



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2025.1155



The source of ore fluids in the Bafq district iron oxide-apatite deposits, Central Iran: a fluid inclusion approach

Mobina Esmaeili Zeini ^{1*} , Saeed Alirezaei ²

¹ Ph.D. Student, Department of Mineral and Water Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University of Tehran, Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Mineral and Water Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 19 July 2025
Revised: 25 December 2025
Accepted: 25 December 2025

Keywords

fluid inclusion
Iron oxide-apatite
Chadormalu-Gazestan-Esfordi
Bafq mineralized zone
Central Iran

*Corresponding author

Mobina Esmaeili Zeini
✉ m_esmaili@sbu.ac.ir

ABSTRACT

The Bafq metallogenic district in the Kashmar-Kerman zone, or Posht-Badam block, in the Central Iran structural zone, hosts large iron oxide-apatite deposits hosted in Early Cambrian volcanic, subvolcanic, and sedimentary rocks, as well as in Precambrian metamorphic rocks. The proposed models vary from orthomagmatic to hydrothermal and sedimentary. Different generations of apatite have been identified based on their size, morphology, and paragenetic relationships with magnetite and the host rock. Microthermometric studies were carried out on two main generations of apatite (referred to as Ap-I and Ap-II) from the main stage of mineralization, and on the late calcite, quartz and chlorite in the samples from Chadormalu, Esfordi, and Gazestan deposits. For Chadormalu, the homogenization temperature (Th) and fluid salinity for the liquid-vapor (LV) fluid inclusions in Ap-I and Ap-II were determined to be 266-580 °C and 138-460 °C, and 0.5-10.7 and 12.8-19.6 wt.% NaCl eq., respectively. For Ap-I and Ap-II from Esfordi, the Th and salinity were between 167 to >500 °C and 2.5-6.7 wt.% NaCl eq., and 165-464 °C and 9.8-23.5 wt.% NaCl eq., respectively. The halite-bearing inclusions in Ap-II from Esfordi yielded Th and salinity >500 °C and 36-37 wt.% NaCl eq. For Ap-II in Gazestan, the Th and salinity were measured at 416 to over 500°C, and 19.8 to 25.8 wt.% NaCl eq., respectively. The late calcite coexisting with pyrite from Gazestan yielded Th and salinity at 183-310 °C and 40-41 wt.% NaCl eq. The eutectic temperatures (Te) for various inclusions were measured at -21 to -53°C, implying the presence of complex ternary salts in the ore fluids. The results suggest the involvement of two different fluids in the evolution of the iron ore systems: a magmatic fluid, with relatively high temperature (150 to >500 °C) and low-moderate salinity (0.5-25.8 wt.% NaCl eq.), and a fluid with lower temperature (183-310 °C) but higher salinity. The role of the two fluids is supported by the oxygen isotopic composition of magnetite for the former and the sulfur isotopic composition of pyrite for the latter.

How to cite this article

Esmaeili Zeini, M. and Alirezaei, S., 2025. The source of ore fluids in the Bafq district iron oxide-apatite deposits, Central Iran: a fluid inclusion approach. *Journal of Economic Geology*, 17(4): 89–121. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.2025.1155>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Bafq metallogenic district in the Kashmar-Kerman Zone (Ramezani and Tucker, 2003) or Posht-Badam Block (Haghipour, 1977b) in the Central Iran Structural Zone embraces several Kiruna-type magnetite-apatite deposits, including Chadormalu, Choghart, Gazestan, and Esfordi (e.g., Samani, 1988; Daliran, 2002; Moore and Modabberi, 2003; Jami, 2005; Torab and Lehman, 2007; Stosch et al., 2011; Heidarian et al., 2016; Heidarian et al., 2017). The origin of the deposits is debated, with models ranging from orthomagmatic (e.g., Foerster and Jafarzadeh, 1994; Mücke and Younessi, 1994; Mokhtari et al., 2013) to hydrothermal (Daliran, 2002; Moore and Modabberi, 2003; Jami et al., 2007; Heidarian et al., 2017) and sedimentary, related to the late Precambrian glacial event (Aftabi et al., 2009; Mohseni and Aftabi, 2015). This study investigates the physicochemical properties of ore-forming fluids by fluid inclusion microthermometry on apatite and several other nonmetallic minerals in selected samples from Chadormalu, Esfordi, and Gazestan deposits. The results are compared with published fluid inclusion data and discussed, in an attempt to tackle the source and evolution of the ore fluids.

Materials and methods

Mineralogical and paragenetic studies were conducted on samples from ore and host rocks in outcrops and drill cores from Esfordi, Chadormalu, and Gazestan deposits. Some 20 samples were selected for doubly-polished sections and fluid inclusion petrography and microthermometry. The experiments were performed at the Iranian Mineral Processing Research Center (IMIDRO), utilizing a Linkam TMHS 600 heating-freezing stage on a Zeiss Axioplan-2 microscope. The stage was calibrated with cesium nitrate (melting point 414°C, accuracy $\pm 0.6^\circ\text{C}$) and n-hexane (melting point -94.3°C , accuracy $\pm 0.2^\circ\text{C}$). The fluid inclusion studies were focused on two main generations of apatite; limited measurements were performed on actinolite, and late chlorite, calcite, and quartz.

Results

Magnetite is the main ore mineral in the Bafq district, partially replaced by hematite at surface and shallow

depths. Associated minerals include apatite, actinolite, tremolite, diopside, albite, quartz, dolomite, calcite, chlorite, talc, and minor sulfides dominated by pyrite. Ore textures vary from massive to breccia in central parts of the main ore bodies to pegmatoid comb textures in the peripheral veins. A banded, cumulate-looking ore texture with alternating magnetite and actinolite-rich bands was identified in Chadormalu (Fig. 8A). Two generations of apatite, here referred to as Ap-I and Ap-II, were identified in the selected deposits based on the textures and paragenetic relations. The Ap-I occurs mostly as euhedral to subhedral crystals of varying sizes in the massive ore (Fig. 5A, C and G). The Apatite-II occurs as coarse to pegmatoid crystals commonly associated with magnetite in vein-type ores with comb textures at the margins of the massive ores and/or within the altered host rocks (Fig. 5B, D and F).

Fluid inclusions were classified based on the phases present at room temperature as: single-phase liquid (L) (Fig. 6A and B), single-phase vapor (V) (Fig. 6C and D), two-phase liquid-rich (LV) (Fig. 6E and F), two-phase vapor-rich (VL) (Fig. 6H), three-phase liquid-vapor-halite (LVH) (Fig. 6J and I), and multi-phase inclusions (LVHS) (Fig. 6K) where S stands for unknown solid. The heating-freezing measurements were performed mostly on the LV and LVH inclusions in apatite, with limited experiments on actinolite, dolomite, and late chlorite, calcite, and quartz.

The Th values for the LV inclusions ranged from 138 °C to $>500^\circ\text{C}$ (Table 2). For Chadormalu, the Th values for the primary and secondary fluid inclusions in Ap-II from the vein-type ore ranged between 268–454 °C and 138–217 °C, respectively. For the banded ore, fluid inclusions in actinolite and in the late dolomite and chlorite yielded Th values exceeding 500 °C, 280–330 °C, and 147–157 °C, respectively. For Esfordi, the LV inclusions in Ap-I and Ap-II homogenized between 167–350 °C and 165–464 °C, respectively. For Gazestan, the Th values for the vein-type Ap-II, and for the late calcite and quartz in breccia ore ranged between 416 °C to $>500^\circ\text{C}$, 190–270 °C, and 250–390 °C, respectively. For the LVH fluid inclusions in the calcite, homogenization occurred with halite dissolution between 290–330 °C; vapor disappearance occurred between 183–320 °C ($T_{\text{hd}} > T_{\text{vd}}$). In contrast, for the LVH inclusions in the Esfordi Ap-II, halite dissolution occurred

between 274 to 291 °C, with vapor disappearance at >500 °C ($T_{vd} > T_{hd}$) (Fig. 11). In apatite from the Choghart massive magnetite-apatite ore, halite-bearing inclusions in Ap-I homogenized to the liquid phase ($T_{vd} \leq T_{hd}$), with halite dissolution occurring between 418 and 430 °C. (Fig. 11) (Hosseini et al., 2022).

A wide range of salinities, ranging from <1 wt.% to ~41 wt.% NaCl eq. was observed for fluid inclusions in various minerals (Table 2). For Chadormalu banded ore, salinities were measured for the LV inclusions at 1.7–14 wt.% NaCl eq. in dolomite, and <1 to 2.4 wt.% NaCl eq. in chlorite. Higher salinities at 12.8–19.6 wt.% NaCl eq. were found in Ap-II from the vein-type ore. For Esfordi, the LVH inclusions in Ap-II yielded salinities at 36.1–37.1 wt.% NaCl eq., whereas LV inclusions displayed lower values at 9.8–23.5 wt.% NaCl eq. In contrast, lower salinities (1–6.7 wt.% NaCl eq.) were measured for LV inclusions in Ap-I. For Gazestan, the LVH inclusions in calcite from breccia ore yielded the highest salinities recorded (40–41 wt.% NaCl eq.). Significantly lower values (3.3–5.1 wt.% NaCl eq.), however, were observed for the LV inclusions in quartz from the breccia ore. Hosseini et al. (2022) for the LVH and LV inclusions in apatite-I reported 42.9–~45 wt.% NaCl eq. and 11.5–13.8 wt.% NaCl eq., respectively, from the Choghart deposit.

Discussion

The fluid inclusion data suggest the involvement of at least two distinct fluids in the evolution of the iron oxide-apatite ore systems and associated wall rock alteration/metasomatism in the Esfordi, Chadormalu, Gazestan, and possibly other magnetite-apatite deposits in the Bafq metallogenic district. An evolving fluid source is reflected in the fluid inclusion data from the two main generations of apatite in Chadormalu, where a moderate- to high-temperature fluid (266 to 580°C) with low salinity (0.5 to 10.7 wt.% NaCl eq.) responsible for Ap-I in the massive ore (Heidarian et al., 2017) evolved into a lower temperature (268–454°C) but higher salinity (~13–20 wt.% NaCl eq.) fluid involved in the development of the pegmatoid Ap-II crystals in the vein-type magnetite-apatite ore (this study). The secondary LV fluid inclusions in the Ap-II crystals yielded lower homogenization temperatures (138–217°C) but the same salinities as in the primary fluid inclusions, consistent with a cooling evolution trend.

Fluid evolution and multiple fluid sources is also supported by the banded ore in Chadormalu where actinolite developed in the presence of a high-temperature fluid (>500°C), whereas dolomite and chlorite in the same ore evolved through interaction with fluids at lower temperatures, 280–330°C and 147–157°C, and variable salinities, 1.74–14 and 1–2.4 wt.% NaCl eq., respectively. The comparison between massive and vein ore data reveals fluid mixing and evolution from high-temperature, low-salinity to low-temperature, moderate-salinity fluids in the Chadormalu deposit.

At Esfordi, a low to high-temperature (167–>500°C) but low salinity (2.5–6.7 wt.% NaCl) fluid contributed to the development of magnetite-rich ore, while apatite-rich ore formed from lower temperature (165 to 464°C) but higher salinity (36–37 wt.% NaCl eq.) fluids. Ore formation in Gazestan occurred from high-temperature and relatively saline fluids, as T_h and salinity data from the LV (416–>500°C and ~20–26 wt.% NaCl eq.) and LVHS inclusions (485–>500°C, and ~22–25 wt.% NaCl eq.) in apatite from the breccia ore suggest. The lower T_h but higher salinity values at 183–310°C and 40–41 wt.% NaCl eq. recorded for the LVH inclusions in the late calcite in textural equilibrium with sulfides in the same ore sample suggests involvement of a second fluid source in the evolution of the ore system in Gazestan. Based on the lowest dissolution temperature of halite (235°C) in calcite fluid inclusions from the Gazestan breccia ore, and apatite-I (418°C) from the Choghart massive magnetite-apatite ore (Hosseini et al., 2022), the minimum trapping pressure is estimated at 90 MPa and 75 MPa, respectively. Considering a density of 2.7 g/cm³, the minimum depth for ore formation in Gazestan was 3.3 km; the apatite-I from Choghart developed at depths of ~2.7 km (Fig. 14).

Results from this study suggest that a high-temperature and low-moderate salinity fluid of possible magmatic origin played a key role in mineralization in the Chadormalu, Esfordi, and Gazestan, and possibly other magnetite-apatite deposits in the Bafq district. With time, the iron ore system interacted with an evolved fluid of low-moderate temperature and relatively high salinity, leading to the development of sulfides and other late-paragenetic minerals. The published sulfur isotopic data for pyrite, ranging between +8.9 to ~25 ‰, suggest a basinal brine origin for the evolved fluid.

Acknowledgements

The authors are grateful to the Chadormalu mining complex for providing facilities during field studies in the Bafq district. We sincerely thank Ms. Aghajani

from the Iran Mineral Processing Research Center (IMPRC) for providing the microthermometry data for this research.



منبع سیال کانسنگ‌ساز در ذخایر اکسید آهن - آپاتیت ناحیه بافق، ایران مرکزی؛ رهیافتی بر پایه میان‌بارهای سیال

مبینا اسماعیلی زینی^{۱*}، سعید علیرضایی^۲

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

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

ناحیه فلززایی بافق در زون کاشمر - کرمان و بلوک پشت‌بادام در زون ساختاری ایران مرکزی، میزبان کانسارهای بزرگ اکسید آهن - آپاتیت در سنگ‌های آتشفشانی، رسوبی و توده‌های نفوذی کامبرین پیشین و سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین است. مدل‌های زایشی متفاوتی مانند ارتوماگمایی، گرمایی و رسوبی برای این ذخایر پیشنهاد شده است. نسل‌های مختلف آپاتیت بر اساس اندازه، شکل و ارتباط پاراژنتیکی با کانسنگ مگنتیت و سنگ میزبان شناسایی شده و برای شناخت ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال، بررسی‌های میان‌بار سیال روی دو نسل آپاتیت (I و II) از مرحله اصلی کانی‌سازی و کلسیت، کوارتز، کلریت و دولومیت دیر هنگام در نمونه‌هایی از ذخایر چادرملو، اسفوردی و گزستان انجام شد. دمای همگن‌شدگی و شوری سیال برای میان‌بارهای مایع - بخار در آپاتیت I و آپاتیت II از چادرملو به ترتیب ۲۶۶ تا بیش از ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۳۸ تا ۴۶۰ درجه سانتی‌گراد و ۰/۵ تا ۱۰/۷ و ۱۲/۸ تا ۱۹/۶ درصد وزنی معادل نمک طعام بود. برای میان‌بارهای مایع - بخار در آپاتیت I از اسفوردی، دمای همگنی و شوری، ۱۶۷ تا بیش از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۲/۵ تا ۶/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام و برای آپاتیت II، بین ۱۶۵ تا ۴۶۴ درجه سانتی‌گراد و ۹/۸ تا ۲۳/۵ درصد وزنی معادل نمک طعام به دست آمد. برای میان‌بارهای حاوی هالیت در آپاتیت II از اسفوردی، دمای همگنی بیش از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۳۶ تا ۳۷ درصد وزنی معادل نمک طعام ثبت شد. برای آپاتیت II در گزستان، دمای همگنی، ۴۱۶ تا بیش از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱۹/۸ تا ۲۵/۸ درصد وزنی معادل نمک طعام و برای کلسیت همزاد با پیریت دمای همگنی ۱۸۰ تا ۳۱۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۴۰ تا ۴۱ درصد وزنی معادل نمک طعام اندازه‌گیری شد. دمای یوتکتیک در میان‌بارهای سیال مختلف، ۲۱- تا ۵۳- درجه سانتی‌گراد به دست آمد که نشان‌دهنده حضور سامانه‌های سه جزئی و پیچیده نمک‌هاست. این داده‌ها نقش دو سیال متفاوت را در تحول سامانه کانی‌سازی نشان می‌دهند: یک سیال ماگمایی - گرمایی، با دمای بالا (کمتر از ۱۵۰ تا بیش از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) و شوری کم تا متوسط (۰/۵ تا ۲۵/۸ درصد وزنی معادل نمک طعام) و دیگری، سیالی با دمای کمتر (۱۸۳ تا ۳۱۰ درجه سانتی‌گراد)؛ اما شوری بیشتر بالاتر. نقش این دو سیال، با داده‌های ایزوتوپی اکسیژن مگنتیت برای سیال اول و داده‌های ایزوتوپی گوگرد پیریت برای سیال دوم تأیید می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۴

واژه‌های کلیدی

میان‌بار سیال
اکسید آهن - آپاتیت
چادرملو - گزستان - اسفوردی
ناحیه فلززایی بافق
ایران مرکزی

نویسنده مسئول

مبینا اسماعیلی زینی

m_esmaili@sbu.ac.ir

استناد به این مقاله

اسماعیلی زینی، مبینا و علیرضایی، سعید، ۱۴۰۴. منبع سیال کانسنگ‌ساز در ذخایر اکسید آهن - آپاتیت ناحیه بافق، ایران مرکزی؛ رهیافتی بر پایه میان‌بارهای سیال.

زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۷(۴): ۸۹-۱۲۱. <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1155>

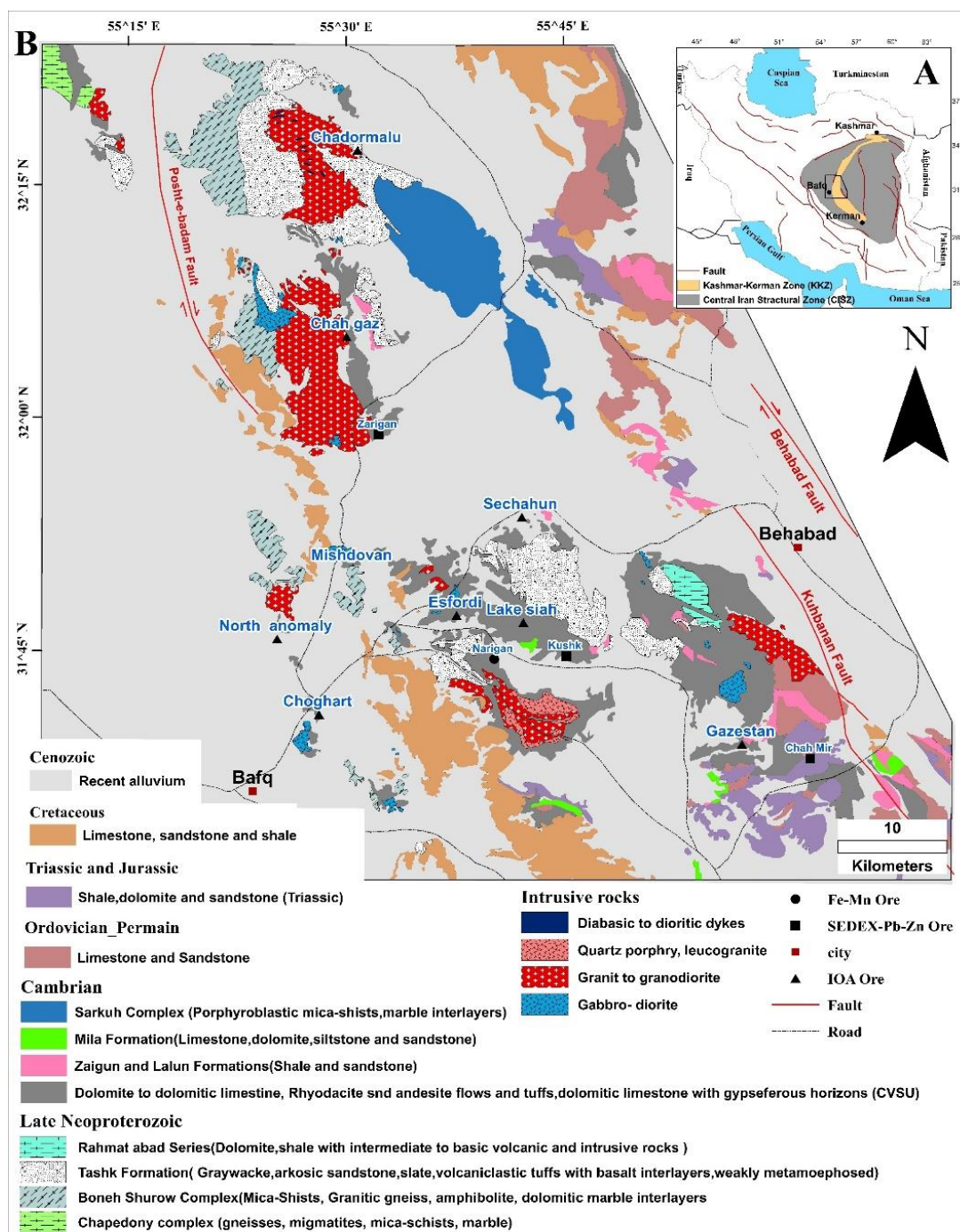
مقدمه

کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت یا نوع کایرونا (Geijer, 1931) به گروهی از کانسارهای آهن کم تیتان ($\text{TiO}_2 < 1 \text{ wt.}\%$) و حاوی فلوئورآپاتیت، سیلیکات‌های کلسیم-منیزیم- (آهن) (ترمولیت-اکتینولیت و دیوپسید) و فقیر از کانی‌های سولفیدی گفته می‌شود (Hildebrand, 1986; Williams et al. 2005; Tornos et al., 2024) که از منابع مهم آهن، عناصر کمیاب خاکی، اورانیوم، کبالت و فسفات هستند و از نظر زمانی از آرکئن تا پلیوسن تشکیل شده‌اند (Barton, 2014). برخی پژوهشگران کانسارهای آهن کایرونا را به عنوان عضو انتهایی فقیر از مس و طلای گروه کانسارهای نوع اکسید آهن-مس-طلا معرفی کرده‌اند (Williams et al. 2005; Barton, 2014; Skirrow, 2022). مدل زایشی و منشأ سیال کانه‌ساز در هر دو گروه بسیار بحث‌انگیز است؛ اگرچه برای کانسارهای گروه اکسید آهن-مس-طلا یک منشأ گرمابی-ماگمایی کم‌ویش پذیرفته شده است (Barton and Johnson, 2000; Perring et al., 2000; Williams et al. 2005; Barton, 2014). در مورد چگونگی زایش و خاستگاه سیال کانه‌ساز در کانسارهای نوع کایرونا، دو نظریه ماگمایی و گرمابی بیشتر مورد توجه است. در نظریه ماگمایی، سیال کانه‌ساز می‌تواند حاصل جدایش و تبلور مستقیم یک مذاب اکسیدی غنی از Fe-P از مذاب سیلیکاتی یا یک سیال ماگمایی دما بالا (تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) و غنی از مواد فرار باشد که از مذاب سیلیکاتی جدا شده و در ترازهای بالاتر در سنگ‌های محل کانی‌سازی کرده است (Hildebrand, 1986; Nystroem and Henriquez, 1994). در نظریه گرمابی، سیالات گرمابی دمای متوسط (۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) تا کم (کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) با چیرگی شوراب حوضه‌ای، با چرخش در سنگ‌های میزبان غنی از آهن، این فلز را از این سنگ‌ها شسته و در فاصله‌ای از منبع، ذخایر اکسید آهن-آپاتیت را پدید آورده‌اند (Parak, 1975; Hitzman et al., 1992; Barton and Johnson, 1996; Sillitoe, 2003; Williams

et al. 2005; Pollard, 2006; Knipping et al., 2015). در

این نظریه، فسفر می‌تواند از سنگ‌های رسوبی شسته‌شده باشد (Tornos et al., 2024).

ناحیه فلززایی بافق در زون کاشمر-کرمان (Ramezani and Tucker, 2003) یا بلوک پشت‌بادام (Haghipour, 1977b) در زون ساختاری ایران مرکزی، میزبان چندین کانسار بزرگ مگنتیت-آپاتیت نوع کایرونا مانند چادرملو، جفارت، اسفوردی و گزستان (Samani, 1988; Daliran, 2002, Moore and Modabberi, 2003, Jami, 2005; Torab and Lehman, 2007; Stosch et al., 2011; Mokhtari et al., 2013; Heidarian et al., 2016; Heidarian et al., 2017) کانسارهای فلزهای پایه نوع سدکس مانند کوشک و چاه‌میر و رخدادهای کانی‌زایی اورانیوم، توریوم و عناصر کمیاب خاکی است (Samani, 1988; Yaghubpour and Mehrabi, 2012; Rajabi, 1997). این ذخایر به طور عمده در سنگ‌های میزبان پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین شامل طیفی از سنگ‌های آتشفشانی، توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی، سنگ‌های رسوبی با چیرگی ماسه‌سنگ، شیل، سنگ آهک و دولومیت و به مقدار کمتر در مجموعه‌های دگرگونی نوپروتروزوئیک شامل انواع شیست، گنیس و آمفیبولیت تشکیل شده‌اند. در مورد زایش کانسارهای آهن ناحیه بافق نظریه‌های مختلفی از ارتوماگمایی (Foerster and Jafarzadeh, 1994; Mokhtari et al., 2013; Mücke and Younessi, 1994) تا گرمابی (Daliran, 2002; Moore and Modabberi, 2003; Jami et al., 2007; Heidarian et al., 2017; Heidarian et al., 2018) و رسوبی مرتبط با دوره یخبندان جهانی پرکامبرین پسین (Aftabi et al., 2009; Mohseni and Aftabi, 2015) ارائه شده است. بررسی میان‌بارهای سیال اطلاعات مفیدی در مورد ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی سیال‌های کانسنگ‌ساز از جمله دما، فشار، چگالی و ترکیب شیمیایی آنها در اختیار می‌گذارد (Roedder, 1984; Bodnar, 2003).



شکل ۱. A: یک طرح ساده از ایران با نمایش جایگاه ناحیه فلززایی بافق در زون کاشمر- کرمان در ایران مرکزی و B: نقشه زمین شناسی ساده شده ناحیه بافق با نمایش محل کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت، سرب- روی نوع سدکس و آهن- منگنز. برگرفته از هوشمندزاده (Hushmandzadeh, 1969) و حق پور (Haghipour, 1977a) با تغییرات

Fig. 1. A: A sketch map of Iran showing the location of the Bafq metallogenic district in the Kashmar-Kerman Zone (KKZ) in Central Iran, and B: Simplified geological map of the Bafq district showing distribution of the Iron Oxide-Apatite, Fe-Mn, and SEDEX-Pb-Zn deposits (modified after Haghipour, 1977a; Hushmandzadeh, 1969)

هگزان با نقطه ذوب $94/3^{\circ}\text{C}$ - درجه سانتی گراد و دقت $\pm 0/2$ درجه انجام شد. بررسی های میان بار سیال بر روی نسل های مختلف آپاتیت همزاد با کانسنگ آهن و بر روی اکتینولیت از زون دگرسانی کلسیک، کلریت، کلسیت و کوارتز انجام شد.

پیشینه زمین شناسی

ناحیه فلزایی بافق با رخنمون های گسترده از مجموعه های پی سنگی نئوپروتروزوئیک شامل هم تافت های چاپدون، بنه شور و پشت بادام و سازند آتشفشانی- رسوبی تاشک شناخته می شود (Hushmandzadeh, 1969; Haghipour, 1974; Ramezani and Tucker, 2003). این مجموعه ها توسط واحد آتشفشانی- رسوبی کامبرین (Ramezani and Tucker, 2003) پوشیده شده اند که با نام های سری ریزو و دزو (Huckriede et al., 1962)، سازند اسفوردی (Borumandi, 1973) و سازند ساغند (Samani, 1993) نیز شناخته می شوند. واحد آتشفشانی- رسوبی کامبرین شامل سنگ های آتشفشانی (گدازه و مواد آذر آواری) و نیمه آتشفشانی فلسیک تا مافیک کالک آلکالن همراه با دولومیت، سنگ آهک، شیل، ماسه سنگ و میان لایه های ژئوس / انیدریت است (Ramezani and Tucker, 2003). این واحد، به ویژه سنگ های آتشفشانی و نیمه آتشفشانی آن، میزبان اصلی کانسنگ های مگنتیت- آپاتیت در ناحیه فلزایی بافق است (Ramezani and Tucker, 2003) (شکل ۱). واحد آتشفشانی- رسوبی کامبرین در منطقه زریگان و جنوب ناحیه بافق با مرز ناپیوسته، توسط توالی های رسوبی قرمز رنگ کامبرین زیرین، معادل سازندهای زایگون و لالون در ایران مرکزی و البرز پوشیده شده است (Haghipour, 1974; Soheili and Mahdavi, 1991). توالی کامبرین پسین با کمپلکس سرکوه (Haghipour, 1977a; Ramezani and Tucker, 2003) معرفی شده است. در ادامه به ویژگی های زمین شناسی سه ذخیره چادرملو، گزستان و اسفوردی پرداخته شده است.

بررسی های پیشین میان بار سیال که به طور عمده روی آپاتیت انجام شده است، دمای همگن شدن و شوری سیال کانسنگ ساز را به ترتیب بین 145°C تا بیش از 580°C درجه سانتی گراد و 9 تا 45% درصد وزنی معادل نمک طعام گزارش کرده و این دامنه وسیع را به فرایندهای مختلفی چون تکامل سامانه گرمابی و آمیختگی سیال نسبت داده است (Jami et al., 2007; Heidarian et al., 2017; Mehrabi et al., 2019; Talefazel and Rostami, 2022; Hosseini et al., 2020). در این مقاله، هم یافت های کانی دقیق بررسی شد و بر اساس آزمایش های ریزدماسنجی میان بار سیال، در نمونه های معرف از کانسارهای چادرملو، اسفوردی و گزستان، دو نسل اصلی آپاتیت معرفی و ویژگی های فیزیکی- شیمیایی سیال کانسنگ ساز بررسی شده است. داده های به دست آمده از این بررسی ها با داده های منتشر شده مقایسه و نتایج با هدف شناخت هرچه بهتر از سیال کانسنگ ساز مورد بحث قرار گرفته است.

روش مطالعه

این پژوهش بر پایه مشاهده های میدانی و نمونه برداری از کانسنگ و سنگ میزبان در رخنمون های سطحی و کارگاه های استخراج به منظور بررسی های کانی شناسی و پاراژنتیکی است. نمونه های معرف از آپاتیت در ذخایر اسفوردی، چادرملو و گزستان انتخاب و بیش از 20 مقطع دوبر- صیقلی برای بررسی های سنگ نگاری و میکروترموتری میان بارهای سیال تهیه شد. مشخصات نمونه ها در جدول ۱ معرفی شده است. بررسی های ریزدماسنجی در آزمایشگاه کانی شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران به کمک صفحه گرم و سردشونده مدل THMS600 600°C ساخت شرکت لینکام تعبیه شده بر میکروسکوپ زایس آکسوپلن-2 زایس انجام شد. دامنه حرارتی دستگاه 196°C - تا 600°C + درجه سانتی گراد است. واسنجی صفحه در آزمایش های گرمایش با استاندارد نیترات سزیم با نقطه ذوب 414°C درجه و تکرارپذیری با دقت $\pm 0/6$ درجه سانتی گراد و در آزمایش های سرمایش با استاندارد ان-

جدول ۱. ویژگی های اصلی نمونه های کانسنگ های مختلف از کانسارهای چادرملو، اسفوردی و گزستان ناحیه بافق که بررسی های سنگ نگاری میان بار سیال بر روی آنها انجام شد. فونت ایتالیک، نشان دهنده نمونه هایی است که بررسی/ریزدماسنجی بر روی آنها انجام شده است.

Table 1. Major characteristics of the various ore samples from the Chadormalu, Esfordi, and Gazestan deposits Bafq district, used for fluid inclusion petrography. Samples selected for microthermometric studies are shown in italic.

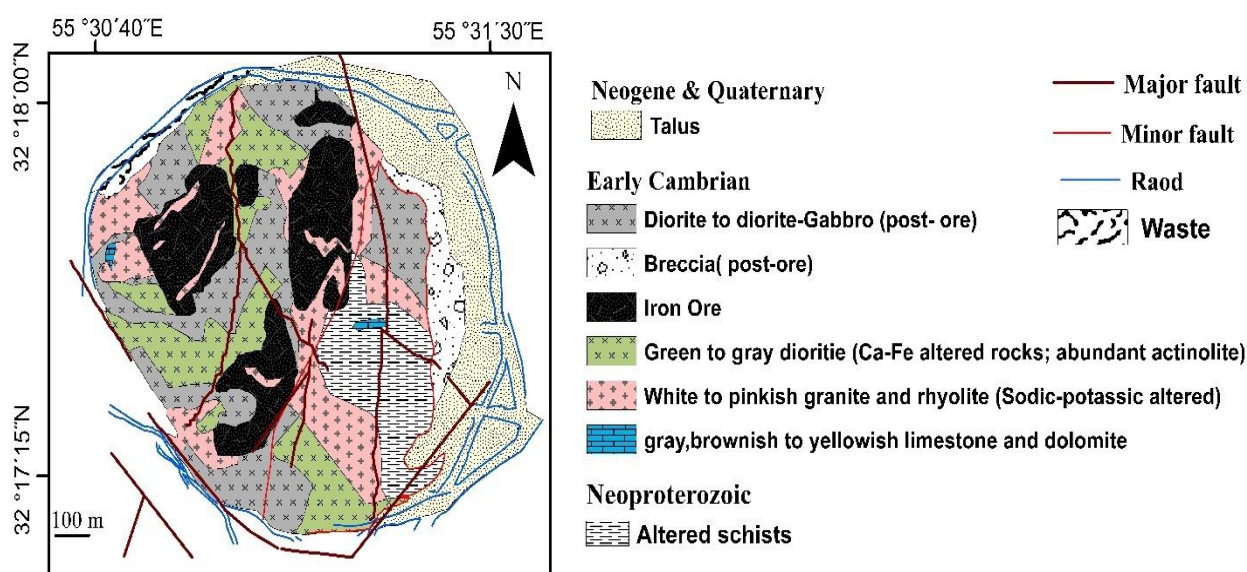
Ore deposit/ sample code	Major minerals	Minor minerals	Trace minerals	Ore type	Texture/ structure
Chadormalu					
CHM	Mag, Act	Ab, Tr, Cal, Chl	Py, Hem	Magnetite-Actinolite ore	Massive
CHM-05-3	Mag, Ap	—	Hem	Magnetite-Apatite ore	Massive
CHM-07	Mag, Ap	—	Hem	Magnetite-Apatite ore	Massive
CHM-016	Mag,	Dol, Act, Chl, Ab, Qtz, Cal, Tlc	Py, Bt, Ttn	Magnetite ore	Banded
CHM0-017A	Mag, Ap	Py, Cal	Hem	Magnetite-Apatite ore	Vein
CHM-018	Mag, Ap	Py, Cal, Ep	Hem	Magnetite-Apatite ore	Vein
Esfordi					
Coarse apatite crystal	Ap	—	Mnz	Pegmatoid-disseminated texture Apatite	Pegmatoid- disseminate
ESF-02	Ap, Hem, Mag	Cal, Qtz	Ep	Apatite-Hematite ore	Massive
ESF-07	Ap, Hem, Mag	Cal, Qtz	Ep	Apatite-Hematite ore	Massive
ESF-019	Ap, Act	Hem, Mag, Tr, Cal		Apatite ore	Massive
Gazestan					
GA	Ap, Mag	Cal	—	Magnetite-Apatite ore	Vein
RS-44-140	Mag, Ap	Chl, Ab	Hem, Srp, Py	Magnetite-Apatite ore	Breccia
RS-46-35.5	Mag, Ap, Cal, Py	Chl, Ab	Hem, Ccp	Magnetite-Apatite ore	Massive
RS-46-60	Ap, Cal, Py, Mag	Chl, Srp	Hem, Ccp	Magnetite-Apatite ore	Massive
RS-47-175	Mag, Ap, Cal	Chl, Ab,	Hem, Srp, Py	Magnetite-Apatite ore	Breccia
RS-47-189	Mag, Ap, Cal	Chl, Ab,	Hem, Srp, Py	Magnetite-Apatite ore	Breccia
RS-47-228	Mag, Ap	Chl, Srp,	Fe-Oxide, Cal	Magnetite-Apatite ore	Breccia
RS-51-67	Mag, Cal, Chl	Ap, Py, Ccp	Fe-Oxide, Srp,	Magnetite ore	Massive
RS-51-160	Mag, Cal, Ap, Chl	Ab, Py	Srp, Fe-Oxide	Magnetite ore	Vein
RS-52-236	Mag, Ap,	Cal, Chl, Ab, Fe- Oxide	Py, Ccp	Magnetite-Apatite ore	Vein

Abbreviation for minerals from [Whitney and Evans \(2010\)](#): Ab: Albite, Act: Actinolite, Ap: Apatite, Bt: Biotite, Cal: Calcite, Chl: Chlorite, Ccp: Chalcopyrite, Dol: Dolomite, Ep: Epidote, Hem: Hematite, Mag: Magnetite, Mnz: Monazite, Py: Pyrite, Qtz: Quartz, Srp: Serpentine, Tlc: Talc, Ttn: Titanite, Tr: Tremolite

چادرملو

در کانسار چادرملو، سنگ‌های آتشفشانی و نیمه آتشفشانی فلسیک تا حد واسط کامبرین پیشین که دستخوش دگرسانی‌های سدیک-کلسیک و سدیک-پتاسیک شده‌اند، میزبان اصلی کانسنگ اکسید آهن هستند (شکل ۲). واحدهای میزبان اصلی شامل گدازه‌ها و مواد آذرآواری ریولیتی و داسیتی، گرانیت و

دیوریت است (شکل ۲). بخشی از کانی‌سازی در سنگ‌های رسوبی همراه با سنگ‌های آتشفشانی و در شیست‌های پرمکبرین رخ داده است (Torab, 2008; Heidarian et al., 2017). یک توده نفوذی دیوریتی تا گابرویی و دایک‌های وابسته به آن، کانسنگ و سنگ‌های میزبان را قطع می‌کنند.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ساده شده کانسار چادرملو. برگرفته از حیدریان و همکاران (Heidarian et al., 2017) با تغییرات

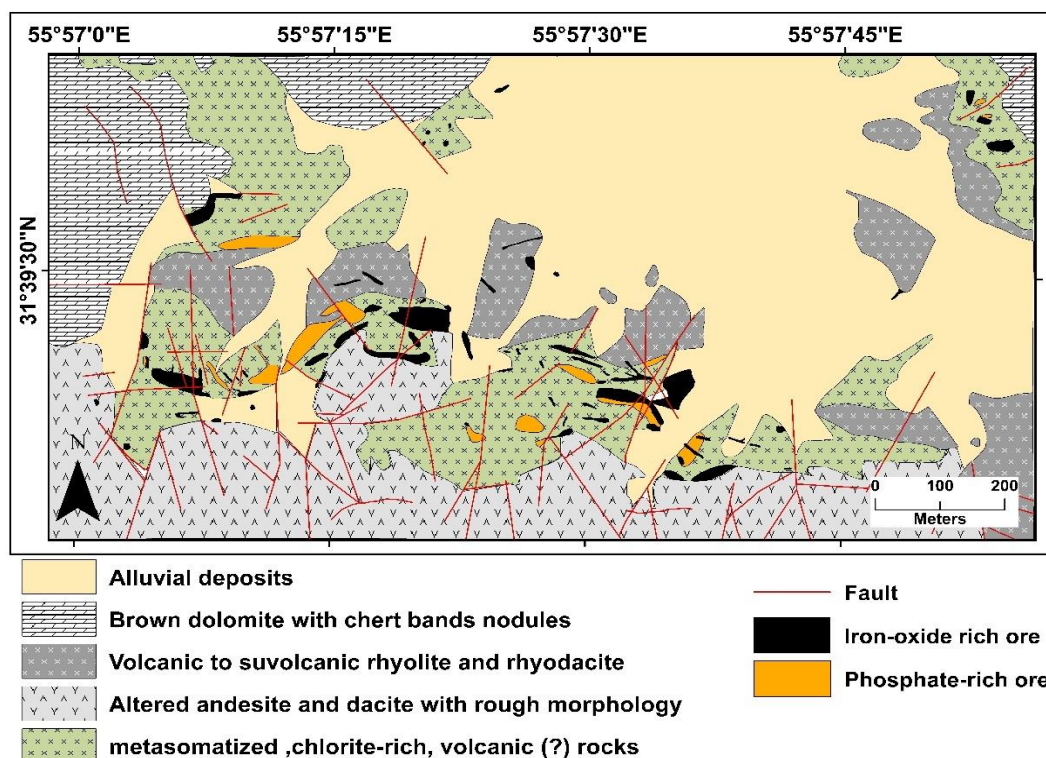
Fig. 2. Simplified geological map of the Chadormalu deposit (modified after Heidarian et al., 2017)

گزستان

سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی کامبرین و توده‌های نفوذی نیمه آتشفشانی با ترکیب ریولیت تا ریوداسیت، واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در محدوده کانسار گزستان هستند. سنگ‌های آتشفشانی ترکیب آندزیت، داسیت و ریولیت دارند که به صورت گدازه، ایگنمبریت و توف دیده می‌شوند. واحدهای رسوبی شامل سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی ضخیم‌لایه و شیل است. سنگ‌های آذرین میزبان دستخوش دگرسانی‌های کلریتی و

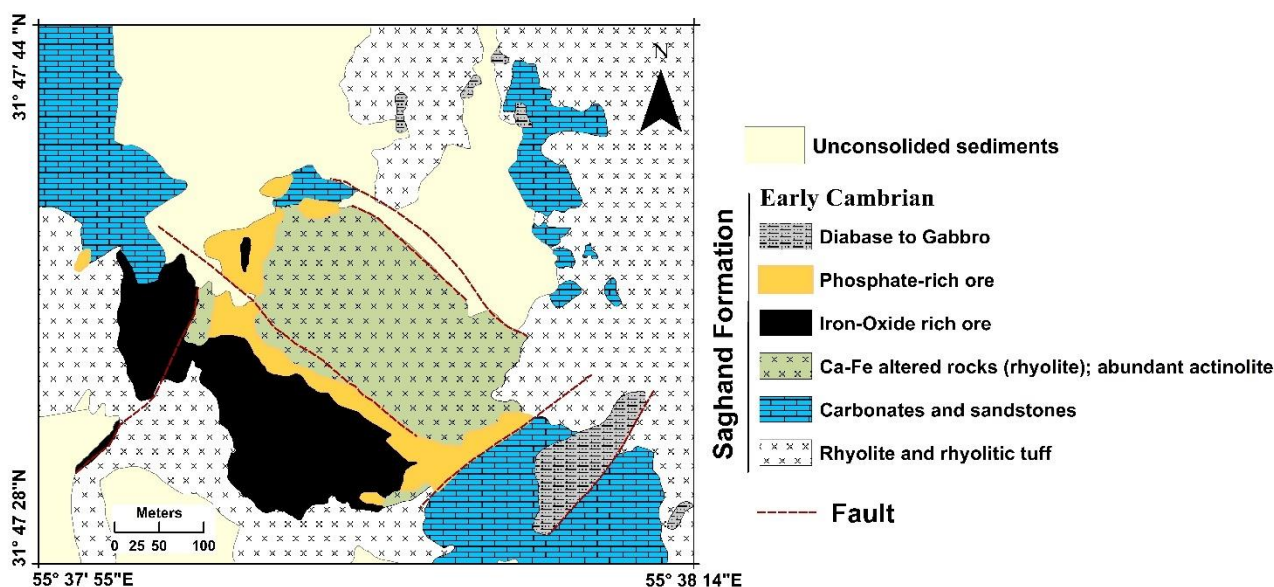
اسفوردی

سنگ‌های آتشفشانی فلسیک کامبرین، با دگرسانی غالب اکتینولیت-ترمولیت، میزبان اصلی کانسنگ اکسید آهن-آپاتیت در اسفوردی هستند (شکل ۴) (Jami, 2005). بخشی از کانسنگ در بخش شمال‌غربی کانسار، در ماسه‌سنگ، ماسه‌سنگ رسی و سنگ‌های کربناتی دیده می‌شود (Jami, 2005).



شکل ۳. نقشه زمین شناسی ساده شده کانسار گزستان برگرفته از سپهری راد و همکاران (Sepehrirad et al., 2018) با تغییرات

Fig. 3. Geological map of the Gazestan deposit (modified after Sepehrirad et al., 2018)



شکل ۴. نقشه ساده شده کانسار اسفوردی برگرفته از جمی و همکاران (Jami et al., 2007) با تغییرات

Fig. 4. Geological map of the Esfordi deposit (modified after Jami et al., 2007)

دگرسانی

پلاژیو کلاز غنی از سدیم (آلبیت) با بافت شطرنجی همراه با مقادیر کمتر اسکاپولیت شاخص دگرسانی سدیک در ناحیه بافق است. این دگرسانی که گسترش زیادی دارد، در بیشتر جاها پیش از کانی سازی اکسید آهن رخ داده است (Haghipour, 1974; Daliran et al., 2010; Bonyadi et al., 2011; Heidarian et al., 2017). بلورهای آلبیت ثانوی به رنگ سفید- صورتی تا مایل به قرمز از کانسارهای چادرملو (Heidarian et al., 2017)، چغارت (Hosseini et al., 2022)، گزستان (Sepehrirad and Alirezaei, 2020)، آنومالی ۵ ساغند (Deymar et al., 2018)، اسفوردی (Jami et al., 2007) و آنومالی شمالی (Sepehrirad et al., 2018) گزارش شده است. رنگ صورتی تا قرمز آلبیت در دگرسانی آلبیتی به حضور رگچه ها و میان بارهای بسیار ریز هماتیت نسبت داده می شود که نشان می دهد سیال های غنی از آهن در تشکیل آلبیت نقش داشته اند (Putnis et al., 2007; Wilde, 2013).

دگرسانی کلسیمی یا کلسیمی- آهنی در ناحیه بافق با بلورهای اکتینولیت $\pm$ ترمولیت، به همراه مقادیر متغیر پیروکسن، مگنتیت، آپاتیت، کلسیت و کلریت شناخته می شود. این دگرسانی همراهی نزدیکی با زون های کانی سازی دارد و با فاصله گرفتن از آنها، شدت و گسترش آن به تدریج کاهش می یابد (Jami, 2005; Torab, 2008; Bonyadi et al., 2011; Ziapour et al., 2021). دگرسانی پتاسیک، به عنوان یک دگرسانی دیر هنگام نسبت به دگرسانی های سدیک و کلسیک، از برخی کانسارهای ناحیه بافق گزارش شده است (Bonyadi et al., 2011; Heidarian et al., 2017; Ziapour et al., 2021). این دگرسانی به صورت جانشینی کانی های سیلیکاتی اولیه سنگ توسط فلدسپار پتاسیمی، بیوتیت، کوارتز و گاه آلبیت تشخیص داده می شود. دگرسانی پتاسیک به طور محلی کم و بیش جانشین دگرسانی سدیک شده که در این حالت با نام دگرسانی سدیک- پتاسیک یا آلکالی معرفی شده است (Daliran, 2002; Jami, 2005).

(2005; Bonyadi et al., 2011).

دگرسانی های کلریتی، سیلیسی، سریسیتی و کربناتی نیز با شدت و گسترش متفاوت، کانسنگ و سنگ میزبان را در ذخایر مختلف ناحیه بافق تحت تأثیر قرار داده اند (Jami et al., 2007; Torab, 2008; Bonyadi et al., 2011; Heidarian et al., 2017; Mehrabi et al., 2019; Bonyadi and Sadeghi, 2020; Ziapour et al., 2021). این دگرسانی ها، دیر هنگام بوده و دگرسانی های پیشین (سدیک، کلسیک)، دگرسانی پتاسیک و مرحله اصلی کانی سازی اکسید آهن را تحت تأثیر قرار داده اند. کانسار گزستان یک استثنا محسوب می شود که در آن دگرسانی کلریتی و سریسیتی همبستگی مکانی نزدیکی با توده های کانسنگ مگنتیت- آپاتیت دارند (Sepehrirad et al., 2018).

کانی سازی مگنتیت- آپاتیت

بافت کانسنگ از توده ای در مرکز (شکل ۵- A، C، D و G) تا برشی (شکل ۵- H) در مرکز تا پگماتوئیدی و شانه ای در رگه های حاشیه ای (شکل ۵- E و I) کانسنگ تغییر می کند. یک بافت نواری کومولیت مانند متشکل از لایه های متناوب مگنتیت تیره و لایه های اکتینولیتی سبز رنگ (شکل ۸- A) نیز در کانسار چادرملو شناسایی شد. مگنتیت، کانی اصلی در ذخایر آهن ناحیه فلز زایی بافق است که با مقداری هماتیت در سطح و اعماق کم همراهی می شود. بر اساس نوع کانسنگ و عیار آن، کانی های غیر فلزی گوناگونی شامل آپاتیت، اکتینولیت، ترمولیت، دیوپسید، آلبیت، کوارتز، دولومیت، کلسیت، کلریت و تالک، همراه با اکسید آهن تشکیل شده است. در مقاطع میکروسکوپی، آنکرت، سیدریت، روتیل و تیتانیت نیز شناسایی شد. پیریت و اندکی کالکوپیریت به شکل افشان یا دانه پراکنده و رگچه های نامنظم از بیشتر کانسارهای اکسید آهن - آپاتیت ناحیه بافق گزارش شده است (Torab, 2008; Sadeghi Davati et al., 2008; Bonyadi et al., 2011; Heidarian et al., 2017; Deymar et al., 2018). اکتینولیت مهم ترین کانی غیر فلزی همراه با دگرسانی کلسیک است. همچنین، این کانی در زون های کانی سازی رگه ای، برشی و

بزرگ (تا ۱۰ سانتی متر و گاه بزرگ تر) در سنگ میزبان متاسوماتیکی (شکل ۵-۵) و بلورهای کوچک بنفش رنگ با اندازه کمتر از ۱ تا ۲ میلی متر به صورت انبان ها و عدسی های نامنظم و نیز رگه مانند در میزبان ریولیت برشی و اکتینولیتی سبزرنگ (شکل ۵-۵) که این حالت دوم، فراوان ترین رخداد آپاتیت در کانسار اسفوردی است.

جمی و همکاران (Jami et al., 2007) به نسل دیگری از آپاتیت در اسفوردی اشاره کرده اند که یک فاز فرعی در مرحله دگرسانی دیر هنگام است و همراه با کربنات و کوارتز، در هر دو کانسنگ پرعیار اکسید آهن و پرعیار آپاتیت تشکیل شده است. در کانسار گزستان، آپاتیت نسل I، شامل بلورهای ریز و پراکنده آپاتیت در کانسنگ توده ای مگنتیت است (شکل ۵-۵) و در تعادل بافتی با مگنتیت دیده می شود. آپاتیت نسل II با بلورهای وجه دار تا نیمه وجه دار صورتی با اندازه کمتر از ۱ تا ۷ سانتی متر و گاه بزرگ تر، فراوان ترین رخداد آپاتیت در این کانسار است. این آپاتیت به شکل کانسنگ رگه ای مگنتیت-آپاتیت در حاشیه توده ها و عدسی های مگنتیت (شکل ۵-۵) و زون های برشی رگه مانند و استوک ورکی متشکل از رگه و رگچه های مگنتیت-آپاتیت-کلسیت $\pm$ پیریت $\pm$ کالکوپیریت که قطعه های برشی سنگ میزبان آندزیتی را سیمانی کرده اند، تشکیل شده است (شکل ۵-۵).

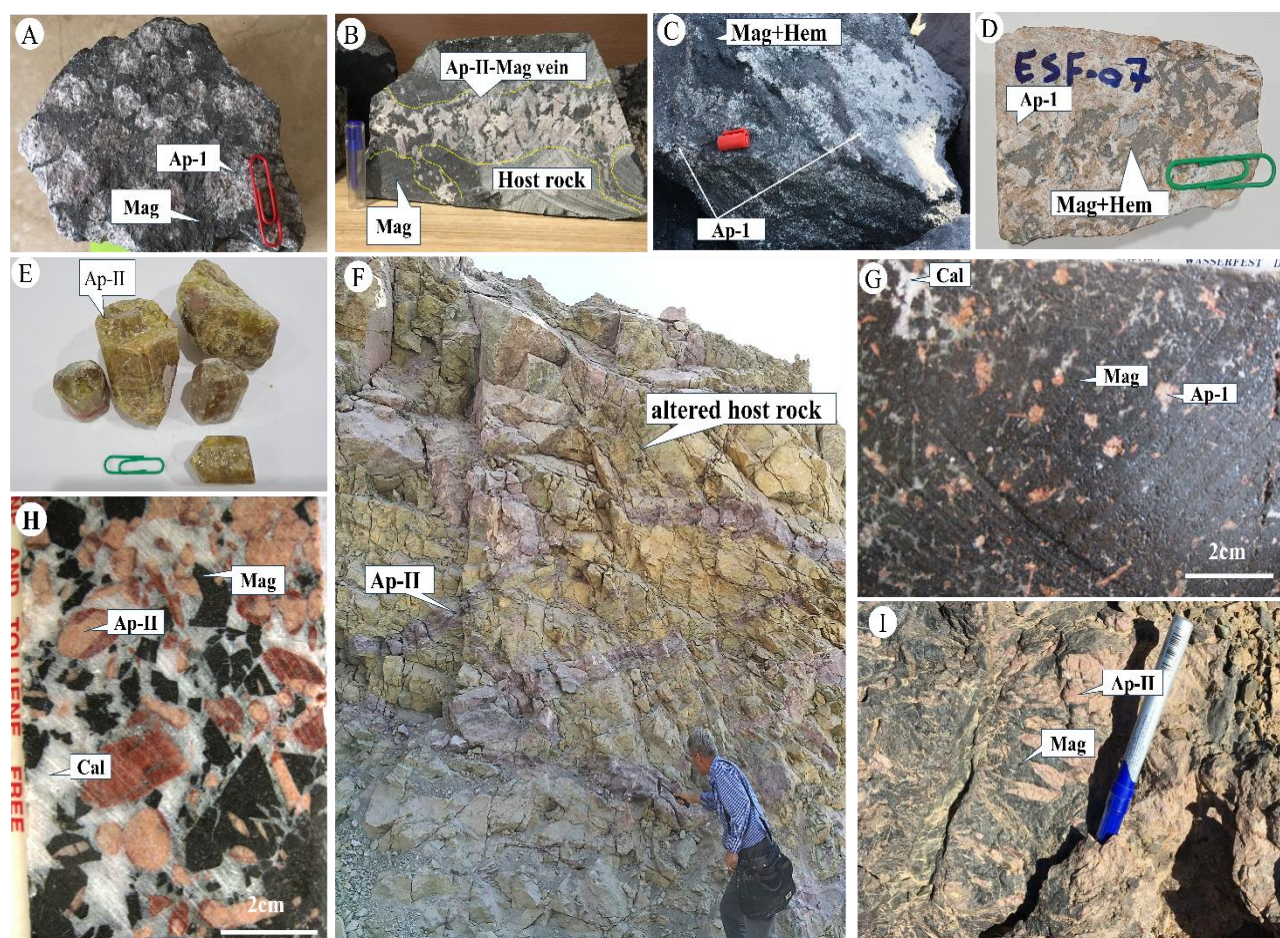
میان بارهای سیال

بررسی میان بارهای سیال بر روی شش نمونه کانسنگ از کانسارهای مورد بررسی در این پژوهش انجام شد. نمونه های اسفوردی شامل کانسنگ آپاتیت-هماتیت (ESF-07؛ شکل ۵-۵) و آپاتیت وجه دار بزرگ (AP-a؛ شکل ۵-۵) به ترتیب معرف آپاتیت نسل I و نسل II و نمونه های چادرملو از آپاتیت نسل II در کانسنگ رگه ای مگنتیت-آپاتیت در سنگ میزبان (CHM-017A؛ شکل ۵-۵) و آپاتیت نسل II، اکتینولیت و کلریت دیر هنگام از کانسنگ نواری (CHM-016؛ شکل ۵-۸) در حاشیه کانسنگ توده ای مگنتیت است.

در حاشیه کانسنگ های توده ای، همراه با اکسید آهن رخ داده است. کوارتز به صورت رگه های کوارتز $\pm$ کلریت $\pm$ کربنات $\pm$ سولفید، سیمان کانسنگ برشی و جانشینی پراکنده در زون های کانی زایی و دگرسانی دیده می شود. دو نسل کربنات در کانسارهای ناحیه فلز زایی بافق شناسایی شده است. نسل اول شامل کلسیت و دولومیت همراه با کانی سازی اولیه اکسید آهن است و نسل دوم، کلسیت دیر هنگام که به صورت رگه-رگچه های نامنظم، مجموعه های دگرسانی اولیه و کانسنگ را قطع کرده یا جایگزین شده است. کلریت نیز به صورت دگرسانی دیر هنگام، کانی سازی و دگرسانی های اولیه را برنقش کرده است (Jami et al., 2007; Bonyadi et al., 2011; Sepehrirad et al., 2018; Heidarian et al., 2018; Deymar et al., 2018; Hosseini et al., 2022).

آپاتیت

آپاتیت، رایج ترین کانی غیرفلزی همراه با کانسنگ اکسید آهن، با فراوانی متغیر از کمتر از ۱ درصد در سه چاهون و جلال آباد تا ۱ و ۲/۵ درصد به ترتیب در چادرملو و گزستان وجود دارد (Torab and Lehman, 2007; Heidarian et al., 2017; Sepehrirad, 2019). کانسار اسفوردی با عیار P_2O_5 بیش از ۱۰ درصد (Jami et al., 2007) یک استثنا محسوب می شود. در اینجا، آپاتیت نیز افزون بر اکسید آهن بهره برداری می شود. آپاتیت در ذخایر آهن ناحیه بافق به شکل های مختلف و در مرحله های متفاوتی تشکیل شده است. در چادرملو، دو نسل آپاتیت قابل شناسایی است: آپاتیت نسل I با بلورهای وجه دار تا نیمه وجه دار بزرگ در مرکز و حاشیه توده های اصلی کانسنگ مگنتیت (شکل ۵-۵) و آپاتیت نسل II شامل رگه-رگچه های نامنظم آپاتیت در سنگ میزبان و کانسنگ توده ای (شکل ۵-۵). در اسفوردی نیز دست کم دو نسل آپاتیت در رخنمون ها قابل شناسایی است: آپاتیت نسل I با بافت برشی و موزائیکی در ابعاد ۲ تا ۳ میلی متر و به رنگ صورتی-نخودی تا سفید در کانسنگ پرعیار اکسید آهن (شکل ۵-۵) و آپاتیت نسل II با بلورهای وجه دار پراکنده و



شکل ۵. تصویرهایی از آپاتیت در مقیاس‌های مختلف در ذخایر مورد بررسی از ناحیه بافق. A: کانسنگ مگنتیت-آپاتیت حاوی آپاتیت نسل I، در حاشیه کانسنگ توده‌ای مگنتیت، کانسار چادرملو، B: کانسنگ رگه‌ای مگنتیت-آپاتیت و رخداد آپاتیت نسل II، کانسار چادرملو، C: کانسنگ غنی از اکسید آهن حاوی آپاتیت نسل I به صورت بلورهای کوچک کشیده و سفیدرنگ، کانسار اسفوردی، D: کانسنگ آپاتیت-مگنتیت، کانسار اسفوردی. آپاتیت برشی نسل I توسط مگنتیت، هماتیت و کوارتز سیمانی شده است، E: بلورهای وجه‌دار و بزرگ آپاتیت نسل II، کانسار اسفوردی، F: رخنمونی از انباشت‌های رگه‌مانند آپاتیت بنفش رنگ نسل II در سنگ میزبان دگرسان‌شده، کانسار اسفوردی، G: آپاتیت ریزبلور نسل I، با بافت دانه‌پراکنده در کانسنگ مگنتیت توده‌ای، کانسار گزستان، H: آپاتیت نسل II همراه با مگنتیت در رگه‌های مگنتیت-آپاتیت در حاشیه کانسنگ توده‌ای مگنتیت، کانسار گزستان و I: کانسنگ برشی مگنتیت-آپاتیت-کلسیت در سنگ میزبان آندزیتی، کانسار گزستان. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ap: آپاتیت، Mag: مگنتیت، Hem: هماتیت، Cal: کلسیت).

Fig. 5. Images of apatite at various scales in the studied deposits from Bafq district. A: Magnetite-apatite ore containing apatite-I, from the margin of the massive magnetite ore, Chadormalu deposit, B: The occurrence of apatite-II in the vein-type magnetite-apatite ore, Chadormalu deposit, C: Iron oxide-rich ore containing apatite-I as small, needle-shaped and white crystals, Esfordi deposit, D: Apatite-magnetite ore, Esfordi deposit. Brecciated apatite-I is cemented by magnetite, hematite, and quartz, E: Large, euhedral crystals of apatite-II, Esfordi deposit, F: Vein-like accumulations of purple-apatite-II in the host rhyolitic rock, Esfordi deposit, G: Fine-grained apatite-I, disseminated in the massive magnetite ore, Gazestan deposit, H: Apatite-II and magnetite in magnetite-apatite veins along the margin of the massive magnetite ore, Gazestan deposit, and I: Brecciated magnetite-apatite-calcite ore in andesitic host rock, Gazestan deposit. Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (Ap: Apatite, Mag: Magnetite, Hem: Hematite, Cal: Calcite).

ریزدماسنجی میان بار سیال

ریزدماسنجی میان بارهای سیال، داده های مناسبی در ارتباط با دما، فشار و ترکیب سیالات کانی ساز در کانسارهای گرمابی فراهم می کند (Roedder, 1984; Wilkinson, 2001; Bodnar et al., 2014). بررسی های ریزدماسنجی به طور عمده روی میان بارهای دوفازی مایع-بخار (LV) و سه فازی مایع-بخار-هالیت (LVHa) در آپاتیت های نسل II انجام شد. تعداد محدودی اندازه گیری روی کلسیت پرکننده فضای خالی در کانسنگ برشی گزستان، اکتینولیت مرتبط با دگرسانی کلسیک، دولومیت و کلریت دیرنگام در کانسنگ نواری چادرملو و همچنین کلسیت و کوارتز همراه با دگرسانی های دیرنگام از کانسنگ های مختلف صورت گرفت. داده های ریزدماسنجی در جدول ۲ و شکل های ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

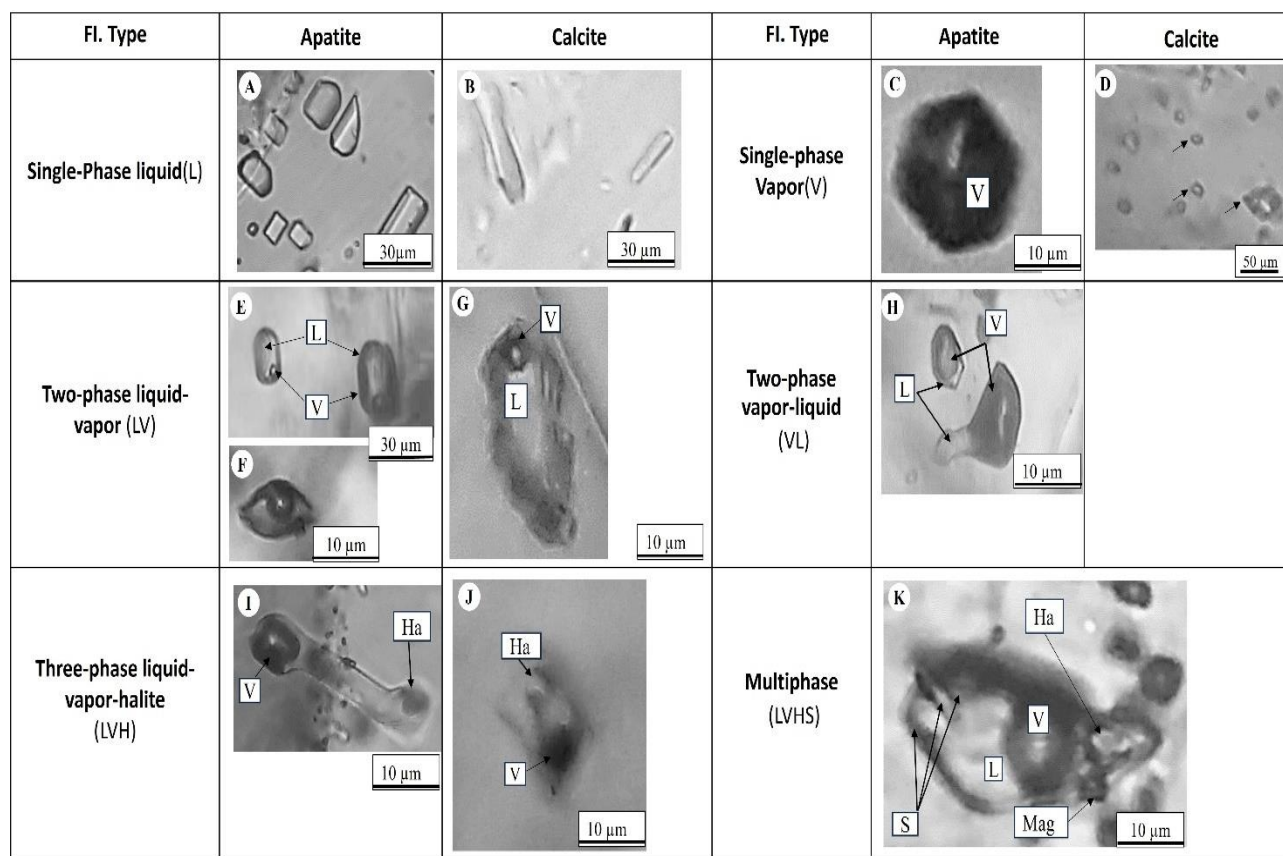
آزمایش های گرمایش

دماهای یوتکتیک میان بارهای سیال دوفازی مایع-بخار (LV) در دامنه ای بین ۵۴- تا ۲۰- درجه سانتی گراد متغیر است (شکل ۹). همچنین، دماهای همگنی (همگن شدگی) این گروه از میان بارها (LV) در نمونه های مختلف، گستره وسیعی از ۱۳۸ تا بیش از ۵۰۰ درجه سانتی گراد را نشان می دهد (جدول ۲). در کانسنگ نواری چادرملو، میان بارهای سیال در اکتینولیت مرتبط با دگرسانی کلسیک که ارتباط نزدیکی با کانی زایی اکسید آهن در این کانسنگ دارد، در دمای بیش از ۵۰۰، در دولومیت در بازه ۲۸۰ تا ۳۳۰ و در کلریت دیرنگام در بازه ۱۴۷ تا ۱۵۷ درجه سانتی گراد همگن شدند. در کانسنگ رگه ای چادرملو، دماهای همگنی میان بار سیال اولیه و ثانویه در آپاتیت نسل II، به ترتیب ۴۵۴ تا ۲۶۸ و ۱۳۸ تا ۲۱۷ درجه سانتی گراد به دست آمد (شکل ۱۰-A). در اسفوردی، دمای همگنی میان بارهای دوفازی غنی از مایع در آپاتیت نسل I و نسل II به ترتیب در بازه ۱۶۷ تا ۳۵۰ و ۱۶۵ تا ۴۶۴ درجه سانتی گراد رخ داد؛ در حالی که برای میان بار سیال دوفازی غنی از بخار، دامنه دمای بالاتری ثبت شد (۴۰۰ تا بیش از ۵۰۰ درجه سانتی گراد) (شکل ۱۰-C).

این کانسنگ از لایه های متناوب تیره (حاوی مگنتیت+دولومیت+آپاتیت+ب یوتیت+تالک+تیناتیت+پیریت) و لایه های سبز روشن (متشکل از اکتینولیت+ترمولیت+کلریت+کلسیت+تالک+آپاتیت) تشکیل شده است. دو نمونه از گزستان شامل کانسنگ برشی مگنتیت-آپاتیت-کلسیت است (نمونه های RS-51-67 و RS-46-35.5، حاوی آپاتیت نسل II، به ترتیب شکل B-۸ و C). مشخصات نمونه ها در جدول ۱ ارائه شده است.

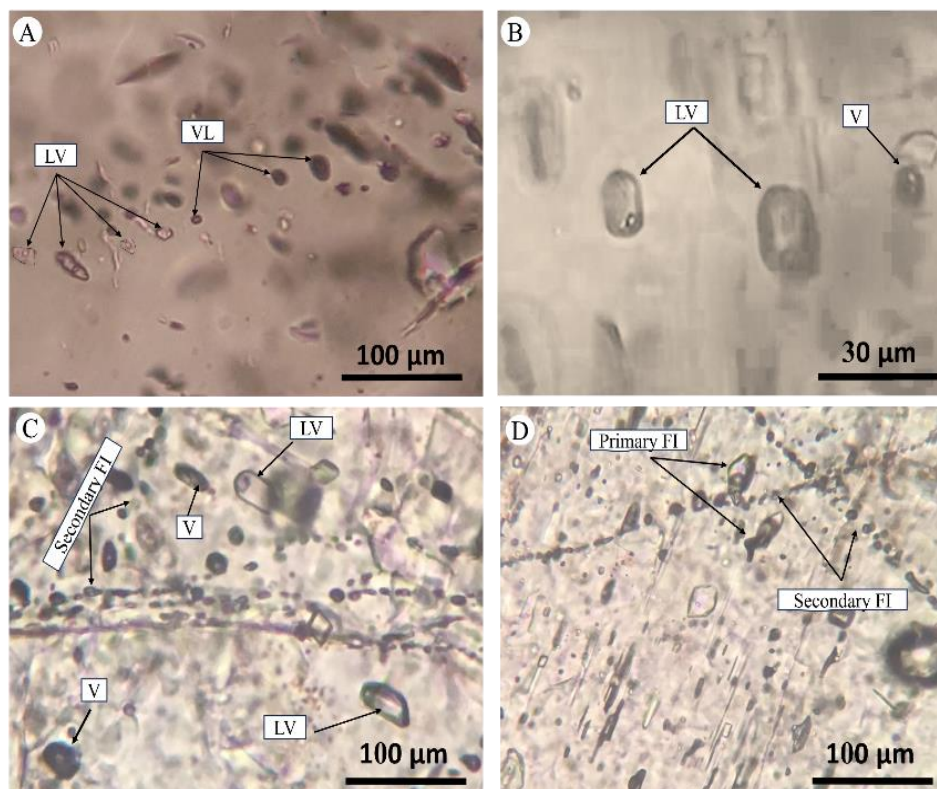
سنگ نگاری

بیش از ۲۰ مقطع دوبرصیقلی از کانسنگ های اسفوردی، گزستان و چادرملو تهیه و بررسی های سنگ نگاری برای شناخت فازهای موجود و مشاهده اندازه، شکل، فراوانی و نحوه توزیع میان بارهای سیال انجام شد. بر اساس تعداد و نوع فازهای موجود در دمای اتاق، میان بارهای سیال در شش گروه تقسیم بندی شدند (شکل ۶): میان بارهای تک فازی مایع (L) (شکل ۶-A و B)؛ میان بارهای تک فازی بخار (V) (شکل ۶-C و D)؛ میان بارهای دوفازی مایع-بخار غنی از مایع (LV) (شکل ۶-E، F و G)؛ میان بارهای دوفازی بخار-مایع غنی از بخار (VL) (شکل ۶-H)؛ میان بارهای سه فازی مایع-بخار-هالیت (LVH) (شکل ۶-I و J) و میان بارهای چندفازی حاوی فاز جامد ناشناخته (LVHS) (شکل ۶-K). همراهی و فراوانی میان بارهای دوفازی مایع-بخار (LV) با میان بارهای غنی از بخار (VL) می تواند نشان دهنده جوشش سیال باشد (Kamilli and Ohmoto, 1977). در سنگ نگاری میان بارها از معیارهای پاراژنتیکی رودر (Roedder, 1984) و گلدشتین (Goldstein, 2003) استفاده شد که بر اساس آن میان بارهای اولیه به صورت منفرد و پراکنده و همبود (اجتماع) میان بار سیال در امتداد سطوح رشد بلور و میان بارهای شبه ثانوی و ثانوی به شکل دنباله در داخل بلور یا قطع کننده مرز بلورها شناسایی شد (شکل ۷-A تا D) که بیشترین فراوانی مربوط به میان بارهای اولیه و شبه ثانویه بود. ابعاد میان بارها از کمتر از ۵ μm تا حدود ۳۰ μm و شکل آنها از چندوجهی تا دوکی، میله ای، شکل بلوری منفی، نامنظم و آمیبی متغیر بود (شکل ۶).



شکل ۶. انواع میان‌بارهای سیال در آپاتیت و کلسیت در کانسارهای چادرملو، گزستان و اسفوردی، ناحیه بافق. L: مایع، V: بخار، Ha: هالیت، S: جامد. A و B: میان‌بارهای سیال تک فاز مایع (L) در آپاتیت بنفش رنگ و ریز بلور نسل II در سنگ میزبان دگرسان شده سبز رنگ، کانسار اسفوردی (A) و کلسیت پرکننده فضای خالی در کانسنگ برشی مگنتیت-آپاتیت-کلسیت، کانسار گزستان (B)، C و D: میان‌بارهای سیال تک فاز بخار (V) در آپاتیت نسل II بنفش رنگ و ریز بلور در سنگ میزبان دگرسان شده سبز رنگ، کانسار اسفوردی (C) و کلسیت از کانسنگ برشی مگنتیت-آپاتیت، کانسار گزستان (D)، E، F و G: میان‌بارهای سیال دوفازی مایع-بخار (LV) در آپاتیت نسل I از کانسنگ آپاتیت-مگنتیت، کانسار اسفوردی (E) و کلسیت پرکننده فضای خالی از کانسنگ برشی مگنتیت-آپاتیت-کلسیت، کانسار گزستان (G)، H: میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از بخار (VL) در آپاتیت نسل I از کانسنگ آپاتیت-مگنتیت، کانسار اسفوردی، I و J: میان‌بارهای سیال سه فاز مایع-بخار-هالیت (LVH) به ترتیب در آپاتیت نسل II بنفش رنگ و ریز بلور در سنگ میزبان دگرسان شده سبز رنگ، کانسار اسفوردی، و کلسیت پرکننده فضای خالی در کانسنگ برشی مگنتیت-آپاتیت-کلسیت، کانسار گزستان و K: میان‌بارهای سیال چندفازی (LVHS) در آپاتیت بنفش رنگ و ریز بلور نسل II در سنگ میزبان دگرسان شده سبز رنگ، کانسار اسفوردی

Fig. 6. Microphotographs of fluid inclusions in apatite and calcite from Chadormalu, Gazestan, and Esfordi, Bafq district. L: liquid, V: vapor, Ha: halite, S: solid. A and B: Single-phase liquid (L) fluid inclusions in: Purple, fine-grained apatite-II in the altered green-looking host rock, Esfordi deposit (A). Space-filling Calcite in brecciated magnetite-apatite-calcite ore, Gazestan deposit (B), C and D: Single-phase vapor (V) fluid inclusions in: Purple, fine-grained apatite-II in the altered green-looking host rock, Esfordi deposit (C). Calcite in brecciated magnetite-apatite ore, Gazestan deposit (D). E, F and G: Two-phase liquid-vapor (LV) fluid inclusions in. Apatite-I from magnetite-apatite ore, Esfordi deposit (E and F). Space-filling Calcite in brecciated magnetite-apatite-calcite ore, Gazestan deposit (G), H: Vapor-rich two-phase fluid inclusions (VL) in apatite-I from magnetite-apatite ore, Esfordi deposit, I and J: Three-phase fluid inclusions (LVH) consisting of liquid, vapor, and halite, respectively, in purple, fine-grained apatite-II in the altered green-looking host rock, Esfordi deposit, and Space-filling Calcite in brecciated magnetite-apatite-calcite ore, Gazestan deposit, and K: Multi-phase fluid inclusions (LVHS), in fine-grained, purple apatite-II in the altered green-looking host rock, Esfordi deposit



شکل ۷. تصویرهای میکروسکوپ (PPL) از همبود میان‌بارهای سیال در آپاتیت از کانسنگ‌های ناحیه بافق A: همراهی میان‌بارهای دو فاز بخار-مایع (VL) با میان‌بارهای دو فاز مایع-بخار (LV) در آپاتیت نسل I؛ کانسنگ رگه‌ای مگنتیت-آپاتیت، کانسار چادرملو، B: همراهی میان‌بارهای دو فاز مایع-بخار (LV) با میان‌بارهای تک فاز بخار (V) در آپاتیت نسل I؛ کانسنگ آپاتیت-هماتیت، کانسار اسفوردی، C: همراهی میان‌بارهای اولیه و پراکنده LV و V و ردیفی از میان‌بارهای سیال ثانویه در آپاتیت ریزبلور و بنفش رنگ نسل II در سنگ میزبان دگرسان‌شده، کانسار اسفوردی و D: میان‌بارهای سیال اولیه در امتداد سطوح رشد و به صورت پراکنده، و میان‌بارهای ثانویه در امتداد شکستگی‌های ترمیم‌یافته در آپاتیت ریزبلور بنفش رنگ نسل II در سنگ میزبان دگرسان‌شده، کانسار اسفوردی

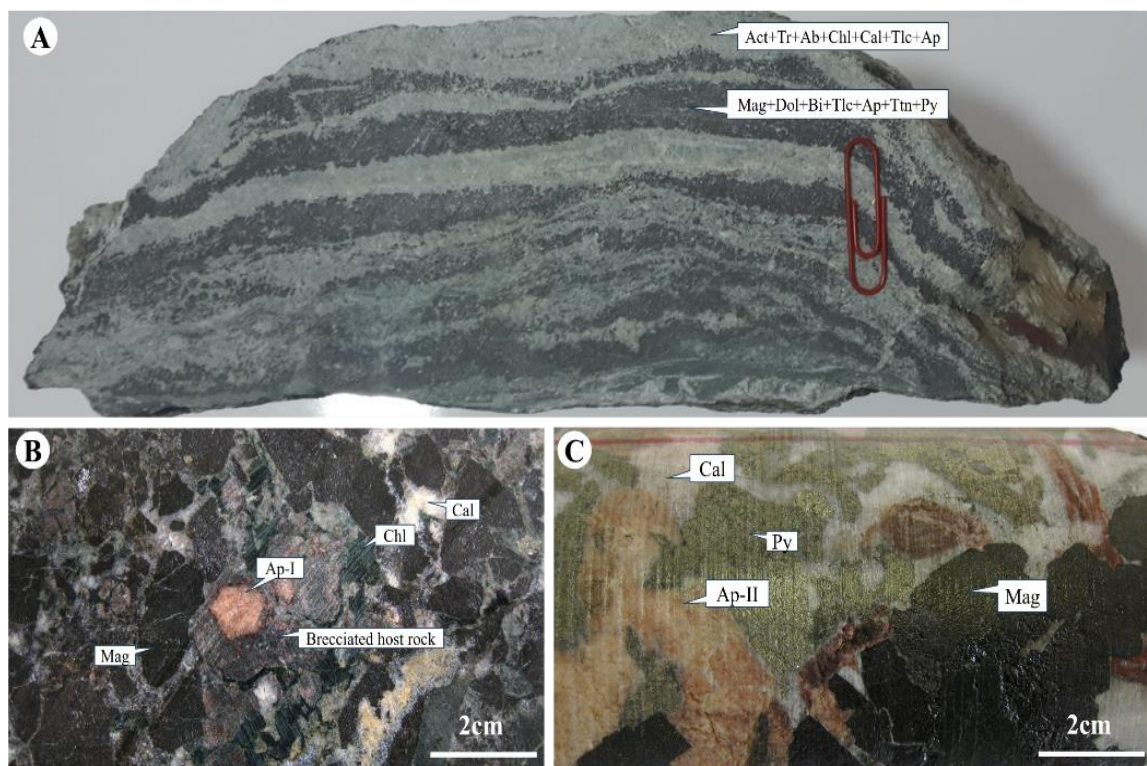
Fig. 7. Microphotographs (PPL) of fluid inclusions assemblage in apatite from Bafq district ores A: Primary fluid inclusions in apatite-II, showing coexistence of two-phase vapor-liquid inclusions (VL) with two-phase liquid-vapor inclusions (LV); magnetite-apatite vein-type ore, Chadormalu deposit, B: Coexistence of two-phase liquid-vapor inclusions (LV) with vapor inclusions (V) in apatite-I; apatite-hematite ore, Esfordi deposit, C: Coexistence of primary and scattered LV and V inclusions, as well as trails of secondary fluid inclusions in the fine-grained, purple apatite-II in altered green-looking host rock, Esfordi deposit, and D: Primary fluid inclusions across growth zones and as scattered bodies, as well as secondary fluid inclusions across healed fractures in the fine-grained, purple apatite-II in altered green-looking host rock, Esfordi deposit

کانسنگ برشی: ۲۵۰ تا ۳۹۰ درجه سانتی گراد) (شکل ۱۰-E). در میان‌بارهای سیال سه فاز مایع-بخار-هالیت (LVH) الگوهای متفاوتی از همگن‌شدگی مشاهده شد. برای میان‌بارهای سیال در کلسیت کانسنگ برشی گزستان،

در گزستان، این گروه از میان‌بارهای سیال در دامنه دمایی بین ۱۸۳ تا بیش از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد همگن شدند (در آپاتیت نسل II: ۴۱۶ تا بیش از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، در کلسیت همراه با کانسنگ برشی: ۱۹۰ تا ۲۱۷ درجه سانتی‌گراد، در کوارتز

اسفوردی، میان بارهای سیال با ناپدید شدن حباب بخار در دمایی بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی گراد همگن شدند ($T_{vd} > T_{hd}$) (شکل ۱۱). برای این گروه از میان بارها دمای انحلال هالیت بین ۲۷۴ تا ۲۹۱ درجه سانتی گراد تعیین شد. در آپاتیت از کانسنگ توده‌ای مگنتیت-آپاتیت چفارت، میان بار سیال سه فازی مایع-بخار-هالیت با انحلال هالیت در دامنه دمایی بین ۴۱۸ تا ۴۳۰ درجه سانتی گراد برای آپاتیت نسل I در فاز مایع همگن شدند (Hosseini et al., 2022) (شکل ۱۱).

همگنی با انحلال هالیت در فاز مایع در محدوده دمای ۲۹۰ تا ۳۳۰ درجه سانتی گراد و دمای ناپدید شدن فاز بخار بین ۱۸۳ تا ۳۲۰ درجه سانتی گراد تعیین شد. همگنی سیال در حالت ناپدید شدن بخار پیش از ناپدید شدن نمک ($T_{vd} < T_{hd}$)، در امتداد منحنی غیراشباع از بخار لیکیدوس هالیت در سیال NaCl-H₂O رخ می‌دهد (شکل ۱۱). تنها در یک مورد دمای ناپدید شدن فاز بخار (۳۲۰ درجه سانتی گراد) تقریباً با دمای ناپدید شدن هالیت (۳۳۰ درجه سانتی گراد) برابر بود. در مقابل، در آپاتیت نسل II از کانسار



شکل ۸. تصاویرهای نمونه دستی از کانسنگ‌های انتخاب شده ناحیه بافق برای بررسی‌های ریزدماسنجی A: کانسنگ نواری متشکل از نوارهای متناوب تیره غنی از مگنتیت و نوارهای روشن غنی از اکتینولیت که بیانگر دگرسانی کلسیک است، کانسار چادرملو، B: نمونه کانسنگ برشی مگنتیت-آپاتیت-کلسیت، در سنگ میزبان آندزیتی، کانسار گزستان و C: نمونه کانسنگ مگنتیت-آپاتیت-پیریت-کلسیت، کانسنگ گزستان. علائم اختصاری از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Act: اکتینولیت، Tr: ترمولیت، Ab: آلپیت، Chl: کلریت، Tlc: تالک، Ap: آپاتیت، Mag: مگنتیت، Dol: دولومیت، Bt: بیوتیت، Ttn: تیتانیت، Py: پیریت، Cal: کلسیت).

Fig. 8. Images of specimens of selected ore from Bafq district for microthermometric studies. A: Banded ore consists of alternating magnetite-rich and actinolite-rich bands, Chadormalu deposit, B: Brecciated magnetite-apatite-calcite ore in the andesitic host rock, Gazestan deposit, and C: Magnetite-apatite-pyrite-calcite ore sample, Gazestan deposit. Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (Act: Actinolite, Tr: Tremolite, Ab: Albite, Chl: Chlorite, Tlc: Talc, Ap: Apatite, Mag: Magnetite, Dol: Dolomite, Bt: Biotite, Ttn: Titanite, Py: Pyrite, Cal: Calcite).

جدول ۲. داده‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال در کانی‌های مختلف از کانسنگ‌های چادرملو، اسفوردی و گزستان ناحیه بافق

Table 2. Microthermometric data for fluid inclusions in various minerals from Chadormalu, Esfordi and Gazestan deposits Bafq district

Sample	FI.Type	Host. Min	T _{mice} (°C).....T _e (°C)		T _m ^{halite} (°C)	Th (°C)	Salinity (wt.% NaCl)	Salinity (wt.% CaCl ₂)
Chadormalu								
CHM-016	LV(P)	Dol	-9 to-1	-30 to-21		280–330	1.7–13.9	
	LV(P)	Chl	-0.4 to-0.5	-30 to-21		147–157	0.7–2.4	
	LV(P)	Act				>500		
CHM-017	LV(P)	Ap-II				268–454	12.8–19.6	
	LV(S)	Ap-II	-16.2 to-6.7	-35 to-40		138–217	13.4–18.9	
	VL(P)	Ap-II		-12 to-7.8		460		
Esfordi								
ESF-07	LV(P)	AP-I	-4.2 to-0.5	~-30		167–350	2.5–6.7	
Ap.a	VL(P)	AP-I		-2		418–530	3.3–4	
	LV(P)	Ap-II	-24.9 to-6.6	~-45		165–464	9.8–23.5	2.21–9.9
	LVH(P)	AP-II			274-291	510–520	36.1–37.1	
Gazestan								
RS-51-67	LV(P)	Cal				190–270		
	LV(P)	Ap-II				>500		
	LVH(P)	Cal				183–320	39.9–40.9	
RS-46-35-d	LV(P)	AP-II			290-330	416–>500	19.8–25.8	
	LV(P)	Qtz	-2	~-30		250–390	3.9–5.1	
	LVHS(P)	AP-II	-20	~-40		485–>500	22.3–24.8	

*Abbreviations after [Whitney and Evans \(2010\)](#) (FI: Fluid Inclusion; Min: Mineral; P: Primary; S: Secondary; Dol: dolomite; Chl: chlorite; Act: actinolite; Ap: Apatite; Di: Diopside; Cal: Calcite; Qtz: quartz).

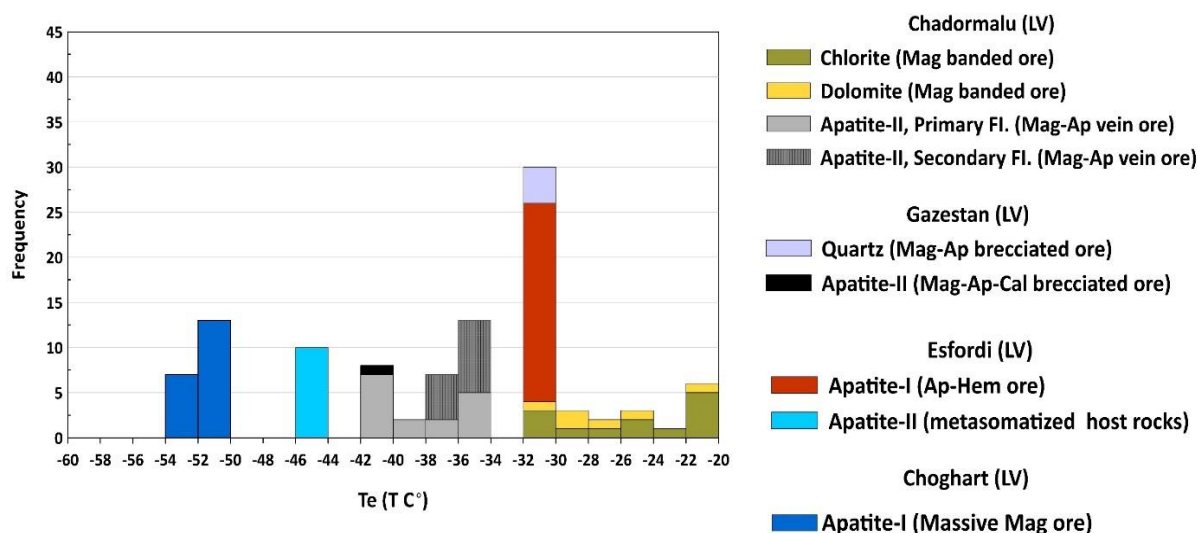
شوری سیال

درصد وزنی معادل کلسیم کلراید + ۱۵/۸ تا ۲۳/۵ درصد وزنی معادل نمک طعام در دامنه‌ای بین ۲۴/۶ تا ۲۵/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام + کلسیم کلراید اندازه‌گیری شد (جدول ۲). شوری میان‌بار سیال سه فاز مایع-بخار-هالیت (LVH) بر اساس دمای ناپدیدشدن هالیت (T_{hd}) نسبت به ناپدیدشدن حباب بخار (T_{vd}) با استفاده از معادلات استرنر و همکاران ([Sterner et al., 1988](#)) برای $T_{hd} \leq T_{vd}$ لاکومبری-سانچز و همکاران ([Lecumberri-Sanchez et al., 2012](#)) برای $T_{hd} \geq T_{vd}$ محاسبه‌شد. برای

داده‌های شوری سیال که بر اساس دمای ذوب آخرین یخ و دمای ذوب نمک تعیین شده است، نشان‌دهنده دامنه‌ای وسیع بین کمتر از ۱ تا ۴۱ درصد وزنی معادل نمک طعام است (شکل ۱۰-B، D و F). در چهار میان‌بار سیال به دام افتاده در آپاتیت نسل II از کانسار اسفوردی، به دلیل تشکیل کلسیم هیدروکلراید ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$) با دمای انحلال (۶/۷- تا ۱۵/۹- درجه سانتی‌گراد) در کنار تشکیل یخ و هیدروهالیت شوری سیال به صورت مجموع ۲/۲ تا ۹/۹

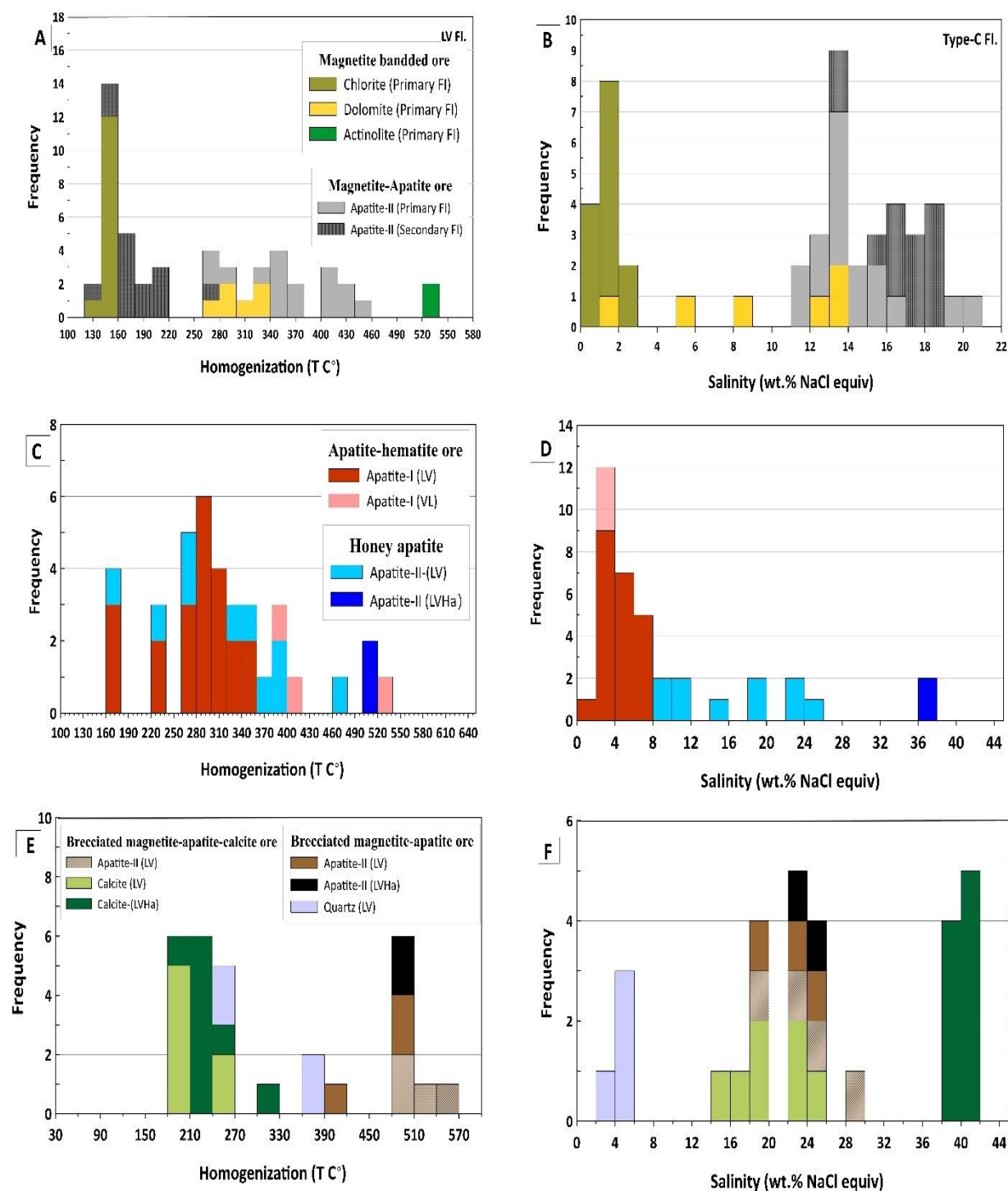
نمک طعام) نشان دادند. در مقابل، برای میان بارهای دوفازی مایع-بخار (LV) در آپاتیت نسل I از کانسنگ آپاتیت-هماتیت اسفوردی، شوری پایین (کمتر از ۱ تا ۶/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام) محاسبه شد. برای کانسنگ برشی گزستان، بالاترین مقادیر شوری (۴۰ تا ۴۱~ درصد وزنی معادل نمک طعام) برای میان بار سیال سه فازی مایع-بخار-هالیت در کلسیت به دست آمد؛ در حالی که برای میان بارهای دوفازی مایع-بخار (LV) در کوارتز دیر هنگام مقادیر شوری پایین (۳/۹ تا ۵/۱ درصد وزنی معادل نمک طعام) ثبت شد. حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2022) برای میان بارهای دوفازی مایع-بخار و سه فازی مایع-بخار-هالیت در آپاتیت I از کانسنگ توده ای مگنتیت-آپاتیت چغارت، به ترتیب دامنه شوری ۱۱/۴ تا ۱۳/۸ و ۴۲/۵ تا ۴۵~ درصد وزنی معادل نمک طعام گزارش کرده اند. تمام میان بارهای حاوی هالیت با ناپدید شدن هالیت ($T_{hd} \geq T_{vd}$) در فاز مایع همگن شدند (شکل ۱۱).

میان بارهای دوفازی مایع-بخار (LV)، شوری سیال از دمای ذوب آخرین بلور یخ (T_{mice}) با استفاده از معادله بودنار (Bodnar, 1994) به دست آمد. برای کانسنگ نواری چادرملو، دامنه ای گسترده از شوری (۱/۷ تا ۱۴ درصد وزنی معادل نمک طعام) برای میان بارهای سیال دو فازی مایع-بخار (LV) در دولومیت محاسبه شد. در مقابل، میان بار سیال دوفازی در کلریت، شوری کمتر از ۱ تا ۲/۴ وزنی معادل نمک طعام را نشان داد. به دلیل کوچک بودن میان بارها و عدم اندازه گیری دمای ذوب آخرین بلور یخ (T_{mice}) در اکتینولیت، شوری سیال در این حالت محاسبه نشد. برای کانسنگ رگه ای چادرملو، شوری بالاتر (۱۲/۸ تا ۱۹/۶ درصد وزنی معادل نمک طعام) برای میان بارهای سیال LV در آپاتیت نسل II محاسبه شد. در کانسار اسفوردی، میان بارهای سیال سه فازی مایع-بخار-هالیت (LVH) در آپاتیت نسل II، شوری نسبتاً بالا (۳۶/۱ تا ۳۷/۱ درصد وزنی معادل نمک طعام) و میان بارهای سیال دوفازی مایع-بخار (LV) شوری کم-متوسط (۹/۸ تا ۲۳/۵ درصد وزنی معادل



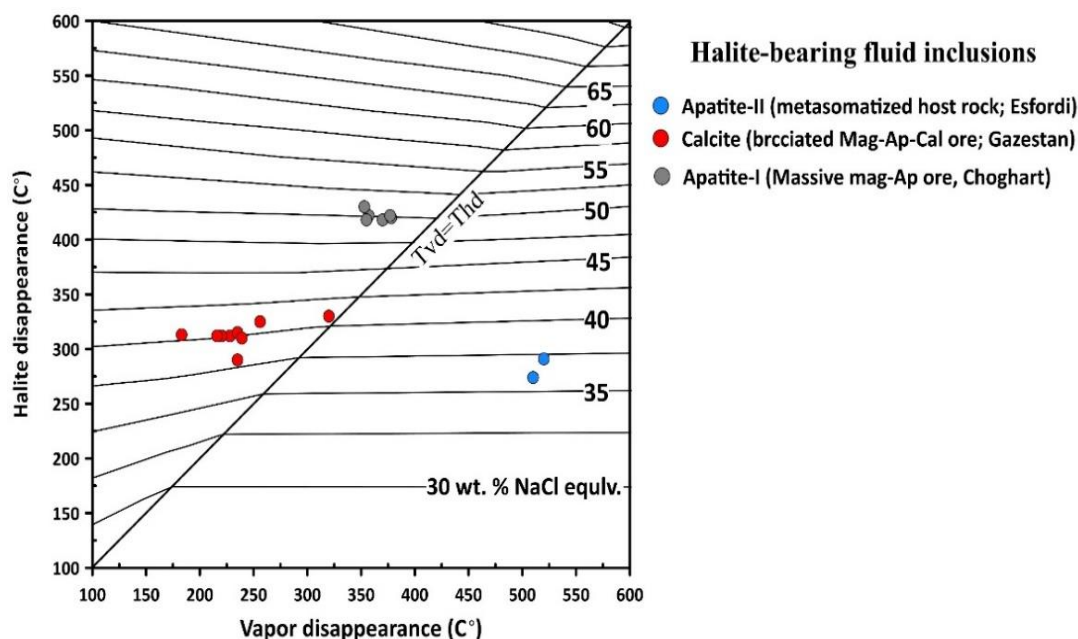
شکل ۹. هیستوگرام فراوانی دمای یوتکتیک برای میان بارهای دوفازی غنی از مایع (LV) در کانی های غیرفلزی همراه با اکسید آهن در کانسنگ های اکسید آهن-آپاتیت ناحیه ساغند- بافق. داده های چغارت از حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2022)

Fig. 9. Frequency histograms of eutectic temperatures for two-phase liquid-rich fluid inclusions (LV) in non-metallic minerals in iron oxide-apatite ores from the Bafq district, Choghart data from Hosseini et al., 2022



شکل ۱۰. هیستوگرام‌های فراوانی دمای همگن شدن و شوری از کانسنگ‌های ناحیه بافق، A و B: کانسار چادرملو، C و D: کانسار اسفوردی، E و F: کانسار گزستان

Fig. 10. Frequency histograms of total homogenization temperatures, and salinities form Bafg-Saghand district, A and B: Chadormalu, C and D: Esfordi, E and F: Gazestan deposits



شکل ۱۱. نمودار T_{hd} در برابر T_{vd} (با تغییر از لاکومبری-سانچز و همکاران (Lecumberri-Sanchez et al., 2012): T_{vd} : دمای ناپدید شدن فاز بخار؛ T_{hd} : دمای انحلال هالیت. برای میان بار سیال حاوی هالیت در کانی‌های همراه با کانسنگ اکسید آهن در کانسارهای اسفوردی، گزستان و چغارت. داده‌های چغارت از حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2022). خط‌های سیاه و اعداد روی آن، همگشت‌های شوری سیال را نشان می‌دهند.

Fig. 11. T_{hd} - T_{vd} diagram (after Lecumberri-Sanchez et al., 2012) T_{vd} : vapor disappearance temperature; T_{hd} : halite dissolution temperature. For halite-bearing fluid inclusions in various minerals associated with iron-oxide ore in the Esfordi, Gazestan, and Choghart deposits. Data for Choghart from Hosseini et al., 2022. The black lines with numbers show the Salinity contour.

بحث

متوسط (۲۸۰ تا ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد) و شوری کم تا متوسط (۱/۷ تا ۱۴ درصد وزنی معادل نمک طعام) و برای کلریت دیر هنگام، یک سیال دما پایین (۱۴۷ تا ۱۵۷ درجه سانتی‌گراد) و شوری کم (کمتر از ۱ تا ۲/۴ درصد وزنی معادل نمک طعام) ثبت شد (شکل ۱۲). داده‌های میان بار سیال از این سه کانی نشان می‌دهد که سیال‌هایی با ویژگی متفاوت در تحول کانسنگ نواری نقش داشته‌اند. اکتینولیت که بیشترین همبستگی را با کانسنگ آهن دارد از واکنش سیالی دما بالا پدید آمده است. در مراحل بعدی و دماهای پایین‌تر، واکنش سیال-سنگ با تشکیل دولومیت و سپس کلریت همراه بوده است.

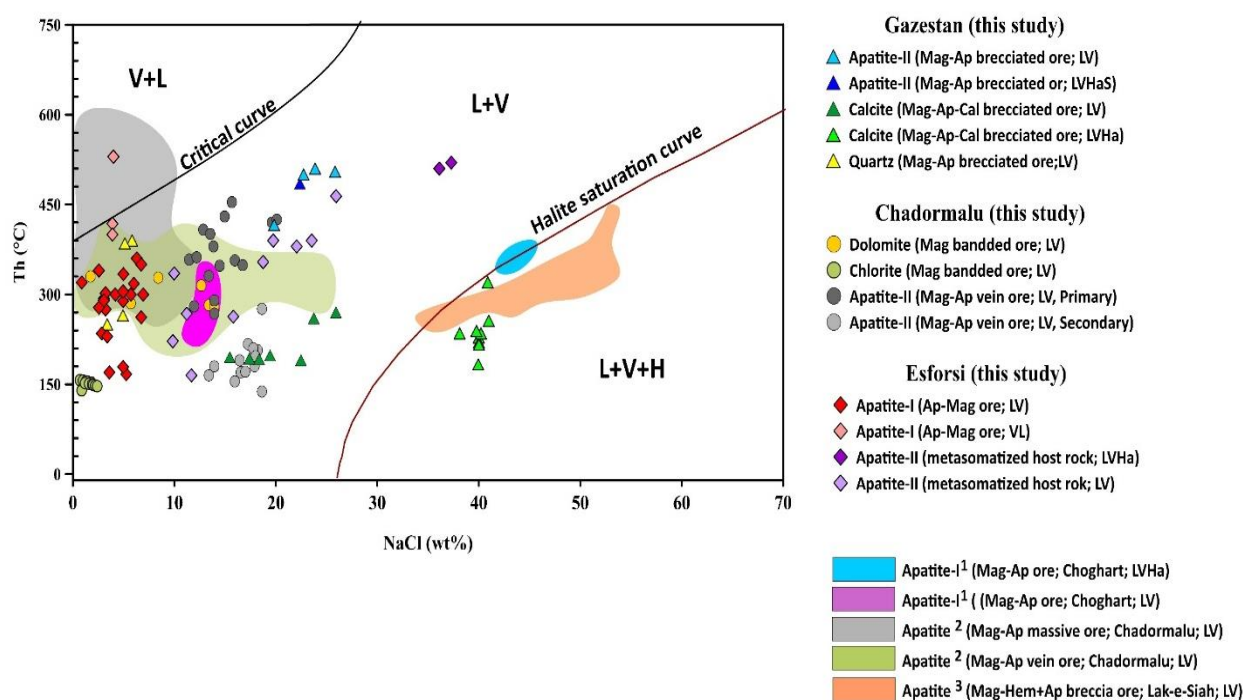
برای شناخت بیشتر از ویژگی‌های سیال کانسنگ ساز در ذخایر اکسید آهن-آپاتیت ایران مرکزی، بررسی‌های میان بارهای سیال روی کانی‌های غیرفلزی همراه با اکسید آهن در نمونه‌های معرف از ذخایر چادرملو، گزستان و اسفوردی انجام شده است.

تکامل سیال کانه‌زا

داده‌های میان بار سیال از کانسنگ نواری چادرملو در حاشیه کانسنگ توده‌ای مگنتیت، مشخص کرد که سیالی دما بالا (بالای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) در تشکیل اکتینولیت و دگرسانی کلسیک نقش داشته است. برای دولومیت در همین کانسنگ، سیالی با دمای

میان بارهای ثانویه مایع-بخار در آپاتیت های این کانسنگ، با دماهای همگنی پایین تر (۱۳۸ تا ۲۱۷ درجه سانتی گراد) و شوری مشابه، نشان دهنده منبع مشترک سیال است که با پیشرفت کانی سازی و تحول سیال دمای آن کاهش یافته است (شکل ۱۲). مقایسه داده های کانسنگ توده ای و کانسنگ رگه ای که در حاشیه کانسنگ توده ای تشکیل شده است، رخداد هم آمیختگی سیال و تکامل یک سیال دمابالا با شوری به نسبت پایین به یک سیال دمابالین و شوری متوسط است.

حیدریان و همکاران (Heidarian et al., 2017) دامنه دمایی ۲۶۶ تا ۵۸۰ درجه سانتی گراد و شوری ۰/۵ تا ۱۰/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام برای میان بارهای سیال از کانی آپاتیت در کانسنگ توده ای چادرملو گزارش کرده اند. داده های میان بار سیال از آپاتیت در کانسنگ رگه ای مگنتیت-آپاتیت نشان می دهد، احتمالاً یک سیال با دمای متوسط تا بالا (۲۶۸ تا ۴۵۴ درجه سانتی گراد) و شوری متوسط (۱۳~ تا ۲۰~ درصد وزنی معادل نمک طعام) در تشکیل کانسنگ رگه ای نقش داشته است.



شکل ۱۲. شوری در برابر دمای همگنی میان بارهای سیال برای نمونه هایی از کانسارهای گزستان، چادرملو و اسفوردی. داده های میان بار سیال از چغارت (Hosseini et al., 2022)، چادرملو (Heidarian et al., 2017) و لکه سیاه (TaleFazel and Rostami, 2020) برای مقایسه افزوده شده است. منحنی اشباعی هالیت، منحنی دمای بحرانی و محدوده های L+V+H, L+V و V+L بر اساس بودنار و همکاران (Bodnar et al., 1985) و ویلکینسون (Wilkinson, 2001)

Fig. 12. Salinity versus homogenization temperature of fluid inclusions for samples from the Gazestan, Chadormalu, and Esfordi. Data from Choghart (Hosseini et al., 2022) Chadormalu (Heidarian et al., 2017) and Lak-e-Siah (TaleFazel and Rostami, 2020) deposits are shown for comparison. Halite saturation curve, critical temperature curve, and the L+V+H, L+V, and V+L domains are after Bodnar et al. (1985) and Wilkinson (2001)

طعام و میان بارهای غنی از مایع با دمای همگنی ۱۶۷ تا ۳۵۰ درجه سانتی گراد و شوری ۲/۵ تا ۷~ درصد وزنی معادل نمک طعام از

میان بارهای دوفازی غنی از بخار با دمای همگنی ۴۱۸ تا ۵۳۰ درجه سانتی گراد و شوری معادل ۳/۳ تا ۴~ درصد وزنی معادل نمک

آپاتیت نسل I در اسفوردی، شواهدی از نقش یک سیال دمابالا با شوری کم در تشکیل کانسنگ غنی از مگنتیت را پیشنهاد می کنند. در حالی که، در تشکیل آپاتیت نسل II و کانسنگ غنی از آپاتیت در اسفوردی، سیالی نسبتاً شور نقش داشته است که با حضور میان بارهای سه فازی مایع-بخار-هالیت و دوفازی مایع-بخار به ترتیب با دماهای همگنی بیش از ۵۰۰ و ۱۶۵ تا ۴۶۴ درجه سانتی گراد و شوری های معادل ۳۶ تا ۳۷ و ۱۰ تا ۱۲/۳ درصد وزنی معادل نمک طعام مشخص می شود (شکل ۱۲). جمی و همکاران (Jami et al., 2007)، دامنه دما و شوری کم و بیش مشابهی را برای میان بارهای دوفازی مایع-بخار در آپاتیت II (دمای همگنی ۱۴۵ تا ۴۹۵ درجه سانتی گراد و شوری معادل ۱۲/۸ تا ۱۸/۶ درصد وزنی معادل نمک طعام گزارش کردند. این نویسندگان برای میان بارهای دوفازی مایع-بخار موجود در کوارتز دیر هنگام دمای همگنی و شوری را ۱۱۵ تا ۱۹۵ درجه سانتی گراد و ۹ درصد وزنی معادل نمک طعام گزارش کردند.

در کانسار گزستان، یک سیال دمابالا و نسبتاً شور مسئول کانی زایی آپاتیت و مگنتیت در کانسنگ برشی مگنتیت-آپاتیت-کلریت-کلسیت-کوارتز-پیریت $\pm$ کالکوپیریت بوده است. این سیال با میان بارهای دوفازی مایع-بخار و چند فازی حاوی فاز جامد به ترتیب با دماهای همگن شدگی ۴۱۶ تا بیش از ۵۰۰ و ۴۸۵ تا بیش از ۵۰۰ درجه سانتی گراد و شوری های معادل ۲۰ تا ۲۶ و ۲۲ تا ۲۵ درصد وزنی معادل نمک طعام شناسایی شد (شکل ۱۲). میان بارهای دوفازی مایع-بخار در کوارتز با دمای همگنی ۲۵۰ تا ۳۹۰ درجه سانتی گراد و شوری معادل ۴ تا ۵ درصد وزنی نمک طعام شاخص سیالی است که در مراحل پایانی کانی سازی حضور داشته است (شکل ۱۲). در کلسیت دیر هنگام همراه با سولفیدها (پیریت و کالکوپیریت) در این کانسنگ، میان بارهای سیال سه-فازی مایع-بخار-هالیت، با دمای همگنی ۱۸۳ تا ۳۱۰ درجه سانتی گراد و شوری زیاد (۴۰ تا ۴۱ درصد وزنی معادل نمک طعام) منبع سیال متفاوتی را پیشنهاد می کند (شکل ۱۲). بر اساس داده های میان بار سیال از آپاتیت، کوارتز و کلسیت کانسنگ

گزستان (شکل ۱۲)، حضور هم زمان میان بارهای دوفازی غنی از مایع (LV) و غنی از بخار (VL) در یک نمونه و یک اجتماع میان بار سیال، همراه با میان بارهای چند فازی حاوی فاز جامد (LVHS)، نشان دهنده رخداد فرایند جوشش در سامانه کانه زایی این کانسار است. مشاهده میان بارهای سه فازی حاوی هالیت (LVH) در کلسیت های دیر هنگام همراه با پیریت و کالکوپیریت، با دماهای ۱۸۳ تا ۳۱۰ درجه سانتی گراد و شوری زیاد (حدود ۴۰ تا ۴۱ درصد وزنی معادل نمک طعام)، می تواند نشان دهنده تفکیک فاز ناشی از جوشش در مرحله پایانی کانه زایی باشد. میان بارهای دوفازی در کوارتز با دمای همگنی ۲۵۰ تا ۳۹۰ درجه سانتی گراد و شوری پایین (۴ تا ۵ درصد وزنی نمک طعام) نیز می تواند مرتبط با این فرایند باشد. با توجه به داده های ریزدما سنجی (شکل ۱۲)، دمای تقریبی جوشش در کانسار گزستان حدود ۱۸۰ تا ۳۲۰ درجه سانتی گراد برآورد می شود. این دماها بیانگر مرحله گذار از سامانه دمابالا (۴۱۶ تا بیش از ۵۰۰ درجه سانتی گراد) و نسبتاً شور مرتبط با کانه زایی آپاتیت-مگنتیت، به سامانه دما پایین تر و شور تر مرتبط با کلسیت و سولفیدهاست. چنین ویژگی هایی با شواهد جوشش در سامانه های ماگمایی-گرمایی مشابه، مطابقت دارد (Kamilli and Ohmoto, 1977; Bodnar, 1994; Lecumberri-Sanchez et al., 2012). ترکیب ایزوتوپی گوگرد برای کانی های سولفیدی همراه با کلسیت دیر هنگام در کانسنگ های ناحیه، منبع سولفات دریایی را نشان می دهد که با منشأ شوارب های حوضه ای برای سیال دیر هنگام مسئول مرحله سولفیدی سازگار است (Heidarian et al., 2017; Mehrabi et al., 2019; Ziapour et al., 2021).

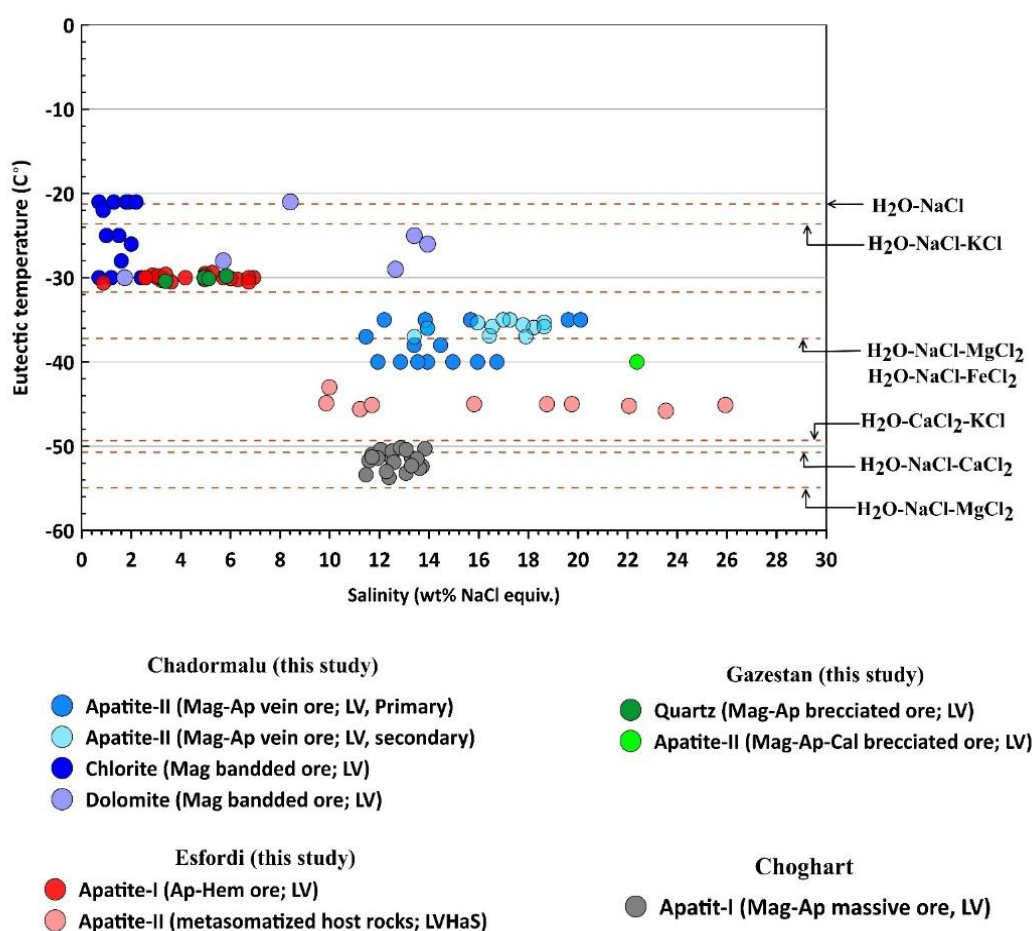
مقایسه ی ویژگی های میان بارهای سیال در سه کانسار مورد بررسی نشان می دهد که فرایند جوشش به صورت مشخص تنها در کانسار گزستان قابل تشخیص است (شکل ۱۲). در مقابل، در کانسار چادرملو میان بارهای سه فازی به ندرت دیده می شوند و گستره دمایی بالا (۴۲۰ تا ۵۴۰ درجه سانتی گراد) همراه با شوری متوسط، بیشتر بیانگر تفکیک جزئی یا سرد شدن تدریجی سیال ماگمایی

حوضه‌ای در هر سامانه باشد.

ترکیب سیال کانده‌زا

دمای یوتکتیک (T_e) برای میان‌بارهای سیال گوناگون در دامنه‌ای بین ۲۱- تا ۵۳- درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند (جدول ۲ و شکل ۱۳).

است تا جوشش واقعی. در کانسار اسفوردی نیز میان‌بارهای سیال اغلب از نوع دوفازی با دمای نسبتاً پایین‌تر (۲۵۰ تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد) و شوری کم هستند و هیچ شواهد قطعی از جوشش در آنها مشاهده نشده است. این تفاوت رفتاری می‌تواند ناشی از تغییرات فشار، عمق تشکیل و نسبت اختلاط سیالات ماگمایی و



شکل ۱۳. نمودار شوری در برابر دمای یوتکتیک (T_e C°) برای میان‌بارهای دوفازی مایع-بخار و سه‌فازی مایع-بخار-هالیت در نمونه‌هایی از کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت در ناحیه بافق که حضور سیال‌هایی با ترکیب و شوری مختلف را نشان می‌دهد. خط‌های قرمز (برگرفته از کراویرو و همکاران (Craveiro et al., 2020)) نشان‌دهنده ترکیب سیال در دمای یوتکتیک است. داده‌های چغارت از حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2022)

Fig. 13. Salinity versus eutectic temperature (T_e C°) plot for two-phase liquid-vapor and three-phase liquid-vapor-halite inclusions from iron oxide-apatite deposits in the Bafq district, showing the presence of fluids with different compositions and salinities. Red lines (from Craveiro et al., 2020) indicate fluid composition at the eutectic temperature. Choghart data from Hosseini et al. (2022)

می شوند، در برخی از کانسارهای گرمابی شامل ذخایر مس و مولیبدن پورفیری، اسکاردن و IOCG و همچنین محیط های دگرگونی درجه متوسط تا شدید متداول هستند (Becker et al., 2012; Lecumberri-Sanchez et al., 2008). میان بارهای سه فاز مایع-بخار-هالیت در کلسیت از کانسنگ برشی گزستان با انحلال هالیت در بازه دمایی بین ۲۹۰ تا ۳۳۰ درجه سانتی گراد در فاز مایع همگن شدند که نشان دهنده شوری بین ۴۰~ تا ۴۱ درصد وزنی معادل نمک طعام، بر اساس دمای ذوب هالیت است. دمای ناپدیدشدن فاز بخار برای این میان بارها بین ۱۸۳ تا ۳۲۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد. فشار و چگالی کل این میان بارها بر اساس لاکومبری-سانچز و همکاران (Lecumberri-Sanchez et al., 2012) و با استفاده از دمای ذوب یا انحلال هالیت و دمای همگنی فاز بخار تعیین شد (شکل ۱۴).

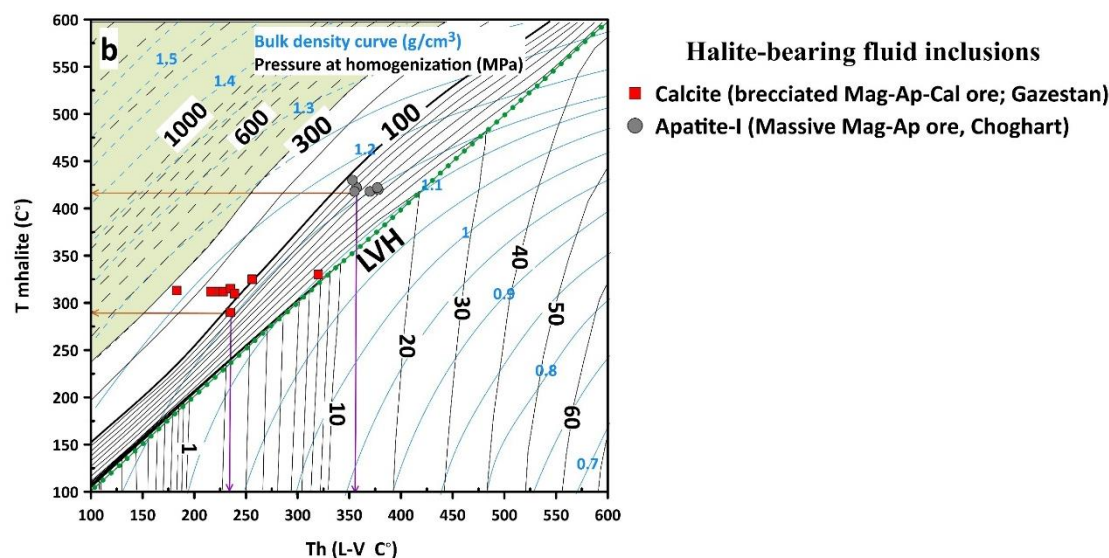
اختلاف در دماهای ناپدیدشدن فاز بخار و هالیت در یک مجموعه از میان بارهای شور نشانه ای از به دام افتادن ناهمگن سیال بوده و یا احتمالاً برخی بلورهای هالیت به صورت فاز جامد تصادفی از یک سیال اشباع از هالیت به دام افتاده اند (Lecumberri-Sanchez et al., 2012). در چنین شرایطی پایین ترین دمای انحلال هالیت برای تعیین شرایط کمینه فشار به دام افتادن آن مجموعه استفاده می شود (Lecumberri-Sanchez et al., 2012). بر اساس پایین ترین دمای انحلال هالیت (۲۳۵ درجه سانتی گراد) در میان بارهای کلسیت در کانسنگ برشی مگنتیت-آپاتیت-کلسیت گزستان، و آپاتیت I از کانسنگ توده ای مگنتیت-آپاتیت چغارت (۴۱۸ درجه سانتی گراد)، کمینه فشار به دام افتادن این میان بارها به ترتیب ۹۰ MPa و ۷۵ MPa تخمین زده می شود (شکل ۱۴). با در نظر گرفتن چگالی 2.7 g/cm^3 ، کمینه عمق به دام افتادن میان بارها در آپاتیت II از کانسنگ برشی گزستان، ۳/۳ کیلومتر و در آپاتیت I از کانسنگ مگنتیت-آپاتیت چغارت، ۲/۷ کیلومتر است (شکل ۱۴).

مقادیر منفی بزرگ تر از ۵۷- مشخصه سامانه های چندجزئی $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{MgCl}_2-\text{CaCl}_2$ است (Crawford, 1981)؛ درحالی که دامنه وسیع بین ۲۱- تا ۵۲- درجه سانتی گراد نشان دهنده حضور سامانه های سه تایی $\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2-\text{NaCl}$ ، $\text{H}_2\text{O}-\text{FeCl}_2-\text{NaCl}$ و $\text{H}_2\text{O}-\text{MgCl}_2-\text{NaCl}$ به ترتیب با دمای یوتکتیک ۵۲-، ۳۷-، ۳۵- و ۲۳- درجه سانتی گراد است (Crawford, 1981; Bodnar, 2003). نتایج به دست آمده حضور دست کم دو گروه سیال با ترکیب و شوری مختلف را در سامانه کانی زایی بافق نشان می دهد (شکل ۱۳).

دمای یوتکتیک ۳۰- تا ۲۱- درجه سانتی گراد و شوری کمتر از ۹ درصد وزنی معادل نمک طعام برای میان بارهای دوفازی مایع-بخار می تواند بیانگر نسبت های متفاوتی از سیال $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{MgCl}_2$ باشد. این سیال در آپاتیت نسل I از کانسنگ غنی از مگنتیت کانسار اسفوردی و کلریت و کوارتز دیر هنگام به ترتیب از کانسنگ نواری چادرملو و کانسنگ برشی گزستان شناسایی شد. میان بارهای دوفازی مایع-بخار با دمای یوتکتیک ۵۳- تا ۳۵- درجه سانتی گراد و شوری متوسط (۱۰~ تا ۲۶ درصد وزنی معادل نمک طعام) می تواند نشان دهنده حضور سیال های $\text{NaCl}-\text{MgCl}_2$ ، $\text{NaCl}-\text{FeCl}_2$ و CaCl_2-KCl باشد (Craveiro et al., 2020). شواهد حضور این سیال در دولومیت و آپاتیت نسل II به ترتیب در کانسنگ نواری و رگه ای چادرملو، آپاتیت نسل II هم رشد با مگنتیت در کانسنگ غنی از آپاتیت اسفوردی و آپاتیت نسل II در کانسنگ برشی مگنتیت-آپاتیت-کلسیت-پیریت ثبت شد. همچنین، نتایج مشابهی از میان بارهای دوفازی مایع-بخار از کانسار چغارت با دمای یوتکتیک ۵۱- تا ۵۴- درجه سانتی گراد و شوری ۱۱/۴ تا ۱۴~ درصد وزنی معادل نمک طعام گزارش شد (Hosseini et al., 2022) (شکل ۱۳).

تفسیر داده های میان بارهای شور حاوی هالیت

میان بارهای بسیار شور حاوی هالیت که با انحلال هالیت همگن



شکل ۱۴. نمودار دمای انحلال هالیت ($T_{mHalite}$) در برابر دمای همگنی فاز بخار-مایع (Th_{L-V}) که روابط فشار و چگالی کل را برای میان‌بارهای سیال حاوی هالیت (Type-E) در نمونه‌های انتخابی از کانسارهای گزستان و چغارت نشان می‌دهد. چگالی کل (خط‌های آبی) و فشار سیال (خط‌های سیاه) برگرفته از لاکومبری-سانچز و همکاران (Lecumberri-Sanchez et al., 2012). خط نقطه‌های سبز، منحنی تعادل بخار-مایع-هالیت را نشان می‌دهد. داده‌های چغارت از حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2022)

Fig. 14. T_m -halite vs Th L-V plots showing pressure and bulk density relationships of halite-bearing fluid inclusions in selective samples from Gazestan and Choghart deposits from the Bafq district. The bulk density of fluid (blue lines), and the fluid pressure (black lines) adapted from Lecumberri-Sanchez et al. (2012). The green dotted line indicates the liquid-vapor-halite (LVH) equilibrium curve. Data of Choghart from Hosseini et al. (2022)

نتیجه‌گیری

دامنه وسیع دمای همگن‌شدگی و شوری میان‌بارها حتی در یک نوع خاص کانسنگ (شکل ۱۰)، در کنار ردیابی سامانه‌های پیچیده و چندجزئی سیال حاوی نمک‌های کاتیونی دوظرفیتی در آپاتیت هم‌رشد با مگنتیت در کانسنگ‌های مختلف (شکل ۱۳)، احتمال سازوکار هم‌آمیختگی در روند تکامل سیال کانه‌دار ماگمایی در کانسنگ‌های مورد بررسی را تقویت می‌کند.

ردیابی یک سیال دم‌پایین‌تر با شوری متوسط تا بالا (جدول ۲ و شکل ۱۲)، ترکیب ایزوتوپی اکسیژن سیال در تعادل با مگنتیت در اسفوردی (Jami et al., 2007) و مقادیر مثبت و بالای ایزوتوپ گوگرد (+۸/۹ تا حدود +۲۵‰) در سولفیدهای دیر هنگام از کانسارهای چادرملو و گزستان، جلال‌آباد و چاه‌گز (Heidarian et al., 2017; Sepehrirad et al., 2018; Mehrabi et al.,

نتایج این پژوهش، نقش دست‌کم دو سیال با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوت را در تشکیل کانسارهای مورد بررسی آشکار می‌کند. شواهدی مانند شدت و گستردگی دگرسانی‌ها (Jami et al., 2007; Torab, 2008; Heidarian et al., 2017)، دماهای همگن‌شدگی بالای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد برای اکتینولیت مرتبط با دگرسانی کلسیک و آپاتیت هم‌رشد با مگنتیت در کنار داده‌های ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن مگنتیت (Jami et al., 2007; Torab, 2008; Heidarian et al., 2017; Mehrabi et al., 2019; Mehdipour Ghazi et al., 2019)، نقش یک سیال ماگمایی دم‌بالا را در تشکیل کانسنگ مگنتیت-آپاتیت در کانسارهای چادرملو، گزستان و اسفوردی و احتمالاً سایر کانسارهای ناحیه بافق را برجسته می‌کند. از طرفی،

2008)؛ در حالی که تشکیل سولفیدها $\pm$ مس $\pm$ طلا به هم آمیختگی سیال ماگمایی با سیال غیرماگمایی نسبت داده شده است (Chen, 2015; Williams et al., 2013). در مقابل، برخی نقش شوره‌های حوضه‌ای را در کانی‌زایی اکسید آهن برجسته‌تر دانسته و بیان می‌کنند که سیال ماگمایی اغلب دگرسانی‌ها و فراوانی عناصر را کنترل می‌کند (Barton and Johnson, 1996).

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

نویسندگان از مدیریت و کارکنان مجتمع معدنی چادرملو برای فراهم‌سازی امکانات در طول انجام بررسی‌های میدانی در منطقه بافق قدردانی می‌کنند. همچنین از خانم آقاجانی از مرکز تحقیقات فراآوری مواد معدنی ایران بابت فراهم کردن داده‌های ریزدماسنجی مورد استفاده در این پژوهش، قدردانی می‌شود.

(2019; Ziapour et al., 2021) ماهیت غیرماگمایی و پوسته‌ای (احتمالاً شوره‌های حوضه‌ای) را برای سیال دوم در سامانه‌های کانی‌زایی مورد بررسی و احتمالاً منطقه بافق روشن می‌کند (Chen, 2013). وجود توالی‌های تبخیری در واحد CVSU که میزبان اصلی کانسنگ‌های اکسید آهن- آپاتیت در ناحیه بافق هستند (Ramezani and Tucker, 2003) و عمق کم کانی‌سازی، بر اساس میان‌بارهای شور حاوی هالیت (حدود ۳ کیلومتر) احتمال حضور یک سیال غیرماگمایی و پوسته‌ای (احتمالاً شوره‌های حوضه‌ای) را در سامانه کانه‌زایی منطقه بافق تقویت می‌کند (شکل ۱۳).

در تشکیل کانسارهای گروه IOCG و زیر گروه اکسید آهن- آپاتیت (IOA)، دست کم دو سیال، با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوت ردیابی شده‌اند. ماهیت این دو سیال بسته به محیط‌های زمین‌شناسی، توده‌های نفوذی هم‌زمان و زمین‌ساخت می‌تواند شامل یک سیال داغ ماگمایی و سیال سرد غیرماگمایی (شوره‌های حوضه‌ای، آب جوی، آب سازندی و آب دگرگونی) باشد (Song et al., 2024). سیال ماگمایی مسئول دگرسانی‌های اولیه و کانی‌سازی آهن- آپاتیت معرفی شده است (Monteiro et al.).

1. Iron Oxide-Apatite (IOA)
2. Kiruna
3. REE
4. Iron- Oxide-Copper-Gold (IOCG)
5. Linkam
6. Zeiss Axioplan-2 microscope
7. Cambrian volcanic-sedimentary unit (CVSU)
8. Fluid Inclusion Assemblage (FIA)
9. IMPRC

References

- Aftabi, A., Mohseni, S., Babeki, A. and Azaraieen, 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/10.2113/gsecongeo.104.1.137>
- Barton, M., 2014. Iron oxide (–Cu–Au–REE–P–Ag–U–Co) systems. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors), *Treatise on Geochemistry* (Second Edition), 13: 515–541.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01123-2>
- 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/10.1130/0091-7613\(1996\)024%3C0259:ESMFIR%3E2.3.CO;2](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. Retrieved December 8, 2025 from [https://www.geo.arizona.edu/~mdbarton/MDB_papers_pdf/Barton\[00_BrineSourcesIOCGdeps_AMF.pdf](https://www.geo.arizona.edu/~mdbarton/MDB_papers_pdf/Barton[00_BrineSourcesIOCGdeps_AMF.pdf)
- Becker, S., Fall, A. and Bodnar, R., 2008. Synthetic fluid inclusions. XVII. 1 PVTX properties of high salinity H₂O–NaCl solutions (> 30 wt.% NaCl): Application to fluid inclusions that homogenize by halite disappearance from porphyry copper and other hydrothermal ore deposits. *Economic Geology* 103(3): 539–554.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.3.539>
- Bodnar, R., 1994. Synthetic fluid inclusions: XII. The system H₂O–NaCl. Experimental determination of the halite liquidus and isochores for a 40 wt.% NaCl solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(3): 1053–1063.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90571-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90571-1)
- Bodnar, R.J., 2003. Introduction to aqueous-electrolyte fluid inclusions. In: I. Samson, A. Anderson and D. Marshall (Editors), *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Canada, 32: 81–99.
<https://doi.org/10.3749/9780921294672.ch04>
- Bodnar, R., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D. and Steele-MacInnis, M., 2014. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Treatise on geochemistry* (Second Edition), 13: 119–142.
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01105-0>
- Bodnar, R.J., Reynolds, T.J. and Kuehn, C.A., 1985. Fluid-inclusion systematics in epithermal systems, In: B.R. Berger; P.M. Bethke and J.M. Robertson (Editors), *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*, Society of Economic Geologists, USA, pp. 73–97.
<https://doi.org/10.5382/Rev.02.05>
- 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/10.1016/j.chemgeo.2010.12.013>
- Bonyadi, Z. and Sadeghi, R., 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.jseaes.2019.104152>
- Borumandi, H., 1973. Petrographische und Lagerstättenkundliche untersuchungen der Esfordi-formation zwischen Mishdovan und Kushk bei Yazd/Zentral Iran. Ph.D. Thesis, University of Aachen, Germany, 174 pp.
- Chen, H., 2013. External sulphur in IOCG mineralization: Implications on definition and classification of the IOCG clan. *Ore Geology Reviews*, 51: 74–78.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.12.002>
- Craveiro, G.S., Villas, R.N.N. and Xavier, R.P., 2020. A fluid inclusion and stable isotope (O, H, S, and C) study of the Archean IOCG Cristalino deposit, Carajás mineral Province, Brazil: Implications to ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 127: 103–822.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103822>
- Crawford, M.L., 1981. Phase equilibria in aqueous fluid inclusions. In: L.S. Hollister, and M.L. Crawford (Editors), *Fluid inclusions: applications to petrology*. Mineralogical Association of Canada, Toronto, Canada, pp. 75–100.
- 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. Retrieved July 13, 2025 from <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 In: L. Corriveau and H. Mumin (Editors), Exploring for iron oxide copper-gold deposits. Canada and Global Analogues, Geological Association of Canada, 147-160. Retrieved December 8, 2025, from <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1942458>
- 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/10.1016/j.oregeorev.2018.01.008>
- Foerster, 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/10.2113/gsecongeo.89.8.1697>
- Geijer, P., 1931. The iron ores of the Kiruna type: geographical distribution, geological characters, and origin. Sveriges Geologiska Undersökning, Generalstabens Litografiska Anstalt, Stockholm, Series C, No. 367. 39 pp.
- Goldstein, R.H., 2003. Petrographic analysis of fluid inclusions. In: I. Samson, A. Anderson and D. Marshall (Editors), Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. Mineralogical Association of Canada, 32: pp. 9–52. <https://doi.org/10.3749/9780921294672.ch02>
- Haghipour, A., 1974. Etude 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 pp. <https://hal.science/tel-00740361/>
- Haghipour, A., 1977a. Geological Map of the Biabanak-Bafq Area, scale 1:500,000. Geological Survey of Iran.
- Haghipour, A., 1977b. Geological Map of the Posht-e-Badam Area, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- 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. <http://dx.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/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>
- Hildebrand, R.S., 1986. Kiruna-type deposits; their origin and relationship to intermediate subvolcanic plutons in the Great Bear magmatic zone, Northwest Canada. *Economic Geology*, 81(3): 640–659. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.81.3.640>
- 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/10.1016/0301-9268\(92\)90121-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90121-4)
- Hosseini, K., Shahpasandzadeh, M. and Moradian Bafghi, M.H., 2022. Origin of Mineralizing Fluids in the Choghart Magnetite-Apatite 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. <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 pp.
- 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 pp.
- Jami, M. 2005. Geology, geochemistry and evolution of the Esfordi phosphate-iron deposit, Bafq area, Central Iran, Ph.D. Thesis, UNSW Sydney, Wales, 396 pp.
<https://doi.org/10.26190/unsworks/17736>
- 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/10.2113/gsecongeo.102.6.1111>
- Kamilli, R.J. and Ohmoto, H., 1977. Paragenesis, zoning, fluid inclusion, and isotopic studies of the Finlandia vein, Colqui district, central Peru. *Economic Geology*, 72(6): 950–982.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.72.6.950>
- 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(7): 591–594.
<https://doi.org/10.1130/G36650.1>
- Lecumberri-Sanchez, P., Steele-MacInnis, M. and Bodnar, R.J., 2012. A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 92: 14–22.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.05.044>
- 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/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/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/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: 795–807. <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0313-z>
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Hitzman, M.W., Juliani, C., de Souza Filho, C.R. and Carvalho, E.d.R., 2008. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 34(3): 317–336.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.01.003>
- Moore, F. and Modabberi, S., 2003. Origin of Choghart iron oxide deposit, Bafq District, Central Iran: new isotopic and geochemical evidence. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 14(3): 259–269. Retrieved July 13, 2025, from https://jscienc.es.ut.ac.ir/article_31711.html
- Mücke, A. and Younessi, R., 1994. Magnetit-Apatitlagerstätten (Kiruna-Typ) entlang der Sanandaj-Sirjan Zone und im Bafq Gebiet, Iran und ihre Beziehung zu ultramafischen, alkalischen und karbonatitischen Gesteinen. *Mineralogy and Petrology*, 50(4): 219–244.
<https://doi.org/10.1007/BF01164607>
- Nystroem, 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/10.2113/gsecongeo.89.4.820>
- Parak, T., 1975. Kiruna iron ores are not intrusive-magmatic ores of the Kiruna type. *Economic Geology*, 70(7): 1242–1258.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.7.1242>
- Perring, C., Pollard, P., Dong, G., Nunn, A. and Blake, K., 2000. The Lightning Creek sill complex, Cloncurry district, northwest Queensland: A source of fluids for Fe oxide Cu-Au mineralization and sodic-calcic alteration. *Economic Geology*, 95(5): 1067–1089.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.5.1067>

- Pollard, P.J., 2006. An intrusion-related origin for Cu–Au mineralization in iron oxide–copper–gold (IOCG) provinces. *Mineralium Deposita*, 41(2): 179–187. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0054-x>
- Putnis, A., Hinrichs, R., Putnis, C.V., Golla-Schindler, U. and Collins, L.G., 2007. Hematite in porous red-clouded feldspars: evidence of large-scale crustal fluid–rock interaction. *Lithos*, 95(1–2): 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.07.004>
- Rajabi, A., 2012. Ore controlling parameters and genesis of sedimentary exhalative Zn–Pb (SEDEX type) deposits, Zarigan-Chahmir Area, East of Bafq, Central Iran. Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 420 pp.
- 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. <http://dx.doi.org/10.2475/ajs.303.7.622>
- Roedder, E., 1984. Volume 12: fluid inclusions. Mineralogical Society of America, United States, 644 pp.
- Sadeghi Davati, V., Hassanzadeh, J. and Alirezaei, S., 2008. Iron Oxide-apatite mineralization of Bafq district: Spatial, temporal and geochemical relationship with granitoid magmatism and early Cambrian sedimentary provinces. 26th Earth Sciences Meeting, Geological Survey of Iran. Abstracts.
- Samani, B.A., 1988. Metallogeny of the Precambrian in Iran. *Precambrian Research*, 39(1–2): 85–106. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(88\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0301-9268(88)90053-8)
- Samani, B.A., 1993. Sagand formation, a riftogenic unit of Upper Precambrian in Central Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 2(6): 32–45. (in Persian with English abstract) Retrieved December 8, 2025 from https://www.researchgate.net/publication/292811521_Saghand_formation_a_riftogenic_unit_of_upper_Precambrian_in_central_Iran
- Sepehrirad, R. 2019. Processes Controlling Iron oxide - Apatite - REE Mineralization in Gazestan Deposit, Central Iran, Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran., 188 pp.
- 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): 247–258. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22071/gsj.2019.155886.1568>
- Sepehrirad, R., Alirezaei, S. and Azimzadeh, A.M., 2018. Hydrothermal alteration in the Gazestan magnetite-apatite deposit and comparison with other Kiruna-type iron deposits in the Bafq district, Central Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27(108): 257–268. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.91765.1189>
- Sillitoe, R.H., 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7): 787–812. <https://doi.org/10.1007/s00126-003-0379-7>
- Skirrow, R.G., 2022. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits: A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification. *Ore Geology Reviews*, 140: 104569. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104569>
- Soheili, M. and Mahdavi, M., 1991. Geological Map of Esfordi, scale:100.000. Geological Survey of Iran.
- Song, M., Peng, Y., Chen, Y., Zhang, Y., Yang, H. and Xu, S., 2024. Research progress of fluid inclusions and its application in iron oxide copper-gold (IOCG) deposits. *Ore and Energy Resource Geology*, 17: 100066. <https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2024.100066>
- Sterner, S.M., Hall, D.L. and Bodnar, R.J., 1988. Synthetic fluid inclusions. V. Solubility relations in the system NaCl–KCl–H₂O under vapor-saturated conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5): 989–1006. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90254-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90254-2)
- 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: 9–21. <https://doi.org/10.1007/s00126-010-0309-4>
- TaleFazel, 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/10.1007/s11631-020-00405-7>
- Torab, F., 2008. Geochemistry and Metallogeny of Magnetite-Apatite Deposits of the Bafq Mining District, Central Iran. Ph.D. Thesis, Clausthal

- University of Technology, Lower Saxony. 144 pp.
- 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/10.1180/minmag.2007.071.3.347>
- Tornos, F., Hanchar, J.M., Steele-MacInnis, M., Crespo, E., Kamenetsky, V.S. and Casquet, C., 2024. Formation of magnetite-(apatite) systems by crystallizing ultrabasic iron-rich melts and slag separation. *Mineralium Deposita*, 59(1): 189–225. <https://doi.org/10.1007/s00126-023-01203-w>
- Whitney, D. and Evans, B., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wilde, A., 2013. Towards a model for albitite-type uranium. *Minerals*, 3(1): 36–48. <https://doi.org/10.3390/min3010036>
- Wilkinson, J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)
- 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: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), One hundredth anniversary volume, Society of Economic Geologists, pp. 371–405. <https://doi.org/10.5382/AV100.13>
- Williams, M.R., Holwell, D.A., Lilly, R.M., Case, G.N. and McDonald, I., 2015. Mineralogical and fluid characteristics of the fluorite-rich Monakoff and El Cu–Au deposits, Cloncurry region, Queensland, Australia: Implications for regional F–Ba-rich IOCG mineralisation. *Ore Geology Reviews*, 64: 103–127. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.021>
- Yaghubpour, A. and Mehrabi, B., 1997. Kushk Zinc-Lead deposit, a typical black-shale-hosted deposit in Yazd state, Iran. *Journal of Sciences Islamic Republic of Iran*, 8: 117–125. Retrieved December 8, 2025 from https://jsciences.ut.ac.ir/article_31425.html
- Ziapour, S., Esmaeily, 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/10.1016/j.oregeorev.2020.103924>