



RESEARCH ARTICLE

10.22067/econg.2024.1108



Physicochemical Evolution of Hydrothermal Fluids in the Kuh-e-Esfand porphyry Copper System, South of Jiroft, Kerman Province

Afsaneh Soltani¹ , Alireza Zarasvandi^{2*} , Nader Taghipour^{3*} , Mohsen Rezaei⁴ , Adel Saki⁵ , Morteza Sajjadiyan⁶ , Ghazal Zarasvandi⁷

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

² Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

³ Associate Professor, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

⁵ Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

⁶ Senior expert in mineral exploration research, center of research and technology of Golgohar mining and industrial company, Kerman, Iran

⁷ M.Sc. student, Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 03 April 2024

Revised: 02 July 2024

Accepted: 06 July 2024

Keywords

Fluid inclusions

Secondary boiling

Fluid mixing

Vein-veinlet

Kuh-e-Esfand

Urumieh-Dokhtar magmatic belt

*Corresponding authors

Alireza Zarasvandi

✉ Zarasvandi_a@scu.ac.ir

Nader Taghipour

✉ taghipour@du.ac.ir

ABSTRACT

The Kuh-e-Esfand copper deposit is located in the southernmost part of the Urmia-Dokhtar magmatic belt. The Oligocene-Miocene intrusive bodies, ranging from diorite to quartz diorite and granodiorite, are emplaced within the Eocene volcanic complex. Based on the classification of veins- veinlets, the main mineralization stage consists of quartz ± pyrite ± chalcopyrite associated with potassic alteration. Based on petrographic studies, fluid inclusions in quartz minerals are categorized into three main groups and seven subgroups: 1- Vapor-rich fluid inclusions comprising single-phase vapor inclusions (V), vapor-rich two-phase inclusions (VL), and vapor-rich inclusions with a opaque phase (VLS), 2- Liquid-rich fluid inclusions including liquid-rich two-phase inclusions (LV) and liquid-rich inclusions with a opaque phase (LVS) and 3- Saline fluid inclusions consisting of simple brine three-phase inclusions (LVH), and multi-phase brine inclusions (LVHS) containing solid phases of halite± hematite± anhydrite± sylvite± chalcopyrite. The multi-phase saline inclusions with high temperature and salinity (358-598°C and 42-70 wt.% NaCl equivalent) of magmatic origin are the primary fluid inclusions forming the deposit. The two-phase liquid-rich inclusions with lower temperature and salinity (290-490°C and 11-20 wt.% NaCl equivalent) of magmatic-meteoritic origin are related to the final stages of hydrothermal fluid circulation and mixing with lower salinity fluids. The temperature decrease due to secondary boiling and mixing of magmatic and meteoric fluids led to the instability of the chloride complex carrying copper and subsequent mineralization under favorable conditions.

How to cite this article

Soltani, A., Zarasvandi, A., Taghipour, N., Rezaei, M., Saki, A., Sajjadiyan, M. and Zarasvandi, G., 2024. Physicochemical Evolution of Hydrothermal Fluids in the Kuh-e-Esfand porphyry Copper System, South of Jiroft, Kerman Province. *Journal of Economic Geology*, 16(2): 163–206. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1108>



©2024 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

Porphyry deposits are the major global source of Cu, Mo, and Re, along with being noteworthy reservoirs of Au and Ag (Sillitoe, 2010; Arndt and Ganino, 2012; Crespo et al., 2020). Exploration techniques aimed at optimizing the discovering new deposits are evolving towards a deeper understanding of ore genesis. Fluid inclusion studies serve as an enhanced technique to delineate the nature of ore-forming fluids and the processes governing deposit formation (Wilkinson, 2001), alongside other key geological aspects such as tectonic setting, mineral alteration, vein structure, ore-forming zones, and metal transportation and concentration dynamics (Singer et al., 2002; Sillitoe, 2010; Zajacz et al., 2017). Extensive studies have examined the physicochemical conditions, origins, and evolution of hydrothermal fluids in porphyry deposits globally, including in Iran, through fluid inclusion studies. The Kuh-e-Esfand porphyry copper deposit is located in Kerman province, Iran, approximately 90 kilometers southeast of Jiroft. Currently, the deposit is under exploration, and drilling activities are underway to obtain precise information on the type, composition, quantity, and economic potential of mineral reserves for evaluation and extraction purposes. Since fluid inclusion studies contribute to understanding hydrothermal processes as mineralizing agents, in this study focuses on detailed fluid inclusion studies, including petrography and microthermometry, to understand the nature and evolution of ore-forming fluids, as well as the physicochemical processes influencing mineral precipitation in the Kooh-Esfand deposit.

Materials and methods

In this study, 15 surface samples and 48 drill core samples were utilized for detailed investigations, with BH2, BH3, and BH4 boreholes being drilled at depths of 506 m, 475 m, and 496 m respectively. BH2 and BH3 were drilled into the intrusive mass, while BH4 was drilled into the volcanic unit, encountering a quartz diorite intrusive mass at 340 m depth. Among the selected samples, 42 thin section samples and 11 polished thin sections were prepared and examined. Petrographic studies of fluid inclusions were conducted using optical microscopy, and samples were separated from the veins in

mineralogy and fluid laboratories. Temperature and salinity parameters of fluid inclusions in quartz minerals were measured at Pamukkale University in Denizli, Turkey, and part of it was conducted at Tarbiat Modares University in Tehran. In Pamukkale University's laboratory, fine grain size measurements were carried out using a Linkam THMSG 600 freeze-thaw stage equipped with an Olympus microscope. This stage was calibrated using H₂O-CO₂ fluid inclusions at temperatures of 1.1°C, 0.0°C, and -56.6°C. The upper and lower temperature thresholds for fine grain size measurements were 600°C and -120°C respectively. The heating rate was set at 1°C per minute for determining the homogenization temperature or ice melting temperature. At Tarbiat Modares University, temperature measurements on sections were conducted using a THMCG600 heating-cooling stage equipped with a Leitz microscope, with a temperature range of -196°C to +600°C. Calibration of the stage was performed using C₄H₃CH₃ at 95°C and KNO₃ at 335°C.

Result

The study area encompasses three distinct geological units: volcanic, volcanoclastic, and intrusive units. The intrusive unit range in composition from diorite to quartz-diorite and granodiorite. Various alteration zones, such as potassic alteration, quartz-sericite-feldspar alkaline ± chlorite alteration, phyllic alteration, argillic alteration, and propylitic alteration, have significantly influenced the lithological units in the study area. On the basis of vein classification, the early stage of mineralization predominantly is characterized by quartz ± chalcopyrite ± magnetite ± pyrite veins. The main mineralization stage is characterized by quartz + pyrite + chalcopyrite veins associated with potassic alteration and quartz-sericite-alkali feldspar-chlorite zone. Post mineralization stage is characterized by quartz-pyrite veins. Due to pressure variations from lithostatic to hydrostatic conditions, substantial copper mineralization likely occurred during the main mineralization stage, with comparatively lesser molybdenum mineralization observed in quartz-pyrite-chalcopyrite and quartz-pyrite-chalcopyrite-molybdenite veins. These mineralization stages, often accompanied by abundant vapor-rich and multi-phase fluid inclusions, initiated ore formation through fluid boiling processes.

Based on petrographic studies, fluid inclusions in

quartz minerals are categorized into three main groups and seven subgroups: 1- Vapor-rich fluid inclusions comprising single-phase vapor inclusions (V), vapor-rich two-phase inclusions (VL), and vapor-rich inclusions with a opaque phase (VLS) (including chalcopyrite, possibly magnetite, and unidentified opaque phases), 2- Liquid-rich fluid inclusions including liquid-rich two-phase inclusions (LV) and liquid-rich inclusions with a opaque phase (VLS) containing opaque minerals (such as chalcopyrite and unidentified opaque phases), and 3- Saline fluid inclusions consisting of simple brine three-phase inclusions (LVH) containing liquid+ vapor+ halite, and multi-phase brine inclusions (LVHS) containing vapor+ liquid+ halite± hematite± anhydrite± sylvite± chalcopyrite.

Discussion

The relationship between different types of fluid inclusions in the Kuh-Esfand deposit is established through detailed petrographic and micrometric investigations. In microthermometric studies, the relationship between different types of fluid inclusions, including liquid-rich, vapor-rich, three-phase, and multiphase inclusions, is investigated to examine the origin and evolution process of the hydrothermal fluid. This investigation is based on variations in homogenization temperature and salinity content. By analyzing variations in homogenization temperature and salinity, these investigations provide valuable insights into the processes governing fluid evolution in the Kuh- e- Esfand copper deposit.

On the basis of the microthermometric analyses, the observed changes in homogenization temperature and salinity indicate a systematic decrease from multiphase fluid inclusions to liquid-rich fluid inclusions. Interestingly, vapor-rich fluid inclusions exhibit homogenization temperatures comparable to the upper end of the temperature range observed in multiphase fluid inclusions.

Primary fluid inclusions of magmatic origin encompass vapor-rich inclusions characterized by elevated homogenization temperatures (330-600 °C) and diminished salinities (12-22 wt.% NaCl eq.), multisolid fluid inclusions exhibiting extended

temperature ranges (385-598 °C) and heightened salinities (42-70 wt.% NaCl eq.), and three-phase fluid inclusions demonstrating significant temperature variations (230-590 °C) alongside elevated salinities (35-65 wt.% NaCl eq.). The presence of multi-phase fluid inclusions is indicative of the initial hydrothermal fluids responsible for the formation of the Kuh-e-Esfand deposit. Conversely, fluid inclusions of magmatic-meteoric source encompass liquid-rich inclusions characterized by homogenization temperatures and reduced salinities (290-490 °C and 11-20 wt.% NaCl eq., respectively). This particular fluid inclusion type signifies the terminal phase of hydrothermal fluid circulation, characterized by interaction and dilution with lower salinity meteoric fluids. The depth of the Kuh-e-Esfand deposit ranges from 0.8 to 1.7 kilometers, with an average depth of 1.4 kilometers (equivalent to 1400 meters). This translates to pressures ranging from 215 to 603 bars on average, with an average hydrostatic pressure of 412 bars and a lithostatic pressure of 1112 bars.

In the Kuh-e-Esfand deposit, fluid inclusions exhibit a sequence of influential processes, including secondary boiling phenomena, fluid immiscibility, the interaction of magmatic fluids with meteoric waters, and isothermal mixing, throughout the hydrothermal fluid evolution. Vapor-rich fluid inclusions, characterized by the presence of opaque minerals (e.g., chalcopyrite), are infrequently observed in the Kuh-e-Esfand deposit, suggesting that the brine phase predominantly facilitates the transport of copper metal. Finally, the decrease in temperature due to secondary boiling and mixing of magmatic fluids with meteoric fluids has led to the destabilization of the chloride complex, the primary carrier of copper in the studied deposit, and its deposition under favorable conditions.

Acknowledgements

This article is part of a research project with contract number 4304/00 with the Golgozar company. We would like to express our gratitude and appreciation to Rahim Satouh Bahreini, the esteemed manager of this department, and his colleagues.



تکامل فیزیکوشیمیایی سیال گرمابی در سامانه مس پورفیری کوه اسفند، جنوب جیرفت، استان کرمان

افسانه سلطانی^۱، علیرضا زراسوندی^{۲*}، نادر تقی‌پور^{۳*}، محسن رضایی^۴، عادل ساکی^۵، مرتضی سجادیان^۶، غزال زراسوندی^۷

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

^۴ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۵ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۶ کارشناس ارشد تحقیقات اکتشاف، مرکز تحقیقات و فناوری شرکت معدنی و صنعتی گلگهر، کرمان، ایران

^۷ دانشجوی کارشناسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

کانسار مس کوه اسفند در جنوبی‌ترین بخش از کمربند ماگمایی ارومیه- دختر واقع شده است. توده‌های نفوذی با طیف دیوریت تا کوارتز دیوریت و گرانودیوریت الیگوسن- میوسن در مجموعه آتشفشانی ائوسن جای گرفته‌اند. بر اساس طبقه‌بندی رگه- رگچه‌ها، مرحله کانی‌سازی اصلی شامل کوارتز \pm پیریت \pm کالکوپیریت مرتبط با دگرسانی پتاسیک است. بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، میان‌بارهای سیال در کانی کوارتز در سه گروه اصلی و هفت گروه فرعی طبقه‌بندی می‌شوند: ۱- میان‌بارهای سیال غنی از گاز شامل: میان‌بارهای سیال تک‌فازی گازی (V)، میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از گاز ساده (VL) و میان‌بارهای سیال غنی از گاز همراه با فاز کدر (VLS)، ۲- میان‌بارهای سیال غنی از مایع شامل: میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع ساده (LV) و میان‌بارهای سیال غنی از مایع همراه با فاز کدر (LVS) و ۳- میان‌بارهای سیال شور شامل: میان‌بارهای سیال سه‌فازی شور ساده (LVH) و میان‌بارهای سیال شور چندفازی (LVHS) حاوی فاز جامد هالیت \pm هماتیت \pm انیدریت \pm سیلویت \pm کالکوپیریت. میان‌بارهای سیال شور چندفازی با دما و شوری بالا (۳۵۸ تا ۵۹۸ درجه سانتی‌گراد و ۴۲ تا ۷۰ درصد شوری معادل نمک طعام) با منشأ ماگمایی نخستین سیالات تشکیل‌دهنده کانسار و میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع با دما و شوری پایین (۲۹۰ تا ۴۹۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۱ تا ۲۰ درصد شوری معادل نمک طعام) با منشأ ماگمایی- جوی مرتبط با آخرین گردش سیال گرمابی و اختلاط با سیال با شوری پایین‌تر هستند. کاهش دما ناشی از وقوع فرایند جوشش ثانویه و اختلاط سیالات ماگمایی و جوی به ناپایداری کمپلکس کلریدی حامل فلز مس و کانی‌سازی در شرایط مساعد منجر شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶

واژه‌های کلیدی

میان‌بارهای سیال
جوشش ثانویه
اختلاط سیال
رگه- رگچه
کوه اسفند
کمربند ماگمایی ارومیه - دختر

نویسنده مسئول

علیرضا زراسوندی
✉ Zarasvandi_a@scu.ac.ir
نادر تقی‌پور
✉ taghipour@du.ac.ir

استناد به این مقاله

سلطانی، افسانه؛ زراسوندی، علیرضا؛ تقی‌پور، نادر؛ رضایی، محسن؛ ساکی، عادل؛ سجادیان، مرتضی و زراسوندی، غزال. ۱۴۰۳. تکامل فیزیکوشیمیایی سیال گرمابی در سامانه مس پورفیری کوه اسفند، جنوب جیرفت، استان کرمان. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۶(۲): ۱۶۳-۲۰۶. <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1108>

مقدمه

پورفیری و شناسایی زون‌های کانی‌ساز عیار بالا با بررسی سنگ‌نگاری و بررسی فشار، چگالی، دما و ترکیب انواع میان‌بارهای سیال از سطوح کم عمق تا سطوح عمیق‌تر (مانند کانسار مس-مولیدن پورفیری زالیو در منطقه کولاواسی شمال شیلی توسط آوالوس و آوالوس (Avalos and Avalos, 2023) و شناسایی پتانسیل و اکتشاف کانسارها بر مبنای نحوه توزیع و فراوانی انواع مختلف میان‌بارهای سیال و همچنین چگونگی تغییر دمای همگن‌شدگی و شوری میان‌بارهای سیال مانند کانسار دره حمزه توسط ناطقی و قربانی شادپی (Natghi and Ghorbani Shadpi, 2015) اشاره می‌کنند. کانسار مس پورفیری کوه اسفند با مختصات جغرافیایی ۲۸ درجه و ۱۸ دقیقه و ۲۸/۱ ثانیه عرض شمالی و ۵۸ درجه و ۳۳ دقیقه و ۲۷/۳۳ ثانیه طول شرقی، در ۹۰ کیلومتری جنوب شرق جیرفت در استان کرمان قرار دارد. در حال حاضر کانسار مورد بررسی در حال اکتشاف است و تحت فعالیت‌های حفاری قرار گرفته است تا اطلاعات دقیقی از نوع، ترکیب، مقدار و پتانسیل اقتصادی ذخایر معدنی به منظور بررسی و استخراج ماده معدنی به دست آید. از آنجایی که بررسی میان‌بار سیال به درک فرایندهای سیالات گرمایی به عنوان محرک‌های کانی‌ساز کمک می‌کند، در این پژوهش بررسی دقیق میان‌بارهای سیال شامل بررسی‌های سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی بر مبنای پی بردن به ماهیت و سیر تکامل سیال کانه‌ساز و نیز فرایند فیزیکوشیمیایی مؤثر در نهشت مواد معدنی سیال در کانسار کوه اسفند مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، بر اساس نوع سنگ و تغییرات سنگ‌شناختی و کانی‌شناختی کانسنگ، تعداد ۱۵ نمونه سطحی و ۴۸ نمونه مغزه حفاری برای مطالعات و بررسی‌های دقیق‌تر از سه گمانه حفاری BH2، گملمه BH3 و گملمه BH4 به ترتیب با اعماق ۵۰۶ متری، ۴۷۵ متری و ۴۹۶ متری استفاده شده است. گمانه BH2 و BH3 در توده نفوذی و گمانه BH4 در واحد آتشفشانی حفر شده که در عمق ۳۴۰ متری به

کانسارهای پورفیری منبع اصلی عناصر Cu، Mo و Re و همچنین منبع قابل توجهی از Au و Ag هستند (Sillitoe, 2010; Arndt and Ganino, 2012; Crespo et al., 2020). علاوه بر این، مقادیر قابل توجهی از عناصر مانند Ag، Re، Se، Te، As و Pd در برخی از کانسارهای مس پورفیری گزارش شده است (Singer et al., 2016; John and Taylor, 2008; al., 2008). با توجه به تئوری‌های میان‌بارهای سیال و ارتباط آنها با کانسارهای مس پورفیری توسط پژوهشگران (Van den Kerkhof and Hein, 2001; Goldstein, 2003) می‌توان گفت بررسی میان‌بارهای سیال به عنوان ابزاری مدرن در کنار سایر شواهد نظیر جایگاه زمین‌ساختی، دگرسانی، تناوب رگه‌ها، مناطق کانی‌سازی و پویایی فلزهای در انتقال و تمرکز (Singer et al., 2002; Sillitoe, 2010; Zajacz et al., 2017) برای تعیین ماهیت سیالات کانی‌ساز و فرایندهای تشکیل کانسار (Wilkinson, 2001) مؤثر واقع شده است. بررسی میان‌بارهای سیال در کانسارهای مس پورفیری، از طریق بررسی‌های ریزدماسنجی شرایط محیطی پیدایش این نوع از کانسارها را به دلیل حضور سیالات ماگمایی-گرمایی در طی تکامل آنها تأیید می‌کند (Roedder, 1972).

بررسی دقیق میان‌بارهای سیال می‌تواند اطلاعاتی مهم در رابطه با ویژگی‌های سیال کانه‌دار، سیر تکاملی آنها و نیز فرایند فیزیکوشیمیایی مؤثر در نهشت مواد معدنی سیال مانند پدیده‌های جوشش، اختلاط و جدایش فازی را شناسایی کرد (Ioannou et al., 2007). بررسی‌های گسترده‌ای به منظور بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی، منبع و تکامل سیالات گرمایی کانسارهای پورفیری در ایران و جهان با استفاده از بررسی میان‌بارهای سیال توسط زراسوندی (Zarasvandi et al., 2013; Zarasvandi et al., 2019) و همکاران، خسروی و همکاران (Khosravi et al., 2020)، رحمانی و قربانی (Rahmani and Ghorbani, 2023) و دیگر پژوهشگران انجام شده است. علاوه بر این، پژوهش‌های اخیر به کاربرد بررسی میان‌بارهای سیال در زمینه اکتشاف کانسارهای

McQuarrie et al., 2003; McQuarrie and van Hinsbergen, 2013). عطاپور و آفتابی (Atapour and Aftabi, 2021)، فعالیت‌های دوره‌ای ماگمایی در این بخش از کمان ماگمایی ارومیه-دختر را در ۵ مرحله توصیف می‌کنند. این ۵ مرحله شامل سنگ‌های آتشفشانی بحر آسمان (ریولیت و ریوداست)، رازک (بازالت و آندزیت) و هزار (آندزیت و ریولیت) به سن ائوسن، گرانیتوئیدهای نوع جبال بارز به سن الیگوسن-میوسن، داسیت پلتن به سن میوسن میانی-بالایی، گرانیتوئیدهای نوع کوه پنج به سن میوسن بالایی و گدازه‌های بازالتی آلکالن پتاسیم هم‌زمان تا پس از برخورد به سن پلیوسن - پلیستوسن هستند. از نظر ارتباط با کانی‌سازی، فاز دوم ماگمایی اغلب در زمان الیگو-میوسن رخ داده است و به صورت توده‌های گرانیتوئیدی عظیم در جنوب شرقی کمان سنوزوئیک کرمان تا غرب سنگ‌های آتشفشانی کوه مصحجم گسترش یافته و به عنوان گرانیتوئیدهای نوع جبال بارز معرفی شده است (Dimitrijevic, 1973). داده‌های سن‌سنجی گرانیتوئیدهای جبال بارز به روش Rb-Sr سن ۱۶-۱۸/۹ Ma (Hassanzadeh, 1993; Conrad et al., 1977) و به روش U-Pb زیرکن ۱۵/۴۸ ± ۰/۷۱ Ma (Rasoli et al., 2017) متعلق به میوسن پایینی است. به این ترتیب استقرار گرانیتوئیدهای نوع جبال بارز به احتمال زیاد در میوسن رخ داده است (Dimitrijevic, 1973)، اگرچه تعداد کمی از گرانیتوئیدها ممکن است به سن ۲۸/۱ Ma باشند (Shafiei et al., 2009). فاز دوم ماگمایی مرتبط با توده‌های گرانیتوئیدی جوان کوه پنج در بخش شمال‌غربی کمان سنوزوئیک کرمان است. ماهیت آداکیتی گرانیتوئیدهای کوه پنج (بررسی موردی سرچشمه) می‌تواند ناشی از ذوب‌بخشی و متاسوماتیسم پوسته اقیانوسی و گوه گوشته باشد که با شکست لبه پوسته اقیانوسی در گوشته دما بالا در قسمت میانی کمربند ماگمایی کرمان همراه است (Maanijou et al., 2022). معانی جو و همکاران (Maanijou et al., 2020) متاسوماتیسم شدید منبع گوشته‌ای با میزان پایین ذوب‌بخشی محل منشأ و آلودگی ماگما با مواد پوسته‌ای و همچنین ماگماهای کالک‌آلکالن حاصل از میزان زیاد ذوب‌بخشی و یا ذوب‌بخشی پوسته اقیانوسی نتوتیس را عامل غنی‌شدگی گرانیتوئیدهای سرچشمه در یک پهنه فرورانشی حاصل از کمان ماگمایی می‌دانند.

توده نفوذی کوارتز دیوریت برخورد داشته است. از نمونه‌های انتخاب‌شده، تعداد ۴۲ مقطع نازک-صیقلی و ۱۱ نمونه دوبر صیقلی تهیه و بررسی شد. برای میان‌بارهای سیال، پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری میان‌بارهای سیال به وسیله میکروسکوپ نوری و جداسازی نمونه از لام‌ها در آزمایشگاه ذخایر معدنی و سیالات درگیر، اندازه‌گیری مؤلفه‌های دما و شوری میان‌بارهای سیال در کانی‌کوارتز در دانشگاه پاموک کاله شهر دنیزلی کشور ترکیه و بخشی از آن در دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام شد. در آزمایشگاه پاموک کاله اندازه‌گیری ریزدماسنجی با استیج انجماد-گرمایش THMSG 600 ساخت شرکت لینکام مجهز به میکروسکوپ الیمپوس انجام شد. این صفحه در دمای ۱/۳۷۴+ درجه سانتی‌گراد، ۰/۰ درجه سانتی‌گراد و ۵۶/۶- درجه سانتی‌گراد با استفاده از میان‌بارهای سیال H₂O-CO₂ کالیبره شد. برای اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی، آستانه دمای بالا و پایین به ترتیب ۶۰۰ و ۱۲۰- درجه سانتی‌گراد بود. میزان گرمایش زمان تعیین دمای همگن‌شدگی و یا دمای ذوب یخ ۱ درجه سانتی‌گراد در دقیقه بود. در آزمایشگاه تربیت مدرس تهران، اندازه‌گیری مؤلفه‌های دمایی بر روی مقاطع با استفاده از صفحه گرمایش-انجماد مدل THMCG600 ساخت شرکت لینکام مجهز به میکروسکوپ لیتز انجام شد. دامنه حرارتی دستگاه ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است. کالیبره شدن صفحه با استفاده از C₄H₃CH₃ در دمای ۹۵- درجه سانتی‌گراد و KNO₃ در دمای ۳۳۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد.

زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی

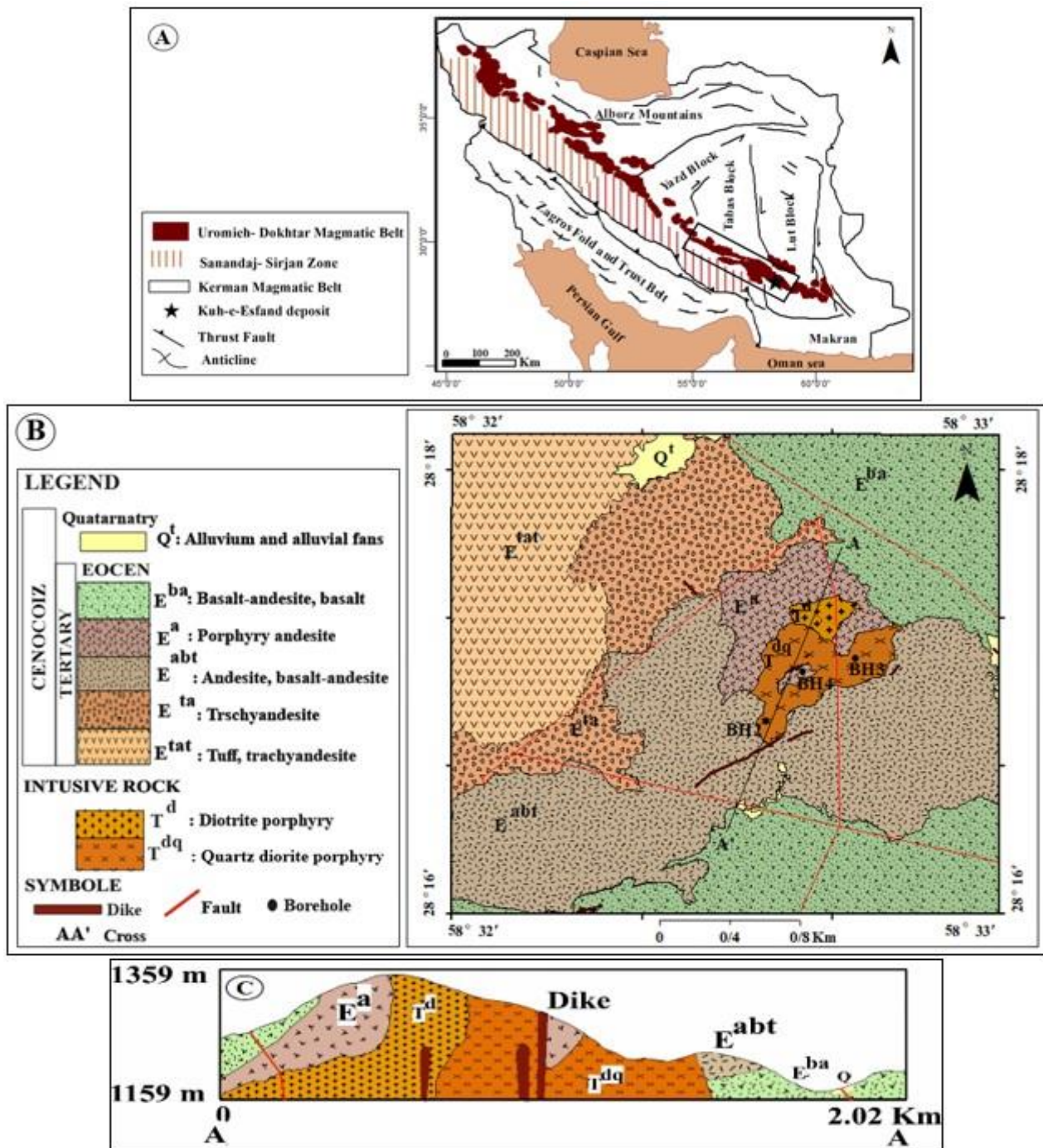
کانسار مس پورفیری کوه اسفند در بخش جنوبی کمان ماگمایی ارومیه دختر واقع شده (شکل ۱- A) و بخشی از سامانه پورفیری متالورژی تیس (Shafiei et al., 2009; Aftabi and Atapour, 2009; Wang et al., 2020; Aghazadeh, 2015; Atapour, 2017) ناشی از هم‌گرایی صفحه آفریقایی-عربی ایران مرکزی (کوه‌زایی زاگرس) در الیگوسن پسین-میوسن پسین می‌است (Hassanzadeh, 1993;)

توده‌های نفوذی، گرانودیوریت‌های جبال بارز را تشکیل می‌دهند. در منطقه معدنی کوه اسفند دایک‌های با ترکیب دیوریتی تا کوارتز دیوریتی با روند کلی شمال شرقی - جنوب غربی و روند شمالی - جنوبی سنگ‌های آتشفشانی و توده نفوذی دیوریت تا کوارتز دیوریتی را قطع کرده‌اند. دایک‌ها بیشتر در بخش‌های مرکزی - شرقی منطقه رخنمون دارند و طول آنها تا ۸۰ متر و ضخامت آنها از ۱ تا ۳ متر متغیر است (شکل ۲- C).

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، پلاژیو کلاز از جمله فراوان‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده سنگ‌های آندزیتی است. در برخی موارد بیوتیت و آمفیبول به شدت دگرسان شده و به مجموعه‌ای از کانی‌های ثانویه نظیر اکسید آهن، کلسیت، کلریت و اپیدوت تبدیل شده‌اند (شکل ۳- A). کانی‌های اصلی توده نفوذی دیوریت شامل پلاژیو کلاز (۴۵ تا ۶۰ درصد حجمی)، آمفیبول (۱۰ تا ۲۰ درصد حجمی)، بیوتیت (۲۰ تا ۳۰ درصد حجمی)، آلکالی فلدسپار، پیروکسن و کوارتز با مقدار کم به ایجاد بافت گرانولار منجر می‌شوند. علاوه بر این، آمفیبول کانی فرومنیزین دیگری است که از نوع سبز و قهوه‌ای بوده و در برخی موارد به کانی‌های دیگر از جمله کلریت و اکسیدهای آهن دگرسان شده‌اند (شکل ۳- B). در بررسی‌های میکروسکوپی کوارتز دیوریت بافت پورفیری متشکل از کانی‌های اصلی پلاژیو کلاز (بین ۲۵ تا ۵ درصد)، فلدسپار آلکالن (۱۰ درصد)، کوارتز (۲۰ تا ۲۵ درصد)، هورنبلند (تا ۱۰ درصد)، بیوتیت (تا ۲۰ درصد) و به مقدار کمتر پیروکسن تشکیل شده است (شکل ۳- C, D, E). بیوتیت به سه شکل بلورهای متوسط تا درشت اولیه (مستطیلی شکل)، تعادل مجدد یافته (فلس مانند) و ثانویه (دانه‌های پراکنده در زمینه سنگ) یافت می‌شود (شکل ۳- D). از کانی‌های فرعی می‌توان به کلریت، کلسیت، انیدریت، مسکویت و همچنین سیرسیت حاصل از دگرسانی کانی‌های فرومنیزین (بیوتیت و آمفیبول)، پلاژیو کلازها و آلکالی فلدسپارها اشاره کرد (شکل ۳- E). از مهم‌ترین کانی‌های واحد گرانودیوریت می‌توان به درشت بلورهای فلدسپار پتاسیم، کوارتز، پلاژیو کلاز، هورنبلند و بیوتیت اشاره کرد که به تشکیل بافت گرانولار منجر شده است (شکل ۳- F).

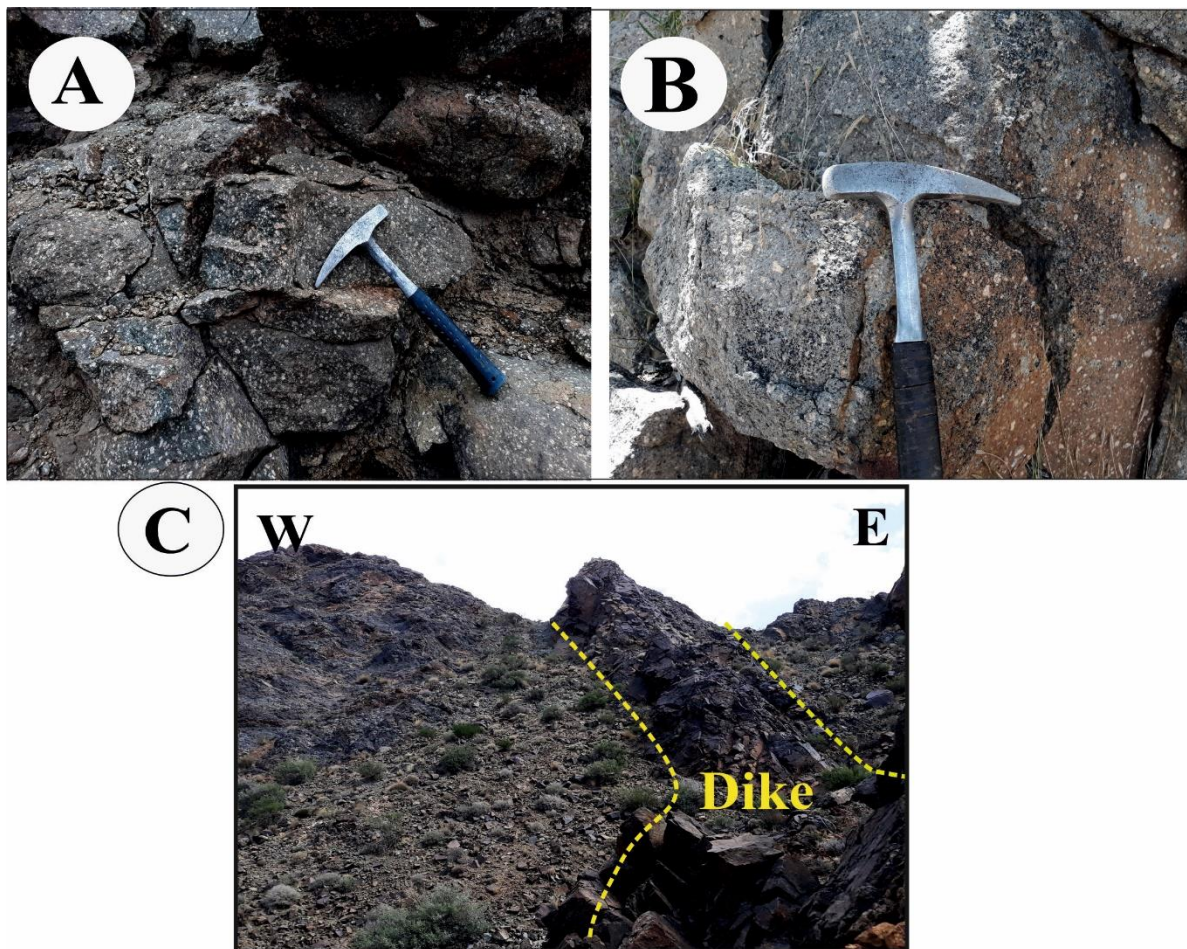
ساختار تکتوماگمایی منطقه آتشفشان‌های ائوسن (ولکانیکی رازک میانی - بالایی (بازالت و آندزیت) و گرانیتوئیدهای الیگوسن - میوسن نوع جبال بارز را متحمل شده است. در محدوده مورد بررسی، مجموعه آتشفشانی رازک میانی - بالایی قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه را با طیف ترکیبی آندزیت پورفیری، آندزیت - بازالت در بر می‌گیرند. توده‌های نفوذی با ترکیب دیوریت و کوارتز دیوریت در قسمت مرکزی منطقه و توده گرانیت تا گرانودیوریت در بخش شمالی منطقه مورد بررسی در بین واحدهای آتشفشانی و آذر آواری ائوسن نفوذ کرده است (شکل ۱- B و C).

بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، سه مجموعه آتشفشانی، آذر آواری و توده نفوذی واحدهای سنگی دربرگیرنده منطقه مورد بررسی محسوب می‌شوند. در این میان، واحدهای آتشفشانی آندزیت، آندزیت - بازالت و بازالت (E^a , E^{bt} and E^{abt}) بزرگ‌ترین واحدهای دربرگیرنده منطقه هستند. سنگ‌های آندزیتی با بافت پورفیری دارای طیف متنوعی از رنگ‌های خاکستری روشن متمایل به قهوه‌ای، سرخ و سبز در سطح هوازده و در سطح تازه خاکستری تیره (شکل ۲- A) و در برخی نقاط به دلیل آغشتگی اکسیدهای آهن به رنگ قرمز مشاهده می‌شود. نمونه‌های برداشت شده از گمانه BH4 از سطح تا عمق ۴۰۰ متری با ترکیب آندزیت تا تراکی آندزیتی و از عمق ۴۰۰ متری به بعد ترکیب به سمت کوارتز دیوریت تغییر می‌یابد. توده‌های نفوذی نیمه عمیق حدواسط در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن نفوذ کرده‌اند و از این رو سن نسبی آنها پس از واحدهای آتشفشانی در نظر گرفته شده است. توده‌های نفوذی با طیف دیوریت (Td) تا کوارتز دیوریت (Tqd) و گرانودیوریت متغیرند و اغلب با بافت گرانولار و پورفیری درشت دانه مشاهده می‌شوند. گسترده‌ترین واحد نفوذی در منطقه کوه اسفند توده نفوذی با ترکیب کوارتز دیوریت با رنگ ظاهری خاکستری روشن با بافت دانه‌ای متوسط تا درشت بلور و پورفیری است (شکل ۲- B). دیوریت در مشاهدات صحرایی و نمونه دستی به رنگ خاکستری با بافت دانه‌ای دیده می‌شوند و به شدت تحت تأثیر دگرسانی قرار گرفته‌اند. توده نفوذی گرانودیوریتی با رنگ ظاهری خاکستری روشن و فلدسپارهای پتاسیم صورتی رنگ و با بافت گرانولار رخنمون دارند و در فاصله قابل توجهی نسبت به دیگر



شکل ۱. A: نقشه زمین‌شناسی ساختاری ایران و موقعیت کانسار کوه اسفند، B: نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه کوه اسفند، جنوب جیرفت (اصلاح شده نقشه اقتباس شده از گزارش کوشا معدن (Taghipour et al., 2020) و C: مقطع عرضی زمین‌شناسی در امتداد AA' واقع در نقشه زمین‌شناسی منطقه کوه اسفند (B)

Fig. 1. A: The structural geology map of Iran and the location of the Kuh-e-Esfand deposit, B: Simplified geological map of the Kuh-e-Esfand region, south of Jiroft (modified map excerpted from the comprehensive mining report (Taghipour et al., 2020), and C: A geological cross-section along AA' located on the geological map of Kuh-e-Esfand region (B)



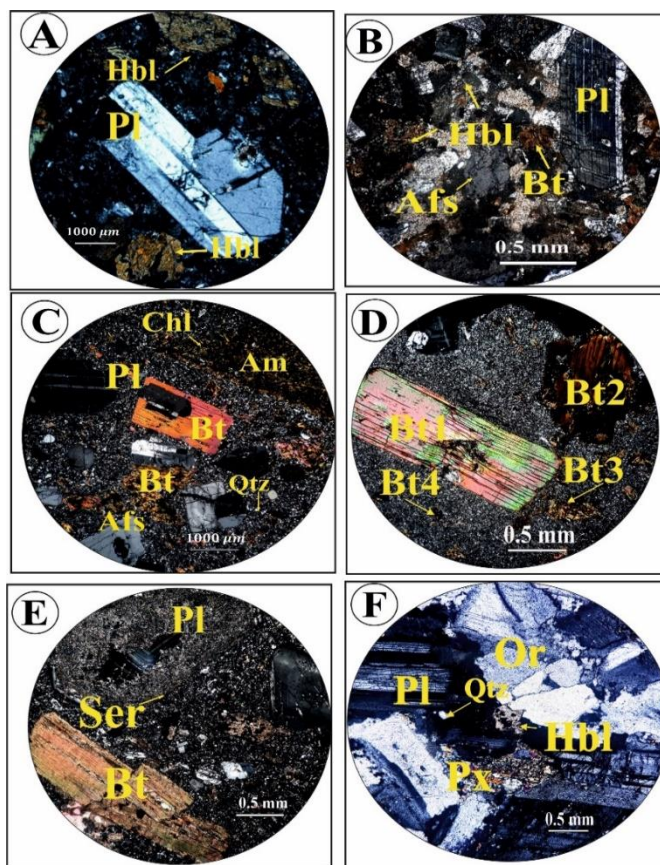
شکل ۲. تصویرهای صحرایی واحدهای سنگی کانسار کوه اسفند. A: نمایی از واحد آندزیت پورفیری، B: نمایی از توده نفوذی کوارتز دیوریت پورفیری و C: نمایی از دایک قطع کننده توده نفوذی دیوریت پورفیری

Fig. 2. field photograph of lithological units in the Kuh-e-Esfand deposit: A: an outcrop of andesite porphyry unit, B: showcases of intrusive quartz diorite porphyry, and C: an exposure of a cross-cutting dike in the intrusive diorite porphyry

صورت کمتر در واحد آتشفشانی با مجموعه کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، آلکالن فلدسپار، کانی‌های فرومنیزین از جمله بیوتیت، هورنبلند، سریسیت و کلریت مشخص می‌شوند. کانی‌های سولفیدی غالب در این مجموعه پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت هستند. بیوتیت به صورت ماگمایی و گرمابی دیده می‌شود (شکل ۳-D و E) و گاهی جاننشین پلاژیوکلاز و هورنبلندها شده است (شکل ۵-C).

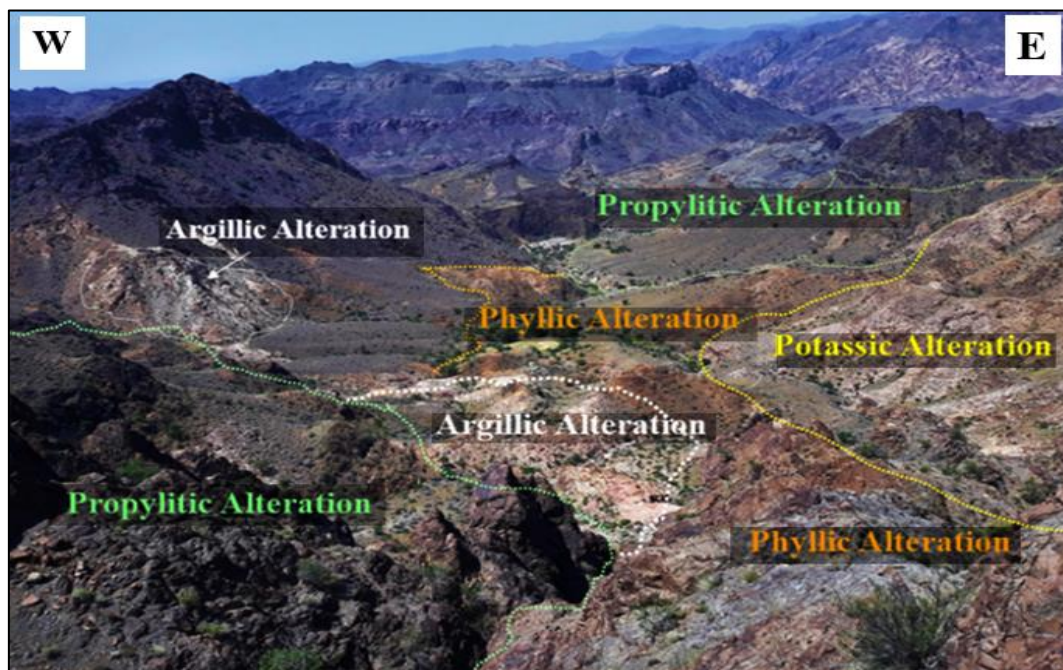
دگرسانی و کانی‌زایی

دگرسانی‌ها در توالی آتشفشانی و آذرآواری و همچنین توده نفوذی از گسترش قابل توجهی برخوردار است (شکل ۴). مجموعه دگرسانی‌ها در مناطق مورد بررسی عبارتند از: ۱- دگرسانی پتاسیک، ۲- دگرسانی کوارتز-سریسیت-آلکالن فلدسپار \pm کلریت، ۳- دگرسانی فلیک (شکل ۵-A)، ۴- دگرسانی آرژیلیک و ۵- دگرسانی پروپلیتیک (شکل ۵-B). دگرسانی پتاسیک با گسترش قابل توجه در توده نفوذی و به



شکل ۳. تصاویرهای میکروسکوپی واحدهای سنگی کانسار کوه اسفند. A: تصویر میکروسکوپی بافت پورفیری واحد آندزیت پورفیری با حضور درشت بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند قهوه‌ای رنگ، B: تصویر میکروسکوپی دیوریت با بافت گرانولار متشکل از کانی‌های پلاژیوکلاز منطقه‌بندی شده، بیوتیت و آلکالی فلدسپارها و هورنبلند، C: تصویر میکروسکوپی کوارتز دیوریت با بافت پورفیری متشکل از دانه‌های درشت بیوتیت مستطیلی شکل ماگمایی و بیوتیت تعادل مجدد یافته فلس مانند، پلاژیوکلاز با بافت منطقه‌بندی و آمفیبول کلریتی شده به همراه آلکالی فلدسپار در زمینه دانه ریز کوارتز دیوریت، D: حضور بیوتیت مستطیل شکل ماگمایی (Bt1)، بیوتیت اکسید شده (Bt2)، بیوتیت تعادل مجدد یافته فلس مانند قهوه‌ای (Bt3) و دانه‌های پراکنده بیوتیت ثانویه در زمینه کوارتز دیوریت، E: حضور بیوتیت مستطیلی شکل ماگمایی به همراه پلاژیوکلاز دگرسان شده به سریسیت در کوارتز دیوریت و F: بافت گرانولار متشکل از پلاژیوکلاز، کوارتز، هورنبلند، پیروکسن و ارتوکلاز در واحد گرانودیوریت. علائم اختصاری از سیوولا و اشמיד (Siivola and Schmid, 2007) اقتباس شده است (Am: آمفیبول، Afs: آلکالی فلدسپار، Bt: بیوتیت، Chl: کلریت، Hbl: هورنبلند، Or: ارتوکلاز، Pl: پلاژیوکلاز، Px: پیروکسن، Qtz: کوارتز و Ser: سریسیت).

Fig. 3. Microphotographs of lithological units in the Kuh-e-Esfand deposit. A: Microphotograph of the porphyritic texture of an andesite unit, showcasing phenocrysts of plagioclase and coffee-colored hornblende, B: Microphotograph of diorite unit with a granular texture composed of zoned plagioclase, biotite, alkali feldspars, and hornblende, C: Microphotograph of quartz diorite with a porphyritic texture consisting of coarse rectangular-shaped magmatic biotite grains and re-equilibrated flaky-like biotite, zoned plagioclase, chloritized amphibole along with alkali feldspar in the fine-grained quartz diorite background, D: Presence of magmatic rectangular-shaped biotite (Bt1), oxidized biotite (Bt2), re-equilibrated phyllitic-like coffee-colored biotite (Bt3), and scattered secondary biotite grains in the background of quartz diorite, E: Presence of magmatic rectangular-shaped biotite along with sericitic plagioclase in the quartz diorite, and F: Granular texture composed of plagioclase, quartz, hornblende, pyroxene, and orthoclase in the granodiorite unit. Abbreviations after Siivola and Schmid (2007) (Afs: Alkalifeldspar, Am: Amphibole, Bt: Biotite, Chl: Chlorite, Or: Orthoclase, Pl: Plagioclase, Px: Pyroxene, Qtz: Quartz, and Ser: Sericite, Hbl: Hornblende).



شکل ۴. تصویر صحرایی از دگرسانی‌های گرمایی کانسار کوه اسفند

Fig. 4. Field photograph of hydrothermal alterations of kuh-e-Esfand deposit

جمله اپیدوت، کلریت، کوارتز و کربنات شناسایی می‌شوند. این دگرسانی به رنگ سبز در واحدهای دیوریت و کوارتز دیوریت مشاهده می‌شود (شکل ۵-B). در واقع پلاژیو کلازها به کلریت، کلسیت و اپیدوت تبدیل شده‌اند.

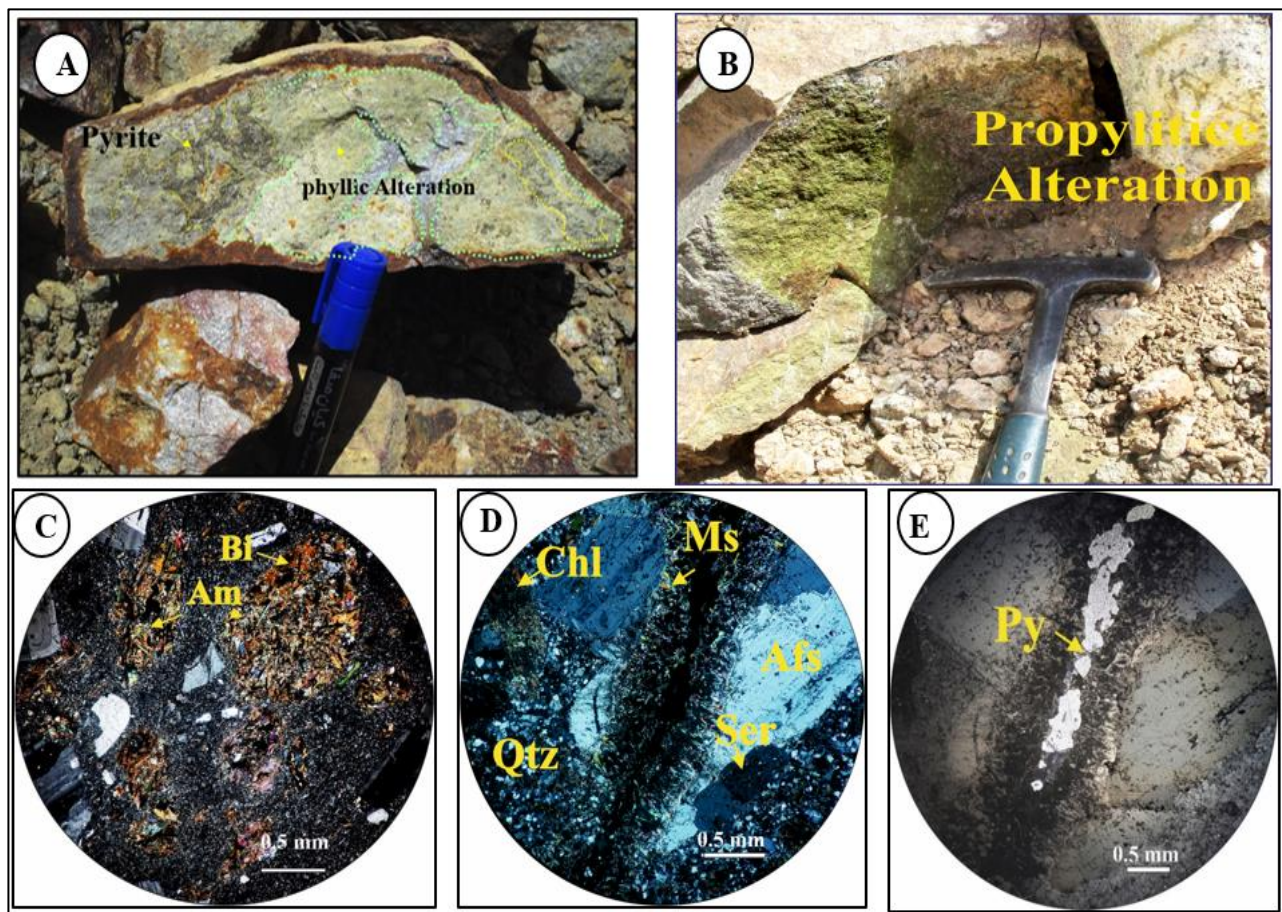
بر اساس بررسی‌های صحرایی، میکروسکوپی ارتباط زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی در کانسار کوه اسفند بر مبنای سه گمانه BH2، BH3 و BH4 حفاری شده در توده نفوذی کوارتز دیوریت و آندزیت به صورت مقطع عرضی نشان داده شده است (شکل ۶).

بر اساس بررسی نمونه‌های سطحی و مغزه‌های حفاری میزبان کانی‌سازی مس پورفیری کوه اسفند به طور عمده نفوذی‌های پورفیری کوارتز دیوریت هستند. کانی‌سازی به طور غالب به صورت رگه - رگچه‌ای یا استوک ورک، افشان و یا پتچ‌های نامنظم یافت می‌شوند (شکل ۷-A و B). علاوه بر این، رخداد بافت برشی همراه با حضور اکسیدهای آهن و در برخی موارد همراه با کانی‌زایی در مرکز کانسار مورد بررسی مشاهده می‌شود (شکل ۷-۷).

در اعماق بیشتر از ۴۵۰ متری گمانه‌ها در اعماق دگرسانی پتاسیک با تغییر روند دگرسانی به مجموعه دگرسانی با حضور کانی‌های کوارتز - سریسیت - فلدسپار آلکالن \pm کلریت مواجه می‌شویم. کانی‌های فلزی پیریت و مگنتیت با بیشترین میزان و به مقدار خیلی کمتر کالکوپیریت همراه با این نوع از دگرسانی یافت می‌شوند. دگرسانی فلیک در منطقه مورد بررسی انواع دگرسانی قبلی را پوشش می‌دهد؛ به طوری که در زون دگرسانی پتاسیک به جانشینی آلکالن فلدسپار و یا بیوتیت توسط کوارتز - سریسیت تا سریسیت - کوارتز - کربنات منجر می‌شود. علاوه بر این، کانی مسکویت، کلریت از دیگر کانی‌های قابل مشاهده در این نوع دگرسانی نیز هستند (شکل ۵-D). کانی فلزی شاخص این نوع از دگرسانی پیریت است (شکل ۵-E). در مرز دگرسانی فلیک و پتاسیک بیشترین زون کانه‌زایی رخ داده است. دگرسانی پروپلیتیک در منطقه مورد بررسی به طور گسترده رخ داده است و گاهی توسط دگرسانی فلیک و آرژیلیک پوشانده می‌شود و توسط کانی‌هایی از

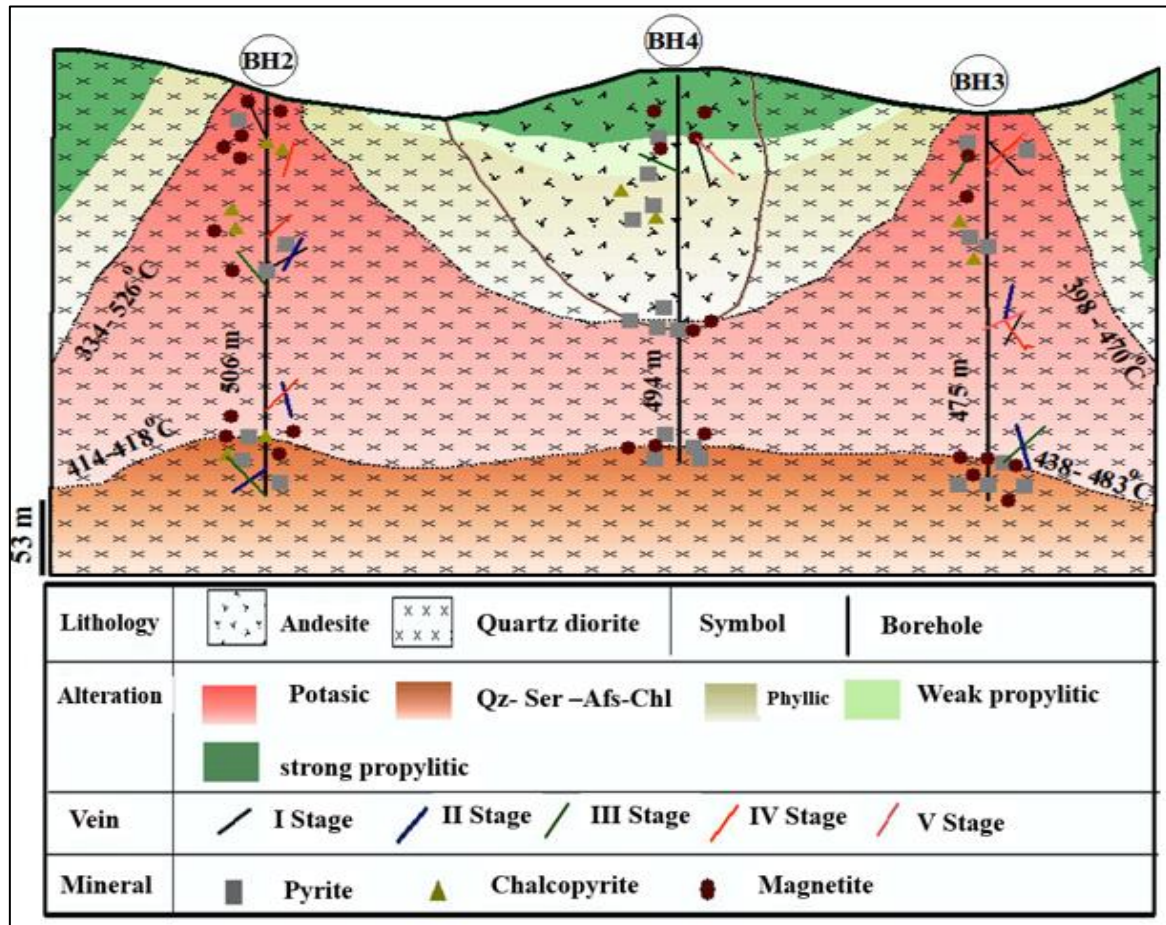
کانی‌های غیرفلزی کوارتز، سریسیت، کلریت، بیوتیت، اپیدوت، مسکویت، انیدریت، فلدسپات و کلسیت غالب هستند.

(C). کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت، کولیت و مقدار بسیار پایین مولیبدنیت که در رگه‌ها و در متن سنگ مشاهده می‌شوند. از



شکل ۵. تصویرهای صحرایی و میکروسکوپی دگرسانی‌های دربرگیرنده کانسار کوه اسفند. A: تصویر صحرایی از دگرسانی فیلیک توده نفوذی، B: تصویر صحرایی از دگرسانی پروپیلیک توده نفوذی، C: تصویر میکروسکوپی تبدیل آمفیبول به بیوتیت در طی دگرسانی پتاسیک در واحد کوارتزدیوریت، D و E: تصویر میکروسکوپی نشان‌دهنده دگرسانی فیلیک با حضور کانی کوارتز، سریسیت، مسکویت، کلریت، آلکالی فلدسپارهای سرسیتی شده و کانی فلزی پیریت در رگه واحد کوارتزدیوریت. علائم اختصاری از سیوولا و اشמיד (Siivola and Schmid, 2007) اقتباس شده است (Am: آمفیبول، Bt: بیوتیت، Chl: کلریت، Qtz: کوارتز، Py: پیریت، Ms: مسکویت، Afs: آلکالی فلدسپات و Ser: سریسیت).

Fig. 5. Field and microphotographs depicting the encompassing alterations in the Kuh-e-Esfand deposit. A: Field photograph illustrating phyllic alteration within the intrusive mass, B: Field photograph displaying propylitic alteration in the intrusive mass, C: Microphotograph revealing the transformation of amphibole to biotite during the potassic alteration event within the quartz diorite unit, D and E: Microphotographs indicating phyllic alteration with the presence of minerals such as quartz, sericite, chlorite, muscovite, sericitized alkali feldspars, and pyrite mineralization within the quartz diorite unit vein. Abbreviations after Siivola and Schmid (2007) (Am: Amphibole, Bt: Biotite, Chl: Chlorite, Qtz: Quartz, Py: Pyrite, Ms: Muscovite, Afs: Alkalifeldspar Ser: Sericite).



شکل ۶. تصویر مقطع عرضی و موقعیت گمانه‌های BH2، BH3، BH4 کانسار کوه اسفند و ارتباط زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی بر اساس اطلاعات گمانه‌های حفر شده در واحد کوارتز دیوریت و آندزیت

Fig. 6. Cross-sectional photograph and location of drill holes BH2, BH3, and BH4 in the Kuh-e-Esfand deposit and the geological, alteration, and mineralization relationships based on the information from the drilled holes in the quartz diorite and andesite units

ضخیم چند سانتی‌متر و گاهی به صورت متقاطع مشاهده می‌شوند (شکل ۸- A).

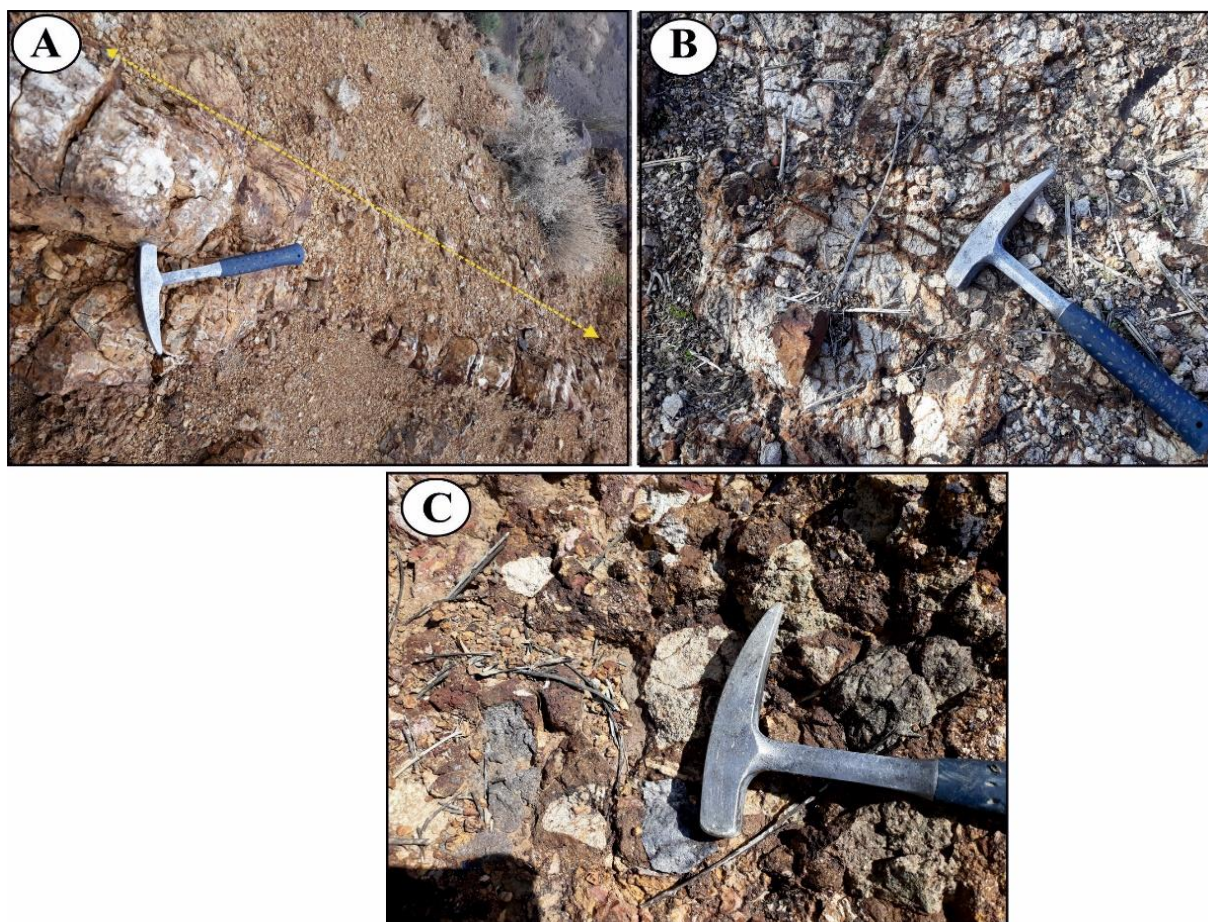
مرحله اولیه کانی‌سازی (نوع M): به طور عمده در واحد دیوریت و کوارتز دیوریت در غالب ۵ رگه کانه‌دار شکل گرفته که عبارتند از: ۱- رگه کوارتز+ بیوتیت ± مگنتیت، ۲- رگه مگنتیت ± کالکوپیریت: رگه نسبتاً باریک از مگنتیت و کالکوپیریت در اعماق ۵۰۰ متری که توسط رگه‌های ضخیم کوارتز- کالکوپیریت- پیریت- مگنتیت قطع شده‌اند. این رگه‌ها به میزان کم و همراه با

طبقه‌بندی رگه‌ها

رگه‌های کانی‌سازی در کانسار مس کوه اسفند بر اساس طبقه‌بندی رگه‌ها در سامانه‌های پورفیری (Sillitoe, 2010)، در ۵ مرحله در انواع رگه‌های A، M، B، C، D و L طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۸). **مرحله پیش از کانی‌سازی (نوع A):** دو نوع از رگه‌ها در واحد سنگی کوارتز دیوریت با ترکیب رگه کوارتز و کوارتز- انیدریت بدون کانه‌زایی طی مرحله اولیه تشکیل می‌شوند. این رگه‌ها اغلب با ضخامت متغیر از رگه‌های نسبتاً باریک میلی‌متری تا رگه‌های نسبتاً

کوارتز \pm انیدریت \pm آلکالن فلدسپار \pm پیریت \pm بیوتیت \pm مگنتیت \pm کالکوپیریت: این رگه با ضخامت نسبتاً باریکی در حدود کمتر از ۱ میلی متری در طول رگه تغییرات کانی شناسی قابل توجهی برخوردار هستند. سرسیتی شدن در امتداد این رگه رخ داده است. ۶- رگه کوارتز + کالکوپیریت + مگنتیت + پیریت \pm انیدریت: این رگه با ضخامت ۰/۵ تا ۵ میلی متری با حضور کالکوپیریت و پیریت به طور پراکنده در طول رگه و مگنتیت در امتداد رگه تمرکز دارند و با مقدار پایینی انیدریت همراه هستند.

دگرسانی پتاسیک ایجاد می‌شوند. ۳- رگه کوارتز \pm کالکوپیریت \pm مگنتیت: این رگه‌ها با ضخامت کمتر از ۲ میلی متر تا ۵ میلی متر در مقاطع میکروسکوپی و نمونه مغزه حفاری و گاهی همراه با پیریت دیده می‌شوند. کانه‌زایی اغلب در بخش مرکزی رگه و محل تقاطع رگه‌ها به مقدار زیاد رخ داده است (شکل ۸- A). ۴- رگه کوارتز \pm پیریت \pm کالکوپیریت \pm مگنتیت: این رگه‌ها با ضخامت کمتر از ۵ میلی متری و گاهی به صورت متقاطع در مقاطع میکروسکوپی و نمونه دستی دیده می‌شوند (شکل ۸- B). ۵- رگه



شکل ۷. تصویر صحرایی از انواع کانه‌زایی در کانسار کوه اسفند. A: تصویر صحرایی رگه سیلیسی با طول ۲ متر و ضخامت نیم متر، B: رخداد کانه‌زایی به صورت رگه - رگچه‌ای یا استوک ورک و C: رخداد بافت برشی با زمینه اکسیدهای آهن در مرکز کانسار

Fig. 7. Field photograph of different types of mineralization in the Kuh-e-Esfand. A: Image showing a 2-meter long and half-meter thick siliceous vein, B: Field photograph of mineralization occurring as vein-veinlet or stockwork, and C: Field photograph of the occurrence of a breccia texture with a background of iron oxides in the center of the ore deposit

۸- E)، رگه‌های نسل بعد از مرحله کانی‌سازی اصلی محسوب می‌شوند.

مرحله تأخیری (نوع L): در مرحله پایانی فعالیت‌های گرمایی جوان‌ترین نسل از رگه-رگچه‌ها رگه‌های کلسیتی با ضخامت ۲ تا ۳ سانتی‌متری بدون کانه‌زایی سولفیدی قطع‌کننده رگه‌های کانه‌زا هستند (شکل ۸- G).

سنگ‌نگاری میان‌بارهای سیال

از نظر منشأ توزیع میان‌بارهای سیال مورد بررسی به صورت اولیه (با پراکندگی تصادفی، منفرد و گاهی گروهی و هم‌مرکز)، ثانویه (با روند خطی ساده، متقاطع و گاهی در امتداد دو کانی مجاور) و ثانویه کاذب (با روند خطی ساده، موازی و متقاطع) قابل مشاهده هستند (شکل ۹- A، B و C).

با بررسی سنگ‌نگاری میان‌بارهای سیال در کانی کوارتز و بر اساس تقسیم‌بندی الریش و همکاران (Ulrich et al., 2001)، میان‌بارهای سیال بر اساس تعداد و فازهای درونی در قالب سه گروه اصلی و هشت گروه فرعی تقسیم‌بندی شده‌اند (شکل ۱۰).

۱) میان‌بارهای سیال غنی از گاز شامل: میان‌بارهای سیال تک‌فازی گاز (V)، میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از گاز ساده (V+L) و میان‌بارهای سیال غنی از گاز همراه با فاز کدر (V+L+S) حاوی مایع + گاز ± کانی کدر (کالکوپیریت، احتمالاً مگنتیت و فازهای کدر ناشناخته).

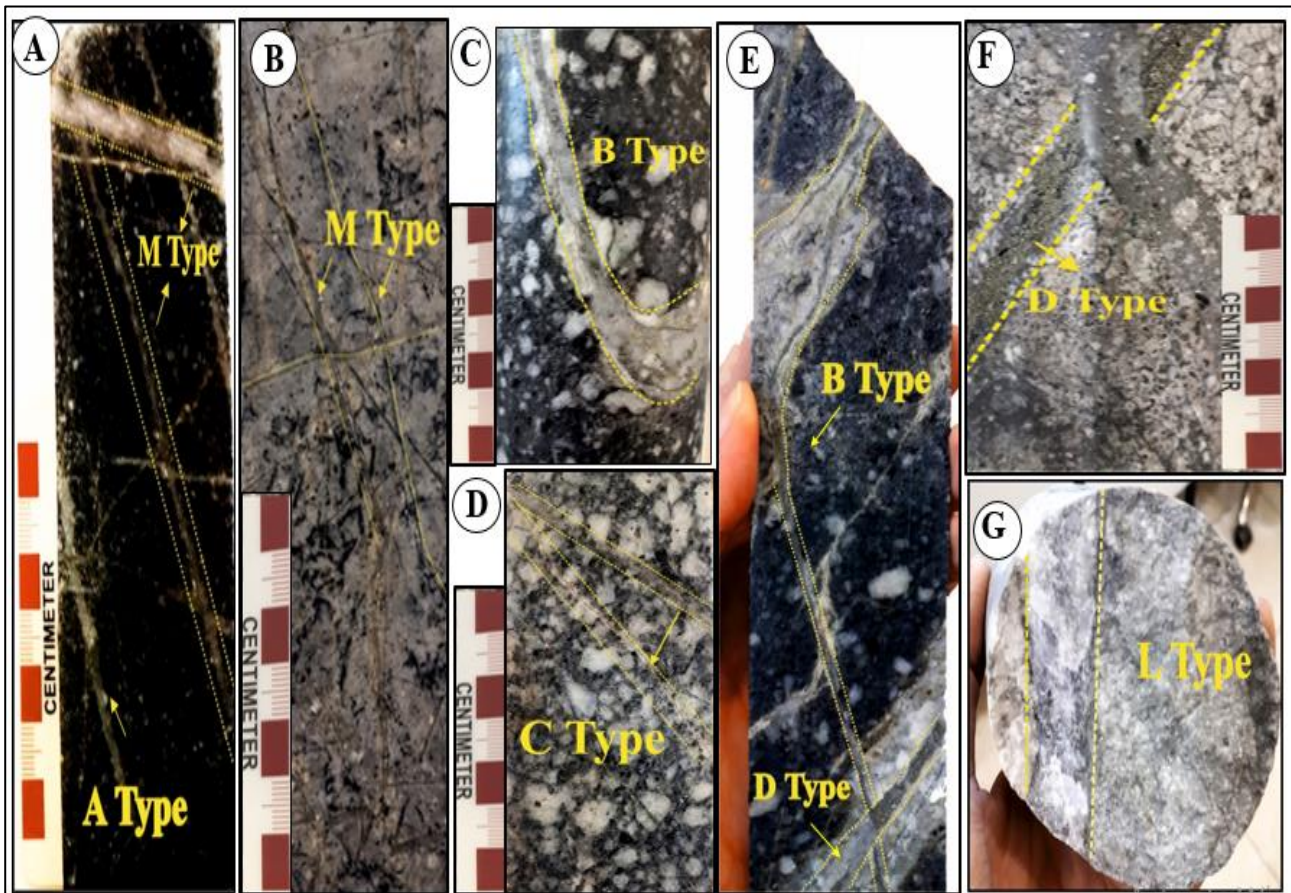
۲) میان‌بارهای سیال غنی از مایع شامل: میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع (L+V) حاوی مایع + گاز و میان‌بارهای سیال غنی از مایع همراه با فاز کدر (L+V+S) حاوی مایع + گاز + کانی کدر (کالکوپیریت و فازهای کدر ناشناخته).

۳) میان‌بارهای سیال شور شامل: میان‌بارهای سیال سه‌فازی شور ساده (L+V+H) حاوی مایع - گاز - هالیت و میان‌بارهای سیال شور چندفازی (L+V+H+S+S) حاوی مایع + گاز + هالیت ± هماتیت ± انیدریت ± سیلویت ± کالکوپیریت.

مرحله اصلی کانی‌سازی (نوع B): مرحله اصلی گرمایی با کانی‌سازی مس و مقدار بسیار پایین مولیبدن همراه دگرسانی‌های پتاسیک و کوارتز-سریسیت-آلکان فلدسپار - کلریت هستند. نوع رگه‌ها در این مرحله عبارتند از: ۱- رگه کوارتز ± پیریت ± کالکوپیریت مرحله اصلی کانی‌سازی مرتبط با دگرسانی پتاسیک (شکل ۸- C و E) و دگرسانی کوارتز-سریسیت-فلدسپار آلکان-کلریت متعلق به گمانه ۲ در اعماق ۵۰۶ متری است. ۲- رگه کوارتز ± پیریت ± کالکوپیریت ± مولیبدنیت مرحله اصلی کانی‌سازی همراه با دگرسانی کوارتز-سریسیت-فلدسپار آلکان-کلریت متعلق به گمانه ۳ در اعماق ۴۷۵ متری هستند.

مرحله پس از کانی‌سازی (نوع C و نوع D): ترکیب رگه‌های قابل تشخیص پس از کانه‌زایی از نوع C با ترکیب کوارتز ± پیریت ± مسکویت ± کلریت ± آلکان فلدسپات ± انیدریت ± کلسیت قابل تشخیص هستند. این رگه‌های باریک با تغییرات کانی‌شناسی در طول رگه حاوی مقادیر قابل توجهی از مسکویت هستند (شکل ۸- D).

این رگه‌ها گاهی همراه با آلکان فلدسپار، انیدریت و کلسیت دیده می‌شوند و قطع‌کننده رگه اصلی کوارتز-انیدریت با کمی پیریت و کالکوپیریت دانه پراکنده هستند. رگه نوع D عبارتند از: ۱- رگه کوارتز ± پیریت: این رگه به طور پیوسته و با ضخامت ۱ سانتی‌متری با حاشیه سریستی شده همراه با دگرسانی پتاسیک دیده می‌شوند (شکل ۸- E و F). ۲- کوارتز ± فلدسپار آلکان + پیریت: این رگه‌ها با عرض ۵ میلی‌متری تا نسبتاً باریک اغلب همراه با پیریت در سرتاسر رگه و همراه با دگرسانی فلیک ایجاد می‌شوند. کالکوپیریت و انیدریت با مقدار خیلی کمتر نیز حضور دارند. رخنمون این رگه‌ها در نمونه‌های سطحی با ضخامت پایین و در مغزه‌ها حفاری تا اعماق ۲۰۰ متری با ضخامت نسبتاً بیشتری دیده می‌شوند. ۳- کوارتز + پیریت ± سریسیت: این رگه‌ها با عرض ۵ میلی‌متری همراه با دگرسانی سریستی قابل توجه در اطراف رگه‌ها مشاهده می‌شوند (شکل ۸- E). رگه پیریت-کوارتز-سریسیت و رگه پیریت-کوارتز با حاشیه سریسیت - رسی (کائولن) (شکل



شکل ۸. تصویرهای نمونه دستی از انواع رگه- رگچه‌های طبقه‌بندی شده از نوع A، M، B، C، D و L در واحد سنگی کوارتز دیوریت کانسار کوه اسفند. A: نمونه شماره (S-BH2-D367) با دو نوع رگه از نوع رگه A (رگه کوارتز بدون کله‌زایی) و رگه M (کوارتز ± کالکوپیریت ± مگنتیت)، B: نمونه شماره (S-BH2-D264) با حضور رگه نوع B (کوارتز ± پیریت ± کالکوپیریت ± مگنتیت و رگچه‌های ریز مگنتیت)، C: نمونه شماره (S-BH2-D139) با حضور رگه نوع C (کوارتز ± پیریت ± مسکویت ± کلریت)، E: نمونه شماره (S-BH2-D228) با حضور دو نوع رگه از نوع رگه B (کوارتز ± پیریت ± کالکوپیریت) و رگه نوع D (کوارتز ± پیریت ± سرسیت)، F: نمونه شماره (S-BH4-117) با حضور رگه نوع D (کوارتز ± پیریت) و G: نمونه شماره (S-BH4-D118) با حضور رگه نوع L (کلسیت)

Fig. 8. Hand specimen Photograph of the types of classified vein- veinlets as A, M, B, C, D, and L in the quartz diorite unit of the Kuh-e- Esfand deposit. A: Sample No. (S-BH2-D367) with two types of veins, A Type (barren quartz vein) and M Type (quartz ± chalcopyrite ± magnetite), B: Sample No. (S-BH2-D462) with the presence of M Type veins (quartz ± pyrite ± chalcopyrite ± magnetite and fine magnetite veinlet), C: Sample No. (S-BH2-D264) with B Type veins (quartz ± chalcopyrite ± pyrite), D: Sample No. (S-BH2-D139) with C Type veins (quartz ± pyrite ± muscovite ± chlorite), E: Sample No. (S-BH2-D228) with two types of veins, B Type (quartz ± pyrite ± chalcopyrite) and D Type (quartz ± pyrite ± sericite), F: Sample No. (S-BH4-117) with D Type veins (quartz ± pyrite), and G: Sample No. (S-BH4-D118) with L Type veins (calcite)

میان‌بارهای سیال بر اساس درجه پرشدگی حجم سیال توسط فاز مایع و حضور یا عدم حضور کانی کدر در سه گره رده‌بندی می‌شوند.

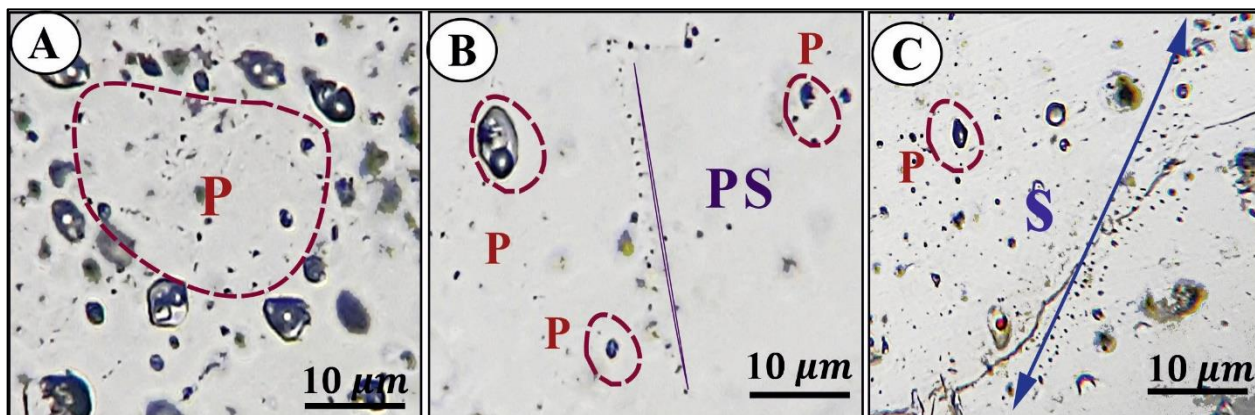
میان‌بارهای سیال غنی از گاز: میان‌بارهای سیال گازی فراوان‌ترین نوع میان‌بار سیال مشاهده شده در نمونه‌های کوارتز هستند. این نوع از

مرحله پس از کانه‌زایی در رگه کوارتز \pm پیریت همراه با میان‌بارهای سیال غنی از مایع ساده (LV) و همچنین به طور محدود در رگه کوارتز \pm آلکالی فلدسپار + پیریت همراه با میان‌بارهای سیال غنی از گاز ساده (VL)، غنی از مایع ساده (LV)، میان‌بار سیال شور ساده (LVH) مشاهده می‌شوند.

۲) میان‌بار سیال دو فاز غنی از گاز ساده (LV): این نوع از میان‌بارهای سیال حاوی دو فاز گاز و مایع هستند و با بیشترین حجم از فاز گازی با اندازه‌های بین ۵ تا ۲۰ میکرون در شکل‌های بیضوی، کشیده مستطیلی، شکل‌های چند ضلعی (بلور منفی) و بی‌شکل مشاهده شده است (شکل ۱۱- B).

۳) میان‌بار سیال غنی از گاز همراه با فاز کدر: این نوع از میان‌بارهای سیال سه فاز غنی از گاز (VLS) با میزان فراوانی کمتر حاوی بیشترین حجم از فاز گازی به همراه فاز مایع و کلنی کدر (کالکوپیریت، احتمالاً مگنتیت و کانی ناشناخته) به صورت چند ضلعی (بلور منفی) و بی‌شکل و با پراکندگی تصادفی و منفرد در اندازه‌های ۲ تا ۱۰ میکرون قابل مشاهده هستند (شکل ۱۱- C و D).

۱) میان‌بار سیال تک فاز گازی (V): میان‌بارهای سیال تک فاز گازی با فراوانی قابل توجهی به طور غالب با منشأ اولیه در اندازه‌های کوچک تا متوسط (به طور میانگین ۲ تا ۱۰ میکرون) به شکل‌های کروی، بیضوی و بی‌شکل اغلب به صورت منفرد و با پراکندگی تصادفی و گاهی به صورت تجمعی مشاهده می‌شوند (شکل ۱۱- A). میان‌بارهای تک فاز گازی در رگچه‌های کوارتز در مراحل پیش از کانه‌زایی همراه با رگه کوارتز \pm کالکوپیریت \pm مگنتیت همراه با تنوعی از میان‌بارهای سیال غنی از مایع ساده (LV)، غنی از گاز ساده (VL) و میان‌بارهای سیال شور ساده (LVH) حاوی هالیت و گاهی انیدریت و همچنین رگه کوارتز \pm انیدریت \pm آلکالی فلدسپار \pm پیریت \pm بیوتیت \pm مگنتیت \pm کالکوپیریت به مقدار فراوان همراه با میان‌بارهای سیال غنی از گاز ساده (VL) و بدون حضور میان‌بارهای سیال شور و چندفازی مشاهده می‌شوند. در مرحله اصلی کانی‌زایی همراه با رگه کوارتز \pm پیریت \pm کالکوپیریت همراه با میان‌بارهای غنی از گاز ساده (VL)، میان‌بارهای سیال غنی از مایع ساده (LV) و میان‌بارهای سیال شور ساده (LVH) و شور چندفازی (LVHS) و در

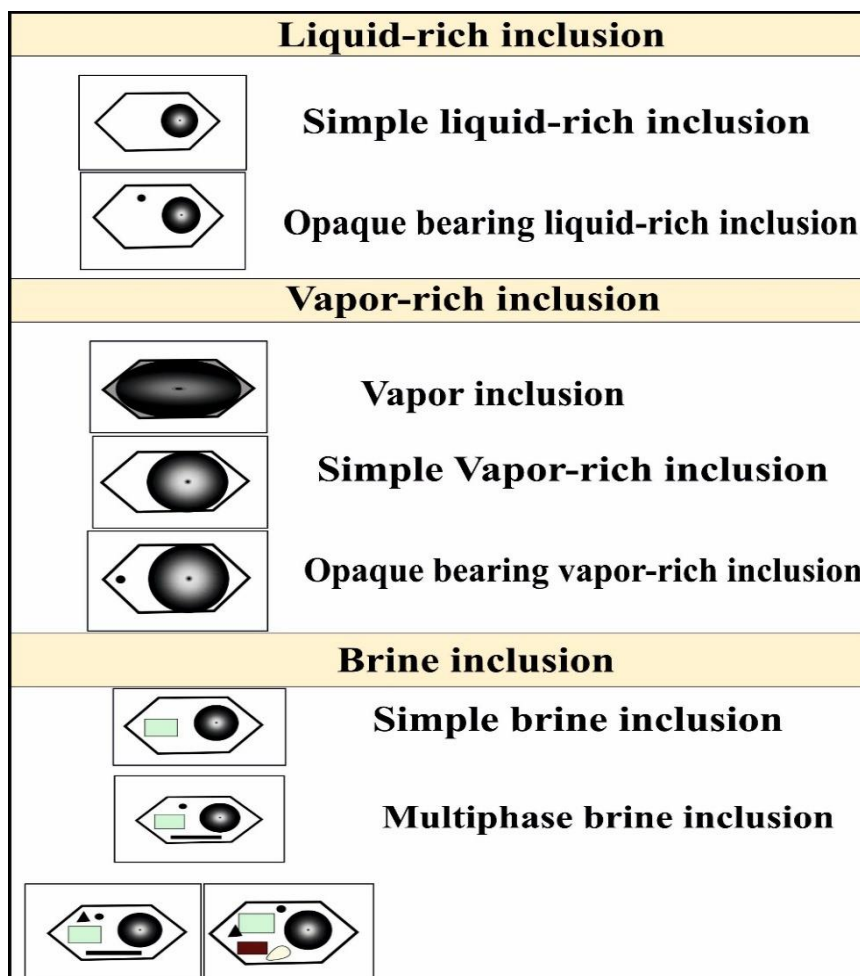


شکل ۹. تصویرهای میکروسکوپی میان‌بارهای سیال از نوع اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب کانسار کوه اسفند. A: حضور میان‌بار سیال اولیه به صورت تجمعی و پراکنده منفرد، B: میان‌بار سیال اولیه و ثانویه کاذب و C: روند خطی میان‌بارهای ثانویه در دو کانی کوارتز مجاور یکدیگر به همراه دانه‌های پراکنده از میان‌بارهای سیال اولیه. (P: اولیه، S: ثانویه و PS: ثانویه کاذب)

Fig. 9. Photographs of fluid inclusions of primary, secondary, and pseudosecondary types in the Kuh-e-Esfand deposit. A: Presence of primary fluid inclusions in an accumulative and scattered individual form, B: Pseudosecondary primary and secondary fluid inclusions, and C: Linear trend of secondary fluid inclusions in two adjacent quartz minerals along with scattered grains of primary fluid inclusions. (P: primary, S: Secondary, PS: Pseudosecondary)

شور چندفازی (LVHS) و به ندرت میان‌بارهای سیال غنی از مایع ساده (LV) و همراه با رگه کوارتز \pm کالکوپیریت \pm پیریت همراه با میان‌بارهای سیال غنی از گاز ساده (LV)، میان‌بارهای سیال شور ساده (LVH) و شور چندفازی (LVHS) حضور دارند. در مرحله پس از کانی‌زایی به مقدار قابل توجه همراه با رگه کوارتز \pm پیریت \pm مسکویت \pm کلریت همراه با میان‌بارهای سیال شور چندفازی (LVHS) در کانی‌زایی کوارتز و همچنین در رگه کوارتز \pm پیریت همراه با میان‌بارهای سیال شور ساده (LVH) و شور چندفازی (LVHS) به مقدار کمتر قابل مشاهده هستند.

میان‌بارهای غنی از گاز ساده (LV) در انواع مراحل پیش از کانی‌زایی، پس از کانی‌زایی و پس از کانی‌زایی قابل مشاهده هستند. در مرحله پیش از کانی‌زایی همراه با رگه کوارتز \pm کالکوپیریت \pm مگنتیت و رگه کوارتز \pm انیدریت \pm آلکالی فلدسپار \pm پیریت \pm بیوتیت \pm مگنتیت \pm کالکوپیریت همراه با میان‌بارهای سیال تک‌فازی گازی (V) در اندازه متوسط میان‌بارهای سیال شور و چندفازی مشاهده می‌شوند. در مرحله کانی‌زایی اصلی به اندازه نسبتاً ریزتر نسبت به مرحله پیش از کانی‌زایی کوارتز \pm کالکوپیریت \pm پیریت \pm مولیبدنیت به طور فراوان همراه با میان‌بارهای شور ساده (LVH) و



شکل ۱۰. تصویر شماتیک طبقه‌بندی انواع میان‌بارهای سیال کانسار کوه اسفند بر اساس طبقه‌بندی الریش و همکاران (Ulrich et al., 2001)

Fig. 10. Schematic diagram of the classification of various fluid inclusions in the Ku-e-Esfand deposit based on the classification by Alireza and colleagues (Ulrich et al., 2001)

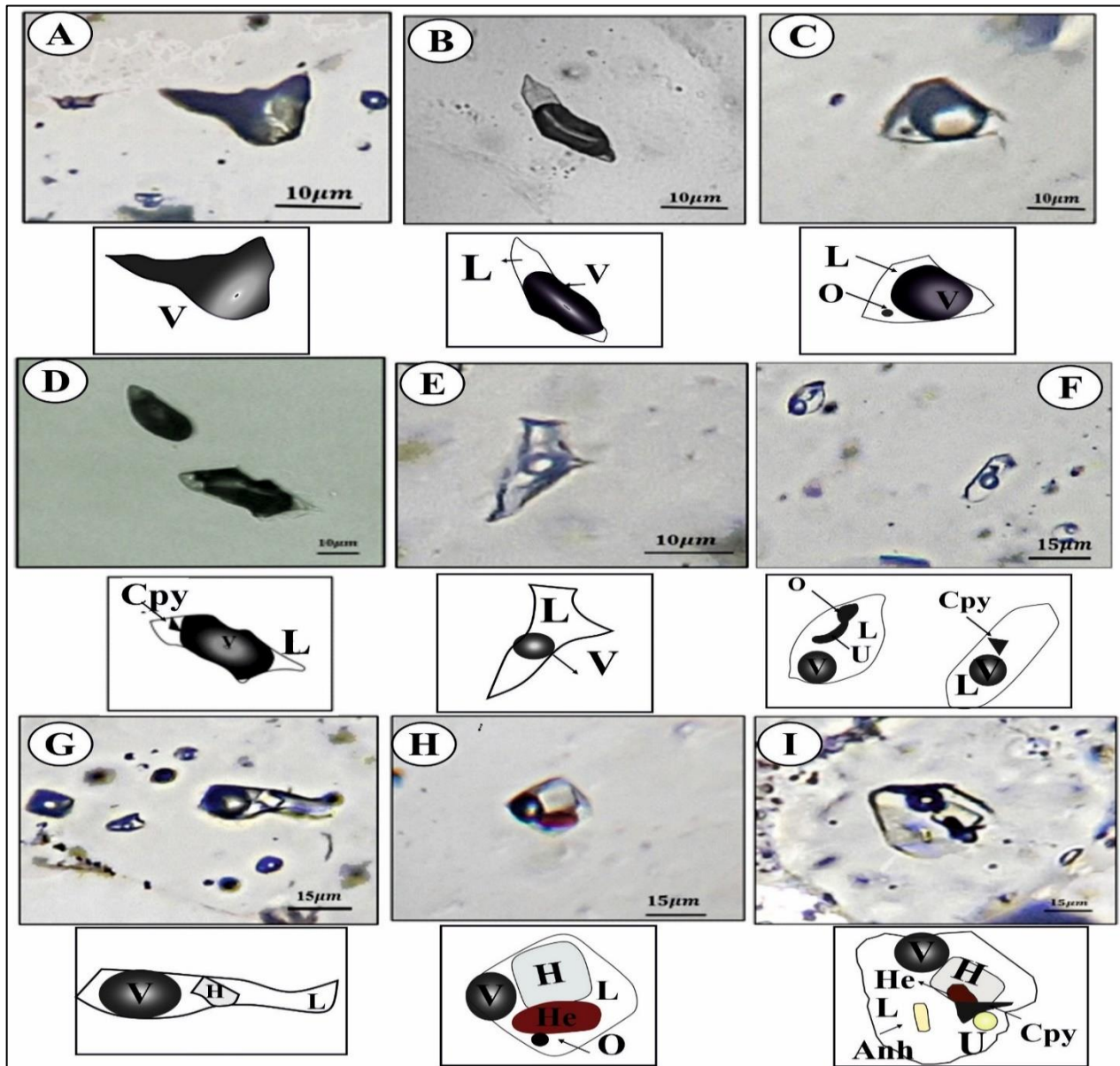
میان‌بارها گاهی حاوی کانی کدر در اندازه ۵ تا ۲۰ میکرون، در شکل‌های متفاوت و به صورت منفرد و با پراکنندگی تصادفی نیز ظاهر می‌شوند. (۲) میان‌بار سیال شور چندفازی (LVHS): تنوع فازهای جامد در میان‌بارهای سیال چند فازی آنها را در گروه دیگر قرار می‌دهد. علاوه بر این می‌توان میان‌بارهای سیال شوراب همراه با فاز کدر را در دو گروه همراه با هماتیت و بدون هماتیت قرار داد. اندازه این نوع میان‌بارهای سیال از ۵ تا ۳۰ میکرون متغیر است و حضور منفرد با پراکنندگی تصادفی از دیگر ویژگی‌های این نوع از میان‌بارهای سیال است. از فازهای جامد می‌توان به هالیت، هماتیت، انیدریت، سیلویت، کالکوپیریت و سایر کانی‌های کدر دیگر (احتمالاً مگنتیت) اشاره کرد (شکل ۱۱-H و I).

در مرحله اصلی کلنه‌زایی تنوع فازهای میان‌بارهای سیال با فراوانی قابل توجهی از میان‌بارهای سیال شور چندفازی (LVHS) و میان‌بارهای سیال شور ساده (LVH) و سپس میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع (LV) و غنی از گاز (VL) مرتبط با رگه کوارتز ± پیریت ± کالکوپیریت همراه با دگرسانی پتاسیک در اعماق ۳۶۴ متری از گمانه ۳ با محدوده دمایی ۲۴۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد (به طور میانگین ۴۷۵/۷ سانتی‌گراد) و با میزان شوری معادل ۷/۸ تا ۶۹/۶ درصد شوری معادل نمک طعام (به طور میانگین ۲۴/۵۶) است. علاوه بر این، رگه کوارتز ± پیریت ± کالکوپیریت ± مولیبدنیت همراه با دگرسانی کوارتز ± سریسیت ± آلکان فلدسپار ± کلریت مرتبط با مرحله اصلی کانی‌زایی گویای محدوده دمایی ۳۳۰ تا ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد با شوری معادل ۳۸ تا ۴۶ درصد شوری معادل نمک طعام از میان‌بارهای سیال شور چندفازی (LVHS) و میان‌بارهای سیال غنی از گاز (VL) در گمانه ۳ در اعماق ۴۷۵ متری هستند. رگه کوارتز ± پیریت ± کالکوپیریت مرحله اصلی کانی‌سازی همراه با دگرسانی کوارتز - سریسیت - فلدسپار آلکان - کلریت گویای محدوده دمایی ۳۱۵ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (به طور میانگین ۳۸۵ درجه سانتی‌گراد) از میان‌بارهای سیال چندفازی (LVHS) و دوفازی غنی از گاز (VL) و تک فازی (V) در گمانه ۲ در اعماق ۵۰۶ متری است.

میان‌بارهای سیال غنی از مایع: این نوع از میان‌بارهای سیال غنی از مایع بر اساس حضور و عدم حضور کانی کدر در دو گروه میان‌بار سیال غنی از مایع ساده (LV) و میان‌بار سیال غنی از مایع همراه با فاز کدر (LVS) رده‌بندی می‌شوند. میان‌بار سیال غنی از مایع ساده در اندازه‌های کوچک تا متوسط (به طور میانگین ۵ تا ۱۰ میکرون) به صورت منفرد و با پراکنندگی تصادفی حضور دارند (شکل ۱۱-E). این نوع میان‌بارهای سیال اغلب اولیه است و به صورت بی‌شکل از فراوانی کمتری نسبت به سایر میان‌بارهای سیال غنی از گاز برخوردار هستند. میان‌بار سیال غنی از مایع همراه با فاز کدر (LVS) با فراوانی کم در اندازه ۵ تا ۱۰ میکرون اغلب به صورت بی‌شکل، چند ضلعی (بلور منفی) مشاهده می‌شوند. هماتیت، کالکوپیریت و فازهای کدر دیگر از جمله فازهای جامد در این نوع میان‌بارهای سیال هستند (شکل ۱۱-F). میان‌بارهای سیال غنی از مایع ساده (LV) در رگه‌های کوارتز بدون کانی‌زایی همراه با میان‌بارهای سیال غنی از گاز ساده (VL) و در مرحله کانی‌زایی اصلی همراه با رگه کوارتز ± کالکوپیریت ± پیریت میان‌بارهای سیال غنی از مایع ساده در اندازه بزرگ‌تر از میان‌بارهای نسبتاً ریز از میان‌بارهای غنی از گاز ساده، تک فازی گاز و همچنین میان‌بارهای سیال شور ساده و مقدار اندکی از میان‌بارهای سیال غنی از مایع همراه با کانی کدر با فراوانی خیلی کم قابل مشاهده هستند. در مرحله پس از کانی‌زایی مرتبط با رگه کوارتز ± پیریت با فراوانی بیشتر همراه با میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از گاز (VL) و به طور محدود میان‌بار سیال شور ساده (LVH) دیده شده است.

میان‌بارهای سیال شوراب: بر مبنای تعداد و نوع فازهای جامد میان‌بارهای سیال شوراب در سه گروه رده‌بندی می‌شوند که عبارتند از: ۱- میان‌بار سیال شوراب ساده، ۲- میان‌بار سیال شوراب همراه با فاز کدر و ۳- میان‌بار سیال شوراب چند فازی. در این نوع از میان‌بارهای سیال هالیت تنها فاز قابل انحلال در دو گروه است:

(۱) میان‌بار سیال شور ساده (LVH): میان‌بارهای سیال سه فازی از فاز مایع، گاز و هالیت تشکیل شده است. فاز گازی حجم بیشتری را نسبت به فاز مایع در برمی‌گیرد. هالیت در این نوع از میان‌بارهای سیال در اندازه متوسط (۱۰ میکرون) به وضوح دیده می‌شود (شکل ۱۱-G). این نوع از



شکل ۱۱. تصویرهای سنگ‌نگاری میان‌بارهای سیال کانسار کوه اسفند. A: میان‌بار سیال تک‌فازی گازی، B: میان‌بار سیال دو‌فازی غنی از گاز ساده، C و D: میان‌بارهای غنی از گاز همراه با فاز کدر (VLS) (کالکوپریت و احتمالاً مگنتیت)، E: میان‌بار سیال دو‌فازی غنی از مایع ساده (LV)، F: میان‌بارهای سیال غنی از مایع همراه با فاز کدر (LVS) و G: میان‌بار سیال شوراب ساده (LVH)، H و I: میان‌بار سیال شوراب چندفازی (LVHS). علائم اختصاری از سیوولا و اشمید (Siivola and Schmid, 2007) اقتباس شده است (V: بخار، L: مایع، O: کدر، H: هالیت، He: هماتیت، Cpy: کالکوپریت، Anh: آنهدریت و U: ناشناخته).

Fig. 11. Petrography photograph of the fluid inclusions of Kuh-Esfand deposit. A: Vapor single-phase fluid inclusion, B: Vapor-rich two-phase fluid inclusions, C and D: Vapor-rich three-phase inclusion with opaque phase (VLS) (Chalcopyrite and probably Magnetite), E: liquid-rich two-phase fluid inclusion (LV), F: Liquid-rich phase fluid inclusion with opaque phase (LVS) and G: simple brine fluid inclusion (LVH), H and I: Brine multiphase fluid inclusions (LVHS). Abbreviations after Siivola and Schmid (2007) (V: vapor, L: liquid, O: opaque, H: Halite, He: hematite, Cpy: Chalcopyrite, Anh: Anhydrite and U: unknown).

ریزدماسنجی میان بارهای سیال غنی از گاز ساده (VL): میان بارهای سیال تک فاز گازی را که اغلب حاصل جوشش ثانویه بوده و با میان بارهای سیال شور ساده و شور چند فاز همراه هستند، به دلیل عدم حضور فاز مایع، برای بررسی گرمایش و سرمایش کمتر مورد استفاده قرار می گیرند.

روش گرمایش: دمای همگن شدگی نهایی به فاز گازی میان بارهای سیال دو فاز غنی از گاز ساده از ۳۳۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد (به طور میانگین ۴۶۱ درجه سانتی گراد) متغیر می است و اغلب در دمای ۳۹۰ تا ۴۵۰ و ۴۸۰ تا ۵۳۰ درجه سانتی گراد همگن شده اند (شکل ۱۲- A). این میان بارهای سیال در دمای اندکی بیشتر از میان بارهای سیال چند فاز همگن می شوند که این مسئله به علت به دام افتادن نامتجانس مایع و گاز در طی جوشش ثانویه است (Hezarkhani, 2009). کمترین و بیشترین دمای همگن شدگی میان بارهای سیال این گروه، محدوده دمایی که در آن جوشش ثانویه اتفاق می افتد را نشان می دهد (Bodnar and Beane, 1980). **روش سرمایش:** دمای ذوب شدگی آخرین بلور یخ میان بارهای سیال دو فاز غنی از گاز ساده مقدار بیشینه بین ۱۵/۵- تا ۱۷/۵- و بیشینه شوری ۱۷ تا ۲۰ درصد شوری معادل نمک طعام است (شکل ۱۲- B و C).

ریزدماسنجی میان بارهای سیال غنی از مایع ساده (LV): **روش گرمایش:** دمای همگن شدگی نهایی میان بارهای سیال دو فاز غنی از مایع ساده به فاز مایع دامنه تغییرات وسیعی از ۲۰۹ تا ۴۲۵ درجه سانتی گراد (به طور میانگین ۳۳۶ درجه سانتی گراد) نشان می دهند و اغلب در دمای ۳۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد همگن شده اند (شکل ۱۳- A).

روش سرمایش: دمای یوتکتیک اندازه گیری شده در این نوع از میان بارهای سیال دو فاز غنی از مایع ساده بازه ای از ۴۵- تا ۶۳- را در برمی گیرد و این نشان دهنده حضور نمک های دیگر علاوه بر NaCl از جمله نمک های کلرید کلسیم (CaCl₂)، پتاسیم (KCl) و منیزیم (MgCl₂) در سیال است (Borisenko, 1977). دمای ذوب آخرین بلور یخ اغلب نمونه های میان بارهای سیال دو فاز غنی از مایع ۱۲- تا ۱۵- درجه سانتی گراد است و بیانگر شوری ۱۱ تا ۲۱ درصد شوری معادل نمک طعام است (شکل ۱۳- B و C).

با این وجود در مراحل پس از کانی زایی نیز همراه با رگه کوارتز ± پیریت ± سربیسیت مرتبط دگرسانی فلیک با فراوانی غالب میان بار سیال شور ساده (LVH) نسبت به میان بار سیال شور چند فاز (LVHS) همراه با میان بارهای غنی از گاز ساده (VL) و همچنین در رگه کوارتز ± آلکالی فلدسپار ± پیریت مرتبط با دگرسانی فلیک میان بار سیال شور ساده (LVH) با میان بارهای غنی از گاز ساده (VL) و تک فاز گازی (V) و میان بارهای سیال غنی از مایع ساده (LV) حضور دارند. علاوه بر این، میان بارهای سیال شور ساده در مرحله پیش از کانی زایی همراه با رگه های کوارتز ± کالکوپیریت ± مگنتیت قابل مشاهده است.

در حالت کلی می توان بیان کرد که میان بارهای سیال شور ساده در مراحل متعدد کانی زایی حضور نسبتاً قابل توجهی نسبت به میان بارهای سیال شور چند فاز دارند. میان بارهای سیال شور چند فاز فراوانی قابل توجهی در مرحله کانی زایی اصلی نشان داده اند. میان بارهای سیال تک فاز گازی فراوانی قابل توجهی در مرحله پیش از کانی زایی و پس از کانی زایی دارند. میان بارهای سیال غنی از گاز ساده حضور گسترده ای در انواع رگه ها در مراحل پیش از کانی زایی، کانی زایی اصلی و پس از کانی زایی نشان می دهند. فراوانی میان بارهای سیال غنی از مایع ساده در رگه های مرتبط با مرحله پس از کانی زایی قابل توجه است.

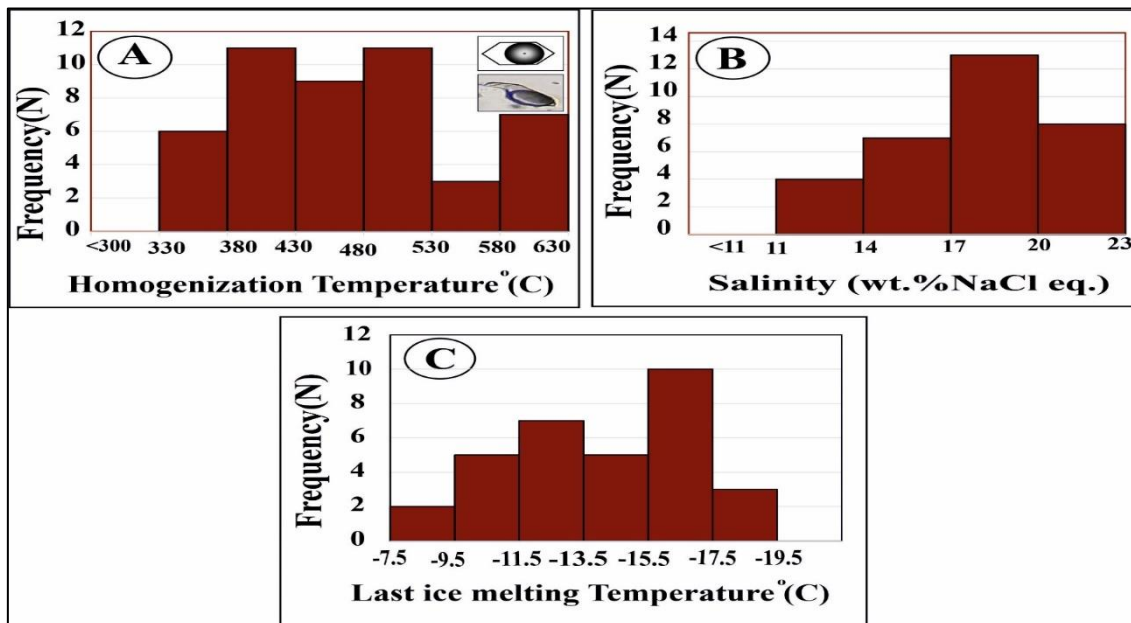
ریزدماسنجی میان بارهای سیال

پس از بررسی سنگ نگاری میان بارهای سیال و ثبت اطلاعات به دست آمده، بررسی های ریزدماسنجی بر اساس مشاهده دقیق و تشخیص تغییرات فازی میان بار سیال، طی مراحل سرمایش و گرمایش بر روی کانی کوارتز بنا شده است. در این بخش میان بارهای سیال تک فاز گازی و همچنین میان بارهای سیال غنی از گاز همراه با کانی کدر (VLS) و میان بارهای سیال غنی از مایع همراه با کانی کدر (LVS) از فراوانی کمی برخوردار هستند. بنابراین در بررسی های ریزدماسنجی از آنها صرف نظر شد. نتایج حاصل از بررسی های ریزدماسنجی میان بارهای سیال در کانسار مس کوه اسفند، در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. خلاصه ویژگی‌های دمای همگن‌شدگی، شوری، فشار و عمق اندازه‌گیری و محاسبه شده در انواع میان‌بارهای سیال کانسار کوه اسفند. Th (vapor): دمای همگن‌شدگی فاز بخار، Tm (halite): دمای ذوب هالیت، Th (final): دمای همگن‌شدگی نهایی، Tm (ice): دمای ذوب یخ، Te (eutectic): دمای یوتکتیک

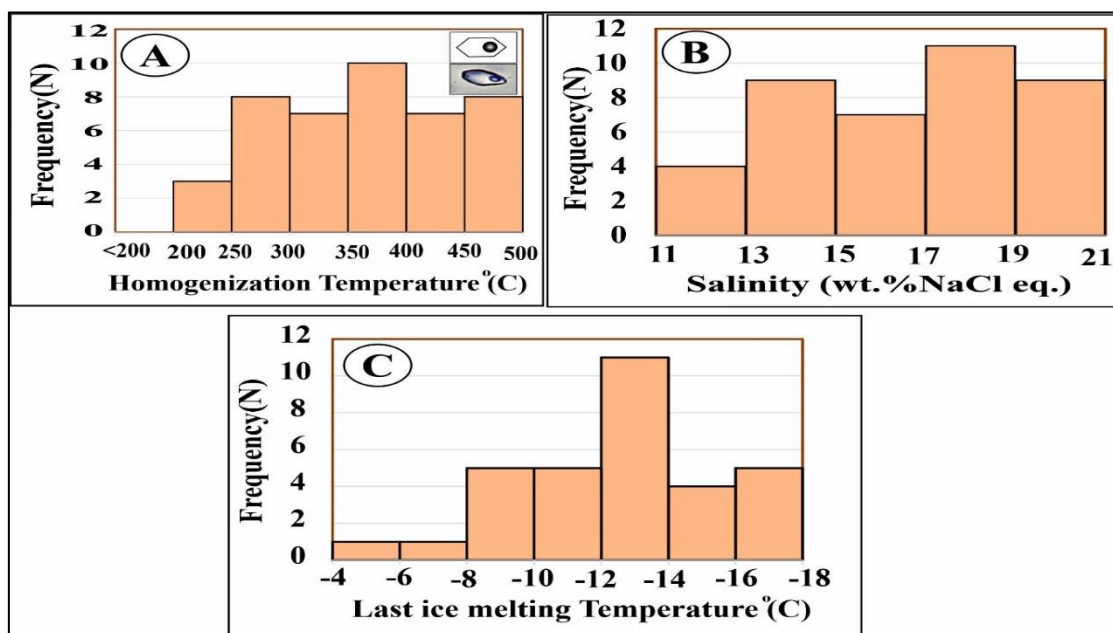
Table 1. Summary of Characteristics of homogenization temperature, salinity, pressure and depth in types of fluid inclusions of Kuh-e-Esfand deposit. Th (vapor) = homogenization temperature to vapor, Tm (halite) = melting temperature of halite, Th (Total) = total homogenization temperature to vapor, Tm (ice) = melting temperature of ice, Te (eutectic) = first melting temperature

Sample	Type inclusion	Th (vapor) (°C)		Tm (halite) (°C)		Th (Total) (°C)		Tm (ice) (°C)		Te (eutectic) (°C)	
		range	average	range	average	range	average	range	average	range	average
Brine inclusion											
S-BH2-D462	Multi-phase brine inclusion (L+V+H+S) N (19)	356-598	492	346-570	409	358-598	501
S-BH3-D346											
S-BH3-D462											
S-BH2-D506											
S-BH2-D228											
S-BH2-D506	Simple brine inclusion (L+V+H) N (17)	251-590	446	250-540	342	330-590	462
S-BH3-D346											
S-BH3-D131											
ST-BH3-475											
ST-BH3-475											
Vapor-rich and liquid-rich inclusion (Two – phase)											
S-BH2-D367	Simple V-rich N (33)	330-600	461	330-600	461	9.7-19.5	14.5
S-BH2-D506											
S-BH3-D131											
S-BH3-D346											
S-BH3-D475											
S-BH2-D367	Simple L-rich N (21)	209-490	378	209-490	378	5-18	12.6	-45--57	-53
S-BH2-D506											
S-BH3-D131											
S-BH3-D346											
S-BH3-D475											
Sample	Type inclusion	Density (g/cm ³)		Salinity (wt.%)		Pressure (bar)		Depth (km)			
		range	average	range	average	range	average	range	average		
S-BH2-D462	Multi-phase brine inclusion (L+V+H+S) N (19)	0.9-1.3	1.02	42-70	49	210-720	442	0.9-2.7	1.7		
S-BH3-D346											
S-BH3-D462											
S-BH2-D506											
S-BH2-D228											
S-BH2-D506	Simple brine inclusion (L+V+H) N (17)	0.8-1.1	0.98	35-65	42	100-762	390	0.6-1.9	1.5		
S-BH3-D346											
S-BH3-D131											
ST-BH3-475											
ST-BH3-475											
Vapor-rich and liquid-rich inclusion (Two – phase)											
S-BH2-D367	Simple V-rich N (33)	0.6-0.8	0.7	12-22	18	230-935	603	0.9-3.5	2.3		
S-BH2-D506											
S-BH3-D131											
S-BH3-D346											
S-BH3-D475											
S-BH2-D367	Simple L-rich N (21)	0.5-1	0.8	11-21	17	15-488	215	0.1-1.8	0.8		
S-BH2-D506											
S-BH3-D131											
S-BH3-D346											
S-BH3-D475											



شکل ۱۲. نمودارهای بررسی ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال غنی از گاز ساده (VL) کانسار کوه اسفند، A: نمودار دمای همگن‌شدگی، B: نمودار شوری و C: نمودار دمای ذوب آخرین بلور یخ

Fig. 12. Histograms of microthermometric studies of simple vapor-rich fluid inclusions of Kuh-e-Esfand deposit. A: Histogram of Homogenization temperature, B: Histogram of Salinity, and C: Histogram of last ice melting temperature

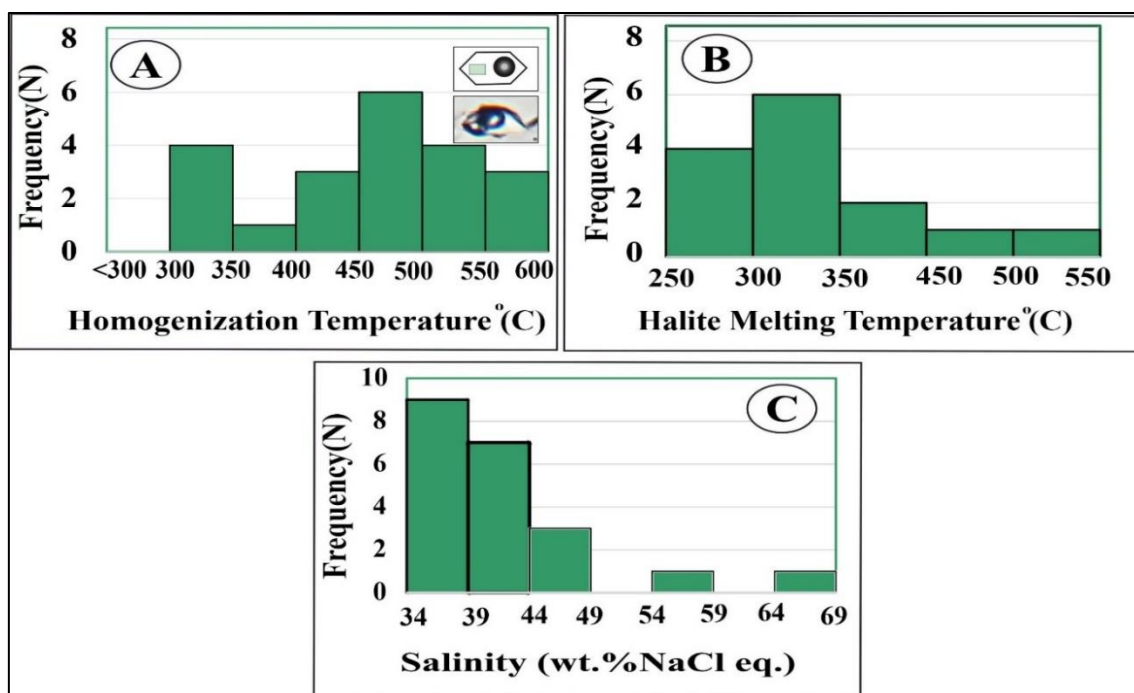


شکل ۱۳. نمودارهای بررسی ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال غنی از مایع (LV) کانسار کوه اسفند، A: نمودار دمای همگن‌شدگی، B: نمودار میزان شوری و C: نمودار دمای ذوب آخرین بلور یخ

Fig. 13. Histogram of microthermometric studies of simple liquid-rich fluid inclusions (LV) of Kuh-e-Esfand deposit. A: Histogram of Homogenization temperature, B: Histogram of Salinity, and C: Histogram of last ice melting temperature

انحلال هالیت بین ۲۵۰ تا ۵۴۰ درجه سانتی گراد (به طور میانگین ۳۴۹ درجه سانتی گراد) است و اغلب آنها در دمای ۳۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی گراد همگن می‌شوند (شکل ۱۴- B).
روش سرمایش: میزان شوری در میان‌بارهای سیال شوراب ساده بر اساس دمای انحلال هالیت محاسبه می‌شوند. از این رو، دامنه شوری معادل ۳۴/۷ تا ۶۵/۳ درصد شوری معادل نمک طعام با بیشترین فراوانی ۳۵ تا ۴۰ درصد شوری معادل نمک طعام را نشان می‌دهند (شکل ۱۴- C).

ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال شوراب ساده (LVH):
روش گرمایش: بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، هالیت تنها فاز جامد در این نوع از میان‌بارهای سیال شوراب ساده است. دمای انحلال هالیت، دمای محو شدن حباب گازی و دمای همگن‌شدگی نهایی میان‌بارهای سیال شوراب ساده نسبت به میان‌بارهای سیال فازی کمتر است. دمای همگن‌شدگی نهایی میان‌بارهای سیال شوراب ساده با محدوده دمایی از ۳۳۰ تا ۵۴۰ درجه سانتی گراد (به طور میانگین ۴۴۰ درجه سانتی گراد)، بیشترین فراوانی را در دماهای ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد نشان می‌دهند (شکل ۱۴- A).



شکل ۱۴. نمودارهای بررسی ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال شور ساده (LVH) کانسار کوه اسفند، A: نمودار دمای همگن‌شدگی نهایی، B: نمودار دمای ذوب هالیت و C: نمودار شوری

Fig. 14. Histograms of microthermometric studies of simple brine fluid inclusions (LVH) of Kuh-e-Esfand deposit. A: Histogram of Homogenization temperature, B: Histogram of halite melting temperature, and C: Histogram of last ice melting temperature

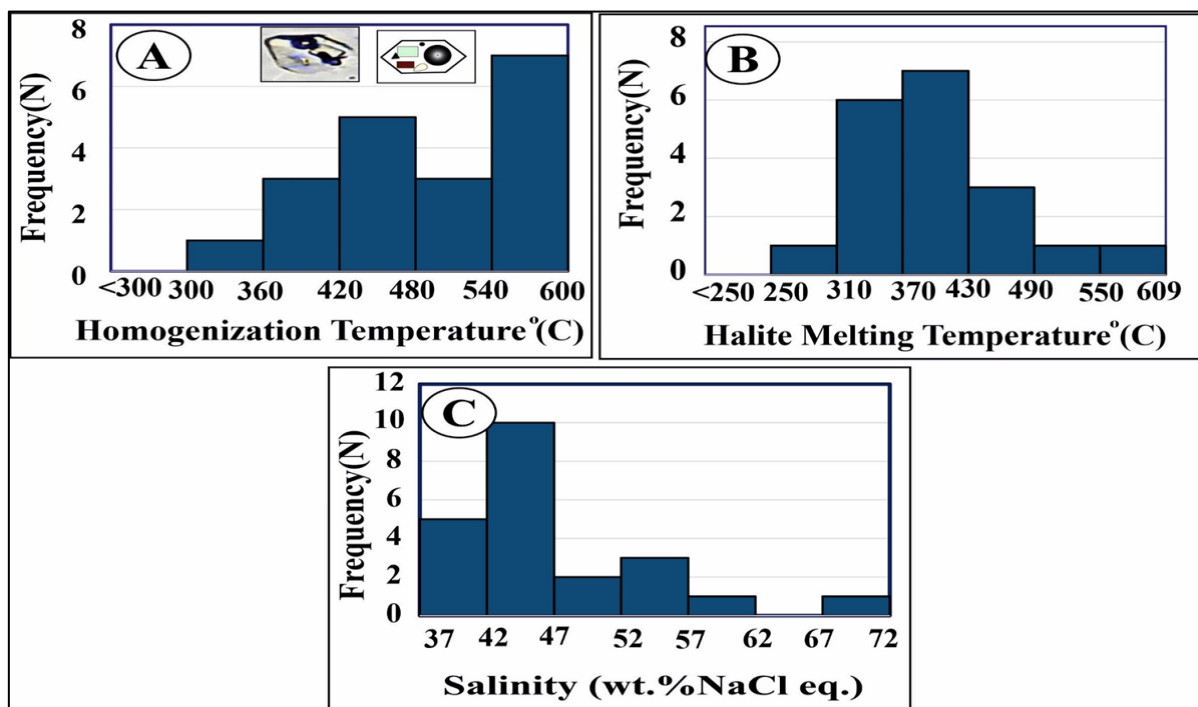
سیال از نظر دمایی و میزان شوری به طور میانگین بالاترین مقدار را نشان می‌دهند.

ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال شور چندفازی (LVHS):
 میان‌بارهای سیال شوراب چند فازی حاوی بیشترین فاز جامد و بالاترین درجه پرشدگی از فازهای جامد هستند. این نوع از میان‌بارهای

دامنه تغییرات بین ۳۴۶ تا ۵۷۰ درجه سانتی گراد (به طور میانگین ۴۰۹ درجه سانتی گراد) بیشترین فراوانی را در دمای ۳۷۰ تا ۴۳۰ درجه سانتی گراد نشان می‌دهند که از دمای انحلال هالیت در سیالات درگیر شوراب ساده بیشتر است (شکل ۱۵-B).

روش سرمایش: شوری میان‌بارهای چندفازی بر اساس دمای انحلال هالیت از ۳۷ تا ۷۰ درصد شوری معادل نمک طعام متغیر است و بیشترین فراوانی را در ۴۲ تا ۵۰ درصد شوری معادل نمک طعام نشان می‌دهند (شکل ۱۵-C).

روش گرمایش: میان‌بارهای سیال چندفازی حاوی بالاترین تنوع از فازهای جامد هستند و از نظر دمایی و میزان شوری به طور میانگین بالاترین مقدار را نشان می‌دهند. دمای همگن‌شدگی نهایی میان‌بارهای سیال شوراب چندفازی با انحلال هالیت و یا محو شدن حباب گازی مشخص می‌شود. دمای همگن‌شدگی نهایی با تغییرات دمایی تقریباً منظمی از ۳۳۳ تا ۵۹۸ درجه سانتی گراد (به طور میانگین ۵۰۱ درجه سانتی گراد)، بیشترین فراوانی را در دمای بین ۴۲۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد در برمی‌گیرند (شکل ۱۵-A). دمای انحلال هالیت با



شکل ۱۵. نمودارهای بررسی ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال چندفازی (LVHS) کانسار کوه اسفند، A: نمودار دمای همگن‌شدگی نهایی، B: نمودار دمای ذوب هالیت و C: نمودار میزان درصد شوری

Fig. 15. Histograms of microthermometric studies of multiphase brine fluid inclusions (LVHS) of Kuh-e-Esfand deposit. A: Histogram of Homogenization temperature, B: Histogram of halite melting temperature, and C: Histogram of last ice melting temperature

نمی‌کنند. با این وجود، بررسی‌های ریزدماسنجی بر روی میان‌بارهای سیال متعلق به مرحله پیش از کانی‌سازی، کانی‌سازی اصلی و همچنین پس از کانی‌سازی بیانگر تنوع قابل توجهی از میان‌بارها در مرحله کانی‌سازی اصلی مرتبط با رگه کوارتز ±

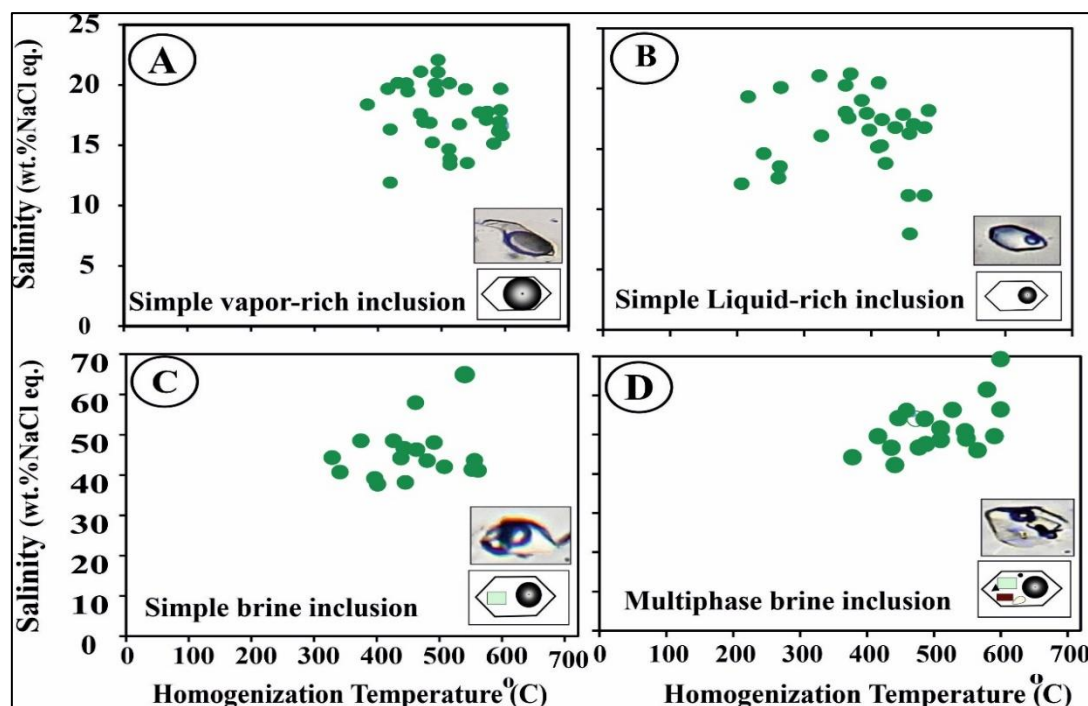
بحث

شرایط فیزیکی - شیمیایی سیال گرمایی

میان‌بارهای سیال بررسی شده در کانی‌میزبان کوارتز پراکنده‌گی قابل توجهی در رگه‌ها نشان می‌دهند و از روند خاصی پیروی

وجود شاهد حضور میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از مایع و غنی از گاز ساده در رگه‌های مرتبط با مراحل ابتدایی کانی‌سازی هستیم. رابطه بین دمای همگن‌شدگی نهایی (درجه سانتی‌گراد) و میزان شوری (بر حسب درصد شوری نمک طعام) در میان‌بارهای سیال غنی از گاز ساده و غنی از مایع ساده (شکل ۱۶-A و B) پراکنده و غیرخطی است که می‌تواند ناشی از اختلاط دو سیال متفاوت باشد (Taghipour, 2007). در مقابل، رابطه بین دمای همگن‌شدگی نهایی و میزان شوری در میان‌بارهای شور چندفازی افزایش دما همراه با افزایش شوری روند یکنواخت‌تر و خطی‌تری را نسبت به میان‌بارهای سیال شور ساده و میان‌بارهای سیال غنی از مایع ساده و غنی از گاز ساده نشان می‌دهند (شکل ۱۶-C و D).

کالکوپیریت \pm پیریت و رگه کوارتز \pm کالکوپیریت \pm پیریت \pm مولیدنیت است که فراوانی قابل توجهی از میان‌بارهای سیال شور چندفازی به همراه میان‌بارهای سیال غنی از گاز (نوع تک فاز گازی دو فازی غنی از گاز) را نشان می‌دهند. در مرحله کانی‌سازی اولیه مرتبط با رگه کوارتز \pm کالکوپیریت \pm مگنتیت میان‌بارهای سیال تک فاز گازی و دو فازی غنی از گاز به همراه مقدار کمتری از میان‌بارهای سیال غنی از مایع و همچنین میان‌بارهای سیال شور ساده همراه هستند. در رگه‌های کوارتز \pm پیریت \pm سربیسیت مرتبط با مرحله پس از کانی‌سازی اصلی، مقدار میان‌بارهای سیال غنی از مایع ساده بر میان‌بارهای سیال غنی از گاز برتری دارند؛ در واقع فراوانی میان‌بارهای سیال غنی از گاز کاهش یافته است. با این

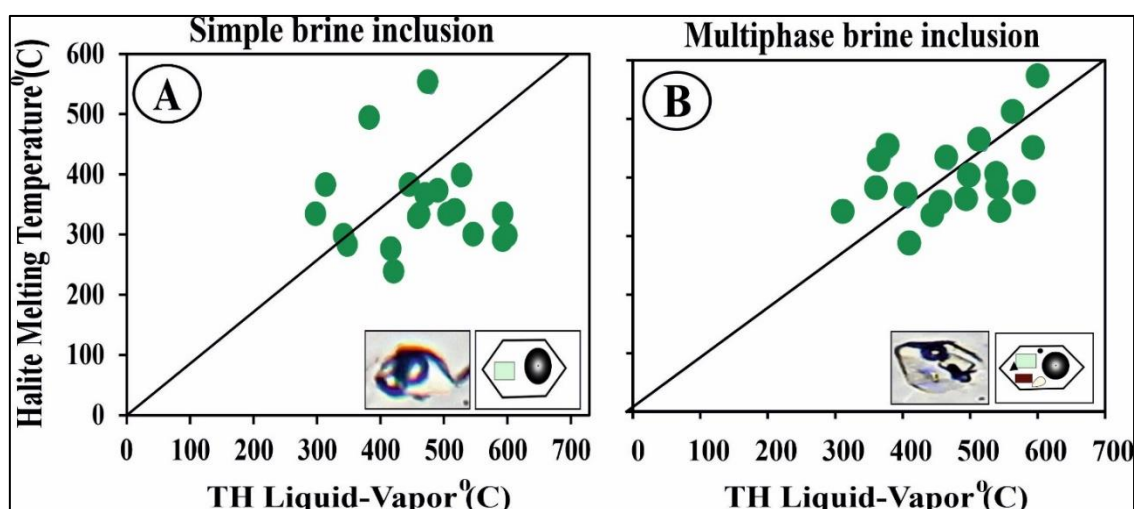


شکل ۱۶. نمودار دمای همگن‌شدگی در مقابل شوری میان‌بارهای سیال کانسار کوه اسفند. A: نمودار دما همگن‌شدگی - شوری میان‌بارهای سیال غنی از گاز ساده (VL)، B: نمودار دما همگن‌شدگی - شوری میان‌بارهای سیال غنی از مایع ساده (LV)، C: نمودار دما همگن‌شدگی - شوری میان‌بارهای سیال شور ساده (LVH) و D: نمودار دما همگن‌شدگی - شوری میان‌بارهای سیال شور چندفازی (LVHS)

Fig. 16. Homogenization temperature-salinity diagram versus salinity of fluid inclusions in the Kuh-e- Esfand deposit. A: Homogenization temperature-salinity diagram of simple vapor-rich fluid inclusions (VL), B: Homogenization temperature-salinity diagram of simple liquid-rich fluid inclusions (LV), C: Homogenization temperature-salinity diagram of brine liquid-rich fluid inclusions (LVH), and D: Homogenization temperature-salinity diagram of multiphase brine fluid inclusions (LVHS)

در رابطه بین دمای ذوب هالیت در مقابل دمای همگن‌شدگی مایع-گاز میان‌بارهای سیال شور ساده و میان‌بارهای شور چندفازی (شکل ۱۷- A و B)، میان‌بارهای واقع در زیر خط مورب گویای همراه بودن دمای همگن‌شدن نهایی با محو شدن حباب گازی و نمونه‌های واقع در بالای خط مورب گویای همراه بودن

دمای همگن‌شدن نهایی با انحلال هالیت هستند که می‌تواند بیانگر به دام افتادن میان‌بار سیال در فشار زیاد باشد (Bodnar, 1994). میان‌بارهای واقع بر روی خط مورب حاکی از دمای همگن‌شدگی با انحلال و حذف هم‌زمان هالیت و حباب گازی است.



شکل ۱۷. نمودار دمای ذوب هالیت در مقابل دمای همگن‌شدگی مایع-بخار کانسار کوه اسفند، مرتبط با A: میان‌بارهای سیال شور ساده و B: میان‌بارهای شور چندفازی

Fig. 17. Diagram of the halite melting temperature versus the homogenization temperature of liquid-vapor in the Kuh-e-Esfand deposit, related to A: simple brine fluid inclusions, and B: multiphase brine fluid inclusions

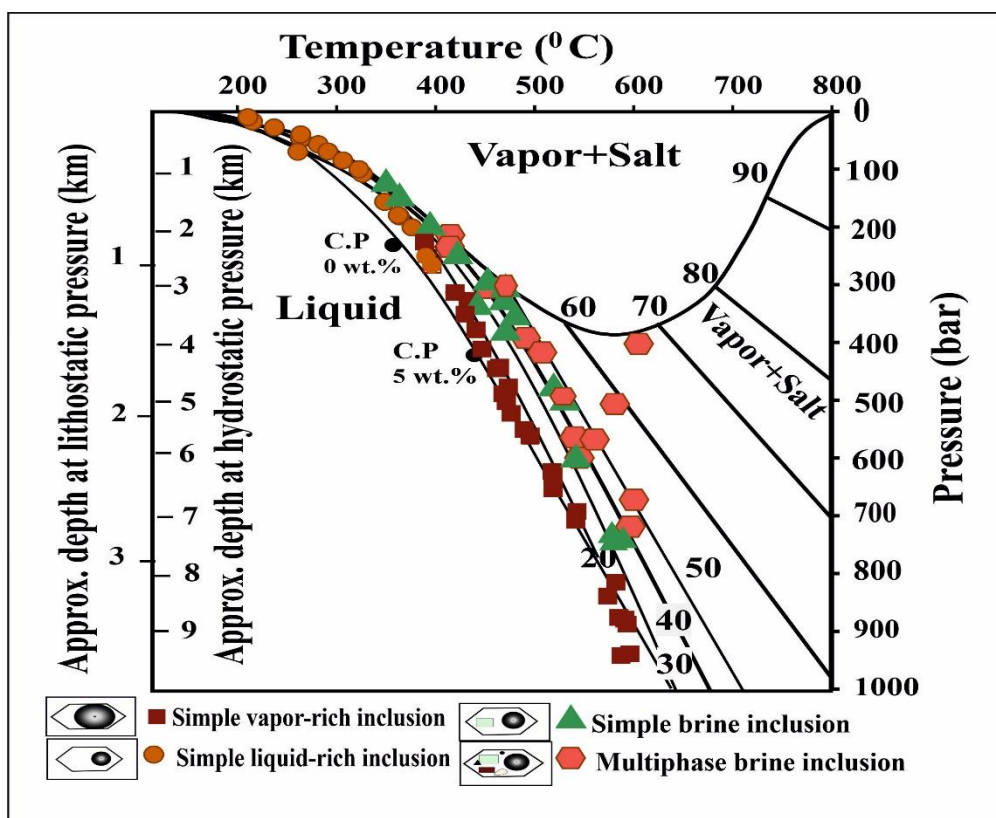
چگالی به ترتیب معادل $1-0.1 \text{ g/cm}^3$ به طور میانگین $0.1-0.2 \text{ g/cm}^3$ به طور میانگین هستند.

تعیین فشار کانسار
فشار به دام‌افتادن میان‌بارهای سیال غنی از مایع و گاز را می‌توان بر اساس داده‌های دما و شوری در سامانه $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ (Bodnar, 1989) (Brown, 1989) (and Beane, 1980) در نرم‌افزار فلینکور (Fournier, 1987) ارزیابی کرد. لذا بر اساس نمودار دما-فشار (شکل ۱۸)، بیشینه مقدار فشار متعلق به میان‌بار سیال دوفازی غنی از گاز ساده (معادل ۹۳۵ بار) با عمق ۳/۵ کیلومتر است که تشکیل

تعیین چگالی: چگالی میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع ساده (LV) و غنی از گاز ساده (VL) و میان‌بارهای سیال شوراب ساده (LVH) و میان‌بارهای شوراب چندفازی (LVHS) بر اساس میزان دما و شوری میان‌بارهای سیال در سامانه $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ (Bodnar, 1989) (and Beane, 1980) با استفاده از نرم‌افزار فلینکور (Brown, 1989) محاسبه شد. طبق جدول ۱، کمترین دامنه تغییرات چگالی متعلق به میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع ساده $0.99-0.5 \text{ g/cm}^3$ به طور میانگین 0.8 g/cm^3 و میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از گاز ساده $0.6-0.7 \text{ g/cm}^3$ به طور میانگین 0.7 g/cm^3 است. میان‌بارهای سیال شوراب ساده و چندفازی حاوی بالاترین مقدار

کیلومتر عمق ادامه دارد. میانگین عمق میان‌بارهای سیال غنی از گاز ساده ۱/۴ کیلومتر، میان‌بار سیال غنی از مایع ساده ۰/۸ کیلومتر، میان‌بارهای سیال شور ساده ۱/۵ کیلومتر و میان‌بارهای سیال شور چندفازی معادل ۱/۷ کیلومتر هستند. بنابراین عمق نهشت کانسار با کمینه ۰/۸ تا بیشینه ۱/۷ کیلومتر به طور میانگین ۱/۴ کیلومتر معادل ۱۴۰۰ متر معادل فشار کمینه ۲۱۵ بار تا بیشینه ۶۰۳ بار به طور میانگین ۴۱۲/۵ بار هیدرواستاتیک و ۱۱۱۲ بار لیتواستاتیک است.

آن تا فشار ۲۳۰ بار با عمق ۰/۹ کیلومتر ادامه دارد. تشکیل میان‌بارهای سیال شور چند فازی در شرایط بیشینه فشار و عمق به ترتیب معادل ۷۲۰ بار و ۲/۷ کیلومتر است که تا فشار ۲۱۰ بار و عمق ۰/۸ کیلومتر ادامه می‌یابد. همچنین میان‌بارهای سیال شور ساده در بیشینه مقدار فشار ۷۶۲ بار معادل عمقی ۲/۹ کیلومتر تشکیل می‌شوند و تا فشار ۱۰۰ بار با عمق ۰/۶ کیلومتر ادامه دارد. میان‌بارهای سیال غنی از مایع ساده شرایط تشکیل در بیشینه فشار ۴۸۸ بار معادل عمق ۱/۸ کیلومتر تا کمینه فشار ۱۵ بار معادل ۰/۱



شکل ۱۸. تعیین عمق و فشار میان‌بارهای سیال کانسار کوه اسفند، با استفاده از نمودار دما-فشار (Fournier, 1987)

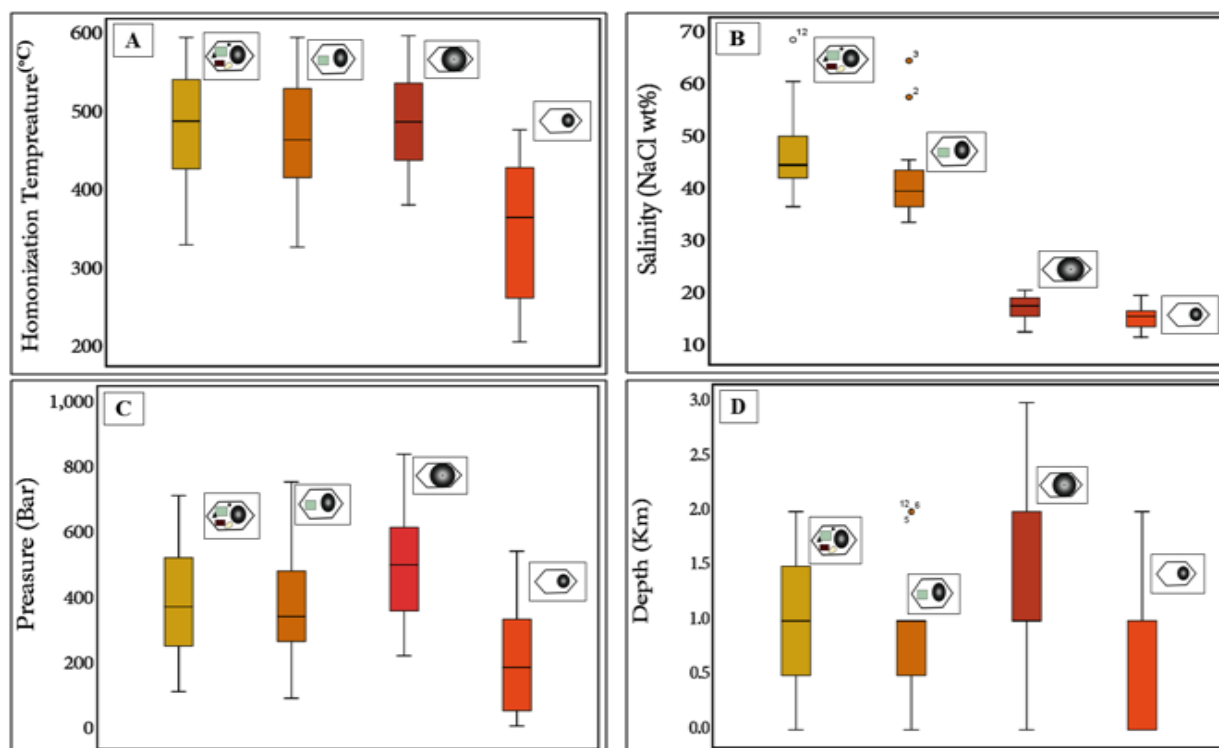
Fig. 18. Determining the depth and pressure of fluid inclusions in the Kuh-e-Esfand deposit, using a temperature-pressure diagram (Fournier, 1987)

همگن‌شدگی و شوری، روند کاهشی از میان‌بارهای سیال چند فازی به سمت میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع نشان می‌دهند (شکل

به طور کلی، بر اساس نتایج به دست آمده از بررسی‌های ریزدماسنجی ارائه‌شده در جدول ۱ و شکل ۱۰، تغییرات دمای

می‌دهند (Mohammadi Qaqab and Taghipour, 2011). تغییرات فشار و عمق گویای روند کاهشی از میان‌بارهای دو فازی غنی از گاز و میان‌بارهای سیال شور چندفازی به سمت میان‌بارهای سیال شور ساده و میان‌بارهای دو فازی غنی از مایع هستند (شکل ۱۹-C و D).

با این وجود، میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از گاز ساده (VL) دارای دمای همگن شدن مشابه با انتهای گستره دمایی همگن شدن میان‌بارهای سیال شور چندفازی هستند (شکل ۱۹-A). میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از مایع ساده (LV) با شوری و دمای کمتر، آخرین مراحل به دام افتادن سیال گرمایی را نشان



شکل ۱۹. روند تغییرات فیزیکی-شیمیایی در انواع میان‌بارهای سیال کانسار کوه اسفند. A: روند تغییرات دما میان‌بارهای سیال، B: روند تغییرات شوری میان‌بارهای سیال، C: روند تغییرات عمق میان‌بارهای سیال و D: روند تغییرات فشار میان‌بارهای سیال

Fig. 19. The trend of physical-chemical fluctuations of various fluid inclusions of the Kuh-e-Esfand deposit. A: Temperature fluctuations of fluid inclusions, B: Salinity fluctuations of fluid inclusions, C: Depth fluctuations of fluid inclusions, and D: Pressure fluctuations of fluid inclusions

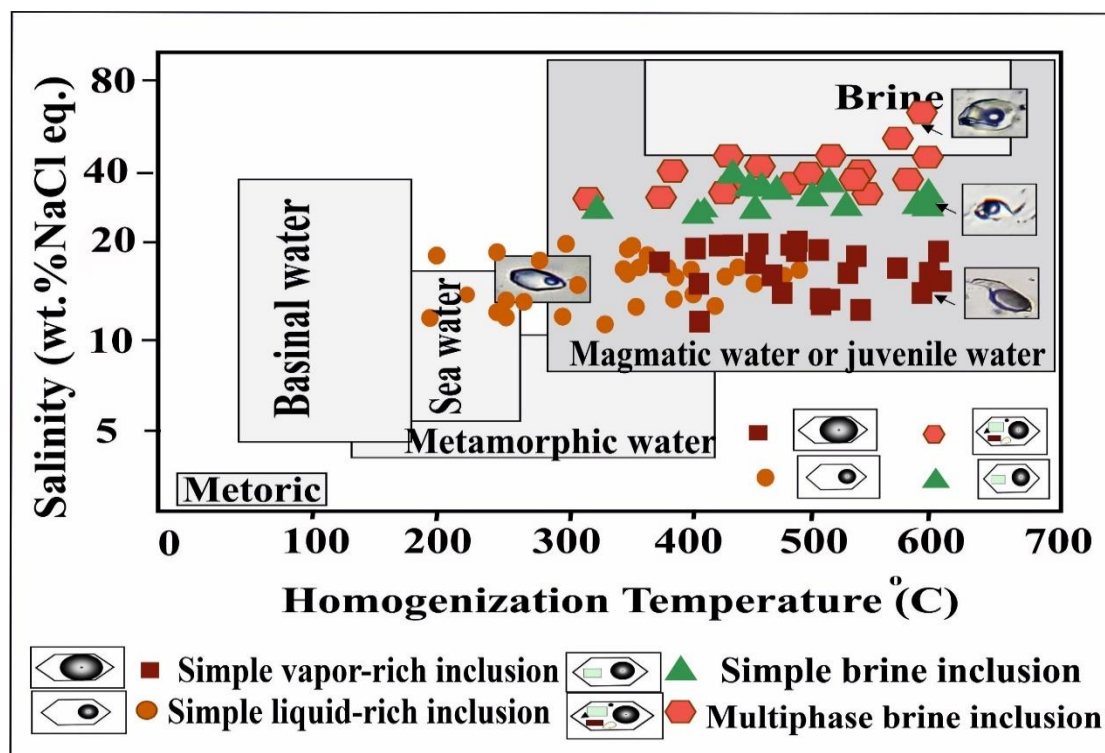
میان‌بارهای سیال شور ساده و چند فازی در جهت بررسی منشأ سیال و روند تکامل سیال بر اساس تغییرات دمای همگن شدن و میزان شوری صورت می‌گیرد (شکل‌های ۲۰ و ۲۱). منشأ غالب سیال کانی‌سازی کانسار کوه اسفند بر اساس نمودار دمای همگن شدن در مقابل شوری (Kesler, 2005) (شکل ۲۰)، سیال

تکامل سیال گرمایی

ارتباط بین انواع میان‌بارهای سیال مشاهده شده در کانسار کوه اسفند بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی امکان‌پذیر است. در بررسی‌های ریزدماسنجی، ارتباط بین انواع مختلف میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع ساده و غنی از گاز ساده،

ماگمایی است. بر اساس نمودار دمای همگن شدگی در مقابل شوری (Wilkinson, 2001) (شکل ۲۱-A و B)، سیر تکاملی سیال گرمایی از درجه حرارت و شوری بالا آغاز می‌شود که خاص شرایط ماگمایی در سامانه‌های پورفیری است (Zimmerman et al., 2014; al., 2008). فاز بخار با افزایش دما و کاهش فشار یا ترکیبی از این دو ایجاد می‌شود (Wilkinson, 2001).

روند تکاملی سیال گرمایی کانسار مس کوه اسفند بر اساس نمودار شوری - دمای همگن شدگی بررسی‌های میان‌بارهای سیال (Kesler, 2005)، جهت تعیین منشأ سیال به دام افتاده



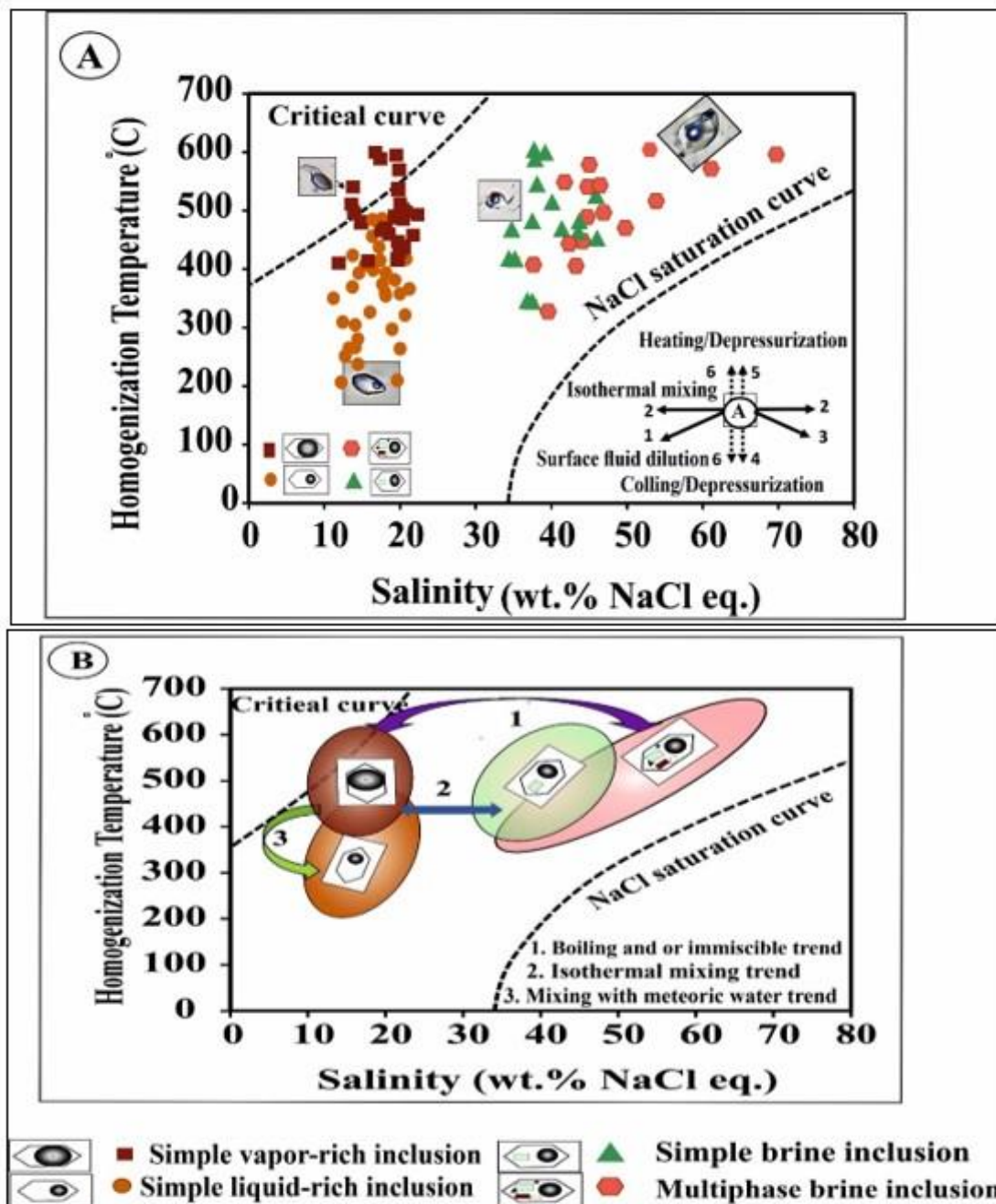
شکل ۲۰. روند تکاملی سیال گرمایی کانسار مس کوه اسفند بر اساس نمودار شوری - دمای همگن شدگی بررسی‌های میان‌بارهای سیال (Kesler, 2005)، جهت تعیین منشأ سیال به دام افتاده

Fig. 20. Evolution trend of hydrothermal fluid of Kuh-e-Esfand copper deposit based on the salinity-temperature homogenization diagram of fluid inclusions (Kesler, 2005), for determining the trapped fluid source

فرایندهای مؤثر در روند تکامل سیال گرمایی کانسار کوه اسفند از طریق بررسی ارتباط بین انواع میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از گاز ساده، میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع ساده، میان‌بارهای شور ساده و میان‌بارهای شور چندفازی عبارتند از: ۱- فرایند جوشش ثانویه و عدم اختلاط سیال، ۲- اختلاط هم‌دما و ۳- اختلاط سیال ماگمایی با آب‌های جوی. دو فرایند رایج جوشش ثانویه و اختلاط سیالات شرایط لازم جهت ته‌نشست کانی‌های معدنی فراهم می‌کنند و باعث

فوق اشباع شدن سریع سیال گرمایی و ته‌نشست کانسار می‌شوند (Wilkinson, 2001).
 (۱) فرایند جوشش ثانویه و عدم اختلاط سیال: از آنجایی که یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر اقتصادی بودن کانی‌زایی، رخداد فرایند جوشش ثانویه است، بررسی این فرایند از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴۰۳، دوره ۱۶ شماره ۲

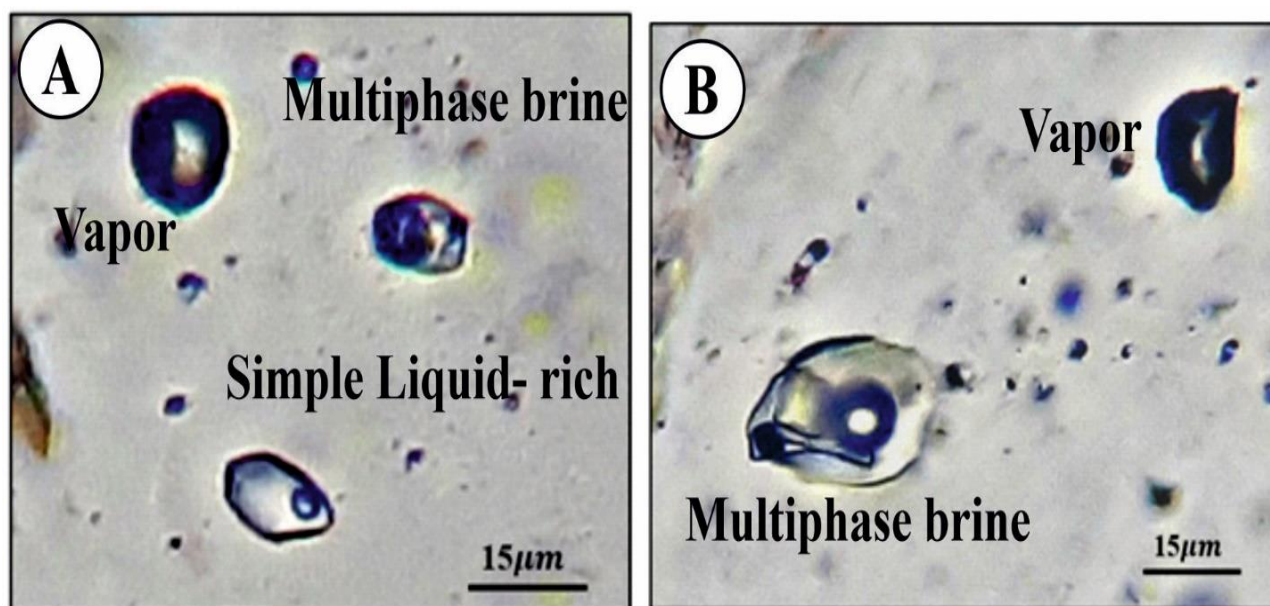


شکل ۲۱. روند تکاملی سیال گرمایی کانسار مس کوه اسفند بر اساس بررسی‌های میان‌بارهای سیال. A: نمودار دمای همگن‌شدگی - شوری (Wilkinson, 2001)، جهت تعیین فرایندهای مؤثر در تکامل سیال و نهشت کانسار، B: تصویر شماتیک انواع میان‌بارهای سیال در نمودار دمای همگن‌شدگی - شوری (Wilkinson, 2001). جهت‌ها نشان‌دهنده روند کلی حاصل از انواع فرایندهای مختلف بر روی تکامل سیال در کانسار کوه اسفند هستند.

Fig. 21. Evolution trend of hydrothermal fluid in the Kuh-e-Esfand copper deposit based on fluid inclusion studies. A: Homogenization temperature-salinity diagram (Wilkinson, 2001), to determine the influential processes in fluid evolution and ore deposition, and B: Schematic image of various fluid inclusions in the homogenization temperature-salinity diagram (Wilkinson, 2001). The directions indicate the overall trend illustrating the combined effects different processes on fluid evolution in the Kuh-e-Esfand copper deposit.

فازی با شوری بالا همراه با میان‌بارهای سیال گازی که اغلب به دو صورت میان‌بار سیال دو فازی غنی از گاز و تک فازی گازی مشاهده می‌شوند (شکل ۲۲-A و B)، نشان‌دهنده به دام افتادن سیال در حال جوشش ثانویه و عدم اختلاط سیالات منشأ گرفته از ماگما (Cline and Bodnar, 1994; Drummond and Ohmoto, 1985) و سیالات کانسنک‌ساز در مرحله اصلی کانی‌سازی (Ulrich et al., 2001; Bouzari and Clark, 2006) در کانسار کوه اسفند است.

فرایند جوشش بیان‌کننده شرایط جدید فیزیکوشیمیایی در طی تغییرات درجه حرارت و فشار سیال در گذر از شرایط لیتوستاتیک به هیدروستاتیک (Cunningham, 1978) ناشی از گسلش و شکست هیدرولیکی است که با کاهش سریع فشار محصورکننده سیالات گرمایی به عنوان یک سازوکار مهم در ته‌نشست مس در رگه-رگچه‌ها در نظر گرفته می‌شوند (Zarasvandi et al., 2013). در بررسی‌های سنگ‌نگاری، همزیستی میان‌بارهای سیال شور ساده و میان‌بار سیال شور چند



شکل ۲۲. A و B: تصویر میکروسکوپی از هم‌جواری میان‌بارهای سیال شور چندفازی با میان‌بارهای تک فازی نشان‌دهنده رخداد جوشش در کانسار کوه اسفند

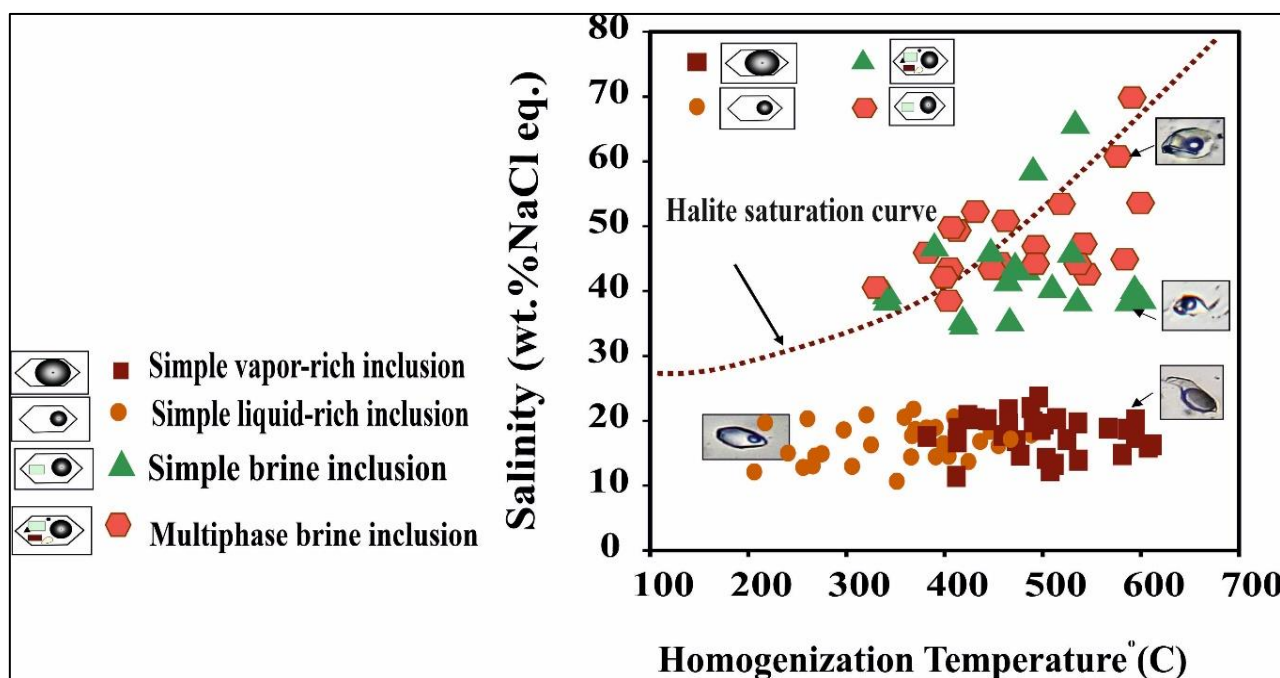
Fig. 22. A and B: microphotography showing the coexistence of multiphase brine fluid inclusions with vapor fluid inclusions indicative of boiling events of Kuh-e-Esfand deposit

میان‌بارهای شور چندفازی کانسار مس کوه اسفند در نمودار شوری-دما (شکل ۲۳)، شوری اندازه‌گیری شده دو جمعیت متمایز را نشان می‌دهند که می‌تواند به وسیله جوشش سیالات حاصل شوند (Zhang et al., 2012). بر اساس نمودار، میان‌بارهای واقع در زیر خط مورب نشان‌دهنده دمای همگن‌شدگی

علاوه بر این، وجود برش گرمایی، سامانه استوک‌ورک و تراکم رگه-رگچه‌ها در بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی کانسار کوه اسفند بیانگر فرایند جوشش است. در بررسی‌های ریزدماسنجی بر اساس ارتباط بین انواع مختلف میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع و غنی از گاز، میان‌بارهای شور ساده و

است (Bodnar, 1994). میان‌بارهای چندفازی با شوری بالا (۴۲ تا ۷۰ درصد شوری معادل نمک طعام) ویژگی‌های سیال اصلی مرتبط با کانی‌سازی هستند که تکامل سیالات گرمایی از ماگمای دما بالا را ثبت کرده‌اند.

نهایی آنها با محو شدن فاز گازی است. برخی از میان‌بارهای سیال سه فازی و همچنین چند فازی بالای خط انحلال هالیت بیانگر همگن‌شدگی نهایی آنها همراه با انحلال هالیت است که نشان‌دهنده تحولات فشار در حین تشکیل (Bodnar and Vityk, 1994; Becker et al., 2008) و عدم تعادل با فاز بخار



شکل ۲۳. موقعیت انواع میان‌بارهای سیال در نمودار شوری-دمای همگن‌شدگی (Wilkinson, 2001) در کانسار کوه اسفند، نمونه‌های واقع در زیر خط مورب گویای بودن دمای همگن‌شدن نهایی با محو شدن حباب گازی بوده و نمونه‌های واقع در بالای خط مورب گویای همراه بودن دمای همگن‌شدن نهایی با انحلال هالیت است. نمونه‌های قرار گرفته روی خط مورب نشان‌دهنده هم‌زمانی محو شدن هالیت با محو شدن حباب گازی است.

Fig. 23. The location of different fluid inclusions in the salinity - homogenization temperature diagram (Wilkinson, 2001) of Kuh-e-Esfand. Samples located below the sloping line indicate the homogenization temperature coinciding with the disappearance of the gas bubble, while samples above the sloping line indicate the homogenization temperature coinciding with halite dissolution. Samples placed on the sloping line indicate simultaneous disappearance of halite and gas bubble.

در این نوع از میان‌بارهای سیال که دمای همگن‌شدگی آنها با انحلال هالیت همراه است، می‌تواند حاصل سردشدگی توده نفوذی تحت شرایط فشار لیتواستاتیک باشد که به ایجاد سیال گرمایی با شوری بالا منجر می‌شوند (Cline and Bodnar, 1994). میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از گاز ساده با دمای همگن‌شدگی نزدیک به دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال شور چندفازی؛ اما با شوری به مراتب کمتر (بیشینه شوری ۲۲ درصد وزن نمک طعام) در نمودار، اغلب در زیر میان‌بارهای سیال

در این نوع از میان‌بارهای سیال که دمای همگن‌شدگی آنها با انحلال هالیت همراه است، می‌تواند حاصل سردشدگی توده نفوذی تحت شرایط فشار لیتواستاتیک باشد که به ایجاد سیال گرمایی با شوری بالا منجر می‌شوند (Cline and Bodnar, 1994).

و رگه کوارتز \pm کالکوپیریت \pm پیریت \pm مولیدنیت مرتبط با مراحل اصلی کانی‌سازی با حضور فراوان میان‌بارهای سیال غنی از گاز ساده (VL) و میان‌بارهای سیال شور ساده (LVH) و میان‌بار سیال شور چندفازی (LVHS) همراه هستند. علاوه بر این، حضور تنوعی از میان‌بارهای سیال غنی از گاز و غنی از مایع ساده به همراه میان‌بارهای سیال شور ساده و چندفازی مرحله کانی‌سازی می‌تواند تأییدکننده فرایند جوشش باشند.

(۲) فرایند اختلاط هم‌دما: تنوع فازهای میان‌بار سیال با طیف گسترده‌ای از میزان شوری در مقابل تغییرات تقریباً یکنواخت دما در نمودار دمای همگن‌شدگی - شوری (شکل ۲۱-A و B)، روند اختلاط هم‌دما بین سیالات بسیار شور و سیالات با شوری کمتر در دمای حدود ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند. مسیر تکاملی شماره ۲ در نمودار دمای همگن‌شدگی - شوری (شکل ۲۱-A و B)، همچنین روند اختلاط هم‌دما بین میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از گاز ساده و به طور کمتر غنی از مایع ساده با شوری پایین و میان‌بارهای سیال شور ساده و شور چند فازی را به صورت شماتیک به نمایش می‌گذارد. این فرایند به شکل‌گیری رگه کوارتز \pm پیریت \pm سیریسیت و رگه کوارتز \pm پیریت \pm مسکویت \pm کلریت \pm آلکان فلدسپات \pm انیدریت \pm کلسیت مرتبط به مرحله پس از کانی‌سازی اصلی منجر می‌شود. علاوه بر این، تنوع گسترده میان‌بارهای سیال در رگه‌های مرتبط با مرحله کانی‌سازی اصلی در رگه کوارتز \pm پیریت \pm کالکوپیریت در مرز دگرسانی پتاسیک به فلیک همراه با میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از مایع و دو فازی غنی از گاز همراه با میان‌بار شور ساده است.

(۳) فرایند اختلاط سیالات ماگمایی و جوی: دمای همگن‌شدگی و شوری بالای برخی از میان‌بارهای سیال نشان‌دهنده حضور اولیه شورابه چگال با منشأ ماگمایی است (Zarasvandi et al., 2013). سیال با شوری پایین ممکن است در نتیجه فرایندهای زمین‌شیمیایی مختلف از جمله اختلاط سیال با میزان شوری بالا با آب‌های جوی با میزان شوری پایین (Ahmad and

چندفازی قرار می‌گیرند که می‌توانند نشان‌دهنده تشکیل هم‌زمان آنها در اثر فرایند جوشش باشد. همچنین نزدیکی میان‌بارهای سیال به خط مورب اشباع‌شدگی هالیت می‌تواند نشان‌دهنده فرایند جوشش باشد (Hosseinzadeh et al., 2016). حضور میان‌بارهای سیال غنی از مایع ساده، با شوری بین ۱۵ تا ۲۵ درصد شوری معادل نمک طعام در بخش‌های عمیق‌تر سامانه‌های مس پورفیری، جایی که فشار به اندازه کافی بالاست، مانع جدایش فازی و در نتیجه وقوع فرایند جوشش می‌شوند (Rusk et al., 2008). از سوی دیگر، در نمودار دمای همگن‌شدگی - شوری (Wilkinson, 2001) (شکل ۲۱-A)، شکاف شوری بین میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از گاز و غنی از مایع از میان‌بارهای سیال سه فازی و چندفازی در دامنه شوری بین (۲۲ تا ۳۵ درصد شوری نمک طعام) بدون حضور هیچ نوع میان‌بار سیال ایجاد شده است که برخی از پژوهشگران، شفرود و همکاران (Shepherd et al., 1985) و رودر و همکاران (Roedder, 1984) آن را به عنوان شکست هسته سامانه NaCl-H₂O نزدیک به نقطه اشباع‌شدگی تفسیر می‌کنند. در سامانه‌های پورفیری تغییرات در درجه حرارت و فشار در طی گذر از شرایط لیتواستاتیک به هیدرواستاتیک ناشی از شکست هیدرولیکی و گسلش به رخداد جوشش ثانویه و در نتیجه تشکیل سیال امتزاج‌ناپذیر در محیط منجر می‌شوند. در نهایت اختلاف چگالی و انقطاع شوری تأییدکننده پدیده جدایش فاز در طی رخداد جوشش ثانویه است. علاوه بر این مسیر تکاملی سیال گرمایی کانسار کوه اسفند به صورت شماتیک در مسیرهای ۱، ۲ و ۳ در نمودار دمای همگن‌شدگی - شوری (شکل ۲۱-B) شرح داده شده است. مسیر تکاملی شماره ۱ در نمودار دمای همگن‌شدگی - شوری (شکل ۲۱-B)، بیان‌کننده جدایش فازها در حین جوشش ثانویه یا عدم امتزاج سیال است. در واقع جوشش به تولید فاز بخار و از دست رفتن H₂O و سایر گونه‌های فرار در سامانه‌های باز منجر می‌شود و به تقسیم‌بندی شدید نمک در فاز مایع منجر شده و میزان شوری در مایع باقی‌مانده افزایش می‌یابد (Wilkinson, 2001). رخداد جوشش ثانویه در رگه‌های کوارتز \pm کالکوپیریت \pm پیریت

ماگمایی و جوی را نشان می‌دهد. این فرایند به شکل گیری رگه‌های کوارتز پیریت \pm سریسیت \pm و کوارتز \pm آلکالی فلدسپار \pm پیریت منجر شده است.

حمل و ته‌نشست فلزها

فلزها اغلب به صورت کمپلکس در سیالات گرمایی حمل می‌شوند (Roedder, 1971; Williams-Jones, and Heinrich, 2005). کمپلکس‌های سولفیدی هنگامی که مقدار سولفور در سامانه‌های ماگمایی - گرمایی غالب است، در دما و شوری پایین تری حامل اصلی فلزها محسوب می‌شوند. جابه‌جایی فلزها در دمای بالا توسط کمپلکس‌های کلروری در سیالات آبدار شور و چگال صورت می‌گیرد (Ulrich and Mavorogenes, 2008). بر اساس بررسی‌ها، در طی جوشش یا جدایش فاز بخار - مایع در سامانه‌های ماگمایی - گرمایی غنی از گوگرد، عنصر مس تمایل بیشتری برای ورود به فاز بخار ماگمای با شوری پایین نسبت به شورا به نشان می‌دهد (Seo and Heinrich, 2013; Lerchbaumer and Audéat, 2012). یک شاهد تأییدکننده حمل فلزها توسط فاز بخار در سامانه‌های پورفیری، حضور میان‌بارهای سیال گازی حاوی کالکوپیریت است (Wang et al., 2018). از طرفی، سولفورها با ترکیب H_2S به درون فاز بخار وارد می‌شوند، بنابراین میان‌بارهای بخار مس بیشتری را نسبت به شورا به دست می‌آورند (Zhang et al., 2019). با این حال، ممکن است مس بعد از به دام افتادگی در میان‌بارهای سیال در اثر انحلال جزئی مشاهده نشود (Wang et al., 2018).

در کانسار کوه اسفند میان‌بارهای سیال غنی از گاز حاوی کانی کالکوپیریت به ندرت حضور دارند، بنابراین می‌توان گفت در این کانسار احتمالاً فاز شورا به عامل اصلی انتقال فلز مس بوده است.

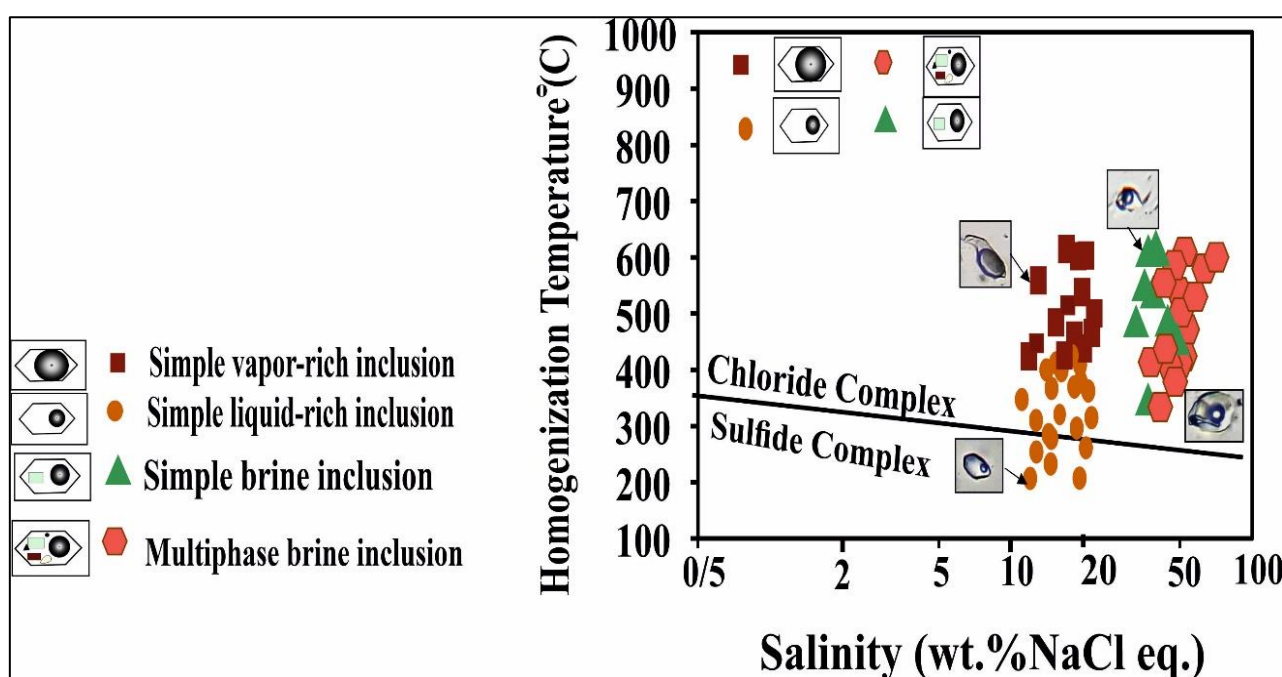
لذا بر اساس نمودار دمای همگن‌شدگی - شوری (Large et al., 1988) (شکل ۲۴)، کمپلکس‌های کلریدی بر کمپلکس‌های سولفیدی غالب بوده و عامل اصلی انتقال مس در سیالات گرمایی کانسار کوه اسفند محسوب می‌شوند.

Rose, 1980; Shelton, 1983; Asadi et al., 2012; Zarasvandi et al., 2013) و یا از طریق خروج از ماگمایی که پس از رهاسازی سیال با شوری بالا از کلر تهی شده‌اند، تولید شود (Cline and Bodnar, 1991). بر اساس نمودار دمای همگن‌شدگی - شوری (Wilkinson, 2001) (شکل ۲۱-A)، کاهش شوری برای هر نوع از میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع ساده منطقه کوه اسفند به علت فرایند اختلاط آب‌های ماگمایی با آب‌های جوی رقیق‌تر سازگاری بیشتری دارند. در واقع، میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع دارای محدوده دمایی نزدیک به هم و با شوری متفاوت می‌تواند گویای اختلاط سیالات گرمایی مختلف باشد (Taghipour, 2007). به بیان زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2013)، میان‌بارهای سیال با شوری بالا نشان‌دهنده سیال گرمایی اولیه قبل از رخداد جوشش و یا در حین جوشش در دماهای بالا هستند و میان‌بارهای سیال با شوری پایین نشان‌دهنده اختلاط سیالی اولیه با سیال با شوری دمای پایین است. طبق نمودار شکل ۲۱-A، طیف گسترده دما همراه با تغییرات یکنواخت شوری ناشی از هم‌جواری میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از گاز و غنی از مایع می‌توان فرایندهای رقیق‌شدگی (اختلاط آب جوی و ماگمایی) همراه با کاهش دما و کاهش فشار را مسئول تحولات ایجاد شده در سیال دانست. از طرفی، تغییرات در میزان شوری به احتمال زیاد توسط اختلاط سیال کنترل می‌شود. در واقع، ماهیت شوری سیال با اضافه کردن یا حذف آب یا اختلاط با محلول با شوری کمتر یا بیشتر تغییر می‌کند. بنابراین اندازه‌گیری میزان شوری برای استنباط حضور دو سیال و میزان اختلاط بسیار مفید است (Wilkinson, 2001).

هجوم احتمالی آب‌های جوی باعث رقیق شدن سیالات شور ماگمایی و تسریع روند سرد شدن می‌شود و همچنین به ایجاد سیالات گرمایی تأخیری با شوری بین ۱ تا ۱۰ درصد شوری معادل نمک طعام منجر می‌شود (Bodnar et al., 2014). مسیر تکاملی ۳ در نمودار دمای همگن‌شدگی - شوری (شکل ۲۱-B)، میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از گاز ساده و غنی از مایع ساده روند اختلاط آب

اصولی اشاره به شرایط اکسیدی سیال (Zarasvandi et al., 2019) و حضور سولفور به شکل SO_4 به جای H_2S دارد. در نهایت کاهش دمای سیال در نتیجه رقیق‌شدگی سیالات کانه‌دار شور (Ulrich et al., 2001) و فرایند جوشش باعث ناپایدار شدن کمپلکس کلریدی و ته‌نشینی کانه‌ها می‌شوند (Thiersch et al., 1997).

حضور کالکوپیریت به عنوان کانی دختر در میان‌بارهای سیال شور چندفازی و به ندرت در میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از گاز ساده، نشان‌دهنده حمل و ته‌نشست مس توسط سیال است (Nateghi and Hezarkhani, 2013; Avalos and Avalos, 2023). حضور هماتیت، انیدریت، مگنتیت و سیلویت در میان‌بارهای سیال به ویژه در میان‌بارهای مرحله پیش از کانی‌سازی



شکل ۲۴. نمودار دمای همگن‌شدگی - شوری (Large et al., 1988)، برای تعیین کمپلکس احتمالی برای حمل فلزهای کانسار کوه اسفند

Fig. 24. The homogenization temperature - salinity diagram (Large et al., 1988) is used to determine the probable complex for the transport of metal in the Kuh-e-Esfand deposit

کانسار مس کوه اسفند از نظر ویژگی‌های شاخص زمین‌شناسی، دگرسانی، کانه‌زایی به ویژه ویژگی‌های ریزدماسنجی شوری، دما و همچنین عمق نهشت کانسار با برخی از کانسارهای مس پورفیری بر روی کمر بند ماگمایی کرمان از جمله کانسارهای پرعیار سرچشمه و میدوک و همچنین کانسارهای کم‌عیارتر ایجو، سرکوه و پرکام مطابقت دارد (جدول ۲).

مقایسه کانسار مس کوه اسفند با سایر کانسارهای مس در کمر بند ماگمایی کرمان

بررسی‌های فراوانی در زمینه ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال مرتبط با کانسارهای مس پورفیری انجام شده است (Mohammadi, Qaqab and Taghipour, 2011; Maanijou et al., 2012; Habibi and Hezarkhani, 2013; Zarasvandi et al., 2013; Goleatan et al., 2017; Malekshahi et al., 2023)

جدول ۲. مقایسه کانسار مس کوه اسفند با برخی از کانسارهای مس پورفیری بر روی کمربند ماگمایی کرمان

Table 2. Comparison of Kuh-e- Esfand copper deposit with some porphyry copper deposits on the Kerman magmatic belt

Indicator properties	Kuh-e-Esafand	Sarcheshmeh	Meyduk	Sarkuh	Ijo	Parkam
Cu grade (wt %)	0.23	0.64	0.82	0.26	0.31	0.16
Host rock	Diorite, Quartzdiorite	Granodiorite, Quartzmonzonite	Diorite, Quartzdiorite, Granodiorite	Granite, Granodiorite	Quartzdiorite, Granodiorite to Granite	Diorite, Microdiorite, Quartzdiorite
Ore minerals	Py, Cpy, Mag, Mo	Cpy, Py, Mo, Bn	Cpy, Py, Mag, Mo	Py, Cpy, Bn, Cc, Sp, Jar	Py, Cpy, Mo, Mag	Cpy, Py, Mag
Alteration	Potassic, Qz-Ser-Afs-Chl, Phyllic, Argillic, Propylitic	Potassic, Propylitic, Phyllic, Argillic	Potassic rich of mag, Potassic, Potassic-Phyllic, Propylitic, Phyllic, Argillic	Potassic, Potassic-Phyllic, Phyllic-Argillic	Potassic, Potassic-Phyllic, Phyllic, Propylitic, Argillic	Potassic, Biotitic, Potassic-Phyllic, Phyllic, Argillic, Propylitic
Fluid source	Magmatic-Metoric	Magmatic-Metoric	Magmatic-Metoric	Magmatic-Metoric	Magmatic-Metoric	Magmatic-Metoric
Temperature (°C)	290-598	144-464	276-482	132-527	*142-480	187-505
Salinity (wt.% NaCl eq.)	11-70	2.9-57.1	9.39-56	*4.7-52.9	*0.18-52.99	1-59
Depth (km)	1.4	4.75	2.51	0.85	*3.5	2.3
Pressure (bar)	215-603		400-700	232-300	500-700	500-700
References	Current study	(Waterman and Hamilton, 1975; Maanijou et al., 2012)	(Taghipour, 2007)	(Zaravandi et al., 2020; *Malekshahi et al., 2023)	(Aghazadeh et al., 2015; *Golestani et al., 2017)	(Mohammadi Qaqab and Taghipour, 2011)

نتیجه گیری

- میزان اصلی کانی سازی مس در کانسار کوه اسفند، توده دیوریتی و کوارتز دیوریتی است. بیشتر کانی سازی به صورت افشان و چندین نسل از رگه- رگچه ها هستند. مرحله اصلی کانی سازی مرتبط با دگرسانی پتاسیک و همچنین دگرسانی کوارتز- سریسیت- آلکالی فلدسپار- کلریت در بخش های عمیق تر از دگرسانی پتاسیک همراه با کانی سازی غالب از مگنتیت و پیریت و به میزان کمتر کالکوپیریت و مولیدنیت هستند.

- مرحله کانی سازی اولیه به طور عمده شامل رگه های کوارتز ± کالکوپیریت ± مگنتیت ± پیریت است. با تغییرات فشار از لیتواستاتیک تا هیدرواستاتیک؛ احتمالاً مقدار وسیعی از کانی سازی در مرحله اصلی کانی سازی مس و به طور کمتر مولیدن با حضور رگه های کوارتز ± پیریت ± کالکوپیریت و رگه کوارتز ± پیریت ± کالکوپیریت ± مولیدنیت همراه با فراوانی قابل وجهی از میان بارهای شور چند فاز و میان بارهای دوفازی غنی از گاز همزیست رخ می دهند و شکل گیری ماده معدنی توسط فرایند جوشش سیالات آغاز می شوند. مرحله پس از کانی سازی توسط رگه کوارتز ± پیریت و رگه کوارتز ± پیریت ± سریسیت مشخص می شوند.

- بر اساس بررسی های سنگ نگاری میان بارهای سیال از نظر تعداد و فازهای درونی در قالب سه گروه اصلی و هفت گروه فرعی عبارتند از: ۱- میان بارهای سیال غنی از گاز شامل: میان بارهای سیال تک فاز گازی (V)، میان بارهای سیال دوفازی غنی از گاز ساده (VL) و میان بارهای سیال غنی از گاز همراه با فاز کدر (VLS) (کالکوپیریت، احتمالاً مگنتیت و فازهای کدر ناشناخته)، ۲- میان بارهای سیال غنی از مایع شامل: میان بارهای سیال دوفازی غنی از مایع ساده (LV) و میان بارهای سیال غنی از مایع همراه با فاز کدر (LVS) حاوی کانی کدر (کالکوپیریت و فازهای کدر ناشناخته) و ۳- میان بارهای سیال شور شامل: میان بارهای سیال سه فاز شور ساده (LVH) حاوی مایع + گاز + هالیت و میان بارهای سیال شور چند فاز (LVHS) حاوی گاز + مایع + هالیت ± هماتیت ± انیدریت ± سیلیت ± کالکوپیریت

- حضور فازهای جامد هماتیت، مگنتیت، انیدریت و سیلیت در میان بارهای سیال نشان دهنده شرایط اکسیدی سیال به ویژه در میان بارهای مرحله پیش از کانی سازی اصلی است. از طرفی حضور کالکوپیریت به عنوان کانی دختر در میان بارهای سیال شور چندفازی و یا میان بارهای دو فاز غنی از گاز می تواند نشان دهنده سیال منشأ حاوی فلز مس باشد.

- میان بارهای سیال اولیه با منشأ ماگمایی در برگیرنده میان بارهای سیال دو فاز غنی از گاز ساده با دمای همگن شدگی بالا (۳۳۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد) و شوری پایین (۱۲ تا ۲۲ درصد شوری نمک طعام) و میان بارهای سیال شور چندفازی با گستره دمایی بالا (۳۵۸ تا ۵۹۸ درجه سانتی گراد) و شوری بالا (۴۲ تا ۷۰ درصد شوری نمک طعام) و میان بارهای سیال شور ساده با گستره دمایی بالا (۲۳۰ تا ۵۹۰ درجه سانتی گراد) و شوری بالا (۳۵ تا ۶۵ درصد شوری نمک طعام) هستند. میان بارهای سیال شور چندفازی نشان دهنده نخستین سیالات تشکیل دهنده کانسار کوه اسفند محسوب می شوند و میان بارهای سیال با منشأ ماگمایی- جوی دربرگیرنده میان بارهای سیال دوفازی غنی از مایع ساده با دمای همگن شدگی و شوری پایین به ترتیب معادل (۲۹۰ تا ۴۹۰ درجه سانتی گراد) و شوری بالا (۱۱ تا ۲۰ درصد شوری نمک طعام) است. این نوع از میان بارهای سیال بیان کننده آخرین گردش سیال گرمایی و اختلاط با سیال با شوری پایین تر (سیال جوی) هستند.

- عمق کانسار کوه اسفند ۱/۷-۰/۸ کیلومتر به طور میانگین ۱/۴ کیلومتر (۱۴۰۰ متر) معادل فشار ۲۱۵ تا ۶۳۰ بار به طور میانگین ۴۱۲/۵ بار فشار هیدرواستاتیک و ۱۱۱۲ بار فشار لیتواستاتیک است. - از نظر سنگ نگاری هم یافتی میان بارهای سیال دو فاز غنی از گاز ساده به همراه میان بارهای شور چندفازی و از نظر ریزدماسنجی تغییرات در درجه حرارت و شوری سیالات که ناشی از گذر از شرایط لیتواستاتیک به هیدرواستاتیک است، شاهدهی بر رخداد جوشش است. از نظر ریزدماسنجی، روند مثبت شوری و دمای میان بارهای سیال شور ساده و چندفازی در منطقه نشان دهنده فرایند

کلریدی حامل اصلی فلز مس و ته نشست آن در شرایط مساعد منجر شده است.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

این مقاله بخشی از پروژه تحقیقاتی با شماره قرارداد ۰۰/۴۳۰۴ با بخش شرکت صنعتی گل گهر است. بدین وسیله از آقای رحیم ستوه بحرینی مدیر محترم این بخش و همکارانشان تشکر و قدردانی می شود.

جوشش و عدم اختلاط سیالات دوفازی غنی از مایع و غنی از گاز ساده و میان بارهای سیال شور ساده است و روند پراکنده دما و شوری میان بارهای دو فازی غنی از مایع و غنی از گاز ساده و همچنین کاهش شوری در میان بارهای دوفازی به علت اختلاط آب های ماگمایی با سیال با شوری کمتر است.

- در کانسار کوه اسفند میان بارهای سیال انعکاس دهنده توالی از فرایندهای مؤثر جوشش ثانویه و عدم اختلاط سیال، اختلاط سیال ماگمایی با آب های جوی و اختلاط هم دما در روند تکامل سیال گرمایی هستند. در نهایت، کاهش دما ناشی از رخداد جوشش ثانویه و اختلاط سیالات ماگمایی با سیالات جوی به ناپایداری کمپلکس

1. Pamukkale
2. Linkam
3. Olympus
4. Leitz
5. Pelean
6. A Type
7. M Type
8. B Type
9. C Type and D Type
10. L Type
11. Vapor-rich inclusion
12. Vapor inclusion
13. Simple vapor- rich inclusion
14. opaque -bearing vpor- rich inclusion
15. Liquid-rich inclusion
16. Simple liquid- rich inclusion
17. opaque -bearing liquid- rich inclusion
18. Brine inclusion
19. simple brine inclusion
20. Multiphase brine inclusion
21. Flincor

References

- Aftabi, A. and Atapour, H., 2009. Comments on Arc magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences by J. Omrani, P. Agard, H. Whitechurch, M. Bennoit, G. Prouteau, L. Jolivet. *Lithos*, 113(3–4): 844–846. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.032>
- Aghazadeh, M. 2015. Petrogenesis and U-Pb Age Dating of Intrusive Bodies in the Sarcheshmeh Deposit. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 25(97): 291–312. <https://doi.org/10.22071/gsj.2015.41516>
- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z. and Zhou, L., 2015. Temporal–spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: constraints from zircon U–Pb and molybdenite Re–Os geochronology. *Ore geology reviews*, 70: 385–406. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.003>
- Ahmad, S.N. and Rose, A.W., 1980. Fluid inclusions in porphyry and skarn ore at Santa Rita, New Mexico. *Economic Geology*, 75(2): 229–250. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.75.2.229>
- Arndt, N.T. and Ganino, C., 2012. *Metals and society: An introduction to economic geology*: Berlin. Springer-Verlag, Germany, 160 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22996-1>
- Asadi, S., Moore, F. and Fattahi, N., 2012. Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of the Jian copper deposit, SanandajSirjan metamorphic zone, Iran. *Geofluids*, 13(1): 66–81. <https://doi.org/10.1111/gfl.12013>
- Atapour, H., 2017. The exploration significance of Ag/Au, Au/Cu, Cu/Mo, (Ag× Au)/(Cu× Mo) ratios, supra-ore and sub-ore halos and fluid inclusions in porphyry deposits: a review. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 28(2): 133–146. https://jscienc.es.ut.ac.ir/article_60750.html
- Atapour, H. and Aftabi, A., 2021. Petrogeochemical evolution of calcalkaline, shoshonitic and adakitic magmatism associated with Kerman Cenozoic arc porphyry copper mineralization, southeastern Iran: A review. *Lithos*, 398–399: 106261. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106261>
- Avalos, S. and Avalos, N., 2023. Fluid inclusions technique for porphyry deposit exploration: The Rosario porphyry Cu-Mo deposit. <https://doi.org/10.31223/X5H083>
- Becker, S.P., Fall, A. and Bodnar, R.J., 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.J., 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. and Beane, R.E., 1980. Temporal and spatial variations in hydrothermal fluid characteristics during vein filling in preore cover overlying deeply buried porphyry copper-type mineralization at Red Mountain, Arizona. *Economic Geology*, 75(6): 876–893. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.75.6.876>
- Bodnar, R.J., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D. and Steele-MacInnis, M., 2014. 13.5–Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Treatise on geochemistry*, 13: 119–142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01105-0>
- Bodnar, R.J. and Vityk, M.O. 1994. Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions. In B. de Vivo and M. L. Frezzotti (Eds.), *Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications*. Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, 117–130 pp. Retrieved June 21, 2024 from <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=59d2e7af3d7f4bcbe2356849&assetKey=AS%3A545186906206209%401506994095585>
- Borisenko, A.S., 1977. Studies of salinity of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method. *Soviet Geology and Geophysics* 18: 11–19. Retrieved June 21, 2024 from <https://www.researchgate.net/publication/283688999>
- Bouzari, F. and Clark, A.H., 2006. Prograde evolution and geothermal affinities of a major porphyry copper deposit: the Cerro Colorado hypogene protore, I Región, northern Chile. *Economic Geology*, 101(1): 95–134. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.1.95>

- Brown, P.E., 1989. FLINCOR; a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. *American Mineralogist*, 74(11–12): 1390–1393. Retrieved June 21, 2024 from <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/74/11-12/1390/42220/>
- Cline, J.S. and Bodnar, R.J., 1991. Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B5): 8113–8126. <https://doi.org/10.1029/91JB00053>
- Cline, J.S. and Bodnar, R.J., 1994. Direct evolution of brine from a crystallizing silicic melt at the Questa, New Mexico, molybdenum deposit. *Economic Geology*, 89(8): 1780–1802. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.8.1780>
- Conrad, G., Conrad, J. and Girod, M., 1977. Les formations continentales tertiaires et quaternaires du bloc Lout Iran. Importance du plutonisme et du volcanisme. *Memoirs of the Historical Series of the Geological Society France*, 8: 53–75. Retrieved June 21, 2024 from <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCALGEODEBRGM7720435244>
- Crespo, J., Reich, M., Barra, F., Verdugo, J.J., Martínez, C., Leisen, M., Romero, R., Morata, D. and Marquardt, C., 2020. Occurrence and distribution of silver in the world-class Río Blanco Porphyry Cu-Mo deposit, central Chile. *Economic Geology*, 115(8): 1619–1644. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4778>
- Cunningham, C.G., 1978. Pressure gradients and boiling as mechanisms for localizing ore in porphyry systems. *Research United States Geological Survey*, 6(6): 745–754.
- Dimitrijevic, M.D. 1973. *Geology of Kerman Region*. Institute for Geological and Mining Exploration and Investigation of Nuclear and Other Mineral Raw Materials, Belgrade. Geological Survey of Iran, Report Yu/52. 334 pp. Retrieved June 21, 2024 from <https://search.worldcat.org/title/geology-of-kerman-region/oclc/8699834>
- Drummond, S.E. and Ohmoto, H., 1985. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology*, 80(1): 126–147. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.1.126>
- Fournier, R.O., 1987. Conceptual models of brine evolution in magmatic-hydrothermal systems. U.S. Geological Survey Professional Paper. 1350: 1487–1505. Retrieved June 21, 2024 from https://pubs.usgs.gov/pp/1987/1350/pdf/chapters/pp1350_ch55.pdf
- Goldstein, R.H., 2003. Petrographic analysis of fluid inclusions. In: Samson, I., Anderson, A. and Marshall, D (Editors), *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook, pp. 32–53. Retrieved June 21, 2024 from <https://pubs.geoscienceworld.org/mac/books/edited-volume/2433/chapter-abstract/135797493/PETROGRAPHIC-ANALYSIS-OF-FLUID-INCLUSIONS?redirectedFrom=fulltext>
- Golestani, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Haidarian Shahri, M.R. 2017. Characterization of fluid inclusions and sulfur isotopes in the Iju porphyry copper deposit, North West of Shahr-e-Babak. *Journal of Economic Geology*, 9(1): 25–55. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v9i1.60709>
- Habibi, T. and Hezarkhani, A., 2013. Hydrothermal evolution of Daraloo porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusions. *Arabian Journal of Geosciences*, 6: 1945–1955. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0488-z>
- Hassanzadeh, J., 1993. *Metallogenic and Tectonomagmatic Events in the SE Sector of the Cenozoic Active Continental Margin of Central Iran (Shahr e Babak area, Kerman Province)*. Ph.D. Thesis, University of California, Los Angeles, United States of America, 204 pp.
- Hezarkhani, A., 2009. Hydrothermal fluid geochemistry at the Chah-Firuzeh porphyry copper deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(3): 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.09.002>
- Hosseinzadeh, M., Maghfouri, S., Ghorbani, M. and Moayyed, M., 2016. Different types of vein-veinlets related to mineralization and fluid inclusion studies in the Sonajil porphyry Cu-Mo deposit, Arasbaran magmatic zone. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 26(101): 219–230. <https://doi.org/10.22071/gsj.2016.41069>

- Ioannou, S.E., Spooner, E.T.C. and Barrie, C.T., 2007. Fluid temperature and salinity characteristics of the Matagami volcanogenic massive sulfide district, Quebec. *Economic Geology*, 102(4): 691–715.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.691>
- John, D.A. and Taylor, R.D., 2016. By-products of porphyry copper and molybdenum deposits. Society of Economic Geologists, Inc. *Reviews in Economic Geology*, 18: 137–164.
<https://doi.org/10.5382/Rev.18.07>
- Kesler, S.E., 2005. Ore-forming fluids. *Elements*, 1 (1): 13–18.
<https://doi.org/10.2113/gselements.1.1.13>
- Khosravi, M., Rajabzadeh, M.A., Mernagh, T.P., Qin, K., Bagheri, H. and Su, S., 2020. Origin of the ore-forming fluids of the Zefreh porphyry Cu–Mo prospect, central Iran: Constraints from fluid inclusions and sulfur isotopes. *Ore Geology Reviews*, 127: 103876.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103876>
- Large, R.R., Bull, S.W., Cooke, D.R. and McGoldrick, P.J. 1998. A genetic model for the HYC Deposit, Australia; based on regional sedimentology, geochemistry, and sulfide-sediment relationships. *Economic Geology*, 93(8): 1345–1368.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.8.1345>
- Lerchbaumer, L. and Audétat, A., 2012. High Cu concentrations in vapor-type fluid inclusions: An artifact? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 88: 255–274.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.04.033>
- Maanijou, M., Mostaghimi, M., Abdollahi Riseh, M. and Sepahi, A. A. 2012. Systematic sulfur stable isotope and fluid inclusion studies on veinlet groups in the Sarcheshmeh porphyry copper deposit: based on new data. *Journal of Economic Geology*, 4(2): 217–239. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v4i2.16492>
- Maanijou, M., Mostaghimi, M., Abdollahy Riseh, M. and Sepahi, A. A., 2020. Petrology and tectonic settings of the Sarcheshmeh porphyry copper deposit with emphasis on granodiorite and quartz eye porphyry. *Journal of Economic Geology*, 12(3): 269–297. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v12i3.80951>
- Maanijou, M., Mostaghimi, M., Riseh, M.A., Lentz, D.R. and Sepahi Gerow, A.A., 2022. Petrology and geochemistry of adakitic intrusions and dykes at Sarcheshmeh porphyry Cu-Mo±Au deposit, Iran: Insights into their source. *Resource Geology*, 72(1): 12297.
<https://doi.org/10.1111/rge.12297>
- Malekshahi, S., Khalajmasoumi, M., Mohammad-Doost, H., Sojdehee, M. and Aboutorab, S., 2023. Study of Alterations, fluid inclusions and sulfur and oxygen isotope compositions in Sarkuh porphyry copper deposit, Kerman. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 33(3): 159–182.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2023.363665.2033>
- McQuarrie, N., Stock, J.M., Verdel, C. and Wernicke, B.P., 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. *Geophysical research letters*, 30(20).
<https://doi.org/10.1029/2003GL017992>
- McQuarrie, N. and van Hinsbergen, D.J., 2013. Retrodeforming the Arabia-Eurasia collision zone: Age of collision versus magnitude of continental subduction. *Geology*, 41(3): 315–318. <https://doi.org/10.1130/G33591.1>
- Mohammadi Qaqab, H. and Taghipour, N., 2011. Physico-chemical evolution of hydrothermal fluid in Sara porphyry copper deposit (Percom), Kerman province. *Advanced Applied Geology*, 1(1): 11–24. (in Persian with English abstract) Retrieved June 21, 2024 from https://aag.scu.ac.ir/article_11540.html?lang=en
- Nateghi, A. and Hezarkhani, A., 2013. Fluid inclusion evidence for hydrothermal fluid evolution in the Darreh-Zar porphyry copper deposit, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73: 240–251.
<https://doi.org/10.1016/j.jseae.2013.04.037>
- Natghi, A. and Ghorbani Shadpi, R., 2015. The application of fluid inclusions in the exploration of deposits: a case study in the exploration area of Hamza Dareh, The first specialized and national conference on the application of fluids involved in earth sciences, Zanjan, Iran. Retrieved June 21, 2024 from <https://civilica.com/doc/421248>
- Rahmani, H. and Ghorbani, M., 2023. Geology, mineralization, sulfur isotope and fluid inclusion studies in alteration zones in Cu-Au-Mo south of Zahedan porphyry prospect (SE Iran). *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 57(3): 283–298. Retrieved June 21,

- 2024 from
https://ijmge.ut.ac.ir/article_92580.html
- Rasoli, J., Ghorbani, M. and Ahadinegad, V. 2017. The U-Pb dating of Jebale Barez plutonic complex: Evidence for the Old Iranian basement in the SE of Urumieh-Dokhtar magmatic zone. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 25(2): 245–258. Retrieved June 21, 2024 from <http://ijcm.ir/article-1-788-en.html>
- Roedder, E., 1971. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado. *Economic Geology*, 66(1): 98–118. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.1.98>
- Roedder, E., 1972. Composition of fluid inclusions. U.S. Geological Survey Professional Paper, Washington, Report 440, 163 pp. <https://doi.org/10.3113/pp440JJ>
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. De Gruyter, Berlin, Boston. 644 pp. <https://doi.org/10.1515/9781501508271>
- Rusk, B.G., Reed, M.H. and Dilles, J.H., 2008. Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, Montana. *Economic Geology*, 103(2): 307–334. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.2.307>
- Seo, J.H. and Heinrich, C.A., 2013. Selective copper diffusion into quartz-hosted vapor inclusions: Evidence from other host minerals, driving forces, and consequences for Cu–Au ore formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 113: 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.03.016>
- Shafiei, B., Haschke, M. and Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita*, 44: 265–283. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-008-0216-0>
- Shelton, K.L., 1983. Composition and origin of ore-forming fluids in a carbonate-hosted porphyry copper and skarn deposit, a fluid inclusion and stable isotope study of Mines Gaspé Quebec. *Economic Geology*, 78(8): 387–421. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.3.387>
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M. 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, New York. Retrieved June 21, 2024 from <https://search.worldcat.org/title/12082734>
- Siivola, J. and Schmid, R., 2007. List of Mineral Abbreviations: Recommendations by the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks: Web version 01.02.07. (Electronic Source), Retrieved June 21, 2024 from <https://www.B2n.ir/f95089>
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic geology*, 105(1): 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Singer, D.A., Berger, V.I. and Moring, B.C., 2002. Porphyry copper deposits of the world: Database, maps, and preliminary analysis, US Geological Survey, Report 02-268. Retrieved June 21, 2024 from <https://pubs.usgs.gov/of/2002/0268/pdf/of02-268.pdf>
- Singer, D.A., Berger, V.I. and Moring, B.C., 2008. Porphyry copper deposits of the world: Database and grade and tonnage models, US Geological Survey, Washington, 2008(2008-1155), 46 pp. US Geological Survey. Retrieved June 21, 2024 from <https://pubs.usgs.gov/of/2008/1155/of2008-1155.pdf>
- Taghipour, N., 2007. The Application of Fluid Inclusions and Isotope Geochemistry as Guides for Exploration, Alteration and Mineralization at the Miduk Porphyry Copper Deposit, Shar-e-Babak, Kerman. Unpublished Ph.D. thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, 305 pp.
- Taghipour, N., Asgari, Gh., Dorani, M. and Mortezaezhad, Gh. R., 2020. Conducting prospecting and general exploration services in the northern and southern areas of the Bam exploration Block, Kerman Province, Iran, University of Damghan, University of Damghan, Report 112, 337 pp. Unpublished report.
- Thiersch, P.C., Williams-Jones, A.E. and Clark, J.R., 1997. Epithermal mineralization and ore controls of the Shasta Au-Ag deposit, Toodoggone district, British Columbia, Canada. *Mineralium Deposita*, 32: 44–57. <https://doi.org/10.1007/s001260050071>
- Ulrich, T., Günther, D. and Heinrich, C.A., 2001. The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*, 96(8): 1743–1774. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1743>

- Ulrich, T. and Mavrogenes, J., 2008. An experimental study of the solubility of molybdenum in H₂O and KCl–H₂O solutions from 500 C to 800 C, and 150 to 300 MPa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(9): 316–2330.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.02.014>
- Van den Kerkhof, A.M. and Hein, U.F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1–4): 27–47.
[https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00037-2)
- Wang, Y., Chen, H., Xiao, B., Han, J., Fang, J., Yang, J. and Jourdan, F., 2018. Overprinting mineralization in the Paleozoic Yandong porphyry copper deposit, Eastern Tianshan, NW China—Evidence from geology, fluid inclusions and geochronology. *Ore Geology Reviews*, 100: 148–167.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.013>
- Wang, R., Zhu, D., Wang, Q., Hou, Z., Yang, Z., Zhao, Z. and Mo, X., 2020. Porphyry mineralization in the Tethyan orogen. *Science China Earth Sciences*, 63: 2042–2067. <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9609-0>
- Waterman, G.C. and Hamilton, R.L., 1975. The Sar Cheshmeh porphyry copper deposit. *Economic Geology*, 70(3): 568–576.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.3.568>
- Wilkinson, J.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-Jones, A.E. and Heinrich, C.A., 2005. 100th Anniversary special paper: vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 100(7): 1287–1312.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.7.1287>
- Zajacz, Z., Candela, P.A. and Piccoli, P.M., 2017. The partitioning of Cu, Au and Mo between liquid and vapor at magmatic temperatures and its implications for the genesis of magmatic-hydrothermal ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 207: 81–101.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.03.015>
- Zarasvandi, A.R., Davoodian Ranjbar, F., Rezaei, M., Tashi, M. and Pourkaseb, H., 2020. Physicochemical attributes of potassic alteration zone in Sarkuh porphyry copper deposit; using biotite and chlorite chemistry. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 29(114): 279–288.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2019.116399.1390>
- Zarasvandi, A., Liaghat, S., Lentz, D. and Hossaini, M., 2013. Characteristics of Mineralizing Fluids of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad Porphyry Copper Deposits, Central Iran, Determined by Fluid Inclusion Microthermometry. *Resource Geology*, 63(2): 188–209.
<https://doi.org/10.1111/rge.12004>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Asadi, S. and Lentz, D., 2019. Hydrothermal fluid evolution in collisional Miocene porphyry copper deposits in Iran: Insights into factors controlling metal fertility. *Ore Geology Reviews*, 105: 183–200.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.027>
- Zhang, F.F., Wang, Y.H., Xue, C.J., Liu, J.J. and Zhang, W., 2019. Fluid inclusion and isotope evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the Tuwu porphyry copper deposit, Xinjiang, NW China. *Ore Geology Reviews*, 113: 103078.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103078>
- Zhang, L., Zheng, Y. and Chen, Y., 2012. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Tiemurt Pb–Zn–Cu deposit, Altay, Xinjiang, China: a case study of orogenic-type Pb–Zn systems. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.11.019>
- Zimmerman, A., Stein, H.J., Hannah, J.L., Koželj, D., Bogdanov, K. and Berza, T. 2008. Tectonic configuration of the Apuseni–Banat–Timok–Srednogorie belt, Balkans-South Carpathians, constrained by high precision R e–O s molybdenite ages. *Mineralium Deposita*, 43: 1–21. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-007-0149-z>
- Zimmerman, A., Stein, H.J., Morgan, J.W., Markey, R.J. and Watanabe, Y. 2014. Re–Os geochronology of the El Salvador porphyry Cu–Mo deposit, Chile: tracking analytical improvements in accuracy and precision over the past decade. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 131: 13–32.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.01.016>