




Research Article

Mineralogy, geochemistry and genesis of the Zaghdarreh Mn deposit, SW Kerman province, the southern Sanandaj-Sirjan zone

Mirmohammad Miri^{1*} , Alireza Zarasvandi¹, Mohsen Rezaei¹, Raziieh Almasi Beiranvand¹

1-Geology department, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 18 Apr 2025 Accepted: 7 Jul 2025

Extended Abstract

Introduction

Manganese deposits occur in various tectonic settings from mid-ocean ridges to plagic environments and continental margins. Depending on the difference in the source of manganese supply, these deposits are divided into hydrothermal, hydrogenous and diagenetic (Oksuz, 2011; Polgari et al, 2012; Schmidt et al, 2014). The change in origin causes distinct geochemical differences in these deposits. The studied area in the southwest of Kerman province (Fig. 1) hosts manganese deposits. This area is a part of the South Sanandaj-Sirjan zone, where different rock sequences formed in association with the subduction of the Neotethys oceanic crust beneath the central Iranian micro-plate occur. The aim of this study is to investigate the mineralogical and geochemical properties of the Zaghdareh manganese deposit in order to identify the origin and genesis of this deposit, which has not been studied by researchers so far. Also, the formation of this deposit is compared with some other deposits from the Sanandaj-Sirjan zone to gain a better understanding of the conditions governing the mineralization environment of the Neotethys Ocean during the Mesozoic Era. The study area belongs to the southern part of the Sanandaj-Sirjan zone (Fig. 1a). As the other parts of the zone, this area is composed of metamorphic, igneous and sedimentary rocks. The main lithology of the area includes a color mélange with Cretaceous age (Fig. 1b). These rocks cover the southern and southeastern parts of the region and include some parts of the ophiolitic sequence, volcanic rocks, radiolarian cherts and pelagic limestones. In the northern parts, basaltic and andesitic rocks of Mesozoic-Cenozoic age occur. The Zaghdarreh deposit occurs at the boundary between the ophiolitic color mélange and pelagic limestones (Fig. 1b). In this area, radiolarian cherts host the Mn-ore mineralization (Fig. 2). The cherts occur as interlayers with pelagic limestones in the region (Fig. 2a, b and c). The thickness of the Mn-ore layers in different parts of the deposit varies from 1 cm to more than 1 m. The occurrence of iron oxides and hydroxides (hematite and limonite) is visible in some parts of the deposit (Fig. 2d), which is evidence of the presence of Fe along with Mn in this deposit. Faulting has caused crushing and uplift in limestones and radiolarite cherts. Based on field surveys, these faults have a NW-SE trend and a 60° dip to the SW.

Materials and Methods

The samples were analyzed for major elements in the Kansaran Binaloud laboratory, Tehran using a Philips PW 1480 XRF instrument. The trace element contents were measured through ICP-MS method in ACME laboratory, Shivana, Indian. The XRD analyses were carried out in the Zarazma laboratory, Tehran.

Results and Discussion

Mineralography

The samples show a uniform paragenesis in the polished and thin-polished. Pyrolusite is the main manganese-bearing mineral, which is accompanied by braunite.

Citation: Miri, M. et al, 2026. Mineralogy, geochemistry and genesis of the Zaghdarreh Mn deposit, *Res. Earth. Sci:* 17(1), (60-78) DOI: 10.48308/esrj.2025.105906

* Corresponding author E-mail address: m.miri@scu.ac.ir



Pyrolusite is generally occur as fine-grained and associated with fine-grained quartz (Fig. 4a). Psilomelane and todorokite were identified in some samples, occurring as thin veins or filling the empty spaces between the other grains. Quartz, hematite and calcite are other minerals in these samples. The main textures in the studied samples include colloform, micronodular, and synchronous fine-grained and stockwork veins (Fig. 4). The colloform texture (Fig. 4b), which is abundant in the samples, indicates formation in a deep marine environment where manganese oxides and hydroxides precipitated slowly. The micronodular texture (Fig. 4c, d, and e) consists of spherical or elliptical aggregates of manganese minerals in a matrix of fine-grained silica and is indicative of slow depositional environments. The cores of the nodules are made of braunite, which is covered by a coating of pyrolusite (Fig. 4d, e). The synchronous fine-grained texture (Fig. 4f) indicates the coeval deposition of silica and manganese minerals, which is often associated with early diagenetic conditions. The presence of thin, interconnected stockwork veins filled with manganese and quartz minerals (Fig. 4g) indicates the intrusion of hydrothermal fluids into the host rock. Another characteristic of these samples is the alternation of manganese-bearing and silica layers, which demonstrate variations in depositional conditions and the influence of hydrothermal fluids on the mineralization process (Fig. 4h and i).

Mineralogy

The results of X-ray diffraction analysis of two samples from the Zaghdarreh deposit are presented in Fig. 4. The analyses show that quartz, calcite, braunite and hematite are the main minerals and fluorapatite, dolomite, clay minerals and amphibole are the minor ones. Pyrolusite is the main mineral in one sample and is considered as a minor mineral in the other sample, indicating that the conditions of formation of the deposit were not uniform in all parts of it.

Geochemistry

The results of the whole rock geochemical analyses of the Zaghdarreh deposit samples are represented in Table 1. SiO₂ is the most abundant oxide and its amount range from 46 to 63 wt% in the samples. MnO range from 11 to 19 wt%. The other important oxides include CaO (8-14 wt%), FeO (8 to 11 wt%) and Al₂O₃ (0.8 to 1.4 wt%). The correlation diagrams between Mn and Fe, Co, Cu, Ni, Zn and V are presented in Fig. 6. The results show that manganese has the highest correlation with Fe (R = 0.62) and the lowest correlation with Ni (R = -0.63). The SiO₂ vs. Al₂O₃ variation diagram (Toth, 1980) (Fig. 6a) shows that the Zaghdarreh deposit formed from hydrothermal fluids. Also correlations between Al₂O₃, TiO₂ and MgO can be attributed to detrital materials from the adjacent island arcs (Zarrasvandi et al, 2023) and submarine volcanic activities.

Genesis

Manganese oxides are formed by a variety of processes and in a variety of geological environments. In general, manganese deposits are divided into three main categories: sedimentary (sedimentary-diagenetic or stratiform), hydrothermal, hydrogenic, and supergene (Roy, 1992; Kuleshov, 2011). Maynard (2010) also has divided manganese deposits into two types: primary (resulting from hydrothermal, diagenetic, and hydrogenic activities) and secondary (resulting from supergene processes). Hydrothermal deposits are formed by the deposition of metal-rich hydrothermal fluids near oceanic ridges, seamounts, arc islands, and around submarine hot springs, and hydrogenic (deposition from seawater) and primary diagenetic (deposition from pore water) processes produce Fe-Mn sedimentary nodules in the seas (Roy, 1992). Petrographic studies can be useful in determining the origin and genesis of manganese deposits. Deposits close to the source often contain hematite and quartz formed by hydrothermal fluids exhumed from the oceanic crust. Deposits far from the source are associated with jasperite and occur at a distance from mid-ocean ridges (Oksuz, 2011; Brusntinyn and Zhukov, 2012). Hydrothermal deposits usually have coarse-grained crystalline textures with hematite and quartz veins, but hydrogenous deposits have thin-layered textures and ferromanganese crusts (Oksuz, 2011). Also, the presence of stockwork veins and manganese-rich nodules indicates the influence of hydrothermal processes (Maynard, 2010; Oksuz, 2011). The textural and mineralogical characteristics of the studied samples are consistent with hydrothermal deposits. The Fe₂O₃-SiO₂-MnO ternary diagram (Karakus et al, 2010) also confirms this (Fig. 6b). In addition, the Mn/Fe ratio is also an important factor in investigating the origin of Mn deposits. The Mn/Fe ratio is less than 1 in lacustrine deposits, 1 in hydrogenous deposits, and higher than 10 in hydrothermal deposits (Nicholson et al, 1997). This ratio range 1.17 to 1.9 (Table 1) for the studied samples which is between those of hydrothermal and hydrogenous deposits. Also, TiO₂ contents are higher than 1 for hydrogeous Fe-Mn deposits and lower than 1 for the hydrothermal ones (Ahmadi et al, 2019). The TiO₂ values of the Zaghdarreh deposit samples (0.03 to 0.06 wt%, Table 1) are consistent with a hydrothermal origin. The values of some minor elements such as Ni, Cu, V, Co, and Zn are also useful in determining the origin of Mn deposits. Hydrothermal manganese deposits have relatively high concentrations of Co, Ni, and Cu compared to

hydrothermal deposits located along mid-ocean ridges (Toth, 1980; Usui and Someya, 1997). Co is closely associated with Mn oxides and its abundance decreases on average from hydrogeous to diagenetic and hydrothermal deposits (Sabatino et al, 2011). It should be noted that manganese and cobalt are oxidized together in the same catalytic pathway, and as a result, microbial processes can cause cobalt enrichment in manganese deposits (Moffett and Ho, 1996; Polgári et al, 2012). The Co/Zn ratio is important for separating hydrothermal and hydrogeous deposits. The average ratios are 0.15 and 2.5 in hydrothermal and hydrogeous deposits, respectively (Toth, 1983). The Co/Zn ratio for the Zaghdarreh deposit samples range from 0.02 to 0.5, which is consistent with hydrothermal deposits. Trace element diagrams presented for determining the origin of manganese deposits are shown in Fig. 7. The ternary diagram Fe-Mn-(Ni+Co+Cu)*10 (Fig. 7a) indicates a hydrothermal origin for studied the samples. In the Zn-Co-Ni diagram, the samples are mainly located in the hydrothermal deposits, however some samples lie near the hydrogenous deposits (Fig. 7b).

Environment of occurrence

Manganese deposits derived from hydrothermal fluids can form in or near mid-ocean ridges and to a lesser extent in arc islands (Roy, 1992). Sedimentary deposits are formed by the slow deposition of Fe-Mn crusts in deep marine waters or by bacterial processes (Toth, 1980; Usui and Someya, 1997; Jach and Dudek, 2005). Deposits close to the mid-ocean ridge have higher iron contents than others and, in turn, lower TiO₂ contents (Murray, 1994; Nicholson et al, 1997; Ahmadi et al, 2019). In the plot of Al₂O₃/Al₂O₃+Fe₂O₃ vs. Fe₂O₃/TiO₂ (Fig. 8), samples from the Zaghdarreh deposit are located near the mid-ocean ridge, where MnO was deposited by the ridge associated hydrothermal fluids. The high Fe contents and presence of hematite in the samples studied (Fig. 4) are consistent with this.

Comparison with the other Mn deposits from

The Zagros and Sanandaj-sirja zones hosts many Mn-deposits, mainly formed as a result of hydrothermal processes (Zarasvandi et al, 2016b). Comparing the geochemistry of samples from the Zaghdarreh Mn deposit with other deposits can confirm the results and interpretations related to its genesis. In most of the graphs presented in Figs. 7 and 8, geochemistry of the Zaghdarreh deposit are in agreement with the other ones, although there are also some differences. The Fig. 8a shows that, unlike other deposits, diagenetic and bacterial processes did not affect the Zaghdarreh deposit. Also, this deposit, like the Nasirabad deposit (Neyriz area), also exhibits some geochemical characteristics of water-borne deposits, indicating their genesis. Also, the Nasirabad deposit was formed in a pelagic environment and at a distance from the oceanic ridge.

Conclusion

The Zaghdarreh Mn deposit occurs in the southern part of the Sanandaj-Sirjan zone and in the color mélange radiolarite cherts of the Neotethys ophiolites. Petrographic studies and X-ray diffraction analyses show that the deposit mineral include pyrolusite, braunite, todorokite, hematite, quartz, and calcite. The main textures are colloform, micronodular, disseminate, and stockwork veins formed by hydrothermal processes. The geochemical properties of samples, such as high of Si, Fe, Zn and low of Ni, Co, and Cu contents is consistent with hydrothermal fluid originated Mn-deposits. Also, the ratios between Al₂O₃, Fe₂O₃, and TiO₂ indicates that they were formed near a mid-ocean ridge by associated hydrothermal fluids. Submarine volcanic activities and detrital materials from the adjacent island arcs changed the geochemistry of the deposit and elevated Al, Ti and Mg contents. The results obtained for the Zaghdarreh deposit are consistent with other hydrothermal Mn deposits of the Zagros orogeny. Also, differences in position of the adjacent Nasirabad deposit (Neyriz region) and Zaghdarreh deposit indicates that hydrothermal fluids caused both the distal and proximal Mn mineralization in this part of the Neo-Tethys Ocean.

Keywords: Mn-deposit, Geochemistry, Hydrothermal, Ophiolite, Kerman, Sanandaj-Sirjan, Neo-Tethys

کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و زایش کانسار منگنز زاغدره، جنوب غرب استان کرمان، پهنه سنندج - سیرجان جنوبی

میرمحمد میری*¹، علیرضا زراسوندی^۱، محسن رضایی^۱، راضیه الماسی بیرانوند^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

چکیده گسترده

مقدمه

ذخایر منگنز در محیط‌های زمین‌ساختی مختلف از پشته‌های میانی اقیانوس تا محیط‌های پلاژیک و حاشیه‌های قاره‌ای رخ می‌دهند (Evensen et al, 1978). بسته به تفاوت در منبع تامین منگنز، این ذخایر به گرمابی، آبراد و دیاژنتیکی تقسیم می‌شوند (Oksuz, 2011; Polgari et al, 2012; Schmidt et al, 2014). تغییر در منشا باعث ایجاد تفاوت‌های ژئوشیمیایی مشخص در این نهشته‌ها می‌شود. منطقه مورد پژوهش در جنوب غربی استان کرمان (شکل ۱) میزبان ذخایر منگنز است. این ناحیه بخشی از پهنه جنوبی سنندج - سیرجان است که توالی‌های سنگی مختلفی در ارتباط با فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس در زیر صفحه ریز صفحه مرکزی ایران در آن ایجاد می‌شود. هدف از این مطالعه، بررسی خواص کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی کانسار منگنز زاغدره به منظور شناسایی منشا و پیدایش این کانسار است که تاکنون توسط محققین مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین تشکیل این کانسار با برخی دیگر از کانسارهای پهنه سنندج - سیرجان مقایسه می‌شود تا درک بهتری از شرایط حاکم بر محیط کانی‌سازی اقیانوس نئوتتیس در دوران مزوزوئیک به دست آید.

منطقه‌ی مورد مطالعه

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه: از نظر تقسیم‌بندی ساختاری پهنه‌های ایران، منطقه مورد مطالعه در بخش جنوبی پهنه سنندج - سیرجان قرار می‌گیرد (شکل ۱a). این ناحیه همانند سایر بخش‌های پهنه سنندج - سیرجان از سنگ‌های دگرگونی، آذرین و رسوبی تشکیل شده است. سنگ‌های اصلی منطقه شامل آمیزه رنگی با سن کرتاسه است (شکل ۱b). این سنگ‌ها بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی منطقه را پوشانده و بخش‌هایی از توالی افیولیتی، سنگ‌های آتشفشانی، چرت‌های رادیولاریتی و آهک‌های پلاژیک را شامل می‌شوند. در قسمت‌های شمالی سنگ‌های بازالتی و آندزیتی با سن مزوزوئیک-سنوزوئیک وجود دارد. کانسار زاغدره در مرز بین رنگ افیولیتی ملانژ و سنگ آهک‌های پلاژیک رخ می‌دهد (شکل ۱b). در این منطقه، چرت‌های رادیولاری میزبان کانی‌سازی منگنز معدنی هستند (شکل ۲). چرت‌ها به صورت لایه‌های میانی با سنگ آهک‌های پلاژیک در منطقه رخ می‌دهند (شکل ۲a، b و c). ضخامت لایه‌های سنگ معدن منگنز در بخش‌های مختلف کانسار از ۱ سانتی متر تا بیش از ۱ متر متغیر است.

استناد: میری، م.م. و همکاران، ۱۴۰۵. کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و زایش کانسار منگنز زاغدره، جنوب غرب استان کرمان، پژوهشهای دانش زمین: ۱۷(۱)، (۶۰-۷۸)، DOI: 10.48308/esrj.2025.105906

E-mail: m.miri@scu.ac.ir

* نویسنده مسئول:



وجود اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و لیمونیت) در برخی از نقاط کانسار قابل مشاهده است (شکل d2) که گواه وجود آهن به همراه منگنز در این کانسار است. گسلش باعث خرد شدن و بالا آمدن سنگ‌های آهکی و چرت‌های رادیولاریت شده است. بر اساس بررسی‌های میدانی، این گسل‌ها دارای روند NW-SE و شیب ۶۰ درجه به سمت جنوب غربی هستند.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی زمین‌شیمی و کانی‌شناسی کانسار زاغدره، تعداد ۴۰ نمونه از بخش‌های مختلف کانسار در طی عملیات‌های صحرائی برداشت شد. مقاطع نازک- صیقلی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ پلاریزان با نور انعکاسی مطالعه و نمونه‌های متناسب با اهداف پژوهش به برای انجام آنالیزهای مربوطه به آزمایشگاه مواد معدنی فرستاده شدند. مقادیر اکسید عناصر اصلی در آزمایشگاه شرکت کانساران بینالود تهران و توسط روش XRF با دستگاه Philips PW 1480 تعیین گشتند.

نتایج و بحث

کانی‌شناسی

تجزیه و تحلیل XRD

نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس دو نمونه از کانسار زاغدره در شکل ۳ ارائه شده است. آنالیزها نشان می‌دهد که کوارتز، کلسیت، برونیت و هماتیت کانی‌های اصلی و فلوراپاتیت، دولومیت، کانی‌های رسی و آمفیبول جزئی هستند. پیرولولزیت کانی اصلی یک نمونه است و در نمونه دیگر کانی فرعی محسوب می‌شود که نشان می‌دهد شرایط تشکیل کانسار در تمام قسمت‌های آن یکنواخت نبوده است.

پتروگرافی

بررسی‌های انجام شده بر روی مقاطع نازک - صیقلی و صیقلی، نشان‌دهند وجود پاراژنز یکنواخت در تمامی نمونه‌هاست. پیرولولزیت، کانه اصلی محتوی منگنز در نمونه‌هاست که با براونیت همراهی می‌شود. پیرولولزیت‌ها عموماً به صورت دانه‌ریز و به همراه کوارتزهای دانه‌ریز دیده می‌شود (شکل a4). پسپولوملان و تودوروکیت نیز در برخی نمونه‌ها شناسایی شده‌اند که به صورت رگه‌های نازک یا پرکننده فضاهای خالی بین دیگر دانه‌ها رخداد دارند. کوارتز، هماتیت و کلسیت دیگر کانی‌های این نمونه‌ها هستند. بافت‌های مهم در نمونه‌های مورد بررسی شامل کلوروفرم، میکروندولار، همزمان‌زایش‌ریزدانه‌ای و رگه‌های استوکورکی می‌باشند (شکل ۴). بافت کلوروفرم (شکل b4) که به فراوانی در نمونه‌ها دیده می‌شود نشان می‌دهد که این کانی‌ها در یک محیط دریایی عمیق در آنجا اکسید و هیدروکسیدهای منگنز به آرامی رسوب کرده‌اند شکل گرفته‌اند. بافت میکروندولار (شکل c4، d و e) از تجمعات کروی یا بیضوی‌شکل از کانی‌های منگنز در زمینه‌ای متشکل از سیلیس ریزدانه‌ای شکل می‌گیرد و شاخص محیط‌های آرام رسوبی می‌باشد. در نمونه‌های مورد بررسی، هسته‌های این بافت از کانی براونیت ساخته شده که پوششی از پیرولولزیت آنها را دربر می‌گیرد (شکل d4 و e). بافت همزمان‌زایش‌ریزدانه‌ای (شکل f4) نشان‌دهنده هم‌زمانی رسوب‌گذاری کانی‌های سیلیسی و منگنز است بوده که اغلب با شرایط دیاژنتیکی اولیه مرتبط می‌باشد. حضور رگه‌های نازک و به هم پیوسته رگه‌های استوکورکی پرشده از کانی‌های منگنز و کوارتز (شکل g4) نشان‌دهنده نفوذ سیال‌های گرمایی به درون سنگ میزبان است. از دیگر مشخصات این نمونه‌ها تناوب لایه‌های حاوی کانه منگنز و لایه‌های سیلیسی است که نشان‌دهنده تغییرات در شرایط رسوب‌گذاری و تأثیر سیالات گرمایی بر فرآیند کانه‌زایی می‌باشد (شکل h4 و i).

بحث

ژئوشیمی

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل کل ژئوشیمیایی سنگ نمونه‌های نهشته زاغدره در جدول ۱ نشان داده شده است. SiO_2 فراوان‌ترین اکسید است و مقدار آن از ۴۶ تا ۶۳ درصد وزنی در نمونه‌ها متغیر است. محدوده MnO از ۱۱ تا ۱۹ درصد وزنی. اکسیدهای مهم دیگر عبارتند از CaO (۸-۱۴ درصد وزنی)، FeO (۸ تا ۱۱ درصد وزنی) و Al_2O_3 (۰/۸ تا ۱/۴ درصد وزنی). نمودارهای همبستگی بین منگنز و آهن، کوب، مس، نیکل، روی و V در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که منگنز بیشترین همبستگی را با آهن ($R=0/62$) و کمترین همبستگی را با نیکل ($R=-0/63$) دارد. نمودار تغییرات SiO_2 در مقابل (Toth, 1980)

Al_2O_3 (شکل ۶a) نشان می‌دهد که کانسار زاغدره از سیالات گرمایی تشکیل شده است. همچنین همبستگی بین TiO_2 و MgO را می‌توان به حضور مواد آواری از جزایر کمانی (Zarrasvandi et al, 2023) و فعالیت‌های آتشفشانی مجاور محیط رخداد نسبت داد.

پیدایش

اکسیدهای منگنز در اثر فرآیندهای مختلف و در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی تشکیل می‌شوند. به طور کلی، ذخایر منگنز به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: رسوبی (رسوبی-دیاژنتیکی یا چینه‌ای)، گرمایی، آزادک و سوپرژن (Kuleshov, Roy, 1992). مینارد (2011). مینارد (2010) نیز ذخایر منگنز را به دو نوع اولیه (ناشی از فعالیت‌های گرمایی، دیاژنتیکی و آزاد) و ثانویه (ناشی از فرآیندهای سوپرژن) تقسیم کرده است. ذخایر گرمایی از رسوب سیالات گرمایی غنی از فلز در نزدیکی پشته‌های اقیانوسی، کوه‌های دریایی، جزایر قوس و اطراف چشمه‌های آب گرم زیردریایی تشکیل می‌شوند و فرآیندهای آزادک (رسوب از آب دریا) و دیاژنتیک اولیه (رسوب از آب منفذی) ندول‌های رسوبی Fe-Mn را در دریاها تولید می‌کنند. مطالعات پتروگرافی می‌تواند در تعیین منشأ و پیدایش ذخایر منگنز مفید باشد. رسوبات نزدیک به منبع اغلب حاوی هماتیت و کوارتز هستند که توسط مایعات گرمایی بیرون آورده شده از پوسته اقیانوسی تشکیل شده‌اند. رسوبات دور از منبع با جاسپریت همراه است و در فاصله‌ای از پشته‌های میانی اقیانوس رخ می‌دهد (Brusntinyn and Zhukov, 2012; Oksuz, 2011). رسوبات گرمایی معمولاً دارای بافت‌های کریستالی دانه درشت با رگه‌های هماتیت و کوارتز هستند، اما نهشته‌های آزاد دارای بافت‌های لایه نازک و پوسته فرومنگنز هستند (Oksuz, 2011). همچنین وجود رگه‌های استوک و گره‌های غنی از منگنز نشان‌دهنده تأثیر فرآیندهای گرمایی است (Maynard, 2010; Oksuz, 2011). ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه با نهشته‌های گرمایی همخوانی دارد. نمودار سه تایی $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MnO}$ (Karakuş et al, 2010) نیز این موضوع را تایید می‌کند (شکل ۶b). علاوه بر این، نسبت منگنز به آهن نیز عامل مهمی در بررسی منشأ ذخایر منگنز است. نسبت منگنز/آهن در نهشته‌های دریایچه‌ای کمتر از ۱، در نهشته‌های آزاد ۱، و در نهشته‌های گرمایی از ۱۰ بیشتر است (Nicholson et al, 1997). این نسبت بین ۱/۱۷ تا ۱/۹ (جدول ۱) برای نمونه‌های مورد مطالعه که بین کانسارهای گرمایی و آزاد قرار دارد. همچنین، محتوای TiO_2 برای ذخایر Fe-Mn آبدار بالاتر از ۱ و برای کانسارهای گرمایی کمتر از ۱ است (Ahmadi et al, 2019). مقادیر TiO_2 نمونه‌های کانسار زاغدره (۰/۰۳ تا ۰/۰۶ درصد وزنی، جدول ۱) با منشأ گرمایی سازگار است. مقادیر برخی از عناصر جزئی مانند Ni، Cu، V، Co و Zn نیز در تعیین منشأ ذخایر منگنز مفید هستند. ذخایر گرمایی منگنز دارای غلظت نسبتاً بالایی از Ni، Co و Cu در مقایسه با ذخایر گرمایی واقع در امتداد پشته‌های میانی اقیانوس هستند (Toth, 1980; Usui and Someya, 1997). کبالت، ارتباط تنگاتنگی با اکسیدهای منگنز دارد و فراوانی آن به طور متوسط از ذخایر آبدار به دیاژنتیک و گرمایی کاهش می‌یابد (Sabatino et al, 2011). لازم به ذکر است که منگنز و کبالت با هم در یک مسیر کاتالیزوری اکسید می‌شوند و در نتیجه فرآیندهای میکروبی می‌توانند باعث غنی‌شدن کبالت در ذخایر منگنز شوند (Moffett and Ho, 1996; Polgári et al, 2012). نسبت Co/Zn برای جداسازی ذخایر گرمایی و هیدروژئو مهم است. میانگین نسبت‌ها در نهشته‌های گرمایی و آزاد به ترتیب ۰/۱۵ و ۲/۵ است (Toth, 1980). نسبت Co/Zn برای نمونه‌های کانسار زاغدره از ۰/۰۲ تا ۰/۵ متغیر است که با کانسارهای گرمایی همخوانی دارد. نمودارهای عناصر کمیاب ارائه شده برای تعیین منشأ رسوبات منگنز در شکل ۷ نشان داده شده است. در نمودار Zn-Co-Ni، نمونه‌ها عمدتاً در نهشته‌های گرمایی قرار دارند، با این حال برخی از نمونه‌ها در نزدیکی نهشته‌های آزاد قرار دارند (شکل ۶b). در نمودار Zn+Cu+Pb+V در مقابل Ni+Co (شکل ۶c)، نمونه‌ها بین مناطق گرمایی و گرمایی قرار می‌گیرند.

محیط رخداد

ذخایر منگنز به دست آمده از سیالات گرمایی می‌تواند در یا نزدیک پشته‌های میانی اقیانوس و به میزان کمتری در جزایر قوسی شکل بگیرد (Roy, 1992). رسوبات رسوبی با رسوب آهسته پوسته‌های Fe-Mn در آب‌های عمیق دریایی یا فرآیندهای باکتریایی تشکیل می‌شوند (Toth, 1980; Usui and Someya, 1997; Jach and Dudek, 2005). کانسارهای نزدیک به پشته میان اقیانوسی دارای محتوای آهن بالاتری نسبت به سایرین هستند و به نوبه خود، محتوای TiO_2 کمتری دارند (Murray, 1994; Nicholson et al, 2019). در نمودار $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ در مقابل $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (شکل ۸)، نمونه‌هایی از کانسار

زاغدره در نزدیکی پشته میان اقیانوسی قرار دارند، جایی که MnO توسط سیالات گرمایی مرتبط با پشته رسوب کرده است. محتوای آهن بالا و وجود هماتیت در نمونه‌های مورد مطالعه (شکل ۴) با این امر مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

کانسار منگنز زاغدره در قسمت جنوبی پهنه ساندج - سیرجان و در چرت‌های رادیولاریتی ملانژ رنگی افیولیت‌های نئوتتیس وجود دارد. مطالعات پتروگرافی و آنالیزهای پراش اشعه ایکس نشان می‌دهد که کانی ذخایر شامل پیرولوویت، برونیت، تودوروکیت، هماتیت، کوارتز و کلسیت است. بافت‌های اصلی عبارتند از رگه‌های کلروفرم، میکروندولار، انتشاری و استوک‌ورک که توسط فرآیندهای گرمایی تشکیل شده‌اند. ویژگی‌های ژئوشیمیایی نمونه‌ها مانند مقادیر زیاد Zn، Fe، Si و مقادیر کم Ni، Cu و Co با ذخایر منگنز منشأ سیال گرمایی سازگار است. همچنین، نسبت‌های بین Al_2O_3 ، Fe_2O_3 و TiO_2 نشان می‌دهد که آنها در نزدیکی پشته میان اقیانوسی توسط سیالات گرمایی مرتبط تشکیل شده‌اند. فعالیت‌های آتشفشانی زیردریایی و مواد آواری از جزایر کمانی مجاور ژئوشیمی نهشته را تغییر داد و سبب بالا رفتن محتوای آلومینیم، تیتانیوم و منیزیم شده است. نتایج به دست آمده برای نهشته زاغدره با سایر نهشته‌های منگنز گرمایی کوه‌زایی زاگرس مطابقت دارد. همچنین اختلاف در موقعیت دو کانسار مجاور نصیرآباد (منطقه نیریز) و زاغدره نشان می‌دهد که سیالات گرمایی سبب کانه‌زایی هم به صورت برجا و هم نابرجا در این بخش از اقیانوس نئوتتیس شده‌اند.

واژگان کلیدی: کانسار منگنز، زمین‌شیمی، گرمایی، افیولیت، کرمان، ساندج-سیرجان، نئوتتیس.

مقدمه

(et al, 2019). این نهشته‌ها همچنین در ادامه کوه‌زایی زاگرس و در کردستان عراق نیز حضور دارند (Latif et al, 2025). منطقه مورد بررسی در جنوب غرب استان کرمان (شکل ۱) میزبان نهشته‌های منگنز می‌باشد. این منطقه بخشی از پهنه ساندج - سیرجان جنوبی است که در آن توالی‌های سنگی مختلف با سن مزوئیک تا سنوزوئیک رخداد دارند. مطالعات محدودی در مورد سنگ‌های آذرین (Kashfi et al, 2023) و کانه‌زایی مس (Ashgharzadeh et al, 2018) در منطقه صورت گرفته است. هدف از این پژوهش بررسی کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی کانسار منگنز زاغدره به منظور شناسایی منشأ و شیوه زایش این کانسار می‌باشد. همچنین نحوه پیدایش این کانسار با برخی دیگر از کانسارهای پهنه ساندج - سیرجان مقایسه می‌گردد تا درکی بهتر از شرایط حاکم بر محیط کانه‌زایی اقیانوس نئوتتیس در دوران مزوئیک به دست آید.

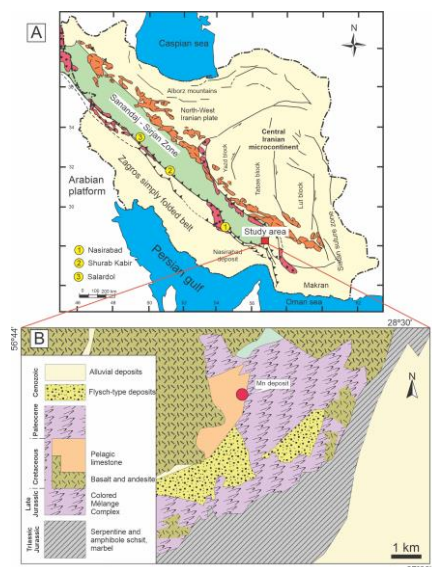
منطقه‌ی مورد مطالعه

از نظر تقسیم‌بندی ساختاری پهنه‌های ایران، منطقه مورد مطالعه در بخش جنوبی پهنه ساندج - سیرجان قرار می‌گیرد (شکل ۱A). پهنه ساندج - سیرجان با درازای حدود ۱۲۰۰ کیلومتر و پهنای حدود ۱۰۰ کیلومتر در نتیجه بسته

کانسارهای منگنز در پهنه‌های ساختاری مختلف ایران و در طی دوره‌های زمین‌شناسی از پرکامبرین تا سنوزوئیک رخداد دارند. در این میان، کمربند کوه‌زایی زاگرس نیز در بخش‌های مختلف میزبان کانسار منگنز است، مانند سرخ وند، آباده تشک (Zarasvandi et al, 2016a)، نصیرآباد (Zarasvandi et al, 2013)، سالاردل (Shahrokhi and Ahankoub, 2023). شوراب کبیر شهرکرد (Farhadinejad, 2022)، توکلان (Moinevaziri, 2019). نهشته‌های منگنز در موقعیت‌های زمین‌ساختی مختلفی از پشته‌های میان‌اقیانوسی گرفته تا آبهای عمیق آزاد و حاشیه‌قاره‌ها رخداد دارند (Evensen et al, 1978). همچنین بسته به تفاوت در منشأ تامین منگنز، این نهشته‌ها به انواع گرمایی، آزاد و دیاژنتیک تقسیم‌بندی می‌شوند (Oksuz, 2011; Polgári et al, 2012; Schmidt et al, 2014). تغییر در منشأ سبب ایجاد تفاوت‌های زمین‌شیمیایی مشخص در این نهشته‌ها می‌گردد. در ایران نیز نهشته‌های منگنز بسیاری رخداد دارد. مجموعه ماگمایی ارومیه-دختر، پهنه های ایران مرکزی، البرز، ساندج-سیرجان و سبزواری و افیولیت‌های نئوپروتوزوئیک پسین تا ائوسن در بخش‌های مختلف خود میزبان کانه‌زایی منگنز هستند (Maghfouri

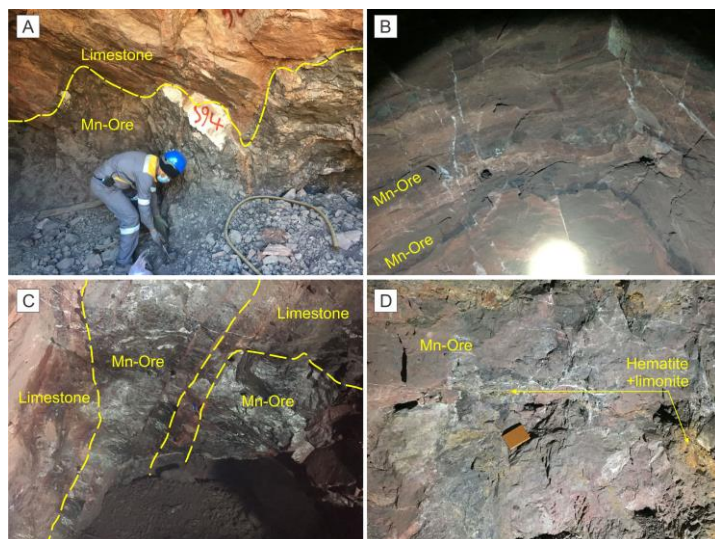
آتشفشانی، کراتوفیر، چرت‌های رادیولاریتی و آهک‌های پلاژیک می‌باشند. در بخش‌های شمالی سنگ‌های بازالتی و آندزیتی با سن مزوزوئیک-سنوزوئیک رخداد دارند. دگرسانی‌های آرژیلیک و سیلیسی شدن در بخش‌هایی از این سنگ‌ها به چشم می‌خورد. فیلیش‌های سنوزوئیک بر روی سنگ‌های آمیزه رنگی قرار گرفته‌اند. رسوبات آبرفتی عهد حاضر جوان‌ترین واحد سنگی هستند که به صورت دگرشیب بر روی فیلیش‌ها و بازالت‌ها قرار دارند (Azizi et al, 2007). کانسار زاغدره در درون آمیزه زنگی افیولیتی و در بخش چرت‌های رادیولاریتی رخداد دارد (شکل B۱). چرت‌ها به صورت بین لایه‌ای با آهک‌های پلاژیک در منطقه دیده می‌شوند (شکل A۲، B و C). ضخامت لایه‌های منگنز در بخش‌های مختلف کانسار از ۱ سانتی‌متر تا بیشتر از ۱ متر متغیر است. رخداد اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و لیمونیت) در برخی از قسمت‌های کانسار به چشم می‌خورد (شکل D۲) که گواهی بر حضور آهن به همراه منگنز در این کانسار است. گسل خوردگی سبب خرد شدگی و بالآمدگی در سنگ‌های آهکی و چرت‌های رادیولاریتی شده است. شواهد صحرایی و نتایج مطالعات پیشین حاکی از وجود مولفه افقی راستگرد با امتداد شمال-غرب-جنوب شرق و مولفه معکوس با شیب حدود ۶۰ درجه به سمت جنوب‌غرب بر روی این گسل می‌باشد.

شدن اقیانوس نئوتتیس و فرورانش پوسته آن به زیر خرده صفحه ایران مرکزی در طی مزوزوئیک شکل گرفته است (Stöcklin, 1968; Alavi, 1994; Ghasemi and Talbot, 2006; Hassanzadeh and Wernicke, 2016). عمده سنگ‌های تشکیل‌دهنده این پهنه شامل متاپلیت‌ها، متاکربنات‌ها و متابازیت هستند که تحت تاثیر نفوذ توده های آذرین دچار دگرگونی مجاورتی گشته‌اند (مانند Stöcklin, 1968; Alavi, 1994; Ghasemi and Talbot, 2006; Hassanzadeh and Wernicke, 2016). دیگر بخش‌های این پهنه، این منطقه نیز متشکل از سنگ های دگرگونی، آذرین و رسوبی می‌باشد (Ghasemi and Talbot, 2006; Hassanzadeh and Wernicke, 2016). طبق نقشه زمین‌شناسی منطقه (Azizi et al, 2007) سنگ‌های دگرگونی (سرپنتین شیبست، آمفیبول شیبست و مرمراه‌های پهنه سندنج-سیرجان با سن مزوزوئیک، قدیمی ترین سنگ‌های منطقه را تشکیل می‌دهند. این سنگ‌ها در طی رویدادهای زمین‌ساختی مرتبط با بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس که سبب شکل‌گیری سنگ‌های دگرگونی پهنه سندنج-سیرجان شد شکل گرفته‌اند. عمده لیتولوژی منطقه شامل آمیزه‌رنگی با سن کرتاسه است (شکل B۱). این سنگ‌ها بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی منطقه را در بر گرفته و شامل بخش‌های توالی افیولیتی، سنگ‌های



شکل ۱: A: نقشه زمین‌شناسی ایران (برگرفته از قاسمی و تالبوت (Ghasemi and Talbot, 2006)) به همراه موقعیت کانسارهای زاغدره، نصیرآباد، سالاردل و شوراب کبیر، B: نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مورد بررسی (برگرفته از عزیزی و همکاران (Azizi et al, 2007)).

Fig. 1: A: Geology map of Iran (after Ghasemi and Talbot, 2006) with the location of the Zaghdarreh, Nasirabad, Salardol and Shourab Kabir deposits, B: Simplified geology map of the study area (after Azizi et al, 2007).



شکل ۲: A، B و C: توالی لایه‌های چرت میزبان کانه‌زایی منگنز و آهک‌های پلاژیک در کانسار زاغدره؛ D: رخداد هماتیت و لیمونیت به همراه پیرولولزیت در محدوده مورد بررسی.

Fig. 2: A, B and C: alternations of the Mn-ore host chert layers and plagic limestones in the Zaghdarreh deposit; D: Occurrence of hematite and limonite together with pyrolusite in the study area.

های فرعی محسوب می‌شوند. پیرولولزیت در یک نمونه کانه اصلی بوده و در نمونه دیگر فرعی محسوب می‌شود که نشان می‌دهد شرایط تشکیل کانسار در تمام بخش‌های آن یکنواخت نبوده است. کانه‌نگاری

بررسی‌های انجام شده بر روی مقاطع نازک - صیقلی و صیقلی، نشان می‌دهند پیرولولزیت، کانه اصلی محتوی منگنز در نمونه‌هاست که با براونیت همراهی می‌شود. پیرولولزیت‌ها عموماً به صورت دانه‌ریز و به همراه کوارتزهای دانه‌ریز دیده می‌شود (شکل ۴A). پسیلوملان و تودوروکیت نیز در برخی نمونه‌ها شناسایی شده‌اند که به صورت رگه‌های نازک یا پرکننده فضاهای خالی بین دیگر دانه‌ها رخداد دارند. براونیت به همراه کوارتز از رایج‌ترین کانی‌ها در کانسارهای دورن‌زاد منگنز بوده و معمولاً در فرآیندهای درون‌زاد شکل می‌گیرد و تشکیل آن به واکنش‌های پیچیده‌ای میان اکسیدهای منگنز و محلول‌های گرمایی بستگی دارد (مانند Huebner and Flohr, 1990). علاوه بر این، واکنش‌های میان اکسیدهای منگنز و سیلیس موجود در رسوبات نیز می‌تواند منجر به تشکیل این کانی شود. کوارتز، هماتیت و کلسیت دیگر کانی‌های این نمونه‌ها هستند. لازم به توضیح است که کانی‌های رسی، فلئورآپاتیت و دولومیت که در آنالیز XRD شاخص‌سازی شده‌اند در مقاطع قابل شناسایی نبودند. بافت‌های مهم در

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی زمین‌شیمی و کانی‌شناسی کانسار زاغدره، تعداد ۴۰ نمونه از بخش‌های مختلف کانسار در طی عملیات‌های صحرایی برداشت شد. مقاطع نازک - صیقلی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ پلاریزان با نور انعکاسی مطالعه و نمونه‌های متناسب با اهداف پژوهش به برای انجام آنالیزهای مربوطه به آزمایشگاه مواد معدنی فرستاده شدند. مقادیر اکسید عناصر اصلی در آزمایشگاه شرکت کانساران بینالود تهران و توسط روش XRF با دستگاه Philips PW 1480 تعیین گشتند. دقت اندازه‌گیری برابر با کمتر از ۲ درصد برای عناصر با فراوانی بالاتر از ۵ درصد وزنی و کمتر از ۵ درصد برای عناصر با فراوانی بیش از ۵ درصد وزنی می‌باشد. مقادیر عناصر فرعی با روش ICP-MS آزمایشگاه ACME شیوانا کشور هندوستان مورد آنالیز قرار گرفتند. دقت آنالیز برای عناصر فرعی بین دقت آنالیزها برای عناصر کمیاب از ۰/۵ تا ۵ ppm می‌باشد.

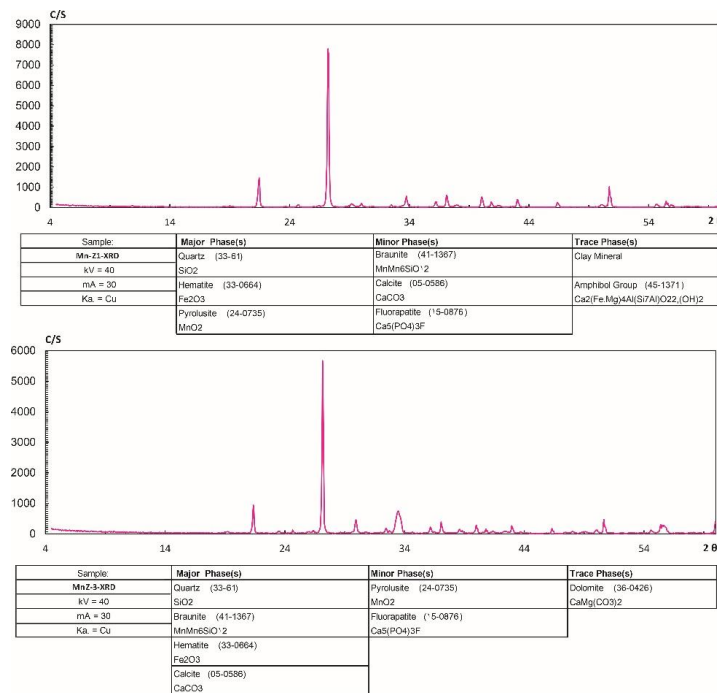
بحث و نتایج

کانی‌شناسی

نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس دو نمونه از کانسنگ کانسار زاغدره در شکل ۳ ارائه شده‌اند. آنالیزها نشان می‌دهند که کوارتز، کلسیت، براونیت و هماتیت کانی‌های اصلی بوده و فلئورآپاتیت، دولومیت، کانی‌های رسی و آمفیبول کانی

کانی‌های سیلیسی و منگنز بوده که اغلب با شرایط دیاژنتیکی اولیه مرتبط می‌باشد (Karakuş et al, 2010). حضور رگه‌های نازک و به هم پیوسته استوک‌ورکی پرشده از کانی‌های منگنز و کوارتز (شکل G۴) نشان‌دهنده نفوذ سیال‌های گرمایی به درون سنگ میزبان است (Jach and Dudek, 2005). از دیگر مشخصات این نمونه‌ها تناوب لایه‌های حاوی کانه منگنز و لایه‌های سیلیسی است که نشان‌دهنده تغییرات در شرایط رسوب‌گذاری و تأثیر سیالات گرمایی بر فرآیند کانه‌زایی می‌باشد (شکل H۴ و I). هم‌زایشی کانه‌های پیرولوویت و هماتیت نشان‌دهنده شرایط pH بالاتر از ۶ و Eh بالاتر از ۰/۴ است (Brookins, 1988).

نمونه‌های مورد بررسی شامل کلوفرم، میکرو نودولار، افشان و رگه‌های استوک‌ورکی می‌باشند (شکل ۴). بافت کلوفرم (شکل B۴) که به فراوانی در نمونه‌ها دیده می‌شود نشان می‌دهد که این کانی‌ها در یک محیط دریایی عمیق که در آنجا اکسید و هیدروکسیدهای منگنز به آرامی رسوب کرده اند شکل گرفته‌اند (Zarasvandi et al, 2013). بافت میکرو نودولار (شکل C۴، D و E) از تجمعات کروی یا بیضوی شکل از کانی‌های منگنز در زمینه‌ای متشکل از سیلیس ریزدانه‌ای شکل می‌گیرد و شاخص محیط‌های آرام رسوبی می‌باشد (Pattan et al, 1993). در نمونه‌های مورد بررسی، هسته‌های این بافت از کانی براونیت ساخته شده که پوششی از پیرولوویت آنها را دربر می‌گیرد (شکل D۴ و E). بافت افشان (شکل F۴) نشان‌دهنده هم‌زمانی رسوب‌گذاری



شکل ۳: نتایج آنالیز XRD نمونه‌های کانسار منگنز زاغدره

Fig. 3: XRD analysis results of the Zaghdarreh Mn deposit samples

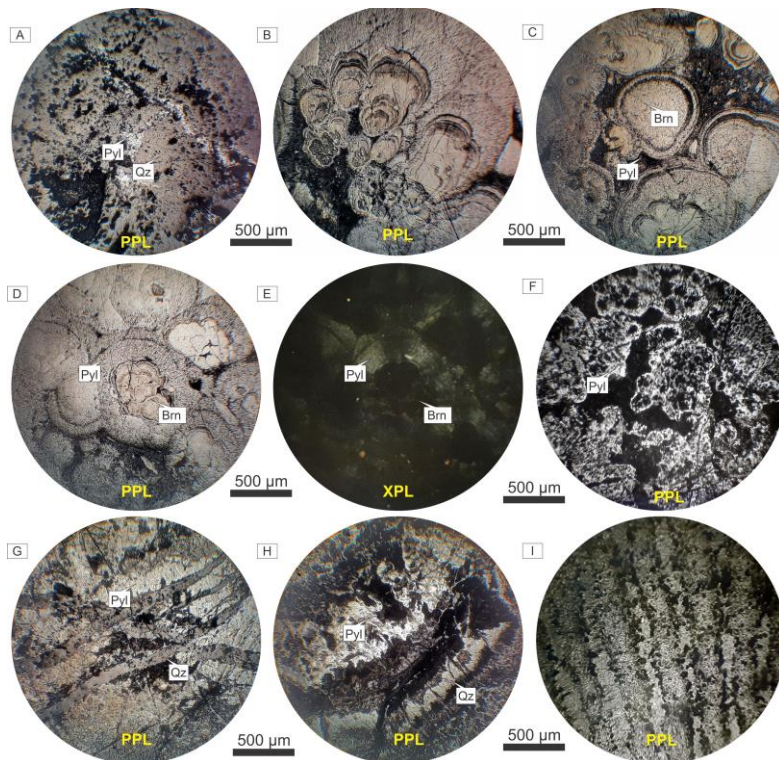
این نمونه‌ها هستند. نسبت Mn/Fe در نمونه‌ها از ۱/۷ تا ۱/۹ و نسبت Si/Al از ۲۴ تا ۸۰ تغییر می‌کند. اساساً حضور آلومینیوم در نهشته‌های منگنز به ورود مواد آواری نسبت داده شده است (Crerar et al, 1982; Maynard, 2010; Polgari et al, 2012; Zarasvandi et al, 2023). اما همچنین می‌توان آن را حاصل فعالیت‌های آتشفشانی حوضه کف اقیانوس نیز در نظر گرفت. از سوی دیگر، تیتانیم در آب دریا محلول نبوده و در محلول‌های گرمایی نامتحرک

زمین‌شیمی

نتایج آنالیز زمین‌شیمیایی سنگ‌کل نمونه‌های کانسار زاغدره در جدول ۱ ارائه شده‌اند. SiO₂ فراوان‌ترین اکسید در این نمونه‌ها محسوب می‌شود که مقدار آن در نمونه‌های مختلف از ۴۶ تا ۶۳ درصد وزنی تغییر می‌کند. پس از آن MnO از ۱۱ تا ۱۹ درصد وزنی متغیر است. CaO (۸-۱۴ درصد وزنی)، FeO (۸ تا ۱۱ درصد وزنی) و Al₂O₃ (۰/۸ تا ۱/۴ درصد وزنی) دیگر اکسیدهای عناصر اصلی مهم در

آواری با منشأ مافیک از جزایر کمانی اطراف محل کانه‌زایی به حوضه رسوبی در نظر گرفته‌اند، اگرچه با توجه به زایش کانسار (به ادامه توجه شود)، فعالیت‌های آتشفشانی مرتبط با پشته‌های میان اقیانوسی نیز قطعاً در حضور این اکسیدها تأثیرگذار بوده‌اند. بنابراین بخشی از اکسیدها را حاصل فرآیندهای آتشفشانی زیردریایی و بخش نیز از آنها را محصول فرسایش خشکی‌های مجاور در نظر گرفت.

است، از این رو به عنوان معیاری برای ورود مواد آواری در نهشته‌های منگز در نظر گرفته می‌شود (Sugisaki, 1984; Shah and Khan, 1999; Maynard, 2010; Sasmaz et al, 2013). همبستگی بین محتوای آلومینیوم، تیتانیوم و منیزیم (شکل ۵) نشان دهنده ارتباط در نحوه رخداد آنها در نهشته مورد بررسی است. زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al, 2023) این همبستگی را به عنوان گواهی بر ورود مواد



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپی مقاطع صیقلی نمونه‌های کانسار زاغدره. A: رخداد پیرولوزیت با بافت افشان دانه‌ریز به همراه کوارتز؛ B: بافت کلوفرم؛ C, D, E و F: بافت میکرو نودولار؛ G: رگه‌های استوکورکی؛ H و I: تناوب لایه‌های حاوی کانه منگنز و لایه‌های سیلیسی. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها: Brn: براونیت، Pyl: پیرولوزیت و Qz: کوارتز (Whitney and Evans, 2010).

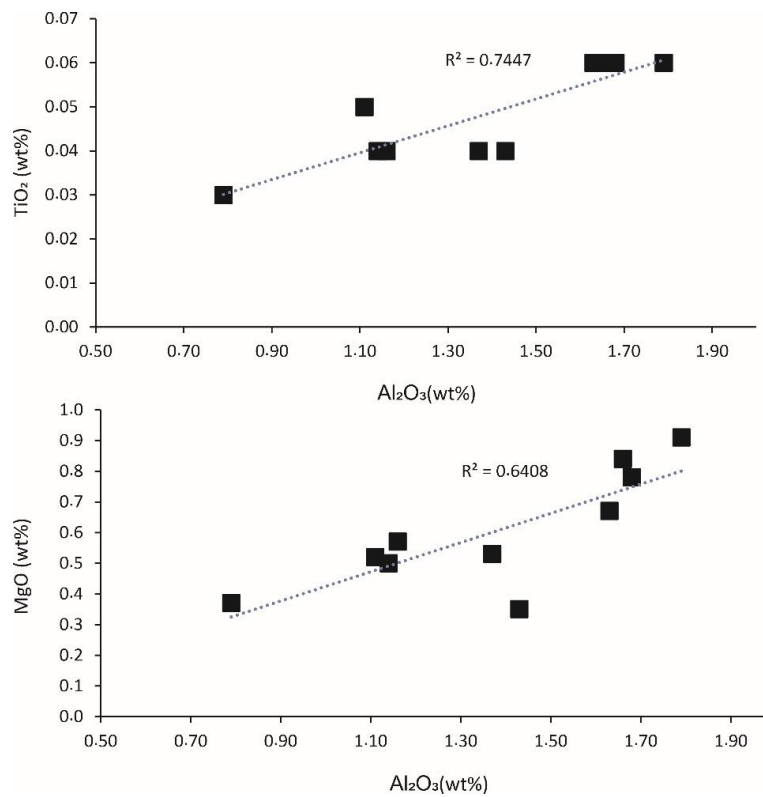
Fig. 4: Microscopic photographs of the polished sections from the Zaghdarreh deposit samples. A: fine-grain pyrolusite with disseminate texture and quartz; B: colloform texture; C, D, E and F: micro-nodular texture; G: stockwork veins; H and I: alternation of Mn-bearing and silica layers. The mineral abbreviations are Brn: braunite, Pyl: pyrolusite, and Qz: quartz (Whitney and Evans, 2010).

جدول ۱: محتوای عناصر اصلی و کمیاب نمونه‌های کانسار زاغدره. مقادیر عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و مقادیر عناصر کمیاب بر حسب ppm هستند.

Table 1: Major and trace element contents of the Zaghdarreh deposit. The major element oxides and trace elements are in wt% and ppm, respectively.

Sample	ALMO1	ALMO2	ALMO3	ALMO4	ALMO5	ALM32mn	ALM33mn	ALM42mn	ALM51mn	ALM53mn
SiO ₂	63.35	52.81	59.67	46.06	58.55	43.90	52.02	53.63	47.48	52.31
TiO ₂	0.03	0.05	0.04	0.06	0.04	0.06	0.06	0.04	0.06	0.04
Al ₂ O ₃	0.79	1.11	1.14	1.66	1.16	1.79	1.63	1.37	1.68	1.43
Fe ₂ O ₃	9.02	9.55	8.79	10.26	9.48	11.50	9.33	11.96	11.13	11.56
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
MnO	10.77	11.47	11.93	13.05	13.32	14.65	15.49	17.06	18.03	19.54

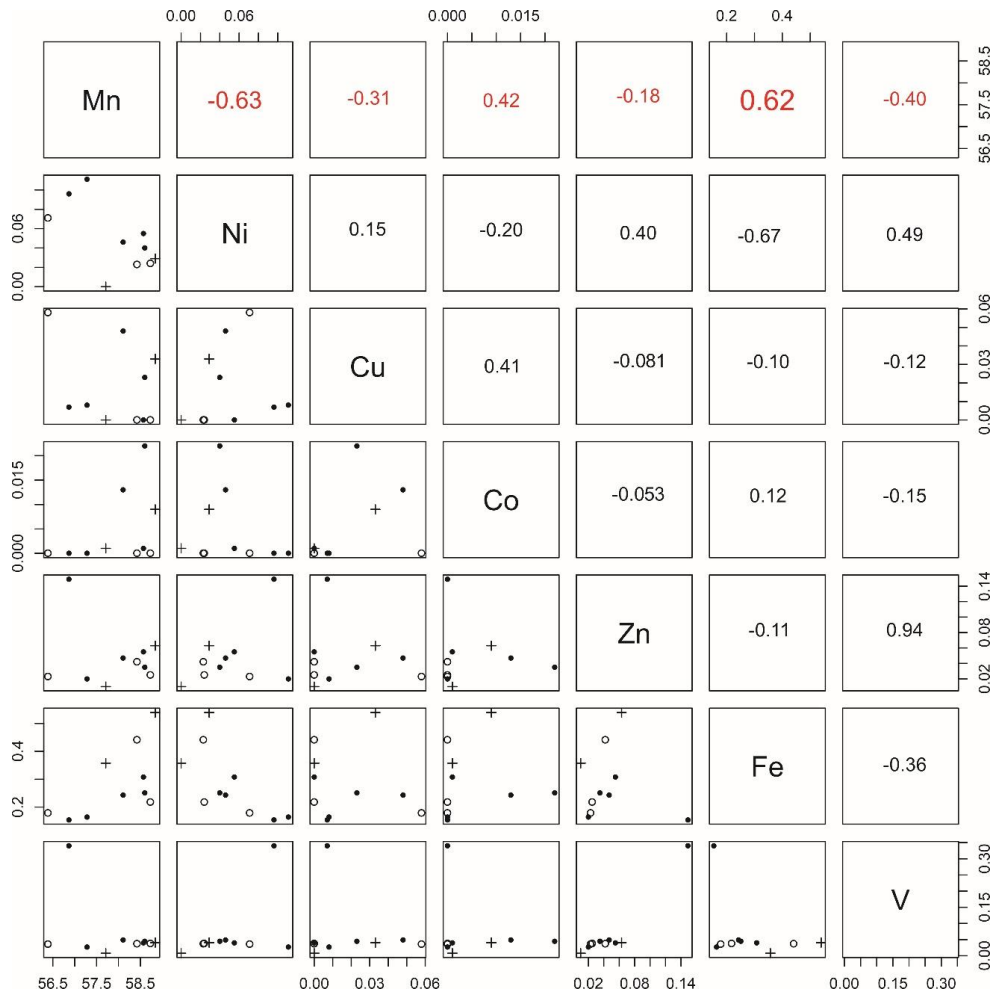
MgO	0.37	0.52	0.50	0.84	0.57	0.91	0.67	0.53	0.78	0.35
CaO	8.18	12.49	9.12	14.72	8.43	14.36	10.64	7.80	10.33	6.63
Na ₂ O	<0.01	0.10	0.03	0.10	0.03	0.12	0.03	<0.01	0.01	0.17
K ₂ O	0.08	0.16	0.13	0.18	0.14	0.17	0.11	0.06	0.18	0.03
BaO	0.20	0.30	0.35	0.30	0.38	0.33	0.48	0.55	0.53	0.88
P ₂ O ₅	0.18	0.15	0.15	0.48	0.15	0.47	0.19	0.42	0.15	0.70
SO ₃	0.13	0.13	0.14	0.15	0.15	0.23	0.21	0.30	0.21	0.35
Total	93.11	88.86	92.00	87.87	92.41	88.5	90.88	93.73	90.59	94.00
LOI	6.81	10.98	7.88	12.04	7.44	11.52	9	6.25	9.18	6.11
Pb	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05
Ti	0.04	0.00	0.06	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02
Zn	0.01	0.06	0.06	0.04	0.02	0.03	0.05	0.04	0.02	0.15
P	0.05	0.09	0.09	0.08	0.10	0.07	0.11	0.07	0.15	0.25
Sr	0.16	0.09	0.11	0.15	0.17	0.25	0.22	0.14	0.14	0.22
Ni	0.05	0.06	0.03	0.02	0.11	0.02	0.05	0.04	0.07	0.10
S	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.04	0.00	0.02	0.01	0.01
V	0.01	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05	0.05	0.04	0.34
Co	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00
Cu	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.05	0.02	0.06	0.01
Total	58.73	59.65	60.20	59.50	58.32	59.79	59.19	59.55	57.43	58.17
MnO/FeO	1.19	1.20	1.36	1.27	1.41	1.27	1.66	1.43	1.62	1.69
V/(V+Ni)	0.13	0.42	0.59	0.62	0.20	0.61	0.52	0.53	0.34	0.78



شکل ۵: همبستگی بین عناصر آلومینیوم، تیتانیوم و منیزیم برای نمونه‌های مورد بررسی در کانسار زاغدره
 Fig. 5: Correlation between Al_2O_3 , TiO_2 and MgO for the Zaghdarreh deposit samples.

داشته و پس از نیکل، وانادیوم، مس و روی کمترین همبستگی را دارند. همچنین این نمونه‌ها محتوی مقادیر بالایی باریتم هستند (۰/۲ تا ۰/۸ درصد وزنی) و مقادیر اندکی استرانسیوم (۰/۱۱ تا ۰/۲۳ ppm) هستند.

نمودارها و مقادیر همبستگی بین Mn و دیگر عناصر شامل Fe، Co، Ni، Cu، Zn و V نیز در شکل ۶ ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که منگنز بیشترین همبستگی را با آهن ($R=0/62$) و کمترین همبستگی را با نیکل ($-0/63$) دارد. پس از آنها آهن، کبالت بیشترین همبستگی را



شکل ۶: نمودارهای ضرایب همبستگی منگنز با عناصر آهن، کبالت، مس، نیکل، روی و وانادیوم در نمونه‌های کانسار زاغدره

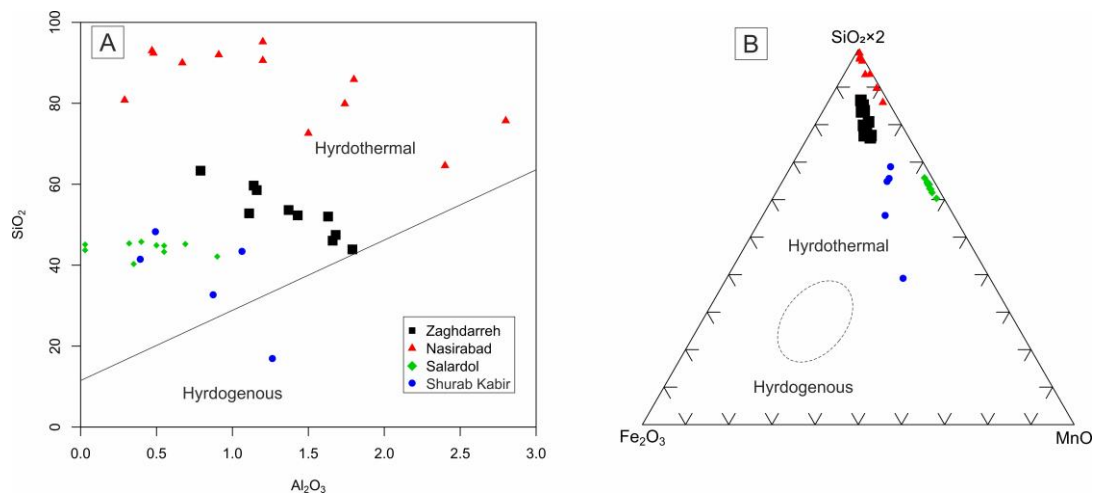
Fig. 6: Correlation coefficient diagrams for Mn with Fe, Co, Cu, Ni, Zn and V for the Zaghdarreh deposit

در نزدیکی پشته‌های اقیانوسی، سی مونت‌ها، جزایر کمانی و اطراف چشمه‌های آب داغ زیردریایی شکل گرفته و فرآیندهای آزاد (رسوب از آب دریا) و دیازنتیک اولیه (رسوب از آب منافذ رسوب) ندول‌های رسوبی Fe-Mn را در دریاها تولید می‌کنند (Roy, 1992). یکی از مهم‌ترین انواع کانه‌زایی مرتبط با منگنز، کانه‌زایی آهن - منگنز گرمابی است که تقریباً در تمام محیط‌های دریایی عمیق رخ می‌دهد. این نوع کانه‌زایی می‌تواند به شکل پوسته‌های آهن- منگنز، نودول‌های چندفلزی یا رسوبات مستقیم ناشی از سیالات گرمابی ظاهر شود (Nicholson, 1992; Polgári)

زایش اکسیدهای منگنز در اثر فرآیندهای متنوع و در محیط‌های گوناگون زمین‌شناسی شکل می‌گیرند. به طور کلی، نهشته‌های منگنز به سه دسته اصلی شامل رسوبی (رسوبی- دیازنتیک یا چینه‌سان)، گرمابی، آزاد و برونزاد تقسیم‌بندی می‌شوند (Roy, 1992; Kuleshov 2011). مینارد (Maynard, 2010) نهشته‌های منگنز را به دو نوع اولیه (حاصل فعالیت‌های گرمابی، دیازنز و آزاد) و ثانویه (حاصل فرآیندهای برونزاد) تقسیم بندی نموده است. کانسارهای گرمابی از ته‌نشست سیالات گرمابی غنی از عناصر فلزی،

کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و زایش کانسار منگنز زاغدره، جنوب غرب استان کرمان (Anschutz et al, 2005). مقادیر و نسبت‌های میان عناصر اصلی و کمیاب در رهگیری منشاء آنها مفید هستند. در اینجا از برخی نمودارهای عناصر اصلی و کمیاب برای بررسی منشاء کانسار زاغدره استفاده می‌گردد. همچنین نمونه‌های مربوط به چند کانسار دیگر منگنز در پهنه سنج-سیرجان شامل کانسارهای نصیرآباد (نیریز)، سالاردل (الشتر) و شوراب کبیر (شهرکرد) به منظور مقایسه ارائه شده‌اند. نمودار تغییرات SiO_2 در برابر Al_2O_3 (Toth, 1980) (شکل A) نشان می‌دهد که کانسار زاغدره از منشاء سیالات گرمابی شکل گرفته است. نمودار سه‌تایی Fe_2O_3 - SiO_2 - MnO (Karakus et al, 2010) نیز تایید کننده این موضوع است (شکل B). علاوه بر این، نسبت آهن به منیزیم نیز عاملی مهم در رهگیری منشاء نهشته‌های منگنز است. نسبت Mn/Fe در نهشته‌های دریاچه‌ای کمتر از ۱، در نهشته‌های آبراد برابر با ۱، در نهشته‌های گرمابی بالاتر از ۱۰ می‌باشد (Nicholson et al, 1997). این نسبت در نمونه‌های مورد بررسی کمی بالاتر از ۱ می‌باشد (۱/۱۷ تا ۱/۹)، که بین نهشته‌های آبراد و گرمابی قرار می‌گیرد. همچنین، نهشته‌های آهن - منگنز آبراد غلظت TiO_2 بالاتر از ۱ و نهشته‌های گرمابی غلظت TiO_2 پائین دارند (Ahmadi et al, 2019). مقادیر TiO_2 نمونه‌های کانسار زاغدره از ۰/۰۳ تا ۰/۰۶ درصد وزنی تغییر می‌کنند که با منشاء گرمابی مطابقت دارد.

بررسی‌های سنگ‌نگاری (Ewan et al, 2017; et al, 2012). می‌توانند در تعیین منشاء و زایش کانسارهای منگنز مفید باشند. نهشته‌های نزدیک به منشاء اغلب دارای هماتیت و کوارتز هستند و تحت تاثیر سیالات گرمابی خارج شده از پوسته اقیانوسی شکل می‌گیرند. نهشته‌های دور از منشاء با جاسپریت همراه‌اند و در فاصله نسبت به پشته‌های میان اقیانوسی رخداد می‌یابند (Brusntinyan, 2011; Oksuz, 2011; and Zhukov, 2012). نهشته‌های گرمابی (Hydrothermal) معمولاً دارای بافت‌های متبلور درشت‌بلور به همراه هماتیت و رگه‌های کوارتز هستند اما نهشته‌های آبراد (Hydrogenous) بافت‌های نازک‌لایه و پوسته‌های نازکی از اکسیدهای منگنز دارند که به صورت پوسته‌های آهن‌منگنز (Ferromanganese crusts) ته‌نشین می‌شوند (Oksuz, 2011). همچنین، حضور رگه‌های استوکورکی و نودول‌های غنی از منگنز نشان‌دهنده تأثیر فرآیندهای گرمابی (Maynard, 2010; Oksuz, 2011). ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی نمونه‌های مورد بررسی با نهشته‌های گرمابی سازگاری دارد. محتوای زمین‌شیمیایی کانسارهای منگنز در ارتباط مستقیم با منشاء آنهاست. اکسیدهای منگنز به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مانند جذب سطحی بالا، واکنش‌پذیری شدید با کاتیون‌های مختلف و داشتن بار سطحی منفی می‌توانند شواهد زمین‌شیمیایی منشاء خود را ثبت کنند (Stumm and Morgan, 1996).

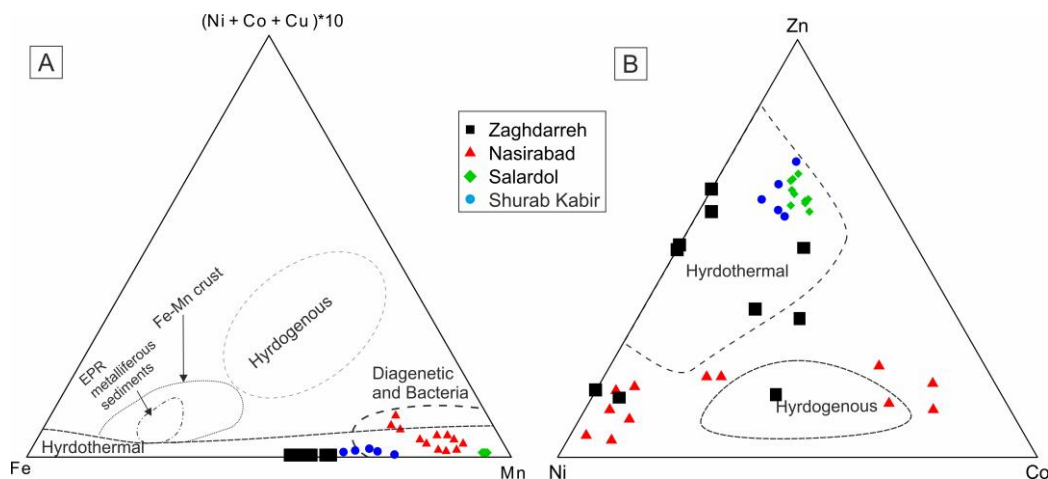


شکل ۷: A: نمودار تغییرات SiO_2 در برابر Al_2O_3 (Toth, 1980)؛ B: نمودار نمودار سه‌تایی Fe_2O_3 - $\text{SiO}_2 \times 2$ - MnO (Karakus et al, 2010) برای تعیین منشاء کانسار منگنز زاغدره.

Fig. 7: A: Si vs. Al diagram (Toth, 1980); B: Fe_2O_3 - $\text{SiO}_2 \times 2$ - MnO ternary diagram (Karakus et al, 2010) to identify genesis of the Zaghdarreh Mn-deposit.

مقادیر برخی از عناصر فرعی مانند نیکل، مس، و انادیم، کبالت و روی نیز در تعیین زایش کانسارهای منگنز مفید هستند. نهشته‌های منگنز آبراد غلظت نسبتاً بالایی از Co، Ni و Cu در مقایسه با نهشته‌های گرمایی واقع در امتداد پشته‌های میانی اقیانوسی دارند (Usui and Toth, 1980; Someya, 1997). کبالت با اکسیدهای منگنز ارتباط تنگاتنگی دارد و فراوانی آن به طور متوسط از رسوبات آبراد به دیاژنزی و گرمایی کاهش می‌یابد (Sabatino et al, 2011). لازم به ذکر است که منگنز و کبالت در یک مسیر کاتالیزوری یکسان با هم اکسید می‌شوند و در نتیجه فرآیندهای میکروبی می‌توانند سبب غنی‌شدگی کبالت در ذخایر منگنز شوند (Moffett and Ho, 1996; Polgári et

al, 2012). نسبت Co/Zn برای جدایش ذخایر گرمایی و آبراد مهم است. میانگین این نسبت در نهشته‌های گرمایی و آبراد به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۲/۵ می‌باشد (Toth, 1983). نسبت Co/Zn نمونه‌های کانسار زاغدره از ۰/۰۲ تا ۰/۵ تغییر می‌کند که با نهشته‌های گرمایی سازگار است. نمودارهای عناصر کمیاب ارائه شده برای تعیین زایش کانسارهای منگنز در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. نمودار سه‌تایی $(Ni+Co+Cu)*10$ -Fe-Mn (شکل ۸A) نشان دهنده منشأ گرمایی نمونه‌های مورد بررسی است. در نمودار Zn-Co-Ni نیز نمونه‌ها عمدتاً در بخش نهشته‌های گرمایی قرار می‌گیرند و برخی در نزدیکی محدوده نهشته‌های آبراد (شکل ۸B).



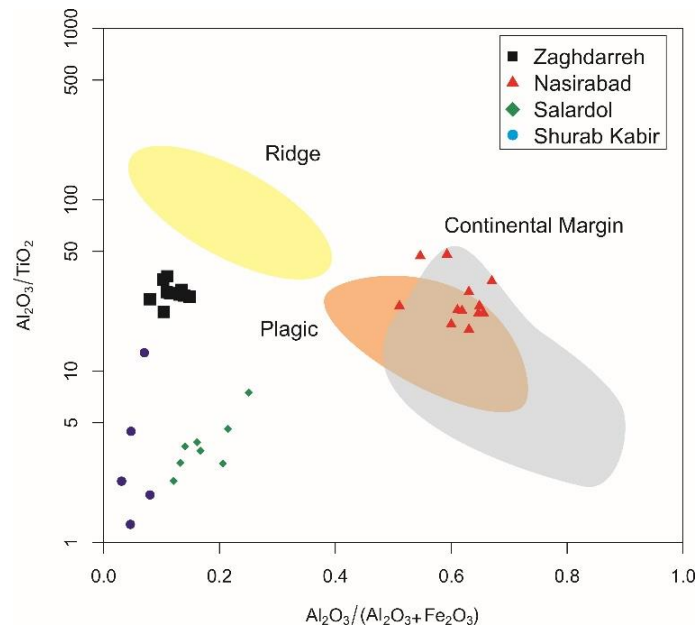
شکل ۸: A: نمودار سه‌تایی $(Ni+Co+Cu)*10$ -Fe-Mn (Bonatti et al, 1972; Crerar et al, 1982); B: نمودار سه‌تایی Zn-Co-Ni (Choi and Hariya, 1992) برای نمونه‌های کانسار زاغدره (and Hariya, 1992)

Fig. 8: A: Fe-Mn-(Ni+Co+Cu)*10 ternary diagram (Bonatti et al, 1972; Crerar et al, 1982); B: Zn-Co-Ni ternary diagram (Choi and Hariya, 1992) for the Zaghdarreh Mn-deposit.

(شکل ۸) نمونه‌های کانسار زاغدره در نزدیکی محدوده مربوط به پشته میان‌اقیانوسی قرار می‌گیرند که در آنجا منگنز توسط سیالات گرمایی خارج شده از پشته نهشته شده است. بالا بودن محتوای آهن و حضور هماتیت در نمونه‌های مورد بررسی (شکل ۴) با این موضوع سازگاری دارند. نسبت $V/(V+Ni)$ بالاتر از ۰/۸ به عنوان شاخص شرایط احیایی در نهشته‌های منگنز گرمایی قلمداد می‌شود (Marynowski et al, 2012). این نسبت‌ها برای نمونه‌های مورد بررسی برابر با ۰/۱۳ تا ۰/۷۸ می‌باشد که نشان‌دهنده شرایط اکسیدان اما تا حدی نزدیک به احیایی می‌باشد. نسبت بالای Mn/Fe نیز نشانه بالا بودن سطح اکسیژن در محیط است (Sasmaz et al, 2022).

محیط رخداد

نهشته‌های منگنز حاصل از سیالات گرمایی می‌توانند در پشته‌های میان‌اقیانوسی یا نزدیکی آنها و به مقدار کمتر در جزایر کمانی شکل بگیرند (Roy, 1992). نهشته‌های آبراد یا رسوبی از ته نشست آرام پوسته‌های آهن منگنزدار در آب‌های دریایی عمیق یا توسط فرآیندهای باکتریایی تشکیل می‌شوند (Toth, 1980; Usui and Someya, 1997; Jach and Dudek, 2005; Murray, 2019). پشته اقیانوسی محتوی آهن بالاتری نسبت به سایر نهشته‌ها هستند و در عوض تیتانیم کمتری دارند (Nicholson et al, 1994; Ahmadi et al, 2019). نمودار نسبت $Al_2O_3/Al_2O_3+Fe_2O_3$ در برابر Fe_2O_3/TiO_2



شکل ۹: نمودار $Al_2O_3/Al_2O_3+Fe_2O_3$ در برابر Fe_2O_3/TiO_2 (Murray, 1994) برای نمونه‌های کانسار زاغدره.

داده‌های صحرایی، میکروسکوپی و ژئوشیمیایی دال بر دخالت سیالات گرمایی در تشکیل کانسار شوراب کبیر می‌باشد (Ahankoub et al, 2022). کانسار سالاردل در پهنه افیولیت کرمانشاه و به صورت عدسی‌های نامنظم به صورت بین‌لایه‌ای با رادیولاریت‌ها رخداد دارد. کانی‌سازی در یک نسل سین‌ژنتیک (به صورت بین‌لایه‌ای)، و دو نسل اپی‌ژنتیک به شکل شکل رگه-گچ‌های و به‌طور عمده درون گسل‌ها و درز و شکاف‌های رادیولاریت‌ها دیده می‌شود. پارائز منگنز شامل پیرولوست، رومنشیت، رودوکروزیت، ژاکوسیت و بیکسبائیت بوده و مهم‌ترین کانی‌های باطله نیز کوارتز و کلسیت هستند. این کانسار دارای ویژگی‌های ژئوشیمیایی نهشته‌های با منشاء گرمایی می‌باشد (Shahrokhi and Farhadinejad, 2023). در بیشتر نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۷ و ۸، نمونه‌های کانسار زاغدره در هماهنگی با سایر کانسارها هستند، اگرچه اختلافاتی نیز وجود دارد. نمودار شکل ۸ نشان می‌دهد که بر خلاف دیگر کانسارها، فرآیندهای دیانزنی و باکتریایی تأثیر چندانی بر کانسار زاغدره نداشته‌اند. همچنین، این کانسار همانند کانسار نصیرآباد نیز اندکی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی نهشته‌های آبراد را نیز بروز می‌دهد که نشان دهنده ارتباط زایشی آنهاست. همچنین، کانسار نصیرآباد در یک محیط پلاژیک و با فاصله از پشته اقیانوسی تشکیل شده است.

مقایسه با دیگر کانسارهای منگنز

کانسارهای منگنز فراوانی در امتداد کوهزایی زاگرس رخداد دارند که عمدتاً در نتیجه فرآیندهای گرمایی تشکیل شده‌اند (Zarasvandi et al, 2016b). مقایسه زمین‌شیمی نمونه‌های کانسار منگنز زاغدره با دیگر کانسارهای پهنه سندنج-سیرجان می‌تواند تایید کننده نتایج و تفسیرهای مربوط به نحوه زایش آن باشد. در ابتدا شرحی در خصوص ویژگی‌های این کانسارها ارائه شده و سپس به مقایسه آنها پرداخته می‌گردد. کانسار نصیرآباد در همجواری افیولیت‌های نیریز و در به صورت بین‌لایه‌ای با چرت‌ها رادیولاریتی رخداد دارد. کانه اصلی منگنز شامل پیرولوست بوده که با تودوروکیت و پسیلوملان همراهی می‌گردد که به صورت سین‌ژنتیک و اپی‌ژنتیک شکل گرفته‌اند. این کانسار نمونه‌ای از یک کانسار منگنز غیر سولفیدی است که توسط سیالات گرمایی و در فاصله با پشته اقیانوسی تشکیل شده است (Zarasvandi et al, 2013). از نظر موقعیت مکانی، این کانسار نزدیکترین به کانسار زاغدره می‌باشد. کانسار شوراب کبیر در بخش میانی پهنه سندنج-سیرجان قرار داشته و در آن کانه‌زایی منگنز به صورت عدسی، رگه‌ای و توده‌ای شکل در درون واحدهای مرمری و دولومیت‌های دگرگون شده رخ داده است. پارائز پیرولوست، پسیلوملان، منگنتیت و هماتیت در این کانسار دیده می‌شود که با کلسیت و کوارتز به عنوان کانی باطله همراهی هستند. کلیه

فعالیت‌های آتشفشانی زیردریایی و نیز مواد آواری حاصل از فرسایش جزایر اقیانوسی همجوار سبب تغییرات اندک در محتوای زمین‌شیمیایی نهشته شده و سبب بالارفتن محتوای آلومینیوم، تیتانیوم و منیزیم گشته است. نتایج به دست آمده برای کانسار زاغدره با دیگر کانسارهای منگنز گرمابی کوهزایی زاگرس همخوانی دارد. همچنین، اختلاف در موقعیت کانسار زاغدره با کانسار نصیرآباد (منطقه نیریز) که در همجواری آن است نشان می‌دهد که سیالات گرمابی در این بخش از اقیانوس نئوتتیس هم به صورت نزدیک به منشاء و هم دور از منشاء سبب کانه‌زایی منگنز شده‌اند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه شهید چمران اهواز جهت تامین هزینه‌های این پژوهش (پژوهانه شماره: SCU.EG1403.44295) سپاسگزاری می‌نمایند.

نتیجه‌گیری

کانسار منگنز زاغدره در چرت‌های رادیولاریتی آمیزه‌رنگی افیولیتی نئوتتیس رخداد دارد. بررسی‌های مقاطع میکروسکوپی و آنالیزهای پراش پرتو ایکس نشان می‌دهند که کانسنگ در این کانسار از پیرولولویت، براونیت، تودوروکیت، همتیت، کوارتز و کلسیت ساخته شده است. عمده بافت‌های نمونه‌ها شامل کلوفر، میکرو نودولار، افشان و رگه‌های استوکورکی هستند که در فرآیندهای گرمابی شکل می‌گیرند. محتوای زمین‌شیمیایی نمونه‌های این کانسار مانند مقادیر بالای Zn، Fe، Si و مقادیر پائین Ni، Co و Cu با کانسارهای گرمابی سازگاری دارد. همچنین نسبت بین TiO_2 و Fe_2O_3 ، Al_2O_3 این نمونه‌ها نشان می‌دهد که آنها در نزدیکی یک پشته میان اقیانوسی و در ارتباط به سیالات گرمابی آن شکل گرفته‌اند. در این منطقه سیالات آزاد شده از پشته‌ی اقیانوسی با آب دریا واکنش داده و سبب نهشته شدن منگنز گشته است.

References

- Ahankoub, M., Ayati, F. and Mohamadi, A., 2022. Geology and geochemistry of the Shurab Kabir Mn mineralization, north Shahrekord, Sanandaj-Sirjan Zone. *Advanced Applied Geology*, v. 12(3), p. 489-501 (In Persian).
- Ahmadi, J., Mirnejad, H., Modabberi, S. and Niroomand, S., 2019. Geochemical Evidence for the Depositional Environment of the Esfandaghe Manganese Deposit, Kerman Province, Iran. *Geochemistry International*, v. 57, p. 266-281.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics*, v. 229, p. 211-238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2).
- Anschutz, P., Dedieu, K., Desmazes, F. and Chaillou, G., 2005. Speciation, oxidation state, and reactivity of particulate manganese in marine sediments. *Chemical Geology*, v. 218, p. 265-327. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.01.008>.
- Asgharzadeh, H., Ziaei, J., Tale-Fazel, A. and Siahcheshm, K., 2018. Geochemistry and genesis of Zaghdarreh deposit, SW Kerman. The 21st Conference of the Geological Society of Iran, Qom.
- Azizi, H., Nader, N. and Navazi, M., 2007. Geology map of Dolatabad, scale: 100000. Geology survey of Iran (In Persian).
- Bonatti, E., 1972. Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits. *Ferromanganese deposits on the ocean floor*, p. 149-166.
- Brookins, D., 1988. Eh-pH Diagrams for Geochemistry. Springer, 176 p.
- Brusnitsyn, A.I. and Zhukov, I.G., 2012. Manganese deposits of the Devonian Magnitogorsk palaeovolcanic belt (southern Urals, Russia). *Ore Geology Reviews*, v. 47, p. 42-58.
- Choi, J.H. and Hariya, Y., 1992. Geochemistry and depositional environment of Mn oxide deposits in Tokoro belt, northeastern Hokkaido, Japan. *Economic Geology*, v. 87, p. 1265-1274. <http://dx.doi.org/10.2113/GSECONGEO.87.5.1265>.
- Crerar, D.A., Namson, J., Chyi, M.S., Williams, L. and Feigenson, M.D., 1982. Manganiferous cherts of the Franciscan Assemblage: I. General geology, ancient and modern analogues and implications for hydrothermal convection at oceanic spreading centers. *Economic Geology*, v. 77, p. 519-540.
- Evensen, N.M., Hamilton, P.J. and O'Nions, R.K., 1978. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 42, p. 1199-1212. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90114-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90114-X).
- Ewan, P., Yves, F., Joel, E., Sandrine, Ch., Shasa, L., Pierre, J., Claire, B. and Jessica L., 2017. Ni-Cu-Co-rich hydrothermal manganese mineralization in the Wallis and Futuna back-arc environment (SW Pacific). *Ore Geology Reviews*, v. 87, p. 126-146.

- <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.014>
- Ghasemi, A. and Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 26(6), p. 683-693.
- Hassanzadeh, J. and Wernicke, B.P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics*, v. 35, p. 586-621.
- Huebner, J.S. and Flohr, M.J., 1990. Microbanded manganese formations: protoliths in the Franciscan Complex, California (No. 1502). US Government Printing Office.
- Jach, R. and Dudek, T., 2005. Origin of a Toarcian manganese carbonate/silicate deposit from the Križna unit, Tatra Mountains, Poland. *Chemical Geology*, v. 224(1-3), p. 136-152.
- Karakus, A., Yavuz, B.E. and Koc, S.E.V.C.A.N., 2010. Mineralogy and major-trace element geochemistry of the Haymana manganese mineralizations, Ankara, Turkey. *Geochemistry International*, v. 48, p. 1014-1027.
- Kashfi, S.M., Alirezaei, S., Hosseini, M.R., Rasa, I., 2023. The Geology and petrology of volcanic rocks and a plagiogranite intrusive body in the Zaghdareh area, Esfandagheh-Faryab ophiolitic complex, southeast Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, v. 33(2), p. 67-92 (In Persian).
- Kuleshov, V.N., 2011. Manganese deposits: Communication 1. Genetic models of manganese ore formation: Lithology and Mineral Resources, v. 46(5), p. 473, Doi:10.1134/S0024490211050038.
- Latif, D.A., Mohammad, Y.O., Qadir, M.M. and Azizi, H., 2025. Geochemical characteristics of hydrothermal manganese deposits in the Sulaimani metallogenic district, Kurdistan Region of Iraq: A serpentinization marker. *Iranian Journal of Earth Sciences*, v. 17(1), p. 1-14.
- 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*, v. 115, p. 103026.
- Marynowski, L., Zatoń, M., Rakociński, M., Filipiak, P., Kurkiewicz, S. and Pearce, T.J., 2012. Deciphering the upper Famennian Hangenberg Black Shale depositional environments based on multi-proxy record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 346, p. 66-86.
- Maynard, J.B., 2010. The chemistry of manganese ores through time: a signal of increasing diversity of earth-surface environments. *Economic Geology*, v. 105, p. 535-552.
- Moffett, J.W. and Ho, J., 1996. Oxidation of cobalt and manganese in seawater via a common microbially catalyzed pathway. *Geochim. Cosmochimica Acta*, v. 60, p. 3415-3424.
- Moinevaziri, H., 2019. Manganese mine of Tawakalan in Kurdistan-Iran: A rare Mn mineralization process. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, v. 27(2), p. 411-422.
- Murray, R.W., 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications. *Sedimentary Geology*, v. 90, p. 213-232.
- Nicholson, K., 1992. Contrasting mineralogical-geochemical signatures of manganese oxides; guides to metallogenesis. *Economic Geology*, v. 87(5), p. 1253-1264.
- Oksuz, N., 2011. Geochemical characteristics of the Eymir (Sorgun-Yozgat) manganese deposit. *Journal of Rare Earth*, v. 29, p. 287-296.
- Pattan, J.N., 1993. Manganese micronodules: A possible indicator of sedimentary environments. *Marine Geology*, v. 113(3-4), p. 331-344.
- Polgári, M., Hein, J.R., Vigh, T., Szabó-Drubina, M., Fórizs, I., Bíró, L., Müller, A. and Tóth, A.L., 2012. Microbial processes and the origin of the Úrkút manganese deposit, Hungary. *Ore Geology Reviews*, v. 47, p. 87-109.
- Polgari, M., Okita, P.M. and Hein, J.R., 1991. Stable isotope evidence for the origin of the Úrkút manganese ore deposit, Hungary. *Journal of Sedimentary Research*, v. 61(3), p. 384-393.
- Roy, S., 1992. Environments and Processes of Manganese Deposition. *Economic Geology*, v. 87, p. 1213-1236.
- Sabatino, N., Neri, R., Bellanca, A., Jenkyns, H.C., Masetti, D. and Scopelliti, D., 2011. Petrography and high-resolution geochemical records of Lower Jurassic manganese rich deposits from Monte Mangart, Julian Alps. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, v. 299, p. 97-109.
- Sasmaz, A., Turkyilmaz, B., Ozturk, N., Yavuz, F. and Kumral, M., 2013. Geology and geochemistry of Middle Eocene Maden complex ferromanganese deposits from the Elazığ–Malatya region, eastern Turkey. *Ore Geology Reviews*, v. 56, p. 352-372. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.06.012>
- Sasmaz, A., Türkyilmaz, B., Öztürk 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 Review*, v. 36, p. 357-372. <https://doi.org/10.4154/gc.2021.20>

- Schmidt, K., Bau, M., Hein, J. and Koschinsky, A., 2014. Fractionation of the geochemical twins Zr-Hf and Nb-Ta during scavenging from seawater by hydrogenetic ferromanganese crusts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 140, p. 468-487. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2014.05.036>
- Shah, M.T. and Khan, A., 1999. Geochemistry and origin of Mn-deposits in the Waziristan ophiolite complex, North Waziristan, Pakistan. *Mineralium Deposita*, v. 34(7), p. 697-704.
- Shahrokhi, S.V. and Farhadinejad, T., 2023. Mineralization and geochemistry of major, trace and rare earth elements in Salardol Mn Deposit (West Alashtar-Lorestan Province). *Advanced Applied Geology*, v. 13(1), p. 176-198 (In Persian).
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG Bulletin*, v. 52, p. 1229-1258.
- Stumm, W. and Morgan, J.J., 1996. *Aquatic Chemistry*. 3rd eds. J. Wiley and Sons, New York.
- Sugisaki, R., 1984. Relation between chemical composition and sedimentation rate of Pacific Ocean floor sediments deposited since the middle Cretaceous: basic evidence for chemical constraints on depositional environments of ancient sediments. *The Journal of Geology*, v. 92(3), p. 235-259.
- Toth, J.R., 1980. Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron. *Geological Society of America Bulletin*, v. 91(1), p. 44-54.
- Usui, A. and Someya, M., 1997. Distribution and composition of marine hydrogenetic and hydrothermal manganese deposits in the northwest Pacific. In: Nicholson, K., Hein, J.R., Buhn, B., and Dasgupta, S. (Eds.), *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*, Geological Society Special Publication, v. 19, p. 177-198.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, v. 95, p. 185-187.
- Zarasvandi, A., Lentz, D., Rezaei, M. and Pourkaseb, H., 2013. Genesis of the Nasirabad manganese occurrence, Fars province, Iran: Geochemical evidences. *Geochemistry*, v. 73(4), p. 495-508.
- Zarasvandi, A., Pourkaseb, H., Sepahvand, M., Raith, J. and Rezaei, M., 2016a. Tracing of hydrothermal ore forming process in the Sorkhvand manganese deposit, Kermanshah Province, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 9, p. 109-127. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2237-1>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Sadeghi, M., Pourkaseb, H. and Sepahvand, M., 2016b. Rare-earth element distribution and genesis of manganese ores associated with Tethyan ophiolites, Iran: A review. *Mineralogical Magazine*, v. 80(1), p. 127-142.