



## Research Article

# Evolution and genesis of the Bardeh-Rash iron deposit in northwest Baneh (Northwestern Sanandaj–Sirjan Zone): Based on geological, mineralogical, and geochemical studies

Zahra Nazari Rahigh<sup>1</sup>, Hossein-Ali Tajeddin<sup>1\*</sup> , Ebrahim Rastad<sup>1</sup>, Mohammadreza Afshoon<sup>1</sup>

1- Departments of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 25 Apr 2025 Accepted: 14 Aug 2025

## Extended Abstract

### Introduction

The Bardeh-Rash iron mineralisation is located approximately 30 km northwest of Baneh and 7 km north of Bardeh Rash village, within the Sanandaj–Sirjan tectonic zone. This NW–SE trending belt is one of the most significant metallogenic provinces in Iran, hosting a wide spectrum of iron deposits, including volcanic-sedimentary, skarn-type, and IOCG (iron oxide–copper–gold) deposits (Nabatian et al, 2015). Tectonic evolution associated with the opening and closure of the Neotethys Ocean and the interplay of extensional and compressional regimes during the Triassic to Jurassic led to intense regional metamorphism and deformation (Saki, 2010). Recent investigations in the northwestern segment of the Sanandaj–Sirjan zone have led to the identification of several iron occurrences and deposits. Notable examples include the Gurgur, Halab, Kosaj and Mianaj iron deposits (Pourmohammadi et al, 2019), as well as the Ghaluzendan and Qaderabad iron deposits (Karimi et al, 2021), all hosted within metamorphosed equivalents of the Kahar Formation. The Bardeh-Rash deposit, discovered by locals in 2016, represents one of the previously unstudied iron occurrences in this region. The mineralisation is stratiform in nature, hosted within upper Precambrian metarhyolitic tuff units and exhibits concordant layering and foliation with its metamorphosed volcanic host rocks. The primary objective of this study is to provide a comprehensive geological, mineralogical, geochemical, and genetic framework for the Bardeh Rash iron deposit, aiming to propose a viable exploration model for similar geological settings.

### Materials and Methods

This research comprises both field-based and laboratory investigations. During fieldwork, a 5 km<sup>2</sup> area was systematically mapped at a scale of 1:5000, wherein lithological units, structural features, and mineralised horizons were carefully delineated. Over 100 rock samples, including both barren and ore-bearing lithologies, were collected. Structural measurements of bedding, foliation, and geometry of ore horizons were recorded to reconstruct the geometry of the mineralised system. In the laboratory, 12 thin sections were prepared for petrographic analysis and 33 polished thin sections for ore microscopy. For geochemical analysis, 31 representative samples were selected; 21 were analysed via XRF at Tarbiat Modares University and 10 by ICP-MS at ZarAzma Analytical Laboratories.

### Results and Discussion

Field and laboratory investigations reveal that iron mineralisation occurs in three distinct stratiform horizons within metarhyolitic tuff units.

**Citation:** Nazari Rahigh, Z. et al, 2025. Evolution and genesis of the Bardeh-Rash iron deposit in northwest Baneh, *Res. Earth. Sci.* 16(3), (168-192) DOI: 10.48308/esrj.2025.239603.1271

\* Corresponding author E-mail address: [h.tajeddin@modares.ac.ir](mailto:h.tajeddin@modares.ac.ir)



Horizon I is hosted in dark grey metarhyolite and comprises banded hematite with an outcrop length of ~20 m and thickness ranging from 10 to 40 cm. Horizon II, the main ore body, occurs in light grey metarhyolite, is ~200 m long and 0.5 to 2.5 m thick, and hosts massive, banded, and disseminated hematite textures. Horizon III is composed of magnetite and hematite lenses hosted in dark green metarhyolite, with dimensions of ~30 m in length and 0.2 to 1.5 m in thickness. The metallic assemblage, primarily hematite and magnetite with minor pyrite, occurs in banded, massive, and disseminated textures, accompanied by gangue minerals such as quartz and barite within the altered metavolcanic host rocks. Evidence of metamorphism and deformation—including foliation, folding, boudinage, and S–C fabrics—is well developed in both ore bodies and host rocks. Geochemical analyses indicate that the host rocks are metarhyolitic tuffs of calc-alkaline affinity, formed in a volcanic arc setting on an active continental margin. Tectonomagmatic discrimination diagrams (e.g., Nb/Yb vs. Th/Yb) confirm a subduction-related magmatic source. Enrichment in large ion lithophile elements (LILEs) such as K, Rb, and Ba, together with positive Ba anomalies, implies a significant role for crustal contamination. REE patterns show light REE enrichment and positive Eu anomalies, indicative of oxidising conditions during ore formation. Mineralogical and paragenetic data suggest four main stages of deposit evolution: Syn-volcanic mineralisation with deposition of banded and disseminated hematite and magnetite during tuff emplacement. Regional metamorphism under greenschist facies, resulting in the formation of sericite, chlorite, and recrystallisation of pre-existing phases. Tectonic deformation, leading to the development of boudinage structures, folding, faulting, and pressure shadow features. Supergene alteration, during which surface weathering led to oxidation of primary sulfide and oxide phases and the formation of iron hydroxides. These features are consistent with other volcanogenic–sedimentary iron deposits in Iran, such as those in the Bukan and Takab districts, supporting a sedimentary–hydrothermal origin.

### Conclusion

The Bardeh-Rash iron deposit is interpreted as a deformed and metamorphosed volcanic-sedimentary system that formed contemporaneously with late Precambrian rhyolitic volcanic activity. Subsequent metamorphic overprint and deformation significantly modified the primary textures and structures. Stratiform and lensoidal geometry of the ore horizons, coupled with enrichment in LILEs and anomalies in Ta and Ba, support a sedimentary–hydrothermal genesis within a subduction-related volcanic arc setting. REE patterns further confirm oxidising conditions and a genetic link between the host rocks and mineralisation. The recognition of four distinct mineralisation stages provides a robust framework for understanding the ore-forming processes. The results of this study contribute to the metallogenic models of iron in the Sanandaj–Sirjan zone and offer valuable insights for exploration strategies in analogous tectonic and geological settings.

**Keywords:** Bardeh-Rash, Iron ore mineralization, Precambrian, Sanandaj-Sirjan Zone, Volcanic-sedimentary sequences.

## مراحل تکوین و زایش کانسار آهن برده‌رش در شمال غرب بانه (شمال غرب پهنه سنندج - سیرجان): بر پایه مطالعات زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی

زهرا نظری رحیق<sup>۱</sup>، حسینعلی تاج‌الدین<sup>۱\*</sup> , ابراهیم راستاد<sup>۱</sup>، محمدرضا افشون<sup>۱</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۲۳

### چکیده گسترده

#### مقدمه

کانه‌زایی آهن برده‌رش در ۳۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان بانه و ۷ کیلومتری شمال روستای برده‌رش، در پهنه زمین‌ساختی سنندج - سیرجان واقع شده است. این پهنه با روند شمال غرب - جنوب شرق، یکی از مهم‌ترین پهنه‌های فلززائی کشور به شمار می‌رود که میزبان انواع مختلفی از کانسارهای آهن از جمله تیپ‌های آتشفشانی - رسوبی، اسکارن و IOCG (اکسید آهن - مس - طلا) است (Nabatian et al, 2015). تحولات زمین‌ساختی ناشی از باز و بسته شدن اقیانوس نئوتتیس و ماگماتیسم وابسته به رژیم‌های کششی و فشاری در دوره‌های تریاس تا ژوراسیک، منجر به دگرگونی ناحیه‌ای و دگرشکلی‌های شدید در این پهنه شده است (Saki, 2010). مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر در شمال غرب پهنه سنندج - سیرجان به شناسایی چندین کانسار و رخداد آهن در این بخش شده است. از مهم‌ترین این کانه‌زایی‌ها می‌توان به کانسارهای گورگور، حلب، کوسج و میانج و کانسارهای آهن قالوزندان و قادرآباد (Karimi et al, 2021) اشاره کرد که همگی درون توالی سنگ‌های دگرگونی معادل سازند کهر واقع شده‌اند. کانسار آهن برده‌رش نیز یکی از ذخایر آهن در شمال غرب پهنه سنندج - سیرجان است که در سال ۱۳۹۵ توسط افراد محلی شناسایی شده است و تاکنون مورد مطالعات پژوهشی قرار نگرفته است. این کانسار به صورت چینه‌سان در واحدهای متاتوف ریولیتی با سن پرکامبرین بالایی تشکیل شده و با لایه‌بندی و نیز برگوارگی‌های دگرگونی سنگ میزبان خود هم‌روند است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی جامع زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و فرآیندهای تکامل و زایش کانسار آهن برده‌رش با هدف ارائه مدل اکتشافی برای شناسایی ذخایر آهن در محیط‌های زمین‌شناسی مشابه است.

#### مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر در دو بخش میدانی و آزمایشگاهی انجام شده است. در بخش میدانی، محدوده‌ای به مساحت ۵ کیلومتر مربع پیمایش شده و نقشه زمین‌شناسی آن با مقیاس ۱:۵۰۰۰ تهیه شده است. در این نقشه، واحدهای سنگی، ساختارهای تکتونیکی و افق‌های کانی‌سازی به دقت شناسایی و ترسیم شده‌اند. بیش از ۱۰۰ نمونه از سنگ‌های میزبان و کانه‌دار برداشت شده است؛ همچنین شیب و امتداد لایه‌ها، ژئومتری و ضخامت افق‌های کانه‌دار و ساخت و بافت نمونه‌های کانه‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. ارتباط ساختاری میان واحدهای سنگی و الگوهای تکتونیکی منطقه نیز با هدف شناسایی هندسه کانسار مورد ارزیابی قرار گرفت.

استناد: نظری رحیق، ز. و همکاران، ۱۴۰۴. مراحل تکوین و زایش کانسار آهن برده‌رش در شمال غرب بانه، پژوهشهای دانش زمین: ۱۶(۳)، (۱۶۸-۱۹۲)، DOI: 10.48308/esrj.2025.239603.1271

E-mail: h.tajeddin@modares.ac.ir

\* نویسنده مسئول:



در بخش آزمایشگاهی، ۱۲ مقطع نازک برای مطالعات سنگ‌نگاری و ۳۳ مقطع نازک - صیقلی برای مطالعه کانه‌نگاری تهیه و بررسی شد. برای تحلیل‌های ژئوشیمیایی، ۳۱ نمونه انتخاب شد که از این میان، ۲۱ نمونه به روش XRF در دانشگاه تربیت مدرس و ۱۰ نمونه با روش ICP-MS در آزمایشگاه زرآما آنالیز شده است.

### نتایج و بحث

بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که کانی‌سازی آهن در سه افق و با میزبانی واحدهای متاتوف ریولیتی تشکیل شده است. افق اول (I) در واحد متاریولیت خاکستری تیره، شامل هماتیت نواری با طول رخنمون حدود ۲۰ متر و ضخامت ۱۰ تا ۴۰ سانتی‌متر؛ افق دوم (II) که افق اصلی کانی‌سازی است، در واحد متاریولیت خاکستری روشن با طول حدود ۲۰۰ و ضخامت ۰/۵ تا ۲/۵ متر رخنمون دارد و دارای بافت‌های توده‌ای، نواری و دانه‌پراکنده هماتیت است؛ و افق سوم (III) که به صورت عدسی‌هایی از مگنتیت و هماتیت با طول حدود ۳۰ متر و با ضخامت ۰/۲ تا ۱/۵ متر برونزد دارد، در واحد متاریولیت با رنگ سبز تیره تشکیل شده است. کانی‌های فلزی، که هماتیت و مگنتیت در همراهی با مقادیر جزئی پیریت را شامل می‌شوند، با ساخت و بافت‌های نواری، توده‌ای و دانه پراکنده و در همراهی با کانی‌های نافلزی (از جمله کوارتز و باریت) در سنگ میزبان توفی دگرگون شده رخداد دارند. شواهد دگرگونی - دگرشکلی از جمله برگوارگی‌های دگرگونی، چین‌خوردگی، بودین‌شدگی و فابریک‌های C و S در کانسنگ‌های اکسید آهن و سنگ میزبان آتشفشانی قابل مشاهده است. داده‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهند که سنگ‌های میزبان از نوع متاتوف با ترکیب ریولیتی بوده و در محیطی مرتبط با کمان ماگمایی در حاشیه فعال قاره‌ای تشکیل شده‌اند. نمودارهای تکتونوماگمایی (مانند Nb/Yb در برابر Th/Yb) منشأ ماگمایی مرتبط با زون فرورانش را تأیید می‌کنند. غنی‌شدگی در عناصر لیتوفیل با یون بزرگ (LILE) نظیر K, Rb و Ba، به‌همراه آنومالی‌های مثبت Ba، گویای نقش آلایش پوسته‌ای در تکوین ماگمای مادر است. الگوهای REE نشان‌دهنده غنی‌شدگی در عناصر کمیاب خاکی سبک (LREE) و حضور آنومالی مثبت Eu هستند که بر محیط کانی‌سازی اکسیدان دلالت دارد. براساس مطالعات کانی‌شناسی و روابط پاراژنزی، چهار مرحله اصلی در فرآیند تکامل کانسار شناسایی شد. مطالعات پتروگرافی و کانه‌نگاری منجر به شناسایی چهار مرحله تکامل کانی‌سازی شد. در مرحله اول، همزمان با فوران آتشفشانی، هماتیت و مگنتیت به‌صورت نواری و دانه‌پراکنده ته‌نشست یافته‌اند. در مرحله دوم، دگرگونی ناحیه‌ای در رخساره شیبست سبز منجر به تشکیل سریسیت، کلریت و بازتبلور کانی‌ها شده است. مرحله سوم شامل دگرشکلی‌های تکتونیک نظیر بودین‌شدگی، چین‌خوردگی، گسل‌خوردگی و ایجاد ساختارهای سیگموئیدال و سایه‌فشاری است. در مرحله چهارم نیز فرآیندهای هوازدگی سبب اکسایش کانی‌های اکسیدی و سولفیدی و تشکیل هیدروکسیدهای آهن شده است. این ویژگی‌ها با کانسارهای آهن آتشفشانی - رسوبی دیگر ایران، نظیر ذخایر نواحی بوکان و تکاب، مطابقت داشته و منشأ رسوبی - گرمایی کانی‌سازی را تأیید می‌کند.

### نتیجه‌گیری

کانسار آهن برده‌رش یک سامانه آتشفشانی - رسوبی دگرگون‌شده است که هم‌زمان با تشکیل واحدهای ریولیتی پرکامبرین بالایی شکل گرفته و در مراحل بعدی تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای و دگرشکلی‌های شدید قرار گرفته است. شواهد زمین‌شناسی نظیر هندسه لایه‌ای و عدسی‌شکل افق‌های کانه‌دار، به‌همراه داده‌های ژئوشیمیایی از جمله غنی‌شدگی در LILE و آنومالی Ba، منشأ رسوبی - گرمایی این کانسار را در یک محیط کمان ماگمایی تأیید می‌کنند. الگوهای REE نیز نشان‌دهنده شرایط اکسیدان و ارتباط زایشی سنگ میزبان و کانه‌زایی هستند. تحلیل مراحل چهارگانه تکاملی کانسار، چارچوبی روشن برای درک فرآیندهای کانی‌سازی فراهم کرده است. نتایج این پژوهش نه‌تنها به تبیین الگوهای متالوژنی آهن در پهنه سنندج - سیرجان کمک می‌کند؛ بلکه به‌عنوان مدلی مؤثر در برنامه‌ریزی‌های اکتشافی در سایر مناطق مشابه کاربرد خواهد داشت.

**واژگان کلیدی:** آتشفشانی - رسوبی، برده‌رش، پرکامبرین، سنندج - سیرجان، کانه‌زایی آهن.

## مقدمه

کانسارهای آهن ایران در طی مراحل مختلف فلزایی تشکیل شده و عمدتاً سه دوره کانی‌سازی را شامل می‌شوند: (۱) نئوپروتروزوئیک - کامبرین پیشین (کانسارهای تیپ آتشفشانی - رسوبی و کایرونا)، (۲) پالئوزوئیک پایانی - مزوزوئیک (کانسارهای تیپ آتشفشانی- رسوبی و اسکارن) و (۳) سنوزوئیک (کانسارهای تیپ کایرونا، اکسید آهن- مس- طلا (IOCG)، پلاسور و اسکارن) (Karimpour, 1989; Jami et al, 2007; Golmohammadi et al, 2015; Nabatian et al, 2015, 2017). در این میان، پهنه سنندج - سیرجان با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی، یکی از محیط‌های زمین‌ساختی دارای ذخایر آهن با سنگ میزبان آتشفشانی - رسوبی است که اغلب با جایگیری توده‌های نفوذی همراه هستند. میزان ذخیره کانسنگ‌های آهن در این پهنه حدود ۱۰ تا ۴۰ میلیون تن برآورد شده است (Ghorbani, 2013). ذخایر آهن اقتصادی مهم در بخش شمالی پهنه سنندج - سیرجان شامل کانسارهای صاحب، کله‌کان، ابراهیم‌آباد، شهرک، میمون‌آباد، خسروآباد، چرمه، گلالی، هزارخانی، باباعلی، همه‌کسی، قادرآباد و قالوزندان هستند. این ذخایر عمدتاً همراه با مجموعه دگرگون‌شده سنندج - سیرجان و در همراهی با توده‌های گرانیتوئیدی تشکیل شده‌اند (Ghorbani, 2013; Nabatian et al, 2015; Maanijou and Salami, 2015; Karimi et al, 2024; Akbarpour et al, 2021). پهنه مورد بحث، متاثر از چرخه باز و بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس و ماگماتیسیم حاصل از فازهای کششی و فشاری تریاس - ژوراسیک، متحمل دگرگونی ناحیه‌ای شده است (Berberian and King, 1981; Mohajjel et al, 2003; Agard et al, 2005; Tajeddin, 2011, Karimi et al, 2021). منشأ ذخایر آهن پهنه سنندج - سیرجان همواره مورد بحث و بررسی پژوهشگران بوده و نظریات متفاوتی در این زمینه ارائه شده است. متولی و همکاران (Motevali et al, 2006) ضمن بررسی کانسار آهن خسروآباد همراه با مجموعه دگرگون‌شده آتشفشانی - رسوبی صحنه، منشأ آتشفشانی - رسوبی را برای آن پیشنهاد کرده‌اند. رستمی‌پایدار و همکاران (Rostami-Paydar et al, 2010) کانسارهای آهن باباعلی و گلالی را به‌عنوان کانسارهای اسکارن طبقه‌بندی کرده و آن‌ها را حاصل فرآیندهای متاسوماتیک درون سنگ‌های دگرگونی منطقه معرفی نموده‌اند. از سوی دیگر،

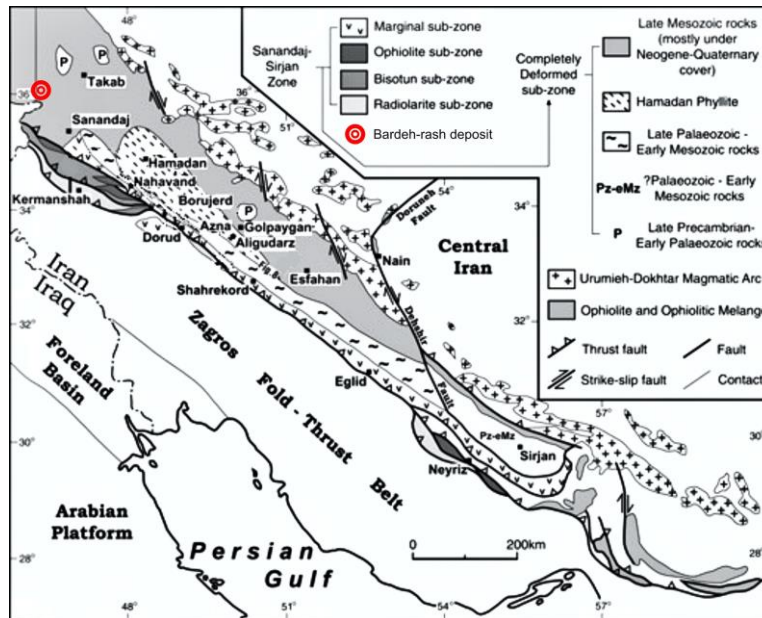
زمانیان و رادمرد (Zamanian and Radmard, 2016) طی مطالعه بر روی کانسارهای آهن با میزبان سنگ‌های دیوریتی دگرگون‌شده، به‌ویژه کانسار باباعلی، مگنتیت را محصول فرآیندهای ماگمایی دانسته‌اند. علاوه بر این، زندی و همکاران (Zandi et al, 2018) کانسار آهن - مس صاحب در جنوب شرق سقز را به‌عنوان یک کانسار اسکارنی معرفی کرده‌اند که در همبری توده گرانیتوئیدی الیگومیوسن صاحب و سنگ‌های کربناته پرمین تشکیل شده است. کانسار آهن برده‌رش، یکی از رخدادهای معدنی آهن در پهنه سنندج - سیرجان است که با مختصات جغرافیایی  $31^{\circ} 12' 31.023''$  عرض شمالی و  $41^{\circ} 42' 51.869''$  طول شرقی، در ۳۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان بانه و ۷ کیلومتری شمال روستای برده‌رش واقع شده است. این کانسار از نظر ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی شباهت چشمگیری با برخی از ذخایر آهن این پهنه از جمله کانسارهای گورگور، حلب، کوسج و میانج و کانسارهای آهن قالوزندان و قادرآباد (Karimi et al, 2021) نشان می‌دهد. با وجود انجام مطالعات اکتشافی در این محدوده، تاکنون پژوهش علمی جامع و دقیقی بر روی آن انجام نشده است. در این پژوهش، ضمن بررسی جامع ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمیایی رخداد معدنی آهن برده‌رش، تیپ کانه‌زایی و مدل تشکیل آن معرفی شده است. شناخت دقیق این نوع ذخایر، نقش کلیدی در درک الگوهای زمانی و مکانی کانی‌سازی‌های مشابه در پهنه سنندج - سیرجان داشته و می‌تواند به‌عنوان مدلی کارآمد در راهبردهای اکتشافی منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

## منطقه‌ی مورد مطالعه

کانسار آهن برده‌رش در شمال غرب پهنه دگرگونی سنندج - سیرجان (Stocklin, 1968; Alavi, 1994; Mohajjel et al, 2003)، که بخشی از کمربند کوه‌زایی زاگرس محسوب می‌شود، واقع شده است (شکل ۱). این کانسار در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ مهاباد (Eftekhar-Nezhad, 1973) و ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ آلوت (Omranian and Khabaznia, 2003) قرار دارد. محجل و همکاران (Mohajjel et al, 2003) پهنه سنندج - سیرجان را با توجه به ویژگی‌های ساختاری و واحدهای سنگ‌چینه‌ای آن، به چندین زیرپهنه با روند شمال غربی - جنوب شرقی تقسیم

دگرشکل و دگرگون شده پهنه سنندج - سیرجان تشکیل شده است. فراوانی شیست، آمفیبولیت و همچنین وجود چندین مرحله دگرشکلی، که گاهی با دگرگونی و نفوذ توده‌های متعددی از سنگ‌های آذرین نفوذی همراه است، این زیرپهنه را از سایر زیرپهنه‌ها متمایز می‌کند (شکل ۱).

کرده‌اند که از جنوب غرب به شمال شرق عبارت‌اند از: زیرپهنه رادیولاریتی، زیرپهنه بیستون، زیرپهنه افیولیتی، زیرپهنه حاشیه‌ای و زیرپهنه کاملاً دگرشکل شده (با دگرشکلی پیچیده). زیرپهنه کاملاً دگرشکل شده که محدوده مورد مطالعه را در بر می‌گیرد، از سنگ‌های شدیداً



شکل ۱: موقعیت محدوده برده رش (مشخص شده با دایره قرمز) که در شمال غرب پهنه سنندج - سیرجان و در زیر پهنه کاملاً دگرشکل شده قرار گرفته است (Mohajjel et al, 2003).

Fig. 1: Location of the Bardesh Rash area (indicated by the red circle), situated in the northwestern part of the Sanandaj-Sirjan Zone, within the intensely deformed subzone (Mohajjel et al, 2003).

### مواد و روش‌ها

و کانسنگ آهن انتخاب شده و به آزمایشگاه ارسال شدند. آنالیزهای شیمیایی با استفاده از روش XRF بر روی ۲۱ نمونه در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس و به روش ICP-MS بر روی ۱۰ نمونه در آزمایشگاه شرکت زرآما در تهران انجام شد. در این فرآیند، ابتدا نمونه‌ها با استفاده از خردکننده فولادی تا ابعاد حدود ۵ مش خرد شده و سپس با آسیاب تنگستن - کاربید به مدت دو دقیقه تا اندازه ۲۰۰ مش (حدود ۷۵ میکرون) پودر شدند. به منظور کاهش میزان آلودگی، پس از هر مرحله پودر شدن، ماسه‌های کوارتزی آسیاب شدند. در ادامه، مقدار ۲۰ گرم از هر نمونه برای اندازه‌گیری عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی به آزمایشگاه‌های مربوطه ارسال شد. علاوه بر این، مقدار افت حرارتی (LOI) نیز با نگهداری نمونه‌ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت مشخص شد. برای آنالیز عناصر اصلی، از روش XRF و تهیه قرص‌های پودری استفاده شد. همچنین، جهت اندازه‌گیری عناصر کمیاب و

این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی است. در بخش مطالعات صحرایی، واحدهای سنگی و افق‌های کانه‌دار شناسایی شده و از آن‌ها نمونه‌برداری شده است. در این راستا، علاوه بر تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰، بیش از ۱۰۰ نمونه جهت مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و تجزیه‌های شیمیایی برداشت شد. در طی عملیات صحرایی، پارامترهایی نظیر امتداد، شیب، ضخامت، ساخت و بافت کانه‌زایی و ارتباط آن با واحدهای سنگی و ساختارهای تکتونیکی اندازه‌گیری شدند. از میان نمونه‌های برداشت شده، ۱۲ مقطع نازک و ۳۳ مقطع نازک - صیقلی برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری تهیه و مطالعه شدند. پس از انجام مطالعات اولیه سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، برای آنالیزهای ژئوشیمیایی و اندازه‌گیری عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی (REE)، تعداد ۳۱ نمونه از توالی‌های آتشفشانی - رسوبی محدوده



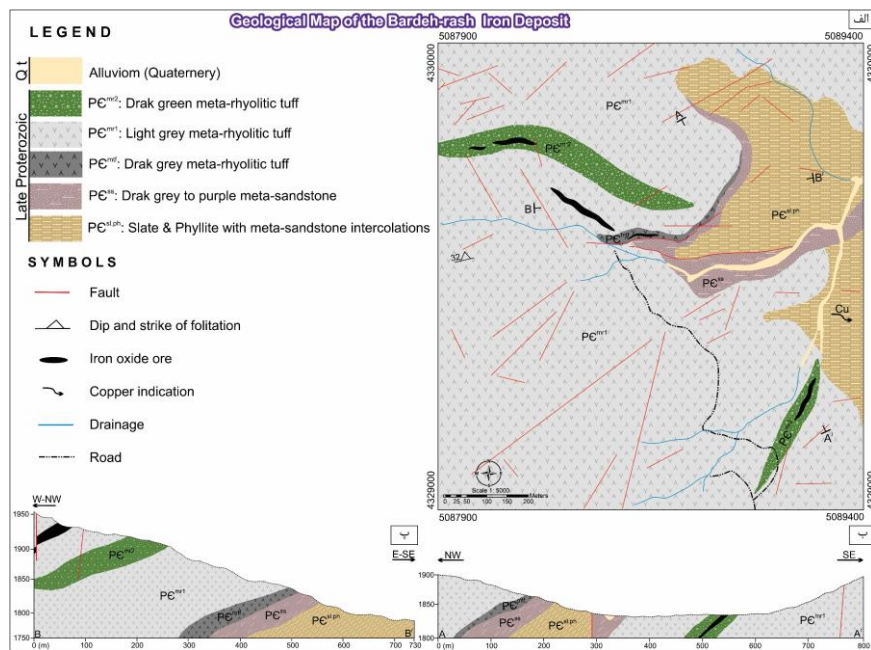
پروتوزئیک پسین هستند. این توالی از قدیم به جدید شامل واحدهای اسلیت و فیلیت، ماسه‌سنگ‌های دگرگون‌شده و توف‌های ریولیتی با رنگ خاکستری تیره، خاکستری و سبز تیره که اغلب با همبری عادی مشاهده می‌شوند. (شکل ۲). واحدهای آتشفشانی این مجموعه معادل سازند قره‌داش معرفی شده‌اند (Eftekhari-Nezhad, 2003; Omrani and Khabaznia, 1973). در ادامه به طور مختصر ویژگی‌های هر یک از واحدهای سنگی کانسار مورد مطالعه توضیح داده شده است.

کمیاب خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه در مخلوط لیتیم متابورات/تترابورات ذوب و سپس در اسید نیتریک حل شد.

## بحث و نتایج

### زمین‌شناسی محدوده

بر اساس نقشه زمین‌شناسی تهیه‌شده با مقیاس ۱:۵۰۰۰ در مساحت ۵ کیلومتر مربع (شکل ۲)، واحدهای سنگی برونزد یافته در محدوده کانسار آهن برده‌رش متشکل از توالی‌های آتشفشانی - رسوبی دگرگون‌شده متعلق به



شکل ۲: الف: نقشه زمین‌شناسی کانسار برده‌رش در مقیاس ۱:۵۰۰۰؛ ب: مقطع زمین‌شناسی از کانه‌زایی، مطابق با نیمرخ A-A'؛ پ: مقطع زمین‌شناسی از کانه‌زایی، مطابق با نیمرخ B-B'.

Fig. 2: a: Geological map of the Bardeh-Rash deposit at scale of 1:5,000; b: Geological cross-section of the mineralized zone along profile A-A'; c: Geological cross-section of the mineralized zone along profile B-B'.

بافت لپیدوبلاستیک - پورفیروبلاستیک با جهت‌یافتگی ترجیحی کوارتز و حضور کانی‌های ورقه‌ای شکل سریسیت و کلریت است. کوارتز به‌عنوان کانی پورفیروبلاست اصلی، خاموشی موجی نشان می‌دهد و در دانه‌های کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرون در زمینه‌ای متشکل از تجمعات دانه‌ریز و کریپتوکریستالین کوارتز، فلدسپار، کلسیت، لوکوکسن و کانی‌های ورقه‌ای شکل سریسیت و کلریت قرار دارد. اغلب پورفیروبلاست‌های کوارتز در راستای برگواری، کشیدگی و جهت‌یافتگی مشخصی از خود نشان می‌دهند؛ در حالی که کانی‌های ورقه‌ای سریسیت - موسکویت به‌صورت تیغک‌های جهت‌یافته و گاه به شکل ورقه‌های ظریف تاب‌دار

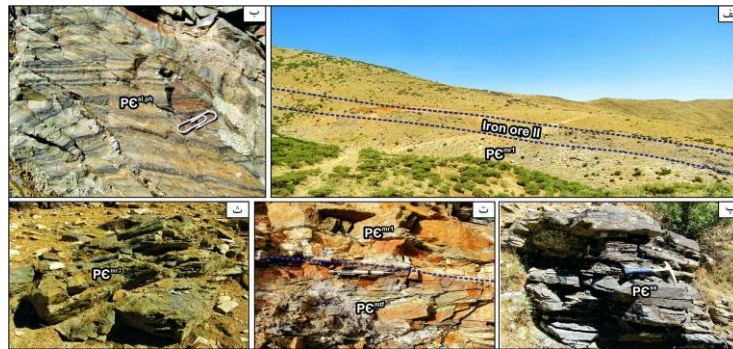
### سنگ‌شناختی و کانی‌شناختی

واحد اسلیت و فیلیت (PC<sup>sl.ph</sup>): قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی محدوده مورد مطالعه عمدتاً از اسلیت و فیلیت همراه با میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ دگرگون‌شده با رنگ رخنمون خاکستری تشکیل شده است. فیلیت با ویژگی‌های شاخصی همچون تورق شدید و جلای براق خاکستری شناخته شده و در برخی موارد، حاوی عدسی‌های سیلیسی سفیدرنگ با ضخامت سانتی‌متری هستند. به دلیل ماهیت نرم‌فرسای فیلیت، این سنگ‌ها مورفولوژی هموار داشته و در مقایسه با اسلیت، شواهد بیشتری از چین‌خوردگی را نشان می‌دهد (شکل ۳ ب). در مقیاس میکروسکوپی، فیلیت‌ها دارای

رنگ خاکستری روشن ( $PC^{mr1}$ ): این واحد با رنگ خاکستری روشن، بیش از دو سوم گستره محدوده مورد مطالعه را پوشش داده است (شکل ۳ الف و ت و شکل ۴ چ). این واحد میزبان یک میان لایه از متاتوف ریولیتی با رنگ سبز تیره است. واحد  $PC^{mr1}$  دارای برگوارگی میلونیتی بوده و در بخش زیرین، میزبان افق دوم (II) کانی‌سازی آهن است. این افق به عنوان افق اصلی کانی‌سازی آهن در کانسار برده‌رش شناخته می‌شود که این کانه‌زایی با طول حدود ۲۰۰ متر و ضخامتی بین ۰/۵ تا ۲/۵ متر در واحد متاتوف ریولیتی ( $PC^{mr1}$ ) برونزد دارد (شکل ۳ الف). با توجه به مطالعات میکروسکوپی، پورفیروبلاست اصلی در این واحد سنگی، کوارتز با خاموشی موجی است که اندازه‌های بین ۵۰۰ میکرون تا ۳ میلی‌متر دارد. این کانی در زمینه‌های از تجمعات دانه‌ریز و کریپتوکریستالین از کوارتز، فلدسپار، کلسیت و کانی‌های رسی قرار گرفته است. در مقاطع مطالعه‌شده، کانی‌های ورقه‌ای سربیسیت - موسکویت به صورت تیغک‌های جهت‌یافته و گاه ورقه‌های ظریف تاب‌دار، کوارتزها را احاطه کرده‌اند (شکل ۴ ح). واحد متاتوف ریولیتی با رنگ سبز تیره ( $PC^{mr2}$ ): این واحد متشکل از توف با ترکیب اسیدی (متاریولیت) است که به صورت یک میان لایه با رنگ سبز تیره و با ضخامت کمتر از ۵۰ متر در شمال غرب و جنوب شرق کانسار برده‌رش رخنمون دارد (شکل ۳ ث و شکل ۴ خ). این واحد میزبان افق سوم (III) ماده معدنی است که به صورت عدسی‌شکل، با ضخامتهایی بین ۰/۲ تا ۱/۵ متر تشکیل شده است. مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد که نمونه‌های این واحد دارای درشت‌بلورهای کوارتز، با اندازه‌هایی کمتر از ۲/۵ میلی‌متر، در خمیره شیشه‌ای رخداد دارند. خمیره شیشه‌ای کم و بیش متحمل شیشه‌زدایی شده و اساساً از کانی‌های کریپتوکریستالین کوارتز همراه با مقادیر فرعی کلریت، سربیسیت و کانی‌های رسی تشکیل شده است. پورفیروبلاست‌های کوارتز، خاموشی موجی نشان داده و در اثر تنش‌های اعمال شده دچار خردشدگی، تبلور مجدد و کشیدگی شده‌اند. فضای بین کشیدگی‌ها نیز توسط سربیسیت پر شده است. در مقاطع مطالعه شده، مقادیر قابل توجهی از کانی‌های ورقه‌ای سربیسیت، به صورت تیغک‌های جهت‌یافته و نیز ورقه‌های ظریف تاب‌دار، کوارتزها را احاطه کرده‌اند (شکل ۴ د).

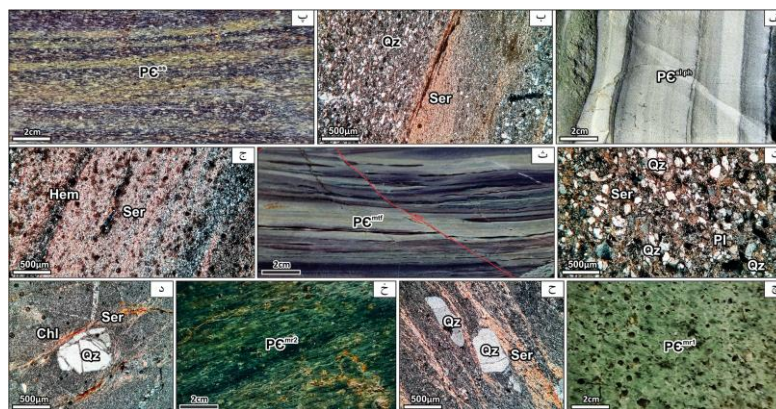
که پیرامون پورفیروبلاست‌ها را دربر گرفته‌اند، قابل مشاهده هستند (شکل ۴ الف و ب). واحد ماسه‌سنگ دگرگون‌شده ( $PC^{ss}$ ): این واحد به صورت نواری با ضخامت کمتر از ۱۰ متر در نیمه شمالی محدوده رخنمون دارد (شکل ۳ پ) و عمدتاً از ماسه‌سنگ‌های دگرگون‌شده با رنگ خاکستری تیره تا ارغوانی تشکیل شده است (شکل ۴ پ). براساس مطالعات میکروسکوپی، ترکیب اصلی سنگ را بلورهای کوارتز همراه با مقادیر فرعی پلاژیوکلاز و فلدسپار آلکالن تشکیل داده‌اند. اجزای آواری ذکر شده، دارای گردشگی متوسط و جورشدگی ضعیف تا متوسط بوده و در سیمانی از سربیسیت، کلریت، کوارتز و کانی‌های رسی جای گرفته‌اند. کوارتزهای آواری که اندازه‌ای کمتر از ۵۰۰ میکرون دارند، خاموشی موجی نشان می‌دهند و از کوارتزهای موجود در سیمان، که اغلب به صورت رشد توأم و با بافت کریپتوکریستالین ظاهر شده‌اند، متمایز هستند. علاوه بر کانی‌های فلسیک، تیغک‌ها و ریزبلورهای سربیسیت به صورت بلورهای فیبری و ورقه‌ای شکل، ۵ تا ۱۰ درصد از سطح نمونه را پوشش داده‌اند (شکل ۴ ت). واحد متاتوف ریولیتی با رنگ خاکستری تیره تا ارغوانی ( $PC^{mf}$ ): این واحد به صورت نواری باریک با ضخامت کمتر از ۱۰ متر در نیمه شمالی محدوده رخنمون دارد که میزبان افق اول (I) کانی‌سازی آهن است. این واحد از متاتوف‌های ریولیتی با رنگ خاکستری تیره تا ارغوانی تشکیل شده (شکل ۳ ت) و به خوبی ساخت و بافت لایه‌بندی و نواری - لامینه‌ای ناشی از نهشت خاکسترهای آتشفشانی در یک محیط رسوبی را نمایش می‌دهد (شکل ۴ ث). بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که این نمونه یک توف شیشه‌ای بسیار ریزدانه است که عمدتاً از کانی‌های فلسیک، شامل کوارتز به عنوان فاز غالب و مقادیر فرعی فلدسپار آلکالن و پلاژیوکلاز، در اندازه‌های کمتر از ۱۵۰ میکرون تشکیل شده است. خمیره سنگ از خاکستر (شیشه) تشکیل شده که کم و بیش متحمل شیشه‌زدایی شده و اساساً از کوارتزهای کریپتوکریستالین همراه با مقادیر فرعی سربیسیت، کانی‌های کدر و کانی‌های رسی تشکیل شده است. در بخش‌هایی از نمونه، نوارهای ظریف غنی از کانی‌های ریزبلور اکسید آهن و کوارتز قابل مشاهده است. میزان فراوانی کانه‌های کدر در این نوارها بین ۱۰ تا ۲۰ درصد برآورد می‌شود (شکل ۴ ج). واحد متاتوف ریولیتی با





شکل ۳: الف: دورنمایی از رخنمون کانی‌سازی آهن در افق دوم (II)، که به صورت چینه‌سان در واحد متاتوف ریولیتی ( $PC^{mr1}$ ) رخداد دارد (جهت دید به سمت شمال)؛ ب: تصویری از رخنمون بخش فیلیتی متعلق به واحد اسلیت و فیلیت ( $PC^{sl.ph}$ )؛ پ: تصویر رخنمون از واحد ماسه‌سنگی دگرگون‌شده ( $PC^{ss}$ )؛ ت: تصویری از رخنمون واحد متاتوف ریولیتی با رنگ خاکستری تیره تا ارغوانی ( $PC^{mtf}$ ) و واحد متاتوف ریولیتی با رنگ خاکستری روشن ( $PC^{mr1}$ )؛ ث: تصویری از رخنمون واحد توف متاریولیتی با رنگ سبز تیره ( $PC^{mr2}$ ).

Fig. 3: a: Overview of the iron mineralization outcrop in the second horizon (II), occurring as stratiform mineralization within the metarhyolitic tuff unit ( $PC^{mr1}$ ) (view direction: north); b: Outcrop view of the phyllitic section belonging to the slate–phyllite unit ( $PC^{sl.ph}$ ); c: Outcrop of the metamorphosed sandstone unit ( $PC^{ss}$ ); d: Outcrop showing the dark gray to purple metarhyolitic tuff unit ( $PC^{mtf}$ ) alongside the light gray metarhyolitic tuff unit ( $PC^{mr1}$ ); e: Outcrop of the dark green metarhyolitic tuff unit ( $PC^{mr2}$ ).

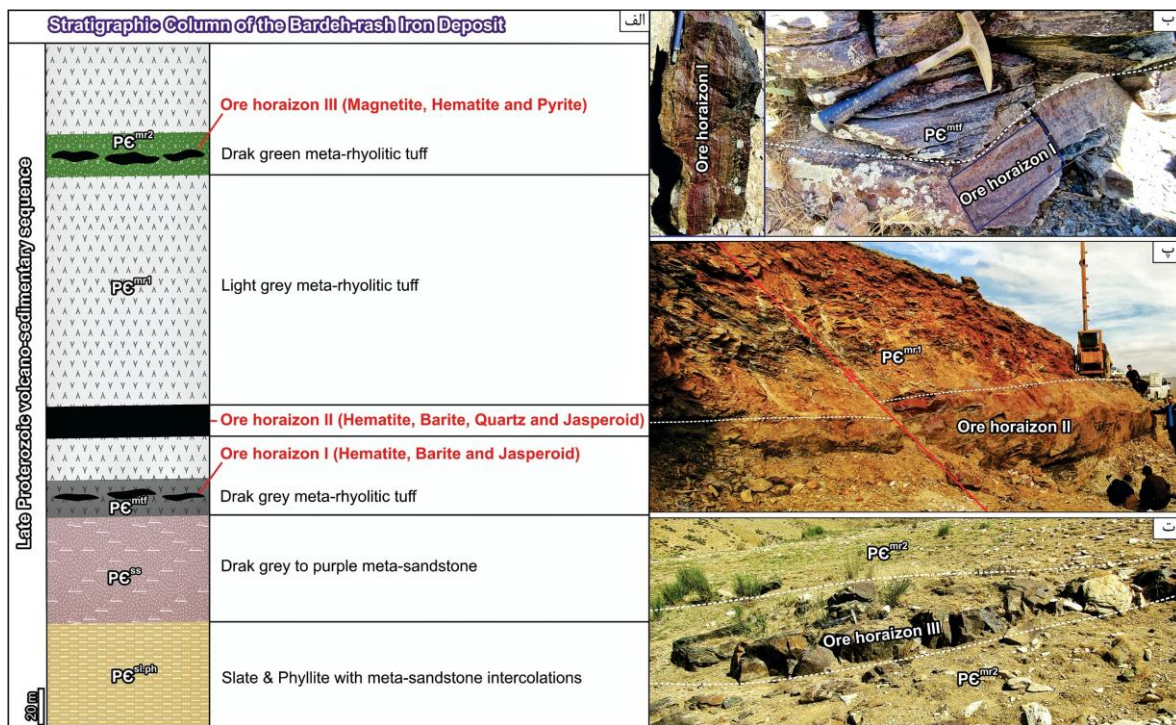


شکل ۴: الف: تصویر نمونه دستی از بخش فیلیتی متعلق به واحد اسلیت و فیلیت ( $PC^{sl.ph}$ ) در کانسار برده‌رش؛ ب: تصویر میکروسکوپی از واحد اسلیت - فیلیت در نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL)؛ پ: تصویر نمونه دستی از واحد متاسندستون دگرگون شده ( $PC^{ss}$ )؛ ت: تصویر میکروسکوپی از واحد متاسندستون دگرگون شده در نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL)؛ ث: تصویر نمونه دستی از واحد متاتوف ریولیتی ( $PC^{mtf}$ )، همراه با نوارهای غنی از اکسیدهای آهن (تیره‌رنگ)؛ ج: تصویر میکروسکوپی از واحد متاتوف ریولیتی در نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL)، که کانی‌سازی آهن با بافت‌های دانه پراکنده و نواری را نشان می‌دهد؛ چ: تصویر نمونه دستی از واحد متاتوف ریولیتی با رنگ خاکستری روشن ( $PC^{mr1}$ )؛ ح: تصویر میکروسکوپی از واحد متاتوف ریولیتی ( $PC^{mr1}$ ) در نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL)؛ خ: تصویر نمونه دستی از واحد متاتوف ریولیتی با رنگ سبز تیره ( $PC^{mr2}$ )؛ د: تصاویر میکروسکوپی از واحد متاتوف ریولیتی ( $PC^{mr2}$ ) در نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL) (علایم اختصاری کانی‌ها Qz - کوارتز؛ Pl - پلاژیوکلاز؛ Ser - سریسیت؛ Chl - کلریت؛ Hem - هماتیت). علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده‌اند.

Fig. 4: a: Hand specimen of the phyllitic section from the slate–phyllite unit ( $PC^{sl.ph}$ ) in the Bardeh-Rash deposit; b: Photomicrograph of the slate–phyllite unit under cross-polarized light (XPL); c: Hand specimen of the metamorphosed metasandstone unit ( $PC^{ss}$ ); d: Photomicrograph of the metamorphosed metasandstone unit under cross-polarized light (XPL); e: Hand specimen of the metarhyolitic tuff unit ( $PC^{mtf}$ ), showing iron oxide–rich (dark) bands; f: Photomicrograph of the metarhyolitic tuff unit under cross-polarized light (XPL), exhibiting disseminated and banded iron mineralization textures; g: Hand specimen of the light gray metarhyolitic tuff unit ( $PC^{mr1}$ ); h: Photomicrograph of the metarhyolitic tuff unit ( $PC^{mr1}$ ) under cross-polarized light (XPL); i: Hand specimen of the dark green metarhyolitic tuff unit ( $PC^{mr2}$ ); j: Photomicrographs of the metarhyolitic tuff unit ( $PC^{mr2}$ ) under cross-polarized light (XPL). Abbreviations: Qz – Quartz; Pl – Plagioclase; Ser – Sericite; Chl – Chlorite; Hem – Hematite. Mineral abbreviations are adopted from Whitney and Evans (2010).

میزبان کانی‌سازی در هریک از افق‌ها متفاوت بوده و به طور کلی شامل متاتوف ریولیتی با رنگ خاکستری تیره ( $PC^{mtf}$ ) (شکل ۵ ب)، متاتوف ریولیتی با رنگ خاکستری روشن ( $PC^{mr1}$ ) (شکل ۵ پ) و متاتوف ریولیتی با رنگ سبز تیره ( $PC^{mr2}$ ) است (شکل ۵ ت) که به ترتیب میزبان افق اول (I)، افق دوم (II) و افق سوم (III) کانی‌سازی آهن می‌باشند.

**افق‌های کانه‌زایی و ساخت و بافت کانسنگ**  
براساس مطالعات صحرایی، کانی‌سازی آهن در کانسار برده‌رش عمدتاً به صورت کانسنگ هماتیته و به شکل چینه‌سان در سه افق مختلف در واحدهای آتشفشانی - رسوبی اسیدی (توف‌های ریولیتی) تشکیل شده است (شکل ۵ الف). با توجه به تعدد افق‌های کانه‌دار، سنگ



شکل ۵: الف: موقعیت افق‌های کانسنگ آهن در توالی چینه‌شناسی کانسار آهن برده‌رش؛ دید به سمت شمال‌شرق؛ ب: نمایی نزدیک از برونزد افق اول (I) کانسنگ آهن در واحد متاتوف ریولیتی به رنگ خاکستری تیره تا ارغوانی ( $PC^{mtf}$ )؛ پ: نمایی نزدیک از برونزد افق دوم (II) کانسنگ آهن در واحد متاتوف ریولیتی به رنگ خاکستری روشن ( $PC^{mr1}$ )؛ ت: نمایی نزدیک از برونزد افق سوم (III) کانسنگ آهن در واحد متاتوف ریولیتی سبز تیره ( $PC^{mr2}$ ).

Fig. 5: a: Position of the iron ore horizons within the stratigraphic succession of the Bardeh-Rash iron deposit; view toward the northeast; b: Close-up view of the outcrop of the first iron ore horizon (I) hosted in the dark gray to purple metarhyolitic tuff unit ( $PC^{mtf}$ ); c: Close-up view of the outcrop of the second iron ore horizon (II) hosted in the light gray metarhyolitic tuff unit ( $PC^{mr1}$ ); d: Close-up view of the outcrop of the third iron ore horizon (III) hosted in the dark green metarhyolitic tuff unit ( $PC^{mr2}$ ).

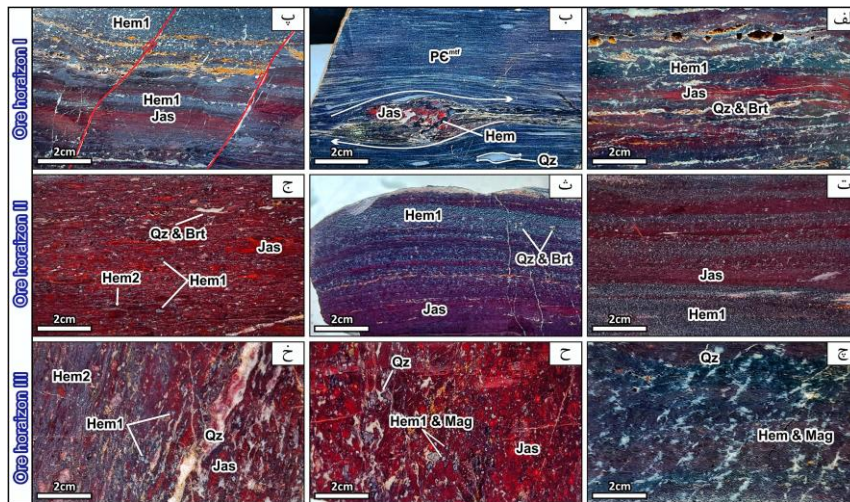
دگرشکلی پس از تشکیل، به صورت بودین‌شدگی، ظهور فابریک‌های C و S (شکل ۶ ب) و در برخی موارد چین خوردگی و گسل خوردگی در کانسنگ نواری (شکل ۶ پ) قابل مشاهده است. افق دوم (II)، که ذخیره اصلی آهن در کانسار برده‌رش را در بر می‌گیرد، با ژئومتری چینه‌سان در واحد متاریولیت خاکستری روشن ( $PC^{mr1}$ ) تشکیل شده است. این افق با طولی بالغ بر ۲۰۰ متر و ضخامتی بین ۰/۵ تا ۲/۵ متر رخنمون دارد (شکل ۵ الف و پ). کانه اصلی این افق، هماتیت است که باریت و کوارتز، کانی‌های باطله

کانه‌زایی آهن در افق اول (I) با ژئومتری لایه‌ای و چینه‌سان، با طول بالغ بر ۲۰ متر و ضخامت ۱۰ تا ۴۰ سانتی‌متر در واحد متاتوف ریولیتی خاکستری تیره‌رنگ ( $PC^{mtf}$ ) برونزد دارد (شکل ۵ الف و ب). این کانه‌زایی هم‌راستا با برگوارگی سنگ میزبان بوده و کانه اصلی آن، هماتیت با ساخت و بافت غالب نواری است (شکل ۶ الف). در این افق کانه‌زایی، نوارهای متناوب هماتیت - باریت و ژاسپروئید به چشم می‌خورند که نشانگر شرایط نهشت در یک محیط آتشفشانی - رسوبی است. شواهد دگرگونی و



حدود ۳۰ و ۵۰ متر و ضخامت‌های ۰/۲ تا ۱/۵ متر رخمون دارند (شکل‌های ۵ الف و ت). کانه‌های اصلی در این افق کانسنگی از مگنتیت و هماتیت در همراهی با کوارتز و مقادیر جزئی پیریت تشکیل شده‌اند (شکل ۶ چ). این کانه‌زایی نیز پس از تشکیل متحمل دگرگونی و دگرشکلی شده و توسط رگچه‌های کوارتزی قطع شده است (شکل ۶ ح و خ).

همراه هستند. مشاهدات صحرایی سبب شناسایی ساخت و بافت‌های توده‌ای، نواری - لامینه‌ای و دانه‌پراکنده در این افق شده است (شکل ۶ ت، ث و ج). افق سوم (III) کانه‌زایی آهن در کانسار برده‌رش، به صورت دو رخمون لایه‌ای - عدسی شکل در واحد متاتوف ریولیتی سبز تیره‌رنگ ( $PC^{mr2}$ ) در شمال‌غرب و جنوب‌شرق محدوده مورد مطالعه برنزد دارد. در این افق، کانسنگ‌های آهن در طول‌های



شکل ۶: تصاویر نمونه دستی از ساخت و بافت‌های مختلف کانی‌سازی آهن در افق‌های اول، دوم و سوم: الف: ساخت نواری در کانسنگ آهن افق اول، که از تناوب نوارهای سیاه رنگ هماتیت با کوارتز و باریت به رنگ سفید و ژاسپروئیدهای قرمز رنگ تشکیل شده است؛ ب: چین‌خوردگی نوارهای هماتیت و ژاسپروئید تحت‌تأثیر فشار اعمالی در سنگ میزبان متاتوف ریولیتی، که منجر به تغییرات شکل و انحراف در نوارهای هماتیت و ژاسپروئید شده است؛ پ: جابجایی نوارهای هماتیت و ژاسپروئید (افق اول کانسنگ آهن) در اثر گسل‌خوردگی؛ ت، ث و ج: بافت نواری در کانسنگ آهن افق دوم، که عمدتاً از تناوب نوارهای هماتیت، ژاسپروئیدهای قرمز رنگ و باریت تشکیل شده است؛ چ: کانی‌سازی هماتیت و مگنتیت با بافت توده‌ای از افق سوم کانسنگ آهن؛ ح: هماتیت و مگنتیت با بافت دانه‌پراکنده در زمینه ژاسپروئیدی از افق سوم ماده معدنی؛ خ: دگرشکلی در نوارهای هماتیتی و ژاسپروئیدی، که موجب تشکیل بافت کاتاکلاستیک و رخداد رگچه‌های کوارتزی شده است (علایم اختصاری کانی‌ها Qz - کوارتز؛ Brt - باریت؛ Jas - ژاسپروئید؛ Mag - مگنتیت؛ Hem - هماتیت). علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده‌اند.

Fig. 6: Hand specimen images showing various textures and structures of iron mineralization from the first, second, and third horizons: a: Banded texture in the iron ore of the first horizon, characterized by alternating black hematite bands with white quartz and barite, as well as red jasperoid layers; b: Folding of hematite and jasperoid bands due to compressive stress imposed on the metarhyolitic host rock, leading to deformation and deflection of the hematite and jasperoid bands; c: Displacement of hematite and jasperoid bands (first iron ore horizon) as a result of faulting; d, e, f: Banded texture in the second iron ore horizon, mainly composed of alternating layers of hematite, red jasperoid, and barite; g: Massive texture of hematite and magnetite mineralization from the third iron ore horizon; h: Disseminated texture of hematite and magnetite grains within a jasperoidal matrix from the third ore horizon; i: Ductile deformation in hematite and jasperoid bands, resulting in cataclastic textures and the formation of quartz veinlets. (Mineral abbreviations: Qz - Quartz; Brt - Barite; Jas - Jasperoid; Mag - Magnetite; Hem - Hematite). Abbreviations follow Whitney and Evans (2010).

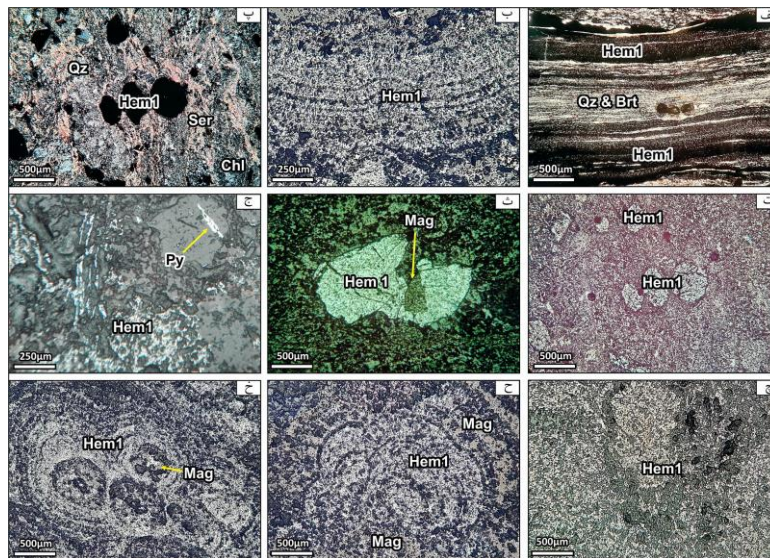
نوارهای غنی از هماتیت در تناوب با نوارهای غنی از کوارتز و باریت دیده می‌شوند (شکل ۷ الف). ضخامت این نوارها معمولاً از کمتر از یک میلی‌متر تا یک سانتی‌متر متغیر بوده و گاه پس از تشکیل، تحت‌تأثیر

ساخت و بافت‌های اولیه در افق‌های کانسنگی نشان‌دهنده همزمانی تشکیل ماده معدنی با سنگ درونگیر آن هستند. بافت نواری - لایه‌ای یکی از انواع بافت‌های مرتبط با مراحل اولیه ته‌نشست ماده معدنی در کانسار برده‌رش است که

کانسار برده‌رش است که در آن هماتیت و مگنتیت به صورت هم‌رشد، بیش از ۵۰ درصد حجم کانسنگ را شامل می‌شوند (شکل ۷ چ).

بافت گل‌کلمی (کلورم) نیز عمدتاً در مقاطع میکروسکوپی دیده می‌شود، به گونه‌ای که کانی‌های مگنتیت در هسته‌ی مرکزی مجموعه‌های اکسید آهنی قرار گرفته و توسط نوارهای ظریف هماتیت - مگنتیت احاطه شده‌اند (شکل ۷ ح و خ).

دگرگونی و دگرشکلی متحمل بر گوارگی، بودین‌شدگی، خرد شدگی و گاه چین‌خوردگی شده‌اند (شکل ۶). بافت دانه‌پراکنده از دیگر بافت‌های شاخص است که در آن دانه‌های هماتیت، هماتیت و مگنتیت و با فراوانی جزئی هماتیت و پیریت به‌طور پراکنده در متن سنگ میزبان حضور داشته و ارتباطی با شکستگی‌ها نشان نمی‌دهند. این بافت بیشتر در نمونه‌های کم‌عیار مشاهده شده و نشانه‌ای از تنش‌ست اولیه ماده معدنی است (شکل ۷ پ، ت، ث و ج). بافت توده‌ای از دیگر بافت‌های رایج در افق‌های II و III



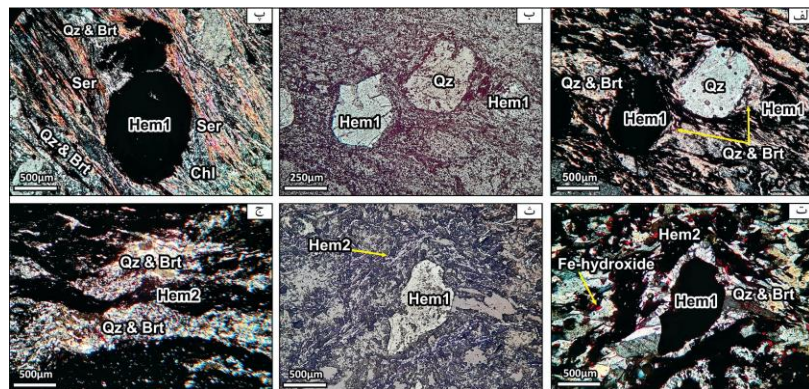
شکل ۷: تصاویر میکروسکوپی از ساخت و بافت‌های اولیه از نمونه‌های کانه‌دار افق‌های اول، دوم و سوم؛ الف: ساخت نواری هماتیت، کوارتز و باریت از افق دوم کانسنگ آهن، در نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL)؛ ب: ساخت نواری هماتیت از افق دوم کانسنگ آهن در نور انعکاسی با نیکول‌های موازی (PPL)؛ پ: هماتیت‌های دانه‌پراکنده در نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL)؛ ت: همان تصویر "پ" در نور انعکاسی با نیکول‌های موازی (PPL)؛ ث: تصویر هماتیت و مگنتیت دانه‌پراکنده در نور انعکاسی با نیکول‌های موازی (PPL)؛ ج: تصویر هماتیت و پیریت در نور انعکاسی با نیکول‌های موازی (PPL)؛ چ: تصویر میکروسکوپی از بافت توده‌ای هماتیت در نور انعکاسی با نیکول‌های موازی (PPL)؛ ح و خ: تصاویر میکروسکوپی (نور انعکاسی با نیکول‌های موازی PPL) از بافت گل‌کلمی (کلورم) در کانسنگ‌های آهن افق سوم، در این تصاویر کانه‌های مگنتیت به عنوان هسته رخداد داشته و نوارهای ظریف هماتیت - مگنتیت آن را احاطه کرده‌اند. (علایم اختصاری کانی‌ها Qz - کوارتز؛ Brt - باریت؛ Chl - کلریت؛ Mag - مگنتیت؛ Hem - هماتیت). علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده‌اند.

Fig. 7: Photomicrographs illustrating primary textures and structures from ore-bearing samples of the first, second, and third horizons: a: Banded texture of hematite, quartz, and barite from the second iron ore horizon under transmitted light with crossed nicols (XPL); b: Banded hematite texture from the second iron ore horizon under reflected light with parallel nicols (PPL); c: Disseminated hematite grains under transmitted light with crossed nicols (XPL); d: Same field as c: under reflected light with parallel nicols (PPL); e: Disseminated hematite and magnetite grains under reflected light with parallel nicols (PPL); f: Hematite and pyrite grains under reflected light with parallel nicols (PPL); g: Photomicrograph of massive hematite texture under reflected light with parallel nicols (PPL); h & i: Reflected light photomicrographs with parallel nicols (PPL) showing colloform (botryoidal) textures from iron ores of the third horizon. In these images, magnetite forms the core, surrounded by delicate concentric bands of hematite and magnetite. (Mineral abbreviations: Qz - Quartz; Brt - Barite; Chl - Chlorite; Mag - Magnetite; Hem - Hematite). Abbreviations follow Whitney and Evans (2010).



کم‌فشار، عمدتاً در بلورهای کوارتز دیده می‌شود. این بافت اغلب با سایه‌فشاری همراه بوده و به خصوص در حاشیه بلورهای درشت کوارتز و هماتیت، ریزبلورهای کوارتز و باریت تشکیل می‌شوند (شکل ۸ ت و ث). علاوه بر این، خاموشی موجی که ناشی از تنش‌های تکتونیکی و تغییر شکل شبکه بلورین کانی‌ها است؛ در حاشیه بسیاری از هماتیت‌های دانه‌پراکنده اولیه (Hem1) و کانی‌های همراه در افق‌های دوم و سوم مشاهده می‌شود و نشان‌دهنده تأثیر دگرگونی و دگرشکلی بر حوضه میزبان کانه‌زایی است که حاصل آن تشکیل بلورهای سوزنی شکل هماتیت (Hem2) است (شکل ۸ ث و ج).

در افق‌های کانسنگی، تحت تأثیر فرایندهای دگرگونی و عملکرد پهنه‌های برشی، شواهدی از فابریک‌های دگرشکلی مشاهده می‌شود. بافت سایه‌فشاری اطلاعات ارزشمندی از تاریخچه دگرریختی سنگ ارائه می‌کند، به‌گونه‌ای که در اثر تنش، دانه‌های سخت‌تر باعث تغییر در میدان تنش شده و در نواحی کوتاه‌شدگی، انحلال فشاری رخ می‌دهد، درحالی‌که در نواحی کششی، درزه‌های کششی همراه با رشد کانی‌های جدید مانند کوارتز، باریت (شکل ۸ الف و ب)، سربیسیت - موسکوویت و هماتیت مشاهده می‌شود (شکل ۸ پ). بافت طول‌شدگی نیز نتیجه اعمال فشار جهت‌دار بوده و در اثر تبلور مجدد کانی‌ها در نواحی



شکل ۸: تصاویر میکروسکوپی از ساخت و بافت‌های دگرشکلی کانه‌زایی آهن در افق‌های اول، دوم و سوم: الف، ب و پ: تصاویر میکروسکوپی از هماتیت‌های نسل اول به همراه کوارتز، که در سایه فشاری آن‌ها کوارتز و باریت تشکیل شده است. به ترتیب در دو نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL) و انعکاسی با نیکول‌های موازی (PPL)؛ ت و ث: تصاویر میکروسکوپی (به ترتیب در دو نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL) و انعکاسی با نیکول‌های موازی (PPL)) از بافت کاتاکلاستیک حاصل از خرد شدگی در کانی هماتیت. در سایه فشاری هماتیت (Hem1)، کانی‌های کوارتز و باریت تشکیل شده‌اند و هماتیت‌های سوزنی شکل دوم (Hem2) که در اثر فرایند دگرشکلی تشکیل شده‌اند، هماتیت‌های نسل اول را دور زده‌اند؛ ج: بودین‌شدگی و طول‌شدگی در کانی‌های کوارتز، باریت و هماتیت در نور عبوری (XPL). علائم اختصاری کانی‌ها Qz - کوارتز؛ Brt - باریت؛ Fe-hydroxide - ترکیبات اکسیدی آهن؛ Mag - مگنتیت؛ Hem - هماتیت؛ Ser - سربیسیت). علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده‌اند.

Fig. 8: Photomicrographs of deformation-related textures and structures in iron mineralization from the first, second, and third horizons: a, b, c: Photomicrographs of first-generation hematite (Hem1) associated with quartz, showing pressure shadow zones where quartz and barite have precipitated. Images are shown respectively under transmitted light with crossed nicols (XPL) and reflected light with parallel nicols (PPL); d, e: Photomicrographs (PPL) illustrating cataclastic texture resulting from brittle deformation in hematite. Quartz and barite have crystallized in the pressure shadows of first-generation hematite (Hem1), and second-generation acicular hematite (Hem2), formed during deformation, wraps around the earlier hematite grains; f: Boudinage and elongation structures in quartz, barite, and hematite under transmitted light (XPL). (Mineral abbreviations: Qz - Quartz; Brt - Barite; Fe-hydroxide - Iron oxides; Mag - Magnetite; Hem - Hematite; Ser - Sericite). Abbreviations follow Whitney and Evans (2010).

هماتیت کانه اصلی آهن در هر سه افق معدنی بوده و در افق‌های اول (I) و دوم (II) تنها کانه فلزی است. این کانی با فراوانی ۱۰ تا ۸۰ درصد از حجم کل ماده معدنی، با بافت‌های دانه‌پراکنده، نواری - لامینه‌ای، توده‌ای و رگه -

#### کانی‌شناسی، کانه‌زایی و توالی پاراژنزی

کانه‌زایی آهن در کنسار برده‌رش، با کانی‌شناسی اصلی هماتیت و مگنتیت، همراه با کانی‌های باریت، کوارتز، سربیسیت، کلریت و پیریت در سه افق معدنی رخ داده است.

هیدروکسیدهای آهن تبدیل شده و اغلب همراه با کوارتز و هماتیت دیده می‌شوند. مراحل کانه‌زایی کانسار برده‌رش شامل سه مرحله اصلی است که براساس مطالعات کانی‌شناسی و بررسی روابط بافتی تفکیک شده‌اند (شکل ۹). مرحله نخست، کانه‌زایی چینه‌سان و همزمان با تشکیل متاتوف‌های ریولیتی میزبان است که با تشکیل هماتیت در همراهی با کوارتز و باریت در افق‌های (I) و (II)، هماتیت (Hem1)، مگنتیت و مقادیر جزئی پیریت در افق (III) مشخص می‌شود. این مرحله با بافت‌های دانه‌پراکنده، نواری - لامینه، توده‌ای و کلوفرم همراه است. مرحله دوم کانه‌زایی همزمان با دگرگونی و دگرشکلی حاکم بر منطقه رخ داده است. در این مرحله، ساختارهایی همچون چین‌خوردگی و بودین‌شدگی در نوارهای کانه‌دار، ساختارهای سیگما و رشد بلورهای هماتیت در سایه‌فشاری شکل گرفته‌اند. همچنین، تغییرات دگرشکلی در مقیاس‌های میکروسکوپی و میکروسکوپی شامل تبلور مجدد کوارتز، تشکیل هماتیت نسل دوم و توسعه برگوارگی‌ها در اطراف بلورهای هماتیت و مگنتیت رخ داده است. مرحله سوم کانه‌زایی شامل هوازگی و اکسایش کانه‌های اکسیدی (هماتیت و مگنتیت) و پیریت است که به تشکیل ترکیبات هیدروکسیدی آهن منجر شده است. توالی پاراژنزی این کانسار نشان‌دهنده تأثیر رویدادهای زمین‌شناختی مختلف از جمله دگرگونی، دگرشکلی و فرایندهای سطحی در تکامل سیستم کانه‌زایی است.

رگچه‌ای رخداد دارد (شکل ۷ و ۸). مگنتیت در افق سوم کانسنگی با فراوانی ۱۰ تا ۳۰ درصد و با بافت‌های دانه‌پراکنده، قشرگون (Crustified)، نواری و توده‌ای قابل مشاهده است (شکل ۷ و ۸). باریت به همراه کوارتز یکی از فراوان‌ترین کانی‌های باطله همراه در افق‌های (I) و (II) بوده و با فراوانی ۵ تا ۳۰ درصد در اندازه‌های کمتر از ۷۰۰ میکرون مشاهده می‌شود (شکل ۸). در کانسار برده‌رش، دو نسل مختلف باریت تشکیل شده است که نسل اول همزمان با هماتیت و کوارتز اولیه رشد کرده (شکل ۷ الف) و نسل دوم تأخیری‌تر بوده و معمولاً در سایه‌فشاری هماتیت‌ها تشکیل شده یا آن‌ها را دور زده است (شکل ۸). کوارتز با فراوانی ۲۰ تا ۶۰ درصد، فراوان‌ترین کانی باطله در افق‌های (I) و (II) است که تحت تأثیر فرایندهای تکتونیکی، به صورت بلورهایی با خاموشی موجی و بلورهای شکسته و خردشده مشاهده می‌شود. سریسیت و کلریت به‌عنوان محصولات دگرگونی و دگرشکلی در افق‌های کانه‌زایی رخداد دارند. سریسیت با فراوانی بیشتر (۱ تا ۵ درصد) در سایه‌فشاری هماتیت‌های اولیه و پورفیروبل‌های کوارتز تشکیل شده است. این کانی‌ها همچنین به‌صورت بلورهای طولی، کشیده و فیبری در امتداد صفحات برگوارگی حاصل از دگرگونی مشاهده می‌شوند. پیریت تنها کانه سولفیدی تشکیل شده در کانسار برده‌رش است که فقط در افق سوم با فراوانی جزئی (کمتر از یک درصد) رخداد دارد (شکل ۷ ج). بخشی از بلورهای پیریت، در اثر هوازگی به

Stage	Synvolcanic	Metamorphism & Deformation	Supergene
Minerals	Hem 1	Hem 2	
Minerals	Hematite		
	Magnetite		
	Pyrite		
	Barite		
	Quartz		
	Sericite-Muscovite		
	Chlorite		
Fe-Hydroxides			
Ore texture & Structure	Dissiminated		
	Laminated		
	Colloform		
	Massive		
	Vein-Veinlet		
Fabric	Shearing		
	Folding		
	Boudinage		
	σ-Type		
	Strain shadows		

شکل ۹: نمودار توالی پاراژنزیکی، توزیع نسبی و ویژگی‌های ساخت و بافت کانی‌ها در کانسار آهن برده‌رش.

Fig. 9: Paragenetic sequence diagram illustrating the relative distribution and textural-structural characteristics of minerals in the Bardeh-Rash iron deposit.



## ژئوشیمی کانسار

به منظور تعیین فراوانی اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و کمیاب، ۹ نمونه از واحدهای آتشفشانی (۷ نمونه از واحد  $PC^{mr1}$  و ۲ نمونه از واحد  $PC^{mr1}$ ) و از کانسنگ‌های آهن‌دار افق II (۱۰ نمونه) و افق III (۲ نمونه) برداشت و به روش XRF در آزمایشگاه بخش زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس آنالیز شدند. در همین راستا، ۵ نمونه از واحد

آتشفشانی  $PC^{mr1}$  و ۵ نمونه از کانسنگ‌های آهن‌دار (۴ نمونه از افق II و یک نمونه از افق III) با استفاده از روش ICP-MS برای ۵۶ عنصر در آزمایشگاه شرکت مطالعات مواد معدنی زرآرما آنالیز شدند. نتایج آنالیزهای شیمیایی سنگ‌های میزبان و افق‌های معدنی در کانسار برده‌ش در جدول‌های ۱ و ۲ به تفصیل آمده است.

جدول ۱: نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های برداشت شده از واحدهای متاتوف ریولیتی در کانسار برده‌ش به روش XRF. مقادیر اکسیدهای اصلی به صورت درصد وزنی (Wt%) و سایر عناصر به صورت گرم در تن (ppm) گزارش شده‌اند.

Table 1: Geochemical analysis results of samples collected from metarhyolitic units in the Bardeh-Rash deposit, obtained using XRF method. Major oxide concentrations are reported in weight percent (Wt%), while trace and rare elements are reported in parts per million (ppm).

Sample	Kz-01	Kz-04	Kz-08a	Kz-11	Kz-13b	Kz-315	Kz-316	Kz-314	Kz-318
Name	$PC^{mr1}$					$PC^{mr2}$			
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	11.29	10.02	12.49	11.06	11.60	11.37	13.63	10.5	13.86
<b>BaO</b>	0.044	0.041	0.039	0.03	0.077	0.051	0.064	0.031	0.038
<b>CaO</b>	0	1.06	1.16	0	0	0.37	0.27	0.27	0.23
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1.33	3.11	1.51	2.81	0.97	3.57	4.18	3.8	3.67
<b>K<sub>2</sub>O</b>	4.86	1.21	4.15	3.40	6.55	5.64	3.15	2.51	4.53
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1.60	3.19	1.84	0.33	0.13	1.74	2.30	1.05	0.51
<b>MgO</b>	0.67	1.25	0.84	1.90	0.64	1.80	0.98	1.39	2.24
<b>MnO</b>	0	0.11	0.03	0.01	0	0.05	0.01	0	0.08
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.05	0.07	0.007	0.06	0.005	0.28	0.14	0.09	0.18
<b>SiO<sub>2</sub></b>	78.73	77.88	75.73	77.81	78.54	75.73	72.95	71.5	72.00
<b>SO<sub>3</sub></b>	0.02	0.03	0.06	0.01	0.02	0.04	0.04	0.05	0.03
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.13	0.37	0.08	0.12	0.06	0.45	0.46	0.17	0.12
<b>L.O.I</b>	1.19	1.58	1.95	2.4	1.34	1.84	1.76	0.51	2.34
<b>Total</b>	99.91	99.92	99.98	99.94	99.93	99.52	99.934	91.87	99.828
<b>Ce</b>			0.03			0	0	0	0
<b>Cl</b>	0.01	0.008	0.004	0.008	0	0	0	0.007	0.006
<b>Cr</b>	0	0	0	0	0	0.01	0.007	0	0
<b>Ga</b>	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0.002
<b>Ni</b>	0	0.005	0.005	0.004	0	0.007	0.007	0	0
<b>Rb</b>	0.01	0.004	0.01	0.009	0.015	0.007	0.007	0.003	0.01
<b>Sr</b>	0.006	0.006	0.003	0.001	0.003	0.005	0.004	0	0
<b>Zn</b>	0.002	0.004	0.004	0	0.003	0.004	0.004	0.01	0.004
<b>Zr</b>	0.008	0.01	0.01	0.007	0.009	0.018	0.01	0.01	0.008
<b>Y</b>	0	0	0	0	0	0	0	0.004	0



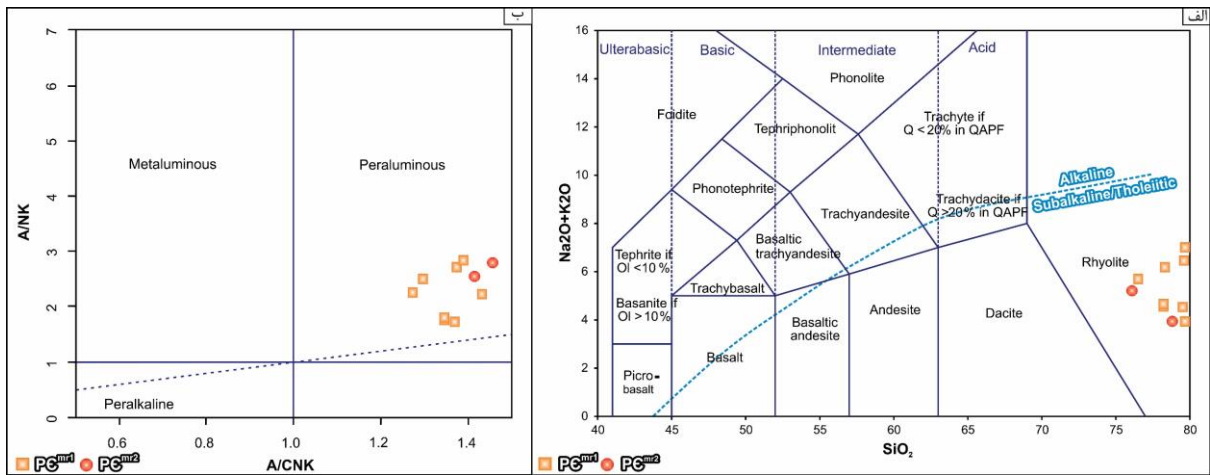
جدول ۳: نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های برداشت شده از واحد متاتوف ریولیتی و افق‌های کانسنگی در محدوده کانسار برده‌رش به روش ICP-MS برای عناصر کمیاب خاکی (REE). مقادیر به صورت گرم در تن (ppm) گزارش شده‌اند.

Table 3: Results of ICP-MS chemical analyses for rare earth elements (REE) in samples collected from the metarhyolitic tuff unit and iron ore horizons within the Bardeh-Rash deposit area. Element concentrations are reported in parts per million (ppm).

Sample Name	Kz-01(	Kz-04	Kz-08a	Kz-11	Kz-13b
<b>Element</b>	<b>ppm</b>				
Ce	27	29	85	29	163
Eu	1.47	1.46	1.95	0.66	4.78
La	15	20	46	18	85
Nd	11.4	14.1	35	11.8	61.1
Pr	3.04	3.83	9.1	3.47	16.5
Sm	3	2.02	7.57	1.4	16.43
Dy	3.17	1.51	3.51	2.73	4.11
Er	1.57	0.61	1.93	1.49	2.23
Gd	2.49	2.43	4.43	2.48	6.69
Tb	0.49	0.29	0.69	0.46	1.09
Yb	1.9	0.6	2.2	2.1	1.9
<b>Sample</b>	<b>Kz-10</b>	<b>Kz-17</b>	<b>KZ-103</b>	<b>Kz-108</b>	<b>Kz-109</b>
<b>Ore horizon</b>	<b>III</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>
<b>Element</b>	<b>ppm</b>				
Ce	0.66	36	0.66	14	40
Eu	7.5	3.29	6.98	6.2	9.05
La	4	22	2	6	26
Nd	3.1	18.1	0.9	4.8	20.6
Pr	0.88	4.45	0.44	1.33	4.98
Sm	12.0	6.3	9.85	9.51	15.79
Dy	1.48	1.57	0.44	0.49	1.6
Er	0.66	0.61	0.08	0.13	0.72
Gd	1.67	2.6	1.15	1.46	2.84
Tb	0.28	0.33	0.1	0.1	0.38
Yb	3	0.7	0.1	0.1	0.5

براساس نمودار مذکور، واحدهای آتشفشانی میزبان کانی‌سازی در کانسار برده‌رش، در محدوده ریولیت واقع شده‌اند (شکل ۱۰ الف). براساس نمودار A/CNK در مقابل A/NK (Shand, 1943)، نمونه‌های متاتوف ریولیتی در محدوده سری ماگمایی پرآلومینوس قرار گرفته‌اند (شکل ۱۰ ب).

ژئوشیمی سنگ‌های میزبان کانی‌سازی نام‌گذاری و تعیین سری ماگمایی سنگ‌های میزبان نمودارهای متعددی برای نامگذاری سنگ‌های آتشفشانی براساس ترکیب شیمیایی آن‌ها ارائه شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به نمودار TAS که توسط لوباس و همکاران (Le Bas et al, 1986) ارائه شده، اشاره نمود.

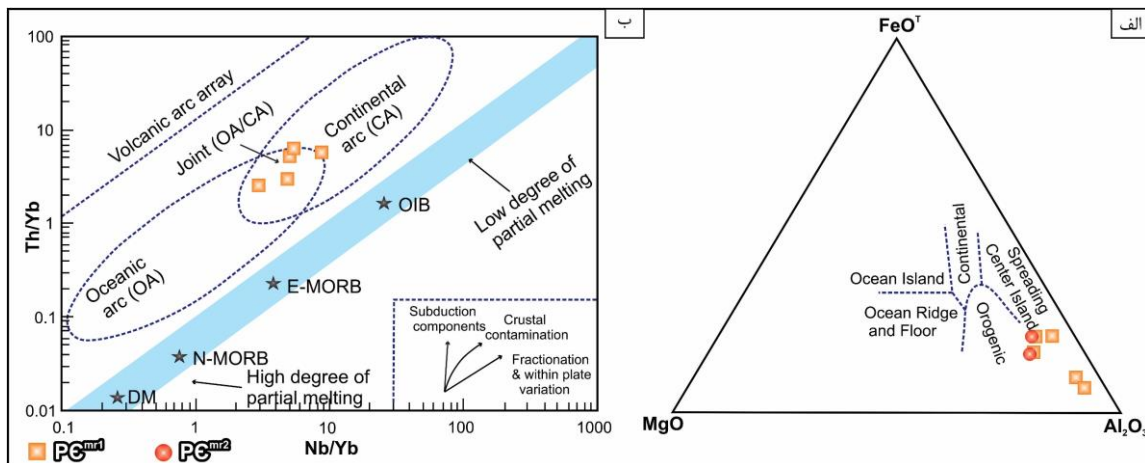


شکل ۱۰: الف: طبقه‌بندی ژئوشیمیایی و نام‌گذاری سنگ‌های آتشفشانی با استفاده از نمودار آلکالی در مقابل سیلیس (Le Bas et al, 1986)؛ ب: موقعیت نمونه‌های متاتوف ریولیتی بر روی نمودار A/CNK\_A/NK (Shand, 1943).

Fig. 10: a: Geochemical classification and nomenclature of volcanic rocks based on the Total Alkali vs. Silica (TAS) diagram (Le Bas et al, 1986); b: Position of metarhyolitic tuff samples on the A/CNK vs. A/NK diagram (Shand, 1943).

در مقابل  $Th/Yb$ ، (Pearce, 2008) بهره گرفته شده است. جایگاه نمونه‌ها بر روی این نمودار نشان‌دهنده آن است که سنگ منشأ در محیط کمان آتشفشانی (Volcanic Arc Array) قرار دارد (شکل ۱۱ ب). این امر بیانگر وابستگی ژئودینامیکی سنگ‌های مذکور به محیط‌های فرورانشی و فرایندهای مرتبط با کمان‌های ماگمایی است.

جایگاه تکتونوماگمایی سنگ‌های میزبان موقعیت نمونه‌های ریولیتی بر روی نمودار مثلثی  $FeO_T-MgO-Al_2O_3$  (Pearce et al, 1977) نشان می‌دهد که سنگ آذرین اولیه با ترکیب ریولیتی در یک محیط کوهزایی (Orogenic) تشکیل شده است (شکل ۱۱ الف). به‌منظور تعیین ماهیت سنگ منشأ، از نمودار  $Nb/Yb$



شکل ۱۱: الف: موقعیت نمونه‌های برداشت شده از واحدهای آتشفشانی (متاتوف ریولیتی) بر روی نمودار مثلثی  $FeO_T-MgO-Al_2O_3$  (Pearce et al, 1977)؛ ب: موقعیت نمونه‌ها بر روی نمودار  $Nb/Yb$  در مقابل  $Th/Yb$  (Pearce, 2008).

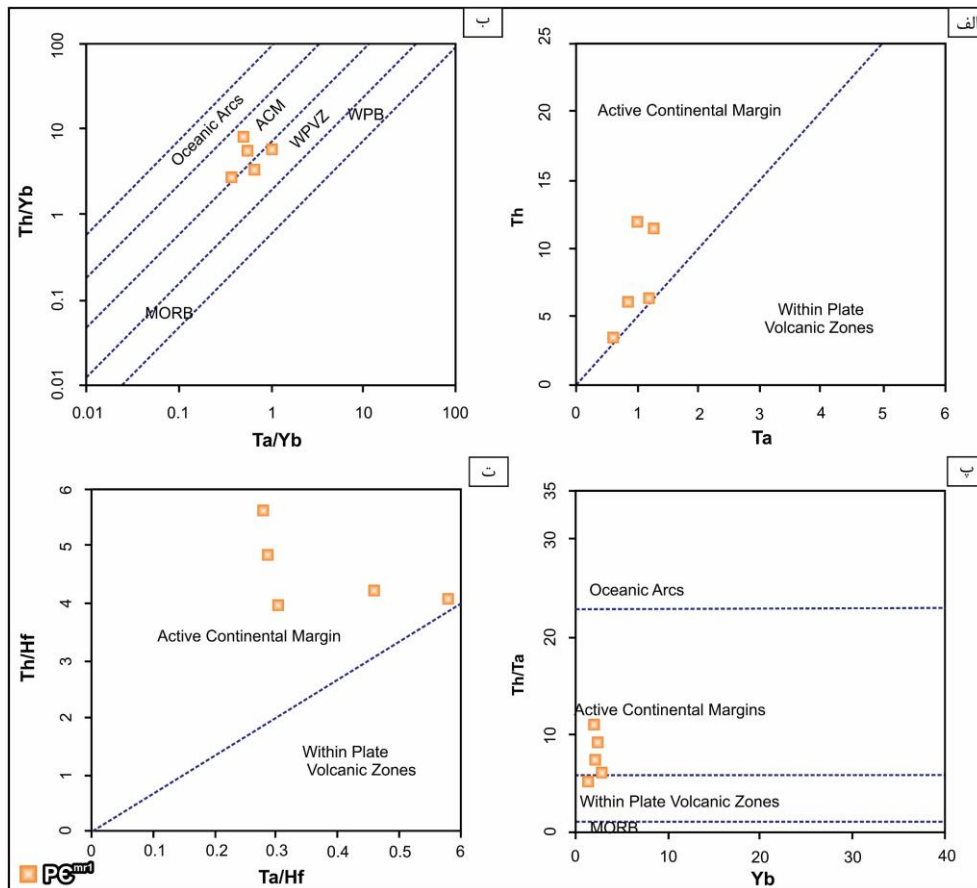
Fig. 11: a: Position of samples collected from volcanic units (metarhyolitic) plotted on the ternary diagram  $FeO_T-MgO-Al_2O_3$  (Pearce et al, 1977); b: Sample distribution on the  $Nb/Yb$  vs.  $Th/Yb$  discrimination diagram (Pearce, 2008).

بر پایه ترکیب چهار عنصر کمیاب که به‌طور معمول تحرک کمی دارند، شامل  $Yb$ ،  $Ta$ ،  $Th$  و  $Hf$ ، استوار است. اکثر داده‌ها در محدوده حاشیه‌های قاره‌ای فعال قرار می‌گیرند

تفکیک محیط ژئوتکتونیک سنگ‌های آتشفشانی فلسیک (ریولیت‌ها) مطابق با روش ارائه‌شده توسط شاندل و گورتن (Schandl and Gorton, 2002) انجام شده است. این روش

زیرقاره‌ای است و بنابراین، به‌عنوان نمایانگر آتشفشان‌های حاشیه قاره‌ای فعال پیشنهاد می‌شود. در نمودار Th/Ta نسبت به Yb، بیشتر نمونه‌های متاولکانیک مورد بررسی در محدوده حاشیه قاره‌ای فعال قرار دارند (شکل ۱۲ پ)، اگرچه برخی از نمونه‌ها در محدوده حاشیه قاره‌ای فعال جای می‌گیرند (شکل ۱۲ پ).

(شکل ۱۲ الف و ت)، در حالی که تعدادی از نمونه‌ها در محدوده مناطق آتشفشانی درون‌صفحه‌ای قرار دارند (شکل ۱۲ ب و پ). در نمودار Ta در مقابل Th، مشاهده می‌شود که تمایل به غنی‌شدن عنصر Th نسبت به Ta در تمامی نمونه‌های مطالعه‌شده وجود دارد (شکل ۱۲ الف)، که این پدیده احتمالاً ناشی از تأثیر مایعات غنی از Th در ناحیه



شکل ۱۲: موقعیت نمونه‌های برداشت شده از واحد آتشفشانی (متاتوف ریولیتی) بر روی نمودارهای (Schandl and Gorton, 2002). الف:

نمودار Th/Yb در برابر Ta/Yb؛ ب: نمودار Th در برابر Ta؛ پ: نمودار Th/Hf در برابر Ta/Hf؛ ت: نمودار Th/Ta در برابر Yb.

Fig. 12: Position of samples collected from the volcanic unit (metarhyolitic) plotted on discrimination diagrams proposed by Schandl and Gorton (2002): a: Th/Yb vs. Ta/Yb diagram; b: Th vs. Ta diagram; c: Th/Hf vs. Ta/Hf diagram; d: Th/Ta vs. Yb diagram.

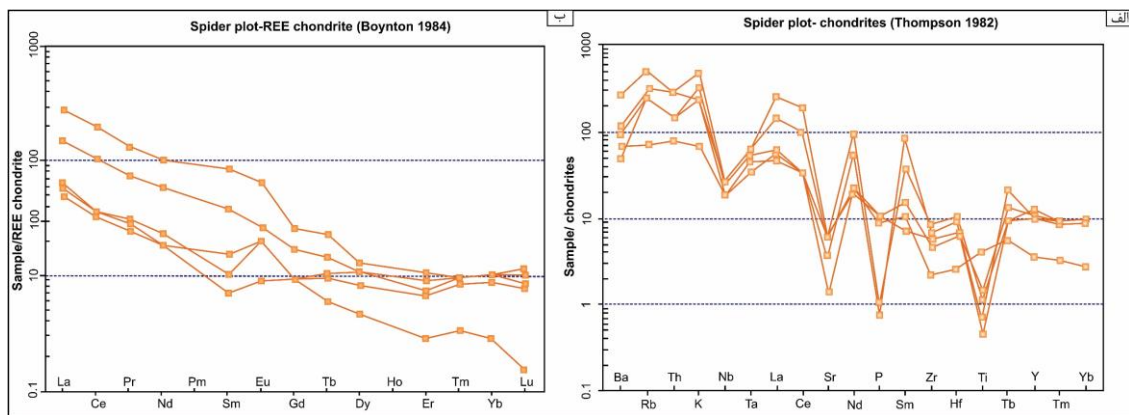
این سنگ‌ها آنومالی منفی نشان می‌دهند. تهی‌شدگی عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) نظیر Nb، P و Ti، از ویژگی‌های شاخص ماگماتیسم در محیط‌های کم‌انرژی به شمار می‌رود. این پدیده می‌تواند برآیند فرایندهایی چون آلیش ماگمای منشأ با مواد حاصل از پوسته اقیانوسی فرورانده‌شده، تفریق ماگمایی، جدایش فازی، صعود سیالات و نیز آلودگی ماگما به ترکیبات پوسته‌ای باشد (Sunders et al, 1992; Nagudi et al, 2003). همچنین، آنومالی مثبت Ba و Sr در نمودار به‌هنگار شده ممکن است به دلیل

### ژئوشیمی عناصر کمیاب خاکی

جهت تحلیل تغییرات عناصر کمیاب در سنگ‌های متاتوف ریولیتی، نمونه‌ها نسبت به کندریت (Thompson, 1982) به‌هنگار شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که سنگ‌های متاریولیتی غنی از عناصر LILE بوده و آنومالی مثبت در عنصر Ba مشاهده می‌شود. این غنی‌شدگی در عناصر LILE ممکن است به نقش مواد پوسته‌ای در ناحیه منشأ یا در حین صعود ماگما از گوشته مرتبط باشد (Wilson, 1989). در عین حال، عناصر Zr، P، Ti، Nb و Ta در Sr

LILE بوده و آنومالی مثبت در عنصر Eu مشاهده می‌شود کانی‌های هورنبلند، اسفن، کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن و گارنت ممکن است باعث ایجاد آنومالی مثبت در مذاب شوند (Dokuz et al, 2005; Wang et al, 2006). سایر عناصر نیز روند و الگوی مشابهی در نمودار بهنجار شده نسبت به کندریت نشان می‌دهند (شکل ۱۳ ب).

آرایش بیشتر ماگمای مادر با مواد پوسته‌ای باشد وجود این عناصر نشان‌دهنده منشأ پوسته‌ای فلسیک است (Sunders et al, 1992; Rao and Naqvi, 1995) (شکل ۱۳ الف). برای بررسی تغییرات دیگر عناصر کمیاب خاکی، نمونه‌های متاریولیتی به مقادیر کندریتی (Boynton, 1984) به هنجار شده‌اند. در این نمودار، نمونه‌های متاریولیتی غنی از عناصر



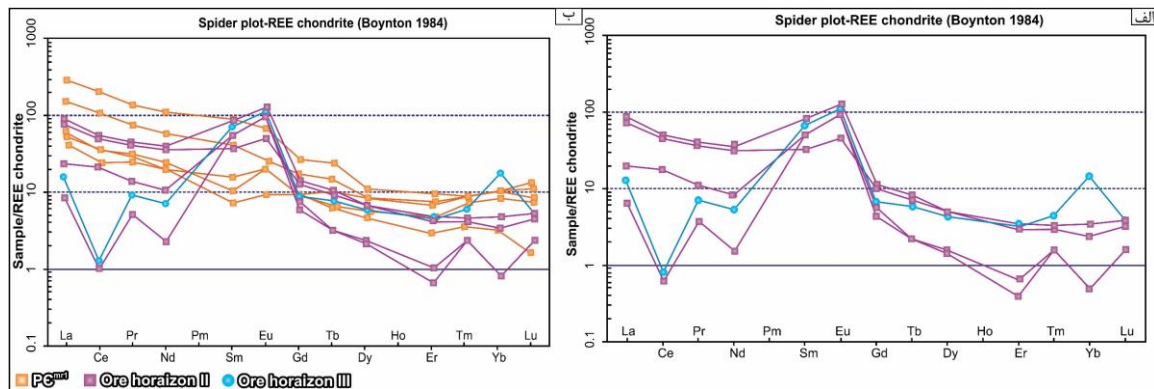
شکل ۱۳: الف: نمودار فراوانی عناصر کمیاب به‌هنجار شده نسبت به کندریت (Thompson, 1982) برای نمونه‌های برداشت شده از واحدهای آتشفشانی (متاتوف ریولیتی) میزبان کانی‌زایی در محدوده‌ی برده‌رش؛ ب: الگوی عناصر کمیاب خاکی به هنجار شده نسبت به کندریت (Boynton, 1984) برای نمونه‌های برداشت شده از واحدهای آتشفشانی (متاتوف ریولیتی) در این محدوده.

Fig. 13: a: Chondrite-normalized trace element distribution diagram (Thompson, 1982) for samples collected from the volcanic (metarhyolitic) units hosting mineralization in the Bardeh-Rash area; b: Chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns (Boynton, 1984) for samples from the volcanic (metarhyolitic) units in this area.

سانتی‌گراد) دارای آنومالی‌های مثبت قوی یوروپیم هستند، در حالی که سیالات با دمای پایین‌تر (کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) فاقد آنومالی یا دارای آنومالی‌های مثبت ضعیف یوروپیم می‌باشند (Basta et al, 2011). تغییر در نسبت سیال گرمایی به آب دریا، همراه با تحرک‌پذیری عنصر یوروپیم در دماهای بالاتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در طی فرآیندهای دگرسانی یا دگرگونی کانسنگ‌ها، می‌تواند منجر به تغییر در شدت آنومالی یوروپیم گردد (Bolhar et al, 2004). بنابراین، آنومالی‌های مثبت و ضعیف یوروپیم در کانسار مورد مطالعه، با سیستم‌های آتشفشانی - رسوبی کم‌عمق و با دمای پایین (کمتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) سازگاری دارد (Bau and Dulski, 1996; Bolhar et al, 2004; Planavsky et al, 2010; Basta et al, 2011). علاوه بر این، این پنج نمونه کانسنگ آهن، الگوی مشابهی از نظر فراوانی LREE با نمونه‌های برداشت شده از سنگ‌های متاتوف ریولیتی میزبان نشان می‌دهند (شکل ۱۴ ب).

الگوهای عناصر نادر خاکی (REE) در نمونه‌های کانسنگ آهن برداشت شده از کانسار برده‌رش، شامل پنج نمونه از افق‌های II و III است (جدول ۲ و ۳) که با روش ICP-MS مورد آنالیز قرار گرفته‌اند. مقادیر این نمونه‌ها نسبت به کندریت (Boynton, 1984) به‌هنجار شده‌اند (شکل ۱۴ الف). تمامی این پنج نمونه کانه‌دار، الگوی غنی‌شدگی در عناصر نادر خاکی سبک (LREE) با نسبت محدود LREE/HREE و آنومالی مثبت نسبت به Eu را نشان می‌دهند. آنومالی مثبت Eu می‌تواند نشان‌دهنده شرایط اکسیدان در محیط تشکیل کانه‌زایی باشد. همچنین آنومالی‌های مثبت و بارز عنصر یوروپیم (Eu) در کانسارهای آهن آرکن و پالئوپروتروزوئیک، نشان‌دهنده تأثیر سیالات گرمایی منشأ گرفته از پهنه‌های گسترش کف اقیانوس بر آب‌های اقیانوسی است (Bau and Dulski, 1996; Bolhar et al, 2004; Planavsky et al, 2010). به‌طور خاص، سیالات گرمایی با دمای بالا (بیش از ۲۵۰ درجه





شکل ۱۴: الف: الگوی توزیع عناصر نادر خاکی (REE) به‌هنجار شده نسبت به ترکیب کندریتی (Boynton, 1984) برای نمونه‌های کانسنگ آهن در محدوده برده‌رش؛ ب: الگوی توزیع عناصر نادر خاکی به‌هنجار شده نسبت به ترکیب کندریتی برای نمونه‌های کانسنگ آهن و متاتوف‌های ریولیتی میزبان کانی‌سازی در این کانسار.

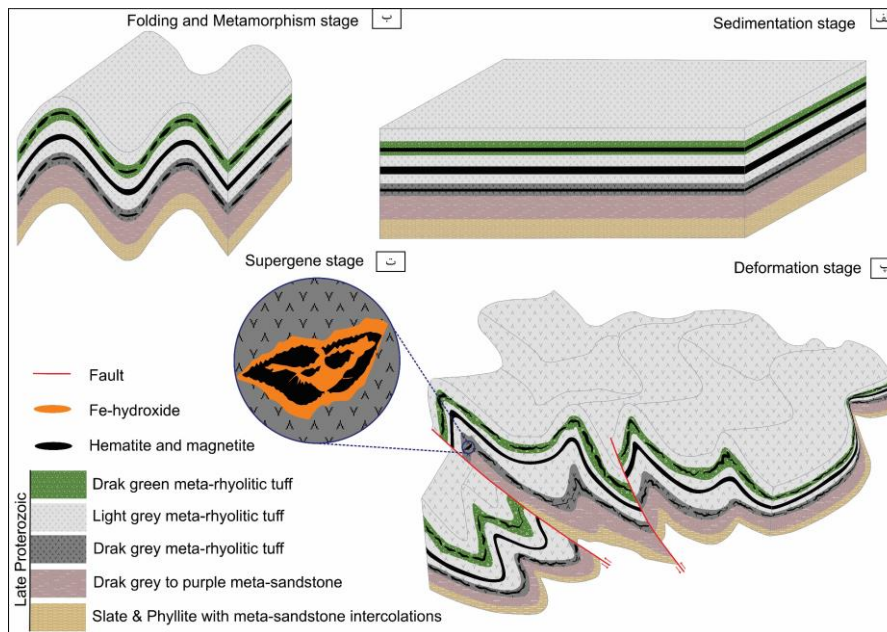
Fig. 14: a: Chondrite-normalized rare earth element (REE) distribution patterns (Boynton, 1984) for iron ore samples from the Bardesh Rash area; b: Chondrite-normalized REE distribution patterns for both iron ore samples and the metarhyolitic host rocks of mineralization in this deposit.

- رسوبی پهنه سنندج - سیرجان، روند تکوین و تکامل کانسار آهن برده‌رش را می‌توان در ۴ مرحله خلاصه نمود (شکل ۱۵: ۱) مرحله اول: این مرحله با شکل‌گیری توالی‌های آتشفشانی - رسوبی در منطقه همراه بوده و کانه‌زایی اولیه آهن همزمان با تشکیل واحدهای میزبان به وقوع پیوسته است (شکل ۱۵ الف). ژئومتری لایه‌ای - عدسی‌شکل کانسنگ‌های آهن، همراه با ساخت و بافت‌های متنوع از جمله دانه‌پراکنده، کلوفرم، نواری - لامینه‌ای و توده‌ای و هم‌راستایی آن‌ها با برگوارگی‌های دگرگونی واحدهای میزبان، حاکی از تنش‌ست هم‌زمان ماده معدنی با تشکیل واحدهای میزبان در طی فعالیت‌های آتشفشانی - برون‌دمی است. ۲) مرحله دوم: در این مرحله، واحدهای سنگی منطقه تحت تأثیر دگرگونی در حد رخساره شیست سبز و گاه متحمل دگرشکلی شده‌اند که حاصل آن تبلور دوباره کانه‌زایی نسل اول است (شکل ۱۵ ب). شواهدی نظیر چین‌خوردگی در نوارهای هماتیت - باریت - کوارتز در افق‌های (I) و (II) و همچنین در نوارهای مگنتیت و هماتیت در همراهی با مقادیر جزئی پیریت در افق (III)، همراه با ساختارهای سیگموئیدال، بودین‌شدگی، رشد در سایه فشاری و انحراف برگوارگی اطراف بلورهای دانه‌پراکنده هماتیت در سنگ‌های میزبان، همگی گواهی بر تأثیر دگرگونی و گاه دگرشکلی پس از رخداد کانه‌زایی اولیه هستند. علاوه بر این؛ تبلور مجدد بلورهای کوارتز، باریت و هماتیت نیز بر شدت این فرآیندها دلالت دارد. ۳) مرحله سوم: در این مرحله، دگرشکلی و فرآیندهای کوه‌زایی شدت

**تعیین ژنز و مراحل تکوین و تکامل کانسار برده‌رش**  
ویژگی‌های زمین‌شناسی، هندسه کانی‌سازی، ساخت و بافت، کانی‌شناسی و ژئوشیمی کانسار آهن برده‌رش حاکی از آن است که این ذخیره همانند سایر ذخایر مشابه (Smirnov et al, 1983; Ashley et al, 1998; Roy and Venkatesh, 2009; Wu et al, 2016) در رده کانسارهای آهن آتشفشانی - رسوبی دگرگون‌شده و دگرشکل شده قرار می‌گیرد. شواهد متعددی از جمله هندسه لایه‌ای و عدسی‌شکل کانسنگ، وجود ساخت و بافت‌های متنوع نظیر دانه‌پراکنده، نواری - لامینه‌ای، توده‌ای و گل‌کلمی (کلوفرم) مؤید آن است که فرآیند تنش‌ست ماده معدنی به صورت هم‌زمان با تشکیل واحدهای میزبان رخ داده است. علاوه بر این، هم‌روندی ماده معدنی با برگوارگی سنگ‌های میزبان و حضور چین‌خوردگی‌های مشابه در هر دو واحد، تأییدی دیگر بر هم‌زمانی کانی‌سازی با تکتونیک حاکم بر محیط تشکیل‌دهنده کانسار است. کانی‌سازی‌های مشابه با کانسار آهن برده‌رش در سایر بخش‌های کشور، از جمله ذخایر آهن شمال‌غرب بوکان (Karimi et al, 2021)، پهنه‌های کانه‌دار تکاب - تخت سلیمان - انگوران (Ghaderi Piraghom et al, 2020; Tofighi et al, 2018) و محور سلطانیه - مهاباد (Ghorbani, 2013) شناسایی شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل از مشاهدات صحرایی، مطالعات سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، بررسی‌های ریزساختاری و تحلیل روابط پاراژنتیکی میان کانی‌ها و کانه‌ها در کانسار برده‌رش و همچنین مقایسه آن با سایر کانی‌سازی‌های آهن آتشفشانی

چهارم: این مرحله شامل هوازدگی و اکسایش کانه‌های اکسیدی (هماتیت و مگنتیت) و نیز مقادیر جزئی پیریت است که به تشکیل ترکیبات هیدروکسیدی آهن منجر شده است (شکل ۱۵ ت).

بیشتری یافته و منجر به شکل‌گیری یک سیستم چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی شده‌اند. در این مرحله، عملکرد سامانه گسلی توسعه یافته و باعث جابجایی واحدها در مقیاس ناحیه‌ای شده است (شکل ۱۵ پ). (۴) مرحله



شکل ۱۵: مراحل تکوین و تکامل کانه‌زایی کانسار آهن برده‌رش به صورت شماتیک نمایش داده شده است؛ الف: در مرحله نخست، توالی آتشفشانی - رسوبی منطقه شکل گرفته و کانه‌زایی آهن به‌طور هم‌زمان با واحدهای میزبان، به صورت لایه‌ای و عدسی تشکیل شده است؛ ب) در ادامه، فرایندهای کوهزایی موجب ایجاد چین‌خوردگی و دگرگونی یکسان در واحدهای میزبان و ماده معدنی شده‌اند که ساختار اولیه کانسنگ تحت‌تأثیر قرار گرفته است؛ پ: با افزایش شدت دگرگونی در مراحل بعدی، دگرشکلی نیز تشدید شده و در نتیجه، فرایندهای گسل‌خوردگی و جابه‌جایی واحدهای سنگی رخ داده است؛ ت: هوازدگی و اکسایش کانه‌های هماتیت و مگنتیت منجر به تشکیل ترکیبات هیدروکسیدی آهن شده است.

Fig. 15: Schematic illustration of the stages of formation and evolution of iron mineralization in the Bardeh Rash deposit: a: In the initial stage, a volcano-sedimentary sequence developed in the area, during which stratiform and lens-shaped iron mineralization formed contemporaneously with the host units; b: Subsequently, orogenic processes led to folding and regional metamorphism of both the host rocks and the ore body, modifying the primary texture of the mineralization; c: With increasing metamorphic intensity, deformation was intensified, resulting in faulting and displacement of rock units; d: Weathering and oxidation of hematite and magnetite led to the formation of iron hydroxide phases.

### نتیجه‌گیری

را می‌توان در دسته کانسارهای آهن آتشفشانی - رسوبی دگرگون و دگرشکل شده طبقه‌بندی کرد. شواهدی از جمله ژئومتری لایه‌ای عدسی‌شکل و ساخت و بافت‌های نواری، توده‌ای و دانه‌پراکنده کانسنگ‌ها در هر سه افق ماده معدنی، نشان‌دهنده تهنشست آنها هم‌زمان با تشکیل واحدهای آتشفشانی - رسوبی میزبان است. کانسنگ‌های آهن و سنگ‌های میزبان آنها پس از تشکیل، متحمل دگرگونی (در رخساره شیبست سبز) و دگرشکلی شده و کانه‌زایی اولیه مورد رونقشی این دو فرایند قرار گرفته است. وجود ساختارهای بودین‌شدگی، چین‌خوردگی و

سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی دگرگون شده با سن پروتروزوئیک پسین، که در شمال غرب پهنه سندج - سیرجان رخنمون دارند، میزبان تعدادی از ذخایر آهن (از جمله کانسارهای آهن قالوزندان، قادرآباد و برده‌رش) هستند که اغلب به صورت چینه‌سان در واحدهای توفی دگرگون شده (متاتوف) رخداد دارند. مطالعه ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت ماده معدنی در کانسار آهن برده‌رش نشان می‌دهد که این ذخیره معدنی

متاتوفهای ریولیتی میزبان اصلی کانی‌سازی، مورد توجه و مطالعه بیشتر قرار گیرد. بر این اساس، مناطقی از پهنه سندنج - سیرجان که به لحاظ ویژگی‌های زمین‌شناسی، سنگ‌شناختی و ژئوشیمی مشابه با محدوده کانساری مورد مطالعه بوده و با سنگ‌های آتشفشانی رسوبی پروتروزوئیک بالایی (معادل سازندهای کهر و قره‌دش) و با ترکیب غالب اسیدی همراه باشند، مستعد میزبانی ذخایر آهن چینه‌سان مشابه با محدوده برده‌رش (و نیز قالوزندان و قادرآباد) محسوب می‌شوند.

### سپاسگزاری

این پژوهش، برگرفته از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد نگارنده اول در دانشگاه تربیت مدرس است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب قدردانی و سپاس خویش را از دانشگاه تربیت مدرس به واسطه فراهم آوردن زمینه‌های علمی و پژوهشی لازم، ابراز دارند.

خردشدگی در کانسنگ‌های اولیه، به همراه ساختارهای سیگما، رشد در سایه فشاری و دور زدن برگوارگی اطراف بلورهای هماتیت و نیز تبلور مجدد بلورهای کوارتز - باریت و هماتیت بیانگر عملکرد دگرشکلی و دگرگونی بعد از تشکیل کانه‌زایی است. ژئوشیمی کانسنگ‌های آهن‌دار، مشابه با دیگر کانسارهای آهن آتشفشانی - رسوبی، از منشأ رسوبی - گرمابی کانه‌زایی حمایت می‌کنند. ژئوشیمی سنگ‌های میزبان نیز گویای این است که ترکیب ماگمای اولیه ریولیتی بوده و در یک محیط فرورانشی مرتبط با کمان‌های ماگمایی تشکیل شده است؛ از این رو در کانسار آهن برده‌رش، موقعیت و جایگاه چینه‌ای کانسنگ‌های آهن توسط سنگ‌های آتشفشانی با ماهیت اسیدی (متاریولیت‌ها و توف‌های وابسته) که معادل سازندهای کهر و قره‌دش با سن پروتروزوئیک بالایی می‌باشند، کنترل شده است؛ لذا پیشنهاد می‌گردد موقعیت چینه‌نگاری افق‌های کانه‌دار جهت اکتشاف منطقه‌ای و ناحیه‌ای، به‌ویژه در زیرپهنه کاملاً دگرشکل شده از پهنه سندنج - سیرجان به دلیل حضور

### References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros (Iran): Constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences*, v. 94, p. 401-419.
- Akbarpour, A., Ghalamghash, J., Azizi, H. and Sadeghi, B., 2024. Mineralogy, geochemistry and mineralization of iron ore deposition in NW Sanandaj-Sirjan Geological Zone: A futuristic review based on a representative case study. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 259, 107427. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107427>.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of Zagros Orogenic Belt of Iran, new data and interpretation. *Tectonophysics*, v. 229, p. 211-238.
- Ashley, P.M., Lottermoser, B.G. and Westaway, J.M., 1998. Iron-formation and epigenetic ironstones in the Palaeoproterozoic Willyama Supergroup, Olary Domain, South Australia. *Mineralogy and Petrology*, v. 6, p. 187-218.
- Bas, M.L., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, v. 27(3), p. 745-750.
- Basta, F.F., Maurice, A.E., Fontboté, L. and Favarger, P.Y., 2011. Petrology and geochemistry of the banded iron formation (BIF) of Wadi Karim and Um Anab, Eastern Desert, Egypt: implications for the origin of Neoproterozoic BIF. *Precambrian Research*, v. 187(3-4), p. 277-292.
- Bau, M. and Dulski, P., 1996. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, v. 79(1-2), p. 37-55.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 18, p. 210-265.
- Bolhar, R., Kamber, B.S., Moorbath, S., Fedo, C.M. and Whitehouse, M.J., 2004. Characterisation of early Archaean chemical sediments by trace element signatures. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 222(1), p. 43-60.
- Boynnton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: *Developments in Geochemistry*, v. 2, p. 63-114.
- Dokuz, A., Tanyolu, E. and Genc, S., 2005. A mantle and a lower crust derived bimodal suite in the Yusufeli Artvin area, NE Turkey: Trace element and REE evidence for Subduction-related rift origin of Early Jurassic Demirkent intrusive complex. *International Journal of Earth*
- Eftekhari-Nezhad, J., 1973. The Mahabad Quadrangle Map (scale 1:250,000). Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran (In Persian).
- Ghaderi Piraghoum, Z., Kouhestani, H. and Tofighi, F., 2020. Geology, geochemistry and genesis of the Kosaj Fe occurrence, Takab-Takht-e

- Soleiman–Angouran metallogenic zone, SW Zanjan. *Advanced Applied Geology*, v. 10(3), p. 294-313.
- Ghaderi, Z., 2019. Geology, geochemistry and genesis of Kousaj iron mineralization, SW Zanjan. Unpublished MSc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 74 p (In Persian).
- Ghorbani, M., 2013. *The Economic Geology of Iran: Mineral Deposits and Natural Resources*. Springer Geology, Berlin, 542 p.
- Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Shafaroudi, A.M. and Mazaheri, S.A., 2015. Alteration–mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, v. 65, p. 545-563.
- Jami, M., Dunlop, A.C. and Cohen, D.R., 2007. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite–magnetite deposit, Central Iran. *Economic Geology*, v. 102, p. 1111-1128.
- Karimi, P., Tajeddin, H.A., Rastad, E. and Madanipour, S., 2021. Geology and geochemistry of Bukan iron ore deposits, Ductile Shear Zone, Northwest Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen*, p. 121-144.
- Karimpour, M.H., 1989. *Applied Economic Geology*. Javid Publication, Mashhad, Iran (In Persian).
- 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*, v. 6, p. 2657-293 (In Persian).
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L. and Sahandi, M.R., 2003. Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj–Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 21(4), p. 397-412.
- Momenzadeh, M., 1978. Pb and Zn mineralization in Cretaceous carbonate Malyier-Isfahan Trend. PhD thesis, Heidelberg University, Germany, 286 p.
- Motevali, K., Ghaderi, M. and Rashidnejad-Omran, N., 2006. Structural and textural studies and genesis of mineralogy, Khosrow-Abad Iron Deposit, NE Kermanshah. *Journal of Earth Science*, v. 15(60), p. 110-119 (In Persian).
- Nabatian, G., Li, X.H., Honarmand, M. and Melgarejo, J.C., 2017. Geology, mineralogy and evolution of iron skarn deposits in the Zanjan district, NW Iran: Constraints from U-Pb dating, Hf and O isotope analyses of zircons and stable isotope geochemistry. *Ore Geology Reviews*, v. 84, p. 42-66.
- Nabatian, G., Rastad, E., Neubauer, F., Honarmand, M. and Ghaderi, M., 2015. Iron and Fe–Mn mineralisation in Iran: Implications for Tethyan metallogeny. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 62, p. 211-241.
- Nagudi, B., Koeberl, C. and Kurat, G., 2003. Petrography and geochemistry of the Singo granite, Uganda, and implications for its origin. *Journal of African earth sciences*, v. 36(1-2), p. 73-87.
- Omrani, J. and Khabaznia, A.R., 2003. Geological map of Alut, scale 1:100,000. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (In Persian).
- Pearce, J. A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, v. 100(1-4), p. 14-48.
- Pearce, T.H., Gorman, B.E. and Birkett, T.C., 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 36(1), p. 121-132.
- Planavsky, N., Bekker, A., Rouxel, O.J., Kamber, B., Hofmann, A., Knudsen, A. and Lyons, T.W., 2010. Rare earth element and yttrium compositions of Archean and Paleoproterozoic Fe formations revisited: new perspectives on the significance and mechanisms of deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 74(22), p. 6387-6405.
- Rao, T.G. and Naqvi, S.M., 1995. Geochemistry, depositional environment and tectonic setting of the BIF's of the Late Archaean Chitradurga Schist Belt, India. *Chemical Geology*, v. 121(1-4), p. 217-243.
- Rostami-Paydar, G., Amiri, A., Lotfi, M. and Ghaderi, M., 2010. Geochemistry and origin of Galali iron deposit, NW Hamedan. In: 1st Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran (In Persian).
- Roy, S. and Venkatesh, A.S., 2009. Mineralogy and geochemistry of banded iron formation and iron ores from eastern India with implications on their genesis. *Science*, v. 118, p. 619-641.
- Saki, A., 2010. Proto-Tethyan remnants in northwest Iran: Geochemistry of the gneisses and metapelitic rocks. *Gondwana Research*, v. 17, p. 704-714.
- Saunders, A.D., Storey, M., Kent, R.W. and Norry, M.J., 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 68(1), p. 41-60.
- Schandl, E.S. and Gorton, M.P., 2002. Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology*, v. 97(3), p. 629-642.
- Shand, S.J., 1943. *Classic A/CNK vs A/NK plot for discriminating metaluminous, peraluminous and peralkaline compositions*, John Wiley, New York, 444 p.
- Smirnov, V.M., Ginzburg, A.I., Grigoriev, V.M. and Yakovlev, G.F., 1983. *Studies of Mineral Deposits*. Mir Publishers, Moscow, 288 p.

- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonic of Iran: A review. AAPG Bulletin, v. 52, p. 1229-1258.
- Tajeddin, H., 2011. Ore controlling parametrs of gold mineralization in the metamorphic rocks of SagezSardasht area, NW Sanandaj-Sirjan zone. Unpublished Ph.D. Thesis, Tarbiat-Modares University, Tehran, Iran.
- Thompson, R.N., 1982. Magmatism of the British Tertiary volcanic province. Scottish Journal of Geology, v. 18(1), p. 49-107.
- Tofighi, F., Mokhtari, M.A.A., Izadyar, J. and Kouhestani, H., 2019. Geology and genesis of Halab 2 Fe occurrence in Takab–Takht-e-Soleiman–Angouran metallogenic zone. Advanced Applied Geology, v. 8(27), p. 44-59 (In Persian).
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J.F., Zhao, Z.H., Jian, P., Xiong, X.L., Bao, Z.W., LI, C.F. and Bai, Z.H., 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui province (Eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. Lithos, v. 89, p. 1-26.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, v. 95(1), p. 185-187.
- Willson, M., 1989. Igneous petrogenesis. A global tectonic approach. Unwin Hyman, London, 466 p.
- 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, v. 58(11), p. 1398-1416.
- Zamanian, H. and Radmard, K., 2016. Geochemistry of rare earth elements in the Baba Ali magnetite skarn deposit, western Iran – A key to determine conditions of mineralisation. Geologos, v. 22, p. 33-47.
- Zandi, Z., Jafari Rad, A.R., Gourabjeripour, A. and Lotfi, M., 2018. Mineralization, mineralogy and geochemistry of Saheb Fe-Cu deposit of Saqqez (Kurdistan), NW Iran. Open Journal of Geology, v. 8, p. 514-528.