



Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>



Geology, geochemistry and mineralization of the Kordkandi copper deposit, northwest Zanjan

Maryam Ahmadi¹, Ghasem Nabatian^{*1}, Amir Morteza Azimzadeh^{1,2}, Maryam Honarmand³

1. Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.

3. Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran.

Article info

Article type

Research Article

Article history

Received: 6 April 2026

Accepted: 21 June 2026

Keywords:

Copper mineralization, Manto-type, Western Alborz-Azarbaijan Zone, Kordkandi, Zanjan.



Abstract

The Kordkandi deposit is located 26 km northwest of Zanjan, within the Western Alborz-Azarbaijan zone and the Tarom subzone, occurring as a stratabound mineralization within Eocene andesitic basalt lava flow units (equivalent to the Karaj Formation). Copper mineralization in this deposit is primarily observed as sulfide minerals including chalcopyrite, bornite, chalcocite, and lesser pyrite and specular hematite exhibiting disseminated, vein-veinlet, and replacement textures. The volcanic rocks in this area were formed in an extensional, back-arc environment. Geochemically, the investigated samples fall within the calc-alkaline to high-potassium calc-alkaline to shoshonitic series. Based on the host rock characteristics, mineralogy, texture and structure, geometry, and alteration, this deposit shows significant similarity to Manto-type deposits in Chile. According to these lines of evidence, it can be stated that the Kordkandi copper deposit formed during burial metamorphism stages within andesitic basalt units. During this stage, with increasing burial depth, copper mineralization occurred alongside alterations such as zeolitization, chloritization, epidotization, silicification, and carbonatization. Subsequently, due to the uplift of the area and through weathering and supergene processes, secondary minerals were formed in this deposit.

Introduction

The Kordkandi copper deposit is located in the northwestern part of Zanjan Province, within the Western Alborz-Azarbaijan structural zone, and in the Tarom-Hashtjin subzone of the Karaj Formation. This area is part of the Eocene volcano-sedimentary sequences (Karaj Formation) that hosts numerous mineral deposits in the Zanjan region, including magnetite-apatite deposits (Nabatian et al., 2014), The Chore-Nab iron deposit (Ebrahimi Fard et al., 2022), the Manto-type copper mineralization in the Tarom-Hashtjin region (Nabatian, 2021), the Khalifehlu copper deposit (Esmaeli et al., 2018), the Chumalu lead-zinc deposit (Afshari et al., 2024), the epithermal mineralization at Armaghankhaneh (Kouhestani et al., 2022), the epithermal mineralization at Nikuyeh (Aghajani et al., 2020), the Galehrud copper deposit (Asgari, 2021), the Mahin copper deposit (Hadi, 2000), the Dahaneh copper deposit (Mohammadi et al., 2019; 2021), the Qeshlaq copper deposit (Abbaspour, 2017), Mari (Hosseinazadeh et al., 2016), and the Yahyaabad copper deposit (Hamidi, 2024). In Iran, Manto-type mineralization has been identified in various structural zones including the Alborz, Urumieh-Dokhtar, Sanandaj-Sirjan, and Sabzevar zones (Nabatian, 2021; Movahednia et al., 2022).

This research aims to investigate the geology, mineralogy, alteration, geochemistry, mineralization type, and genesis of the

Kordkandi copper deposit. The results provide crucial information for understanding the formation mechanisms and exploration criteria for similar deposits in the Tarom subzone and other parts of Iran.

Materials and Methods

This research was conducted through a combination of field studies, laboratory analyses, and data interpretation. Following detailed field investigations, systematic sampling was performed from the host rock units of mineralization, and a geological map at a scale of 1:20,000 was prepared. A total of 32 thin sections and polished-thin sections were prepared and studied to identify mineral phases, their abundances, textures, temporal relationships, and their association with mineralization.

Additionally, from 38 collected samples, five host rock samples exhibiting minimal alteration were selected for geochemical analysis. These samples were analyzed at Zarazma Zangane Iranian Company using XRF (X-ray Fluorescence) for determining major oxide concentrations and ICP-MS (Inductively Coupled Plasma- mass spectrometry) for trace and rare earth element (REE) concentrations.

Petrographic studies were conducted using a polarizing microscope to identify mineral assemblages, textures, and

DOI 10.22034/kjes.2026.11698

*Corresponding author: Ghasem Nabatian; E-mail: gh.nabatian@znu.ac.ir

How to cite this article: Ahmadi, M., Nabatian, G., Morteza Azimzadeh, A. M., Honarmand, M., 2026. Geology, geochemistry and genesis of the Kordkandi copper deposit, northwest Zanjan. Kharazmi Journal of Earth Sciences 12(1), 82- 105. <http://doi.org/10.22034/kjes.2026.11698>



paragenetic relationships. Geochemical data processing and interpretation were performed using GCDkit software and various discrimination diagrams to determine rock types, magmatic series, and tectonic setting.

Results and discussion

Geology and petrography

The study area is situated in the Western Alborz-Azarbaijan zone, within the Tarom-Hashtjin subzone and belongs to the Kordkandi member of the Karaj Formation (Figs. 1 and 2). The exposed rock units in the Kordkandi area belong to an Eocene volcano-sedimentary sequence, indicating volcanic activity in a shallow sedimentary basin with alternating explosive phases and effusive andesitic, dacitic, and minor rhyolitic lava flows. The Eocene volcanoclastic and volcanic units are the most important exposed units in the study area. These units mainly consist of tuffaceous sandstones associated with andesitic basalt lavas.

Two types of gray and green tuff units are present in the area which interbedded with lava units. The gray tuff unit occurs in the lower parts, exhibiting a gray color with porphyritic and fine-grained textures containing minor lithic fragments, classified as lithic crystal tuff. The green tuff is more widespread, displaying a greenish-gray color with fine-grained texture and abundant lithic fragments, classified as crystal lithic tuff. These tuff units have an approximate thickness of 150 meters and are not significant for mineralization.

Andesitic-basaltic lava units host the mineralization and are interbedded with tuff units, extending approximately 200 meters in thickness. They exhibit distinct layering, light gray color, and porphyritic texture in hand samples, with minor amygdaloidal texture filled by carbonate minerals and quartz. A dioritic dyke with approximately 1.5 meters width cuts through the andesitic basalt lavas in the western part of the area.

Microscopic studies reveal that the tuff units primarily consist of plagioclase, pyroxene, and quartz. Plagioclase is the most abundant mineral, largely replaced by sericite and clay minerals. Clinopyroxene occurs in lesser amounts, mostly replaced by epidote and calcite. Epidote is also observed as veinlets. Chlorite is one of the most abundant secondary minerals in these units, replacing mafic minerals and filling irregular cavities.

The andesitic basalt lava units contain plagioclase and pyroxene as primary minerals, altered to varying degrees to secondary minerals including calcite, epidote, chlorite, and clay minerals. Plagioclase constitutes approximately 55-65% of the minerals in these units. The microdiorite dyke exhibits fine-grained texture with primary plagioclase and pyroxene, and secondary epidote, calcite, chlorite, and sericite, with intergranular texture observed as a subordinate texture.

Mineralization and alteration

Copper mineralization in the Kordkandi area occurs as stratabound within andesitic basalt lava units, confined to a mineralized horizon approximately 20-50 meters thick and 250 meters long, exhibiting vein-veinlet and disseminated textures. Late-stage specular hematite veins cross-cut the earlier copper mineralization and host rocks. The primary ore minerals include pyrite, chalcopyrite, bornite, chalcocite, and specular hematite. Secondary minerals include malachite, azurite, chalcocite, chrysocolla, covellite, and goethite, formed through weathering and supergene processes. The main ore textures include vein-veinlet, disseminated, open space filling, brecciated, relic, and replacement textures.

Chalcopyrite is the main copper-bearing mineral in the Kordkandi deposit, occurring predominantly as disseminated grains and veinlets. It is cross-cut by later-stage specular hematite and replaced by secondary minerals including covellite, chalcocite, and goethite during supergene and weathering stages, resulting in relic and island textures.

Chalcocite occurs in both primary and secondary forms. Primary chalcocite, as a major copper mineral, occurs with veinlet and disseminated textures associated with chalcopyrite and bornite. During supergene processes, it transforms to secondary minerals including malachite, azurite, and minor covellite. Secondary chalcocite forms through supergene and weathering processes, replacing primary minerals such as chalcopyrite and bornite.

Bornite occurs as another primary copper mineral with veinlet and disseminated textures. It typically forms intergrowths with other copper minerals including chalcopyrite and chalcocite during the primary mineralization stage and is transformed to secondary minerals including covellite, malachite, and goethite during supergene processes.

Specular hematite is the main iron ore mineral in the Kordkandi deposit, occurring as acicular crystals with vein-veinlet texture. As mentioned, this mineral predominantly occurs as veinlets cross-cutting the earlier (copper) mineralization stage.

Hydrothermal alteration in the Kordkandi deposit is well-developed and includes chloritic, epidotic, silicic, zeolitic, and carbonate alteration types. Silicic, zeolitic, chloritic and epidotic alterations are extensive, predominantly in andesitic basalt units, occurring as veinlets, cavity-filling (amygdaloidal), and replacement around ore minerals. Carbonate alteration occurs as veinlets, replacement, and cavity-filling (amygdaloidal) during the latest mineralization phase, cross-cutting all previous mineralization stages and alteration assemblages. These alterations formed during copper mineralization stage as vein-veinlets and cavity-filling (amygdaloidal). Minor sericitic and argillic alterations, related to supergene processes, are also observed but are not associated with copper mineralization.

Based on field and microscopic studies, the paragenetic sequence in the Kordkandi copper deposit can be divided into

two main stages including burial metamorphism and mineralization and supergene and weathering.

During early stage, volcanic and sedimentary activities began with the deposition of pyroclastic and sedimentary units. With increasing burial depth, temperature and pressure increased, initiating burial metamorphism. Metamorphic fluids, carrying valuable metals, migrated through different parts of the host rock, leaching copper and iron from mafic minerals such as pyroxene. Progressive fluid infiltration into fractures and open spaces resulted in the precipitation of copper and iron minerals. Copper minerals including chalcocite, chalcopyrite, and bornite, along with pyrite, formed during various alterations such as silicic, zeolitic, and chloritic-epidotic alteration. During this stage, copper mineralization formed first, followed by iron mineralization (specular hematite) as vein-veinlets. Evidence indicates that specular hematite mineralization post-dates copper mineralization and cross-cuts it. In the final stages of mineralization, carbonate veins and veinlets formed, cross-cutting the entire earlier mineralized assemblage and host rocks.

During the second stage, secondary minerals including malachite, covellite, azurite, goethite, and secondary chalcocite formed through replacement and vein-veinlet textures. In some parts, replacement intensity was so high that only relicts or islands of primary minerals remained. Alterations formed during this stage include argillic and sericitic alteration, which are not related to mineralization.

Geochemistry of host rocks

Geochemical studies show that the host rocks of the Kordkandi deposit have basaltic composition and have calc-alkaline to high-potassium calc-alkaline to shoshonitic series.

Chondrite-normalized and primitive mantle-normalized spider diagrams indicate enrichment in light rare earth elements (LREEs) and large ion lithophile elements (LILEs), and depletion in heavy rare earth elements (HREEs) and high field strength elements (HFSEs) for the studied samples. All magmatic rocks from the Kordkandi area show relatively similar trace element and REE patterns, suggesting a common source and magmatic evolution for the igneous units in this area. Positive anomalies in Rb, Ba, U, and to some extent Th indicate enrichment of the magma source in these elements. A significant Pb anomaly suggests crustal contamination of the magmas and enrichment of the source region. The studied samples do not show strong depletion in HFSEs and HREEs, making the presence of garnet in the residue from partial melting unlikely. Negative Zr anomalies may result from zircon fractionation in the magmas. Overall, LILE enrichment accompanied by negative Nb, Ta, and Ti anomalies can be indicative of magmas generated in subduction zones.

In the chondrite-normalized REE patterns, the studied samples do not show significant Eu anomalies, suggesting the absence of plagioclase in the residue from partial melting or lack of plagioclase fractionation during magma ascent. The REE

distribution patterns in all samples are subparallel and show LREE enrichment, which is probably due to subduction components or crustal contamination. Negative Ce anomalies, along with elements such as Ti and Nb, are indicators of involvement of subducting slab sediments in the lithospheric mantle. According to the Th/Ta versus Yb diagram, the studied samples plot in the active continental margin field. These results are consistent with a subduction-related tectonic setting for the formation of the host rocks.

Based on field and microscopic studies and investigation of the characteristics of the Kordkandi copper deposit, including mineralogy, structure and texture, alteration, host rock, tectonic setting, and comparison with volcanic-hosted copper deposits worldwide, it can be concluded that this deposit shows the greatest similarity to Manto-type copper deposits.

Conclusions

The Kordkandi deposit is located in the Western Alborz-Azarbaijan zone and Tarom-Hashtjin subzone within andesitic basalt units of the Karaj Formation. The Eocene volcanic rocks host a significant portion of economic Manto-type copper (-silver) deposits in Iran, which formed in a back-arc extensional setting, particularly in the Alborz magmatic belt. Deposits in the Urumieh-Dokhtar and Sabzevar zones also formed in similar Eocene back-arc tectonic settings during subduction of the Neotethys oceanic crust beneath Iran.

Therefore, studying this deposit can provide important key information for exploration of similar deposits in other parts of the Alborz zone and analogous areas in Iran. For exploration and evaluation of these deposits, various geological guides can be used. One of the main requirements is the preparation of detailed geological maps. In areas where no known deposits exist, matching the age of volcano-sedimentary sequences with important global mineralization periods such as Mesoproterozoic, Jurassic-Cretaceous, and Eocene can be a good indicator. In areas where known deposits exist, important indicators include: (1) volcano-sedimentary units that may include mafic lavas and tuffs; (2) mineral indications such as stratiform sulfides and discordant veins; (3) chloritic and zeolitic alterations containing high amounts of copper and silver; (4) presence of fine-grained pyrite in andesitic rocks indicating back-arc basins, especially in the Alborz zone, Urumieh-Dokhtar belt, and Sabzevar zone.

References

- Abbaspour, N., 2017. Petrology and Geochemistry of the Host Rock and Qeshlaq Copper Deposit, East of Zanzan. M.Sc. Thesis in Petrology, University of Zanzan, Zanzan, Iran. 76 pp. (in Persian).
- Afshari, M., Nabatian, Gh., Honarmand, M., Ebrahimi, M., Li, X.-H., 2024. Investigation of shoshonitic pluton and an associated base-metal deposit in the Tarom-Hashtjin metallogenic zone, NW Iran: Implication for

- tectonomagmatic evolution and metallogenic considerations. *Australian Journal of Earth Sciences*, 71 (2), 251-276.
- Aghajani, S., Ghasemi Siani, M., Emami, M. H., Lotfi, M., Gholizadeh, K., 2020. Petrography, Geochemistry, Magmatic Evolution and Tectonomagmatic setting of Igneous Rocks Associated with Nikuyeh Epithermal Mineralization (west of Qazvin). *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 6 (1), 1-20. (in Persian)
- Asgari, E., 2021. Geology and mineralization in the Golahroud Cu deposit, north of Zanjan. M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran. 108 pp. (in Persian)
- Ebrahimi Fard, H., Ghasemi Siani, M., Tabbakh Shabani, A. A., Nazarian, M., Karimi Shahraki, B., 2022. Mineralogy and mineral chemistry of alteration zone in order to determine the tectonic settings and mineralization characteristics in the Choreh-Nab iron deposit (Western Alborz). *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 8 (2), 164-211. (in Persian)
- Esmaeli, M., Lotfi, M., Nezafati, N., 2018. Mineralogy, and genesis of Khalyfehlou copper deposit based on host rock geochemical data and o-s isotope characteristics. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 28 (110), 33-46.
- Hadi, A., 2000. Economic Geology of Copper Deposits in the Mahin Area (Lower Tarom - Northwest Abhar). M.Sc. Thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University.
- Hamidi, S., 2024. Copper Mineralization at Yahyaabad with Emphasis on the Geology, Geochemistry, and Genesis of the Deposit, East of Zanjan. M.Sc. Thesis in Economic Geology, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran. 83 pp. (in Persian)
- Hosseinzadeh, M., Maghfouri, S., Moayyed, M., Farid Azl, V., 2016. Introduction of the Mari Copper Deposit as a Manto-type Stratiform Deposit in the Tarom Zone, Northwest Iran. *Geosciences Quarterly* 38, 17-37.
- Mohammadi, M., Nabatian, Gh., Honarmand, M., Ebrahimi, M., Haj Abolfath, A., 2021. Petrography and mineral chemistry of volcanic host rocks in the Dohneh Cu mineralization, NE Zanjan. *Kharazmi journal of earth sciences* 7(2), 225-249. (in Persian)
- Mohammadi, M., Nabatian, Gh., Honarmand, M., Ebrahimi, M., 2019. Geology and Origin of the Dohneh Copper Mineralization, Northeast of Zanjan. *Journal of economic geology* 11(3), 497-524. (in Persian)
- Movahednia, M., Maghfouri, S., Fazli, N., Rastad, E., Ghaderi, M., González, F.J., 2022. Metallogeny of Manto-type stratabound Cu-(Ag) mineralization in Iran: Relationship with NeoTethyan evolution and implications for future exploration. *Ore Geology Reviews* 149, 105064.
- Nabatian, Gh., 2021. The Manto-Type Copper Mineralization in the Eocene Volcano-Sedimentary Sequences, Western Alborz-Azarbaijan Belt, NW Iran. *Aspects in Mining & Mineral Science* 6(5), 757-759.
- Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Corfu, F., Neubauer, F., Bernroider, M., Prokofiev, V., Honarmand, M., 2014. Geology, alteration, age and origin of iron oxide-apatite deposits in Upper Eocene quartz monzonite, Zanjan district, NW Iran. *Mineralium Deposita* 49, 217-234.

CRediT authorship contribution statement

 Maryam Ahmadi	Conceptualization, Methodology, Software, Writing - Original Draft, Investigation, Writing - Review & Editing, Supervision
 Ghasem Nabatian	Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Supervision
 Amir Morteza Azimzadeh	Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Supervision
 Maryam Honarmand	Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Supervision



دسترسی آزاد

نشریه علوم زمین خوارزمی

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

زمین‌شناسی، ژئوشیمی و کانه‌زایی در کانسار مس کردکندی، شمال غرب زنجان

مریم احمدی^۱، قاسم نباتیان^{۱*}، امیر مرتضی عظیم‌زاده^{۲،۱}، مریم هنرمند^۳

۱. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲. گروه زمین‌شناسی ذخایر معدنی، بخش علوم زمین و مهندسی محیط زیست، دپارتمان مهندسی عمران و منابع معدنی، دانشکده علوم و تکنولوژی، دانشگاه فنی لولئو، لولئو، سوئد.

۳. دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱

واژه‌های کلیدی:

کانه‌زایی مس، نوع مانتو،

پهنه البرز غربی- آذربایجان،

کردکندی، زنجان.



کانسار کردکندی در ۲۶ کیلومتری شمال غرب زنجان و در پهنه البرز غربی- آذربایجان و زیرپهنه طارم به صورت چینه‌کران در میان واحدهای گدازه‌ای آندزیت-بازالت به سن ائوسن (معادل سازند کرج) رخ داده است. کانی‌سازی مس در این کانسار بیشتر به صورت کانی‌های سولفیدی شامل کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت و به مقدار کمتر پیریت و همتایت اسپیکولار با بافت دانه پراکنده، رگه- رگجه‌ای و جان‌شینی مشاهده می‌شود. سنگ‌های آتشفشانی این منطقه در یک محیط کشتی و پشت کمائی و ترکیب کالک‌آلکان تا کالک‌آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی (مقادیر K_2O برابر با ۱/۱۳ تا ۲/۳۱ درصد وزنی و مقادیر Na_2O برابر با ۱/۹۳ تا ۲/۱۵ درصد وزنی) قرار می‌گیرند. براساس شواهد بدست آمده می‌توان گفت که کانسار مس کردکندی در طی مراحل دگرگونی تدفینی در واحدهای آندزیت-بازالت تشکیل شده است. در طی این مرحله، با افزایش عمق تدفین، کانه‌زایی مس به همراه دگرسانی‌هایی از جمله ژئولیتی، کلریتی، اپیدوتی، سیلیسی و کربناتی صورت گرفته است. بر اساس ویژگی‌های سنگ میزبان، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، ژئومتری و دگرسانی، این کانسار شباهت فراوانی با کانسارهای تیپ مانتو در شیلی دارد.

Aghajani et al., (Mehrabi et al., 2016)، کانی‌سازی اپی‌ترمال نیکوبیه (،

2020)، کانه‌زایی طلا- مس چرگر (، Mousavi Motlagh and Ghaderi،

2019)، کانسار مس گلهرود (Asgari، 2021)، کانسار مس ماهین (، Hadi،

2000)، کانسار مس دهنه (، Mohammadi، 2018; Mohammadi et al.،

2019; 2021)، کانسار مس قشلاق (Abbaspour، 2017) و کانسار مس

یحیی آباد (Hamidi، 2024) اشاره کرد.

در ایران کانه‌زایی‌های تیپ مانتو در پهنه‌های مختلف از جمله البرز،

ارومیه- دختر، سنندج- سیرجان و سبزوار شناسایی شده است (، Nabatian،

2021; Movahednia et al.، 2022). کانسار وشنوه به عنوان اولین کانسار

تیپ مانتو (مس فقیر از آهن) در ایران معرفی گردید (Samani، 2001) که

پس از آن، وجود این تیپ از کانه‌زایی در ایران مورد توجه قرار گرفت. بر این

اساس، کانسارهای عباس‌آباد (Samani، 2001) و چشمه‌گز (Mahvashi،

مقدمه

کانسار مس کردکندی در بخش شمال غربی استان زنجان، در پهنه البرز غربی- آذربایجان (Aghanabati، 2004) و در نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ زنجان (Babakhani and Sadeghi، 2004) در زیر پهنه طارم- هشتجین قرار دارد (شکل ۱- a و b). استان زنجان با وجود ذخایر معدنی متعدد، همواره مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از جمله پژوهش‌های صورت گرفته در این منطقه می‌توان به مطالعه کانسار اکسید آهن- آپاتیت منطقه زنجان (Nabatian et al.، 2014; Nabatian، 2012)، کانه‌زایی آهن چوره ناب (Ebrahimi Fard et al.، 2022)، کانه‌زایی مس تیپ مانتو در منطقه طارم- هشتجین (Nabatian، 2021)، کانسار مس خلیفه‌لو (، Esmaeli et al.، 2018)، کانسار سرب و روی چومالو (Afshari et al.، 2024)، کانه‌زایی اپی‌ترمال ارمغانخانه (Kouhestani et al.، 2022)، کانه‌زایی گلوجه

DOI 10.22034/kjes.2026.11698

*نویسنده مسئول: قاسم نباتیان gh.nabatian@znu.ac.ir

استناد به این مقاله: احمدی، م.، نباتیان، ق.، عظیم‌زاده، ا. م.، هنرمند، م. (۱۴۰۵). زمین‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه کانه‌زایی مس در کانسار کردکندی، شمال غرب زنجان. مجله علوم زمین

خوارزمی. جلد ۱۲، شماره ۱، صفحه ۸۲ تا ۱۰۵. <http://doi.org/10.22034/kjes.2026.11698>

زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری

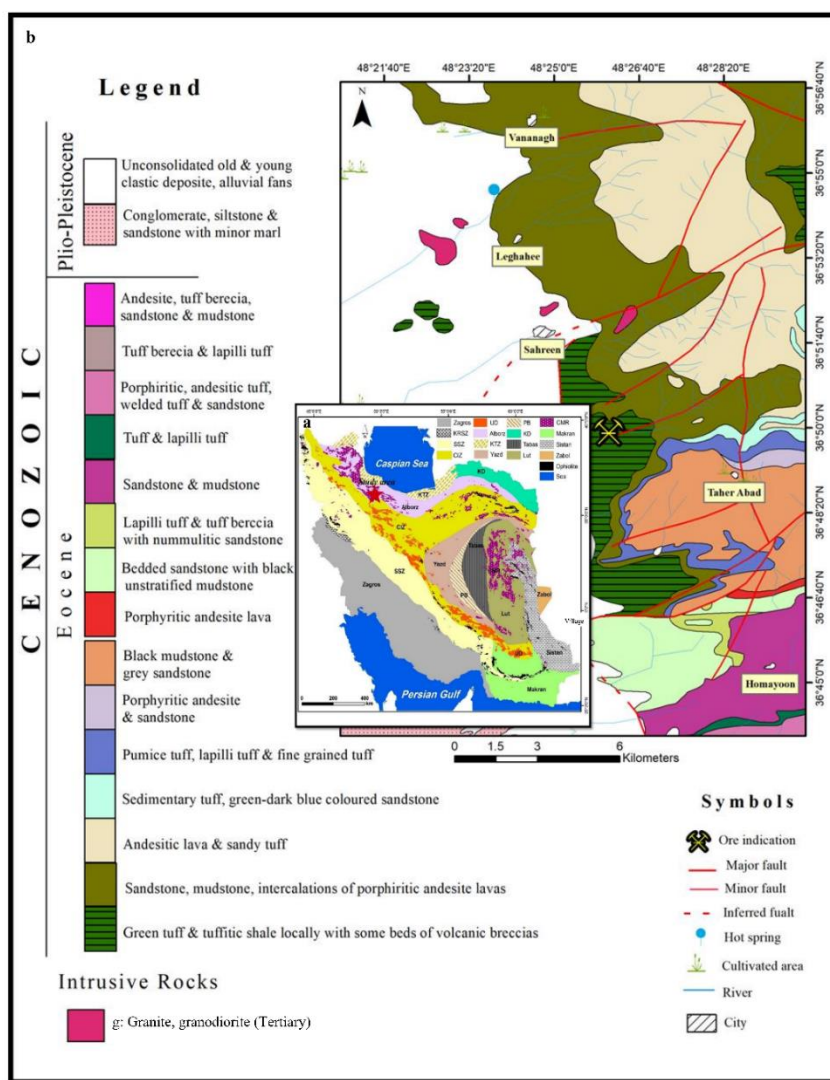
بر اساس نقشه زمین‌شناسی زنجان با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ منطقه (Babakhani and Sadeghi, 2004)، منطقه مورد مطالعه در پهنه البرز غربی- آذربایجان و زیرپهنه طارم- هشتجین و عضو کردکند از سازند کرج قرار دارد (شکل‌های ۱ و ۲)، که نشان‌دهنده فعالیت آتشفشانی در یک حوضه رسوبی کم عمق با فازهای متناوب انفجاری و خروجی روانه‌های آندزیتی، داسیتی و بسیار اندک ریولیتی است. واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه کردکندی، متعلق به سری آتشفشانی- رسوبی به سن ائوسن هستند، که این واحدهای سنگی در زیرپهنه طارم شامل دو بخش اصلی کردکند در پایین و آمند در بالا می‌شوند که بخش آمند به طور عادی روی کردکند قرار گرفته است. واحدهای آذرآواری و آتشفشانی (Ek1) به سن ائوسن (معادل بخش زیرین سازند کرج) مهم‌ترین واحدهای رخنمون یافته در منطقه مورد مطالعه هستند. این واحدها بیشتر شامل ماسه‌سنگ توفی است که همراه آنها گدازه- های آندزیتی- بازالتی نیز دیده می‌شود. واحدهای سنگی رخنمون یافته از واحد Ek1 در منطقه مورد مطالعه شامل واحدهای توفی، گدازه‌های آندزیت- بازالتی و دایک دیوریتی می‌باشند که میزبان اصلی کانه‌زایی در منطقه واحدهای آندزیت- بازالتی است.

(Malekzadeh Shafaroudi, 2016 and Hosseinzadeh et al., 2016) و قشلاق (Abbaspour, 2017) در پهنه البرز غربی- آذربایجان، کشکویه (Aboulipour et al., 2011) و نارباغی شرقی (Fazli et al., 2015) در پهنه ارومیه- دختر و کشک مهکی (Bouyri Kenari et al., 2014) در پهنه سهندج- سیرجان به عنوان کانسارهای تیپ مانتو شناسایی شدند. همچنین کانسار مس ماری (Hosseinzadeh et al., 2016) به عنوان کانسار تیپ مانتو در پهنه طارم معرفی گردیده است.

با وجود انجام عملیات اکتشافی انجام شده در کانسار مس کردکندی، همچنان پرسش‌های اساسی در مورد الگوی کانه‌زایی، ژنز و ویژگی‌های دقیق زمین‌شناسی آن بی‌پاسخ مانده و مطالعات پژوهشی در این خصوص ضروری به نظر می‌رسد. لذا در این پژوهش، زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی، تیپ کانه‌زایی و چگونگی تشکیل کانسار مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی و مطالعه این کانسار می‌توان اطلاعات دقیقی از چگونگی تشکیل، زمین‌شناسی و کانی‌شناسی آن به دست آورد که این اطلاعات می‌توانند راهنمای کلیدی خوبی برای اکتشاف کانسارهای جدید در این زیرپهنه و حتی سایر بخش‌های مشابه در ایران داشته باشد.

روش مطالعه

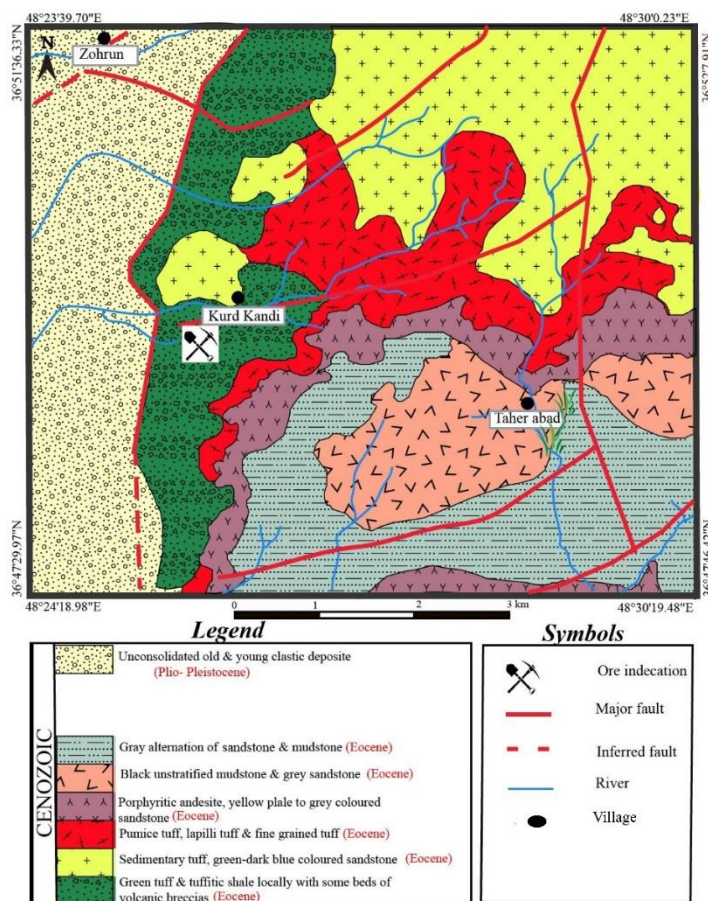
به منظور انجام این پژوهش، پس از مطالعات صحرایی، نمونه برداری از واحدهای سنگی میزبان کانه‌زایی و تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱/۲۰۰۰۰ انجام شد. جهت شناسایی کانی‌ها، ابعاد، درصد کانی‌ها، بافت، رابطه زمانی و ارتباط آنها با کانه‌زایی تعداد ۳۲ مقطع نازک و نازک- صیقلی تهیه و مطالعه گردید. همچنین از ۳۸ نمونه برداشت شده از منطقه مورد مطالعه، تعداد شش نمونه از مناطق کانه‌زایی که دگرسانی کمتری در آنها مشاهده گردید انتخاب و مورد آنالیز قرار گرفت. از بین نمونه‌های انتخاب شده، پنج نمونه از واحدهای آندزیت- بازالت میزبان کانه‌زایی می‌باشند که به روش XRF (تعیین مقادیر اکسیدهای اصلی) و ICP-MS (تعیین میزان عناصر کمیاب و کمیاب خاکی)، در شرکت زراژما زنگان ایرانیان (زنجان) مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت. در این پژوهش، عناصر اصلی به روش فلورسانس اشعه ایکس (XRF) تعیین گردیدند؛ بدین صورت که بعد از خردایش و نرمایش، ۰/۵ گرم از پودر نمونه با ۰/۳ گرم NH_4NO_3 ، ۰/۴ گرم LiF ، ۳/۶ گرم $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ و مقدار جزئی LiBr مخلوط شده و در یک بوتله پلاتینی در دستگاه ذوب با فرکانس بالا، به صورت قرص شیشه‌ای ذوب شدند. برای تجزیه عناصر کمیاب و خاکی کمیاب (REEs)، حدود ۵۰ میلی‌گرم از پودر نمونه با استفاده از چهار اسید (HCl ، HNO_3 ، HClO_4 ، HF) هضم (هیدرولیز) گردید. عناصر کمیاب و خاکی کمیاب به وسیله طیف‌سنجی جرمی با پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) تحلیل شدند.



شکل ۱- (a) نقشه تقسیم بندی پهنه‌های زمین‌شناسی - ساختاری ایران (Aghanabati; 1998, Alavi, 2004) که محدوده مورد بررسی با علامت ستاره قرمز بر روی آن مشخص شده است. (b) بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ زنجان (Babakhani and Sadeghi, 2004) با تغییرات که محدوده کانسار کردکندی بر روی آن نشان داده شده است. علائم اختصاری در شکل ۱- a عبارتند از:

Alborz: Alborz ranges; CIZ: Central Iranian zone; CIM: Central Iranian microcontinent (includes the Yazd, Posht-eBadam (PB), Tabas, and Lut blocks); CMR: Cenozoic magmatic rocks; KD: Kopeh Dag ranges; KRSZ: Kermanshah radiolarites subzone; KTZ: Khazar- Talesh- Ziveh structural zone; Makran: Makran zone; SSZ: Sanandaj- Sirjan magmatic- metamorphic zone; Sistan: East Iran ranges; UD: Urumieh- Dokhtar magmatic arc; Zabol: Zabol area; Zagros: Zagros ranges

Fig. 1. a) Map of the geological-structural zones of Iran (Aghanabati, 1998; Alavi, 2004) on which the study area is marked with a red star symbol. b) A portion of the 1:100,000 geological map of Zanzan (Babakhani and Sadeghi, 2004) with some modifications, showing the location of the Kordkandi deposit. The abbreviations in Figure 1-a are: Alborz: Alborz ranges; CIZ: Central Iranian zone; CIM: Central Iranian microcontinent (includes the Yazd, Posht-eBadam (PB), Tabas, and Lut blocks); CMR: Cenozoic magmatic rocks; KD: Kopeh Dag ranges; KRSZ: Kermanshah radiolarites subzone; KTZ: Khazar- Talesh- Ziveh structural zone; Makran: Makran zone; SSZ: Sanandaj- Sirjan magmatic- metamorphic zone; Sistan: East Iran ranges; UD: Urumieh- Dokhtar magmatic arc; Zabol: Zabol area; Zagros: Zagros ranges



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۰۰۰۰ تهیه شده از منطقه مورد مطالعه (بر گرفته از (Ahmadi, 2019)

Fig. 2. Geological map (1:20,000) of the study area (Ahmadi, 2019)

واحدهای توفی

واحدهای توفی موجود در منطقه از دو بخش توف خاکستری و توف سبز در تناوب با واحدهای گدازه‌ای و به صورت هم‌شیب با آنها قرار گرفته‌اند (شکل ۳- a, b). واحد توف خاکستری در محدوده مورد مطالعه، در پایین‌ترین بخش و به رنگ خاکستری، با بافت پورفیری و بافت ریز بلور همراه با مقادیر کمی قطعات لیتیک قابل مشاهده است که براساس ترکیب سنگ‌شناسی و مطالعات میکروسکوپی می‌توان نام لیتیک کریستال توف را به آن داد. توف سبز نسبت به واحد توف خاکستری از گسترش بیشتری برخوردار بوده و به رنگ خاکستری متمایل به سبز با بافت ریز بلور که دارای قطعات لیتیک است در منطقه رخنمون دارد. به‌طوری‌که فراوانی قطعات لیتیک در این واحد بیشتر از واحد توف خاکستری است و به همین علت به عنوان واحد کریستال لیتیک توف نامیده می‌شود. واحدهای توفی با بافت ریز بلور در قاعده واحدهای سنگی با ضخامتی حدود ۱۵۰ متر قرار دارد و به لحاظ کانه‌زایی حائز اهمیت نمی‌باشند.

واحد گدازه آندزیت-بازالتی

واحد آندزیت-بازالتی در منطقه میزبان کانه‌زایی بوده و به صورت متناوب با واحدهای توفی و با ضخامت نزدیک به ۱۵ متر در محدوده معدنی گسترش دارد. این واحدهای گدازه‌ای با لایه‌بندی مشخص، به رنگ خاکستری روشن دیده می‌شوند (شکل ۳- a, c). این واحدها در نمونه‌های دستی دارای بافت پورفیری (شکل ۳- d) و به میزان کمتر بافت آمیگدالوئیدال بوده که توسط کانی‌های کربناته و کوارتز پر شده است. قابل ذکر است که در بخش غربی منطقه مورد مطالعه و در میان گدازه‌های آندزیت-بازالتی سنگ میزبان که به شدت گسله می‌باشند؛ دایک با ترکیب دیوریتی با پهنای ۱/۵ متر مشاهده می‌گردد که این واحد را قطع کرده است (شکل ۳- c).

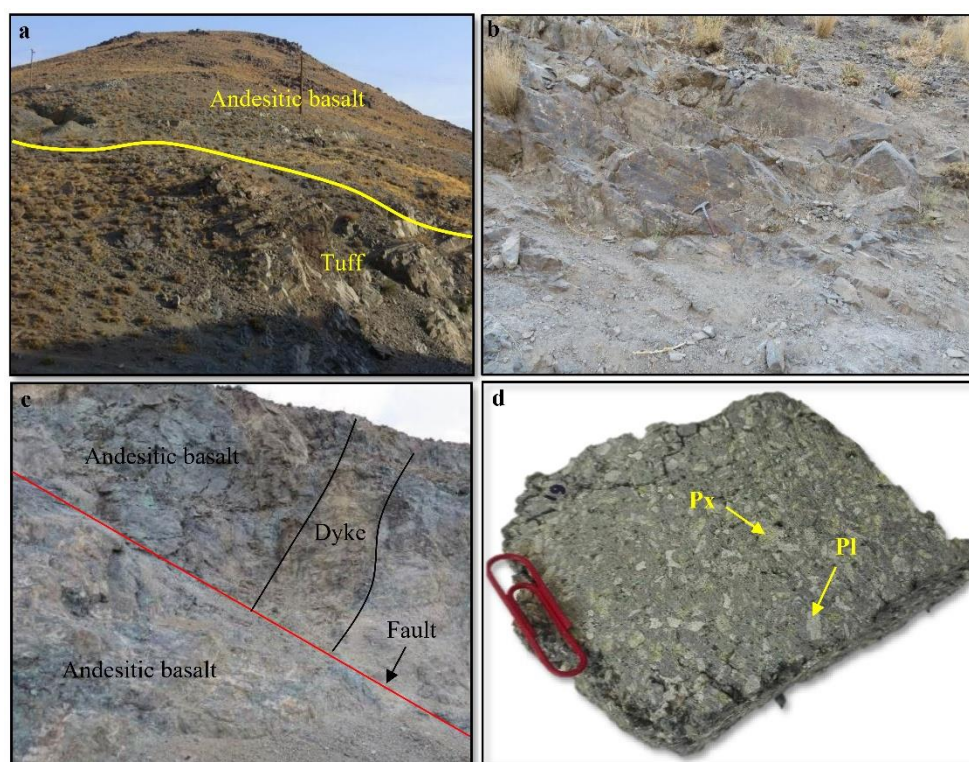
سنگ‌نگاری

براساس مطالعات میکروسکوپی، کانی‌های اصلی تشکیل دهنده واحدهای توفی بیشتر شامل پلاژیوکلاز، پیروکسن و کوارتز هستند که در این میان، پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی بوده که بخش اعظم آن توسط سریسیت و کانی‌های رسی جایگزین شده است (شکل ۴- a, b, c). پیروکسن نیز به مقدار کمتر و بیشتر از نوع کلینوپیروکسن که در بیشتر موارد با اپیدوت و کلسیت جایگزین شده قابل مشاهده است. اپیدوت نیز به صورت رگچه‌ای در آن قابل مشاهده است (شکل ۴- a, b). کلریت نیز یکی از فراوان‌ترین کانی‌های ثانویه در این واحد بوده که جایگزین کانی‌های مافیک شده و در مواردی حفرات پراکنده نامنظم را پر کرده است (شکل ۴- c).

کانی‌های اصلی تشکیل دهنده واحد گدازه آندزیت-بازالتی که در نمونه دستی و تصاویر میکروسکوپی قابل مشاهده است شامل پلاژیوکلاز و پیروکسن می‌باشد که کم و بیش به کانی‌های ثانویه از جمله کلسیت، اپیدوت، کلریت و

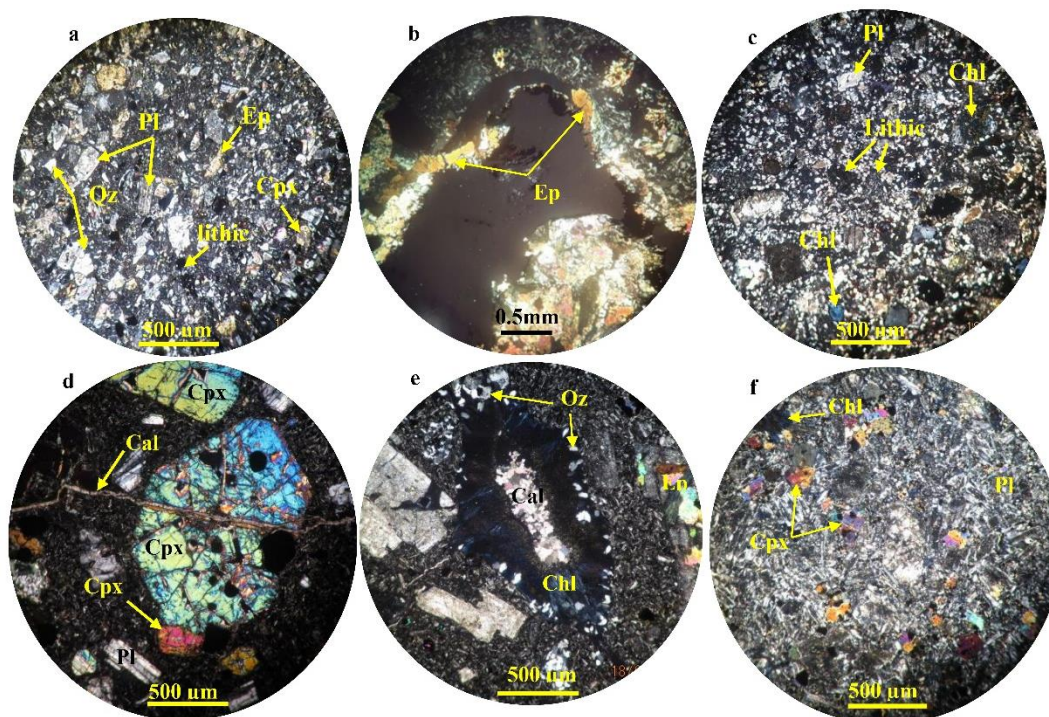
کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند (شکل ۴- d, e). پلاژیوکلازها حجم قابل توجهی از کانی‌های موجود (تقریباً ۵۵ تا ۶۵ درصد) در زمینه سنگ این واحد را تشکیل می‌دهند.

کانی اصلی دایک، پیروکسن و به مقدار کمتر پلاژیوکلاز می‌باشد (شکل ۴- f). بافت پورفیری و آمیگدالوئیدال نیز در نمونه دستی از این دایک قابل مشاهده است که حفرات آمیگدالوئیدال توسط کلسیت و کوارتز پر شده است. قابل ذکر است که این واحد به شدت دگرسان شده و دگرسانی کلریتی-اپیدوتی و کربناتی در نمونه‌های دستی آن قابل مشاهده است. بر اساس مطالعات میکروسکوپی، بافت این واحد دانه ریز بوده و کانی‌های اصلی آن شامل پلاژیوکلاز و پیروکسن و کانی‌های ثانویه شامل اپیدوت، کلسیت، کلریت و سریسیت هستند. بافت اینترگرانولار نیز از بافت‌های فرعی دیده شده در نمونه‌های مورد مطالعه دایک است (شکل ۴- f).



شکل ۳- a) نمایی از واحدهای موجود در منطقه کردکندی. b) نمایی نزدیک از واحد توف سبز (کریستال لیتیک توف). c) نمایی از دایک دیوریتی موجود در منطقه مورد مطالعه که توسط گسل قطع شده است. d) تصویری از نمونه دستی واحد گدازه‌ای آندزیت-بازالت، کانی‌های پلاژیوکلاز (Pl) و پیروکسن (Px) که بیشتر به کانی‌های ثانویه از جمله اپیدوت، کلریت، کانی‌های رسی و سریسیت دگرسان شده‌اند، کانی‌های قابل مشاهده این سنگ به شمار می‌روند. علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانس (Whitney and Evans, 2010) است

Fig. 3. a) A view of the units presents in the Kordkandi area. b) Closed view of the green tuff unit (crystal lithic tuff). c) A view of a dioritic dyke in the study area that is cut by a fault. d) Image of a hand sample from the andesitic basalt lava unit. Plagioclase (Pl) and pyroxene (Px), which are mostly altered to epidote, chlorite, clay minerals and sericite, are the observable minerals in this rock. Mineral abbreviations are taken from Whitney and Evans (2010)



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی از واحدهای موجود در منطقه کردکندی. (a) واحد لیتیک کریستال توف که کانی‌های پلاژیوکلاز (Pl)، کلینوپروکسن (Cpx)، کوارتز (Qz)، قطعات سنگی (Lithic) و اپیدوت (Ep) که جانشین کانی مافیک اولیه شده است. (b) اپیدوت (Ep) که به صورت رگچه‌های سنگ میزبان را در واحد لیتیک کریستال توف قطع کرده است. (c) واحد کریستال لیتیک توف کانی‌های پلاژیوکلاز (Pl) و قطعات لیتیک (Lithic) به همراه کانی ثانویه کلریت (Chl) قابل مشاهده است. (d) واحد گدازه آندزیت-بازالتی که فنوکریست درشت کلینوپروکسن (Cpx) حاوی ادخال‌هایی از کانی‌های اپک به همراه رگچه کلسیتی (Cal) که سنگ را قطع کرده است. (e) واحد گدازه آندزیت-بازالتی که بافت آمیگدالوئیدال که توسط کوارتز (Qz)، کلریت (Chl) و کلسیت (Cal) (به ترتیب از بیرون به درون حفره) پر شده است. (f) دایک میکرودیوریتی موجود در منطقه همراه با بلورهای پلاژیوکلاز (Pl) و کلینوپروکسن (Cpx). علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و وانس (Whitney and Evans, 2010) است.

Fig. 4. Photomicrographs of the units present in the Kordkandi area. a) Crystal lithic tuff unit with plagioclase (Pl), clinopyroxene (Cpx), quartz (Qz), lithic fragments, and epidote (Ep) replacing the primary mafic mineral. b) Epidote (Ep) forming veinlets cross-cutting the host rock in the crystal lithic tuff unit. c) Crystal lithic tuff unit showing plagioclase (Pl) and lithic fragments (Lithic) along with the secondary mineral chlorite (Chl). d) Andesitic basalt lava unit containing a large clinopyroxene (Cpx) phenocryst with inclusions of opaque minerals, cut by a calcite (Cal) veinlet. e) Andesitic basalt lava unit exhibiting an amygdaloidal texture, with vesicles filled by quartz (Qz), chlorite (Chl), and calcite (Cal) (from the outer to inner part of the cavity, respectively). f) Microdiorite dyke present in the area, containing plagioclase (Pl) and clinopyroxene (Cpx) crystals. Mineral abbreviations are taken from Whitney and Evans (2010).

۶). کانی‌های ثانویه نیز شامل ملاکیت، آزوریت، کالکوسیت، کریزوکولا، کوولیت و گوتیت هستند که در اثر فرآیندهای هوازدگی و سوپرژن تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۵ و ۶). همچنین پیریت به صورت دانه پراکنده و به صورت ادخال در کانی کالکوپیریت مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده شرایط احیایی در زمان ته‌نشست است که در تمرکز مس در این کانسار موثر بوده است. از مهم‌ترین بافت‌های تشکیل شده کانی‌ها می‌توان به بافت رگه-رگچه‌ای، دانه پراکنده، پرکننده فضای خالی، برشی، بازماندی و جانشینی اشاره کرد.

کالکوپیریت به عنوان اصلی‌ترین کانی تشکیل‌دهنده مس در محدوده معدنی کردکندی است. کالکوپیریت بیشتر به صورت دانه پراکنده و رگه-رگچه‌ای در این کانسار دیده می‌شود (شکل ۶-ا). این کانی در طی مراحل

کانه‌زایی و دگرسانی

کانه‌زایی

کانه‌زایی مس در این منطقه، در واحدهای گدازه‌ای (آندزیت-بازالت) به صورت چین‌کران و در یک افق کانه‌زایی به ضخامت حدود ۲۰ تا ۵۰ متر و طول ۲۵۰ متر به صورت رگه-رگچه‌ای و دانه پراکنده رخ داده است (شکل ۵-ا، ب، ج). قابل ذکر است که یکسری رگه-رگچه‌های هماتیت اسپیکولار (موسوم به الیژست) نیز کانه‌زایی مس و سنگ میزبان را در مرحله بعدی قطع کرده است (شکل ۵-د). از جمله کانی‌های اصلی یا هیپوژن این کانسار می‌توان به پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت و هماتیت اسپیکولار اشاره کرد (شکل

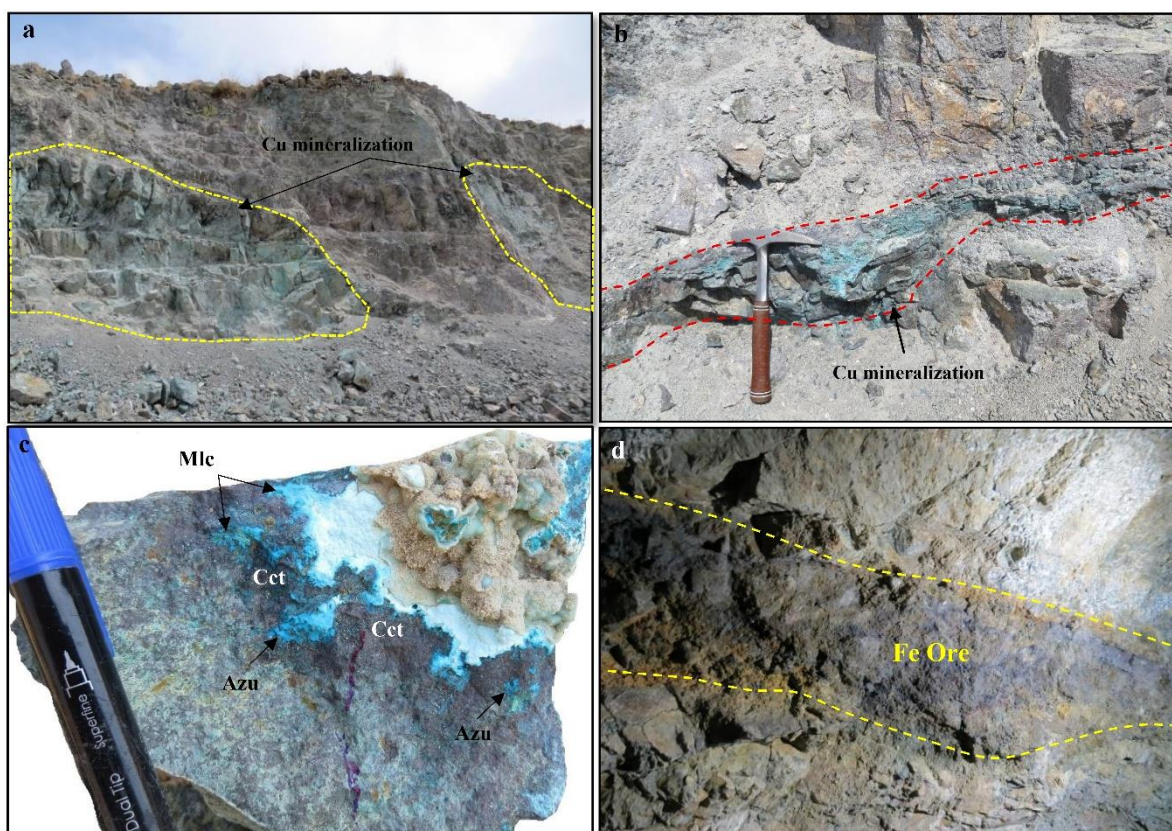
سوپرژن و هوازدگی تشکیل شده و جانشین کانی‌های اولیه از جمله کالکوپیریت و بورنیت شده است (شکل ۶-۲).

بورنیت به عنوان یکی دیگر از کانی اولیه تشکیل دهنده مس در منطقه کردکندی است که به صورت رگچه‌ای و دانه پراکنده در این کانسار مشاهده می‌شود (شکل ۶-۲). بورنیت بیشتر به صورت هم‌رشدی با سایر کانی‌های تشکیل دهنده مس مانند کالکوپیریت و کالکوسیت در مرحله اول کانه‌زایی تشکیل شده است و در مرحله سوپرژن به کانی‌های ثانویه از جمله کوولیت، مالاکیت و گوتیت تبدیل شده است (شکل ۶-۲).

هماتیت اسپیکولار یکی دیگر از کانی‌های موجود در کانسار مس کردکندی

بعدی کانه‌زایی، توسط هماتیت اسپیکولار قطع شده است (شکل ۶-۲). کالکوپیریت در مرحله سوپرژن و هوازدگی توسط کانی‌های ثانویه همچون کوولیت، کالکوسیت و گوتیت جایگزین شده و در نتیجه آن بافت بازماندی و جزیره‌ای در آن تشکیل شده است (شکل‌های ۵-۲، ۵-۳، ۶-۲ و ۶-۳).

کالکوسیت به دو صورت اولیه و ثانویه در منطقه کردکندی تشکیل شده است. کالکوسیت اولیه به عنوان یکی از کانی‌های اصلی تشکیل دهنده مس با بافت رگچه‌ای و دانه پراکنده به همراه کانی کالکوپیریت و بورنیت تشکیل شده است (شکل ۶-۲). قابل ذکر است که این کانی در مرحله سوپرژن به کانی‌های ثانویه از جمله مالاکیت، آزوریت و به مقدار کمتر کوولیت تبدیل شده است

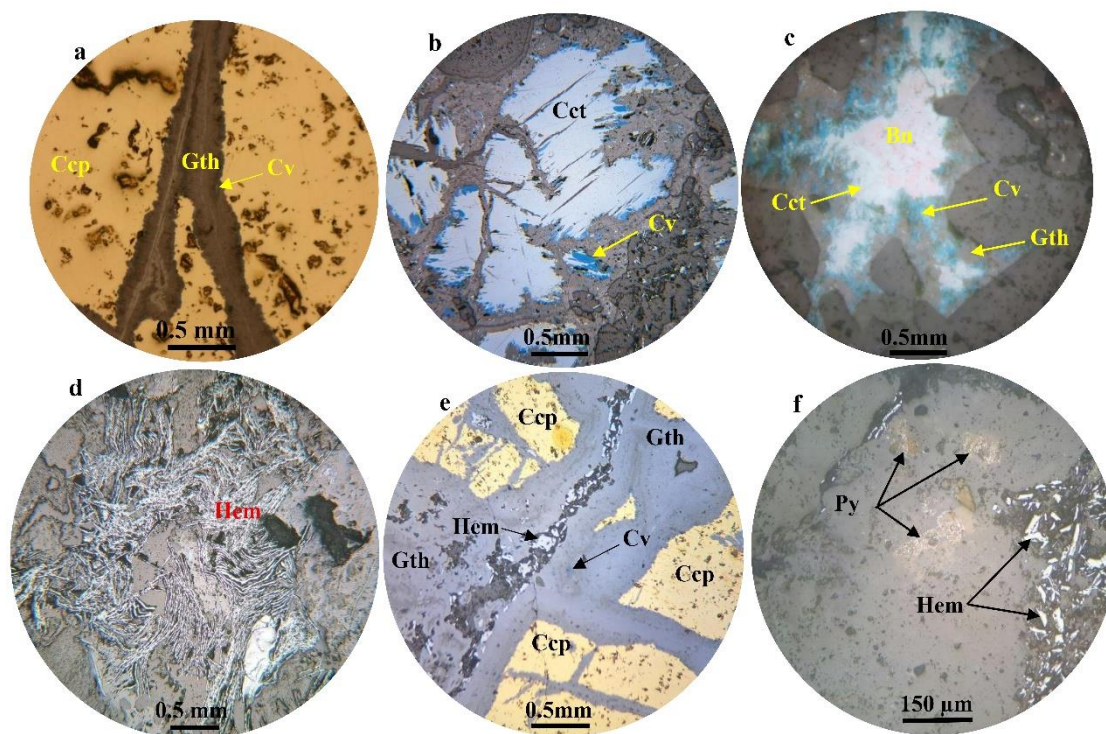


است. این کانی به صورت سوزنی شکل و با بافت رگه-گچه‌ای در این کانسار قابل مشاهده است. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، این کانی پس از کانه‌زایی مس تشکیل شده است (شکل‌های ۵-۲ و ۵-۳، ۶-۲ و ۶-۳).

(شکل ۶-۲). در برخی بخش‌ها جایگزینی به حدی بوده که بافت بازماندی را تشکیل داده است. کالکوسیت ثانویه نیز در این کانسار، در طی فرایندهای

شکل ۵- تصاویر کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه. (a) دورنمای صحرایی از آغستگی سطحی سنگ میزبان آندزیتی-بازالتی به مالاکیت (دید به سمت شرق). (b) کانه‌زایی مس به صورت رگه‌ای که سنگ میزبان آندزیتی-بازالت را قطع کرده است. (c) کانی کالکوسیت (Cct) در واحد آندزیتی-بازالتی که در اثر فرایندهای سطحی و سوپرژن به مالاکیت (Mlc) و آزوریت (Azu) در حال تبدیل است. (d) کانه‌زایی آهن (Fe Ore) به صورت رگه‌ای که در داخل واحد آندزیتی-بازالتی تشکیل شده است

Fig. 5. Views of mineralization in the study area. a) Surface impregnation of malachite in the andesitic-basalt host rock (view eastward). b) Vein-type copper mineralization cutting through the andesitic-basalt host rock. c) Chalcopyrite (Ccp) in the andesitic-basalt unit, replaced by malachite (Mlc) and azurite (Azu) due to supergene surface processes. d) Iron ore (Fe Ore) mineralization occurring as veins within the andesitic-basalt unit



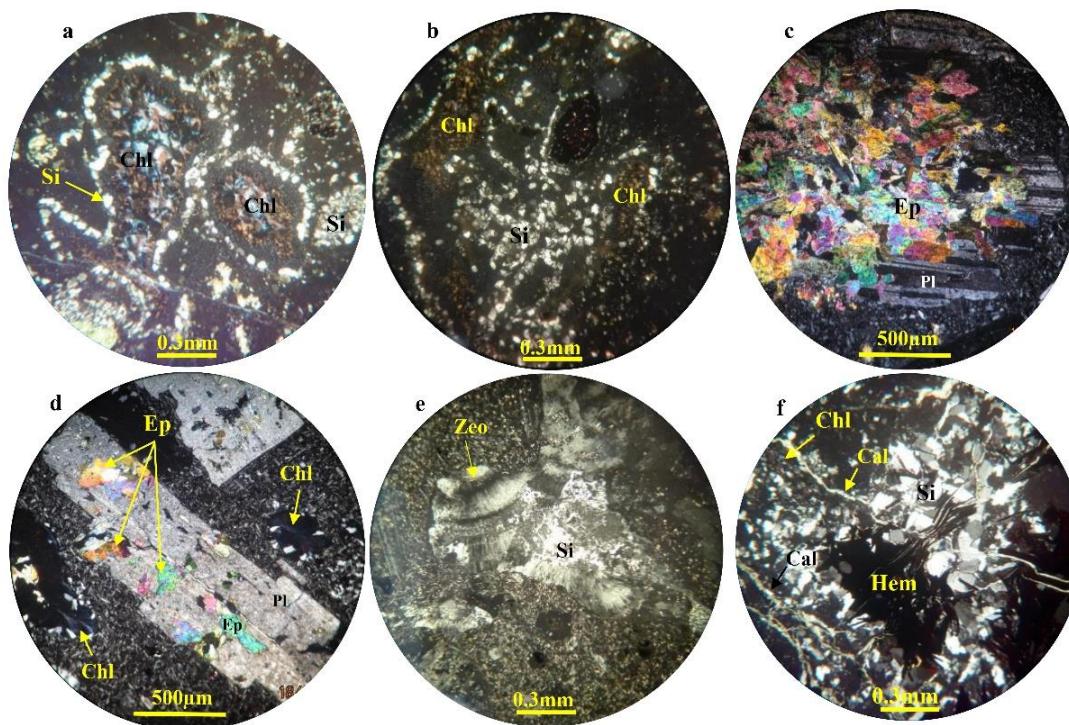
شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های اولیه موجود در کانسار کردکندی. (a) کانی کالکوپیریت (Cpy) با بافت توده‌ای که در اثر فرایندهای هوازدگی و سوپرژن به گوتیت (Gth) و کوولیت (Cv) در حال تجزیه است. (b) کانی کالکوسیت اولیه (Cct) که در طی فرایندهای هوازدگی و سوپرژن به کوولیت (Cv) تبدیل شده است. (c) کانی بورتیت (Bn) که در طی فرایندهای هوازدگی و سوپرژن به کالکوسیت (Cct)، کوولیت (Cv) و گوتیت (Gth) تبدیل شده است. (d) کانی هماتیت اسپیکولار (Hem) با بافت سوزنی و به صورت رگچه‌ای در این کانسار تشکیل شده است. (e) کانی هماتیت اسپیکولار (Hem) که به صورت رگچه‌ای کالکوپیریت (Cpy) را قطع کرده است. (f) کانی پیریت (Py) که به صورت پراکنده در زمینه سنگ میزبان تشکیل شده و توسط هماتیت اسپیکولار (Hem) نیز قطع شده است. علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانس (Whitney and Evans, 2010) است.

Fig. 6. Photomicrographs of the primary minerals present in the Kordkandi deposit. a) Chalcopyrite (Cpy) with a massive texture, replaced by goethite (Gth) and covellite (Cv) due to weathering and supergene processes. b) Primary chalcocite (Cct) replaced by covellite (Cv) during weathering and supergene processes. c) Bornite (Bn) altered to chalcocite (Cct), covellite (Cv), and goethite (Gth) through weathering and supergene processes. d) Specular hematite (Hem) with an acicular texture, formed as veinlets in this deposit. e) Specular hematite (Hem) veinlets cross-cutting chalcopyrite (Cpy). f) Disseminated pyrite (Py) in the host rock matrix, also cross-cut by specular hematite (Hem). Mineral abbreviations are taken from Whitney and Evans (2010)

مرتبط با فرایندهای سوپرژن می‌باشند. دگرسانی‌های کلریتی و اپیدوتی با گسترش زیاد و بیشتر در واحدهای آندزیتی- بازالتی، به صورت رگچه‌ای، پرکننده حفرات (آمیگدالوئیدال) و جانیشینی اطراف ماده معدنی مشاهده می‌شوند (شکل ۷- a, b, c, d). همراه با این دگرسانی‌ها، دگرسانی‌های سیلیسی و ژئولیتی نیز تشکیل شده است (شکل ۷- a, b, e, f). دگرسانی کربناته به صورت رگچه‌ای، جانیشینی و پرکننده حفرات (آمیگدالوئیدال) در طی آخرین فاز کانه‌زایی در این کانسار تشکیل شده و تمامی فازهای کانه‌زایی قبلی و دگرسانی‌ها را قطع کرده است (شکل ۷- f). قابل ذکر است که دگرسانی‌های ذکر شده بیشتر به صورت رگه- رگچه‌ای و پرکننده حفرات (آمیگدالوئیدال) رخ داده است.

دگرسانی

با توجه به گسترش کم دگرسانی، در کانسارهای تیپ مانتو، معمولاً دگرسانی در نظر گرفته نمی‌شود اما به طور کلی، دگرسانی‌های سیلیسی و کربناتی از معمول‌ترین دگرسانی‌ها در کانسارهای تیپ مانتو هستند (Cabral and Beaudoin, 2007). همچنین در این کانسارها، دگرسانی ژئولیتی در طی دیانژز تدفینی و همزمان با کانه‌زایی اصلی در منطقه اتفاق می‌افتد (Wilson and Zentilli, 2003). دگرسانی‌های موجود در این کانسار شامل کلریتی، اپیدوتی، سیلیسی، کربناته و ژئولیتی است (شکل ۷). به علاوه دگرسانی‌های سریسیتی و آرژیلیکی نیز به مقدار کمتر در این کانسار مشاهده می‌شود که



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی از دگرسانی‌های تشکیل شده در کانسار مس کردکندی. (a و b) تشکیل دگرسانی‌های کلریتی (Chl) و سیلیسی (Si) همراه با هم. (c و d). تشکیل دگرسانی اپیدوتی (Ep) و جانیشینی پلاژیوکلاز توسط کانی اپیدوت (Ep). همانطور که مشاهده می‌شود پلاژیوکلاز (Pl) تقریباً به طور کامل توسط اپیدوت (Ep) جانشین شده است. (e) تصویر میکروسکوپی از دگرسانی ژئولیتی (Zeo) که با بافت آمیگدالوئیدال همراه با دگرسانی سیلیسی (Si) تشکیل شده است. (f) دگرسانی کربنات‌ها (Cb) که به صورت رگه- رگچه کلسیتی (Cal) سنگ میزبان کانه‌زایی، هماتیت اسپیکولار (Hem)، دگرسانی سیلیسی (Si) و کلریتی (Chl) را قطع کرده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانس (Whitney and Evans, 2010) است

Fig. 7. Photomicrographs of alteration assemblages formed in the Kordkandi copper deposit. a and b) Chloritic (Chl) and siliceous (Si) alteration formed contemporaneously. c and d) Formation of epidotic (Ep) alteration and the replacement of plagioclase by epidote (Ep). As observed, plagioclase (Pl) has been almost completely replaced by epidote (Ep). e) Photomicrograph of zeolitic (Zeo) alteration exhibiting an amygdaloidal texture, associated with siliceous (Si) alteration. f) Carbonate (Cb) alteration forming calcite (Cal) veinlets that cross-cut the mineralized host rock, specular hematite (Hem), and the siliceous (Si) and chloritic (Chl) alteration zones. Mineral abbreviations are taken from Whitney and Evans (2010)

سیالات به داخل شکستگی‌ها و فضاهای خالی در سنگ، باعث ته‌نشینی کانی‌های مس می‌شوند.

در این فرایند، کانی‌های مس مثل کالکوسیت، کالکوپیریت و بورنیت به همراه پیریت و در اثر دگرسانی‌های مختلفی مانند سیلیسی، ژئولیتی و کلریتی- اپیدوتی به وجود می‌آیند. به عبارتی، در طی این مرحله، ابتدا کانی‌سازی مس تشکیل شده و پس از آن، کانه‌زایی آهن (هماتیت اسپیکولار) به صورت رگه- رگچه‌ای تشکیل شده است. شواهد حاکی از آن است که کانه‌زایی هماتیت اسپیکولار، بعد از کانه‌زایی مس بوده و کانی‌زایی مس را قطع کرده است. در مراحل پایانی کانه‌زایی، رگه‌ها و رگچه‌هایی از کربنات نیز در این کانسار تشکیل می‌شوند که مجموعه کانه‌زایی اولیه و سنگ میزبان را قطع کرده‌اند. همچنین،

براساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی از منطقه معدنی مس کردکندی توالی پاراژنتیک کانی‌ها در این کانسار شامل دو مرحله به صورت زیر قابل تفکیک است (شکل ۸):

مرحله اول (دگرگونی تدفینی و کانه‌زایی): در مرحله اول، فعالیت‌های آتشفشانی و رسوب‌گذاری واحدهای آذرین، آذرآواری و رسوبی آغاز می‌شود. با افزایش عمق تدفین این واحدها، دما و فشار بر روی سنگ‌ها بیشتر می‌شود و این وضعیت باعث شروع مرحله دگرگونی تدفینی می‌گردد. در این شرایط، سیالات دگرگونی که حاوی عناصر معدنی ارزشمند هستند، در محیط شکل می‌گیرند. این سیالات با حرکت درون بخش‌های مختلف سنگ میزبان، فلز مس را از کانی‌های مافیک مانند پیروکسن جدا کرده و به تدریج با تزریق این

جانشینی به حدی بوده که فقط آثاری از کانی‌های اولیه به صورت بازماندی یا جزیره‌ای باقی مانده است. قابل ذکر است که دگرسانی‌های تشکیل شده در این مرحله شامل دگرسانی‌های آرژیلیکی و سربستی است که ارتباطی با کانه‌زایی ندارد.

کانی‌های حاصل از دگرسانی به صورت رگه‌ای، برشی، جانشینی و پرکننده فضای خالی (آمیگدالوئیدال) شکل می‌گیرند.

مرحله دوم (سوپرژن و هوازدگی): در این مرحله، کانی‌های ثانویه از جمله مالاکیت، کوولیت، آزوریت، گوتیت و کالکوسیت ثانویه به صورت جانشینی و رگه-رگه‌ای در این کانسار تشکیل شده‌اند. در برخی از بخش‌ها، شدت این

Minerals		Burial metamorphism	Supergene and weathering
Stages			
Ore minerals	Pyrite		
	Chalcopyrite		
	Chalcocite I		
	Bornite		
	Specular hematite		
	Chalcocite II		
	Covellite		
	Goethite		
	Malachite		
	Azurite		
Alteration	Quartz		
	Chlorite-Epidote		
	Zeolite		
	Carbonate		
Textures	Vein-veinlet		
	Brecciate		
	Replacement		
	Residual		

شکل ۸) توالی پاراژنتیکی، ساخت و بافت کانی‌های معدنی و باطله در کانسار مس کردکندی

Fig. 8. Paragenetic sequence, structure, and texture of ore and gangue minerals in the Kordkandi copper deposit

آندزیت-بازالت قرار می‌گیرند (شکل ۹-ا). به دلیل گسترش بالای دگرسانی در منطقه سعی شد تا از بخش‌های کمتر دگرسان شده منطقه نمونه‌ها برداشت شوند، اما با توجه به این نکته که تحرک عناصر آلوکالین در بخش‌های هوازده و دگرسان شده بیشتر است؛ جهت تعیین ماهیت سنگ‌های مورد نظر، از نمودارهای مبتنی بر عناصر کمیاب (Ti, Zr, Nb, Y) که دارای تحرک کمتری هستند و جزء عناصر با قدرت میدانی بالا می‌باشند (Rollinson, 1993)، نیز استفاده شد. بر اساس نمودار Zr/Ti در مقابل Nb/Y (Pearce and Wyman, 1996) سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانه‌زایی مس در کانسار کردکندی، در محدوده سنگ‌های بازالتی قرار دارند (شکل ۹-ب).

بررسی‌های ژئوشیمیایی سنگ میزبان کانه‌زایی:

در این بخش از پژوهش، نتایج مطالعات ژئوشیمیایی که بر روی واحد آندزیت-بازالت انجام شده، ارائه خواهد شد. نتایج ژئوشیمیایی نمونه‌های آنالیز شده در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

نامگذاری سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه

بر اساس نمودار طبقه‌بندی ژئوشیمیایی سنگ‌های آتشفشانی (Middlemost, 1994)، سنگ‌های دربرگیرنده کانسار کردکندی در محدوده

جدول ۱- نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه به روش XRF (کلیه مقادیر به درصد وزنی می‌باشند و حد تشخیص برای تمامی اکسیدها ۰/۰۵ درصد است)

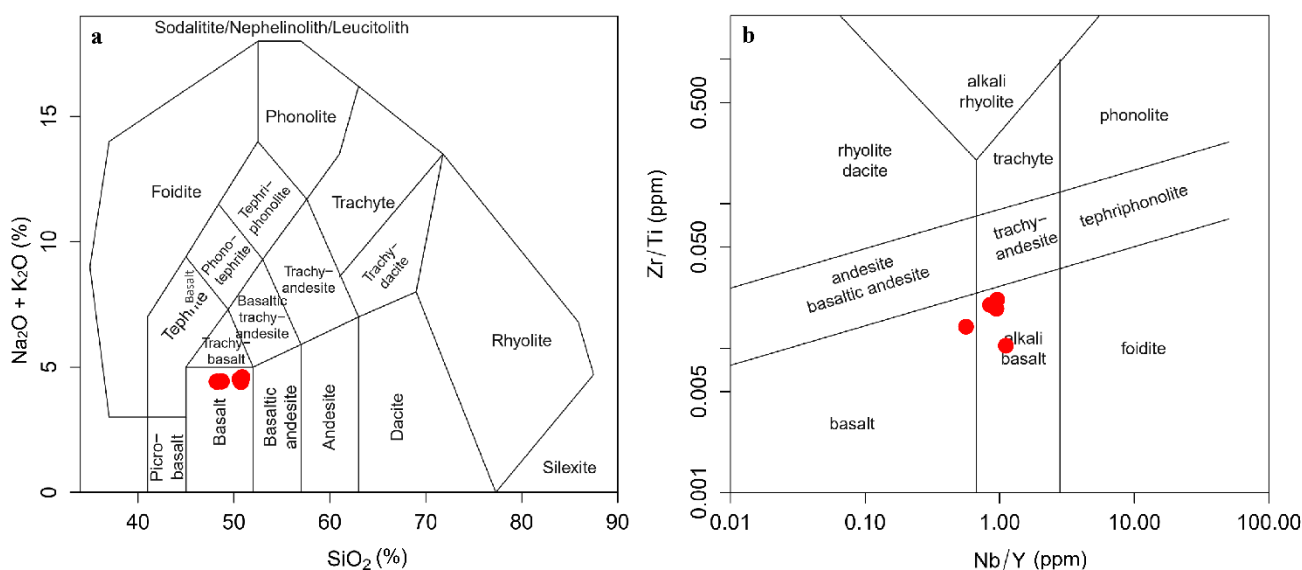
Table 1. Results of rock sample analysis from the study area by XRF method (values are in weight percent. The detection limit for all oxides is 0.05 percent)

Element	KD-02	KD-16	KD-22	KD-30	KD-31
Rock type	Andesite-basalt				
SiO ₂	46.81	49.02	48.39	45.28	47.96
TiO ₂	0.94	1.05	1.06	1.07	1.01
Al ₂ O ₃	16.73	18.53	18.76	17.88	18.67
Fe ₂ O ₃	9.99	9.44	9.57	10.66	9.08
MnO	0.46	0.22	0.17	0.23	0.21
MgO	8.19	5.89	5.86	6.77	5.94
CaO	9.35	8.65	8.19	8.64	8.24
BaO	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
Na ₂ O	1.99	2.12	2.15	1.93	2.00
K ₂ O	2.27	2.31	2.17	2.22	2.17
P ₂ O ₅	0.30	0.19	0.33	0.28	0.24
SO ₃	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.10
LOI	2.90	2.45	3.30	4.99	4.27

جدول ۲- نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌های سنگی آندزیت- بازالت در منطقه مورد مطالعه به روش ICP-MS (مقادیر به ppm می‌باشند)
Table 2. Results of andesite-basalt rock sample analysis from the study area by ICP-MS method (values are in ppm)

Element	Detection limit	ID/ Rock samples				
		KD-2	KD-16	KD-22	KD-30	KD-31
Li	1	14	10	9	16	13
Rb	1	78	79	51	72	78
Cs	0.5	1.8	1.7	1.1	3.7	1.5
Be	0.2	1.2	1.5	1.4	1.3	1.3
Sr	1	450	596	468	480	537
Ba	1	570	556	495	519	499
Sc	0.5	30	26.4	23.4	27.9	23.8
V	1	197	191	184	222	177
Cr	1	177	67	57	47	54
Co	1	30.3	26.3	25.7	34	25
Ni	1	45	24	23	22	22
Cu	1	97	213	83	118	185
Zn	1	104	88	79	101	81
As	0.1	7.4	1	<0.1	<0.1	<0.1
Se	0.5	0.88	1.05	1.17	0.92	1.16
Cd	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.3
In	0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Sb	0.5	2.4	0.9	0.6	0.8	0.6
Te	0.1	0.26	<0.1	0.2	0.17	<0.1
Y	0.5	16.4	18.5	17.8	17.6	18
Nb	1	18.1	17.4	15.2	10.2	16.9
Ta	0.1	0.47	0.57	0.57	0.37	0.66
Zr	5	46	97	96	67	99
Hf	0.5	2.1	3.31	3.34	2.56	3.32
W	1	1.2	1.2	1.1	<1	1.2
Mo	0.1	<0.1	0.3	1.1	<0.1	0.4
Sn	0.1	1.3	1.8	1.5	1.2	1.9
Tl	0.1	0.24	0.2	0.11	0.23	0.26
Pb	1	15	13	10	11	11
Bi	0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
U	0.1	0.7	1.9	1.8	0.8	1.9

Th	0.1	3.56	6.71	6.68	3.26	6.85
La	1	15	20	19	15	20
Ce	0.5	30	40	40	33	40
Pr	0.05	4.24	5.56	5.2	4.4	5.36
Nd	0.5	19.5	23.8	22.3	20.2	23
Sm	0.02	4.26	4.93	4.5	4.33	4.67
Eu	0.1	1.4	1.55	1.39	1.4	1.48
Gd	0.05	4.28	4.77	4.41	4.3	4.64
Tb	0.1	0.67	0.76	0.69	0.69	0.72
Dy	0.02	4.07	4.51	4.18	4.18	4.4
Er	0.05	2.31	2.63	2.44	2.37	2.54
Tm	0.1	0.33	0.38	0.35	0.34	0.36
Yb	0.05	2	2.3	2.2	2.3	2.2
Lu	0.1	0.29	0.34	0.34	0.34	0.34
Sm/Yb	-	2.13	2.14	2.04	1.89	2.12



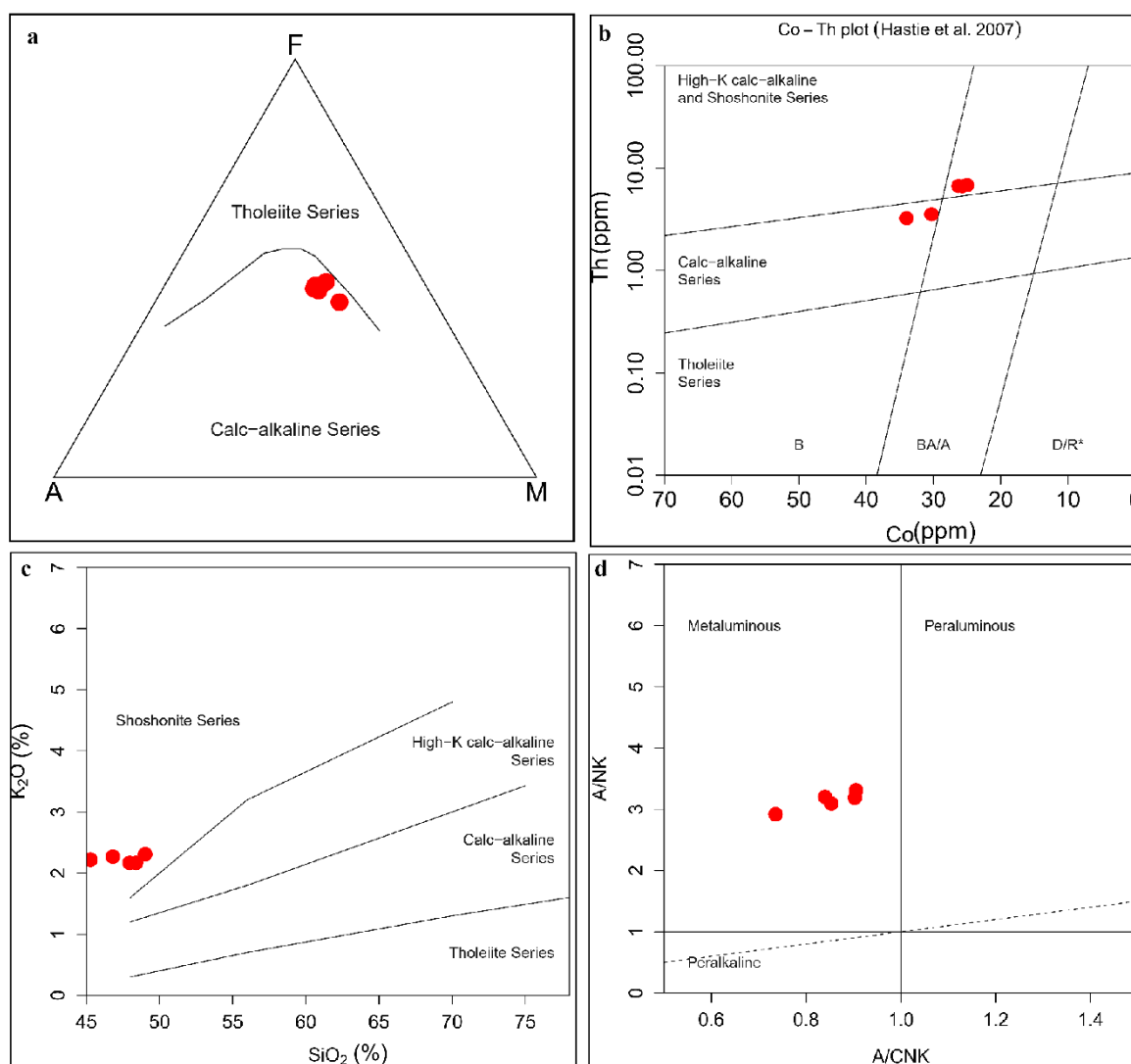
شکل ۹- موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در (a) نمودار $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ در مقابل SiO_2 (Middlemost, 1994)، (b) نمودار Zr/Ti در مقابل Nb/Y (Pearce and Wyman, 1996)

Fig. 9. Location of the studied samples in a) $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ vs. SiO_2 diagram (Middlemost, 1994), b) Zr/Ti vs. Nb/Y diagram (Pearce and Wyman, 1996)

(شکل ۱۰-ب). همانطور که در این شکل (شکل ۱۰-ب) مشاهده می‌شود، نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده آندزیت-بازالت قرار می‌گیرند. در نمودار K_2O در مقابل SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976) نیز، سنگ‌های مورد مطالعه در قلمرو سری ماگمایی شوشونیتی قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-ج). در نمودار $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ (Shand, 1927) نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده متآلومین قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-د).

تعیین سری ماگمایی

بر اساس نمودار AFM (Irvine and Baragar, 1971) نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده کالک‌آلکان قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-ا). طبق نمودار Th در مقابل Co (Hastie et al., 2007) که ماهیت تولییتی از نوع کالک‌آلکان و شوشونیتی را از یکدیگر تفکیک می‌کند، نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده کالک‌آلکان تا کالک‌آلکان پتاسیم بالا و شوشونیتی قرار می‌گیرند



شکل ۱۰- تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی در کانسار کردکندی. (a) نمودار AFM (Irvine and Baragar, 1971)، (b) نمودار Th به Co (Hastie et al., 2007)، (c) نمودار K₂O به SiO₂ (Peccerillo and Taylor, 1976)، (d) نمودار A/NK به A/CNK (Shand 1927). علائم شبیه شکل ۹ است

Fig. 10. Determination of the magmatic series of volcanic rocks in the Kordkandi deposit. a) AFM diagram (Irvine and Baragar, 1971), b) Th vs. Co diagram (Hastie et al., 2007), c) K₂O vs. SiO₂ diagram (Peccerillo and Taylor, 1976), d) A/NK vs. A/CNK diagram (Shand, 1927). Symbols are similar to those in Figure 9

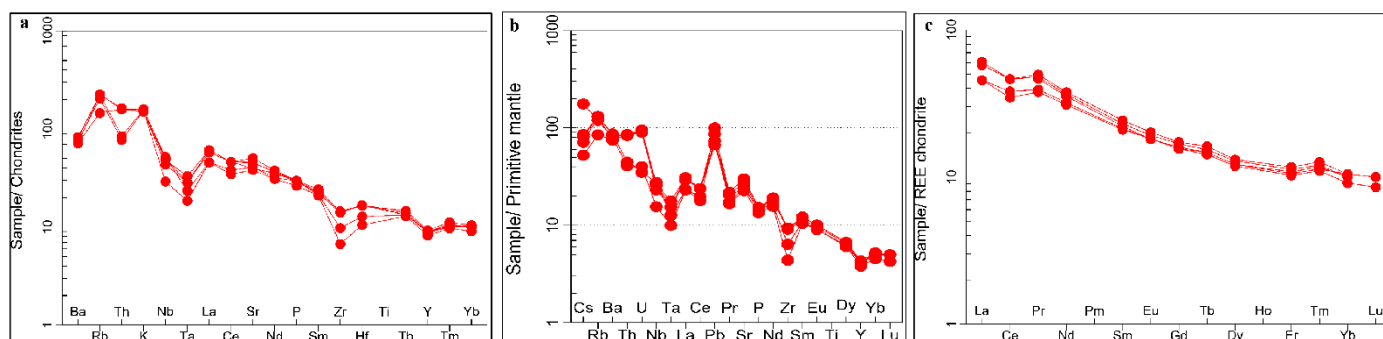
مطالعه است. علاوه بر این، همانطور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، کلیه سنگ‌های ماگمایی منطقه کردکندی الگوی نسبتاً یکسانی از عناصر کمیاب و نادر خاکی نشان می‌دهند که حاکی از تشابه منشأ و تحولات ماگمایی در واحدهای آذرین این منطقه است. آنومالی مثبت از عناصر Rb، Ba، U و تا حدی Th نشان دهنده غنی‌شدگی منبع ماگماهای مورد بحث از این عناصر است. آنومالی شاخص Pb نیز حاکی از آلودگی ماگماهای مورد نظر با پوسته قاره‌ای و همچنین غنی‌شدگی ناحیه منشأ است (شکل ۱۱-b). با توجه به اینکه نمونه‌های مورد مطالعه تهی‌شدگی شدیدی از HFSE و HREE نشان نمی‌دهند، بنابراین حضور گارنت در پسمانده حاصل از ذوب بخشی غیر محتمل

به منظور شناخت ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه، از نمودارهای بهنجار شده نسبت به کندریت و گوشته اولیه (Thompson, 1982; McDonough and Sun, 1995) استفاده شده است (شکل ۱۱-a، b). همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، شیب منفی در این نمودارها نشان‌دهنده غنی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سبک (Light rare-earth elements: LREE) و عناصر با شعاع یونی بزرگ (Large ion lithophile element: LILE) و تهی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سنگین (Heavy Rare Earth Elements: HREE) و عناصر با شدت میدان بالا (High field strength elements: HFSE) برای نمونه‌های منطقه مورد

حاصل از ذوب بخشی منبع ماگماها و یا عدم تفريق و جدایش این کانی در طی صعود ماگماهای سازنده سنگ‌های منطقه باشد. در این نمودار، الگوی پراکندگی عناصر نادر خاکی در همه نمونه‌ها، کم و بیش با هم موازی و همراه با غنی‌شدگی در LREE است که این غنی‌شدگی احتمالاً ناشی از تأثیر مؤلفه‌های فراوانش و یا آلودگی پوسته‌ای است. از طرف دیگر، آنومالی منفی Ce همراه با عناصری مانند Ti و Nb از نشانه‌های دخالت رسوبات لبه‌ فرورونده در گوشته‌ لیتوسفری هستند (Shimizu et al., 1992).

خواهد بود. آنومالی منفی Zr می‌تواند ناشی از تفريق زیرکن در ماگماهای سازنده سنگ‌های مورد مطالعه باشد. بطور کلی، غنی‌شدگی از عناصر LILE به همراه آنومالی منفی در عناصر Ta، Nb و Ti می‌تواند از نشانه‌های ماگماهای ایجاد شده در مناطق فرورانش باشد (Zanetti et al., 1999; Machado et al., 2005; Pearce et al., 1984).

در نمودارهای الگوی فراوانی عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (شکل ۱۱- c) نمونه‌های منطقه مورد مطالعه آنومالی واضحی از Eu نشان نمی‌دهند که این موضوع بیانگر عدم وجود کانی پلاژیوکلاز در پسمانده

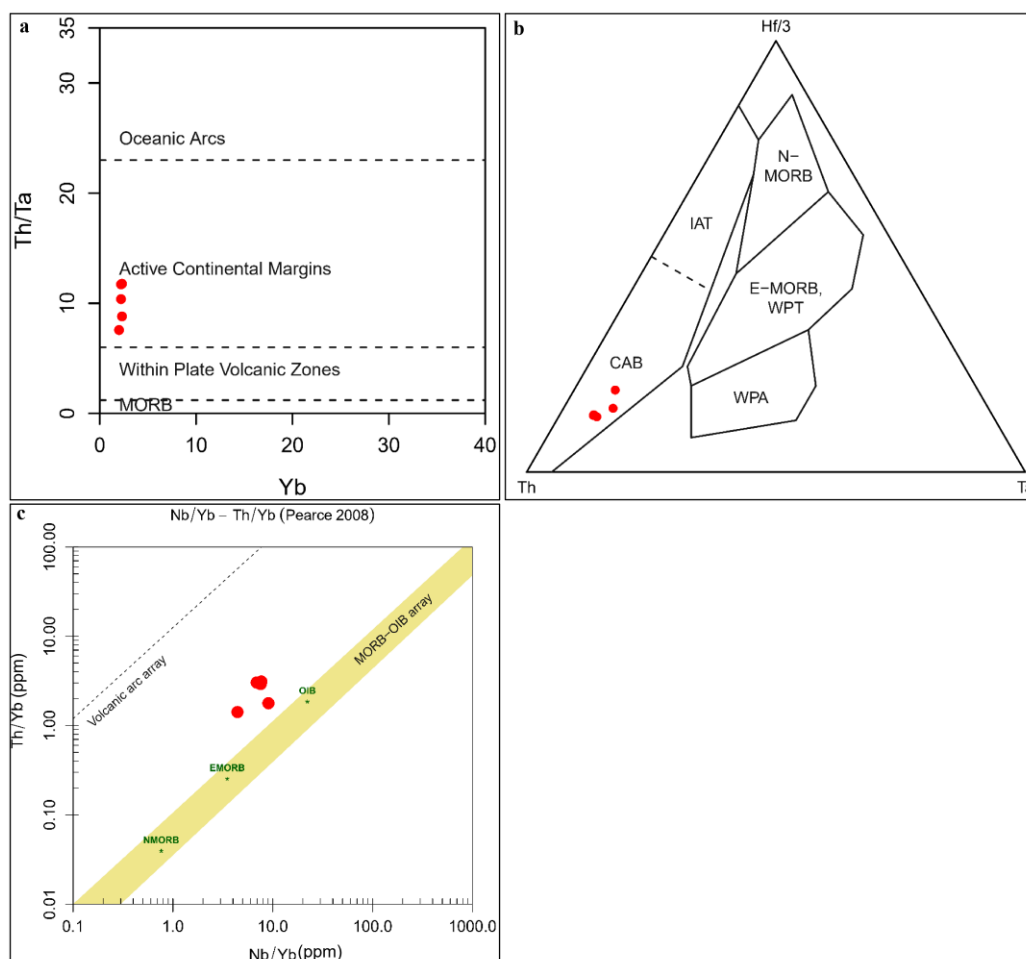


شکل ۱۱- نمودارهای غنی‌بودن عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به (a) کندریت (Thompson, 1982)، (b) گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995)، (c) نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت کندریت (Nakamura, 1974)

Fig. 11. Chondrite-normalized rare earth element (REE) spider diagrams for a) chondrite (Thompson, 1982), b) primitive mantle (McDonough and Sun, 1995), c) chondrite-normalized REE diagram (Nakamura, 1974)

سه عنصر Ta، Hf/3 Th، ترسیم شده است، نمونه‌های منطقه کردکندی در محدوده بازالت‌های کالک‌آلکان کمان قاره‌ای (CAB) قرار می‌گیرند (شکل ۱۲- b). براساس نمودارهای تمایز تکتونیکی Nb/Yb – Th/Yb و Nb/Yb – TiO₂/Yb (Pearce, 2008)، گوشته نرمال (N-MORB)، گوشته غنی‌شده (E-MORB)، بازالت‌های مرتبط با جزایر اقیانوسی (OIB) و همچنین قوس‌های ماگمایی از هم متمایز شده‌اند. براساس این نمودارها، نمونه‌های منطقه کردکندی در محدوده بین بازالت‌های مرتبط با جزایر اقیانوسی و گوشته غنی شده و نزدیک به گوشته غنی شده قرار می‌گیرند (شکل ۱۲- c).

بر اساس نمودارهای عناصر کمیاب و نسبت‌های بین آنها و عناصر کم تحرک، جایگاه تکتونیکی سنگ‌های ماگمایی منطقه مورد مطالعه بررسی قرار گرفته است. طبق نمودار Th/Ta در مقابل Yb (Schandl and Gorton, 2002) سنگ‌های مورد تجزیه منطقه کردکندی در محیط‌های تکتونیکی حاشیه فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۱۲- a). ماگماهای حاشیه فعال قاره‌ای نسبت به ماگماهای کمان‌های جزیره‌ای دارای درجات بالاتری از غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی ناسازگار هستند، که احتمالاً ناشی از سرچشمه گرفتن از یک خاستگاه گوشته‌ای غنی‌شده و آرایش پوسته‌ای باشد (Franceschelli et al., 2003). در نمودار تمایز محیط تکتونیکی وود (Wood, 1980) نیز که براساس



شکل ۱۲- تعیین محیط تکتونیکی سنگ‌های ماگمایی محدوده کردکندی. (a) نمودار Th/Ta به Yb (Schandl and Gorton, 2002)، (b) نمودار مثلثی $Th, Hf/3, Ta$ (Wood, 1980)، (c) نمودار $Nb/Yb-Th/Yb$ (Pearce, 2008)، (d) نمودار $Nb/Yb-TiO_2/Yb$ (Pearce, 2008). علائم شبیه شکل ۹ است

Fig. 12. Determination of the tectonic setting of the magmatic rocks in the Kordkandi area. a) Th/Ta vs. Yb diagram (Schandl and Gorton, 2002), b) $Th-Ta-Hf/3$ triangular diagram (Wood, 1980), c) Nb/Yb vs. Th/Yb diagram (Pearce, 2008), d) Nb/Yb vs. TiO_2/Yb diagram (Pearce, 2008). Symbols are similar to those in Figure 9

مقایسه کانسار کردکندی با سایر کانسارهای تیپ مانتو

با توجه به جدول ۳، کانسار مس کردکندی از لحاظ سنگ میزبان، کانی-شناسی، ساخت، بافت، ژئومتری، کانه‌زایی و دگرسانی‌ها شباهت فراوانی با کانسارهای مس چینه‌کران مانتو در شیلی دارد. از ویژگی‌های کانسارهای تیپ مانتو، چینه‌کران بودن آنها است که با کانی‌شناسی نسبتاً ساده‌ای شامل کالکوسیت، بورنیت، کالکوپیریت، پیریت و هماتیت است که در یک حوضه درون کمائی تشکیل می‌شوند. اکثر این کانسارها در یک محیط سنگی آندزیتی تا آندزیت-بازالتی در یک توالی آتشفشانی-رسوبی به سن مزوزوئیک و غالباً قبل از پروتروژئیک تا تریاس ایجاد شده‌اند (Boric et al., 2002). ماده معدنی در این کانسارها عموماً به صورت رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی،

دانه پراکنده، لامینه‌ای و جانیشینی دیده می‌شود که محدود به یک واحد چینه-ای مشخص می‌باشد (Kojima et al., 2009). با توجه به گسترش کم دگرسانی، در کانسارهای تیپ مانتو، معمولاً دگرسانی در نظر گرفته نمی‌شود. اما به طور کلی، دگرسانی‌های سیلیسی و کربناتی از معمول‌ترین دگرسانی‌ها در کانسارهای تیپ مانتو هستند (Cabral and Beaudoin, 2007). همچنین در این کانسارها، ژئولیتی شدن در طی دیاژنز تدفینی و همزمان با کانه‌زایی اصلی در منطقه اتفاق می‌افتد (Wilson and Zentilli, 2003). کانسار مس کردکندی نیز به صورت چینه‌کران و محدود به یک افق کانه-زایی در واحد آندزیت-بازالت به سن اتوسن و در یک حوضه کششی و پشت کمان تشکیل شده است. ماده معدنی در این کانسار بیشتر با بافت رگه-رگچه-ای و جانیشینی و پرکننده فضای خالی دارای کانی‌های اولیه کالکوسیت،

نهایت انجماد آنها اتفاق می‌افتد. با افزایش عمق، دما و فشار سنگ‌ها بالا می‌رود و این امر منجر به آغاز دگرگونی تدفینی می‌شود. در این شرایط، سیالات حاوی عناصر کانه‌ساز درون توالی آتشفشانی- رسوبی ائوسن شکل می‌گیرند. در این مرحله، مس از کانی‌ها شسته شده و با ورود سیالات غنی از مس به واحدهای آتشفشانی آندزیت- بازالتی، کانی‌های سولفیدی در فضاهای مناسب آنها ته‌نشین می‌شوند. این سیالات در جریان خود، فلز مس را از کانی‌های مافیک مانند پیروکسن جدا کرده و با تزریق به شکستگی‌ها و فضاهای خالی، مس را در آنجا ته‌نشین می‌کنند. همچنین در این مرحله، دگرسانی‌های مختلفی همچون سیلیسی، کلریتی- اپیدوتی، زئولیتی و کربناتی شکل می‌گیرد که آخرین فاز کانه‌زایی کربناتی است و به صورت رگه‌های کوچک در سنگ میزبان ظاهر می‌شود.

در مرحله دوم، فرآیند سوپرژن و هوازدگی آغاز می‌شود. در طی آن، کانی‌های ثانویه نظیر مالاکیت، آزوریت، کوولیت، کالکوسیت ثانویه و گوتیت به صورت جانشینی و شکافه پرکن تشکیل می‌شوند. شدت جانشینی در برخی بخش‌ها بالا بوده و در نتیجه بقایایی از کانی‌های اولیه به صورت جزیره‌ای باقی مانده است. دگرسانی‌های اصلی این مرحله شامل سریسیتی و آرژیلیکی هستند که هیچ ارتباطی با کانه‌زایی مس ندارند.

به طور کلی، باتوجه به شواهد ارائه شده از کانسار مس کردکندی، می‌توان تلفیقی از دو مدل (Kirkham, 1996) را برای این کانسار در نظر گرفت. بدین صورت که بعد از فرایند ته‌نشست، در اثر فرایند افزایش عمق تدفین و دما، دگرگونی تدفینی روی سنگ‌های منطقه اثر گذاشته و باعث تکمیل فرایند کانه‌زایی در این منطقه شده است. در شکل ۱۳، مدل شماتیک نحوه تشکیل کانسار مس کردکندی نشان داده شده است.

کالکوپریت، بورنیت، هماتیت اسپیکولار و کانی‌های ثانویه مالاکیت، آزوریت، گوتیت، کوولیت و کالکوسیت است. دگرسانی‌های موجود در این کانسار نیز، شامل کلریتی، اپیدوتی، سیلیسی، کربناته و زئولیتی است به علاوه دگرسانی سریسیتی و آرژیلیکی نیز به مقدار کمتر مشاهده می‌شود که مرتبط با فرآیندهای سوپرژن می‌باشد. اکثر کانسارهای تیپ مانتو در یک محیط سنگی آندزیتی تا آندزیت- بازالتی در یک توالی آتشفشانی- رسوبی به سن مزوزوئیک و غالباً قبل از پروتروزوئیک تا تریاس ایجاد شده‌اند (Boric et al., 2002). ماده معدنی در این کانسارها عموماً به صورت رگه- رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی، دانه پراکنده و جانشینی دیده می‌شود که محدود به یک واحد چینه‌ای مشخص می‌باشد (Kojima et al., 2009).

شایان ذکر است که کانسار مس کردکندی، تفاوت جزئی نیز با کانسارهای مس تیپ مانتو دارد که شامل وجود هماتیت اسپیکولار و عدم وجود مس و نقره آزاد در این کانسار است. همانطور که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شد، هماتیت اسپیکولار به مقدار کم و پس از کانه‌زایی مس در این کانسار تشکیل شده و وجود آن نشانه یک برهم‌نهی اکسیداسیون موضعی و دیر هنگام است. در جدول ۳، کانسار مس کردکندی با کانسارهای تیپ مانتو و همچنین با برخی از کانسارهای تیپ مانتو در ایران مقایسه شده است.

ژنز کانسار مس کردکندی

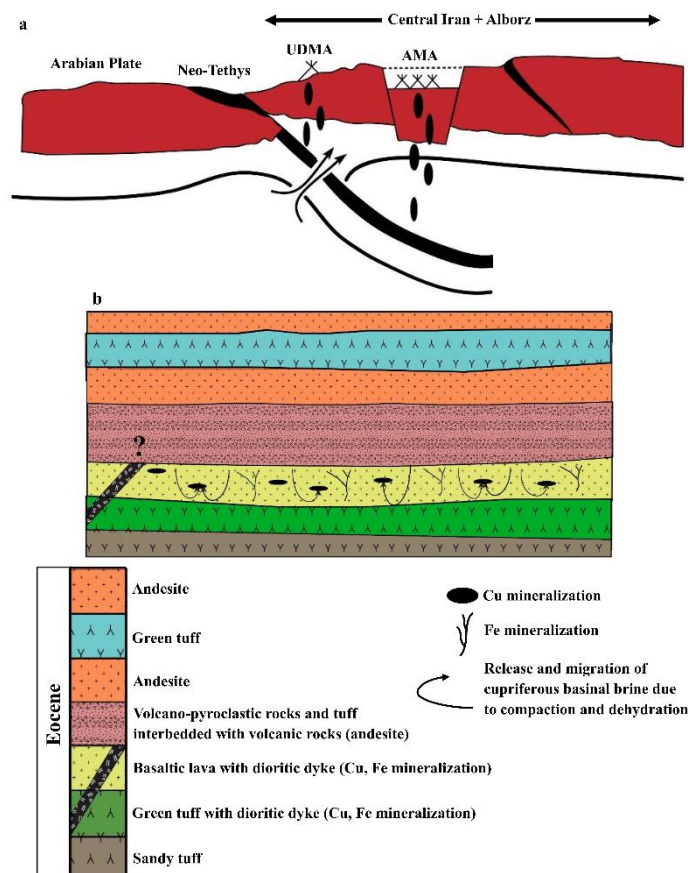
براساس شواهد به دست آمده، می‌توان اظهار داشت که شکل‌گیری و کانه‌زایی در کانسار مس کردکندی در طی دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول، فعالیت‌های آتشفشانی آغاز می‌شود. در این مرحله، فوران‌های آتشفشانی باعث خروج مواد مذاب و گدازه‌ها به سطح زمین می‌شود که در

جدول ۳- مقایسه کانسار مس کردکندی با کانسارهای تیپ مانتو در شیلی و ایران

Table 3. Comparison of the Kordkandi copper deposit with Manto-type deposits in Chile and Iran

ویژگی‌ها	کانسار تیپ مانتو شیلی	کانسار مس کردکندی	کانسار مس قشلاق	کانسار مس ماری	کانسار مس عباس‌آباد
موقعیت جغرافیایی	شیلی	شمال غرب زنجان	شرق زنجان	شمال غرب زنجان	شمال شاهرود
محیط تکتونیکی	کمان و پشت کمانی	محیط کششی و پشت کمانی	محیط کششی و پشت کمانی	محیط کششی رفتی درون کمانی	--
سنگ میزبان	گدازه‌های تراکی آندزیتی مگاپورفیری	آندزیت- بازالت	بازالت تا آندزیت-بازالتی پورفیری و دارای اشکال بادامکی	تراکی آندزیت مگاپورفیری	آندزیت تا آندزیت-بازالت پورفیری
کانی‌شناسی	بورنیت، کالکوسیت، کالکوپریت، پیریت، دیژنیت و هماتیت	کالکوسیت، کالکوپریت، بورنیت، پیریت، هماتیت اسپیکولار، گوتیت، مالاکیت، آزوریت	کالکوسیت، بورنیت، مالاکیت، آزوریت، کوپریت و کوولیت	بورنیت، کالکوسیت و کالکوپریت بیشتر همراه با پیریت	مس طبیعی، کاکوسیت، دیژنیت، بورنیت، و کوولیت

میزان نقره	۸ تا ۳۲ گرم بر تن	-	-	-	-
دگرسانی	کربناتی، کلریتی، سیلیسی، سرسیتی، هماتیتی و آلبیتی	سیلیسی، کلریتی، اپیدوتی، زئولیتی، کربناتی	کلریتی، کربناتی، اپیدوتی، سیلیسی	کربناتی، کلریتی، اپیدوتی و سرسیتی	-
ساخت و بافت	پرکننده فضای خالی، دانه پراکنده، رگه و رگچه‌ای، جانیشینی	پرکننده فضای خالی، رگه و رگچه-ای، جانیشینی	پرکننده فضای خالی، دانه پراکنده، رگه و رگچه‌ای، جانیشینی	پرکننده فضای خالی، دانه پراکنده، رگه و رگچه‌ای، جانیشینی	پرکننده فضای خالی، رگه و رگچه‌ای
ماهیت کانی-سازی	استراتی باند	استراتی باند (رگه‌ای و رگچه‌ای)	استراتی باند	استراتی باند	استراتی باند
سن سنگ میزبان	کرتاسه	ائوسن	ائوسن	ائوسن	ائوسن زیرین
منبع	Kirkham (1996)	تحقیق حاضر	Abbaspour (2017)	Hossein-zadeh et al (2016)	Samani (2001)



شکل ۱۳- شکل شماتیک از ژنز کانسار مس کردکندی. (a) الگوی تکامل تکتونوماگمایی مجموعه ماگمایی البرز، تشکیل حوضه‌های دریایی پشت قوسی همراه با رسوبگذاری و فوران‌های انفجاری (ائوسن اولیه تا میانی) (Asiabanha and Foden, 2012). (b) تصویر شماتیک از مراحل تکامل و کانه‌زایی مس در منطقه کردکندی

Fig. 13. Schematic figure of the genesis of the Kordkandi copper deposit. a) Tectono-magmatic evolution pattern of the Alborz magmatic belt, including the formation of back-arc marine basins accompanied by sedimentation and explosive eruptions (Early to Middle Eocene) (Asiabanha and Foden, 2012). b) Schematic illustration of the evolution and copper mineralization stages in the Kordkandi area

نتیجه‌گیری

آتشفشانی ائوسن میزبان بخش عمده‌ای از ذخایر اقتصادی مس- (نقره) نوع مانتو در ایران هستند که در یک محیط کشتی پشت‌کمانی، به ویژه در پهنه ماگمایی البرز شکل گرفته‌اند. کانسارهای موجود در پهنه ارومیه- دختر و سبزوار نیز همگی در چنین محیط‌های تکتونیکی پشت‌کمانی ائوسن و در طی فرورانش پوسته اقیانوس نئوتتیس به زیر ایران تشکیل شده‌اند. بنابراین، مطالعه این کانسار می‌تواند اطلاعات کلیدی مهمی را جهت اکتشاف کانسارهای مشابه در سایر بخش‌های پهنه البرز و نقاط مشابه در ایران ارائه دهد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش تقدیر و تشکر کنند.

Reference

- Abbaspour, N., 2017. Petrology and Geochemistry of the Host Rock and Qeshlaq Copper Deposit, East of Zanjan. M.Sc. Thesis in Petrology, University of Zanjan, Zanjan, Iran. 76 pp. (in Persian).
- Aboulipour, M., Rastad, E., Rashidnejad-Omran, N., 2011. Stratiform Manto-type Copper Mineralization in the Dehaj-Sarduiyeh Zone, Kashkuyeh Area, Rafsanjan. 2nd Iranian Economic Geology Symposium.
- Afshari, M., Nabatian, Gh., Honarmand, M., Ebrahimi, M., Li, X.-H., 2024. Investigation of shoshonitic pluton and an associated base-metal deposit in the Tarom-Hashtjin metallogenic zone, NW Iran: Implication for tectonomagmatic evolution and metallogenic considerations. *Australian Journal of Earth Sciences* 71 (2), 251-276.
- Aghajani, S., Ghasemi Siani, M., Emami, M. H., Lotfi, M., Gholizadeh, K., 2020. Petrography, Geochemistry, Magmatic Evolution and Tectonomagmatic setting of Igneous Rocks Associated with Nikuyeh Epithermal Mineralization (west of Qazvin). *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 6 (1), 1-20. (in Persian)
- Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Publications of the Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran, 586 p.
- Aghanabati, A., 1998. Major sedimentary and structural units of Iran (map). *Geosciences* 7, 29-30.
- Ahmadi, M., 2019. Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of Kordkandi Cu-Fe deposit, NW Zanjan. M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran. 120 pp. (in Persian).
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science* 304(1), 1-20.
- Asgari, E., 2021. Geology and mineralization in the Golahroud Cu deposit, north of Zanjan. M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran. 108 pp. (in Persian).
- Asiabanha, A., Foden, J., 2012. Post-collisional transition from an extensional volcanosedimentary Basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. *Lithos* 148, 98-111.
- Babakhani, A., Sadeghi, A., 2004. Zanjan Geological Map, Scale 1:100,000. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran.
- Boric, R., Holmegren, C., Wilson, N.F.S., Zentilli, M., 2002. The Geology of the El Soldado manto type Cu (Ag) deposit, Central Chile, in: Porter, T.M. (Ed.), *Hydrothermal iron oxide Copper-Gold & related deposits: A global perspective*, volume 2; PGC publishing, Adelaide, pp 185-205.
- Bouyri Kenari, M., Rastad, E., Rashidnejad-Omran, N., 2014. Volcanic Red Bed Type Copper (-Silver) Mineralization in Keshtmahaki Deposit, Northwest of Safashahr, Southern Sanandaj-Sirjan Zone. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 24 (93), 19-36.
- Cabral, A. R., Beaudoin, G., 2007. Volcanic red-bed copper mineralization related to submarine basalt alteration, Mont Alexandre, Quebec Appalachians, Canada. *Mineralium Deposita*, 42, 901- 912.
- Fazli, N., Ghaderi, M., Maghfouri, S., 2015. Eastern Narbaghi Manto-type stratabound copper mineralization in Eocene volcano-sedimentary sequence, northeast Saveh, Iran. *Proceedings of the 33rd National Geosciences Symposium*, Geological Survey of Iran.
- Franceschelli, M., Puxeddu, M., Gattiglio, M., 2003. Geochemistry and origin of chloritoid schist from the Alpi Apuane, Italy: Evidence of a prevailing lateritic signature. *European Journal of Mineralogy* 15(3), 575-588.
- Hadi, A., 2000. Economic Geology of Copper Deposits in the Mahin Area (Lower Tarom - Northwest Abhar). M.Sc. Thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. 177 pp. (in Persian).
- Hamidi, S., 2024. Copper Mineralization at Yahyaabad with Emphasis on the Geology, Geochemistry, and Genesis of the Deposit, East of Zanjan. M.Sc. Thesis in Economic Geology, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran. 83 pp. (in Persian).
- Hastie, A. R., Craig Kerr, A., Pearce, J., Mitchell, S. F., 2007. Classification of Altered Volcanic Island Arc Rocks Using

- Immobile Trace Elements: Development of the Th-Co Discrimination Diagram. *Journal of Petrology* 48 (12), 2341-2357.
- Hosseinzadeh, M., Maghfouri, S., Moayyed, M., 2016. Introduction of the Mari Copper Deposit as a Stratabound Manto-type Deposit in the Tarom Zone, Northwest Iran. *Iranian Journal of Geology* 38, 17-37.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8(5), 523-548.
- Ebrahimi Fard, H., Ghasemi Siani, M., Tabbakh Shabani, A. A., Nazarian, M., Karimi Shahraki, B., 2022. Mineralogy and mineral chemistry of alteration zone in order to determine the tectonic settings and mineralization characteristics in the Choreh-Nab iron deposit (Western Alborz). *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 8 (2), 164-211. (in Persian)
- Esmaeli, M., Lotfi, M., Nezafati, N., 2018. Mineralogy, and genesis of Khalyfehlou copper deposit based on host rock geochemical data and o-s isotope characteristics. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 28 (110), 33-46.
- Kirkham, R.V., 1996. Volcanic red bed copper. In: Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I. (eds.), *Geology of Canadian mineral deposit types*. Geological Survey of Canada, *Geology of Canada* 8, 241-252.
- Kojima, S., Trista, D., Guilera, A., Ken-ichiro ayashi, H., 2009. Genetic Aspects of the Mantotype Copper Deposits Based on Geochemical Studies of North Chilean Deposits. *Resource Geology* 59(1), 87- 98.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Chang, Z., 2022. Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of epithermal base-metal veins in the Armaqan Khaneh mining district, Tarom-Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Australian Journal of Earth Sciences* 69(6), 844-860.
- Machado, A., Lima, E. F., Chemale, F. Jr., Morata D., Oteiza, O., Almeida, D. P. M., Figueiredo, A. M. G., Alexandre, F. M., Urrutia J. L., 2005. Geochemistry constraints of Mesozoic-Cenozoic calc-alkalin magmatism in the south Shetland arc Antarctica. *Journal of South American Earth Sciences* 18, 407-4.
- Mahvashi, M., Malekzadeh Shafaroudi, A., 2016. Cheshmeh Gaz (Nasim) copper deposit, NW Bardaskan: mineralogy, alteration, geochemistry, and determination of model. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 24 (3), 419-434.
- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120, 223-253.
- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M., Goldfarb, R., Azizi, H., Ganerod, M., Marsh, E. E., 2016. Mineral assemblages, fluid evolution and genesis of polymetallic epithermal veins, Gulojeh district, NW Iran. *Ore Geology Review* 78, 41-57.
- Middlemost, E.A.K., 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Review* 37, 215-224.
- Mohammadi, M., 2018. *Geology, Geochemistry, and Genesis of the Dehneh Copper Deposit, Northeast of Zanjan*. M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran. 132 pp. (in Persian)
- Mohammadi, M., Nabatian, Gh., Honarmand, M., Ebrahimi, M., Haj Abolfath, A., 2021. Petrography and mineral chemistry of volcanic host rocks in the Dohneh Cu mineralization, NE Zanjan. *Kharazmi journal of earth sciences* 7(2), 225-249. (in Persian)
- Mohammadi, M., Nabatian, Gh., Honarmand, M., Ebrahimi, M., 2019. *Geology and Origin of the Dohneh Copper Mineralization, Northeast of Zanjan*. *Journal of economic geology* 11(3), 497-524. (in Persian)
- Mousavi Motlagh, S. H., Ghaderi, M., 2019. The Chargar Au-Cu deposit: an example of low-sulfidation epithermal mineralization from the Tarom subzone, NW Iran. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie- Abhandlungen* 196 (1), 43-66.
- Movahednia, M., Maghfouri, S., Fazli, N., Rastad, E., Ghaderi, M., González, F.J., 2022. Metallogeny of Manto-type stratabound Cu-(Ag) mineralization in Iran: Relationship with Neo-Tethyan evolution and implications for future exploration. *Ore Geology Reviews* 149, 105064.
- Nabatian, G., 2012. *Geology, Geochemistry, and Evolution of Iron Oxide-Apatite Deposits in the Tarom Volcanic-Plutonic Belt, Western Alborz*. Ph.D. in Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. 375 pp. (in Persian).
- Nabatian, Gh., 2021. The Manto-Type Copper Mineralization in the Eocene Volcano-Sedimentary Sequences, Western Alborz-Azarbaijan Belt, NW Iran. *Aspects in Mining & Mineral Science* 6(5), 757-759.
- Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Corfu, F., Neubauer, F., Bernroider, M., Prokofiev, V., Honarmand, M., 2014. Geology, alteration, age and origin of iron oxide-apatite deposits in Upper Eocene quartz monzonite, Zanjan district, NW Iran. *Mineralium Deposita* 49, 217-234.
- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and k in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimical Acta* 38, 757-775.
- Pearce, J.A., Harris, N.B., Tindle, A.G., 1984. Trace Element discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology* 25, 956-983.
- Pearce, J. A., Wyman, D. A., 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams. Trace element geochemistry of volcanic rocks: applications for massive sulphide exploration. Geological Association of Canada, Short Course Notes 12(79), 113.
- Pearce, J. A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos* 100(1-4), 14-48.
- Peccerillo, A., Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastomonon area, northern Turkey. *Contribution mineral petrology* 58, 63-81.
- Rollinson, H. R., 1993. *Using geochemical data: evaluation, Presentation and interpretation*. Longman, UK. 352.

- Samani, B., 2001. Metallogeny of Manto-type deposits in Iran. 6th Symposium on Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian with English abstract).
- Schandl, E.S., Gorton, M.P., 2002. Applications of high field strength elements to discriminate tectonic setting in VMS environments. *Economic geology* 97, 629-642.
- Shand, S. J., 1927. Eruptive Rocks: Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore Deposits with a Chapter on Meteorites. *Nature* 120, 872.
- Shimizu, H., Sawatari, H., Kawata, Y., Dunkley, P.N., Masuda, A., 1992. Ce and Nd isotope geochemistry on island arc volcanic rocks with negative Ce anomaly: existence of sources in the mantle beneath the Solomon and Bonin island arcs. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110, 242-252.
- Thompson, R.N., 1982. Magmatism of the British Tertiary Volcanic Province. *Scottish Journal of geology* 18, 49-107.
- Whitney, D. L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185-187.
- Wilson, F., Zentilli, M., 2003. A sulfur, carbon, Oxygen, and strontium isotope study of the volcanic-hosted El Soldado Manto-type copper deposit, Chile: The essential role of bacteria and petroleum., *Economic Geology* 98, 163-174.
- Wood, D., 1980. The Application of a Th Hf Ta Diagram to Problems of Tectonomagmatic Classification and to Establishing the Nature of Crustal Contamination of Basaltic Lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters* 50 (1), 11-30.
- Zanetti, A., Mazzucchelli, M., Rivalenti, G., Vannuci, R., 1999. The Finero phlogopite-peridotite massif: An example of subduction related metasomatism. *Contributions of Mineralogy and petrology* 134, 107-122.