

Original Research Paper

The Sadat iron skarn, Kashmar-Kerman block, Iran: a comparison with Bafq district iron oxide-apatite deposits

Masoumeh Mahboubi-Niyeh^{1*}, Saeed Alirezaei¹, and Iraj Rasa¹

¹ Department of Mineral and Ground Water Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2025 December 15

Accepted: 2026 June 08

Available online: 2026 September 23

Keywords:

Sadat iron skarn

Siriz intrusive body

syenite-monzonite

Kashmar-Kerman block

Iron oxide-apatite

Central Iran

ABSTRACT

The Sadat iron deposit in the west of the Siriz, in the southern section of the Kashmar-Kerman block (KKB), Central Iran structural zone, is closely associated with a syenitic-monzonitic pluton, here referred to as Siriz intrusive body, intruded into the Cambrian sedimentary rocks. Calc-silicate minerals typical of skarns including anhydrous garnet-pyroxene-wollastonite, and hydrous phlogopite-epidote-tremolite-actinolite are developed in Sadat, the former minerals being of limited extent. The intrusive body is variably albitized to a distance from the ore deposit. Ore formation occurred with the retrograde skarn. Magnetite is the main ore mineral, commonly containing minor late pyrite and locally chalcopyrite. The iron ore occurs in massive, banded, and locally breccia textures, and distinguished by relatively low contents of the magnetite-compatible metals, Ni-Cr-V-Ti-Co. The spatial relations between the intrusive body and surrounding rocks suggest a post-Cambrian-pre-Triassic timing for emplacement of the intrusion and ore formation. The Sadat deposit is comparable in some respects, including albitic alteration, late pyrite, and low Ti contents, to iron oxide-apatite deposits of the Bafq-Saghand district in the central KKB. Significant differences, however, exist in host rocks (Middle-Upper Cambrian sediments and post-Cambrian intrusive body in Siriz, Early Cambrian, dominantly volcanic-subvolcanic rocks in Bafq-Saghand), and scarcity of apatite.

1. Introduction

The Sadat iron deposit is located ~11km west of the Siriz in southern part of the Basab (Siriz) 1:100000 quadrangle (Zia, 2004) in the southern section of the Kashmar-Kerman belt (KKB) or Posht-Badam block in the central Iran structural zone (Fig. 1- B). The KKB is characterized by abundant Kiruna-type iron oxide-apatite (IOA) deposits in the Bafq, or Bafq-Saghand, metallogenic district

in its central section, represented by the world-class Choghart and Chadormalu deposits (Fig. 1- B). The deposits occur mostly in a Cambrian volcanic-sedimentary unit (CVSU) and associated shallow intrusions (Ramezani and Tucker, 2003; Heidarian et al., 2017). The CVSU was formerly known as Rizu series (Huckriede et al., 1962) and Esfordi series (Borumandi, 1973).

* Corresponding author: Masoumeh Mahboubi-Niyeh; E-mail: mmahboubi@ymail.com

Citation:

Mahboubi-Niyeh, M., Alirezaei, S., and Rasa, I., 2026. The Sadat iron skarn, Kashmar-Kerman block, Iran: a comparison with Bafq district iron oxide-apatite deposits. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 36(3), 141, 1-24. <https://doi.org/10.22071/gsj.2026.566286.2239>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2026.566286.2239

 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.1.3



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

The ore bodies in the Sadat deposit occur mainly in the Middle-Upper Cambrian limestone, dolomite, sandstone, and shale of the Kuhbanan Formation that is intruded by a large syenitic to monzonitic intrusive body, here referred to as the Siriz intrusion. Similar, but smaller ore bodies occur in the intrusion. Zia (2004) proposed a post-Jurassic age for the Siriz intrusion based on the assumption that metamorphic rocks to the west of the intrusive body (Fig. 2) were the products of contact metamorphism of Jurassic shales and sandstones. Moghaddasi et al. (2017) and Shaker et al. (2018) reported a skarn affinity for the iron ores related to a post-Jurassic alkaline intrusive body in the area.

Given the geological setting of the Sadat deposit, one question of interest would be the possible relation between the Sadat deposit and the IOA deposits in the Bafq-Saghand district in terms of the timing of ore formation and the ore-forming processes. This study investigates the genesis of the Sadat deposit by examining field relations between the intrusive body and various host rocks and the ores, hydrothermal alteration, and ore/gangue mineralogy and ore chemistry, and compares the Sadat deposit with the IOA deposits in the Bafq-Saghand district.

2. Research methodology

Some 40 samples were selected for detailed petrography and ore microscopy following inspection of a large set of samples collected from various rock units, iron ores, and the altered wall rocks from natural exposures, the pit walls, and the drill cores. A processed magnetite concentrate, <200 mesh, from the main pit in the exoskarn, provided by the mine authorities, was analyzed by the Zar Azma Labs, Tehran, using a combination of alkaline fusion and ICP-OES techniques for major oxides, and ICP-MS (4-acid digestion) for the minor and trace elements.

3. Results

3.1. Geology background

The Central Iran, or the Central Iran Microcontinent, is bordered by ophiolitic complexes, and divided into four major tectonic blocks, known as Lut, Tabas, Kashmar-Kerman, and Yazd, by major strike-slip faults (Fig. 1-B). The Sadat iron deposit lies in the Siriz (Basab) quadrangle (Zia, 2004) in the southern part of the Kashmar-Kerman block (KKB). The KKB is characterized by extensive exposures of Late Precambrian metamorphic-igneous basement rocks, mostly distributed in its central section, Paleozoic sedimentary and volcanic-sedimentary units, and Mesozoic carbonate and clastic sequences (Haghipour and Pelissier, 1977; Sahandi, 1992). The Bafq-Saghand district in the central section of the KKB embraces several iron oxide-apatite (IOA) deposits hosted mainly in a Lower Cambrian volcanic-sedimentary sequence and subvolcanic intrusions (Ramezani and Tucker, 2003).

The Siriz area in the southern part of the KKB shares geologic features comparable to those known in the central part of the block, including outcrops of the Precambrian basement rocks overlain by late Precambrian clastic sediments, dolomite, limestone, and volcanic materials (Zia, 2004). Exposures of the basement rocks occur to the west of the Sadat mine area (Fig. 2). The Lower Cambrian is represented by the cherty dolomite, sandstone, gypsum, and andesitic-basaltic lava flows of the Dezu series and the clastic red beds of the Dahu, Zaigoon, and Lalun formations (Zia, 2004). Outcrops of the Lower Cambrian clastic sediments occur to the southeast of the Sadat area (Fig. 2). The Middle Cambrian-Early Ordovician stratigraphic record consists of a thick sequence of dolomite, dolomitic limestone, sandstone, calcareous sandstone, and shale, equivalent to comparable to the Derenjal formation in the neighboring Tabas block (Zia, 2004) with extensive outcrops to the west of the Siriz intrusive body and in the mine area (Fig. 2). Similar middle-upper Cambrian sediments in the KKB are also known as Kuhbanan formation (Huckriede et al., 1962). Local exposures of dolomite, dolomitic limestone, shale and volcanic rocks of the Silurian Niur formation disconformably cover the Derenjal formation.

A notable distinction between the Siriz area and the Saghand-Bafq district is the scarcity of Cambrian volcanic/subvolcanic rocks and intrusive bodies in Siriz. The Rizu Series or its equivalent, the Cambrian volcanic-sedimentary unit, that are the main host to the Bafq-Saghand iron oxide-apatite deposits are not reported from the Siriz quadrangle. Outcrops of the Rizu series are, however, reported from the Davaran quadrangle (Vahdati-Daneshmand et al., 1995) to the southeast of Siriz implying that the Rizu series locally extends into the southern section of the KKB.

The Upper Paleozoic rocks in the Siriz quadrangle are limited to local exposures of the Upper Devonian crystalline dolomitic limestone of the Bahram formation (Zia, 2004). The Lower-Middle Triassic is represented by red shales and thick-bedded sandstones of the Sorkh Shale formation, thick-bedded dolomites of the Shotori formation, and the Espahk limestones (Fig. 2). Following a period of epeirogeny and erosion, late Triassic marine transgression led to deposition of alternating dolomitic limestone, dolomite, and shale of the Nayband formation, followed by coal-bearing sandstone and shale of the Shemshak formation (Fig. 2). The Cretaceous is represented by a thick sequence of conglomerate, marl, gypsum, and cliff-forming limestone widely distributed across the Siriz quadrangle. The rocks are locally overlain by Paleocene conglomerates. The youngest rock units are Neogene colored marls with extensively exposures in the west part of the quadrangle. Large parts of the Siriz area are covered by Quaternary deposits (Zia, 2004).

A salient feature in the southern part of the Siriz quadrangle is

a large intrusive body with rugged topography, intruded into the Cambrian Kuhbanan (Derenjal) formations (Fig. 2). Outcrops of metamorphic rocks, consisting of various schists, metasandstone, and recrystallized limestone, occur to the west of the Siriz intrusive body (Fig. 2). Assuming a Jurassic age for the protoliths and a contact metamorphism origin for the rocks, Zia (2004) suggested a post-Jurassic age for emplacement of the intrusion. The field relations, however, indicate that the metamorphic rocks are in fault contact against the surrounding Paleozoic-Mesozoic rocks. The regional NW-SE foliation, well developed in the metamorphic rocks, cannot be distinguished in the widespread lower Paleozoic and Triassic-Jurassic rocks in the Sadat deposit area. The Cambrian rocks are recrystallized and skarnified at contact with the intrusive body, no thermal metamorphism, however, can be established in the Mesozoic rocks. We consider the metamorphic rocks as exposures of the Precambrian basement rocks, and a post-Cambrian – pre-Triassic-Jurassic age for the Siriz pluton. Similar Precambrian metamorphic assemblages occur to the west and northwest of the Siriz pluton (Fig. 4).

3.2. Local geology

The mine area is mostly covered by the Siriz intrusive body and the Kuhbanan formation consisting of dolomite, cherty dolomite, shale-dolomite interbeds, dolomite and quartz-arenite interlayers, and thick-bedded dolomite (Figs. 3 and 7). In the northwest, the formation is covered by Ordovician-Silurian andesitic to basaltic lava flows. A suite of basal conglomerate, shale, carbonaceous shale, sandstone, and lesser limestone and dolomite of the Shemshak formation covers large areas to the south and west of the mine (Fig. 3). The rocks are overlain by Cretaceous strata consisting of a basal conglomerate, orbitolina limestone, and marl (Fig. 5). Quaternary alluvial deposits cover large areas to the northwest of the mine area.

The Siriz intrusion appears in pinkish to greyish colour in natural exposures (Fig. 6), and displays a sheeted structure due to the development of sub-parallel fractures. A close spatial relation exists between the intrusion and the ore bodies in the Sadat mine (Fig. 7). The intrusion is medium- to coarse-grained and consists of equigranular plagioclase and alkali-feldspars in broadly similar proportions, and lesser biotite, hornblende, and quartz (Figs. 8-A and 8-B). Minor magnetite, apatite, titanite, and zircon occur as accessory minerals. The mafic minerals are variably chloritized, and the feldspars are weakly altered to clay minerals and locally to calcite (Fig. 8-C). From the mineralogy and abundances of the major minerals in the least altered rocks, the composition of the Siriz intrusion varies from syenite to monzonite and quartz monzonite. A distinct feature in the intrusive body in the deposit area is albitic alteration where plagioclase and K-feldspars are variably replaced by albite (Fig. 8-D). A mafic intrusive body and associated dykes

occur in the eastern part of the Sadat deposit (Figs. 9 and 10). The intrusions consist mostly of plagioclase, clinopyroxene, and subordinate orthoclase in subophitic to granular texture (Fig. 10). The pyroxene is variably uralitized. Magnetite and lesser apatite occur as accessory minerals.

3.3. Calc-silicate alteration

Calc-silicate alteration, distinguished by the occurrence of Ca-Mg $\pm$ Fe-rich silicates developed through fluid-rock interaction or isochemical reactions with increasing heat from intrusions, is characteristic of many skarns (Meinert, 1992). Prograde and retrograde calc-silicates typical of many skarns are developed in Sadat, represented by anhydrous wollastonite, garnet, and pyroxene, and hydrous phlogopite, tremolite-actinolite, epidote, chlorite, and sericite, respectively. The minerals are developed both as endoskarn within the intrusive body (Figs. 11 and 12) and as exoskarn in the host sedimentary rocks (Fig. 15). Exoskarn extends for several hundred meters from the intrusive contact into the host Kuhbanan formation (Figs. 13 and 14). Two stages of skarn formation and associated mineralization were identified in the Sadat iron deposit (Fig. 18).

-Prograde skarn: With the emplacement of Siriz intrusion in the Cambrian sedimentary rocks, the elevated heat flow led to thermal metamorphism and isochemical reactions in the host rocks and the formation of anhydrous calc-silicate minerals, represented by garnet, pyroxene, and wollastonite. The prograde skarn is not widespread, but only locally developed/preserved in Sadat. No specific mineral zoning can be established (Fig. 12).

-Retrograde skarn: Hydrous calc-silicate minerals, including phlogopite, tremolite-actinolite, epidote, chlorite, and locally sericite, are the main minerals formed during this stage. Minor calcite occurs in textural equilibrium with the silicates, as well as in late veinlets. Phlogopite is locally replaced by late chlorite across grain boundaries and cleavages. Mineralization occurred at this stage of the skarn system evolution (Fig. 15).

3.4. Iron ore

Iron ore occurs in three main ore bodies oriented in north-south to northwest-southeast directions as well as scattered pods, lenses, and veins in the intrusive body (Fig. 16-A) and in the host sedimentary rocks (Fig. 7). Mineralization occurs predominantly in the ex-skarn. The ore texture varies from massive to banded, the latter being the product of selective replacement of carbonate strata in carbonate-sandstone interlayers in the host Kuhbanan formation (Fig. 16-B). Scattered accumulations of massive-textured ore occur within the intrusive body

The iron ore in the Sadat mine has a simple mineralogy. Magnetite is the main ore mineral, partially to totally replaced by hematite at surface exposures and shallow depths. Minor pyrite and trace chalcopyrite occur as replacement of magnetite across fractures as well as scattered grains and grain aggregates in magnetite (Fig. 17-A). Associated non-metallic minerals include phlogopite, calcite, and quartz. Where present, phlogopite is often found in textural equilibrium with calcite and magnetite (Fig. 17-B). At the microscopic scale, phlogopite was found to be locally cut by magnetite, implying that iron mineralization continued after the development of phlogopite (Fig. 17-C).

3.5. Iron ore geochemistry

Chemical analysis of the iron ore concentrate from the Sadat mine is presented in Table 1. As discussed earlier, the iron ore is commonly associated with minor quartz, phlogopite, calcite, and pyrite. The minerals account for most SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO , and S in the ore concentrate analysis (Table 1). A comparison with the high-temperature (700-500 °C) hydrothermal magnetite (Dare et al., 2014) shows that the Sadat ore sample is relatively depleted in the more compatible metals, Ti, Co, Ni, Zn, and V, but enriched in the more incompatible elements, Si, Al, P, Ca, Zr, and W (Fig. 19).

The rare earth element (REE) contents of the Sadat iron ore, normalized to chondritic values, is shown in (Fig. 20). A comparison is also made with magnetite from selected IOA deposits in the Bafq district. The Sadat ore is enriched in all REE. The enrichment can partly be attributed to the presence of minor calcite and phlogopite in the Sadat ore. The two minerals are known to be able to accommodate minor REE, in particular LREE, in their crystal structures (Henderson, 1984; Lieftink et al., 1994). In discrimination diagrams using Ti and V, the Sadat magnetite plots in the hydrothermal and skarn fields, away from IOA, Kiruna, and El Laco (Fig. 21-A) and magmatic iron ores (Fig. 21-B).

4. Discussions

The metamorphic assemblage, consisting of various schists, quartzite, and marbles, to the west of the Siriz pluton and the Sadat mine, is not the product of thermal metamorphism of Triassic-Jurassic rocks, as shown in the Siriz quadrangle (Zia, 2004). The post-Jurassic age, thus considered for the emplacement of the pluton, is not supported by field relations. The northwest-southeast regional foliation, well developed in the metamorphic rocks, is absent in the Paleozoic and Mesozoic country rocks in the area. The emplacement of the Siriz pluton led to thermal metamorphism and skarnification of the immediate Cambrian host rocks. We consider the metamorphic rocks to the west of the Siriz intrusion as a tectonic window of Precambrian basement rocks, and propose a post-Cambrian, pre-Triassic age for the intrusion. Similar Precambrian

metamorphic rocks occur with distance to the west and northwest of the Siriz pluton.

The Siriz pluton varies in composition from syenite to monzonite and quartz-monzonite; the associated mafic rocks are monzodiorite to monzogabbro. Anhydrous and hydrous calc-silicate minerals typical of skarns are developed in Sadat. Ore formation is closely associated with the hydrous skarn marked by the occurrence of phlogopite, tremolite-actinolite, and epidote. The ore bodies occur mostly in the Cambrian sedimentary rocks of the Kuhbanan formation. The common occurrence of phlogopite allows the Sadat deposit to be classified as a magnesium skarn.

The processed ore concentrate in the Sadat mine contains 66.23%wt iron (Fet). The main impurities, Si, Al, Ca, Mg, and S, in the chemical composition of the ore can be explained by the presence of minor quartz, calcite, phlogopite, and pyrite in the concentrate. The low contents of the more compatible metals in magnetite, Ni, Cr, V, Ti, Co, and Zn in the Sadat ore suggest a formation temperature below 500°C for the iron ores (c.f. Dare et al., 2014; Nadoll et al., 2012, 2014).

The Sadat iron deposit shares similarities with the IOA (iron oxide-apatite) deposits of the Bafq district; notable differences, however, exist. The main similarities include:

- **Geological setting.** The Sadat iron deposit occurs in the south-central section of the Kashmar-Kerman block that embraces the Bafq district IOA deposits. The block is distinguished by extensive outcrops of the Precambrian basement rocks.

- **Sodic (albitic) alteration.** As in the Bafq district, sodic (albitic) alteration is widespread in and around the Sadat deposit.

- **Occurrence of late pyrite.** As in the Bafq district deposits, the Sadat iron ore contains abundant late pyrite, locally with minor chalcopyrite, as replacement of magnetite.

The main differences are:

- **Host rocks.** Mineralization in the Bafq deposits occurs mostly in the Early Cambrian volcanic and subvolcanic rocks (Daliran, 2002; Jami, 2005; Sepehrirad and Alirezai, 2020; Heidarian et al., 2017). The Jalalabad deposit is an exception where the ore bodies are mostly hosted in sedimentary rocks. In Sadat, however, the ore bodies occur in the Cambrian sedimentary rocks and in a rather deep-seated alkaline intrusive body. A close spatial and genetic link can be established between the intrusion and ore formation in Siriz.

- **Scarcity of apatite.** Unlike the Bafq iron deposits, where apatite is a common associate mineral (e.g., Heidarian et al., 2017; Nayeibi et al., 2021), the Sadat deposit is poor in apatite. Apatite, however, occurs as a common accessory mineral in the associated intrusive body.

- **Calcic or calcic-ferroan alteration.** Unlike the Bafq deposits with extensive Ca-Fe alteration, marked by tremolite-actinolite and locally pyroxene, the alteration is missing or only locally developed in Sadat.

- **Phlogopite occurrence.** Phlogopite is a common calc-silicate mineral in the Sadat deposit, found in both ore and the host rocks. The mineral is rarely reported from the Bafq district.

5. Conclusion

The Sadat iron deposit is spatially and genetically related to a syenitic to monzonitic intrusive body, intruded into the Cambrian sediments. Field relations suggest a post-Cambrian and pre-Mesozoic age for the emplacement and crystallization of the intrusion.

A skarn affinity for the Sadat iron deposit is supported by the occurrence of anhydrous calc-silicate minerals garnet, pyroxene, and wollastonite, and hydrous minerals phlogopite, epidote, tremolite-actinolite, and chlorite.

Ore formation is closely associated with the hydrous skarn. The common occurrence of phlogopite in both exoskarn and endoskarn, as well as an associate mineral in the ore, allows the Sadat iron deposit to be classified as a magnesian skarn.

A sodic (albitic) alteration has affected the Siriz intrusion in the mine area and surroundings.

The Sadat iron ore is depleted in magnetite-compatible metals, Cr, Ni, Co, Ti, V, Mn, and plots in the skarn domain on discrimination diagrams.

Pyrite, a minor constituent of the iron ore in the Sadat mine, occurs as a late mineral phase replacing magnetite.

The Sadat iron deposit shares similarities with the iron oxide-apatite (IOA) deposits in the Bafq-Saghand district in the central section of the KKB, including albitic alteration, late pyrite, and low Ti contents, but differs in terms of host rocks (sedimentary and plutonic vs volcanic-subvolcanic-sedimentary), timing of ore formation (post-Cambrian vs Early Cambrian), and scarcity of apatite.

Acknowledgement

We are grateful to the authorities of the South East Iran Mines and Iron and Steel Industries Co for access to the mine and for the generous support during our fieldwork, and for chemical analysis of ore samples. Field work and discussions with the mine geologists, Mr. Alipour and Mr. Ghorbani, were critical in our understanding of the geology of the mine area.

زمین‌شناسی و زایش اسکارن آهن سادات، بلوک کاشمر-کرمان، ایران: مقایسه با کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت بافق-ساغند

معصومه محبوبی نیه^{۱*}، سعید علیرضایی^۱ و ایرج رسا^۱

^۱ گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

کانسار آهن سادات در باختر سیریز در بخش جنوبی بلوک کاشمر-کرمان، پهنه ساختاری ایران مرکزی، همبستگی مکانی نزدیکی با یک توده نفوذی سینیتی-مونزونیتی دارد که در سنگ‌های رسوبی کامبرین نفوذ کرده است. کانی‌های کالک-سیلیکاتی نشانگر اسکارن، شامل کانی‌های بی‌آب گارنت-پیروکسن-ولاستونیت و کانی‌های آب‌دار فلوگوپیت-اپیدوت-ترمولیت-اکتینولیت در سادات پدید آمده است که گروه اول گسترش کمی دارد. کانی‌سازی همراه با اسکارن آب‌دار رخ داده است. توده نفوذی که در اینجا با نام سیریز معرفی می‌شود، دستخوش دگرسانی آلیتی شده است. مگنتیت کانه اصلی آهن است. پیریت و اندکی کالکوپریت دیر هنگام نیز وجود دارد. کانسنگ با دو بافت چیره توده‌ای و نواری و به‌طور محلی برشی وجود دارد و با مقادیر نسبتاً پایین فلزات سازگار با مگنتیت، مانند نیکل، کروم، وانادیم، تیتانیم و کبالت مشخص می‌شود. ارتباط فضایی میان توده نفوذی و واحدهای سنگی پیرامونی، زمان جایگزینی این توده و کانی‌سازی را پس-کامبرین و پیش-تریاس پیشنهاد می‌کند. کانسار آهن سادات از نظر دگرسانی آلیتی، پیریت دیر هنگام و کمبود تیتانیم با کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق-ساغند قابل مقایسه است، اما از نظر سنگ میزبان (سنگ‌های رسوبی کامبرین میانی-بالایی و توده نفوذی پس-کامبرین در سیریز در مقایسه با چیرگی سنگ‌های آتشفشانی-نفوذی کامبرین زیرین در بافق-ساغند) و کمبود آپاتیت متفاوت است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

اسکارن آهن سادات

توده نفوذی سیریز

سینیت-مونزونیت

بلوک کاشمر-کرمان

اکسید آهن-آپاتیت

ایران مرکزی

۱- پیش‌نوشتار

کانسار آهن سادات در ۱۱ کیلومتری باختر سیریز، شمال استان کرمان، و در بخش جنوبی بلوک کاشمر-کرمان یا پُشت بادام در ایران مرکزی قرار دارد که با ذخایر فراوان آهن «نوع کایرونا» یا نوع اکسید آهن-آپاتیت در ناحیه بافق-ساغند در بخش میانی خود مشخص می‌شود (شکل ۱-۸). ضیا (۱۳۸۳) در گزارش نقشه زمین‌شناسی چهارگوش بساب (سیریز) به رخداد کانسنگ آهن در همبری یک توده نفوذی با نهشته‌های پالئوزویک زیرین در بخش جنوبی این چهارگوش اشاره کرده و سن توده نفوذی را پس از ژوراسیک در نظر گرفته است. مقدسی و همکاران (۱۳۹۶) کانی‌زایی آهن در این محل را (که اکنون با نام سادات شناخته می‌شود) از نوع اسکارن و مرتبط با توده نفوذی قلیایی نوع A معرفی کردند. شاکر و همکاران (۱۳۹۷) نیز با مطالعات کانی‌شناسی و ویژگی‌های ژئوشیمیایی کانسنگ، این کانی‌زایی را از نوع اسکارنی می‌دانند.

کانسار آهن سادات به طور عمده در یک مجموعه رسوبی شامل سنگ آهک،

دولومیت و ماسه‌سنگ از سازند کوهبنان از کامبرین و در همبری با یک توده نفوذی بزرگ با ترکیب چیره سینیت تا مونزونیت تشکیل شده است و از این نظر تفاوت آشکاری با ذخایر آهن ناحیه بافق-ساغند در بخش میانی بلوک کاشمر-کرمان دارد که عموماً در سنگ‌های میزبان آتشفشانی و نفوذی تشکیل شده‌اند. با توجه به جایگاه زمین‌شناسی مشابه و نزدیکی به ذخایر اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق-ساغند، یک پرسش مهم که از دو جنبه علمی و کاربردی اهمیت زیادی دارد، ارتباط این کانسارها با هم از نظر زمانی و فرایندهای کانی‌سازی است. هدف از این مطالعه، آگاهی از چگونگی زایش کانسنگ آهن در کانسار سادات با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی، ارتباط توده نفوذی با واحدهای سنگی دربرگیرنده، سن نسبی توده نفوذی و ارتباط آن با کانی‌سازی، زمین‌شیمی کانسنگ، و همبستگی این کانسار با ذخایر اکسید آهن-آپاتیت آهن در ناحیه بافق-ساغند است.

* نویسنده مسئول: معصومه محبوبی نیه؛ E-mail: mmahbouby@ymail.com

ماخذنگاری:

محبوبی نیه، م، علیرضایی، س. و رسا، ا. ۱۴۰۵، زمین‌شناسی و زایش اسکارن آهن سادات، بلوک کاشمر-کرمان، ایران: مقایسه با کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت بافق-ساغند. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۶ (۳)، ۱۴۱، ۲۴-۱. <https://doi.org/10.22071/gsj.2026.566286.2239>

doi: 10.22071/gsj.2026.566286.2239



doi: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.1.3

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

۲- روش پژوهش

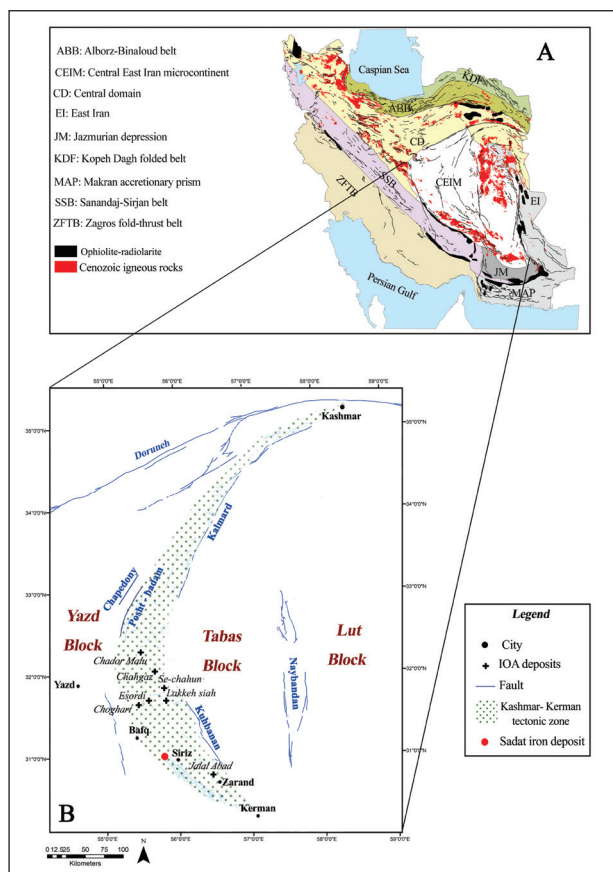
اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق-ساغند به طور عمده در یک توالی از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی و توده‌های نیمه آتشفشانی پرکامبرین پایانی-کامبرین در بخش میانی این بلوک پدید آمده‌اند (Ramezani and Tucker, 2003). این توالی در بلوک پشت بادام با نام‌های سری ریزو (Huckriede et al., 1962) و سری اسفوردی (Borumandi, 1973) معرفی شده است (Ramezani and Tucker, 2003). با سن‌سنجی یک واحد گدازه ریوداسیتی و یک توده داسیت پورفیری نیمه آتشفشانی در این توالی با روش اورانیم-سرب زیرکن، سن کامبرین پیشین را به دست آوردند و آن را با عنوان واحد آتشفشانی-رسوبی کامبرین معرفی کردند.

ناحیه سیریز در بخش جنوبی بلوک کاشمر-کرمان، از نظر واحدهای سنگی قابل مقایسه با بخش میانی این بلوک است، اگرچه تفاوت‌های آشکاری نیز وجود دارد. ضیا (۱۳۸۳) رخنمون‌هایی از شیست با پیش‌سنگ (پروتولیت) رسوبی و آتشفشانی و مرمرهای دولومیتی و سنگ آهکی در باختر چهارگوش سیریز را معادل سازند تاشک از پرکامبرین در ناحیه بافق-ساغند معرفی می‌نماید که با واحدهای سنگی معادل سری مراد و سازند بایندور از پرکامبرین پسین پوشیده شده است. رخنمونی از این سنگ‌های دگرگونه در باختر محدوده سادات دیده می‌شود (شکل ۲). کامبرین زیرین-میانی در ناحیه سیریز با دولومیت چرت‌دار، ماسه‌سنگ آهکی - دولومیتی و ژپس و گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی سری دزو و نهشته‌های آواری معادل سازندهای داهو، زاگون و لالون معرفی می‌شود (ضیا، ۱۳۸۳). رخنمونی از این واحدهای آواری کامبرین در جنوب باختر محدوده سادات وجود دارد (شکل ۲). کامبرین میانی-اردوئیسین در این ناحیه با تناوبی از دولومیت، سنگ آهک دولومیتی، ماسه‌سنگ کوارتز-آرنایتی، ماسه‌سنگ آهکی و شیل (هم‌ارز سازند درنجال در بلوک طبس) معرفی می‌شود که به طور محلی با تناوبی از دولومیت، سنگ آهک دولومیتی، شیل و سنگ‌های آتشفشانی (هم‌ارز سازند نیور از سیلورین) با ناپوستگی فرسایشی پوشیده شده است (ضیا، ۱۳۸۳).

۳- داده‌ها و اطلاعات

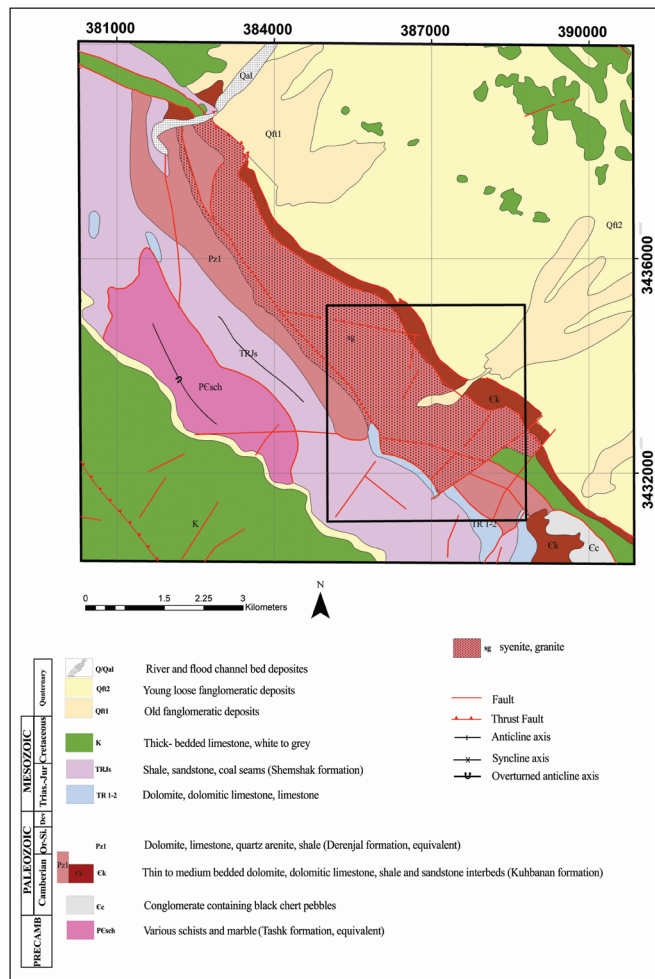
۳-۱- زمین‌شناسی ناحیه‌ای

ایران مرکزی یا خُردقاره ایران مرکزی، بخشی از ایران میانی است که با مجموعه‌های افیولیتی احاطه شده و توسط چند گسل بزرگ امتدادلغز به ۴ بلوک شامل لوت، طبس، کاشمر-کرمان و یزد تقسیم شده است (شکل ۱-۱). کانسار آهن سادات در جنوب چهارگوش ۱:۱۰۰،۰۰۰ بساب (سیریز) (ضیا، ۱۳۸۳) در بخش جنوبی بلوک کاشمر-کرمان قرار دارد. این بلوک با رخنمون‌های گسترده پی‌سنگ دگرگونی-آذرین پرکامبرین پسین، به‌ویژه در بخش میانی خود، واحدهای رسوبی-آتشفشانی و رسوبی پالئوزویک و واحدهای کربناتی و آواری مزوزویک مشخص می‌شود (Haghipour and Pelissier, 1977; Sahandi et al., 1992). ذخایر



شکل ۱-۱ (A) نقشه زمین‌شناسی ساده شده ایران، با نمایش پهنه‌های ساختاری اصلی (برگرفته از Stocklin, 1968 و Sahandi, 2002). (B) خُرد قاره ایران خاوری- مرکزی با بلوک‌های زمین‌ساختی (Sahandi, 2002) و گسل‌های اصلی آن. محل چند کانسار آهن نوع IOA و نیز کانسار آهن سادات نشان داده شده است.

Figure 1-A) Simplified geological map of Iran, showing the main structural zones (taken from Stocklin, 1968 and Sahandi, 2002). B) East-central Iranian microcontinent with tectonic blocks (Sahandi, 2002) and major faults. The locations of several IOA deposits and the Sadat iron deposit are shown.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ناحیه کانسار سادات و پیرامون آن، بر پایه نقشه زمین‌شناسی سیریز (ضیا، ۱۳۸۳، با تغییر). چهار گوش، محدوده نقشه زمین‌شناسی در شکل ۳ را نشان می‌دهد.

Figure 2. Geological map of the Sadat deposit area and surroundings (modified after Zia, 2004). The square shows the area of the geological map in Figure 3.

می‌شود (شکل ۲). کانسار آهن سادات در بخش جنوبی این توده و در همبری آن با سنگ‌های رسوبی پالئوزویک زیرین تشکیل شده است. در نقشه زمین‌شناسی چهار گوش سیریز، یک مجموعه دگرگونی شامل شیبست آندالوزیت‌دار و گارنت‌دار در هسته یک ناودیس برگشته از سنگ‌های تریاس وجود دارد که عامل دگرگونی آن توده نفوذی سیریز معرفی شده و بر این اساس سن توده نفوذی پس از ژوراسیک گزارش شده است (ضیا، ۱۳۸۳). مشاهدات میدانی نشان می‌دهند که این واحد، یک پنجره زمین‌ساختی از سنگ‌های دگرگونی قدیمی‌تر است که با مرزهای گسلی در کنار واحدهای مزوزویک قرار گرفته است. این واحد دگرگونی، شامل شیبست، مرمر و کوارتزیت است و برگ‌وارگی ناحیه‌ای به‌خوبی در شیبست‌ها توسعه یافته است (شکل ۴). از سوی دیگر، هیچ آثار دگرگونی حرارتی در واحدهای تریاس-ژوراسیک دیده نمی‌شود. با توجه به این که توده نفوذی، واحدهای رسوبی کامبرین را قطع می‌کند، سن آن را می‌توان پس از کامبرین و پیش از مزوزویک در نظر گرفت.

۳-۲- زمین‌شناسی محلی محدوده معدن سادات

کهن‌ترین واحد سنگی در محدوده معدن سادات و پیرامون آن یک توالی رسوبی شامل دولومیت، دولومیت چرت‌دار، تناوب شیل و دولومیت، دولومیت با بین‌لایه‌های ماسه سنگ و دولومیت ستبرلایه چرت‌دار است که در اینجا با نام سازند کوهبان معرفی می‌شود (شکل ۳). در نقشه زمین‌شناسی چهار گوش سیریز، سازندی با این نام معرفی نشده، اما در گزارش نقشه، سازند کوهبان معادل بخش زیرین-میانی سازند درنجال و از کامبرین میانی-بالایی در نظر گرفته شده است (شکل ۲). در باختر و جنوب معدن، این سازند توسط روانه‌های گدازه آندزیتی تا بازالتی اردوویسین-

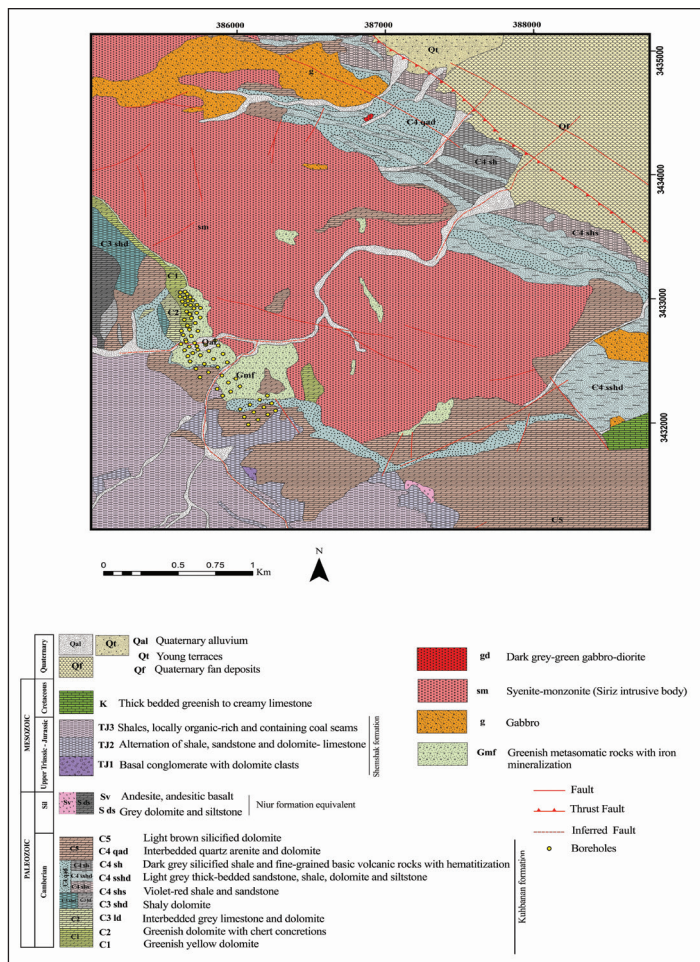
یک تفاوت آشکار ناحیه سیریز با ناحیه بافق-ساغند در بخش میانی بلوک کاشمر-کرمان، کمبود فعالیت‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی و نیمه-آتشفشانی کامبرین زیرین در سیریز است. بر اساس ضیا (۱۳۸۳)، سری ریزو یا معادل آن، واحد رسوبی-آتشفشانی کامبرین، در چهار گوش سیریز رخمون ندارد. با این حال، رخمون‌هایی از این سری با سنگ‌های آتشفشانی ریولیتی تا متوسط و بازیک و سنگ‌های رسوبی از چهار گوش داوران در جنوب خاور سیریز گزارش شده است (Vahdati-Daneshmand et al., 1995) که نشان می‌دهد سری ریزو به سوی جنوب بلوک کاشمر-کرمان نیز گسترش دارد.

پالئوزویک بالایی در چهار گوش سیریز، محدود به یک واحد سنگ آهک دولومیتی بلورین (معادل سازند بهرام از دونین بالایی) در جنوب باختر روستای سیریز است (ضیا، ۱۳۸۳). تریاس زیرین-میانی با شیل‌های قرمز رنگ و ماسه سنگ ستبرلایه (هم‌ارز سازند سرخ شیل)، دولومیت‌های ستبرلایه سازند شتری و سنگ آهک اسپهک معرفی می‌شود. پس از یک دوره خشکی‌زایی، پیش‌روی دریا در تریاس پایانی، تناوبی از سنگ آهک دولومیتی، دولومیت و شیل سازند نایند را پدید می‌آورد که خود با توالی ماسه سنگ و شیل زغال‌دار سازند شمشک پوشیده می‌شود. کرتاسه با توالی ستبری از کنگلومرا، مارن، ژپس و سنگ آهک ستیغ‌ساز معرفی می‌شود که گسترش زیادی در چهار گوش سیریز دارد. این توالی به طور محلی با لایه‌های کنگلومرای پالتوسن پوشیده شده است. جوان‌ترین واحد سنگی، مارن‌های رنگین نئوژن است که در باختر ورقه سیریز گسترش زیادی دارد. بخش بزرگی از ورقه سیریز را نهشته‌های کواترنری پوشانده است.

در بخش جنوب باختری چهار گوش سیریز، یک توده نفوذی بزرگ با ترکیب چیره سینیتی-مونزویتی رخمون دارد که در اینجا با نام توده نفوذی سیریز معرفی

از یک کنگلومرای قاعده‌ای، سنگ آهک اوریتولین‌دار و مارن پوشیده شده‌اند (شکل ۵). رسوبات آبرفتی کوآترنری مناطق وسیعی را در شمال باختری منطقه معدن پوشانده‌اند.

سیلورین پوشیده شده است. مجموعه‌ای از کنگلومرای قاعده‌ای، شیل، شیل کربنی و ماسه‌سنگ که به عنوان سازند شمشک شناخته می‌شود، مناطق وسیعی را در جنوب و باختر معدن پوشانده است (شکل ۳). این سنگ‌ها توسط لایه‌های کرتاسه متشکل



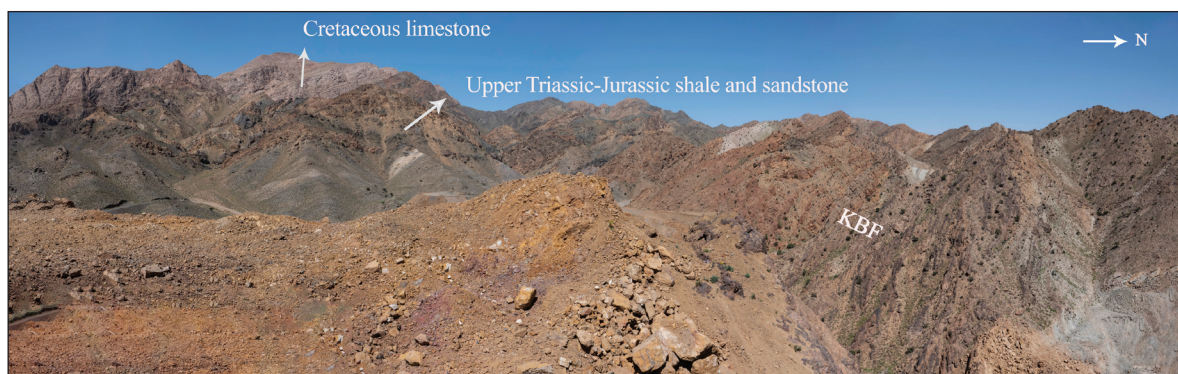
شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی معدن سادات (شرکت مجتمع صنعت و معدن ذوب آهن جنوب شرق ایران، ۱۳۹۱، با تغییر).

Figure 3. Geological map of the Sadat mine area (modified after Southeast Iranian Iron and Steel Industries and Mining Complex Co., 2012).



شکل ۴- نمایی از رخنمون واحد دگرگونه، شامل شیست (خاکستری رنگ) و مرمر (کرم رنگ، گوشه شمال خاوری). برگ‌وارگی به‌خوبی در شیست توسعه یافته است.

Figure 4. Outcrop view of the metamorphic unit, consisting of schists (gray) and marble (creamy, NE corner). Foliation is well developed in the schist.



شکل ۵- نمای پانوراما که نشانگر واحدهای سنگی در ناحیه سادات است. سازند کوهبنان (KBF) به سمت جنوب و باختر با همبری گسلی در کنار توالی ماسه‌سنگ و شیل سازند شمشک از تریاس پایانی-ژوراسیک قرار می‌گیرد که خود با سنگ آهک کرتاسه پوشیده می‌شود.

Figure 5. A panoramic view of the rock units in the Sadat mine area. To the south and west, the Kuhbanan Formation is in faulted contact against the Late Triassic-Jurassic Shemshak Formation, consisting of sandstone and shale, that is in turn covered by Cretaceous limestone.

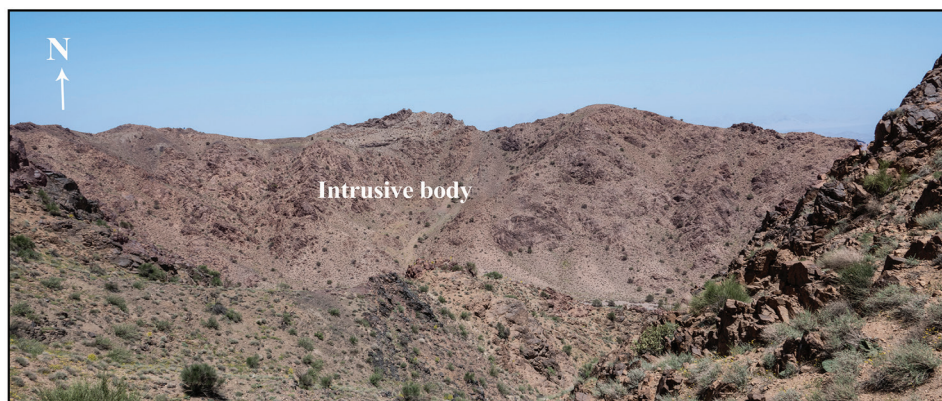
این کانی به شکل میان‌بار در کانی‌های سیلیکاتی و به صورت بین‌دانه‌ای دیده می‌شود که نشانگر منشا ماگمایی آن است. آپاتیت در توده‌های نفوذی متوسط-فلسیک از نخستین کانی‌هایی است که از ماگما متبلور می‌شود و رخداد آن به صورت میان‌بار در کانی‌های ماگمایی دیگر متداول است (Piccoli and Candela, 2002; Adlakha et al., 2018). تیتانیت به دو شکل بین‌دانه‌ای (intergranular) و در تعادل بافتی با کانی‌های سیلیکاتی، و همین‌طور ثانوی دیده می‌شود. تیتانیت به عنوان کانی ماگمایی از بسیاری توده‌های نفوذی گزارش شده است (Frost et al., 2001; Henze et al., 2023). تیتانیت اولیه با بلورهای گوه‌ای شکل و میان‌بارهایی از آپاتیت دیده می‌شود (شکل ۸-۷).

توده نفوذی سیریز در محدوده کانسار سادات کم‌ویش دگرسان شده است. دگرسانی آلپیتی و جانیشینی پلاژیوکلازها و فلدسپارهای پتاسیمی به آلپیت، از مهم‌ترین رخدادها در این توده هستند (شکل ۸-۷). پلاژیوکلازها و فلدسپارهای قلیایی کم‌ویش سریسیتی و رسی شده‌اند (شکل ۸-۷). کلریت، محصول دگرسانی کانی‌های مافیک اولیه سنگ (بیوتیت و آمفیبول) است که در بیشتر نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۸-۷).

۳-۳- مجموعه نفوذی سیریز

بارزترین واحد سنگی در محدوده معدن سادات و پیرامون آن، یک توده نفوذی با ترکیب چیره سینیتی-مونزونیتی است که همبستگی مکانی آشکاری با کانی‌سازی دارد. این توده در رخنمون‌های طبیعی با رنگ مایل به صورتی و خاکستری و بافت چیره گرانولار مشخص می‌شود (شکل ۶-۸). یک ویژگی این توده، که ناشی از همگن بودن آن است، سیستم‌های شکستگی منظم است که به طور محلی ظاهر لایه‌ای به آن داده است (شکل ۶-۸). در بخش‌های شمالی و خاوری کانسار، این توده در همبری با سازند کوهبنان دیده می‌شود (شکل ۷).

کانی‌های اصلی شامل پلاژیوکلاز و آلکالی-فلدسپار است که با مقادیر متفاوتی کوارتز، بیوتیت و هورنبلند همراهی می‌شوند. کانی‌های ثانوی شامل کلریت، کلسیت و کانی‌های رسی است (شکل ۸). پلاژیوکلاز عموماً با بلورهای وجه‌دار دیده می‌شود که نشانگر تبلور پیشین آن از ماگما است (شکل ۸-۸). ارتوزکلاز و میکروکلین با بلورهای بی‌وجه تا نیمه‌وجه‌دار و وجه‌دار و گاه ماکل‌های کارلسباد و شطرنجی وجود دارند (شکل ۸-۸). آپاتیت با بلورهای کشیده تا سوزنی وجه‌دار تا نیمه‌وجه‌دار حضور دارد (شکل ۸-۷) و فراوانی آن تا بیش از ۱٪ ترکیب مودال سنگ می‌رسد.



شکل ۶- رخنمون‌هایی از توده نفوذی سادات. (A) در بخش شمال خاوری کارگاه استخراج مرکزی. (B) بخش خاوری کارگاه استخراج مرکزی، با یک سیستم درز و شکستگی منظم.

Figure 6. Outcrops of the Sadat intrusive body: A) to the northeast of the main (central) pit. B) to the east of the main pit, showing a set of systematic joints and fractures.



شکل ۷- نمایی از کارگاه استخراج اصلی کانسار آهن سادات، با رخنمونی از توده نفوذی در همبری با سازند کوهبنان. (KBF) در بخش باختری کارگاه استخراج، توده نفوذی با همبری گسلی در کنار نهشته‌های رسوبی تریاس بالا-ژوراسیک زیرین قرار دارد.

Figure 7. A view of the main mining pit in the Sadat iron deposit, with outcrops of the intrusive body in contact with the Kuhbanan Formation (KBF). To the west, the Upper Triassic-Lower Jurassic sedimentary rocks are in faulted contact against the intrusive body.

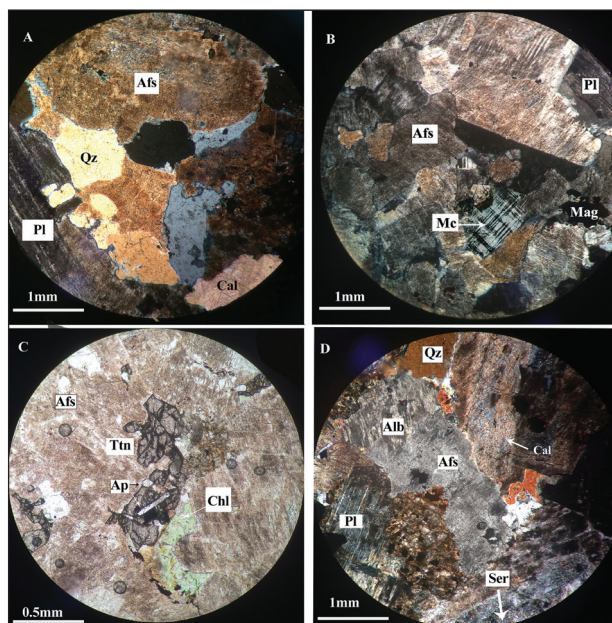


Figure 8. Microphotographs of samples representing the intrusive body in the Sadat deposit area; A, B, D in XPL; C in PPL. A) Coarse crystals of orthoclase and plagioclase with argillic alteration. B) Microcline with tartan texture, plagioclase with polysynthetic twinning, and orthoclase with carlsbad twinning. Minor magnetite occurs in the rock. C) Titanite, containing apatite inclusions, interstitial to the main rock-forming minerals; chlorite is a product of alteration of the mafic minerals. D) Plagioclase with polysynthetic twinning, and orthoclase partially replaced by albite. Minor argillic, carbonate, and silicic alterations can be distinguished. Mineral abbreviation from (Whitney and Evans, 2010).

PPL: Plane polarized light; XPL: cross polarized light

Afs: Alkali feldspar, Ap: Apatite, Cal: Calcite, Chl: Chlorite, Pl: Plagioclase, Qtz: Quartz, Ser: Sericite, Ttn: Titanite

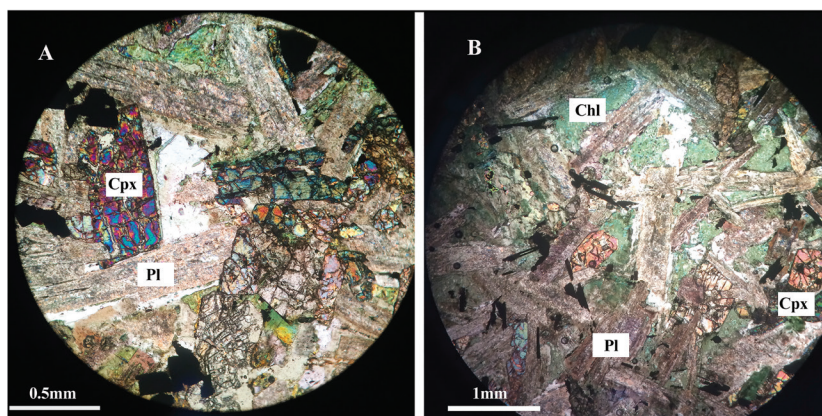
و در تعادل بافتی با کانی‌های سیلیکاتی وجود دارد که منشا ماگمایی را برای آن پیشنهاد می‌نماید. پلاژیوکلازها در امتداد رخ (کلیواژ) و ماکل و حاشیه بلورها کم‌ویش رسی شده‌اند. کلینوپیروکسن تا حد زیادی کلریتی شده‌است (شکل ۱۰- B). به طور محلی، دگرسانی سیلیسی و کربناتی نیز در سنگ رخ داده است.

در فاصله ۲ کیلومتری خاور کانسار سادات، یک توده نفوذی مافیک با ترکیب گابرو، مونزوگابرو و مونزو دیوریت و دایک‌های وابسته به آن برونزد دارد (شکل ۹). کانی‌های اصلی این توده، پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن با نسبت‌های کم‌ویش برابر و کانی فرعی آن، ارتوز است. بافت چیره این توده ساب‌افیتیک تا گرانولار است (شکل ۱۰- A). مگنتیت به عنوان کانی همراه



شکل ۹- برونزد توده نفوذی مافیک در بخش خاوری محدوده معدنی.

Figure 9. Outcrop of the mafic intrusive body in the eastern part of the mining area.



شکل ۱۰- تصاویرهای میکروسکوپی توده نفوذی مافیک سادات در XPL. A) کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در بافت اُپیتی. B) همراهی بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن که به ترتیب دستخوش دگرسانی‌های رسی و اورالیتی رسی شده‌اند.

Figure 10. Microphotographs of the Sadat mafic intrusive rocks in XPL. A) Clinopyroxene and plagioclase in ophitic texture. B) Association of plagioclase and clinopyroxene crystals, partially altered to clay minerals and urallite, respectively.

۳-۴- دگرسانی کالک-سیلیکاتی (اسکارنی)

است (Meinert, 1992). بسته به این که این واکنش‌های دگرسانی در توده نفوذی یا در سنگ‌های میزبان آن رخ دهد، مجموعه کالک-سیلیکاتی حاصل با عنوان‌های درون-اسکارن و برون-اسکارن معرفی شده است (Einaudi et al., 1981).

این دگرسانی که با تشکیل کانی‌های سیلیکاتی غنی از کلسیم و/یا منیزیم $\pm$ آهن در اثر واکنش سیال-سنگ یا واکنش‌های هم‌شیمیایی رخ می‌دهد، شاخص اسکارن‌ها

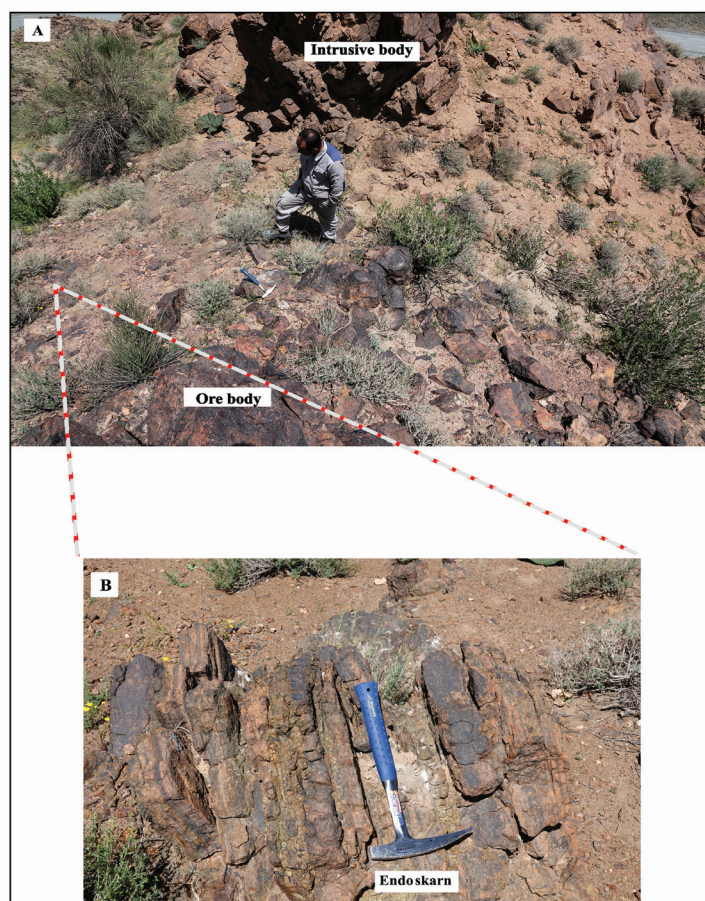
تا نیمه‌وجه‌دار حضور دارد (شکل‌های ۱۲-A و ۱۲-C) که گاه در حاشیه به کلریت تبدیل شده است. در برخی نمونه‌ها، اندکی ولاستونیت با بلورهای ریز تا متوسط و فابریک شعاعی مشاهده شد (شکل ۱۲-A).

فلوگوپیت با بلورهای بزرگ تا کوچک، با اندازه ۱ تا ۵ میلی متر، و رنگ‌های بیرفرانزاس بارز زرد-قهوه‌ای-سبز در بسیاری از نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۱۲-E). بلورهای ورقه‌ای فلوگوپیت در بیشتر نمونه‌ها دگرشکل شده‌اند که این با خمیدگی محورهاهای بلورشناسی و خاموشی موجی مشخص می‌شود. با توجه به روابط بافتی، فلوگوپیت از کانی‌های مربوط به مرحله اسکارن پس‌رونده است. بلورهای فلوگوپیت گاه در حاشیه به کلریت تبدیل شده‌اند.

جانشینی فلدسپارها با تیتانیت (شکل ۱۲-D) و کلسیت (شکل‌های ۱۲-F و ۱۲-C) و کلریتی شدن کانی‌های مافیک (شکل ۱۲-E) از دیگر رخداد‌های دگرسانی در درون-اسکارن سادات است.

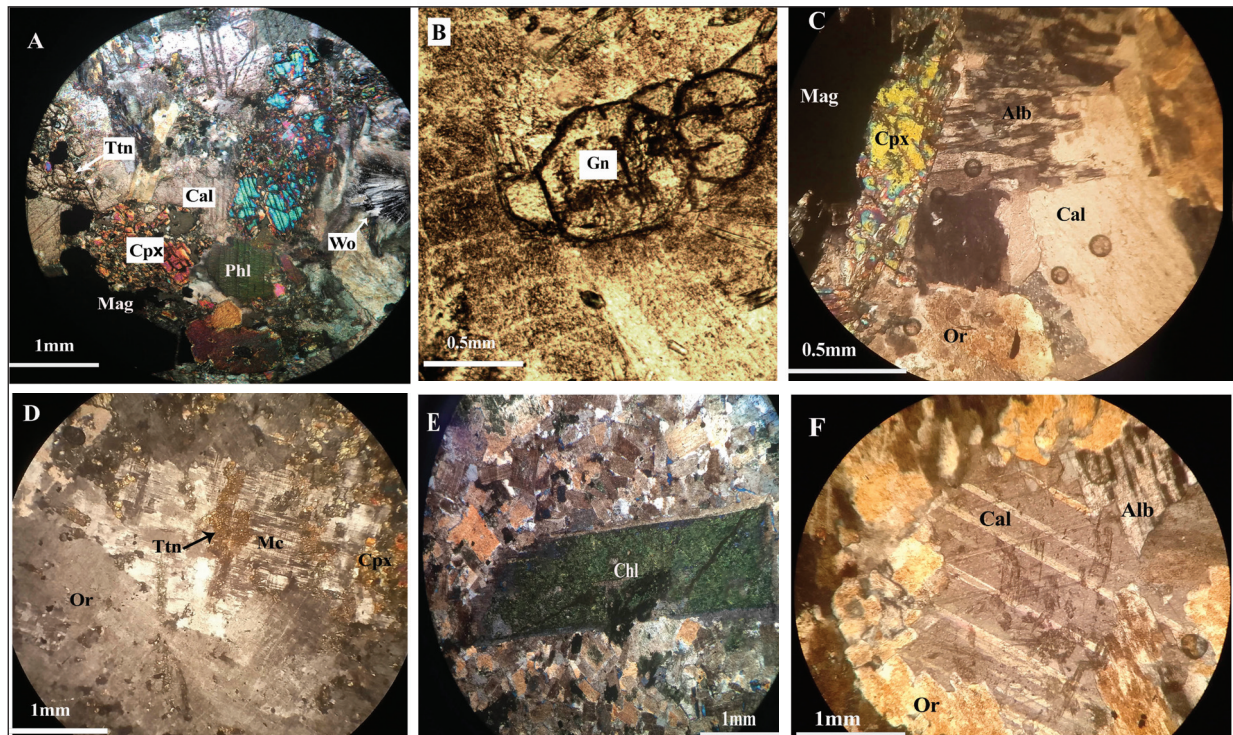
(Meinert et al., 2005). کانی‌های کالک-سیلیکاتی همچنین بر اساس ترکیب شیمیایی و شرایط تشکیل، به دو گروه کانی‌های بی‌آب (مانند ولاستونیت، گارنت و پیروکسن) و آب‌دار (مانند ترمولیت-اکتینولیت و اپیدوت) تفکیک شده‌اند که گروه نخست با عنوان اسکارن پیش‌رونده و گروه دوم با عنوان اسکارن پس‌رونده شناخته می‌شود (Meinert et al., 2005). مانند بسیاری از ذخایر اسکارنی دیگر، مجموعه‌های کالک-سیلیکاتی در کانسار سادات پدید آمده است.

– **درون-اسکارن** (شکل ۱۱) در سادات با حضور گارنت، کلینوپیروکسن و ولاستونیت از کانی‌های شاخص اسکارن بی‌آب و فلوگوپیت، کلریت و سریست از کانی‌های آب‌دار مشخص می‌شود (شکل ۱۲). گارنت به صورت پراکنده با بلورهای وجه‌دار تا نیمه‌وجه‌دار وجود دارد (شکل ۱۲-B). کلینوپیروکسن با بلورهای بی‌وجه



شکل ۱۱- A) نمایی از یک توده کانستگ آهن در توده نفوذی و درون‌اسکارن همراه با آن در بخش شمالی کانسار سادات. B) نمای نزدیک از درون اسکارن که در این محل غنی از فلوگوپیت است. یک سیستم شکستگی موازی، ساخت لایه‌ای به توده نفوذی داده است.

Figure 11-A) An iron ore body hosted in the intrusive body and associated endoskarn in the northern section of the Sadat deposit. B) Close-up of the endoskarn in the intrusive body, distinguished by abundant phlogopite. A set of parallel fractures renders a layered structure to the intrusive rock.



شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های معرف درون‌اسکارن در محدوده کانسار سادات در B، XPL؛ در A، PPL. A) کلینوپیروکسن و ولاستونیت، همراه با فلوگوپیت، کلسیت، مگنتیت و تیتانیت. B) بلورهای گارنت همراه با بلورهای پلاژیوکلز با دگرسانی رسی. C) آلپیت، پیروکسن، ارتوز و کلسیت. D) بلورهای ارتوز، میکروکلین، تیتانیت و کلینوپیروکسن. تیتانیت جانشین میکروکلین شده است. E) بلور درشت هورنبلند کلریتی در زمینه کوارتز-فلدسپاتی. F) کلسیت درشت‌بلور که جایگزین فلدسپات شده است.

Figure 12. Microphotographs from rocks representing the Sadat deposit endoskarn. A, C, D, E, F in XPL; B in PPL. A) Association of clinopyroxene, wollastonite, phlogopite, calcite, magnetite and titanite. B) Garnet crystals enclosed in clay-altered plagioclase crystals. C) Albite, pyroxene, orthoclase, and calcite. D) Orthoclase, microcline, titanite, and clinopyroxene. Titanite has replaced microcline. E) A coarse chloritized hornblende crystal in quartz-feldspathic matrix. F) Coarse calcite replacing feldspars.

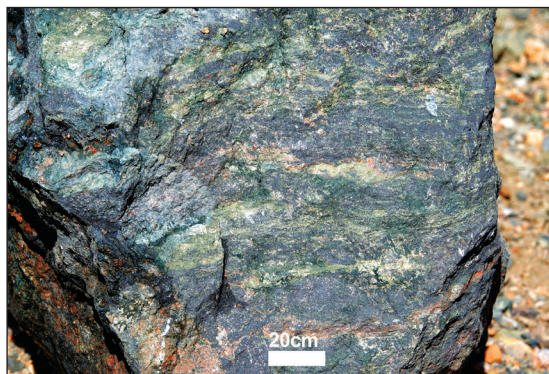
و رنگ‌های بیرفرزئانس گوناگون (شکل ۱۵-B) و فلوگوپیت به همان شکل که در درون-اسکارن توصیف شد، حضور دارند (شکل ۱۵). کلسیت درشت‌بلور از کانی‌های متداول در برون‌اسکارن سادات است. کوارتز به صورت پراکنده در بیشتر نمونه‌ها مشاهده شد (شکل ۱۵-C). آکتینولیت-ترمولیت با بلورهای کشیده تا سوزنی و دسته‌های بلوری شعاعی وجود دارد (شکل ۱۵-B). تیتانیت با بلورهای وجه‌دار تا نیمه‌وجه‌دار و بی‌شکل مشاهده شد (شکل ۱۵-C).

برون-اسکارن در سنگ‌های میزبان رسوبی سازند کوهبنان، به‌ویژه در لایه‌های کربناتی گسترش یافته است (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) و با کانی‌های گارنت، کلینوپیروکسن، ولاستونیت، فلوگوپیت، اپیدوت، آکتینولیت-ترمولیت، کلسیت، کوارتز، تیتانیت، مگنتیت و پیریت مشخص می‌شود (شکل ۱۵-A). کلینوپیروکسن با بلورهای کم‌ویش کشیده و رنگ‌های بیرفرزئانس سری اول و ولاستونیت با بلورهای خاکستری کشیده تا فیبری (شکل ۱۵-A) دیده می‌شود. اپیدوت با برجستگی بالا



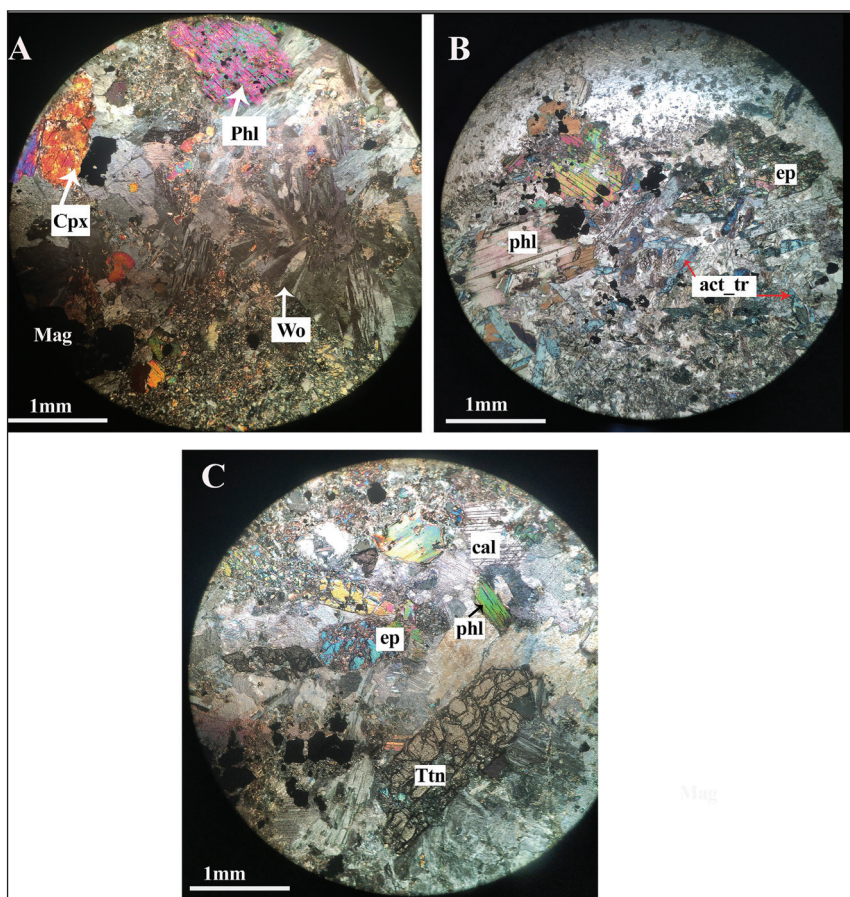
شکل ۱۳- نمایی از همبری سازند کوهبنان با توده نفوذی در خاور کارگاه استخراج مرکزی کانسار سادات. در اینجا درون-اسکارن و برون-اسکارن به‌خوبی توسعه یافته است. یک توده کانسنگ آهن در برون-اسکارن دیده می‌شود.

Figure 13. A view of the Kuhbanan Formation at contact with the intrusive body to the east of the central pit of the Sadat deposit. Here, the endoskarn and exoskarn are well developed. An iron ore body occurs in the exoskarn.



شکل ۱۴- نمایی از بافت نواری در یک تخته سنگ از برون-اسکارن کانسار سادات که شامل نوارهای غنی از مگنتیت و نوارهای غنی از کلسیت، اپیدوت و فلوگوپیت است.

Figure 14. A view of banded texture in a boulder from the exoskarn in the Sadat deposit, consisting of magnetite-rich bands and magnetite-poor, calcite, epidote, and phlogopite bands.



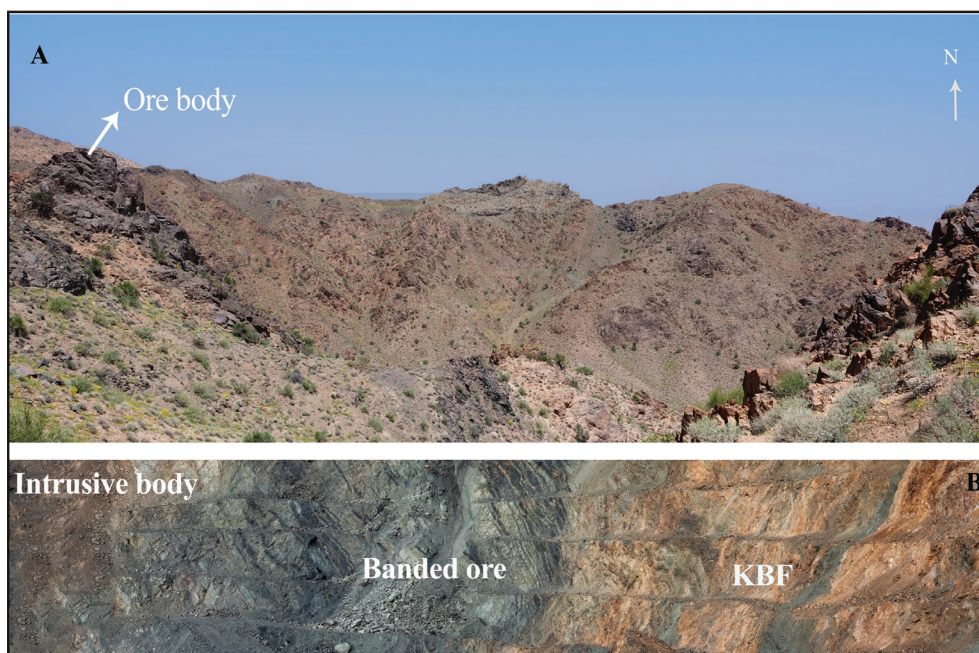
شکل ۱۵- تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های معرف برون-اسکارن در کانسار سادات در XPL. A) ولاستونیت، کلینوپروکسن، فلوگوپیت، کلسیت و مگنتیت. B) فلوگوپیت، اپیدوت و ترمولیت-اکتینولیت در زمینه کربنات. C) فلوگوپیت، اپیدوت، تیتانیت در زمینه کربناتی.

Figure 15. Microphotographs of samples representing the exoskarn in the Sadat deposit in XPL. A) Wollastonite, clinopyroxene, phlogopite, calcite, and magnetite. B) Phlogopite, epidote, and tremolite-actinolite in calcite matrix. C) Phlogopite, epidote, and titanite in calcite matrix.

بافت توده‌ای است. بخشی از کانی‌سازی به صورت جانشینی گزینشی و به موازات لایه‌بندی سنگ‌های رسوبی دربرگیرنده دیده می‌شود که کانسنگی با بافت نواری پدید آورده است (شکل ۱۶-B). انباشت‌های پراکنده کانسنگ با بافت چیره توده‌ای در خود توده نفوذی نیز تشکیل شده است (شکل ۱۶-A).

۳-۵- کانی‌سازی آهن

کانسنگ آهن در معدن سادات به طور عمده در ۳ توده نسبتاً بزرگ در امتداد شمالی-جنوبی تا شمال باختری- جنوب خاوری و چند انباشت کوچک و پراکنده وجود دارد. کانی‌سازی بیشتر در برون-اسکارن رخ داده است. بافت چیره کانسنگ،



شکل ۱۶- A) نمای از یک توده کانسنگ آهن در توده نفوذی در بخش خاوری معدن سادات. B) کانسنگ نواری در بخش خاوری کارگاه استخراج روباز کانسار سادات که محصول جانشینی گزینشی لایه‌های کربناتی با مگنتیت در میان لایه‌های ماسه‌سنگ و سیلت‌استون در سازند کوهبنان (KBF) است.

Figure 16- A) An iron ore body hosted in the intrusive body in the eastern part of the Sadat mine. B) Outcrop of banded ore to the east of the main ore body in the Sadat deposit, developed by selective replacement of the carbonate layers interbedded with siliciclastic rocks in the Kuhbanan Formation.

و افزایش دما سبب واکنش‌های هم-شیمیایی و تشکیل کانی‌های کالک-سیلیکاتی بی‌آب شده است. بررسی‌های سنگ‌نگاری، کانی‌های گارنت، پیروکسن و ولاستونیت را در مرحله اسکارن پیش‌رونده تایید می‌کند. سنگ‌های تک‌کانی مانند ماسه سنگ و سنگ آهک فقط تجدید تبلور یافته و به کوارتزیت و مرمر تبدیل شده‌اند. واکنش‌های اسکارن پیش‌رونده و تشکیل کانی‌های خاص آن در کانسار سادات، گسترش چندانی ندارد یا حفظ نشده است. منطقه‌بندی و نظم یا الگوی خاصی در توزیع کانی‌های کالک-سیلیکاتی دیده نمی‌شود. در تشکیل منطقه‌بندی اسکارن عوامل گوناگونی از جمله ژرفای تشکیل، ترکیب ماگما و توده نفوذی مولد، زمان خروج سیال گرمایی از ماگما در روند تحول توده نفوذی مادر، حالت اکسایش-کاهش ماگما (Redox state) و ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی سنگ‌های دیواره موثرند (Chang and Meinert, 2008).

– **اسکارن پس‌رونده:** با کاهش دما و افزایش فعالیت آب، کانی‌های کالک-سیلیکاتی آب‌دار تشکیل می‌شود که ممکن است به صورت جانشینی کانی‌های بی‌آب مرحله اسکارن پیش‌رونده یا جدا از آن پدید آیند (Einaudi et al., 1981; Meinert et al., 2005). در کانسار سادات، مجموعه کانی‌های کالک-سیلیکاتی آب‌دار مانند فلوگوپیت، ترمولیت-اکتینولیت و اپیدوت از مهم‌ترین کانی‌هایی هستند که در مرحله اسکارن پس‌رونده شکل گرفته‌اند. کلسیت و کلریت نیز از کانی‌های همراه هستند. کانی‌سازی آهن (مگنتیت) نیز همزمان با این مرحله از تحول سامانه اسکارن رخ داده است. فاز سولفیدی، با حضور پیریت و اندکی کالکوپیریت که غالباً به صورت جانشینی در کانسنگ آهن پدید آمده، یک فاز دیر هنگام بوده و پس از مگنتیت شکل گرفته است. کلریتی شدن در حاشیه فلوگوپیت‌ها در مرحله پایانی رخ داده است.

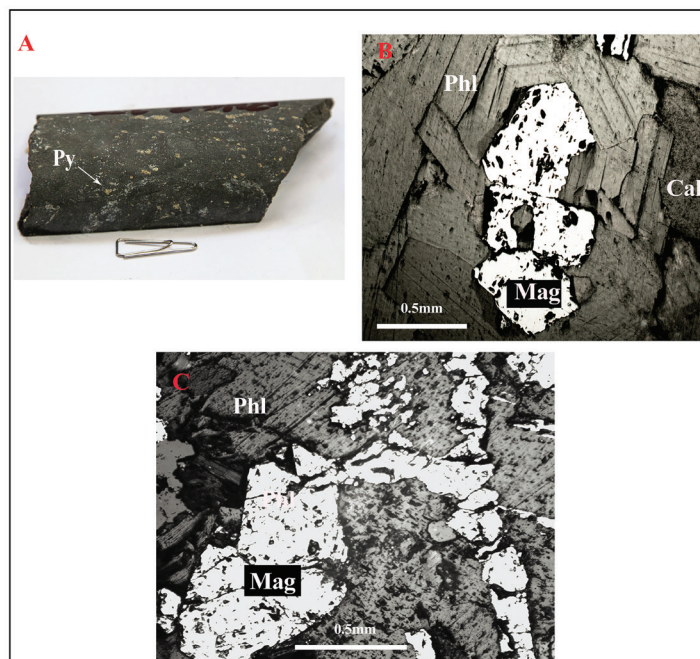
کانسنگ آهن در معدن سادات، ترکیب کانی شناختی ساده‌ای دارد. مگنتیت کانی اصلی است که به‌طور محلی با پیریت و اندکی کالکوپیریت همراهی می‌شود. پیریت یک فاز کانی دیر هنگام نسبت به مگنتیت است و عموماً به صورت جانشینی آن در امتداد درز و شکستگی‌ها و همین‌طور بلورهای پراکنده در مگنتیت وجود دارد (شکل ۱۷- A).

کانی‌های غیرفلزی همراه، به ترتیب فراوانی شامل فلوگوپیت، کلسیت و کوارتز است. فلوگوپیت از کانی‌های غیرفلزی اصلی در اسکارن سادات است. با توجه به فراوانی نسبی فلوگوپیت در درون-اسکارن و برون-اسکارن و همین‌طور به عنوان کانی همراه در کانسنگ، کانسار آهن سادات را می‌توان اسکارن منیزیمی معرفی کرد. لایه‌های سنگ آهک دولومیتی و دولومیت در سنگ میزبان (سازند کوهبنان) یک منبع مهم برای منیزیم بوده است. فلوگوپیت غالباً در تعادل بافتی با مگنتیت و همزاد با آن دیده می‌شود (شکل ۱۷- B). مگنتیت به صورت قطع‌کننده فلوگوپیت نیز مشاهده شد که نشان می‌دهد کانی‌سازی آهن به‌طور محلی پس از تشکیل فلوگوپیت ادامه داشته است (شکل ۱۷- C).

۳-۶- توالی پاراژنزی اسکارن سادات

پاراژنزی کانیایی در ذخایر معدنی تابع شرایط ترکیب شیمیایی، Eh، pH، دما و فشار سیال و همین‌طور ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی محیط میزبان است (Guilbert and Park, 1985). بر پایه مطالعات صحرایی، سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، مراحل تشکیل اسکارن و کانی‌سازی در کانسار آهن سادات به شرح زیر است (شکل ۱۸):

– **اسکارن پیش‌رونده:** با نفوذ توده گرانیتویدی سیریز با ترکیب چیره سینومونزونیته در مجموعه سنگ‌های رسوبی پالئوزویک زیرین، دگرگونی مجاورتی پدید آمده



شکل ۱۷- تصاویر میکروسکوپی در نور بازتابی و یک نمونه مغزه حفاری که کانی شناسی و روابط بافتی در نمونه های معرف کانسنگ را نشان می‌دهند. (A) پیریت افشان و رگچه‌ای که با جانشینی مگنتیت پدید آمده است. (B) مگنتیت، فلوگوپیت و کلسیت در تعادل بافتی با یکدیگر در یک نمونه درون - اسکارن. (C) مگنتیت که زمینه غنی از فلوگوپیت را قطع کرده است.

Figure 17. Reflected light microphotographs and a drill core sample showing the mineralogy and textural relationships in the ore. A) Pyrite occurring as disseminated grains and in veinlets replacing magnetite. B) Magnetite, phlogopite, and calcite in textural equilibrium. Sample from endoskarn. C) Magnetite veinlets developed in phlogopite.

Minerals	Prograde Skarn	Retrograde Skarn	
		Early	Late
Garnet			
Pyroxene			
Wollastonite			
Calcite I			
Phlogopite			
Epidote			
Tremolite- Actinolite			
Calcite II			
Magnetite			
Pyrite			
Chalcopyrite			
Chlorite			
Calcite III			
Quartz			

شکل ۱۸- پاراژنز و توالی پاراژنری در کانسار اسکارن آهن سادات.

Figure 18. Paragenesis and paragenetic sequence in the Sadat iron skarn deposit.

مگنتیت می‌تواند در جایگاه‌های هشت‌وجهی و چهار وجهی شبکه بلوری خود میزبان عناصری مانند Mg^{2+} , Al^{3+} , Si^{4+} , Ca^{2+} , Ti^{4+} , V^{3+} , 4^{+} , Cr^{3+} , Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Ga^{3+} , Mo^{4+} , Sn^{4+} باشد که بررسی توزیع این عناصر برای درک فرایندهای کانه‌ساز مفید است (Xie et al., 2022; Deditius et al., 2018; Nadoll et al., 2012). آساوینچارونکیچ و همکاران (Assawincharoenkij et al., 2024) با آنالیز LA-ICP-MS نمونه های مگنتیت از ذخایر آهن اسکارنی تایلند، تا بیش از ۶۰۰۰۰ ppm سیلیسیم گزارش کردند. بر اساس توزیع عنصری حاصل از آنالیز EPMA، بیشتر سیلیس به صورت ذرات جامد وجود داشت.

۳-۷- ژئوشیمی مگنتیت

مگنتیت یک کانی معمول در سنگ‌های آذرین، رسوبی، دگرگونی در بسیاری از ذخایر معدنی است و در طیف گسترده‌ای از شرایط محیطی پایدار می‌باشد (Deer et al., 2013). در ذخایر معدنی، این کانی بسته به فرایندهای زایشی و محیط زمین‌شناسی تشکیل کانسنگ، ترکیب شیمیایی کم‌ویش متفاوتی نشان می‌دهد (Han et al., 2022). بر این اساس با تعیین ترکیب شیمیایی مگنتیت، به‌ویژه عناصر فرعی همراه، و مقایسه آن با انواع شناخته شده کانسنگ‌های آهن، می‌توان به محیط زمین‌شناسی و نوع زایشی یک ذخیره خاص پی برد.

۳-۸- اکسیدهای اصلی

مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌نگاری نمونه‌های کانسنگ، حضور فازهای جامد پیریت، کلسیت، کوارتز و فلوگوپیت را در کانسنگ معدن سادات نشان می‌دهد. همان گونه که در جدول ۱ دیده می‌شود، نمونه فراوری شده کانسنگ معدن سادات، ۸۵/۲ درصد وزنی FeO دارد. تیتانیم و منگنز به ترتیب با فراوانی ۲۸۷۷ و ۱۲۳۹ ppm (معادل ۰/۴۸ و ۰/۱۶ درصد وزنی) سازگار در ساختار شبکه‌ای مگنتیت هستند (Deditius et al., 2018) و جایگزین Fe می‌شوند. بخش مهمی از کلسیم توسط کلسیت حمل شده است که به مقدار کم در کانسنگ فراوری شده وجود دارد. فلوگوپیت با فرمول آرمانی $\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$ مهم‌ترین

میزبان برای آلومینیم و منیزیم، به ترتیب با فراوانی ۰/۸۷ و ۰/۹۶ (درصد وزنی اکسید) است. اما با توجه به فراوانی اندک پتاسیم (۰/۱۸ درصد وزنی اکسید)، و در نظر گرفتن نسبت فراوانی K, Mg, Al در فلوگوپیت، این کانی نمی‌تواند پاسخگوی تمامی منیزیم و آلومینیم باشد. می‌توان انتظار داشت که بخشی از آلومینیم و منیزیم به صورت جانشینی شبکه‌ای در مگنتیت حضور داشته باشد (Deditius et al., 2018; Nadoll et al., 2012). بخشی از منیزیم می‌تواند به صورت جانشینی کلسیم توسط کلسیت حمل شده باشد. با توجه به کانی‌شناسی کانسنگ، فاز کانی اصلی حاوی پتاسیم، فلوگوپیت است که به مقدار کم در کانسنگ فراوری شده وجود دارد.

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی کنسانتره مگنتیت کانسار آهن سادات (اکسیدها به درصد وزنی، عناصر به ppm).

Table 1. Chemical analysis of magnetite concentrate from the Sadat iron ore deposit (oxides in %wt, elements in ppm).

sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fet	FeO	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	LOI
	3.74	0.87	0.87	66.23	85.20	0.18	0.96	0.16	0.13	<	0.83	0.48	-1.99
	Ag	As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Er
	0.9	20.1	50	1	<0.1	0.1	4	10	56	0.6	3	0.9	0.9
	Eu	Gd	Hf	In	La	Li	Lu	Mo	Nb	Nd	Ni	P	Pb
SDT-01	0.13	1.09	<0.5	<0.5	<1	15	0.1	<0.5	5.2	<0.5	17	199	52
	Pr	Rb	S	Sb	Sc	Se	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Te	Th
	1.54	17	2284	<0.5	<0.5	<0.5	0.9	6	12	<0.1	0.2	<0.5	1.1
	Tl	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr	LREE	HREE	LREE/HREE	Sum_REE
	<0.1	0.2	0.7	252	5.1	<0.5	6.51	275	25	7.66	8.81	0.87	16.47

این ناشی از افزایش وزن با گداز (Gain On Ignition)، به دلیل اکسایش FeO به Fe_2O_3 است (Watanabe et al., 2013).

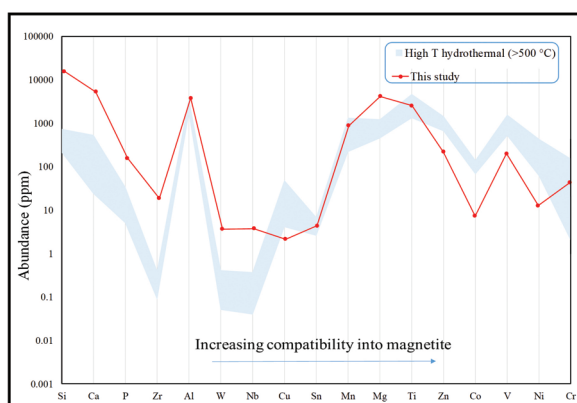
۳-۹- عناصر فرعی و کمیاب ماده معدنی

ذخایر آهن در شرایط متفاوتی، از ارتومگمایی (جدایش اکسید آهن از مذاب‌های سیلیکاتی) تا نهشت از سیال‌های گرمایی با خاستگاه‌های گوناگون، به‌ویژه گرمایی-ماگمایی، و همین‌طور رسوبی-دیاژنتیکی تشکیل می‌شوند (Dare et al., 2014; Peng et al., 2021). عواملی چون ترکیب شیمیایی، دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن سیال، برهمکنش سیال-سنگ، و ترکیب سنگ‌های میزبان از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی کانسنگ‌های آهن و فراوانی عناصر فرعی و کمیاب در مگنتیت هستند (Nadoll et al., 2014; Zeng et al., 2023). در و همکاران (Dare et al., 2014) یک نمودار توزیع بر اساس میزان سازگاری عناصر برای ورود به شبکه مگنتیت ارائه دادند. در شکل ۱۹ فراوانی ۱۷ عنصر در نمونه مگنتیت کانسار سادات، با فراوانی بالاتر از حد تشخیص دستگاهی، با ترتیب پیشنهادی در و همکاران (Dare et al., 2014) نشان داده شده است. در این شکل، ترکیب مگنتیت گرمایی بالا-دما (۷۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) نیز برای مقایسه دیده می‌شود. نمونه کانسنگ کانسار سادات نسبت به مگنتیت‌های گرمایی بالا-دما حاوی مقدار کمتری از عناصر به نسبت سازگار (Ti, Zn, Co, Ni, V) و مقدار بیشتری از عناصر به نسبت ناسازگار (Si, Al, Ca, Mg) غنی‌شدگی نسبی Si, Al, Ca, Mg را می‌توان تاحدی به

سیلیس SiO₂ با فراوانی ۳/۷۴٪ بیشترین ناخالصی در ترکیب کانسنگ است. با توجه به مطالعات سنگ‌نگاری، بخش مهمی از سیلیس به صورت کوارتز وجود دارد. فراوانی فسفر که معمولاً به صورت P₂O₅ گزارش می‌شود، در نمونه کانسنگ سادات کمتر از حد تشخیص دستگاهی (۰/۰۵ درصد وزنی) است. آنالیز ICP-MS مقدار فسفر را ۱۹۹ ppm نشان داده است که ناشی از حضور مقدار بسیار کمی آپاتیت در نمونه فراوری شده است. آپاتیت از کانی‌های همراه متداول در توده نفوذی سیریز است و در نمونه‌های درون-اسکارن نیز بلورهای کوچک و پراکنده آن در مقاطع میکروسکوپی دیده شد. انتظار می‌رود کانسنگ توده‌ای مگنتیت نیز حاوی مقداری، هرچند ناچیز، از این کانی باشد. آپاتیت در نمونه‌های دستی کانسنگ و مقاطع میکروسکوپی آن مشاهده نشد. آپاتیت به احتمال زیاد با بلورهای بسیار کوچک در کانسنگ وجود دارد که تشخیص آن از کوارتز آسان نیست.

با توجه به کانی‌شناسی کانسنگ، کانی حامل گوگرد در کانسنگ سادات، پیریت است که بخش زیادی از آن ضمن فراوری کانسنگ خارج می‌شود. آنالیز کانسنگ فراوری شده، مقدار گوگرد به صورت SO₃ را ۰/۸۳ درصد وزنی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در بخش کانی‌شناسی کانسنگ توصیف شده است. پیریت یک فاز کانی دیر هنگام است و در اثر واکنش یک سیال حاوی H₂S با مگنتیت تشکیل شده است. این کانی با اندازه بلورهای بسیار متفاوت (از کوچک‌تر از ۰/۱ میلی‌متر تا بیش از یک میلی‌متر) در امتداد درز و شکستگی‌ها و همین‌طور به صورت افشان وجود دارد. مقدار LOI برای نمونه کانسنگ فراوری شده، ۱/۹۹- گزارش شده است که

داشته باشند. جانشینی این فلزات در کلسیت و فلوگوپیت نیز محدود است (Wang et al., 2022). پیریت می‌تواند حاوی این فلزات به صورت جانشینی شبکه‌ای باشد (Meng et al., 2019)، اما با توجه به ماهیت پیریت که به صورت جانشینی مگنتیت پدید آمده، این فلزات نیز مانند آهن توسط مگنتیت تامین شده است. کوارتز گرمایی می‌تواند حاوی اندکی Ti، تا ۱۰ ppm در دمای پایین (>۳۵۰ درجه سانتی‌گراد)، و کمی بیش از آن در دماهای بالاتر (بیش از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) باشد (Wang et al., 2022). غنی‌شدگی فسفر در کانسنگ آهن سادات در مقایسه با کانسنگ‌های گرمایی بالا-دما ناشی از حضور اندکی آپاتیت است.



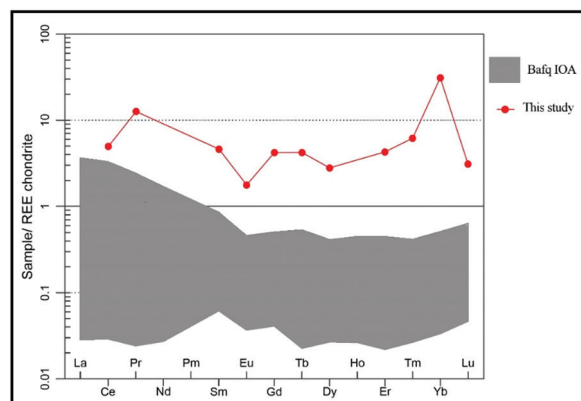
حضور اندکی کوارتز، کلسیت و فلوگوپیت در نمونه فراوری شده نسبت داد. مقدار Al مگنتیت در شرایط گرمایی بالا-دما تا چند صد ppm و در گرمایی پایین-دما تا بیش از ۲۰۰۰ پی پی ام گزارش شده است (Wang et al., 2022). فراوانی بالاتر منیزیم در کانسنگ سادات هماهنگ با گرایش منیزی می‌آن است که با فراوانی نسبی فلوگوپیت تایید می‌شود.

کوارتز کانی باطله اصلی در کانسنگ فراوری شده است. با توجه به این واقعیت که جانشینی عنصری در شبکه کوارتز بسیار محدود است، می‌توان تصور کرد که فلزات Ti, Zn, Co, Ni, V به طور عمده در ساختار مگنتیت حضور

شکل ۱۹- ترکیب شیمیایی نمونه کنسانتره کانسنگ آهن در کانسار سادات. محدوده ترکیب مگنتیت گرمایی بالا-دما (Dare et al., 2014) برای مقایسه مشخص شده است.

Figure 19. Chemical composition of the iron ore concentrates from the Sadat deposit. The composition of high-temperature hydrothermal magnetite (Dare et al., 2014) is shown for comparison.

کانسنگ آهن سادات الگوی کمابیش تخت نشان می‌دهد و از این نظر قابل مقایسه با مگنتیت در کانسارهای ناحیه بافق است. یک تفاوت آشکار، غنی‌شدگی نسبی در بیشتر عناصر REE در کانسنگ سادات است. اما آنچه که مقایسه را پیچیده می‌سازد، حضور مقداری ناخالصی فلوگوپیت و کلسیت در کانسنگ سادات است. این دو کانی می‌توانند بسته به محیط تشکیل حاوی مقدار کمی REE، به‌ویژه LREE، در حد ppm به صورت جانشینی شبکه‌ای باشند (Henderson, 1984; Liefink et al., 1994).



۳-۱۰- عناصر نادر خاکی

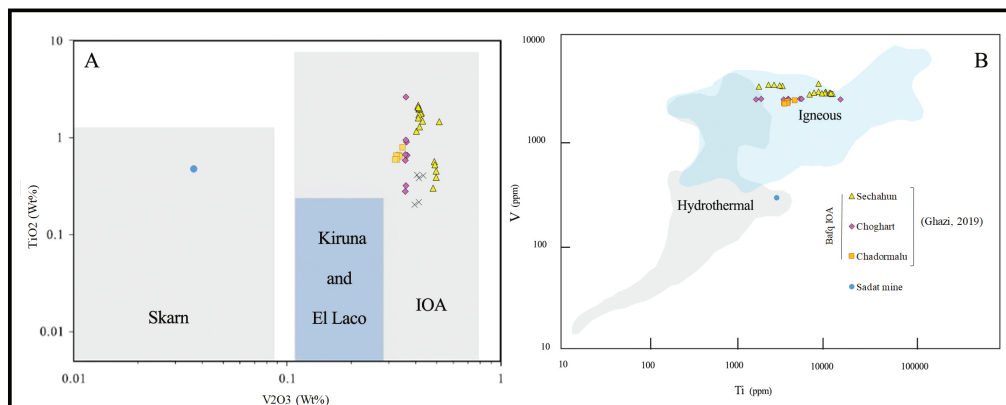
در شکل ۲۰ توزیع عناصر نادر خاکی که نسبت به مقادیر کندریتی بهنجار شده است، دیده می‌شود. در این شکل همچنین داده‌های شیمیایی مگنتیت از ذخایر مگنتیت-آپاتیت سه‌چاهون، چادرملو و چغارت در ناحیه بافق در کمربند کاشمر-کرمان برای مقایسه نشان داده شده است. فراوانی عناصر La, Nd, Pm, Ho در نمونه معرف کانسنگ در ذخیره سادات کمتر از حد تشخیص دستگاهی است. نمونه معرف

شکل ۲۰- توزیع عناصر نادر خاکی در نمونه کنسانتره کانسنگ آهن کانسار سادات، بهنجار شده نسبت به کندریت. ترکیب مگنتیت از سه کانسار آهن نوع اکسید آهن-آپاتیت سه‌چاهون، چادرملو و چغارت در ناحیه بافق (Ghazi et al., 2019) برای مقایسه نشان داده شده است. مقادیر بهنجارسازی از بوینتون (Boynton, 1984).

Figure 20. Chondrite-normalized diagram of rare earth elements in the iron ore concentrate from the Sadat deposit. The composition of magnetite from Se Chahoun, Chadormalu, and Choghart iron oxide-apatite (IOA) deposits in the Bafq district (Ghazi et al., 2019) is shown for comparison. Normalization values after Boynton (1984).

برابر Ti (Knipping et al., 2015) نمونه مگنتیت کانسار سادات در محدوده گرمایی قرار می‌گیرد، در حالی که نمونه‌های معرف ذخایر آهن باقی با محتوی وانادیم بسیار بیشتر و تیتانیم نسبتاً بالاتر در محدوده ماگمایی قرار گرفته‌اند (شکل ۲۱-B).

در نمودار TiO_2 در برابر V_2O_3 (Hu et al., 2019) نمونه کانسنگ سادات در محدوده ذخایر اسکارن قرار می‌گیرد و متفاوت از مگنتیت ذخایر باقی است که همگی در محدوده ذخایر اکسید آهن-آپاتیت قرار گرفته‌اند (شکل ۲۱-A). در نمودار V در



شکل ۲۱- A) جانمایی نمونه کنسانتره کانسنگ سادات در نمودار V_2O_3 در برابر TiO_2 ، محدوده کانسارها از هو و همکاران (Hu et al., 2019). B) جانمایی نمونه مگنتیت کانسار سادات در نمودار Ti در برابر V ، محدوده‌های آذرین و گرمایی از نپینگ و همکاران (Knipping et al., 2015). ترکیب شیمیایی مگنتیت از ذخایر IOA سه‌چاهون، چادرملو و چغارت در ناحیه باقی (Ghazi et al., 2019) برای مقایسه نشان داده شده است.

Figure 21 -A) Plot of the Sadat iron ore concentrate on the V_2O_3 vs TiO_2 diagram. Domains for the deposit types after Hu et al. (2019). B) Plot of the iron ore concentrate from the Sadat deposit on the Ti vs. V diagram. The composition of magnetite from the Seh Chahoun, Chadormalu, and Choghart IOA deposits in the Bafq district (Ghazi et al., 2019) is shown for comparison. Fields for igneous and hydrothermal magnetite after (Knipping et al. 2015). The composition of magnetite from Se Chahoun, Chadormalu, and Choghart IOA deposits, Bafq district, is shown for comparison.

۴- بحث

مونزوگابرو و مونزو دیوریت دارند. نمونه‌های معرف توده نفوذی سیریز با فراوانی آلپیت مشخص می‌شوند. در مقاطع میکروسکوپی، آلپیت به شکل کانی مستقل در میان سیلیکات‌های دیگر و نیز به شکل نامنظم و جانشینی بخشی پلازیو کلاز و فلدسپارهای پتاسیمی (ارتوز و میکروکلین) دیده می‌شود. دگرسانی آلپیتی از برخی کانسارهای اسکارن آهن گزارش شده است و ممکن است ارتباط زایشی با کانی‌سازی آهن داشته باشد (برای مثال: Zhang et al., 2022; Cui et al., 2022).

نمونه کانسنگ فراوری شده کانسار آهن سادات، حاوی ۶۶/۲۳ درصد وزنی آهن (Fet) است. مهم‌ترین ناخالصی شامل سیلیسیم، آلومینیم، کلسیم و منیزیم است که بخشی از آن می‌تواند ناشی از حضور اندکی کوارتز، کلسیت و فلوگوپیت در کانسنگ باشد که با وجود فراوری، همچنان مقداری باقی مانده است. مگنتیت در ذخایر گرمایی می‌تواند حاوی چندصد تا چند هزار و گاه تا چند ده هزار ppm از عناصر Mg , Al , Ca , Si , Ti باشد که برخی مانند Mg , Al که بار و شعاع یونی هماهنگ با شبکه بلورین مگنتیت دارند در ساختار این کانی وارد می‌شوند و برخی مانند Na , Ca , Si که شعاع یونی بزرگی دارند، می‌توانند به صورت فازهای کانی در اندازه ذرات نانو (nanoparticles) و میکرو (microparticles) در مگنتیت قرار گیرند (Deditius et al., 2018).

نمونه معرف کانسنگ آهن کانسار سادات، از نظر فراوانی تیتانیم قابل مقایسه با کانسنگ‌های آهن نوع IOA در ناحیه باقی است، اما وانادیم بسیار کمتری دارد و از

توده نفوذی سیریز، بارزترین پدیده زمین‌شناسی در ناحیه کانسار سادات و پیرامون آن است. این توده، سنگ‌های رسوبی پالئوزویک زیرین را قطع می‌کند و با همبری عادی یا گسلی در کنار واحدهای رسوبی تریاس-ژوراسیک قرار دارد. در نقشه زمین‌شناسی بساب یا سیریز (ضیا، ۱۳۸۳)، پیش‌سنگ (پروتولیت) یک مجموعه دگرگونه با چیرگی شیبست در بخش باختری-شمال باختری کانسار سادات، توالی رسوبی آواری و کربناتی تریاس بالا-ژوراسیک است که دست‌خوش دگرگونی حرارتی ناشی از توده نفوذی سیریز شده است. بر این اساس، سن پس از ژوراسیک برای این توده پیشنهاد شده است (ضیا، ۱۳۸۳). مشاهدات میدانی نگارندگان، آثار دگرگونی حرارتی یا دینامیکی-حرارتی در واحدهای تریاس-ژوراسیک را تایید نمی‌کند. در واحد دگرگونی یاد شده، برگ‌وارگی ناحیه‌ای با روند چیره شمال باختری-جنوب‌خاوری گسترش یافته است، که فقط محدود به همین واحد است و در واحدهای سنگی دیگر مشاهده نمی‌شود. مجموعه دگرگونه در باختر-شمال باختر کانسار، به شکل یک پنجه زمین‌ساختی نمایان شده است و سن پیش از کامبرین برای آن پیشنهاد می‌شود. مجموعه‌های دگرگونی پرکامبرین از بخش باختری و جنوب باختری چهارگوش سیریز گزارش شده است (ضیا، ۱۳۸۳).

توده نفوذی سیریز از نظر کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی چندان همگن نیست. این توده از نظر سنگ‌شناسی، طیفی از سینیت تا مونزونیت، کوارتز-مونزونیت و مونزو دیوریت را شامل می‌شود. سنگ‌های مافیک ترکیب سنگ‌شناسی گابرو،

– **نبود دگرسانی کلسیمی یا کلسیمی-آهنی.** بر خلاف ذخایر ناحیه بافق با دگرسانی گسترده کلسیمی یا کلسیمی-آهنی با کانی‌های شاخص ترمولیت-اکتینولیت و به طور محلی پیروکسن در سنگ‌های دربرگیرنده توده‌های کانسنگ، این دگرسانی در سنگ‌های میزبان کانی‌سازی در کانسار سادات دیده نمی‌شود یا فقط به طور محلی رخ داده است.

– **رخداد فلوگوپیت.** فلوگوپیت از کانی‌های کالک-سیلیکاتی چیره در کانسار سادات است که هم در کانسنگ و هم در سنگ‌های میزبان آن دیده می‌شود. این کانی از کانسارهای ناحیه بافق گزارش نشده است یا فقط به طور محلی وجود دارد (Ghazi et al., 2019).

۵- نتیجه‌گیری

توده نفوذی سیریز، با ترکیب سینیت تا مونزونیت و مونزودوریت، با سن پس از کامبرین و پیش از مزوزویک، در توالی رسوبی کامبرین نفوذ کرده و سبب کانی‌زایی آهن اسکارنی شده است. دگرسانی وسیع سدیک (آلبیتی) در توده نفوذی سیریز رخ داده است.

اسکارن در کانسار سادات با کانی‌های کالک-سیلیکاتی بی‌آب گارنت، پیروکسن و ولاستونیت، و کانی‌های آب‌دار فلوگوپیت، اپیدوت، ترمولیت-اکتینولیت مشخص می‌شود، و با توجه به فراوانی نسبی فلوگوپیت، می‌توان آن را به عنوان اسکارن منیزیمی رده‌بندی کرد.

کانسنگ آهن به طور عمده در ۳ توده نسبتاً بزرگ در امتداد شمالی-جنوبی تا شمال باختری-جنوب خاوری شکل گرفته و کانی‌سازی بیشتر در برون-اسکارن رخ داده است. بافت چیره کانسنگ استخراجی، توده‌ای است. نوعی کانی‌سازی با بافت نواری در بخشی از سازند کوه‌بان که تناوب سنگ‌های کربناتی و سیلیسی است، وجود دارد.

کانسنگ آهن، با ناخالصی‌های عمده سیلیسیم، آلومینیم، کلسیم و منیزیم، در دمای کمتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و شرایط گرمایی تشکیل شده است.

کانسار آهن سادات از نظر جایگاه زمین‌شناسی، دگرسانی آلبیتی، پیریت دیر هنگام و کمبود تیتانیم با کانسارهای آهن نوع اکسید آهن-آپاتیت در ناحیه فلزایی بافق قابل مقایسه است، اما از نظر سنگ میزبان، سن کانی‌سازی (پس از کامبرین)، کمبود آپاتیت و رخداد محدود دگرسانی کلسیمی-آهنی متفاوت است.

سپاسگزاری

از مدیریت محترم شرکت مجتمع صنعت و معدن ذوب آهن جنوب شرق ایران برای دسترسی به معدن و حمایت سخاوتمندانه ایشان در انجام مطالعات میدانی و نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌های کانسنگ سپاسگزاریم. بازدیدهای میدانی بدون همراهی و تبادل نظر با کارشناسان معدن، آقایان مهندس علیپور و مهندس قربانی امکان‌پذیر نبود، صمیمانه سپاسگزار ایشان هستیم. قدردان جناب آقای دکتر کشفی برای پیشنهاد این پژوهش و هماهنگی با معدن سادات هستیم.

این نظر شبیه به ذخایر آهن اسکارنی است. پایین بودن مقادیر عناصر سازگار در شبکه مگنتیت (Cr و Ni، V، Co، Zn) در نمونه معرف کانسنگ آهن در معدن سادات می‌تواند بیانگر دمای تشکیل پایین تر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد برای کانی‌سازی آهن باشد (Dare et al., 2014; Nadoll et al., 2012, 2014) را ببینید.

کانسار آهن سادات را با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی (همراهی مکانی نزدیک با یک توده نفوذی)، رخداد کانی‌سازی در داخل توده نفوذی و در سنگ‌های رسوبی میزبان آن، حضور کانی‌های کالک-سیلیکاتی بی‌آب، مانند گارنت، پیروکسن و ولاستونیت، و آب‌دار مانند فلوگوپیت، اپیدوت، ترمولیت-اکتینولیت می‌توان کانسار آهن اسکارنی رده‌بندی کرد. با توجه به فراوانی نسبی فلوگوپیت، این کانسار در رده ذخایر اسکارن منیزیمی قرار می‌گیرد.

کانسار آهن سادات از برخی جنبه‌ها قابل مقایسه با ذخایر آهن نوع IOA (iron oxide-apatite) ناحیه بافق-ساغند است، اگرچه تفاوت‌های آشکاری نیز وجود دارد. مهم‌ترین شباهت‌ها عبارتند از:

– **جایگاه زمین‌شناسی.** کانسار آهن سادات، مانند ذخایر ناحیه بافق در بلوک کاشمر-کرمان قرار دارد که با پی سنگ گندوانایی پرکامبرین مشخص می‌شود.

– **دگرسانی سدیک (آلبیتی).** دگرسانی سدیک، که با آلبیت گرمایی شناخته می‌شود، از بیشتر ذخایر IOA ناحیه بافق-ساغند گزارش شده است (Ghazi and Moazzen, 2023; Bonyadi et al., 2020). این دگرسانی در کانسار سادات و پیرامون آن گسترش چشمگیری دارد.

– **رخداد پیریت دیر هنگام.** مانند کانسار سادات، پیریت از کانی‌های همراه مگنتیت در ذخایر IOA ناحیه بافق-ساغند بوده، همواره به صورت جانشینی مگنتیت تشکیل شده است (Heidarian et al., 2017; Ghazi et al., 2019; Nayeibi et al., 2021). در کانسار سادات نیز مانند ذخایر ناحیه بافق به طور محلی اندکی کالکوپیریت وجود دارد.

مهم‌ترین تفاوت‌ها عبارتند از:

– **کانی‌زایی در ذخایر ناحیه بافق.** بیشتر در سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌آتشفشانی کامبرین پیشین رخ داده است (برای مثال، Jami, 2005; Daliran, 2002; Sepehrirad and Alirezai, 2020; Heidarian et al., 2017). سهم کمتری به عنوان میزبان دارند. کانسار جلال آباد با چیرگی سنگ‌های میزبان رسوبی، یک استثنا در این میان است. در کانسار سادات، کانی‌سازی در سنگ‌های رسوبی پالئوزویک زیرین و کمتر از آن در توده نفوذی با ترکیب چیره مونزوسینیتی رخ داده است که این سنگ‌ها را قطع می‌کند.

– **کمبود آپاتیت.** برخلاف ذخایر ناحیه بافق که عموماً با حضور آپاتیت به عنوان کانی همیشگی همراه در کانسنگ آهن مشخص می‌شوند (برای مثال، Heidarian et al., 2017; Nayeibi et al., 2021)، کانسار سادات فقیر از آپاتیت است.

کتابنگاری

- شاکر، ع.، قوام آبادی، ا.، قایدی، ب. و الهی، ع.، ۱۳۹۷، تعیین منشأ کانسار آهن سادات، شمال غرب زرنده. دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران.
- شرکت مجتمع صنعت و معدن ذوب آهن جنوب شرق ایران، ۱۳۹۱، گزارش پایان عملیات اکتشاف حین استخراج (مرحله اول) معدن سنگ آهن سیریز زرنده کرمان (سادات ۵). گزارش داخلی. ۳۱ ص.
- ضیاء، ح.، ۱۳۸۳، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ منطقه سیریز (بساب)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- مقدسی، ج.، یزدی، ج. و نامدار محمدی، ط.، ۱۳۹۶، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی کانسار آهن سادات، شمال باختر زرنده، استان کرمان. فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۰۶، ص ۹۹-۱۱۶.

References

- Adlakha, E., Hanley, J., Falck, H., and Boucher, B., 2018. The origin of mineralizing hydrothermal fluids recorded in apatite chemistry at the Cantung W-Cu skarn deposit, NWT, Canada. *European Journal of Mineralogy* 30(6), pp, 1095–1113. <https://doi.org/10.1127/ejm/2018/0030-2780>.
- Assawincharoenkij, T., Homchan, K., Hauzenberger, C., Keawpaluk, S., Kanjanapayont, P., and Sutthirath, C., 2024. Geochemistry of magnetite from Fe-skarn deposits along the central Loei Fold Belt, Thailand. *Open Geosciences* 16(1), pp, 202-206. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0638>.
- Bonyadi, Z., Sadeghi, R., and Davidson, G. J., 2020. Hydrothermal alteration associated with magnetite mineralization in the Bafq iron deposits, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 189, 104152. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2019.104152>.
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In *Developments in geochemistry*, pp, 63–114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>.
- Borumandi, H., 1973. Petrographische und lagerstättenkundliche Untersuchungen der Esfordi-Formation zwischen Mishdowan und Kushk bei Bafgh, Zentral-Iran. Ph.D. Thesis, Aachen University, Aachen, Germany, 174 p.
- Chang, Z., and Meinert, L. D., 2008. The Empire Cu-Zn mine, Idaho: Exploration implications of unusual skarn features related to high fluorine activity. *Economic Geology* 103(5), pp, 909-938. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.5.909>.
- Cui, F.-H., Zhang, C., Jin, D.-T., Wang, L.-Y., Gao, J.-L., Ma, M., and Li, Y.-D., 2022. Mineral chemistry of the lower Cretaceous Jinling Iron Skarn Deposit, Western Shandong Province, North China Craton: Implications for the iron skarn mineralization process. *Minerals* 12, pp, 1152. <https://doi.org/10.3390/min12091152>.
- Daliran, F., 2002. Kiruna-type iron oxide-apatite ores and apatites of the Bafq District, Iran, with an emphasis on the ree geochemistry of their apatites. In: Porter, T.M., Ed., *Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: A Global Perspective*, PGC Publishing 1, pp, 303-320.
- Dare, S.A.S., Barnes, S., Beaudoin, G., Méric, J., Boutroy, E., and Potvin-Doucet, C., 2014. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators, *Mineralium Deposita* 49(7), pp, 785–796. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0529-0>.
- Deditius, A.P., Reich, M., Simon, A.C., Suvorova, A., Knipping, J., Roberts, M.P., Rubanov, S., Dodd, A., and Saunders, M., 2018. Nanogeochemistry of hydrothermal magnetite. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 173(46), pp, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1474-1>.
- Deer, FRS, W.A., Howie R.A., and Zussman, J., 2013. *An Introduction to the rock-forming minerals*. (3rd ed.), Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 506p.
- Einaudi, M.T., Meinert, L.D., and Newberry, R.J., 1981. Skarn deposits. In *Skarn deposits*, pp, 317–391. <https://doi.org/10.5382/Rev.26.14>
- Frost, B.R., Chamberlain, K.R., and Schumacher, J.C., 2001. Sphene (titanite): phase relations and role as a geochronometer. *Chem. Geol* 172, pp, 131–148. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00240-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00240-0).
- Ghazi, J.M., Harris, C., Rahgoshay, M., and Moazzen, M., 2019. Combined igneous and hydrothermal source for the Kiruna-type Bafq magnetite-apatite deposit in Central Iran; trace element and oxygen isotope studies of magnetite. *Ore Geology Reviews* 105, pp, 590–604. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.016>.
- Ghazi, J. M., and Moazzen, M., 2023. Cadomian iron ore bodies in the Bafq-Saghand metallogenic province, Iran: Genetic constraints from field observations and laser ablation ICP-MS mineral studies. *International Geology Review* 66(5), pp, 1144–1164. <https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2238210>.
- Guilbert, J.M., and Park, C.F., 1985. *The geology of ore deposits*. Freeman, San Francisco, 985p.
- Han, C.C., Zhang, X.B., Wu, S.S., and Liu, Y.T., 2022. The magmatic-hydrothermal ore-forming processes of the Tonggou Cu-Zn Deposit, NW China: Constraints from Magnetite Chemistry and Fluid Inclusions, *Minerals* 12, pp, 485. <https://doi.org/10.3390/min12040485>.
- Haghipour, A., and Pelissier, G., 1977. Geology of the Saghand sector, in Haghipour, A., Valeh, N., Pelissier, G., and Davoudzadeh, M., editors, *explanatory text of the Ardekan quadrangle map: Geological Survey of Iran*, H8, pp, 10–68.
- Heidarian, H., Alirezaei, S., and Lentz, D. R., 2017. Chadormalou Kiruna-type magnetite-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights into hydrothermal alteration and petrogenesis from geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope data. *Ore Geology Reviews* 83, pp, 43-62. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.028>.
- Henderson, P., 1984. *Rare earth element geochemistry (developments in geochemistry)*, Elsevier, Oxford, 511 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-22310-7>.
- Henze, P., Christiansen, E., Kowallis, B., Dorais, M., Mosher, H., Franzen, L., Martin, A., and Nabelek, P., 2023. Titanite geochemistry and textures: Implications for magmatic and post-magmatic processes in the Notch Peak and Little Cottonwood granitic intrusions, Utah. *American Mineralogist* 108(2), pp, 226-248. <https://doi.org/10.2138/am-2022-8577>.

- Hu, H., Li, J., Harlov, D.E., Lentz, D.R., McFarlane, C.R., and Yang, Y., 2019. A genetic link between iron oxide-apatite and iron skarn mineralization in the Jinniu volcanic basin, Daye district, eastern China: Evidence from magnetite geochemistry and multi-mineral U-Pb geochronology. *Geological Society of America Bulletin* 132(5–6), pp, 899–917. <https://doi.org/10.1130/B35266.1>.
- Huckriede, R., Kursten, M., and Venzlaff, H., 1962. Zur geologie des gebiets zwischen Kerman and Saghand (Iran). *Beih. Geol. Jb* 53, pp, 197.
- Jami, M., 2005. *Geology, Geochemistry and evolution of the Esfordi phosphate-iron deposit, Bafq area, Central Iran*. Unpublished PhD Thesis, The University of New South Wales, Australia, 397p.
- Knipping, J.L., Bilenker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A.P., Lundstrom, C., Bindeman, I., and Munizaga, R., 2015. Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions: *Geology*, 43, pp, 591–59. <https://doi.org/10.1130/G36650.1>.
- Liefink, D.J., Nijland, T.G., and Maijer, C., 1994. The behavior of rare earth elements in high temperature bearing aqueous fluids: results from the Udeganotrus Verk Natural Laboratory. *The Canadian Mineralogist* 32, pp, 149–158.
- Meinert, L.D., 1992. Skarns and Skarn Deposits. *Geoscience Canada*, 19(4), pp, 145–162.
- Meinert, L.D., Dipple, and Nicolescu, G.M., 2005. World Skarn Deposits. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P., Eds., *Economic Geology* 100, pp, 299–336. <https://doi.org/10.5382/AV100.11>.
- Meng, Y.M., Hu, R.Z., Huang, X.W., Gao, J.F., and Sasseville, C., 2019. The origin of the carbonate hosted Huize Zn–Pb–Ag deposit, Yunnan province, SW China: constraints from the trace element and sulfur isotopic compositions of pyrite. *Mineralogy and Petrology* 113(3), pp, 369–391. <https://doi.org/10.1007/s00710-019-00642-4>.
- Moghaddasi, J., Yazdi, J., and Namdar Mohammadi, T., 2017. *Mineralogy and geochemistry of the Sadat iron deposit, northwest Zarand, Kerman Province, Iran. Quarterly Journal of Geosciences*, No. 106, pp, 99–116. (In Persian).
- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J.L., French, D., and Walshe, J., 2014. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. *Ore Geol. Rev* 61, pp, 1–32. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.013>.
- Nadoll, P., Mauk, J.L., Hayes, T.S., Koenig, A.E., and Box, S.E., 2012. Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic belt supergroup, United States. *Economic Geology* 107(6), pp, 1275–1292. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.6.1275>.
- Nayebi, N., Esmaeily, D., Chew, D.M., Lehmann, B., and Modabberi, S., 2021. Geochronological and geochemical evidence for multi-stage apatite in the Bafq iron metallogenic belt (Central Iran), with implications for the Chadormalu iron-apatite deposit. *Ore Geology Reviews* 132, pp, 1040–1054. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104094>.
- Peng, H., Hou, L., Sun, C., Zou, H., Wang, T., and Ma, Z., 2021. Geochemistry of magnetite from the Hongniu–Hongshan Cu skarn deposit in Yunnan Province, SW China, *Ore Geology Reviews* 136, 104237. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104237>.
- Piccoli, P. M., and Candela, P. A., 2002. Apatite in igneous systems. In *De Gruyter eBooks*, pp, 255–292. <https://doi.org/10.2138/rmg.48.6.255>.
- Ramezani, J., and Tucker, R.D., 2003. The Saghand region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science* 303, pp, 622–665. <https://doi.org/10.2475/ajs.303.7.622>.
- Sahandi, M. R., Rahimzadeh, F., Jamshidi, K., Afsharian Zadeh, A. M., and Manouchehri, M., 1992. Geological quadrangle map of Kerman (J10), scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Sahandi, M. R., 2002. Geological quadrangle map of Iran, Dehsalm (Chah Vak) sheet (K9), scale1: 250,000, Geol. Surv. of Iran, Tehran.
- Sepehrirad, R., and Alirezaei, S., 2020. Apatite geochemistry and development of ree minerals related to coupled dissolution-reprecipitation process in the Gazestan deposit, Central Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 29(115), pp, 247–258.
- Shaker, A., Ghavamabadi, A., Ghaedi, B., and Elahi, A., 2018. *Determination of the origin of the Sadat iron deposit, northwest Zarand, Iran. 10th Conference of the Iranian Economic Geology Society, Iran. (In Persian)*.
- South-East Iranian Iron and Steel Industry and Mining Complex Company, 2012. *Final report of exploration during mining operations (Phase I) of the Siriz iron ore mine, Zarand, Kerman (Sadat 5). Internal report, 31p. (In Persian)*.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonic of Iran: A review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, USA 52, pp, 1229–1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>.
- Vahdati-Daneshmand, F., Mosavvary, F., Mahmudy Ghareei, M., and Ghasemi, A., 1995. Geological map of Zarand, 1:100,000 sheet 7358. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Wang, S., Peng, H., Wang, T., Zou, H., Zhou, Q., Yang, D., Sun, C., and Tian, X., 2022. Trace element composition and cathodoluminescence of quartz in the Hongniu–Hongshan Skarn deposit in Yunnan province, southwest China. *Front. Earth Sci*, 10:864118. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.864118>.
- Watanabe, M., Inoue, H., Yamada, Y., Feeney, M., Oelofse, L., and Kataoka, Y., 2013. XRF analysis of high gain-on-ignition samples by fusion method using fundamental-parameter method. *Powder Diffraction* 28(2), pp, 132–136. <https://doi.org/10.1017/S0885715613000023>.
- Whitney, D.L., Evans, W.B., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, pp 185–187.

- Xie, H., Huang, X., Meng, Y., Tan, H., and Qi, L., 2022. Discrimination of mineralization types of Skarn deposits by magnetite chemistry. *Minerals* 12(5), 608. <https://doi.org/10.3390/min12050608>.
- Zeng, Z., Siddique, U., Sun, M., Gao, Q., Chen, Y., Chen, L., and Li, Z., 2023. The mineral chemistry of magnetite and its constraints on Ore-Forming mechanism in the Sandaozhuang Skarn-Type W-MO deposit in East Qinling, China. *Minerals* 13(8), 1091. <https://doi.org/10.3390/min13081091>.
- Zhang, Z.L., Zhang, C., Li, Y., Wang, L.Y., Gao, J.L., Ma, M., and Li, Y.D., 2022. Petrogenesis and Geological Significance of the Quartz Monzonites in the Jinling Area, Western Shandong Province. *Minerals* 12, 771. <https://doi.org/10.3390/min12060771>.
- Zia, H., 2004. *Geological map of the Siriz (Basab) area, 1:100000, Geological Survey of Iran, Tehran. (In Persian)*.