



## Geochemical and mineralogical evidence on genesis of the Kal-Baneh Mn deposit, north-west of Jiroft, Kerman province

Mohammad Hossein Sedghi Deh Ziyari <sup>1</sup>, Balandeh Aminzadeh <sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article History

Received: 06 April 2022  
 Revised: 09 November 2022  
 Accepted: 09 November 2022

#### Keywords

mineralogy  
 geochemistry  
 Kal-Baneh  
 Mn deposit  
 Jiroft  
 Sanandaj-Sirjan zone

#### \* Corresponding author

Balandeh Aminzadeh  
 ✉ [aminzadeh85@uk.ac.ir](mailto:aminzadeh85@uk.ac.ir)

### ABSTRACT

The Kal-Baneh Mn deposit is located 56 km northwest of Jiroft city in the southeast of the Sanandaj-Sirjan Zone. The ore mineralization occurs as layered, banded, massive, and disseminated textures within radiolarian cherts of the upper parts of the Esfandaghe ophiolitic complex. The mineralogy is simple and ores consist mainly of pyrolusite and braunite, with trace amounts of hausmannite and hematite. The main gangue minerals are quartz and calcite. Geochemical evidence, including relatively high Mn/Fe (mean=89.39), Si/Al ratios (mean=20), Ba concentrations (mean=842.3 ppm), the low contents of Cu (mean=92.07 ppm), Ni (63.38 ppm), Co (mean=13.04 ppm), Zn (mean=68.15 ppm), total REE (28.1-96.13 ppm), negative Ce (Ce/Ce\*: 0.3-0.7), slightly positive Eu (Eu/Eu\*: 0.64-1.35) anomalies, the REE pattern of ore samples, and geochemical data reveal a distal hydrothermal-exhalative source and indicate the combination of hydrothermal solutions with seawater. Geochemical signatures, the geometry of orebodies, the nature of the host rock, mineralogy, and the textural features of the manganese ores are consistent with the submarine hydrothermal-hydrogenous Mn deposits.

### How to cite this article

Sedghi Deh Ziyari, M.H. and Aminzadeh, B., 2022. Geochemical and mineralogical evidence on genesis of the Kal-Baneh Mn deposit, north-west of Jiroft, Kerman province. *Journal of Economic Geology*, 14(3): 95–121. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.2022.76082.1043>



©2022 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

In the submarine environment, Mn-oxide deposits are classified as hydrogenic, diagenetic, and hydrothermal mineralization corresponding to various processes of formation, rate of precipitation, host rocks, geochemical characteristics, and manganese sources in deposits (Öksüz, 2011; Polgari et al., 2012; Bau et al., 2014). The hydrogenetic iron-manganese deposits have been slowly precipitated from seawater (2–10 mm/Ma) (Öksüz, 2011) and consist of polymetallic Fe-Mn crusts. These deposits may be identified by rather high concentrations of trace elements in Mn ores (e.g., Co, Ni, Cu, Mo and Zn) (Choi and Hariya, 1992; Hein et al., 1997; Pelleter et al., 2017). Diagenetic Mn deposits are considered to be a result of buried Mn-oxyhydroxide and occur as nodules. In the burial diagenetic processes, Mn-oxyhydroxide is reduced to Mn<sup>2+</sup> and bicarbonate is derived from the oxidation of organic carbon (Wu et al., 2016). In such a process, the Mn carbonates (e.g., rhodochrosite; Polgari et al., 2012) are hosted in black shales. Mn-oxide deposits have been precipitated from hydrothermal fluids which generally contain a low concentration of trace elements (Choi and Hariya, 1992; Hein et al., 2008). Although hydrothermal Mn-oxide deposits occur as distal of a massive sulfide ore deposit, they show slightly anomalous contents of trace elements (Hein et al., 2008; Pelleter et al., 2017).

The Kal-Baneh Mn deposit is located in the southwest of the Kerman Province, Iran, around 56 km north-west of Jiroft city and 245 km southwest of Kerman in the Sanandaj-Sirjan Zone (Fig. 1). The Sanandaj-Sirjan Zone is one of the main metallogenic provinces in Iran. It hosts several massive sulfides, manganese and ferromanganese deposits. The majority of these deposits are hosted by the Late Triassic to Middle Cretaceous ophiolites. So far, no investigation has been reported on the Kal-Baneh Mn deposit. Nevertheless, petrological studies have been carried out on the southeast margin of the Sanandaj-Sirjan Zone (Sabzehei, 1974; Sabzehei and Youssefi, 2000; Mohajjel and Fergusson, 2000).

In this study, we describe the geological and mineralogical data for the Kal-Baneh Mn-oxide deposit in detail and the textural and structural characteristics of the ore minerals. Major, trace, and rare earth element (REE) contents in ore samples

were determined. The present study aims to recognize the origin of the deposit and mineralization processes.

### Materials and methods

During the fieldwork, more than 90 hand specimens of oxide ores were collected from the Kal-Baneh Mn deposit. 30 polished thin sections of representative ore samples were prepared for petrographic study to establish textures and mineral assemblages of the orebodies. They were investigated by transmitted and reflected light microscopy. 6 samples were analyzed by X-Ray diffraction (XRD) at the Zar Azma Company, Tehran. 13 representative ore samples were crushed by agate mortar. The chemical composition of Mn ores was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

### Results

Strata-bound Mn-oxide mineralization in the Kal-Baneh deposit is hosted by radiolarian cherts from the ophiolitic complex. The main primary ore minerals are pyrolusite and braunite, with trace hausmannite and hematite. The chemical compositions of both Mn ores are given in Tables 1 and 2. Previous studies have reported that among the major oxides, Mn, Fe, Al, Ti, and Si contents are used to discriminate the origin of Mn ores (Karakus et al., 2010; Zarasvandi et al., 2013; Sasmaz et al., 2014; Maghfouri et al., 2017). Table 1 shows that the studied ore samples have Mn contents ranging from 13.18 to 51.8 wt.% (mean=39.7 wt.%), Fe from 0.17 to 2.84 wt.% (mean=0.89 wt.%), Si from 3.8 to 25.6 wt.% (mean=11.76 wt.%), and Al from 0.2 to 4.1 wt.% (mean=1.33 wt.%). All studied ores are characterized by relatively high Mn/Fe (mean=89.39) and Si/Al ratios (mean=20).  $\Sigma$  REE contents of Mn-ores range from 28.1 to 96.13 ppm. The ores studied are characterized by negative Ce anomaly (0.3-0.7) and weak positive Eu anomaly (0.64-1.35).

### Discussion

The high value of Mn/Fe can be applied as a discrimination factor between manganese deposits. For the studied ores, this ratio varies between 4.64 - 290.53 (mean=89.39) and is comparable with the characteristics of hydrothermal deposits, as defined by Nicholson et al. (1997). All studied samples are

characterized by relatively high Mn/Fe ratios comparable with that of hydrothermal Mn deposits, as fractionation of Mn and Fe during hydrothermal transport and mineralization (Xie et al., 2013).

Si/Al ratios of the studied samples range from 2.15 to 102.5 (mean= 20) and are comparable to those of hydrothermal exhalative Mn deposits (Sasmaz et al., 2014; Wu et al., 2016).

The chemical composition of Mn ore samples compared with different types of Mn deposits in the diagrams of Si-Al (Choi and Hariya, 1992), (Co+Ni)-(As+Cu+Pb+V+Zn) (Nicholson, 1992), Co-Ni-Zn (Choi and Hariya, 1992), Fe-Mn-(Ni + Co + Cu) ×10 (Hein et al., 1994), Ce-Zr (Vereshchagin et al., 2019), Ce-(Co + Ni + Cu)/1000 and (Ce/Ce\*)<sub>n</sub>-Nd (Sasmaz et al., 2020) are similar to those of hydrothermal Mn deposits. The REE patterns in the oxide ores from the Kal-Baneh deposit are similar to hydrothermal Mn deposits.

The total REE (ΣREE) contents in the studied samples vary from 28.1 to 96.13 ppm and are characterized by the relative enrichment of LREE/

HREE ratios (Table 2). The low REE contents of ore samples from the Kal-Baneh deposit is compared with hydrothermal Mn deposits (Xie et al., 2013). The Ce/Ce\* and Eu/Eu\* values of Mn oxide ores collected from the study deposit vary from 0.3 to 0.7 and 0.64 to 1.35, respectively. Negative Ce anomaly is the most common characteristic of hydrothermal manganese deposits (Bau et al., 2014). The Mn ore samples have negative Ce anomalies within the Kal-Baneh deposit. The Eu anomalies depend on the temperature of the hydrothermal fluids and the proximity to the hydrothermal source. Large positive Eu anomalies are recognized in high-temperature (> 250 °C) hydrothermal systems at mid-ocean ridges and back-arc spreading centers (Bau and Dulski, 1996; Bau and Dulski, 1999).

Some evidence such as negative Ce anomaly, weak positive Eu anomaly, absence of Fe minerals, and high value of Mn/Fe ratios in the Kal-Baneh deposit support a distal source for the hydrothermal exhalations that are contributions of both hydrothermal and hydrogenous processes.



## شواهد زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی بر پیدایش کانسار منگنز کل - بنه، شمال غرب جیرفت، استان کرمان

محمدحسین صدقی ده‌زیاری<sup>۱</sup>، بالنده امین‌زاده<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
کانسار منگنز کل - بنه در فاصله ۵۶ کیلومتری شمال غرب شهرستان جیرفت، در جنوب شرق پهنه ساختاری سنندج - سیرجان واقع شده است. رخداد کانی‌سازی به صورت لایه‌ای، نواری، توده‌ای و دانه پراکنده در چرت‌های رادیولاریتی بخش بالایی مجموعه افیولیتی اسفندقه رخ داده است. کانی‌شناسی ماده معدنی ساده و شامل پیرولوزیت، براونیت و به مقدار بسیار جزئی هاسمانیت و هماتیت است. کوارتز و کلسیت کانی‌های باطله اصلی را تشکیل می‌دهند. شواهد زمین‌شیمیایی نظیر نسبت‌های بالای Mn/Fe (میانگین ۸۹/۳۹)، Si/Al (میانگین ۲۰)، مقادیر نسبتاً بالای Ba (میانگین ۸۴۲/۳ ppm)، مقادیر پایین Cu (میانگین ۹۲/۰۷ ppm)، Ni (میانگین ۶۳/۳۸ ppm)، Co (میانگین ۱۳/۰۴ ppm)، Zn (میانگین ۶۸/۱۵ ppm) محتوای کم عناصر خاکی نادر <sup>۱</sup> (ppm ۹۶/۱۳ - ۲۸/۱)، ناهنجاری منفی Ce (Ce/Ce*: ۰/۷ - ۰/۳)، ناهنجاری مثبت ضعیف Eu (Eu - ۱/۳۵ - ۰/۶۴: Eu/Eu*)، نحوه توزیع عناصر خاکی نادر در نمونه‌های کانسنگ و نتایج تحلیل‌های زمین‌شیمیایی بیانگر آمیختگی سیال گرمابی با آب دریا به دور از دودکش گرمابی منشأ <sup>۲</sup> در بستر حوضه اقیانوسی است. نتایج داده‌های زمین‌شیمیایی، ژئومتری ماده معدنی، سنگ میزبان، ساخت، بافت و کانی‌شناسی نشان می‌دهد که فرایند کانه‌سازی در کانسار کل - بنه با ذخایر گرمابی - آب‌زاد زیردریایی مطابقت دارد.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸
	<b>واژه‌های کلیدی</b> کانی‌شناسی زمین‌شیمی کل - بنه کانسار منگنز جیرفت پهنه ساختاری سنندج - سیرجان
	<b>* نویسنده مسئول</b> بالنده امین‌زاده <a href="mailto:aminzadeh85@uk.ac.ir">aminzadeh85@uk.ac.ir</a> ✉

### استناد به این مقاله

صدقی ده‌زیاری، محمدحسین و امین‌زاده، بالنده، ۱۴۰۱. شواهد زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی بر پیدایش کانسار منگنز کل - بنه، شمال غرب جیرفت، استان کرمان.

زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴(۳): ۹۵-۱۲۱. <https://doi.org/10.22067/ECONG.2022.76082.1043>

## مقدمه

فلز منگنز در بخش‌های مختلف صنعتی از جمله صنایع متالورژی و غیر متالورژی نقش به‌سزایی دارد. بیشترین کاربرد صنعتی آن در ساخت فولاد است. ذخایر منگنز بر پایه فرایندهای تشکیل، سرعت ته‌نشینی، سنگ میزبان و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی کانسنگ به عنوان ذخایر گرمابی، آب‌زاد، دیاژنزی و زیست‌زادی طبقه‌بندی می‌شوند (Hein et al., 1997; Öksüz, 2011; Polgari et al., 2012). ذخایر منگنز گرمابی، حاصل ته‌نشست منگنز از محلول‌های گرمابی به صورت لایه‌ای تا چینه‌کران و رگه‌ای (Hein et al., 1997) در موقعیت‌های زمین‌ساختی متفاوت، از محیط‌های دریایی تا کمربندهای ماگمایی مربوط به محیط فرورانش تشکیل می‌شوند. ذخایر منگنز آب‌زاد از ته‌نشینی منگنز از آب دریا (با سرعت ته‌نشینی ۲ تا ۱۰ میلی‌متر در میلیون سال) به دور از محیط‌های آتشفشانی تشکیل می‌شوند (Ingram et al., 1990). نسبت Mn/Fe در این ذخایر نزدیک به ۱، حاوی عناصر فرعی مانند مس، کبالت، روی و نیکل ( $> 3000 \text{ ppm}$ )، مجموع عناصر خاکی نادر ( $> 1000 \text{ ppm}$ ) و آنومالی مثبت سریم هستند (Usui and Someya, 1997; Hein et al., 1997; Öksüz, 2012; Surya Prakash et al., 2011). ذخایر منگنز نوع دیاژنزی به صورت نودول هستند که از ته‌نشینی منگنز از آب‌های اشباع از رسوبات تغییر شکل یافته و معمولاً مرتبط با اکسیدشدگی مواد ارگانیک هستند (Klinkhammer et al., 1982; Polgari et al., 2012). کانسارهای حاوی منگنز از آرکئن تا کنون، در حال تشکیل هستند. در ایران بیش از ۴۰ کانسار منگنز و ده‌ها رخداد کانه‌زایی منگنز در واحدهای مختلف زمین‌شناسی گزارش شده است که به دوره‌های نئوپروتریوزوئیک پسین - کامبرین آغازین تا میوسن - پلیوسن محدود می‌شوند (Maghfouri et al., 2019). ذخایر منگنز در ایران بر اساس محل پیدایش آنها در زون‌های ساختاری و سن سنگ میزبان آنها به صورت زیر تقسیم شده‌اند (Maghfouri et al., 2017; Maghfouri et al., 2019):

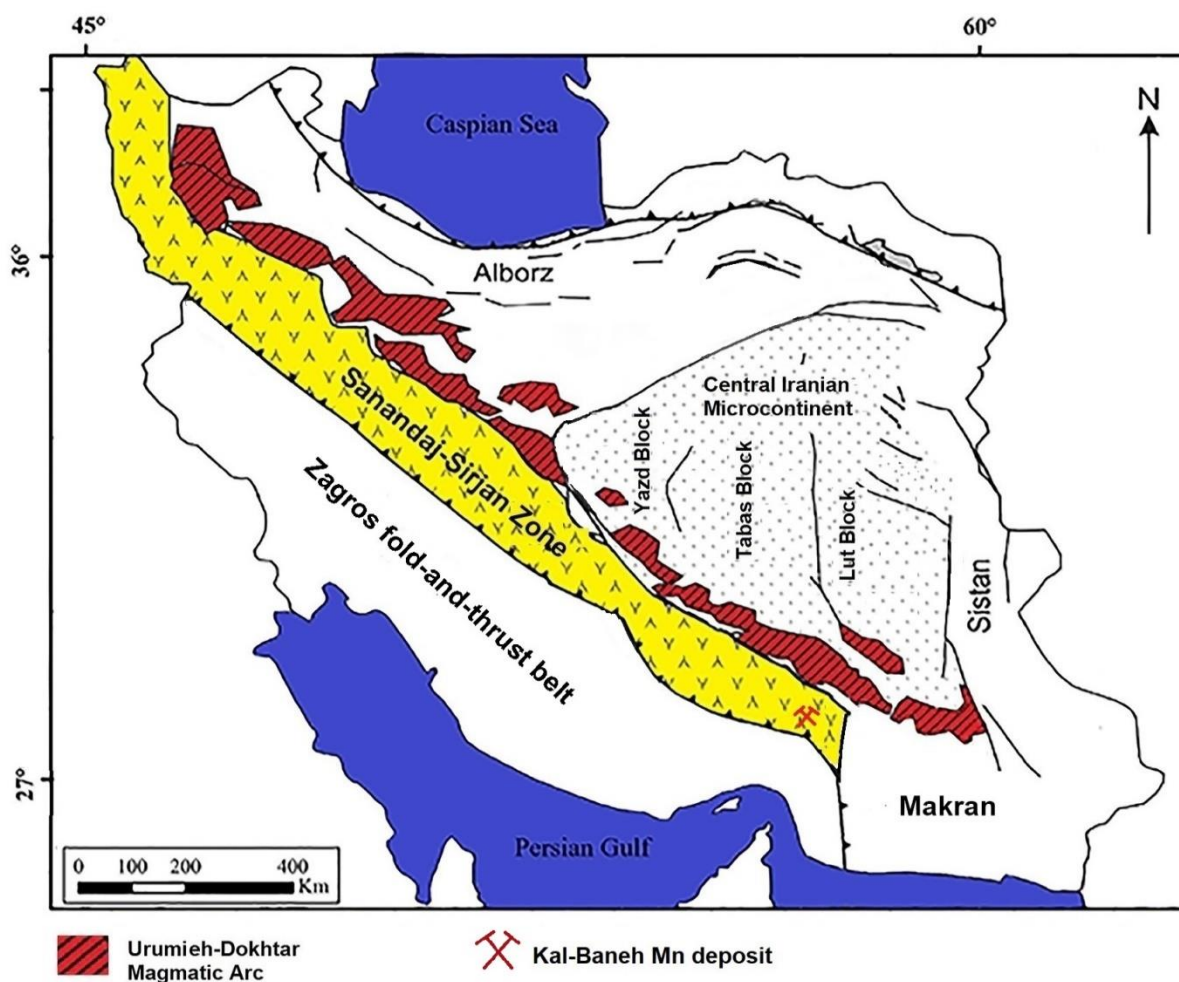
ذخایر منگنز واقع در پهنه ساختاری ایران مرکزی (بلوک پشت‌بادام) مانند کانسار نارینگان با منشأ آتشفشانی - متصاعدی به عنوان یکی از قدیمی‌ترین ذخایر منگنز (کامبرین آغازین) شناسایی شده است (Bonyadi and Moore, 2005; Rajabi et al., 2014).

کانه‌زایی منگنز در زون سبزوار با منشأ گرمابی زیردریایی در توالی آتشفشانی - رسوبی دگرگون‌شده با سن ژوراسیک پیشین مانند کانسار هلالان در زون سبزوار (Mosadegh, 2015)، ذخایر منگنز واقع در نوارهای افیولیتی نظیر کانسار سرخ‌وند در مجموعه افیولیتی کرمانشاه (Zarasvandi et al., 2016)، کانسار منگنز آباده طشک (Rajabzadeh et al., 2017) و کانسار نصیرآباد در افیولیت‌های نیریز (Zarasvandi et al., 2013). ذخایر منگنز آتشفشانی - رسوبی اواخر کرتاسه در جنوب غرب حوضه سبزوار نظیر ذخایر چشمه‌فریزی و چشمه‌سفید (Maghfouri et al., 2017). ذخایر منگنز در نوار ماگمایی ارومیه - دختر و البرز در توالی‌های آتشفشانی - رسوبی سنوزوئیک، به ویژه لاهای آندزیتی - داسیتی نظیر ذخایر ونارچ (Mahdavi et al., 2015)، رباط کریم (Amiri, 1995)، شهرستانک (Maanijou et al., 2015) و گراب (Doulatkhah et al., 2005).

تاکنون در بالاترین ردیف‌های سنگی مربوط به مجموعه‌های افیولیتی (چرت‌های رادیولاریتی و آهک‌های پلاژیک) واقع در پهنه ساختاری سنندج - سیرجان چندین کانسار و رخداد کانه‌زایی منگنز؛ نظیر گوغر و گوشک (Heshmatbehzadi and Shahabpour, 2010) و گدارسبیز (Aminzadeh and Rahimpour, 2021) در نوار افیولیتی ناین - بافت گزارش شده است. کانسار منگنز کل - بنه در جنوب شرق پهنه ساختاری سنندج - سیرجان در چرت‌های رادیولاریتی بخش بالایی مجموعه افیولیتی اسفندقه واقع شده است (شکل ۱). این کانسار در فاصله ۵۶ کیلومتری شمال غرب جیرفت در طول جغرافیایی  $27^{\circ} 18' 57''$  و عرض جغرافیایی  $45^{\circ} 45' 28''$  واقع شده است. بررسی‌های زمین‌شناسی در جنوب شرقی پهنه ساختاری سنندج - سیرجان

این پژوهش، تعیین مدل کانه‌زایی و نحوه تشکیل کانسار منگنز کل-بنه بر پایه بررسی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، بافت و ساخت است.

انجام‌شده است (Sabzehei, 1974; Sabzehei and Youssefi, 2000, Mohajjel and Fergusson, 2000; Badrzadeh et al., 2011)؛ اما تا کنون هیچ بررسی بر روی کانه‌سازی منگنز در کانسار کل-بنه انجام نشده است. هدف از



شکل ۱. نقشه عمومی ساختاری ایران با تغییرات از اشتوکلین (Stöcklin, 1968)، علوی و همکاران (Alavi et al., 1991) و موقعیت منطقه معدنی کل-بنه در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان

Fig. 1. General tectonic map of Iran (modified after Stöcklin, 1968; Alavi et al., 1991) and location of Kal-Baneh mining district in the Sanandaj-Sirjan Zone

سیرجان به صورت یک نوار ماگمایی-دگرگونی دارای روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی با امتداد ۱۵۰۰ کیلومتر و پهنای ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر (Mohajjel and Fergusson, 2000) بین نوار

زمین‌شناسی کانسار منگنز کل-بنه در انتهای جنوب‌شرقی پهنه ساختاری سنندج-سیرجان واقع شده است (شکل ۱). پهنه ساختاری سنندج-

سنگ‌نگاری، کانه‌نگاری، ساخت و بافت کانی‌ها توسط میکروسکوپ پلاریزان مجهز به نور انعکاسی و عبوری Leitz در دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شد. همچنین از روش پراش پرتو ایکس برای تعیین فازهای کانیایی بر روی ۶ نمونه کانسنگ منگنز در آزمایشگاه شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزما استفاده شد. تعداد ۱۳ نمونه انتخاب شده برای انجام آنالیز شیمیایی از کانسنگ توسط سنگ‌شکن فکی خرد شده و سپس توسط آسیاب دیسکی از نوع آگات پودر شد. با توجه به اهمیت زمین‌شیمی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب برای تعیین نوع کانه‌زایی منگنز، تجزیه شیمیایی به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی<sup>۳</sup> در آزمایشگاه شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزما تهران انجام شد. حد تشخیص برای عناصر اصلی ۰/۰۱ تا ۰/۱ درصد، برای عناصر فرعی و کمیاب ۰/۱ تا ۱۰ ppm و برای عناصر خاکی نادر ۰/۰۱ تا ۰/۵ ppm بود.

### کانه‌زایی

بر اساس بررسی‌های صحرایی، نمونه‌دستی و میکروسکوپی، کانه‌زایی در کانسار مورد بررسی در چرت‌های رادیولاریتی بخش بالایی مجموعه افیولیتی رخ داده است. ژئومتری ماده معدنی در منطقه مورد بررسی به صورت چینه‌سان (لایه‌ای) و هم‌روند با واحدهای دربرگیرنده (چرت‌های رادیولاریتی) است. ضخامت لایه‌های منگنزدار بین ۰/۵ تا ۶ متر و طول ۷ تا ۲۷۸ متر، دارای امتداد شمال‌غرب- جنوب شرقی و شرقی- غربی رخ داده است (شکل ۴- A، B و C). لایه‌های منگنزدار در کانسار مورد بررسی در حال بهره‌برداری است (شکل ۴- D).

بر اساس مشاهدات صحرایی و نمونه‌دستی، بافت کانسنگ شامل توده‌ای (شکل ۵- A و B)، دانه پراکنده (شکل ۵- C و D)، نواری (شکل ۵- D و E) و لایه‌ای (شکل ۵- F) است. بافت شاخه درختی یکی از ویژگی‌های کانی منگنز است که در محیط‌های هوازده در سطح یا در تخلخل سنگ‌ها تشکیل می‌شود. بافت نواری شامل تناوب نوارهای تیره غنی از منگنز و

ماگمایی ارومیه- دختر در شمال و کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس در جنوب- غرب قرار گرفته است. حد شرقی این پهنه توسط گسل زندان با روند شمالی- جنوبی مشخص می‌شود. واحدهای سنگی در این ناحیه از قدیم به جدید به شرح زیر است (Sabzehei, 1974; Badrzadeh et al., 2011):

۱) سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک- اوایل مزوزوئیک با سن کامبرین زیرین تا پرمین بالایی و تریاس زیرین که درجه دگرگونی آنها در حد رخساره شیت‌سبز تا آمفیولیت است. این سنگ‌ها شامل شیت‌سبز، کالک شیت‌سبز، کوارتزیت و آمفیولیت هستند.

۲) گدازه‌های بازالتی بالشی با سن احتمالی تریاس بالایی- ژوراسیک زیرین.

۳) تناوبی از آذرآواری‌ها و گدازه‌های پورفیری با ترکیب آندزیتی که بیانگر شروع دوباره فاز آتشفشانی در ژوراسیک است.

۴) گدازه‌ها و سنگ‌های با ترکیب ریوداسیتی، چرت‌های لایه‌ای و رادیولاریتی.

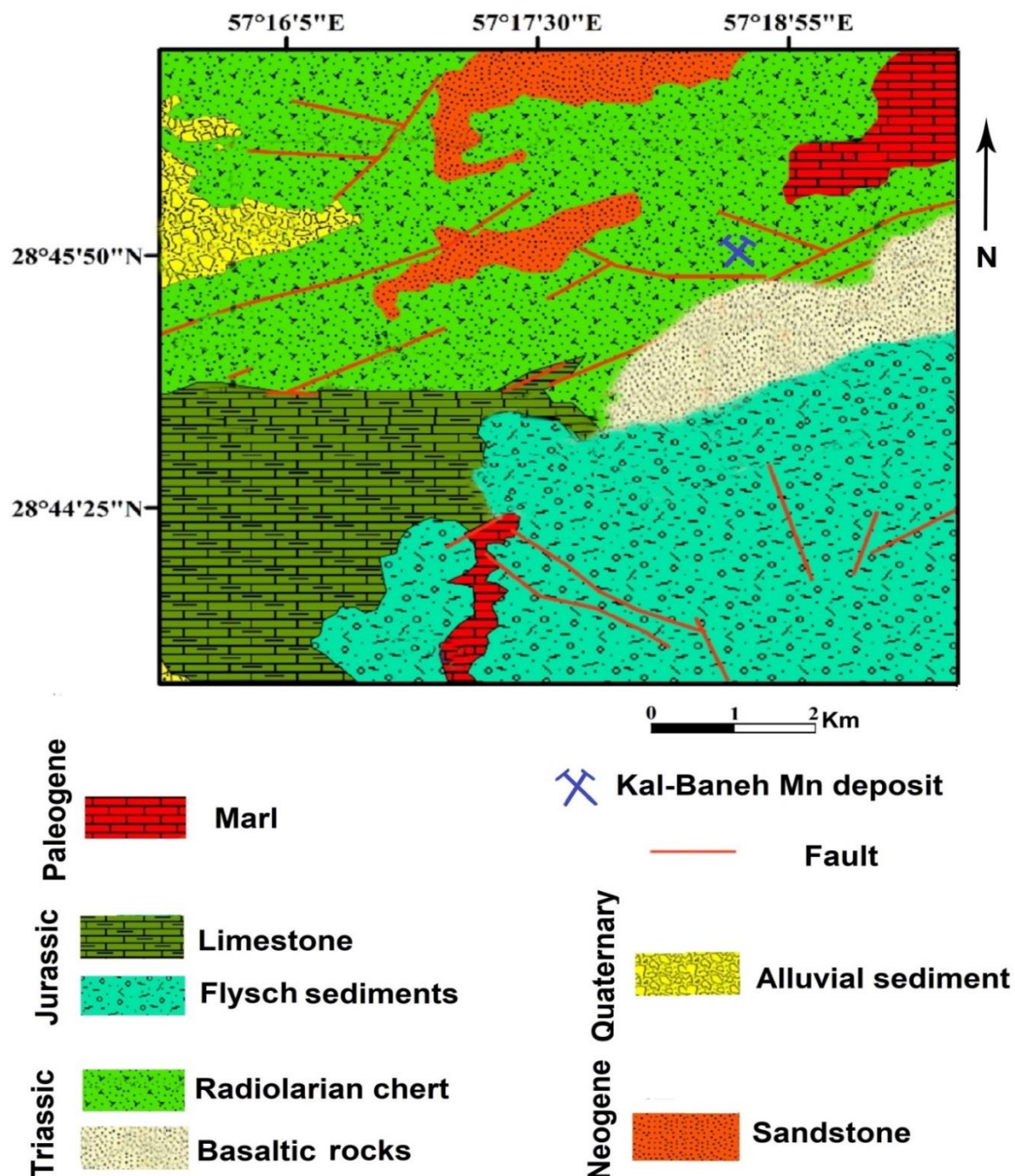
واحدهای سنگی یادشده در بالا در شرق منطقه قرار دارند که در محدوده کانسار مورد بررسی فقط واحدهای گدازه‌های بازالتی و چرت‌های رادیولاریتی حاوی افق دارای کانه‌زایی منگنز (شکل ۲، شکل ۳ و شکل ۴) مشاهده می‌شوند.

۵) واحدهای یادشده توسط سنگ‌های رسوبی ستبر شامل شیل، ماسه سنگ، کنگلومرا و گاهی توف با رخساره فلیشی، آهک‌های لایه‌ای پوشیده می‌شوند.

### روش مطالعه

پس از بررسی‌های صحرایی، تعداد ۹۰ کانسنگ از انواع رخنمون‌های واحدهای کانه‌دار برداشت شد. بررسی‌های آزمایشگاهی به این صورت انجام شده است: برای بررسی کانی‌شناسی و کانه‌نگاری کانسنگ منگنز، تعداد ۳۰ مقطع نازک- صیقلی تهیه و بررسی مقاطع میکروسکوپی برای بررسی

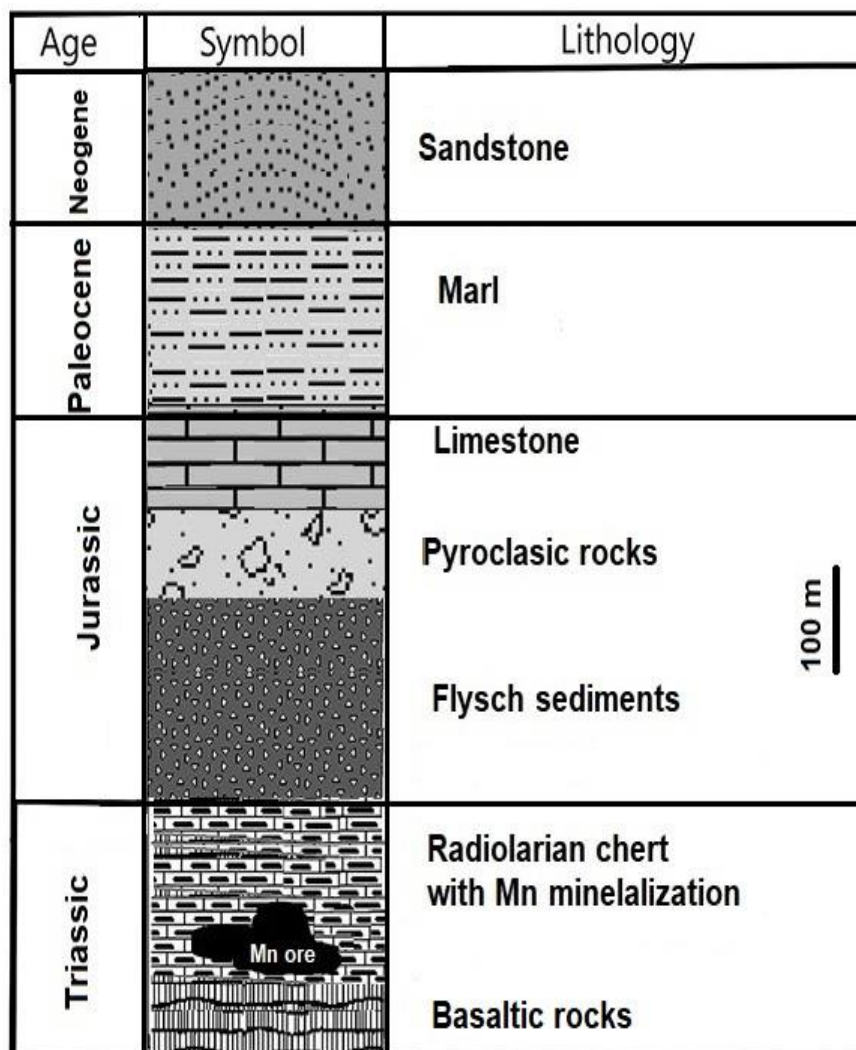
نوارهای قرمز رنگ چرت‌های رادیولاریتی است که به عنوان ناشی از فعالیت فرایندهای گرمایی در منطقه مورد بررسی باشد. شاهدهی برای رسوب‌گذاری کلوئیدی به کار می‌رود و می‌تواند



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ناحیه معدنی کل-بنه پس از تغییرات از شهرکی (Shahraki, 2003)

Fig. 2. Geological map of Kal-Baneh mining district (modified after Shahraki, 2003)



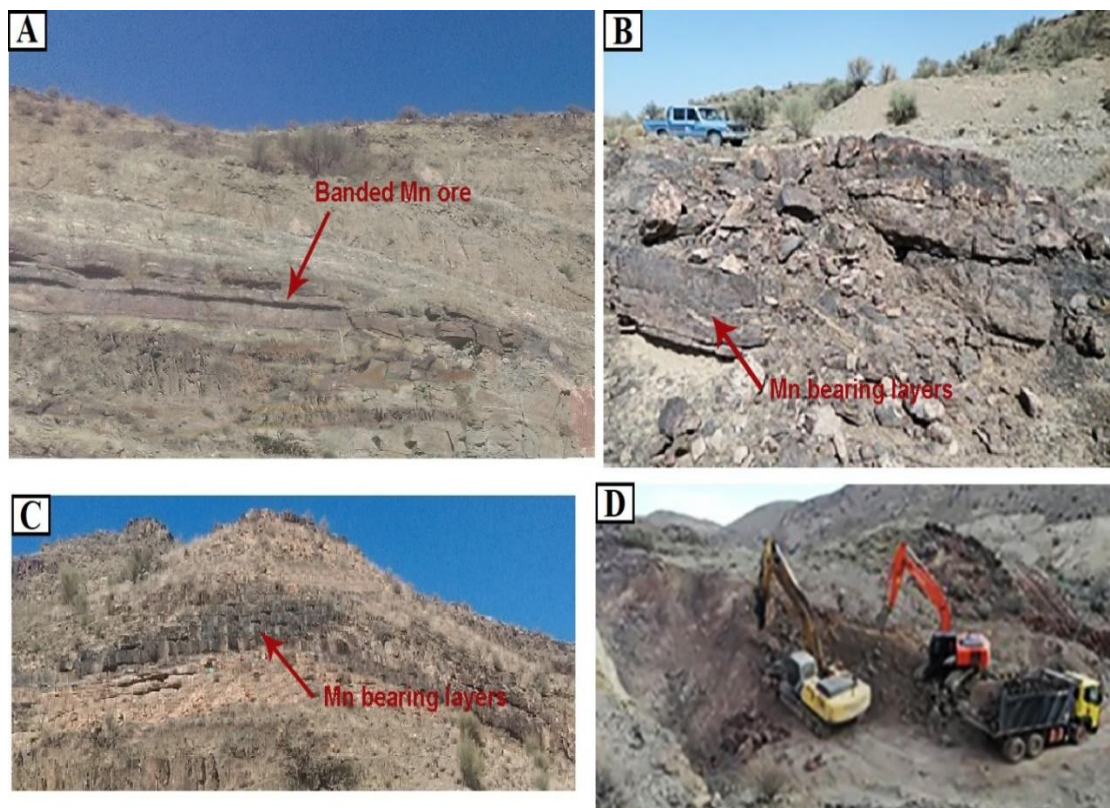


شکل ۳. توالی ستون چینه‌شناسی کلی از ناحیه معدنی کل-بنه

Fig. 3. The generalized lithostratigraphic column of the Kal-Baneh mining district

براونیت (شکل ۶-D و E) به عنوان یکی از کانی‌های اصلی منگنز (از معمول‌ترین کانی‌های منگنز با خاصیت گرمایی) می‌تواند از نشانه‌های کانی‌سازی گرمایی در ناحیه معدنی کل-بنه باشد. آثار میکروفسیل‌های رادیولاریت (شکل ۶-F) در لایه‌های چرت همراه با کانی‌های منگنز در منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد که بخشی از سیلیس موجود در کانسنگ‌های مورد بررسی دارای منشأ زیستی است.

کانی‌شناسی ماده معدنی ساده و شامل سیلیکات و اکسیدهای منگنز است. نتایج به دست آمده از بررسی‌های میکروسکوپی و بررسی به روش پراش پرتو ایکس بر روی کانسنگ منگنز بیانگر وجود کانه‌های پیرولوویت، براونیت و به مقدار بسیار جزئی از هاسمانیت و هماتیت است. کلسیت و کوآرتز، کانی‌های باطله اصلی را تشکیل می‌دهند. بافت‌های مشاهده شده در مقاطع صیقلی، شامل بافت‌های توده‌ای (شکل ۶-A)، رگچه‌ای (شکل ۶-B و C) و انتشاری است. ویژگی‌های بافتی بیان شده و شناسایی



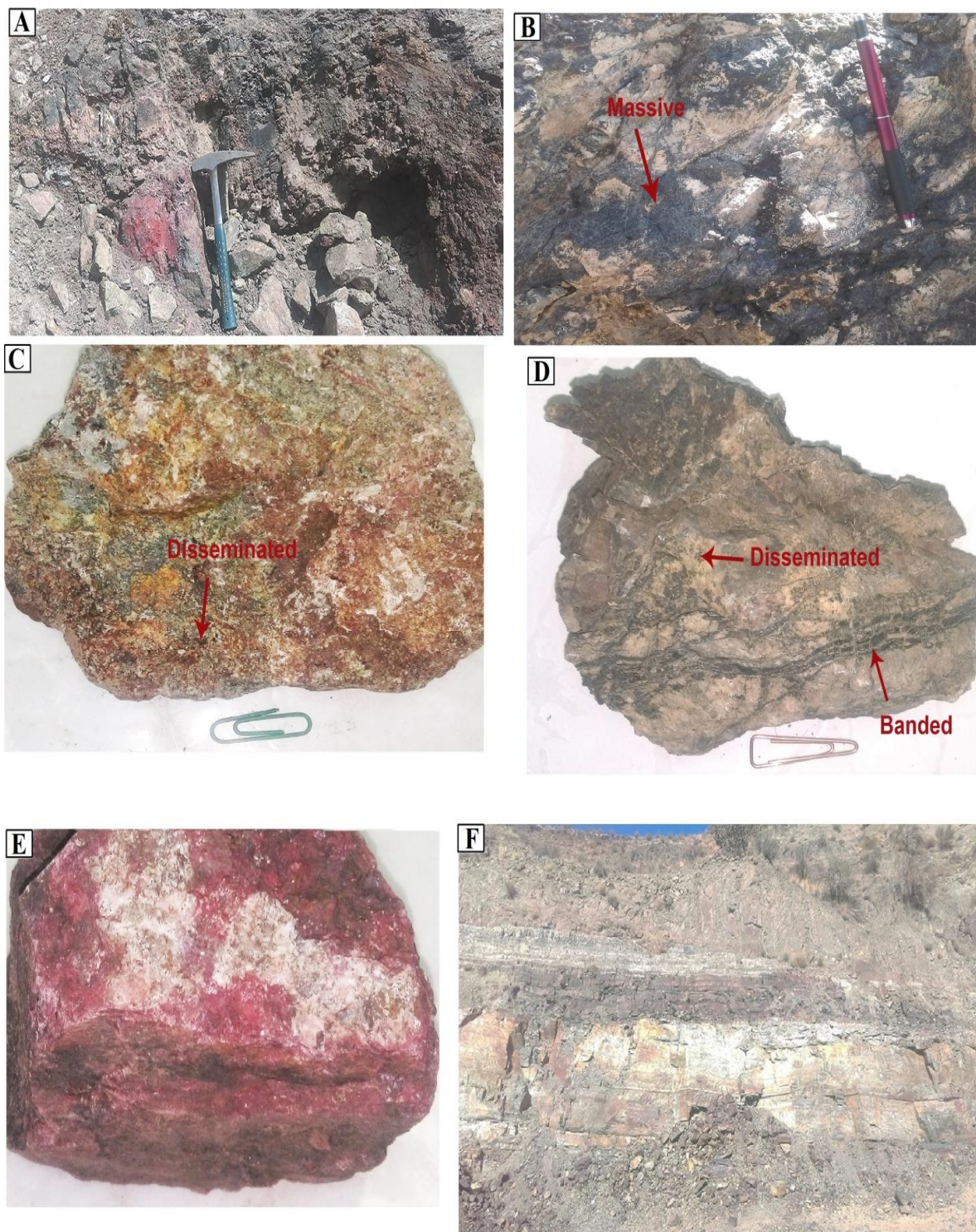
شکل ۴. A, B و C: نمایی از رخنمون لایه‌های منگنزدار به صورت هم‌روند با واحد چرت‌های رادیولاریتی و D: نمایی از رخنمون فعال معدن کل-بنه  
**Fig. 4.** A, B and C: The views of the manganese layers are concurrent with the radiolarian chert unit, and D: Photograph of the Kal-Baneh Mn deposit

### نتایج زمین‌شیمیایی

از معیارهای زمین‌شیمیایی نظیر نسبت عناصر اصلی، غلظت عناصر فرعی، کمیاب و الگوی توزیع عناصر خاکی نادر به طور گسترده‌ای برای تعیین منشأ ذخایر و نهشته‌های منگنز استفاده می‌شود (Polgari et al., 2012; Josso et al., 2017; Yasukawa et al., 2020). نتایج به دست آمده از آنالیز شیمیایی عناصر اصلی، فرعی و خاکی نادر بر روی نمونه‌های کانسنگ برداشت‌شده از کانسار کل-بنه در جدول ۱ و جدول ۲ خلاصه شده است.

یکی از شاخص‌های مهم برای تعیین منشأ ذخایر منگنز، استفاده از غلظت عناصر اصلی نظیر Mn، Fe، Ti، Al و Si است (Karakus et al., 2010; Zarasvandi et al., 2013; Sasmaz et al., 2014; Maghfouri et al., 2017). محتوای

منگنز در نمونه‌های کانسنگ کانسار کل-بنه از ۱۳/۱۸ تا ۵۱/۸ درصد (میانگین ۳۹/۷ درصد) متغیر است. مقادیر آهن در نمونه‌های مورد بررسی نیز از ۰/۱۷ تا ۲/۸۴ درصد (میانگین ۰/۸۹ درصد) تغییر می‌کند. محتوای Si و Al در نمونه‌های مورد بررسی به ترتیب ۳/۸ تا ۲۵/۶ درصد (میانگین ۱۱/۷۶ درصد Si) و ۰/۲ تا ۴/۱ درصد (میانگین ۱/۳۳ درصد Al) است. از بین عناصر فرعی، غلظت عناصر کبالت، باریم، مس، نیکل و روی برای تمایز خاستگاه ذخایر منگنز استفاده می‌شود (Nicholson, 1992; Xie et al., 2013; Josso et al., 2017). در کانسار کل-بنه میانگین غلظت عناصر باریم، کبالت، مس، نیکل و روی به ترتیب ۸۴۲/۳ ppm، ۱۳/۰۴ ppm، ۹۲/۰۷ ppm، ۶۳/۳۸ ppm و ۶۸/۱۵ ppm است.

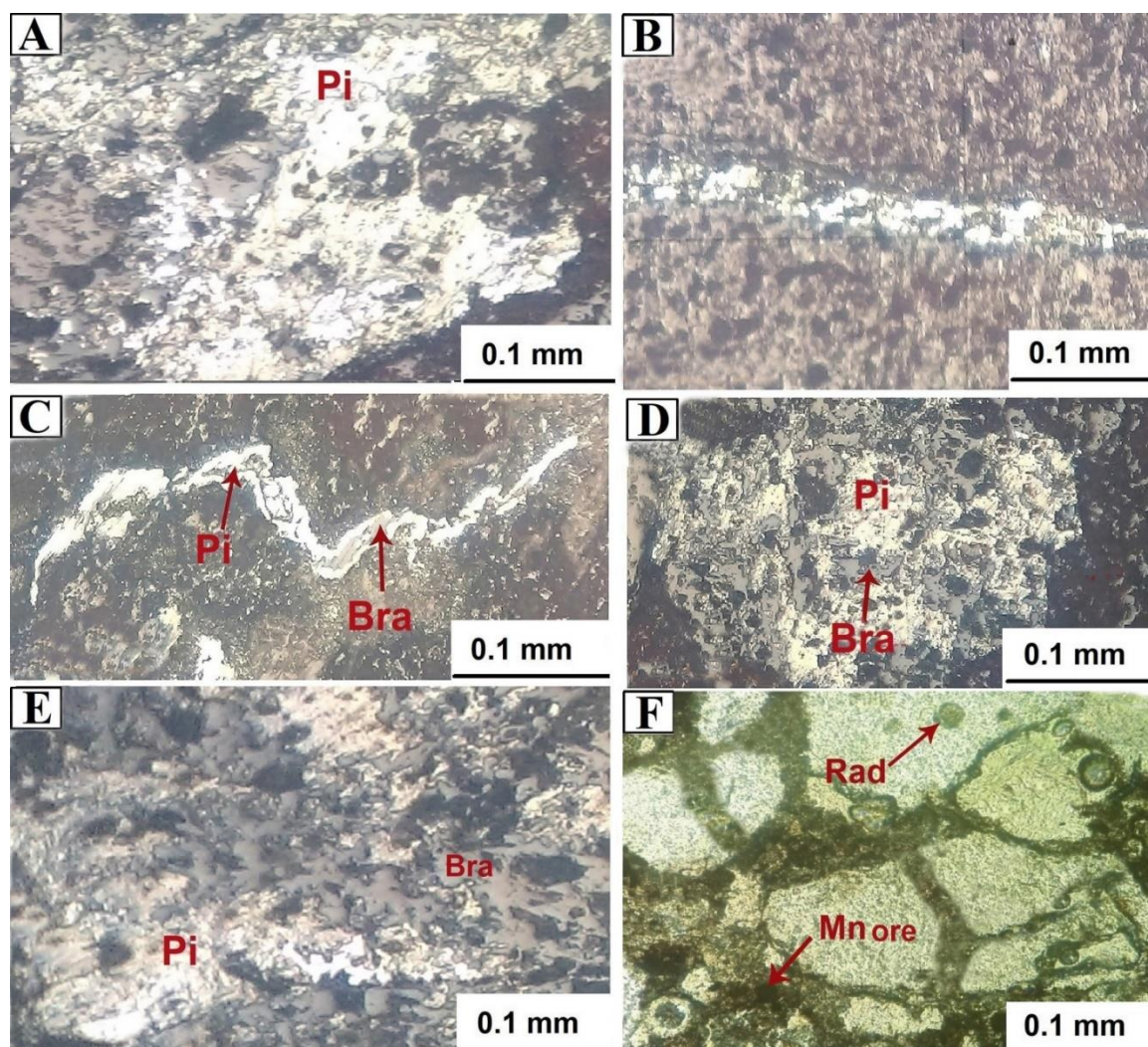


شکل ۵. تصویرهای بافت‌های اصلی در کانسار منگنز کل-بنه. A و B: توده‌ای، C و D: دانه پراکنده، E: نواری و F: لایه‌ای

**Fig. 5.** Photographs of the main ore mineral textures in the Kal-Baneh Mn deposit. A and B: Massive ore, C and D: Disseminated texture, E: Banded manganese ore, and F: Manganese ore layer

نشان‌دهنده مقادیر بهنجار شده با کندریت است (Evensen et al., 1978). آنومالی‌های Eu و Ce در نمونه‌های کانسنگ کانسار کل-بنه به ترتیب ۰/۳ تا ۰/۷ و ۰/۶۴ تا ۱/۳۵ محاسبه شد (جدول ۲).

$\sum$  REE در نمونه‌های مورد بررسی ۲۸/۱-۹۶/۱۳ ppm است (جدول ۲). در این پژوهش، برای محاسبه آنومالی‌های Ce/Ce\* و (Eu/Eu\*) به ترتیب از فرمول‌های  $Eu/Eu^* = Eu_n / (Sm_n \times Gd_n)^{1/2}$  و  $Ce/Ce^* = Ce_n / (La_n \times Pr_n)^{1/2}$  استفاده شد (Taylor and McLennan, 1985). در این فرمول n



**شکل ۶.** تصویرهای میکروسکوپی انعکاسی نشان‌دهنده بافت کانه‌ها در کانسار کل-بنه. A: پیرولوزیت با بافت توده‌ای، B: پیرولوزیت رگچه‌ای، C: پیرولوزیت رگچه‌ای همراه با مقادیر فرعی براونیت، D و E: پیرولوزیت همراه با براونیت، F: چرت نواری حاوی میکروفسیل‌های رادیولاریت همراه با کانی‌های منگنز علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Bra: براونیت، Mn: منگنز، Pi: پیرولوزیت، Rad: رادیولاریت).

**Fig. 6.** Representative photomicrographs in reflected light showing ore textures of ores in the Kal-Baneh Mn deposit. A: Pyrolusite with massive texture, B: Pyrolusite veinlet, C: Pyrolusite veinlet containing minor amounts of braunite, D and E: Pyrolusite association with braunite, and F: Radiolarian fossil-bearing bedded chert associated with Mn minerals. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Bra: Braunite, Pi: Pyrolusite, Mn: Manganese, Rad: Radiolarian fossil).

**جدول ۱.** داده‌های عناصر اصلی (بر پایه درصد وزنی) و فرعی (بر پایه ppm) در نمونه‌های کانسنگ کانسار کل-بنه. (S.N: شماره نمونه، O.T: بافت کانسنگ، B: نواری، D: انتشاری، L: لایه‌ای و M: توده‌ای)

**Table 1.** Major (in weight percent) and trace elements data in ore samples from the Kal-Baneh deposit. (S.N: Sample number, O.T: Ore texture, B: banded, D: disseminated, L: laminated, and M: massive)

S.N	D-1	K-1	K-5	K-6	K-7	K-8	K-10	K-12	S-16	S-23	S-24	S-25	K-20
Si	18.7	5.3	6.1	8.8	3.8	6.9	25.6	14.6	13.2	20.5	3.9	6.4	19.0
Ti	0.07	0.02	0.01	0.01	0.03	0.09	0.19	0.01	0.05	0.01	0.01	0.03	0.07
Al	2.2	0.7	0.3	0.4	1.2	3.2	4.1	0.3	1.8	0.2	0.3	0.7	2.0
Fe	0.98	0.38	0.66	0.17	0.53	0.83	2.84	2.4	0.72	0.25	0.37	0.44	1
Mn	28.2	47.87	46.58	49.4	50.78	42.86	13.18	32.23	39.03	37.67	47.89	51.8	28.74
Mg	0.63	0.23	0.34	0.12	0.31	0.54	0.25	0.78	0.61	0.05	0.29	0.27	0.66
Ca	4.46	5.31	1.56	1.02	1.96	1.75	1.05	2.55	3.89	0.82	4.53	2.92	3.97
Ba	1000	247	199	$\frac{110}{0}$	4100	202	112	35	793	462	900	800	1000
Ni	63	29	197	40	43	43	35	112	34	49	45	69	65
Co	12.4	3.7	6.9	14.4	30.7	14.1	7	30	10.5	3.1	16.6	7.5	12.7
V	12	12	14	13	13	35	17	26	10	26	11	12	12
Zr	24	11	2.5	6	24	36	41	6	29	2.5	7	21	24
Cu	78	234	189	31	85	12	24	22	238	76	41	91	76
Pb	5	4	21	3	21	1	5	0.5	8	19	0.5	2	5
Zn	54	55	177	92	68	77	28	81	55	32	45	67	55
As	149	319.3	113.9	410	312.6	243.6	82	60.8	253.7	273.3	389.7	223	149.9
Mn/Fe	28.7	125.9	70.57	290	95.81	51.63	4.640	13.42	54.20	150.6	129.4	117	28.74
Si/Al	8.5	7.571	20.33	22	3.166	2.156	6.243	48.66	7.333	102.5	13	9.14	9.5
O.T	D	L	B	M	M	L	D	M	L	L	L	L	D

**جدول ۲.** نتایج آنالیز عناصر خاکی نادر در معدن منگنز کل-بنه (ppm) (S.N: شماره نمونه، O.T: بافت کانسنگ، B: نواری، D: انتشاری، L: لایه‌ای و M: توده‌ای)

**Table 2.** Rare earth elements in the Kal-Baneh Mn deposit (ppm) (S.N: Sample number, O.T: Ore texture, B: banded, D: disseminated, L: laminated, and M: massive)

S.N	D-1	K-1	K-5	K-6	K-7	K-8	K-10	K-12	S-16	S-23	S-24	S-25	K-20
La	20	19	11	15	25	14	14	19	23	10	12	15	20
Ce	16	20	4	7	16	7	15	9	18	3	4	15	16
Pr	2.77	3.36	0.83	1.08	3.26	1.4	2.25	2.73	3.24	0.26	0.51	1.77	2.85
Nd	19.9	26.4	12.5	14.1	21.7	15.4	18.9	20	23.2	10.3	11.6	15.6	21.1
Sm	3.84	5.26	1.34	2.26	5.35	2.09	3.1	2.7	3.92	0.75	1.47	3.04	4.2
Eu	1.08	1.37	0.33	0.86	2.1	0.82	0.98	0.93	1	0.35	0.65	1	1.11
Gd	3.25	7.3	1.84	2.57	4.19	2.76	3.24	2.56	4.61	0.95	1.5	3.18	3.49
Tb	0.52	0.9	0.38	0.46	0.67	0.43	0.53	0.4	0.58	0.22	0.31	0.53	0.54
Dy	3.55	5.41	2.41	3.44	5.18	3.11	2.94	2.37	4.04	0.9	1.51	3.8	3.64
Er	1.87	3.21	1.61	2.71	3.32	2.03	1.69	1.38	2.33	0.43	1.01	2.32	1.94
Tm	0.32	0.45	0.28	0.44	0.49	0.35	0.25	0.25	0.37	0.13	0.19	0.36	0.36
Yb	2	3	2	2.7	3.1	1.6	1.5	1.7	2.4	0.6	1.2	2.6	2.1
Lu	0.38	0.47	0.36	0.48	0.55	0.38	0.31	0.33	0.41	0.18	0.25	0.4	0.42
LREE/ HREE	13.7	10.38	6.98	6.23	9.56	9.15	14.2	14.6	13.0	18.1	11.2	8.88	13.3 1
ΣREE	75.5	96.13	33.8 8	53.1	90.9 1	51.3 7	64.6 9	63.3 5	87.1	28.1	36.2	64.6	77.7 5
Ce/Ce*	0.52	0.61	0.32	0.42	0.43	0.38	0.65	0.30	0.50	0.45	0.39	0.70	0.51
Eu/Eu*	0.93	0.67	0.64	1.1	1.35	1.04	0.94	1.08	0.71	1.26	1.33	0.98	0.88
O.T	D	L	B	M	M	L	D	M	L	L	L	L	D

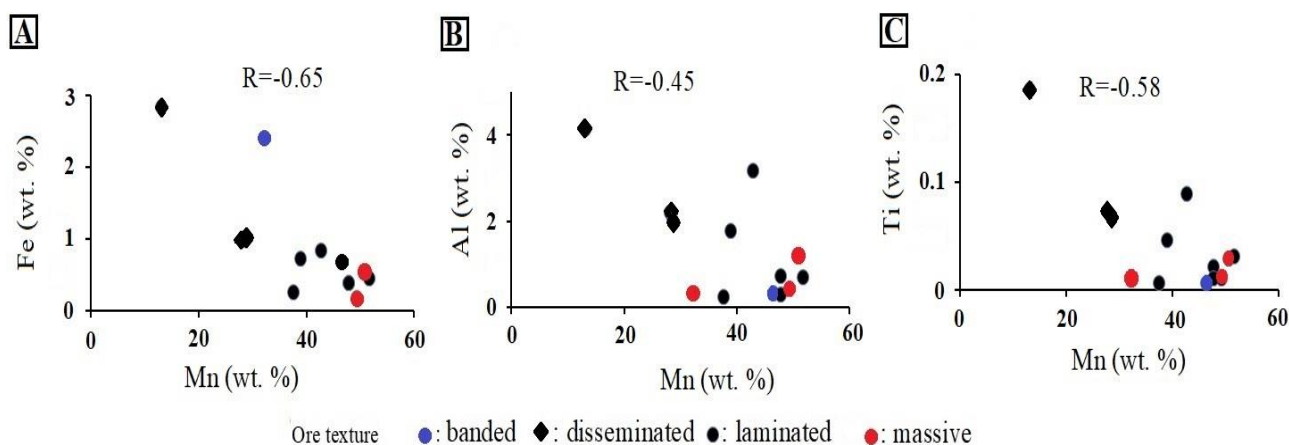
## بحث

استفاده شد. از نسبت Mn/Fe برای تفکیک و تعیین خاستگاه کانسارهای منگنز استفاده می‌شود. این نسبت نشان‌دهنده میزان تفریق و جدایش منگنز از آهن است. به دلیل حلالیت بیشتر منگنز دوظرفیتی نسبت به آهن دوظرفیتی، با تغییر شرایط Eh و pH،

از نتایج به دست آمده از تجزیه شیمیایی کانسنگ و نمودارهای زمین‌شیمیایی پیشنهاد شده توسط پژوهشگران مختلف برای شناسایی نحوه و فرایندهای مؤثر کانه‌زایی در کانسار مورد بررسی

ته‌نشینی آهن نسبت به منگنز اولویت دارد؛ لذا آهن و منگنز در زمان نهشت از محلول‌های گرمابی، از یکدیگر تفکیک می‌یابند. حاصل این جدایش، نسبت بالای Mn/Fe در کانسارهای منگنز برون‌دمی می‌شود. این نسبت در ذخایر منگنز با منشأ برون‌دمی بیش از ۱، در ذخایر منگنز با منشأ رسوبی کمتر از ۱ و در ذخایر آب‌زاد نزدیک به ۱ است (Nicholson et al., 1997; Jach and Dudek, 2005). نسبت Mn/Fe در نمونه‌های کانسنگ کانسار مورد بررسی ۴/۶۴ تا ۲۹۰/۵۳ (میانگین ۸۹/۳۹) محاسبه شد. مقادیر پایین Fe (شکل A-۷) و نسبت‌های بالای Mn/Fe در کانسار یادشده قابل مقایسه با ذخایر منگنز حاصل از فرایند برون‌دمی (شرایط گرمابی زیردریایی) است. از نسبت Si/Al برای شناسایی و تفکیک نهشته‌های گرمابی، آب‌زاد و رسوبی استفاده می‌شود. میانگین بالای این نسبت در نهشته‌های گرمابی برون‌دمی بیانگر درصد بالای SiO<sub>2</sub> طی فرایندهای فوران زیردریایی است (Nicholson, 1992; Karakus et al., 2010; Öksüz, )

ویژگی‌های ذخایر منگنز با خاستگاه آواری، میانگین پایین نسبت Si/Al است که نشان‌دهنده ورود مواد آواری، تخریب و تجزیه فلدسپارها در طی حمل‌ونقل از خشکی به حوضه کانه‌زایی است (Maynard, 2010). در کانسار منگنز کل-بنه، Si در ترکیب کانی کوآرتز (باطله) و به میزان کمتر در ترکیب کانی براونیت در کانسنگ یافت می‌شود. مقادیر پایین Al (میانگین ۱/۳۳ درصد) و Ti (میانگین ۰/۰۴۴ درصد) در نمونه‌های کانسنگ مورد بررسی نشان می‌دهد که مواد آواری نقشی در فرایند کانه‌زایی نداشته است (شکل B-۷ و C). غلظت نسبتاً بالای Si (میانگین ۱۱/۷۶ درصد) در نمونه‌های مورد بررسی می‌تواند منشأ سیال گرمابی و یا مقادیر بالای حضور سیلیس بیوژنیک (به صورت رادیولاریت) توجیه شود (Polgari et al., 2012). همراهی چرت‌های رادیولاریتی با نوارهای منگنز در این مجموعه بیانگر رخداد کانه‌زایی در پوسته اقیانوسی است.

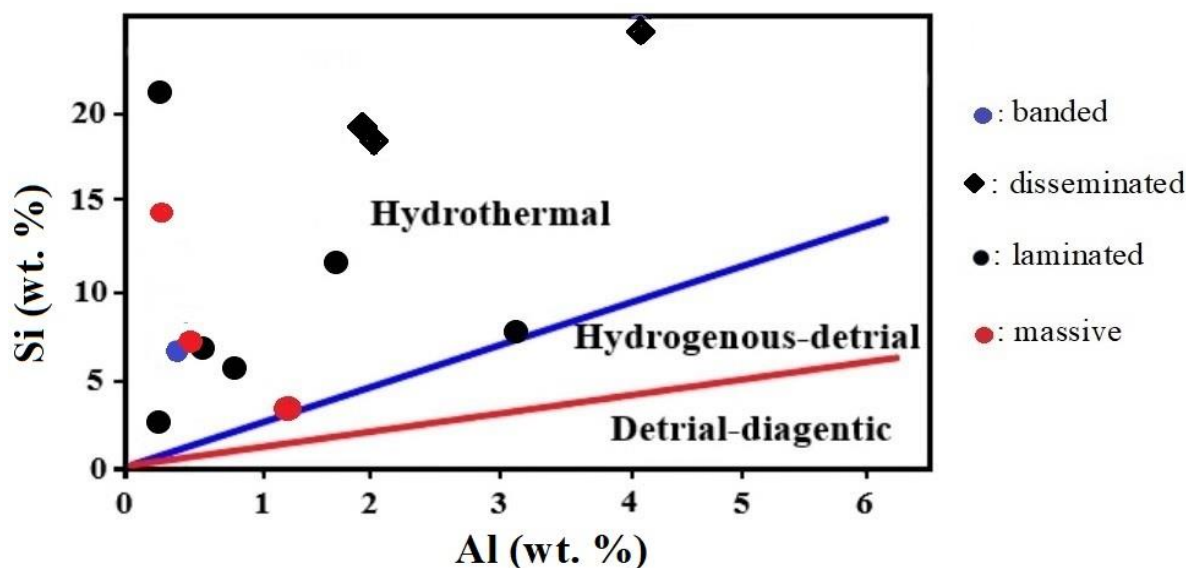


شکل ۷. نمودارهای همبستگی بین منگنز با A: آهن، B: آلومینیم و C: تیتانیوم در نمونه‌های کانسنگ کانسار کل-بنه

Fig. 7. Correlation diagrams between Mn, A: Fe, B: Al, and C: Ti in ore samples from the Kal-Baneh deposit

نمونه‌های مورد بررسی در گستره نهشته‌های منگنز با خاستگاه گرمابی قرار می‌گیرند (شکل ۸).

نسبت Si/Al در نمونه‌های کانسنگ کانسار کل-بنه ۲/۱۵ تا ۱۰۲/۵ (میانگین ۲۰) محاسبه شد. در نمودار Si در مقابل Al،



شکل ۸. نمودار دوتایی سیلیس در برابر آلومینیم (Choi and Hariya, 1992) و موقعیت نمونه‌های کانسنگ کانسار کل-بنه

Fig. 8. Bivariate plot of Si versus Al (Choi and Hariya, 1992) and location of ore samples from the Kal-Baneh Mn deposit

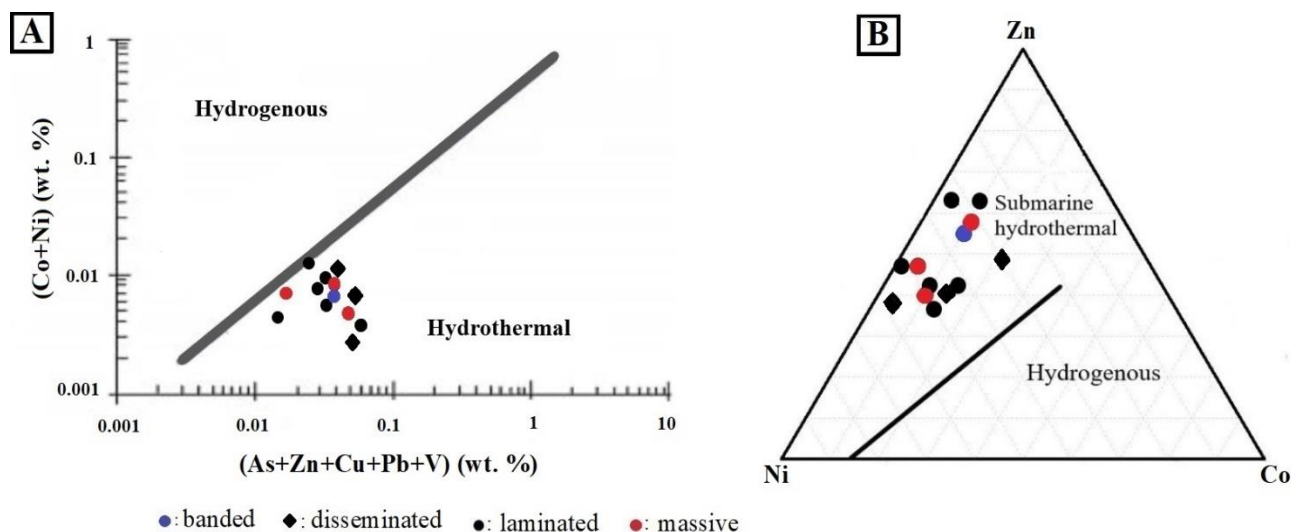
هاریا (Choi and Hariya, 1992) و  $Fe-Mn-(Ni + Co + Cu)$  10 (شکل ۱۰-A) ارائه شده توسط هاین و همکاران (Hein et al., 1994) به طور گسترده برای تعیین و تفکیک ذخایر منگنز گرمابی از آب‌زاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه‌های کانسنگ مورد بررسی در نمودارهای یادشده در محدوده ذخایر گرمابی قرار می‌گیرند (شکل ۹ و شکل ۱۰-A).

در نمودارهای دوتایی  $Ce-Zr$  (شکل ۱۰-B) برگرفته از ورشچاگین و همکاران (Vereshchagin et al., 2019)،  $Ce-(Ce/Ce^*)_n-Nd$  و  $(Co + Ni + Cu)/1000$  (شکل ۱۰-C) و (Sasmaz et al., 2020)، نمونه‌های مورد بررسی در محدوده ذخایر گرمابی قرار می‌گیرند.

نحوه توزیع عناصر خاکی نادر، به عنوان یکی دیگر از شاخص‌های زمین‌شیمیایی مهم و کاربردی برای تعیین مدل کانه‌زایی کانسارهای منگنز استفاده می‌شود (Chen et al., 2006; Xie et al., 2013; Pitzalis et al., 2019). غلظت عناصر خاکی نادر در نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۲ خلاصه شده است.

به دلیل تأثیر فعالیت‌های آتشفشانی، محلول‌های گرمابی در مقایسه با آب دریا دارای مقادیر بیشتری از باریم هستند (Öksüz, 2011; Sasmaz et al., 2014). مقادیر نسبتاً بالای باریم در نمونه‌های کانسنگ کانسار مورد بررسی (میانگین  $842/3$  ppm) متأثر از فعالیت‌های گرمابی زیردریایی است. از مقادیر عناصر فرعی نظیر  $Co$ ،  $Ni$  و  $Cu$  به عنوان یکی از معیارها برای تمایز خاستگاه ذخایر منگنز استفاده می‌شود. نهشته‌های منگنز آب‌زاد در مقایسه با ذخایر گرمابی مقادیر نسبتاً بالایی از عناصر  $Co$ ،  $Ni$  و  $Cu$  دارند (Polgari et al., 2012; Fu et al., 2020). این ویژگی نتیجه سرعت رسوب‌گذاری کم و زمان تماس طولانی مدت نهشته‌های منگنز آب‌زاد با آب دریا به همراه جذب سطحی کاتیون‌های عناصر یادشده توسط فازهای کلوئیدی منگنز و آهن از آب دریاست. نهشت سریع ذخایر منگنز گرمابی، مانع از جذب سطحی عناصر ذکر شده می‌شود (Hein et al., 2008; Bazilevskaya, 2009). نمودار دوتایی  $(Co+Ni)-(As+Cu+Pb+V+Zn)$  (شکل ۹-A) ارائه شده توسط نیکلسون (Nicholson, 1992) و نمودارهای سه‌تایی  $Co-Ni-Zn$  (شکل ۹-B) برگرفته از چویی و





شکل ۹. A: نمودار دوتایی (Co+Ni)-(As+Cu+Pb+V+Zn) ارائه شده توسط نیکلسون (Nicholson, 1992) و B: نمودار سه‌تایی Co-Ni-Zn برگرفته از چویی و هاریا (Choi and Hariya, 1992). نمونه‌های کانسنگ کانسار کل-بنه در موقعیت گرمایی قرار می‌گیرند.

Fig. 9. Bivariate plots of A: (Co+Ni)-(As+Cu+Pb+V+Zn) (Nicholson, 1992), and B: (Co-Ni-Zn) ternary diagram (Choi and Hariya, 1992). Data points of ore samples from the Kal-Baneh Mn deposit fall within the hydrothermal deposits.

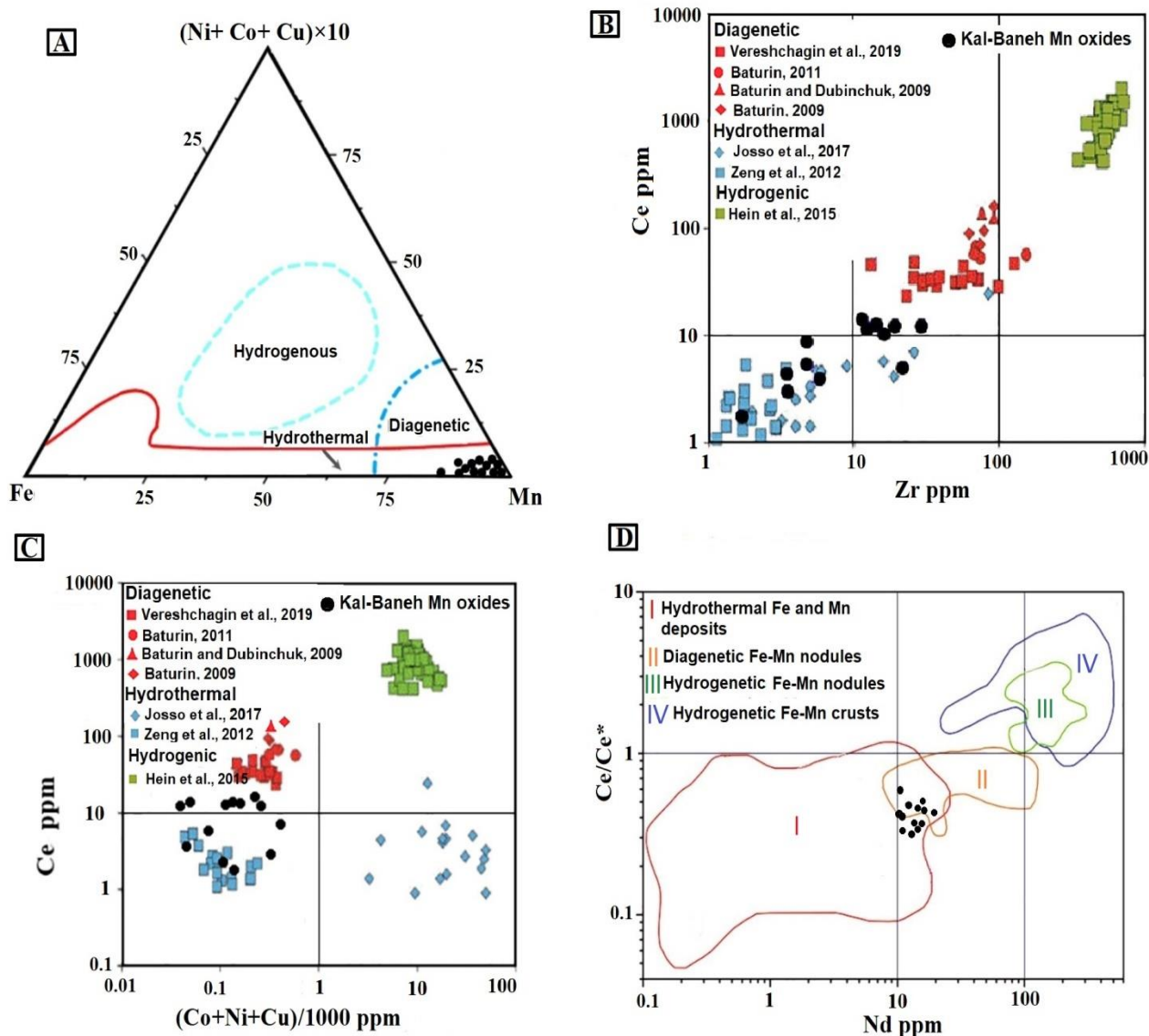
است که نشان‌دهنده نقش محلول‌های گرمایی در فرایند کانه‌زایی است (Hongo and Nozaki, 2001; Jiancheng et al., 2006; Mazhari et al., 2015). یکی از ویژگی‌های رایج ذخایر منگنز گرمایی تشکیل شده در پشته‌های میان اقیانوسی، ناهنجاری منفی Ce است (Öksüz, 2011). در شرایط اکسیدی  $Ce^{3+}$  (محلول) به  $Ce^{4+}$  (نامحلول) به صورت  $CeO_2$  از مایع جدا و جذب اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز و یا مواد آلی می‌شود؛ لذا باعث ایجاد آنومالی منفی در آب‌های اکسیدی می‌شود (Holster, 1997; Chen et al., 2006; Pourret et al., 2008). به دلیل سرعت ته‌نشینی کم و سطح جذب بالای اکسیدهای منگنز در نهشته‌های آب‌زاد؛ جذب بالای Ce توسط اکسیدهای منگنز موجب ناهنجاری مثبت Ce در این ذخایر می‌شود (Pattan et al., 2005; Surya Prakash et al., 2012; Bau et al., 2014). از آنجایی که سنگ‌های مافیک در پوسته اقیانوسی دارای تهی‌شدگی شدید Ce هستند؛ ذخایر منگنز متأثر از فعالیت‌های گرمایی زیردریایی در پوسته

ذخایر منگنز آب‌زاد در مقایسه با ذخایر منگنز گرمایی دارای مقادیر بیشتری از عناصر خاکی نادر هستند (Xie et al., 2013; Wu et al., 2016). نتایج حاصل از بررسی‌های گذشته نشان‌دهنده است که  $\sum REE \leq 100$  ppm در نمونه‌های ذخایر گرمایی (Maanijou et al., 2015) و در ذخایر آب‌زاد نزدیک به 1000 ppm است (Bau et al., 2015). محتوای کم عناصر خاکی نادر در  $\sum REE$  در نمونه‌های مورد بررسی 96/13 ppm است (جدول ۲). محتوای کم عناصر خاکی نادر در نمونه‌های مورد بررسی با کانسارهای گرمایی مطابقت دارد (Bau et al., 2014; Tsukamoto et al., 2020). الگوی بهنجار شده عناصر خاکی نادر کانسنگ کانسار کل-بنه، مشابه با الگوی گزارش شده در ذخایر گرمایی است (شکل ۱۱).

مقادیر بالاتر عناصر خاکی نادر سبک نسبت به عناصر خاکی نادر سنگین یکی از ویژگی‌های بارز کانسارهایی با منشأ گرمایی در نظر گرفته می‌شود (Hongo and Nozaki, 2001; Xie et al., 2013; Bau et al., 2014; Maghfouri et al., 2017). نسبت LREE / HREE در کانسار مورد بررسی بین ۶/۲۳ تا ۱۸/۱ متغیر

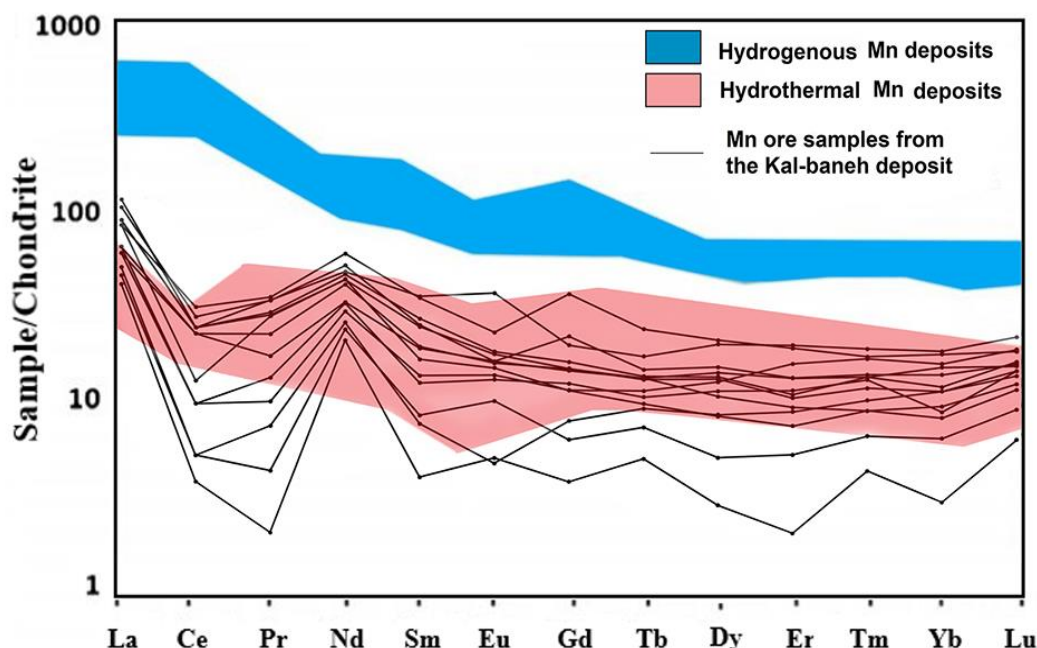
نمونه‌های کانسنگ کل-بنه و تشابه الگوی بهنجار شده عناصر خاکی نادر در نمونه‌های مورد بررسی با سایر ذخایر گرمابی نشان می‌دهد که رخداد کانسزایی مرتبط با شرایط گرمابی است.

اقیانوسی دارای آنومالی منفی Ce هستند (Sabatino et al., 2011). ناهنجاری منفی Ce در نمونه‌های مورد بررسی از ۰/۳۰ تا ۰/۷۰ متغیر است (جدول ۲). آنومالی منفی Ce مشاهده شده در



شکل ۱۰. انواع ذخایر منگنز کل-بنه: A:  $10 \text{ Fe-Mn-(Ni + Co + Cu)}$  (Hein et al., 1994)، B:  $\text{Ce-Zr}$  (Vereshchagin et al., 2019)، C:  $\text{Ce-(Co + Ni + Cu)/1000}$  و D:  $(\text{Ce/Ce}^*)_n\text{-Nd}$  (Sasmaz et al., 2020) ارانه‌شده توسط ساسماز و همکاران (Sasmaz et al., 2020). نمونه‌های کانسنگ کانسار کل-بنه در موقعیت گرمابی قرار می‌گیرند.

**Fig. 10.** Different genetic types of Mn deposits in a A:  $\text{Fe-Mn-(Ni + Co + Cu)}$  10 (Hein et al., 1994), B:  $\text{Ce-Zr}$  (Vereshchagin et al., 2019), C:  $\text{Ce-(Co + Ni + Cu)/1000}$ , and D:  $(\text{Ce/Ce}^*)_n\text{-Nd}$  (Sasmaz et al., 2020). Data points of ore samples from the Kal-Baneh Mn deposit fall within the hydrothermal deposits.

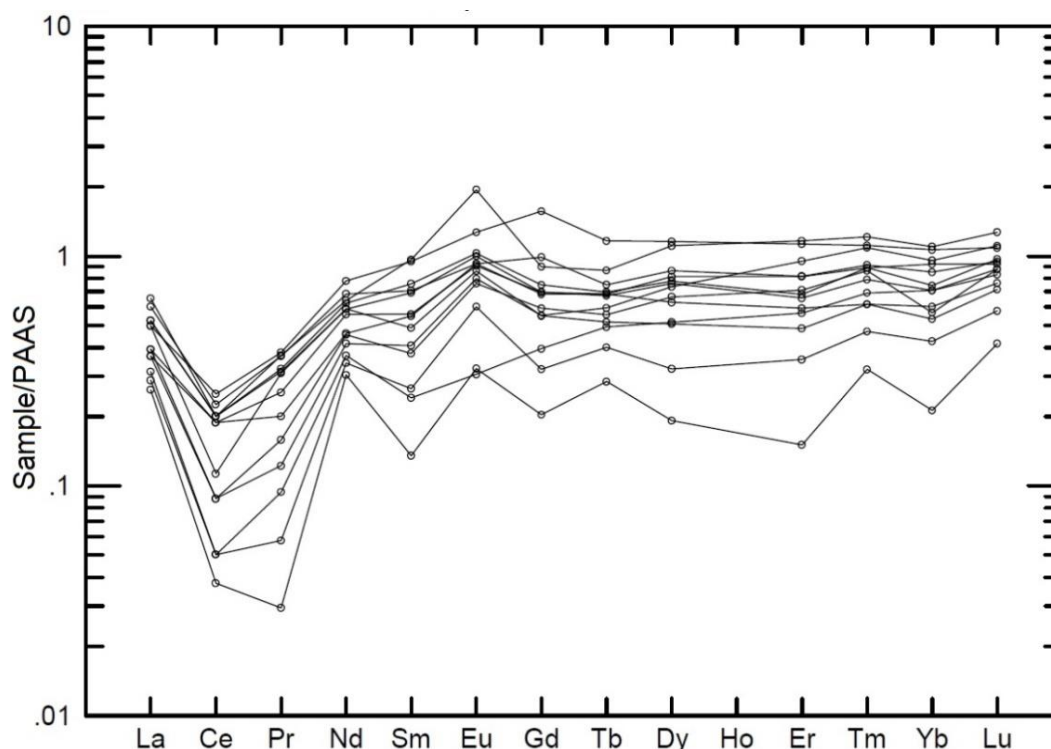


شکل ۱۱. مقایسه الگوی بهنجار شده عناصر خاکی نادر نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) در نمونه‌های کانسنگ کانسار کل-بنه با ذخایر منگنز آب‌زاد و گرمایی (Öksüz, 2011)

**Fig. 11.** Comparison of Chondrite-normalized (Sun and McDonough, 1989) REE patterns of the Kal-Baneh ore samples with hydrogenous and hydrothermal Mn deposits (Öksüz, 2011)

رقیق‌شدگی سیال گرمایی با آب دریا (نقش‌آفرینی هم‌زمان مخلوط سیال گرمایی-آب‌زاد) نسبت‌داده می‌شود. همچنین الگوی توزیع بهنجار شده عناصر خاکی نادر در نمونه‌های کانسنگ کانسار کل-بنه نسبت به میانگین ترکیب شیمیایی شیل متعلق به بعد از آرکئن استرالیا<sup>۴</sup> (Taylor and McLennan, 1985) نیز نشان‌دهنده غنی‌شدگی ضعیف HREE نسبت به LREE است (شکل ۱۲) که با آمیختگی سیال گرمایی با آب دریا (با افزایش فاصله‌گیری از منشأ سیال گرمایی) قابل تفسیر است (Tostevin et al., 2016). از آنجایی که HREE در نمونه‌های کانسنگ منگنز اغلب دارای منشأ آب‌زاد هستند؛ لذا در صورت آمیختگی سیال گرمایی با آب دریا، نمودارهای بهنجار شده عناصر خاکی نادر کانسنگ با شیل PAAS، غنی‌شدگی ضعیف HREE را نسبت به LREE نشان می‌دهند.

ناهنجاری Eu در سیالات گرمایی متأثر از ترکیب سنگ‌هایی است که شست‌وشوی عناصر از آنها رخ داده است (Glasby, 1997). به علت وجود پلاژیوکلاز در سنگ‌های مافیک کف اقیانوس (وجود Ca در آنها)، سنگ‌های یادشده واجد Eu هستند. آنومالی‌های مثبت قوی Eu فقط در سامانه‌های گرمایی دما بالا (>250 °C) واقع در پشته‌های میان اقیانوسی و مراکز گسترشی پشت‌کمانی مشاهده شده است (Bau and Dulski, 1996; Bau and Dulski, 1999). با فاصله گرفتن سیالات گرمایی از منشأ خود (دودکش گرمایی)، از شدت آنومالی‌های منفی Ce و مثبت Eu کاسته می‌شود (Sabatino et al., 2011; Mahmoudi et al., 2020). ناهنجاری ضعیف مثبت Eu محاسبه شده در نمونه‌های مورد بررسی (۰/۱ تا ۶۴/۳۵) (جدول ۲)، به افزایش فاصله محلول گرمایی از دودکش گرمایی منشأ و



شکل ۱۲. نمودارهای بهنجار شده عناصر خاکی نادر در نمونه‌های کانسنگ کانسار کل- بنه نسبت به PAAS (Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 12. PAAS-normalized REE element patterns of ores in the Kal-Baneh deposit. The PAAS data are from Taylor and McLennan (1985)

مجموعه افیولیتی اسفندقه رخ داده است. ماده معدنی دارای بافت توده‌ای، دانه‌پراکنده، نواری و لایه‌ای است. نتایج به دست آمده از بررسی‌های صحرایی (ژئومتری ماده معدنی به صورت لایه‌ای و هم‌روند با چرت‌های رادیولاریتی)، کانی‌شناسی (عدم رخداد قابل توجه فازهای آهن‌دار) و زمین‌شیمی عناصر اصلی (نسبت بالای Mn/Fe و Si/Al)، فرعی (محتوای پایین عناصری نظیر Cu، Ni و Co) و کمیاب (ناهنجاری منفی Ce و ناهنجاری ضعیف مثبت Eu) نشان می‌دهد که آمیختگی سیال گرمابی با آب دریا به دور از دودکش گرمابی منشأ در بستر حوضه اقیانوسی، نقش اصلی را در کانه‌زایی ایفا کرده است و فرایند کانه‌سازی در کانسار کل- بنه با ذخایر گرمابی- آب‌زاد زیردریایی مطابقت دارد. از آنجایی که گستره پایداری منگنز دوظرفیتی در آب‌های سطحی و آب دریاها در مقایسه با آهن دوظرفیتی بیشتر است؛ لذا

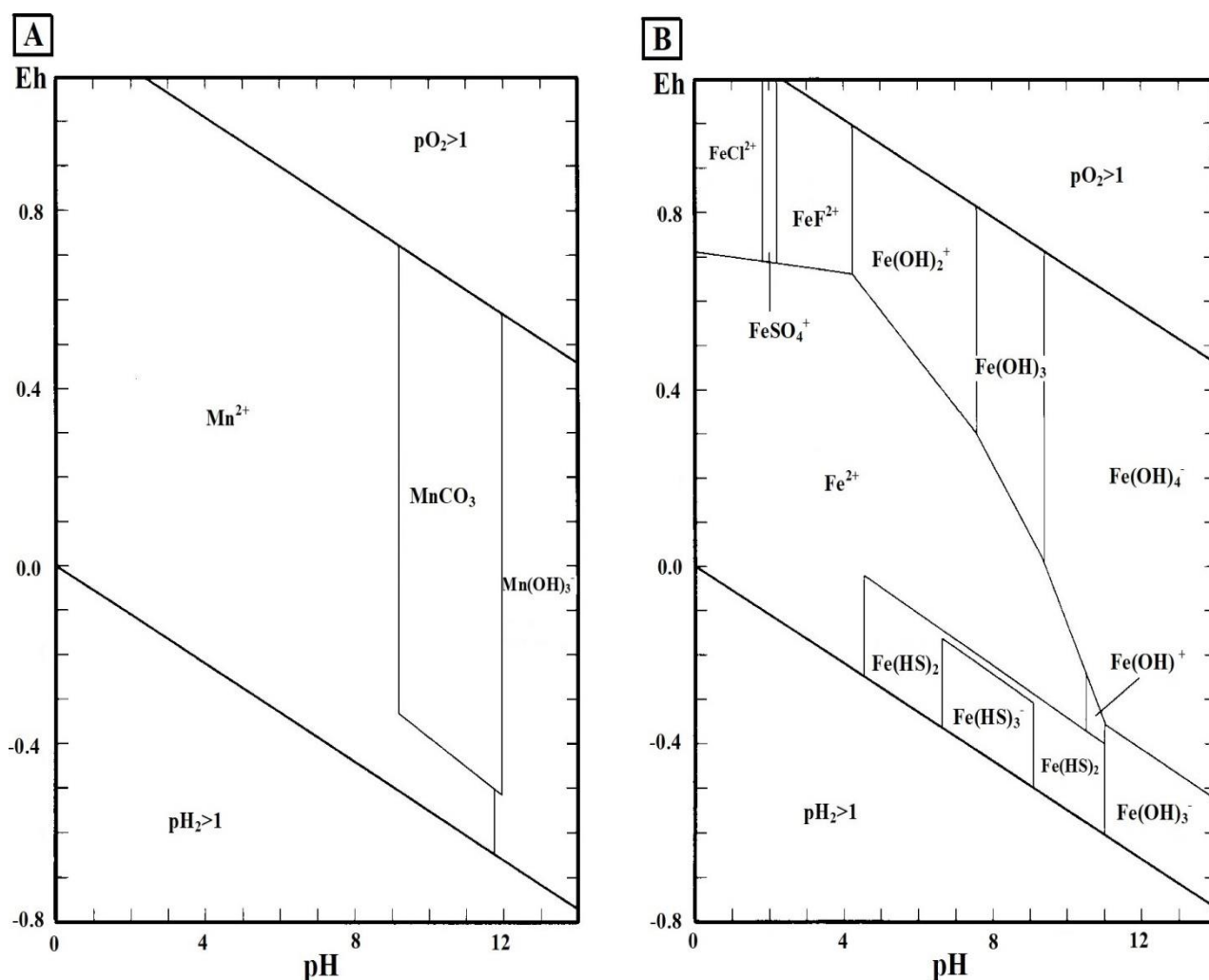
در نمودارهای Eh-pH که محدوده پایداری گونه‌های Mn (شکل ۱۳-A) و Fe (شکل ۱۳-B) را در محیط آبی نشان می‌دهند، محدوده پایداری  $Mn^{2+}$  (فرم محلول منگنز) بسیار گسترده‌تر از  $Fe^{+2}$  (فرم محلول آهن) است. در نتیجه با فاصله‌گیری سیال گرمابی از منشأ، تفریق و جدایش آهن و منگنز رخ خواهد داد. عدم رخداد قابل توجه فازهای آهن‌دار و نسبت بالای Mn/Fe (میانگین ۸۹/۳۹) در نمونه‌های کانسنگ کانسار منگنز کل- بنه نیز تأییدی بر آمیختگی سیال گرمابی با آب دریا (دور از منشأ سیال گرمابی) است.

### نتیجه‌گیری

کانه‌زایی منگنز در کانسار کل- بنه به صورت چینه‌سان به طور ناپیوسته در ابعاد مختلف در چرت‌های رادیولاریتی بخش بالایی

آهن از منگنز در طی فاصله‌گیری محلول گرمابی از مجرای برون‌دمی است. وجود اندیس کانه‌زایی آهن در فاصله ۳ کیلومتری کانسار منگنز کل- بنه (شکل ۱۴) نشان می‌دهد که با فاصله‌گیری سیال گرمابی از دودکش گرمابی، تفریق و جدایش آهن و منگنز رخ داده است.

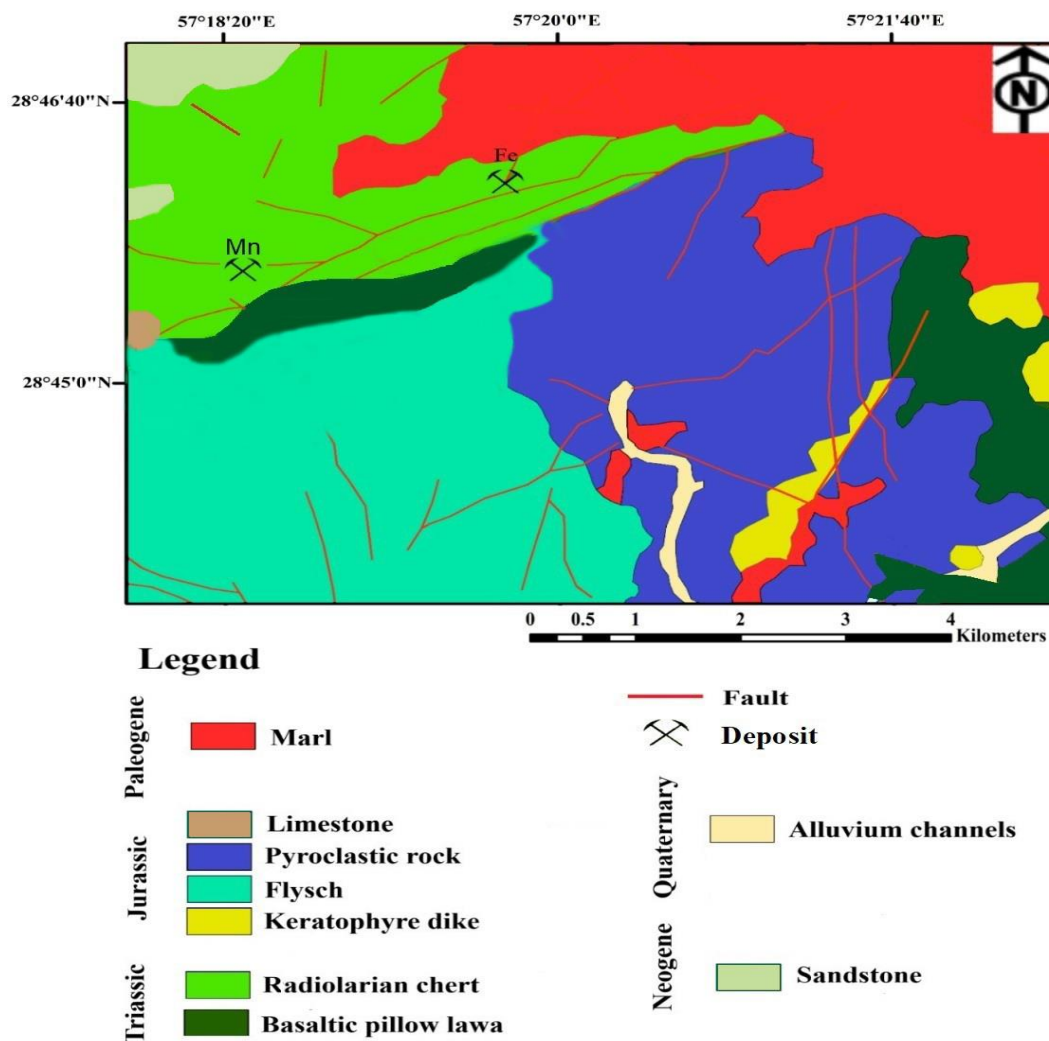
عناصر آهن و منگنز که به صورت محلول وارد آب دریا می‌شوند، ابتدا آهن به فاصله نزدیک به خاستگاه فعالیت گرمابی (دودکش گرمابی) ته‌نشین شده و سپس منگنز در فاصله بیشتر از دودکش گرمابی ته‌نشین می‌شود. نبود فازهای آهن‌دار در نتایج به دست آمده از بررسی‌های میکروسکوپی و نسبت‌های بالای Mn/Fe در نمونه‌های کانسنگ کانسار مورد بررسی بیانگر جدایش کامل



شکل ۱۳. محدوده پایداری گونه‌های A: منگنز و B: آهن در نمودارهای Eh-pH در محیط‌های آبی (Brooking, 1988; Force and Cannon, 1988). در ناحیه معدنی کل- بنه، جدایش بین آهن و منگنز به دلیل حلالیت منگنز در محدوده وسیع Eh-pH در طی مهاجرت محلول رخ داده است.

**Fig. 13.** Eh-pH stability diagrams for aquatic species of A: Mn, and B: Fe (Brooking, 1988; Force and Cannon, 1988).

In the Kal-Baneh mining district, the fractionation of Mn and Fe has occurred due to the solubility of Mn in wide Eh-pH ranges during the migration of the solution.



شکل ۱۴. بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفندقه پس از تغییرات از شهرکی (Shahraki, 2003) و موقعیت کانسار منگنز کل-بنه و اندیس کانه‌زایی آهن

**Fig. 14.** Part of the geological map (1:100,000 scale) of Esfandqeh (modified after Shahraki, 2003) and the location of Kal-Baneh Mn and Fe deposits.

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

1. rare earth elements (REE)
2. distal source
3. inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)
4. Post-Archean Australian Shale (PAAS)

## References

- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America 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)
- Aminzadeh, B. and Rahimpour, Y., 2021. Geology, geochemistry and genesis of the Godar Sabz Mn deposit in the Baft region, Iran. *Geochemistry*, 81(4): 125827.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125827>
- Amiri, A., 1995. Geology, mineralogy and controlling factors of formation and concentration of ore matter in Robat Karim manganese deposit, SW Tehran-Iran. Unpublished M.Sc. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 200 pp. (in Persian with English abstract)
- Badrzadeh, Z., Barrett, T.J., Peter, J.M., Gimeno, D., Sabzehei, M. and Aghazadeh, M., 2011. Geology, mineralogy, and sulfur isotope geochemistry of the Sargaz Cu–Zn volcanogenic massive sulfide deposit, Sanandaj–Sirjan Zone, Iran. *Mineralium Deposita*, 46: 905–923.  
<https://doi.org/10.1007/s00126-011-0357-4>
- 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*, 79(1–2): 37–55.  
[https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00087-9](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00087-9)
- Bau, M. and Dulski, P., 1999. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater. *Chemical Geology*, 155(1–2): 77–90.  
[https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00142-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00142-9)
- Bau, M., Schmidt, K., Koschinsky, A., Hein, J.R. and Usui, A., 2014. Discriminating between different genetic types of marine ferro-manganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium. *Chemical Geology*, 381: 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.05.004>
- Bazilevskaya, E.S., 2009. Ocean Environment and Developing of Oceanic Iron-Manganese Ores. *Doklady Earth Sciences*, 429: 1417–1419.  
<https://doi.org/10.1134/S1028334X09090013>
- Bonyadi, Z. and Moore, F., 2005. Geochemistry and genesis of Narigan ferromanganese deposit, Bafgh, Yazd province. *The Iranian Journal of Earth Sciences*, 15(57): 54–63. (in Persian with English abstract) Retrieved November 9, 2022 from  
<https://www.sid.ir/paper/31659/en>
- Brooking, D.G., 1988. Eh-pH diagrams for geochemistry. Springer-Verlag, Berlin, 176 pp. Retrieved October 26, 2022 from  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-73093-1>
- Chen, D., Qing, H., Yan, X. and Li, H., 2006. Hydrothermal venting and basin evolution (Devonian, South China): constraints from rare earth element geochemistry of chert. *Sedimentary Geology*, 183(3–4): 203–216.  
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.09.020>
- Choi, J.H. and Hariya, Y., 1992. Geochemistry and depositional environment of Mn oxide deposits in the Tokora Belt, northeastern Hokkaido, Japan. *Economic Geology*, 87: 1265–1274.  
<https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.87.5.1265>
- Doulatkhan, R., Rastad, E. and Emami, M.H., 2005. Garab stratiform manganese deposit in the Oligo miocene volcano-sedimentary sequence, northeast of Taleghan (central Alborz). *The Iranian Journal of Earth Sciences*, 14(56): 40–51. (in Persian with English abstract) Retrieved October 26, 2022 from  
<https://www.sid.ir/paper/32632/en>
- Evensen, M.N., Hamilton, P. and O Nions, R.K., 1978. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(8): 1199–1212.  
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90114-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90114-X)
- Force, E.R. and Cannon, W.F., 1988. Depositional model for shallow-marine manganese deposits around black shale basins. *Economic Geology*, 83(1): 93–117.  
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.1.93>
- Fu, Y. and Wen, H., 2020. Variabilities and enrichment mechanisms of the dispersed elements in marine Fe-Mn deposits from the Pacific Ocean. *Ore Geology Reviews*, 121: 103470.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103470>
- Glasby, G.P., 1997. Fractionation of manganese from iron in Arcean and Proterozoic sedimentary ores. In: K. Nicholson, J.R. Hein and S. Dasgupta

- (Editors), Manganese mineralization: geochemistry and mineralogy of terrestrial and marine deposits. Geological Society of London, Special Publication, London, 29–42 pp. Retrieved November 9, 2022 from [https://books.google.com/books/about/Manganese\\_Mineralization.html?id=gByCNEdt5twC](https://books.google.com/books/about/Manganese_Mineralization.html?id=gByCNEdt5twC)
- Hein, J.R., Koschinsky, A., Halbach, P.E., Manheim, F.T., Bau, M., Kang, J.K. and Lubick, N., 1997. Iron and manganese oxide mineralization in the Pacific. Geological Society Special Publication, 119(1): 123–138. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1997.119.01.09>
- Hein, J.R., Schulz, M.S., Dunham, R.E., Stern, R.J. and Bloomer, S.H., 2008. Diffuse flow hydrothermal manganese mineralization along the active Mariana and southern Izu-Bonin arc system, western Pacific. Journal of Geophysical Research, 113(8): 1–29. <https://doi.org/10.1029/2007JB005432>
- Hein, J.R., Yeh, H.W., Gunn, S.H., Gibbs, A.E. and Wang, C.H., 1994. Composition and origin of hydrothermal ironstones from central Pacific seamounts. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58(1): 179–189. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90455-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90455-3)
- Heshmatbehzadi, K. and Shahabpour, J., 2010. Metallogeny of manganese and ferromanganese ores in Baft ophiolitic Mélange, Kerman, Iran. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(2): 302–313. Retrieved October 25, 2022 from <http://ajbasweb.com/old/ajbas/2010/302-313.pdf>
- Holster, W.T., 1997. Evaluation of the application of rare-earth elements to paleoceanography. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 132(1–4): 309–323. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00069-2](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00069-2)
- Hongo, Y. and Nozaki, Y., 2001. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits and Calyptogena shell from the Iheya Ridge vent field, Okinawa Trough. Geochemical Journal, 35(5): 347–354. <https://doi.org/10.2343/geochemj.35.347>
- Ingram, B.L., Hein, J.R. and Farmer, G.L., 1990. Age determinations and growth rates of Pacific ferromanganese deposits using strontium isotopes. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54(6): 1709–1721. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90402-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90402-7)
- Jach, R. and Dudek, T., 2005. Origin of a Toarcian manganese carbonate/silicate deposit from the Krízna unit, Tatra Mountains, Poland. Chemical Geology, 224(1–3): 136–152. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.07.018>
- Jiancheng, X., Xiaoyong, Y., Jianguo, D. and Wei, X., 2006. Geochemical characteristics of sedimentary manganese deposit of Guichi, Anhui Province, China. Journal of Rare Earths, 24(3): 374–380. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(06\)60127-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(06)60127-0)
- Josso, P., Pelleter, E., Pourret, O., Fouquet, Y., Etoubleau, J., Cheron, S. and Bollinger, C., 2017. A new discrimination scheme for oceanic ferromanganese deposits using high field strength and rare earth elements. Ore Geology Reviews, 87: 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.003>
- Karakus, A., Yavuz, B. and Koc, S., 2010. Mineralogy and major trace element geochemistry of the haymana manganese mineralizations, Ankara, Turkey. Geochemistry International, 48(10): 1014–1027. <https://doi.org/10.1134/S001670291010006X>
- Klinkhammer, G.P., Heggie, D.T. and Graham, D.W., 1982. Metal diagenesis in oxic marine sediments. Earth and Planetary Science Letters, 61(2):211–219. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90054-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90054-1)
- Maanijou, M., Nasiri, A., Aliani, F., Mostaghimi, M., Gholipour, M. and Maghsoodi, A., 2015. The study of major, trace and rare earth elements geochemistry in Shahrestanak Mn deposit, south of Qom: Implications for genesis. Journal of Economic Geology, 7(1):1–21. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v7i1.23393>
- Maghfouri, S., Rastad, A., Mousivand, F., Choulet, F. and Lin, Y., 2017. Geological and geochemical constraints on the cheshmeh-frezi volcanogenic stratiform manganese deposit, Southwest Sabzevar basin Iran. Ore Geology Reviews, 89: 96–113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.06.015>
- Maghfouri, S., Rastad, E., Movahednia, M., Lentz, D.R., Hosseinzadeh, M.R., Ye, L. and Mousivand, F., 2019. Metallogeny and temporal–spatial distribution of manganese mineralizations in Iran: Implications for future exploration. Ore Geology Reviews, 115: 103026.



- <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103026>
- Mahdavi, M., Dabiri, R. and Shah Hosseini, E., 2015. Magmatic evolution and compositional characteristics of tertiary volcanic rocks associated with the Venarch manganese mineralization, SW Qom, central Iran. *Earth Sciences Research Journal*, 19(2): 141–145. <https://doi.org/10.15446/esrj.v19n2.49372>
- Mahmoudi, S., Geravandi, P., Ghasemi Siani, M. and Gholizadeh, K., 2020. Mineralogy, geochemistry, and genesis of Mn mineralization associated with the Noorabad Delfan radiolarites, Northwestern Lorestan. *Journal of Economic Geology*, 11(4): 603–627. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v11i4.67074>
- Maynard, J., 2010. The chemistry of manganese ores through time: a signal of increasing diversity of earth-surface environments. *Economic Geology*, 105(3): 535–552. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.535>
- Mazhari, N., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Ghaderi, M., 2015. Geology, mineralogy and geochemistry of Ferezhneh ferromanganese anomaly, east of Sangan mines complex, NE Iran. *Journal of Economic Geology*, 7(1): 23–37. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v7i1.44694>
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj–Sirjan zone, Western Iran. *Journal of Structural Geology*, 22(8): 1125–1139. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00023-7)
- Mosadegh, M., 2015. Mineralogy, geochemistry and genesis of the Halalan Mn deposit, Moalleman area, south of Damghan. Unpublished M.Sc. thesis, Shahrood University of Technology, Shahroud, Iran, 190 pp. (in Persian with English abstract)
- Nicholson, K., 1992. Genetic types of manganese oxide deposits in Scotland: Indicators of paleo-Ocean-spreading rate and a Devonian geochemical mobility boundary. *Economic Geology*, 87(5): 1301–1309. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.5.1301>
- Nicholson, K., Hein, J.R. and Dsgupta, S., 1997. Manganese mineralization: Geochemistry and mineralogy of terrestrial and marine deposits. Geological Society of London, London, 370 pp. Retrieved November 9, 2022 from [https://books.google.com/books/about/Manganese\\_Mineralization.html?id=gByCNEdt5twC](https://books.google.com/books/about/Manganese_Mineralization.html?id=gByCNEdt5twC)
- Öksüz, N., 2011. Geochemical characteristics of the Eymir (Sorgun-Yozgat) manganese deposits, Turkey. *Journal of Rare Earths*, 29(3): 287–296. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60446-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60446-2)
- Pattan, J.N., Pearce, N.J.G. and Mislankar, P.G., 2005. Constraints in using Cerium anomaly of bulk sediments as an indicator of paleo bottom water redox environment: a case study from the Central Indian Ocean Basin. *Chemical Geology*, 221(3–4): 260–278. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.06.009>
- Pelleter, E., Fouquet, Y., Etoubleau, J., Cheron, S., Labanieh, S., Josso, P. and Langlade, J., 2017. Ni-Cu-Co-rich hydrothermal manganese mineralization in the Wallis and Futuna back-arc environment (SW Pacific). *Ore Geology Reviews*, 87: 126–146. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.014>
- Pitzalis, E., Fulignati, P., Lezzerini, M., Cioni, R., Pinarelli, L., Tamponi, M. and Gioncada, A., 2019. Origin of volcanic-hosted Mn-oxide mineralization from San Pietro Island (SW Sardinia, Italy): An integrated geochemical, mineralogical and isotopic study. *Journal of Geochemical Exploration*, 204: 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.05.010>
- Polgari, M., Hein, J.R., Vigh, T., Szabo-Drubina, M., Forizs, I., Biro, L., Muller, A. and Toth, A.L., 2012. Microbial processes and the origin of the Urkut manganese deposit, Hungary. *Ore Geology Reviews*, 47: 87–109. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.10.001>
- Pourret, O., Davranche, M., Gruau, G. and Dia, A., 2008. New insights into cerium anomalies in organic-rich alkaline waters. *Chemical Geology*, 251(1–4): 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.03.002>
- Rajabi, A., Canet, C., Rastad, E. and Alfonsa, P., 2014. Basin evolution and stratigraphic correlation of sedimentary-exhalative Zn–Pb deposits of the Early Cambrian Zarigan-Chahmir Basin, Central Iran. *Ore Geology Reviews*, 64: 328–353. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.013>
- Rajabzadeh, M.A., Haddad, F., Polgari, M., Fintor, K., Walter, H., Molnar, Z. and Gyollai, I., 2017. Investigation on the role of microorganisms in manganese mineralization from Abadeh-Tashk area, Fars Province, southwestern Iran by using

- petrographic and geochemical data. *Ore Geology Reviews*, 80: 229–249.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.035>
- Sabatino, N., Neri, R., Bellanca, A., Jenkyns, H.C., Masetti, D. and Scopelliti, G., 2011. Petrography and high-resolution geochemical records of Lower Jurassic manganese rich deposits from Monte Mangart, Julian Alps. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299(1–2): 97–109.  
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.10.039>
- Sabzehei, M., 1974. Les melanges ophiolitiques de la region d Esfandagheh. These, Universite de Grenoble, Grenoble, France, 303 pp.
- Sabzehei, M. and Youssefi, E.G., 2000. An introduction to the geology and mineral exploration of Sargaz Kuh massive sulfide deposit Southeast Iran. Unpublished Report for Arman-Pajouh-e-Sabzevaran project, 59 pp.
- Sasmaz, A., Turkyilmaz, B., Ozturk, N., Yavuz, F. and Kumral, M., 2014. Geology and geochemistry of Middle Eocene Maden complex ferromanganese deposits from the Elazığ-Malatya region, eastern Turkey. *Ore Geology Reviews*, 56: 352–372.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.06.012>
- Sasmaz, A., Zagnitko, V.M. and Sasmaz, B., 2020. Major, trace and rare earth element (REE) geochemistry of the Oligocene stratiform manganese oxide-hydroxide deposits in the Nikopol, Ukraine. *Ore Geology Reviews*, 126: 103772.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103772>
- Shahraki, A., 2003. 1/100000 geological map of Esfandagheh sheet. Geological Survey of Iran.
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(7): 1229–1258.  
<https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society London Special*, 42: 313–345.  
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Surya Prakash, L., Ray, D., Paropkari, A.L., Mudholkar, A.V., Satyanarayanan, M., Sreenivas, B., Chandrasekharam, D., Kota, D., Kamesh Raju, K.A., Kaisary, S., Balaram, V. and Gurav, T., 2012. Distribution of REEs and yttrium among major geochemical phases of marine Fe-Mn-oxides: comparative study between hydrogenous and hydrothermal deposits. *Chemical Geology*, 312–313: 127–137.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.03.024>
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, 312 pp.
- Tostevin, R., Shields, G.A., Tarbuck, G.M., He, T. and Clarkson, M.O., Wood, R.A., 2016. Effective use of cerium anomalies as a redox proxy in carbonate-dominated marine settings. *Chemical Geology*, 438: 146–162.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.027>
- Tsukamoto, Y., Nonaka, K., Ishida, A. and Kakegawa, T., 2020. Geochemical and mineralogical studies of ca.12 Ma hydrothermal manganese-rich rocks in the Hokuroku district in Japan. *Ore Geology Reviews*, 121: 103539.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103539>
- Usui, A. and Someya, M., 1997. Distribution and composition of marine hydrogenetic and hydrothermal manganese deposits in the northwest Pacific. *Geological Society Special Publication*, 119(1): 177–198.  
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1997.119.01.12>
- Vereshchagin, O.S., Perova, E.N., Brusnitsyn, A.I., Ershova, V.B., Khudoley, A.K., Shilovskikh, V.V. and Molchanova, E.V., 2019. Ferromanganese nodules from the Kara Sea: mineralogy, geochemistry and genesis. *Ore Geology Reviews*, 106: 192–204.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.01.023>
- 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., Zhang, Z., Xiao, J., Fu, Y., Shao, S., Zheng, C., Yao, J. and Xiao, Ch., 2016. Nanhuan manganese deposits within restricted basins of the southeastern Yangtze Platform, China: Constraints from geological and geochemical evidence. *Ore Geology Reviews*, 75: 76–99.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.12.003>
- Xie, J., Sun, W., Du, J., Xu, W., Wu, L., Yang, X. and Zhou, T., 2013. Geochemical studies on Permian manganese deposits in Guichi, eastern

China: Implications for their origin and formative environments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 155–166.

<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.04.002>

Yasukawa, K., Kino, S., Azami, K., Tanaka, E., Mimura, K., Ohta, J., Fujinaga, K. and Nakamura,

K., Kato, Y., 2020. Geochemical features of Fe-Mn micronodules in deep-sea sediments of the western North Pacific Ocean: Potential for co-product metal extraction from REY-rich mud. *Ore Geology Reviews*, 127: 103805. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103805>