

Research Article

Mineralogy and sulfide mineral chemistry of Khabr iron ore, Southwest of Baft (Southeast of Sanandaj-Sirjan Zone)

Mohammad Bameri ¹, Habib Biabangard ²
Somayeh Dehghani Soltani ³, Azadeh Bordbar ⁴

¹ Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran, boomeri@science.usb.ac.ir

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran, h.biabangard@science.usb.ac.ir

³ M.Sc., Kerman Mining Engineering Organization, Kerman, Iran, dehghani372@yahoo.com

⁴ Ph.D., Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran, azadeh.bordbar1277@gmail.com

ARTICLE INFO

Received: 24 March 2024

Accepted: 10 August 2024

Keywords

Iron Mineralization
Sulfide Chemistry
Hydrothermal Solutions
Kerman Province
Sanandaj-Sirjan Zone



 [10.22108/ijp.2024.141036.1329](https://doi.org/10.22108/ijp.2024.141036.1329)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Khabr iron ore is located in about 55 km southwest of Baft and 15 km northeast of Khabr in the southeastern part of the Sanandaj-Sirjan zone. This zone hosts a large number of iron deposits of Iran such as Golegozar in Sirjan. The Khabr iron ore is a small and unknown deposit, mainly composed of supergene iron hydroxides outcrops. The Khabr iron ore is a hydrothermal mineralization that has occurred in marble during primary and secondary stages as oxide and sulfide (Dehghani Soltani, 2012). There is rare information about mineralogy, paragenesis and genesis of the study deposit This paper aims to study the mineralogy of hypogene and supergene ores and the chemistry of sulfide minerals.

Material and Methods

Following field study and sampling from the rock units, alteration zones, iron ore and sulfide veins, 45 thin sections and 12 polished sections were prepared and studied by transmission and reflective light microscopes at the University of Sistan and Baluchestan and X-ray diffractometry (XRD) at the Yamagata University. The sulfide minerals are analyzed by the Electron Probe Micro Analyze (EPMA) model of JEOL. JXA-8600 with an accelerator voltage of 15kv and current of 2×10^{-8} A in Yamagata University.

Geology

The oldest rocks in the Sanandaj-Sirjan zone are metamorphic rocks of the late Precambrian-Cambrian period (Ghorbani, 2008). In this zone, Paleozoic and

Mesozoic rocks such as carbonate, quartzite, and volcanic rocks with layers of shale and sandstone are covered by Hamedan phyllites (Ghorbani, 2008). The Cretaceous rocks in this zone are mainly carbonated

 Corresponding Author

To cite this article: Bameri, M., Biabangard, H., Dehghani Soltani, S., and Bordbar, A. (2024) Mineralogy and sulfide mineral chemistry of Khabr iron ore, SW Baft (SE Sanandaj-Sirjan Zone). *Petrological Journal*, 15(2), 55-78.

rocks and ophiolitic complex. The Tertiary outcrops in the Sanandaj-Sirjan zone are relatively small. Several intrusive bodies in the Sanandaj-Sirjan zone were formed in the Middle and Late Triassic, Late Jurassic, Late Cretaceous and Paleocene periods. They are mainly intermediate to acidic in composition (Ghorbani, 2008). Most pre-Mesozoic rocks in the Sanandaj-Sirjan zone were metamorphosed. The metamorphic complexes in the study area are Goleghar, Rutchun and Khabr (Figure 1B). The Khabr Iron mineralization is located in the Rutchun complex, which is on top of the Goleghar complex (lower Cambrian) and below the Khabr complex (Devonian) (Figure 1B). The host rock units in this area are an alternation of carbonate rocks, phyllite, greenschist, mica schist and quartz-schist ranging in age from Upper Cambrian to Ordovician. The dominant minerals in these rock units are calcite, quartz, biotite and muscovite including sericite, paragonite, chlorite and clay minerals.

Discussion and Results

The iron mineralization occurs at the contact of carbonate rocks and phyllite and schists. The mineralization develops in a northeast-southwest orientation as hill-like and isolated outcrops including hypogene oxide and sulfide mineralization and supergene iron oxide mineralization. The hypogene iron mineralization is characterized by magnetite euhedral crystals, formed as replacements in carbonate rocks by hydrothermal solutions. The hypogene sulfide mineralization forms following the oxide mineralization as silica veins, cavities and open space filling. Sulfides are associated with quartz and composed of pyrite, arsenopyrite, chalcopyrite, bornite and covellite. The chemistry of arsenopyrite, pyrite and chalcopyrite contain low volumes of gold, silver, bismuth, Pb, Zn, Te and mercury. Some pyrite grains contain Au (maximum 700 ppm) (Table 2). The iron ore outcrops are mainly supergene-type formed as open space filling in fractures or around gangue grains boundary. The supergene iron mineralization is due to the weathering of hypogene minerals such as magnetite and sulfide minerals. The margin of the outcrops of the sulfide veins are partially altered to iron hydroxides in brown, red and yellow. The supergene ore minerals are mainly goethite, hematite and limonite. Calcite, dolomite, quartz and phyllosilicates are the predominant gangue minerals. There exist many secondary structures in iron ore like grape-like, colloidal, box-like, cavity-like, rhythmic, replacement and vein-like and open space filling all are indication of weathering and supergene processes. Some textures of the host rocks

are similar to clastic rocks like the magnetite-rich sandstone. The magnetite texture reveals that, the Khabr hypogene iron mineralization is mainly formed as a replacement in carbonated rocks by hydrothermal solutions. High temperature acidic hydrothermal solutions containing chloride complexes, dissolve the carbonate rocks upon reaction with them (Robb, 2005). By dissolving carbonate rocks and increasing the pH, chloride complexes became unstable and magnetite replaced limestone. The Khabr sulfides mineralization in the quartz veins is more characteristic of hydrothermal solutions. The hydrothermal solutions containing metal-sulfide complexes had migrated along faults and permeable zones and then with a decrease in the temperature and pressure, the sulfides had been formed. The fluids responsible for the Khabr sulfide stage have the same salinity and temperature as of the those of epithermal deposits (Dehghani Soltani, 2012).

The formation mechanism of supergene mineralization is well-known (Guibert and Park, 1986). The Khabr supergene iron ores are the result of magnetite and sulfide oxidation to goethite, hematite and limonite. The magnetites replaced in limestone and marble and magnetites in clastic sandstone have been weathered and altered by oxygen- and carbon dioxide-rich surface waters. The mineralization zone is severely faulted, crushed and permeable. As a result, the circulation of the oxygen-rich waters toward depths or decomposition of magnetite and sulfides had been possible.

Conclusions





The Khabr Fe mineralization can be divided into hypogene and supergene stages. The hypogene stage can be divided into sub-stages of oxide and sulfide mineralization. The hypogene oxide stage is characterized by magnetite, formed as a replacement in limestone by hydrothermal solution or as clastic grains in sandstone. The remarkable features of the hypogene sulfide stage are the presence of arsenopyrite, pyrite and chalcopyrite in quartz veinlets precipitated from hydrothermal solutions like those of epithermal type. The supergene mineralization is characterized by iron oxides and hydroxides as hematite, goethite and limonite precipitated from surface waters.

Acknowledgments

We acknowledge Kazuo Nakashima professor of Yamagata University for his assistance with EPMA and XRD. We thank the reviewers who provided useful comments on an earlier draft of this paper.



کانی‌شناسی و شیمی‌کانی‌های سولفیدی کانسنگ آهن خبر، جنوب‌باختری بافت (جنوب‌خاوری پهنه سنندج-سیرجان)

محمد بامری^۱ ، حبیب بیابانگرد^۲ ، سمیه دهقانی‌سلطانی^۳ ، آزاده بردبار^۴ 

^۱ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، boomeri@science.usb.ac.ir

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، h.biabangard@science.usb.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد، نظام مهندسی معدن کرمان، کرمان، ایران، dehgani372@yahoo.com

^۴ دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، azadeh.bordbar1277@gmail.com

چکیده

کانسنگ آهن خبر در ۱۵ کیلومتری شمال‌خاوری شهر خبر در استان کرمان جای دارد. واحدهای سنگی در این محدوده شامل تناوبی از سنگ‌های کربناته، فیلیت، شیست‌سبز و میکاشیست با سن کامبرین بالایی تا اردویسین هستند. کلسیت فراوان‌ترین کانی در سنگ‌های کربناته (مرمر) است که با مقدار اندکی دولومیت، آنکریت، کوارتز و مسکوویت و فلدسپار همراه است. کوارتز و مسکوویت در همه سنگ‌های منطقه وجود دارند، بیوتیت بیشتر در میکاشیست‌ها دیده می‌شوند. پاراگونیت، کلریت، سریسیت و کانی‌های رسی در شیست‌های سبز فراوان‌تر هستند. کانه‌زایی آهن در مرممر رخ داده است. کانه‌زایی با روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری در برونزدهای تپه‌مانند و منفرد رخ داده است و شامل کانه‌زایی اکسیدی و سولفیدی درون‌زاد (هیپوژن) و کانه‌زایی اکسید آهن برون‌زاد (سوپرژن) می‌شود. بررسی کانی‌شناسی با روش‌های میکروسکوپی، XRD و EPMA انجام شد. کانه‌زایی آهن درون‌زاد با بقایای بلورهای مگنتیت شناخته می‌شود که به‌صورت جانشینی در مرممر و توسط محلول‌های گرمابی پدید آمده‌اند. کانه‌زایی سولفیدی پس از کانه‌زایی اکسیدی در رگچه‌های سیلیسی، حفره‌ها و فضاهای خالی رخ داده است که گویای پیدایش آنها از محلول‌های گرمابی است. سولفیدها شامل پیریت، آرسنوپیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، بورنیت و کولیت هستند. شیمی آرسنوپیریت، پیریت و کالکوپیریت نشان می‌دهد عنصرهایی مانند طلا، نقره، بیسموت و جیوه در آنها ناچیز است. کانه‌زایی آهن برون‌زاد از تجزیه مگنتیت پدیدآمده و شامل گوتیت، هماتیت و لیمونیت است. بخش‌هایی از سولفیدهای درون‌زاد نیز با هیدرواکسیدهای آهن جایگزین شده‌اند.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۱/۰۵

تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۵/۲۰

کلید واژه‌ها

کانه‌زایی آهن
شیمی‌کانی‌های سولفیدی
سیال‌های گرمابی
استان کرمان
پهنه سنندج-سیرجان



doi: 10.22108/ijp.2024.141036.1329

نویسنده مسئول

استناد به این مقاله: بامری، م.، بیابانگرد، ح.، دهقانی‌سلطانی، س.، بردبار، ا. (۱۴۰۳) کانی‌شناسی و شیمی‌کانی‌های سولفیدی کانسنگ آهن خبر، جنوب‌باختری بافت (جنوب‌خاوری پهنه سنندج-سیرجان). پترولوژی، ۱۵ (۲)، ۵۵-۷۸.



مقدمه

سرب و روی نوع MVT^۱ به چاه نار، زردبازی، چاه سرب ارجمند، سه چاه، و چاه سربی را نام برد (Ghorbani Denavi et al., 2023a, b). بررسی‌های پیشین نشان داده‌اند کانسنگ آهن خبر در پی حرکت محلول‌ها گرمابی در سنگ‌های کربناته و برهم‌کنش با آنها به‌صورت اکسیدی و سولفیدی در دو مرحله نخستین و ثانویه پدید آمده است (Moridi, 2005; Dehghani Soltani, 2012). آنجایی‌که پهنه سنندج-سیرجان میزبان چندین کانسار و کانی‌زایی آهن از جمله کانسار گل‌گهر در سیرجان است، کانسنگ آهن خبر می‌تواند کانی‌زایی با اهمیتی برای پی‌جویی و اکتشاف آهن در منطقه خبر باشد. درباره کانی‌شناسی و خاستگاه و دیگر جنبه‌های کانسنگ آهن خبر، مطلب منتشرشده‌ای وجود ندارد. هدف از این مقاله، بررسی کانی‌شناسی فازهای اکسیدی و سولفیدی برون‌زاد و درون‌زاد کانسنگ آهن خبر و هاله دگرسانی پیرامونش است. در این راستا به بررسی زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، دگرسانی و سبک کانی‌زایی آهن نیز پرداخته می‌شود. شناخت این موارد چه‌بسا کلیدی برای شناخت چگونگی پیدایش و کنترل‌کننده‌های کانی‌زایی و طراحی یک برنامه اکتشافی است.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

کهن‌ترین سنگ‌های پهنه سنندج-سیرجان به سن پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین هستند که بیشترشان دچار دگرگونی شده‌اند (Ghorbani, 2008). در بخش جنوب‌خاوری این پهنه، سنگ‌های آتشفشانی مافیک، توف‌های اسیدی با میان‌لایه‌هایی از شیل و آهک، ماسه سنگ کوارتزی و دولومیت چرت‌دار پالئوزوییک و تریاس زیرین رخنمون بیشتری دارند که در بخش میانی آن با فیلیت‌های همدان به سن تریاس و واحدهای ژوراسیک پوشیده شده‌اند (Ghorbani, 2008). سنگ‌های کرتاسه در این پهنه، شامل سنگ‌های کربناته و واحدهای سنگی

کانسنگ آهن خبر در استان کرمان، ۱۵ کیلومتری شمال‌خاوری شهر خبر و ۵۵ کیلومتری جنوب‌باختری شهر بافت جای دارد. این کانسنگ از دیدگاه زمین‌شناسی و ساختاری در بخش جنوب‌خاوری پهنه سنندج-سیرجان جای دارد (شکل ۱-۱A). پهنه سنندج-سیرجان از دیدگاه کانی‌زایی آهن، سرب و روی و طلا اهمیت بسیاری دارد؛ به‌گونه‌ای که می‌توان آن را نوار آهن، سرب، روی و طلای ایران نیز دانست (Shahabpour, 1994; Asadi, 2000; Aliyari et al., 2012; Mirzaei et al., 2018; Maanijou et al., 2020). کانسارهای شناخته‌شده آهن در این پهنه می‌تواند کانسارهای آهن گل‌گهر سیرجان، شمس‌آباد اراک و باعالی همدان و ایوان‌دره در کردستان را نام برد (Zamanian, 2016; Mirzaei et al., 2018; Marbouti et al., 2021; Akbarpour and Kalatbari Jafari, 2021). هرچند دیدگاه‌های گوناگونی درباره پیدایش کانسارهای آهن در این پهنه هست (Badavi et al., 2019)، اما بیشتر آنها از نوع اسکارن، جانشینی و گرمابی هستند (Maanijou and Salemi, 2015).

کانسنگ آهن خبر کانسنگی کوچک و ناشناخته است که از اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن برون‌زاد، ساخته شده است. نقشه‌های توپوگرافی این کانسنگ در مقیاس‌های ۱:۵۰۰، ۱:۱۰۰۰ و ۱:۲۰۰۰ تهیه و عملیات زمین‌فیزیک به روش مغناطیس‌سنجی زمینی روی آنها انجام شده است (Moridi, 2005). میزان اندوخته قطعی کانسنگ آهن خبر، بیشتر از ۳ میلیون تن با عیار متوسط ۵۰ درصد آهن گزارش شده است (Moridi, 2005). کانسنگ آهن خبر از دیدگاه کانی‌زایی در منطقه‌ای است که چندین کانه‌زایی دیگر نیز در نزدیک آن و در جنوب‌باختری خبر دیده می‌شود و می‌تواند کانه‌زایی آهن در غار نیگو، چاه گارسی، چاه انجیر، و غار گروه و کانه‌زایی

¹ Mississippi Valley-Type Deposit

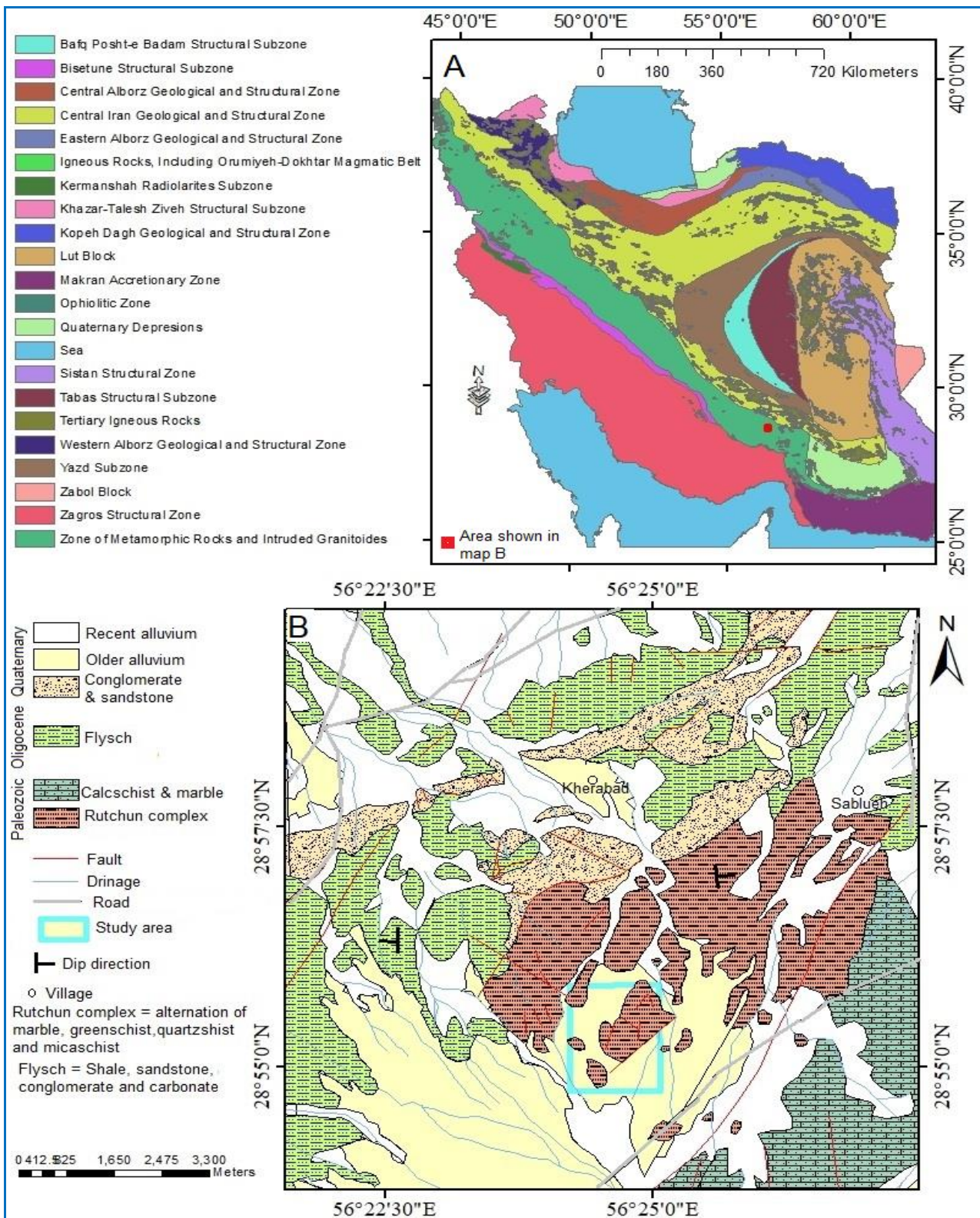
کرتاسهٔ پسین- پالئوسن را پیامد فرورانش یاد شده و کمر بند افیولیتی کرتاسهٔ پسین در حاشیهٔ جنوبی پهنهٔ سنندج-سیرجان و دگرگونی آن را پیامد بسته‌شدن نئوتتیس دانسته‌اند. تکامل ژئودینامیکی پهنهٔ سنندج-سیرجان بدین‌گونه است (Sheikholeslami, 2015):

- ۱- بازشدگی درون‌قاره‌ای به سن پالئوزویک در حاشیهٔ شمالی گندوانا و پیدایش اقیانوس نئوتتیس؛
 - ۲- فرورانش نئوتتیس از تریاس پسین به زیر پهنهٔ سنندج-سیرجان و ایران مرکزی؛
 - ۳- بسته‌شدن نئوتتیس در پایان مزوزویک.
- بر پایهٔ نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰:۱ خبر (Sabzehei, 1997) واحدهای سنگی در پیرامون محدودهٔ خبر شامل واحدهای سنگی پالئوزویک، نهشته‌های آواری ائو-الیگوسن و نهشته‌های کواترنری است (شکل ۱-B). سنگ‌های پالئوزویک شامل دو مجموعهٔ روتشون و خبر هستند. محدودهٔ معدنی یاد شده در مجموعهٔ روتشون جای دارد (شکل ۱-B). واحدهای سنگی این مجموعه به سن پالئوزویک زیرین (کامبرین بالایی-اردویسین) هستند و از قدیم به جدید عبارتند از: تناوب مرمر، میکاشیست، مرمر آنکریتی، گدازهٔ بازالتی دگرگون‌شده (شیست‌سبز) و تناوب شیست‌سبز، شیست‌های سیاه و گرافیت‌شیست. مجموعهٔ خبر که روی مجموعهٔ روتشون جای دارد، به سن پالئوزویک میانی (دونین) است و از تناوب کالک‌شیست و میکاشیست با تنوعی از مرمرهای سفید، خاکستری و سیاه ساخته شده است.

نهشته‌های آواری ائو-الیگوسن بیشتر از شیل، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و لایه‌های نارکی از سنگ آهک‌های نومولیت‌دار ساخته شده‌اند. این نهشته‌ها با مجموعهٔ روتشون توسط یک گسل تراستی در همبری هستند. واحدهای کواترنری شامل کنگلومرا، تراورتن، نهشته‌های رودخانه‌ای متعلق به پلیستوسن و نهشته‌های جدید روخانه‌ای و سیلابی هولوسن هستند.

مرتبط با مجموعهٔ افیولیتی هستند. سنگ‌های آتشفشانی با سن ژوراسیک پسین تا کرتاسه روی مجموعه‌های افیولیتی و رادیولاریت‌های کرتاسه در بخش‌هایی از پهنهٔ سنندج-سیرجان رانده شدند (Ghorbani, 2008). گسترش مجموعه‌های ترشیری در پهنهٔ سنندج-سیرجان اندک است و شامل تناوبی از سنگ‌های آواری سیلیسی و کربنات‌های کم‌ژرفا، گدازه‌های بازیک تا حد واسط، شیل و واحد کنگلومرایی و مارن می‌شوند. توده‌های آذرین درونی بسیاری در پهنهٔ سنندج-سیرجان وجود دارند که در دوره‌های تریاس میانی و پایانی، ژوراسیک پایانی، کرتاسه پیشین و پسین و پالئوسن تشکیل شده‌اند. این توده‌ها بیشتر ترکیب حد واسط تا اسیدی دارند (Ghorbani, 2008). دگرگونی در پهنهٔ سنندج-سیرجان نمود بسیاری دارد به‌گونه‌ای که ۴ فاز دگرگونی برای آن معرفی شده است (Ghorbani, 2008). بیشتر سنگ‌های پیش از مزوزویک در این پهنه دگرگون‌شده و چندین مرحله از دگرریختی را نشان می‌دهند و شامل شیست، فیلیت و آمفیبولیت می‌شوند. سنگ‌های کامبرین پسین-کامبرین پیشین در فاز نخست دچار دگرگونی ضعیفی شده‌اند؛ اما در فاز دوم دگرگونی مرتبط با سیمیرین پیشین رخ داده است که شدیدترین فاز است و شواهد آن در سرتاسر پهنهٔ سنندج-سیرجان به‌طور گسترده دیده می‌شود. در فاز سوم، فیلیت‌های همدان در ارتباط با سیمیرین پسین پدید آمده‌اند. فاز پایانی دگرگونی در این پهنه همزمان با فاز کوهزایی لارامید در کرتاسهٔ پسین رخ داده است (Ghorbani, 2008).

از دیدگاه پیدایش و سیر تکاملی پهنهٔ سنندج-سیرجان یک کمر بند باریک درون کراتونی در طول پالئوزویک و یک حاشیهٔ فعال قاره‌ای در طول مزوزویک بوده است (Berberian and King, 1981). سنگ‌های آتشفشانی تریاس پایانی-ژوراسیک پیامد بازشدن نئوتتیس هستند. جایگیری توده‌های آذرین درونی در زمان ژوراسیک میانی و



شکل ۱. جایگاه کانسنگ آهن خبر در (A) نقشه پهنه‌های ساختاری ایران (Aghanabati, 2010)؛ (B) بخشی از نقشه زمین‌شناسی (Sabzehei, 1997) ۱:۱۰۰۰۰۰ خبر.

Figure 1. Location of Khabr iron mineralization in (A) the map of Iran's geological zones (Aghanabati, 2010); (B) the geological map of Khabr (Sabzehei, 1997).

روش انجام پژوهش

در این پژوهش نخست بررسی‌های میدانی و نمونه‌برداری انجام شد. سپس با کمک تصویرهای ماهواره‌ای بینگ و ساس‌پلانت^۲ و نرم‌افزار ArcMap، نقشه‌های زمین‌شناسی محدوده کانسنگ آهن خیر در سامانه GIS ترسیم شد. برای بررسی کانی‌شناسی کانسنگ‌ها و سنگ‌های میزبان، شمار ۴۵ مقطع نازک از واحدهای سنگی و پهنه‌های دگرسانی و ۱۲ بلوک صیقلی از کانسنگ آهن و رگه‌های سولفیدی تهیه شد. مقاطع نازک با میکروسکوپ‌های نور عبوری و مقاطع صیقلی با میکروسکوپ نوربازتابی بررسی شدند.

برای شناسایی نوع دگرسانی و کانی‌های کانسنگ از روش‌های پراش پرتوی ایکس دیفراکتومتری^۳ و ریز کاو الکترونی (EPMA^۴) بهره گرفته شد. آنالیزهای XRD و EPMA در دانشگاه یاماگاتا در کشور ژاپن انجام شدند. پیش از آنالیز برای XRD شمار ۱۰ نمونه از کانسنگ و هاله دگرسانی با یک هاون آگاتی پودر شده و سپس نزدیک به یک گرم از آن داخل یک هولدر شیشه‌ای ریخته شد. این هولدر را در دستگاه پرتوی ایکس شرکت ریگاکو (MiniFlex II, Rigaku Corp) گذاشتند و برای 2θ دو تا شصت درجه تجزیه شدند. شناسایی کانی‌های با کمک نرم‌افزار شرکت ریگاکو و پایگاه داده مرکز بین‌المللی داده‌های پراش و انجمن بلورشناسی ژاپن انجام شده است. در روش EPMA، برای کانی‌های درون دو بلوک صیقلی از دستگاه JEOL JXA-8600Superprobe با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلووات و جریان پرتو آمپر ۲۰ nA به کار برده شد. استانداردهای به کار رفته عبارتند از FeS₂, CuFeS₂, ZnS, PbS, Sb₂S₃, Bi, Se, Te, Au, Ag. دقت آنالیزها از ۰/۱ درصد کمتر است که اثری روی محاسبه فرمول ندارد. با کمک این دستگاه نقشه‌های عنصری برای آرسنیک، سرب، روی و طلا تهیه شد. فرمول سولفیدها بر پایه درصدوزنی هر عنصر و وزن اتمی آن به دست آورده شد.

زمین‌شناسی کانسنگ آهن خیر

کهن‌ترین واحد سنگی در کانسنگ آهن خیر به مجموعه روتشون متعلق است که سن آن کامبرین میانی تا اردوئین زیرین دانسته می‌شود (Sabzehei, 1997). واحدهای سنگی این مجموعه شامل فیلیت، شیست سبز، میکاشیست و کوارتزیت و سنگ‌های کربناته (بیشتر مرمر) هستند (شکل ۲). فیلیت، شیست سبز، میکاشیست، و کوارتزیت جهت‌یافتگی و شواهدی از میلونیتی شدن را نشان می‌دهند که به صورت برگواره با رنگ سبز و خاکستری در زیر سنگ‌های کربناته جای دارند. میلونیتی شدن نشانه دگرریختی برشی و جای داشتن محدوده در یک پهنه برشی است. در این سنگ‌ها عدسی‌های کوچکی از آهن به صورت بودیناژ و جداگانه دیده می‌شوند که این نیز پیامد دگرریختی برشی است (شکل ۳-۱). سنگ‌های کربناته در بخش بالایی فیلیت و میکاشیست‌ها دیده می‌شوند و میزبان بخش بزرگی از کانی‌زایی آهن هستند (شکل ۳-۲). بر پایه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خیر سنگ‌های کربناته شامل سنگ آهک متبلور، مرمر، مرمر دولومیتی و آنکریتی است.

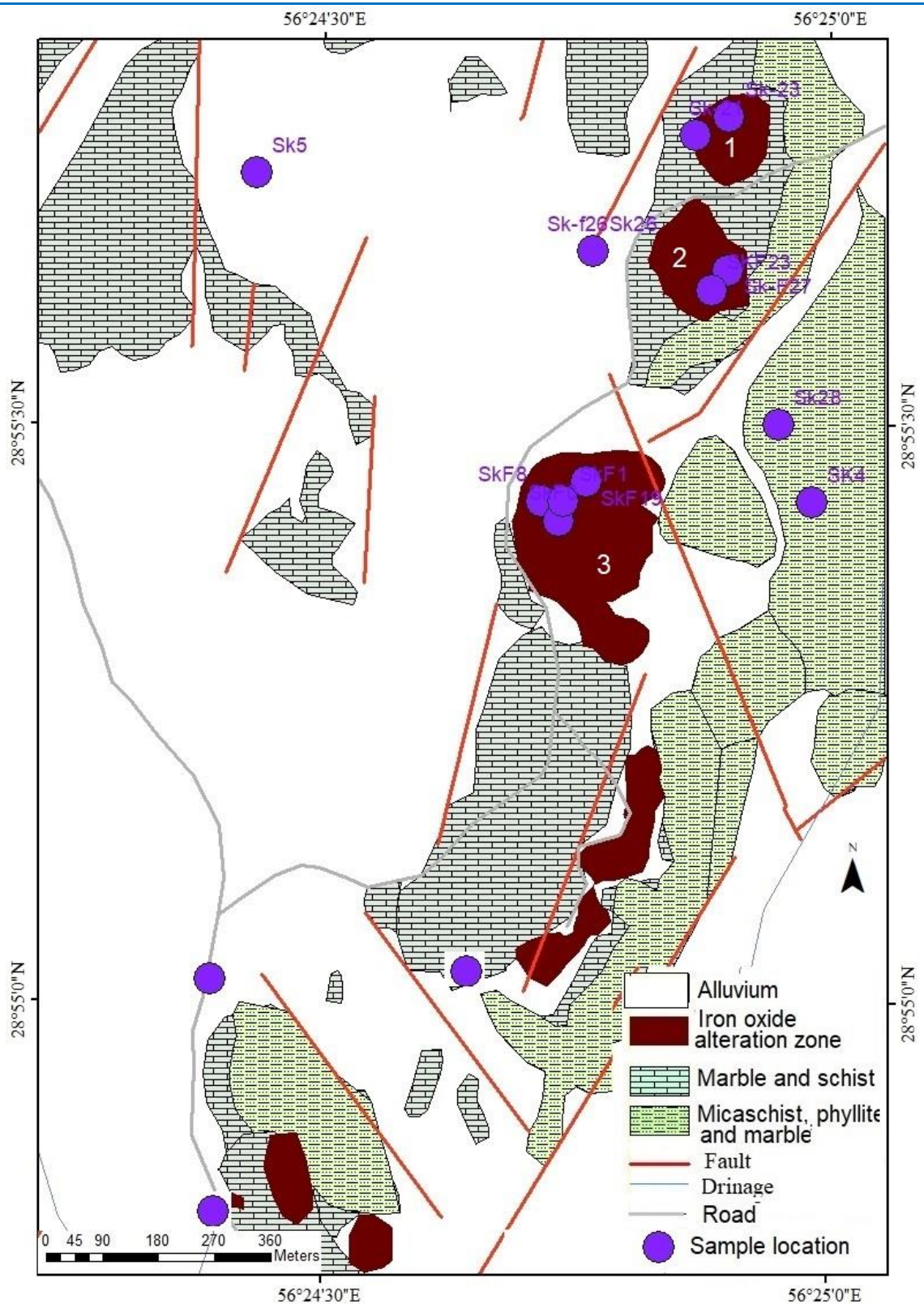
سنگ‌های کربناته در کنار کانسنگ آهن به علت آغشته شدن به اکسیدهای آهن با رنگ قهوه‌ای تیره و کمی دورتر کمرنگ هستند که به شکل توده‌های کوچک و بزرگ منفرد و پراکنده به صورت ضخیم‌لایه و نازک‌لایه بروزند دارند.

در محدوده کانسنگ آهن خیر، بروزنده‌های کوچکی از ماسه‌سنگ، کنگلومرا نیز دیده می‌شوند که به علت مقیاس نقشه، نمی‌توان آنها را نمایش داد. ماسه‌سنگ‌ها با سطح هوازدگی سیاه رنگ به صورت لایه‌های ناپیوسته در محدوده کانسنگ آهن پراکنده هستند و در برخی جاها تحت تأثیر نیروهای کششی به صورت بودیناژ در آمده و بیشتر میلونیتی شده‌اند و به مجموعه روتشون متعلق هستند. رگه‌ها و رگچه‌های کوارتز با ضخامت متغیر (از میلی‌متر تا بیشتر از یک متر) در فیلیت‌ها، شیست‌ها، کانسنگ آهن و سنگ‌های کربناته دیده می‌شوند (شکل‌های ۳-۱ و ۳-۲). شکل نامنظم، بافت توده‌ای، میلونیتی و برشی و دگرریختی از ویژگی‌های رگه‌های کوارتز هستند.

² SAS Planet

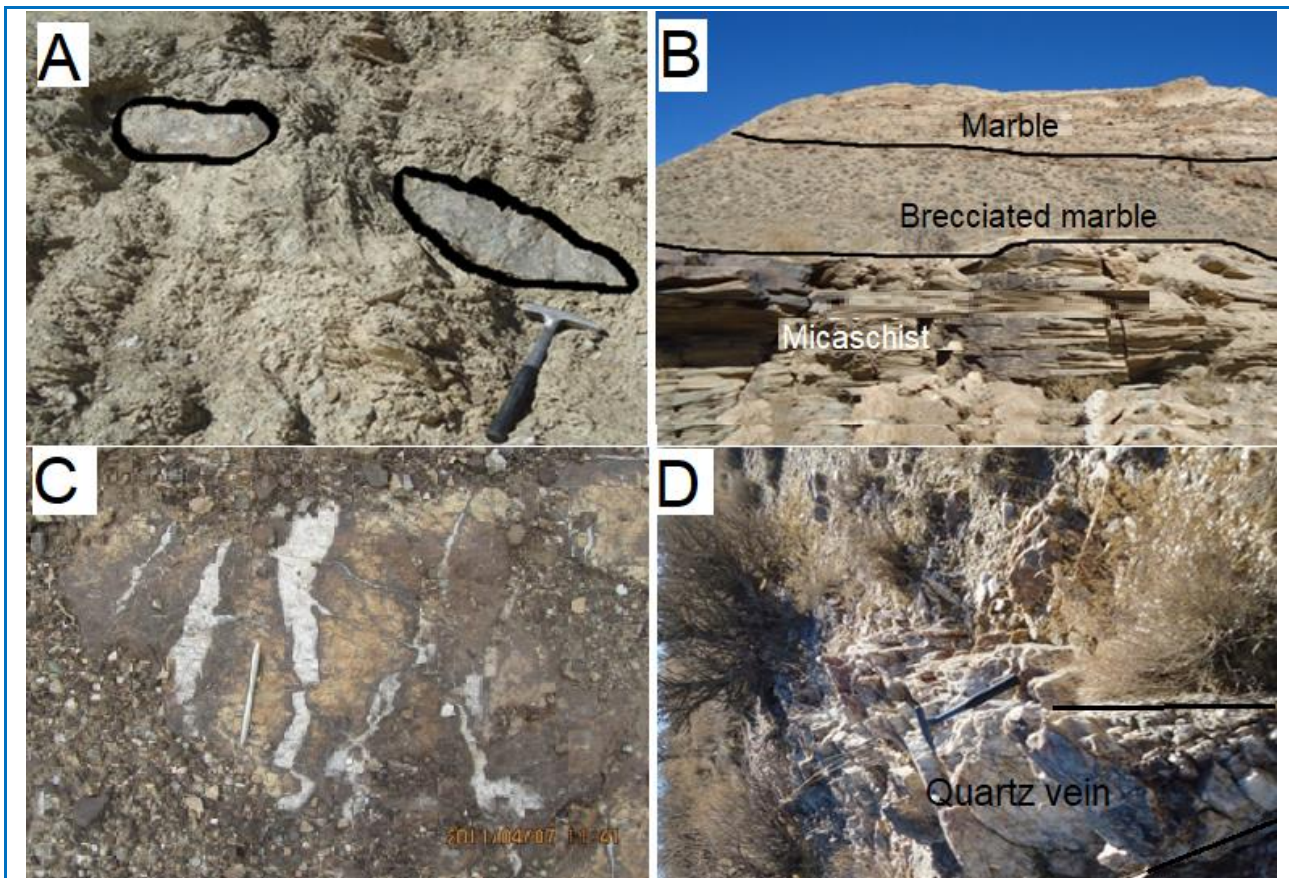
³ X-Ray Diffractometry

⁴ Electron Prob Micro Analysis



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده از کانسنگ آهن خبر، رسم‌شده بر پایه تصاویرهای ساس‌پلانت و بررسی‌های میدانی. شماره‌های سفید پهنه‌های اصلی اکسید آهن را نشان می‌دهند.

Figure 2. A simplified geological map of the Khabr Fe ore based on SAS Planet images and field studies. The white numbers show the main iron oxide zones.



شکل ۳. تصویرهای صحرایی از واحدهای سنگی کانسنگ آهن خبر (A) واحد میکاشیست میزبان دو عدسی کوچک سنگ آهن که دور آنها با خطوط سیاه نمایش داده شده است؛ (B) مرز واحدهای کربناته توده‌ای و برشی در بالا و میکاشیست در پایین؛ (C) رگچه‌های سفید رنگ کوارتز در سنگ آهک؛ (D) برونزد رگه سفید رنگ کوارتز در آبرفت‌ها.

Figure 3. Field photographs of the rock units of Khabr Fe ore; A) Mica-schist unit hosting two small iron ore lenses that are surrounded by black lines; B) Contact of massive and brecciated carbonate unit at the top and mica-schist at the bottom; C) White quartz veinlets in limestone; D) White quartz vein outcrop in alluviums

جنوب‌باختری و شمال‌باختری- جنوب‌خاوری دارند و بیشتر از نوع راست‌الغز و رورانده هستند (شکل ۲).

سنگ‌نگاری

میکاشیست‌ها در زیر میکروسکوپ، بافت گرانوبلاستیک تا لپیدوبلاستیک نشان می‌دهند و مسکوویت، بیوتیت، کلریت و کوارتز از کانی‌های اصلی سازنده آنها هستند (شکل‌های ۴-۱ تا ۴-۳). بلورهای مسکوویت، فضای میان دانه‌های کوارتز را پر کرده‌اند و در اطراف آنها دچار چرخش شده‌اند. همچنین، گاهی کینک‌بند نشان می‌دهند. بلورهای کوارتز دانه‌ای هستند و اندازه متغیر دارند. در نور XPL، خاموشی موجی، حاشیه‌های مضرسی و شکل یا ساخت چشمی و عدسی نشان

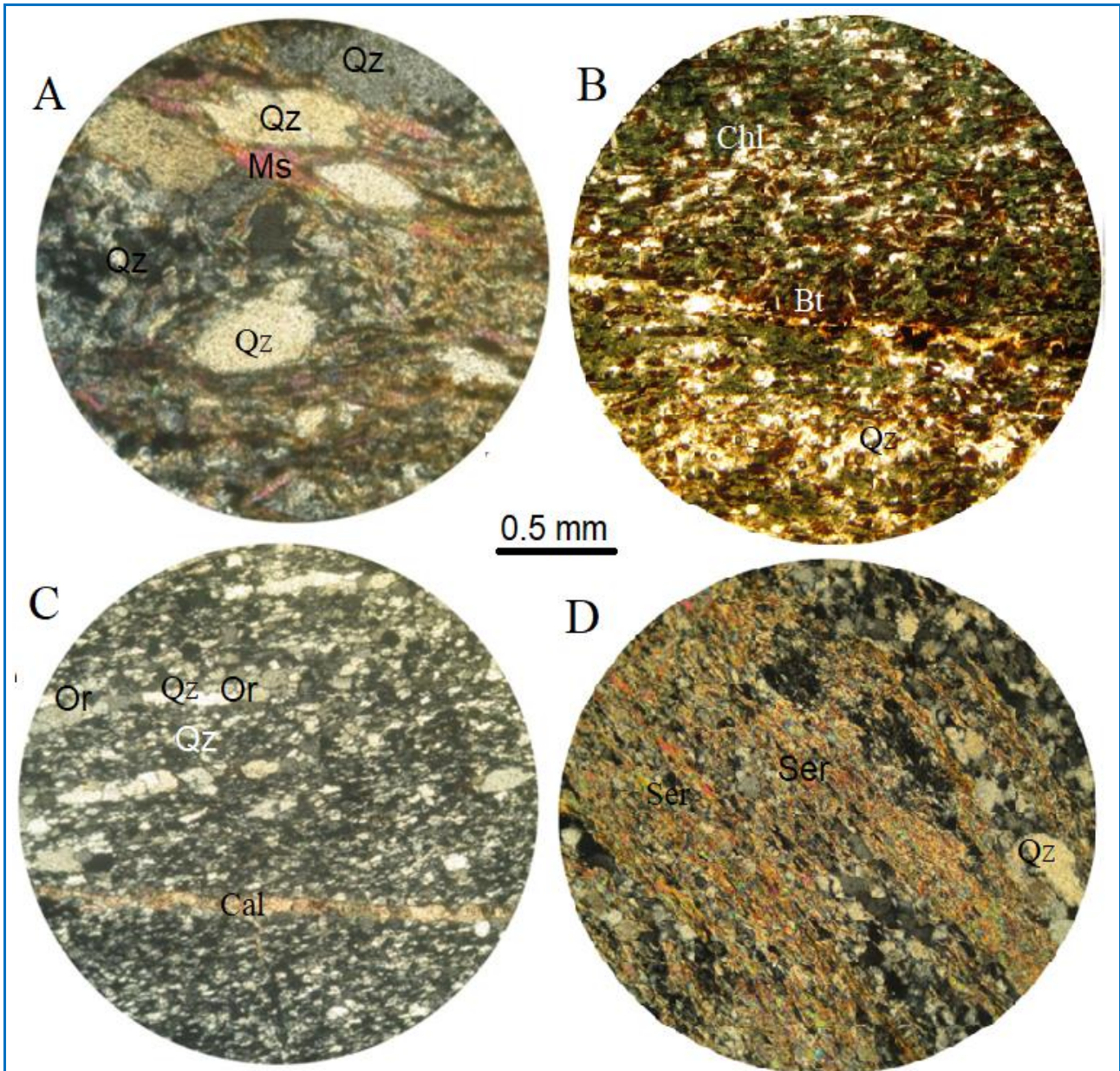
بیشتر این رگه‌ها برشی شده‌اند و شکستگی‌های فراوانی دارند. رگه‌های سیلیسی در نمونه دست‌ی به رنگ خاکستری، متراکم و سخت هستند و خردشدگی و شکستگی بسیاری در آنها دیده می‌شود و همچنین، بافت و ساخت میلونیتی نشان می‌دهند. ساخت و بافت میلونیتی در فیلیت و میکاشیست و حتی در مرمرها نیز دیده می‌شوند.

کنگلومرها در منطقه کانسنگ آهن خبر به صورت برونزدهای با ابعاد متفاوت، هم در نزدیکی و هم با فاصله از کانسنگ آهن هستند. این کنگلومرها از دیدگاه سنی دو دسته هستند: نوع قدیمی‌تر (ترشیری) و نوع جدیدتر (کواترنری). بخش بزرگی از محدوده را آبرفت‌های جدید پوشانده‌اند.

گسل‌های محدوده یادشده بیشتر روند شمال‌خاوری-

مقدار کم و سبز رنگ و پراکنده در زمینه سنگ و در امتداد سطوح شیستوزیته یافت می‌شود.

می‌دهند (شکل ۴-۱). در برخی میکاشیست‌ها، بلورهای بیوتیت به‌همراه کلریت‌های سبز رنگ در امتداد سطوح شیستوزیته دیده می‌شوند (شکل ۴-۲). اپیدوت بی‌شکل به



شکل ۴. تصویرهای میکروسکوپی از سنگ‌های میزبان کانسنگ آهن خیر در نور قطبیده متقاطع (A) میکاشیست شامل موسکوویت‌های خمیده در اطراف بلورهای چشمی و عدسی شکل کوارتز؛ (B) میکاشیست شامل بیوتیت، کوارتز، کلریت و اپیدوت؛ (C) میلونیت ساخته‌شده از دانه‌های جهت‌یافته کوارتز و ارتوکلاز؛ (D) فیلیت شامل بلورهای جهت‌یافته کوارتز و موسکوویت (نام اختصاری کانی‌ها از: Whitney and Evans, 2010).

Figure 4. Photomicrographs of host rocks in the Khabr iron ore in XPL; **A)** Muscovite crystals bending around quartz grains that occur as lens and eye-shaped; **B)** Biotite, quartz, chlorite and epidote crystals in micaschist; **C)** Quartz-schist composed of oriented quartz crystals; **D)** Phyllite composed of oriented quartz and muscovite (The mineral abbreviations from: Whitney and Evans, 2010).

شده‌اند.

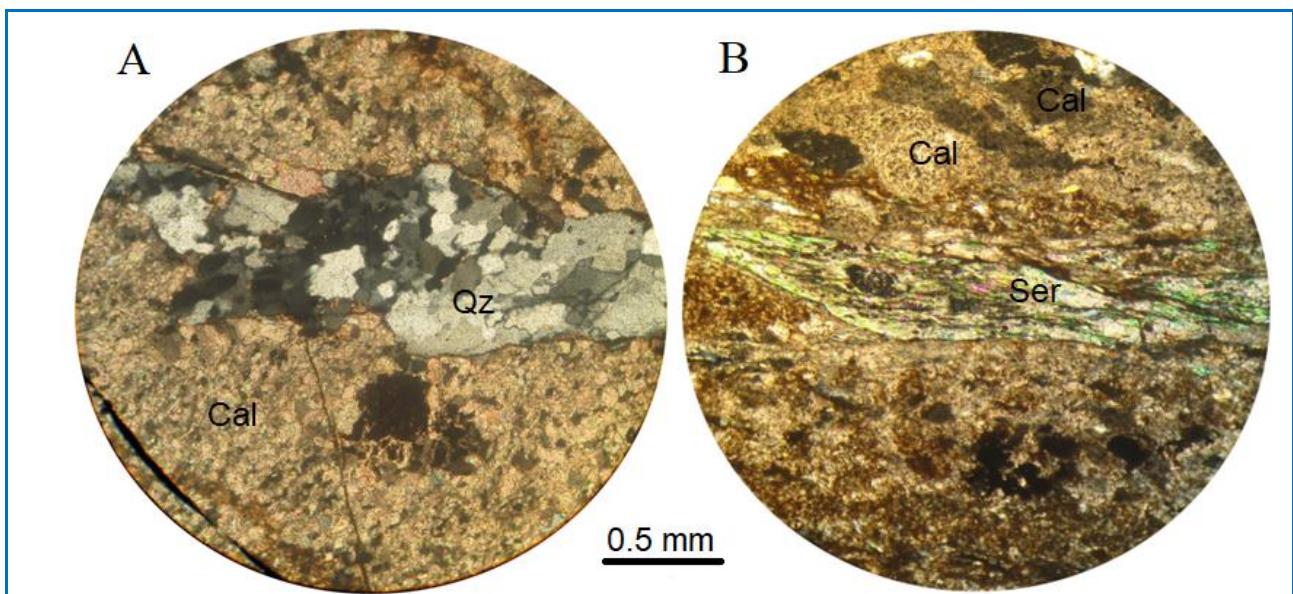
سنگ آهنک هم به‌صورت دانه‌ریز و هم به‌صورت دانه‌درشت یافت می‌شود. این سنگ‌ها بافت گرانولار، برشی، اسپاریتی و میکرایتی دارند. کلسیت کانی اصلی سازنده سنگ‌های کربناته است که معمولاً با دولومیت و آنکرایت همراهی می‌شود.

نمونه‌های برداشت‌شده از رگه‌های سیلیسی در زیر میکروسکوپ بیشتر از بلورهای کوارتز دانه‌ای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل ساخته شده‌اند و معمولاً خاموشی موجی دارند و بافت کاتاکلاستیک و میلونیتی نشان می‌دهند (شکل A-۶). در این رگه‌ها، بلورهای کوارتز با ریزگسل‌ها جابه‌جا شده‌اند. در واقع برگوارگی اولیه سنگ را برگوارگی شکننده پس از دگرگونی قطع کرده است (شکل A-۶). در فیلیت و شیست‌ها، بلورهای کوارتز سازنده اصلی هستند و به‌صورت دانه‌های بی‌شکل با ابعاد مختلف ریز و درشت به فراوانی در زمینه آنها دیده می‌شوند. این کوارتزها در بیشتر موارد حاشیه‌های مضرسی دارند. این سنگ‌ها مورد هجوم اکسیدهای آهن قرار گرفته‌اند (شکل B-۶).

میلونیت یا کوارتزیت میلونیتی بیشتر از کوارتز و مقادیری ارتوکلاز و پلاژیوکلاز ساخته شده است. این کانی‌ها در این سنگ نیز جهت‌یافتگی ترجیحی نشان می‌دهند (شکل C-۴). رگچه‌های ثانویه کلسیت، بافت نخستین این سنگ را قطع کرده‌اند (شکل C-۴).

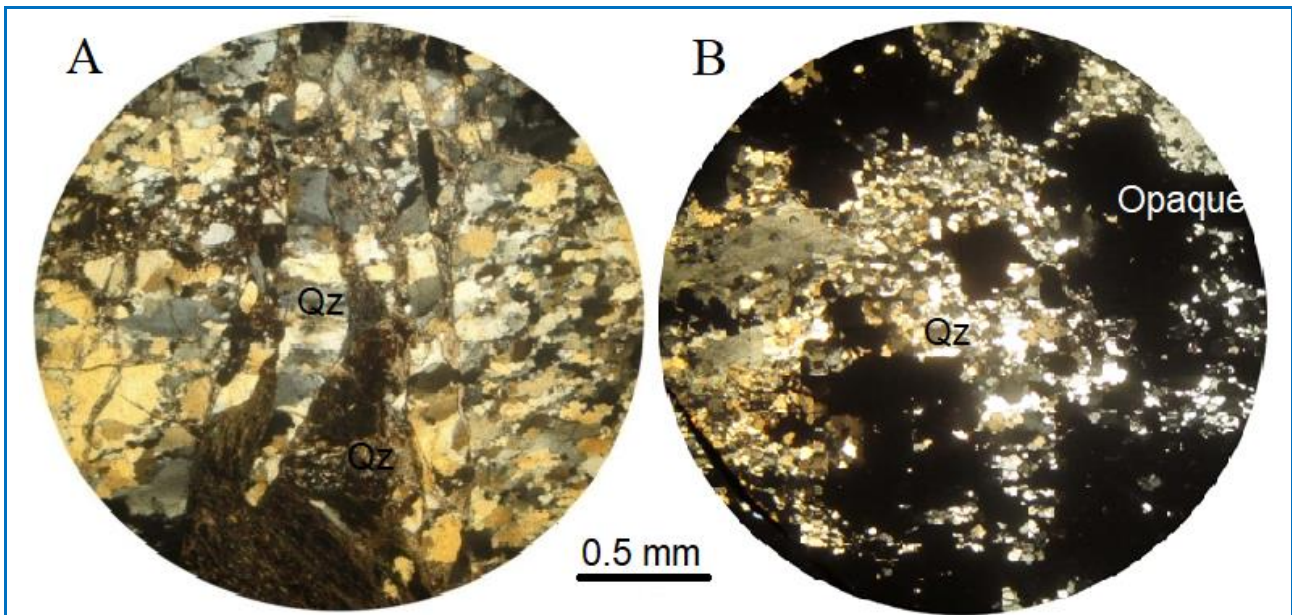
فیلیت فراوان‌ترین سنگ میزبان در محدوده کانسنگ آهن خبر است. کانی‌های اصلی سازنده آن شامل مسکوویت و کوارتز است که جهت‌یافتگی ترجیحی یا بافت لپیدوبلاستیک را نشان می‌دهند (شکل D-۴).

مرمر بافت موزاییکی و اسپاریتی دارد و بیشتر از کلسیت و مقدار کمی دولومیت ساخته شده است. بلورهای کلسیت و دولومیت به‌علت دگرگونی دچار تبلور دوباره شده‌اند و به‌صورت درشت بلور درآمده‌اند (شکل‌های A-۵ و B-۵). در این سنگ‌ها، کوارتز به‌صورت بی‌شکل، پراکنده و همچنین، به‌صورت رگچه و ریزرگچه سیلیسی نفوذ کرده است (شکل A-۵). سربیسیت یا مسکوویت نیز در بخش‌هایی از این سنگ دیده می‌شوند (شکل B-۵). در مرمرها، شبکه‌ای از شکستگی‌ها و درزه‌ها دیده می‌شود که با اکسیدهای آهن پر



شکل ۵. تصویرهای میکروسکوپی مرمر در نور قطبیده متقاطع (A) ریزرگچه کوارتز در مرمر، بلورهای کلسیت را قطع کرده است؛ (B) ریزرگچه سربیسیت در مرمر که دانه‌های کلسیت را قطع کرده است (نام اختصاری کانی‌ها از: Whitney and Evans, 2010).

Figure 5. Photomicrographs of marble in XPL; A) Quartz microveinlet in marble cut the calcite crystals; B) Sericitic microveinlet in marble cut the calcite grains (Mineral abbreviations from: Whitney and Evans, 2010)



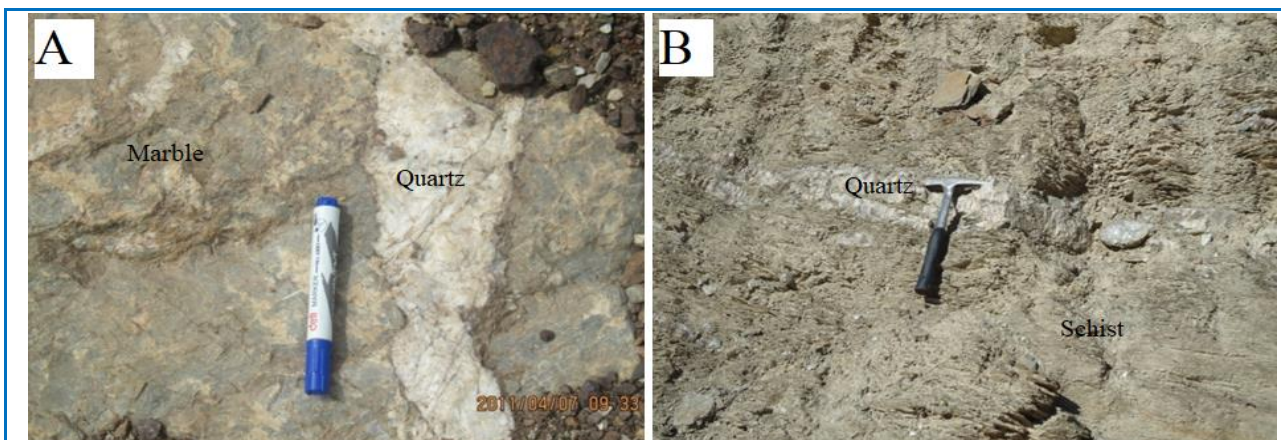
شکل ۶. تصویرهای میکروسکوپی در XPL از **A** برگوارگی صفحه‌ای اولیه سنگ (برگوارگی افقی) که با برگوارگی دینامیکی ثانویه و پس از دگرگونی (برگوارگی عمودی) قطع شده است؛ **B** نفوذ اکسیدهای آهن (کانی کدر) در فضای خالی و درزه‌ها (نام اختصاری کانی‌ها از: Whitney and Evans, 2010).

Figure 6. Photomicrographs from **A**) Primary foliation of the rock (horizontal foliation) that is interrupted by post-metamorphism and dynamical foliation (vertical foliation); **B**) Penetration of iron oxides (opaque) in open spaces and fractures (The abbreviations: Qz: quartz; Whitney and Evans, 2010).

سنگ‌های کربناته (شکل A-۷) و غیرکربناته (شکل B-۷) دیده می‌شود. در مقیاس میکروسکوپی، دگرسانی سیلیسی در مرمر، ماسه سنگ و شیست‌ها نیز دیده می‌شود (شکل‌های A-۵ و A-۶ -B). در شیست‌ها، دگرسانی سیلیسی (شکل B-۷) به صورت رگه‌های بدون کانی‌زایی دیده می‌شود.

دگرسانی

در سنگ‌های میزبان و کانسنگ آهن، سه نوع دگرسانی سیلیسی شدن، کربناتی شدن و هماتی-گوتیتی شدن دیده می‌شود. دگرسانی سیلیسی با پیدایش کوارتز شناخته می‌شود. کوارتز به صورت رگچه‌های ژئودی و پرکننده حفره‌ها در



شکل ۷. تصویر رگچه‌های سیلیسی در سنگ‌های میزبان **A** در سنگ‌های کربناته؛ **B** در فیلیت و شیست‌ها.

Figure 8. Photos of silicic veins in the host rocks in **A**) carbonate rocks; **B**) phyllites and schists.

هیدرواکسیدهای آهن آغشته شده‌اند. شمار برونزدهای تپه‌مانند اصلی کانسنگ‌دار در محدوده یادشده شامل سه تپه شمالی، میانی و جنوبی هستند (شکل ۳). برونزدهای مشابهی نیز در بیرون از محدوده کانسنگ آهن خبر دیده می‌شوند. طول و عرض رگه‌های کانی‌زایی پرعیار آهن در تپه شمالی به ترتیب ۳۵ و ۲۳ متر، در تپه میانی ۳۵ و ۲۵ متر و در تپه جنوبی ۴۲ و ۲۱ متر است (Moridi, 2005). هاله دگرسانی کم‌عیار و آغشتگی سنگ‌های کربناته به اکسید آهن در اطراف بخش پرعیار گسترش بسیاری دارد.

کانه‌زایی آهن درون‌زاد

کانه‌زایی آهن درون‌زاد در برونزدها کمیاب است. بررسی نمونه‌های برداشت‌شده از برونزد کانسنگ آهن در زیر میکروسکوپ نور بازتابی نشان می‌دهد مگنتیت، کانی اصلی کانیه‌زایی درون‌زاد است و ساخت و بافت آن اولیه و جانشینی است. بلورهای پراکنده مگنتیت کمتر از ۲ تا ۱۰ درصد مقاطع بررسی شده را دربر گرفته‌اند. کانی‌های باطله در کانسنگ آهن خبر شامل کلسیت و کوارتز است که مرز میان آنها با رگچه‌های ثانویه هماتیت و گوتیت پوشیده شده است. مگنتیت‌ها به صورت بلورهای پراکنده و شکل‌دار با رنگ کرمی هستند که بخشی از آنها با مارتیت یا هماتیت و هیدرواکسیدهای آهن (شکل ۱۰-A) جایگزین شده‌اند. پیریت‌های اولیه نیز در نمونه‌ها دیده می‌شوند که پس از مگنتیت پدید آمده‌اند و با گوتیت جانشین شده‌اند؛ اما بقایایی از آنها هنوز دیده می‌شوند (شکل ۱۰-A).

کانه‌زایی سولفیدی درون‌زاد

کانه‌زایی سولفیدی درون‌زاد، کانیه‌زایی اکسیدی را قطع کرده است و به‌طور آشکار پس از آن رخ داده است (شکل B-۹). کانیه‌زایی سولفیدی درون‌زاد در رگه‌های سیلیسی، حفره‌ها و ژئودها پدید آمده است که با دگرسانی سیلیسی همراه است و بیشتر شامل کوارتز و سولفید هستند (شکل‌های B-۹، C-۹ و D-۹). سولفیدهای اولیه بیشتر شامل، پیریت (۱۰ تا ۳۰ درصد حجمی)، ارسنوپیریت (۱۰ تا ۲۵ درصد حجمی) و کالکوپیریت (۱ تا ۵ درصد حجمی) همراه با کانی‌های باطله هستند.

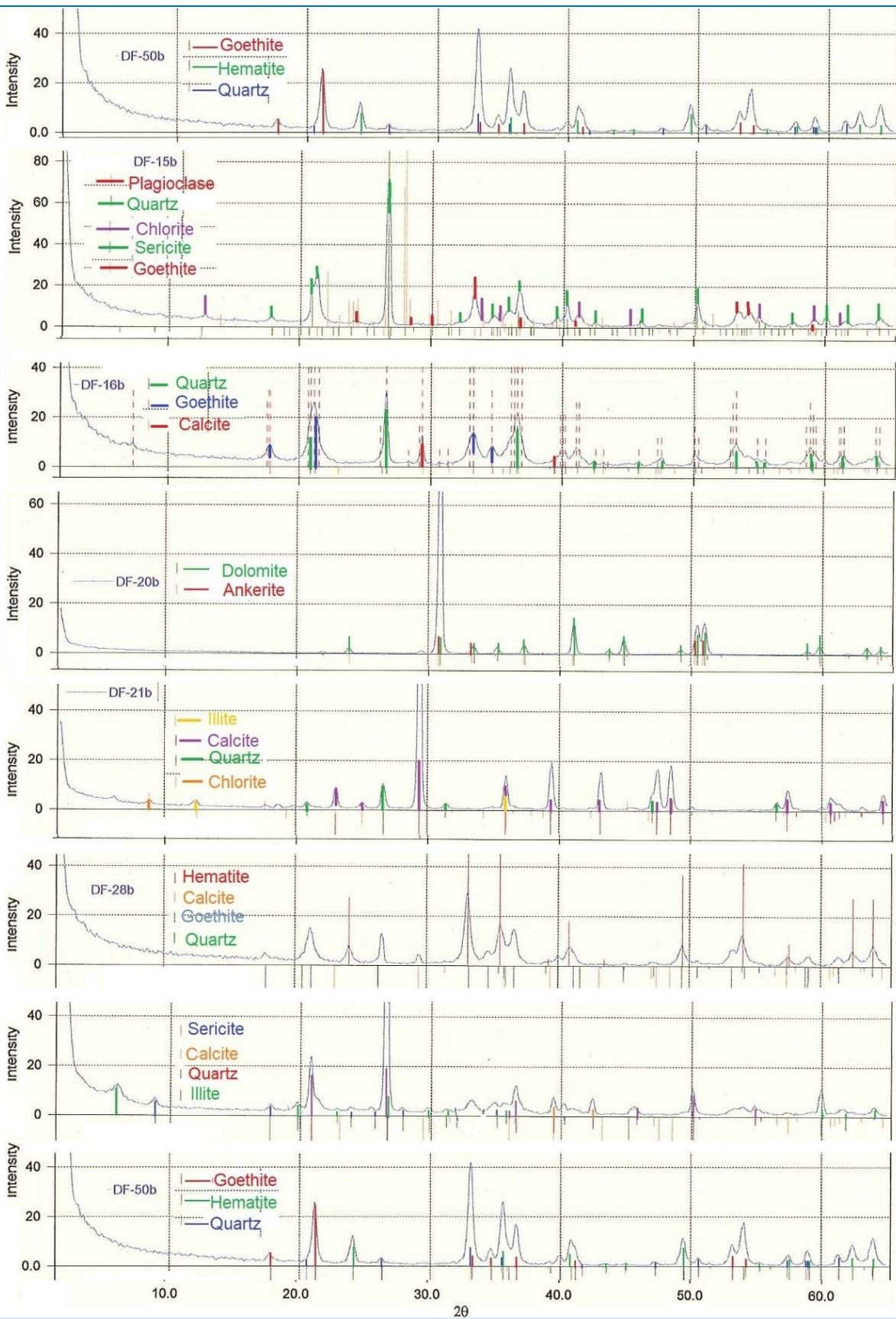
دگرسانی سیلیسی بیشتر به شکل کوارتز با اندکی کلسدونی است. کوارتزهای همراه با کانی‌زایی در مجاورت رگه‌های سولفیدی و هیدرواکسیدهای آهن جای دارند. بر پایه نتایج XRD، کوارتز، کلسیت، دولومیت، آنکریت، کلریت، ایلیت و سریسیت از کانی‌های رایج در این دگرسانی هستند (شکل ۸). وجود کانی‌های رسی (ایلیت) و سریسیت در کنار کوارتز، تأییدکننده محیط اسیدی حاکم بر دگرسانی سیلیسی است.

کربناتی‌شدن با حضور کانی‌های کلسیت، دولومیت و آنکریت در بخش‌های کانی‌زایی شده و دگرسان‌شده شناسایی می‌شود. این کانی‌ها هم به صورت رگچه‌ای و هم به صورت جانشینی (دولومیت و آنکریت جانشین کلسیت‌های نخستین شدند) گسترش یافته‌اند. وجود دولومیت و آنکریت در نمودارهای XRF تأیید شده است (شکل ۸).

دگرسانی هماتیتی-گوتیتی در مرمرها رخ داده است و با رنگ قهوه‌ای مایل به سرخ شناسایی می‌شود. این رنگ پیامد نفوذ مقدار اندکی هماتیت و گوتیت در امتداد شبکه درزه در مرمر است. دگرسانی هماتیتی نشانه مهمی در پی‌جویی کانسنگ‌های آهن در این ناحیه شمرده می‌شود.

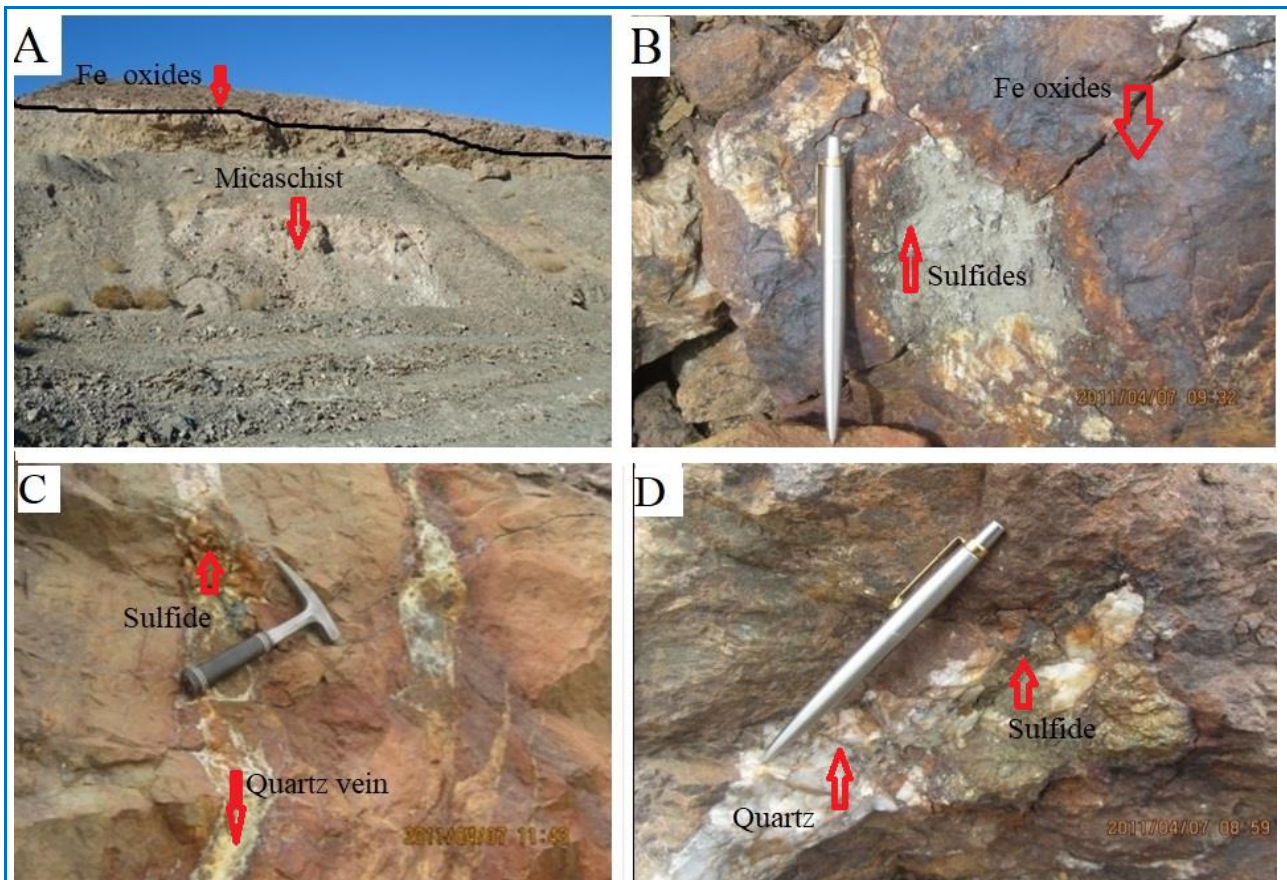
کانه‌زایی

در کانسنگ آهن خیر، کانیه‌زایی به صورت اکسیدی و سولفیدی رخ داده است. کانیه‌زایی اکسیدی درون مرمر و روی میکاشیست‌ها به شکل عدسی و رگه‌ای رگچه‌ای رخ داده است (شکل‌های A-۳، A-۹ و B-۹)، اما کانی‌زایی سولفیدی به صورت رگه‌ای و پرکننده فضای خالی هم در کانسنگ آهن و هم در سنگ‌های میزبان آن روی داده است (شکل‌های C-۹ و D-۹). هر دو نوع کانی‌زایی را می‌توان به انواع درون‌زاد و برون‌زاد دسته‌بندی کرد. کانی‌زایی آهن خبر در برنزهایی رخ داده است که نسبت به پیرامون خود مرتفع‌تر و از دیدگاه رنگ متمایز هستند (پهنه دگرسانی آهن با رنگ قهوه‌ای در شکل ۳). این برونزدها، به شکل تپه یا کلاهک قارچی منفرد با رنگ قهوه‌ای تا سیاه و ترکیب غالب کربناته هستند که به شدت به اکسیدها و



شکل ۸. نمودارهای XRD از نمونه‌های دگرسان‌شده در کانسنگ آهن خبر.

Figure 8. Graphs of XRD for the altered samples in the Khabr iron ore.



شکل ۹. تصویرهای صحرایی از برونزد کانسنگ آهن خبر (A) برونزد کانسنگ آهن در مرز با میکاشیست‌ها (دید رو به شمال); (B) برونزد سنگ آهن از نمای نزدیک با یک رگه کوارتز-سولفید; (C و D) رگچه‌های سولفیدی در سنگ‌های کربناته متأثر از هیدرواکسیدهای آهن.

Figure 9. Field photos of the Khabr iron ore outcrop (A) Iron ore outcrop in contact with the micaschist (northward view); (B) Close-up of the iron ore outcrop with a quartz-sulfide vein; (C and D) Sulfide veinlets in the carbonate rocks that affected by iron hydroxides.

ریزکاو الکترونی اندازه‌گیری شد. داده‌های به‌دست‌آمده نشان دادند که مقدار عنصرهای اصلی گوگرد، آرسنیک و آهن در آن به‌ترتیب ۳۳/۶۰، ۳۲/۲۱ و ۳۹/۳۸ درصدوزنی است (جدول ۱). عنصرهای دیگر در این کانی اندک هستند؛ به‌گونه‌ای که مقدار طلا، نقره، سرب، تلوریم و آنتیموان ناچیز یا صفر و نزدیک به آستانه آشکارسازی دستگاه ریزکاو الکترونی است.

کالکوپیریت: کالکوپیریت به مقدار اندک در فضای میان آرسنوپیریت و پیریت دیده می‌شود (شکل B-۱۰). این کانی در نور پلاریزه طبیعی به رنگ زرد پُرنرنگ، بی‌شکل و پراکنده دیده می‌شود. عنصرهای اصلی آن مس، آهن و گوگرد به‌ترتیب

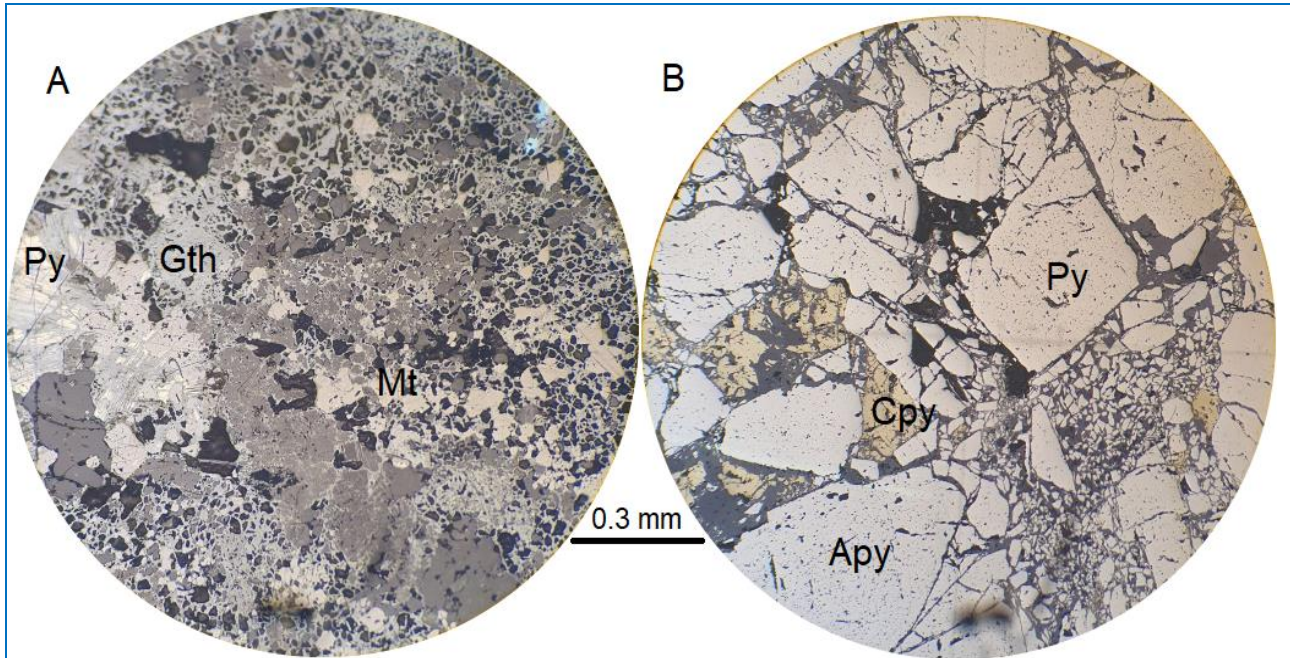
کانه‌نگاری و شیمی سولفیدها

آرسنوپیریت: این کانی در نور بازتابی قطبیده مسطح (PPL) از پیریت روشن‌تر و تقریباً سفیدرنگ و بلورهای کاملاً شکل‌داری دارد (شکل B-۱۰). در این نور بی‌رفلکتانس^۵ و چندرنگی ضعیفی (سفید تا کرم رنگ) از خود نشان می‌دهد. در نور پلاریزه متقاطع (XPL) ویژگی ان‌ایزوتروپی آبی تا سبز دارد. آرسنوپیریت‌ها به‌صورت برشی درون درز و شکاف‌ها و نیز به‌صورت خُردشده و برشی در کنار کالکوپیریت دیده می‌شوند و بیشترشان بافت گرانولار و برشی دارند (شکل B-۱۰). ترکیب شیمیایی آرسنوپیریت با کمک دستگاه

⁵ Bireflectance

وجود دارد و مقادیرهای دیگر عناصرها به اندازه آستانه آشکارسازی دستگاه ریزکاوالکترونی هستند.

۱). مقدار اندکی سرب و آرسنیک در ترکیب آن (جدول ۳۴/۱۶ و ۳۰/۸۳، ۳۵/۴۶ درصدوزنی هستند)



شکل ۱۰. تصویرهای میکروسکوپی نور بازتابی (PPL) از کانه‌زایی آهن درون‌زاد در کانسنگ آهن خبر (A) مگنتیت‌های شکل‌دار که بخش‌هایی از آنها به مارتیت تجزیه شده‌اند و بقایای پیریت‌ها که با گوتیت جانشین شده‌اند؛ (B) بلورهای خردشده پیریت، آرسنوپیریت و کالکوپیریت در فضاهای خالی (نام اختصاری کانی‌ها از: Whitney and Evans, 2010).

Figure 10. Microscopic photos of hypogene mineralization from Khabr iron ore (A) Euhedral magnetites altered to martite and the pyrite that was replaced by goethite (Gth); (B) Crushed pyrite (Py), arsenopyrite (Apy) and chalcopyrite (Cpy) in the open spaces (The mineral abbreviations from: Whitney and Evans, 2010).

جدول ۱. داده‌های ریزکاوالکترونی برای دانه‌های آرسنوپیریت و کالکوپیریت در کانسنگ آهن خبر (عناصرها پایه درصدوزنی).

Table 1. EPMA Results of arsenopyrite and chalcopyrite grains of Khabr Fe ore (elements are in wt.%).

Sample No.	A12	A13	A14	A15	A16	F291	F2921	F293	F294	F295	F296
Sulfides	Arsenopyrite										Chalcopyrite
Cu	0	0.03	0.07	0.1	0.81	0	0	0	0	35.4	35.3
Fe	37.8	37.8	35.1	36.3	36.2	37.3	37.2	38.5	37.7	31	30.6
As	41	40.7	40.7	40.6	42.2	42.4	42	41.2	40.2	0.05	0
Ag	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0.03	0	0
Sb	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0
Pb	0.05	0.06	0.01	0.04	0	0.12	0.1	0.08	0.15	0.1	34
Au	0.06	0.02	0	0	0	0	0.02	0	0.04	0	0.14
Te	0.01	0.01	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0
S	21.5	21.6	21.2	21.3	21.1	21.1	21.4	21.9	21.8	34	34
Total	100	100	97.3	98.7	100	101	100.8	101.	100	101	100

جدول ۱. ادامه (عنصرها بر پایه اتم در واحد فرمولی).

Table 1. Continued (elements are in wt.% and a.p.f.u.).

Sample No.	A12	A13	A14	A15	A16	F291	F2921	F293	F294	F295	F296
Sulfides	Arsenopyrite									Chalcopyrite	
Cu	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0.55	0.55
Fe	0.67	0.67	0.63	0.65	0.64	0.66	0.67	0.6.9	0.67	0.55	0.55
As	0.54	0.54	0.54	0.54	0.56	0.56	0.56	0.55	0.54	0	0
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Au	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Te	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S	0.67	0.67	0.6	0.66	0.65	0.70	0.67	0.68	0.68	1.07	1.05

سرب وجود دارد که بیشینه آن ۰/۱۷ درصدوزنی است و در فرمول آوردنی نیست. مقدار بیسموت گاه چشمگیر و در یک مورد ۰/۴۳ درصدوزنی می‌رسد. مقدار طلا نسبت به مقدارهای آن در آرسنوپیریت و کالکوپیریت بیشتر است و از صفر تا ۷۰۰ ppm متغیر است. با وجود این، می‌تواند به اندازه آستانه آشکارسازی دستگاه باشد. مقدار نقره و جیوه ناچیز هستند. مقدار سلنیم، منگنز، تلوریم، کادمیم و روی صفر یا نزدیک به صفر هستند و از این‌رو، از جدول داده‌ها حذف شدند.

پیریت: پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی در کانسنگ آهن خیر شمرده می‌شود که در نور بازتابی پلاریزه مسطح (PPL) به رنگ زرد و به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار، بی‌شکل و شکل‌دار دیده می‌شود (شکل ۱۰-B) در برخی موارد پیریت از مرکز توسط گوتیت جانشین شده است (شکل ۱۰-B). میانگین عنصرهای اصلی آهن و گوگرد در پیریت‌ها به ترتیب ۴۵/۴۹ و ۴۷/۱۶ درصدوزنی است (جدول ۲). مقدار آرسنیک در یک دانه از پیریت چشمگیر و در بقیه آنها ناچیز است. در ترکیب این کانی مقداری

جدول ۲. داده‌های ریزکاو الکترونی روی دانه‌های پیریت در کانسنگ آهن خیر (بر پایه درصدوزنی).

Table 2. Results of chemical analysis of EPMA on pyrite grains in Khabr iron ore (in wt.%).

Sample No.	A13	A14	A16	A21	A22	F2912	F2913	F2931	F2932	F2933	F2934	F2941
Cu	0	0	6.04	0	0	0	0.04	0	0	0	0.25	0.14
Fe	48.1	46.1	44.6	48.2	48.3	47.5	48	47.4	48	48	48	47.7
As	0.86	0.08	0	0	0.03	0	0	0	0.011	0	0.05	0
Ag	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0
Pb	0.11	0.09	0.012	0.09	0.17	0.04	0.11	0.09	0.14	0.06	0.12	0.08
Hg	0	0	0	0	0.15	0	0.05	0.01	0.13	0.21	0	0
Bi	0.16	0.43	0	0.32	0.16	0	0	0.27	0.25	0.32	0	0
Au	0.01	0.03	0.07	0.06	0	0	0	0	0.04	0	0	0
S	51	52.3	48.7	49	48.7	52	52	52	52	51	52	52
Total	100.5	99.8	99.8	98.2	97.59	99.9	100.5	99.72	100.6	99.7	100	100.2

جدول ۲. ادامه (بر پایه a.p.f.u.).

Table 2. Continued (in a.p.f.u.).

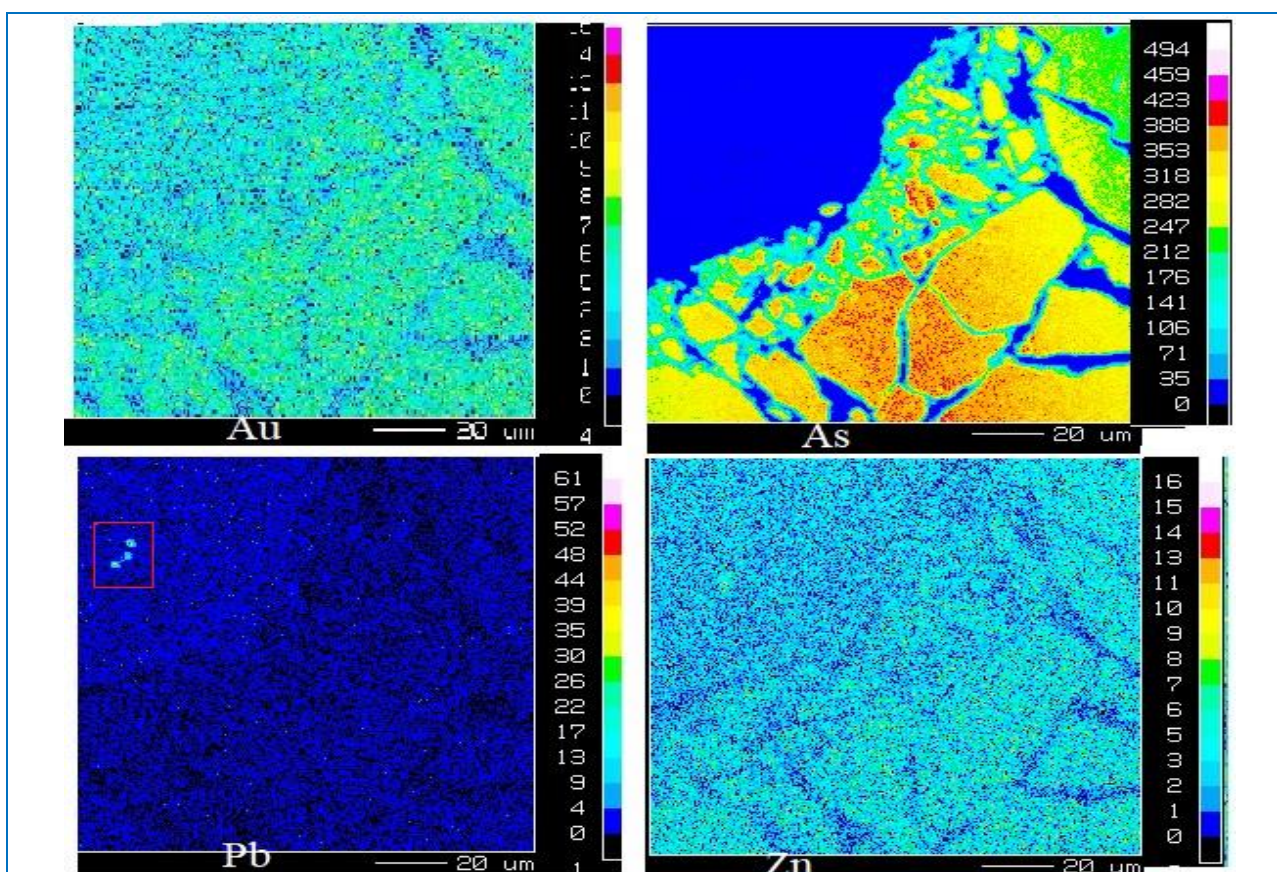
Sample No.	A13	A14	A16	A21	A22	F2912	F2913	F2931	F2932	F2933	F2934	F2941
Cu	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe	0.86	0.83	0.7	0.86	0.86	0.85	0.86	0.67	0.81	0.85	0.86	0.85
As	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bi	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Au	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S	1.6	1.63	1.51	1.53	1.51	1.62	1.62	1.67	1.62	1.62	1.62	1.63

کوولیت: کوولیت و بورنیت به مقدار ناچیز در کانستگ

آهن خبر دیده شده است که در نور PPL به ترتیب رنگ آبی و قهوه‌ای تا بنفش و بلورهای بی‌شکل دارند. کوولیت جانشین بورنیت و کالکوپریت شده است.

نقشه‌های عنصری: با توجه به حضور

ارسنوپریت در رگه‌های سیلیسی فرضیه حضور طلا و عنصرهای ردیاب با تهیه نقشه‌های تک عنصری با ریزکاوالکترونی بررسی شد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. نقشه‌های عنصری Au و As و Pb و Zn تهیه‌شده با دستگاه ریزکاوالکترونی از یک نمونه سولفیدی در کانستگ آهن خبر بر پایه کانت که نشان می‌دهد مقدارهای طلا ناچیز، آرسنیک بسیار بالا، سرب بالا و روی کم است. سه پهنه با غلظت بالای سرب، نشان‌دهنده حضور گالن است.

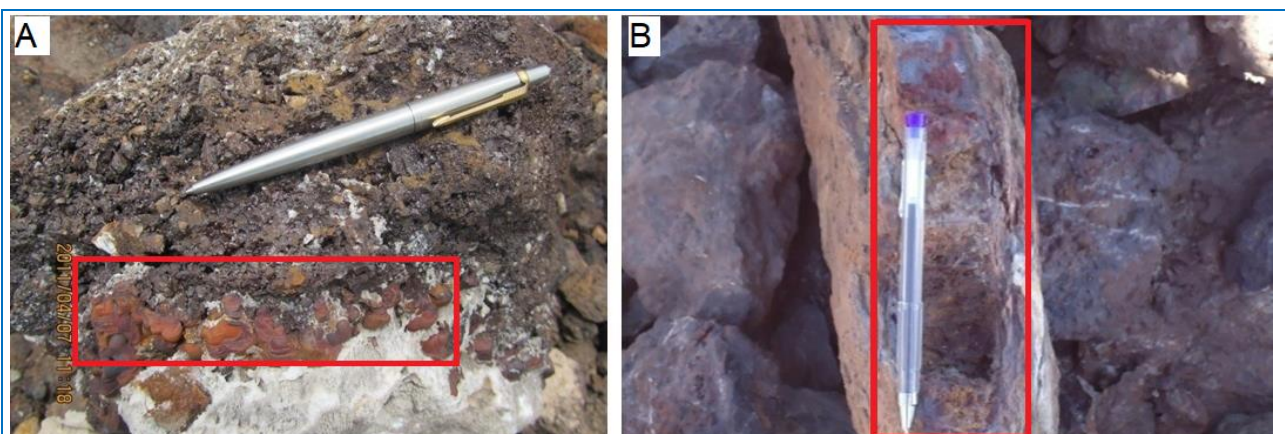
Figure 11. Map of Au, As, Pb, and Zn in a sulfide-bearing sample by EPMA from Khabr Fe ore in terms of count, indicating contents of Au is low, As is very high, Pb is high and Zn is low and three whiter grains in Pb map indicating galena.

نشان می‌دهند گوتیت، هماتیت و لیمونیت از کانی‌های آهن برون‌زاد هستند (شکل ۸). مارتیت و هیدراکسیدهای آهن نشان‌دهنده کانی‌زایی برون‌زاد در شرایط اکسیدان و هوازدگی هستند که در پی نفوذ جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی از تجزیه مگنتیت و سولفیدها به‌ویژه پیریت پدید می‌آیند. در کانسنگ آهن خبر، گوتیت با رنگ خاکستری روشن به‌صورت بی‌شکل هم به‌صورت جانشینی در پیریت (شکل ۱۰-A) و هم به‌صورت پرکننده شکاف‌ها و فضاهای خالی دیده می‌شود. گوتیت پایدارترین و آخرین کانی اکسید آهن در شرایط اکسیداسیون و برون‌زاد است. در کانسنگ‌های آهن خبر، مگنتیت نخست با مارتیت یا هماتیت و سپس با گوتیت جایگزین شده است. کانی‌های برون‌زاد هیدرواکسیدی در برونزدها به‌صورت هاله‌های پیرامون کانی‌های سولفیدی را فرا گرفته‌اند و به رنگ‌های زرد، سرخ و قهوه‌ای دیده می‌شوند. بررسی داده‌های XRD نشان می‌دهد این کانی‌ها بیشتر هماتیت و گوتیت هستند. در کانسنگ آهن خبر، ساخت‌های ثانویه فراوانی مانند ساخت‌های خوشه‌ای، کلوبیدی، جعبه‌ای، حفره‌ای، ریتمیک، جانشینی و رگه‌ای و پرکننده شکاف‌ها دیده می‌شوند (شکل‌های ۱۲-A و ۱۲-B). حضور این ساخت‌ها و بافت‌ها همراه با هیدرواکسیدهای آهن بیشتر ویژگی پیدایش آنها در شرایط برون‌زاد است (Guilbert and Park, 1986).

دقت این روش نزدیک به ۰/۱ تا ۰/۵ درصد است. بنابراین اگر فاز خالصی از یک کانی حضور داشته باشد با تهیه چنین نقشه‌هایی می‌توان آن را شناسایی کرد. نقشه‌های تهیه شده با ریزکواکترونی از یک نمونه از رگه‌های سولفیدی آرسنوپیریت‌دار نشان می‌دهد با وجود فراوانی آرسنیک، مقدار طلا در این رگه‌ها ناچیز و ثبت‌شدنی نیست و کانی‌طلاداری در نقشه این عنصر دیده نمی‌شود. بر پایه نقشه آرسنیک، مقدار آن در این مقطع بسیار بالاست که به‌علت حضور آرسنوپیریت (رنگ‌های زرد تا سرخ) است. در نقشه سرب در چپ به‌سوی گوشه بالایی (داخل کادر سرخ)، سرب با غلظت بالاتر دیده می‌شود که با لکه‌های روشن‌تری (سه دانه) از زمینه شناسایی شدند و نشان‌دهنده حضور گالن هستند (شکل ۱۱). نقشه عنصر روی (Zn) نیز نشان می‌دهد مقدار این عنصر در این نمونه بسیار ناچیز است (شکل ۱۱). نتایج این بررسی‌ها با نتایج کانه‌شناسی سازگاری دارد.

کانه‌زایی برون‌زاد

کانه‌زایی آهن در کانسنگ آهن خبر بیشتر از نوع برون‌زاد است که توسط عوامل سطحی تشکیل شده‌اند. عوامل سطحی تخریب کانه‌زایی درون‌زاد و پیدایش اکسیدها و هیدرواکسیدهای ثانویه به‌جای آن را به‌دنبال داشته‌اند (شکل‌های ۱۰-A و ۱۰-B). هاله‌ای از اکسیدهای آهن آبدار مانند گوتیت و لیمونیت در پیرامون کانی‌زایی سولفیدی نیز پدید آمده است. داده‌های XRD



شکل ۱۲. تصویرهای صحرایی از کانسنگ آهن برون‌زاد خبر (A) ساخت خوشه‌ای به‌صورت لایه‌های هم‌مرکز از گوتیت و لیمونیت روی کانسنگ یا در حفره‌ها که در پی چرخش آب‌های سطحی پدید آمده است؛ (B) ساخت جعبه‌ای که پیامد جانشینی هماتیت، گوتیت و لیمونیت به‌جای پیریت و دیگر سولفیدهاست.

Figure 12. Field photos of Khabr iron ore (A) Botryoidal structure as concentric layers of goethite and limonite developed over the ore or infilling the voids due to circulation of surface waters; (B) Boxwork structure composed of limonite, hematite and goethite as a result of the oxidation and leaching of hypogene minerals.

پاراژنز

شامل دو فاز اکسیدی و سولفیدی است. در فاز نخست، کانی‌زایی اکسیدی به‌صورت رگ‌های یا عدسی در مرمر جانشین شده است. در این فاز مگنتیت و پیریت فراوانترین کانی کدر بودند. سپس در فاز دوم، کانی‌زایی سولفیدی به‌صورت رگچه‌ای در کانسنگ آهن و در مرمر پدید آمده است. سولفیدهای پدیدآمده در آغاز این فاز پیریت و ارسنوپیریت و در پایان آن کالکوپیریت به‌همراه مقادیر اندکی برنیت، اسفالریت و گالن هستند.

در مرحلهٔ برون‌زاد، در اثر فرایندهای هوازدگی روی کانی‌زایی درون‌زاد، کانی‌زایی اکسیدی برون‌زاد رخ داده است که بیشتر از هماتیت، گوتیت و لیمونیت به‌همراه کانی‌های رسی و کربناته ساخته شده است و اکنون بخش بزرگی از برونزدها را دربر می‌گیرد.

کانی‌های سازندهٔ کانسنگ آهن خبر مربوط به سه مرحلهٔ دگرگونی، گرمایی (درون‌زاد) و برون‌زاد هستند (جدول ۳). در مرحلهٔ دگرگونی سنگ‌آهک با مرمر جایگزین شده است و سنگ‌های سیلیسی آواری مانند شیل، سیلتستون و ماسه‌سنگ با کوارتزیت، فیلیت، شیست و میکاشیست و میلونیت جایگزین شده‌اند. در این مرحله، کانی‌های کلسیت، کوارتز، مسکوویت، سربیت، بیوتیت، کلریت و دولومیت پدید آمده یا دچار باز تبلور شده‌اند (شکل ۵). مسکوویت، کلریت و بیوتیت نشانهٔ دگرگونی در حد رخسارهٔ شیست سبز و بافت‌های میلونیتی نشانهٔ دگرگونی‌های برشی هستند. در مرحلهٔ گرمایی، کانی‌زایی درون‌زاد روی داده است که خود

جدول ۳. توالی کانی‌های همایند سازندهٔ کانسنگ آهن خبر.

Table 3. Paragenesis sequence of forming-minerals in the Khabr iron ore.

Stages	Metamorphic	Hypogene		Supergene
		Oxides	sulfides	
Calcite	██████████	██████████	██████████	██████████
Quartz	██████████		██████████	
Clay minerals				██████████
Biotite	██████████			
Muscovite	██████████			
Chlorite	██████████			
Dolomite		██████████		
Sericite	██████████			
Magnetite		██████████		
Pyrite			██████████	
Arsenopyrite			██████████	
Chalcopyrite				██████████
Sphalerite				██████████
Bornite				██████████
Covellite				██████████
Hematite				██████████
Goethite				██████████
Limonite				██████████

بحث

آهن در کانی‌های بسیاری به‌صورت اکسید، سولفید و سیلیکات شرکت می‌کند و نهشته‌های آن در همه محیط‌ها و دوره‌های زمین‌شناسی یافت می‌شوند. نوع، فراوانی نسبی، کانی‌های همایند و شیمی کانی‌ها به‌همراه ساخت و بافت کانسنگ کمک می‌کنند تا پیدایش آنها توسط هر کدام از فرایندهای آذرین، رسوبی، دگرگونی و گرمایی شناسایی شود. کانسنگ‌های سولفیدی و اکسیدی زمانی که در سطح زمین و در معرض آب‌های سطحی جای می‌گیرند به‌علت اکسیداسیون با اکسید و هیدرواکسید جایگزین می‌شوند. کانی‌شناسی، بافت و ساخت این هیدرواکسید راهنمایی برای شناسایی سنگ بستر آنهاست. هر چند نهشته‌های لیمونیتی متشکل از گوتیت و هماتیت از اجزاء گوسن‌ها یا کلاهدک آهنی روی ذخایر سولفیدی و ذخایر بازماندی آهن هستند، اما بقایای مگنتیت در محدوده کانسنگ آهن خبر نشان می‌دهند کانسنگ آهن برون‌زاد در خبر روی یک کانسنگ آهن درون‌زاد پدید آمده است و با عوامل مختلفی کنترل شده است.

بر پایه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ خبر، واحد کربناته کمپلکس روتشون (پالئوزویک پیشین) میزبان کانسنگ آهن خیر است که نشان‌دهنده چینه‌کران بودن آن است. مرمر در تناوب با فیلیت و شیست‌ها در یک روند شمال‌خاوری - جنوب‌باختری به‌صورت تکه‌های جداشده و تحت کنترل ساختاری در مناطق میلونیتی شده میزبان کانه‌زایی آهن هستند. با توجه به رخداد کانی‌زایی در سنگ‌های دگرگونی ارتباطی میان کانه‌زایی آهن و فرایندهایی دگرگونی نیز وجود دارد. در پیرامون کانسنگ خیر توده‌های آذرین درونی گزارش شده است که در نزدیکی آنها سنگ‌های کربناته با مرمر جایگزین شده‌اند (Moridi, 2005; Dehghani Soltani, 2012). از سوی دیگر، از دیدگاه شیمیایی، سنگ‌های کربناته و به‌ویژه مرمر برای میزبانی انواع کانسنگ‌ها و به‌ویژه کانسنگ‌های آهن گرمایی مستعد هستند (Robb, 2005). این شواهد نشان می‌دهند چندین عامل کانی‌زایی آهن و پیدایش مجموعه کانی‌های درون‌زاد و برون‌زاد را کنترل کرده‌اند. بررسی‌های میدانی، سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری نشان می‌دهند کانه‌زایی در یک پهنه دگرگونی، گسلی، میلونیتی و برشی و به شکل دیرزاد پدید آمده

است. گسل‌ها به‌صورت مجراها و کانال‌هایی برای حرکت سیال‌های گرمایی رفتار کرده‌اند. خاستگاه این سیال‌ها چه‌بسا با یک توده آذرین درونی مرتبط باشد یا اینکه چنین توده‌هایی مانند یک موتور گرمایی گرمایش و چرخش سیال‌های گرمایی با خاستگاه جوی را به‌دنبال داشته‌اند (Evans, 1993; Rajabzadeh and Asadi, 2010). در باختر نقشه زمین‌شناسی خبر چند توده آذرین درونی دیده می‌شوند که در مرز آن‌ها کانه‌زایی آهن رخ داده است. بیشتر مگنتیت‌هایی که در سنگ‌های کربناته پدید می‌آیند خاستگاه گرمایی و اسکارن دارند (Guilbert and Park, 1986). زمین‌شیمی کانسنگ آهن خبر نیز همانند کانسارهای گرمایی است و مقدار عنصرهایی مانند آرسنیک، آنتیموان، بیسموت، سرب و روی و مس در آن بالاست (Dehghani Soltani, 2012). بر پایه این بررسی‌های دهقانی سلطانی (Dehghani Soltani, 2012)، مقادیر این عناصر تنوع بالایی دارد و همبستگی میان آنها ضعیف است. همان‌گونه که گفته شد کانه‌زایی درون‌زاد شامل دو مرحله اکسیدی و سولفیدی می‌شود. با توجه به بافت مگنتیت در مقاطع میکروسکوپی، در مرحله نخست یا مرحله اکسیدی، کانه‌زایی درون‌زاد آهن به شکل مگنتیت بیشتر به‌صورت جاننشینی در سنگ‌های کربناته رخ داده است. با توجه به بررسی‌ها و یافته‌های رجب‌زاده و اسدی (Rajabzadeh and Asadi, 2010) برای کانسار آهن قیطرویه، منبع آهنی که پیدایش مگنتیت در کانسنگ آهن خبر را به‌دنبال داشته است، بیشتر سنگ‌های کم‌بالا و کم‌پایین پهنه کانی‌سازی یعنی شیست‌های گوناگون هستند که به موجب چرخش محلول گرمایی در آنها، آهن با کمپلکس‌های کلریدی به افق کربناته منتقل شده است. انحلال‌پذیری کوارتز، کلسیت و فلزها با شرکت در کمپلکس‌های کلریدی و سولفیدی افزایش می‌یابد و پایداری آن‌ها افزایش می‌یابد. اصولاً محلول‌های دما بالا که اسیدی و دارای کمپلکس‌های کلریدی هستند در برخورد با سنگ‌های کربناته و انحلال آنها و در پی دگرسانی کربناتی، قلیایی می‌شوند. با انحلال سنگ‌های کربناته و افزایش pH، کمپلکس‌های کلریدی ناپایدار می‌شوند و مگنتیت جانشین سنگ آهنک می‌شود. در کانسنگ آهن خبر کانی‌های کالک‌سیلیکات که شاخص اسکارن هستند دیده نمی‌شود. این

کانی‌سازی به شدت گسله، خردشده و نفوذپذیر است. از این‌رو، شرایط برای نفوذ آب‌های غنی از اکسیژن فراهم و امکان دگرسانی مگنتیت و سولفیدها میسر شده است. حضور بافت جعبه‌ای و خوشه‌ای در کانسنگ خبر نشان می‌دهد میزان اسیدیته سیال‌ها متوسط تا نزدیک به خنثی بوده است ($\text{pH} > 3$) (Andreu et al., 2014). بر پایه این رفرنس، بافت جعبه‌ای در شرایط اسیدی قوی‌تر تخریب می‌شود و بافت خوشه‌ای نیز تنها از سیال‌های نزدیک به خنثی پدید می‌آید. سولفیدها نیز به مقدار ناچیز دچار اکسیداسیون شدند؛ اما بخش بزرگی از سولفیدهای اولیه حفظ شدند که این شاید نشان می‌دهد مگنتیت‌ها پیش از پیدایش رگچه‌های سولفیدی تجزیه شده‌اند. برای ارزیابی کانی‌زایی سولفیدی و وجود طلا به همراه آرسنوپیریت نیاز به بررسی‌های جامع‌تر و مفصل‌تری است.

برداشت

سنگ میزبان کانسنگ آهن خبر، مرمر دگرسان شده با میان‌لایه‌هایی از شیبست و میکاشیبست با سن پالئوزویک زیرین است. کلسیت، کوارتز، بیوتیت، مسکوویت و کلریت کانی‌های شاخص سنگ‌های دگرگونی میزبان هستند. کانی‌زایی درون‌زاد در این کانسنگ در دو مرحله رخ داده است. در مرحله نخست، مگنتیت همراه با مقدار کمی پیریت به صورت درون‌زاد با محلول‌های گرمابی بالارو، جانشین مرمر شده است. شکل کانی‌زایی درون‌زاد اکسیدی بیشتر عدسی است. فراوان‌ترین دگرسانی در این مرحله دگرسانی کربناتی است که با کلسیت، دولومیت و آنکریت شناخته می‌شوند. این کانی‌زایی و دگرسانی مرتبط با آن با پهنه‌های گسل‌خورده همخوانی دارد. پیدایش مگنتیت در سنگ‌های کربناته پیامد حرکت محلول‌های گرمابی مزوترمال در آنهاست. در مرحله دوم یک فاز سولفیدی ضعیف به شکل رگچه‌ای پدیدار شده است که بیشتر شامل پیریت، آرسنوپیریت و کالکوپیریت است. دگرسانی در این مرحله دگرسانی سیلیسی است که بیشتر با پیدایش کوارتز شناخته می‌شود. این کانی‌زایی از سیال‌های گرمابی با دما و درجه شوری همانند کانسارهای اپی‌ترمال ساخته شده است. خاستگاه سیال‌های گرمابی برای هر دو نوع کانی‌سازی شاید با یک توده آذرین درونی مرتبط باشد یا اینکه چنین توده‌ای مانند یک

پدیده نشان می‌دهد دما، فشار و دیگر شرایط فیزیکوشیمیایی برای پیدایش اسکارن فراهم نبوده است. در مرحله دوم کانی‌سازی درون‌زاد سولفیدی رخ داده است که تنها به صورت رگچه‌ای و همراه با دگرسانی سیلیسی و کوارتز است. پیدایش رگچه‌های کوارتز همراه سولفیدها از شواهد قوی چرخش محلول‌های گرمابی است (Robb, 2005). مجموعه کانی‌های پیریت، آرسنوپیریت و کالکوپیریت بیشتر از محلول‌های گرمابی پدید می‌آیند. شیمی سولفیدهای بررسی شده در کانسنگ آهن خبر نیز همانند شیمی کانسارهای گرمابی است (Maydagan et al., 2013; Zarasvandi, 2023). پیدایش سولفیدهای پس از مگنتیت، نشان‌دهنده افزایش فوگاسیته گوگرد و افزایش لیگاندهای سولفیدی هست که در دماهای کمتر در سیال‌های گرمابی معمول هستند (Guilbert and Park, 1986; Rajabzadeh and Asadi, 2010). محلول‌های گرمابی دارای کمپلکس‌های فلز-سولفیدی در جهت کاهش گرادیان دما و فشار در رگه‌ها حرکت می‌کنند و در پایان، در pH نزدیک به خنثی ناپایدار می‌شوند و کوارتز و سولفیدها را پدید می‌آورند. در واقع، این کانی‌سازی بیشتر تحت کنترل عوامل فیزیکی و سیستم درز و شکاف‌ها در پهنه کانه‌زایی است. همه بافت‌ها در مرحله سولفیدی، بافت‌های شکافه پرکن هستند. این مرحله دیرتر از مرحله اکسیدی و در دما و فشار کمتری نسبت به مرحله اکسیدی رخ داده است. کلسدونی در جاهایی پدید آمده است که کاهش دما شدید بوده است. دما سیال‌های مسؤل مرحله سولفیدی درجه شوری (۰.۲-۱۹ درصدوزنی معادل نمک طعام) و دمایی مشابه با کانسارهای اپی‌ترمال (۲۳۵-۲۸۰ درجه سانتیگراد) دارد و خاستگاه آنها آب‌های جوی و دگرگونی هستند (Dehghani Soltani, 2012).

سازوکار پیدایش کانی‌زایی برون‌زاد در نهشته‌های سولفیدی شناخته شده است (Guilbert and Park, 1986). در واقع برون‌زادهای کانسنگ آهن خبر، پیامد اکسیداسیون مگنتیت و سولفیدهای درون‌زاد به گوتیت، همتایت و لیمونیت هستند. مگنتیت‌های جانشین شده در سنگ‌های آهکی و مگنتیت‌های درون سنگ‌های آواری مانند ماسه‌سنگ در بخش‌های سطحی به موجب برخورد با آب‌های سطحی غنی از اکسیژن و دی‌اکسیدکربن به شدت تجزیه و دگرسان شده‌اند. پهنه

شبکه‌ای از شکستگی‌های موجود در مرمر است که باعث پیدایش رنگ قهوه‌ای مایل به سرخ در آنها شده است. با توجه به توان پهنه‌ سنندج-سیرجان برای کانی‌زایی آهن، رخنمون‌های برون‌زاد کانسنگ آهن خبر کلید اکتشافی مهمی برای اکتشافات ژرف هستند و ارزش بالایی دارند. پیشنهاد می‌شود بررسی‌های مگنومتری دقیق‌تری در منطقه انجام شود. برای ارزیابی کانی‌زایی سولفیدی و وجود طلا به‌همراه آرسنوپیریت نیاز به بررسی‌های جامع‌تر و مفصل‌تری است.

سپاس‌گزاری

از پروفیسور کازوو ناکاشیما برای همکاری در تجزیه‌های ریزکاوالکترونی و XRD سپاس‌گزاری می‌شود. از داوران مقاله نیز برای راهنمایی‌های مفیدشان در ویرایش نخستین نسخه مقاله سپاس‌گزاری می‌شود.

موتور گرمایی به‌همراه گرمای درونی زمین گرمایش و چرخش سیال‌های گرمایی با خاستگاه جوی و دگرگونی را به دنبال داشته است.

نقشه و شیمی فازهای سولفیدی حاصل از بررسی ریزکاوالکترونی گویای نبود طلا در آرسنوپیریت و کالکوپیریت است. به هر حال حضور آرسنوپیریت و طلا در برخی بلورهای پیریت ممکن است نشان‌دهنده همراهی طلا با فاز سولفیدی باشند. ثبت عنصرهایی مانند سرب، روی، جیوه، بیسموت، نقره و آرسنیک در فازهای سولفیدی از ویژگی‌های سولفیدهای گرمایی است. برونزدهای کانسنگ آهن خبر بیشتر از نوع برون‌زاد و پیامد اکسیداسیون اکسیدهای آهن درون‌زاد و سولفیدهای آهن توسط آب‌های سطحی فرورو هستند. کانی‌های اصلی کانی‌زایی برون‌زاد گوتیت و همتایت به‌همراه لیمونیت و کانی‌های رسی مانند ایلیت هستند. هاله دگرسانی پیرامون این کانی‌زایی نیز پیامد حرکت آب‌های سطحی آغشته به اکسیدهای آهن در

References

- Aghanabati, S.A. (2010) Shape file of structural zones map of Iran (1:2500000). Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Akbarpour, A. and Kalatbari Jafari, M. (2021) Petrography and geochemistry of Ebrahim-Abad iron ore deposit (northwest Divandere, Kurdistan Province). *Petrological Journal*, 11(4), 57-74 (in Persian). <https://doi.org/10.22108/ijp.2021.124932.1201>
- Aliyari, F., Rastad, E. and Mohajjel, M. (2012) Gold deposits in the Sanandaj-Sirjan Zone: orogenic gold deposits or intrusion-related gold Systems. *Resource Geology*, 62(3), 296-315. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00196.x>
- Andreu, E.; Torró, L., Proenza, J. A., Domenech, C., García-Casco, A., Villanova de Benavent, C., Chavez, C., Espaillat, J., and Lewis, J. F. (2015) Weathering profile of the Cerro de Maimón VMS deposit (Dominican Republic): textures, mineralogy, gossan evolution and mobility of gold and silver. *Ore Geology Reviews*, 65, 165-179. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.015>
- Asadi, H.H. (2000) The Zarshuran Gold deposit model applied in a mineral exploration GIS in Iran, 172 p. Ph.D. thesis, Delft University, Delft, Netherland. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:2c1c4bb4-8403-4d93-8f49-705b0b9f4482>
- Badavi, M., Atapour, H., and Mohammadi, M. (2019) Mineralogy, petrography, geochemistry of magnetite ore and sulfide minerals and the possible model of mineralization at Anomaly#3, Gol-e-Gohar, iron mine, Sirjan (Kerman). *Petrological Journal*, 10(38), 49-78 (in Persian). <https://doi.org/10.22108/ijp.2019.115960.1124>
- Berberian, M. and King, G. (1981) Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2), 210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Dehghani Soltani, S. (2012) Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Khabr Iron Mineralization, Baft, Southeaster Iran, 132 p. M.Sc. thesis, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan. Iran (in Persian).
- Evans, A. (1993) Ore geology and industrial minerals: An Introduction, 403 p. Blackwell Publishing company.

- Ghorbani, M. (2008) Economic Geology of mineral deposits and natural resources of Iran, 552 p. Arian Zamin, Tehran, Iran (in Persian).
- Ghorbani Denavi, M., Malekzadeh Shafaroudi, A., and Karimpour, M.H. (2023a) Pb-Zn deposits in Ruchun Mazar region, Kerman Province: geology, alteration and mineralization. *Journal of Economic Geology*, 15(2), 109-134 (in Persian). <https://doi.org/10.22067/ECONG.2023.81763.1072>
- Ghorbani Denavi, M., Malekzadeh-Shafaroudi, A., and Karimpour, M.H. (2023b) Geology, mineralogy, geochemistry of sulfide ores and galena mineral in the Chah-Nar Pb-Zn deposit, SW Baft (Southern Sanandaj-Sirjan zone). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 33(3), 243-266 (in Persian). <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.383871.2059>
- Guilbert, J.M. and Park, C. F. (1986) *The Geology of Ore Deposits*, 985 p. W. H. Freeman and Company, New York.
- Maanijou, M. and Salemi, R. (2015) Mineralogy, chemistry of magnetite and genesis of Korkora-1 iron deposit, east of Takab, NW Iran, *Journal of Economic Geology*, 6(2), 355-374. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4814-1>
- Maanijou, M., Tale Fazel, E., Hayati, S., Mohseni, H., and Vafaei, M. (2020) Geology, fluid inclusions, C–O–S–Pb isotopes and genesis of the Ahangaran Pb-Ag (Zn) deposit, Malayer- Esfahan Metallogenic Province, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences.*, 195, 104-339. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104339>
- Marbouti, Z., Ehya, F., Rostami Paydar, G., and Maleki Kheymehsari, S. (2021) Geochemistry and the origin of the Shamsabad manganese- bearing iron deposit, Markazi Province. *Advanced Applied Geology*, 11(3), 536-556 (in Persian). <https://doi.org/10.22055/AAG.2020.34519.2146>
- Maydagan, L., Franchini, M., Impiccini, A., and Lentz, D.R. (2016) Phyllosilicates geochemistry and distribution in the Altar porphyry Cu- (Au) deposit, Andes Cordillera of San Juan, Argentina: Applications in exploration, geothermometry, and geometallurgy, *Journal of Geochemical Exploration*, 167, 83-109. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.05.002>
- Mirzaei, R., Ahmadi, A., Mirnejad, H., Gao, J. F., Nakashima, K., and Boomeri, M. (2018) Two-tiered magmatic-hydrothermal and skarn origin of magnetite from Gol-e-Gohar Iron ore deposit of SE Iran: In situ LA-ICP-MS analyses. *Ore Geology Reviews*, 102, 639-653. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.09.025>
- Moridi, M. (2005) Qualitative and quantitative investigation of Khabar iron deposit, Kerman Mining Engineering Organization (in Persian).
- Rajabzadeh, M.A. and Asadi, S. (2010) Mineralization study on iron ores from Qatruyeh area, northeast Neyriz, Sanandaj-Sirjan zone using hydrothermal alteration evidences and fluid inclusion studies. *Petrological Journal*, 1(1), 67-86 (in Persian). https://ijp.ui.ac.ir/article_16032.html?lang=en
- Robb, L. (2005) *Introduction to ore-forming processes*, 386 p. Blackwell Publishing Company.
- Sabzehei, M. (1997) Geological map (1:100000) of Khabr. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Shahabpour, J. (1994) Post mineralization breccia dike from the Sar Cheshmeh porphyry copper deposits, Kerman, Iran. *Exploration and Mining Geology*, 3(1): 39-43.
- Sheikholeslami, M.R. (2015) Tectonostratigraphic units of the southeastern part of Sanandaj-Sirjan zone, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 24(1), 243-252 (in Persian).
- Whitney, D.L. and Evans, B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1), 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.337>
- Zamanian, H. (2016) Geochemistry of rare earth elements in the Baba Ali magnetite skarn deposit, western Iran—a key to determine conditions of mineralization. *Geologist*, 22(1), 33–47. <https://doi.org/10.1515/logos-2016-0003>
- Zarasvandi, A., Rezaei, Adelpour, M., and Parvaneh, H. (2023) Chemistry of sericite, pyrite, and chalcopyrite in the phyllic alteration zone of the Parkam and Abdar Porphyry Deposits. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 33(3), 139-158. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.351321.2015>