

Research Article**Stratigraphic position, mineralogy and distribution of the main elements in manganese oxide minerals of Mohammadabad deposit in the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence, southwest of Sabzevar**Shaghayegh Sadat Hashempour¹, Sajjad Maghfouri^{2*}, Ebrahim Rastad³

1- M.Sc. Student, Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Professor, Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Keywords: Elemental distribution map, Volcano-sedimentary sequence, Late Cretaceous, Mohammadabad manganese deposit**1- Introduction**

Southwest Sabzevar basin is one of the most favorable metallogenic areas in Iran for the exploration of manganese deposits; because this zone hosts a number of manganese deposits that are formed in the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence (Maghfouri et al., 2019). These deposits can include Cheshmeh-Frezi manganese deposit (Maghfouri et al., 2017), Benesbourd (Masoudi, 2008), Nudeh (Nasrolahi et al., 2013), Khavarzamin, Homaei (Nasiri et al., 2010), Cheshmeh-Sefid and Zakeri (Taghizadeh et al., 2015). The southwest Sabzevar basin formed from two anticlines and a syncline structures parallel to the trend general Sabzevar zone. The southwest Sabzevar basin is characterized two successive sedimentary sequences: 1) the Lower Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence (LLCVSS), including fine-grained siliciclastic sediments and bimodal volcanism and pyroclastic rocks, and 2) the Upper Late Cretaceous Sedimentary Dominated Sequence (ULCSS), formed by pelagic limestone, marly tuff, silty limestone and marl (Fig. 4) (Maghfouri, 2012; Maghfouri et al., 2016). The Mohammadabad manganese deposit is located in the ULCSS. Based on mineralization and textural studies, formation and evolution of the manganese deposits are during the diagenesis process.

This paper describes the ore facies, stratigraphic and mineralogy features of the Mohammadabad deposit together with the relationships between the manganese oxide mineralization and the host rock. Studies have been completed by mineral elemental mapping and scanning electron microscopy (SEM-EDX) analysis of manganese mineralization in this deposit.

2- Methodology

In this study, due to studies on volcano-sedimentary sequence in the southwest of Sabzevar, a geological map of the area and a geological map of Mohammadabad deposit was drawn. 17 thin and thin-polished sections were studied in the mineralogy laboratory of Tarbiat Modares University for lithology, mineralogy, structure and texture studies and paragenesis sequence of ores. To identify the amount and type of elements in manganese oxide minerals, especially pyrolusite mineral as the main known mineral in Mohammadabad deposit and in order to accurately determine the chemical composition of mineral phases, led us to SEM studies. For this reason, 2 thin-polished sections were selected and examined through SEM in the Applied Research Center of the Geological Survey of Iran.

3- Results and discussion

In the Mohammadabad deposit manganese mineralization has been formed in stratiform geometry and concordant with marly tuff-limy tuff host rock. These orebodies occur as bedded and lenticular shapes (Fig. 5C), and their

* Corresponding author: s.maghfouri@modares.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2022.40216.2284

Received 2022-03-08

Accepted 2022-06-02

texture is controlled by the host strata. Observations indicate that mineralization in this deposit is divided into three ore facies: massive ore facies, bedded ore facies and stringer zone based on shape, mineralogy, mineral texture and grade. The most abundant minerals are psilomelane, pyrolusite and manganite. The gangue minerals are mainly quartz, feldspar and chlorite, which coexist with lithic clasts in the tuff. The structure and texture of manganese ores are massive, laminae, nodules, disseminated and the replacement of manganese ores in the inner cells of foraminifera and radiolarite fossils. Based on mineralogical studies, the formation of the Mohammadabad deposit consists of three main stages, the first stage is related to pre-mineralization stage and the second stage is related to Mineralization stage or exhalative-diagenesis stage and the third stage is related to weathering and supergene (Post- mineralization) processes. In the Mohammadabad deposit, in order to accurately determine the chemical composition of mineral phases, SEM studies were performed, which according to the results, oxygen, manganese and iron are the main constituents of nodules. Oxygen and manganese have a positive correlation and the main part of nodules are composed of these elements. Elements such as Si and Fe are both involved in the formation of manganese nodules and in host rock cement. Carbon and calcium fill the nodule margin and act mostly as cement. The distribution of elements within manganese nodules and filled cells of fossils in the Mohammadabad deposit confirms that the crystals are relatively homogeneous and are composed primarily of manganese and are only partially associated with silica.

4- Conclusions

Geological evidence and the location of manganese mineralization in the sedimentary-volcanic sequence and sedimentary host rock (marly tuff-limy tuff), as well as the structure and texture of the ores, all indicate the formation of Mohammadabad manganese deposit during exhalative processes and syngenetic deposition. Elemental maps showing the distribution of major elements in different generations of manganese ores indicate that oxygen, manganese, and iron are the constituents of the nodules in the deposit.

References

- Eftekhari-Nezhad, J., Aghanabati, A., Hamzehpour, B., 1976. Geological map of 250000 Kashmar, Geological Survey of Iran.
- Jafarian, M.B., Jalali, A., 1983. Geological map 1: 100,000 Six, Geological Survey of Iran.
- Maghfouri, S., Rastad, E., Mousivand, F., Choulet, F., 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.
- Maghfouri, S., Rastad, E., Movahednia, M., Lentz, D.R., Hosseinzadeh, M.R., Ye, L., Mousivand, F., 2019. Metallogeny and temporal-spatial distribution of manganese mineralization's in Iran: Implications for future exploration. *Ore Geology Reviews* 115, 103-026.
- Masoudi, M., 2008. Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of Benesbourd Mn deposit in the southwest Sabzevar. M.Sc. Thesis, Tehran Islamic Azad University, Iran. 100 pp (in Persian with English abstract).
- Nasiri, F., Lotfi, M., Jafari, M., 2010. Mineralogical studies on the Homaei manganese deposit in southwest of Sabzevar. 30th Symposium on Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Nasrollahi, A., Moosivand, F., Ghasemi, H.A, 2013. Geochemical studies of primary, rare and rare earth elements (REE) and the origin of Nuddeh manganese deposit, southwest of Sabzevar. 17th conference of the Geological Society of Iran.
- Taghizadeh, S., 2015. Mineralogy, geochemistry and genesis of the Zakeri Mn deposit, Southwest of Sabzevar. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Shahrud, Iran. p. 202. (In Persian with English abstract).

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Hashempour, S.S., Maghfouri, S., Rastad, E., 2022. Stratigraphic position, mineralogy and distribution of the main elements in manganese oxide minerals of Mohammadabad deposit in the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence, southwest of Sabzevar. *Adv. Appl. Geol.* 12(2), 306-324.

DOI: 10.22055/AAG.2022.40216.2284

url: https://aag.scu.ac.ir/article_17676.html?lang=en



جایگاه چینه‌ای، کانی‌شناسی، توزیع و پراکندگی عناصر اصلی در کانی‌های اکسیدی منگنز کانسار محمدآباد در توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین، جنوب غرب سبزوار

شقایق سادات هاشم‌پور

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

سجاد مغفوری*

استادیار، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

ابراهیم راستاد

استاد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* s.maghfouri@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۲

چکیده

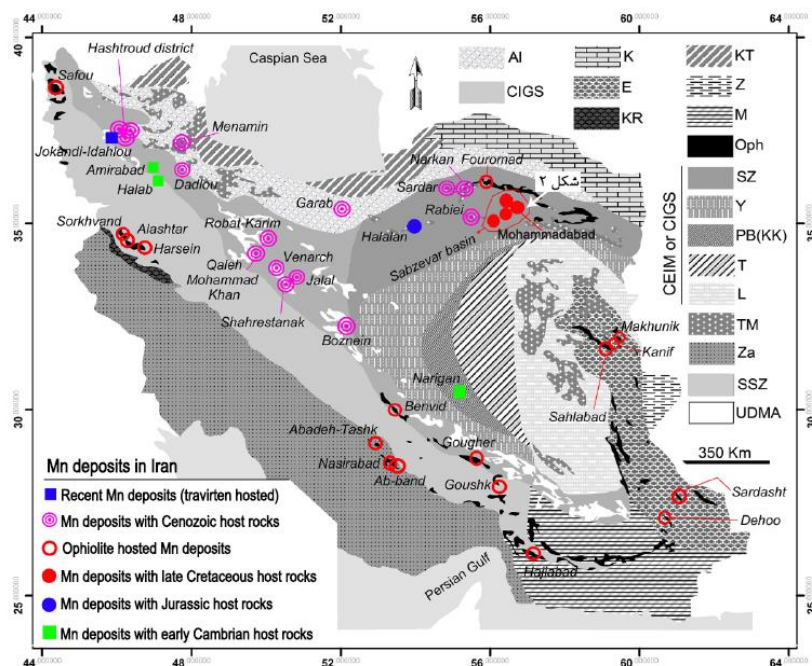
کانسار منگنز محمدآباد در توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین حوضه جنوب غرب سبزوار واقع شده است. این حوضه دارای دو ساختار تاقدیسی شمالی و جنوبی و یک ساختار ناودیس میانی می‌باشد که کانسار محمدآباد در یال جنوبی تاقدیس جنوبی و در توالی سنگی واحد چهار از ستون چینه‌شناسی ناحیه‌ای تشکیل شده است. شکل هندسی ماده معدنی در این کانسار به صورت چینه‌سان و لایه‌ای می‌باشد که محدود به سنگ میزبان توفمانری - توف‌آهکی است. رخساره‌های کانسنگی در این کانسار بر اساس ساخت و بافت به سه رخساره تغذیه کننده، لایه‌ای و توده‌ای تقسیم می‌شوند که بخش پر عیار کانسار با ضخامت زیاد در بخش غربی و در رخساره کانسنگ توده‌ای تشکیل شده است. ساخت و بافت ماده معدنی به صورت توده‌ای، لامینه، نودول، دانه پراکنده و جانشینی کانی‌های منگنز در حرات داخلی فسیلهای فرامینیر و رادیولاریت مشاهده می‌شود. در کانسار محمدآباد اکسید-هیدروکسیدهای منگنز، کانیهای اصلی می‌باشند و به طور عمده از کانیهای پیرولولزیت، پسیلوملان (رومنشیت) و منگانیت تشکیل شده است. دگرسانی‌های کلریتی، کربناتی و آرژیلیکی از جمله دگرسانی‌های مشاهده شده در این کانسار می‌باشند. به منظور تعیین دقیق ترکیب عنصری فازهای کانیایی مطالعات SEM انجام گرفت و به کمک این مطالعات و با استفاده از نقشه توزیع و پراکندگی عنصری، اکسیدی بودن کانی‌های منگنز تأیید شد. با توجه به نتایج؛ عناصر منگنز، اکسیژن و آهن در بخش‌های داخلی نودول‌ها و فسیل‌ها حضور داشته و همبستگی مثبت نشان می‌دهند. در مقابل، عناصری مانند سیلیسیم، کربن و کلسیم به طور کامل در پوسته فسیل قرار گرفته و پوسته خارجی آن را تشکیل داده‌اند.

کلمات کلیدی: نقشه توزیع و پراکندگی عنصری، توالی آتشفشانی - رسوبی، کرتاسه پسین، کانسار منگنز محمدآباد

مقدمه

کیلومتر و در راستای شمال شرق - جنوب غرب موازی با روند عمومی زون سبزوار گسترده شده است (شکل ۲). توالی رسوبی - آتشفشانی تاقدیس جنوبی میزبان کانه‌زایی منگنز محمدآباد می‌باشد (شکل ۲). کانسار منگنز محمدآباد در چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشمر (Eftekhar-Nezhad et al., 1976) و در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ششتمد (Jafarian and Jalali, 1983) واقع شده است. با توجه به گسترش کانه‌زایی منگنز در توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین حوضه جنوب غرب سبزوار، مطالعه کانسار محمدآباد می‌تواند به عنوان الگو در اکتشاف ذخایر مشابه منگنز در این منطقه و مناطق با زمین‌شناسی مشابه در ایران مورد استفاده قرار گیرد. این مقاله ضمن معرفی کانسار منگنز محمدآباد بعنوان تیپ آتشفشانی - رسوبی، به معرفی ویژگی‌های رخساره‌های کانسنگی، ساخت و بافت و کانی‌شناسی هر رخساره و بررسی ترکیب شیمیایی کانیهای منگنز پرداخته است.

منطقه جنوب غرب سبزوار یکی از مساعدترین مناطق فلززایی ایران برای اکتشاف ذخایر منگنز می‌باشد (Maghfouri et al., 2019) چرا که این زون میزبان تعدادی از کانسارهای منگنز بوده که در توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین تشکیل شده‌اند (Maghfouri et al., 2019) (شکل ۱) از جمله این کانه‌زایی‌ها می‌توان به کانسارهای منگنز چشمه‌فریزی (Maghfouri et al., 2017)، بنسبرد (Masoudi, 2008)، نوده (Nasrolahi et al., 2013)، خاور زمین، همایی (Nasiri et al., 2010)، چشمه‌سفید و ذاکری (Taghizadeh et al., 2015) اشاره کرد (شکل ۱). توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین در منطقه جنوب غرب سبزوار، در داخل یک ساختار چین خورده که متشکل از دو تاقدیس شمالی و جنوبی و یک ناودیس میانی است با طول حدود ۱۰۰ کیلومتر و پهنای ۸ تا ۱۴



شکل ۱- نقشه پراکندگی کانسارهای منگنز ایران براساس سن سنگ میزبان در پهنه‌های ساختاری ایران (Aghanabati, 2004; Maghfouri et al., 2019).

Fig. 1. Distribution map of manganese deposits according to the age of host rocks within the main tectonic zones of Iran (modified after Aghanabati, 2004; Maghfouri et al., 2019).

روش مطالعه

در این پژوهش، به واسطه عملیات صحرایی و مطالعات انجام شده بر روی توالی آتشفشانی - رسوبی و رخساره‌های کانسنگی نقشه زمین‌شناسی کانسار محمدآباد ترسیم گردید (شکل ۱۴). جهت مطالعات سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت و تعیین تقدم و تاخر کانی‌ها و ترسیم توالی پاراژنزی کانه‌ها، تعداد ۱۷ مقطع نازک و نازک - صیقلی در آزمایشگاه کانی‌شناسی بخش زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس مورد مطالعه قرار گرفت. برای شناسایی مقدار و نوع عناصر موجود در کانی‌های اکسیدی منگنز به خصوص کانی پیرولوزیت به عنوان اصلی‌ترین کانی شناخته شده در کانسار محمدآباد و به منظور تعیین دقیق ترکیب شیمیایی فازهای کانیایی، مطالعات SEM انجام شد. به همین دلیل، ۲ عدد مقطع نازک - صیقلی انتخاب و از طریق دستگاه SEM در مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور مورد بررسی قرار گرفتند و طیف ترکیبی عناصر در کانه‌های منگنز مشخص گردید.

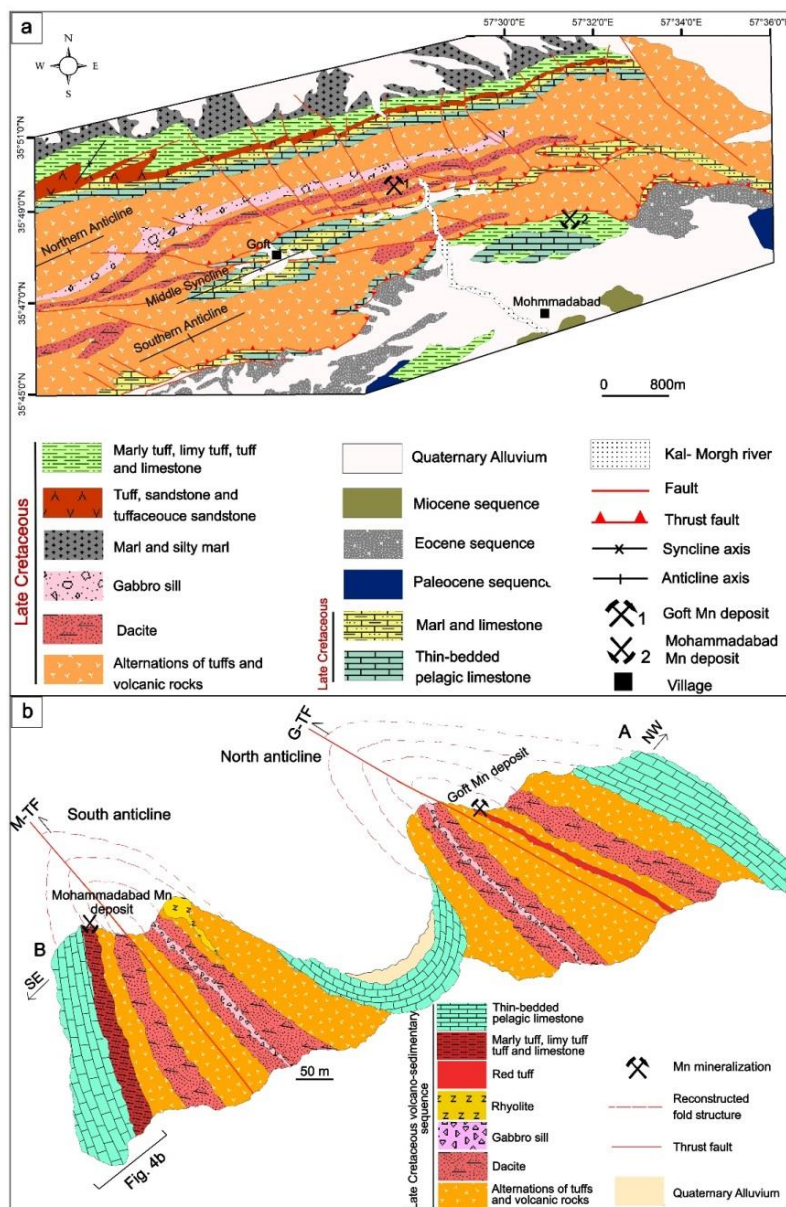
زمین‌شناسی

در بخش جنوب‌غربی پهنه ساختاری سبزوار، توالیهای آتشفشانی - رسوبی به دلیل عملکرد فازهای فشارشی پس از کرتاسه تغییر شکل داده و ساختار چین‌خورده به عرض ۸ تا ۱۴ کیلومتر و طول حدود ۱۰۰ کیلومتر را تشکیل داده است (شکل ۲) که کانسار منگنز محمدآباد در فاصله ۶۵ کیلومتری جنوب‌غرب شهر سبزوار واقع شده است. روند این

ساختار شمال‌شرق - جنوب‌غرب است که با زون سبزوار همروند می‌باشد (Maghfouri, 2012) (شکل ۱۲). بر طبق بررسی‌های انجام گرفته شده توسط Maghfouri (۲۰۱۲) توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین در جنوب‌غرب سبزوار میزبان کانه‌زایی‌های متعدد منگنز و مس سولفید توده‌ای آتشفشانزاد تیپ بشی (Besshi-type VMS deposit) است که هریک دارای جایگاه چینه‌شناسی مخصوص به خود می‌باشند (شکل ۱۳). این کانسارها و اندیس‌های منگنز را می‌توان از جهت موقعیت چینه‌ای در ستون چینه‌شناسی ناحیه جنوب‌غرب سبزوار، سن نسبی و توالی سنگ میزبان به دو افق مختلف تقسیم نمود (Maghfouri et al., 2015) (شکل ۱۳): ۱) توالی آتشفشانی - رسوبی بخش زیرین کرتاسه پسین (Lower Late Cretaceous Volcano- Sedimentary Sequence (LLCVSS): شامل رسوبات سیلیسی کلاستیک (آواری) ریزدانه و ولکانیسم بایمودال و سنگهای آذرآواری (شکل ۱۳) و ۲) توالی رسوبی - آتشفشانی بخش بالایی کرتاسه پسین (Upper Late Cretaceous (ULCSVS) Sedimentary- Volcanic Sequence) که از سنگ‌آهک پلاژیک، توفمارنی، سنگ‌آهک سیلتی و مارن تشکیل شده است (Maghfouri et al., 2019) (شکل ۱۳). مطالعات زمین‌شناسی و پیمایش‌های صحرایی حاکی از تشکیل کانسار منگنز محمدآباد در بخش بالایی توالی کرتاسه پسین (ULCSVS) می‌باشد (شکل ۱۳). زیر واحدهای این توالی چینه‌ای (ULCSVS) عبارتند از: ۱- واحد تناوبی

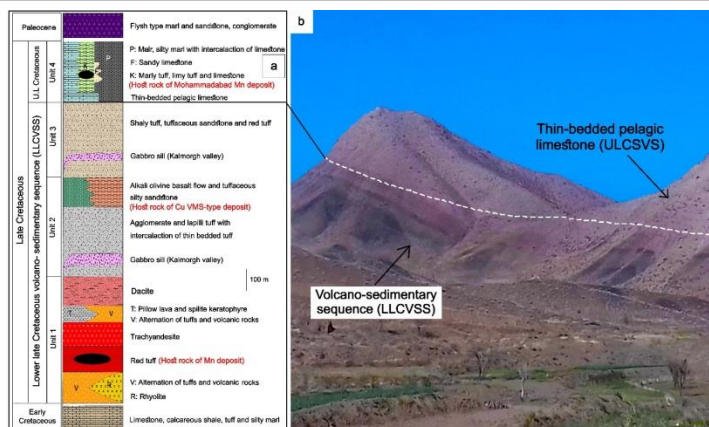
فوق در امتداد شمال شرق - جنوب غرب قرار گرفته‌اند که شیب آنها به سمت شمال غرب می‌باشد (شکل‌های a۴ و b۵). سنگهای توفمارنی-توف‌آهکی، سنگ میزبان کانه‌زایی منگنز در کانسار محمدآباد را تشکیل می‌دهند (شکل‌های ۴ و a۵).

از توف، آهک و مارن، ۲- واحد لیتیک توف سبز رنگ زیرین، ۳- واحد آندزیتی، ۴- واحد آهک توفی، ۵- واحد لیتیک توف سبز رنگ بالایی، ۶- واحد توف ماسه‌ای و ماسه‌سنگ، ۷- واحد توفمارنی-توف‌آهکی (سنگ میزبان کانه‌زایی)، ۸- واحد توف کربناتی و ماسه‌سنگ توفی و ۹- واحد آهک نازک‌لایه پلاژیک (شکل‌های ۴، ۵ و ۶). تمام زیر واحدهای



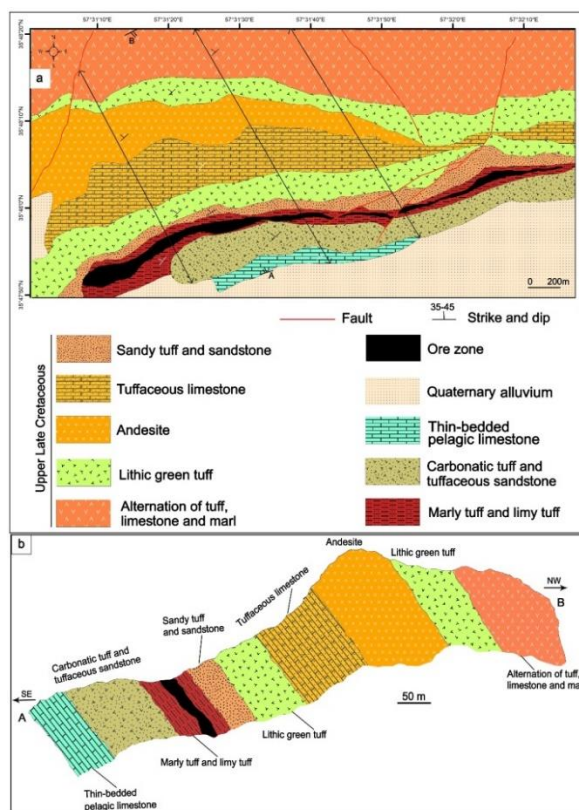
شکل ۲- (a) نقشه زمین‌شناسی ناحیه‌ای از منطقه جنوب غرب سبزوار (تلفیقی از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ دارین و ۱:۱۰۰۰۰۰ ششتمد) (با تغییرات از Vaahdati Daneshmand and Saedi, 1998; Jafarian and Jalali, 1983) که موقعیت کانسار منگنز محمدآباد بر روی آن مشخص شده است و (b) مقطع زمین‌شناسی در جهت شمال غرب - جنوب شرق توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین (G-TF: گسل تراسی گوت و M-TF: گسل تراسی مظفرآباد). خوابیدگی واحد سنگی قدیمی بر روی واحدهای جوان، در مقطع زمین‌شناسی کانسار محمدآباد قابل مشاهده است.

Fig. 2. (a) Geological map of the southwestern Sabzevar area (a combination of 1: 100000 Darin and 1: 100000 Sheshtomad maps) (modified after Vaahdati Daneshmand and Saedi, 1998; Jafarian and Jalali, 1983) and the location of Mohammadabad manganese deposit in these geological maps, and (b) Geological cross section of the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence in the southwest Sabzevar area (G-TF: Goft thrust fault and M-TF: Mozafarabad thrust fault). The dormancy of the older rocks on the younger rocks can be seen in the geological cross section of the Mohammadabad deposit.



شکل ۳- (a) ستون چینه‌شناسی عمومی از ناحیه جنوب غرب سبزوار که جایگاه چینه‌های کانسار منگنز محمدآباد در توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین را نشان می‌دهد (Maghfouri et al., 2019) و (b) رخمون توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین و قرارگیری هم‌شیب آهک‌های نازک لایه پلاژیک بر روی سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی (LLCVSS) منطقه جنوب غرب سبزوار (دید به سمت شمال غرب).

Fig. 3. (a) General stratigraphic column from the southwest Sabzevar area, which shows the stratigraphic position of Mohammadabad manganese deposit in the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence (Maghfouri et al., 2019), and (b) Outcrop of Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence which conformably covered with thin-bedded pelagic limestones of LLCVSS (view to the northwest).

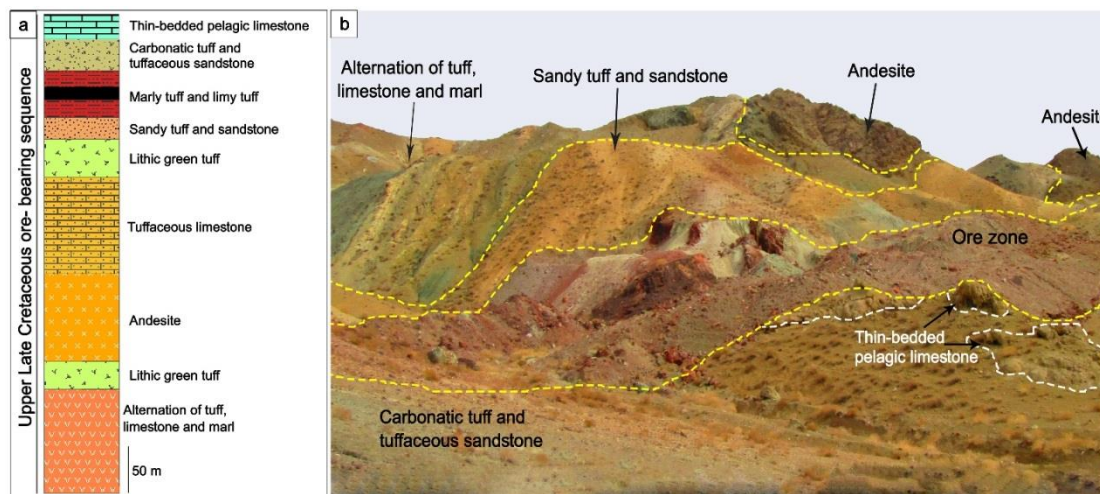


شکل ۴- (a) نقشه زمین‌شناسی کانسار محمدآباد، کانه‌زایی در واحد توف‌مارنی - توف‌آهکی تشکیل شده است (B-A محل برش زمین‌شناسی شکل 4b می‌باشد). خطوط روی نقشه محل ترسیم ستون‌های چینه‌شناسی در شکل ۶ می‌باشد و (b) مقطع زمین‌شناسی از توالی‌های رسوبی - آتشفشانی کرتاسه پسین در کانسار محمدآباد. محل ترسیم مقطع در شکل‌های a4 و b2 نشان داده شده است.

Fig. 4. (a) Geological map of the Mohammadabad deposit, mineralization is formed in the marly tuff-limy tuff unit (B-A is the cross section figure 4b). The lines on the map are the location of the stratigraphic columns in figures 6 and (b) Geological cross section of Upper Late Cretaceous sedimentary-volcanic sequence in the Mohammadabad deposit. The location of the cross section is shown in figures 4a and 2b.

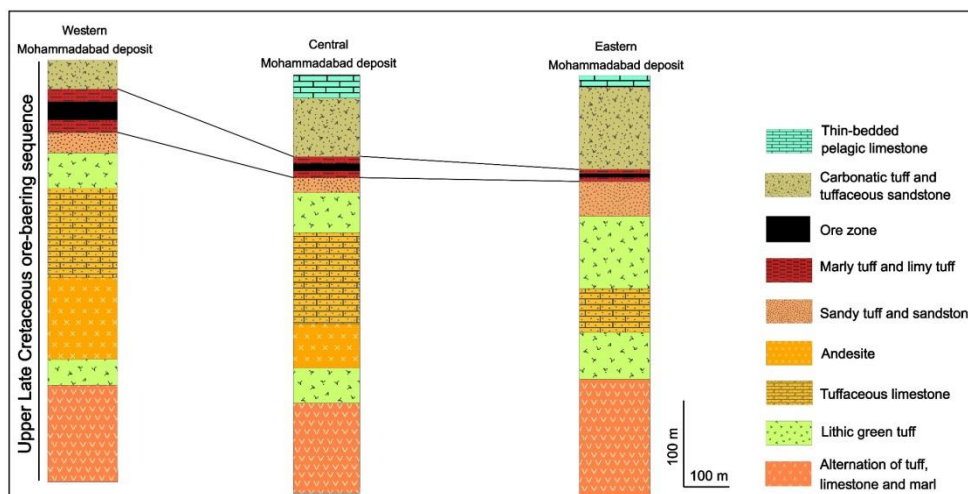
و (۷a). بخش‌هایی از این واحد چینه‌ای دارای لامینه‌های چرتی (ژاسپر) است که با اکسیدهای منگنز - آهن و نوارهای سنگ میزبان همروند بوده و در ضخامت‌های متغیر دیده می‌شوند (شکل ۱۰c). در مقاطع میکروسکوپی این واحد چینه‌ای پرفسیل بوده و متشکل از فسیلهای فرامینیفر می‌باشد که عمدتاً توسط کانیه‌های منگنز (شکل ۱۲e) و اکسیدهای آهن جانشین شده‌اند (شکل ۷b و c).

ضخامت این واحد در بخشهای ضخیم ۱۰۰ متر و در کمترین ضخامت حدود ۳۰ متر اندازه‌گیری شده است (شکل‌های ۴، ۵b و ۶). کمر پایین این واحد را ماسه‌سنگ توفی و ماسه‌سنگ (شکل‌های ۴، ۵b و ۷a) و کمر بالای آن را واحد توف کربناتی تشکیل می‌دهد که میانگین ضخامت آن به ۱۵۰ متر می‌رسد (شکل‌های ۴ و ۵). مرز این واحد با واحد کمر پایین خود به صورت تدریجی است و هم چنین آثار چین خوردگی نیز در توالیهای سنگی قابل مشاهده است (شکل‌های ۵b



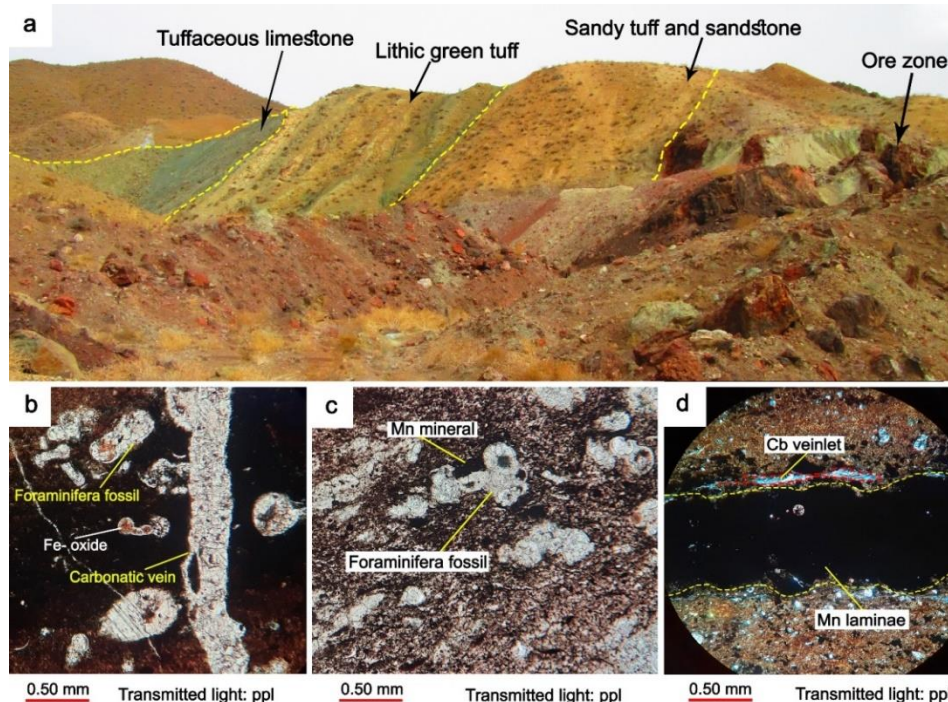
شکل ۵- (a) ستون چینه‌شناسی کانسار منگنز محمدآباد و موقعیت افق کانه‌زایی در واحد توف‌مارنی - توف‌آهکی و (b) دورنمایی از واحدهای چینه‌شناسی رخنمون یافته در کانسار منگنز محمدآباد که روند واحدهای سنگی، شمال شرق - جنوب غرب و شیب آنها به سمت شمال غرب است (دید به سمت شمال شرق).

Fig. 5. (a) Stratigraphic column of the Mohammadabad Mn deposit and position of mineralization horizon in marly tuff-limy tuff unit and (b) General view of the stratigraphic units exposed in the Mohammadabad manganese deposit, which the trend of units is NE-SW and their dips are NW (view to the northeast).



شکل ۶- تطابق چینه‌ای بخشهای مختلف کانسار محمدآباد و جایگاه افق کانه‌زایی منگنز در داخل واحد توف‌مارنی - توف‌آهکی. محل رسم ستون‌ها در شکل ۴a نشان داده شده است.

Fig. 6. Lithostratigraphic correlation diagram of the ore-bearing sequence in the Mohammadabad Mn deposit and the location of manganese mineralization horizon within the marly tuff-limy tuff host rock. The location of the columns is shown in figure 4a



شکل ۷- (a) دورنمایی از رخنمون واحد میزبان کانه‌زایی در کانسار محمدآباد که بصورت همروند با دیگر واحدهای چینه‌ای مشاهده می‌شود (دید به سمت شمال شرق)، (b-c) تصاویر میکروسکوپی از واحد توفمارنی - توف‌آهکی که فسیل‌های فرامینیفر توسط اکسیدهای آهن جانشین شده است و (d) تصویر میکروسکوپی که لامیناسیون منگنز را نشان می‌دهد. علائم اختصاری؛ Cb: Carbonate.

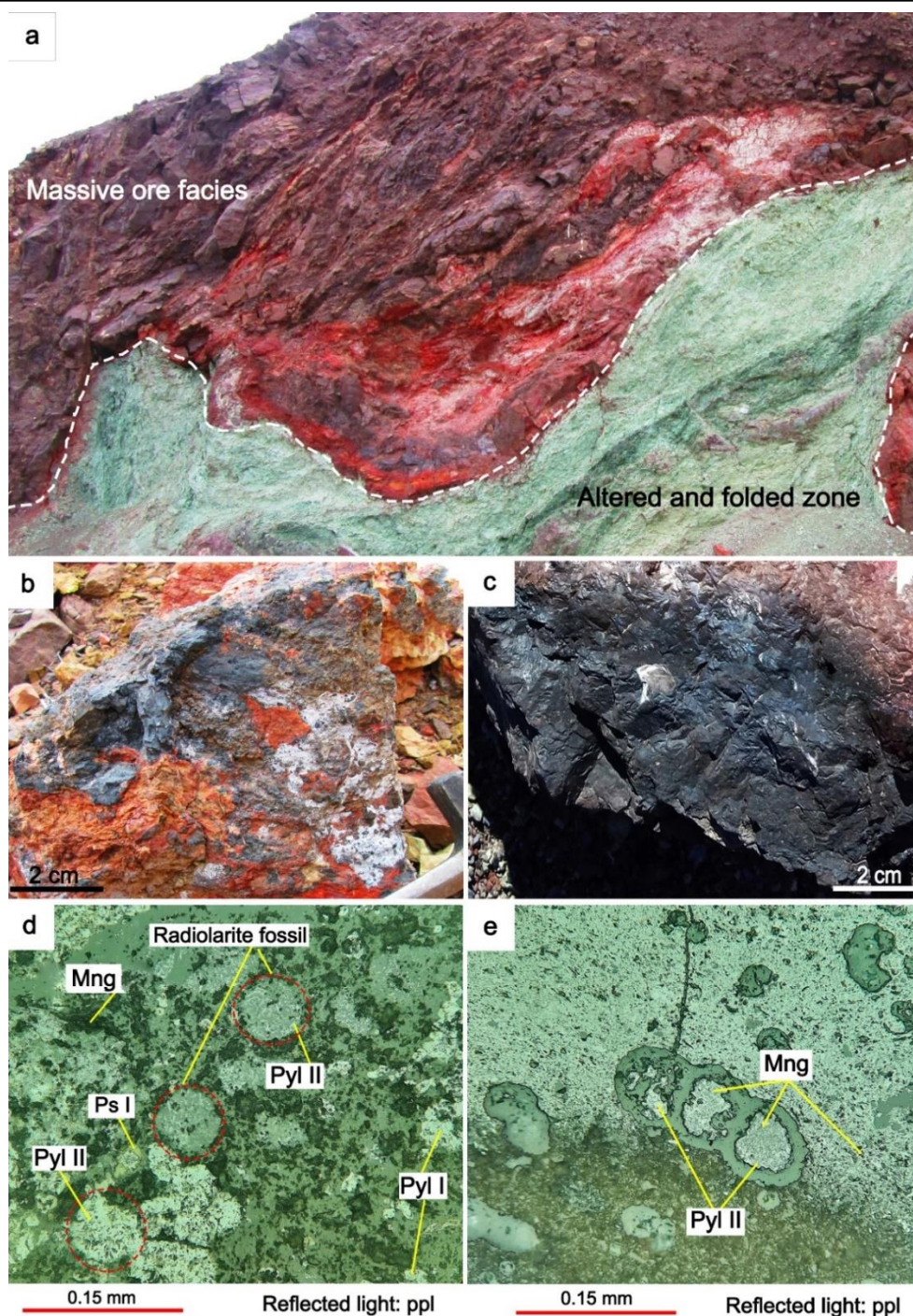
Fig. 7. (a) General view of the ore-bearing host rock in the Mohammadabad deposit, which is observed in parallel with other stratigraphic units (view to the northeast), (b-c) The microscopic photographs of marly and limy tuff Foraminifera fossils that are replaced by iron oxides, and (d) Microscopic photograph of manganese laminae. Abbreviation; Cb: Carbonate.

الف) رخساره کانسنگ توده‌ای

رخساره کانسنگ توده‌ای، ضخیم‌ترین و پرعیارترین بخش کانه‌زایی در کانسار محمدآباد را به خود اختصاص داده است که در قسمت غربی کانسار گسترش دارد (شکل a4 و a6). کانه‌زایی در این رخساره به صورت توده‌ای و نیمه توده‌ای با ماهیتی ناهمگون و تقریباً چینه‌کران در داخل سنگ میزبان توفمارنی - توف‌آهکی تشکیل شده است (شکل a8 و c). در نمونه‌های دستی از این رخساره، کانه‌زایی توده‌ای منگنز همراه با اکسیدهای آهن به چشم می‌خورد (شکل b8). کانی‌های منگنز تشکیل شده در این رخساره درشت بلور بوده و متشکل از پیرولولزیت، پسیلوملان و منگنیت می‌باشند (اشکلهای d-12 و 13) که در اکثر نمونه‌های مطالعه شده، کانی پسیلوملان همراه با پیرولولزیت تشکیل شده است (شکل a12، b و d). از دیگر ویژگی‌های بارز رخساره کانسنگ توده‌ای و با توجه به سن سنگ میزبان (کرتاسه پسین) کانسار محمدآباد، وجود فسیل‌های فرامینیفر و رادیولاریت جانشین شده با کانی پیرولولزیت می‌باشد. این جانشینی‌ها در قسمتهای درونی حجرات فسیلهای فرامینیفر رخ داده است و در رادیولاریت به صورت پر کننده حفرات دیده می‌شود (اشکلهای a12، d8 و e).

کانه‌زایی و رخساره‌های کانسنگی

کانسار محمدآباد در بخش بالایی توالی رسوبی - آتشفشانی کرتاسه پسین (ULCSVS) تشکیل شده است (شکل a3). کانه‌زایی منگنز در این کانسار، دارای شکل هندسی لایه‌ای (Bedded) می‌باشد. با حرکت به سمت غرب کانسار، شکل هندسی توده‌ای (Massive ore facies) (بخش پرعیار ماده معدنی با ضخامت حدود ۸۰ متر) گسترش می‌یابد (شکل‌های a4، a5 و 6) و در مجموع شکل چینه‌کران به کانسار می‌دهد، اما با کاهش ضخامت واحد کانه‌دار و به طبع آن کاهش مقدار ماده معدنی به سمت شرق با ضخامت ۳۰ متر، کانسار شکل چینه‌سان به خود گرفته و همروند با لایه‌بندی سنگ میزبان (توفمارنی - توف‌آهکی) دیده می‌شود (شکل‌های a4، a5 و 6). در این منطقه آثاری از دگرسانی‌های گرمایی، در حد دگرسانی کربناتی (شکل a10)، آرژیلیکی (شکل b10) و کلریتی (شکل f12) دیده می‌شود که در ارتباط با فرآیندهای گرمایی کانه‌زایی اکسیدی منگنز زون تغذیه‌کننده است. مطالعه نمونه‌های دستی برداشت شده در تلفیق با مطالعات میکروسکوپی در کانسار محمدآباد، حاکی از آن است که کانه‌زایی در این کانسار، بر اساس شکل ماده معدنی، کانی‌شناسی، بافت - ساخت و عیار آن به سه رخساره کانسنگی متفاوت قابل تقسیم است:



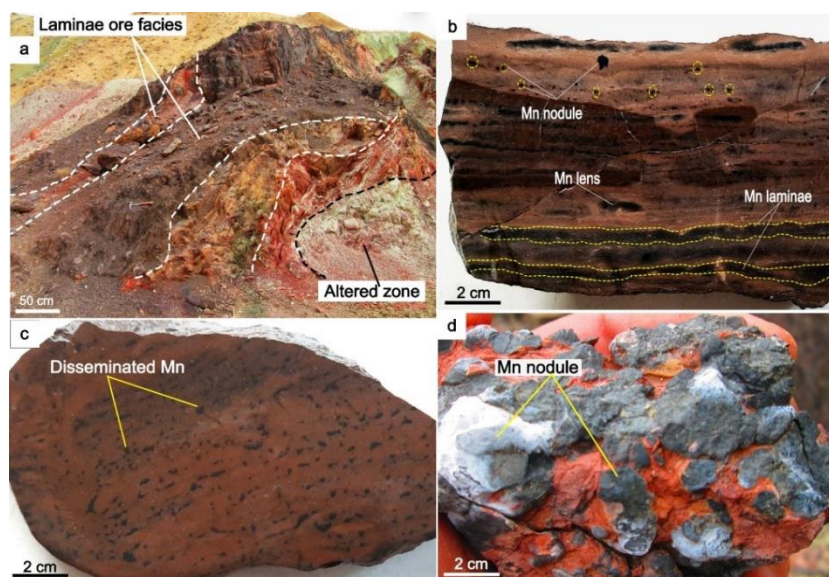
شکل ۸- (a) رخنمونی از کاننه‌زایی توده‌ای و نیمه توده‌ای که در سنگ میزبان توف‌مارنی-توف‌آهکی تشکیل شده است (دید به سمت شمال‌غرب)، (b-c) نمونه‌های دستی از کاننه‌زایی توده‌ای منگنز در کانسار محمدآباد و (d-e) تصاویر میکروسکوپی از حضور فسیلهای رادیولاریت در کانسار محمدآباد که حجره‌های داخلی فسیلهای توسط کانی پیرولولزیت نسل دو پر شده است. علائم اختصاری؛ Ps: Psilomelane، Pyl: Pyrolusite، Mng: Manganite،

Fig. 8. (a) General view of the massive and semi-massive mineralization within the marly tuff- limy tuff host rock (view to the NW), (b-c) Hand specimens of massive manganese mineralization in the Mohammadabad deposit, and (d-e) Microscopic photographs of radiolarite fossils in the Mohammadabad deposit, where the inner cells of the fossils have been filled by pyrolusite II mineral. Abbreviation; Pyl: Pyrolusite, Mng: Manganite, Ps: Psilomelane.

رخساره کانسنگ لایه‌ای

کانه‌زایی منگنز در کانسار محمدآباد عمدتاً به شکل رخساره کانسنگ لایه‌ای مشاهده می‌شود که محدود به واحد توف‌مارنی-توف‌آهکی است (شکل‌های a4 و a9). این رخساره کانسنگی، ضخامت کمتری نسبت به رخساره کانسنگ توده‌ای داشته اما امتداد و گسترش آن نسبت به رخساره کانسنگ توده‌ای بیشتر است و در قسمت‌های جانبی رخساره کانسنگ توده‌ای به سمت شرق کانسار گسترش دارد (شکل‌های a4 و 6). ضخامت لایه‌ها و لامینه‌های منگنزدار در کانسار مورد مطالعه متغیر است که از چندین متر در رخنمون (شکل a9) تا حدود ۲ سانتی‌متر در نمونه دستی (شکل 9b) و نیم میلی‌متر در مقطع میکروسکوپی قابل مشاهده است (شکل d7). بافت‌های نواری و لامینه از مهمترین بافت و ساختهای موجود در کانسار محمدآباد می‌باشند (شکل c11) که شامل تناوبی از لامینه‌های اکسیدی منگنز و سنگ میزبان هستند و نمایی از نوارهای تیره (غنی از کانه‌زایی منگنز) و روشن (سنگ میزبان کانه‌زایی) به کانسار می‌بخشند (شکل a9 و b). حضور لامینه‌های متناوب اکسیدی منگنز و لامینه‌های سنگ میزبان می‌تواند حاکی از تشکیل و هم‌زمانی تشکیل لامینه‌های حاصل از فرایند پروندمی (Exhalative) با فرایند رسوبگذاری است (Franklin et al., 2005; Gibson and Galley, 2007). رخداد لامیناسیون

اکسیدی متناوب با لامیناسیون سنگ میزبان در بسیاری از کانسارهای منگنز با میزبان رسوبی از جمله کانسار چشمه‌فریزی (Maghfouri et al., 2017)، کانسار نوده (Nasrolahi et al., 2013)، کانسار ذاکری (Taghizadeh et al., 2015)، کانسار نصیرآباد (Zarasvandi et al., 2013) و کانسار سرخوند (Zarasvandi et al., 2016b) گزارش شده است. رخساره کانسنگ لایه‌ای از لحاظ کانی‌شناسی حاوی کانیهای اکسیدی منگنز مانند پیرولوزیت، پسیلوملان و منگانیت است (شکل‌های 11 و 13). از ویژگیهای بارز رخساره کانسنگ لایه‌ای وجود لایه‌ها و عدسی‌های چرتی در تناوب با کانه‌زایی منگنز می‌باشد (شکل c10). بافت دانه‌پراکنده با کانی‌شناسی پیرولوزیت در رخساره کانسنگ لایه‌ای کانسار محمدآباد در بخشهایی که فراوانی منگنزها کم است، قابل مشاهده می‌باشد (شکل‌های a11 و c9). از دیگر بافت‌های شاخص موجود در کانسار مورد مطالعه می‌توان به بافت نودول اشاره کرد. نودول‌های منگنز در کانسار محمدآباد گسترش زیادی دارند که در زمینه سنگ میزبان تشکیل شده‌اند. قطر نودول‌های منگنز از ۳ سانتی‌متر در رخنمون سطحی تا کمتر از یک میلی‌متر در مقاطع میکروسکوپی قابل مشاهده هستند (شکل‌های d9، b11 و d). این نودول‌ها به طور عمده از کانی‌های پیرولوزیت، پسیلوملان و منگانیت تشکیل شده‌اند (شکل b11 و d).

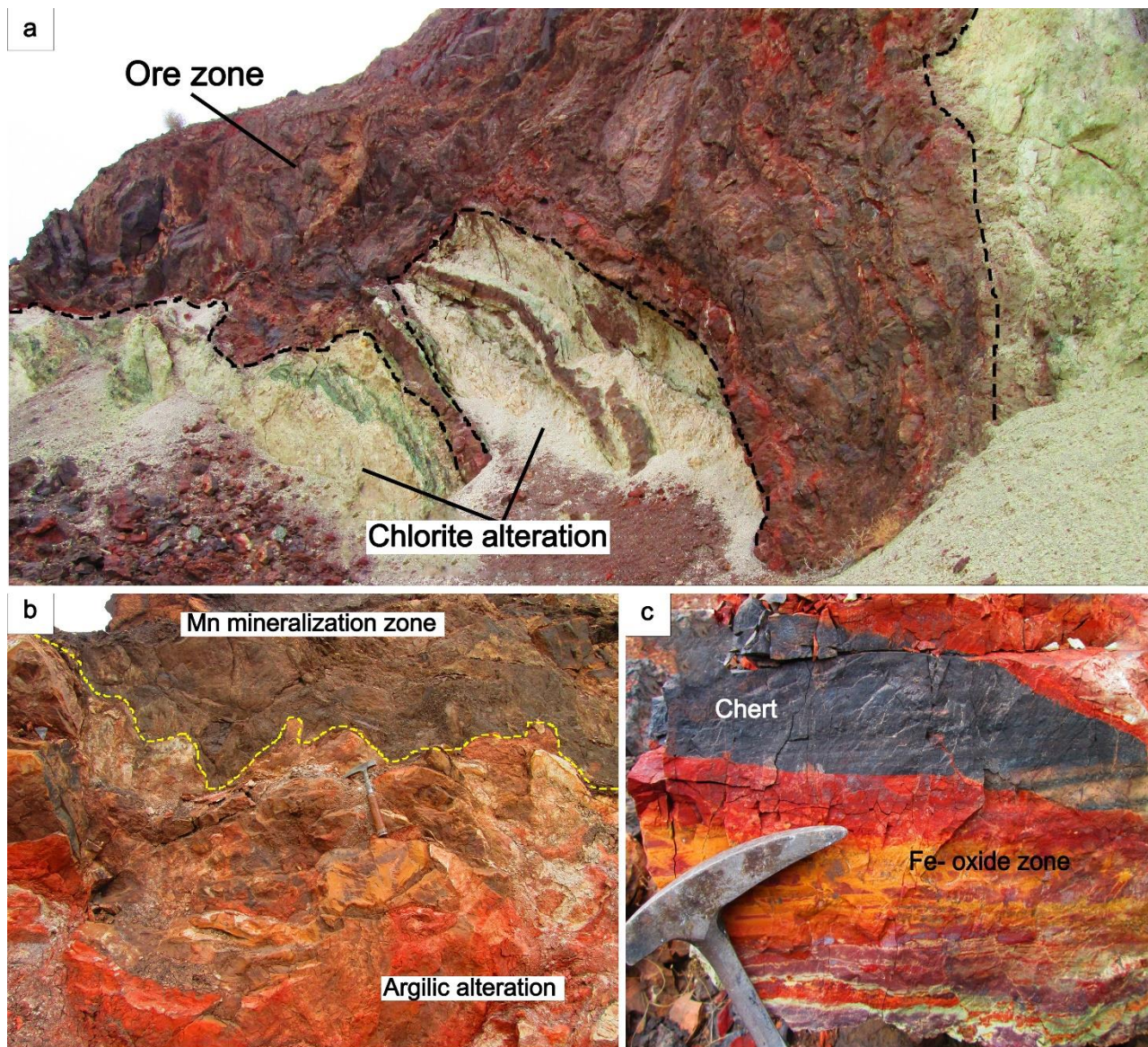


شکل ۹- (a) دورنمایی از رخساره کانسنگ لایه‌ای در کانسار محمدآباد که کانه‌زایی منگنز همروند با لایه‌بندی سنگ میزبان تشکیل شده است (دید به سمت شرق)، (b) نمونه دستی از بافت لامینه در رخساره کانسنگ لایه‌ای کانسار محمدآباد، (c) نمونه دستی از بافت دانه‌پراکنده در سنگ میزبان توف‌مارنی - توف‌آهکی کانسار محمدآباد و (d) نمونه دستی از نودول‌های منگنز تشکیل شده در متن سنگ میزبان توف‌مارنی- توف‌آهکی کانسار محمدآباد.
 Fig. 9. (a) General view of the bedded ore facies in the Mohammadabad deposit, which is composed of manganese ores concordant with host rock stratification (view to the east), (b) Hand specimen of laminae texture in the bedded ore facies of the Mohammadabad deposit, (c) Hand specimen of disseminated texture in the host rock of marly tuff-limy tuff of the Mohammadabad deposit, and (d) Hand specimen of manganese nodules which are formed in the marly tuff-limy tuff host rock of the Mohammadabad deposit.

رخساره تغذیه کننده

رخساره کانسنگی تغذیه کننده در کانسار محمدآباد توسط دگرسانیهایی شدید کلریتی و آرژیلیتی در بخشهای کمر پایین ماده معدنی و به خصوص در قسمت‌های زیرین رخساره کانسنگ توده‌ای دیده

می‌شود و به دلیل عملکرد رگه - رگچه‌های تغذیه کننده به هم ریختگی در قسمت‌های کمر پایین مشاهده می‌شود (شکل‌های a۸، a۱۰ و b). این رگه - رگچه‌ها محل عبور سیال کانه‌ساز بوده‌اند که باعث دگرسانی سنگ درونگیر در اطراف خود شده‌اند.



شکل ۱۰- (a) نمایی از دگرسانی کلریتی که بافت اولیه سنگ میزبان را بطور کامل از بین برده است (دید به سمت شمال غرب)، (b) رخمنونی از دگرسانی آرژیلیکی در افق کانه‌دار کانسار محمدآباد که باعث سفید رنگ شدن سنگ میزبان شده است (دید به سمت شمال)، (c) نمونه دستی از اکسیدهای آهن و عدسی چرتی به صورت همروند با هم تشکیل شده است.

Fig. 10. (a) View of chlorite alteration that completely destroys the original texture of the host rock (northwest view), (b) Outcrop of argillic alteration in the mineralized horizon of Mohammadabad deposit, which has caused the host rock to turn white (view to the north), and (c) Hand specimen iron oxides and a chert lens is formed concordant with together.

کانی شناسی، توالی پاراژنزی و مراحل تشکیل کانه‌زایی

توالی پاراژنتیکی به منظور توصیف نحوه توزیع کانیها یا فلزاتی که از لحاظ ژنتیکی با یکدیگر مرتبط هستند، ترسیم می‌شود (Robb, 2005). در کانسار منگنز محمدآباد، اکسیدهای منگنز در رخساره‌های مختلف به خوبی بافت‌های اولیه خود را حفظ کرده‌اند، لذا بررسی توالی پاراژنتیک کانه‌ها با مطالعه بافت‌های موجود به خوبی قابل انجام می‌باشد. بر اساس مطالعات بافتی و کانی‌شناسی، تشکیل و تکوین کانسار مورد مطالعه، سه مرحله عمده را شامل می‌شود که مرحله اول مربوط به قبل از کانه‌زایی و رسوبگذاری سنگ میزبان (Pre-mineralization stage) و مرحله دوم مربوط به فرآیندهای کانه‌زایی و بروندمی - دیاژنز (Mineralization stage or Exhalative-Diagenesis) و مرحله سوم مربوط به فرآیندهای هوازدگی و سوپرژن (Post-mineralization) است که در ادامه هر یک از مراحل فوق به اختصار توضیح داده می‌شود.

مرحله قبل از کانه‌زایی (Pre-mineralization) یا مرحله

رسوبگذاری سنگ میزبان

در این مرحله از توالی پاراژنتیک ته‌نشست رسوبی قطعات سنگ‌ساز (Rock-forming minerals) صورت گرفته است. بطوریکه اجزای تخریبی تشکیل‌دهنده سنگ میزبان، نوارهای چرتی، فسلیلهای رادیولاریت و فرامینیفیر در این مرحله در کف حوضه رسوبی و در طی فرآیند رسوبگذاری تشکیل شده‌اند و لایه‌های رسوبی سنگ میزبان را تشکیل داده‌اند، علاوه بر رسوبگذاری سنگهای رسوبی، فوران و خروج گدازه‌های آتشفشانی و آذرآوری باعث ایجاد تناوب سنگهای رسوبی با سنگهای گدازه‌ای و آذرآوری در سنگ میزبان کانه‌زایی کانسار محمدآباد شده است (شکل ۱۳).

مرحله کانه‌زایی (Mineralization or Exhalative-Diagenesis stage)

مرحله کانی‌زایی با توجه به رخساره‌های کانسنگی و نسل‌بندی کانیایی به سه زیر مرحله (Sub-stage) تقسیم می‌شود که به شرح زیر می‌باشد:

الف) زیر مرحله یک (Sub-stage I): در این زیرمرحله همزمان با ته‌نشست کانیهای سنگ‌ساز میزبان کانه‌زایی، نسل یک کانیهای منگنز بصورت لامینه و دانه‌پراکنده و نودول تشکیل می‌شوند، این زیر مرحله از رخداد کانه‌زایی منگنز در کانسار محمدآباد، منطبق با رخداد کانه‌زایی

در رخساره کانسنگ لایه‌ای این کانسار است بطوریکه کانیهای پیرولولزیت نسل یک، پسپیلوملان نسل یک و کلسیت‌های نسل یک در رخساره کانسنگ لایه‌ای در این زیرمرحله تشکیل شده‌اند (شکل ۱۳).

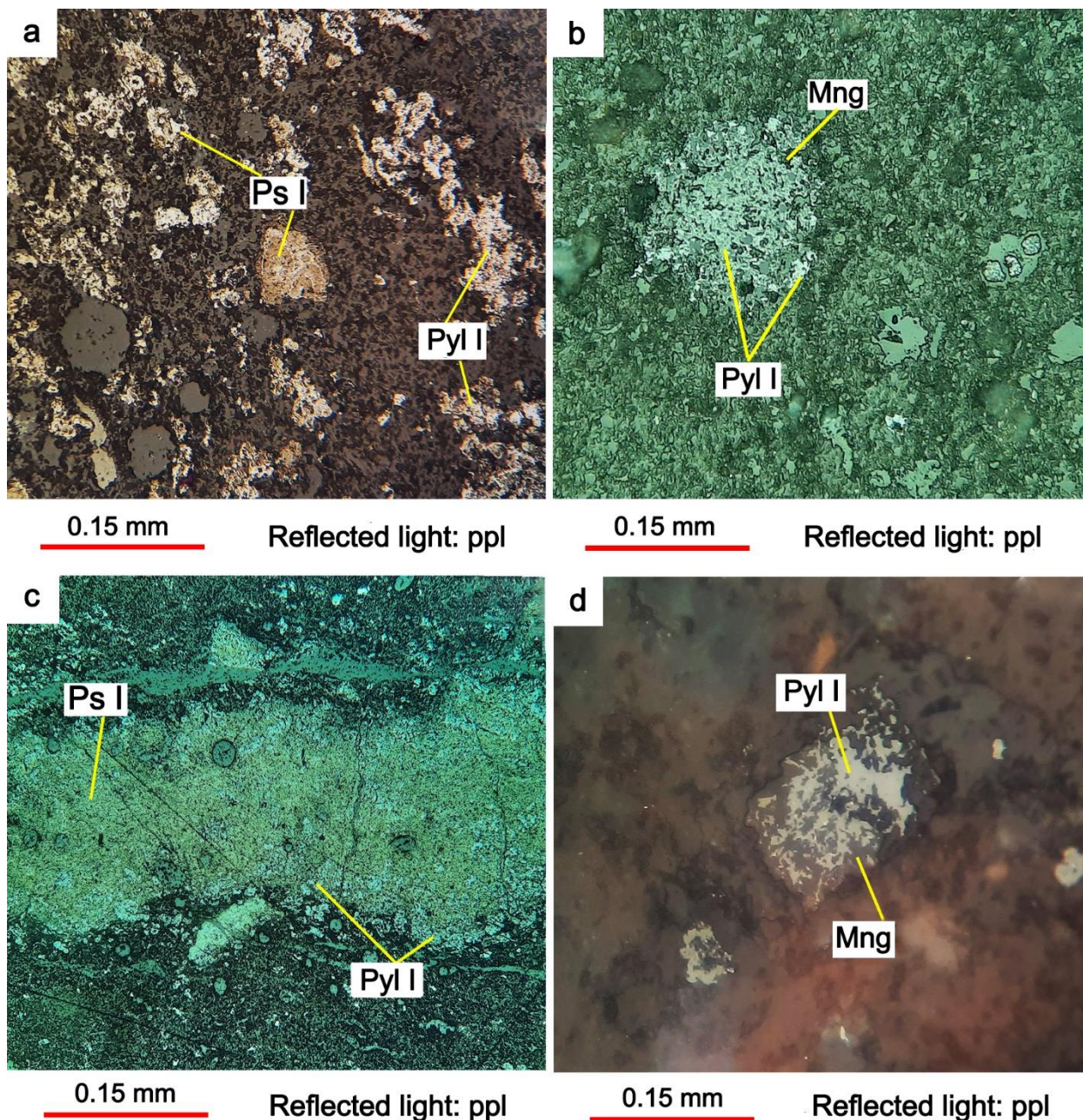
ب) زیر مرحله دو (Sub-stage II): در این زیر مرحله کانی‌های نسل دو کانه‌زایی منگنز کانسار محمدآباد تشکیل شده است. این زیر مرحله منطبق با رخساره کانسنگ توده‌ای و زون تغذیه کننده این کانسار بوده و بافت‌های جانیشینی و توده‌ای، عمده بافت‌های مشاهده شده در این زیر مرحله هستند. جانیشینی کانی‌های پیرولولزیت و پسپیلوملان نسل دو در این زیر مرحله بجای کانیهای نسل یک زیر مرحله یک، از عمده ویژگیهای بافتی این زیر مرحله از توالی پاراژنتیک کانسار محمدآباد است. هم چنین در این زیر مرحله بخش عمده‌ای از فسلیلهای فرامینیفیر و رادیولاریت موجود در سنگ میزبان، توسط کانی پیرولولزیت و به صورت جزئی‌تر توسط کانی پسپیلوملان پر شده‌اند. کلسیت‌های نسل دو در همراهی با دیگر کانیهای منگنز نسل دو در این زیر مرحله تشکیل شده‌اند (شکل ۱۳).

پ) زیر مرحله سه (Sub-stage III): این زیر مرحله بعنوان زیر مرحله دیاژنزی شناخته می‌شود و بصورت رگچه‌های محدود به لامینه‌های کانه‌زایی مشاهده می‌شود، این رگچه‌ها دارای ابتدا و انتهای مشخص هستند و از شکستگیهای تکتونیک تبعیت نمی‌کنند. رگچه‌های دیاژنزی، وقتی لامینه‌های کانه‌دار را قطع می‌کنند دارای کانه‌زایی هستند. کانی پیرولولزیت نسل سه در این زیر مرحله تشکیل شده است که جانشین کانیهای نسل یک و نسل دو زیر مرحله‌های قبلی شده است (شکل ۱۳).

مرحله بعد از کانه‌زایی (Post-mineralization) یا مرحله

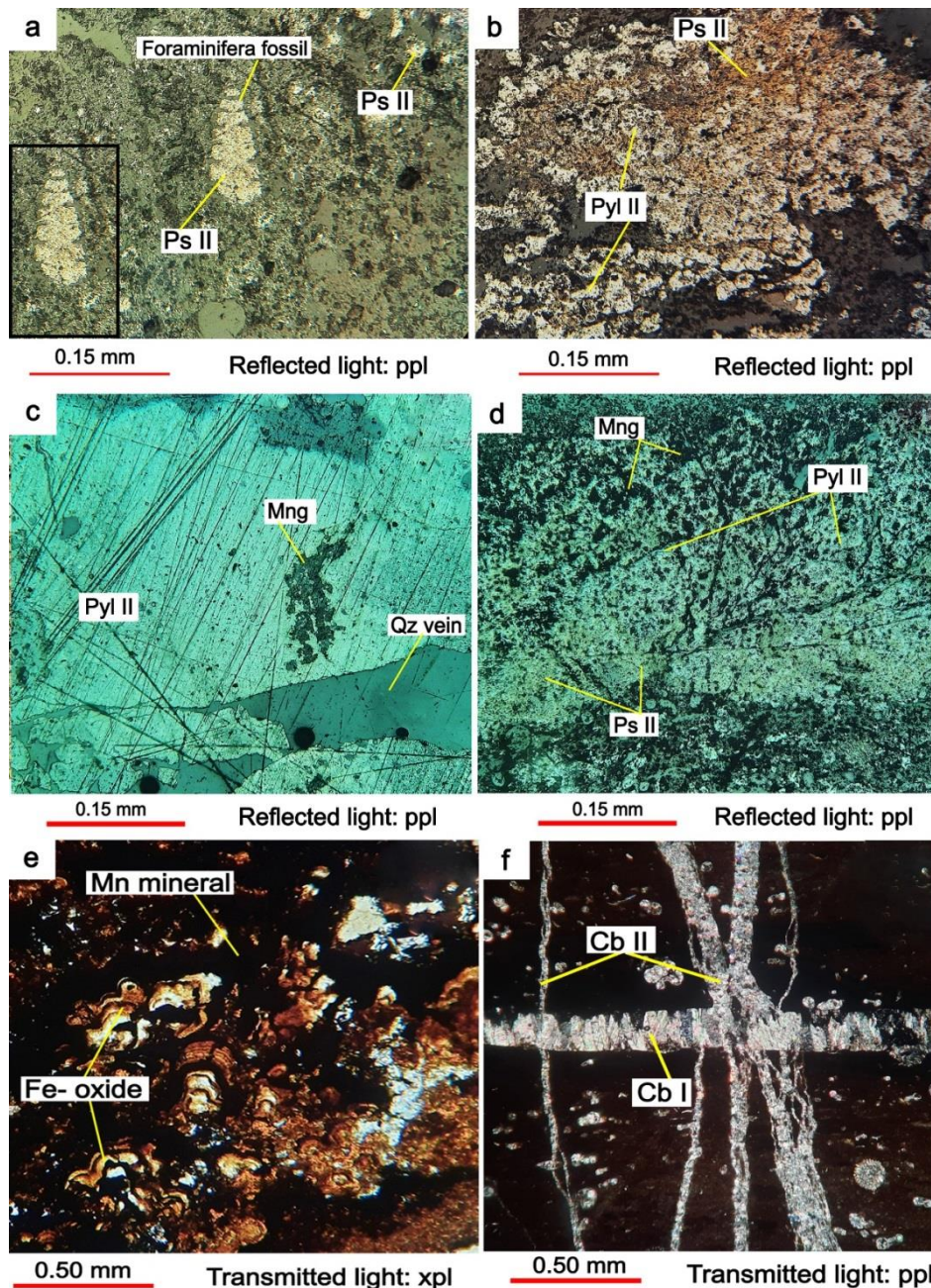
هوازدگی و سوپرژن

مرحله آخر که مرحله پس از کانی‌زایی است شامل تاثیر فرآیندهای تکتونیک و بالا آمدگی (Uplift) و مرحله سوپرژن است. در مرحله بالا آمدگی با آغاز فرآیند گسل خوردگی و چین خوردگی اکسیدهای منگنز دچار تحرک شده‌اند و کانی‌زایی مجددی از کانیهای اکسیدی منگنز را ایجاد می‌کنند. تاثیر آبهای جوی اکسیدان بر روی کانیهای اولیه نزدیک سطح زمین، موجب شسته‌شدن منگنز و انحلال آن می‌گردد. این سیالات در طی مسیر خود، کانیهای سوپرژن نظیر منگانیت، اکسید/هیدروکسیدهای آهن و پیرولولزیت را در کانسار محمدآباد تشکیل داده‌اند (شکل ۱۳).



شکل ۱۱- (a) تصویر میکروسکوپی از بافت دانه پراکنده متشکل از کانی پسیلوملان نسل اول که با کانی پیرولوژیت نسل اول همراهی نشان می‌دهد، (b) تصویر میکروسکوپی از نودول حاوی کانی پیرولوژیت نسل اول در کانسار محمدآباد که توسط منگانیست جانشین شده است، (c) تصویر میکروسکوپی از بافت لامینه در کانسار محمدآباد که کانی پیرولوژیت نسل اول همراه با پسیلوملان نسل اول تشکیل شده است و (d) تصویر میکروسکوپی از کانی پیرولوژیت نسل اول در کانسار محمدآباد با بافت نودول که توسط منگانیست جانشین شده است. علائم اختصاری؛ Pyl: Pyrolusite, Mng: Manganite, Ps: Psilomelane

Fig. 11. (a) Microscopic photograph of disseminated texture composed of psilomelane I mineral associated with pyrolusite I mineral, (b) Microscopic photograph of nodule containing first generation pyrolusite mineral in Mohammadabad deposit, which has been replaced by manganite, (c) Microscopic photograph of laminae texture in Mohammadabad deposit, which is composed of pyrolusite I with psilomelane I, and (d) Microscopic photograph of pyrolusite I in Mohammadabad deposit with nodule texture replaced by manganite. Abbreviation; Pyl: pyrolusite, Mng: manganite, Ps: psilomelane.



شکل ۱۲- (a) تصویر میکروسکوپی از پسیلوملان نسل دو در کانسار محمدآباد که به طور کامل جانشین فسیل فرامینیفر شده است، (b) تصویر میکروسکوپی از کانیهای پسیلوملان و پیرولوژیت نسل دو در کانسار محمدآباد، (c) تصویر میکروسکوپی از پیرولوژیت نسل دو که با منگانیت جانشین شده است، (d) تصویر میکروسکوپی از پیرولوژیت نسل دوم کانسار محمدآباد با بافت توده‌ای که همراه با پسیلوملان نسل دوم تشکیل شده است و سپس به وسیله منگانیت جانشین شده است، (e) تصویر میکروسکوپی از اکسید آهن که با شکل کلوفورمی مشاهده می‌شود و (f) تصویر میکروسکوپی از رگه-رگچه‌های متشکل از کربنات کلسیم نسل دو و نسل اول. علائم اختصاری؛ Cb: Carbonate.

Fig. 12. (a) Microscopic photograph of psilomelane II in the Mohammadabad deposit, which has completely replaced in the Foraminifera fossil, (b) Microscopic photograph of psilomelane II and pyrolusite II minerals in the Mohammadabad deposit, (c) Microscopic photograph of pyrolusite II of Mohammadabad deposit, which is replaced by manganite, (d) Microscopic photograph of pyrolusite II of Mohammadabad deposit with massive texture formed with psilomelane II and then replaced by manganite, (e) Microscopic photograph of iron oxide as seen in the form of chloroform texture, and (f) Microscopic photograph of carbonate II and I vein-veinlets in the Mohammadabad deposit. Abbreviation; Pyl: Pyrolusite, Mng: Manganite, Ps: Psilomelane, Cb: Carbonate.

Ore minerals/Rock-forming minerals	Pre-mineralization or Sedimentation	Ore-mineralization or Exhalative-diagenesis			Post-mineralization or Supergene
		Sub-stage I (Bedded ore facies)	Sub-stage II (Massive-stringer ore facies)	Sub-stage III (Late diagenetic vein-veinlet)	
Radiolarite					
Foraminifera					
Chert					
Lithic fragments					
Detrital fragments					
Clay minerals					Replacement, vein-veinlet
Pyrolusite I		Bedded, nodule, disseminated			
Psilomelane I		Bedded, nodule, disseminated			
Calcite I		Laminae			
Pyrolusite II			Massive, replacement in fossil		
Psilomelane II			Massive		
Calcite II			Vein-veinlet		
Pyrolusite III				Vein-veinlet	
Chlorite					Replacement, vein-veinlet
Manganite					Replacement, vein-veinlet
Iron oxide/hydroxide					Replacement, vein-veinlet

شکل ۱۳- مراحل تشکیل و توالی پاراژنتیک کانه‌ها، کانی‌ها و ساخت و بافت مربوط به آنها در کانسار منگنز محمدآباد.

Fig. 13. Stages of formation and paragenetic sequence of ores, minerals and related structure and texture in the Mohammadabad manganese deposit.

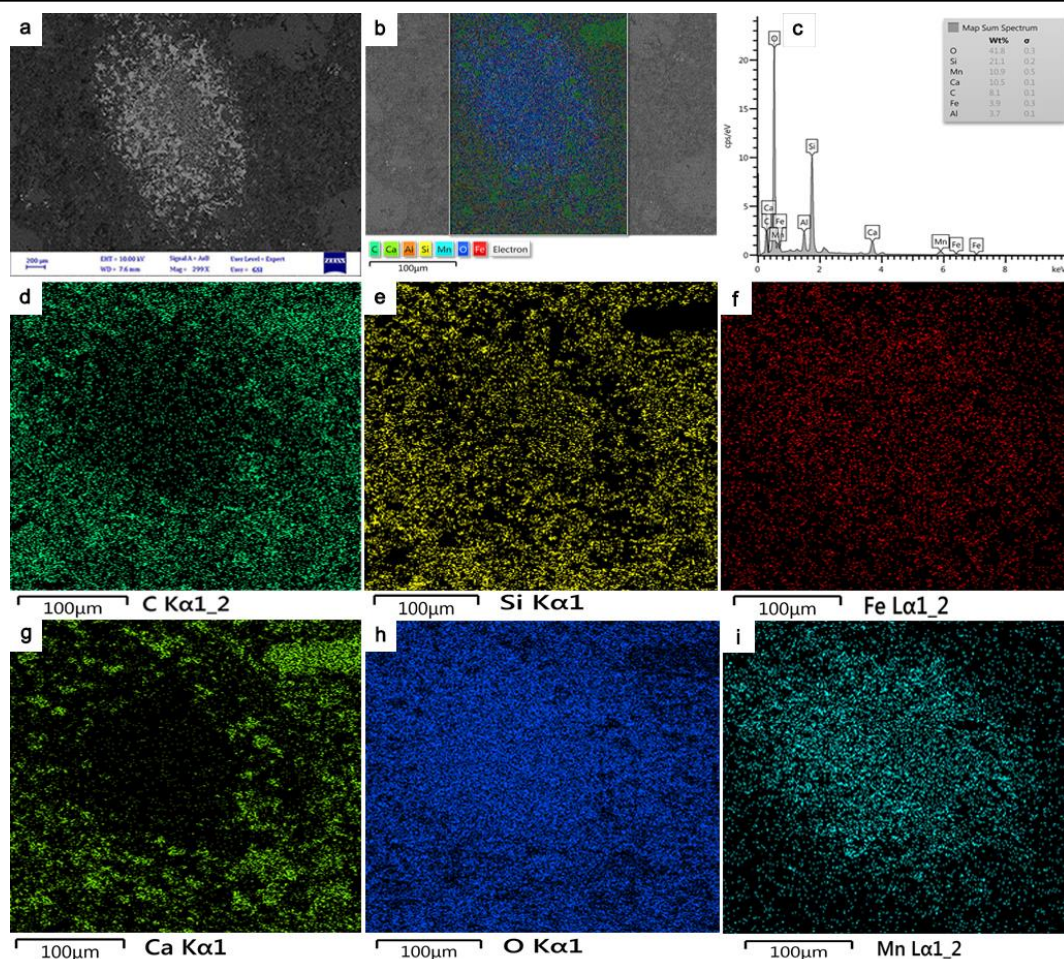
است. اکسیژن، منگنز و آهن از مواد تشکیل دهنده نودولها در کانسار مورد مطالعه می‌باشند (شکل‌های ۱۴ و ۱۵). توزیع عناصر درون نودول-های منگنز و حجرات پر شده فسیل‌های کانسار محمدآباد، تأیید می‌کند که کریستال‌ها نسبتاً همگن هستند و اساساً از منگنز تشکیل شده‌اند و فقط تا حدی توسط سیلیس همراهی می‌شوند.

توزیع و پراکندگی عناصر در کانه‌های منگنز نسل یک

همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، کانه‌زایی منگنز کانسار محمدآباد با بافت نودول، تحت عنوان کانه‌زایی نسل اول شناخته می‌شود. بر اساس مطالعات SEM انجام شده بر روی این نسل از کانه‌زایی (شکل ۱۴) توزیع عناصر روند مشخصی را نشان می‌دهد که اکسیژن (شکل ۱۴h) و منگنز (شکل ۱۴i) همبستگی مثبت داشته و بخش اصلی نودول از این عناصر تشکیل شده است. سیلیسیم (شکل ۱۴e) و آهن (شکل ۱۴f) هر دو در تشکیل نودول منگنردار و هم در سیمان سنگ میزبان نقش دارند. برخلاف اکسیژن و منگنز، عناصری همچون کربن (شکل ۱۴d) و کلسیم (شکل ۱۴g) حاشیه نودول را پر کرده‌اند و بیشتر به صورت سیمان عمل می‌کنند.

مطالعات SEM و نقشه عنصری کانی‌ها (Minerals Elemental Mapping)

توزیع عنصری کانی‌ها و همبستگی عناصر برای تعیین فرآیندهای کانسنگ‌ساز و تشخیص تیپ‌های کانسارها بسیار مهم است (Cox and Singer, 1986; Pirajno, 1992; Sillitoe, 1997; Large et al., 2009, 2013; Kouhestani et al., 2012). برای این منظور، در سال‌های اخیر چندین روش از قبیل آنالیز الکترون میکروپروب (EPMA) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و همچنین طیف سنجی جرمی پلاسما - جفت شده با لیزر (LA-ICP-MS) برای توزیع عناصر کانیایی استفاده شده است (San Shen and Yang, 2004; Chouinard et al., 2005; Velásquez et al., 2014; Kouhestani et al., 2018; Shahbazi et al., 2019). شناسایی دقیق مقدار و نوع عناصر موجود در کانی‌های اکسیدی منگنز به خصوص کانی پیرولوزیت به عنوان اصلی‌ترین کانی شناخته شده در کانسار محمدآباد، به منظور تعیین دقیق ترکیب عنصری فازهای کانیایی، ما را به سوی انجام مطالعات SEM رهنمون ساخت. به طور کلی، توزیع هر عنصر در حاشیه و یا هسته هر کانی با رنگ مشخص نشان داده شده



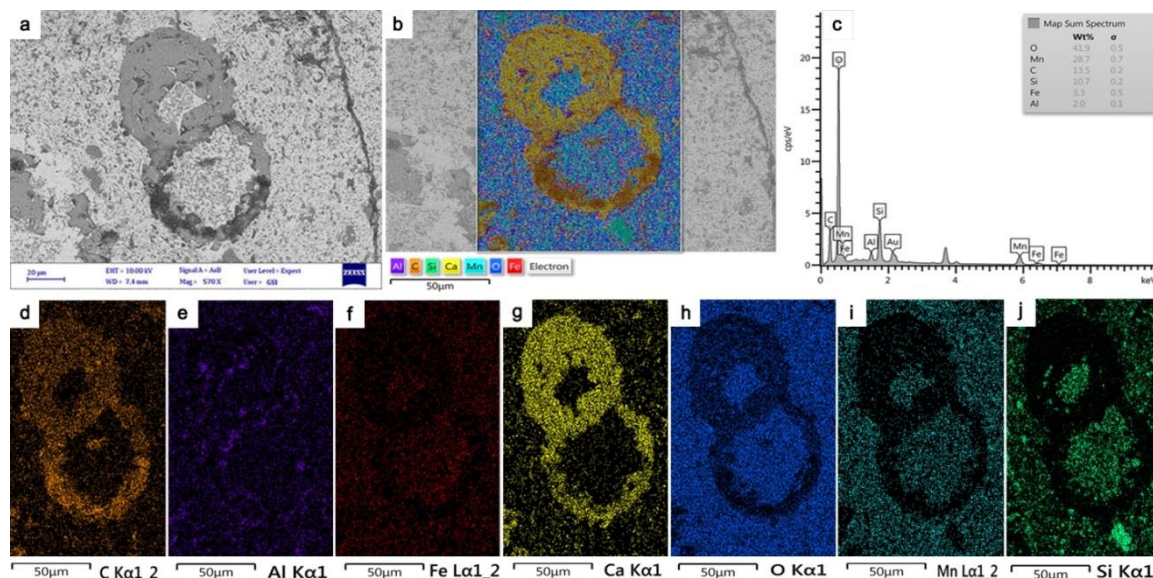
شکل ۱۴- توزیع و همبستگی عنصری در نقشه پراکندگی عنصری (Elemental mapping) کانی پیرولولزیت نسل یک، (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDX) از نودول حاوی منگنز نسل اول مربوط به کانسار محمدآباد، (b) نقشه توزیع عنصری که برآیند و پراکندگی همگن عناصر C، Ca، Al، Si، Mn، O و Fe در آن مشخص شده است، (c) نمودار نشان داده شده تجزیه و تحلیل طیف سنجی پراکندگی انرژی و ترکیب کانی شناسی را نشان می‌دهد و (d-i) نقشه‌های توزیع عنصری (TEM/BSE) که پراکندگی عناصر C، Si، Fe، Ca، O، Mn را در نودول حاوی منگنز نشان می‌دهد.

Fig. 14. Elemental distribution and correlation in the elemental mapping of one generation pyrolusite mineral, (a) A SEM/BSE image showing nodule texture of sub-stage I in the Mohammadabad deposit, (b) An elemental map showing the homogenous distribution of C, Ca, Al, Si, Mn, O and Fe, (c) The graph shown on the right represent energy-dispersive spectroscopy analysis presenting the mineral composition, and (d-i) A TEM/BSE elemental maps showing the distribution of C (d), Si (e), Fe (f), Ca (g), O (h) and Mn (i) in the Mn-bearing nodule.

توجه به نتایج، عناصر منگنز (شکل ۱۱۵)، اکسیژن (شکل ۱۱۵) و سیلیسیم (شکل ۱۱۵) در بخش‌های داخلی فسیل حضور داشته و همبستگی مثبت نشان می‌دهند. در مقابل، عناصر کربن (شکل ۱۱۵) و کلسیم (شکل ۱۱۵) به طور کامل در پوسته فسیل قرار گرفته و پوسته آهکی آن را تشکیل داده‌اند. همانند سایر نمونه‌ها، عنصر آهن (شکل ۱۱۵) و آلومینیوم (شکل ۱۱۵) روند خاصی نداشته و در تمام بخش‌ها توزیع شده است.

توزیع و پراکندگی عناصر در کانه‌های منگنز نسل دو

با توجه به نسل‌بندی کانه‌زایی منگنز؛ آن دسته از کانیهای منگنز که در داخل حجرات داخلی فسیلهای فرامینیر و رادیولاریت جانشین شده‌اند تحت عنوان نسل دوم کانه‌زایی شناخته می‌شوند. از اینرو، جهت بررسی پراکندگی و توزیع عنصری در فسیلهای نامبرده بخشی از مطالعات SEM به کانه‌زایی منگنز در بخشهای داخلی فسیلهای فرامینیر و رادیولاریت در کانسار محمدآباد اختصاص داده شد که در زیر هر یک از آنها به اختصار توضیح داده خواهد شد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- توزیع و همبستگی عنصری در نقشه پراکندگی عنصری (Elemental mapping) کانی پیرولوژیت نسل دو، (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDX) از فسیل فرامینیفر که حجرات داخلی آن به وسیله منگنز نسل دو جانشین شده است، (b) نقشه توزیع عنصری که برآیند و پراکندگی همگن عناصر Al, C, Si, Ca, Mn, O, Fe در آن مشخص شده است، (c) نمودار نشان داده شده تجزیه و تحلیل طیف سنجی پراکندگی انرژی و ترکیب کانی شناسی را نشان می دهد و (d-j) نقشه های توزیع عنصری (TEM/BSE) که پراکندگی عناصر C, Al, Fe, Ca, Mn, O, Si را در نودول حاوی منگنز نشان می دهد.

Fig. 15. Elemental distribution and correlation in the elemental mapping of two generation pyrolusite mineral, (a) A SEM/BSE image showing foraminifera fossil that has been largely replaced by manganese in the sub-stage II, (b) An elemental map showing the homogenous distribution of Al, C, Si, Ca, Mn, O and Fe, (c) The graph shown on the right represent energy-dispersive spectroscopy analyses presenting the mineral composition, and (d-j) A TEM/BSE elemental map showing the distribution of C (d), Al (e), Fe (f), Ca (g), O (h), Mn (i) and Si (j) in the foraminifera fossil replaced by manganese.

و همچنین ساخت و بافت کانه ها، همگی نشان دهنده تشکیل کانسار منگنز محمدآباد در طی فرآیندهای بروندمی و همزمان با سنگ دربرگیرنده ماده معدنی (syngenetic) است. نقشه های عنصری که توزیع عناصر اصلی در نسل های مختلف کانه های منگنز را نشان می دهند، مشخص می کند که اکسیژن، منگنز و آهن از مواد تشکیل دهنده نودول های کانه دار در کانسار مورد مطالعه می باشند. توزیع عناصر درون نودول های منگنز و حجرات پر شده فسیلهای کانسار محمدآباد، تأیید می کند که کریستال ها نسبتاً همگن هستند و اساساً از منگنز تشکیل شده اند و فقط تا حدی توسط سیلیس همراهی می شوند. با توجه به گسترش توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین در منطقه جنوب غرب سبزوار و رخداد کانه زاییهای متعدد منگنز در جایگاه های خاص چینهای و قرارگیری آنها در افقهای معین و متعدد، می توان از کانسار منگنز محمدآباد به عنوان الگویی به منظور اکتشاف ذخایر جدید اقتصادی منگنز در منطقه بهره برداری کرد.

نتیجه گیری

کانه زایی منگنز محمدآباد در ناحیه جنوب غرب سبزوار و در داخل توالی آتشفشانی - رسوبی بخش بالایی کرتاسه پسین تشکیل شده است. این توالی آتشفشانی - رسوبی در داخل یک ساختار چین خورده قرار گرفته است که کانسار مذکور در یال جنوبی تاقدیس جنوبی و در سنگ میزبان توفمارنی - توف آهکی تشکیل شده است. کانه زایی منگنز به صورت چینه سان و همروند با سنگ دربرگیرنده ماده معدنی و همزمان با ته نشین شدن کانی های تشکیل دهنده سنگ درونگیر، تشکیل گردیده است. کانی شناسی منگنز در کانسار مورد مطالعه عمدتاً از نوع اکسید - هیدروکسیدهای منگنز است. ساخت و بافت ماده معدنی به صورت توده ای، لامینه، نودول، دانه پراکنده و جانشینی کانی های منگنز در حجرات داخلی فسیلهای فرامینیفر و رادیولاریت می باشد که کانی شناسی آنها پیرولوژیت، پسیلوملان و منگانیت است. شواهد زمین شناسی و قرار گرفتن کانه زایی منگنز در توالی رسوبی - آتشفشانی

منابع

- Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, p. 600.
 Cannon, W.F., Kimball, E.B., Corathers, L.A., 2017. Manganese (Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply). U.S Geological Survey, Reston, Virginia.

- Chouinard, A., Williams-Jones, A.E., Leonardson, R.W., Hodgson, C.J., 2005. Geology and genesis of the multistage high sulfidation epithermal Pascua Au-Ag-Cu deposit, Chile and Argentina. *Economic Geology* 100, 463–490.
- Cox, D., Singer, D., 1986. Mineral deposits models. U.S. Geological Survey Bulletin. 1693 p.
- Dorr, J.V.N., Crittenden, M.D., Jr., Worl, R.G., 1973. Manganese, in Brobst, D.A., Pratt, W.P. eds., United States mineral resources: U.S. Geological Survey Professional Paper 820, p. 385–399.
- Eftekhari-Nezhad, J., Aghanabati, A., Hamzhepour, B., 1976. Geological map of 250000 Kashmar. Geological Survey of Iran.
- Franklin, J.M., Gibson, H.L., Jonasson, I.R., Galley, A.G., 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits, The Economic Geology Publishing Company. 100th Anniversary Volume, pp. 523–560.
- Gibson, H., Galley, A., 2007. Volcanogenic massive sulphide deposits of the Archean, Noranda District, Quebec. *Mineral Deposits of Canada*, p. 533–552.
- Jafarian, M.B., Jalali, A., 1983. Geological map 1: 100,000 Six, Geological Survey of Iran.
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Zaw, K., Meffre, S., Emami, M.H., 2012. Geological setting and timing of the Chah-Zard breccia-hosted epithermal gold-silver deposit in the Tethyan belt of Iran. *Mineralium Deposita* 47, 425–440.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Chang, Z., Stein, H.J., Johnson, C.A., 2018. Timing and genesis of ore formation in the Qarachilar Cu-Mo-Au deposit, Ahar-Arasbaran metallogenic zone, NW Iran: evidence from geology, fluid inclusions, O–S isotopes and Re-Os geochronology. *Ore Geology Reviews* 102, 757–775.
- Large, R.R., Danyushevsky, L., Hollit, C., Maslennikov, V., Meffre, S., Gilbert, S., Bull, S., Scott, R., Emsbo, P., Thomas, H., Singh, B., Foster, J., 2009. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits. *Economic Geology* 104, 635–668.
- Large, R.R., Meffre, S., Burnett, R., Guy, B., Bull, S., Gilbert, S., Geomann, K. & Danyushevsky, L.V., 2013. Evidence for an intrabasinal source and multiple concentration processes in the formation of the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa. *Economic Geology* 108, 1215–1241.
- Maghfouri, S., 2012. Geology, Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Cu Mineralization within Late Cretaceous Volcano-Sedimentary Sequence in Southwest of Sabzevar, with emphasis on the Nodeh Deposit. Unpublished M.Sc. thesis. University of Tarbiat Modares, Iran. p. 312 (in Persian with English abstract).
- Maghfouri, S., Rastad, A., Mousivand, F., 2015. Stratigraphic position, origin and characteristics of manganese mineralization horizons in the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence, south-southwest of Sabzevar. *Journal of Economic Geology (Iran)* 6(2) (in Persian with English abstract).
- Maghfouri, S., Rastad, E., Mousivand, F., Choulet, F., 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.
- Maghfouri, S., Rastad, E., Movahednia, M., Lentz, D.R., Hosseinzadeh, M.R., Yed, L., Mousivand, F., 2019. Metallogeny and temporal-spatial distribution of manganese mineralization's in Iran: Implications for future exploration. *Ore Geology Reviews* 115, 103–026.
- Masoudi, M., 2008. Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of Benesbourd Mn deposit in the southwest Sabzevar. M.Sc. Thesis. Tehran Islamic Azad University, Iran, 100 pp. (in Persian with English abstract).
- Maynard, J.B., 2003. Manganiferous sediments, rocks, and ores, in MacKenzie, F.T., ed., *Sediments, diagenesis, and sedimentary rocks*, v.7 of Holland, H.D., and Turekian, K.K., eds., *Treatise on geochemistry*: Oxford, United Kingdom, Elsevier-Pergamon. p. 289–308.
- Nasiri, F., Lotfi, M., Jafari, M., 2010. Mineralogical studies on the Homaei manganese deposit in southwest of Sabzevar. 30th Symposium on Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Nasrollahi, A., Moosivand, F., Ghasemi, H.A., 2013. Geochemical studies of primary, rare and rare earth elements (REE) and the origin of Nuddeh manganese deposit, southwest of Sabzevar. 17th conference of the Geological Society of Iran.
- Pirajno, F., 1992. *Hydrothermal Mineral Deposits—Principles and Fundamental Concepts for the Exploration Geologist*. Springer-Verlag, Berlin. 709 p.
- Robb, L., 2005. *Introduction to Ore-Forming Processes*, 386p.
- San Shen, J.J., Yang, H.J., 2004. Sources and genesis of the Chinkuashih Au–Cu deposits in northern Taiwan: constraints from Os and Sr isotopic compositions of sulfides. *Earth and Planetary Science Letters* 222. 71–83.

- Shahbazi, S., Ghaderi, M., Alfonso, P., 2019. Mineralogy, alteration, and sulfur isotope geochemistry of the Zehabad intermediate-sulfidation epithermal deposit, NW Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences* 28(6), 882–901.
- Sillitoe, R.H., 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the Circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Science* 44, 373–388.
- Taghizadeh, S., 2015. Mineralogy, geochemistry and genesis of the Zakeri Mn deposit, Southwest of Sabzevar. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Shahrud, Iran. p. 202 (in Persian with English abstract).
- Vahdati Daneshmand, F., 1999. Geological Map of Darin. Scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Velásquez, G., Béziat, D., Salvi, S., Siebenaller, L., Borisova, A.Y., Pokrovski, G.S., Parseval, P.D., 2014. Formation and deformation of pyrite and implications for gold mineralization in the El Callao District, Venezuela. *Economic Geology* 109, 457–486.
- Zarasvandi, A., Lentz, D., Rezaei, M., Pourkaseb, H., 2013. Genesis of the Nasirabad manganese occurrence, Fars province, Iran: geochemical evidences. *Geochemistry* 73, 495–508.
- Zarasvandi, A., Pourkaseb, H., Sepahvand, M., Raith, J., Rezari, M., 2016b. Tracing of hydrothermal ore forming process in the Sorkhvand manganese deposit, Kermanshah Province, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 9, 109.



©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.