۲ از عناصر LILE غنی بوده و آنومالی مثبت ضعیفی در عناصر HFSE (نظیر Nb, Ta و Ti) همراه با آنومالی منفی Ba نشان می‌دهند (شکل ۱۰b). این

الگوها را می‌توان به در ارتباط با تشکیل این سنگ‌ها در مناطق کششی داخل قاره‌ای مرتبط دانست (Dixon et al., 2002; Saal et al., 2007). الگوهای عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های اکتینولیت هورنبلند شیبستی و مسکوویت شیبستی منطقه که نسبت به کندریت (Boynnton, 1984) بهنجار شده‌اند، در شکل ۱۰c نشان داده شده‌اند. براساس این شکل، نمونه اکتینولیت هورنبلند شیبستی دارای یک الگوی مسطح با نسبت پایین LREE/HREE را نشان داده و از این نظر با سایر نمونه‌های منطقه حلب متفاوت است درحالی‌که نمونه مسکوویت شیبستی روندی مشابه با دیگر نمونه‌های منطقه حلب داشته و غنی از LREE با نسبت بالای LREE/HREE همراه با آنومالی منفی Eu می‌باشد. بالا بودن LREE/HREE شاخصی از گوشته غنی‌شده به‌وسیله فرورانش یا احتمالاً آلیاژ پوسته‌ای است (Fitton et al., 1991; Barragan et al., 1998). درجه پایین ذوب‌بخشی گوشته اولیه می‌تواند منجر به غنی‌شدگی بیشتر LREE نسبت به HREE شود. علاوه بر این، میزان پایین عناصر HREE نسبت به عناصر LREE می‌تواند به‌علت درجه پایین ذوب بخشی و یا باقی ماندن گارنت در سنگ منشأ و آلودگی ماگمایی باشد. آنومالی منفی Eu می‌تواند در ارتباط با تفریق پلاژیوکلاز باشد (Wilson, 1989). محتوای Eu اغلب به‌وسیله فلدسپارها کنترل می‌شود. زیرا Eu (در حالت دوظرفیتی) در پلاژیوکلاز و آلکالی فلدسپار سازگار است درحالی‌که سایر عناصر کمیاب خاکی سه ظرفیتی، ناسازگار هستند. بنابراین جداشدن فلدسپارها از مذاب چه به‌وسیله تفریق بلوری و چه به‌علت ذوب بخشی که در آن فلدسپار در تفریق باقی می‌ماند، باعث پیدایش آنومالی منفی Eu می‌شود.



شکل ۱۰- (a) نمودار چند عنصری بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995) برای نمونه‌های اکتینولیت هورنبلند شیستی و مسکوویت شیستی منطقه کوسج، (b) الگوهای چند عنصری بهنجار شده به کندریت (Thompson, 1982) برای نمونه‌های اکتینولیت هورنبلند شیستی و مسکوویت شیستی منطقه کوسج و (c) الگوهای عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Boynton, 1984) برای نمونه‌های اکتینولیت هورنبلند شیستی و مسکوویت شیستی منطقه کوسج. برای مقایسه نمونه‌های مربوط به آمفیبول شیست و کوارتز شیست آهن حلب ۲ (Tofighi, 2017)، نمونه‌های آمفیبول شیست و اکتینولیت شیست سرب و روی حلب (Karami, 2018) و نمونه‌های اکتینولیت شیستی طلای حلب (Nafisi, 2018) نیز بر روی هر سه نمودار ترسیم شده است.

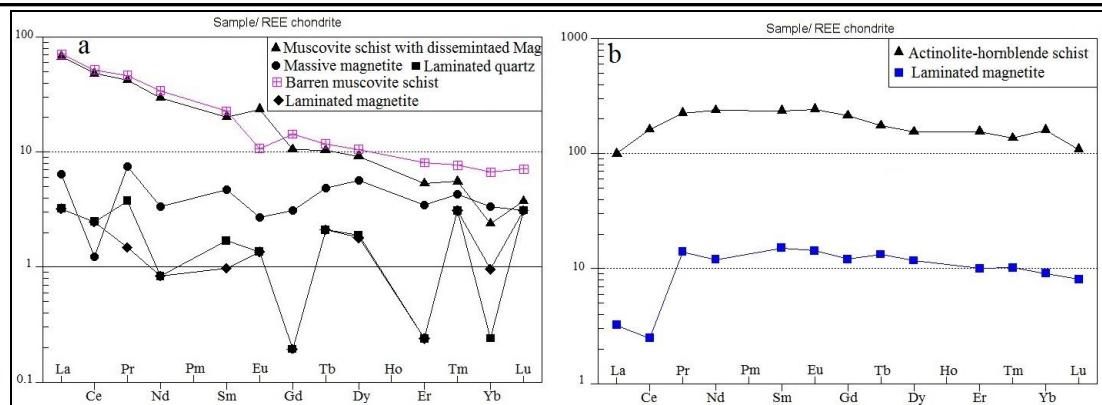
Fig. 10. (a) Primitive mantle-normalized multi-elements patterns (McDonough and Sun, 1995) for the actinolite-hornblende schist and muscovite schist samples at Kosaj area, (b) Chondrite-normalized multi-elements patterns (Thompson, 1982) for the actinolite-hornblende schist and muscovite schist samples at Kosaj area, and (c) Chondrite-normalized REE patterns (Boynton, 1984) for the actinolite-hornblende schist and muscovite schist samples at Kosaj area. For comparison, data from amphibole schist and quartz schist samples of the Halab 2 Fe deposit (Tofighi, 2017), amphibole schist and actinolite schist samples of the Halab Pb-Zn deposit (Karami, 2018), and actinolite schist samples of the Halab Au deposit (Nafisi, 2018) are also plotted.

نمونه مسکوویت شیست حاوی مگنتیت دانه‌پراکنده می‌تواند در ارتباط با محیط اکسیدان تشکیل کانه‌زایی (حضور کانی‌های مگنتیت) باشد. نمونه‌های مربوط به مگنتیت لامینه‌ای و کوارتز لامینه‌ای دارای الگوی مشابهی هستند با این تفاوت که نمونه مگنتیت لامینه‌ای دارای آنومالی‌های منفی Pr و Sm می‌باشد (شکل ۱۱a). نمونه مگنتیت توده‌ای نیز دارای الگویی مشابه با نمونه‌های مگنتیت لامینه‌ای و کوارتز لامینه‌ای است با این تفاوت که نسبت به آنها دارای غنی‌شدگی بیشتری در عناصر کمیاب خاکی بوده و دارای آنومالی منفی Ce نیز می‌باشد (شکل ۱۱b). نمونه مگنتیت لامینه‌ای و اکتینولیت هورنبلند شیست میزبان آن نیز دارای یک الگوی مشابه هستند با این تفاوت که نمونه مگنتیت لامینه‌ای دارای غنی‌شدگی بیشتری از عناصر کمیاب خاکی است (شکل ۱۱b). غنی‌شدگی بیشتر عناصر کمیاب خاکی در مگنتیت لامینه‌ای را می‌توان به تمرکز این عناصر در شبکه کانی مگنتیت نسبت داد.

برعکس نقش فلدسپارها، در مقیاس کوچک‌تر کانی‌های هورنبلند، اسفن، کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن و گارنت ممکن است باعث پیدایش آنومالی مثبت Eu در مذاب شوند (Wang et al., 2006; Dokuz et al., 2005).

### الگوی عناصر کمیاب خاکی در پهنه‌های کانه‌دار

الگوی عناصر کمیاب خاکی برای پهنه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی آهن کوسج که نسبت به کندریت (Boynton, 1984) بهنجار شده‌اند، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. براساس این شکل، نمونه‌های مسکوویت شیست دارای مگنتیت دانه‌پراکنده و مسکوویت شیست فاقد کانه‌زایی الگوی مشابه هم با غنی‌شدگی در LREE و نسبت بالای LREE/HREE را نشان می‌دهند با این تفاوت که نمونه مسکوویت شیست دارای مگنتیت دانه‌پراکنده دارای آنومالی مثبت Eu و مسکوویت شیست فاقد کانه‌زایی دارای آنومالی منفی Eu می‌باشند (شکل ۱۱a). نمونه مسکوویت شیست حاوی مگنتیت دانه‌پراکنده، آنومالی منفی در Yb را نیز نشان می‌دهد. آنومالی مثبت Eu در



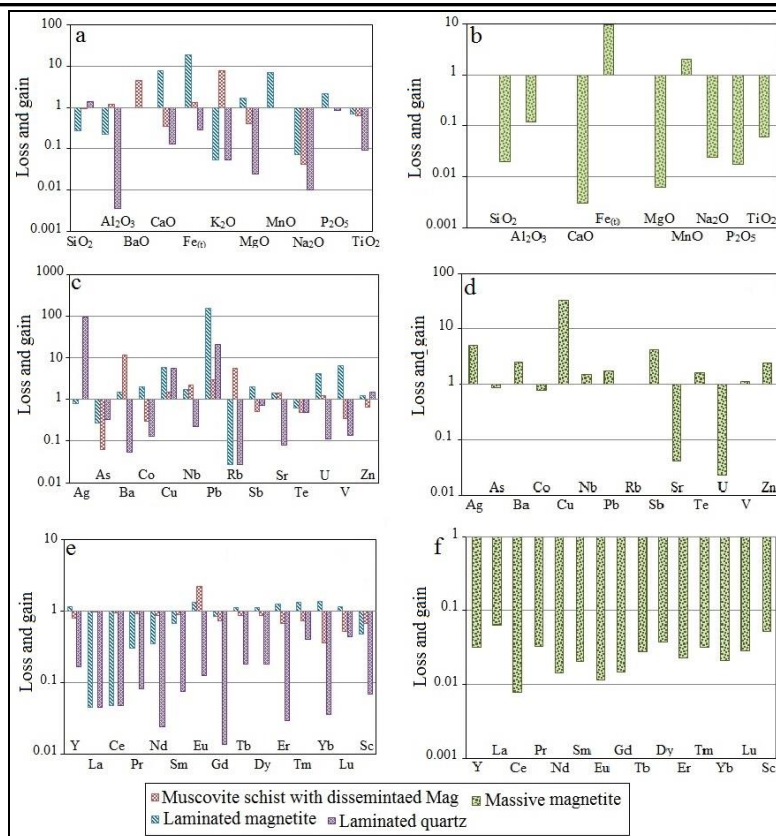
شکل ۱۱- (a) الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجارشده به کندریت (Boynton, 1984) در نمونه‌های کانه‌دار و مسکوویت شیست میزبان فاقد کانه‌زایی در رخداد معدنی آهن کوسج و (b) الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجارشده به کندریت (Boynton, 1984) در نمونه مگنتیت نواری و اکتینولیت هورنبلند شیست میزبان فاقد کانه‌زایی در رخداد معدنی آهن کوسج. Fig. 11. (a) Chondrite-normalized REE patterns (Boynton, 1984) for the ore horizon samples and barren host muscovite schist at Kosaj Fe occurrence, and (b) Chondrite-normalized REE patterns (Boynton, 1984) for the laminated magnetite sample and barren host actinolite-hornblende schist at Kosaj Fe occurrence.

عناصر کمیاب خاکی سبک تپی و از عناصر کمیاب خاکی سنگین غنی شده است (شکل ۱۲). براساس این نمودار، نمونه مسکوویت شیست با مگنتیت دانه‌پراکنده در مقایسه با مسکوویت شیست فاقد کانه‌زایی از تمامی عناصر کمیاب خاکی (به‌جز Eu که غنی شده است)، تپی‌شدگی نشان می‌دهد. نمونه کوارتز لامینه‌ای نیز در مقایسه با مسکوویت شیست فاقد کانه‌زایی از تمامی عناصر کمیاب خاکی تپی شده است. نمونه مگنتیت توده‌ای نیز در مقایسه با اکتینولیت هورنبلند شیست فاقد کانه‌زایی از همه عناصر کمیاب خاکی تپی شده است (شکل ۱۲). به‌طور معمول رفتار زمین‌شیمیایی عناصر کمیاب خاکی در محیط‌های دگرسانی و کانه‌زایی تحت تأثیر فرایندهایی از قبیل واکنش سیال با سنگ، نهشت سیال، جذب، تجزیه به اجزاء، تغییرات دما، فشار، pH، Eh، آکالینیتی و تمرکز سیال وابسته است (Humphris, 1984; Lottermoser, 1992). لذا بین مجموعه دگرسانی، خصوصیات فیزیکوشیمیایی محلول کانه‌ساز، نسبت سیال به سنگ و الگوی عناصر کمیاب خاکی، همبستگی وجود دارد (Alderton et al., 1980). ترکیب سیال و شرایط دما و فشار، پایداری و فراوانی نسبی فازهای دربر دارنده عناصر کمیاب خاکی را کنترل می‌کنند. اگر دگرسانی و کانی‌سازی در شرایط یکسانی از دما و فشار رخ دهد، تمرکز عناصر کمیاب خاکی توسط ترکیب سیال، فلوکسید اکسیژن و تمرکزهایی از لیگاندهای مناسب مانند F, Cl, OH, CO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub> (Wood, 1990a,b; Giere and Williams, 1992) کنترل می‌شود. این لیگاندها پاسخی به تغییرات ترکیب سیال، بسته به فرایندهای واکنش سیال-سنگ و یا اختلاط سیالات می‌باشند (Brunsman et al., 2001; Rolland et al., 2003). همچنین، طی فرایندهای کانه‌زایی، سیالات غنی از F, Cl, CO<sub>2</sub> قادر به تحرک عناصر کمیاب خاکی هستند به‌طوریکه کمپلکس‌های هالوژنی و کربنیک عامل اصلی انتقال و تحرک عناصر مزبور محسوب می‌شوند (Murphy and Hynes, 1986; Whitford et al., 1988; Bienvenu, 1990). حجم پایین دگرسانی‌های موجود در رخداد معدنی کوسج بیانگر میزان پایین واکنش بین سیالات کانه‌زا و سنگ میزبان می‌باشد. بر این اساس، به نظر می‌رسد در منطقه کوسج، ترکیب اسیدی سیالات گرمابی و ماهیت اکسیدی آنها در تمرکز و تحرک عناصر کمیاب خاکی نقش داشته است.

### تپی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در پهنه‌های کانه‌دار

به‌منظور بررسی تپی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر طی کانه‌زایی در رخداد معدنی کوسج، داده‌های مربوط به نمونه‌های کانه‌دار بر داده‌های مربوط به نمونه‌های مسکوویت شیستی و اکتینولیت هورنبلند شیستی فاقد کانه‌زایی بهنجار گردید تا عناصر اضافه و یا کم‌شده به سنگ طی کانه‌زایی مشخص گردد. لازم به ذکر است که این روش نیمه‌کمی بوده و برای تعیین میزان کمی تپی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر، نیاز به محاسبات موازنه جرم است که در این پژوهش انجام نشده است.

بررسی نمودارهای تپی‌شدگی-غنی‌شدگی اکسیدهای عناصر اصلی در بخش‌های کانه‌دار رخداد معدنی کوسج نشان می‌دهد که نمونه مگنتیت لامینه‌ای در مقایسه با مسکوویت شیست فاقد کانه‌زایی از اکسیدهای CaO, MgO, MnO, Fe<sub>(t)</sub> و P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> غنی و از سایر اکسیدها تپی شده است (شکل ۱۲). نمونه مسکوویت شیست با مگنتیت دانه‌پراکنده نیز در مقایسه با مسکوویت شیست فاقد کانه‌زایی از اکسیدهای Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaO, Fe<sub>(t)</sub> و K<sub>2</sub>O غنی و از سایر اکسیدها تپی شده است. نمونه کوارتز لامینه‌ای در مقایسه با مسکوویت شیست فاقد کانه‌زایی از همه اکسیدها به‌جز SiO<sub>2</sub> تپی شده است. نمونه مگنتیت توده‌ای نیز در مقایسه با اکتینولیت هورنبلند شیست فاقد کانه‌زایی از اکسیدهای Fe<sub>(t)</sub> و MnO غنی و از سایر اکسیدها تپی شده است (شکل ۱۲). در نمودارهای تپی‌شدگی-غنی‌شدگی عناصر کمیاب، نمونه مگنتیت لامینه‌ای در مقایسه با مسکوویت شیست فاقد کانه‌زایی از عناصر Ag, As, Rb, Te و از سایر عناصر غنی شده است (شکل ۱۲). براساس این نمودار، نمونه مسکوویت شیست با مگنتیت دانه‌پراکنده در مقایسه با مسکوویت شیست فاقد کانه‌زایی از عناصر As, Co, U, Ba, Cu, Nb, Pb, Rb, Sr, Sb, Te, V و از عناصر Zn تپی و از عناصر Ba, Cu, Nb, Pb, Rb, Sr و U غنی شده است. نمونه کوارتز لامینه‌ای نیز در مقایسه با مسکوویت شیست فاقد کانه‌زایی از همه عناصر کمیاب به‌جز عناصر Ag, Cu و Pb تپی شده است. نمونه مگنتیت توده‌ای نیز در مقایسه با اکتینولیت هورنبلند شیست فاقد کانه‌زایی از عناصر Sr و U و به میزان کمی از عناصر As و Co تپی و از سایر عناصر کمیاب غنی شده است (شکل ۱۲). در نمودارهای تپی-شدگی-غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی، همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه مگنتیت لامینه‌ای در مقایسه با مسکوویت شیست فاقد کانه‌زایی از



شکل ۱۲- الگوهای تهی‌شدگی و غنی‌شدگی اکسیدهای عناصر اصلی (a و b)، عناصر کمیاب (c و d) و عناصر کمیاب خاکی (e و f) برای بخش‌های کانه‌دار در رخداد معدنی آهن کوسج که نسبت به مسکوویت شیبست (a، c و e) و اکتینولیت هورنبلند شیبست (b، d و f) فاقد کانه‌زایی بهنجار شده‌اند.

Fig. 12. Loss and gain histogram of major elements oxides (a and b), rare elements (c and d) and REE (e and f) for ore samples at Kosaj Fe occurrence, normalized against data of barren muscovite schist (a, c and e) and barren actinolite-hornblende schist (b, d and f).

واحدهای میزبان طی فعالیت‌های آتشفشانی- پروندمی است. شباهت الگوهای بهنجار شده عناصر کمیاب خاکی در کانسنگ‌های مگنتیتی و واحدهای شیبستی نیز تشکیل هم‌زمان ماده معدنی و واحدهای میزبان را تایید می‌کند. در مرحله دوم، واحدهای سنگی منطقه تا رخساره شیبست سبز دگرگون و دگرشکل شده و کانه‌زایی اولیه مورد رونقشی قرار گرفته است (شکل ۱۳b). وجود ساختارهای چین‌خورده در نوارهای مگنتیت- کوارتز و مگنتیت- اکتینولیت همانند واحدهای میزبان به‌همراه ساختارهای سیگما و بودین- شدگی، رشد در سایه فشار و دوزدن برگراری اطراف بلورهای دانه‌پراکنده مگنتیت موجود در سنگ‌های میزبان و در نهایت تبلور مجدد بلورهای کوارتز و مگنتیت بیانگر عملکرد دگرشکلی و دگرگونی بعد از تشکیل کانه‌زایی است. در مرحله سوم توده‌های گرانیتوئیدی به‌داخل توالی‌های دگرگونی منطقه نفوذ کرده‌اند (شکل ۱۳c). نفوذ این توده‌ها در بخش باختری منطقه در محل کانسار سرب و روی حلب (Karami, 2019) سبب تشکیل هاله‌های اسکارنی در این کانسار شده است. نفوذ توده‌های مزبور سبب ایجاد شکستگی‌های متقاطع با واحدهای دگرگون و دگرشکل شده منطقه شده است. این توده‌ها به‌عنوان موتور حرارتی عمل کرده و سبب چرخش آب‌های ماگمایی- جوی و تشکیل رگه- رگچه‌های مگنتیتی- کوارتزی مرحله سوم کانه‌زایی شده‌اند. در مرحله چهارم با بالا آمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش همراه بوده و شکل امروزی کانه‌زایی را به‌وجود آورده است (شکل ۱۳d).

علاوه بر این، کاهش عناصر کمیاب خاکی در بخش‌های کانه‌دار نسبت به سنگ‌های میزبان می‌تواند ناشی از تأثیر سیالات غنی از کلر و فلوئورداری باشد که سبب شستشو و حمل آنها از بخش‌های کانه‌دار شده‌اند (Gramaccioli et al., 1999; Kikawada et al., 2001).

### تیپ و مدل تشکیل رخداد معدنی کوسج

ویژگی‌های زمین‌شناسی، زمین‌شیمیایی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت ماده معدنی در رخداد معدنی آهن کوسج نشان می‌دهد که این رخداد معدنی را می‌توان در دسته کانسارهای آهن آتشفشانی- رسوبی دگرگون و دگرشکل- شده (Smirnov et al., 1983; Ashley et al., 1998; Roy and Venkatesh, 2009) طبقه‌بندی کرد (جدول ۲). شواهدی از قبیل ژئومتری عدسی‌شکل و بافت‌های دانه‌پراکنده، لامینه‌ای و نواری ماده معدنی تأییدکننده این مطلب است. براساس نتایج به‌دست آمده از مشاهدات صحرایی، مطالعات سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، روابط پاراژنتیکی کانی‌ها و کانه‌ها، مراحل تکوین و تکامل رخداد معدنی آهن کوسج را می‌توان به‌صورت یک توالی چهار مرحله‌ای خلاصه کرد (شکل ۱۳).

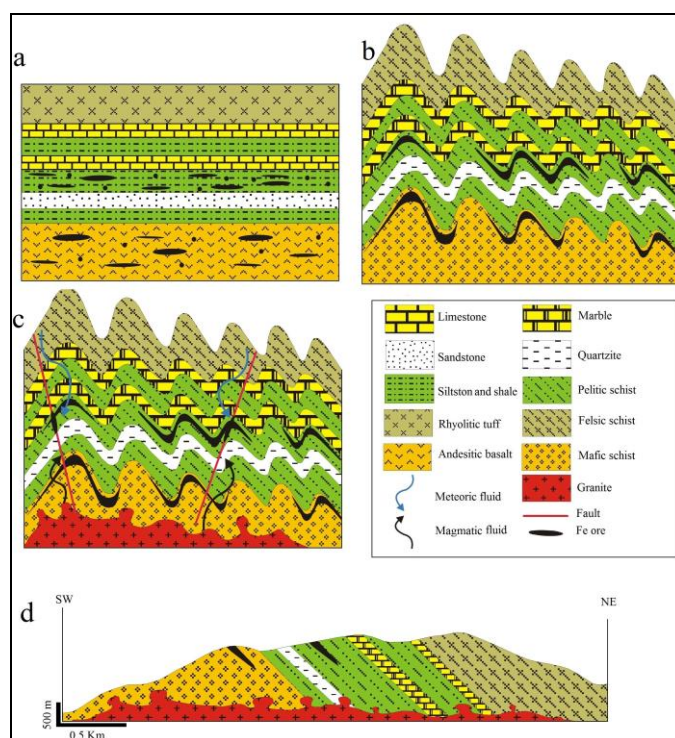
مرحله نخست با تشکیل توالی‌های آتشفشانی- رسوبی منطقه همراه می‌باشد. کانه‌زایی آهن به‌عنوان یک پتانسیل اولیه هم‌زمان با واحدهای میزبان تشکیل شده است (شکل ۱۳a). ژئومتری عدسی‌شکل و لایه‌ای و وجود بافت‌های دانه‌پراکنده، لامینه‌ای و نواری ماده معدنی و هم‌راستا بودن آن با برگراری واحدهای میزبان، نشان‌دهنده ته‌نشست ماده معدنی هم‌زمان با تشکیل



جدول ۳- مقایسه ویژگی‌های اصلی رخداد معدنی آهن کوسج با برخی از کانسارهای آهن آتشفشانی- رسوبی.

Table 3. Comparison of main characteristics of the Kosaj Fe occurrence with some volcano-sedimentary Fe deposits.

|                              | Otluklise-Turkey  | La Hueca- Mexico               | Goorgoor                          | Mianaj                            | Halab 2  | Kosaj   |
|------------------------------|---|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|---|
| <b>Host rock</b>             | Shale, limestone, marl, sandstone                       | Shale, greywacke, limestone    | Schist                            | Schist, rhyolitic meta-tuff       | Quartz schist, actinolite schist                                 | Muscovite schist, actinolite-hornblende schist  |
| <b>Mineralization age</b>    | Cretaceous  | Cretaceous                     | Precambrian (?)                   | Precambrian (?)                   | Precambrian (?)  | Precambrian (?)                                 |
| <b>Geometry</b>              | Laminated   | Laminated, lenticular          | Lenticular                        | Lenticular                        | Lenticular   | Laminated, lenticular                           |
| <b>Structure and texture</b> | Laminated, disseminated                                 | Banded                         | Disseminated, massive, banded     | Disseminated, massive, banded,    | Disseminated, banded, vein-veinlet                               | Disseminated, massive, banded,                  |
| <b>Ore mineralogy</b>        | Hematite, siderite,                                     | Magnetite, siderite, hematite  | Magnetite, pyrite, hematite       | Magnetite, hematite               | Magnetite, pyrite, chalcopyrite                                  | Magnetite, pyrite, hematite                     |
| <b>Alteration</b>            | Martitization, chloritization, silicification, argillic | Martitization, chloritization  | Quartz-tourmaline, sericitization | Martitization                     | Martitization, carbonatization, silicification, actinolitization | Martitization, actinolitization, silicification |
| <b>Deposit type</b>          | Primary as volcano-sedimentary                          | Primary as volcano-sedimentary | Metamorphosed volcano-sedimentary | Metamorphosed volcano-sedimentary | Metamorphosed volcano-sedimentary                                | Metamorphosed volcano-sedimentary               |
| <b>References</b>            | Ciftci et al. (1996)                                    | Corona-Esquivel et al. (2000)  | Mohammadi et al. (2014)           | Pourmohamad et al. (2019)         | Tofighi et al. (2019)  | This study                                      |



شکل ۱۳- نمایشی شماتیک از مراحل تکوین و تکامل کانه‌زایی در رخداد معدنی آهن کوسج. (a) تشکیل توالی آتشفشانی- رسوبی منطقه. کانه‌زایی آهن هم‌زمان با واحدهای میزبان و به صورت دانه‌پراکنده، لایه‌ای، عدسی‌شکل و لامینه‌ای تشکیل شده است، (b) چین‌خوردگی واحدهای میزبان و باندهای مگنتیت- کوارتز و مگنتیت- اکتینولیت طی رخداد دگرشکلی و دگرگونی ناحیه‌ای، (c) نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی به داخل سنگ‌های دگرگونی و دگرشکلی منطقه. این توده‌ها سبب چرخش سیالات گرمایی و تشکیل رگه- رگچه‌های مگنتیتی- کوارتزی شده‌اند که لایه‌ها و عدسی‌های کانه‌دار قبلی را قطع کرده‌اند و (d) بالآمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش.

Fig. 13. Schematic representation of mineralization evolution stages at the Kosaj Fe Occurrence. (a) Formation of volcano-sedimentary units of the area. Fe mineralization formed as disseminated, laminated, lens-shaped and banded forms contemporaneous with host strata, (b) Folding of host units and magnetite-quartz and magnetite-actinolite bands during deformation and regional metamorphism, (c) Granitoid plutons intruded into the deformed and metamorphosed rock units. Intrusion of these plutons caused circulation of hydrothermal fluids that formed magnetite- quartz veins-veinlets crosscutting previous ore lens and layers, and (d) Regional exhumation and development of weathering and erosion processes.

## نتیجه گیری

سازند کهر قرار دارند. لذا به نظر می‌رسد که این مجموعه سنگی از نظر اکتشاف آهن حائز اهمیت بالایی باشد. بررسی این واحدهای سنگی در منطقه تکاب-انگوران-تخت سلیمان و تعمیم شواهد به دست آمده از آن به مناطق مشابه در پهنه سنج-سیرجان می‌تواند به شناسایی این تیپ از کانسارهای آهن منجر گردد.

## قدردانی

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

نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی، ژئومتری، ساخت و بافت، سنگ میزبان و توالی پاراژنزی در رخدادهای معدنی آهن کوسج، همگی حاکی از آنست که این رخداد معدنی را می‌توان در ردیف کانسارهای آهن تیپ آتشفشانی-رسوبی دگرگون و دگرشکل شده تقسیم‌بندی کرد. ژئومتری عدسی شکل ماده معدنی و وجود بافت‌های دانه پراکنده، لامینه‌ای و نواری در ماده معدنی نشان‌دهنده ته‌نشست آنها هم‌زمان با تشکیل واحدهای میزبان است. هم‌روند بودن ماده معدنی با برگواگی واحدهای میزبان و وجود چین‌خوردگی‌های مشابه در ماده معدنی و سنگ میزبان نیز این مطلب را تأیید می‌کند. مطالعات انجام شده طی سال‌های اخیر در منطقه دگرگونی حلب در پهنه کانه‌دار تکاب-تخت سلیمان-انگوران، منجر به شناسایی رخدادهای آنومالی-های متعددی از آن‌ها زایی‌های آهن با منشأ آتشفشانی-رسوبی (گورگور، حلب ۱، حلب ۲، میانج و کوسج) در این منطقه از ایران شده است. این کانه‌زایی‌ها درون واحدهای آتشفشانی-رسوبی دگرگون و دگرشکل شده معادل

## منابع

- Alderton, D.M.H., Pearce, J.A., Potts, P.J., 1980. Rare earth element mobility during granite alteration: Evidence from Southwest England. *Earth Planet Scientific Letters* 49, 149-165.
- Asadi, H.H., Voncken, J.H.L., Kühnel, R.A. and 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.
- Ashley, P.M., Lottermoser, B.G., Westaway, J.M., 1998. Iron-formation and epigenetic ironstones in the Palaeoproterozoic Willyama Supergroup, Olary Domain, South Australia. *Mineralogy and Petrology* 6, 187-218.
- Babakhani, A.R., Ghalamghash, J., 1996. Geological map of Takht-e-Soleyman, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Barker, A.J., 1991. An introduction to metamorphic textures and microstructures. Oxford University press, 209 pp.
- Barragan, R., Geist, D., Hall, M., Larsen, P., Kurz, M., 1998. Subduction controls on the compositions of lavas from the Ecuadorian Andes. *Earth and Planetary Science Letters* 154, 153-166.
- Bienvenu, P., 1990. MORB alteration: Rare earth element/non-rare hydromagmaphile element fractionation. *Chemical Geology* 82, 1-14.
- 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.
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the earth element: meteorite studies. In: Henderson, P., (Ed.): Rare Earth Element geochemistry. Elsevier, Amsterdam, pp: 63-114.
- Brunsmann, A., Franz, G., Erzinger, J., 2001. REE mobilization during small-scale high-pressure fluid-rock interaction and zoisite/fluid partitioning of La to Eu. *Geochemica et Cosmochimica Acta* 65(4), 559-570.
- Ciftci, D., Unlu, T., Sayili, S.A., 1996. Discussion on the origin of Otlukiliseiron deposit Gurun- Sivas. *Mineral Resource Exploration Bulletin* 118, 25-50.
- Corona-Esquivel, R., Ortega-Gutiérrez, F., Reyes-Salas., M., Lozano-Santacruz, R., Miranda-Gasca, M.A., 2000. Mineralogical study of the La Hueca Cretaceous ironmanganese deposit, Michoacan, Southwestern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 17(2), 143-153.
- Craige, J.R., Vaughan, D.L., 1994. Ore Microscopy and Ore Petrography. 2nd ed., New York, John Wiley and Sons, 434 p.
- Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran, hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita* 4, 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.
- Dixon, J.E., Leist, L., Langmuir, C., Schilling, J.G., 2002. Recycled dehydrated lithosphere observed in plume-influenced mid-ocean-ridge basalt. *Nature* 420, 385-389.

- Dokuz, A., Tanyolu, E., Genc, S., 2005. A mantle and a lower crust derived bimodal suite in the Yusufeli Artvin area, NE Turkey: Trace element and REE evidence for Subduction-related rift origin of Early Jurassic Demirkent intrusive complex. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundsch)* 95(3), 370-394.
- Feridooni, Z., 2017. Geology, mineralogy and geochemistry of Halab 1 Fe mineralization, southwest Zanjan. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Iran, (in Persian with English abstract).
- Fitton, J.G., James, D., Leeman, W.P., 1991. Basic magmatism associated with Late Cenozoic extension in the Western United States: compositional variations in space and time. *Journal of Geophysical Research* 96, 13693-13712.
- Giere, R., Williams, C.T., 1992. REE-bearing minerals in a Ti-rich vein from the Adamello contact aureole (Italy). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 112(1), 83-100.
- 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* 4, 1-16.
- Gramaccioli, C.M., Diella, V., Demartin, F., 1999. The role of fluoride complexes in REE geochemistry and the importance of 4f electrons: some complexes in minerals. *European Journal of Mineralogy* 11(6), 983-992.
- Heidari, M., 2013. Geology, dating and genesis of the Touzlar, Aabshah and Qozalbolag Au occurrences, Qorveh-Takab area. Unpublished PhD Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 459 pp. (In Persian with English abstract).
- Heidari, M., Daliran, F., Paquette, J.L., Gasquet, D., 2015a. Geology, timing, and genesis of the high sulfidation Au (Cu) deposit of Touzlar, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 65, 460-486.
- Heidari, M., Ghaderi, M., Kouhestani, H., 2015b. Touzlar epithermal Au-Ag (Cu) deposit, subvolcanic intrusion-related of intra-arc extensional setting, northwest Mahneshan, Iran. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 24(95), 329-348. (In Persian with English abstract).
- Humphris, S.E., 1984. The mobility of the rare earth elements in the crust. In: Henderson, P., (Ed.): *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp: 317-342.
- Karami, F., 2018. Geology, geochemistry and genesis of Halab Zn-Pb (Ag) deposit (SW Zanjan). Unpublished M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 122 pp. (In Persian with English abstract).
- Kato, Y., Ohta, I., Tsumematsu, T., Watanabe, Y., I., Maruyama, S., Imai, N., 1998. Rare earth element variations in mid-Archean banded iron formations: Implications for the chemistry of ocean and continent and tectonics. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62, 3475-3497.
- Kikawada, Y., Ossaka, T., Oi, T., Honda, T., 2001. Experimental studies on the mobility of lanthanides accompanying alteration of andesite by acidic hot spring water. *Chemical Geology* 176(1-4), 137-149.
- Kontny, A., Engelmann, R., Grimmer, J.C., Greiling, R.O., Hirt, A., 2012. Magnetic fabric development in a highly anisotropic magnetite-bearing ductile shear zone (Seve Nappe Complex, Scandinavian Caledonides). *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)* 101, 671-692.
- Lanza, R., Pioli, L., Ort, M., Rosi, M., 2008. Magnetic fabric, welding texture and strain fabric in the Nuraxi Tuff. Sardinia, Italy. *Bull Volcano* 70, 1123-1137.
- Lottermoser, B.G., 1992. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews* 7(1), 25-41.
- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120, 223-253.
- Mehrabi, B., Yardley, B.W.D., Cam, J.R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita* 34, 673-696.
- Mohammadi Niaei, R., 2014. Genesis and economic geology of Ay Qalasi Pb-Zn deposit with special view on mineralization of precious metals. Unpublished Ph.D. Thesis, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Iran, 210 pp. (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* 192 (3), 263-274.
- Mohammadi, 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).
- Murphy, J.B., Hynes, A.J., 1986. Contrasting secondary mobility of Ti, P, Zr, Nb and Y in two metabasaltic suites in the Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences* 23, 1138-1144.
- 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)
- Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 1997. *Micro-tectonics*. Springer-Verlag New York, Berlin Heidelberg Editions, 289 p.
- Pourmohamad, F., Kouhestani, H., Azimzadeh, A.M., Nabatian, Gh., 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).
- Quade, H., Carlos, A., Rosiere, H.S., Heinz-Gunter, B., Janson, E.M., 2001. Microstructures, textures and deformation in hematite. *Journal of Structural Geology* 23, 1429-1440.
- Rolland, Y., Cox, S., Boullier, A.M., Pennacchioni, G., Mancktelow, N., 2003. Rare earth and trace element mobility in mid-crustal shear zones: insights from the Mont Blanc Massif (Western Alps). *Earth Planet Scientific Letters* 214, 203-219.

- Rostami, H., 2014. Kosaj Fe exploration report. Ministry of Industry, Mine and Trade, Zanjan Province, Zanjan, Iran, 139 pp. (In Persian).
- Roy, S., Venkatesh. A.S., 2009. Mineralogy and geochemistry of banded iron formation and iron ores from eastern India with implications on their genesis. *Science* 118, 619-641.
- Saal, A.E., Kurz, M.D., Hart, S.R., Blusztajn, J.S., Blichert-Toft, J., Liang, Y., Geist, D.J., 2007. The role of lithospheric gabbros on the composition of Galapagos lavas. *Earth Planet Scientific Letters* 257, 391-406.
- Shirkhani, M., 2007. Mineralogy, geochemistry and genesis of Ay Qalasi Pb-Zn deposit, SE Takab. Unpublished M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Iran, 143 pp. (in Persian with English abstract).
- Smirnov, V.M., Ginzburg, A.I., Grigoriev, V.M., Yakovlev, G.F., 1983. Studies of mineral deposits. Mir Publishers, Moscow, 288 p.
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: A review. *American Association of Petroleum Geologists* 52, 1229-1258.
- Thompson, R.N., 1982. Magmatism of the British Tertiary province. *Scottish Journal of Geology* 18, 49-107.
- Tofighi, F., Mokhtari, M.A.A., Izadyar, J., Kouhestani, H., 2019. Geology and genesis of Halab 2 Fe occurrence in Takab-Takht-e-Soleiman-Angouran metallogenic zone. *Advanced Applied Geology* 8(27), 44-59 (In Persian with English abstract).
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J.F., Zhao, Z.H., Jian, P., Xiong, X.L., Bao, Z.W., LI, C.F., Bai, Z.H., 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui province (Eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos* 89, 1-26.
- Whitford, D.J., Korsch M.J., Porritt P.M., Craven, S.J., 1988. Rare-earth element mobility around the volcanogenic polymetallic massive sulfide deposit at Que River, Tasmania, Australia. *Chemical Geology* 68, 105-119.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185-187.
- Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis-A global tectonich approach. Unwin Hyman London, 466 p.
- Wood, S.A., 1990a. The aqueous geochemistry of the rare earth elements and Yttrium. 1: Review of available low-temperature data for inorganic complexes and the inorganic REE speciation of natural waters. *Chemical Geology* 82, 159-186.
- Wood, S.A., 1990b. The aqueous geochemistry of the rare earth elements and Yttrium. 2: Theoretical predictions of speciation in hydrothermal solutions to 350 °C at station water vapor pressure. *Chemical Geology* 88(1-2), 99-125.
- Yardley, B.W.D., Mackenzie, W.S., Guilford. C., 1990. Atlas of metamorphic rocks and their textures. Longman Scientific and technical 120 p.
- 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.

