



Genesis of the Varmazyar Pb-Zn (Ag) occurrence, Tarom-Hashtjin metallogenic belt: Insights from ore geology, geochemistry and fluid inclusion studies

Afsaneh Ghorbani¹, Hossein Kouhestani² * , Mir Ali Asghar Mokhtari³

¹ M.Sc. Student, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

³ Associate Professor, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 03 May 2020
 Revised: 12 January 2021
 Accepted: 20 January 2021

Keywords

Epithermal mineralization
 Intermediate-sulfidation
 fluid inclusion
 Tarom-Hashtjin
 Varmazyar
 Zanjan

*Corresponding author

Hossein Kouhestani
kouhestani@znu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Varmazyar Pb–Zn (Ag) occurrence, 65 km north of Zanjan, is located in the Tarom–Hashtjin metallogenic belt (THMB). The THMB has been recognized to be one of the most important epithermal metallogenic belts in Iran (Kouhestani et al., 2018b). It hosts numerous small- to medium-sized epithermal deposits (i.e., Gulojeh, Aqkand, Aliabad–Khanchy, Chodarchay, Khalyfehlou, Chargar, Zajkan, Marshoun, Abbasabad, Zehabad, and Shah Ali Beiglou). These epithermal deposits are temporally and spatially related to late Eocene granitoids (Mehrabi et al., 2016; Kouhestani et al., 2018b).

Although the general geological characteristics of the region, where the Varmazyar occurrence is located, have been already determined (Faridi and Anvari, 2000), no detailed studies have been conducted on its mineralogy, geochemistry, and characteristics of the ore-forming fluids of the Varmazyar occurrence. In this paper, we investigate the geology, mineralogy, geochemistry, fluid inclusions, and alteration styles of the Varmazyar occurrence to constrain its ore genesis. These results may have implications for the regional exploration of epithermal deposits in the THMB.

Materials and methods

Detailed field work has been carried out at different scales in the Varmazyar area. A total of 70 samples were collected from various parts of ore veins and breccias, host tuff units and granitoid intrusion. The samples prepared for thin (n=15) and polished-thin (n=27) sections in the laboratory of the University of Zanjan, Zanjan, Iran.

How to cite this article

Ghorbani, A., Kouhestani, H. and Mokhtari, M.A.A., 2022. Genesis of the Varmazyar Pb-Zn (Ag) occurrence, Tarom-Hashtjin metallogenic belt: Insights from ore geology, geochemistry and fluid inclusion studies. *Journal of Economic Geology*, 14(1): 1–38. (in Persian with English abstract) <https://dx.doi.org/10.22067/ECONG.2021.51947.86716>



Seven representative samples from the mineralized veins and breccias, one sample from host intermediate tuff unit and one sample from barren and fresh granite intrusion, were analyzed for rare and rare earth elements using ICP-MS in the Zarazma Analytical Laboratories, Tehran, Iran.

Fluid inclusion measurements were conducted on 4 doubly polished thick (~150 μm) sections including crystalline quartz, and sphalerite from the second, and third stages of ore formation. Microthermometric measurements were performed using a Linkam THMSG-600 heating-freezing stage attached to a ZEISS microscope in the fluid inclusion laboratory of the Iranian Mineral Processing Research Center, Tehran, Iran.

Results and Discussion

The geological units hosting the Varmazyar occurrence are mainly Eocene volcanic and volcanoclastic rocks that were intruded by late Eocene granitoids. The volcanoclastic rocks can be divided into two units as acidic (lithic tuff, lithic crystal tuff and crystal tuff) and intermediate (lithic crystal tuff, crystal tuff, and lithic tuff) units. They are metamorphosed to clinopyroxene hornfels facies near contact intrusions. The granodiorite intrusion is the main rock units in the Varmazyar area. It crops out mainly in the south, southwest and northeast of the Varmazyar occurrence. It ranges in composition from monzogranite to syenogranite and shows porphyritic and granular textures.

Mineralization at Varmazyar occurs as an epithermal base metal quartz-sulfide brecciated vein that occupy NS-trending faults in the Eocene acidic and intermediate tuff units. The ore vein extends up to 300 m along, from several cm to 2–3 m wide, and generally dip steeply (65–80°) to the west. Wall-rock alterations developed at the Varmazyar occurrence include silicification, intermediate argillic, carbonate, and propylitic alteration; the first three are closely related to Pb–Zn (Ag) mineralization. The alteration styles show a systematic zonation pattern, from silica, via intermediate argillic, to propylitic alteration. Four stages of mineralization can be

distinguished at Varmazyar. Stage 1 is represented by silicification of host rocks along with minor disseminated pyrite. This stage is a pre-ore stage and it is usually crosscut by later stages. Stage 2 is the main ore-stage at the Varmazyar occurrence. It is characterized by up to 5 cm wide quartz veins and breccias that contain variable amounts of disseminated galena, sphalerite, and minor pyrite. Clasts of this stage and associated wall-rock alteration have been recognized in the hydrothermal cements of stage 3 breccias. Stage 3 is marked by quartz-calcite-manganese oxide (psilomelane, pyrolusite, braunite) veins and breccia cements. It is usually crosscut by previous mineralization stages and, in turn, is cut by stage 4 calcite veinlets. Stage 4 is a barren post-ore stage represented by < 1 mm wide calcite veinlets. This stage usually crosscuts previous ore stages. No sulfide minerals are recognized at stage 4. The ore minerals at Varmazyar have been formed as vein-veinlet and hydrothermal breccia cements, and show disseminated, vein-veinlet, brecciated, comb, crustiform, colloform, cockade, bladed, plumose, and vug infill textures. Galena, sphalerite, pyrite, psilomelane, and pyrolusite are the main ore minerals; smithsonite, cerussite, goethite, secondary pyrolusite, and braunite are supergene minerals. Quartz, calcite, and sericite are present in the gangue minerals. Comparison of Chondrite-normalized rare elements and REE patterns of host intermediate tuffs, barren and fresh granite intrusion, and the mineralized samples at Varmazyar indicate that mineralization is probably genetically related with granite intrusions. In this case, leaching of some elements from the host tuff units may have been involved in mineralization. Ore-forming fluids associated with the quartz-sulfide veins are represented by two-phase aqueous inclusions and H₂O–NaCl fluids with moderate-temperature (135–249 °C) and low-salinity (0.2–6.4 wt.% NaCl equiv.). Fluid inclusion data indicates that fluid boiling and mixing were important processes in the evolution of the ore-forming fluids at Varmazyar. Our data suggest that Varmazyar is an example of intermediate-sulfidation type of epithermal base metal mineralization.



تعیین منشأ رخداد معدنی سرب- روی (نقره) ورمزیار، کمر بند فلز زایی طارم- هشتجین: بر اساس داده‌های زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال

افسانه قربانی^۱، حسین کوهستانی^{۲*}، میر علی اصغر مختاری^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۳ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

کانه‌زایی سرب- روی (نقره) در رخداد معدنی ورمزیار به صورت رگه کوارتز- سولفیدی درون توالی توف‌های حدواسط و اسیدی ائوسن رخ داده است. گالن، اسفالریت، پیریت، پسیلوملان و پیرولولزیت، کان‌های فلزی و کوارتز، سیریسیت و کلسیت، کان‌های باطله هستند. بافت‌های کانسنگ شامل دانه پراکنده، رگه- رگچه‌ای، برشی، شان‌های، پوسته‌ای، کاکلی، پرماند، گل‌کلی، تیغه‌ای و پُرکننده فضای خالی است. چهار مرحله کان‌زایی در ورمزیار قابل تشخیص است. مرحله اول کان‌زایی با سیلیسی شدن سنگ‌های میزبان همراه با اندکی پیریت اکسیده مشخص می‌شود. مرحله دوم شامل رگه- رگچه‌های کوارتزی و برش‌های گرمابی است که حاوی مقادیر متغیری گالن و اسفالریت همراه با میزان اندکی پیریت هستند. مرحله سوم با حضور کوارتز، کلسیت و اکسیدهای منگنز (پسیلوملان، پیرولولزیت و براونیت) در رگه‌ها و سیمان گرمابی برش‌ها مشخص می‌شود. مرحله چهارم شامل رگه- رگچه‌های کربناتی تأخیری است. دگرسانی‌های گرمابی شامل سیلیسی، آرژیلیک متوسط، کربناتی و پروپیلیتیک است. شباهت الگوهای بهنجار شده عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای نمونه‌های کان‌دار و نمونه‌های گرانیتی و توف‌های حدواسط، بیانگر ارتباط سیالات کان‌ی ساز با توده گرانیتی و مشتق شدن آنها از این توده و همچنین شسته شدن عناصر از واحدهای توفی منطقه است. بر اساس داده‌های ریزدماسنجی، سیالات مسئول کان‌زایی در ورمزیار، سامانه‌ای H₂O-NaCl با دمای متوسط (۱۳۵ تا ۲۴۹ درجه سانتی‌گراد)، شوری پایین (۰/۲ تا ۶/۴ درصد وزنی معادل نمک طعام) و چگالی پایین (۰/۸ تا ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بوده است. بر اساس این داده‌ها، روند تکامل سیال کان‌ساز با فرایندهای اختلاط سیالات و جوشش سیال همخوانی دارد. ویژگی‌های رخداد معدنی ورمزیار با کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه (نقره) نوع سولفیداسیون حدواسط قابل مقایسه است.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۱

واژه‌های کلیدی

کانه‌زایی اپی‌ترمال
سولفیداسیون حدواسط
میان‌بار سیال
طارم- هشتجین
ورمزیار
زنجان

نویسنده مسئول

حسین کوهستانی
kouhestani@znu.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

قربانی، افسانه؛ کوهستانی، حسین و مختاری، میر علی اصغر، ۱۴۰۱. تعیین منشأ رخداد معدنی سرب- روی (نقره) ورمزیار، کمر بند فلز زایی طارم- هشتجین: بر اساس داده‌های زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴(۱): ۳۸-۱. <https://dx.doi.org/10.22067/ECONG.2021.51947.86716>

مقدمه

رابطه با اکتشاف سرب و روی توسط بخش خصوصی است که توسط کریم‌پولی (Karimpouli, 2017) جمع‌بندی شده است. در این پژوهش‌ها، به نوع کانه‌زایی و سازوکار تشکیل آن توجه چندانی نشده است. در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمیایی و میان‌بارهای سیال در رخداد معدنی ورمزیار مورد بررسی قرار گرفته و نوع کانه‌زایی و خاستگاه آن تعیین شده است. بررسی دقیق این نوع کانه‌زایی‌ها می‌تواند عوامل کلیدی توزیع زمانی و مکانی برای اکتشاف کانه‌زایی‌های مشابه در این بخش از کمربند فلززایی طارم- هشتجین را معرفی کرده و به عنوان الگوی اکتشافی مورد استفاده قرار گیرد.

روش مطالعه

این پژوهش شامل دو بخش بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی است. در بررسی‌های صحرایی، نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰ منطقه تهیه و چگونگی ارتباط رگه‌های کانه‌دار با سنگ‌های میزبان مشخص شد. در این راستا، ۷۰ نمونه از واحدهای سنگی و رخنمون‌های کانه‌زایی برداشت شد. سپس، تعداد ۱۵ مقطع نازک و ۲۷ مقطع نازک- صیقلی برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت، تهیه و مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد، برای انجام بررسی‌های زمین‌شیمیایی، تعداد ۱ نمونه از توف حدواسط میزبان، ۱ نمونه از توده گرانیتی و ۷ نمونه از بخش‌های کانه‌دار انتخاب شد. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها توسط سنگ‌شکن تا اندازه حدود ۵ مش (۴ میلی‌متر) خرد شده و سپس با استفاده از آگات به مدت ۲ دقیقه تا اندازه حدود ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر شدند. پس از آماده‌سازی، میزان ۲۰ گرم از پودر نمونه‌ها برای تعیین میزان عناصر کمیاب و کمیاب خاکی به روش ICP-MS آزمایشگاه شرکت زرآزما در تهران، ارسال و مورد تجزیه قرار گرفت. برای تعیین میزان عناصر کمیاب خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه در لیتیم متابورات/تترابورات ذوب و سپس در اسید نیتریک حل شد. برای تعیین میزان فلزات پایه، به صورت جداگانه حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه در تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه سانتی‌گراد) حل شد. حد پایین دقت اندازه‌گیری برای عناصر مختلف در جدول ۱ ذکر شده است.

رخداد معدنی سرب- روی (نقره) ورمزیار در فاصله ۶۵ کیلومتری شمال زنجان واقع شده و بخشی از کمربند فلززایی طارم- هشتجین (Kouhestani et al., 2018b; Kouhestani et al., 2019a;) (Kouhestani et al., 2019b) در پهنه البرز باختری- آذربایجان (Nabavi, 1976) است (شکل ۱- A). این کمربند، یکی از مناطق مهم ایران از نظر فلززایی و کانی‌سازی بوده و میزبان انواع مهمی از کانه‌زایی‌های فلزی آهن، مس، سرب، روی و طلاست. از کانسارها و رخدادهای معدنی مهم موجود در این کمربند، می‌توان به کانسارهای آهن مروارید، سرخه‌دیزج، ذاکر و گلستان‌آباد (Nabatian et al., 2007; Khanmohammadi et al., 2009; Nabatian and Ghaderi, 2013; Nabatian et al., Mehrabi et al., 2010; Mehrabi et al., 2014;) (Mehrabi et al., 2016; Ghasemi Siani et al., 2015) مس- سرب- روی زاجکان (Kouhestani et al., 2019a)، مرشون (Kouhestani et al., 2019b)، عباس‌آباد (Kouhestani et al., 2020)، مس علی‌آباد- خان‌چای (Kouhestani et al., 2018b; Mokhtari et al., 2016) و آق‌کند (Feizi et al., 2016; Kouhestani et al., 2017)، مس- طلای لوبین- زرده (Zamanian et al., 2019;) (Zamanian et al., 2020)، رشت‌آباد (Khakzad and Hajalilou, 1999; Kouhestani et al., 2018a) خلیفه‌لو (Esmaeli et al., 2015; Hosseinzadeh et al., 2016) چرگر (Mousavi Motlagh and Ghaderi, 2019;) (Mousavi Motlagh et al., 2019) و شمال چرگر (Naderlou et al., 2021) و سرب- روی (مس) باریک‌آب (Bazargani-Guilani and Parchekani, 2011) اشاره کرد.

بررسی‌های قبلی انجام شده در منطقه ورمزیار شامل تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش بندر انزلی (Davies, 1977) و ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه هشتجین (Faridi and Anvari, 2000) و همچنین فعالیت‌های اکتشافی موضوعی در

بوده و کانی‌های اصلی آنها شامل درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن‌های اکتینولیتی‌شده و کانی‌های مافیک (احتمالاً آمفیبول) جانشین‌شده توسط اکتینولیت، کلسیت و کانی‌های کدر هستند. برخی از بلورهای پلاژیوکلاز دارای گوشه‌های تیز و شکسته هستند که این امر نشان‌دهنده ماهیت آذرآواری توف‌های بلورین است. میان‌لایه‌های بازالتی به رنگ خاکستری تیره بوده و بافت پورفیری متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در زمینه‌ای دانه‌ریز از پیروکسن و پلاژیوکلاز و اغلب کانی کدر را نشان می‌دهند. میان‌لایه‌های آندزیتی شامل درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک هستند.

توف‌های اسیدی (E^{12}): این واحد در بخش‌های شمالی منطقه ورمزیار و در اطراف روستای حاج‌سیران رخمون داشته (شکل ۲-A و B) و متشکل از مجموعه توف سنگی و خاکستر توف با ترکیب اسیدی با میان‌لایه‌هایی از گدازه‌های ریوداسیتی است. روند عمومی واحد E^{12} ، خاوری-باختری و شیب آن به سمت شمال است. بخش کوچکی از کلنه‌زایی سرب و روی منطقه در داخل این واحد قرار دارد. با توجه به ماهیت خاکستر توفی و توف سنگی، نمونه‌ای از این واحد برای بررسی سنگ‌شناسی برداشت نشده است؛ اما بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده بر روی میان‌لایه‌های گدازه‌های ریوداسیتی آن نشان می‌دهد که این گدازه‌ها دارای بافت پورفیری با درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، کوارتز و کانی‌های مافیک دگرسان‌شده در زمینه‌ای دانه‌ریز هستند.

توده گرانیتوئیدی (gr): این توده گرانیتوئیدی یکی از مهم‌ترین واحدهای سنگی در منطقه مورد بررسی است که در بخش‌های شمالی با عنوان گرانیت حاج‌سیران و در بخش‌های خاوری و جنوبی با عنوان گرانیت ورمزیار معروف بوده و به‌عنوان سنگ نما در حال استخراج است. در نتیجه نفوذ این توده به داخل توالی آتشفشانی-رسوبی ائوسن، هاله دگرگونی هورنفلسی (پیروکسن هورنفلس) در مرز همبری حاصل شده است (شکل ۲-A و B). آپوفیزهای کوچکی از توده گرانیتوئیدی با بافت میکروگرانولار تا پورفیری در مجاورت رگه کانه‌دار رخمون دارد. نمونه‌های برداشت‌شده از این آپوفیزها بیانگر ترکیب گرانیتی (مونزوگرانیت و سینوگرانیت) است. سینوگرانیت‌ها در نمونه دستی به

برای تعیین ویژگی‌های دما، فشار و شوری سیالات مسئول کانه‌زایی و دگرسانی، تعداد ۴ نمونه از رگه‌ها و برش‌های کانه‌دار برای انجام بررسی‌های میان‌بارهای سیال انتخاب و در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران در کرج بررسی شد. بررسی‌های ریزدماسنجی با استفاده از دستگاه Linkam THMSG-600 متصل به میکروسکوپ ZEISS در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران در کرج انجام شد. دامنه حرارتی دستگاه ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است. کالیبراسیون دستگاه در مرحله گرمایش با دقت $\pm 0/6$ درجه سانتی‌گراد است که با نیترات سزیم با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد و در مرحله سرمایش با دقت $\pm 0/2$ درجه سانتی‌گراد و با ماده استاندارد ان‌هگزان با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتی‌گراد انجام شده است. میزان شوری به‌صورت معادل درصد وزنی نمک طعام (wt.% NaCl) و از طریق دمای ذوب آخرین قطعه یخ با استفاده از فرمول ارائه‌شده توسط بودنار (Bodnar, 1993) محاسبه شده است.

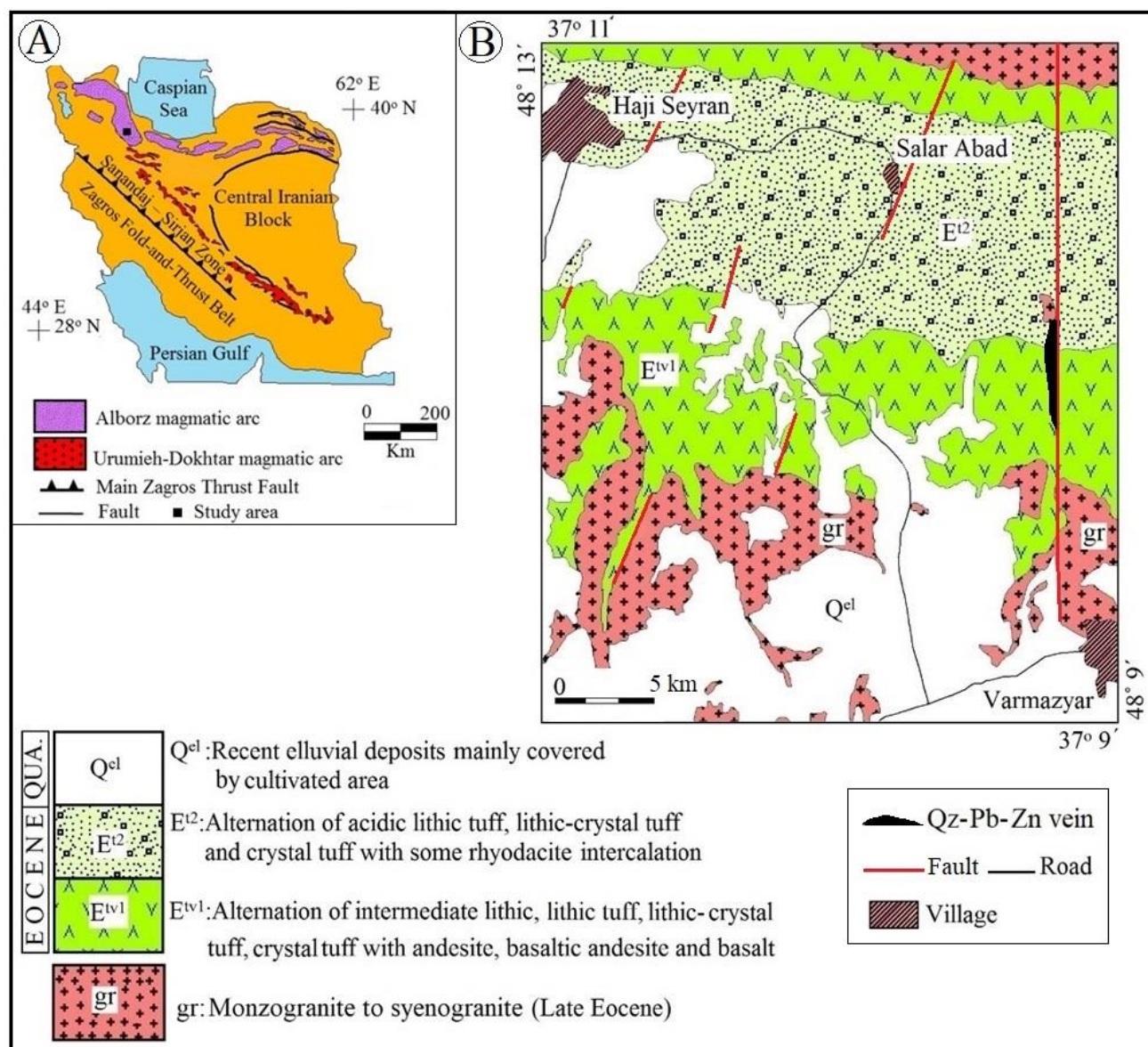
زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه ورمزیار

با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه هشتجین (Faridi and Anvari, 2000) و بر اساس بررسی‌های صحرائی انجام‌شده در قالب تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ منطقه ورمزیار (شکل ۱-B)، واحدهای سنگی موجود در این منطقه شامل سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی ائوسن هستند که توسط توده نفوذی با ترکیب گرانیتی به سن ائوسن بالایی (Ghasemi Siani et al., 2015) مورد هجوم قرار گرفته‌اند. زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی این واحدها به شرح زیر است:

توف‌های حدواسط (E^{IV}): این واحد که میزبان بخش عمده‌ای از کانه‌زایی سرب و روی منطقه ورمزیار است، دربرگیرنده تناوب لایه‌های توف سنگی بلورین، توف بلورین و توف سنگی حدواسط به همراه میان‌لایه‌های گدازه‌های آندزیتی، آندزیت بازالتی و بازالتی است. نفوذ توده گرانیتوئیدی ورمزیار (حاج‌سیران) به داخل این سنگ‌ها موجب دگرگونی مجاورتی در مرز بدون فاصله توده گرانیتوئیدی شده که با رنگ تیره‌تر و ریخت‌شناسی صخره‌سازتر نسبت به بخش‌های دیگر این واحد قابل مشاهده هستند (شکل ۲-A و B). بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، توف‌های بلورین دارای بافت‌های پورفیر و کلاستیک

به‌عنوان کانی‌های فرعی هستند. بافت این سنگ‌ها از نوع پورفیروئیدی، میکروگرانولار و هتروگرانولار است. مونزوگرانیت‌ها در نمونه دستی دانه‌متوسط بوده و دارای رنگ روشن و بیوتیت کمتری هستند.

رنگ خاکستری روشن دیده شده و دارای بافت پورفیری و گرانولار هستند. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، این سنگ‌ها دارای درشت‌بلورهای آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت و هورنبلند به عنوان کانی‌های اصلی و زیرکن، آپاتیت و کانی‌های کدر

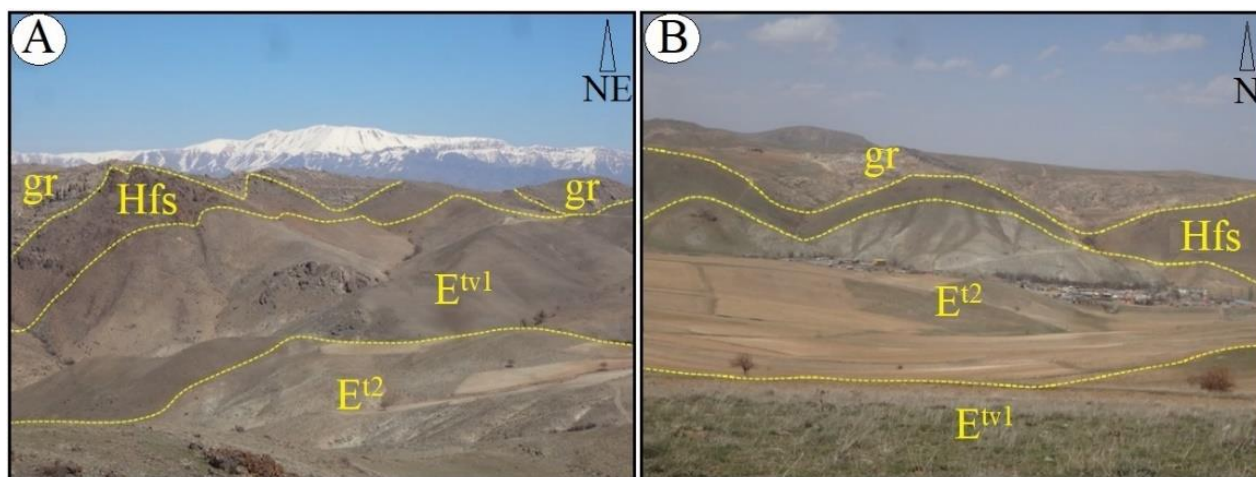


شکل ۱. A: نقشه زمین‌ساخت ایران با تغییرات از نبوی (Nabavi, 1976) همراه با موقعیت منطقه ورمزیار در زون البرز باختری- آذربایجان و B: نقشه زمین‌شناسی رخداد معدنی سرب- روی (نقره) ورمزیار

Fig. 1. A: Tectonic map of Iran (modified from Nabavi, 1976) together with the location of the Varmazyar area in the Western Alborz-Azerbaijan zone, and B: Geological map of Varmazyar Pb-Zn (Ag) occurrence

از نظر ساختاری، منطقه ورمزیار با یک دسته گسل‌های عادی با روند عمومی شمالی- جنوبی و شمال‌خاوری- جنوب‌باختری مشخص می‌شود (شکل ۱- A). در این بین، گسل‌های با روند شمالی- جنوبی، مهم‌ترین گسل‌ها در این منطقه محسوب می‌شوند که کنترل‌کننده کانه‌زایی سرب و روی (نقره) منطقه هستند. این امر نشان‌دهنده نقش گسل‌های نرمال به‌عنوان کنترل‌کننده کانه‌زایی‌های ایپی‌ترمال فلزات پایه و گران‌بها در کمربند فلزایی طارم- هشتجین است که توسط کوهستانی و همکاران (Kouhestani et al., 2018b) مطرح شده است.

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، این سنگ‌ها دارای بافت‌های گرانولار، میکروگرانولار، پورفیروئیدی و هتروگرانولار بوده و هم‌رشدی پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپار (بافت پرتیتی) در آنها مشاهده می‌شود. مونوزوگرولیت‌ها دارای درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، کوارتز، هورنبلند و بیوتیت‌های کلریتی شده هستند. کانی‌های فرعی در این سنگ‌ها شامل کلینوپیروکسن، اسفن، آپاتیت و زیرکن همراه با کانی‌های کدر و کانی‌های ثانویه شامل سریسیت، کانی‌های رسی و کلریت است.



شکل ۲. A و B: نماهایی از توالی‌های حدواسط (E^{t1}) و اسیدی (E^2) در منطقه ورمزیار. نفوذ توده گرانیتوئیدی (gr) به داخل توالی‌های توفی سبب تشکیل هاله دگرگونی هورنفلسی شده است.

Fig. 2. A and B: Views of intermediate (E^{t1}) and acidic (E^2) tuff sequences in the Varmazyar area. Intrusion of granitoid body (gr) within tuff sequences caused to formation of hornfels metamorphic halo.

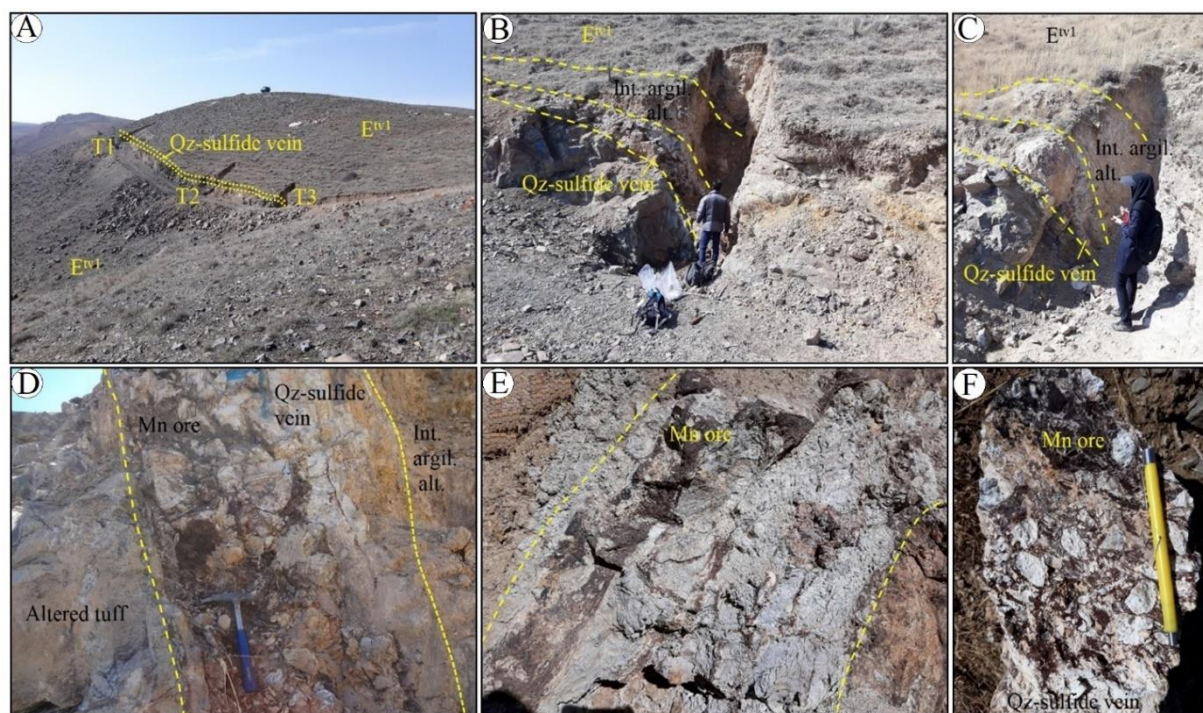
کانه‌زایی و دگرسانی

سولفیدی در این رگه شامل گالن و اسفالریت با بافت دانه‌پراکنده است. دگرسانی آرژیلیک متوسط به ضخامت تا ۲ متر، اغلب در کمربالای رگه کانه‌دار مشاهده می‌شود (شکل ۳- B و C). در بعضی بخش‌ها، رگه- رگه‌های کوارتز- کلسیتی منگنزدار، رگه کوارتز- سولفیدی را قطع کرده و باعث تشکیل بافت برشی با قطعه‌هایی از رگه کوارتز- سولفیدی در سیمانی از کانی‌های منگنز- کلسیت- کوارتز شده است (شکل ۳- D, E و F). ذخیره

کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار به صورت رگه کوارتز- سولفیدی درون توالی توف‌های حدواسط و اسیدی رخ داده و توسط گسلی عادی با روند شمالی- جنوبی کنترل شده است (شکل ۱ و شکل ۳). رخنمون اصلی کانه‌زایی حدود ۳۰۰ متر درازا و ۱ تا ۳ متر پهنا داشته و روند عمومی آن شمالی- جنوبی با شیب حدود ۶۵ تا ۸۰ درجه به سمت باختر است (شکل ۳- A). کانه‌زایی

کانه‌زایی نسبتاً قابل توجه بوده و بالاترین عیار طلا به ۲۱۲ میلی گرم در تن می‌رسد.

این کانسار ۷۵ هزار تن با عیار متوسط سرب، روی و نقره به ترتیب ۳/۱ و ۱/۶ درصد و ۳۲ گرم در تن (بیشینه تا ۱۱۲ گرم در تن) برآورد شده است (Karimpouli, 2017). تمرکز طلا نیز در این



شکل ۳. A: تصویر صحرایی از موقعیت رگه کوارتز- سولفیدی کانهدار در رخداد معدنی ورمزیار (دید به سمت جنوب‌باختر)، B و C: نماهایی از رگه کوارتز- سولفیدی کانهدار و هاله دگرسانی آرژلیک متوسط در کمربالای آن (دید هر دو تصویر به سمت باختر) و D، E و F: قطع شدن رگه کوارتز- سولفیدی توسط رگه‌های کوارتز- کلسیتی منگن‌دار که سبب ایجاد بافت پرشی شده است.

Fig. 3. A: Field photograph showing the location of mineralized quartz-sulfide vein at the Varmazyar occurrence (looking southwest), B and C: Views of mineralized quartz-sulfide vein and intermediate argillic alteration halo in its hanging-wall (both photos looking to the west), D, E and F: Quartz-sulfide vein crosscutting by Mn-bearing quartz-calcite veins that formed breccia texture.

سنگ‌های میزبان را تحت تأثیر قرار داده است. دگرسانی سیلیسی به صورت رگه- رگچه‌ای و یا سیمان پرش‌های گرمایی رخ داده و منطبق بر بخش‌های کانهدار است (شکل ۴-A و B). ضخامت رگه و رگچه‌های کوارتزی تا ۵ سانتی‌متر می‌رسد. در مقاطع نازک، بلورهای کوارتز موجود در رگچه‌ها، به صورت نیمه‌شکل دار تا بی‌شکل با

بر اساس نتایج بررسی‌های صحرایی، XRD و میکروسکوپی، دگرسانی گرمایی در رخداد معدنی ورمزیار شامل انواع دگرسانی‌های سیلیسی، آرژلیک متوسط، کربناتی و پروپلیتیک است که در این بین، دگرسانی‌های سیلیسی، آرژلیک متوسط و کربناتی منطبق بر بخش‌های کانهدار بوده و دگرسانی پروپلیتیک در خارج از بخش‌های کانهدار،

C و D). پیریت (اغلب اکسید شده) تنها کانی سولفیدی این مرحله است که به صورت بلورهای ریز دانه پراکنده نیمه-شکل دار تا بی شکل در زمینه سیلیسی شده سنگ، دیده می شود (شکل ۵-۵A). این مرحله بیشتر به عنوان زمینه ساز مراحل بعدی کانه زایی عمل کرده و اغلب توسط مراحل بعدی کانی سازی قطع شده است (شکل ۵-۵B و C). مرحله دوم، اصلی ترین مرحله کانه زایی در رخداد معدنی ورمزیار است. این مرحله شامل رگه و رگچه های کوارتزی با ضخامت تا ۵ سانتی متر و برش های گرمابی است که حاوی مقادیر متغیری گالن و اسفالریت همراه با میزان اندکی پیریت هستند (شکل ۵-۵B تا I). این مرحله اغلب توسط مراحل سوم و چهارم کانه زایی قطع شده (شکل ۵-۵D تا I) و بخش هایی از آن به صورت قطعه هایی در سیمان گرمابی برش های مرحله سوم کانه زایی دیده می شود. کانه زایی مرحله سوم با حضور کوارتز، کلسیت و اکسیدهای منگنز (پسیلوملان، پیرولولزیت و براونیت) در رگه ها و سیمان گرمابی برش ها مشخص می شود. این مرحله اغلب مراحل قبلی کانه زایی را قطع کرده و خود توسط رگچه های کربناتی مرحله چهارم کانه زایی قطع شده است (شکل ۵-۵D تا I). کانه زایی مرحله چهارم با فراوانی کلسیت به صورت رگچه ای مشخص می شود که مراحل قبلی کانه زایی را قطع کرده است (شکل ۵-۵H و I). هیچ گونه کانی سولفیدی و اکسیدی در این مرحله تشکیل نشده است. ضخامت رگچه های کلسیتی تا ۱ میلی متر نیز می رسد.

کانی شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

بر اساس بررسی های کانه نگاری، گالن و اسفالریت، کانی شناسی اصلی ماده معدنی را در رخداد معدنی ورمزیار تشکیل می دهند که با اندکی پیریت و کانی های منگنزدار (پسیلوملان و پیرولولزیت) همراهی می شوند. کوارتز، کلسیت و سریسیت مواد باطله هستند. اسمیت زونیت، سروزیت، گوتیت، پیرولولزیت و براونیت نیز در اثر فرایندهای برونزاد تشکیل شده اند. انواع بافت ماده معدنی و باطله در رخداد معدنی ورمزیار شامل بافت های دانه پراکنده، رگه-

اندازه های مختلف دیده می شوند. دگرسانی آرژیلیک متوسط به ضخامت تا ۲ متر، به شدت توسط شکستگی ها کنترل شده و اغلب بخش کمربالای ماده معدنی را دربر گرفته است (شکل ۳-۳B و C). این دگرسانی سبب تغییر رنگ سنگ به سفید تا زرد شده است. در مقیاس میکروسکوپی، این دگرسانی به صورت جانشینی پلاژیو کلاز توسط کانی های رسی، سریسیت / ایلیت و مقدار کمی کوارتز و کلسیت مشخص می شود (شکل ۴-۴C و D).

دگرسانی کربناتی در رخداد معدنی ورمزیار از گسترش نسبی بالایی برخوردار بوده و به دو نوع قابل تفکیک است. در نوع اول، دگرسانی کربناتی شامل کلسیت هایی است که همراه با کوارتز و اکسیدهای منگنز در رگه و رگچه های مرحله سوم کانه زایی دیده می شوند (شکل ۴-۴E). دگرسانی کربناتی نوع دوم شامل رگچه های کلسیتی مرحله چهارم کانه زایی هستند که رگه و رگچه های کوارتز- سولفیدی مرحله دوم کانه زایی و رگچه های کوارتز- کلسیتی- اکسید منگنز مرحله سوم کانه زایی را قطع کرده اند (شکل ۵-۵H و I) که نشان می دهد، این رگچه های کلسیتی در مراحل پایانی دگرسانی گرمابی در رخداد معدنی ورمزیار تشکیل شده اند. دگرسانی پروپیلیتیک از گسترش زیادی در منطقه ورمزیار برخوردار بوده و بیشتر در بخش های بیرونی پهنه های دگرسانی دیده می شود. این دگرسانی از شدت ضعیف تا متوسط برخوردار و معمولاً بافت کانی ها در آن حفظ شده است. دگرسانی پروپیلیتیک معمولاً با جانشینی پلاژیو کلاز، آمفیبول و کلینوپیروکسن توسط مجموعه کلریت- اپیدوت- سریسیت و کربنات مشخص می شود (شکل ۵-۵F). کوارتز حاصل از این دگرسانی به میزان کم در زمینه سنگ دیده می شود.

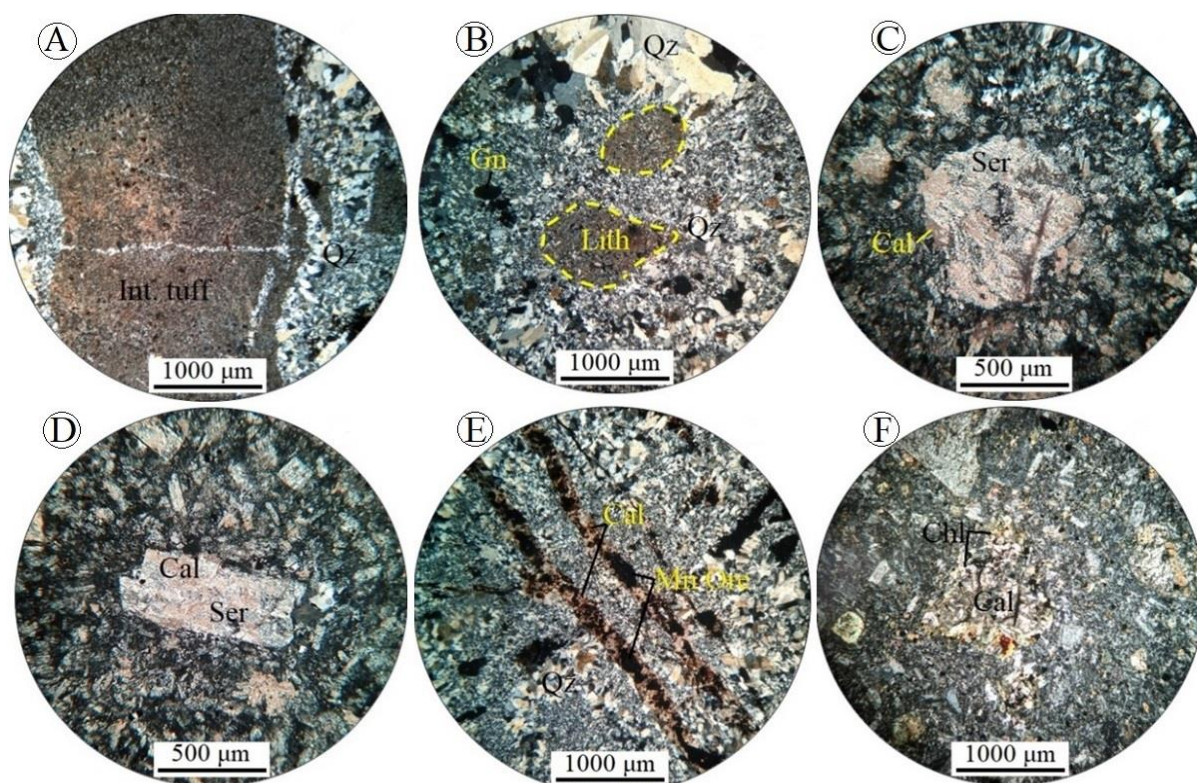
بحث و بررسی

مراحل کانه زایی

با توجه به مجموعه کانی شناسی، روابط بافتی و ارتباط قطع کنندگی رگه های کانه دار، فرایند کانه زایی در رخداد معدنی ورمزیار به چهار مرحله قابل تفکیک است. مرحله اول کانه زایی با سیلیسی شدن سنگ های میزبان مشخص می شود (شکل ۵-۵A، B،

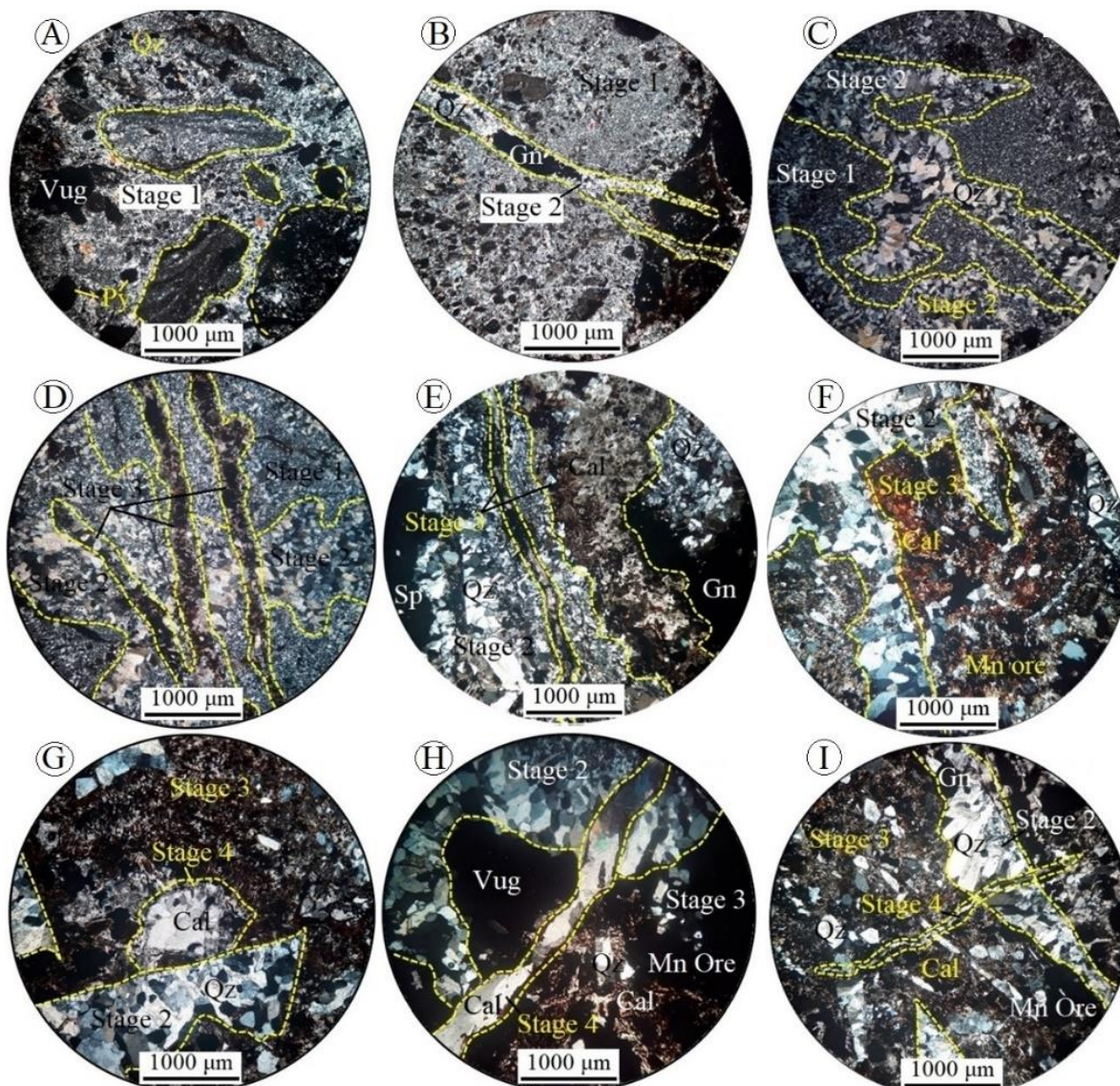
هم‌رشد با اسفالریت نیز مشاهده می‌شود (شکل ۶-C و D). اسفالریت به صورت بلورهای با رنگ عسلی روشن (فقیر از آهن) در رخداد معدنی ورمزیار دیده می‌شود. این کانی پس از گالن فراوان‌ترین کانی سولفیدی در ورمزیار بوده و اغلب به صورت بلورهای بی‌شکل و نیمه‌شکل دار هم‌رشد با گالن حضور دارد (شکل ۶-C و D).

رگچه‌ای، برشی، شانهای، پوسته‌ای، کاکلی، پرماند، گل کلمی، تیغه‌ای، بازماندی، پُرکننده فضای خالی و جانشینی است. گالن فراوان‌ترین کانی سولفیدی در رخداد معدنی ورمزیار است که به صورت بلورهای درشت نیمه‌شکل دار تا بی‌شکل دانه پراکنده در رگه‌های سیلیسی دیده می‌شود (شکل ۶-A). این کانی اغلب دارای رخ‌های مثلثی شکل بوده و اغلب از حاشیه‌ها به سرزیت دگرسان شده است (شکل ۶-A تا D). گالن معمولاً به صورت



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از انواع دگرسانی‌های گرمابی در رخداد معدنی ورمزیار. A و B: دگرسانی سیلیسی به صورت رگچه‌ای و سیمان گرمابی برش‌ها، C و D: دگرسانی آرژیلیک متوسط به صورت جانشینی کانی‌های رسی، سریسیت و کلسیت به جای پلاژیوکلازها، E: دگرسانی کربناتی به صورت رگچه‌های کلسیتی- کوارتزی- اکسیدهای منگنز و F: دگرسانی پروپیلیتیکی به صورت جانشینی کلینوپروکسن توسط کلریت و کلسیت. علائم اختصاصی کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Gn: گالن، Lith: قطعه سنگ توفی، Mn Ore: کانه منگنز، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت).

Fig. 4. Photomicrographs (transmitted polarized light, XPL) of hydrothermal alteration types in the Varmazyar occurrence. A and B: Silica alteration as veinlets and hydrothermal breccia cements, C and D: Intermediate argillic alteration as replacement of plagioclase by clay minerals, sericite and calcite, E: Carbonate alteration as quartz-calcite-Mn oxides veinlets, and F: Propylitic alteration as replacement of clinopyroxene by chlorite and calcite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Chl: chlorite, Gn: galena, Lith: tuff fragment, Mn Ore: manganese ore, Qz: quartz, Ser: sericite).



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از مراحل کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار. A، B و C: مرحله اول کانه‌زایی به صورت سیلیسی شدن سنگ میزبان که توسط رگه‌های کوارتز- سولفیدی مرحله دوم (B و C) قطع شده است. در تصویر A، ذرات ریز دانه‌پراکنده پیریت (اغلب اکسید شده) در متن سیلیسی سنگ قابل مشاهده است، D، E و F: رگچه‌های کوارتز- سولفیدی مرحله دوم کانه‌زایی که توسط رگچه‌های کوارتز- کربناتی- اکسیدی مرحله سوم قطع شده‌اند، G، H و I: مرحله چهارم کانه‌زایی به صورت رگچه‌های کلسیتی تأخیری که مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. Cal: کلسیت، Gn: گالن، Mn Ore: کانه منگنز، Py: پیریت، Qz: کوارتز، Sp: اسفالریت).

Fig. 5. Photomicrographs (transmitted polarized light, XPL) of the mineralization stages in the Varmazyar occurrence. A, B and C: Stage 1 mineralization as silicification of the host rock that crosscut by stage 2 quartz-sulfide veinlets (B and C). In A, fine-grained disseminated pyrites (often oxidize) are observed in the silicified rock. D, E and F: Stage 2 quartz-sulfide veinlets crosscutting by stage 3 quartz-carbonate-oxide veinlets. G, H and I: Stage 4 mineralization as late calcite veinlets crosscutting previous stages. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Gn: galena, Mn Ore: manganese ore, Py: pyrite, Qz: quartz, Sp: sphalerite).

شکل دار (اندازه کمتر از ۱۰۰ میکرون تا ۱ سانتی متر) در رگه و رگچه‌های سیلیسی دیده می‌شود. کوارتز اغلب بافت رگه- رگچه‌ای، سیمان گرمایی برش‌ها، شانه‌ای و پُرکننده فضای خالی نشان می‌دهد (شکل ۷-A تا C). در برخی از بخش‌های پهنه کانی‌سازی، بافت‌های پوسته‌ای، کاکلی، تیغه‌ای، گل کلمی و پرمماند نیز در کوارتزهای موجود در رگه‌های کانه‌دار و سیمان گرمایی برش‌ها قابل مشاهده است (شکل ۷-D تا I). کلسیت دومین کانی باطله در رخداد معدنی ورمزیار است. این کانی اغلب همراه با کوارتز، حفره‌ها را پُر کرده و بافت‌های رگه- رگچه‌ای و پُرکننده فضاهای خالی نشان می‌دهد (شکل ۷-E). سرسیت به صورت بلورهای ریز (اندازه بین ۵ تا ۵۰ میکرون) در مقاطع نازک میکروسکوپی دیده می‌شود.

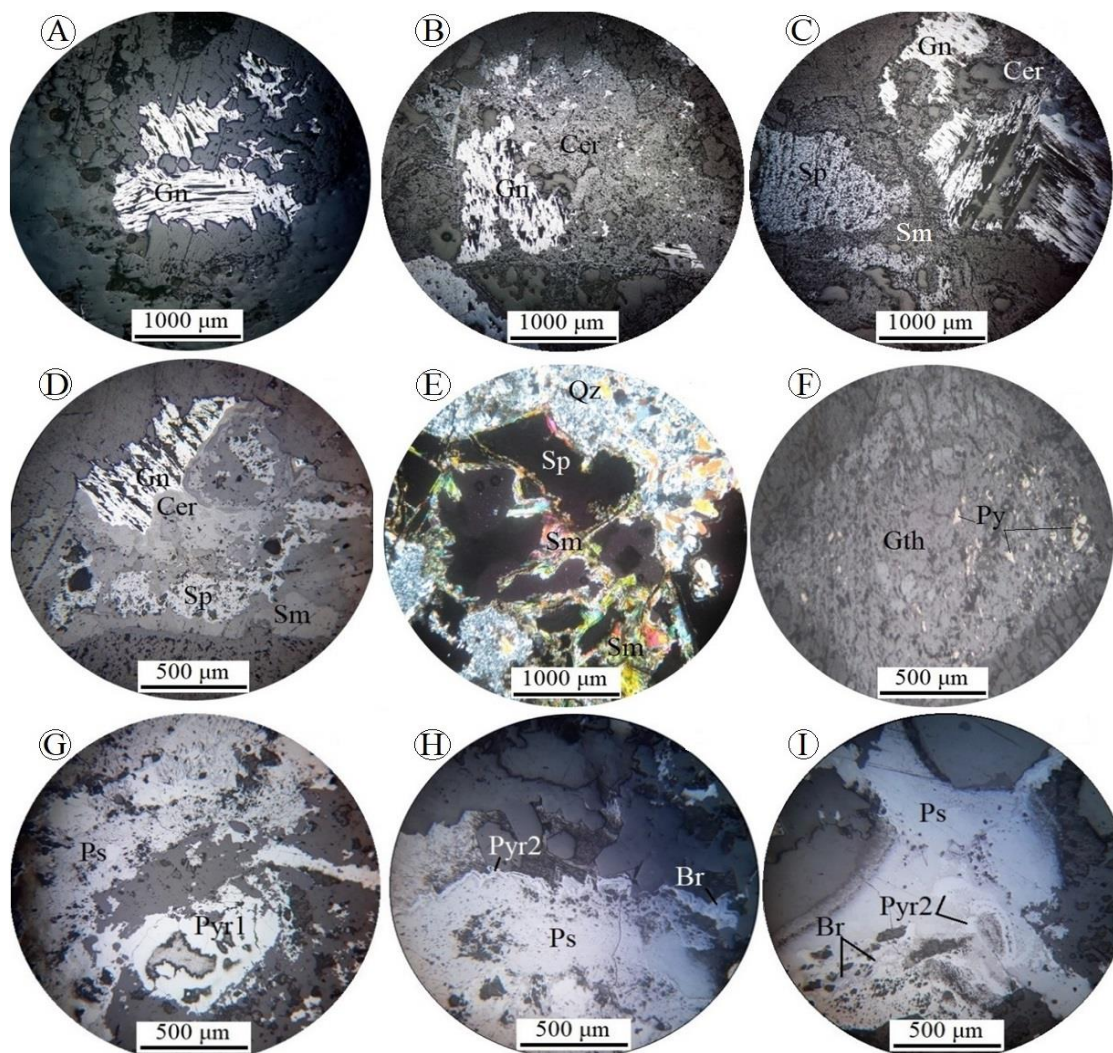
توالی همیافتی

بر اساس بررسی‌های صحرایی، نمونه دستی و میکروسکوپی، توالی هم‌یافتی کانی‌ها در رخداد معدنی ورمزیار را می‌توان به چهار مرحله تقسیم کرد (شکل ۸). مرحله اول، با حضور پیریت به صورت دانه پراکنده در متن سنگ میزبان سیلیسی شده مشخص می‌شود. مرحله دوم با رگه- رگچه‌های کوارتزی و برش‌های گرمایی مشخص می‌شود که حاوی مقادیر متغیری گالن و اسفالریت همراه با میزان اندکی پیریت هستند. مرحله سوم با حضور کوارتز، کلسیت و کانی‌های منگنزدار (پسیلوملان و پیرولولزیت اولیه)، در رگه‌ها و سیمان گرمایی برش‌ها مشخص می‌شود. بافت‌های برشی، پوسته‌ای، کاکلی، گل کلمی، تیغه‌ای، شانه‌ای و پرمماند از بافت‌های مهم مرحله‌های دوم و سوم به شمار می‌روند. مرحله چهارم با حضور رگه- رگچه‌های کلسیتی تأخیری مشخص می‌شود. تشکیل سرروزیت، اسمیت زونیت، گوتیت، پیرولولزیت ثانویه و براونیت با بافت‌های جاننشینی و پُرکننده فضاهای خالی مربوط به فرایندهای برونزاد است.

با این وجود، در برخی از بخش‌ها، اسفالریت بلورهای گالن را دربرگرفته است که نشان می‌دهد، اسفالریت بعد از گالن تشکیل شده است. در برخی از بخش‌های پهنه کانه‌دار، اسفالریت از حاشیه‌ها توسط اسمیت زونیت جانشین شده است (شکل ۶-D و E). پیریت اغلب به صورت بلورهای ریز دانه پراکنده نیمه‌شکل دار تا بی‌شکل، در بخش‌های سیلیسی شده سنگ‌های میزبان، رگه کوارتز- سولفیدی و سیمان گرمایی برش‌ها دیده می‌شود. اندازه بلورهای پیریت اغلب کمتر از ۱۰۰ میکرون بوده و اغلب توسط گوتیت جانشین شده و تنها بقایایی از آنها به صورت بافت بازماندی قابل مشاهده است (شکل ۶-F).

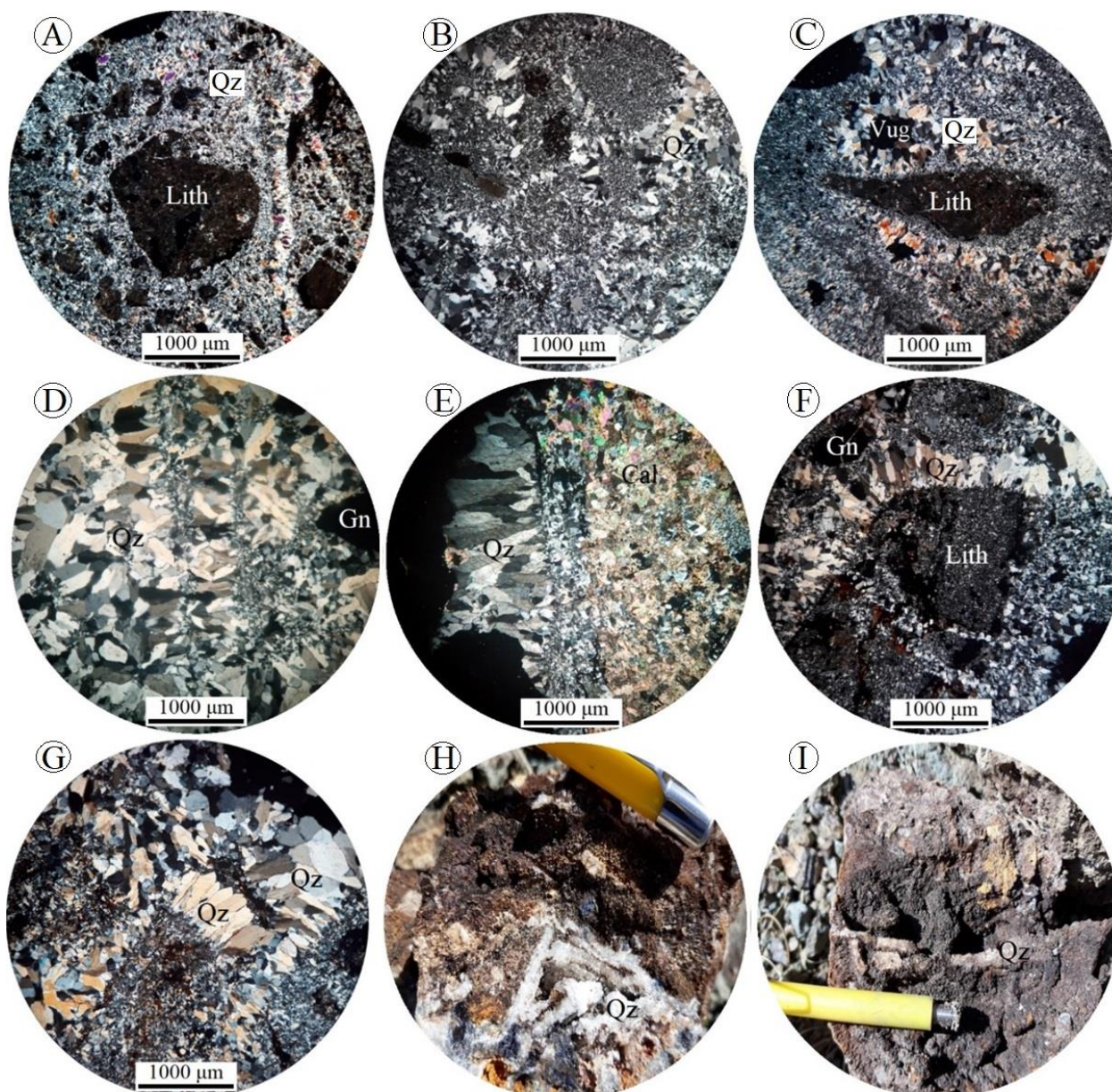
کانی‌های منگنزدار در رخداد معدنی ورمزیار شامل پسیلوملان، پیرولولزیت و براونیت هستند. پسیلوملان فراوان‌ترین کانی منگنز در رخداد معدنی ورمزیار است. این کانی بیشتر به صورت بلورهای درشت بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار در رگه و رگچه‌های کانه‌دار دیده شده و اغلب با پیرولولزیت‌های اولیه هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل ۶-G). در برخی از بخش‌ها، پسیلوملان از حاشیه‌ها به پیرولولزیت ثانویه و یا براونیت دگرسان شده است (شکل ۶-G تا H). پیرولولزیت دومین کانی فراوان منگنز در رخداد معدنی ورمزیار است. این کانی به دو صورت اولیه و ثانویه در مقاطع میکروسکوپی قابل مشاهده است. پیرولولزیت‌های اولیه به صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل و نیمه‌شکل دار و هم‌رشد با پسیلوملان در رگه و رگچه‌های کوارتز- کلسیتی منگنزدار دیده می‌شوند (شکل ۶-G). پیرولولزیت‌های ثانویه محصول جاننشینی پسیلوملان از حاشیه‌ها هستند (شکل ۶-H و I). براونیت محصول فرایندهای برونزاد بوده و اغلب به صورت تیغه‌ای در اطراف یا داخل کانی‌های پسیلوملان و پیرولولزیت‌های اولیه تشکیل شده است (شکل ۶-H و I).

کوارتز، کلسیت و سرسیت کانی‌های باطله در رخداد معدنی ورمزیار هستند. کوارتز مهم‌ترین کانی باطله در این رخداد معدنی است. این کانی اغلب به صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل تا



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی (تصویر E در نور عبوری پلاریزه متقاطع (XPL) و بقیه تصاویر در نور بازتابی) از کانه‌های معدنی در رخداد معدنی ورمزیار. A: بلور بی‌شکل گالن با رخ‌های مثلثی، B: بلور بی‌شکل گالن که از حاشیه‌ها به سرزیت دگرسان شده است، C و D: هم‌رشدی گالن و اسفالریت. هر دو کانی از حاشیه‌ها به ترتیب به سرزیت و اسمیت زونیت دگرسان شده‌اند، E: بلورهای بی‌شکل اسفالریت که از حاشیه‌ها به اسمیت زونیت دگرسان شده‌اند، F: بلور نیمه‌شکل دار پیریت با بافت بازماندی که به گوتیت دگرسان شده است، G: هم‌رشدی پسیلوملان و پیرولوژیت اولیه و H و I: بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار پسیلوملان که از حاشیه‌ها به پیرولوژیت ثانویه و براونیت دگرسان شده است. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. Br: براونیت، Cer: سرزیت، Gn: گالن، Gth: گوتیت، Py: پیریت، Pyr1: پیرولوژیت اولیه، Pyr2: پیرولوژیت ثانویه، Ps: پسیلوملان، Qz: کوارتز، Sm: اسمیت زونیت، Sp: اسفالریت).

Fig. 6. Photomicrographs (E in transmitted polarized light, XPL, and the rest in reflected light) of ore minerals in the Varmazyar occurrence. A: Anhedral galena crystal with triangle cleavage, B: Anhedral galena crystal altered to cerussite along boundaries, C and D: Intergrowth of galena and sphalerite. Both minerals, respectively, altered to cerussite and smithsonite along boundaries, E: Anhedral sphalerite crystals altered to smithsonite along boundaries, F: Anhedral pyrite crystal with relict texture that altered to goethite, G: Intergrowth of psilomelane and primary pyrolusite, H and I: Anhedral to subhedral psilomelane crystals altered to secondary pyrolusite and braunite along boundaries. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Br: braunite, Cer: cerussite, Gn: galena, Gth: goethite, Py: pyrite, Pyr1: primary pyrolusite, Pyr2: secondary pyrolusite, Ps: psilomelane, Qz: quartz, Sm: smithsonite, Sp: sphalerite).



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) و نمونه دستی از انواع بافت کوارتز در رخداد معدنی ورمزیار. A و B: کوارتز با بافت رگچه‌ای و سیمان گرمابی برش‌ها، C: کوارتز با بافت پُرکننده فضای خالی، D و E: بافت پوسته‌ای در کوارتزهای موجود در رگچه‌های کوارتز-سولفیدی (D) و کوارتز-کلسیتی (E). در تصویر D، بافت پرمانند در بلورهای کوارتز نیز دیده می‌شود، F و G: رشد کوارتز با بافت کاکلی بر روی قطعات برشی، H و I: کوارتز با بافت تیغه‌ای. بافت گل کلمی کوارتز نیز در این دو تصویر قابل مشاهده است. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Cal: کلسیت، Gn: گالن، Lith: قطعه سنگ، Qz: کوارتز).

Fig. 7. Photomicrographs (transmitted polarized light, XPL) and hand specimens of quartz texture in the Varmazyar occurrence. A and B: Quartz with veinlet and breccia-cement texture, C: Vug infill quartz, D and E: Crustiform texture of quartz in quartz-sulfide (D) and quartz-calcite (E) veinlets. In D, plumose texture of quartz is also observed, F and G: Cockade texture of quartz developed around brecciated fragments, H and I: Bladed texture of quartz. Colloform texture of quartz is also observed in both photos. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Gn: galena, Lith: rock fragment, Qz: quartz).

		Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Supergene
Ore	Pyrite					
	Galena					
	Sphalerite					
	Psilomelane					
	Pyrolusite					
	Braunite					
	Cerussite					
	Smithsonite					
	Goethite					
	Gangue	Quartz				
Sericite						
Calcite						
Textures	Disseminated					
	Vein-Veinlets					
	Brecciated					
	Cockade					
	Crustiform					
	Collofrom					
	Comb					
	Plumose					
	Bladed					
	Vug Infill					
	Replacement					

شکل ۸. توالی هم‌یافتی، فراوانی نسبی، ساخت و بافت مواد معدنی و باطله در رخداد معدنی ورمزیار

Fig. 8. Paragenetic sequences showing the relative abundance, structure and texture of gangues and ore minerals at the Varmazyar occurrence

داده‌های زمین‌شیمیایی

نتایج تجزیه‌های شیمیایی به دست آمده از نمونه‌های رخداد معدنی ورمزیار در جدول ۱ آمده است.

الگوی توزیع عناصر کمیاب و کمیاب خاکی

الگوی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار و نمونه‌های گرانیتی و توف حدواسط بدون کانه‌زایی که نسبت به کندریت (Thompson, 1982) بهنجار شده‌اند، در شکل ۹-A نشان داده شده است. بر اساس این شکل، همه نمونه‌های کانه‌دار الگوی مشابه هم را نشان می‌دهند.

همچنین، الگوی عناصر کمیاب در بخش‌های کانه‌دار با الگوی این عناصر در نمونه گرانیتی و به‌ویژه توف‌های حدواسط تا حدودی مشابهت دارد. این موضوع می‌تواند بیانگر ارتباط سیالات کانی‌ساز با توده گرانیتی و مشتق شدن آنها از این توده و همچنین شسته شدن عناصر از واحدهای توفی منطقه باشد. نمونه‌های کانه‌دار در مقایسه با گرانیت و واحدهای توف حدواسط از عناصر کمیاب تهی‌شدگی نشان می‌دهند که این امر می‌تواند در ارتباط با شسته شدن این عناصر طی فرایندهای دگرسانی و کانه‌زایی باشد.

جدول ۱. داده‌های تجزیه‌های شیمیایی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای رگه‌های کانه‌دار، توف حدواسط میزبان و توده گرانیتی سالم در رخداد معدنی ورمزیار. تمامی داده‌ها بر حسب گرم در تن هستند.

Table 1. Geochemical data of rare and rare earth elements for mineralized veins, fresh host intermediate tuff and granitic body from the Varmazyar occurrence. All data are in ppm.

	Ag	As	Ba	Cd	Ce	Cu	Dy	Er	Eu	Gd	Hf	K
D.L.	0.1	0.1	1	0.1	0.5	1	0.02	0.05	0.1	0.05	0.5	100
V-02	<0.1	1.5	404	0.1	83	55	4.29	2.67	0.72	4.65	1.36	51657
V-06	0.7	9.7	1074	0.2	25	25	3.12	1.89	1.03	2.89	0.96	34535
V-11	51.8	12.8	31	56.2	<1	155	1.02	0.56	0.11	0.43	0.68	1611
V-13	16.9	20.9	68	63.9	10	35	6.02	3.25	0.79	4.55	0.69	2708
V-35	145.3	57.9	32	134.2	<1	816	0.78	0.34	<0.1	0.19	0.66	101
V-41	3.9	4	53	2.5	2	68	0.66	0.24	0.16	0.32	0.88	4427
V-46	1.3	2.6	60	25.9	<1	24	0.49	0.16	<0.1	<0.05	0.68	1018
V-48	65.1	4.9	40	1.9	2	175	0.8	0.33	0.15	0.37	0.65	2283
V-68	30.1	3.2	14	42.5	<1	32	0.61	0.21	<0.1	0.08	0.64	685
	La	Lu	Mn	Nb	Nd	P	Pb	Pr	Rb	S	Sb	Sm
D.L.	1	0.1	5	1	0.5	10	1	0.05	1	50	0.5	0.02
V-02	45	0.42	450	58.9	30.8	556	258	8.59	229	145	0.9	5.02
V-06	13	0.27	5253	31	14.4	716	171	3.13	121	128	13.8	2.8
V-11	1	<0.1	2468	2.4	2.7	92	>30000	0.09	<1	26315	74.6	0.31
V-13	6	0.31	>20000	2.2	10.3	154	3937	1.67	9	1054	62.9	2.93
V-35	<1	<0.1	1998	3.5	2.5	77	>30000	<0.05	<1	>30000	>100	0.16
V-41	2	<0.1	720	3.1	4.3	185	5894	0.55	21	1081	91.9	0.51
V-46	<1	<0.1	1332	2.2	2.2	105	1790	<0.05	<1	6597	95.4	0.08
V-48	4	<0.1	2827	1.6	3.8	268	>30000	0.38	<1	17919	83.6	0.39
V-68	<1	<0.1	1272	1.5	2.1	81	>30000	<0.05	<1	16837	68.2	0.09
	Sr	Ta	Tb	Te	Th	Ti	Tm	Y	Yb	Zn	Zr	
D.L.	1	0.1	0.1	0.1	0.1	10	0.1	0.5	0.05	1	5	
V-02	230.7	3.6	0.67	0.12	37.18	3254	0.38	21.8	2.3	100	15	
V-06	251.6	1.58	0.46	0.13	5.56	5465	0.26	14.7	2.1	400	12	
V-11	104	0.37	0.11	<0.1	<0.1	137	<0.1	5.9	0.5	>30000	<5	
V-13	2296	0.35	0.9	0.18	<0.1	<10	0.39	32	2	28822	<5	
V-35	135.5	0.38	<0.1	0.12	<0.1	<10	<0.1	3.4	0.2	>30000	<5	
V-41	27.3	0.46	<0.1	<0.1	0.25	206	<0.1	2	0.1	6514	6	
V-46	23.7	0.33	<0.1	<0.1	<0.1	<10	<0.1	1.3	0.1	14993	<5	
V-48	297.8	0.31	<0.1	0.11	<0.1	118	<0.1	3.2	0.3	3892	<5	
V-68	63.9	0.29	<0.1	<0.1	<0.1	<10	<0.1	1.8	0.2	27628	<5	

V-02: Barren and fresh granite, V-06: Barren host intermediate tuff, V-11 and V-68: Qz-Pb-Zn vein with bladed texture, V-13: Mn ore, V-35 and V-48: High-grade Qz-Pb-Zn vein, V-41 and V-46: Low-grade Qz-Pb-Zn vein

کانه‌زایی (شکل ۱۰-A) و توف حدواسط میزبان (شکل ۱۰-B) از عناصر کانه‌ساز Cu , Pb , Zn , Cd , Ag , Sb و As غنی‌شدگی و از سایر عناصر تهی شده‌اند. در نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی (شکل ۱۱)، نیز نمونه‌های کانه‌دار نسبت به توده گرانیتی بدون کانه‌زایی (شکل ۱۱-A) و توف حدواسط میزبان (شکل ۱۱-B) از همه عناصر کمیاب خاکی تهی‌شدگی نشان می‌دهند. یکی از نمونه‌های مربوط به رگه کوارتزی گالن‌دار با بافت تیغه‌ای نسبت به توف حدواسط میزبان در برخی از عناصر کمیاب خاکی متوسط و سنگین مانند Tm , Er , Dy , Tb , Gd و Lu غنی‌شدگی نسبی نشان می‌دهد که این موضوع می‌تواند به دلیل وجود قطعه‌های سنگ میزبان در داخل رگه کوارتز- سولفیدی باشد.

به طور کلی، رفتار زمین‌شیمی عناصر کمیاب خاکی در محیط‌های کانه‌زایی تحت تأثیر فرایندهایی از قبیل واکنش سیال با سنگ، نهشت سیال، جذب، تجزیه به اجزاء، تغییرات دما، فشار، pH ، Eh ، آلکالینیتی و تمرکز سیال وابسته است (Lottermoser, 1984; Humphris, 1984). طی فرایندهای کانه‌زایی، سیالات غنی از F ، Cl و CO_2 در نسبت‌های بالای سیال به سنگ، قادر به تحرک عناصر کمیاب خاکی هستند (Murphy and Hynes, 1986; Whitford et al., 1988; Bienvenu et al., 1990). به اعتقاد این پژوهشگران، کمپلکس‌های هالوژنی و کربنیک عامل اصلی انتقال و تحرک عناصر مزبور محسوب می‌شوند. کاهش مشخص در میزان عناصر کمیاب خاکی برای رگه‌های کانه‌دار نسبت به سنگ‌های میزبان در رخداد معدنی ورمزیار نشان می‌دهد که حجم و یا شیمی سیالات گرمایی برای تحرک این عناصر در این رخداد معدنی کافی بوده و می‌تواند بیانگر میزان بالای واکنش بین سیالات کانه‌زا و سنگ‌های میزبان باشد.

بررسی میان‌بارهای سیال

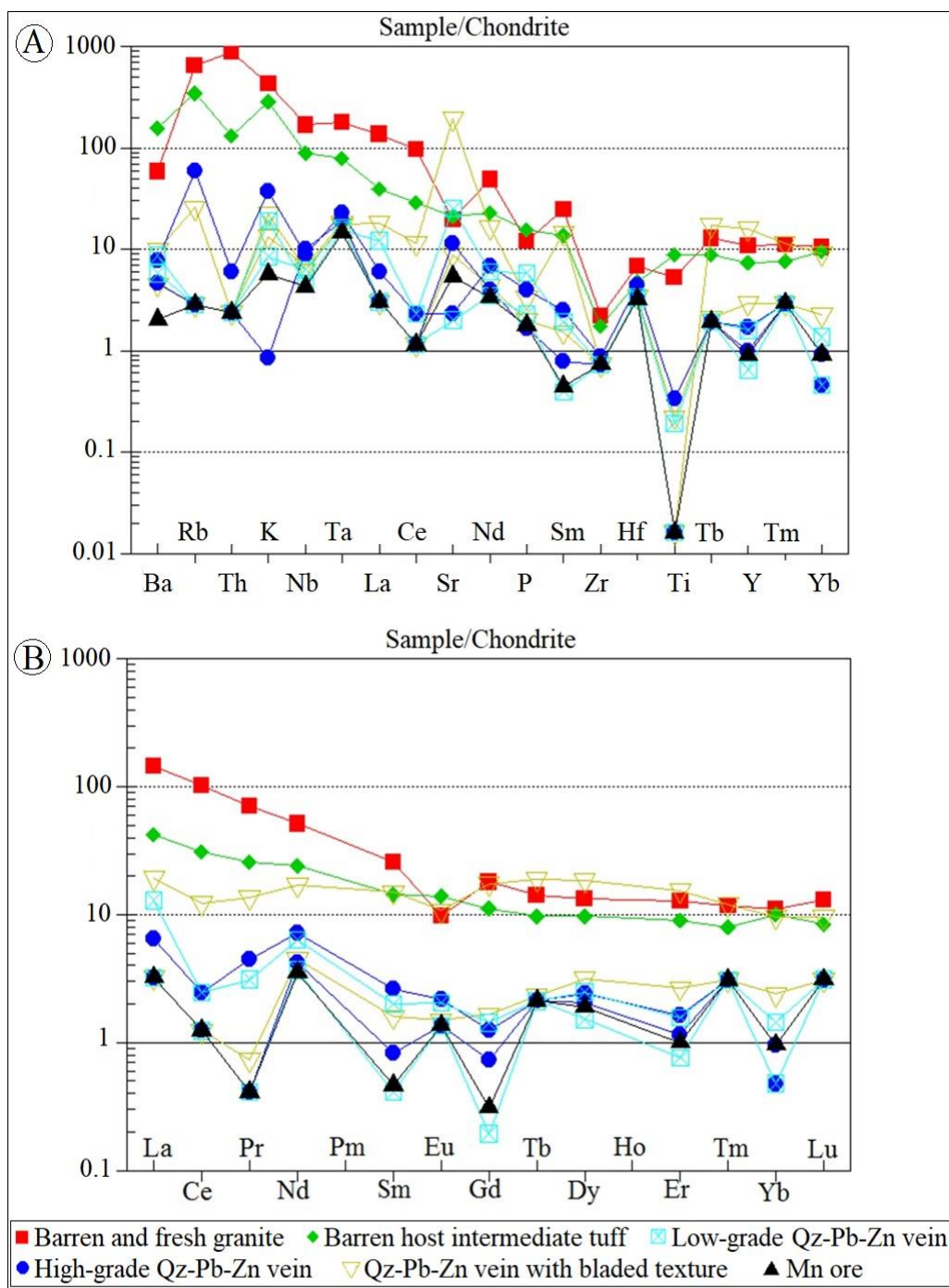
بررسی میان‌بارهای سیال بر روی کوارتزهای بلورین و اسفالریت‌های شفاف موجود در رگه‌های کوارتز- سولفیدی مرحله دوم کانه‌زایی و کوارتزهای با بافت تیغه‌ای موجود در رگه‌های کوارتز- کلسیتی- اکسیدی مرحله سوم کانه‌زایی انجام شد. به دلیل ریز بودن اندازه میان‌بارهای سیال، هیچ میان‌بار سیالی در کوارتزهای موجود در بخش‌های سیلیسی شده مرحله اول کانه‌زایی بررسی نشد.

الگوی عناصر کمیاب خاکی برای بخش‌های کانه‌دار توده گرانیتی و واحدهای توف حدواسط بدون کانه‌زایی که نسبت به کندریت (Boynton, 1984) بهنجار شده‌اند در شکل ۹-B نشان‌داده شده است. بر اساس این شکل، الگوی عناصر کمیاب خاکی برای بخش‌های کانه‌دار در بیشتر نمونه‌ها مشابه هم بوده و تنها یک نمونه (رگه کوارتز- سولفیدی با بافت تیغه‌ای) الگوی متفاوت نشان می‌دهد. این نمونه در مقایسه با نمونه گرانیتی و توف حدواسط تهی‌شدگی کمتری در عناصر LREE و غنی‌شدگی نسبی در عناصر HREE بدون آنومالی مشخصی در عناصر کمیاب خاکی نشان می‌دهد. الگوی نمونه مزبور تا حدودی شبیه به توف‌های حدواسط میزبان است که به نظر می‌رسد شباهت الگوی مزبور به دلیل وجود قطعه‌های سنگ میزبان در داخل رگه کوارتز- سولفیدی باشد. نمونه‌های بخش کانه‌دار در مقایسه با نمونه گرانیتی و توف‌های حدواسط، تهی‌شدگی مشخصی در میزان عناصر کمیاب خاکی همراه با آنومالی منفی عناصر Pr ، Sm ، Gd و Yb نشان می‌دهند.

به اعتقاد آلدرتون و همکاران (Alderton et al., 1980)، تهی و یا غنی‌شدن عناصر کمیاب خاکی طی دگرسانی توسط چند عامل کنترل می‌شود: (۱) تمرکز عناصر کمیاب خاکی در کانی‌های واکنش‌دهنده، (۲) پایداری نسبی کانی‌ها در برابر سیال، (۳) جذب عناصر کمیاب خاکی توسط کانی‌های ثانویه، (۴) غلظت عناصر کمیاب خاکی در سیالات و (۵) توانایی سیال در تحرک عناصر کمیاب خاکی. بر این اساس، به نظر می‌رسد در منطقه ورمزیار، توانایی سیال در تحرک عناصر کمیاب خاکی که ناشی از واکنش بالای سیال به سنگ است، در تهی‌شدگی این عناصر در بخش‌های کانه‌دار نقش داشته است.

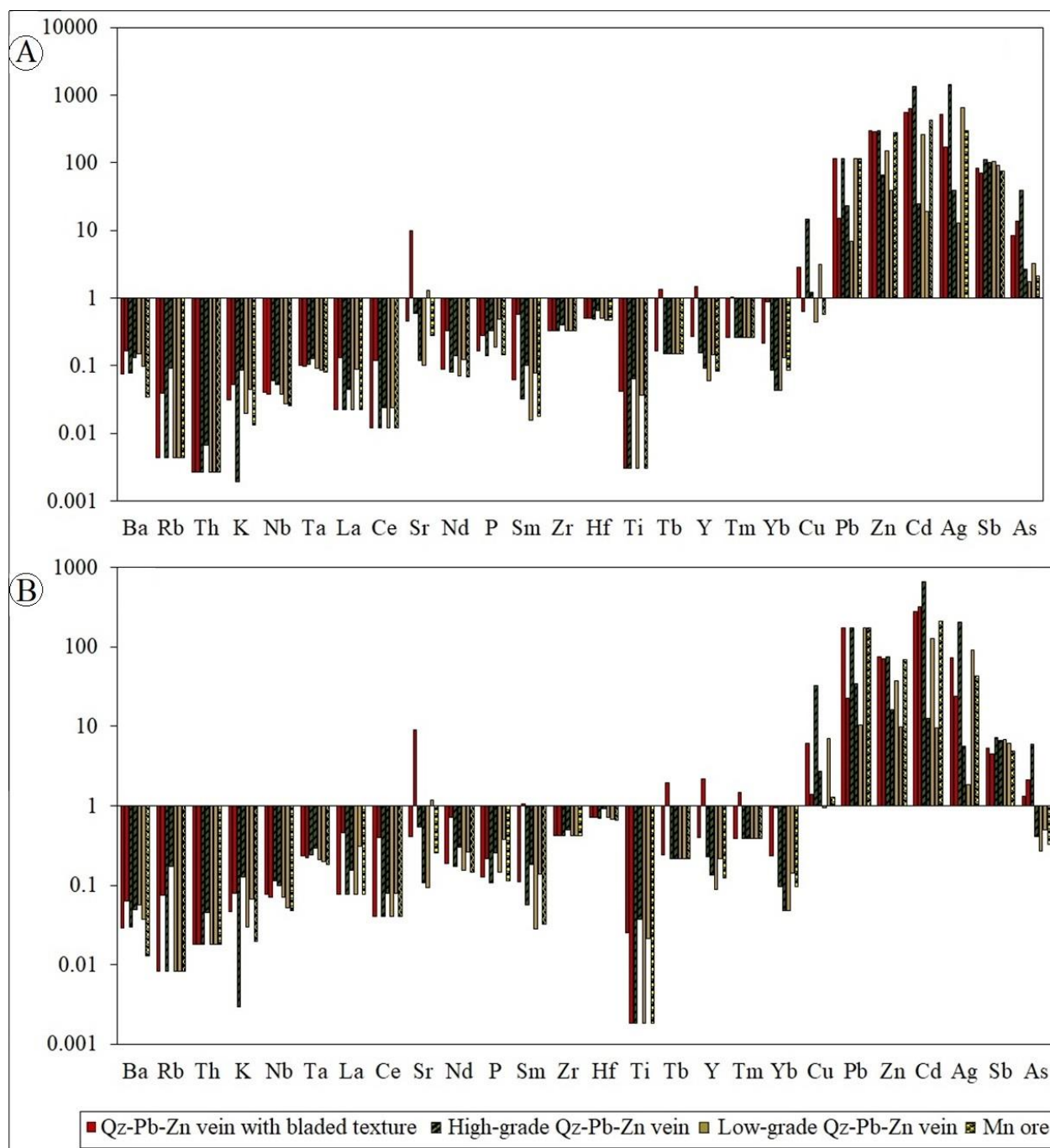
تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در بخش‌های کانه‌دار

برای بررسی غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عنصری مرتبط با کانه‌زایی و دگرسانی در رخداد معدنی ورمزیار، مقادیر این عناصر در نمونه‌های کانه‌دار نسبت به نمونه گرانیتی بدون کانه‌زایی و توف حدواسط میزبان بهنجار شد. بر اساس نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب (شکل ۱۰)، نمونه‌های کانه‌دار نسبت به توده گرانیتی بدون



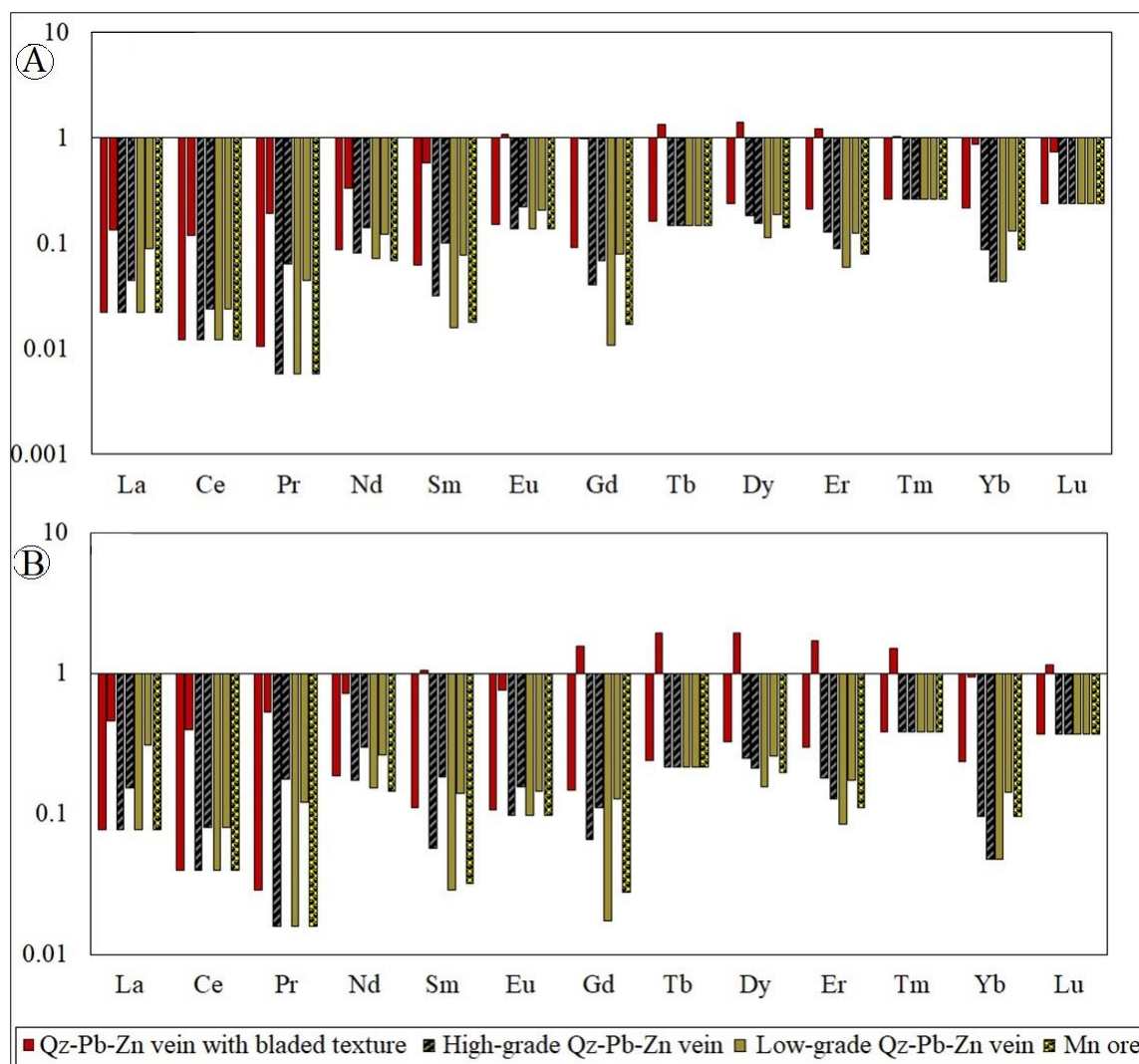
شکل ۹. A: الگوی تغییرات عناصر کمیاب برای رگه‌های کانه‌دار، توف حدواسط میزبان و توده گرانیتی سالم بدون کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار که نسبت به کندریت (Thompson, 1982). بهنجار شده‌اند و B: الگوی تغییرات عناصر کمیاب خاکی برای رگه‌های کانه‌دار، توف حدواسط میزبان و توده گرانیتی سالم بدون کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار که نسبت به کندریت (Boynton, 1984). بهنجار شده‌اند.

Fig. 9. A: Chondrite-normalized (Thompson, 1982) rare element patterns for the mineralized veins, host intermediate tuff, and barren fresh granite body in the Varmazyar occurrence, and B: Chondrite-normalized (Boynton, 1984) REE patterns for the mineralized veins, host intermediate tuff, and barren fresh granite body in the Varmazyar occurrence.



شکل ۱۰. A: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی ورمزیار که نسبت به نمونه گرانیتی بدون کانه‌زایی (نمونه V-02، جدول ۱) بهنجار شده‌اند و B: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی ورمزیار که نسبت به نمونه توف حدواسط میزبان (نمونه V-06، جدول ۱) بهنجار شده‌اند.

Fig. 10. A: Loss and gain histogram of rare elements in the mineralized samples from the Varmazyar occurrence that normalized against barren granite sample (sample V-02, Table 1), and B: Loss and gain histogram of rare elements in the mineralized samples from the Varmazyar occurrence that normalized against host intermediate sample (sample V-06, Table 1).



شکل ۱۱. A: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی ورمزیار که نسبت به نمونه گرانیتی بدون کانه‌زایی (نمونه V-02، جدول ۱) بهنجار شده‌اند و B: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار در رخداد معدنی ورمزیار که نسبت به نمونه توف حدواسط میزبان (نمونه V-06، جدول ۱) بهنجار شده‌اند.

Fig. 11. A: Loss and gain histogram of rare earth elements in the mineralized samples from the Varmazyar occurrence that normalized against barren granite sample (sample V-02, Table 1), and B: Loss and gain histogram of rare earth elements in the mineralized samples from the Varmazyar occurrence that normalized against host intermediate sample (sample V-06, Table 1).

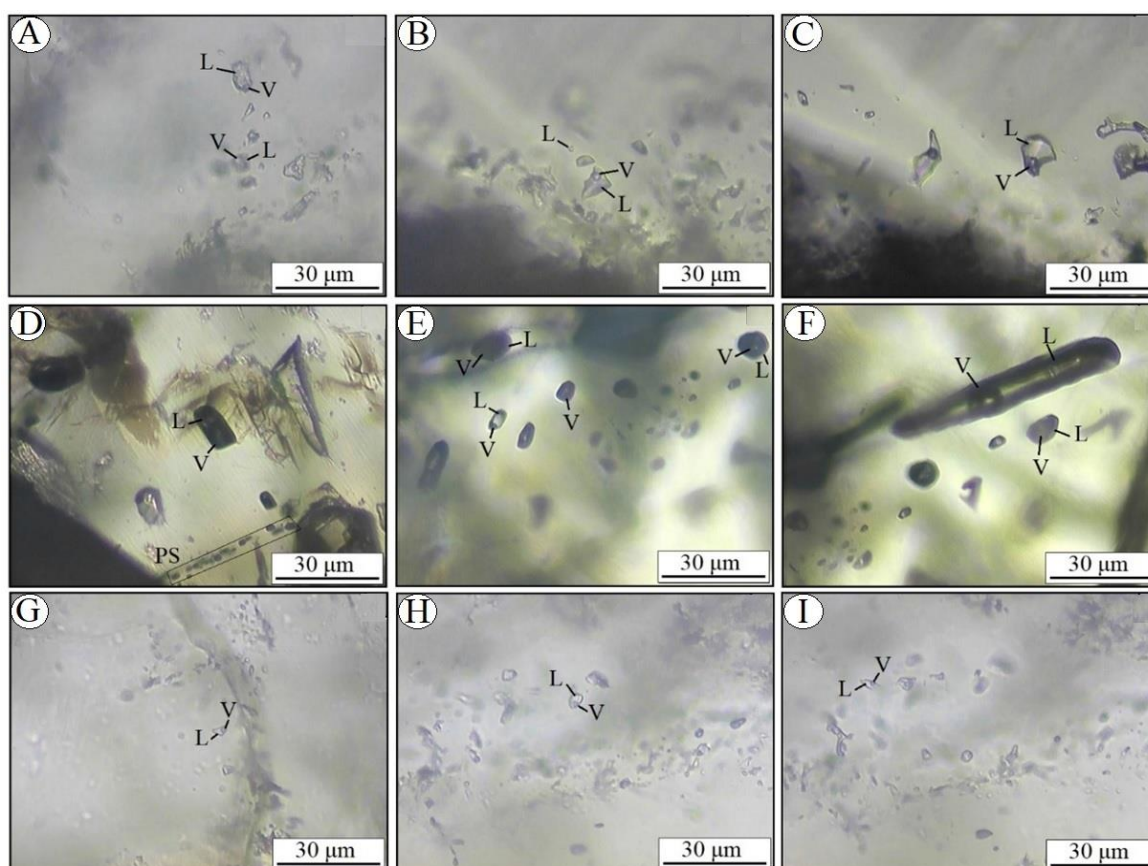
پتروگرافی

سیال موجود در رخداد معدنی ورمزیار از نوع دو فازهای غنی از مایع (LV) و غنی از گاز (VL) و تک فازهای گاز (V) و مایع (L) هستند (شکل ۱۲-A تا I). میان‌بارهای دو فازهای نوع LV نسبت به انواع دیگر از فراوانی بیشتری برخوردار هستند. در اغلب نمونه‌های

میان‌بارهای سیال موجود در نمونه‌های رخداد معدنی ورمزیار بیشتر از نوع اولیه هستند. در برخی از نمونه‌ها، میان‌بارهای سیال ثانویه کاذب نیز قابل مشاهده است. بر اساس بررسی‌های سنگ‌شناسی، میان‌بارهای

اطمینان از درست بودن نتایج، تمامی اندازه گیری‌ها بر روی میان‌بارهایی انجام شد که دارای معیارهای لازم برای میان‌بارهای اولیه (Roedder, 1984) بودند. میان‌بارهای سیال موجود در کوارتزهای مرحله دوم کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار اندازه کوچک تا متوسط دارند و در محدوده بین ۴ تا ۳۰ میکرون قرار می‌گیرند.

بررسی شده، این چهار نوع میان‌بار سیال در کنار یکدیگر قابل مشاهده هستند که می‌تواند شواهدی بر رخداد جوشش باشد. از لحاظ ریخت‌شناسی، میان‌بارهای سیال موجود در نمونه‌های رخداد معدنی ورمزیار دارای شکل‌های بیضوی کشیده، منفی بلور و چندوجهی نامنظم هستند. پدیده باریک‌شدگی در پاره‌ای از میان‌بارهای سیال دیده می‌شود؛ ولی دارای فراوانی زیادی در نمونه‌ها نیست. برای



شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپی (در دمای اتاق و نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) از انواع میان‌بارهای سیال در رخداد معدنی ورمزیار. میان‌بارهای سیال دارای نسبت‌های متفاوت L/V هستند که می‌تواند شواهدی بر رخداد جوشش باشد. A تا C: رخداد هم‌زمان میان‌بارهای سیال اولیه دوفازی نوع LV و VL در کوارتزهای مرحله دوم کانه‌زایی که احتمالاً در اثر رخداد جوشش تشکیل شده‌اند، D تا F: رخداد هم‌زمان میان‌بارهای سیال اولیه نوع LV و VL با شکل‌های بیضوی کشیده و منفی بلور در اسفالریت‌های مرحله دوم کانه‌زایی به عنوان شواهدی بر رخداد جوشش و G تا I: میان‌بارهای سیال اولیه دوفازی نوع LV در کوارتزهای مرحله سوم کانه‌زایی. L: مایع، V: بخار، PS: میان‌بار سیال ثانویه کاذب

Fig. 12. Photomicrographs (at room temperature, plane-polarized light) of fluid inclusion types from Varmazyar occurrence. Inclusions showing variable L/V ratio as evidence for boiling. A–C: Coexisting primary two-phase LV and VL fluid inclusions in stage-2 quartz, probably formed due to boiling, D–F: Coexisting elliptical or negative-shaped primary LV and VL fluid inclusions as evidence of boiling in stage-2 sphalerite, G–I: Primary two-phase LV fluid inclusions in stage-3 quartz. L: liquid, V: vapor, PS: pseudosecondary fluid inclusion

در سیالات گرمایی باشد (Roedder, 1984; Shepherd et al., 1985; Davis et al., 1990; Goldstein, 2003; Prokofiev et al., 2010). دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{m-ice}) در میان‌بارهای سیال موجود در کوارتزها و اسفالریت‌های مرحله دوم کانه‌زایی به ترتیب بین ۳- تا ۰/۶- و ۴- تا ۱- درجه سانتی‌گراد است (جدول ۲). این دما در کوارتزهای مرحله سوم کانه‌زایی در محدوده بین ۰/۵- تا ۰/۱- متغیر است (جدول ۲). بر این اساس و با توجه به رابطه بودنار (Bodnar, 1993)، میزان شوری میان‌بارهای سیال در کوارتزها و اسفالریت‌های مرحله دوم کانه‌زایی به ترتیب بین ۱/۱ تا ۵ (میانگین ۳/۳) و ۱/۷ تا ۶/۴ (میانگین ۵) درصد وزنی معادل نمک طعام است (جدول ۲ و شکل ۱۳-A). میزان شوری در میان‌بارهای سیال کوارتزهای مرحله سوم کانه‌زایی بین ۰/۲ تا ۰/۹ (میانگین ۰/۶) درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه شد (جدول ۲ و شکل ۱۳-A).

اندازه میان‌بارهای سیال بررسی شده در کانی اسفالریت این مرحله بین ۷ تا ۱۴۶ میکرومتر متغیر است. میان‌بارهای سیال موجود در کوارتزهای مرحله سوم اغلب کوچک بوده و اندازه‌ای بین ۱ تا ۴۳ میکرون دارند.

داده‌های ریزدماسنجی

در این پژوهش، تعداد ۶۳ میان‌بار سیال اولیه نوع LV مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس بررسی‌های ریزدماسنجی، دمای ذوب اولین قطعه یخ (T_{fm}) در میان‌بارهای سیال موجود در کوارتزها و اسفالریت‌های مرحله دوم کانه‌زایی به ترتیب در محدوده ۲۱- تا ۲۶- درجه سانتی‌گراد و ۳۰- تا ۴۰- درجه سانتی‌گراد (بیشترین فراوانی در محدوده ۳۰- درجه سانتی‌گراد) و در کوارتزهای مرحله سوم کانه‌زایی در محدوده ۲۱- تا ۳۰- درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند (جدول ۲). این دماها می‌تواند بیانگر وجود نمک‌های سدیم و پتاسیم

جدول ۲. خلاصه نتایج بررسی‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال اولیه نوع LV در رخداد معدنی سرب- روی (نقره) ورمزیار. اعداد داخل پرانتز، مقدار میانگین اندازه‌گیری شده است.

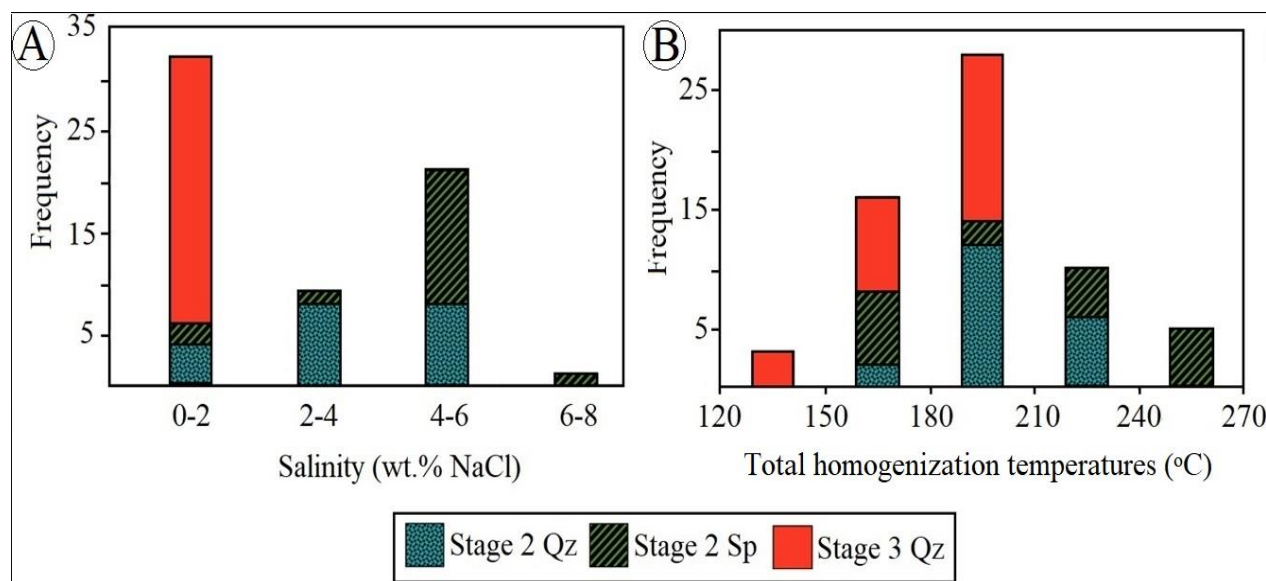
Table 2. Microthermometric data summary for primary LV fluid inclusions from Varmazyar Pb-Zn (Ag) occurrence. The digit in the parenthesis is the mean value of inclusion measured.

Mineral	Size (μm)	T_{fm} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{m-ice} ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity (wt. % NaCl)	T_h ($^{\circ}\text{C}$)	Density (g/cm^3)
Stage 2 Qz (n = 20)	4-30	-21 to -26	-3 to -0.6	1.1-5 (3.3)	168-235 (200)	0.8-0.9
Stage 2 Sp (n = 17)	7-146	-30 to -40 (mode at -30)	-4 to -1	1.7-6.4 (5)	157-249 (206)	0.9-1.0
Stage 3 Qz (n = 26)	1-43	-21 to -26	-0.5 to -0.1	0.2-0.9 (0.6)	135-194 (176)	0.8-0.9

نهایی میان‌بارهای سیال موجود در کوارتزها و اسفالریت‌های مرحله دوم کانه‌زایی به ترتیب در محدوده بین ۱۶۸ تا ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) و ۱۵۷ تا ۲۴۹ درجه سانتی‌گراد

تمامی میان‌بارهای سیال بررسی شده، به فاز مایع همگن شدند. به دلیل وقوع رخداد جوشش، هیچ‌گونه تصحیح دمایی بر روی مقادیر دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال اعمال نشده است. دمای همگن شدن

میانگین ۲۰۶ درجه سانتی گراد) است (جدول ۲ و شکل ۱۳-B). دمای همگن شدن نهایی در میان بارهای سیال موجود در کوارتزهای مرحله سوم کانه زایی بین ۱۳۵ تا ۱۹۴ درجه سانتی گراد (میانگین ۱۷۶ درجه سانتی گراد) متغیر است (جدول ۲ و شکل ۱۳-B). مقادیر چگالی برای میان بارهای سیال در رخداد معدنی ورمزیار بین ۰/۸ تا ۱ گرم بر سانتی متر مکعب به دست آمده است (جدول ۲).



شکل ۱۳. A و B: به ترتیب نمودارهای فراوانی درجه شوری و دمای همگن شدن میان بارهای سیال اولیه نوع LV در رخداد معدنی سرب- روی (نقره) ورمزیار

Fig. 13. Frequency histograms, respectively, of equivalent salinities and total homogenization temperatures for the primary LV fluid inclusions from Varmazyar Pb-Zn (Ag) occurrence

پایین تر و شوری بسیار کمتر است (شکل ۱۴).

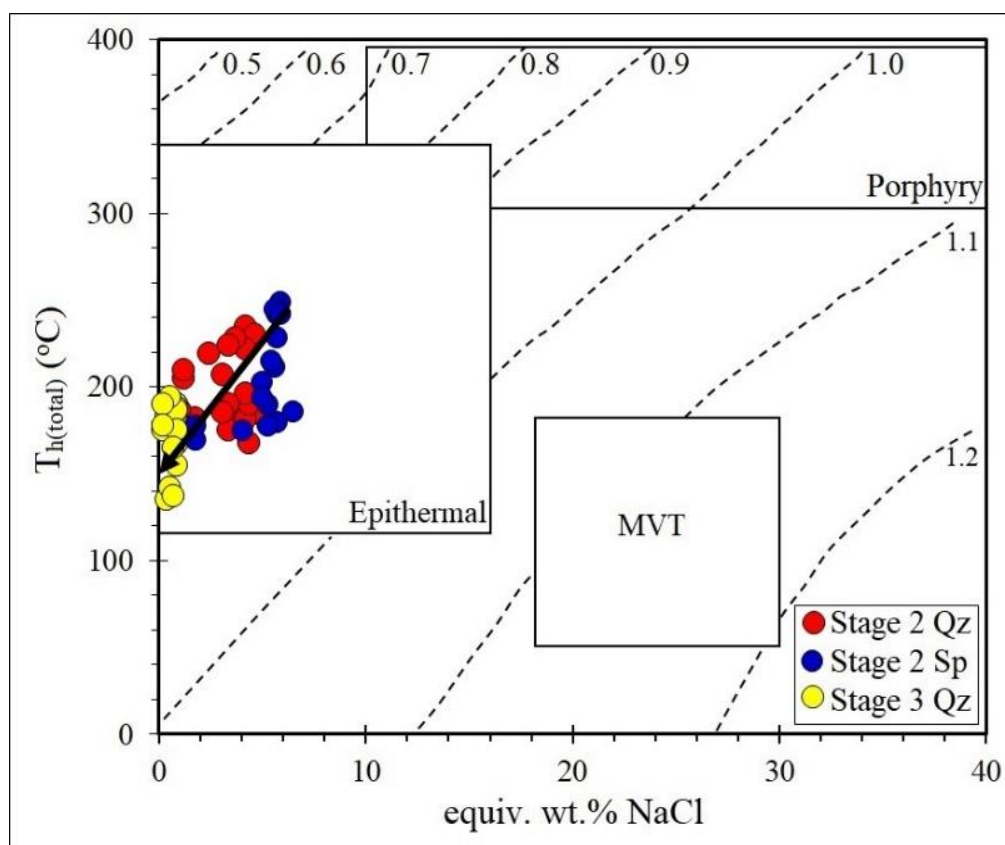
بررسی های پیشین نشان داده اند که بین دمای همگن شدن و شوری سیالات کانه ساز در فرایند اختلاط سیالات، رابطه مستقیم و در فرایند جوشش، رابطه معکوس وجود دارد (Shepherd et al., 1985; Zhai et al., 2013; Canet et al., 2011; Li et al., 2019). در نمودار دمای همگن شدن و شوری (شکل ۱۴)، داده های میان بارهای سیال در رخداد معدنی ورمزیار در محدوده کانه زایی های اپی ترمال و نزدیک به محدوده سیالات ماگمایی (Roedder, 1984) قرار گرفته است. شوری سیالات ماگمایی معمولاً در محدوده بین ۵ تا ۱۰ درصد وزنی معادل نمک طعام تغییر می کند (Burnham, 1979;)

تحول سیال کانه دار

داده های میان بارهای سیال در رخداد معدنی ورمزیار نشان می دهد، سیالات مسئول کانه زایی در این رخداد معدنی با یک سامانه $H_2O-NaCl$ با دمای متوسط و شوری پایین مرتبط است (جدول ۲). تکامل این سامانه از مرحله دوم کانه زایی به مرحله سوم کانه زایی، با کاهش دما از حدود ۲۰۰ درجه سانتی گراد به ۱۷۶ درجه سانتی گراد تغییر کرده است. بر اساس نمودار دمای همگن شدن نهایی در مقابل میزان شوری (Wilkinson, 2001)، داده های میان بارهای سیال در کوارتزها و اسفالریت های رخداد معدنی ورمزیار بیانگر اختلاط یک سیال با دما و شوری متوسط با یک سیال دیگر با دمای به نسبت

در سامانه گرمایی ورمزیار است. جوشش سیال می تواند به تفکیک شدید یک سیال شور به فازهای بخار و در نتیجه افزایش بیشتر شوری سیال باقی مانده منجر شود (Wilkinson, 2001; Canet et al., 2011). این تفسیر برای مقادیر شوری کم تا متوسط میان بارهای سیال در بسیاری از سامانه های کانه زایی اپی ترمال به کار رفته است (Sherlock et al., 1995; Scott and Watanabe, 1998; Simmons and Browne, 2000; Simpson et al., 2001; Camprubi and Albinson, 2007; Klemm et al., 2007

Hedenquist and Lowenstern, 1994; Yardley, 2005; Simmons and Brown, 2006)؛ هر چند سیالات ماگمایی با شوری بیشتر نیز می تواند وجود داشته باشد (Yardley and Bodnar, 2014). لذا، محدوده نسبتاً گسترده داده های شوری (۰/۲ تا ۶/۴ درصد وزنی معادل نمک طعام) برای رخداد معدنی ورمزیار می تواند نشان دهنده اختلاط سیالات ماگمایی و جوی باشد. از طرف دیگر، وجود پرش های گرمایی و کوارتزهای با بافت تیغه ای (جانشین شده به جای کلسیت های تیغه ای)، پرماتند، کاکلی و پوسته ای در این رخداد معدنی بیانگر رخداد جوشش حین تکامل سیال کانه ساز



شکل ۱۴. نمودار دمای همگن شدن نهایی در مقابل شوری برای میان بارهای سیال اولیه نوع LV در رخداد معدنی ورمزیار. محدوده های مشخص شده برای کانسارهای پورفیری، اپی ترمال و MVT بر اساس ویلکینسون (Wilkinson, 2001) ترسیم شده اند. خطوط مقطع نشان دهنده چگالی سیالات در سامانه های H₂O-NaCl است (Haas, 1971).

Fig. 14. Total homogenization temperatures vs. equivalent salinity diagram for primary LV fluid inclusions from Varmazyar Pb-Zn (Ag) occurrence. Typical ranges of fluid inclusions in porphyry, epithermal and MVT deposits worldwide are modified after Wilkinson (2001). Diagonal contours show fluid densities of H₂O-NaCl fluids in g/cm³ for pressures along the L-V curve (Haas, 1971).

شواهد جوش سیال کانه‌دار

شواهد بافتی و داده‌های میان‌بارهای سیال در رخداد معدنی ورمزیار نشان‌دهنده رخداد جوش حین تکامل سامانه کانه‌زایی در این رخداد معدنی است. وجود کوارتزهای با بافت تیغه‌ای (جانشین شده به جای کلسیت‌های تیغه‌ای)، پرماند، کاکلی و پوسته‌ای در رگه‌ها و سیمان گرمایی برش‌ها در رخداد معدنی ورمزیار بیانگر رخداد جوش است. حضور کلسیت با بافت تیغه‌ای که توسط کوارتز جانشین شده است، یکی از شواهد قوی رخداد جوش در محیط‌های اپی‌ترمال است (White and Hedenquist, 1990; Hedenquist et al., 2000; Moncada et al., 2012; Moncada et al., 2017). این بافت در بخش‌های بالایی سامانه‌های اپی‌ترمال در نتیجه خروج CO₂ به صورت فاز بخار در حین جوشش به وجود می‌آید (Simmons and Christenson, 1994; André-Mayer et al., 2002). خروج CO₂ به صورت فاز بخار سبب ته‌نشست سریع کلسیت و تشکیل بافت تیغه‌ای می‌شود.

بافت پرماند کوارتز، محصول فوق‌اشباع شدن سیال در اثر کاهش سریع فشار مرتبط با رخداد فرایند جوشش و به دنبال آن کاهش دما است که سبب ته‌نشست سیلیس بی‌شکل (آمورف) می‌شود (Henley and Hughes, 2000). بافت‌های کاکلی و پوسته‌ای از بافت‌های اولیه سیلیس هستند که به ته‌نشست سریع و متناوب کوارتز کلسدونی در فضاهای خالی در سامانه‌های اپی‌ترمال کم‌عمق نسبت داده می‌شوند (Roedder, 1984; Fournier, 1985; Bodnar et al., 1985a). این بافت‌ها در حین باز شدن سریع درز و شکستگی‌های مرتبط با کاهش فشار و به دنبال آن، کاهش سریع دما مرتبط با فرایند جوشش تشکیل می‌شوند (Henley and Hughes, 2000; Taylor, 2009; Moncada et al., 2012).

رخداد جوش سیالات در رخداد معدنی ورمزیار با رخداد گسترده برش‌های گرمایی و رگه‌های برشی کانه‌دار نیز قابل تشخیص است که معمولاً شواهدی از کاهش شدید و متناوب فشار در نظر گرفته می‌شوند. این وقایع می‌توانند سبب رخداد جوشش در سامانه‌های

گرمایی شوند (Cole and Drummond, 1986; Jobson et al., 1994). علاوه بر این، رگه کانه‌دار ورمزیار دارای مرز تماس مستقیم با واحدهای آذرآواری میزبان خود است. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که رگه و رگچه‌های کانه‌دار از طریق پرکردن فضاهای خالی تحت فشار هیدرواستاتیک تشکیل شده‌اند (Hedenquist et al., 1998; Li et al., 2014; Ouyang et al., 2014). که به توسعه برش‌های گرمایی منجر شده است (Thiersch et al., 1997; Muntean and Einaudi, 2001).

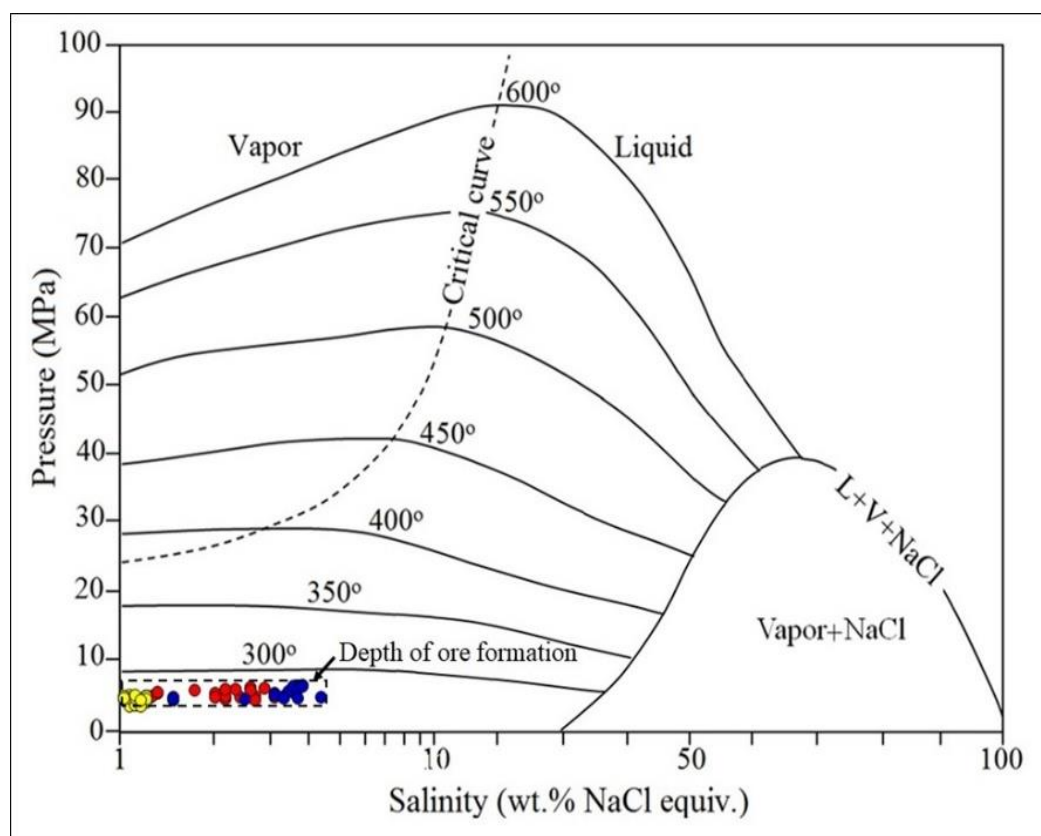
به طور معمول، حضور هم‌زمان میان‌بارهای سیال دوفازی نوع LV و VL در یک مجموعه میان‌بارهای سیال را به عنوان شواهدی از رخداد جوشش تفسیر می‌کنند (Bodnar et al., 1985a; White and Hedenquist, 1995; Moncada et al., 2017). میان‌بارهای سیال تک‌فازی نوع V نیز به عنوان شاهد دیگری از رخداد جوشش در سیالات کانه‌ساز تفسیر می‌شود (Ronacher et al., 2000; Moncada et al., 2017). حضور هم‌زمان میان‌بارهای سیال نوع LV، VL و V در کانی‌های کوارتز و اسفالریت در رخداد معدنی ورمزیار می‌تواند بیانگر به دام افتادن آنها از یک سیال در حال جوشش باشد. با این وجود، این حضور هم‌زمان می‌تواند از طریق به دام افتادن سیالات مختلف، در زمان‌های مختلف (Ramboz et al., 1982) و از طریق نشست و پدیده باریک‌شدگی (Rusk et al., 2008) نیز تعبیر شود.

تعیین عمق و دمای تشکیل

با توجه به رخداد جوشش در کانه‌زایی سرب- روی (نقره) ورمزیار، داده‌های دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال نیاز به تصحیح فشار ندارند (Simeone and Simmons, 1999). از این رو، با توجه به داده‌های ریزدماسنجی، محدوده دمای همگن شدن بین ۱۳۵ تا ۲۴۹ درجه سانتی‌گراد بیانگر دمای کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار تلقی می‌شود. شیب نسبتاً زیاد و ماهیت پرکننده فضاهای خالی رگه کانه‌دار در منطقه ورمزیار نشان می‌دهد که سیالات کانه‌ساز در این رخداد معدنی دوره‌های گذرایی از فشار هیدرواستاتیک را پشت سر

(Hedenquist and Arribas, 1998)، بالاترین دمای میان‌بارهای سیال نوع LV (۱۹۴ تا ۲۴۹ درجه سانتی‌گراد) برای تخمین فشار سیالات در رخداد معدنی ورمزیار استفاده شد. بر اساس داده‌های تجربی هاس (Haas, 1971) و بودنار و همکاران (Bodnar et al., 1985b)، فشار به دام افتادن سیالات در رخداد معدنی ورمزیار بین ۴۵ تا ۸۰ بار به دست آمد (شکل ۱۵). با توجه به میانگین چگالی میان‌بارهای سیال (۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، عمق کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار بین ۴۷۰ تا ۸۲۰ متر زیر سطح ایستایی قدیمی محاسبه شد.

گذاشته و جوشش احتمالاً در این زمان‌ها رخ داده است. بنابراین، حضور هم‌زمان میان‌بارهای سیال نوع LV و VL که در بالا به آن اشاره شد، نشان می‌دهد که سیالات گرمایی مسئول کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار به نقطه اشباع بخار رسیده‌اند. در چنین حالتی، دمای همگن شدن نهایی میان‌بارهای سیال نوع LV می‌تواند به عنوان دمای به دام افتادن تلقی شده و فشار سیال در این دما می‌تواند به عنوان فشار به دام افتادن لحاظ شود (Roedder and Bodnar, 1980; Rabiei et al., 2017; Kouhestani et al., 2019a; Kouhestani et al., 2019b; Kouhestani et al., 2020). لذا به پیروی از آلینسون (Albinson, 1988) و هدنکوئیست و آریباس



شکل ۱۵. فشار تخمینی برای میان‌بارهای سیال در رخداد معدنی ورمزیار که بر مبنای دمای همگن شدن نهایی و از بین رفتن فاز بخار در میان‌بارهای سیال نوع LV محاسبه شده‌اند (با اندکی تغییرات از بوذری و همکاران (Bouzari and Clark, 2006)).

Fig. 15. Estimated pressure for fluid inclusions in the Varmazyar occurrence that exhibited final homogenization by vapor disappearance of LV fluid inclusions (modified after Bouzari and Clark, 2006).

نوع کانه‌زایی و الگوی تشکیل

مقایسه شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت در رخداد معدنی ورمزیار با انواع کانسارهای سرب- روی (Cox and Singer, 1986; Dill, 2010) نشان می‌دهد، کانه‌زایی در این رخداد معدنی را می‌توان در دسته کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه طبقه‌بندی کرد. مهم‌ترین شواهد این مقایسه عبارتند از: ۱) کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار توسط ساختارهای گسلی کنترل و توسط واحدهای آذرآواری میزبانی شده است. ۲) دگرسانی‌های گرمایی در این رخداد معدنی با مجموعه سربسیت، ایلیت، کلسیت و کلریت در نزدیکی رگه کانه‌دار مشخص می‌شود. ۳) کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار شامل مجموعه کانیایی گالن، اسفالریت، پیریت و کانی‌های منگنزدار (پسیلوملان و پیرولوزیت) است که با مجموعه کانی‌های باطله کوارتز، سربسیت و کلسیت همراهی می‌شوند. ۴) ساخت و بافت‌های کانه‌زایی اپی‌ترمال مانند برشی، شانهای، پوسته‌ای، کاکلی، پرمانند، گل کلمی و تیغه‌ای به خوبی در رخداد معدنی ورمزیار توسعه یافته است.

مقایسه این ویژگی‌ها با انواع کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه و گران‌بها نشان می‌دهد که این مجموعه کانیایی، ساخت و بافت و الگوی دگرسانی بیشترین شباهت را با کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون حدواسط (Hedenquist et al., 2000; Einaudi et al., 2003; Sillitoe and Hedenquist, 2005; Gemmeil, 2004; Wang et al., 2019) دارد. علاوه بر این، دمای متوسط و شوری پایین سیالات کانه‌ساز در رخداد معدنی ورمزیار از ویژگی‌های کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه و گران‌بها است که در دیگر بخش‌های کمر بند فلز زایی طارم- هشتجین (Mehrabi et al., 2010; Mehrabi et al., 2014, Mehrabi et al., 2016; Kouhestani et al., 2017; Kouhestani et al., 2018a; Kouhestani et al., 2019a; Kouhestani et al., 2019b; Kouhestani et al., 2020; Mikaeili et al., 2018) و دیگر نقاط دنیا (Albinson et al., 2001; John, 2001; Simmons et al., 2005; Yilmaz et al., 2010; Sabeva et al., 2017) گزارش شده است. عمق کانی‌سازی در رخداد معدنی ورمزیار بین

۴۷۰ تا ۸۲۰ متر تعیین شده است. این عمق کانی‌سازی از ویژگی‌های رگه‌های فلزات پایه غنی از نقره در کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون حدواسط است (Hedenquist et al., 2000; Albinson et al., 2001; Einaudi et al., 2003; Sillitoe and Hedenquist, 2005). نبود بافت کوارتز حفره‌ای و دگرسانی آرژلیک پیشرفته (با مجموعه کانی‌های آلونیت، کاتولینیت و پیروفیلیت) و همچنین نبود مجموعه کانیایی آدولاریا، آلونیت، انارژیت، لوزونیت و تنانیت در رگه کانه‌دار ورمزیار بیانگر متفاوت بودن کانه‌زایی فلزات پایه در این رخداد معدنی از کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین و بالا است. به علاوه، کانی‌های دگرسانی (مجموعه سربسیت، ایلیت، کلسیت و کلریت) در رخداد معدنی ورمزیار جزو دگرسانی‌های گرمایی حرارت پایین تا متوسط هستند که شاخص کانی‌های دگرسانی در کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط هستند. در جدول ۳ و جدول ۴، به ترتیب ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی رخداد معدنی ورمزیار با برخی از کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط موجود در کمر بند فلز زایی طارم- هشتجین و پهنه‌های کانه‌دار ترود- چاه شیرین، تکاب و جنوب‌خاور زنجان مقایسه شده است.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از مشاهدات صحرایی، مطالعات سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری و روابط همیافتی کانی‌ها، مراحل تکوین و تکامل رخداد معدنی سرب- روی (نقره) ورمزیار را می‌توان به صورت توالی سه مرحله‌ای خلاصه کرد (شکل ۱۶):

مرحله نخست با تشکیل توالی‌های آتشفشانی و آتشفشانی- رسوبی ائوسن در منطقه همراه است (شکل ۱۶- A). در مرحله دوم، هم‌زمان با فاز زمین‌ساختی پیرنه در ائوسن پایانی، نهشته‌های ائوسن چین خورده و گسل‌ها و شکستگی‌های فراوانی در آنها تشکیل شده است (شکل ۱۶- B). در همین مرحله، توده‌های گرانیتی اغلب کم‌عمق، هم‌راستا با روندهای ساختاری در واحدهای سنگی ائوسن نفوذ کرده است (Kouhestani et al., 2018b). توده‌های مزبور علاوه بر ایجاد هاله دگرگونی مجاورتی در واحدهای سنگی ائوسن، به عنوان موتور حرارتی عمل کرده و سبب چرخش سیالات جوی در منطقه شده‌اند.

جدول ۳. مقایسه ویژگی‌های اصلی رخداد معدنی ورمزیار با برخی از کانسارهای اپی ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمربند فلززایی طارم- هشتجین

Table 3. Comparison of main characteristics of Varmazyar occurrence with some intermediate-sulfidation type of epithermal deposits in the Tarom-Hashtjin metallogenic belt

	Varmazyar	Zajkan	Marshoun	Aliabad-Khanchy	Aqkand	Lubin-Zardeg	Shah Ali Beiglou
Location	N Zanjan	SE Zanjan	SE Zanjan	E Zanjan	N Zanjan	SE Zanjan	N Zanjan
Host rock	Acidic and intermediate tuff	Acidic and intermediate tuff	Intermediate tuff, pyroxene quartz monzodiorite	Andesitic lavas, tuff units	Andesitic basalt lavas	Tuff units	Quartz monzonite dyke
Timing of mineralization	Late Eocene (?)	Late Eocene (?)	Late Eocene (?)	Late Eocene (?)	Late Eocene (?)	Late Eocene (?)	Miocene (?)
Ore-controlling structures	Normal faults	Normal faults	Normal faults	Normal faults	Normal faults	Normal faults	Normal faults
Ore Minerals	Gn, Sp, Py, Ps, Pyr	Gn, Sp, Ccp, Py, Hem	Gn, Sp, Ccp, Py	Ccp, Py, Hem	Ccp, Hem	Py, Ccp, Gn, Sp, Ttr-Tnt, Bn, Au, Ag	Sp, Gn, Ccp, Py, Ttr-Tnt
Ore texture	Vein-veinlet, breccia, vug infill, comb, crustiform, colloform, plumose, cockade, bladed	Vein-veinlet, breccia, vug infill, comb, crustiform, colloform, plumose, cockade	Vein-veinlet, breccia, vug infill, comb, crustiform, colloform, plumose, cockade, bladed	Vein-veinlet, breccia, vug infill, comb, crustiform, colloform, cockade	Vein-veinlet, breccia, vug infill, crustiform, colloform, plumose	Vein-veinlet, breccia, vug infill, crustiform, comb, colloform	Vein-veinlet, breccia, crustiform, comb
Alteration	Silica, intermediate argillic, carbonatization, propylitic	Silica, intermediate argillic, propylitic	Silica, intermediate argillic, carbonatization, propylitic	Silica, chloritization, argillic, propylitic	Silica, chloritization, propylitic	Silica, argillic, propylitic	Silica, argillic, chloritization, carbonatization, propylitic
References	This study	Kouhestani et al. (2019a)	Kouhestani et al. (2019b)	Mokhtari et al. (2016); Kouhestani et al. (2018b)	Feizi et al. (2016); Kouhestani et al. (2017)	Zamaniah et al. (2019); Zamaniah et al. (2020)	Mikaeili et al. (2018)

Abbreviations: Ag: native silver, Au: native gold, Bn: bornite, Ccp: chalcopyrite, Gn: galena, Hem: hematite, Py: pyrite, Pyr: pyrolusite, Ps: psilomelane, Sp: sphalerite, Tnt: tennantite, Ttr: tetrahedrite. Abbreviations after [Whitney and Evans \(2010\)](#).

جدول ۴. مقایسه ویژگی‌های اصلی رخداد معدنی ورمزیار با برخی از کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در ایران

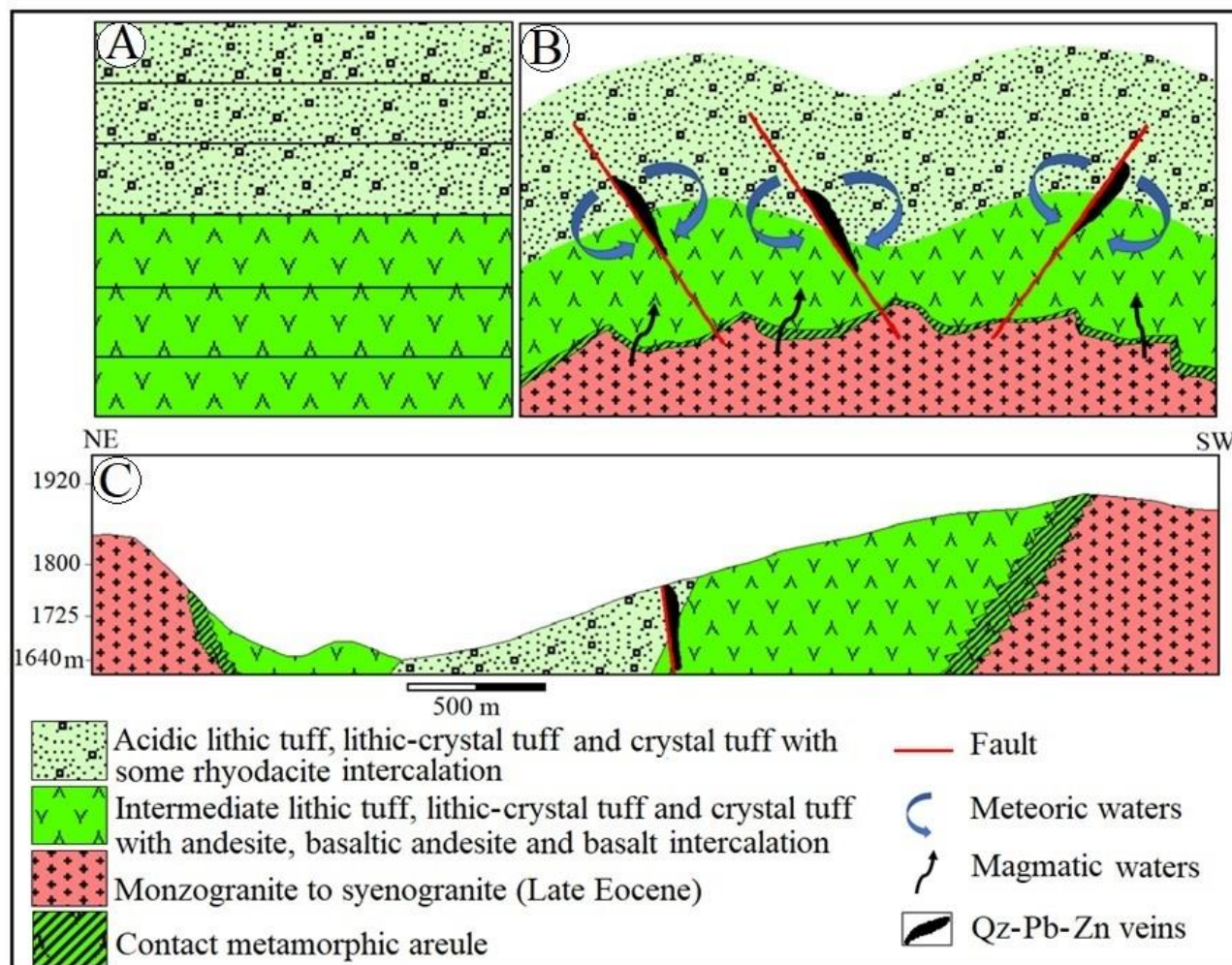
Table 4. Comparison of main characteristics of Varmazyar occurrence with some intermediate-sulfidation type of epithermal deposits in Iran

	Varmazyar	Qoyjeh Yeylaq	Qomish Tappeh	Arpachay	Ay Qalasi	Cheshmeh Hafez	Gandi and Abolhassani
Location	N Zanjan	SE Zanjan	SE Zanjan	Takab	Takab	Torud–Chah Shirin	Torud–Chah Shirin
Tectonic zone	Western Alborz-Azerbaijan	Uromieh-Dokhtar	Uromieh-Dokhtar	Uromieh-Dokhtar	Uromieh-Dokhtar	Alborz	Alborz
Host rock	Acidic and intermediate tuff	Basaltic andesite, andesite	Acidic tuff, crystal-vitric dacitic tuff	Gabbro	Siltstone, sandstone, feldspar porphyry dyke	Tuff, andesite, dacite	Andesite, pyroclastic rocks
Timing of mineralization	Late Eocene (?)	Miocene (?)	Pliocene (?)	Oligo-Miocene (?)	Mid-late Miocene (?)	Miocene (?)	Eocene (?)
Ore-controlling structures	Normal faults	Normal faults	Normal faults	Normal faults	Normal faults	Normal faults	Normal faults
Ore Minerals	Gn, Sp, Py, Ps, Pyr	Gn, Sp, Ttr–Tnt, Ccp, Py	Py, Ccp, Apy, Bn, Gn, Sp, Ttr–Tnt	Gn, Sp, Ccp, Py	Py, Ccp, Sp, Gn, Ttr–Tnt	Gn, Sp, Py, Ccp, Bn, Ttr–Tnt	Sp, Gn, Ag, Py, Ttr, Ccp
Ore texture	Vein-veinlet, breccia, vug infill, comb, crustiform, colloform, plumose, cockade, bladed	Vein-veinlet, breccia, vug infill	Vein-veinlet, breccia, vug infill, crustiform	Vein-veinlet, breccia, colloform, plumose, comb, vug infill	Vein-veinlet, breccia, comb, crustiform, vug infill, colloform	Vein-veinlet, breccia, comb, vug infill	Vein-veinlet, breccia, vug infill, crustiform, colloform
Alteration	Silica, intermediate argillic, carbonatization, propylitic	Silica, carbonatization, propylitic	Silica, argillic, carbonatization, argillic, propylitic	Silica, argillic, carbonatization, argillic, propylitic	Silica, argillic, argillic, propylitic	Silica, argillic, argillic, propylitic	Silica, argillic, propylitic
References	This study	Bagherpour et al. (2020)	Salehi (2009); Salehi et al. (2011); Salehi et al. (2015)	Talebi (2015); Talebi et al. (2017)	Shirkhani (2007); Mohammadi Niaei (2014); Mohammadi Niaei et al. (2015)	Mehrabi and Ghasemi Siani (2012); Mehrabi et al. (2014)	Shamarian et al. (2004)

Abbreviations: Ag: native silver, Apy: arsenopyrite, Bn: bornite, Ccp: chalcopyrite, Gn: galena, Po: pyrrhotite, Py: pyrite, Pyr: pyrolusite, Ps: psilomelane, Sp: sphalerite, Tnt: tennantite, Ttr: tetrahedrite. Abbreviations after [Whitney and Evans \(2010\)](#).

گرانیتی منشأ گرفته باشد نیز وجود دارد. مرحله سوم با بالا آمدگی منطقه و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش همراه بوده و طی آن ریخت‌شناسی امروزی منطقه حاصل شده است (شکل ۱۶- C).

این سیالات علاوه بر توسعه پهنه‌های دگرسانی در منطقه، سبب شسته شدن عناصر فلزی از سنگ‌های مسیر و تمرکز مجدد آنها به صورت رگه‌های سیلیسی- سولفیدی کانه‌دار شده است (شکل ۱۶- B). احتمال اینکه بخشی از ماده معدنی و سیالات گرمایی از توده‌های



شکل ۱۶. تصویر شماتیک از مراحل تکوین و تکامل کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار. A: تشکیل توالی آتشفشانی- رسوبی ائوسن، B: چین خوردگی واحدهای سنگی ائوسن طی فاز کوه‌زایی پیرنه (ائوسن بالایی) و نفوذ توده‌های گرانیتی به داخل آنها. این توده‌ها سبب ایجاد هاله دگرگونی مجاورتی و چرخش آب‌های جوی و شکل‌گیری کانه‌زایی به صورت رگه‌های سیلیسی- سولفیدی کانه‌دار درون واحدهای آتشفشانی منطقه شده است و C: بالا آمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش

Fig. 16. Schematic representation of mineralization evolution stages at Varmazyar occurrence. A: Formation of Eocene volcano-sedimentary units, B: Folding of Eocene rock units during Pyrenean orogeny (late Eocene) and intrusion of granitic bodies within rock strata. Intrusion of these plutons caused contact metamorphism and circulation of meteoric waters and formation of mineralized quartz-sulfide veins within volcanic units in the area, and C: Regional exhumation and development of weathering and erosion processes

نتیجه گیری

۱) شواهدی از قبیل مشاهده‌های صحرایی، ساخت و بافت، سنگ میزبان، هم‌یافت، زمین‌شیمی، میان‌بارهای سیال و الگوی دگرسانی‌ها در رخداد معدنی سرب- روی (نقره) ورمزیار نشان می‌دهد که این رخداد معدنی از نوع کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه (نقره) نوع سولفیداسیون حدواسط بوده و از این نظر قابل مقایسه با سایر کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمر بند فلز زایی طارم- هشتجین (مانند زاجکان، مرشون، علی‌آباد- خان‌چای، آق‌کند، لوبین- زرده و شاه‌علی‌بیگلو) و دیگر نقاط ایران مانند پهنه‌های کانه‌دار ترود- چاه‌شیرین (مانند چشمه‌حافظ، گندی و ابوالحسنی)، تکاب (مانند آی‌قلعه‌سی و آرپاچای) و جنوب‌خاور زنجان (مانند گمیش‌تپه و گویجه‌یلاق) دارد. در هر حال، این مقایسه نیازمند اطلاعات دقیق ایزوتوپی (پایدار و سن‌سنجی) برای بسیاری از این کانه‌زایی‌هاست.

۲) شباهت نسبی روند الگوی بهنجار شده عناصر کمیاب خاکی در رگه‌های کانه‌دار با نمونه‌های گرانیتی و توف‌های حدواسط، بیانگر ارتباط سیالات کانی‌ساز با توده گرانیتی و مشتق شدن آنها از این توده و همچنین شسته شدن عناصر از واحدهای توفی منطقه است.

۳) بررسی نمودارهای تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در رخداد معدنی ورمزیار نشان‌دهنده تمرکز عناصر کانه‌ساز (مانند Sb، Ag، Cd، Zn، Pb، Cu و As) در رگه‌های سیلیسی کانه‌دار است. تهی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی در این نمودارها بیانگر میزان بالای واکنش بین سیالات کانه‌زا و سنگ میزبان در رخداد معدنی ورمزیار است.

۴) داده‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد، سیالات مسئول کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار، یک سامانه

H₂O-NaCl با دمای متوسط (۱۳۵ تا ۲۴۹ درجه سانتی‌گراد) و شوری پایین (۰/۲ تا ۶/۴ درصد وزنی معادل نمک طعام) است. بر اساس این داده‌ها، روند تکامل سیال کانه‌ساز در این رخداد معدنی با فرایندهای اختلاط سیالات و جوشش سیال همخوانی دارد. این داده‌ها نشان می‌دهد، فشار به دام افتادن سیالات در رخداد معدنی ورمزیار بین ۴۵ تا ۸۰ بار و عمق کانه‌زایی بین ۴۷۰ تا ۸۲۰ متر زیر سطح آب‌های قدیمی بوده است.

۵) ژئومتری رگه‌ای کانه‌زایی در رخداد معدنی ورمزیار و دیگر کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال در کمر بند فلز زایی طارم- هشتجین نشان می‌دهد که ساختارهای گسلی معبر اصلی برای عبور جریان سیالات کانه‌ساز بوده‌اند. علاوه بر این، این کانه‌زایی‌ها اغلب درون توالی آتشفشانی- رسوبی ائوسن و در ارتباط فضایی نزدیک با توده‌های گرانیتوئیدی تشکیل شده‌اند. از این رو، بررسی پهنه‌های گسلی موجود در توالی آتشفشانی- رسوبی ائوسن به ویژه در مناطقی که مورد هجوم گرانیتوئیدی قرار گرفته‌اند، از نظر اکتشاف کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه (نقره) می‌تواند حائز اهمیت است.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش و از سردبیر و داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی به خاطر راهنمایی‌های علمی که به غنای بیشتر این مقاله منجر شده است، تشکر می‌نمایند. نویسندگان همچنین از حمایت‌های مالی سازمان ایمدرو برای انجام بررسی‌های میان‌بارهای سیال و سرکار خانم مهندس آفاجانی برای انجام بررسی‌های مزبور کمال قدردانی را دارند.

References

- Albinson, T., Norman, D.I., Cole, D. and Chomiak, B., 2001. Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constraints from fluid inclusion and stable isotope data. In: T. Albinson and C.E. Nelson (Editors), *New Mines and Discoveries in Mexico and Central America*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 1–32.
<https://doi.org/10.5382/SP.08.01>
- Albinson, T.F., 1988. Geologic reconstruction of paleosurfaces in the Sombroreite, Colorado, and Fresnillo districts, Zacatecas State, Mexico. *Economic Geology*, 83(8): 1647–1667.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.8.1647>
- Alderton, D.H.M., Pearce, J.A. and Potts, P.J., 1980. Rare earth element mobility during granite alteration: evidence from south-east England. *Earth and Planetary Science Letters*, 49(1): 149–165.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90157-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90157-0)
- André-Mayer, A.S., Leroy, J.L., Bailly, L., Chauvet, A., Marcoux, E., Grancea, L., Liosa, F. and Rosas, J., 2002. Boiling and vertical mineralization zoning: a case study from the Apacheta low-sulfidation epithermal gold-silver deposit, southern Peru. *Mineralium Deposita*, 37(5): 452–464.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90157-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90157-0)
- Bagherpour, H., Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H., Nabatian, G. and Mehdikhani, B., 2020. Intermediate-sulfidation Style of Epithermal Base Metal (Ag) Mineralization at the Qoyjeh Yeylaq Deposit, SW Zanjan, Iran. *Journal of Economic Geology*, 11(4): 545–564. (in Persian with extended English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v11i4.71615>
- Bazargani-Guilani, K. and Parchekani, M., 2011. Metallogenic properties of Barik-Ab Pb–Zn (Cu) ore deposit with acidic tuff host rock, west Central Alborz, northwest of Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 20(78): 97–104. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22071/GSJ.2010.54611>
- Bienvenu, P., Bougault, H., Joron, J.L., Treuil, M. and Dmitriev, L. 1990. MORB alteration: Rare earth element/non-rare hydromagmaphile element fractionation. *Chemical Geology*, 82: 1–14.
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90070-N](https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90070-N)
- Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O–NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683–684.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90378-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90378-A)
- Bodnar, R.J., Burnham, C.W. and Sterner, S.M., 1985a. Synthetic fluid inclusions in natural quartz. III. Determination of phase equilibrium properties in the system H₂O–NaCl to 1000 °C and 1500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(9): 1861–1873.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90081-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90081-X)
- Bodnar, R.J., Reynolds, T.J. and Kuehn, C.A., 1985b. Fluid-inclusion systematics in epithermal systems. In: B.R. Berger and P.M. Bethke (Editors), *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 73–97.
<https://doi.org/10.5382/Rev.02.05>
- Bouzari, F. and Clark, A.H., 2006. Prograde evolution and geothermal affinities of a major porphyry copper deposit: the Cerro Colorado Hypogene Protore, I Region, northern Chile. *Economic Geology*, 101(1): 95–134.
<http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.101.1.95>
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. *Developments in Geochemistry*, 2: 63–114.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Burnham, C.W., 1979. Magmas and hydrothermal fluids. In: H.L. Barnes (Editor), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. John Wiley and Sons Inc, New York, pp. 71–136.
- Camprubi, A. and Albinson, T., 2007. Epithermal deposits in Mexico, update of current knowledge, and an empirical re-classification. In: S.A. Alaniz-Álvarez and Á.F. Nieto-Samaniego (Editors), *Geology of Mexico: Celebrating the Centenary of the Geological Society of Mexico*. Geological Society of America, McLean, pp. 14–39.
[https://doi.org/10.1130/2007.2422\(14\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(14))
- Canet, C., Franco, S.I., Prol-Ledesma, R.M., González-Partida, E. and Villanueva-Estrada, R.E., 2011. A model of boiling for fluid inclusion studies: Application to the Bolaños Ag–Au–Pb–Zn epithermal deposit, Western Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, 110(2): 118–125.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.04.005>
- Cole, D.R. and Drummond, S.E., 1986. The effect of transport and boiling on Ag/Au ratios in hydrothermal solutions: A preliminary assessment and possible implications for the

- formation of epithermal precious metal ore deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 25(1–2): 45–79.
[https://doi.org/10.1016/0375-6742\(86\)90007-5](https://doi.org/10.1016/0375-6742(86)90007-5)
- Cox, D.P. and Singer, D.A., 1986. Mineral deposit models. United States Government Printing Office, Washington, 379 pp.
- Davies, R.G., 1977. Geological map of Bandar-e-Anzali, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Davis, D.W., Lowenstein, T.K. and Spencer, R.J., 1990. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl–H₂O, NaCl–KCl–H₂O, NaCl–MgCl₂–H₂O, and NaCl–CaCl₂–H₂O. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3): 591–601.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90355-O](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90355-O)
- Dill, H.G., 2010. The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100(1–4): 1–420.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.011>
- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W. and Inan, E.E., 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. In: S.F. Simmons and I. Graham (Editors.), *Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: rulers and witnesses of processes within the earth*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 285–313.
<https://doi.org/10.5382/SP.10.15>
- Esmali, M., Lotfi, M. and Nezafati, N., 2015. Fluid inclusion and stable isotope study of the Khalyfehlou copper deposit, southeast Zanjan, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(11): 9625–9633.
<https://doi.org/10.1007/s12517-015-1907-3>
- Faridi, M. and Anvari, A., 2000. Geological map of Hashtjin, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Feizi, M., Ebrahimi, M., Kouhestani, H. and Mokhtari, M.A.A., 2016. Geology, mineralization and geochemistry of Aqkand Cu occurrence (north of Zanjan, Tarom–Hashtjin zone). *Journal of Economic Geology*, 8(2): 507–524. (in Persian with extended English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v8i2.49150>
- Fournier, R.O., 1985. The behavior of silica in hydrothermal solutions. In: B.R. Berger and P.M. Bethke (Editors), *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 45–61.
<https://doi.org/10.5382/Rev.02.03>
- Gemmell, J. B., 2004. Low- and intermediate-sulfidation epithermal deposits. In: D.R. Cooke, C.L. Deyel and J. Pongratz (Editors), 24 Ct Gold Workshop. University of Tasmania, Hobart, Australia, pp. 57–63.
- Ghasemi Siani, M., Mehrabi, B., Azizi, H., Wilkinson, C.M. and Ganerod, M., 2015. Geochemistry and geochronology of the volcano-plutonic rocks associated with the Glojeh epithermal gold mineralization, NW Iran. *Open Geosciences*, 7(1): 207–222.
<https://doi.org/10.1515/geo-2015-0024>
- Goldstein, R.H., 2003. Petrographic analysis of fluid inclusions. In: I. Samson, A. Anderson and D. Marshall (Editors), *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineral Association of Canada, Vancouver, pp. 9–53.
- Haas, J.L., 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology*, 66(6): 940–946.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.6.940>
- Hedenquist, J.W. and Arribas, A., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu–Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4): 373–404.
<http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.93.4.373>
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Gold in 2000*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 245–277.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Reynolds, T.J., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system; Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu–Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4): 373–404.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.4.373>
- Hedenquist, J.W. and Lowenstein, J.B., 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370(6490): 519–527.
<https://doi.org/10.1038/370519a0>
- Henley, R.W. and Hughes, G.O., 2000. Underground fumaroles: “Excess heat” effects in vein formation. *Economic Geology*, 95(3): 453–466.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.3.453>

- Hosseinzadeh, M.R., Maghfouri, S., Moayyed, M. and Rahmani, A., 2016. Khalyfehlou deposit: High-sulfidation epithermal Cu-Au mineralization in the Tarom magmatic zone, north Khoramdareh. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 25(99): 179–194. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22071/GSJ.2016.40910>
- Humphris, S.E., 1984. The mobility of the rare earth elements in the crust. In: P. Henderson (Editor), *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 317–342.
- Jobson, D.H., Boulter, C.A. and Foster, R.P., 1994. Structural controls and genesis of epithermal gold-bearing breccias at the Lebong Tandai mine, Western Sumatra, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 50(1–3): 409–428.
[https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90034-5](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90034-5)
- John, D.A., 2001. Miocene and early Pliocene epithermal gold–silver deposits in the northern Great Basin, western USA: Characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Economic Geology*, 96(8): 1827–1853.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1827>
- Karimpouli, S., 2017. Exploration report of Pb–Zn in Varmazyar area. Industry, Mine and Trade Organization of Zanjan, Zanjan, 112 pp. (in Persian)
- Khakzad, A. and Hajalilou, B., 1999. Investigation on Pb, Zn and Cu mineralization in northwest of Zanjan and east of Mianeh and their relation to pervasive hydrothermal alteration. 3rd Symposium of Geological Society of Iran, University of Shiraz, Shiraz, Iran. (in Persian with English abstract)
- Khanmohammadi, N., Khakzad, A. and Izadyar, J., 2009. Mineralography, structural and textural studies and genesis of Zaker ironapatite deposit (northeast of Zanjan). *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 76(1): 119–126. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22071/GSJ.2009.55669>
- Klemm, L.M., Pettke, T., Heinrich, C.A. and Campos, E., 2007. Hydrothermal evolution of the El Teniente deposit, Chile: Porphyry Cu–Mo ore deposition from low-salinity magmatic fluids. *Economic Geology*, 102(6): 1021–1045.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.6.1021>
- Kordian, Sh., Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H. and Veiseh, S., 2020. Geology, mineralogy, structure and texture, geochemistry and genesis of the Golestan Abad iron oxide-apatite deposit (East of Zanjan). *Journal of Economic Geology*, 12(3): 299–325. (in Persian with extended English abstract)
<https://dx.doi.org/10.22067/econg.v12i3.79628>
- Kouhestani, H., Azimzadeh, A.M., Mokhtari, M.A.A. and Ebrahimi, M., 2017. Mineralization and fluid evolution of epithermal base metal veins from the Aqkand deposit, NW Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry)*, 194(2): 139–155.
<https://doi.org/10.1127/njma/2017/0036>
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A. and Chang, Z., 2018a. Origin and evolution of mineralizing fluids of the Armaqan Khaneh epithermal base metal deposits, NW Iran: Fluid inclusion and stable isotope perspective. Porphyry Cu–Au–Mo mineralization system international symposium, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Chang, Z. and Johnson, A.C., 2018b. Intermediate-sulfidation type base metal mineralization at Aliabad–Khanchy, Tarom–Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 93: 1–18.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.012>
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K.Z. and Zhao, J.X., 2019a. Fluid inclusion and stable isotope constraints on ore genesis of the Zajkan epithermal base metal deposit, Tarom–Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 109: 564–584.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.05.014>
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K.Z. and Zhao, J.X., 2019b. Origin and evolution of hydrothermal fluids in the Marshoun epithermal Pb–Zn–Cu (Ag) deposit, Tarom–Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 113: 103087.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103087>
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K.Z. and Zhang, X.N., 2020. Genesis of the Abbasabad epithermal base metal deposit, NW Iran: Evidences from ore geology, fluid inclusion and O–S isotopes. *Ore Geology Reviews*, 126: 103752.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103752>
- Li, H., Tang, J., Hu, G., Ding, S., Li, Z., Xie, F., Teng, L. and Cui, S., 2019. Fluid inclusions, isotopic characteristics and geochronology of the Sinongduo epithermal Ag–Pb–Zn deposit, Tibet,

- China. *Ore Geology Reviews*, 107: 692–706. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.033>
- Li, Q., Zhang, Z.X., Geng, X.X., Li, C., Liu, F., Chai, F.M. and Yang, F.Q., 2014. Geology and geochemistry of the Qiaoxiahala Fe–Cu–Au deposit, Junggar region, northwest China. *Ore Geology Reviews*, 57: 462–481. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.08.003>
- Lottermoser, B.G., 1992. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews*, 7(1): 25–41. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(92\)90017-F](https://doi.org/10.1016/0169-1368(92)90017-F)
- Mehrabi, B. and Ghasemi Siani, M., 2012. Intermediate sulfidation epithermal Pb–Zn–Cu (\pm Ag–Au) mineralization at Cheshmeh Hafez deposit, Semnan Province, Iran. *Journal of the Geological Society of India*, 80 (4): 563–578. <https://doi.org/10.1007/s12594-012-0177-x>
- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M., Goldfarb, R., Azizi, H., Ganerod, M. and Marsh, E.E., 2016. Mineral assemblages, fluid evolution and genesis of polymetallic epithermal veins, Gulojeh district, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 78: 41–57. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.016>
- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M. and Tale Fazel, E., 2014. Base and precious metal ore-formation system in the Cheshmeh Hafez and Challu mining area, Torud-Chah Shirin magmatic arc. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 24(93): 105–118. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22071/GSJ.2014.43549>
- Mehrabi, B., Choghaneh, N. and Tale Fazel, E., 2009. Petrology, mineralogy and alteration studies of anomaly no. 4 of Gulloje polymetal deposit (northwest of Zanjan). 1st Symposium of Iranian society of Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- Mehrabi, B., Tale Fazel, E., Ghasemi Siani, M. and Eghbali, M.A., 2010. Investigation on mineralization and genetic model of Gulloje Cu–Au vein deposit (north of Zanjan), using mineralogical, geochemical and fluid inclusion data. *Journal of Sciences*, 35(4): 185–199. (in Persian with English abstract)
- Mikaeili, K., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M. and Maghfouri, S., 2018. The Shah-Ali-Beiglou Zn–Pb–Cu (Ag) deposit, Iran: An example of intermediate-sulfidation epithermal type mineralization. *Minerals*, 8(4): 148. <https://doi.org/10.3390/min8040148>
- Mohammadi Niaei, R., 2014. Genesis and economic geology of Ay Qalasi Pb–Zn deposit with special view on mineralization of precious metals. Unpublished Ph.D. Thesis, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, 210 pp. (in Persian with English abstract)
- Mohammadi Niaei, R., Daliran, F., Nezafati, N., Ghorbani, M., Sheikh Zakariaei, J. and Kouhestani, H., 2015. The Ay Qalasi deposit: An epithermal Pb–Zn (Ag) mineralization in the Urumieh–Dokhtar volcanic belt of northwestern Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry)*, 192(3): 263–274. <https://doi.org/10.1127/njma/2015/0284>
- Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H. and Saeedi, A., 2016. Investigation on type and origin of cooper mineralization at Aliabad Mousavi–Khanchy occurrence, east of Zanjan, using petrological, mineralogical and geochemical data. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 25(100): 259–270. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22071/GSJ.2016.40756>
- Moncada, D., Baker, D. and Bodnar, R.J., 2017. Mineralogical, petrographic and fluid inclusion evidence for the link between boiling and epithermal Ag–Au mineralization in the La Luz area, Guanajuato Mining District, México. *Ore Geology Reviews*, 89: 143–170. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.024>
- Moncada, D., Mutchler, S., Nieto, A., Reynolds, T.J., Rimstidt, J.D. and Bodnar, R.J., 2012. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag–Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 114: 20–35. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.12.001>
- Mousavi Motlagh, S.H. and Ghaderi, M., 2019. The Chargar Au–Cu deposit: an example of low-sulfidation epithermal mineralization from the Tarom subzone, NW Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry)*, 196(1): 43–66. <https://doi.org/10.1127/njma/2019/0158>
- Mousavi Motlagh, S.H., Ghaderi, M., Yasami, N. and Alfonso, P., 2019. Stable isotope geochemistry of Chargar epithermal deposit:

- Constraints on epithermal systems in the Tarom metallogenic belt, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 205, 106331. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.06.013>
- Muntean, J.L. and Einaudi, M.T., 2001. Porphyry-epithermal transition, Maricunga Belt, northern Chile. *Economic Geology*, 96 (4):743–772. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.4.743>
- Murphy, J.B. and Hynes, A.J., 1986. Contrasting secondary mobility of Ti, P, Zr, Nb and Y in two meta-basaltic suites in the Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 23(8): 1138–1144. <https://doi.org/10.1139/e86-112>
- Nabatian, G. and Ghaderi, M., 2013. Mineralogy and geochemistry of rare earth elements at iron oxide-apatite deposits of Zanjan area. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 93(3): 157–170. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22071/GSJ.2014.43556>
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Daliran, F. and Rashidnejad-Omran, N., 2013. Sorkhe-Dizaj iron oxide-apatite ore deposit in the Cenozoic Alborz–Azarbaijan magmatic belt, NW Iran. *Resource Geology*, 63(1): 42–56. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00209.x>
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Rashidnejad Omran, N., and Daliran, F., 2007. Iron-apatite mineralization at Sorkhe Dizaj, Aliabad and Morvarieh deposits, southeast of Zanjan. 15th Symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 109 pp. (in Persian)
- Naderlou, F., Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H. and Nabatian, Gh., 2021. Type and origin of the north Chargar Cu–Au mineralization, southeast Zanjan: Using petrological, mineralogical and geochemical data. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 31(2): 149–162. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22071/GSJ.2020.185408.1652>
- Ouyang, H., Wu, X., Mao, J.W., Su, H., Santosh, M., Zhou, Z. and Li, C., 2014. The nature and timing of ore formation in the Budunhua copper deposit, southern Great Xing'an Range: Evidence from geology, fluid inclusions, and U–Pb and Re–Os geochronology. *Ore Geology Reviews*, 63: 238–251. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.016>
- Prokofiev, V.Y., Garofalo, P.S., Bortnikov, N.S., Kovalenker, V.A., Zorina, L.D., Grichuk, D.V. and Selektor, S.L., 2010. Fluid inclusion constraints on the genesis of gold in the Darasun district (eastern Transbaikalia), Russia. *Economic Geology*, 105(2): 395–416. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.2.395>
- Rabiei, M., Chi, G., Normand, C., Davis, W.J., Fayek, M. and Blamey, N.J.F., 2017. Hydrothermal rare earth element (Xenotime) mineralization at Maw Zone, Athabasca Basin, Canada, and its relationship to unconformity-related uranium deposits. *Economic Geology*, 112(6): 1483–1507. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2017.4518>
- Ramboz, C., Pichavant, M. and Weisbrod, A., 1982. Fluid immiscibility in natural processes: Use and misuse of fluid inclusion data: II. Interpretation of fluid inclusion data in terms of immiscibility. *Chemical Geology*, 37(1–2): 29–48. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(82\)90065-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(82)90065-1)
- Roedder, E. and Bodnar, R.J., 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 8(1): 263–301. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.08.050180.001403>
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. Mineralogical Society of America, Virginia, 644 pp.
- Ronacher, E., Richards, J.P. and Johnston, M.D., 2000. Evidence for fluid phase separation in high-grade ore zones at the Porgera gold deposit, Papua New Guinea. *Mineralium Deposita*, 35(7): 683–688. <https://doi.org/10.1007/s001260050271>
- 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>
- Sabeva, R., Mladenova, V. and Mogessie, A., 2017. Ore petrology, hydrothermal alteration, fluid inclusions, and sulfur stable isotopes of the Milin Kamak intermediate sulfidation epithermal Au–Ag deposit in Western Srednogie, Bulgaria. *Ore Geology Reviews*, 88: 400–415. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.013>

- Salehi, T., 2009. Mineralogy, geochemistry and genesis of Qomish Tappeh Zn-Pb (Ag) deposit, SW Zanjan. Unpublished M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares, Tehran, Iran, 221 pp. (in Persian with English abstract)
- Salehi, T., Ghaderi, M. and Rashidnejad-Omran, N., 2011. Mineralogy and geochemistry of rare earth elements in Qomish Tappeh Zn-Pb-Cu (Ag) deposit, southwest of Zanjan. *Journal of Economic Geology*, 2(2): 235–254. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/ECONG.V2I2.7853>
- Salehi, T., Ghaderi, M. and Rashidnejad-Omran, N., 2015. Epithermal base metal-silver mineralization at Qomish Tappeh deposit, southwest of Zanjan. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 25(97): 329–346. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22071/GSJ.2015.41519>
- Scott, A.M. and Watanabe, Y., 1998. Extreme boiling model for variable salinity of the Hokko low-sulfidation epithermal Au prospect, southwestern Hokkaido, Japan. *Mineralium Deposita*, 33(6): 568–578.
<https://doi.org/10.1007/s001260050173>
- Shamarian, G.H., Hedenquist, J.W., Hattori, K.H. and Hassanzadeh, J., 2004. The Gandy and Abolhassani epithermal prospects in the Alborz magmatic arc, Semnan province, northern Iran. *Economic Geology*, 99(4): 691–712.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.4.691>
- Shepherd, T.J., Ranbin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, 223 pp.
- Sherlock, R.L., Tosdal, R.M., Lehrman, N.J., Graney, J.R., Losh, S., Jowett, E.C. and Kesler, S.E., 1995. Origin of the McLaughlin mine sheeted vein complex: metal zoning, fluid inclusion and isotopic evidence. *Economic Geology*, 90(8): 2156–2181.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.8.2156>
- Shirkhani, M., 2007. Mineralogy, geochemistry and genesis of Ay Qalasi Pb-Zn deposit, SE Takab. Unpublished M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares, Tehran, Iran, 143 pp. (in Persian with English abstract)
- Sillitoe, R.H. and Hedenquist, J.W., 2005. Linkages between volcano-tectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits. In: S.F. Simmons and I. Graham (Editors), *Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 315–343.
<https://doi.org/10.5382/SP.10.16>
- Simeone, R. and Simmons, S.F., 1999. Mineralogical and fluid inclusion studies of low sulfidation epithermal veins at Osilo (Sardinia), Italy. *Mineralium Deposita*, 34(7): 705–717.
<https://doi.org/10.1007/s001260050229>
- Simmons, S.F. and Brown, K.L., 2006. Gold in magmatic hydrothermal solutions and the rapid formation of a Giant ore deposit. *Science*, 314 (5797), 288–291.
<https://doi.org/10.1126/science.1132866>
- Simmons, S.F. and Browne, P.R.L., 2000. Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: implications for understanding low-sulfidation epithermal environments. *Economic Geology*, 95(5): 971–1000.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.5.971>
- Simmons, S.F. and Christenson, B.W., 1994. Origin of calcite in a boiling geothermal system. *American Journal of Science*, 294(3): 361–400.
<https://doi.org/10.2475/ajs.294.3.361>
- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), *One Hundredth Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 485–522.
<https://doi.org/10.5382/AV100.16>
- Simpson, M.P., Mauk, J.L. and Simmons, S.F., 2001. Hydrothermal alteration and hydrologic evolution of the Golden Cross epithermal Au-Ag deposit, New Zealand. *Economic Geology*, 96(4): 773–796.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.4.773>
- Talebi, L., 2015. Petrology of igneous rocks in the Arpachay area (N Takab) with considering the mineralization. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 122 pp. (in Persian with English abstract)
- Talebi, L., Mokhtari, M.A.A., Ebrahimi, M. and Kouhestani, H., 2017. The Arpachay mineralization occurrence, north of Takab: an epithermal base metal mineralization in the Takab-Angouran-Takht-e-Soleyman

- metallogenic zone. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 16(104): 281–296. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22071/GSJ.2017.50296>
- Taylor, R., 2009. *Ore textures: Recognition and interpretation*. Springer-Verlag, Berlin, 287 pp.
- 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(1): 44–57.
<https://doi.org/10.1007/s001260050071>
- Thompson, R.N., 1982. Magmatism of the British Tertiary volcanic province. *Scottish Journal of Geology*, 18(1): 49–107.
<https://doi.org/10.1144/sjg18010049>
- Wang, L., Qin, K.Z., Song, G.Y. and Li, G.M., 2019. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 107: 434–456.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.023>
- White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1990. Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 36(1–3): 445–474.
[https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90063-G](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G)
- White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1995. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletters*, 23(1): 9–13.
<https://doi.org/10.5382/SEGnews.1995-23.fea>
- Whitford, D.J., Korsch, M.J., Porritt, P.M. and Craven, S.J., 1988. Rare earth element mobility around the volcanogenic polymetallic massive sulfide deposit at Que River, Tasmania, Australia. *Chemical Geology*, 68(1–2): 105–119.
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90090-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90090-3)
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
<https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- 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)
- Yardley, B.W.D. and Bodnar, R.J., 2014. Fluids in the continental crust. *Geochemical Perspectives*, 3(1): 1–2.
<https://doi.org/10.7185/geochempersp.3.1>
- Yardley, B.W.D., 2005. Metal concentrations in crustal fluids and their relationship to ore formation. *Economic Geology*, 100(4): 613–632.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.4.613>
- Yilmaz, H., Oyman, T., Sonmez, F.N., Arehart, G.B. and Billor, Z., 2010. Intermediate sulfidation epithermal gold-base metal deposits in Tertiary subaerial volcanic rocks, Sahinli/Tespilh Dere (Lapseki/Western Turkey). *Ore Geology Reviews*, 37(3–4): 236–258.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.04.001>
- Zamanian, H., Rahmani, S. and Zareisahameih, R., 2019. Fluid inclusion and stable isotope study of the Lubin-Zardeh epithermal Cu–Au deposit in Zanjan Province, NW Iran: Implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 112, 103014.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103014>
- Zamaniana, H., Rahmani, S., Zareisahamieha, R., Pazokia, A. and Yang, X.Y., 2020. Geochemical characteristics of igneous host rocks of Lubin-Zardeh Au–Cu deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 122, 103496.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103496>
- Zhai, D., Liu, J., Wang, J., Yao, M., Wu, S., Fu, C., Liu, Z., Wang, S., Li, Y., 2013. Fluid evolution of the Jiawula Ag–Pb–Zn deposit, Inner Mongolia: Mineralogical, fluid inclusion, and stable isotopic evidence. *International Geology Review*, 55(2): 204–224.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2012.692905>