

Original Research Paper

Source and evolution of ore-forming fluids in the Bafq district iron oxide–apatite deposits, Central Iran: insights from pyrite sulfur isotope and magnetite oxygen isotope ratios

Mobina Esmaili Zeini^{1*}, Saeid Alirezaei¹, and Amir Morteza Azim Zadeh²

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

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2026 March 22

Accepted: 2026 June 09

Available online: 2026 June 22

Keywords:

Oxygen isotope

Sulfur isotope

Magnetite

Pyrite

Iron oxide-apatite deposits

Bafq

Central Iran

ABSTRACT

Despite sharing several key features, the iron oxide–apatite deposits of the Bafq district, Central Iran, display variations in host rocks, wall rock alteration, and ore texture/mineralogy, and geochemical attributes, reflecting the complexity of the ore forming processes and the ore fluid sources. Here, oxygen and sulfur isotope composition of magnetite and pyrite, respectively, from various massive, vein-type, breccia, banded, and cumulate ores are used to investigate the source and evolution of the ore-forming fluids in the Bafq district iron deposits. The $\delta^{18}\text{O}$ values of magnetite from Chadormalu, Gazestan, Mishdovan, Lak-e-Siah, and Se-Chahun deposits range from +0.7‰ to +8.2‰. Massive and vein-type magnetites exhibit lower $\delta^{18}\text{O}$ values, between 0.7–4.4‰, consistent with crystallization from high-temperature magmatic fluids. The $\delta^{18}\text{O}$ value of +3.9‰ for the banded ore at Mishdovan, interbedded with pyroclastic materials, indicates a significant contribution from high-temperature magmatic fluids. Magnetite from the cumulate ore in Chadormalu, yielded $\delta^{18}\text{O}$ value at +2.5‰ implying formation under high-temperature magmatic conditions. In contrast, the higher $\delta^{18}\text{O}$ values (up to +8‰) for magnetite from the Gazestan and Lak-e-Siah banded ore suggest deposition from non-magmatic fluids, compatible with a sedimentary–diagenetic origin or sub-seafloor replacement. The $\delta^{34}\text{S}$ values for pyrite from massive, brecciated, and vein-type ores range widely from +4‰ to +30‰, indicating the involvement of variable, dominantly nonmagmatic, sulfur sources. The broad ranges of oxygen and sulfur isotopic compositions suggest a multi-stage evolutionary model for mineralization, with contributions from both magmatic and non-magmatic fluid sources. This is supported by the fluid inclusion data, where wide ranges of fluid salinity and homogenization temperature are reported from various IOA deposits in the Bafq district, and even in individual deposits.

1. Introduction

The Bafq district in the Kashmar-Kerman belt, Central Iran structural zone (Fig. 1) embraces several iron oxide-apatite (IOA)


deposits hosted mostly in Cambrian volcanic–sedimentary rocks and associated shallow felsic-intermediate intrusions. Magnetite is


* Corresponding author: Mobina Esmaili Zeini; E-mail: m.smali.zini@gmail.com

Citation:

Esmaili Zeini, M., Alirezaei, S., and Azim Zadeh, A. M., 2026. Source and evolution of ore-forming fluids in the Bafq district iron oxide–apatite deposits, Central Iran: insights from pyrite sulfur isotope and magnetite oxygen isotope ratios. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 36(2), 140, 103-122. <https://doi.org/10.22071/gsj.2026.578346.2247>.

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

 doi: 10.22071/gsj.2026.578346.2247

 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.2.6.6



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

the main ore mineral. Pyrite is a common constituent occurring as a late mineral phase replacing magnetite. The origin of ore fluids in the Bafq district IOA deposits remains controversial. The proposed models vary from orthomagmatic (Forster and Jafarzadeh, 1994; Mücke and Younessi, 1994; Mokhtari et al., 2013) to magmatic-hydrothermal (Daliran, 2002; Moore and Modabberi, 2003; Jami et al., 2007; Heidarian et al., 2017, 2018), and glaciogenic, associated with the Late Precambrian cryogenic events (Aftabi et al., 2009).

Stable isotope geochemistry has been a fundamental tool in ore deposit studies, and has widely been used to investigate the fluid and metal sources, ore fluid migration pathways, and physico-chemical conditions of mineralization (Taylor, 1974; Ohmoto and Rye, 1979; Ohmoto, 1986; Hoefs, 2018). Light element isotopes, including oxygen and sulfur, are sensitive to temperature, fluid composition, redox conditions, and fluid–rock interactions, providing key information on ore-forming processes (Sheppard, 1986; Sharp, 2017). This study presents new oxygen isotope data for magnetite and sulfur isotope data for pyrite from massive, vein-type, breccia, cumulate, and banded ores from Chadormalu, Gazestan, Mishdovan, Lak-e-Siah, and Se-Chahun deposits. The results are integrated with data from published work on the IOA deposits in the Bafq district and elsewhere to constrain the ore fluid source and evolution.

2. Research methodology

This study is based on detailed field observation, systematic sampling of exposed ores and host rocks, and examination of drill-cores from selected deposits in the Bafq district. Comprehensive petrographic and ore microscopy studies were conducted on a large number of samples, from which representative magnetite- and pyrite-bearing specimens were selected for oxygen and sulfur isotope analysis. Mineral separation was carried out at Shahid Beheshti University with crushing of small pieces of the samples in silica mortar, followed by magnetic separation and hand-picking under binoculars to secure high (>95%) purity. The mineral concentrates were grinded in a small silica mortar to <200 mesh. The samples were analyzed at the Stable Isotope Research Laboratory of Arak University, Iran, using an Isoprime precision-IRMS. Oxygen isotope compositions were determined on magnetite using high-temperature pyrolysis, with CO gas analyzed by isotope ratio mass spectrometry (IRMS), yielding analytical uncertainties better than $\pm 0.3\%$ (1σ). Sulfur isotope analyses were performed on pyrite after combustion at 1150 °C, with SO₂ gas measured by IRMS, achieving a precision of $\pm 0.2\%$. Two additional pyrite samples were analyzed by State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources (GPMR) at China's University of Geosciences (Wuhan) using a Nu Plasma II LA-MC-ICP-MS mass spectrometer and a RESOLUTION-S155 193 nm excimer laser exfoliation system. The details of the analytical technique are presented in Li et al. (2019).

The Bafq district is distinguished by extensive exposures of Late Precambrian metamorphic basement complexes, known as Chapedony, Boneh-Shurow, and Posht-Badam, composed

of various schists, gneisses, and granitoids (Hushmandzadeh, 1969; Stöcklin, 1971; Haghypour, 1974; Ramezani and Tucker, 2003). This basement is overlain by Neoproterozoic to Triassic volcanic and sedimentary rocks (Stöcklin, 1971; Borumandi, 1973; Förster and Jafarzadeh, 1994). The Late Precambrian–Early Cambrian is represented by the Tashk Formation consisting of weakly metamorphosed sedimentary rocks (now phyllite, slate, and quartzite) interlayered with volcanic materials (Ramezani and Tucker, 2003). The rocks are overlain by a thick Cambrian volcanic-sedimentary unit (Ramezani and Tucker, 2003), also referred to as Rizu, Desu, Esfordi, and Saghand series or formations (Huckriede et al., 1962; Borumandi, 1973; Samani, 1988). The Cambrian rocks, composed of K-rich calc-alkaline mafic to felsic volcanic and subvolcanic rocks, and limestone, dolostone, shale, and sandstone, are the main host to the iron oxide–apatite (IOA) deposits in the Bafq district (e.g., Samani, 1988; Jami, 2005; Torab, 2008). The zircon U–Pb ages of rhyodacitic and dacitic subvolcanic rocks (528 ± 0.8 and 527 ± 0.9 Ma) indicate an Early Cambrian age (Ramezani and Tucker, 2003), consistent with the apatite and monazite U–Pb ages (520–535 Ma) reported for the IOA ores (Torab and Lehmann, 2007; Stosch et al., 2011; Bonyadi et al., 2011; Nayebi et al., 2021).

The iron ores occur in sheets, lenses, pipes, veins, and irregular bodies of variable sizes enclosed in altered host rocks (Figs. 2A–C), and display massive, breccia, banded, comb, pegmatitic, and disseminated textures (Figs. 2A–H, 3A–D, 4A–G). The banded ores display distinct features (Figs. 2G–H; 4A–G). A cumulate-looking ore texture consisting of alternate magnetite-rich and silicate-rich bands or layers locally occurs in Chadormalu at the margin of the main ore body (Fig. 4A–B). In Gazestan, a banded ore locally occurs consisting of magnetite- and silica-rich bands closely associated with jaspilite (Fig. 4C). In Mishdovan, the ore consists of magnetite-rich bands interlayered with pyroclastic materials (Fig. 4D–E). A notable feature is the occurrence of lapillitized magnetite embedded in pyroclastic materials. In the Lak-e-Siah banded ore consisting of Magnetite-rich layers within rhyolitic tuff host rocks, looking stratiform ore structure (Fig. 4F–G).

3. Results

A short description of the magnetite and pyrite samples from selected IOA deposits in the Bafq district, as well as the results for oxygen and sulfur isotope analysis, is presented in Table 1. The measured $\delta^{18}\text{O}$ values for magnetite from Chadormalu, Gazestan, Mishdovan, Lak-e-Siah, and Se-Chahun range from $+0.7\%$ to $+8.2\%$, consistent with the data from published work on the Bafq district deposits (Fig. 6).

The massive and vein-type magnetite ores yielded lower $\delta^{18}\text{O}$ values, compared to the banded ores, particularly those associated with volcanoclastic or silica-rich units (Table. 1). When plotted against established isotopic fields for igneous, orthomagmatic, and hydrothermal magnetite (Troll et al., 2019), most data cluster within the igneous to orthomagmatic domains, overlapping with magnetite compositions from the Chilean Iron Belt and the Kiruna

district, Sweden (Fig. 6). Combined $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^{56}\text{Fe}$ systematics further indicate that most Bafq magnetites formed under high-temperature magmatic to orthomagmatic conditions (Fig. 7). Published oxygen and hydrogen isotope data from hydrous minerals associated with the Bafq IOA deposits indicate a predominantly magmatic origin for the ore-forming fluids, although local mixing with meteoric water is evident in some deposits (Fig. 8). Pyrite is present as fine-grained and euhedral–subhedral crystals within magnetite–apatite–calcite-, apatite–magnetite–calcite–chlorite-, and apatite–magnetite–quartz–calcite-bearing breccia cements, and also as disseminated grains in diabase dikes crosscutting massive magnetite ore and older host rocks (Fig. 5). Sulfur isotope composition of pyrite in the Bafq district iron ores exhibits a wide range of $\delta^{34}\text{S}$ values from +4‰ to +30‰, significantly wider than that reported from the Chilean IOA deposits (Fig. 9)

4. Discussions

Integrated stable isotope data of magnetite and pyrite provide constraints on the origin and evolution of the ore-forming fluids in the Bafq district IOA ore systems. The Bafq iron ores display a wide range of oxygen isotope compositions, between +0.7‰ to +8.2‰, reflecting variable physicochemical conditions during ore formation. The $\delta^{18}\text{O}$ values for massive and vein-type ores range between +0.7‰ and +4.4‰, with most data points plotted within the igneous and orthomagmatic fields (Fig. 6), suggesting that ore formation occurred mainly from high-temperature fluids. This interpretation is further supported by combined $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^{56}\text{Fe}$ systematics, with substantial overlap between the Bafq iron ores and those from Sweden and the Chilean Iron Belt (Troll et al., 2019; see Fig. 7).

The $\delta^{18}\text{O}$ composition of the banded ores spans a wide range, from +2.5‰ to +8.2‰, providing evidence for the involvement of non-magmatic fluids. The Chadormalu and Mishdovan banded ores yield $\delta^{18}\text{O}$ values of +2.5‰ and +3.9‰ (Fig. 6), respectively. In Chadormalu, textural and mineralogical evidence supports formation under high-temperature magmatic–hydrothermal conditions. In Mishdovan, the association of iron ores with pyroclastic materials, the presence of magnetite lapilli, and the absence of subaqueous volcanic features (c.f. White and Houghton, 2006) indicate a subaerial volcanic setting. The $\delta^{18}\text{O}$ value of +3.9‰ is consistent with deposition from a high-temperature magmatic fluid.

The higher $\delta^{18}\text{O}$ values for the banded ores from Lak-e-Siah and Gazestan are consistent with the nature of the ores (sedimentary–digenetic or subseafloor replacement), or progressive fluid evolution, enhanced fluid–rock interaction, and partial overprinting during post-magmatic stages (c.f. Bilinker et al., 2016; Troll et al., 2019). Oxygen–hydrogen isotope data from hydrous silicates and apatite further indicate that early ore formation and metasomatic reactions occurred under relatively closed-system conditions dominated by magmatic fluids, whereas local shifts toward the meteoric water field in some deposits reflects late-stage influx of

externally derived fluids (Fig. 8; Afzali et al., 2016; Deymar et al., 2018; Hosseini et al., 2022).

The wide range in the $\delta^{34}\text{S}$ values for pyrite suggest variable sulfur sources and evolving physicochemical conditions of the ore fluids. The distinct shift towards more positive values can be explained by contributions from seawater sulfate or interaction of fluids with evaporites (e.g. Ohmoto and Rye, 1979; Barton and Johnson, 1996). Pyrite in the Bafq district deposits occurs invariably as a late mineral phase replacing magnetite. Sulfur was most likely transported as oxidized species, but reduced during localized redox reactions in the final stages of the ore formation. A possible mechanism would be interaction between the oxidized sulfate-bearing fluids and magnetite, causing martitization, partial sulfate reduction, and replacement of magnetite by pyrite (Gow et al., 1994; Barton, 2014; Heidarian et al., 2017). Hypogene martitization of magnetite has been reported from some Bafq district IOA deposits (Heidarian et al., 2017; Mehrabi et al., 2019). The late development of pyrite can be explained by progressive introduction of fluids of external sources during the final stages of the evolution of the Bafq district ore systems (cf. Ripley and Ohmoto, 1977).

Ore formation in an evolving magmatic–hydrothermal system in the Bafq district is also supported by the fluid inclusion data as well as the isotopic composition of the ore fluids. Esmaeili and Alirezai (2025, and references there in) reported a wide range of fluid salinity and Th values from selected Bafq district IOA deposits. The O–H isotope values calculated from the isotopic composition of actinolite and phlogopite from Saghand-Anomaly, as well as apatite from Gazestan, plot within or near the primary magmatic water field (Afzali et al., 2016; Deymar et al., 2018), suggesting a dominant magmatic fluid source during early stages of ore formation and metasomatic reactions. In contrast, the O–H isotope of apatite from Choghart shows a shift toward the meteoric water line (Fig. 8), implying localized mixing between magmatic fluids and externally derived waters during later stages in the ore system evolution (Hosseini et al., 2022).

5. Conclusion

The integrated oxygen isotope data indicate that the Bafq IOA deposits are primarily associated with high-temperature magmatic–hydrothermal systems, with massive and vein-type ores reflecting early orthomagmatic fluid activity. In contrast, banded ores record more complex fluid evolution involving fluid–rock interaction and episodic contributions from external fluids. Sulfur isotope systematics of pyrite indicate late-stage input of externally derived sulfur, likely related to seawater sulfate and/or evaporitic sequences. Overall, stable isotope signatures, coupled with ore texture/structure, and wall rock alteration suggest that the Bafq IOA deposits developed in a dynamic magmatic–hydrothermal setting spanning a broad crustal profile, from relatively deep- to shallow-seated, through to submarine and subaerial environments. This was associated with increasing contribution of non-magmatic fluids in the evolution of the ore systems.

منبع و تحول سیال کانسنگ‌ساز در ذخایر اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق، ایران مرکزی: رهیافتی بر پایه نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد پیریت و اکسیژن مگنتیت

مینا اسماعیلی زینی^{۱*}، سعید علیرضائی^۱ و امیر مرتضی عظیم‌زاده^۲^۱ گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران^۲ دانشکده مهندسی منابع طبیعی، محیط زیست و عمران، گروه علوم زمین و مهندسی محیط زیست دانشگاه صنعتی لولئو، لولئو، سوئد

چکیده

کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق، ایران مرکزی، با وجود چند ویژگی مشترک، از نظر سنگ میزبان و دگرسانی آن، بافت، کانی‌شناسی و ویژگی‌های ژئوشیمیایی کانسنگ، تفاوت‌هایی دارند که بازتاب‌دهنده پیچیدگی فرایندهای کانی‌سازی و زایش آن‌ها است. به‌منظور بررسی منبع و تحول سیال کانساز در این ذخایر، از داده‌های ایزوتوپی اکسیژن مگنتیت و گوگرد پیریت از کانسنگ‌های مختلف توده‌ای، رگه‌ای، نواری، انباشتی و برشی استفاده شده است. ترکیب ایزوتوپی اکسیژن مگنتیت در کانسارهای چادرملو، گزستان، میشدوان، لک‌سیاه و سه‌چاهون، از ۰/۷ تا ۸/۲٪+ تغییر می‌کند. مقدار $\delta^{18}O$ مگنتیت‌های توده‌ای و رگه‌ای، بین ۰/۷ تا ۴/۴٪+ است که با تبلور از سیال‌های ماگمایی و کانی‌سازی در دماهای بالا سازگار است. مقدار ۳/۹٪+ برای کانسنگ‌نواری میشدوان، که همراه با مواد آذرآواری است، نشانگر سهم مهم سیال‌های ماگمایی است. ترکیب ایزوتوپی مگنتیت در کانسنگ انباشتی چادرملو، ۲/۵٪+ به دست آمد که به تشکیل در شرایط ماگمایی و دما-بالا اشاره دارد؛ در حالی که مقادیر بالاتر (تا ۸٪+) برای کانسنگ‌نواری گزستان و لک‌سیاه، می‌تواند بازتاب فرایندهای رسوبی-دیاژنتیکی یا جانمایی در بستر دریا باشد. ترکیب ایزوتوپی گوگرد پیریت در کانسنگ‌های توده‌ای، برشی و رگه‌ای، دامنه‌ای گسترده از ۴٪+ تا ۳۰٪+ دارد که می‌تواند نشانگر نقش منابع گوگرد متفاوت با چیرگی خاصگاه غیرماگمایی باشد. دامنه وسیع داده‌های ایزوتوپی اکسیژن و گوگرد، نشان‌دهنده تحول چندمرحله‌ای کانی‌سازی با مشارکت سیال‌هایی از منابع ماگمایی و غیرماگمایی است. این تفسیر با دامنه گسترده دمای همگن شدن و شوری میانبراهای سیال از ذخایر مختلف و حتی در یک ذخیره خاص در ناحیه بافق پشتیبانی می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:

ایزوتوپ اکسیژن

ایزوتوپ گوگرد

مگنتیت

پیریت

اکسید آهن-آپاتیت

باقف

ایران مرکزی

۱- پیش‌نوشتار

ژئوشیمی ایزوتوپ‌های پایدار از ابزارهای مهم برای بررسی منبع سیال‌های کانه‌زا، مسیرهای مهاجرت سیال و شرایط فیزیکی-شیمیایی تشکیل کانسارها است (Taylor, 1974; Ohmoto and Rye, 1979; Hoefs, 2018). نسبت‌های ایزوتوپی هسته‌های سبک مانند هسته‌های اکسیژن و گوگرد به دلیل حساسیت بالا به دما، ترکیب سیال، شرایط اکسایش-کاهش و برهم‌کنش سیال-سنگ، اطلاعات کلیدی درباره فرایندهای زایشی در سامانه‌های کانی‌زایی فراهم می‌کنند (Taylor, 1974; Ohmoto and Goldhaber, 1997; Sheppard, 1986). کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت (IOA) و اکسید آهن-مس-طلا (IOCG)

از نظر زایشی همچنان بحث‌انگیز هستند. مدل‌های پیشنهادی برای منشأ این کانسارها شامل طیفی از فرایندها از ارتوماگمایی یا جدایش از مذاب سیلیکاتی، تا سامانه‌های ماگمایی-گرمایی، و گرمایی وابسته به فرایندهای غیرماگمایی است (Hitzman et al., 1992; Barton and Johnson, 2000; Williams et al., 2005). ترکیب ایزوتوپی کانی‌هایی مانند مگنتیت، آپاتیت، کربنات‌ها و سولفیدها می‌تواند داده‌های ارزشمندی درباره منبع و ماهیت سیال‌های کانسنگ ساز ارائه دهد (Nyström and Henriquez, 1994; Harlov et al., 2002; Williams et al., 2005). در کانسارهای IOA که با عنوان «نوع کایرونا» نیز شناخته می‌شوند، ترکیب

* نویسنده مسئول: مینا اسماعیلی زینی؛ E-mail: m.smali.zini@gmail.com

ماخذنگاری:

اسماعیلی زینی، م.، علیرضائی، س. و عظیم‌زاده، ا. م.، ۱۴۰۵، منبع و تحول سیال کانسنگ‌ساز در ذخایر اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق، ایران مرکزی: رهیافتی بر پایه نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد پیریت و اکسیژن مگنتیت. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۶(۲)، ۱۴۰، ۱۰۳-۱۲۲. <https://doi.org/10.22071/gsj.2026.578346.2247>

doi: 10.22071/gsj.2026.578346.2247



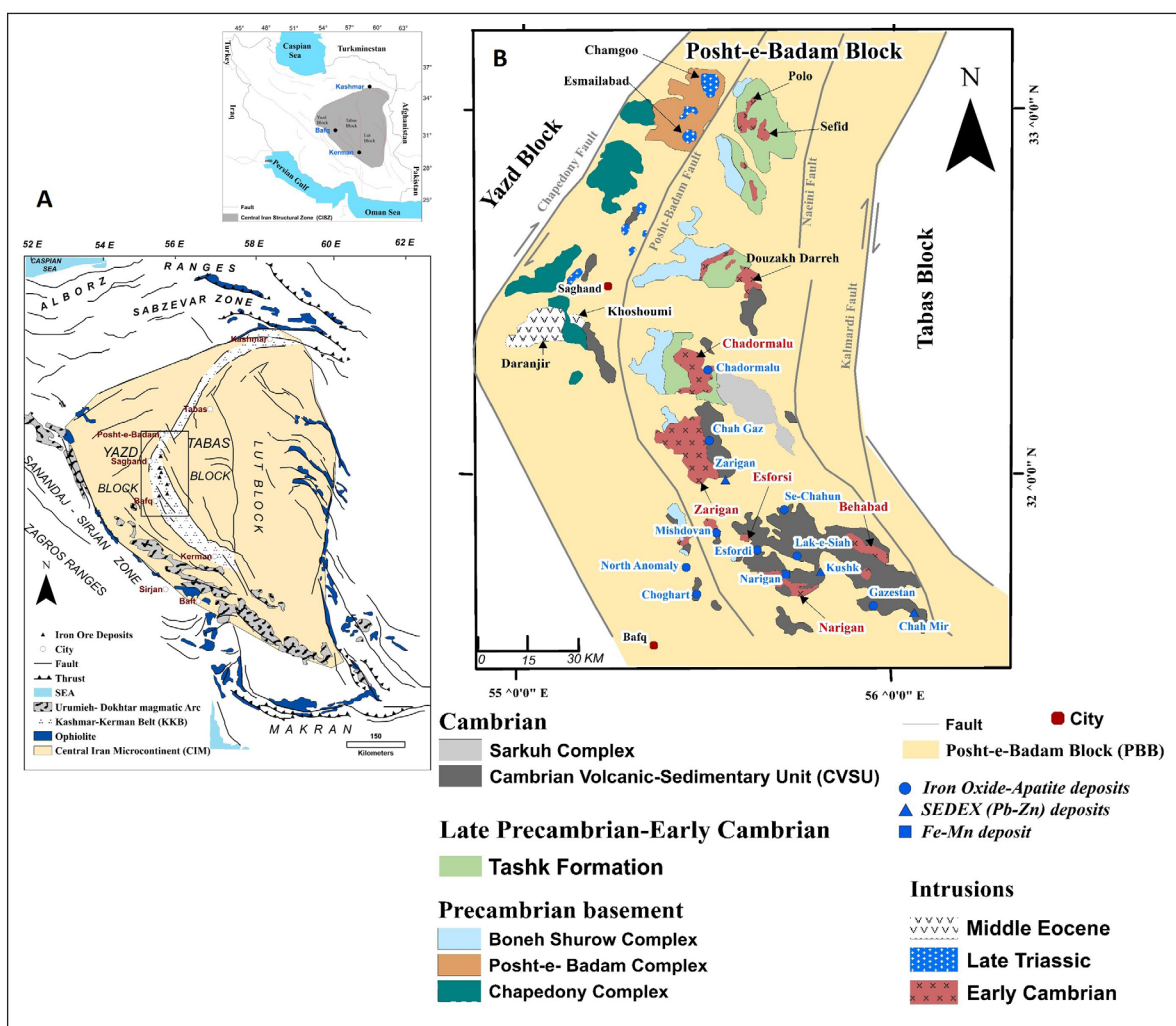
doi: 20.1001.1.10237429.1405.36.2.6.6

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/>)

ذخایر سرب-روی نوع سدکس و رخدادهای اورانیم، توریم و عناصر کمیاب خاکی است (Samani, 1988; Daliran, 2002; Ramezani and Tucker, 2003; Jami, 2005; Torab, 2008; Stosch et al., 2011; Daliran et al., 2010; Heidarian et al., 2016, 2017; Mehdipour Ghazi et al., 2019 Cambrian volcanic-sedimentary) رسوبی کامبرین (unit: CVSU) رخ داده است (شکل ۱) که شامل طیفی از سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی با ترکیب فلسیک تا حدواسط و به‌طور محلی مافیک و سنگ‌های رسوبی است (Ramezani and Tucker, 2003). در این منطقه، واحدهای کامبرین پسین با کمپلکس سرکوه (Haghipour, 1977; Ramezani and Tucker, 2003) شناخته می‌شوند که شامل مجموعه‌ای از شیت‌های دگرگونی متنوع همراه با آهک‌های تجدید تبلور یافته است.

ایزوتوپی اکسیژن مگنتیت به‌طور گسترده برای بررسی نقش سیال‌های ماگمایی در برابر سیال‌های گرمابی غیرماگمایی استفاده شده و نتایج حاصل، بیشتر با منشا ماگمایی یا ماگمایی-گرمابی سازگار بوده است (Nyström and Henriquez, 1994; Martinsson et al., 2016). اگرچه شواهدی از مشارکت آب‌های جوی نیز گزارش شده است (Frietsch et al., 1995). ترکیب ایزوتوپی گوگرد کانی‌های سولفیدی همراه، منابع متفاوتی از ماگمایی تا شورابه‌های حوضه‌ای، را برای گوگرد نشان داده است (Barton and Johnson, 1996; Barton, 2014; Martinsson et al., 2016). ایالت فلزایی بافق در بلوک پشت‌بادام (Stöcklin, 1971; Haghipour, 1977) یا کمر بند کاشمر-کرمان (Ramezani and Tucker, 2003) در پهنه ساختاری ایران مرکزی ((Central Iran Structural Zone (CISZ)) میزان اصلی ذخایر آهن نوع اکسید آهن-آپاتیت (IOA) در ایران است (شکل ۱). این ایالت، همچنین حاوی



شکل ۱- (A) طرحی از پهنه ساختاری ایران مرکزی، با نمایش گسل‌های اصلی و بلوک‌های چهارگانه آن. بلوک کاشمر-کرمان با رنگ خاکستری مشخص شده است. (B) نقشه زمین‌شناسی ناحیه بافق- پشت بادام در بخش میانی بلوک کاشمر-کرمان (ساده شده از حقی‌پور و پلیسییر (Haghipour and Pelissier, 1977)، نیسکو (NISCO, 1980)، رضایی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003)) با نمایش محل کانسارهای مگنتیت-آپاتیت نوع کایرونا، سرب-روی نوع سدکس و آهن-مگنتز رسوبی. شکل ضمیمه، طرح ساده‌ای از ایران با نمایش جایگاه پهنه ساختاری ایران مرکزی است.

Figure 1- A) A sketch of the Central Iran structural zone, showing the major faults and its four-fold divisions (blocks). B) Simplified geological map of the Bafq-Posht-e-Badam area in the central section of the Kashmar-Kerman belt (simplified after Haghipour and Pelissier (1977); Ramezani and Tucker (2003); NISCO (1980) showing the locations of iron oxide-apatite, SEDEX-type lead-zinc, and sedimentary iron-manganese deposits. The inset displays a sketch of Iran indicating the Central Iran structural zone (grey).

تا برشی، نواری، شانه‌ای و پگماتوئیدی و همچنین افشان در کمرسنگ‌های به شدت دگرسان متغیر است (شکل‌های ۲، ۴، A-H).

کانسنگ توده‌ای مگنتیت بیشتر به شکل عدسی‌ها (شکل‌های ۳، A-C) و گاه ورقه‌ها و لوله‌های نامنظم و ناهم‌شیب تا کم و بیش هم‌شیب نسبت به سنگ‌های میزبان تشکیل شده‌اند. نوعی کانسنگ برشی، شامل قطعات سنگ‌های میزبان دگرسان شده که با اکسید آهن \pm آپاتیت \pm اکتینولیت سیمانی شده‌اند (شکل‌های ۲، D و E)، در کانسارهای گزستان، سه‌چاهون، چادرملو و چغارت دیده می‌شود (سپهری‌راد، ۱۳۹۸؛ Heidarian et al., 2017; Bonyadi et al., 2011; Sadeghi Davati et al., 2008). به طور محلی به‌ویژه در حاشیه انباشت‌های کانسنگ توده‌ای و همین‌طور در سنگ‌های دربرگیرنده، کانسنگ رگه‌ای تشکیل شده است (شکل ۲-F). در برخی کانسارها مانند لک‌سیاه، گزستان، چادرملو و میشدوان، کانسنگ نواری شامل تناوب نوارهای غنی از مگنتیت (\pm هماتیت) با مواد آذرآواری مشاهده می‌شود (شکل‌های ۲، G و H). کانسنگ‌های توده‌ای و رگه‌ای عمدتاً با بافت‌های توده‌ای و شانه‌ای، و بلورهای نیمه‌وجه‌دار تا وجه‌دار مگنتیت، همراه یا بدون آپاتیت و اکتینولیت مشخص می‌شوند (شکل ۳). در حالی که کانسنگ‌های نواری در ناحیه بافق از نظر بافتی و جایگاه چینه‌شناسی از انواع توده‌ای و رگه‌ای متمایزند و بیانگر شرایط متفاوت تمرکز آهن هستند (شکل ۴).

کانسنگ‌های نواری در هر یک از کانسارهای میشدوان، چادرملو، لک‌سیاه و گزستان ویژگی‌های بافتی خاص خود را نشان می‌دهند که بیانگر سازوکارهای تشکیل متفاوت است. در کانسار چادرملو، یک کانسنگ با بافت انباشتی، به طور محلی در حاشیه توده اصلی کانسنگ وجود دارد (شکل‌های ۴، A-B). این بافت اکنون با تناوب نوارهای تیره مگنتیت، دولومیت، کوارتز، تالک، بیوتیت، آپاتیت و پیریت (شکل ۴-B) و نوارهای روشن اکتینولیت-ترمولیت، آلپیت، اسکاپولیت، تالک، کربنات (کلسیت و دولومیت) و کمتر از آن کلریت، آپاتیت و کوارتز است. در مقابل، در کانسار گزستان، نبود مواد آذرآواری، مرزهای تدریجی و بافت‌های جانیشینی از یک سو، و همراهی ژاسیلیت از سوی دیگر، خاستگاه گرمایی و متاسوماتیکی را پیشنهاد می‌کند (شکل ۴-C).

در کانسار میشدوان، لایه‌بندی متناوب مگنتیت با توف دگرسان شده، حضور قطعات لایه‌بندی مگنتیتی، خرده‌سنگ‌های آذرآواری و ساختارهای ریزشی و جریانی، به نقش فرایندهای آتشفشانی-رسوبی اشاره دارد (شکل‌های ۴، D-F). در کانسار لک‌سیاه لایه‌های متناوب مگنتیت، گاه تا ستبرای ۵۰ سانتی‌متر، با سنگ میزبان ریولیتی بخشی از کانسنگ اکسید آهن-آپاتیت را تشکیل داده است (شکل ۲-H و شکل‌های ۴، F-G). این تنوع بافتی نشان می‌دهد که کانسنگ نواری در ذخایر بافق، یک گروه زایشی واحد و مشابه نیست.

۲- روش پژوهش

این پژوهش بر پایه مشاهدات میدانی و نمونه‌برداری از رخنمون‌های سطحی کانسنگ‌های مختلف و سنگ میزبان و مغزه‌های حفاری صورت گرفته است. با بررسی نمونه‌های دستی و مطالعات میکروسکوپی نمونه‌های فراوان از کانسارهای چادرملو، اسفوردی، گزستان، میشدوان و سه‌چاهون، نمونه‌هایی برای مطالعات ایزوتوپی اکسیژن و گوگرد انتخاب شد که نمایانگر طیفی از بافت‌ها و مراحل کانه‌زایی هستند (شکل‌های ۳ تا ۵). بُرش، خردایش، جدایش و آماده‌سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی انجام شد. برای هر نمونه مگنتیت و پیریت، حدود ۴ گرم پودر با درجه خلوص بالای ۹۰٪ تهیه شد. آنالیزهای ایزوتوپی در آزمایشگاه تحقیقات ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه اراک انجام شد. همچنین آنالیز ایزوتوپی گوگرد روی یک نمونه کانسنگ آپاتیت-اکتینولیت حاوی پیریت از اسفوردی و یک نمونه از دایک مافییک حاوی پیریت از کانسار چادرملو در دانشگاه علوم زمین ووهان چین با استفاده از روش LA-MC-ICP-MS انجام شد. مشخصات نمونه‌ها به‌همراه نتایج آنالیزهای ایزوتوپی در جدول ۱ ارائه شده است.

در مورد زایش کانسارهای آهن ناحیه بافق نظریه‌های مختلفی از ارثوماگمایی (Foerster and Jafarzadeh, 1994; Mücke and Younessi, 1994; Mokhtari et al., 2013) تا گرمایی (Daliran, 2002; Moore and Modabberi, 2003; Jami et al., 2017, 2018) و رسوبی مرتبط با یخبندان جهانی پرکامبرین پسین (Aftabi et al., 2009; Mohseni and Aftabi, 2015) ارائه شده است.

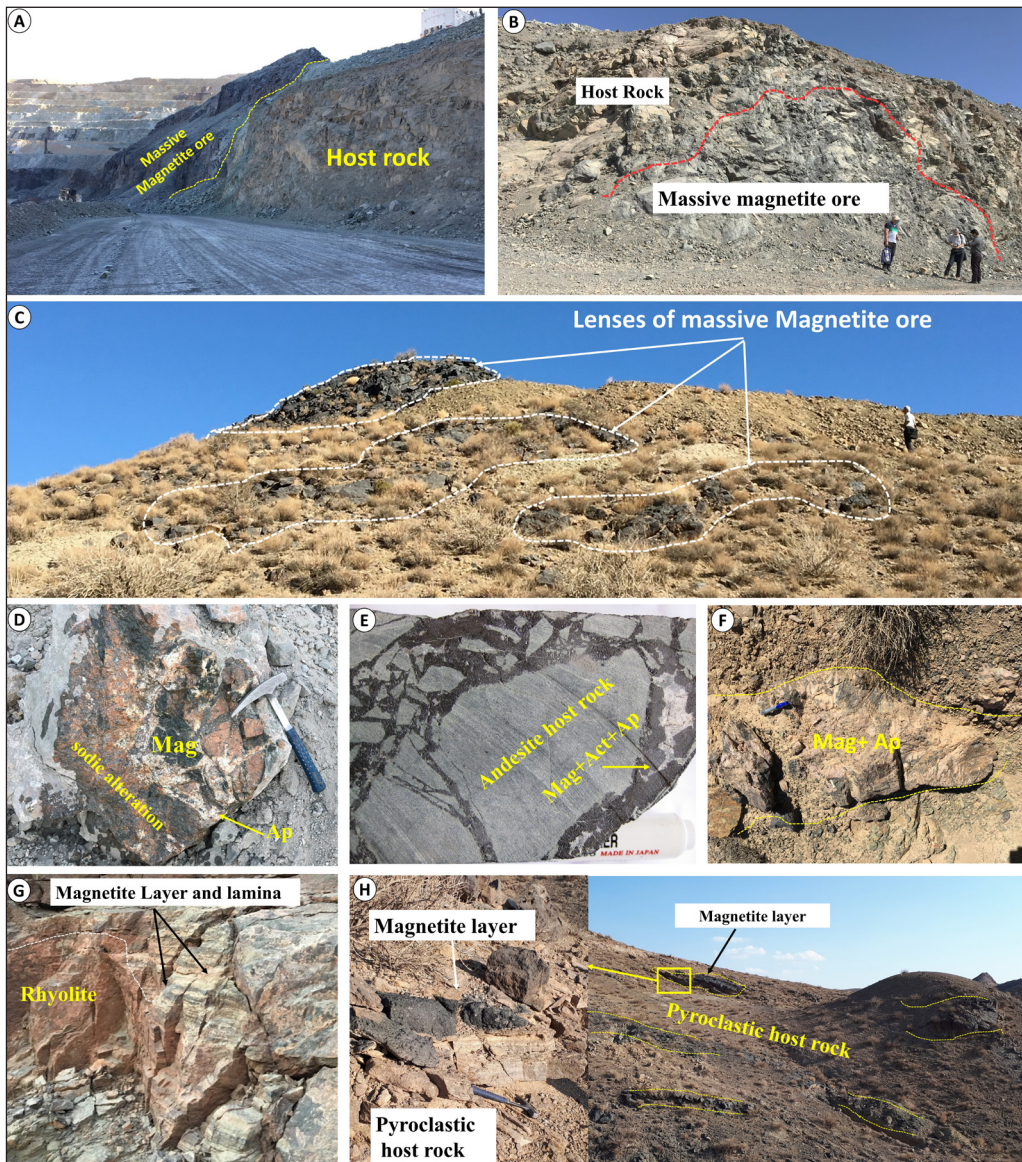
در این مقاله، با ارائه داده‌های ایزوتوپی اکسیژن و گوگرد به ترتیب در کانی‌های مگنتیت و پیریت از انواع مختلف کانسنگ در چند کانسار ناحیه بافق شامل چادرملو، گزستان، میشدوان، لک‌سیاه و سه‌چاهون، و همین‌طور داده‌های ایزوتوپی اکسیژن، هیدروژن و گوگرد منتشر شده از این کانسارها و کانسارهای IOA و IOCG در جاهای دیگر، منشا سیال یا سیال‌های موثر در تشکیل و تکامل سامانه کانه‌زایی ناحیه بافق بحث شده است.

ناحیه بافق با رخنمون‌های گسترده از مجموعه‌های دگرگونی پی‌سنگی و واحدهای سنگی پالئوزوئیک-مئوزوئیک پوشیده شده است. سنگ‌های دگرگونی هماتیت‌های چاپدون، بنه‌شورو و پشت‌بادام که شامل انواع شیست، آمفیبولیت، گنیس و گرانت گنیسی با سن پروتروزوئیک بالایی است، پی‌سنگ ایالت فلز زایی بافق را تشکیل داده‌اند (Hushmandzadeh, 1969; Stöcklin, 1971; Haghpor, 1977; Ramezani and Tucker, 2003).

این پی‌سنگ، توسط واحدهای رسوبی-آتشفشانی نئوپروتروزوئیک پسین تا تریاس پوشیده شده است (Stöcklin, 1971; Borumandi, 1973; Haghpor, 1977; Förster and Jafarzadeh, 1994). سازند تاشک با سن پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین، شامل واحدهای رسوبی با دگرگونی ضعیف (فلیت، اسلیت و کوارتزیت) همراه با میان‌لایه‌هایی از سنگ‌های آتشفشانی است (Ramezani and Tucker, 2003). این توالی توسط واحد رسوبی-آتشفشانی کامبرین (CVSU) (Huckriede and Ramezani and Tucker, 2003) که با نام‌های سری ریزو، سری دزو (Huckriede et al., 1962) و سری اسفوردی (Borumandi, 1973) سازند ساغند (سامانی، ۱۳۷۱) نیز شناخته می‌شود، پوشیده شده است. سنگ‌های آتشفشانی و نیمه-آتشفشانی واحد CVSU مافییک تا فلسیک بوده و از نظر شیمیایی، کالک آلکالن غنی از پتاسیم هستند. سنگ‌های رسوبی شامل دولومیت، سنگ آهک، شیل، ماسه‌سنگ و به طور محلی لایه‌های ژیس است (Ramezani and Tucker, 2003).

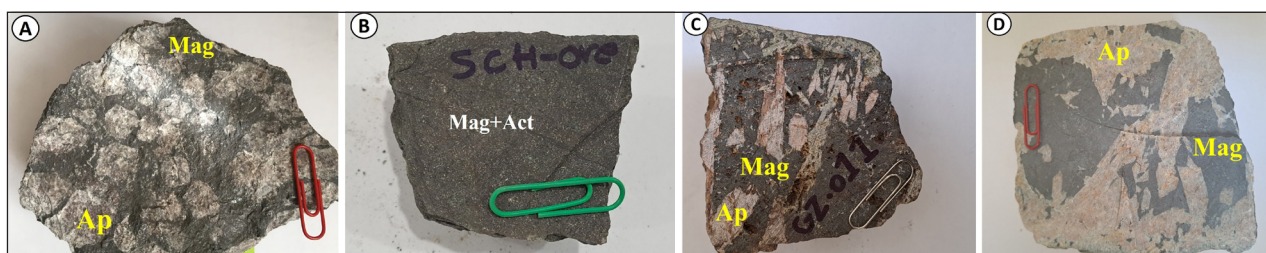
واحد CVSU میزبان اصلی کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت در ناحیه بافق است (Samani, 1988; Ramezani and Tucker, 2003; Jami, 2005; Torab, 2008). سن U-Pb زیرکن توده‌های نیمه-آتشفشانی ریوداسیتی و داسیتی واحد CVSU به ترتیب سن 527 ± 0.9 Ma و 528 ± 0.8 Ma است (Ramezani and Tucker, 2003) و با سن U-Pb آپاتیت و مونازیت ($520-535$ Ma) گزارش شده از کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق سازگار است (Torab and Lehman, 2007; Stosch et al., 2011; Bonyadi et al., 2011; Nayebe et al., 2021).

کانه اصلی آهن در ذخایر ناحیه بافق مگنتیت است که در رخنمون‌های سطحی و ژرفای کم، کم و بیش هماتیته شده است. رخداد محلی هماتیت ژرف‌زاد (هیپوژن) نیز از برخی کانسارها از جمله اسفوردی، چادرملو و سه‌چاهون گزارش شده است (Jami, 2005; Torab and Lehman, 2007; Bonyadi et al., 2011). هم‌راهان متداول کانسنگ است و عموماً به‌عنوان یک فاز کانی دیر هنگام در امتداد شکستگی‌ها و مرز دانه‌ها جانشین مگنتیت شده است. مقادیر جزئی تا ناچیز ایلمنیت و کالکوپیریت از برخی کانسارهای ناحیه بافق گزارش شده است (Jami, 2005; Torab and Lehmann, 2007). کانی‌های غیرفلزی همراه با کانسنگ اکسید آهن شامل آپاتیت، اکتینولیت، ترمولیت، آلپیت، تالک، کلریت، کوارتز، کلسیت و سریسیت است که نشان‌دهنده گستره‌ای از واکنش‌های سیال-سنگ است (Jami, 2005; Torab, 2008; Bonyadi et al., 2011; Heidarian et al., 2017, 2018; Nayebe et al., 2021; Tale Fazel and Roštami, 2020).



شکل ۲- تصویرهایی از انباشت‌های کانسنگ در کانسارهای آهن ناحیه بافق؛ (A) انباشتی از کانسنگ مگنتیت توده‌ای در سنگ میزبان دیوریتی، کانسار چادرملو؛ دید رو به خاور؛ (B) کانسنگ مگنتیت توده‌ای در میزبان ریولیتی، کانسار سه‌چاهون؛ دید رو به خاور؛ (C) عدسی‌های مگنتیت توده‌ای در سنگ‌های آتشفشانی دگرسان شده، کانسار گزستان؛ دید رو به جنوب‌باختر؛ (D) تخته سنگی از کانسنگ برشی شامل قطعات سنگ با دگرسانی سدیمی که توسط مگنتیت و آپاتیت سیمان شده‌اند؛ کانسار چادرملو؛ (E) مغزه حفاری از سنگ میزبان آندزیتی برشی با سیمانی از مگنتیت+کتینولیت+آپاتیت؛ کانسار گزستان؛ (F) کانسنگ رگه‌ای مگنتیت-آپاتیت در حاشیه عدسی‌های کانسنگ مگنتیت، کانسار گزستان؛ (G) توالی توف جوش خورده با لایه‌ها و لایه‌های مگنتیت بر روی سنگ میزبان ریولیتی؛ دیواره شمالی کارگاه استخراج اصلی کانسار میشدوان؛ (H) ساخت چینه‌سان کانسنگ در سنگ میزبان توف ریولیتی، کانسار لک‌سیاه، دید رو به جنوب. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010): Ap: Apatite; Mag: Magnetite; Act: Actinolite

Figure 2. Representative occurrences of iron ore bodies in the Bafq district deposits: A) Massive magnetite ore body hosted by diorite, Chadormalu deposit, view to the east; B) Massive magnetite ore hosted by rhyolite, Se-Chahun deposit, view to the east; C) Lenses of massive magnetite within altered volcanic rocks, Gazestan deposit, view to the southeast; D) Hand specimen of brecciated ore composed of sodically altered rock fragments cemented by magnetite and apatite, Chadormalu deposit; E) Drill core of brecciated andesitic host rock cemented by magnetite + actinolite + apatite, Gazestan deposit; F) Magnetite-apatite vein ore at the margin of magnetite ore lenses, Gazestan deposit; G) Sequence of welded tuff containing magnetite laminae and layers overlying rhyolitic host rocks, northern wall of the main open pit, Mishdovan deposit; H) Stratiform ore structure within rhyolitic tuff host rocks, Lak-e-Siah deposit, view to the southeast. Abbreviations base on Whitney and Evans (2010) including: Ap: Apatite; Mag: Magnetite; Act: Actinolite.



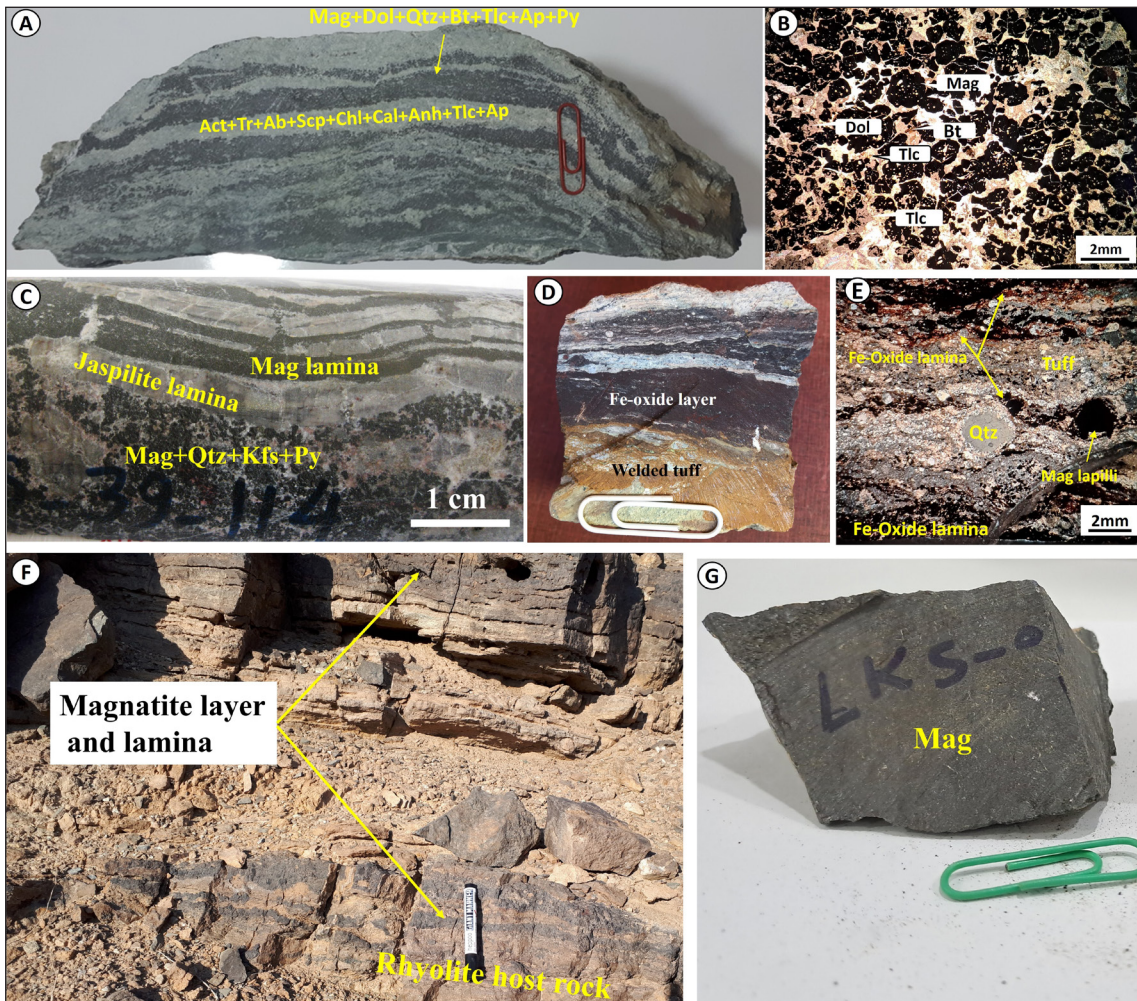
شکل ۳- تصاویر نمونه دستی از کانسنگ‌های توده‌ای و رگه‌ای مورد مطالعه برای آنالیز ایزوتوپ اکسیژن کانی مگنتیت: (A) کانسنگ مگنتیت-آپاتیت توده‌ای (نمونه CHM-04)، چادرملو؛ (B) کانسنگ مگنتیت-آکتینولیت توده‌ای (نمونه SCH-ore)، سه‌چاهون؛ (C) کانسنگ مگنتیت-آپاتیت رگه‌ای (نمونه GZ-011)، گزستان؛ (D) کانسنگ مگنتیت-آپاتیت رگه‌ای (نمونه CHM-017)، چادرملو.

Figure 3. Photographs of the samples of massive and vein ores used for magnetite oxygen isotopic analysis; A) Massive magnetite-apatite ore (CHM-04), Chadormalu; B) Massive magnetite-actinolite ore (SCH-ore), Se-Chahun; C) Vein-type magnetite-apatite ore (GZ-011), Gazestan. D) Vein-type magnetite-apatite ore (CHM-017), Chadormalu.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌ها و داده‌های ایزوتوپی اکسیژن و گوگرد در کانسارهای ناحیه بافق.

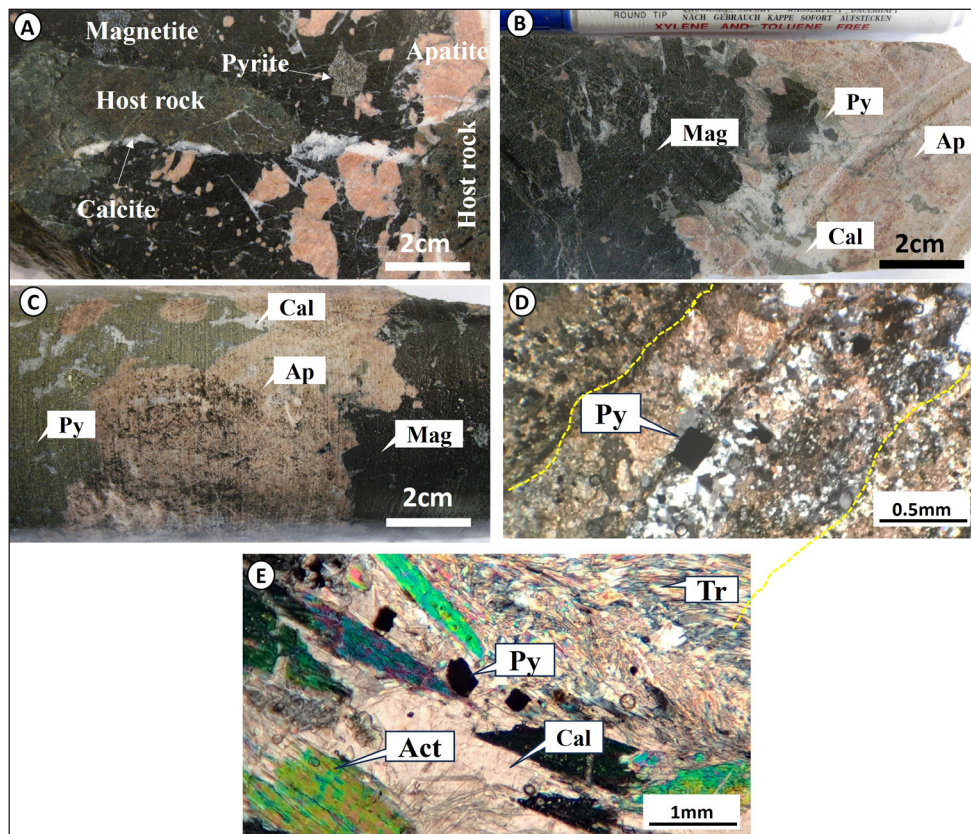
Table 1. Sample characteristics and oxygen and sulfur isotopic data for selected IOA deposits in the Bafq district.

Sample Code	Sample location	Mineral	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ (SMOW) $\pm 1\sigma$	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ (VCDT) $\pm 1\sigma$	Remarks
Chadormalu					
CHM-04	Out crop	Magnetite	+0.7		Massive magnetite-apatite ore consisting of medium- to coarse-grained apatite in a matrix of fine-grained magnetite
CHM-016	Out crop	Magnetite	+2.5		Banded magnetite ore consisting of alternate dark magnetite-rich and greenish actinolite-rich bands.
CHM-017	Out crop	Magnetite	+4.4		Vein-type magnetite-apatite ore consisting of euhedral coarse-grained apatite with a comb texture in a matrix of magnetite
CHM-03	Out crop	Pyrite		+14.5	Diabase dike containing disseminated pyrite crosscuts the massive magnetite ore body and the adjacent host rock.
CHM-03	Out crop	Pyrite		+14	
CHM-03	Out crop	Pyrite		+13.1	
Mishdovan					
MSH-07	Out crop	Magnetite	+3.9		Banded magnetite ore composed of alternating bands or layers of magnetite (hematite) and pyroclastic materials
Se-Chahun					
SCH-ore	Out crop	Magnetite	+3.4		Massive magnetite ore composed of fine-grained magnetite with minor apatite, actinolite, albite, and calcite
Lak-e-Siah					
LSK-02	Out crop	Magnetite	+8.1		Banded magnetite ore consisting of alternating fine- to coarse-grained magnetite layers with pyroclastic rhyolitic materials
LKS-01	Out crop	Magnetite	+7.6		Banded magnetite ore consisting of alternating fine- to coarse-grained magnetite with pyroclastic rhyolitic materials
Gazestan					
GZ-011	Out crop	Magnetite	+2.4		Vein-type magnetite-apatite ore consisting of pegmatoid apatite with comb texture in a matrix of magnetite and late calcite.
RS-39-114	Borehole	Magnetite	+8.2		Banded magnetite-silica ore characterized by alternating reddish silica (jaspilite) \pm pyrite \pm feldspar, and dark, fine-grained magnetite bands.
RS-39-62	Borehole	Pyrite		+11.1	Fine-grained pyrite in a magnetite-apatite-pyrite-calcite association cementing the brecciated host rock.
RS-46-35.5	Borehole	Pyrite		+10.8	Euhedral to subhedral pyrite in an apatite-magnetite-calcite-chlorite-pyrite association cementing brecciated host rock
RS-39-59	Borehole	Pyrite		+11.8	Fine-grained pyrite in an apatite-magnetite-quartz-calcite-pyrite association cementing brecciated host rock.
Esfordi					
ESF-016	Out crop	Pyrite		+13.6	Disseminated pyrite grains in a diabase dike crosscutting massive magnetite ore and older host rocks
EFS-016	Out crop	pyrite		+12.9	



شکل ۴- تصاویر نمونه‌هایی از کانستگسازهای نواری ناحیه بافق که ایزوتوپ اکسیژن مگنتیت آن‌ها آنالیز شده است. (A) سطح برش خورده از کانستگ نواری انباشتی چادرمولو، با نوارهای متناوب غنی از مگنتیت (سیاه) و غنی از اکتینولیت (سبز روشن)؛ نمونه از حاشیه خاوری توده اصلی کانستگ در کارگاه استخراج مرکزی؛ (B) تصویر میکروسکوپی (XPL) از نوار غنی از مگنتیت با بلورهای خودشکل (یوهدرال) تا نیمه‌شکل دار (سابه‌درال) مگنتیت، کانستگ انباشتی چادرمولو؛ فضای بین بلورها شامل دولومیت، کوارتز، بیوتیت و تالک است؛ (C) سطح برش خورده مغزه حفاری از کانستگ نواری ژاسپیلیتی در کانسار گزستان. نوارهای سیلیس دستخوش گسیختگی و بودین‌شدگی گشته‌اند؛ (D) تناوب لایینه‌های تیره (اکسید آهن) و روشن (روانه خاکستر جوش خورده) از کانستگ نواری میشدوان. در هر دو لایینه تیره و روشن، خاکستر، خرده سنگ و بلورهای کوارتز و فلدسپات دیده می‌شود. لایینه‌ها بافت جریان‌دارند؛ (E) تناوب لایینه‌های روانه خاکستر جوش خورده غنی و فقیر از مگنتیت در کانستگ نواری میشدوان. مگنتیت در اندازه لاپیلی‌های کوچک، خرده سنگ و بلورهای کوارتز و فلدسپار با نسبت‌های متفاوت در نوارهای تیره و روشن وجود دارد. (F) کانستگ نواری متشکل از لایه‌ها و لایینه‌های مگنتیت در سنگ میزبان توف ریولیتی؛ (G) کانستگ نواری مگنتیت (نمونه LKS-02)، لک‌سیاه. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010). (Py: Pyrite; Act: Actinolite; Tr: Tremolite; Ab: Albite; Scp: Scapolite; Chl: Chlorite; Cal: Calcite; Anh: Anhydrite)

Figure 4. Photographs of the banded ore samples selected for oxygen isotope analysis of magnetite. A) Cut surface of Chadormalu cumulate ore showing alternating magnetite-rich (black) and actinolite-rich (light green) bands. Sample from the eastern border of the main ore body; B) Microphotograph of Chadormalu cumulate ore consisting of euhedral to subhedral magnetite crystals, now enclosed in dolomite, quartz, biotite, and talc; C) Cut surface of a drill core from banded jaspilitic ore from Gazestan deposit. Silica-rich bands are fractured and boudined; D) Alternation of dark (iron oxide-rich) and light (welded ash matrix) laminae in a sample from Mishdovan banded ore. Ash particles, lithic fragments, and quartz and feldspar crystals occur in both dark and light laminae. The laminae exhibit flow textures; E) XPL photo of Mishdovan banded ore. Alternation of magnetite-rich and magnetite-poor volcanoclastic (welded ash) laminae within the banded ore. Magnetite occurs as fine lapilli-size component associated with lithic fragments, and quartz and feldspar crystals in varying proportions in both dark and light layers. F) Banded ore composed of magnetite layers and laminae within the rhyolitic tuff host rock; G) Banded magnetite ore (sample LKS 02), Lak-e Siah deposit. Abbreviations base on Whitney and Evans (2010) including: Ap: Apatite; Mag: Magnetite; Bt: Biotite; Dol: Dolomite; Tlc: Talc; Qtz: Quartz; Kfs: K-feldspar; Py: Pyrite; Act: Actinolite; Tr: Tremolite; Ab: Albite; Scp: Scapolite; Chl: Chlorite; Cal: Calcite; Anh: Anhydrite.



شکل ۵- تصویر نمونه‌هایی از کانسنگ اکسید آهن-آپاتیت که برای آنالیز ایزوتوپ گوگرد پیریت انتخاب شد. (A) کانسنگ برشی از گزستان با قطعات سنگ میزبان آندزیتی در سیمان مگنتیت-آپاتیت-کلسیت-پیریت، از گمانه RS-46، از ژرفای ۳۵/۵ متری؛ (B-C) کانسنگ برشی از گزستان با سیمان حاوی آپاتیت-پیریت-مگنتیت-کلسیت، هر دو نمونه از گمانه RS-39 به ترتیب از ژرفاهای ۶۲ (B) و ۵۹ (C) متری؛ (D) تصویر میکروسکوپی XPL از رگچه کوارتز-کلسیت حاوی پیریت در نمونه‌ای از یک دایک دیابازی در کانسار چادرملو؛ (E) تصویر میکروسکوپی XPL از کانسنگ توده‌ای آپاتیت-اکتینولیت، کانسار اسفوردی، با بلورهای ریز و یوهدرال پیریت در زمینه کربناتی. علائم اختصاری کانی‌های بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) شامل: Ap: Apatite; Act: Actinolite; Mag: Magnetite; Py: Pyrite; Cal: Calcite; Tr: Tremolite.

Figure 5. Representative samples of from Iron Oxide-Apatite ore that selected for sulfur isotopic analysis. A) Brecciated ore from the Gazestan deposit containing andesitic host-rock fragments within a magnetite-apatite-calcite-pyrite cement, borehole RS-46, at a depth of 35.5 m; B-C) Brecciated ore from the Gazestan deposit with an apatite-pyrite-magnetite-calcite matrix; both samples from borehole RS-39, at depths of 62 m (B) and 59 m, respectively; D) Photomicrograph XPL of a quartz-calcite veinlet containing pyrite in a diabase dike sample from the Chadormalu deposit; E) Photomicrograph XPL of massive apatite-actinolite ore from the Esfordi deposit, showing fine-grained euhedral pyrite crystals in a carbonate matrix. Abbreviations based on Whitney and Evans (2010), including: Ap: Apatite; Act: Actinolite; Mag: Magnetite; Py: Pyrite; Cal: Calcite; Tr: Tremolite.

برای تعیین $\delta^{18}\text{O}$ ، حدود ۱ گرم پودر مگنتیت پیرولیز و مولکول CO تولید شده جمع‌آوری شد و پس از عبور از دو سیستم تله و تصفیه و حذف تمام گازهای مزاحم، به داخل طیف سنج جرمی نسبت ایزوتوپی (IRMS) ارسال و نسبت جرم $^{30}/^{28}$ به منظور ارزیابی $\delta^{18}\text{O}$ نمونه با انحراف معیار $(1\sigma) \leq 0.3\%$ ، تعیین شد. برای تعیین $\delta^{34}\text{S}$ ، پس از سوزاندن نمونه جامد در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، گاز SO_2 تولید شده از سیستم تله و تصفیه عبور کرده و در نهایت نسبت جرم $^{66}/^{64}$ به منظور ارزیابی نسبت $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ نمونه، با دقت 0.20% تعیین شد. آنالیز ایزوتوپ گوگرد پیریت در آزمایشگاه فرایندهای زمین‌شناختی و منابع کانیایی (GPMR) در دانشگاه علوم زمین چین (ووهان) با استفاده از (Nu Plasma II LA-MC-ICP-MS) و سامانه

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- ترکیب ایزوتوپی اکسیژن و آهن مگنتیت

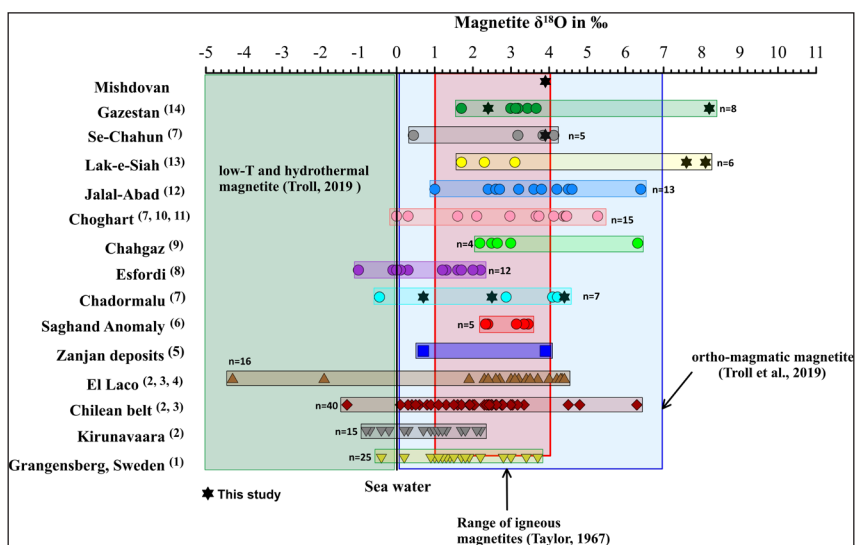
داده‌های ایزوتوپ اکسیژن مگنتیت از کانسارهای چادرملو، گزستان، میشدوان، لک‌سیاه و سه‌چاهون در این پژوهش به همراه داده‌های منتشر شده از این کانسارها و کانسارهای دیگر در ناحیه بافق در شکل ۶ ارائه شده است. در این شکل، محدوده‌های ایزوتوپی متناظر با مگنتیت‌های آذرین (Taylor, 1968)، ارتوماگمایی

از مقادیر گزارش شده برای کانسنگ‌های توده‌ای و رگه‌ای در سایر کانسارها است. در کانسار گزستان، مقدار $\delta^{18}\text{O}$ برای مگنتیت از کانسنگ رگه‌ای مگنتیت-آپاتیت، $+۲/۴\%$ و برای مگنتیت کانسنگ نواری، $+۸/۲\%$ به دست آمد. داده‌ها نشان می‌دهند که کانسنگ‌های نواری همراه با مواد آذرآواری و سیلیس، مقادیر بالاتری از $\delta^{18}\text{O}$ در مقایسه با کانسنگ‌های توده‌ای و رگه‌ای دارند؛ کمترین مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ در مگنتیت کانسنگ‌های توده‌ای ثبت شد (جدول ۱).

مگنتیت کانسارهای ناحیه بافق، دامنه‌ای از مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ را نشان می‌دهد که از نزدیک به -۲ تا $+۸/۲\%$ پرمیل متغیر است (شکل ۶). چنین گستره‌ای از تغییرات ایزوتوپی بیانگر گوناگونی شرایط تشکیل کانسنگ، دمای تشکیل و احتمالاً مشارکت سیال‌هایی با خاستگاه متفاوت در سامانه‌های کانه‌زایی است (Taylor, 1968; Valley, 1986; Hoefs, 2018). به استثنای داده‌های مربوط به کانسنگ‌های نواری گزستان و لک‌سیاه، بیشتر مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ مگنتیت در کانسارهای چادرملو، گزستان، آنومالی ساغند، لک‌سیاه و تنها نمونه کانسنگ میشدوان در محدوده مگنتیت‌های آذرین قرار می‌گیرند (شکل ۶). در کانسار چغارت، مگنتیت‌ها تغییرات نسبتاً گسترده‌ای در مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ نشان می‌دهند که به سمت محدوده ارتوماگمایی گسترش نشان می‌دهند (شکل ۶). در مقابل، مگنتیت‌های کانسار اسفوردی و یک نمونه از کانسنگ چادرملو، تمایل مشخص به سوی محدوده مگنتیت‌های گرمایی دمای پایین نشان می‌دهند.

(Troll et al., 2019) نیز مشخص شده است. مگنتیت آذرین به مگنتیتی گفته می‌شود که مستقیم از ماگما متبلور شده است. مگنتیت ارتوماگمایی به مگنتیتی اشاره دارد که ضمن تحول ماگما و در طیف دمایی گسترده‌تر تشکیل شده است و شامل مرحله اولیه تبلور در دماهای بالا (بیش از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) و مرحله دیر هنگام‌تر، مرتبط با تبلور همزمان از ماگما و از سیال‌های ماگمایی تفریق‌یافته، در دماهای بالا تا متوسط (حدود ۸۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. در مقابل، مگنتیت گرمایی در دماهای پایین‌تر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و به طور عمده از سیال‌های ماگمایی در حال سرد شدن یا سامانه‌های گرمایی با مشارکت سیال‌های برون‌زاد تشکیل می‌شود (Troll et al., 2019).

ترکیب ایزوتوپی اکسیژن مگنتیت به دست آمده از کانسارهای مختلف ناحیه بافق در این پژوهش، از $+۰/۷\%$ تا $+۸/۲\%$ متغیر است (جدول ۱). نمونه‌های مگنتیت از کانسنگ‌های توده‌ای، نواری و رگه‌ای در کانسار چادرملو، به ترتیب مقدار $\delta^{18}\text{O}$ برابر با $+۰/۷\%$ ، $+۲/۵\%$ و $+۴/۴\%$ را به دست دادند. مگنتیت از کانسنگ نواری میشدوان، متشکل از تناوب لایه‌های مگنتیت (هماتیت) و مواد آذرآواری، مقدار $\delta^{18}\text{O}$ برابر با $+۳/۹\%$ را نشان داد (جدول ۱). برای مگنتیت کانسنگ توده‌ای از کانسار سه‌چاهون، مقدار $\delta^{18}\text{O}$ برابر با $+۳/۴\%$ به دست آمد. بالاترین مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ برای مگنتیت در دو نمونه از کانسنگ نواری لک‌سیاه ($+۸/۱\%$ و $+۷/۶\%$) و کانسنگ گزستان ($+۸/۲\%$) ثبت شد. این مقادیر به طور مشخص بالاتر

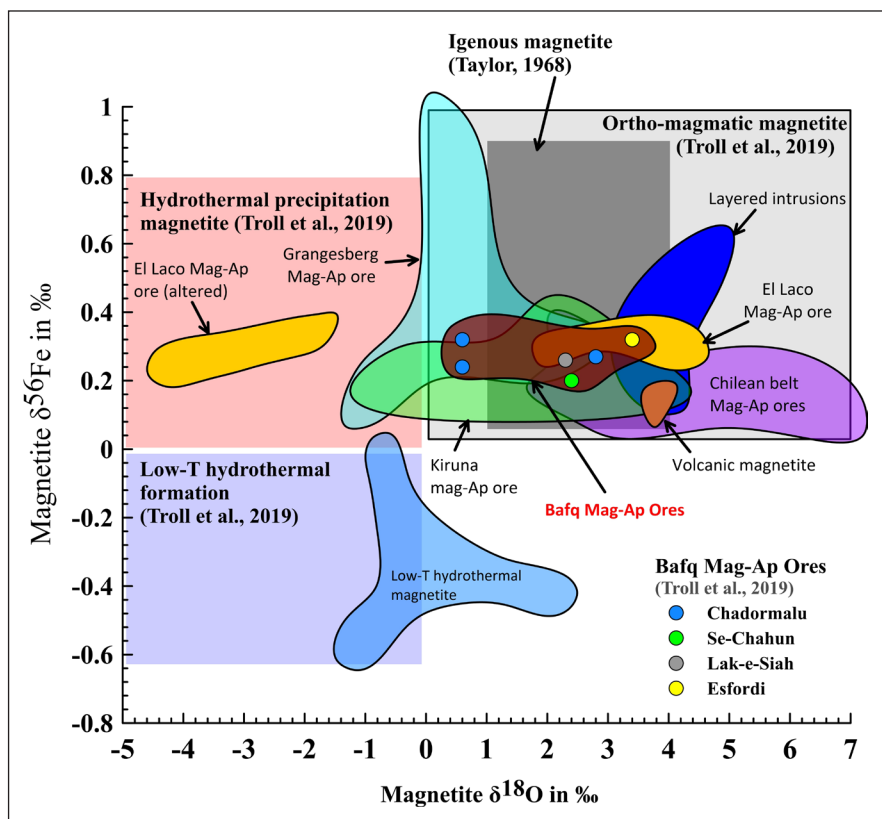


شکل ۶- مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ مگنتیت در کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت (IOA) ناحیه بافق. داده‌های ایزوتوپی کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت زنجان (ایران)، کمر بند آهن شیلی و کانسارهای Kiirunavaara و Grängesberg در سوئد برای مقایسه نشان داده شده است. محدوده‌های مختلف مگنتیت‌های آذرین، ارتوماگمایی و گرمایی نیز مشخص شده است (متن را ببینید). منبع داده‌ها: [1] Jonsson et al. (2013); [2] Nyström et al. (2008); [3] Bilenker et al. (2016); [4] Troll et al. (2019); [6] Deymar et al. (2018); [7] Mehdipour Ghazi et al. (2019); [8] Jami et al. (2007); [9] Ziapour et al. (2021); [10] Moor and Modabberi (2003); [11] Majidi et al. (2021); [12] Mehrabi et al. (2019); [13] Talefazel and Rostami (2020), and [14]. Afzali et al. (2016).

Figure 6. Variations of the magnetite $\delta^{18}\text{O}$ values in the Bafq district iron oxide-apatite (IOA) deposits. Isotopic data from iron oxide-apatite deposits of Zanjan (Iran), the Chilean iron belt and the Kiirunavaara and Grängesberg deposits in Sweden are shown for comparison. See text for a description of igneous, orthomagmatic and hydrothermal magnetites. Sources of data: Jonsson et al. (2013) [1]; Nyström et al. (2008) [2]; Bilenker et al. (2016) [3]; Troll et al. (2019); [5] Deymar et al. (2018); [6] MehdipourGhazi et al. (2019); [7] Jami et al. (2007); [8] Ziapour et al. (2021); [9] Moor and Modabberi (2003); [10] Majidi et al. (2021); [11] Mehrabi et al. (2019); [12] Talefazel and Rostami (2020), and [13]. Afzali et al. (2016).

در بررسی مقایسه‌ای نسبت‌های ایزوتوپی آهن و اکسیژن مگنتیت در مجموعه‌ای از کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت (IOA) در ناحیه بافق و همچنین کانسارهای سوئد و شیلی، ترول و همکاران (Troll et al., 2019) نشان دادند که مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^{56}\text{Fe}$ مگنتیت‌های ناحیه بافق به ترتیب در بازه‌های $+0.2\%$ تا $+0.32\%$ و $+0.6\%$ تا $+3.4\%$ قرار می‌گیرد. این مقادیر، به طور عمده در محدوده‌های مگنتیت‌های ماگمایی و ارتوماگمایی ترسیم شده و همپوشانی چشمگیری با داده‌های گزارش شده از کمر بند آهن شیلی، ناحیه کایرونا در سوئد و کانسار El Laco نشان می‌دهند (شکل ۷). این همخوانی ایزوتوپی بیانگر شباهت در شرایط فیزیکوشیمیایی و فرایندهای موثر بر تشکیل کانسنگ آهن در این سامانه‌های کانه‌زایی است. با این حال، زیرمجموعه‌ای از داده‌ها با مقادیر پایین‌تر $\delta^{18}\text{O}$ ، در حالی که همچنان نشانه ماگمایی $\delta^{56}\text{Fe}$ را حفظ کرده‌اند، در میدان مگنتیت‌های گرمایی ترسیم می‌شوند. این ویژگی به‌عنوان نتیجه برهمکنش مگنتیت ماگمایی اولیه با سیال‌های ماگمایی-گرمایی دما بالا (بیش از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) تفسیر شده است (Sillitoe and Burrows, 2002; Jonsson et al., 2013; Tornos et al., 2016). در مقابل، مگنتیت‌هایی که در میدان گرمایی دمای پایین قرار می‌گیرند، به دگرسانی گرمایی در دماهای کمتر (تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) نسبت داده می‌شوند که طی مراحل پایانی تکامل سامانه کانه‌زایی بر مگنتیت اولیه اثر گذاشته‌اند (Troll et al., 2019).

داده‌های ایزوتوپی مربوط به کانسارهای چادرملو و بی‌هنجاری ساغند عمدتاً در محدوده ارتوماگمایی متمرکز هستند، هرچند وجود یک نمونه از چادرملو در میدان گرمایی دمای پایین، می‌تواند بیانگر ناهمگونی محلی در شرایط کانی‌سازی باشد. بیشتر داده‌های مربوط به کانسار جلال‌آباد نیز در محدوده ارتوماگمایی قرار می‌گیرند (شکل ۶). لازم به ذکر است که تشکیل ذخایر اکسید آهن-آپاتیت در ایران، محدود به ایران مرکزی و دوره کامبرین نیست. ذخایر مشابه در کمر بند طارم-هشتجین، زنجان (شمال باختر ایران) شناسایی شده‌اند که در همبستگی مکانی و زایشی مستقیم با توده‌های نفوذی کوارتز مونزونیتی ائوسن پسین قرار دارند (Nabatian et al., 2014). ترکیب ایزوتوپی اکسیژن مگنتیت در کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت ناحیه زنجان، $+0.7\%$ تا $+3.9\%$ پرمیل است که هماهنگ با نهشت از سیال ماگمایی است (شکل ۶). در مقیاس جهانی، ترکیب ایزوتوپی اکسیژن مگنتیت از کانسار El Laco در کمر بند آهن شیلی و همچنین از کانسارهای کایروناوا (Kiirunavaara) و گرانزبرگ (Grängesberg) در سوئد، عمدتاً در محدوده ارتوماگمایی واقع می‌شود، اگرچه تعداد محدودی از نمونه‌ها در میدان سیال‌های گرمایی با دمای پایین قرار می‌گیرند (شکل ۶). این همپوشانی ایزوتوپی میان کانسارهای ناحیه بافق و نمونه‌های کلاسیک جهانی، نشان می‌دهد که فرایندهای موثر در تشکیل کانسنگ و تکامل سامانه‌های کانه‌زایی، قابل مقایسه با هم هستند.

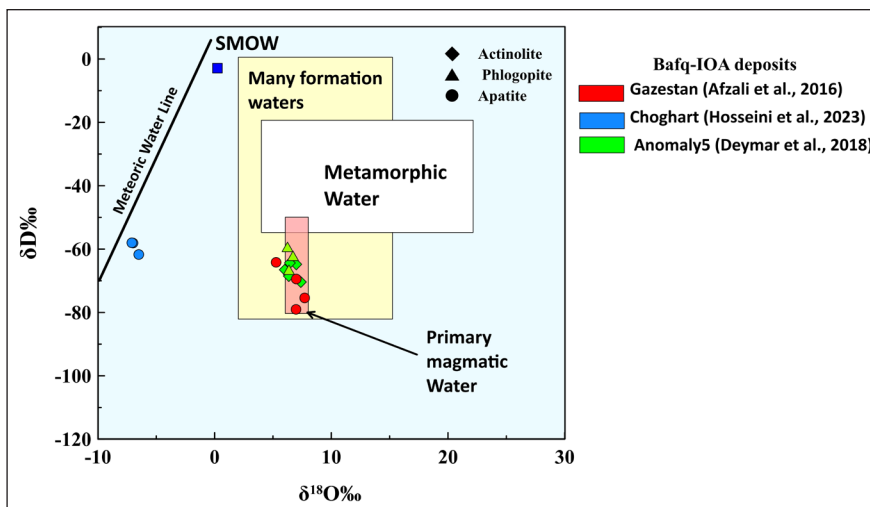


شکل ۷- تغییرات ایزوتوپی آهن و اکسیژن مگنتیت از چند کانسار ناحیه بافق و کانسارهای IOA سوئد و شیلی در نمودار $\delta^{18}\text{O}$ در برابر $\delta^{56}\text{Fe}$ (Troll et al., 2019) با تغییر. محدوده‌های مگنتیت ارتوماگمایی، گرمایی و گرمایی دما-پایین (Troll et al., 2019) و مگنتیت آذرین بر پایه تیلور (Taylor, 1968) مشخص شده است.

Figure 7. Variations of oxygen and iron isotope compositions of magnetites from Bafq district, Swedish, and Chilean IOA deposits (modified after Troll et al., 2019). The domains for orthomagmatic, hydrothermal, and low-temperature hydrothermal magnetite after Troll et al. (2019); the field for igneous magnetite from Taylor (1968).

و $\delta^{18}\text{O}$ به ترتیب برابر با $\% -۷۴/۸$ و $\% ۶/۷$ گزارش شده است که بر نقش چیره سیال‌های ماگمایی در فرایند کانه‌زایی دلالت دارد (افضلی و همکاران، ۱۳۹۵). در مقابل، ترکیب ایزوتوپی آپاتیت از کانسار چغارت خارج از محدوده ماگمایی و بسیار نزدیک به خط آب جوی قرار گرفته است (شکل ۸). داده‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن می‌تواند بیانگر آمیختگی محلی سیال‌های ماگمایی با آب‌های جوی در تحول سامانه کانه‌زایی باشد (حسینی و همکاران، ۱۴۰۱)، پدیده‌ای که در برخی کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت در مراحل دیر هنگام کانی سازی رخ داده است (Barton and Johnson, 1996; Williams et al., 2005; Hitzman et al., 1992; Sillitoe, 2003; Troll et al., 2019).

۳-۱-۱- ایزوتوپ‌های اکسیژن-هیدروژن در کانی‌های آبدار همراه مگنتیت
داده‌های منتشر شده از ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن در کانی‌های آبدار (فلوگوپیت، اکتینولیت و آپاتیت) همراه با کانسنگ اکسید آهن و سنگ‌های میزبان دگرسان‌شده در کانسارهای ناحیه بافق، در شکل ۸ گردآوری شده است. دیمر و همکاران (Deymar et al., 2018) دامنه نسبتا محدودی از مقادیر δD و $\delta^{18}\text{O}$ به ترتیب $\% -۷۰/۴$ تا $\% -۵۹/۳$ و $\% ۰/۶$ تا $\% ۷/۴$ را برای کانی‌های اکتینولیت و فلوگوپیت از کانسار آنومالی ساغند گزارش کردند و بر این اساس یک منشا ماگمایی برای سیال‌های مسئول متاسوماتیسم سدیمی-کلسیمی (Na-Ca) و پتاسیمی-کلسیمی (K-Ca) پیشنهاد دادند (شکل ۸). مقادیر ایزوتوپی مشابهی برای آپاتیت از کانسار گزستان (میانگین δD



شکل ۸- نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن در کانی‌های آبدار همراه با کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت و سنگ‌های دربرگیرنده دگرسان‌شده در کانسارهای گزستان، لک‌سیاه، چغارت و بی‌هنجاری ساغند ناحیه بافق. محدوده‌های مربوط به منابع مختلف آب بر اساس هوفز (Hoefs, 2018).

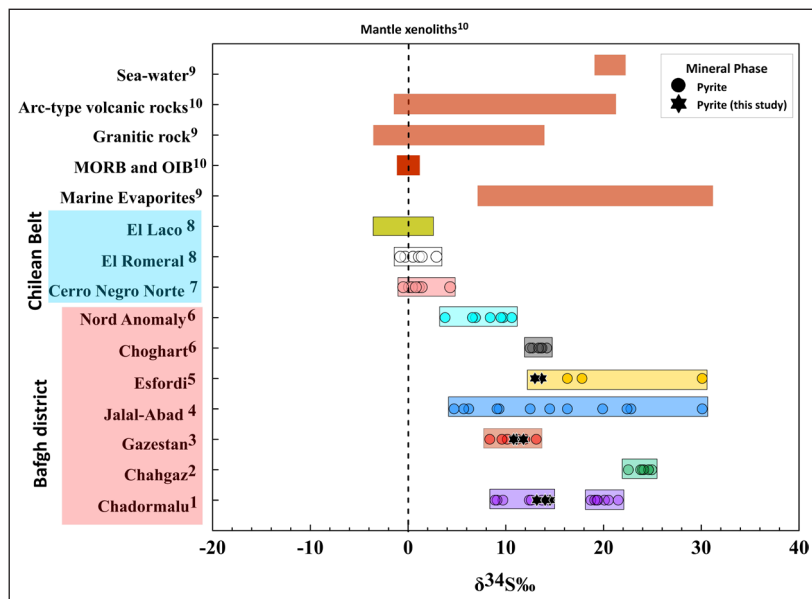
Figure 8. Oxygen and hydrogen isotopic ratios in hydrous minerals associated with magnetite-apatite ores and altered host rocks in the Gazestan, Lak-e-Siah, Choghart, and Saghand Anomaly deposits, Bafq district. The isotopic composition of various water reservoirs after Hoefs (2018).

کانسنگ مگنتیت از کانسار چادرملو و کانسنگ آپاتیت-اکتینولیت از پهنه‌های غنی از آپاتیت در کانسار اسفوردی، به ترتیب مقادیر $\% ۱۳/۱۷$ تا $\% ۱۴/۵۲$ و $\% ۱۲/۹۸$ تا $\% ۱۳/۶۷$ به دست آمد (جدول ۱) (شکل‌های ۵، E و F). ترکیب ایزوتوپی گوگرد پیریت از پهنه‌های غنی از آپاتیت و همین طور سنگ‌های میزبان دگرسان‌شده در کانسار اسفوردی در بازه $\% ۱۶/۳$ تا $\% ۳۰/۱$ گزارش شده است (Jami, 2005). صادقی دعوتی و همکاران (Sadeghi Davati et al., 2008) مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ پیریت برای کانسارهای چغارت و بی‌هنجاری شمالی (Nord Anomaly) را به ترتیب در بازه‌های $\% ۱۲/۵$ تا $\% ۱۴/۲$ و $\% ۳/۷۸$ تا $\% ۱۰/۶$ گزارش کردند. حیدریان و همکاران (Heidarian et al., 2017) برای پیریت در کانسنگ‌های توده‌ای و رگه‌ای کانسار چادرملو به ترتیب مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ بین $\% ۸/۹$ تا $\% ۱۴/۴$ و $\% ۱۸/۷$ تا $\% ۲۱/۵$ را به دست آوردند. به همین شکل، ترکیب ایزوتوپی پیریت از کانسارهای گزستان و جلال آباد، گرایش آشکار به سوی مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ مثبت و سنگین از نظر ایزوتوپی نشان می‌دهد (شکل ۹).

در مقایسه، مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ پیریت از کانسارهای Cerro Negro Norte و El Romeral در کمرند آهن شیلی دامنه بسیار محدودی ($\% -۲$ تا $\% ۴$) نشان می‌دهند که بیانگر منبع گوگرد به نسبت همگن است (Salazar et al., 2019; Rojas et al., 2018). در کانسار El Laco، مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ به سمت مقادیر منفی تر گسترش دارد (شکل ۹).

۳-۱-۲- ایزوتوپ گوگرد

پیریت یکی از کانی‌های همراه متداول در کانسارهای IOA ناحیه بافق است. این کانی در امتداد درز و شکستگی‌ها و همین طور به صورت بلورها و دسته‌جات بلوری پراکنده در کانسنگ مگنتیت و در سنگ‌های دربرگیرنده توده‌های کانسنگ مشاهده می‌شود. ترکیب ایزوتوپی گوگرد پیریت در کانسارهای ناحیه بافق، دامنه‌ای گسترده از حدود $\% ۴$ تا $\% ۳۰$ نشان می‌دهد (شکل ۹). سه نمونه پیریت از سیمان برش در کانسار گزستان، دامنه‌ای به نسبت محدود بین $\% ۱۰/۸$ تا $\% ۱۱/۸$ را به دست داد که از این میان دو نمونه، پیریت ریزدانه همراه با مگنتیت-آپاتیت-کلسیت در سیمان برش (شکل‌های ۵، C-D) به ترتیب مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ برابر با $\% ۱۱/۱$ و $\% ۱۱/۸$ را نشان دادند (جدول ۱). پیریت با ابعاد بلورهای متوسط در سیمان برش، مقدار $\delta^{34}\text{S}$ برابر با $\% ۱۰/۸$ را نشان می‌دهد (جدول ۱). تفاوت میان این مقادیر اندک بوده و بیانگر یکنواختی نسبی ترکیب ایزوتوپی گوگرد در پیریت‌های این کانسار است. دایک‌های دیابازی در کانسار چادرملو، کانسنگ مگنتیت و سنگ‌های میزبان را قطع کرده‌اند. مشاهدات سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که این دایک‌ها برخلاف واحدهای کانسنگی، فاقد دگرسانی‌های گسترده سدیک-کلسیک هستند. در این نمونه‌ها، پیریت منشا گرمایی داشته که نشان‌دهنده اثرپذیری این دایک‌ها از سیال‌های گرمایی دیر هنگام است. برای پیریت‌های پراکنده در دایک دیابازی قطع‌کننده



شکل ۹- ترکیب ایزوتوپی گوگرد پیریت در کانسارهای مگنتیت-آپاتیت ناحیه بافق. دامنه تغییرات ایزوتوپی گوگرد پیریت از چند کانسار مگنتیت-آپاتیت کمر بند آهن شیلی و همین طور ترکیب ایزوتوپی منابع اصلی گوگرد در کره زمین برای مقایسه نشان داده شده است. منبع داده‌ها: 1) Heidarian et al. (2017); 2) Ziapour et al. (2021); 3) Sepehrirad (2019); 4) Mehrabi et al. (2019); 5) Jami (2005); 6) Sadeghi Davati et al. (2008); 7) Salazar et al. (2019); 8) Rojas et al. (2018); 9) Hoefs (2018); 10) De Hoog et al. (2001).

Figure 9. Sulfur isotope composition of pyrite from selected Bafq district magnetite-apatite deposits. Also shown are data from Chilean iron belt magnetite-apatite deposits and the major sulfur reservoirs. Data sources: 1) Heidarian et al. (2017); 2) Ziapour et al. (2021); 3) Sepehrirad (2019); 4) Mehrabi et al. (2019); 5) Jami (2005); 6) Sadeghi Davati et al. (2008); 7) Salazar et al. (2019); 8) Rojas et al. (2018); 9) Hoefs (2018); 10) De Hoog et al. (2001).

۴- بحث

نسبت ایزوتوپی اکسیژن مگنتیت در کانسنگ‌های مختلف ناحیه بافق دامنه‌ای نسبتاً گسترده، از حدود ۲- تا +۸/۲ پر میل نشان می‌دهد. آنالیزهای مربوط به کانسنگ‌های توده‌ای و رگه‌ای مگنتیت-آپاتیت در این مقاله و داده‌های منتشر شده پیشین، عمدتاً در بازه +۰/۷ تا حدود +۴/۵ پر میل قرار می‌گیرد که هماهنگ با ترکیب ایزوتوپی مگنتیت‌های ماگمایی تا ارتوماگمایی است (شکل ۶) و می‌تواند نشان‌دهنده تبلور مستقیم مگنتیت از سیال‌های ماگمایی غنی از آهن باشد؛ نتیجه‌ای که با مدل‌های زایشی پیشنهادی برای کانسارهای IOA نوع کایرونا سازگار است (Nyström and Henriquez, 1994; Bilenker et al., 2016; Troll et al., 2019).

در این پژوهش، برای نخستین بار، داده‌های ایزوتوپی اکسیژن از کانسنگ‌های نواری در کانسارهای ناحیه بافق ارائه شده است. ترکیب ایزوتوپی اکسیژن این کانسنگ‌ها، دامنه‌ای گسترده از +۲/۵ تا بیش از +۸/۲ نشان می‌دهد که شاهدهی از دخالت فرایندهای مختلف در تشکیل این نوع کانسنگ در ناحیه بافق است. در کانسنگ نواری چادرملو و میشدوان مقادیر $\delta^{18}O$ مگنتیت به ترتیب +۲/۵ و +۳/۹ ثبت شده است (شکل ۶). شواهد بافتی و کانی‌شناسی کانسنگ نواری در چادرملو، همراه با ترکیب ایزوتوپی اکسیژن مگنتیت، با تشکیل این کانسنگ در شرایط ماگمایی-گرماپی دما بالا سازگار است. کانسنگ نواری میشدوان، همراه با مواد آذرآواری تشکیل شده است (شکل‌های ۳، D و E). شواهد بافتی به‌ویژه حضور لاپیلی‌های مگنتیت و نیز نبود شواهد آتشفشانی زیرآبی مانند هیالوکلاستیت‌ها، شیشه‌های واکنشی یا ساختارهای موجی ناشی از جریان آب، می‌تواند نشان‌دهنده همبستگی زایشی کانسنگ نواری میشدوان با فعالیت‌های آتشفشانی خشکی باشد (White and Houghton, 2006) را ببینید. این شواهد بافتی در کنار مقدار $\delta^{18}O$ مگنتیت (+۳/۹) با تشکیل کانسنگ نواری میشدوان از یک سیال ماگمایی دما بالا سازگار است.

مقادیر بالاتر $\delta^{18}O$ در مگنتیت‌های کانسنگ نواری لک‌سیاه و گزستان (به ترتیب +۷/۶ تا +۸/۱ و +۸/۲) نسبت به انواع توده‌ای و رگه‌ای را نمی‌توان با یک منشأ ماگمایی ساده توضیح داد. در گزستان، تغییر $\delta^{18}O$ از +۲/۴ در کانسنگ رگه‌ای مگنتیت-آپاتیت در حاشیه انباشت‌های بزرگ کانسنگ توده‌ای، به +۸/۲ در کانسنگ نواری ژاسیلیتی، نشان‌دهنده تغییر قابل توجه در شرایط تشکیل کانسنگ یا منبع سیال است. همچنین در لک‌سیاه، مقادیر +۷/۶ و +۸/۱ در لایه‌های مگنتیتی همراه با توف ریولیتی، بیانگر محیطی است که در آن سیال کانه‌زا هنگام عبور از واحدهای ریولیتی-توفی غنی از سیلیس، با سنگ میزبان تبادل ایزوتوپی قابل توجهی انجام داده و در نتیجه ترکیب ایزوتوپی اکسیژن آن به سمت مقادیر سنگین‌تر جابه‌جا شده است. افزون بر این، اختلاط احتمالی با سیال‌های تکامل‌یافته غیرماگمایی با $\delta^{18}O$ بالاتر نیز می‌تواند در این افزایش نقش داشته باشد. حاصل این

در کانسار گزستان (۵/۳ تا ۷/۷ پرمیل برای $\delta^{18}\text{O}$ و ۶۴- تا ۸۶- پرمیل برای δD)، با سیال‌های ماگمایی و ماگمایی-گرمابی دما بالا سازگار است. چنین سیال‌هایی معمولاً در تعادل با ماگماهای فلیسیک تا حدواسط تکامل یافته و پیش از ورود گسترده سیال‌های برون‌زاد، نقش اصلی را در انتقال آهن، فسفر و عناصر فرعی ایفا می‌کنند (Taylor, 1974; Hoefs, 2018; Troll et al., 2019). پایداری و همگنی نسبی ترکیب ایزوتوپی نشان می‌دهد که در مراحل اولیه کانه‌زایی، سامانه نسبتاً بسته بوده و برهم‌کنش سیال-سنگ دیواره، محدود بوده است. با این حال، انحراف بخشی از داده‌های ایزوتوپ اکسیژن-هیدروژن به سمت خط آب‌های جوی، در آپاتیت از کانسارچغارت، نشان‌دهنده آمیختگی محلی سیال‌های ماگمایی با آب‌های جوی در مراحل بعدی تکامل سامانه است (شکل ۸). این الگو معمولاً به نفوذ سیال‌های سردتر و کم‌زرفاثر در اثر افزایش نفوذپذیری سامانه (ایجاد شکستگی‌ها، برش‌ها یا برش‌های کانه‌دار) نسبت داده می‌شود و از بسیاری از کانسارهای IOA و IOCG گزارش شده است (Barton and Johnson, 1996; Hitzman et al., 1992; Williams et al., 2005).

۴-۱- تکامل شرایط اکسایش-کاهش سامانه گرمابی و منابع گوگرد بر پایه داده‌های ایزوتوپی گوگرد

دامنه گسترده مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ پیریت در کانسارهای مختلف ناحیه بافق (۴+ تا ۳۰+ پرمیل) نشان‌دهنده چیرگی منابع گوگرد غیرماگمایی و نیز تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی سیال در طول کانه‌زایی است. تغییرات ایزوتوپی کم و بیش مشابه با برخی از کانسارهای IOCG و IOA گزارش شده و به مشارکت گوگرد با خاستگاه تبخیری یا بازچرخش گوگرد پوسته‌ای در سامانه‌های گرمابی اکسیدان نسبت داده شده است (Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Barton, 2014). براین اساس، منابع گوگرد پوسته‌ای، مانند شورابه‌های حوضه‌ای غنی از سولفات یا سیال‌هایی که با واحدهای تبخیری به تعادل رسیده‌اند، در تامین گوگرد نقش داشته‌اند. با این حال، نقش یک منبع گوگرد ماگمایی را نمی‌توان به‌سادگی نادیده گرفت و امکان آمیختگی سیال وجود دارد. در چنین شرایطی، پیریت اغلب نه به‌عنوان یک فاز اولیه ماگمایی، بلکه به‌صورت یک کانی دیرهنگام و در پاسخ به تغییرات موضعی شرایط Eh-pH سیال تشکیل می‌شود؛ الگویی که با مشاهدات کانه‌نگاری و روابط پاراژنتیکی پیریت در کانسارهای بافق همخوانی دارد.

در کانسارهای بافق، پیریت عمدتاً به‌صورت پرکننده شکستگی‌ها، جانشینی موضعی مگنتیت و یا همراه با کلسیت و کوارتز در مراحل انتهایی کانه‌زایی تشکیل شده است. این جایگاه پاراژنتیکی، همراه با مقادیر نسبتاً بالای $\delta^{34}\text{S}$ و وجود لایه‌های تبخیری در توالی آتشفشانی-رسوبی کامبرین میزبان (Ramezani and Tucker, 2003) به‌عنوان منبع احتمالی گوگرد، با مدل بالا سازگار است. رخداد پیریت‌های دیرهنگام به تغییر حالت بیشتر گونه‌های گوگرد در سیال کانه‌زا، از سولفاتی (SO_4^{2-}) به سولفیدی (HSO_4^-) به سولفیدی (HS^- , H_2S) در اثر فرایندهای کاهش نسبت داده می‌شود (Ohmoto and Rye, 1979). از جمله مهم‌ترین این فرایندهای کاهش می‌توان به واکنش سیال اکسیدان با کانی‌های حاوی آهن دوظرفیتی، به‌ویژه مگنتیت، اشاره کرد. واکنش یک سیال اکسیده و غنی از گوگرد اکسیدی با مگنتیت می‌تواند به اکسایش Fe^{2+} به Fe^{3+} ، تشکیل هماتیت و همزمان احیای بخشی از سولفات به سولفید شود؛ سولفیدی که سرانجام در تشکیل پیریت شرکت می‌کند (Gow et al., 1994; Barton, 2014). چنین سازوکاری پیش‌تر برای کانسار چادرملو و جلال‌آباد پیشنهاد شده و به‌عنوان یک فرایند موثر در تشکیل پیریت دیرهنگام مطرح شده است (Heidarian et al., 2017; Mehrabi et al., 2019). این مدل همچنین با مارتیتی شدن مگنتیت در بسیاری از کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت در ناحیه بافق (Jami, 2005; Torab, 2008; Heidarian et al., 2017, 2018) و جاهای دیگر (Hitzman et al., 1992; Barton, 2014) سازگار است. ارتباط این نتایج با داده‌های

فرایندها، غنی‌شدگی نسبی $\delta^{18}\text{O}$ در مگنتیت‌های نواری است که با مدل‌های تبادل سیال-سنگ و تحول تدریجی سیال در سامانه‌های ماگمایی-گرمابی سازگار است (Taylor, 1968; Hoefs, 2018; Bilenker et al., 2016; Troll et al., 2019).

مقایسه داده‌های این مطالعه با کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت ناحیه زنجان نیز تصویر روشنی از رفتار ایزوتوپی مگنتیت در سامانه‌های مختلف ارائه می‌کند. بر اساس نباتان و همکاران (Nabatian et al., 2014)، مگنتیت‌های کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت زنجان دارای مقادیر سبک و در دامنه‌ای بسیار محدود از $\delta^{18}\text{O}$ (حدود ۰/۷% تا ۳/۹%+) هستند (شکل ۶)، در حالی که فازهای دیرهنگام مانند کوارتز و کربنات مقادیر به‌مراتب بالاتری (به ترتیب ۱۳%+ تا ۱۷/۸%+ و ۱۹/۲%+ تا ۲۲/۵%+) را نشان می‌دهند. این جدایش ایزوتوپی به تبلور اولیه مگنتیت از یک سیال ماگمایی دما بالا و شکل‌گیری کوارتز-کربنات در مراحل دیرتر تکامل سیال نسبت داده شد (Nabatian et al., 2014). در مقابل، دامنه گسترده‌تر $\delta^{18}\text{O}$ مگنتیت در بافق (حدود ۰/۷%+ تا ۸/۲%+) نسبت به زنجان، حاکی از ناهمگنی بیشتر ترکیب سیال، نقش پررنگ‌تر برهم‌کنش سیال-سنگ یا مشارکت چند مرحله‌ای سیال‌های کانه‌زا است. بدین ترتیب، در حالی که مگنتیت‌های زنجان بازتاب‌دهنده یک مرحله به‌نسبت یکنواخت و ماگمایی به شمار می‌روند، داده‌های بافق نشان‌دهنده تحول پیچیده‌تر سامانه و چندمرحله‌ای بودن فرایندهای مگنتیت‌زایی در این کمر بند معدنی است.

کانسارهای آهن نوع IOA در بسیاری از نواحی کلاسیک، از جمله کایرونا در سوئد و کمر بند آهن شیلی، به‌طور عمده به‌عنوان محصول نهشت از سیال‌های ماگمایی تا ماگمایی-گرمابی غنی از آهن تفسیر شده‌اند (Nyström and Henriquez, 2005; Williams et al., 1994). با این حال، شواهدی وجود دارد که فرایندهای پس‌ماگمایی، مانند برهم‌کنش با سیال‌هایی از منابع غیرماگمایی، به‌طور محلی سبب تغییراتی در ترکیب ایزوتوپی کانی‌های کانسنگ شده است (Bilenker et al., 2016; Troll et al., 2019).

تغییرات ایزوتوپی و انحراف از مقادیر ماگمایی را می‌توان با این فرایندها یا ترکیبی از آن‌ها توضیح داد: (۱) رسوب‌گذاری و دیاژنز در یک محیط نیمه‌باز تا دریایی کم‌عمق در حضور سیال‌های نسبتاً سنگین از نظر ایزوتوپی؛ (۲) جانشینی سنگ‌های آتشفشانی یا رسوبی در زیر بستر دریا توسط سیالات غنی از آهن که به‌هنگام چرخش با سنگ میزبان تبادل ایزوتوپی گسترده داشته‌اند؛ یا (۳) تغییرات ایزوتوپی در مراحل پس‌ماگمایی و دگرسانی سدیک-کلسیک که سبب افزایش $\delta^{18}\text{O}$ مگنتیت اولیه شده است (Bilenker et al., 2016; Troll et al., 2019). در نبود داده‌های ژئوشیمیایی تکمیلی، تمایز قطعی میان این فرایندها دشوار است، اما شواهد بافتی و رخداد ژاسپیلیت و لایه‌بندی متناوب در گزستان و لک‌سیاه، نقش فرایندهای رسوبی-دیاژنتیکی یا جانشینی در بستر دریا را تقویت می‌کند.

تغییرات بافتی و ایزوتوپی مگنتیت، حتی در مقیاس یک کانسار در ناحیه بافق آشکار است، که می‌تواند شواهدی از ناهمگنی سیستم سیال‌های کانه‌زا در تحول سامانه کانه‌زایی بافق باشد. چنین الگویی پیش‌تر برای مگنتیت‌های نواری در El Laco شیلی و Grangesberg سوئد نیز گزارش شده و به‌عنوان نشانه‌ای از گذار از تبلور ماگمایی به شرایط ماگمایی-گرمابی تفسیر شده است (Bilenker et al., 2016; Troll et al., 2019). در مطالعات پیشین نیز دامنه‌ای مشابه از مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ برای مگنتیت‌های IOA گزارش شده و حضور یک سیال ماگمایی چیره در مراحل اولیه تشکیل کانسنگ پیشنهاد شده است (Moore and Modabber, 2003; Jami et al., 2007; Afzali et al., 2016; Heidarian et al., 2018; Deymar et al., 2018; Mehrabi et al., 2019). این تغییرات، در نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن کانی‌های آب‌دار نیز بازتاب دارد. دامنه محدود $\delta^{18}\text{O}$ و δD گزارش شده برای کانی‌های آب‌دار (فلوگوپیت و اکتینولیت) از کانسار بی‌هنجاری ساغند (حدود ۶/۴۵ تا ۷/۳۹ پرمیل برای $\delta^{18}\text{O}$ و حدود ۵۹/۳- تا ۷۰/۴- پرمیل برای δD) و آپاتیت

سولفات دریایی یا واکنش سیال با واحدهای تبخیری در توالی رسوبی-آتشفشانی میزبان بوده است. دامنه تغییرات ایزوتوپی گوگرد نقش کمتری برای منبع ماگمایی پیشنهاد می‌کند. نتایج حاصل از مطالعات ایزوتوپی، با داده‌های میانبارهای سیال از کانسارهای ناحیه بافق پشتیبانی می‌شود که نشانگر دامنه وسیع دمای همگن‌شدگی و شوری است (Heidarian et al., 2017؛ اسماعیلی و علیرضایی، ۱۴۰۴).

داده‌های ایزوتوپی، همراه با بافت و ساخت کانسنگ و دگرسانی سنگ‌های میزبان، پیشنهاد می‌کنند که ذخایر اکسید آهن-آپاتیت بافق، سامانه‌های ماگمایی و گرمایی پویا هستند که در ترازهای مختلفی در پوسته، از محیط‌های نفوذی به نسبت ژرف تا شرایط سطحی (زیرآبی و خشکی) شکل گرفته‌اند و این با تنوع کانی‌سازی، از انباشت‌های توده‌ای کانسنگ همراه با دگرسانی و متاسوماتیسم گسترده سنگ‌های میزبان تا کانی‌سازی همراه با مواد آتشفشانی و کانی‌سازی رسوبی-دیازتیتیکی تایید می‌شود. شواهد زیادی وجود دارد که ذخایر اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق، پس از شکل‌گیری اولیه در کامبرین، سامانه‌های بسته باقی‌نمانده و در دوره‌های بعدی تاحدی دستخوش واکنش با سیال‌هایی از منابع مختلف شده‌اند. این فرایند سبب پیچیدگی بیشتر این ذخایر، به‌ویژه تغییراتی در نسبت‌های ایزوتوپی و داده‌های میانبار سیال (Heidarian et al., 2017؛ اسماعیلی و علیرضایی، ۱۴۰۴) شده است.

داده‌های ایزوتوپی موجود، هماهنگ با خاستگاه چیره ماگمایی-گرمایی و تکامل چندمرحله‌ای سامانه‌های کانه‌ساز ناحیه بافق است. اما برای ارائه یک مدل زایشی جامع که بتواند پاسخگوی تغییرات محلی و ناحیه‌ای و سهم نسبی منابع مختلف آهن، گوگرد و سیال در شکل‌گیری و تحول این کانسارها باشد، به داده‌های میدانی و آزمایشگاهی بیشتر، از جمله نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن-هیدروژن کانی‌های آبدار و میانبارهای سیال در کانی‌های مختلف همراه با کانسنگ و سنگ‌های میزبان دگرسان شده، نسبت‌های ایزوتوپی Sr-Nd و آنالیز عناصر فرعی و کمیاب مگنتیت و آپاتیت از انواع کانی‌سازی (از نظر بافت و ساخت) با استفاده از تکنیک LA-ICP-MS نیاز است. این داده‌ها می‌توانند به تعیین دقیق‌تر منشأ سیال‌های کانه‌زا و ارزیابی سهم احتمالی منابع پوسته‌ای در تکامل سامانه کمک کنند.

ایزوتوپی اکسیژن-هیدروژن نیز قابل توجه است. جابه‌جایی مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ و δD به سمت میدان آب‌های جوی که در کانسار چغارت (حسینی و همکاران، ۱۴۰۱) مشاهده شد (شکل ۸)، نشان‌دهنده آمیختگی سیال‌های ماگمایی با سیال‌های جوی در مراحل دیر هنگام سامانه کانه‌زایی است.

۵- نتیجه‌گیری

داده‌های ایزوتوپی اکسیژن مگنتیت و گوگرد پیریت در این پژوهش و مقایسه با داده‌های ایزوتوپی منتشر شده، نشان می‌دهد که سامانه‌های اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق، تحول کم و بیش پیچیده‌ای را تجربه کرده‌اند. مرحله‌های آغازین کانه‌زایی با چیرگی سیال‌های ماگمایی-گرمایی دما-بالا و کانی‌سازی در سیستم‌های کم و بیش بسته مشخص می‌شود که مسئول تشکیل کانسنگ‌های توده‌ای و رگه‌های مگنتیت-آپاتیت بوده‌اند. این تفسیر با ترکیب ایزوتوپی اکسیژن مگنتیت از این دو نوع کانسنگ، و مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ - δD کانی‌های آبدار همراه با مگنتیت نیز سازگار است. اختلاف میان مقادیر ایزوتوپی در انواع مختلف کانسنگ، به‌ویژه تفاوت میان کانسنگ‌های توده‌ای و رگه‌ای با کانسنگ‌های نواری، نشان می‌دهد که شرایط فیزیکوشیمیایی سامانه در طی فرایند کانه‌زایی یکنواخت نبوده و کانسنگ‌های مختلف از نظر بافت، در محیط زمین‌شناسی متفاوتی تشکیل شده‌اند. مقادیر بالاتر $\delta^{18}\text{O}$ در برخی کانسنگ‌های نواری، که برای نخستین بار در این پژوهش ارائه شده است، شواهدی از مشارکت سیال‌های غیرماگمایی، برهم‌کنش سیال کانه‌زا با سنگ‌های میزبان غنی از سیلیس و یا تغییرات بعدی کانسنگ در اثر واکنش با سیال‌های گرمایی دیر هنگام است.

مقادیر گسترده $\delta^{34}\text{S}$ در پیریت نشان می‌دهد که گوگرد از یک مخزن همگن واحد تامین نشده است، یا ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی سیال، شامل دما، pH و Eh ضمن چرخش دستخوش تحول شده و با تفکیک ایزوتوپی بزرگی همراه بوده است. با توجه به گرایش آشکار ترکیب ایزوتوپی گوگرد به سوی مقادیر مثبت (تا +۳۰ پرمل) و سن کانی‌سازی (کامبرین پیشین) یک منبع مهم تامین گوگرد،

کتابکاری

- اسماعیلی، م.، و علیرضایی، س.، ۱۴۰۴، منبع سیال کانسنگ‌ساز در کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق، ایران مرکزی رهیافتی بر پایه میانبارهای سیال، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۱۷، شماره ۴، ص. ۸۹-۱۲۱. <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1155>.
- افضلی، س.، نظامی، ن.، و قادری، م.، ۱۳۹۵، مطالعه میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار در کانسار مگنتیت-آپاتیت گزستان، ایران مرکزی. فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، دوره ۲۶، شماره ۱۰۱، ص. ۳۵-۴۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2016.41000>.
- حسینی، ک.، شاه پسندزاده، م.، مرادیان بافقی، م. ح.، ۱۴۰۱، منشأ سیال کانه‌ساز در کانسار مگنتیت-آپاتیت چغارت، شمال شرق بافق: شواهدی از کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، ریزدماسنجی و ایزوتوپ‌های پایدار (O-H و O-C) و ناپایدار (Nd-Sm و U-Pb)، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، دوره ۱۴ (۱)، ص. ۱۰۹-۱۵۵. <https://doi.org/10.22067/econg.2021.67972.1004>.
- سامانی، ب.، ۱۳۷۱، معرفی سازند ساغند با رخسارهای ریفتی و جایگاه چینه‌نگاری آن در پرکامبرین پنین ایران مرکزی، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، دوره ۲، شماره ۶، ص. ۳-۴۵.
- سپهری‌راد، ر.، ۱۳۹۸، فرآیندهای کنترل‌کننده کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت-عناصر نادر خاکی در کانسار گزستان، ایران مرکزی. رساله دکتری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، ۱۸۸ صفحه.

References

- Aftabi, A., Mohseni, S., Babeki, A., and Azaraien, H., 2009. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, central Iran—a discussion, *Economic geology*, 104(1), 137–139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.018>.
- Afzali, S., Nezafati, N., and Ghaderi, M., 2016. Fluid inclusion and stable isotope study of the Gazestan magnetite-apatite deposit, Central Iran, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 26(101), 35–44. (In Persian). <https://doi.org/10.22071/gsj.2016.41000>.
- Barton, M. D., and Johnson, D. A., 1996. Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization, *Geology*, 24(3), 259–262. [https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024%3C0259:ESMFIR%3E2.3.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024%3C0259:ESMFIR%3E2.3.CO;2).

- Barton, M. D., and Johnson, D. A., 2000. Alternative brine sources for Fe-oxide (-Cu-Au) systems: Implications for hydrothermal alteration and metals. In: T. M. Porter (Editor), Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: a global perspective. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp. 43–60. [http://https://www.geo.arizona.edu/~mdbarton/MDB_papers_pdf/Barton\[00_BrineSourcesIOCGdeps_AMF.pdf](http://https://www.geo.arizona.edu/~mdbarton/MDB_papers_pdf/Barton[00_BrineSourcesIOCGdeps_AMF.pdf).
- Barton, M., 2014. Iron oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) systems. In Treatise on Geochemistry: Second Edition (pp. 515–541). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01123-2>.
- Bilenker, L. D., Simon, A. C., Reich, M., Lundstrom, C. C., Gajos, N., Bindeman, I., Barra, F., and Munizaga, R., 2016. Fe–O stable isotope pairs elucidate a high-temperature origin of Chilean iron oxide-apatite deposits, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 177, 94–104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.01.009>.
- Bonyadi, Z., Davidson, G. J., Mehrabi, B., Meffre, S., and Ghazban, F., 2011. Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se–Chahun iron oxide–apatite deposit, Bafq district, Iran: insights from paragenesis and geochemistry. *Chemical Geology*, 281(3-4), 253–269. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.12.013>.
- Borumandi, H., 1973. Petrograpische und Lagerst attenkundliche untersuchungen der Esfordi-formation zwischen Mishdovan und Kushk bei Yazd/Zentral Iran. Ph.D. Thesis, University of Aachen, Germany, 174p.
- Daliran, F., 2002. Kiruna-Type Iron Oxide-Apatite Ores and “Apatitites” of the Bafq District, Iran, with an Emphasis on the REE Geochemistry of their Apatites. In: T. Porter (Editor), Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: a global perspective. PGC Publishing, Adelaide, 2: pp. 303–320. <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-19bafq-district-irandaliran.pdf>.
- Daliran, F., Stosch, H., Williams, P., Jamali, H., Dorri, M., Corriveau, L., and Mumin, A., 2010. Early Cambrian iron oxide-apatite-REE (U) deposits of the Bafq district, East-Central Iran, Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues, *Geologists Association, Canada*, 143–155. <https://doi.org/https://doi.org/10.12789/2010SCN20/147.159>.
- De Hoog, J., Mason, P., and van Bergen, M. M., 2001. Sulfur and chalcophile elements in subduction zones: constraints from a laser ablation ICP-MS study of melt inclusions from Galunggung Volcano, Indonesia, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(18), 3147–3164. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00634-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00634-2).
- Deymar, S., Yazdi, M., Rezvanianzadeh, M. R., and Behzadi, M., 2018. Alkali metasomatism as a process for Ti–REE–Y–U–Th mineralization in the Saghand Anomaly 5, Central Iran: Insights from geochemical, mineralogical, and stable isotope data. *Ore Geology Reviews*, 93, 308–336. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.008>.
- Esmaeili, M., and Alirezaei, S., 2025. Source of ore-forming fluids in iron oxide–apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: Insights from fluid inclusion studies. *Journal of Economic Geology*, Vol. 17, No. 4, pp. 89–121. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1155>.
- Förster, H., and Jafarzadeh, A., 1994. The Bafq mining district in central Iran; a highly mineralized Infracambrian volcanic field, *Economic geology*, 89(8), 1697–1721. <https://doi.org/https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.8.1697>.
- Frietsch, R., Billström, K., and Perdahl, J.-A., 1995. Sulphur isotopes in Lower Proterozoic iron and sulphide ores in northern Sweden. *Mineralium Deposita*, 30(3), 275–284. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00196363>.
- Gow, P., Wall, V., Oliver, N., and Valenta, R., 1994. Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits: Further evidence of hydrothermal origins, *Geology*, 22(7), 633–636. [https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022%3C0633:PIOCUA%3E2.3.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022%3C0633:PIOCUA%3E2.3.CO;2).
- Haghipour, A., 1974. Étude géologique de la région de Biabanak-Bafq (Iran Central); pétrologie et tectonique du socle Précambrien et de sa couverture, Ph.D. Thesis, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, France, 403 p. <https://theses.hal.science/tel-00740361v1>.
- Haghipour, A., 1977. Geological Map of the Posht-e-Badam Area, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Haghipour, A., and Pelissier, G., 1977. Geological map of the Biabanak-Bafq area, scale 1:100000. Geological survey of Iran.
- Harlov, D. E., Andersson, U. B., Förster, H.-J., Nyström, J. O., Dulski, P., and Broman, C., 2002. Apatite–monazite relations in the Kirunavaara magnetite–apatite ore, northern Sweden, *Chemical Geology*, 191(1-3), 47–72. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00148-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00148-1).
- Heidarian, H., Alirezaei, S., and Lentz, D. R., 2017. Chadormalu 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, 43–62. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.031>.
- Heidarian, H., Lentz, D. R., Alirezaei, S., McFarlane, C. R., and Peighambari, S., 2018. Multiple stage ore formation in the Chadormalu iron deposit, Bafq Metallogenic Province, Central Iran: evidence from BSE imaging and apatite EPMA and LA-ICP-MS U-Pb geochronology, *Minerals*, 8(3), 87. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/min8030087>.
- Heidarian, H., Lentz, D., Alirezaei, S., Peighambari, S., and Hall, D., 2016. Using the chemical analysis of magnetite to constrain various stages in the formation and genesis of the Kiruna-type chadormalu magnetite-apatite deposit, Bafq district, Central Iran, *Mineralogy and Petrology*, 110(6): 927–942. <https://doi.org/10.1007/s00710-016-0440-8>.
- Hitzman, M. W., Oreskes, N., and Einaudi, M. T., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits, *Precambrian research*, 58(1-4), 241–287. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90121-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90121-4)

- Hoefs, J., 2018. Theoretical and Experiment Principles, In *Stable Isotope Geochemistry* (pp. 1–51). Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-78527-1_1.
- Hosseini, K., Shahpasandzadeh, M., and Moradian Bafghi, M.H., 2022. *Origin of Mineralizing Fluids in the Choghart MagnetiteApatite Deposit, NE of Bafq: Evidence from Mineralogy, Geochemistry, Microthermometry, Stable (O-H and O-C) and Unstable Isotopes (U-Pb and Nd-Sm)*. *Journal of Economic Geology*, 14(1): 109–155. (In Persian). <https://dx.doi.org/10.22067/ECONG.2021.67972.1004>.
- Huckriede, R., Kürsten, M., and Venzlaff, H., 1962. On the geology of the area between Kerman and Sagand, Iran (in German), Supplements to the Geological Yearbook, Hannover, Germany, 197 p.
- Hushmandzadeh, A., 1969. Metamorphism and granitization of the Chapedony massive (central Iran). Ph.D. Thesis, Faculty of Sciences of the University of Grenoble, France. 242 p.
- Jami, M., 2005. Geology, geochemistry and evolution of the Esfordi phosphate-iron deposit, Bafq area, Central Iran, Ph.D. thesis, UNSW Sydney. 396p.
- Jami, M., Dunlop, A. C., and Cohen, D. R., 2007. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran, *Economic geology*, 102(6), 1111–1128. <https://doi.org/https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.6.1111> .
- Jonsson, E., Troll, V. R., Högdahl, K., Harris, C., Weis, F., Nilsson, K. P., and Skelton, A., 2013. Magmatic origin of giant ‘Kiruna-type’ apatite-iron-oxide ores in Central Sweden, *Scientific reports*, 3(1), 1644. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/srep01644>.
- Li, X., Zhao, K.-D., Jiang, S.-Y., and Palmer, M. R., 2019. In-situ U-Pb geochronology and sulfur isotopes constrain the metallogenesis of the giant Neves Corvo deposit, Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, 105, 223–235. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.023>.
- Majidi, S. A., Omrani, J., Troll, V. R., Weis, F. A., Houshmandzadeh, A., Ashouri, E., Nezafati, N., and Chung, S.-L. 2021. Employing geochemistry and geochronology to unravel genesis and tectonic setting of iron oxide-apatite deposits of the Bafq-Saghand metallogenic belt, Central Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 110(1), 127–164. <https://doi.org/10.1007/s00531-020-01942-5>.
- Martinsson, O., Billström, K., Broman, C., Weihed, P., and Wanhainen, C., 2016. Metallogeny of the Northern Norrbotten Ore Province, northern Fennoscandian Shield with emphasis on IOCG and apatite-iron ore deposits, *Ore Geology Reviews*, 78, 447–492. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.02.011>.
- Mehdipour Ghazi, J., 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, 590–604. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.01.006>.
- Mehrabi, B., Karimishahraki, B., Banks, D., Boyce, A., and Yardley, B. W., 2019. Hydrothermal iron oxide-Cu-Au (IOCG) mineralization at the Jalal-Abad deposit, northwestern Zarand, Iran, *Ore Geology Reviews*, 106, 300–317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.01.019>.
- Mohseni, S., and Aftabi, A., 2015. Structural, textural, geochemical and isotopic signatures of synglaciogenic Neoproterozoic banded iron formations (BIFs) at Bafq mining district (BMD), Central Iran: The possible Ediacaran missing link of BIFs in Tethyan metallogeny, *Ore Geology Reviews*, 71, 215–236. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.018>.
- Mokhtari, M. A. A., Zadeh, G. H., and Emami, M. H., 2013. Genesis of iron-apatite ores in Posht-e-Badam Block (Central Iran) using REE geochemistry, *Journal of earth system science*, 122(3), 795–807. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12040-013-0313-z>.
- Moore, F., and Modabberi, S., 2003. Origin of Choghart iron oxide deposit, Bafq mining district, Central Iran: new isotopic and geochemical evidence, *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 14(3), 259–269. https://doi.org/https://www.sid.ir/EN/VEWSSID/J_pdf/97320030306.pdf .
- Mücke, A., and Younessi, R., 1994. Magnetite-apatite deposits (Kiruna-type) along the Sanandaj-Sirjan zone and in the Bafq area, Iran, associated with ultramafic and calcalkaline rocks and carbonatites, *Mineralogy and Petrology*, 50(4), 219–244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF01164607>.
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Corfu, F., Neubauer, F., Bernroider, M., Prokofiev, V., and 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(2), pp.217–234. <https://doi.org/10.1007/s00126-013-0484-1>.
- 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, 104054. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104054> .
- NISCO, 1980. Result of search and valuation works at magnetic anomalies of the Bafq iron ore region during 1976-1979, Unpubl Rept, National Iranian Steel Corporation. 260 p.
- Nyström, J. O., and Henriquez, F., 1994. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden; ore textures and magnetite geochemistry, *Economic geology*, 89(4), 820–839. <https://doi.org/https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.4.820>.
- Nyström, J. O., Billström, K., Henríquez, F., Fallick, A. E., and Naslund, H. R., 2008. Oxygen isotope composition of magnetite in iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden. 130(4), 177–188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/11035890809452771>.

- Ohmoto, H., 1986. Stable isotope chemistry of ore deposits. In: Valley, J.W., Taylor, H.P., O'Neil, J.R. (Editors) Stable isotopes in high temperature geological processes, Mineral Soc Am, Rev Mineral 16: 491–559.
- Ohmoto, H., and Goldhaber, M.B., 1997. Sulfur and carbon isotopes. In: Barnes H.L. (Editor) Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 3rd ed. John Wiley, New York, pp 517–611.
- Ohmoto, H., and Rye, R.O., 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes, H.L. (Editor), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 2nd ed. Wiley, New York, N.Y., pp. 509–567.
- 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(7), 622–665. <https://doi.org/https://ajsonline.org/article/61706.pdf>.
- Ripley, E., and Ohmoto, H., 1977. Mineralogic, sulfur isotope, and fluid inclusion studies of the stratabound copper deposits at the Raul mine, Peru, Economic geology, 72(6), 1017–1041. <https://doi.org/https://doi.org/10.2113/gsecongeo.72.6.1017>.
- Rojas, P. A., Barra, F., Reich, M., Deditius, A., Simon, A., Uribe, F., Romero, R., and Rojo, M., 2018. A genetic link between magnetite mineralization and diorite intrusion at the El Romeral iron oxide-apatite deposit, northern Chile, Mineralium Deposita, 53(7), 947–966. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00126-017-0777-x>.
- Sadeghi Davati, V., Hassanzadeh, J., and Alirezai, S., 2008. Iron oxide-apatite mineralization of the Bafq district: Spatial, temporal, and geochemical relationship with granitoid magmatism and early Cambrian sedimentary provinces. In: Proceedings of the 26th Earth Sciences Meeting, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, Abstracts, pp. xx–xx.
- Salazar, E., Barra, F., Reich, M., Simon, A., Leisen, M., Palma, G., Romero, R., and Rojo, M., 2019. Trace element geochemistry of magnetite from the Cerro Negro Norte iron oxide-apatite deposit, northern Chile, Mineralium Deposita, 55(3), 409–428. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00126-019-00879-3>.
- Samani, B. A., 1988. Metallogeny of the Precambrian in Iran. Precambrian research, 39(1-2), 85–106. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-9268\(88\)90053-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-9268(88)90053-8).
- Samani, B., 1992. Introduction of the Saghand Formation with rift-related facies and its stratigraphic position in the Late Precambrian of Central Iran. Quarterly Journal of Geosciences, Geological Survey of Iran, Vol. 2, No. 6, pp. 3–45. (In Persian).
- Sepehrirad, R., 2019. Processes controlling iron oxide-apatite-rare earth element mineralization in the Gazestan deposit, Central Iran. Ph.D. thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 188 p. (In Persian).
- Sharp, Z., 2017. Principles of Stable Isotope Geochemistry, 2nd Edition. University of New Mexico. doi:<https://doi.org/10.25844/h9q1-0p82>.
- Sheppard, S. M., 1986. Characterization and isotopic variations in natural waters, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 16(1), 165–183.
- Sillitoe, R. H., 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. Mineralium Deposita, 38(7), 787–812. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00126-003-0379-7>.
- Sillitoe, R. H., and Burrows, D. R., 2002. New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile. Economic geology, 97(5), 1101–1109. <https://doi.org/https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.5.1101>.
- Stöcklin, J., 1971. Stratigraphic Lexicon of Iran, Part I: Central, North and East Iran.
- Stosch, H.-G., Romer, R. L., Daliran, F., and Rhede, D., 2011. Uranium-lead ages of apatite from iron oxide ores of the Bafq District, East-Central Iran, Mineralium Deposita, 46(1), 9–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00126-010-0309-4>.
- Tale Fazel, E., and Rostami, M., 2020. Geology, geochemistry, fluid inclusions and O-H stable isotope constraints on genesis of the Lake Siah Fe-oxide-apatite deposit, NE Bafq, Central Iran. Acta Geochimica, 39(6), 920–946. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11631-020-00405-7>.
- Taylor Jr, H. P., 1968. The oxygen isotope geochemistry of igneous rocks. Contributions to mineralogy and Petrology, 19(1), 1–71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00371729>.
- Taylor, H., 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition, Economic geology, 69(6), 843–883.
- Torab, F. M., 2008. Geochemistry and metallogeny of magnetite apatite deposits of the Bafq mining district, Central Iran. Ph.D. thesis, Univ.-Bibliothek, https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/import_derivate_00000406/db108903.pdf.
- Torab, F., and Lehmann, B., 2007. Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology, Mineralogical magazine, 71(3), 347–363. <https://doi.org/https://doi.org/10.1180/minmag.2007.071.3.347>.
- Tornos, F., Velasco, F., and Hanchar, J. M., 2016. Iron-rich melts, magmatic magnetite, and superheated hydrothermal systems: The El Laco deposit, Chile. Geology, 44(6), 427–430. <https://doi.org/https://doi.org/10.1130/G37705.1>.
- Troll, V. R., Weis, F. A., Jonsson, E., Andersson, U. B., Majidi, S. A., Högdahl, K., Harris, C., Millet, M.-A., Chinnasamy, S. S., and Kooijman, E., 2019. Global Fe-O isotope correlation reveals magmatic origin of Kiruna-type apatite-iron-oxide ores, Nature communications, 10(1), 1712. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41467-019-09244-4>.
- Valley, J. W., 1986. Stable isotope geochemistry of metamorphic rocks. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 16(1), 445–489.
- White, J. D., and Houghton, B., 2006. Primary volcanoclastic rocks. Geology, 34(8), 677–680. <https://doi.org/10.1130/G22346.1>.

- Whitney, D. L., and Evans, B. W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist*, 95(1):185-187. http://www.minsocam.org/msa/AmMin/TOC/Abstracts/2010_Abtracts/Jan10_Abtracts/Whitney_p185_10.pdf.
- Williams, P. J., Barton, M. D., Johnson, D. A., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., Oliver, N. H., and Marschik, R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin. In. <https://doi.org/https://doi.org/10.5382/AV100.13> .
- Ziapour, S., Esmaily, D., Khoshnoodi, K., and Simon, A. C., 2021. Mineralogy, geochemistry, and genesis of the Chahgaz (XIVA Anomaly) Kiruna-type iron oxide-apatite (IOA) deposit, Bafq district, Central Iran. *Ore Geology Reviews*, 128, 103924. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103924>.