



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2025.1160



Rezvan ore deposit, northeast of Rafsanjan: a volcano-sedimentary iron mineralization in the Rizou series, Poshte Badam block

Mohammad Reza Ardyani¹, Fardin Mousivand^{2*} , Mahmoud Sadeghian³

¹ M.Sc. graduate in Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² Associate Professor of Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

³ Associate Professor of Petrology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 04 November 2025
Revised: 31 December 2025
Accepted: 31 December 2025

Keywords

Iron
volcanic-sedimentary
Rizou
Poshte Badam Block
Rafsanjan
Rezvan

*Corresponding author

Fardin Mousivand
✉ mousivand@shahroodut.ac.ir

ABSTRACT

The Rezvan iron deposit is located in Kerman province, 28 km northeast of Rafsanjan. This deposit is located in the Central Iran Zone and in the Poshte Badam block. Stratigraphically, the host rock units belong to the Late Proterozoic Rizou series. The rock units from bottom to top include shale, sandstone, limestone, basaltic tuff and lava, stromatolite limestone, white quartzite, and massive dolomite. Iron mineralization has occurred in a specific stratigraphic horizon as stratiform and stratabound. Considering the structure, texture, and mineralogy, the orebodies have a layered facies at the top and a vein-veinlet facies at the bottom. The main minerals of the ore include magnetite, oligist/specularite, pyrite and chalcopyrite. Based on field observations, hand sampling and microscopic studies, the important structures and textures identified in the deposit include massive, banded, brecciated, vein-veinlet, disseminated and replacement. Chloritization and epidotization in the host and footwall tuff units are the most widespread alteration and other minor alterations are silicic and sericitic. Based on studies of structure, texture, mineralogy, alteration and precedence and delay of mineral veins in the footwall, three main phases of mineralization can be recognized in the Rezvan deposit. The first phase, in the form of first-generation veinlets, are mainly composed of quartz (with minor amounts of pyrite) and is siliceous in nature, which probably indicates lower temperature and higher pH conditions of the fluid. The second phase, which is the main phase, consists mainly of magnetite with pyrite, epidote, chlorite and phlogopite and sometimes vermiculite, hornblende and actinolite, and indicates higher temperature and lower pH. The third phase, in the form of third-generation carbonate ore-bearing veinlets, contains some magnetite, pyrite and sometimes oligist/specularite and silica, which seems to have lower temperature than the previous phase and higher pH and Eh. Based on lithogeochemical studies, according to the normalized diagram to chondrite, the europium anomaly is negative, indicating formation of the ores in a shallow and oxidizing environment. Based on geochemical studies on stringer, massive and banded ore facies, the amount of Zn, V, Ni, Co, Mn and As elements increases from the stringer section towards the massive and banded facies, while the amount of Sr and Ti elements decreases. The ore samples of the Rezvan iron deposit are geochemically within the range of volcanic-sedimentary deposits.

How to cite this article

Ardyani, M.R., Mousivand, F. and Sadeghian, M., 2025. Rezvan ore deposit, northeast of Rafsanjan: a volcano-sedimentary iron mineralization in the Rizou series, Poshte Badam block. *Journal of Economic Geology*, 17(4): 145–169. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1160>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Access to the area is via the Rafsanjan asphalt road towards Zarand. This area is located 2 km north of the Odarj village. The Rezvan mine is located in the northern part of the 1:100,000 Davaran map (Vahdati Daneshmand et al., 1995). This exploration area is located in the Central Iran Zone and in the Poshte Badam block in the Central Iran zone (Alavi, 1991). A detailed scientific study of the iron mineralization of this area has not been conducted, which is major aims of this research.

Materials and methods

For geological, mineralogy, and alteration studies in the study area, in addition to field studies, 8 thin sections for petrographic studies of host and associated rocks, 4 polished sections, and 34 thin-polished sections were prepared and examined. In addition to microscopic studies, 3 samples from alteration zones were also selected and studied by X-ray diffraction (XRD) to detect some altered minerals. Also, to conduct geochemical studies of the host rock units of mineralization, 24 samples were sent to Zarazma Company for Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), and the results were examined.

Result and discussion

Iron mineralization in the Rezvan region of Rafsanjan occurred in the Rizou series with a Late Proterozoic age range, which mainly involves felsic tuffs and basaltic lava units with carbonate interlayers at the top of the sequence. Iron mineralization occurred in specific stratigraphic horizons, mainly in tuffaceous units and to a very small extent in the granitoid intrusion. The orebodies are layered in nature and have a vein-veinlet facies in the lower part, and massive and bedded ore facies at top. In the vein-veinlet/stringer facies, the ore-bearing veins-veinlets are accompanied by chlorite-epidotic and siliceous alterations. The massive ore

facies forms the high-grade part of the deposit, and the banded facies involves alternations of iron oxide-rich and iron oxide-poor layers within tuff units. The main ore structures and textures include massive, banded, brecciated, vein-veinlets, disseminated and replacement. The main minerals of the ore include the primary minerals of magnetite, pyrite and some chalcopyrite and oligist/specularite, and the secondary minerals such as hematite and goethite. Based on lithogeochemical studies on the stringer, massive and banded facies, the amount of Zn, V, Ni, Co, Mn and As elements increases from the stringer section towards the massive and banded facies, and, however, the amount of Sr and Ti elements decreases from the stringer facies towards the banded facies. Based on lithogeochemical studies, according to the normalized diagram to chondrite, the europium anomaly is negative, indicating formation of the ores in a shallow and oxidizing environment. Various evidences, including the type of host and associated rocks, the morphology of ore bodies, the structure, texture, and mineralogy of ore and alteration, indicate that iron mineralization in the Rezvan deposit in the Rizou series was similar to the volcanic-sedimentary iron deposits that were deposited during the Late Proterozoic period due to the activity of submarine hydrothermal systems. The volcano-sedimentary iron deposits and banded iron formations, which are the largest sources of iron, are widespread throughout the world (e.g. Hou et al., 2014; Wu et al., 2015; Wu et al., 2016). In addition to other types of iron deposits, Iran is also prone to volcanic-sedimentary iron deposits (Nabatian et al., 2015). Similar deposits involve the iron mineralization in the Hormuz series on Larak Island (Alizadeh Fard and Mousivand, 2023) and the iron-celestite-manganese mineralization of Kuhe Rig (Mahdevari et al., 2021).

Acknowledgements

The authors would like to thank and appreciate the Shahrood University of Technology and the manager of the Rezvan Iron Mine Company, Mr. Mohammadi, for supporting this research.



کانسار آهن رضوان، شمال شرق رفسنجان: کانه‌زایی آهن آتشفشانی - رسوبی در سری ریزو، بلوک پشت‌بادام

محمدرضا اردیانی^۱، فردین موسیوند^{۲*} ID، محمود صادقیان^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ دانشیار زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۳ دانشیار پترولولژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰

واژه‌های کلیدی

آهن

آتشفشانی - رسوبی

ریزو

بلوک پشت‌بادام

رفسنجان

رضوان

نویسنده مسئول

فردین موسیوند

mousivand@shahroodut.ac.ir✉

کانسار آهن رضوان در استان کرمان و در ۲۸ کیلومتری شمال شرق رفسنجان، در پهنه ایران مرکزی و در بلوک پشت‌بادام واقع شده است. کانه‌زایی آهن در افق چینه‌شناسی خاص در سری ریزو به سن نئوپروتروزوئیک به صورت چینه‌سان و چینه‌کران رخ داده است. پیکره‌های ماده معدنی دارای رخساره لایه‌ای در بالا و رخساره رگه - رگچه‌ای زیرین هستند. کانی‌های اصلی ماده معدنی شامل کانی‌های اولیه مگنتیت، اولیژیست، پیریت و کالکوپیریت و کانی‌های ثانویه هماتیت و گوتیت بوده و کانی‌های باطله شامل کلریت، اپیدوت، کلسیت، کوارتز و ورمیکولیت هستند. ساخت و بافت‌های ماده معدنی شامل توده‌ای، نواری، برشی، رگه - رگچه‌ای، دانه پراکنده و جانیشینی است. کلریتی و اپیدوتی شدن گسترده‌ترین نوع دگرسانی است. بر اساس بررسی‌های ساخت، بافت، کانی‌شناسی، دگرسانی و تقدم و تأخیر رگچه‌های معدنی، سه فاز اصلی کانه‌زایی در کانسار رضوان قابل تشخیص است. بر اساس بررسی‌های لیتوژئوشیمیایی، طبق نمودار بهنجار شده به کندریت، کانسنگ‌ها دارای آنومالی منفی یوروپیوم هستند که نشان‌دهنده تشکیل کانسنگ در محیط کم‌عمق و اکسیدان است. بر اساس بررسی‌های زمین‌شیمیایی بر روی رخساره‌های کانه‌دار، مقدار عناصر V، Zn، Ni، Co، Mn و As از رخساره استرینگر، آهن به سمت رخساره توده‌ای و نواری افزایش و مقدار عناصر Sr و Ti از رخساره استرینگر به سمت رخساره نواری کاهش می‌یابد. نمونه‌های کانسنگ کانسار آهن رضوان از نظر زمین‌شیمیایی در محدوده کانسارهای آتشفشانی - رسوبی قرار می‌گیرند.

استناد به این مقاله

اردیانی، محمدرضا؛ موسیوند، فردین و صادقیان، محمود، ۱۴۰۴. کانسار آهن رضوان، شمال شرق رفسنجان: کانه‌زایی آهن آتشفشانی - رسوبی در سری ریزو، بلوک پشت‌بادام. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۷(۴): ۱۴۵-۱۶۹. <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1160>

مقدمه

کانسار آهن رضوان در استان کرمان، در ۲۸ کیلومتری شمال شرق رفسنجان قرار دارد. دسترسی به محدوده از طریق جاده آسفالت رفسنجان به سمت زرنده است. این محدوده در ۲ کیلومتری شمال روستای اودرج قرار دارد. کانسار رضوان در مختصات $28^{\circ} 28'$ طول شرقی و $29^{\circ} 33'$ عرض شمالی، در بخش شمالی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ داوران (Vahdati Daneshmand et al., 1995) واقع شده است. این کانسار در بلوک پشت‌بادام از پهنه ایران مرکزی قرار دارد که از رخدادهای کانسارهای معدنی مهم در این بلوک می‌توان به مس نه‌کوهی (Pakizeh Sanajerdi et al., 2020)، آهن سیریز (Moghaddasi et al., 2018)، آهن-آپاتیت لکه‌سیاه (Rostami and Tale Fazel, 2019)، مگنتیت-آپاتیت همیجان (Amirkhani et al., 2017)، روی-سرب (مولیدن) احمدآباد (Javanshir et al., 2009) اشاره کرد. تا کنون بررسی علمی جامعی بر روی کانه‌زایی آهن در این کانسار انجام نشده است. بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، دگرسانی و ساخت و بافت این کانسار و تعیین نوع کانه‌زایی و الگوی تشکیل آن از اهداف این پژوهش است. بررسی دقیق این نوع کانه‌زایی‌ها می‌تواند در اکتشاف کانه‌زایی‌های مشابه در بلوک پشت‌بادام مورد استفاده قرار گیرد.

روش مطالعه

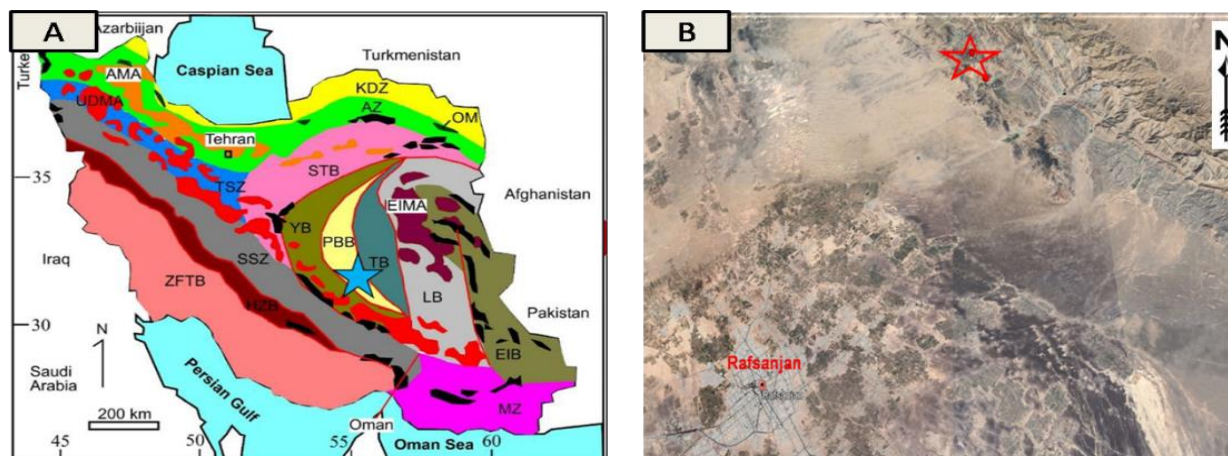
برای بررسی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی در محدوده مورد بررسی، علاوه بر انجام بررسی‌های صحرایی، تعداد ۸ عدد مقطع نازک برای بررسی‌های سنگ‌نگاری سنگ‌های میزبان و همراه، تعداد ۴ عدد مقطع صیقلی و ۳۴ عدد مقطع نازک- صیقلی برای بررسی کانی‌شناسی، ساخت و بافت ماده معدنی، دگرسانی و نحوه توزیع و ارتباط کانی‌های سنگ‌ساز در سنگ درون‌گیر ماده معدنی و کانسنگ تهیه شد و در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر

بررسی‌های میکروسکوپی، برای تشخیص برخی کانی‌های دگرسان‌شده، تعداد ۳ نمونه از پهنه‌های دگرسانی نیز انتخاب و به روش پراش پرتو ایکس با دستگاه ADVANCE D8 بررسی شد. همچنین برای انجام بررسی‌های زمین‌شیمیایی از واحدهای سنگی میزبان کانه‌زایی تعداد ۲۴ نمونه برای انجام تجزیه طیف‌سنجی جرمی توسط پلاسمای جفت‌شده القایی با استفاده از دستگاه ICP-MS که در مقیاس ppb و دقت بالا است، به شرکت زراژما تهران ارسال و نتایج آن بررسی شد.

زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه

بر اساس تقسیم‌بندی ساختاری ایران (Alavi, 1991)، محدوده معدنی رضوان در پهنه ایران مرکزی و در بلوک پشت‌بادام قرار می‌گیرد (شکل ۱- A و B). این محدوده معدنی بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ داوران (Vahdati Daneshmand et al., 1995) را شامل می‌شود (شکل ۲). عمده واحدهای سنگی منطقه شامل توالی‌های تئوپروتروزوئیک است (شکل ۳). واحدهای سنگی با توجه به تغییرات ترکیب سنگ‌شناسی از قدیم به جدید عبارتند از (شکل ۴):

واحد ۱- تناوب شیل، ماسه‌سنگ و آهک که این واحد قدیمی‌ترین واحد در منطقه است (شکل ۵- A، B و C)، واحد ۲- توف و گدازه به همراه سیل و دایک که کانه‌زایی آهن رضوان این واحد رخ داده و این واحد دارای ریخت‌شناسی نرم و تپه‌ای است و در صحرا به رنگ سبز دیده می‌شود (شکل ۵- D، E و F). این واحد به عنوان سنگ میزبان توده نفوذی در منطقه رضوان محسوب می‌شود که متحمل تغییرات فیزیکی و شیمیایی و در نتیجه کانه‌زایی آهن شده است و واحد ۳- آهک استروماتولیتی، کوارتزیت سفید، دولومیت توده‌ای، گاهی حاوی بین لایه‌های آتشفشانی که بر روی سنگ‌های قدیمی‌تر جای گرفته‌اند (شکل ۵- G، H و I).



شکل ۱. A: موقعیت کانسار رضوان (ستاره) در نقشه پهنه‌های زمین‌شناسی - ساختاری ایران (Alavi, 1991) و B: تصویر ماهواره‌ای از موقعیت کانسار رضوان (ستاره) در شمال شرق رفسنجان (برگرفته از تصویر لندست ۸ گوگل ارث). AZ: کمربند البرز، FZTB: زون زاگرس چین‌خورده، EIB: کمربند شرق ایران، KDZ: زون کپه‌داغ، LB: بلوک لوت، MZ: زون مکران، PBB: بلوک پشت‌بادام، SSZ: زون سنندج- سیرجان، SZ: زون سبزوار، YB: بلوک یزد، AMA: مجموعه ماگمایی البرز، EIMA: مجموعه ماگمایی شرق ایران، UDMA: مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر

Fig. 1. A: Location of the Rezvan (Star) deposit on the map of geological-structural zones of Iran (Alavi, 1991), and B: Location of the Rezvan (Star) deposit, northeast of Rafsanjan in the Satellite image (from Google Earth, Landsat 8). AZ: Alborz belt, FZTB: Folded Zagros zone, EIB: East Iran belt, KDZ: Koppeh Dagh zone, LB: Lut block, MZ: Makran zone, PBB: Poshte Badam block, SSZ: Sanandaj-Sirjan zone, SZ: Sabzevar block, YB: Yazd block, AMA: Alborz magmatic assemblage, EIMA: Eastern Iran magmatic assemblage, UDMA: Urumieh-Dokhtar magmatic assemblage



شکل ۲. دورنمایی از کانسار آهن رضوان (دید به سمت شمال)

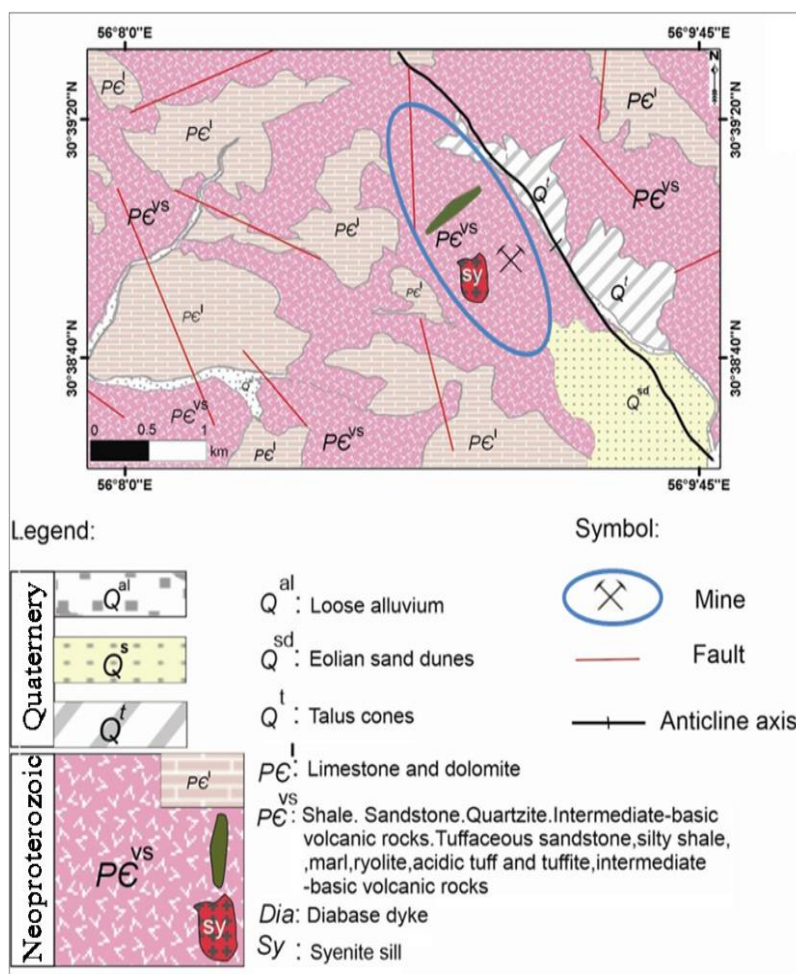
Fig. 2. View of the Rezvan iron deposit (view to the north)

دانه‌بندی متوسط تا درشت دیده می‌شود (شکل ۶-B) و از آلکالی‌فلدسپار، پلاژیوکلاز، ارتوکلاز و هورنبلند در یک بافت همسان‌دانه تشکیل شده است (شکل ۶-C).

دو نوع واحد آذرین نفوذی در کانسار رضوان وجود دارد که عبارتند از: ۱- سیل سینیتی و ۲- دایک دیابازی. سیل سینیتی به لحاظ شکل ظاهری به رنگ کرم تا صورتی و با

ترکیب کانی‌شناسی بوده و نوع بافت اغلب از پلاژیوکلاز، پیروکسن و آمفیبول تشکیل شده است (شکل ۶- E و F). این توده بافت اینترگرانولار و اینترسرتال دارد و دارای کمی دگرسانی سریستی است (شکل ۶- E).

این توده همخوان با لایه‌بندی بوده و دارای دگرسانی اپیدوتی شدید (شکل ۶- A) و همچنین دارای دگرسانی سریستی ناچیز است (شکل ۶- C). دایک دیابازی در منطقه واحدها را قطع کرده و در نمونه دستی به رنگ خاکستری تیره است (شکل ۶- D) و رنگ تیره آن به دلیل



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی محدوده معدنی آهن رضوان

Fig. 3. Geological map of the Rezvan iron district

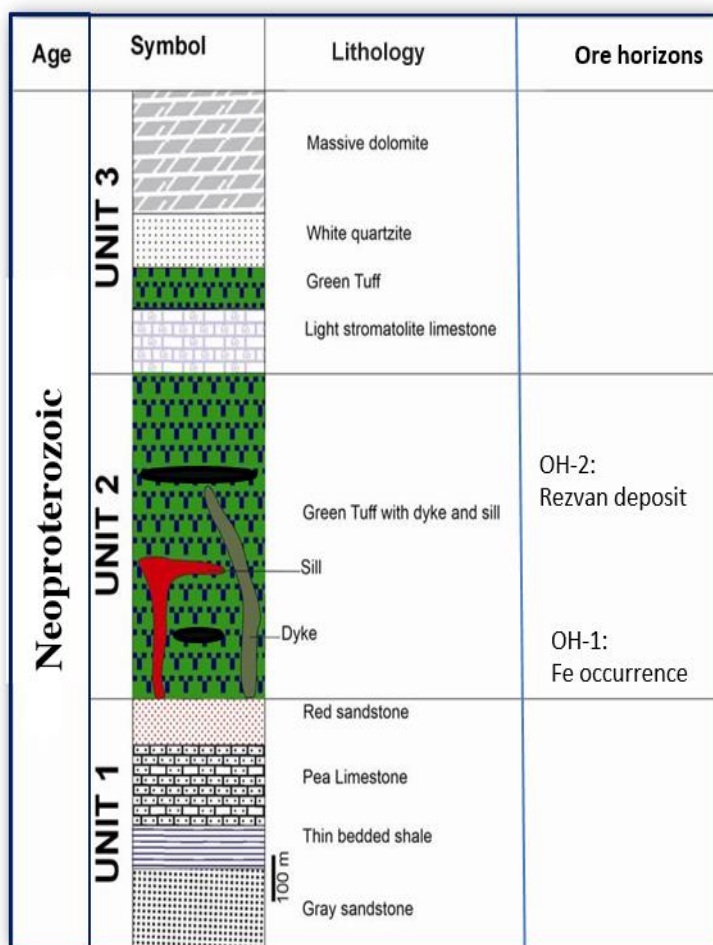
رخ داده است (شکل ۴). افق اول شامل یک اندیس آهن در شمال غرب روستای اودرج و قسمتهایی از بخش جنوبی کانسار رضوان است. افق اصلی کانه‌زایی که استخراج ماده معدنی در آن

رخساره‌های کانه‌دار و فازهای کانه‌زایی

توالی میزبان کانه‌زایی آهن رضوان ماهیت آتشفشانی-رسوبی دارد و کانه‌زایی شامل دو افق کانه‌دار در واحد دوم توالی میزبان

مجموع به صورت قطع کننده و چینه کران هستند، نیز دیده می‌شود. حالت لایه‌ای در بخش‌های شمالی (شکل ۷-۷، A و B و C) و میانی (شکل ۷-۸، D) کانسار بیشتر دیده می‌شود؛ درحالی که شکل ماده معدنی در قسمت جنوبی بیشتر رگه - رگچه‌ای و توده‌ای است.

فعال است، افق دوم بوده که در یال غربی طاق‌دیس رخمون دارد. بر اساس مشاهدات صحرایی و بافتی، شکل هندسی پیکره‌های معدنی در کانسار مورد بررسی به صورت چینه‌سان (بافت توده‌ای و نواری) و همخوان و همروند با لایه‌بندی سنگ‌های درون‌گیر بوده (شکل ۷) که در زیر آنها پهنه کانه‌دار رگه - رگچه‌ای که در



شکل ۴. ستون چینه‌شناسی محدوده معدنی کانسار آهن رضوان

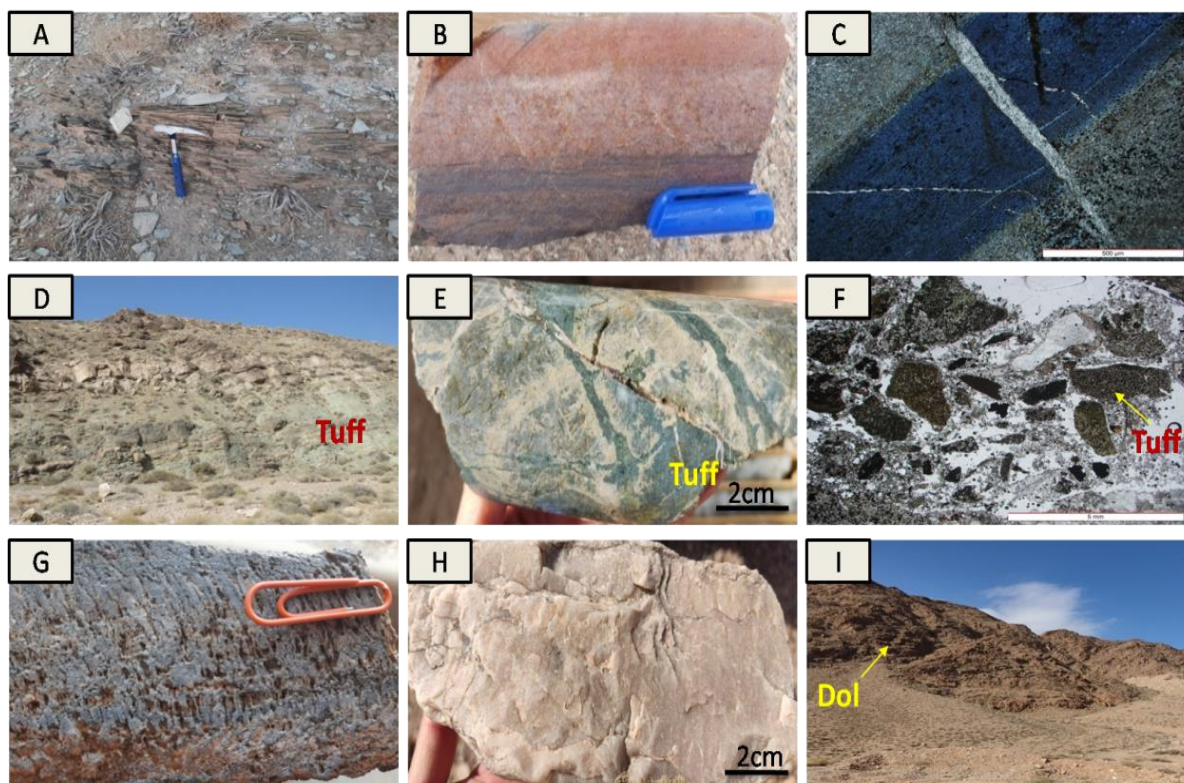
Fig. 4. Stratigraphic column of the Rezvan iron district

(۱) رخساره رگه - رگچه‌ای این رخساره کانه‌دار شامل انواع رگه - رگچه‌های مگنتیت (شکل ۸-۸ و A و B)، پیریت (شکل ۸-۸، C)، کالکوپیریت (شکل ۸-۸، D) و

بر اساس بررسی‌های ساخت، بافت، کانی‌شناسی و نوع ارتباط ماده معدنی با سنگ میزبان، می‌توان سه رخساره کانه‌دار در کانسار آهن رضوان تشخیص داد که از پایین به بالا عبارتند از:

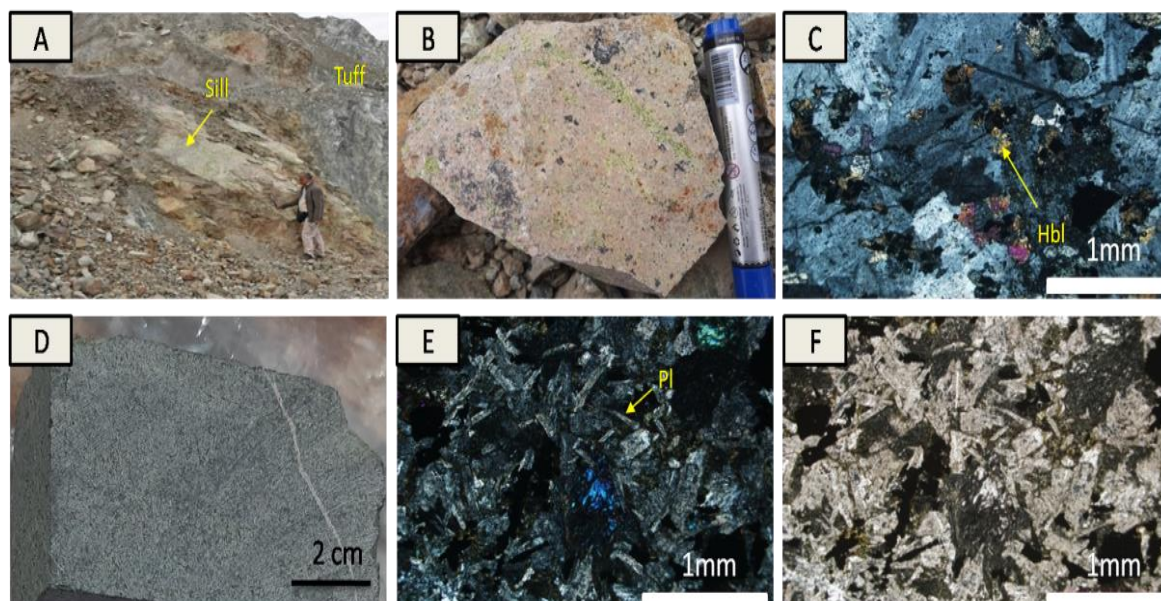
رگچه‌ای در کانسار رضوان قابل تشخیص است (شکل ۹). ۱- نسل اول به صورت رگچه‌های نسل اول متشکل از کوارتز و مقادیر ناچیز پیریت است (شکل ۹-A)، ۲- نسل دوم که اصلی‌ترین فاز کانه‌زایی است، شامل مگنتیت همراه پیریت، اپیدوت، کلریت و فلوگوپیت و گاهی ورمیکولیت، هورنبلند و اکتینولیت است (شکل ۹-B، C و D) و ۳- نسل سوم به صورت رگچه‌های نسل سوم حاوی کمی مگنتیت، پیریت و گاهی اولیژیست یا اسپیکولاریت و کوارتز است (شکل ۹-E، F، G، H و I).

کمی اولیژیست (اسپیکولاریت) است که گاهی حاوی کلسیت و کوارتز بوده و در اطراف با دگرسانی گسترده همراهی می‌شوند. این کانه‌زایی به طور گسترده در رگه‌ها و شکستگی‌های بین قطعه‌های یک سنگ را پر می‌کند. ضخامت رگه‌ها از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر متغیر است. دگرسانی‌های عمده در اطراف رگچه‌های کانه‌دار شامل دگرسانی‌های سیلیسی و کلریتی- اپیدوتی هستند (شکل ۸). بر اساس بررسی‌های ساخت، بافت، کانی‌شناسی، دگرسانی و تقدم و تأخیر رگچه‌های معدنی، سه نسل رگه در پهنه رگه-



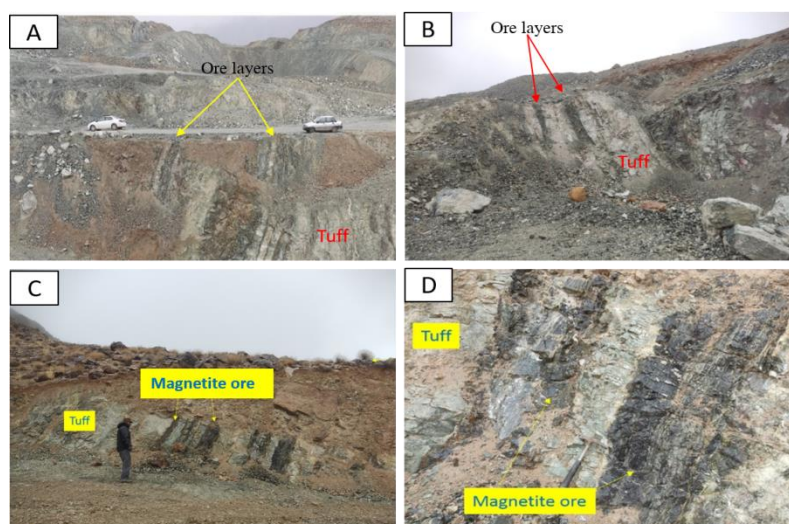
شکل ۵. تصویرهایی از واحدهای سنگی کانسار آهن رضوان، A: نمایی از شیل، B: ماسه سنگ قرمز در نمونه دستی، C: تناوب آهک و شیل که بخش شیلی کاملاً کلریتی شده در XPL، D: نمایی از توف در منطقه، E: توف به صورت رگه- رگچه‌ای در مغزه حفاری، F: تصویری از توف سنگی کربناتی در مقطع میکروسکوپی در PPL، G: آهک استروماتولیتی دندان‌های، H: تصویر نمونه دستی از کوارتزیت سفید و I: نمایی از دولومیت توده‌ای

Fig. 5. Images of the rock units of the Rezvan iron deposit, A: View of shale, B: Red sandstone in hand sample, C: Limestone and shale alternation with the shale part completely chloritized in XPL, D: View of tuff in the area, E: Tuff in the form of veinlets in the drill core, F: Image of lithic carbonate tuff in microscopic section in PPL, G: Dentate stromatolite limestone, H: Hand sample image of white quartzite, and I: View of massive dolomite



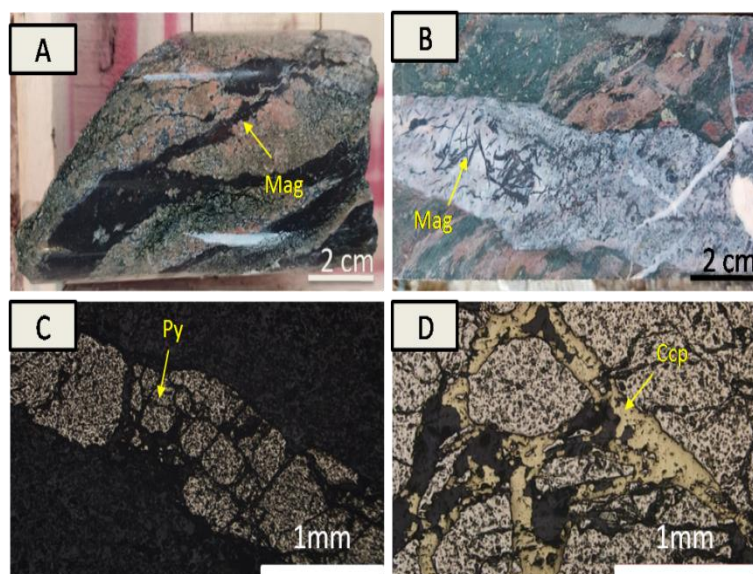
شکل ۶. تصویرهایی از توده‌های نفوذی در کانسار رضوان، A: سیل سینیتی در داخل واحد توفی، B: سیل سینیتی با دگرسانی اپیدوتی در نمونه دستی، C: سیل سینیتی حاوی پلاژیوکلاز و هورنبلند در مقطع میکروسکوپی در نور XPL، D: دایک دیابازی در نمونه دستی، E: دایک دیابازی به همراه پلاژیوکلاز دگرسان‌شده در نور XPL و F: دایک دیابازی در نور PPL. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Hbl: هورنبلند، Pl: پلاژیوکلاز).

Fig. 6. Images of intrusive rocks in the Rezvan deposit, A: Syenite sill within the tuff units, B: Syenite sill with epidote alteration in hand specimen, C: Syenite sill containing plagioclase, apatite and hornblende in microscopic section under XPL light, D: Diabase dyke in hand sample, E: Diabase dyke with altered plagioclase and pyroxene under XPL light, and F: Diabase dyke under PPL light. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Hbl: hornblende, Pl: plagioclase).



شکل ۷. نمایی از ساخت لایه‌ای پیکره‌های معدنی داخل توف، A، B، C: بخش شمالی کانسار و D: بخش میانی کانسار

Fig. 7. View of layered orebodies within tuff: A, B, C: northern part of the deposit, and D: middle part of the deposit



شکل ۸. نمایی از رخساره رگه- رگچه‌ای، A: نمایی از رگه مگنتیتی (Mag) در مغزه حفاری حاوی دگرسانی سیلیسی- کلریتی، B: نمایی از رگچه غنی از مگنتیت تیغه‌ای (Mag) در مغزه حفاری، C: نمایی از رگه پیریت (Py) در مقطع میکروسکوپی و D: نمایی از رگه- رگچه کالکوپریت (Ccp) در پیریت این رخساره. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Mag: مگنتیت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپریت).

Fig. 8. View of the vein-vein facies, A: View of a magnetite vein (Mag) in a drill core containing silicic-chlorite alteration, B: View of a lamellar magnetite-rich vein (Mag) in drill core, C: View of a pyrite vein (Py) in microscopic section, D: View of a chalcopyrite vein (Ccp) in pyrite in this facies. Symbols from Whitney and Evans (2010) (Mag: magnetite, Py: pyrite, Ccp: chalcopyrite).

۲) رخساره توده‌ای

رخساره کانسنگ توده‌ای بخش ستبر، پرعیار و توده‌ای کانسار را

تشکیل می‌دهد. در دید صحرایی و نمونه دستی، بخش عمده ماده معدنی به صورت مگنتیت توده‌ای حاوی کمی پیریت دیده می‌شود (شکل ۱۰- A، B، C و D).

۳) رخساره نواری

این رخساره به صورت نوارها و لامینه‌هایی از کانی‌های اکسید آهن مشاهده می‌شود. لایه‌های غنی از اکسیدهای آهن (مگنتیت) و فقیر از آن (اکسید آهن) در واحد توفی باعث ایجاد ساخت نواری شده است (شکل ۱۱- A و C). رخساره نواری در کانسار مورد بررسی وسعت زیادی دارد و کانه اصلی آن مگنتیت (همراه کمی پیریت) است (شکل ۱۱- B و D). ضخامت لایه‌ها، نوارها و

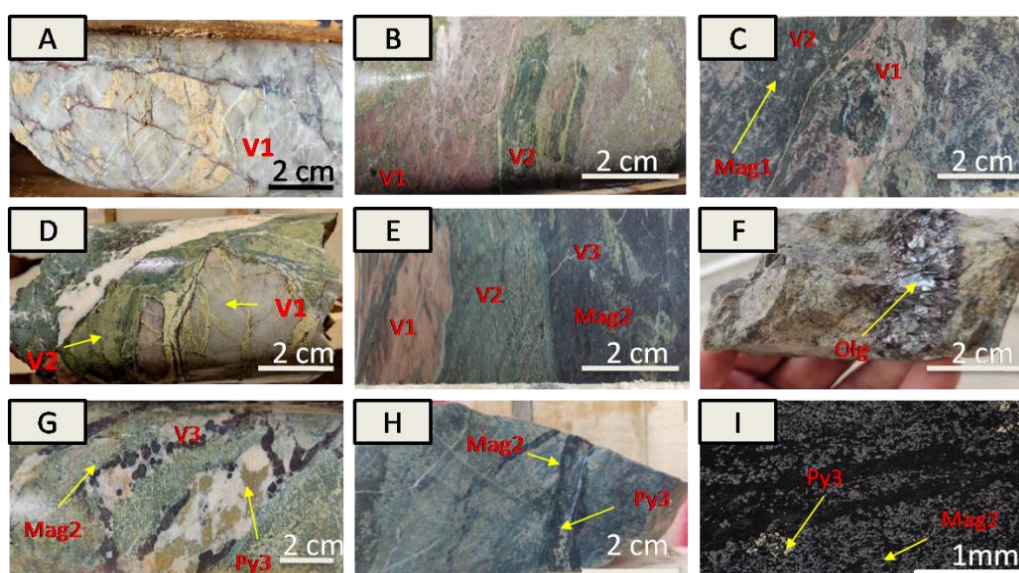
لامینه‌ها متغیر بوده و از میلی‌متر تا ۵۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند (شکل ۱۱).

دگرسانی

بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، دگرسانی‌های موجود در منطقه شامل کلریتی، اپیدوتی، سیلیسی و به ندرت سریستی است. دگرسانی کلریتی در کانسار رضوان به طور گسترده‌ای قابل مشاهده است. این دگرسانی علاوه بر توده‌های نفوذی، در سنگ‌های توفی و همراه با ماده معدنی نیز دیده می‌شود. دگرسانی کلریتی در واحد توفی گسترش زیادی دارد و به رنگ سبز قابل مشاهده است (شکل ۱۲- A). کانی مشخصه این دگرسانی کلریت است که در مقطع میکروسکوپی به رنگ‌های

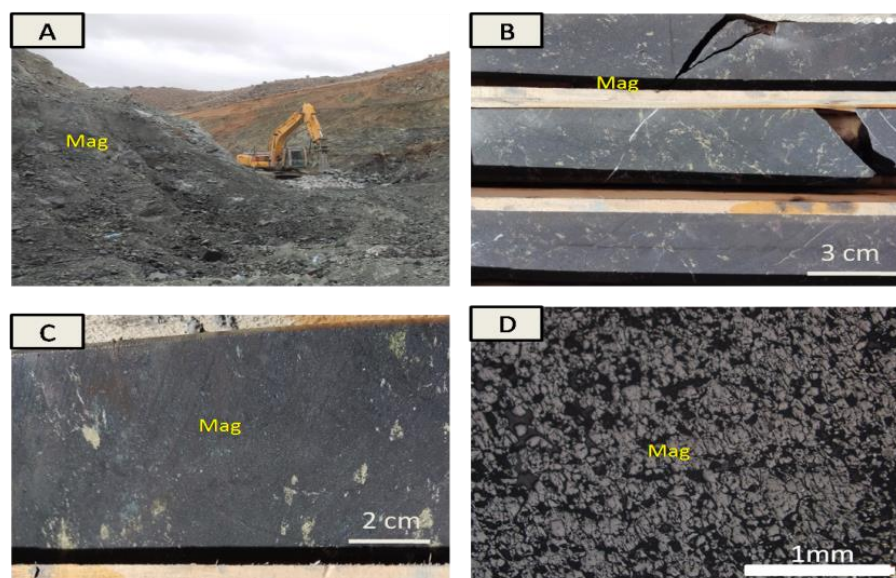
سیلیسی به صورت رگچه‌های سیلیسی نهان بلور همراه با کانی‌های کربناتی (از جمله کلسیت) در داخل سنگ میزبان مشاهده می‌شود. سیلیس در مقطع میکروسکوپی، حفره‌ها و شکستگی‌ها را پر کرده است (شکل ۱۲- G و H). در طی دگرسانی سریسیتی، فلدسپات‌های اولیه موجود در سنگ به کانی سریسیت تبدیل شده‌اند و باعث تشکیل بلورهای ریزدانه و پراکنده سریسیت بر روی بلورهای درشت فلدسپات می‌شوند (Lagat, 2009). در طی سریسیتی شدن فلدسپات، کوارتز آزاد شده باعث سیلیسی شدن سنگ می‌شود. درواقع پلاژیو کلازها مهم‌ترین کانی‌هایی هستند که تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۲- I).

سبز و آبی مشاهده می‌شود (شکل ۱۲- B و C). دگرسانی اپیدوتی همراه با دگرسانی کلریتی دیده می‌شود. کانی اپیدوت گاه در رگه‌ها و حفره‌ها همراه با کلسیت و به شکل بلورهای سبز تا متمایل به زرد رنگ مغز پسته‌ای به صورت بلورهای کشیده یافت می‌شود که در صحرا با چشم غیر مسلح نیز دیده می‌شود (شکل ۱۲- D). در مقاطع میکروسکوپی بلورهای اپیدوت اغلب منشوری، تا بی‌شکل هستند (شکل ۱۲- E و F). اپیدوتی شدن را می‌توان نتیجه دگرسانی گرمابی پلاژیو کلاز و کانی‌های مافیک دانست. دگرسانی سیلیسی، نتیجه تشکیل و افزایش کوارتز یا سیلیس ریزبلور در سنگ‌های دگرسان شده است (Evans, 1993). در کانسار رضوان، دگرسانی



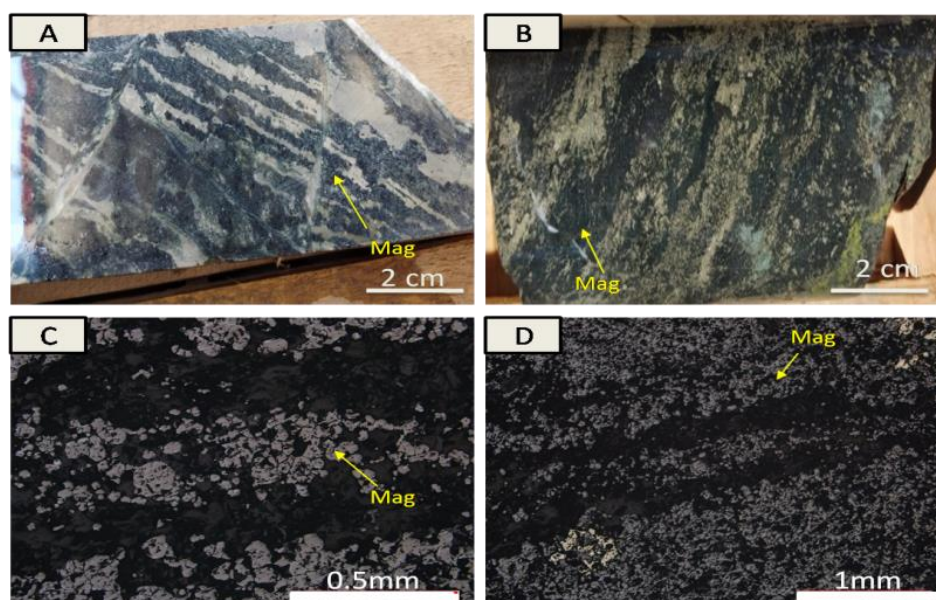
شکل ۹. تصویرهایی از انواع نسل‌های رگچه‌ها، A: رگچه‌های نسل اول که کوارتزی است، B: تصویری از رگچه نسل اول سیلیسی که توسط رگچه نسل دوم کلریتی- اپیدوتی قطع شده است، C: تصویری از رگه اول و دوم، D: رگچه نسل اول که توسط رگچه نسل دوم قطع شده است، E: هر سه رگه موجود در کانسار، F: رگه نسل سوم حاوی اولیژیست، G: رگه نسل سوم حاوی مگنتیت نسل ۲ و پیریت نسل ۳، H: رگه نسل سوم حاوی مگنتیت نسل ۲ و پیریت نسل ۳ و I: تصویر میکروسکوپی از رگه نسل سوم. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Mag: مگنتیت، Py: پیریت، Olg: اولیژیست).

Fig. 9. Images of different generations of veinlets, A: First generation veinlets which are quartz, B: Image of first generation siliceous veinlet cut by second generation chlorite-epidote veinlet, C: Image of first and second veins, D: First generation veinlet cut by second generation veinlet, E: All three veins in the deposit, F: Third generation veinlet containing oligist, G: Third generation veinlet containing second generation magnetite and third generation pyrite, H: Third generation veinlet containing second generation magnetite and third generation pyrite, and I: Microscopic image of third generation veinlet. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Mag: magnetite, Py: pyrite, Olg: oligist).



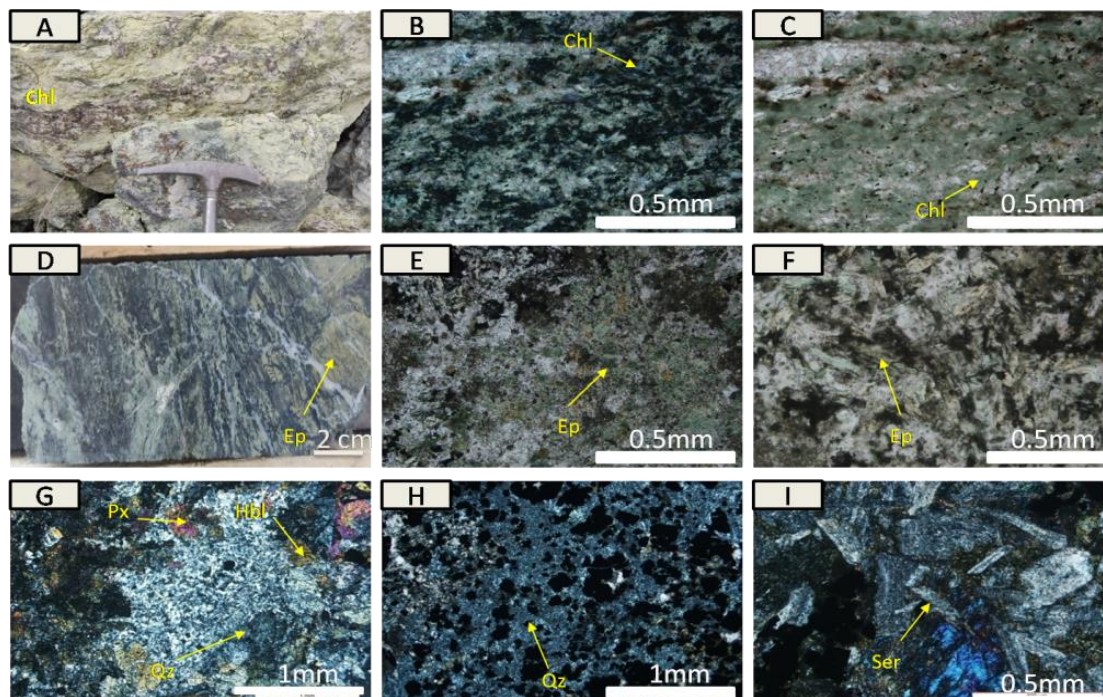
شکل ۱۰. نمایی از رخساره توده‌ای، A: نمایی از مگنتیت توده‌ای، B، C: مگنتیت توده‌ای در مغزه حفاری و D: مگنتیت توده‌ای در مقطع میکروسکوپی. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Mag: مگنتیت).

Fig. 10. View of the massive facies, A: View of the massive magnetite, B, C: massive magnetite in the drill core, and D: massive magnetite in microscopic section. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Mag: magnetite).



شکل ۱۱. نمایی از رخساره نواری، A: نمایی از نوارهای مگنتیت در نمونه دستی، B: مگنتیت نواری در مغزه حفاری، C و D: نوارهای مگنتیت در مقطع میکروسکوپی. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Mag: مگنتیت).

Fig. 11. View of banded facies, A: View of magnetite bands in hand sample, B: banded magnetite in drill core, C and D: magnetite bands in microscopic section. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Mag: magnetite).



شکل ۱۲. تصویرهایی از دگرسانی کلریتی، اپیدوتی، سیلیسی و سریسیتی، A: دگرسانی کلریتی در صحرا، B: دگرسانی کلریتی در نور XPL، C: دگرسانی کلریتی در نور PPL، D: دگرسانی اپیدوتی با رگه‌های کلسیتی در مغزه حفاری، E و F: دگرسانی اپیدوتی در مقطع میکروسکوپی، G: سیلیسی شدن، H: دگرسانی سیلیسی در مقطع میکروسکوپی و I: دگرسانی سریسیتی در پلاژیوکلازها. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Chl: کلریت، Ep: اپیدوت، Ser: سریسیت، Qz: کوآرتز، Px: پیروکسن، Hbl: هورنبلند).

Fig. 12. Images of chloritic, epidote, silicic and sericite alteration, A: chloritic alteration in the desert, B: chloritic alteration in XPL light, C: chloritic alteration in PPL light, D: epidote alteration with calcite veins in the drill core, E and F: epidote alteration in microscopic section, G: silicification, H: silicic alteration in microscopic section, and I: sericite alteration in plagioclases. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Chl: chlorite, Ep: epidote, Ser: sericite, Qz: quartz, Px: pyroxene, Hbl: hornblende).

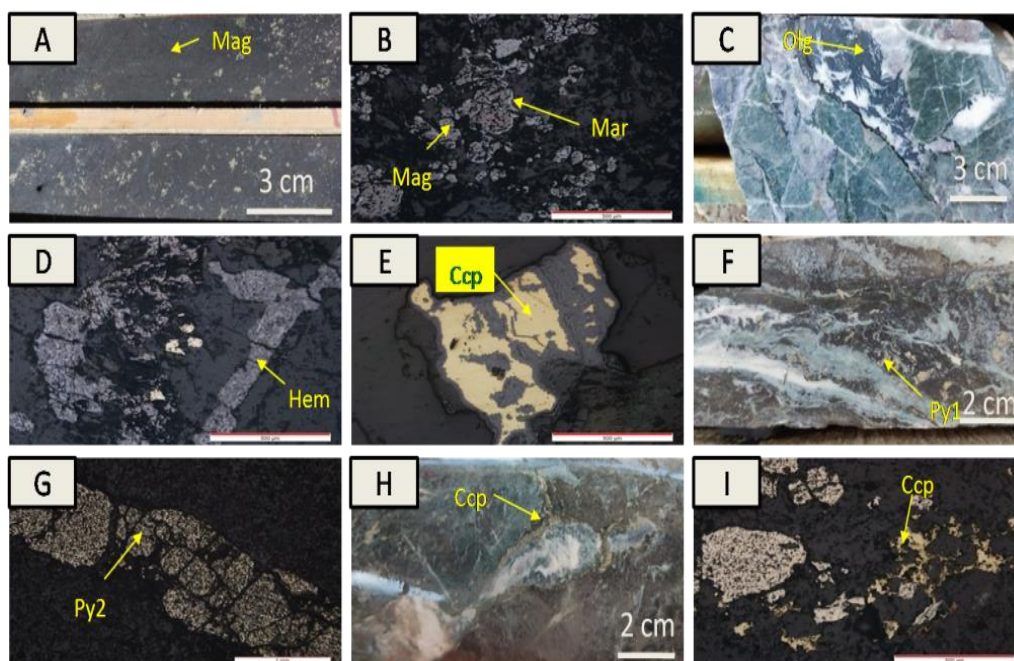
کانی‌شناسی و توالی هم‌یافتی

بررسی، این پدیده به صورت تبدیل مگنتیت از حاشیه و در محل شکستگی‌ها به هماتیت ثانویه و تغییر رنگ مگنتیت از کرم به سفید مشخص می‌شود (شکل ۱۳-B)؛ اما وجود رگه‌های اولیژیستی و تشکیل آن در حفره‌ها و شکستگی‌های کانسنگ مگنتیتی، نشان‌دهنده تشکیل مستقیم و اولیه آهن سه ظرفیتی با ساختار اولیژیست بعد از کانه‌زایی مگنتیت و توسط سیالات گرمابی با فوگاسیته اکسیژن بالا است (شکل ۱۳-C و D). گویت توسط هوازدگی و یا دگرسانی کانی‌های حاوی آهن ایجاد شده است (شکل ۱۳-E)؛ به طوری که بر اثر پدیده انحلال و اکسایش،

کانسار آهن رضوان شامل کانی‌های اولیه مگنتیت، اولیژیست (اسپیکولاریت)، پیریت و کالکوپریت و کانی‌های ثانویه هماتیت و گویت بوده و کانی‌های باطله شامل کلریت، اپیدوت، کلسیت، کوآرتز و ورمیکولیت هستند. مگنتیت بیشترین حجم کانسنگ را در کانسار رضوان به خود اختصاص داده است (شکل ۱۳-A). ماریتی شدن نوع خاصی از پدیده جانشینی است که در طی آن، مگنتیت در امتداد سطوح شکاف‌ها یا لبه‌ها توسط هماتیت ثانویه جانشین می‌شود. در مطالعه مقاطع میکروسکوپی کانسار مورد

(شکل ۱۳-G). با توجه به بررسی‌ها، بافت کالکوپیریت در رگه‌ها و حفره‌ها به صورت هم‌رشدی با مگنتیت و پیریت است (شکل ۱۳-H و I). از بررسی مقاطع مشخص می‌شود که همراهی کالکوپیریت با کانی‌های هماتیت سوزنی یا اسپیکولاریت و کلسیت در رگه‌ها می‌تواند نشانه اکسیدان‌تر شدن سیال گرمایی باشد. بر اساس بررسی‌های کانسار شامل ساخت و بافت در مقیاس صحرایی، نمونه دستی و میکروسکوپی و همچنین با توجه به دگرسانی‌ها و کانی‌شناسی، می‌توان مراحل تکوین کانه‌زایی در کانسار رضوان را به صورت توالی هم‌پافت نشان‌داد (شکل ۱۴).

کانی‌های سولفیدی در قسمت سطحی دچار انحلال می‌شوند و در نتیجه یون گوگرد آنها از محیط خارج و هیدروکسید آهن بر جای می‌ماند (Ramdohr, 1980). پیریت نسل اول به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار بوده و در همراهی با کانی مگنتیت است (شکل ۱۳-F). اندازه این پیریت‌ها گاهی به بیش از یک سانتی‌متر نیز می‌رسد. پیریت نسل اول هم‌زمان با مگنتیت و حتی کمی قبل از مگنتیت تشکیل شده است که احاطه‌شدن پیریت توسط مگنتیت دلیلی بر این امر است. پیریت نسل دوم، طی فاز تأخیری سولفیدی تشکیل شده و بیشتر به صورت شکل‌دار در رگه‌ها دیده می‌شود



شکل ۱۳. تصاویری از کانی‌های اصلی در کانسار آهن رضوان، A: مگنتیت در مغزه حفاری، B: مارتیتی شدن مگنتیت، C: اسپیکولاریت در مغزه حفاری، D: هماتیت در مقطع میکروسکوپی، E: جانشینی گوتیت به جای کالکوپیریت در مقطع میکروسکوپی، F: پیریت دانه‌پراکنده نسل اول در مغزه حفاری، G: پیریت رگه‌ای نسل دوم در مقطع میکروسکوپی، H: کالکوپیریت در مغزه حفاری و I: کالکوپیریت در مقطع میکروسکوپی. علائم اختصاری از ویتنی و اوایز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Mag: مگنتیت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Olg: اولیژیست، Hem: هماتیت، Mar: مارتیت).

Fig. 13. Images of the major minerals of the Rezvan mine, A: Magnetite in the drill core, B: Martitization of magnetite, C: Specularite in the drill core, D: Hematite in microscopic section, E: Replacement of chalcopyrite by goethite in microscopic section, F: Generation 1 disseminated pyrite in the drill core, G: Generation 2 veined pyrite in microscopic section, H: Chalcopyrite in the drill core, and I: Chalcopyrite under microscope. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Mag: magnetite, Py: pyrite, Ccp: chalcopyrite, Olg: oligist, Hem: hematite, Mar: martite).

Stage Mineral		Volcanic-exhalative				Uplift and weathering	
		Stringer ore			Massive ore		Bedded ore
		Vein1	Vein2	Vein3			
Magnetite			████████	████████	████████	████████	
Pyrite		████████	████████	████████	████████		
Chalcopyrite			████████				
Specularite				████████			
Hematite							████████
Goethite							████████
Chlorite			████████	████████	████████		
Epidote			████████	████████			
Quartz		████████		████████			
Calcite				████████			████████
Vermiculite			████████				
Actinolite			████████				
Hornblende			████████				
Textures and Structures	Massive				████████		
	Banded					████████	
	Brecciated		████████	████████			
	Vein-Veinlet	████████	████████	████████			
	Disseminated		████████	████████		████████	
	Replacement		████████	████████	████████		████████

شکل ۱۴. توالی هم‌یافتی کانی‌ها در کانسار آهن رضوان

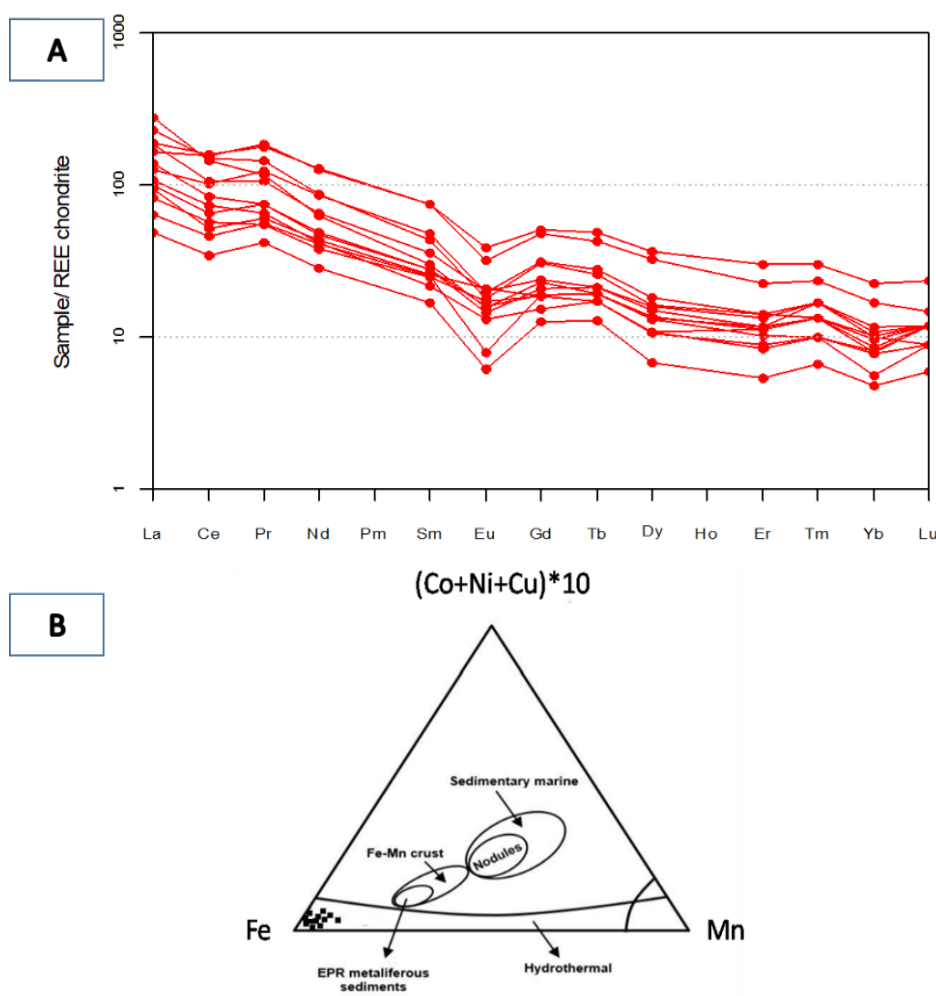
Fig. 14. Paragenetic sequence of minerals in the Rezvan iron deposit

زمین‌شیمی کانسنگ

کندريت (Nakamura, 1974)، مقدار آنومالی یوروپیوم و سیریم پایین است (شکل ۱۵-A). در نمودار سه تایی Fe-Mn- $10(Co+Ni+Cu)$ (Bonatti, 1975) نمونه‌های کانسنگ آهن رضوان در موقعیت گرمایی قرار می‌گیرند (شکل ۱۵-B). علاوه بر این، نسبت‌های U/Th ، Ni/Co و Cu/Zn که به عنوان شاخص اکسایش- احیا گذشته استفاده می‌شود (Hallberg, 1976; Jones and Manning, 1994; Nath et al., 1997; Nagarajan et al., 2007; Ngueutchoua et al., 2017) در کانسنگ‌های آهن رضوان به ترتیب برابر ۱/۱۴، ۰/۳۹ و ۰/۳۲ است.

پس از بررسی‌های صحرایی و انجام بررسی‌های میکروسکوپی بر روی واحدهای سنگی به ویژه سنگ‌های توالی میزبان و رخساره‌های کانه‌دار، برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی کانسار آهن رضوان ۱۴ نمونه از کانسنگ و سنگ میزبان برای بررسی میزان عناصر اصلی، فرعی، کمیاب و عناصر نادر خاکی تجزیه و تحلیل شدند. داده‌های حاصل از تجزیه و تحلیل زمین‌شیمیایی عناصر اصلی، فرعی، کمیاب و عناصر نادر خاکی مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به عناصر نادر خاکی کانسنگ، طبق نمودار بهنجار شده به



شکل ۱۵. A: نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت برای کانسنگ در کانسار آهن رضوان (Nakamura, 1974) و B: نمودار سه تایی $\text{Fe-Mn-(Co+Ni+Cu)*10}$ (Bonatti, 1975) و موقعیت نمونه‌های کانسار رضوان

Fig. 15. A: Chondrite-normalized rare earth element diagram for ores of the Rezvan ore deposit (Nakamura, 1974), and B: Fe-Mn-(Co+Ni+Cu)*10 ternary diagram (Bonatti, 1975) for the Rezvan ores

واضحی را نشان می‌دهد که از تحرک بالای این عناصر حکایت دارد (شکل ۱۶).

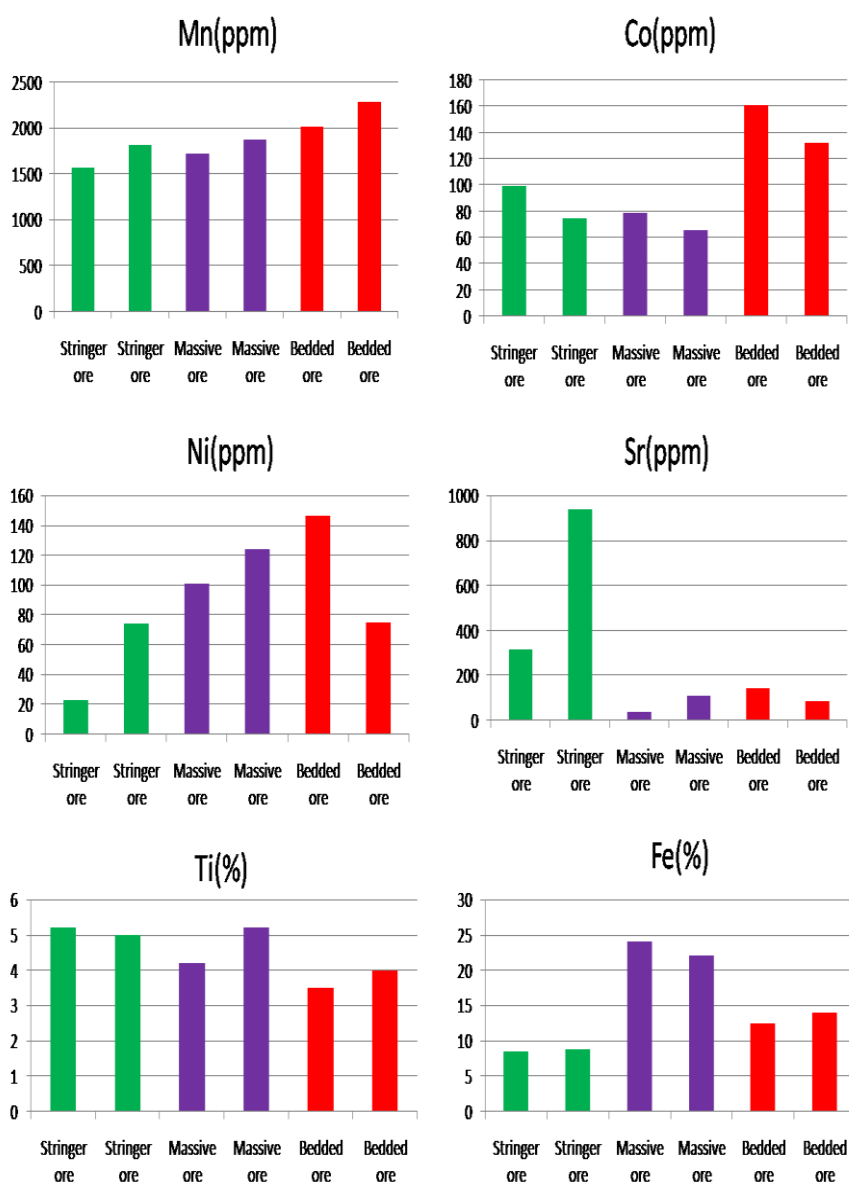
الگوی تشکیل

کانه‌زایی آهن در توالی آتشفشانی- رسوبی ریزو به صورت بین لایه‌ای با لایه‌های توفی در توالی میزبان از ماهیت تشکیل در یک حوضه دریایی دارای فعالیت‌های آتشفشانی هم‌زمان با

بر اساس بررسی‌های زمین‌شیمی بر روی رخساره‌های استرینگر، توده‌ای و نواری مقدار عناصر Zn ، V ، Ni ، Co ، Mn و As از بخش استرینگر به سمت رخساره توده‌ای و نواری افزایش می‌یابد. مقدار عناصر Sr و Ti از رخساره استرینگر به سمت رخساره نواری کاهش می‌یابد. میزان عنصر Fe در رخساره استرینگر کمترین و در رخساره توده‌ای بیشترین مقدار را دارد. میزان عناصر Mn و As از رخساره توده‌ای به سمت رخساره نواری افزایش

دگرسانی‌های شدید سیلیسی، کلریتی و اپیدوتی همراه است. در زیر افق‌های کانه‌دار، توده‌های نفوذی وجود دارد که خود دارای دگرسانی کلریتی، اپیدوتی و سیلیسی بوده و میزبان کانه‌زایی رگه- رگچه‌ای هستند. مواد معدنی دارای بافت و ساخت‌های رگه- رگچه‌ای، برشی، توده‌ای، دانه‌پراکنده و نواری هستند.

رسوب‌گذاری حکایت دارد. پیکره‌های معدنی به صورت لایه‌ای و چینه‌سان، همخوان و همروند با لایه‌بندی توف‌ها بوده که می‌تواند دلیلی بر تشکیل آنها به صورت سین‌ژنتیک و هم‌زمان با فعالیت‌های آتشفشانی و رسوب‌گذاری باشد. بخش زیرین پیکره‌های معدنی لایه‌ای به صورت رگه- رگچه‌ای بوده که با

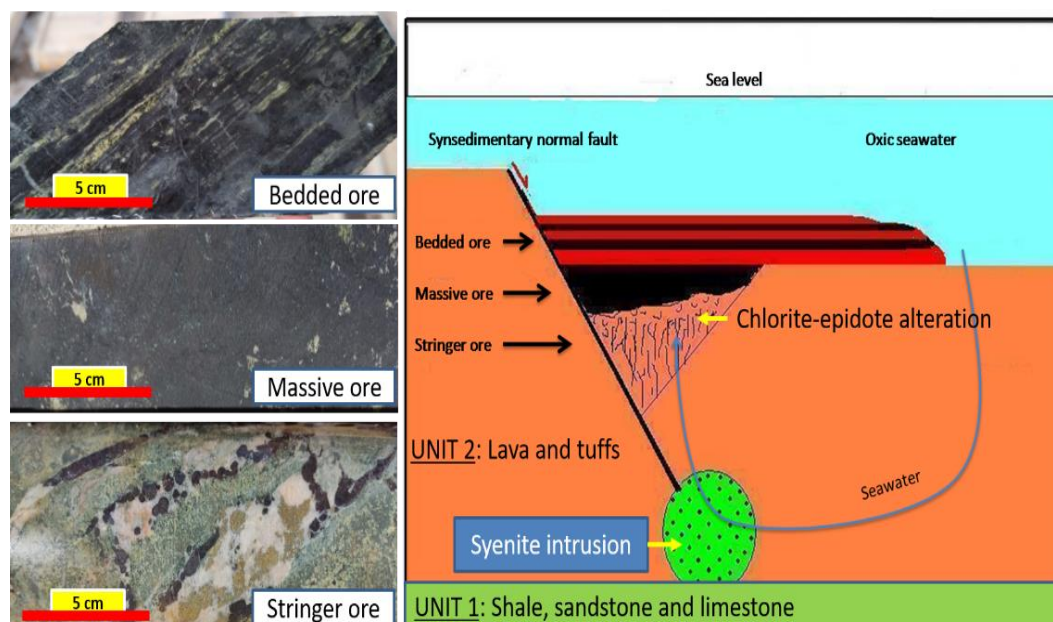


شکل ۱۶. نمودار هیستوگرام فراوانی برخی از عناصر در رخساره‌های کانه‌دار کانسار آهن رضوان

Fig. 16. Histogram diagram of some elements abundance for the ore facies of the Rezvan iron deposit

رضوان هم می‌توان گفت که سیالات گرمابی- برون‌دمی داغ، اسیدی و احیایی، پس از عبور از شکستگی‌های نرمال عمیق کف دریا، عناصر کانه‌ساز را از سنگ‌های کم‌پایین شسته، با خود به طرف بالا آورده و وارد حوضه دریایی اکسیدان کرده و در شرایط مناسب ته‌نشست داده‌اند. ته‌نشینی آهن در زیر کف دریا در محل گسل‌های هم‌زمان با آتشفشان و رسوب‌گذاری یا **زون تغذیه‌کننده** به صورت رگه- رگچه‌ای همراه با دگرسانی شدید سیلیسی، کلریتی و اپیدوتی بوده و در اثر ورود سیال به کف دریا (احتمالاً به صورت پلوم‌های شناور) به صورت کانسنگ لایه‌ای و نواری و همخوان و هم‌روند با نهشته‌های توفی میزبان در ابتدا به صورت ژل‌های هیدروکسید آهن نهشته‌شده و در نهایت در اثر دیاژنز به کانی‌های آهن از جمله مگنتیت و هماتیت تبدیل می‌شوند (شکل ۱۷).

از مهم‌ترین مدل‌های نهشت آهن در محیط‌های آتشفشانی- رسوبی، مدلی است که در آن از طریق گسل‌های هم‌زمان با فعالیت‌های آتشفشانی- رسوبی، ورود سیالات همرفتی گرمابی- برون‌دمی غنی از آهن به کف دریا رخ داده است و تغییر در شرایط فیزیکوشیمیایی (مثل دما، Eh، pH، $f\text{CO}_2$ ، $f\text{O}_2$ ، H_2S) باعث ته‌نشینی آهن می‌شود. بکر و همکاران (Bekker et al., 2010) مدلی را برای تشکیل و ته‌نشست آهن در دریا ارائه می‌دهد. در ادامه باقی‌مانده آهن محلول نیز با رسیدن جریان‌های بالارو به محیط‌های اکسیدان و کم عمق‌تر در حضور اکسیژن، هیدروکسیدهای آمورف آهن سه ظرفیتی تولید می‌کند. چنان‌که بیان شد، ویژگی‌های زمین‌شناسی، شکل هندسی رخداد کانه‌زایی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت کانسنگ و دگرسانی در کانسار آهن رضوان نشان می‌دهد که این کانسار را می‌توان در دسته کانسارهای آهن آتشفشانی- رسوبی قرار داد. بنابراین در مورد کانسار آهن



شکل ۱۷. مدل نمادین تشکیل کانسار آهن رضوان به صورت یک سامانه گرمابی زیردریایی

Fig. 17. Schematic formation model of the Rezvan iron ore deposit as a submarine hydrothermal system

توده‌های نفوذی هم‌زمان با آتشفشان و رسوب گذاری نقش موتور حرارتی برای فعال‌سازی سامانه گرمایی زیردریایی و جریان همرفتی آب دریا داشته‌اند. در ادامه در طی دیاژنز، تبلور کانی‌های مگنتیت، هماتیت (اولیژیست یا اسپیکولاریت) و پیریت رخ داده است. البته هماتیت ثانویه و گوئیت طی فرایند هوازدگی و سوپرژن در طی بالاآمدگی منطقه ایجاد شده‌اند که در بخش‌های سطحی دیده می‌شوند.

بر اساس بررسی‌های ساخت، بافت، کانی‌شناسی، دگرسانی و تقدم و تأخیر رگچه‌های معدنی، سه فاز اصلی کانه‌زایی در کانسار رضوان قابل تشخیص است. فاز اول به صورت رگچه‌های نسل اول به طور عمده متشکل از کوارتز (حاوی مقادیر ناچیزی پیریت) است و دارای ماهیت سیلیسی بوده که احتمالاً از شرایط دمایی پایین‌تر و pH بالاتر سیال حکایت دارد. فاز دوم که اصلی‌ترین فاز است، اغلب شامل مگنتیت همراه پیریت، اپیدوت، کلریت و فلوگوپیت و گاهی ورمیکولیت، هورنبلند و اکتینولیت است و نشان‌دهنده دمایی بالاتر و pH پایین‌تر است. فاز سوم به صورت رگچه‌های نسل سوم کربناتی کانه‌دار حاوی کمی مگنتیت، پیریت و گاهی اولیژیست یا اسپیکولاریت و سیلیس بوده که به نظر می‌رسد دارای دمایی پایین‌تر از فاز قبل و pH و Eh بالاتر است. با توجه به عناصر نادر خاکی کانسنگ، طبق نمودار بهنجار شده به کندریت (Nakamura, 1974)، پایین‌بودن مقدار آنومالی یوروپیوم نشان می‌دهد که محیط تشکیل کانسنگ کم‌عمق و اکسیدان است و Eu^{+3} نمی‌تواند جانشین عنصر در سنگ شود و لذا کانسنگ نهشته شده فقیر از Eu می‌شود. همچنین، پایین‌بودن مقدار آنومالی سریم (Ce) نیز تأیید کننده محیط اکسیدان است (De Baar et al., 1988; Zhang et al., 2022).

علاوه بر این، از نسبت Ni/Co به عنوان شاخص اکسایش-احیای گذشته استفاده می‌شود؛ به طوری که اگر مقادیر این نسبت در کانسنگ کمتر از ۵ باشد، نشان‌دهنده شرایط اکسیدان محیط است (Jones and Manning, 1994). میزان این نسبت در کانسنگ‌های آهن رضوان برابر ۱/۱۴ بوده که از حاکم‌بودن

شرایط اکسیدان در محیط تشکیل حکایت دارد. همچنین میزان نسبت U/Th میانگین در کانسنگ آهن رضوان برابر ۰/۳۹ است که بر اساس ناث و همکاران (Nath et al., 1997) بر محیط اکسیدان منطبق است. به علاوه، میزان نسبت Cu/Zn در کانسنگ برابر ۰/۳۲ بوده که از ویژگی‌های محیط اکسیدان ته‌نشست است (Hallberg, 1976; Nagarajan et al., 2007; Ngueutchoua et al., 2017).

ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022) معتقدند این شرایط در پرکامبرین پسین- کامبرین زیرین حاکم بوده است. بر اساس بررسی‌های زمین‌شیمی بر روی رخساره‌های استرینگر، توده‌ای و نواری مقدار عناصر V, Zn, Co, Ni, Mn و As از بخش استرینگر به سمت رخساره توده‌ای و نواری افزایش و مقدار عناصر Sr و Ti از رخساره استرینگر به سمت رخساره نواری کاهش می‌یابد. افزایش بسیاری از عناصر به ویژه Zn, Mn و As به سمت رخساره نواری از تحرک بالای این عناصر حکایت دارد که می‌تواند نشان‌دهنده ورود سیال به محیط دریایی باشد.

در مجموع، با توجه به شکل هندسی ماده معدنی و رخساره‌های کانه‌دار، ساخت، بافت و کانی‌شناسی ماده معدنی، دگرسانی و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، این گونه استنباط می‌شود که کانسار آهن رضوان به صورت آتشفشانی- رسوبی در زمان نئوپروتروزوئیک تشکیل شده است. علاوه بر سایر انواع کانسارهای آهن، ایران مستعد کانسارهای آهن آتشفشانی- رسوبی است (Nabatian et al., 2015). از جمله این کانسارها در ایران (جدول ۱) می‌توان به کانه‌زایی آهن در سری هرمز در جزیره لارک (Alizadeh Fard and Mousivand, 2023) و کانه‌زایی آهن- سلسیت- منگنز کوه ریگ (Mahdevari et al., 2021) اشاره کرد. البته کانسارهای آهن آتشفشانی- رسوبی و سازند آهن نواری که بزرگ‌ترین منبع آهن هستند، در سراسر کره زمین (جدول ۲) به ویژه در کراتون‌ها گسترش دارند (Hou et al., 2014; Wu et al., 2015; Wu et al., 2016).

جدول ۱. مقایسه کانسار آهن رضوان با برخی از کانسارهای آهن آتشفشانی- رسوبی ایران

Table 1. Comparison of Rezvan iron deposit with some of the volcano-sedimentary Fe deposits in Iran

Deposit	Lark Island	Dash Aghol	Heneshak	Gol Gohar	Zidar	Rezvan
Feature						
Structural area	Zagros	Sanandaj-Sirjan	Sanandaj-Sirjan	Sanandaj-Sirjan	Central Iran	Central Iran
Age	Late Proterozoic	Jurassic	Middle Triassic	Paleozoic	Eocene	Late Proterozoic
Host and country rocks	Lava and rhyolitic tuff, shale and evaporite deposits	Sandstone and carbonate tuffs	Dolomite, shale, sandstone and crystalline limestone	Shale, sandstone, basaltic siltstone, gabbro and diabase, carbonate	Conglomerate, dolomite, shale, sandstone, tuff, marl, and shale	Tuff, shale, sandstone, limestone, stromatolite limestone, dolomite
Mineralogy	Magnetite, oligist/specularite, hematite, pyrite and limonite	Hematite, magnetite, limonite, goethite and pyrite	Hematite, magnetite, goethite, ramsdellite, psilocybin, and cryptomelane	Magnetite, goethite, limonite, pyrite and chalcopryrite	Magnetite, hematite, pyrite, goethite, limonite	Magnetite, hematite, oligist/specularite, goethite, pyrite and chalcopryrite
Structures and texture	Vein-veinlet, brecciated, massive and banded	Massive, laminar, granular, brecciated, and vein-veinlet	Massive, laminated, disseminated, open-space fillings	Banded, granular, massive and replacement	Layered, massive, disseminated, replacement, colloform, and stockwork	Vein-veinlet, layered, massive, brecciated, disseminated, and replacement
References	Alizadeh Fard and Mousivand, 2023	Maghfouri et al., 2019	Kazemi Rad et al., 2013	Babaki and Aftabi, 2006	Rajai Ghahramanloo and Fardoust, 2015	Present research

جدول ۲. مقایسه کانسار آهن رضوان با برخی از کانسارهای آهن آتشفشانی- رسوبی جهان

Table 2. Comparison of the Rezvan iron deposit with some of the volcano-sedimentary Fe deposits in the world

Deposit Feature	Tianhu	Machang	Jinteshan	Yuanjiacun	Rezvan
Age	Ordovician	Neoarchaeon	Precambrian	Paleoproterozoic	Late Proterozoic
Host and country rocks	Schist, quartzite, marble, amphibolite and granitic gneiss	Trachyte volcanic rocks, basalt and andesite, basalt-gneiss, schist, migmatite and granite	Clastic and carbonate sediments along with basaltic rocks	Clastic sediments, carbonate units and volcanic units (greenschist)	Tuff, shale, sandstone, limestone, stromatolite limestone, dolomite
Structures and texture	Layered, banded, and vein-veinlet	Layered, banded, massive, vein, and stockwork	Layered and banded	Layered and banded	Vein-veinlet, layered, massive, shear, disseminated, and replacement
Mineralogy	Magnetite, hematite, pyrite, chalcopyrite	Magnetite, pyrite and hematite	Magnetite, hematite, barite, specularite, pyrite, chalcopyrite, jasper, chlorite and siderite	Magnetite, hematite, siderite, specularite and pyrite	Magnetite, hematite, specularite, pyrite and chalcopyrite
References	Wu et al., 2016	Wu et al., 2015	Sun et al., 1998	Hou et al., 2014	Present research

نتیجه‌گیری

در واحدهای توفی و به مقدار خیلی ناچیز در توده نفوذی گرانیتوئیدی سسینیتی کم‌پایین رخ داده است. پیکره‌های معدنی ماهیت لایه‌ای داشته که در بخش زیرین حالت رگه- رگچه‌ای دارند. در این کانسار سه رخساره کانسنگ از پایین به بالا مشاهده می‌شود: الف- رخساره رگه- رگچه‌ای که در آن رگه- رگچه‌های

کانه‌زایی آهن در منطقه رضوان رفسنجان در سری ریزو با محدوده سنی نوپروتروزوئیک رخ داده که اغلب شامل واحدهای توفی فلسیک تا گدازه‌ای مافیک با بین لایه‌های کربناته در بالای توالی است. کانه‌زایی آهن در افق‌های چینه‌شناسی خاص و به طور عمده

می‌یابد. مقادیر آنومالی منفی یوروپیم نیز نشانه اکسیدان بودن محیط تشکیل کانسار است. شواهد مختلف از جمله نوع سنگ‌های میزبان و همراه، شکل هندسی پیکره‌های معدنی، ساخت، بافت و کانی‌شناسی ماده معدنی و دگرسانی نشان می‌دهد که کانه‌زایی آهن در کانسار رضوان در سری ریزو مشابه کانسارهای آهن آتشفشانی- رسوبی بوده که در زمان نئوپروتریوزوئیک در اثر فعالیت سامانه‌های گرمایی زیر دریایی نهشته شده است.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های دانشگاه صنعتی شاهرود و مدیر عامل محترم شرکت معدن آهن رضوان جناب آقای محمدی، برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

حاوی ماده معدنی در واحدهای سنگی کمرباین به صورت سه نسل دیده می‌شوند که همراه دگرسانی‌های کلریتی- اپیدوتی و سیلیسی هستند، ب- رخساره توده‌ای که بخش پرعیار کانسار را تشکیل می‌دهد و ج- رخساره نواری که تناوب لایه‌های غنی از اکسید آهن و فقیر از آن در واحدهای توفی باعث ایجاد ساخت نواری شده است. ساخت و بافت‌های عمده ماده معدنی در کانسار شامل توده‌ای، نواری، برشی، رگه- رگچه‌ای، دانه‌پراکنده و جانشینی هستند. کانی‌های اصلی ماده معدنی شامل کانی‌های اولیه مگنتیت، پیریت و کمی کالکوپیریت و اولیژیست و کانی‌های ثانویه هماتیت و گوتیت بوده و کانی‌های باطله شامل کلریت، اپیدوت، کلسیت، کوارتز و ورمیکولیت هستند. بر اساس بررسی‌های زمین‌شیمی بر روی رخساره‌های استرینگر، توده‌ای و نواری مقدار عناصر As ، Mn ، Co ، Ni ، V ، Zn از بخش استرینگر به سمت رخساره توده‌ای و نواری افزایش و مقدار عناصر Ti و Sr از رخساره استرینگر به سمت رخساره نواری کاهش

1. X-ray diffraction (XRD)
2. Inductivity coupled plasma- mass spectrometry (ICP-MS)
3. feeder/stringer zone

References

- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *GSA Bulletin*, 103(8): 983–992. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103%3C0983:SASCOT%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103%3C0983:SASCOT%3E2.3.CO;2)
- Alizadeh Fard, Y. and Mousivand, F., 2023. Ore Zoning, Geochemistry and Genesis of Iron Mineralization in Hormuz Volcano-Sedimentary Sequence, Larak Island, South of Bandar Abbas. *Journal of Economic Geology*, 15(2): 163–188. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2023.78626.1074>
- Amirkhani, R., Ebrahimi, M., Mokhtari, M. and Azimzadeh, A., 2017. Mineralogy, geochemistry, fluid inclusion study and genesis of Homeijan magnetite-apatite mineralization, SW Behabad, Yazd province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 26(103): 83–100. <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.46732>
- Babaki, A. and Aftabhi, A., 2006. Investigation on the Model of Iron Mineralization at Gol Gohar Iron Deposit, Sirjan-Kerman. *Quarterly Journal of Earth Sciences*, 16(61): 40–59. Retrieved December 13, 2025 from https://www.gsjournal.ir/article_207694.html?lang=en
- Bekker, A., Slack, J.F., Planavsky, N., Krapez, B., Hofmann, A., Konhauser, K.O. and Rouxel, O.J., 2010. Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes. *Economic Geology*, 105(3): 467–508. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.467>
- Bonatti, E., 1975. Metllogenesis at oceanic spreading centers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 3: 401–431. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.03.050175.002153>
- De Baar, H.J.W., German, C.R., Elderfield, H. and Van Gaans, P., 1988. Rare earth element distributions in anoxic waters of the Cariaco Trench. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5): 1203–1219. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90275-x](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90275-x)
- Evans, A.M., 1993. *An Introduction to Economic Geology and Its Environmental Impacts*. Black well Science, 390 pp. Retrieved December 13, 2025 from https://books.google.de/books?id=V7DIV1dgBHAC&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Hallberg, R., 1976. A geochemical method for investigation of palaeoredox conditions in sediments. *Ambio Special Report*, 4: 139–147. Retrieved December 13, 2025 from <https://www.jstor.org/stable/25099586>
- Hou, T., Zhang, Z., Pirajno, F., Santosh, M., Encarnacion, J., Liu, J., Zhao, Z. and Zhang, L., 2014. Geology, tectonic settings and iron ore metallogenesis associated with submarine volcanism in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 57: 498–517. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.08.007>
- Javanshir, A., Rastad, A. and Rabbani, A., 2009. Ore-bearing Facies of Ahmad-Abad Zn- Pb (Mo) Deposit, Northeast of Bafq and Comparison with Bleiberg at Alps. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 18(71): 69–80. <https://doi.org/10.22071/gsj.2010.56989>
- Jones, B. and Manning, D.C., 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 111(1–4): 111–129. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90085-x](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90085-x)
- Kazemi Rad, M., Rastad, A. and Mohajal, M., 2009. Mineralogy, alteration, structure and texture of the Heneshak, Goli and Cheshmeh Esi iron-manganese deposits in the northeast of Safashahr, Fars Province. 27th Earth Sciences Conference and 13th Conference of the Geological Society of Iran. Geological and Mineral Exploration Organization of Iran, Tehran, Iran.
- Lagat, J., 2009. Hydrothermal alteration mineralogy in geothermal fields with case examples from Olkaria Domes geothermal field, Kenya. Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, Organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya.
- Maghfouri, S., Movahednia, M. and Hosseinzadeh, M., 2019. Geology, geochemistry and genesis of the iron mineralization in Jurassic volcanic-sedimentary sequence of the Dash Aghol deposit, northeast of Bukan, Sanandaj-Sirjan zone. *Quarterly Iranian Journal of Geology*, 13(50): 75–88. Retrieved December 13, 2025 from <https://dori.net/dor/20.1001.1.17357128.1398.13.50.6.0>
- Mahdevvari, M., Mousivand, F., Sadeghian, M. and Movahednia, M., 2021. Ore facies, geochemistry

- and genesis of Kuhe Rig Fe-Sr-(Mn) deposit, South of Shahroud. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 31(2): 79–90.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2020.189496.1666>
- Moghaddasi, J., Yazdi, J. and Namdar Mohammadi, T., 2018. Mineralogy and geochemistry of Siriz iron deposit, northwest of Zarand, Kerman province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27(106): 99–116.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2018.58233>
- Nabatian, Gh., Rastad, E., Neubauer, F., Honarmand, M. and Ghaderi, M., 2015. Iron and Fe–Mn mineralization in Iran: implications for Tethyan metallogeny. *Australian Journal of Earth Sciences*, 62(2): 211–241.
<https://doi.org/10.1080/08120099.2015.1002001>
- Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Nagendra, R., Armstrong-Altrin, J.S. and Moutte, J., 2007. Geochemistry of Neoproterozoic shales of the Rabanpalli formation, Bhima basin, northern Karnataka, southern India: implications for provenance and paleoredox conditions. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(2): 150–160. Retrieved December 13, 2025 from
<https://rmcg.geociencias.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/726>
- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5): 757–775. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(74\)90149-5](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(74)90149-5)
- Nath, N.B., Bau, M., Ramalingeswara Rao, B. and Rao, C.M., 1997. Trace and rare earth elemental variation in Arabian Sea sediments through a transect across the oxygen minimum zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(12): 2375–2388. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(97\)00094-x](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(97)00094-x)
- Ngueutchoua, G., Ngantchu, L.D., Youbi, M., Ngos Iii, S., Beyala, V.K.K., Yifomju, K.P. and Tchamgoué J.C., 2017. Geochemistry of cretaceous mudrocks and sandstones from Douala sub-basin, Kumba area, south west Cameroon: constraints on provenance, source rock weathering, paleo-oxidation conditions and tectonic environment. *International Journal of Geosciences*, 8(4): 393–424.
<https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84021>
- Pakizeh Sanajerdi, S.A., Mousivand, F., Rajabi, A. and Maghfouri, S., 2020. Nohkuhi volcanogenic massive sulfide deposit: a sample of Bathurst-type mineralization in northwest of Kerman. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 29 (115): 111–122.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2019.117154.1397>
- Rajai Ghahramanloo, A. and Fardoust, F., 2015. Mineralogy, geochemistry and genesis model of the Zeidar iron deposit, East Miami. Master's thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 158 pp. Retrieved December 13, 2025 from
<https://shahroodut.ac.ir/fa/thesis/thesis.php?thid=QE253>
- Ramdohr, P., 1980. The ore minerals and their intergrowths (English translation of the 4th. Edition). Pergamon press, 1205 pp.
- Rostami, M. and Tale Fazel, A., 2019. Geochemistry, mineralization and alkali-Fe oxide alteration of the Lake Siah iron±apatite deposit (northeastern Bafq), Bafq-Saghand metallogenic province. *Journal of Economic Geology*, 10(2): 587–616. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/ECONG.V10I2.63377>
- Sun, H., Wu, J., Yu, P. and Li, J., 1998. Geology, geochemistry and sulfur isotope composition of the Late Proterozoic Jingtieshan (Superior-type) hematite-jasper-barite iron ore deposits associated with stratabound Cu mineralization in the Gansu Province, China. *Mineralium Deposita*, 34(1): 102–112. Retrieved December 13, 2025 from
<https://link.springer.com/article/10.1007/s001260050188>
- Vahdati Daneshmand, F., Sheikh-ul-Islami, M. and Rafia, R., 1995. Geological Map 1:100,000, Reviewers. Geological and Mineral Exploration Organization of the Country.
- 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.2010.3371>
- Wu, C.Z., Lei, R.X., Santosh, M., Chi, G.X., Gu, L. X. and Xie, S.W., 2016. Ordovician volcano–sedimentary iron deposits of the Eastern Tianshan area, Northwest China: the Tianhu example. *International Geology Review*, 58(11): 1398–1416.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1163516>
- Wu, H., Niu, X., Zhang, L., Pirajno, F., Luo, H., Qin, F. and Qi, M., 2015. Geology and geochemistry of the Macheng Algoma-type banded iron-formation, North China Craton: Constraints on

mineralization events and genesis of high-grade iron ores. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113(part 3): 1179–1196.

<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.05.024>

Zhang, J., Shields, L., Ma, B., Yin, Y., Wang, J., Zhang, R. and Hui, X., 2022. The clinical learning

environment, supervision and future intention to work as a nurse in nursing students: a cross-sectional and descriptive study. *BMC Medical Education*, 22: 548.

<https://doi.org/10.1186/s12909-022-03609-y>