



RESEARCH ARTICLE



10.22067/econg.2026.1178



Investigation of Low-Sulfidation Precious Metal Mineralization in the Kahyaz Mineral Prospect (Northeast Isfahan, Iran): Insights from Geological, Mineralogical, Geochemical, and Fluid Inclusion Evidence

Mahin Rostami ¹ , Mohammad Maanijou ^{2*} , Ali Sholeh ³ , Ali Asghar Sepahi ⁴ , Reza Alipoor ⁵

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

² Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

³ Ph.D. SRK Consulting, Almaty, Kazakhstan

⁴ Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran; Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

⁵ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 05 June 2026
Revised: 04 August 2026
Accepted: 15 August 2026

Keywords

Electrum
Adularia
Low Sulfidation
Kahyaz
Seveh-Naein-Jiroft magmatic belt

*Corresponding author

Mohammad Maanijou
✉ mohammad@basu.ac.ir

ABSTRACT

The Kahyaz prospect is located approximately 45 km southeast of Ardestan, Esfahan Province, within the central part of the Saveh-Naein-Jiroft magmatic belt. Gold-bearing siliceous veins are hosted by Oligocene andesitic–trachyandesitic volcanic rocks. The main mineralized vein is approximately 2 km long and has a width of 2–5 m, with gold grades ranging from 0.1 to 2.1 g/t. Electrum is the main gold-bearing mineral, whereas base metal sulfides, including pyrite, chalcopyrite, chalcocite, and covellite, occur as minor minerals. Quartz, calcite, and adularia are the dominant gangue minerals. Colloform, crustiform, vein–veinlet, open-space filling, and bladed textures are characteristic features of the Kahyaz. Geochemical data indicate a positive correlation of Au with Ag and Sb, and negative correlations between Au and As, S, and base metals. Hydrothermal alteration is characterized by silicic, intermediate argillic, and propylitic alteration zones. Fluid inclusion studies indicate that ore-forming fluids were characterized by moderate to high homogenization temperatures (169–278°C) and low to moderate salinities (2.73–10.29 wt% NaCl eq.). These fluids were affected by mixing and boiling processes. The geological, mineralogical, geochemical, and fluid inclusion characteristics of the Kahyaz prospect are consistent with a low-sulfidation epithermal system.

How to cite this article

Rostami, M., Maanijou, M., Sholeh, A., Sepahi, A.A. and Alipoor, R., 2026. Investigation of Low-Sulfidation Precious Metal Mineralization in the Kahyaz Mineral Prospect (Northeast Isfahan, Iran): Insights from Geological, Mineralogical, Geochemical, and Fluid Inclusion Evidence. *Journal of Economic Geology*, 18(2): 1–32. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.2026.1178>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Kahyaz prospect is located 16 km northwest of Neystanak Village, and 45 km southeast of Ardestan City, Esfahan Province, central Iran. The Kahyaz epithermal gold (Au) prospect was discovered in 2018 by Pars-Olang Company. The exploration program, which included geological mapping and diamond drilling (14 drill holes), was recently conducted by Kowsar Mining and Industries Development Investment Company, resulting in the identification of 300,000 tonnes of mineral resources with an average gold grade of 1.1 ppm Au. Unlike the numerous studies conducted on porphyry and epithermal deposits in the northwestern and southeastern parts of the belt, the central segment of the Saveh-Naein-Jiroft magmatic belt has received relatively little attention. The discovery of new mineralized zones, including the area investigated in this study, in the central Saveh-Naein-Jiroft magmatic belt may indicate the presence of significant mineralization that has so far remained unexplored. Therefore, the geological, mineralization, geochemical, hydrothermal alteration, and fluid inclusion data presented in this study provide a basis for developing an exploration model to identify additional mineral occurrences within the central Saveh-Naein-Jiroft magmatic belt.

Materials and methods

Petrographic analyses were performed on approximately 100 thin sections was carried out at Bu-Ali Sina University (Hamedan, Iran) using a ZIESS Axioplan2 transmitted- and reflected light polarizing microscope. Textural imaging of five selected samples was performed using an FEI QEMSCAN® Quanta 650F instrument on polished carbon-coated thin sections at the Faculty of Earth Sciences, University of Geneva, Switzerland. Fifty drill-core samples were analyzed for gold using the fire assay method at Zarrin Felez Kavoshgaran Co. (Najafabad, Iran) and Zarraazma Co. (Tehran, Iran). To determine correlation coefficients, 35 samples were analyzed using ICP-OES at Zarazma Co. For fluid inclusion studies, seven quartz samples associated with gold mineralization were selected from drill cores and surface outcrops. After preparing double-polished sections with a thickness of 300 µm, petrographic and microthermometric analyses were performed at Tarbiat Modares University. Microthermometric measurements were conducted

using a Linkam THMS 600 heating-cooling stage equipped with a TP94 temperature controller and an LNP cooling system, mounted on a Zeiss microscope. The analytical system operated over a temperature range of −190 to +600 °C.

Results and Discussion

The Kahyaz mineral prospect, located in northeast Isfahan, Iran, hosts a low-sulfidation epithermal precious-metal system associated with Eocene volcanic and subvolcanic rocks. The host succession consists predominantly of andesite-trachyandesite and rhyolite, which are overlain by Oligocene basaltic andesite and rhyodacite-dacite units. Mineralization is principally confined to a quartz-calcite vein extending for approximately 2 km with a thickness ranging from 2 to 5 m. Quartz is the dominant gangue mineral and the principal host of electrum, whereas calcite and adularia occur as subordinate gangue minerals. Quartz exhibits a wide range of open-space filling textures, including crustiform, comb, colloform, bladed, plumose, cockade, brecciated, and vein-veinlet textures.

The hypogene ore assemblage comprises electrum, acanthite, pyrite, chalcopyrite, and manganite, whereas chalcocite, covellite, and goethite constitute the supergene mineral assemblage. Hydrothermal alteration includes propylitic, intermediate argillic, and silicic-carbonate alterations. Based on mineral assemblages and cross-cutting textural relationships, the hydrothermal evolution of the Kahyaz prospect is divided into three stages: (1) pre-ore alteration, (2) ore stage, and (3) post-ore supergene alteration.

During the pre-ore stage, propylitic and intermediate argillic alteration developed through interaction of near-neutral hydrothermal fluids with the andesitic-trachyandesitic host rocks, producing alteration zonation from argillic adjacent to the veins to propylitic outward. Illite, illite/smectite, montmorillonite, chlorite, epidote, and calcite constitute the principal alteration mineral assemblages. The ore stage was initiated by precipitation of quartz-calcite veins, followed by hydrothermal boiling.

Boiling promoted CO₂ degassing, increased fluid pH, and induced supersaturation of silica and potassium, resulting in the precipitation of quartz and adularia. Simultaneously, the loss of dissolved H₂S destabilized Au-Ag bisulfide complexes, triggering electrum precipitation. Bladed calcite, quartz pseudomorphs after calcite, comb and crustiform textures, together with open-space filling fabrics, provide strong evidence

for boiling during mineralization.

The post-ore stage is characterized by supergene oxidation and enrichment, leading to the formation of chalcocite, covellite, goethite, jarosite, gypsum, and zeolite-group minerals. Fluid inclusion studies of vein quartz indicate homogenization temperatures of 169–278 °C and salinities of 2.73–10.29 wt.% NaCl equivalent, suggesting mineralization from low- to moderate-salinity hydrothermal fluids. The coexistence

of fluid mixing and boiling is interpreted as the principal mechanism responsible for gold deposition. Geological setting, alteration mineralogy, quartz–adularia gangue assemblages, characteristic open-space filling textures, fluid inclusion data, and the scarcity of base-metal sulfides collectively indicate that the Kahyaz prospect represents a low-sulfidation precious-metal system.



بررسی کانه‌زایی فلزهای گران‌بهای سولفیداسیون پایین در پتانسیل معدنی کهپاز (شمال شرق اصفهان) با تکیه بر شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال

مهین رستمی^۱، محمد معانی جو^{۲*}، علی شعله^۳، علی اصغر سپاهی گرو^۴، رضا علی‌پور^۵

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۳ دکتری، شرکت مشاوره‌ای اس.آر.کی، آلماتی، قزاقستان

^۴ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران؛ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۵ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
پتانسیل معدنی کهپاز در ۴۵ کیلومتری جنوب شرق شهرستان اردستان در استان اصفهان، در بخش مرکزی کمر بند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت قرار دارد. رگه‌های سیلیسی حاوی طلا در واحدهای آتشفشانی آندزیتی-تراکی آندزیتی الیگوسن قرار گرفته‌اند. رگه اصلی کانه‌زایی دارای حدود ۲ کیلومتر طول و عرض ۲ تا ۵ متر است. عیار طلا از ۰/۱ گرم بر تن تا ۲/۱ گرم بر تن متغیر است. الکتروم، کانی‌طالدار اصلی است. کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت، کوولیت به صورت فرعی تشکیل شده‌اند. کوارتز، کلسیت و آدولاریا مهم‌ترین کانی‌های باطله هستند. بافت‌های رگه-رگچه‌ای، گل کلمی، قشری، پرکننده فضای خالی و تیغه‌ای از جمله بافت‌های شاخص هستند. داده‌های زمین‌شیمیایی نشان‌دهنده همبستگی مثبت طلا با عناصر نقره و آنتیموان است و همبستگی منفی آن با آرسنیک، گوگرد و فلزهای پایه است. دگرسانی گرمابی شامل پروپیلیتیک، آرژیلیک متوسط و سیلیسی است. بررسی میان‌بارهای سیال در کوارتز مربوط به مرحله اول و اصلی کانه‌زایی نشان می‌دهد که سیالات کانه‌دار دارای دمای متوسط تا بالا (۱۶۹ تا ۲۷۸ درجه سانتی‌گراد) و شوری پایین تا متوسط (۲/۷۳ تا ۱۰/۲۹ درصد وزنی معادل نمک طعام) هستند که تحت تأثیر فرایندهای اختلاط و جوشش قرار گرفته‌اند. کانه‌زایی در کهپاز با کانه‌زایی در سامانه‌های سولفیداسیون پایین مطابقت دارد.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴
	واژه‌های کلیدی الکتروم آدولاریا سولفیداسیون پایین کهپاز کمر بند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت
	نویسنده مسئول محمد معانی جو mohammad@basu.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

رستمی، مهین؛ معانی جو، محمد؛ شعله، علی؛ سپاهی گرو، علی اصغر و علی‌پور، رضا، ۱۴۰۵. بررسی کانه‌زایی فلزهای گران‌بهای سولفیداسیون پایین در پتانسیل معدنی کهپاز (شمال شرق اصفهان) با تکیه بر شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۸(۲): ۱-۳۲.

<https://doi.org/10.22067/econg.2026.1178>

مقدمه

حدود ۱۲ درصد از طلای جهان از کانسارهای سولفیداسیون پایین تأمین می‌شود (Hedenquist et al., 2000). تولید طلا از ذخایر مختلف در ایران، سالانه حدود ۱۱ تن است (Phillips, 2022). این نوع کانسارها در کنار سایر ذخایر معدنی، بخشی از نیاز طلای کشور را تأمین می‌کنند. در این مقاله، طبق طبقه‌بندی پیشنهادی کریم‌پور و همکاران (Karimpour et al., 2021)، از اصطلاح «کمرند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت» به جای «کمان/کمرند ماگمایی ارومیه-دختر» استفاده شده است. کانسارهای طلا از این نوع اغلب در کمرند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت در طی سنوزوئیک تشکیل شده‌اند (Richards et al., 2006; Kouhestani et al., 2012). تاکنون حدود ۱۱۶ کانسار سولفیداسیون پایین، متوسط و بالای فلزهای گران‌بها، پایه و شبه فلزها در زون‌های ساختاری ایران شناسایی شده است (Yasami et al., 2025). این نوع کانسارها در ایران، در محیط‌های زمین‌ساختی مختلف تشکیل شده‌اند که از جمله این کانسارها می‌توان به ساری-گونا (Richards et al., 2006)، توزلار (Heidari et al., 2015)، آق‌دره (Daliran, 2008)، چاه‌رزد (Kouhestani et al., 2015) در کمرند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت، گندی و ابوالحسنی (Shamanian et al., 2004) در کمان آتشفشانی البرز، چاه‌نلی (Daliran et al., 2005; Sholeh et al., 2016) و سیاه‌جنگل (Sholeh et al., 2016; Richards et al., 2018) در منطقه مکران اشاره کرد.

پتانسیل معدنی کهپاز در فاصله ۱۶ کیلومتری شمال غرب روستای نیستانک و ۴۵ کیلومتری جنوب شرق شهرستان اردستان، در استان اصفهان قرار دارد. محدوده طلای سولفیداسیون پایین کهپاز در سال ۲۰۱۸ توسط شرکت پارس اولنگ کشف شد. برنامه اکتشاف شامل نقشه‌برداری زمین‌شناسی، گمانه‌های حفاری الماسه (۱۴ گمانه در مجموع به طول ۱۲۰۰ متر) و ترانشه‌برداری (۱۷۶۰ متر مکعب) به تازگی توسط شرکت سرمایه‌گذاری توسعه صنایع و معادن کوثر انجام و به معرفی ۳۰۰۰۰۰ تن منابع معدنی با عیار میانگین ۱/۱ گرم در تن طلا منجر شد.

برخلاف بررسی‌های زیادی که بر روی کانسارهای پورفیری و سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا در بخش‌های شمال‌غربی و جنوب‌شرقی کمرند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت انجام شده، بخش مرکزی کمرند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت از این نظر چندان مورد توجه قرار نگرفته است. اکتشاف محدوده‌های معدنی جدید، از جمله منطقه مورد بررسی، در بخش مرکزی کمرند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت می‌تواند نویدبخش رخداد کانه‌زایی‌های مهمی باشد که تاکنون از اکتشاف دور مانده‌اند. در این پژوهش، نوع کانه‌زایی، ساخت و بافت، دگرسانی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال بررسی می‌شود تا بتواند در ارائه الگوی اکتشافی برای شناسایی سایر رخدادهای معدنی به کار گرفته شود.

روش مطالعه

سنگ‌نگاری حدود ۱۰۰ مقطع نازک در دانشگاه بوعلی سینا همدان، با استفاده از میکروسکوپ پلاریزه‌کننده عبوری و انعکاسی ZIESS Axioplan2 مورد بررسی شد. تصویربرداری بافتی ۵ نمونه از نمونه‌های مورد بررسی با استفاده از دستگاه FEI QEMSCAN® Quanta 650F، در خلأ بالا، ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۵ کیلوولت و جریان پرتو ۱۰ نانوآمپر بر روی مقاطع نازک صیقلی با پوشش کربن در دانشکده علوم زمین دانشگاه ژنو سوئیس انجام شد. ۵۰ نمونه از مغزه‌های حفاری انتخاب و برای تعیین میزان طلا به روش Fire Assay به شرکت‌های کاوشگران زرین فلز در نجف‌آباد و زرآزما در تهران ارسال شد. برای تعیین ضریب همبستگی، تعداد ۳۵ نمونه با روش ICP-OES در شرکت زرآزما اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها بعد از خردایش و نرمایش به نمونه‌های پودر با اندازه حدود ۲۰۰ مش تبدیل شدند. برای تعیین میزان عناصر کمیاب و فلزهای پایه به ترتیب حدود ۰/۲ و ۰/۵ گرم از هر نمونه برای تجزیه شیمیایی انتخاب شدند. نمونه‌های ۰/۲ گرمی به روش چند اسید حل شدند. نمونه‌های ۰/۵ گرمی در تیزاب سلطانی با دمای حدود ۹۵ درجه سانتی‌گراد حل شدند. در روش Fire Assay برای اندازه‌گیری مقادیر طلا، حدود ۳۰ گرم از نمونه در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شد. در این حالت، طلا از سرباره جدا شده و

محیط کمان فروورانش قرار داشت (Omran et al., 2008)، نخستین نشانه‌های فعالیت ماگمایی در کمرند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت در سنوزوئیک آغاز شد و تا کواترنری ادامه یافت (Jahangiri, 2013; Ayati et al., 2007) و در ائوسن به بیشترین میزان خود رسید (Berberian and King, 1981; Alavi, 1994; Ghasemi and Talbot, 2006; Omran et al., 2008; Azizi and Moeinvaziri, 2009). سنگ‌های آذرین کمرند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت اغلب دارای ماهیت کلک آلکالن با گرایش تولیتی، شوشونیتی و آداکتی هستند (Shahabpour, 2007; Omran et al., 2008; Shafiei et al., 2009; Stern et al., 2021; Maanijou et al., 2022)

زمین‌شناسی

پتانسیل معدنی کهپاز در توالی‌های آتشفشانی، نیمه‌آتشفشانی و آتشفشانی-آواری ائوسن-لیگوسن، در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ زواره (شهراب) قرار دارد (شکل ۱-A). قدیمی‌ترین فعالیت‌های آتشفشانی توسط سنگ‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی ائوسن مشخص می‌شود (شکل ۲-A) که منطقه وسیعی را پوشانده‌اند و توسط توده‌های نفوذی جوان‌تر قطع شده‌اند. مرز پایینی واحد آندزیتی و تراکی آندزیتی نامشخص است؛ اما مرز بالایی آن گسلی است و توسط ریولیت و ایگنیمبریت با همان سن پوشانده شده است. در بخش شرقی منطقه، آندزیت‌ها به طور هم‌تراز توسط آندزیت‌های بازالتی پوشانده شده‌اند. ریولیت و ایگنیمبریت با رنگ خاکستری یا قهوه‌ای مشخص می‌شوند و دارای لایه‌های میانی از قطعه‌های آندزیتی و بازالتی هستند. رخنمون‌های توف برشی مایل به خاکستری و توف لایلی در شمال منطقه، در بالاترین قسمت آندزیت و تراکی آندزیت مشاهده می‌شوند. فعالیت ماگمایی الیگوسن اغلب با واحد آندزیت بازالتی (شکل ۲-C و D)، سنگ‌های نیمه‌آتشفشانی ریوداسیتی تا داسیتی (شکل ۲-B) و دایک‌های مافیک (شکل ۲-E) مشخص می‌شود. این توالی‌های جوان‌تر گسترده در سنگ‌های اولیه تشکیل شده نفوذ کرده و باعث ایجاد دگرسانی در سنگ‌های اطراف شده‌اند.

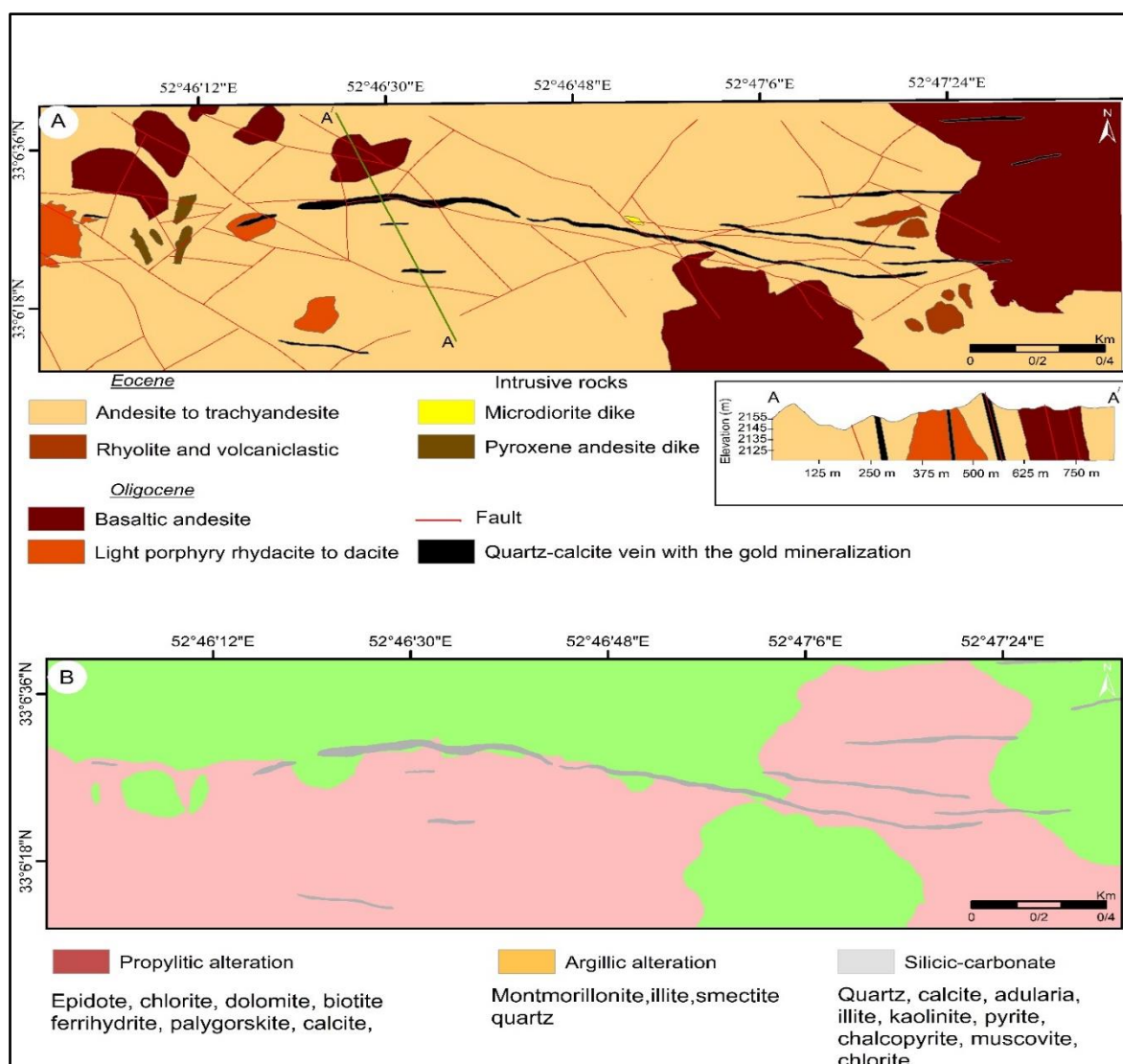
توسط ملغمه سربی جذب می‌شود. در مرحله بعد، سرب حذف شده و طلا و نقره در ملغمه نقره‌ای جدا می‌شوند. ملغمه نقره‌ای توسط تیزاب سلطانی محلول‌سازی شد. در پایان میزان طلا با استفاده از روش ICP-OES (در شرکت زرآزما) و جذب اتمی (در شرکت کاوشگران زرین فلز) تعیین شد. به منظور بررسی میان‌بارهای سیال، تعداد ۷ نمونه کوآرتز مرتبط با مرحله اصلی کانه‌زایی طلا از مغزه‌های حفاری و رخنمون‌های سطحی انتخاب شد. پس از آماده‌سازی مقاطع دوبر-صیقل با ضخامت ۳۰۰ میکرومتر، بررسی‌های سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی در دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. بررسی‌های ریزدماسنجی به وسیله دستگاه Linkam مدل THMS 600 با کنترل‌کننده حرارتی TP 94 و سردکننده LNP نصب‌شده بر روی میکروسکوپ زایس با دامنه حرارتی ۱۹۰- تا ۶۰۰+ انجام شد. کالیبراسیون دستگاه در مرحله گرمایش با استفاده از نترات سزیم (با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد) و با دقت ± 0.6 درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. در مرحله سرمایش، دقت اندازه‌گیری حدود ± 0.2 درجه سانتی‌گراد است و از ماده‌ای به نام ان-هگزان (با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتی‌گراد) به عنوان استاندارد استفاده می‌شود.

موقعیت ژئوتکتونیک

برخورد صفحه‌های عربی-ایران مرکزی و بسته‌شدن نهایی اقیانوس نئوتتیس، صرف نظر از زمان برخورد (پالئوسن (Alavi, 1980); ائوسن (Ghasemi and Talbot, 2006; Allen and Armstrong, 2008; Dargahi et al., 2010; Hassanzadeh, 1993; McQuarrie et al., 2003; Allen et al., 2004; Mohajjel and Ferguson, 2014); میوسن (Förster, 1978)) نقطه عطفی در کانه‌زایی، به ویژه کانی‌سازی نوع پورفیری و سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا در ایران است. کمان ماگمایی سنوزوئیک ساوه-ناین-جیرفت به عنوان یکی از مناطق اصلی حاوی کانسارهای نوع پورفیری و سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا در نظر گرفته می‌شود که در نتیجه فروورانش نئوتتیس تشکیل شده است. هنگامی که کمرند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت در یک

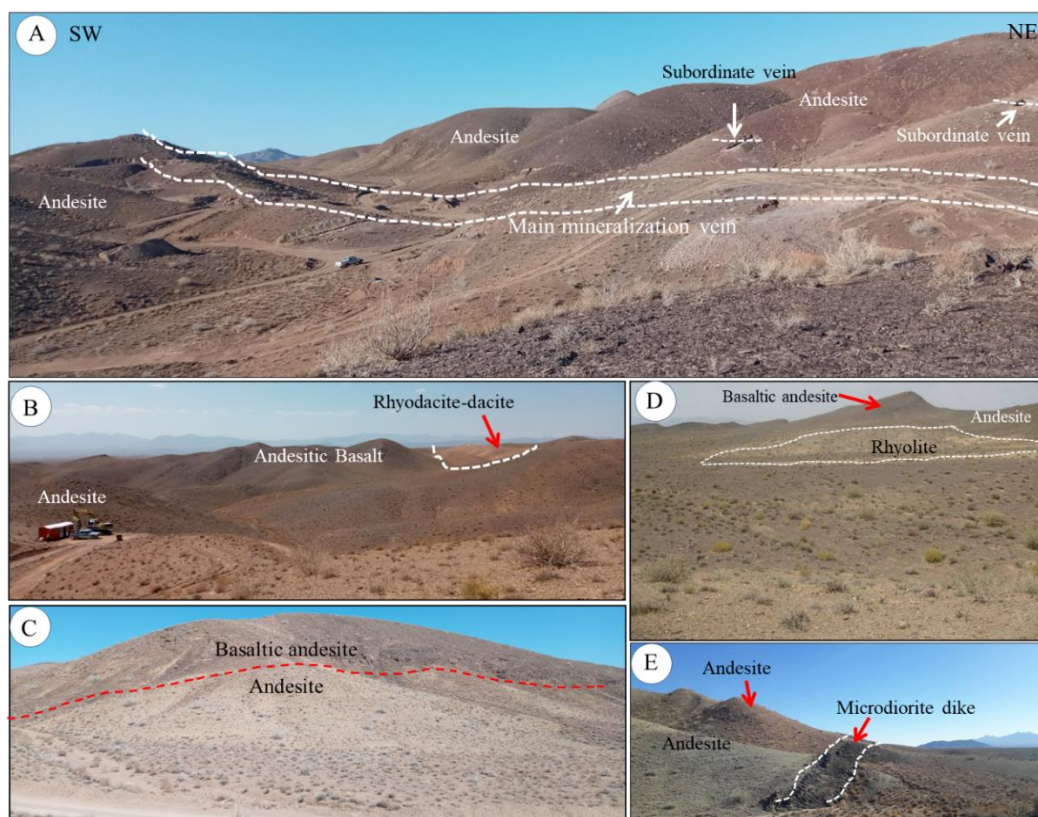
آتشفشانی آندزیت تا تراکی آندزیتی را قطع کرده‌اند. میکرودیوریت و پیروکسن آندزیت به ترتیب به صورت دایک‌هایی با روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و شرقی-غربی ظاهر می‌شوند. آنها ۱ تا ۲ متر عرض دارند و معمولاً درون آندزیت‌ها جای گرفته‌اند. در شکل ۱-B، توزیع دگرسانی‌های مختلف مرتبط با واحدهای سنگی زمین‌شناسی نشان داده شده است.

آندزیت‌های بازالتی به طور هم‌تراز در رخنمون‌های بالاتر روی آندزیت-تراکی آندزیت قرار دارند و به طور گسترده در قسمت شرقی منطقه و با وسعت کمتر در شمال‌غربی رخنمون دارند. سنگ‌های نیمه آتشفشانی گنبدی شکل، داسیت تا ریوداسیت سفید-صورتی که اغلب در جنوب‌شرقی منطقه رخنمون دارند، در طول فعالیت ماگمایی مرحله بعدی تشکیل شده‌اند. آنها اغلب سنگ‌های



شکل ۱. A: نقشه زمین‌شناسی از پتانسیل معدنی کهیاز (با تغییرات از براتی و آقازاده (Barati and Aghazadeh, 2018)) و B: نقشه دگرسانی‌های مختلف واحدهای زمین‌شناسی در محدوده مورد بررسی

Fig. 1. A: Geological map of the Kahyaz prospect (modified after Barati and Aghazadeh, 2018), and B: Alteration map showing the distribution of hydrothermal alteration zones of the geological units in the study area



شکل ۲. تصویرهای صحرایی از رخنمون واحدهای سنگی مختلف در منطقه کهیاز. A: نمایی از واحد آندزیتی که میزبان رگه کوآرتز حاوی طلاست (دید به سمت غرب)، B: نمایی از واحدهای آندزیتی و ریوداسیت-داسیت (دید به سمت جنوب شرق)، C: نمایی از رخنمون سنگ‌های آندزیتی بازالتی الیگوسن بر روی سنگ‌های آندزیتی اتوسن (دید به سمت شمال)، D: توالی آندزیت بازالتی، آندزیت و ریولیت (دید به سمت غرب) و E: دایک میکرودیوریتی که در سنگ میزبان آندزیتی نفوذ کرده است (دید به سمت شمال شرق).

Fig. 2. Field photographs of outcrops of various rock units in the Kahyaz area. A: View of the andesitic unit hosting the Au-bearing quartz vein (view to the west), B: View of the andesitic and rhyodacite-dacite units (looking southeast), C: View of the outcrop of Oligocene andesite-basaltic rocks overlying Eocene andesitic rocks (looking north), D: Sequence of basaltic andesite, andesite, and rhyolite (looking west), and E: Microdiorite dyke intruding the andesitic host rock (looking northeast).

سنگ‌شناسی

تراکی آندزیت شده است (شکل ۳-B و C). پلاژیوکلاز به سایر کانی‌های ثانویه مانند کلریت، کلسیت، سریسیت و اپیدوت تبدیل شده است. آندزیت بازالتی (شکل ۳-D) دارای درشت‌بلورهایی از پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و سانیدین، به همراه مقدار کمی هورنبلند، آپاتیت و کانی‌های کدر است. پلاژیوکلاز دارای ریخت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار، دوقلویی پلی‌سینتیک و منطقه‌بندی نوسانی است. پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و کانی‌های کدر به صورت خوشه‌بندی هستند و بافت گلوومروفریک را تشکیل می‌دهند. هورنبلند به شکل

سنگ میزبان اصلی کانی‌سازی در کهیاز، آندزیت و تراکی آندزیت اتوسن است. آندزیت پورفیری، دانه‌های متوسط تا ریز دارد و اغلب حاوی پلاژیوکلاز و سانیدین است (شکل ۳-A). درشت‌بلورهایی پلاژیوکلاز به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با فراوانی ۶۰ تا ۷۰ درصد قابل مشاهده هستند. سانیدین، دومین کانی فراوان است و فراوانی ۲۰ تا ۳۰ درصد دارد. در برخی نمونه‌ها، افزایش مقدار سانیدین با جهت‌گیری ترجیحی باعث ایجاد بافت تراکیتی و ترکیب

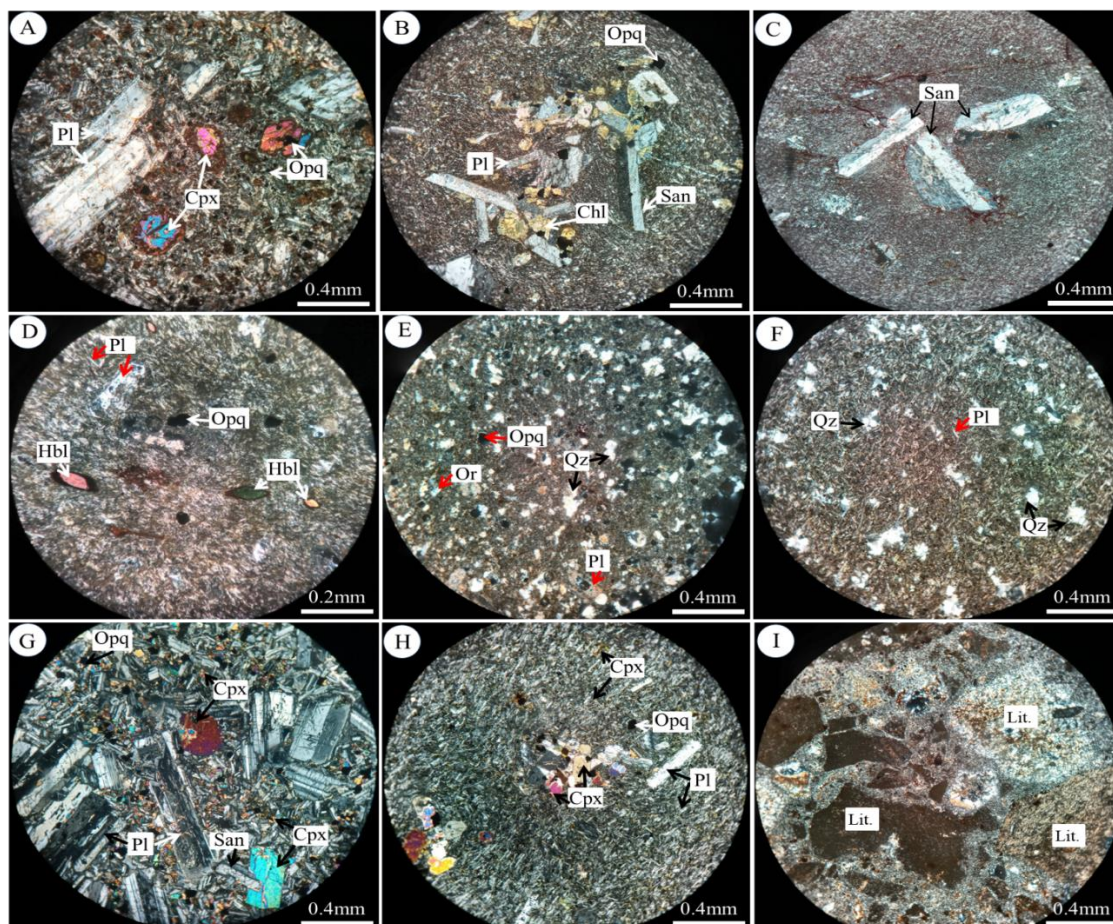
درصد) و کانی کدر (۱۰ درصد) هستند که در زمینه‌ای از میکرولیت‌های جریانی از کانی‌های یادشده قرار دارند. کانی مافیک شامل کلینوپیروکسن است که هم به صورت بلورهای درشت همراه با درشت‌بلورهای فلدسپارها مشاهده می‌شود و بافت گلوپورفیری را تشکیل می‌دهد و هم به صورت ریزبلور در بین میکرولیت‌های جهت‌یافته قرار گرفته است. حضور کلینوپیروکسن‌های فراوان سبب ظهور رنگ سبز زیتونی یا سبز تیره در این نمونه‌ها شده است. کانی‌های کدر به دو صورت درشت و ریز همراه سایر کانی‌ها مشاهده می‌شود. کانی‌های ثانویه حاصل از دگرسانی فلدسپارها به صورت کلسیت، کلریت و سیرسیت تشکیل شده‌اند. سنگ‌های آذرآواری دارای ویژگی‌های فلسیک هستند و اغلب از توف (توف سنگی)، توف بلوری (توف سنگی-بلوری) و توف پرشی تشکیل شده‌اند (شکل ۳-I). توف‌های سنگی اغلب بافت ویتروفری دارند و از قطعه‌های سنگی آندزیتی تا داسیتی تشکیل شده‌اند. قطعه‌هایی از کوارتز و فلدسپار نیز در آنها قابل مشاهده است.

نتایج

کانه‌زایی

کانه‌زایی طلا در منطقه کهپاز اغلب به صورت رگه‌ای در امتداد شکستگی‌ها و گسل‌های با روند غالب شمال غربی-جنوب شرقی رخ داده است. رگه اصلی با طول حدود ۲ کیلومتر، ضخامت ۲ تا ۵ متر و شیب نزدیک به قائم، مهم‌ترین رگه کانه‌دار منطقه است (شکل ۴-۱). A و B و در برخی بخش‌ها به وسیله گسل‌های فرعی دچار جابه‌جایی‌های امتدادلغز به سمت شمال و جنوب شده است. این رگه سنگ‌های آندزیتی میزبان را قطع کرده و مرز آن با سنگ دیواره اغلب تیز و موازی با دیواره رگه است (شکل‌های ۴-A و ۵-B). علاوه بر رگه اصلی، چندین رگه فرعی (شکل ۴-C) با امتداد مشابه، به ویژه در بخش شمال شرقی منطقه، توسعه یافته‌اند که دارای عیار ۰/۳۵ تا ۱/۲۰ گرم در تن طلا هستند. این رگه‌ها نسبت به رگه اصلی باریک‌تر بوده و فراوانی کلسیت در آنها بیشتر است.

رومبوهدرال و به رنگ قهوه‌ای است و حاشیه واکنشی آن با رنگ قهوه‌ای تیره مشخص می‌شود. پلاژیوکلاز به کانی‌های ثانویه کربنات و سیرسیت تبدیل شده است. محدوده غربی منطقه مورد بررسی توسط سنگ‌های ریولیتی و آذرآواری پوشیده شده است. آنها در قسمت زیرین واحدهای آندزیتی و آندزیتی-بازالتی رخ داده‌اند و با رنگ روشن مشخص می‌شوند. ریولیت حاوی درشت‌بلورهای کوارتز (۳۰ تا ۴۰ درصد)، پلاژیوکلاز (۳۰ تا ۳۵ درصد) و سانیدین (۱۰ تا ۱۵ درصد) است که در یک زمینه شیشه‌ای و دانه‌ریز قرار گرفته‌اند. کانی‌های مافیک شامل بیوتیت با حاشیه کدر، با فراوانی ۵ تا ۱۰ درصد و کانی‌های کدر هستند (شکل ۳-E). گنبد‌های نیمه‌آشفشانی داسیتی تا ریوداسیتی (شکل ۳-F)، بافت پورفیری و گلوپورفیری دارند و اغلب از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز (۳۰ درصد) و کوارتز (۲۵ درصد) تشکیل شده‌اند که در یک زمینه شیشه‌ای تا ریزدانه از هر دو کانی یادشده (حدود ۵۰ درصد) قرار گرفته‌اند. در این گنبد‌ها رگه‌های کوارتز به وفور یافت می‌شوند. دایک‌های میکرودیوریتی (شکل ۳-G) و پیروکسن آندزیتی (شکل ۳-H) در واحدهای سنگی قدیمی تر نفوذ کرده‌اند. آنها معمولاً ۱ تا ۲ متر عرض دارند و روند شرقی-غربی و شمال شرقی تا جنوب غربی را نشان می‌دهند و اغلب در قسمت غربی منطقه رخمون دارند. دایک‌های میکرودیوریتی از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در زمینه‌ای با بافت بین‌دانه‌ای تشکیل شده‌اند؛ به گونه‌ای که بلورهای کلینوپیروکسن در فواصل بین بلورهای پلاژیوکلاز مشاهده می‌شوند. (شکل ۳-G). گاهی اوقات، درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در تماس با یکدیگر، در هم قفل شده و بافت دانه‌ای تشکیل می‌دهند. این کانی‌های اولیه را می‌توان هم در دانه‌های ریز (۰/۱ میلی‌متر) و هم در دانه‌های درشت (۱/۵ سانتی‌متر) مشاهده کرد. بیشتر پلاژیوکلازها سالم هستند؛ اما برخی از آنها تحت تأثیر کلریتی شدن قرار گرفته‌اند. سانیدین، بیوتیت و کانی‌های کدر، درشت‌بلورهای فرعی را تشکیل می‌دهند. کانی‌های ثانویه از کلسیت، کلریت و سیرسیت تشکیل شده است که از تجزیه درشت‌بلورهای اولیه حاصل شده‌اند. دایک‌های پیروکسن آندزیتی دارای درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز (۷۰ درصد)، کلینوپیروکسن (۲۰



شکل ۳. تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از بافت و کانی‌شناسی واحدهای سنگی منطقه کهیاز. A: نمونه‌ای از آندزیت با بافت پورفیری، بلورهای درشت پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سنتیک و کلینوپروکسن‌های با حاشیه سوخته نیز مشاهده می‌شود، B: تراکی آندزیت با بافت گومروپورفیری با تجمع خوشه‌ای فلدسپارهای درشت در زمینه فلدسپارهای کوچک‌تر، C: نمونه تراکی آندزیتی با بلورهای جهت‌یافته فلدسپار، D: بازالت آندزیتی با بافت پورفیری. هورنبلند به صورت بلورهای لوزی شکل و حاشیه سوخته تشکیل شده است، E: ریولیت با بافت پورفیری متشکل از بلورهای کوارتز با خاموشی موجی و فلدسپار در زمینه‌ای از بلورهای ریز کوارتز و شیشه، F: ریوداسیت متشکل از کوارتز و فلدسپار، G: تصویری از میکرودیوریت با بافت اینترگرانولار. این نمونه از بلورهای ریز و درشت پلاژیوکلاز با بافت پلی‌سنتیک و اغلب دارای شکستگی تشکیل شده است و بین آنها را بلورهای ریز و درشت کلینوپروکسن و کانی کدر پر کرده است، H: بافت پورفیری در دایک پیروکسن آندزیتی که با حضور بلورهای درشت پلاژیوکلاز و کلینوپروکسن در زمینه‌ای از میکروولیت‌های فلدسپار مشخص می‌شود. کلسیت و اپیدوت نیز به عنوان کانی ثانویه حضور دارند و I: واحد آذرآواری که از قطعه‌های مختلف خرده‌سنگ تشکیل شده است. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Chl: کلریت، Cpx: کلینوپروکسن، Hbl: هورنبلند، Lit: قطعه‌های برشی، Opq: کانی‌های کدر، Or: ارتو کلاز، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، San: سانیدین).

Fig. 3. Photomicrographs (cross-polarized transmitted light, XPL) of the textures and mineralogy rock units in the Kahyaz area. A: Andesite with porphyritic texture; large plagioclase crystals with polysynthetic twinning and clinopyroxenes with opacitic rims are also observed, B: Glomeroporphyritic texture with clustered aggregates of coarse feldspars within a matrix of smaller feldspars, C: Trachy-andesite with aligned feldspar crystals, D: Basaltic andesite with porphyritic texture; hornblende occurs as rhomb-shaped crystals with opacitic rims, E: Rhyolite with porphyritic texture consisting of quartz crystals showing undulatory extinction and feldspar within a groundmass of fine-grained quartz and glass, F: Rhyodacite composed of quartz and feldspar, G: Microdiorite with intergranular texture. This sample consists of fine- and coarse-grained plagioclase crystals exhibiting polysynthetic twinning, commonly fractured, with fine- and coarse-grained clinopyroxene and opaque minerals occupying the interstitial spaces, H: Porphyritic texture in a pyroxene-andesite dike characterized by large plagioclase and clinopyroxene crystals in a groundmass of feldspar microlites. Calcite and epidote are also present as secondary minerals, I: Pyroclastic unit composed of fragments of various lithic clasts. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Chl: Chlorite, Cpx: Clinopyroxene, Hbl: Hornblende, Lit: Lithic fragments, Opq: Opaque minerals, Or: Orthoclase, Pl: Plagioclase, Qz: Quartz, San: Sanidine).



شکل ۴. تصویرهای صحرایی از رگه‌های کوارتز-کلسیت کانه‌دار در منطقه کهیاز. A: رخنمون رگه اصلی کوارتز-کلسیت که در امتداد شکستگی‌ها، سنگ‌های آندزیتی میزبان را قطع کرده است. مرز تیز و مشخص رگه با سنگ دیواره، کنترل ساختاری کانه‌زایی را نشان می‌دهد (دید عکس به سمت شمال غرب)، B: نمای نزدیک از رگه اصلی با ساخت توده‌ای و ضخامت ۲ تا ۵ متر و C: رگه‌ها و رگچه‌های فرعی کوارتز-کلسیت در سنگ‌های آندزیتی که با روندی مشابه رگه اصلی گسترش یافته‌اند و بیانگر توسعه سامانه رگه‌ای در منطقه هستند (دید عکس به سمت شمال شرق).

Fig. 4. Field photographs of the mineralized quartz-calcite veins in the Kahyaz prospect. A: Outcrop of the main quartz-calcite vein cutting the andesitic host rocks along fractures. The sharp and well-defined contact between the vein and the host rock indicates structural control on the mineralization (view looking northwest), B: Close-up view of the main quartz-calcite vein exhibiting a massive structure and a thickness of approximately 2–5 m, and C: Quartz-calcite subsidiary veins and veinlets cutting the andesitic host rocks, trending parallel to the main vein and indicating the development of a vein system within the prospect (view looking northeast).

دگرسانی گرمایی

(شکل ۷-C و E) و همراه با کوارتز و کلسیت، مجموعه کانی‌های شاخص رگه‌های کانه‌دار را تشکیل می‌دهد. دگرسانی کربناتی اغلب به صورت تشکیل کلسیت در رگه‌ها، رگچه‌ها و جانشینی موضعی سنگ میزبان مشاهده می‌شود. کلسیت به صورت بلورهای درشت، تیغه‌ای و **پرکننده فضای باز** همراه با کوارتز و کلسدونی رخ داده است. در برخی بخش‌ها، کلسیت توسط کوارتز جانشین شده و بافت **شبه‌ریخت کوارتز پس از کلسیت** را ایجاد کرده است که یکی از شواهد وقوع جوشش سیالات گرمایی در سامانه کم سولفید محسوب

انواع دگرسانی در منطقه مورد بررسی شامل سیلیسی، کربناتی، پروپیلیتیک، آرژلیک حدوداوسط و دگرسانی برون‌زاد است (شکل‌های ۱-B و ۵-A تا E). دگرسانی سیلیسی-کربناتی در بخش مرکزی سامانه گرمایی و در مجاورت رگه‌های کانه‌دار گسترش یافته است. این دگرسانی اغلب از کوارتز ریزدانه، کلسدونی، کلسیت و آدولاریا تشکیل شده است (شکل ۷). آدولاریا به صورت بلورهای لوزی‌شکل و در هم‌رشدی با کوارتز و کلسدونی مشاهده می‌شود

صفحه‌های کلسیت توسط کوارتز تشکیل می‌شود. اندازه تیغه‌های کوارتز بیانگر اندازه اولیه صفحه‌های کلسیت است (John et al., 2018). بعد از کوارتز، کلسیت دومین کانی فراوان در محدوده مورد بررسی است که به صورت توده‌ای، شعاعی (شکل ۷-B)، پرکننده فضای خالی (شکل ۷-D) و تیغه‌ای (شکل ۶-D و E) تشکیل شده است. کلسیت تیغه‌ای یا صفحه‌ای، شاخصی از رسوب‌گذاری در اثر جوشش سیالات گرمابی است (Browne, 1978; Simmons and Christenson, 1994). این بلورها از چند میکرومتر تا چند سانتی‌متر طول دارند و معمولاً در فضاهای باز تشکیل شده و سپس طی فرایند سیلیسی شدن توسط کوارتز جانشین و یا احاطه می‌شوند. شکل تیغه‌ای آنها تحت تأثیر رخ کامل رومبوندی کلسیت در سه جهت که هیچ‌یک بر یکدیگر عمود نیستند، ایجاد می‌شود و این ویژگی در مقاطع نازک نیز قابل تشخیص است (John et al., 2018). آدولاریا به صورت بلورهای دانه‌ریز و گاهی به صورت لوزی شکل با کانی‌های کوارتز و کلسیت هم‌رشدی دارد.

کانی‌شناسی کانسنگ

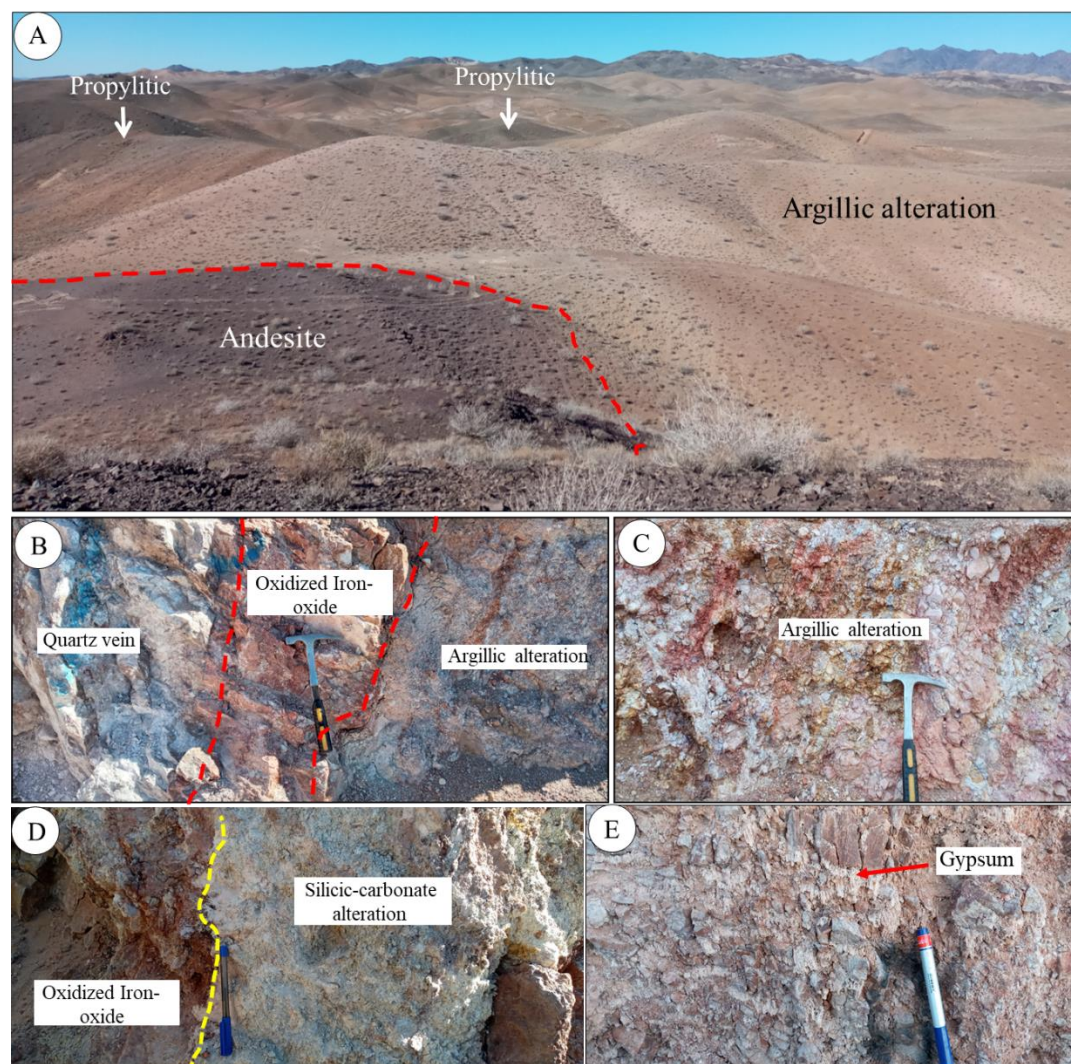
کانی‌های کدر به طور اساسی شامل الکتروم، منگانیات، سولفید نقره (آکانتیت) و به مقدار کمتر روتیل، ایلمنیت، کالکوپیریت، کالکوسیت و کوولیت است. طلا به صورت الکتروم در کوارتز تشکیل شده است (شکل ۸). الکتروم به صورت دانه‌های بسیار ریز (کمتر از ۵ میکرومتر) بی‌شکل، اغلب درون کوارتز و در مجاورت مرز دانه‌های کوارتز و کلسیت رخ می‌دهد (شکل ۸-D و E). این کانی به صورت آزاد مشاهده شده است و ارتباط مستقیمی با سولفیدهای مس نشان نمی‌دهد. آکانتیت (Ag₂S) به صورت دانه‌های بسیار ریز و پراکنده، همراه با الکتروم و درون کوارتز مشاهده می‌شود و کانی اصلی حامل نقره در کانسنگ است. فراوانی کانی‌های فلزهای پایه در کهپاز بسیار محدود است. کالکوپیریت به شکل کانی‌های بی‌نظم و با بافت جانشینی رخ داده است. این کانی به صورت دانه‌های بی‌شکل با اندازه ۵۰ میکرومتر در میان کوارتز تشکیل شده و در حاشیه آن جانشینی توسط کالکوسیت و کوولیت مشاهده می‌شود.

می‌شود. دگرسانی پروپیلیتیک، گسترده‌تر از سایر دگرسانی‌هاست و شامل کانی‌های کلریت، کلسیت، دولومیت، پیریت، اپیدوت، فریهدریت، پیریت، و پالیکورسکیت است. این دگرسانی در فاصله دورتری از رگه اصلی کانی‌سازی قرار دارد و سایر مناطق دگرسانی را در بر گرفته است (شکل ۴-A). سنگ‌های تحت تأثیر این دگرسانی، رنگ‌های سبز را در رخنمون‌ها نمایان می‌کنند. کانی‌های مافیک (مانند هورنبلند و کلینوپیروکسن) سنگ‌های آندزیتی تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته و توسط کلریت جایگزین شده‌اند. هاله‌های دگرسانی آرژلیک حدواسط معمولاً در اطراف رگه‌ها گسترش یافته‌اند و سنگ میزبان آندزیتی خاکستری تیره را بسته به نوع و شدت دگرسانی، به خاکستری کم‌رنگ، قرمز و کرم‌رنگ تبدیل می‌کنند. دگرسانی آرژلیک حدواسط توسط مجموعه‌های کانی‌های ایلیت، اسمکتیت، مونتموریلونیت، بیدلیت و پاراگونیت قابل تشخیص هستند. برخلاف دگرسانی پروپیلیتیک، بافت‌های اولیه سنگ میزبان در دگرسانی آرژلیک حدواسط اغلب تخریب شده‌اند (شکل ۴-B و C). دگرسانی برونزاد در مرحله پس از کانه‌زایی، انواع دگرسانی‌های قبلی را می‌پوشانند و معمولاً از کانی‌های ژیس، کانی‌های گروه زئولیت (مانند کلینوپتیلولیت، فیلپسیت، هولاندیت)، اکسید و هیدروکسید آهن (مانند فری‌هیدریت، هماتیت، گوتیت، جاروسیت) تشکیل شده است.

کانی‌شناسی، ساخت و بافت و توالی هم‌یافتی

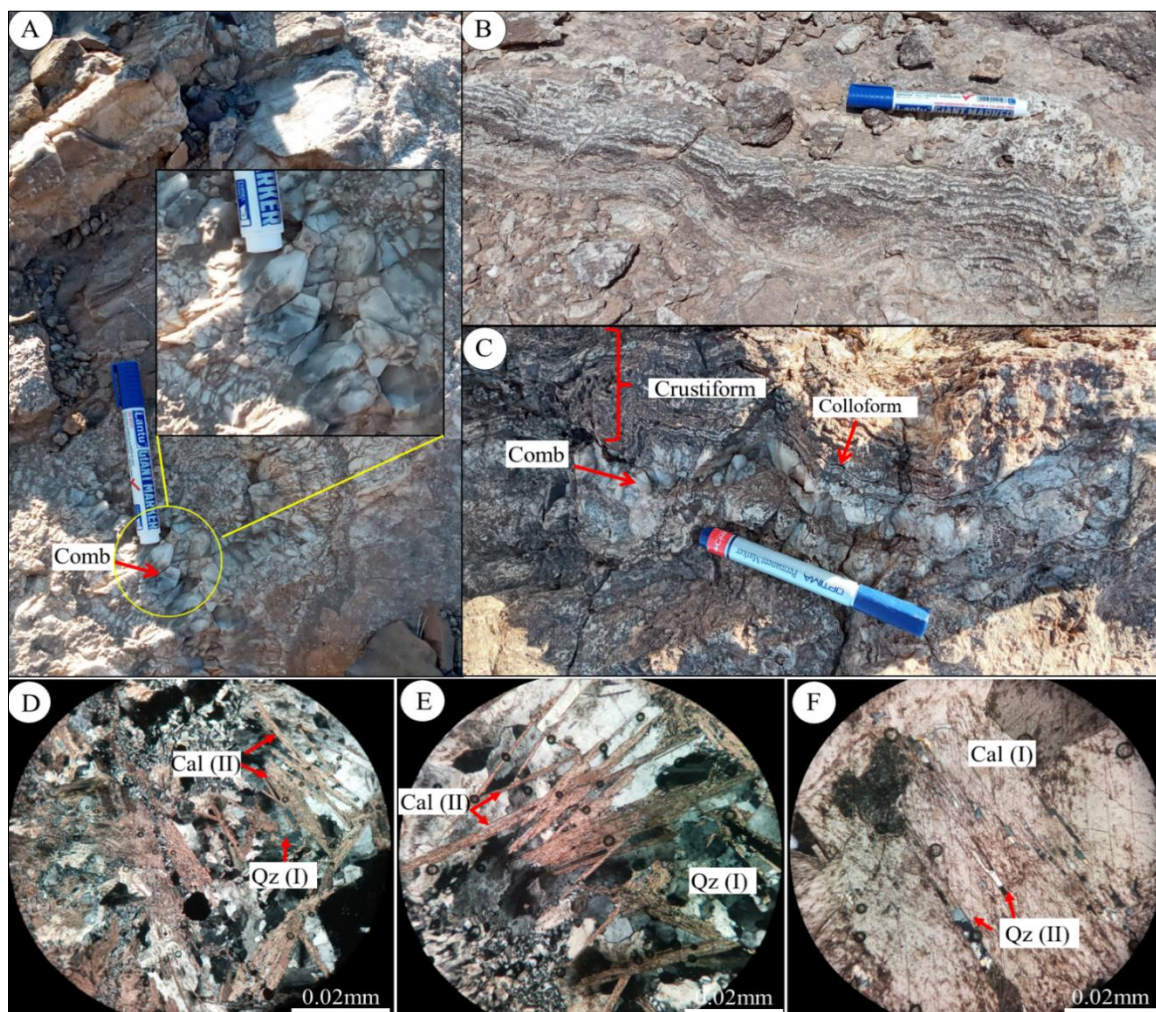
کانی‌شناسی باطله

کانی‌های باطله موجود در رگه اغلب از کوارتز، کلسدون، کلسیت و آدولاریا تشکیل شده است (شکل ۷). کوارتز معمولاً به صورت بافت‌های شانه‌ای (شکل ۶-A و C) قشری (یا پوسته‌ای) (شکل ۶-B و C)، گل‌کلی (شکل ۶-C)، کاکلی، شعله‌مانند و تیغه‌ای (شکل ۶-F) تشکیل شده است (شکل ۶). علاوه بر این، کلسدون ریزبلور نیز بخش عمده رگه را تشکیل می‌دهد (شکل ۷-A، C و E). کوارتز تیغه‌ای یا صفحه‌ای در رگه‌های کوارتز سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا فراوان است. این نوع کوارتز در اثر جانشینی شبرخی



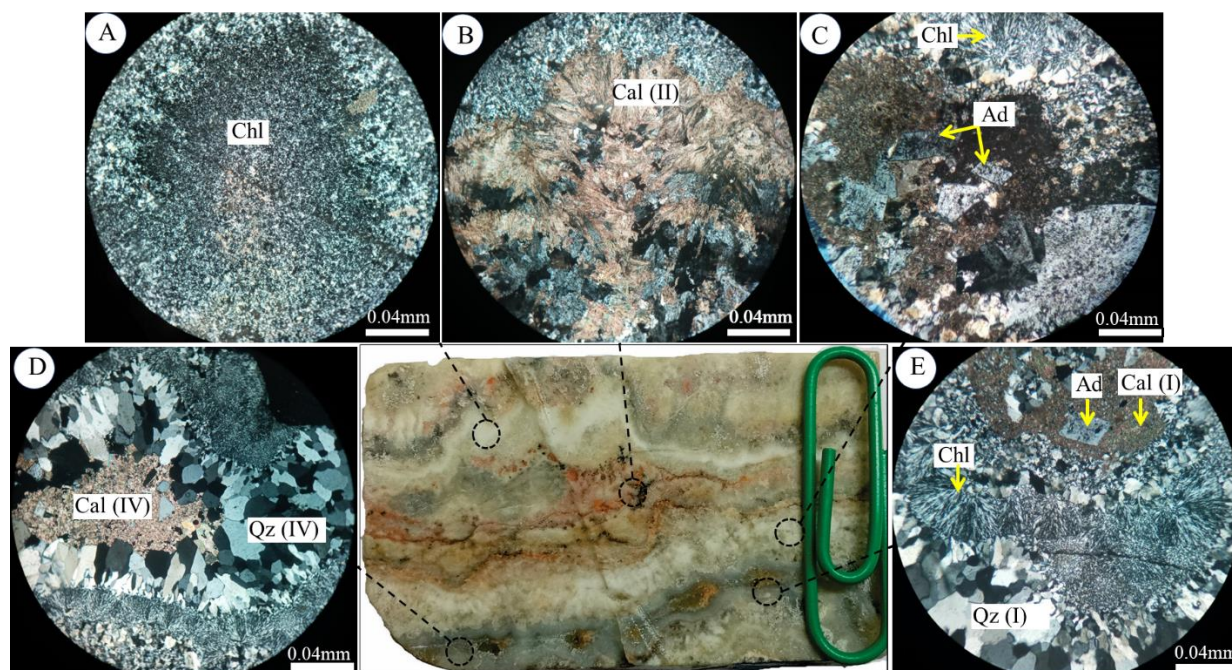
شکل ۵. تصویرهای صحرایی دگرسانی‌های گرمابی در منطقه کهیاز. A: نمای کلی از پراکندگی زون‌های دگرسانی پروپلیتیک و آرژیلیک در سنگ‌های آندزیتی میزبان. دگرسانی پروپلیتیک در حاشیه سامانه گرمابی و دگرسانی آرژیلیک در بخش مرکزی و مجاور رگه‌های کانه‌دار گسترش یافته است. B: رگه کوآرتزی که با هاله دگرسانی آرژیلیک احاطه شده و آثار اکسایش آهن در امتداد شکستگی‌ها و حاشیه رگه مشاهده می‌شود. C: رخنمون دگرسانی آرژیلیک شدید با رنگ روشن، ناشی از تشکیل کانی‌های رسی. D: دگرسانی سیلیسی-کربناته در مجاورت بخش‌های اکسید شده که با سیلیسی شدن و کربناتی شدن سنگ میزبان مشخص می‌شود و E: رگه‌ها و رگچه‌های ژپس در بخش‌های اکسید شده که به عنوان یکی از فرآورده‌های دگرسانی سوپرژن در مراحل پس از کانه‌زایی تشکیل شده‌اند.

Fig. 5. Field photographs illustrating the hydrothermal alteration zones in the Kahyaz area. A: General view of the distribution of propylitic and argillic alteration zones within the andesitic host rocks. Propylitic alteration is developed along the margins of the hydrothermal system, whereas argillic alteration is concentrated in the central part of the system and adjacent to the mineralized veins, B: Quartz vein surrounded by an argillic alteration halo, with iron oxide staining developed along fractures and vein margins, C: Outcrop of intense argillic alteration, characterized by a light-colored appearance resulting from the formation of clay minerals, D: Silicic-carbonate alteration adjacent to oxidized zones, characterized by silicification and carbonatization of the host rock, and E: Gypsum veins and veinlets developed within oxidized zones, representing supergene alteration products formed during the post-mineralization stage.



شکل ۶. تصویرهای صحرایی و میکروسکوپی از ساخت و بافت رگه‌های کوارتز-کلسیت در پتانسیل معدنی کهیاز. A: رگه کوارتز با بافت شانه‌ای که از رشد بلورهای منشوری کوارتز به سمت فضای باز ایجاد شده است. تصویر بزرگ‌نمایی شده، رشد بلورهای کوارتز در فضای باز را نشان می‌دهد، B: رگه نواری با بافت پوسته‌ای که از تناوب لایه‌های متوالی رسوب گذاری کانی‌ها تشکیل شده است، C: هم‌رخدادی بافت‌های پوسته‌ای، گل کلمی و شانه‌ای در یک رگه که نشان‌دهنده رسوب گذاری تناوبی کانی‌ها در فضای باز طی چندین پالس سیال گرمابی است. D و E: بلورهای صفحه‌ای کلسیت نسل دوم [Cal (II)] که فضای باز را پر کرده و توسط کوارتز نسل اول [Qz (I)] احاطه شده‌اند و F: جانشینی کلسیت نسل اول [Cal (I)] توسط کوارتز نسل دوم [Qz (II)] که با حفظ شکل اولیه بلورهای کلسیت، بافت شبه‌ریخت پس از کلسیت را ایجاد کرده است. این بافت از شواهد جوشش سیالات گرمابی در سامانه‌های سولفید پایین به شمار می‌رود. حروف اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Qz: کوارتز).

Fig. 6. Field photographs and photomicrographs showing the textures and structures of quartz-calcite veins in the Kahyaz prospect. A: Quartz vein exhibiting a comb texture, formed by the growth of prismatic quartz crystals into open space; the inset shows a close-up view of quartz crystal growth within the open cavity, B: Banded vein displaying a crustiform texture, produced by successive deposition of mineral layers, C: Coexistence of crustiform and comb textures within the same vein, indicating episodic mineral precipitation in open spaces during multiple pulses of hydrothermal fluids, D and E: Platy crystals of second-generation calcite [Cal (II)] filling open spaces and enclosed by first-generation quartz [Qz (I)], and F: Replacement of first-generation calcite [Cal (I)] by second-generation quartz [Qz (II)], preserving the original morphology of the calcite crystals and producing a quartz-after-calcite pseudomorph. This texture is considered one of the diagnostic indicators of boiling in low-sulfidation epithermal systems. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Qz: Quartz).



شکل ۷. تصویرهای نمونه دستی و مقاطع نازک از رگه‌های کانه‌زایی پتانسیل معدنی کهیاز. A: کلسدونی ریزبلور که بخش عمده رگه را تشکیل داده است، B: تجمع بلورهای شعاعی کلسیت در رگه، C: بلورهای لوزی شکل آدولاریا همراه با کلسدونی، D: کلسیت با بافت پرکننده فضای باز که توسط کوارتز احاطه شده است و E: هم‌رشدی آدولاریا، کوارتز و کلسدونی در رگه. تصویر مرکزی، نمونه دستی رگه نواری با محل برداشت مقاطع نازک (دایره‌های خط‌چین) را نشان می‌دهد. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ad: آدولاریا، Cal: کلسیت، Chl: کلسدونی، Qz: کوارتز).

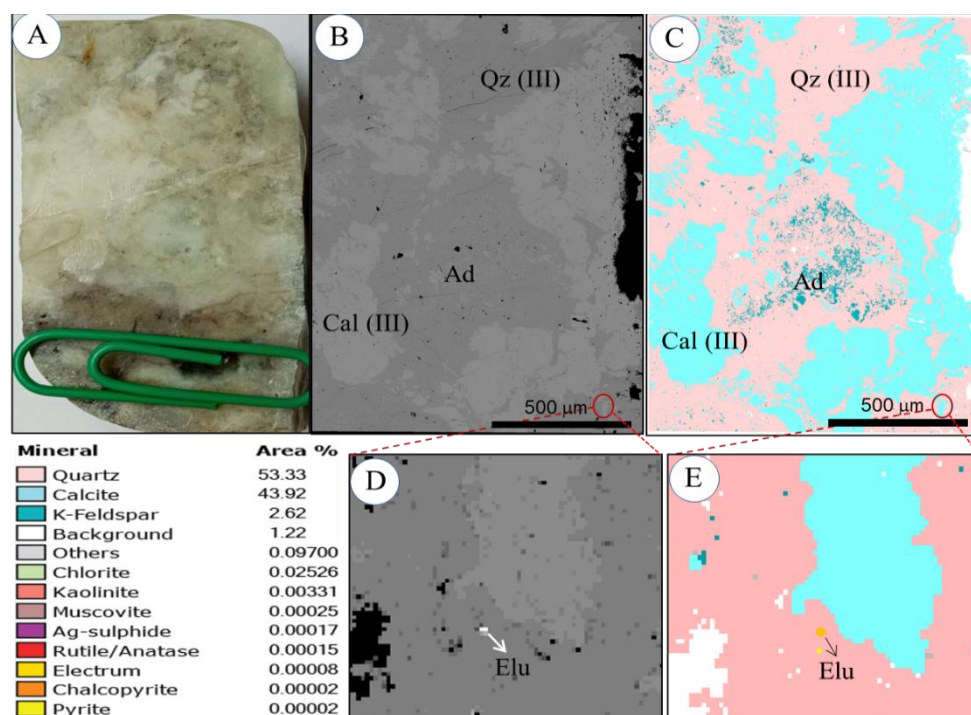
Fig. 7. Hand specimen and photomicrographs of the ore veins from the Kahyaz prospect. A: Microcrystalline chalcidony forming the major constituent of the vein, B: Radial aggregates of calcite crystals within the vein, C: Rhombic adularia crystals associated with chalcidony, D: Calcite displaying an open-space-filling texture and surrounded by quartz, and E: Intergrowth of adularia, quartz, and chalcidony within the vein. The central image shows a hand specimen of a banded vein, with the locations of the examined thin sections indicated by dashed circles. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ad: adularia, Cal: calcite, Chl: chalcidony, Qz: quartz).

بر اساس روابط بافتی و جانشینی، دست کم چهار نسل کوارتز (Qz I-IV) و چهار نسل کلسیت (Cal I-IV) قابل تشخیص است. کوارتز نسل اول همراه با کلسیت اولیه در مراحل آغازین تشکیل رگه‌ها رسوب کرده است. کلسیت تیغه‌ای نسل دوم در فضاهای باز تشکیل شده و سپس توسط کوارتز نسل دوم جانشین شده است. کوارتز نسل سوم همراه با آدولاریا، کلسدونی و کانی‌های فلزی شامل الکتروم، آکانتیت، پیریت و کالکوپیریت، مرحله اصلی کانه‌زایی را تشکیل می‌دهد. کوارتز نسل چهارم به صورت رگه‌ها و رگچه‌های دیرزاد و بدون همراهی کانی‌های فلزی مشاهده می‌شود.

کالکوپیریت در برخی نقاط توسط کالکوسیت و کوولیت جانشین شده است (شکل ۹- A). پیریت به صورت دانه‌های بسیار ریز (کمتر از ۵ میکرومتر) و پراکنده در میان کوارتز مشاهده شده و به دلیل فراوانی بسیار کم، روابط بافتی مشخصی با سایر کانی‌های کانسنگک نشان نمی‌دهد. منگانیات با فرمول $MnO(OH)$ ، کانی اکسید-هیدروکسید منگنز است که در محیط‌های گرمابی کم‌دما تشکیل می‌شود. این کانی در کهیاز در نمونه‌های سطحی با بافت فیبری یا رشته‌ای همراه با کانی‌های کوارتز و کلسیت یافت می‌شود (شکل ۹- B). توالی هم‌بافتی کانی‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.

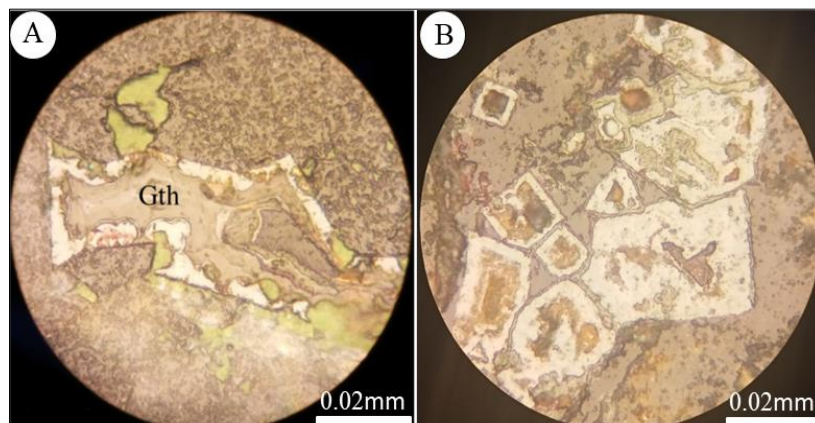
مجموعه این شواهد وقوع **جوشش** سیال گرمابی را در سامانه کم‌سولفید نشان می‌دهد. مرحله سوم، مرحله اصلی کانه‌زایی، با رسوب الکتروم، آکانتیت، مقدار کمی پیریت و کالکوپیریت همراه با نسل‌های دیرتر کوارتز مشخص می‌شود. الکتروم اغلب در داخل کوارتز و در ارتباط نزدیک با این مرحله مشاهده شده است (شکل‌های ۸-۸، ۸-۹، ۸-۱۰ و ۸-۱۱). پس از پایان کانه‌زایی، فرایندهای برون‌زاد موجب تشکیل کالکوسیت، کوولیت، منگانتیت، گوتیت، ژاروسیت و ژپس شده‌اند که اغلب به صورت جانشینی کانی‌های سولفیدی اولیه یا در امتداد شکستگی‌ها و بخش‌های اکسیدشده رگه‌ها گسترش یافته‌اند (شکل ۱۰).

بر اساس روابط بافتی، جانشینی کانی‌ها و شواهد صحرایی و میکروسکوپی، فرایند تشکیل رگه‌ها و کانه‌زایی در پتانسیل معدنی کهیاز را می‌توان به سه مرحله اصلی تقسیم کرد: مرحله نخست با تشکیل رگه‌های اولیه کوارتز-کلسیت و رسوب‌گذاری کوارتز و کلسیت در فضاهای باز آغاز شده است. در این مرحله، بافت‌های شانهای، پوسته‌ای، تیغه‌ای و پرشدگی فضای باز شکل گرفته‌اند که بیانگر رسوب‌گذاری کانی‌ها طی چندین پالس از سیالات گرمابی در شرایط کششی و فضاهای باز هستند (شکل ۷-۷ تا ۷-۹). مرحله دوم با جانشینی کلسیت تیغه‌ای توسط کوارتز و تشکیل بافت شبه‌ریخت همراه است. هم‌زمان، آدولاریا و کلسدون نیز تشکیل شده‌اند که



شکل ۸. تصویرهای نمونه دستی و میکروسکوپی از نمونه Qz-25-46 حاوی کانه‌زایی طلا در پتانسیل معدنی کهیاز. A: تصویر نمونه دستی از نمونه کوارتز دارای کانه‌زایی طلا، B: تصویر الکترون برگشتی از هم‌رشدی کوارتز، کلسیت و آدولاریا، C: تصویر QEMSCAN از هم‌رشدی کوارتز، کلسیت و آدولاریا. D و E: الکتروم به ترتیب با رنگ‌های سفید و زرد در قسمت‌های D و E مشخص شده است. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ad: آدولاریا، Cal: کلسیت، Elu: الکتروم، Qz: کوارتز).

Fig. 8. Hand-specimen and microscopic images of Qz-25-46 sample containing gold mineralization in the Kahyaz prospect. A: Hand-specimen image of a sample containing gold mineralization, B: Backscattered electron (BSE) image showing intergrowth of quartz, calcite, and adularia, C: QEMSCAN image of the intergrowth of quartz, calcite and adularia, D and E: Electrum is indicated by white and yellow colors in Figures D and E, respectively. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ad: Adularia, Cal: Calcite, Elu: Electrum, Qz: Quartz).



شکل ۹. تصویرهای میکروسکوپی از کانه‌زایی فلزهای پایه و واسطه در پتانسل معدنی کهیاز. A: کالکوپیریت درون‌زاد به همراه کالکوسیت و کوولیت برون‌زاد و B: منگائیت فیبری به همراه کوارتز و کلسیت. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Cc: کالکوسیت، Ccp: کالکوپیریت، Cv: کوولیت، Mnn: منگائیت، Qz: کوارتز).

Fig. 9. Microscopic images of base-metal mineralization in Kahyaz prospect. A: Hypogene chalcopyrite associated with supergene chalcocite and covellite, and B: Fibrous manganite accompanied by quartz and calcite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: Calcite, Cc: Chalcocite, Ccp: Chalcopyrite, Cv: Covellite, Mnn: Manganite, Qz: Quartz).

داده‌های زمین‌شیمیایی

نتایج تجزیه شیمیایی ICP-OES و Fire Assay به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. بر اساس جدول ۱، مقدار طلا از ۶ تا ۵۱۴۳ میلی گرم بر تن متغیر است. مقدار نقره نیز دارای دامنه تغییرات ۰/۲۵ تا ۲۷/۵ گرم بر تن است. به همین ترتیب، مقدار مس از ۴ تا ۱۵۴ گرم بر تن، مقدار سرب از ۵ تا ۴۹۹ گرم بر تن و مقدار روی از کمتر از ۱ تا ۵۵۸ گرم بر تن متغیر است. مقدار مولیبدن و منگنز نیز در نمونه‌ها دارای تغییرات زیادی است و به ترتیب از ۰/۵۶ تا ۱۴۷/۱ و ۴۲ تا ۳۰۰۶ گرم بر تن تغییر می‌کند. آرسنیک و آنتیموان دامنه تغییرات کمتری دارند و در بالاترین مقدار، به ترتیب به حدود ۱۰۰ و ۳۰/۶ گرم بر تن می‌رسند. جدول ۲ نشان می‌دهد که عیار طلا از ۰/۱ تا ۲/۱ گرم بر تن تغییر می‌کند. پراکندگی طلا در بیشتر نمونه‌ها بین ۰/۲ تا ۰/۷۵ گرم بر تن است.

بررسی میان‌بارهای سیال

بررسی میان‌بارهای سیال بر روی بلورهای کوارتز موجود در رگه اصلی و رگه‌های فرعی انجام شد. نمونه‌ها از اعماق مختلف و از

چندین گمانه حفاری انتخاب شدند. از میان نمونه‌های مورد بررسی، تنها نمونه Qz-25-46 حاوی الکتروم بود و بنابراین به طور مستقیم با مرحله اصلی کانه‌زایی ارتباط دارد. با توجه به اینکه بررسی‌های میان‌بارهای سیال نیز بر روی کوارتز همین نمونه انجام شده، ویژگی‌های سیال کانه‌ساز اغلب بر اساس نتایج این نمونه تفسیر شده است؛ در حالی که سایر نمونه‌ها برای بررسی تغییرات ویژگی‌های سیالات گرمابی در بخش‌های مختلف سامانه مورد استفاده قرار گرفتند. میان‌بارهای سیال اغلب از نوع اولیه هستند و بر اساس نوع فازهای موجود در دمای اتاق، ۵ نوع میان‌بار سیال شناسایی شد (شکل ۱۱): ۱- میان‌بارهای سیال دو فاز غنی از مایع (LV): در این نوع میان‌بار سیال، فاز مایع همراه با فاز حباب گاز وجود دارد. بیشترین حجم میان‌بار سیال را فاز مایع اشغال کرده است و فاز گازی تنها ۱۰ تا ۴۰ درصد حجم را تشکیل می‌دهد. بیشترین فراوانی نوع میان‌بار سیال بررسی شده در نمونه‌ها مربوط به این نوع هستند. این میان‌بارها فراوانی خوبی در نمونه‌ها دارند و بیشتر به شکل نامنظم، بیضوی و منفی‌بلور دیده می‌شوند. اندازه آنها از ۲ تا ۲۵ میکرون متغیر است که اغلب به فاز مایع همگن شده‌اند. ۲- میان‌بارهای دو فاز غنی از گاز (VL): در

دارند. در این نوع میان‌بار سیال علاوه بر فاز مایع و گازی یک کانی شفاف نیز حضور دارد. این میان‌بارها با اندازه حدود ۱۸ میکرون و شکل‌های نامنظم مشاهده می‌شوند. ۴- میان‌بارهای تک فاز مایع (L): در این نوع سیال‌های درگیر، فاز مایع تمام حجم میان‌بار سیال را در بر گرفته است و امکان مشاهده فاز گازی وجود ندارد. لذا از این نوع سیالات نمی‌توان برای اندازه‌گیری ترموبارومتري استفاده کرد.

این نوع سیال‌ها، حباب گاز بیشترین حجم سیال را در بر گرفته است. در بعضی موارد بیش از ۷۰ درصد حجم سیال را حباب گاز فرا گرفته است. این میان‌بارهای سیال به فاز بخار همگن می‌شوند. این میان‌بارها فراوانی کمی دارند و بیشتر به شکل نامنظم دیده می‌شوند. اندازه آنها حدود ۱۲ میکرون است. ۳- میان‌بارهای سه فازی (LVS): این نوع میان‌بارهای سیال اغلب به صورت پراکنده هستند و فراوانی کمی

Minerals	Propylitic alteration	Argillic alteration	Silicic-Carbonate alteration	Early Ore stage	Main Ore stage	Supergene stage
Illite		_____				
Illite/Smectite		_____				
Montmorillonite		_____				
Beidellite		_____				
Paragonite		_____				
Chlorite	_____					
Epidote	_____					
Calcite (I)	_____					
Calcite (II)			_____			
Calcite (III)				_____		
Calcite (IV)					_____	
Quartz (I)			_____			
Quartz (II)			_____			
Quartz (III)				_____		
Quartz (IV)					_____	
Chalcedony				_____		
Adularia				_____	_____	
Electrum					_____	
Acanthite					_____	
Pyrite	_____			_____		
Chalcopyrite				_____		
Chalcocite						_____
Covellite						_____
Manganite						_____
Goethite						_____
Jarosite						_____
Gypsum						_____
Zeolite group						
Texture						
Bladed			_____			
Comb			_____			
Crustiform			_____			
Colloform			_____			
Massive				_____		
Open space filling			_____			

شکل ۱۰. توالی هم‌یافتی کانه‌ها و کانی‌های دگرسانی در پتانسیل معدنی کهیاز

Fig. 10. Paragenetic sequence of ore and alteration minerals at the Kahyaz prospect

جدول ۱. نتایج تجزیه Fire Assay (برای عنصر طلا بر حسب میلی گرم در تن) و ICP-OES (بر حسب گرم در تن) برای عناصر دیگر نمونه‌های مختلف در پتانسیل معدنی کهیاز

Table 1. Fire Assay (for gold in ppb) and ICP-OES (in ppm) data for samples from the Kahyaz prospect

Element	Au	Ag	As	Ba	Cu	Mn	Mo	Pb	S	Sb	Zn
Detection Limit	5	0.1	0.5	5	1	5	0.5	1	50	0.5	1
97-NN-1	15	0.6	26.5	572	7	75	10.6	14	1927	0.95	9
97-NN-2	10	0.43	11.5	711	4	47	1.79	10	1025	0.86	10
97-NN-3	46	0.52	55.8	633	6	82	15.2	17	1565	0.82	19
97-NN-4	37	0.59	2.7	44	5	800	0.89	5	147	1.28	<1
97-NN-5	5143	27.5	3.5	65	13	192	1.13	25	167	12	13
97-NN-6	1072	12.7	2.6	141	11	396	0.99	7	325	1.3	4
97-NN-7	517	10.8	2.4	65	10	1113	0.87	17	154	16.3	558
97-NN-8	16	0.46	14.4	273	31	489	13.2	26	1896	0.95	62
97-NN-9	457	0.57	30	300	10	627	16	24	779	1.16	34
97-NN-10	2161	9.6	32.3	133	15	275	0.82	11	927	20.8	14
97-NN-11	478	1.8	27.4	420	24	113	0.9	12	243	1.38	20
97-NN-12	6	1.3	30.9	644	7	68	1.56	7	973	1.05	9
97-NN-13	60	3.9	>100	749	13	297	14.5	28	678	1.3	144
97-NN-14	44	0.52	37.3	584	12	354	1.2	42	197	1.07	85
97-NN-15	190	3	13.8	272	9	194	0.83	7	107	1.35	19
97-NN-16	1739	13.4	2.7	47	8	173	0.62	6	100	18.9	9
97-NN-17	311	2.1	10.8	144	5	54	0.86	16	394	1.09	11
97-NN-18	955	8.9	3.1	94	8	671	0.63	6	737	1.35	8
97-NN-19	1615	17.2	2.1	18	6	951	0.56	6	291	1.27	5
97-NN-20	1630	23.2	2.3	113	13	487	0.65	6	266	15	8
97-NN-21	1539	9.7	2.9	107	7	375	0.96	6	1907	1.37	10
97-NN-22	3023	9.3	2.6	56	9	777	0.63	6	223	18.2	10
97-NN-23	819	16.4	2.4	49	5	769	0.63	5	237	11.8	6
97-NN-24	733	11.1	8	27	6	1144	0.6	5	352	1.47	5
97-NN-25	2054	25.6	2.4	42	7	920	0.7	6	246	11.3	6
97-NN-26	3123	37	2.4	61	5	771	0.61	6	163	12	6
97-NN-27	327	6.1	8	117	9	851	0.66	5	313	1.59	12
97-NN-28	708	14.1	4.7	87	14	985	0.61	5	209	12.7	9
97-NN-29	780	22.8	2.6	44	6	577	0.7	6	180	14.1	6
97-NN-30	64	1.8	22.4	105	7	1051	0.64	6	187	17.8	7
97-NN-31	57	14.9	96.1	213	154	630	147.1	499	1752	30.6	495
97-NN-32	46	0.38	18.1	119	28	153	9.6	6	167	1.03	18
97-NN-33		0.31	4	511	6	3006	0.74	7	115	0.92	22
97-NN-34		0.25	9.3	687	13	107	0.69	7	661	0.9	24
97-NN-35		0.27	4.7	589	18	42	0.74	6	567	1.01	6
97-NN-31	57	14.9	96.1	213	154	630	147.1	499	1752	30.6	495
97-NN-32	46	0.38	18.1	119	28	153	9.6	6	167	1.03	18
97-NN-33		0.31	4	511	6	3006	0.74	7	115	0.92	22
97-NN-34		0.25	9.3	687	13	107	0.69	7	661	0.9	24
97-NN-35		0.27	4.7	589	18	42	0.74	6	567	1.01	6

جدول ۲. خلاصه‌ای از نتایج تجزیه Fire Assay (بر حسب گرم بر تن) برای نمونه‌های حاصل از گمانه‌های حفاری کهیاز

Table 2. Summary of Fire Assay data (in ppm) for samples from drill holes in the Kahyaz

Sample Number	Au	Sample Number	Au	Sample Number	Au
KBH 16-S8	1.1	KBH21-S10	0.15	KBH24-S5	0.54
KBH 16-S9	0.6	KBH22-S5	0.2	KBH24-S6	0.5
KBH 16-S10	0.3	KBH22-S6	0.3	KBH24-S7	0.75
KBH 16-S11	0.3	KBH22-S7	0.55	KBH25-S2	0.15
KBH 16-S12	0.45	KBH22-S8	0.3	KBH25-S3	0.3
KBH18-S4	0.5	KBH22-S9	0.7	KBH25-S4	1.7
KBH18-S5	0.7	KBH22-S46	2.1	KBH25-S5	1.1
KBH18-S6	0.9	KBH22-S47	0.37	KBH25-S6	0.15
KBH18-S7	0.75	KBH22-S48	0.25	KBH25-S7	0.6
KBH20-S6	0.35	KBH22-S49	0.1	KBH25-S14	0.65
KBH20-S7	0.45	KBH22-S50	0.2	KBH25-S15	0.62
KBH20-S8	0.65	KBH23-S10	0.15	KBH25-S16	0.54
KBH20-S9	0.22	KBH23-S11	0.25	KBH25-S17	0.7
KBH21-S6	0.65	KBH23-S12	0.5	KBH25-S18	0.5
KBH21-S7	0.3	KBH23-S13	0.27	KBH26-S10	0.75
KBH21-S8	0.35	KBH23-S14	0.27	KBH26-S11	0.7
KBH21-S9	0.35	KBH24-S4	0.55	KBH26-S12	0.35

افراوانی این نوع سیال در گیر بسیار کم است. این میان‌بارها با اندازه حدود ۱۵ میکرون و با شکل‌های نامنظم مشاهده شده‌اند. ۵- میان‌بارهای تک فاز گازی (V): این میان‌بارها به صورت همزیست با میان‌بارهای دو فاز دیده می‌شوند که نشان‌دهنده جوشش سیال است. در این نوع از میان‌بارهای سیال، حباب گاز تنها فاز تشکیل دهنده است. لذا از این نوع سیالات نمی‌توان برای اندازه‌گیری ریزدماسنجی استفاده کرد. این نوع میان‌بارهای سیال، افراوانی زیادی در نمونه دارند و بیشتر به شکل نامنظم و بیضوی با رنگ تیره دیده می‌شوند. اندازه آنها از ۲ تا ۱۵ میکرون متغیر است.

داده‌های ریزدماسنجی

بررسی‌های ریزدماسنجی بر روی میان‌بارهای سیال موجود در کوارتز رگه‌های اصلی و فرعی انجام شد. نمونه‌های Qz-25-8، Qz-25-2، Qz-25-46 و Qz-25-49 از یک گمانه اکتشافی (BH-25) و از

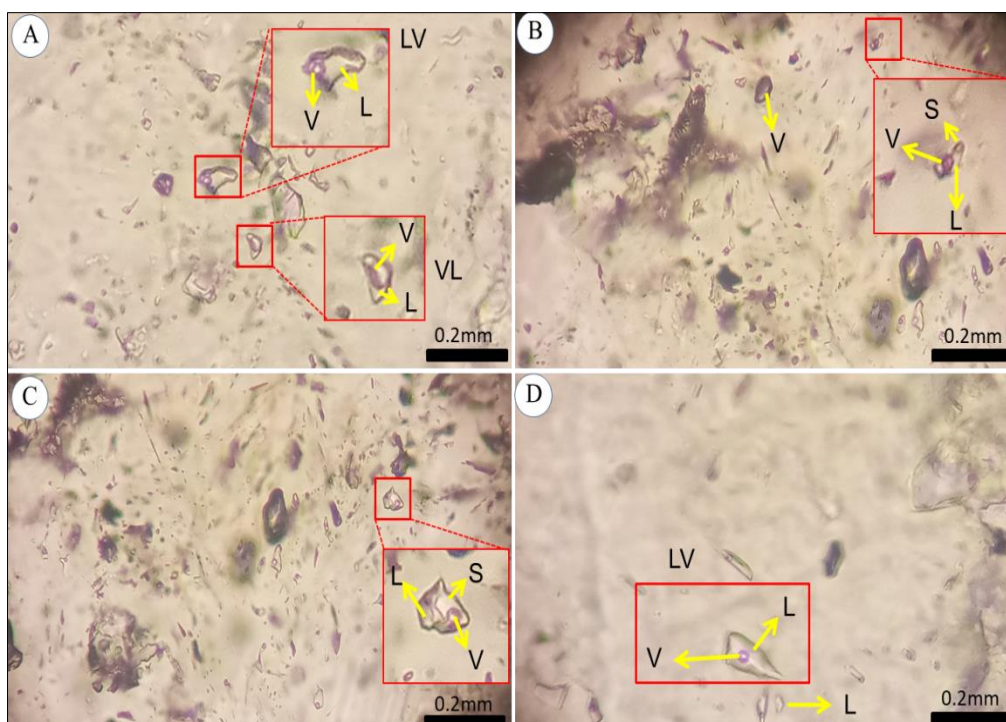
افراوانی این نوع سیال در گیر بسیار کم است. این میان‌بارها با اندازه حدود ۱۵ میکرون و با شکل‌های نامنظم مشاهده شده‌اند. ۵- میان‌بارهای تک فاز گازی (V): این میان‌بارها به صورت همزیست با میان‌بارهای دو فاز دیده می‌شوند که نشان‌دهنده جوشش سیال است. در این نوع از میان‌بارهای سیال، حباب گاز تنها فاز تشکیل دهنده است. لذا از این نوع سیالات نمی‌توان برای اندازه‌گیری ریزدماسنجی استفاده کرد. این نوع میان‌بارهای سیال، افراوانی زیادی در نمونه دارند و بیشتر به شکل نامنظم و بیضوی با رنگ تیره دیده می‌شوند. اندازه آنها از ۲ تا ۱۵ میکرون متغیر است.

داده‌های ریزدماسنجی

بررسی‌های ریزدماسنجی بر روی میان‌بارهای سیال موجود در کوارتز رگه‌های اصلی و فرعی انجام شد. نمونه‌های Qz-25-8، Qz-25-2، Qz-25-46 و Qz-25-49 از یک گمانه اکتشافی (BH-25) و از

۲۲۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد هستند. این میان‌بارهای سیال دارای دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{m-ice}) ۰/۵- تا ۷- درجه سانتی‌گراد هستند و با شوری ۰/۸۸ تا ۱۰/۴۹ معادل درصد وزنی نمک طعام مشخص می‌شوند.

یوتکتیک (Te) یا دمای ذوب اولیه یخ در میان‌بارهای نوع LV از ۲۳- تا ۲۹- درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند (جدول ۳). دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال LV در کوارتز از ۱۱۰ تا ۲۹۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است که اغلب آنها دارای دمای همگن‌شدگی بین



شکل ۱۱. تصویرهای میکروسکوپی از انواع میان‌بارهای سیال در پتانسیل معدنی کهیاز. A: میان‌بارهای سیال اولیه دو فازی غنی از مایع (LV) و غنی از گاز (VL). B: میان‌بارهای سه فازی نوع LVS و میان‌بار تک فاز گازی نوع V. C: میان‌بار سیال سه فازی نوع LVS و D: میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از مایع و تک فاز مایع. (S: فاز جامد، L: فاز مایع، V: فاز بخار)

Fig. 11. Photomicrographs of different types of fluid inclusions in the Kahyaz mineralized area. A: Primary two-phase fluid inclusions, liquid-rich (LV) and vapor-rich (VL), B: Three-phase LVS-type inclusions and single-phase vapor inclusions (V-type), C: Three-phase LVS-type fluid inclusion, and D: Two-phase liquid-rich and single-phase liquid fluid inclusions (S: solid, L: liquid, V: vapor)

سیال نوع VL در نمونه‌های QZ-۲۵-۲ و QZ-۲۵-۴۶ در کنار میان‌بارهای نوع LV مشاهده شدند. دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال نوع VL از ۲۱۰ تا ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. شوری این نوع میان‌بارهای سیال از ۳/۳۸ تا ۱۰/۲۹ درصد وزنی معادل نمک طعام تغییر می‌کند.

چگالی این نوع میان‌بارهای سیال از ۰/۷۳ تا ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است. میان‌بارهای سیال نوع LVS با شوری ۷/۸۰ تا ۹/۵۸ درصد وزنی معادل نمک طعام فقط در نمونه QZ-۲۵-۴۶ مشاهده شده است. دمای همگن‌شدگی این میان‌بارهای سیال نیز زیاد است و از ۲۵۷ تا ۲۶۸ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. میان‌بارهای

جدول ۳. نتایج بررسی‌های ریزدماسنجی انواع میان‌بارهای سیال اولیه در پتانسیل معدنی کهیاز

Table 3. Microthermometric data of primary fluid inclusion types in the Kahyaz prospect

Mineral	Description	Depth of sample collection (m)	Phase	T _{m-ice} range (°C)	T _{h(L-V)} range (°C)	T _{h(V-L)} range (°C)	Te range (°C)	Salinity range (wt. % NaCl)	Bulk Density (g/cm ³)
Qz-Kh-135 (n=10)	Minor vein	0	LV	-2.6 to -0.5	110 to 270		-26 to -23.1	0.88 to 4.34	0.77 to 0.97
Qz-25-2 (n=13)	Major vein	7	LV	-3.5 to -0.5	163 to 290		-23	0.88 to 5.69	0.74 to 0.93
Qz-25-2 (n=2)	Major vein	7	VL	-2		210 to 268		3.38	
Qz-25-8 (n=10)	Major vein	18	LV	-6.10 to -1	168 to 236			1.74 to 9.21	0.85 to 0.91
Qz-25-46 (n=13)	Major vein	37	LV	-7 to -1.6	169 to 278		-23 to -29	2.73 to 10.29	0.82 to 0.95
Qz-25-46 (n=2)	Major vein	37	VL	-7 to -2.9	-	215 to 270		4.79 to 10.29	-
Qz-25-46 (n=2)	Major vein	37	LVS	-6.4 to -5	-	257 to 268		7.80 to 9.58	-
Qz-25-49 (n=10)	Major vein	40	LV	-4 to -0.9	217 to 270			1.57 to 6.41	0.79 to 0.89
Qz-BH-49 (n=7)	Major vein	57	LV	-3 to -1	121 to 298			1.74 to 4.94	0.73 to 0.95
Qz-BH-64 (n=9)	Major vein	108	LV	-5 to -1	126 to 280		-29	1.74 to 7.80	0.77 to 0.97

بحث

طلا (۰/۲۸-) دارای همبستگی منفی است. همبستگی منفی فلزهای پایه (مس، سرب، روی) با طلا نشان‌دهنده ارتباط زایشی ضعیف بین این عناصر و طلاست. همبستگی مثبت قوی بین طلا و نقره از یک سو و همبستگی منفی بین طلا و عناصر آرسنیک و گوگرد از سوی دیگر، نشان می‌دهد که طلا به صورت الکتروم تشکیل شده است و احتمال حضور آن همراه با کانی‌هایی مثل پیریت یا آرسنوپیریت وجود ندارد.

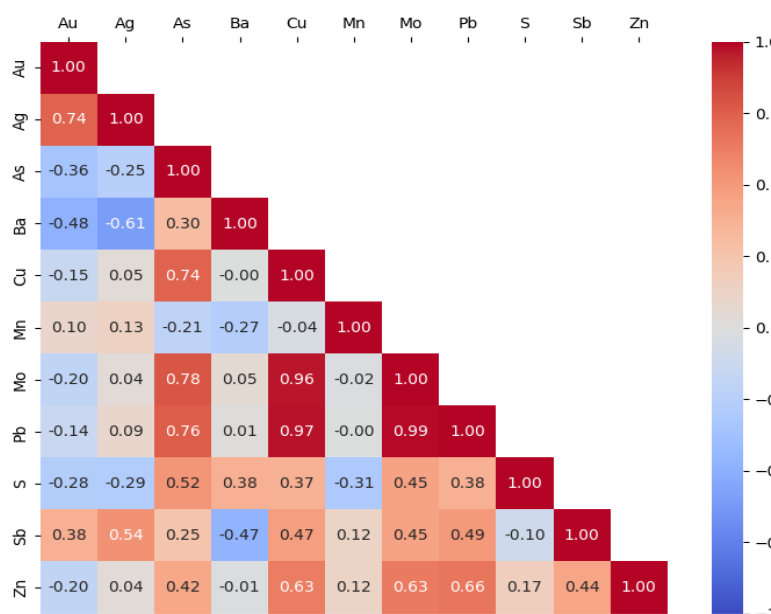
تحول سیال کانه‌ساز

نمودار دمای همگن‌شدگی نهایی در برابر شوری (شکل ۱۴) نشان می‌دهد که میان‌بارهای سیال در محدوده متداول سامانه‌های گرمایی سولفیداسیون پایین قرار می‌گیرند. داده‌های مربوط به نمونه‌های گمانه ۲۵ (Qz-25-2، Qz-25-8، Qz-25-46 و Qz-25-49) به طور کلی بیانگر افزایش نسبی دمای همگن‌شدگی و شوری در برخی نمونه‌های عمیق‌تر هستند. هرچند با توجه به محدود بودن تعداد نمونه‌ها و

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ضرایب همبستگی عناصر کانه‌ساز را در منطقه مورد بررسی نشان می‌دهند. بر این اساس، طلا دارای همبستگی مثبت قوی با عناصر نقره (۰/۷۴) و همبستگی مثبت متوسط با آنتیموان (۰/۳۸) است. همبستگی ضعیف طلا با منگنز (۰/۱) نیز مشاهده می‌شود. طلا با بقیه عناصر مثل باریم (۰/۴۸-)، آرسنیک (۰/۳۶-)، گوگرد (۰/۲۸-) دارای همبستگی منفی متوسط است. نقره دارای همبستگی مثبت متوسط با عنصر آنتیموان (۰/۵۴) است. نقره کمترین میزان همبستگی را با عنصر باریم (۰/۶۱-) دارد. همبستگی آرسنیک با عناصری مثل مولیبدن (۰/۷۸)، سرب (۰/۷۶) و مس (۰/۷۴) زیاد و مثبت است. مس همبستگی مثبت بسیار قوی با سرب (۰/۹۷) و مولیبدن (۰/۹۶) دارد. گوگرد همبستگی مثبتی با عنصر آرسنیک (۰/۵۲)، مولیبدن (۰/۴۵)، باریم و سرب (۰/۳۸) و مس (۰/۳۷) نشان می‌دهد؛ در حالی که با عناصری مثل منگنز (۰/۳۱-)، نقره (۰/۲۹-) و

بلور هالیت و نتیجه‌گیری درباره منشأ ماگمایی سیال خودداری شد. دامنه شوری اندازه‌گیری‌شده (۸/۱۰ تا ۲۹/۱۰ درصد وزنی معادل NaCl) می‌تواند حاصل تغییرات موضعی در شرایط سیال، از جمله برهم‌کنش سیال با سنگ میزبان، اختلاط محدود سیالات و یا وقوع جوشش در بخش‌هایی از سامانه باشد. از این رو، تعیین سازوکار غالب نیازمند شواهد تکمیلی است.

هم‌پوشانی مقادیر دما و شوری، این روند را نمی‌توان به عنوان یک روند قطعی تحول سیال در نظر گرفت. بنابراین، داده‌های میان‌بارهای سیال بیشتر نشان‌دهنده تغییرات محلی در شرایط فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز هستند تا یک روند تکاملی یکنواخت. حضور تعداد محدودی میان‌بار دارای فاز جامد نیز ممکن است نشان‌دهنده سهم موضعی سیالات با شوری بیشتر باشد. با این حال، با توجه به اینکه ماهیت فاز جامد به طور قطعی تعیین نشده است، از تفسیر آن به عنوان



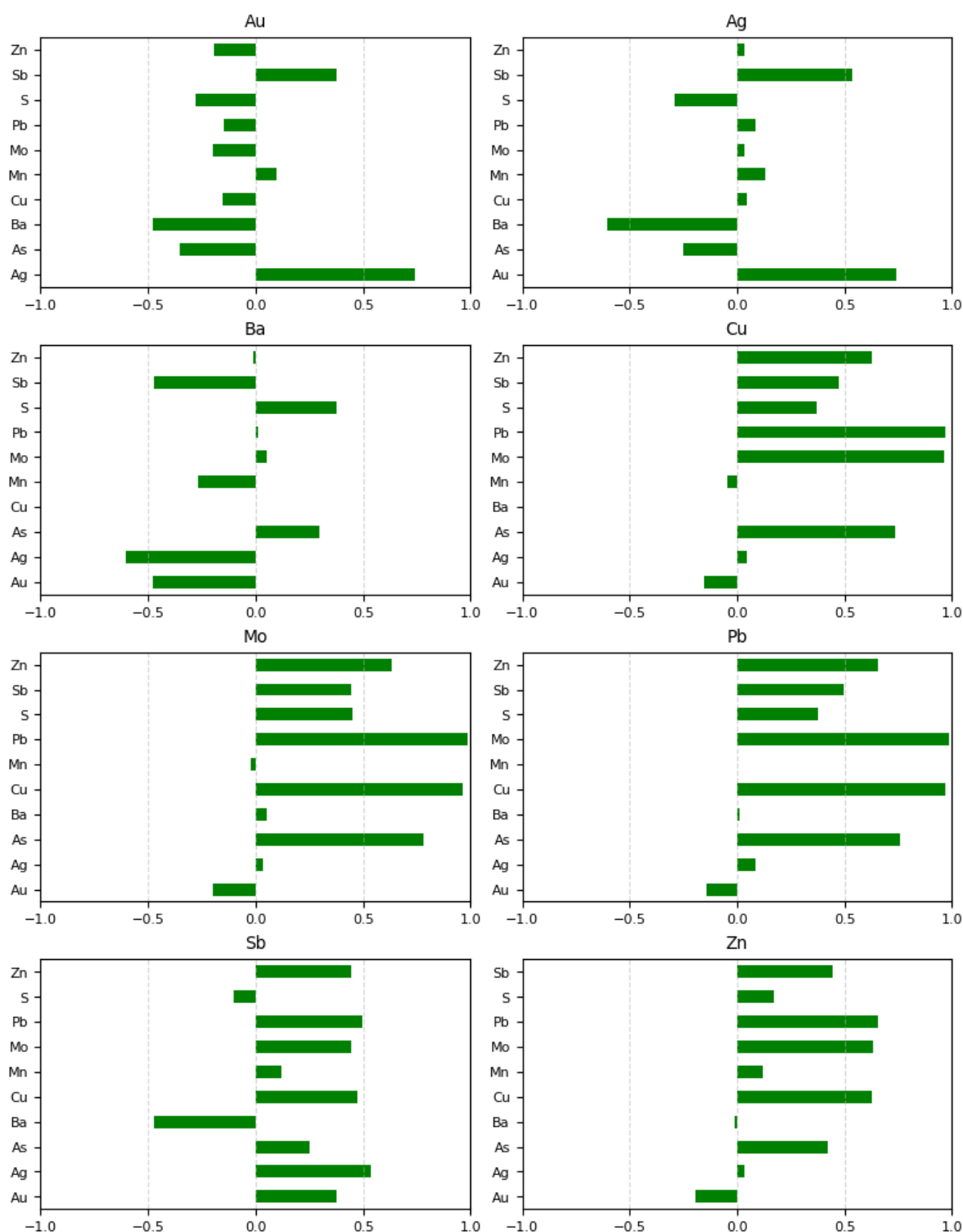
شکل ۱۲. ضریب همبستگی عناصر برای نمونه‌های مختلف پتانسیل معدنی کهیاز

Fig. 12. Correlation coefficients of elements for various samples from the Kahyaz prospect

(al., 2017). احتمال رخداد جوشش با حضور آدولاریا و کلسیت تیغه‌ای (شکل ۶-D و F) نیز تأیید می‌شود (Browne, 1978; Keith and Muffler, 1978; Simmons and Christenson, 1994; Chauvet et al., 2006). رسوب کوارتز کلسدونایی نشان‌دهنده ته‌نشست سریع SiO_2 است که احتمالاً به دلیل کاهش دماهای همراه با جوشش آدیاباتیک و از دست دادن گرما به دلیل تشکیل بخار آب (Thiersch et al., 1997) است.

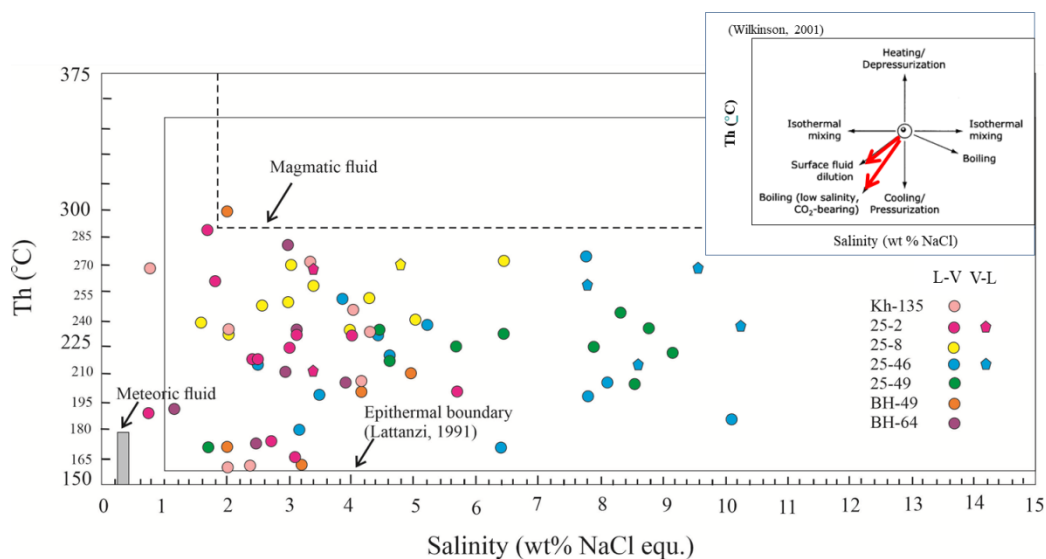
شواهد جوشش سیال کانه‌دار

شواهد قوی بافتی و میان‌بار سیال بیانگر رخداد جوشش در طی رویدادهای کانی‌سازی در کهیاز است. همزیستی میان‌بارهای اولیه VL و LV (شکل ۱۱-A) با نسبت بخار به مایع متغیر، شاخص‌های احتمالی جوشش در سامانه گرمایی هستند (White and Hedenquist, 1995; Thiersch et al., 1997; Ronacher et al., 2000; Simmons et al., 2005). میان‌بارهای سیال تک‌فازی نوع V نیز رخداد جوشش را تأیید می‌کنند (Moncada et



شکل ۱۳. نمودار همبستگی عناصر مختلف پتانسیل معدنی کهیاز

Fig. 13. Correlation diagram of various elements in the Kahyaz prospect



شکل ۱۴. نمودار شوری-دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال در پتانسیل معدنی کهیاز. توزیع داده‌ها با فرایندهای اختلاط و/یا جوشش سیالات گرمایی سازگار است. ترکیب‌های فرضی آب‌های ماگمایی و جوی بر اساس لاتانزی (Lattanzi, 1991)، نادن و همکاران (Naden et al., 2005) و هدنکوئیست و همکاران (Hedenquist et al., 1998) و روندهای جوشش و اختلاط سیال از ویلکینسون (Wilkinson, 2001) اقتباس شده است.

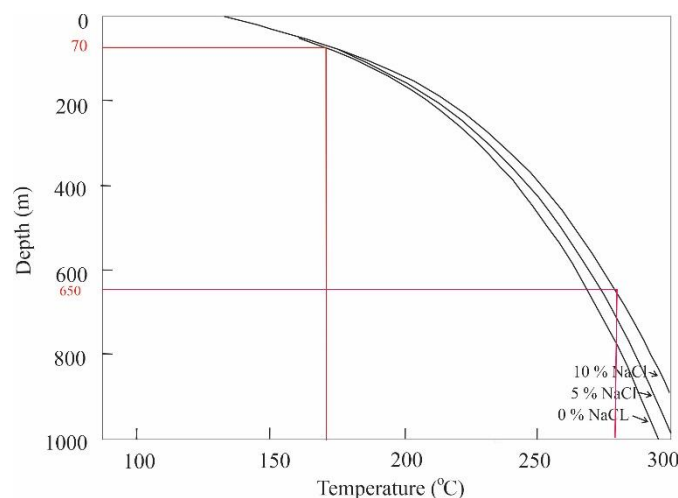
Fig. 14. Salinity versus homogenization temperature (Th) diagram for fluid inclusions from the Kahyaz prospect. The distribution of the data is consistent with fluid mixing and/or boiling processes. The inferred compositions of magmatic and meteoric waters are after Lattanzi (1991), Naden et al. (2005), and Hedenquist et al. (1998), whereas the boiling and fluid-mixing trends are modified after Wilkinson (2001).

در صورت وجود شواهد جوشش، نیازی به اصلاح فشار نیست (Simeone and Simmons, 1999). بنابراین دماها و فشارهای همگن‌سازی مایع-بخار را می‌توان به طور مستقیم به عنوان دما و فشار ته‌نشست سیال استفاده کرد (Roedder and Bodnar, 1980). تمام نمونه‌های انتخاب‌شده برای بررسی میان‌بارهای سیال، دارای شواهد رخداد جوشش بودند. دو نمونه، هم‌زمان هر دو میان‌بارهای نوع LV و VL را داشتند (Qz-25-2 و Qz-25-46) و شواهد جوشش را ثبت کردند. به دلیل اینکه تشکیل طلا در نمونه Qz-25-46 ثابت شده است، این نمونه برای تعیین عمق جوشش انتخاب‌شد. بر این اساس، نمودار هاس (Haas, 1971) و کمترین و بیشترین مقدار دمای همگن‌شدگی مرتبط با این نمونه (به ترتیب برابر با ۱۶۹ و ۲۷۸ درجه سانتی‌گراد) و شوری (به ترتیب ۲/۷۳ و ۱۰/۲۹ درصد وزنی معادل نمک طعام) برای تعیین عمق جوشش استفاده شد که اعماق ۷۰ تا ۶۵۰ متر را نشان داد (شکل ۱۵).

بافت‌هایی مثل گل کلمی و شعله‌ای که از نشانه‌های جوشش است (Dong et al., 1995) در منطقه مورد بررسی مشاهده شد. توزیع نمونه‌های دارای نشانه‌های جوشش در نقاط و اعماق مختلف نشان می‌دهد که این رخداد چند بار و در اعماق مختلف رخ داده است و سبب تشکیل زون جوشش و کانه‌زایی شده است. هنگام جوشش، بخشی از آب و گازهای فرار (به ویژه CO_2) از سیال جدا می‌شوند و محلول باقی‌مانده به نسبت شورتر می‌شود. بنابراین میان‌بارهایی که پس از جوشش به دام افتاده‌اند، می‌توانند شوری بالاتری نسبت به سیال اولیه نشان دهند. این موضوع با وجود کلسیت تیغه‌ای، بافت شبه‌ریخت کوارتز پس از کلسیت، بافت‌های شانه‌ای و قشری نیز سازگار است.

تعیین عمق و فشار سیال

عمق تشکیل در زیر سطح آب دیرینه را می‌توان با استفاده از منحنی‌های نقطه جوش هیدروستاتیکی تخمین زد (Haas, 1971).



شکل ۱۵. نمودار دمای جوشش سیال در مقابل عمق برای سیال با شوری ۵، ۱۰ و درصد وزنی معادل نمک طعام و دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال از هاس (Haas, 1971). خطوط قرمز نشان‌دهنده عمق جوشش ۷۰ تا ۶۵۰ متری در پتانسیل معدنی کهیاز است.

Fig. 15. Fluid boiling temperature versus depth for fluids with 0, 5, and 10 wt.% NaCl-equivalent salinity and homogenization temperatures of fluid inclusions (Haas, 1971). The red lines indicate a boiling depth range of 70 to 650 meters in the Kahyaz prospect.

نوع کانه‌زایی

برای طبقه‌بندی یک کانسار می‌توان از ویژگی‌های شاخص آن استفاده کرد. کانسارهای اپی‌ترمال را می‌توان بر اساس مجموعه کانی‌های دگرسانی و باطله، محتوای فلز و سولفید و مجموعه کانی‌های سولفیدی طبقه‌بندی کرد (Simmons et al., 2005). کانسارهای سولفیداسیون پایین با مجموعه کانی‌های کوارتز، کلسیت، آدولاریا شناخته می‌شوند و دارای فلزهای مهم Au و Ag هستند که معمولاً به صورت طلای آزاد، الکتروم، سولفوسالت، سلنید نقره و آکانتیت تشکیل می‌شوند (White and Hedenquist, 1995; Sillitoe and Hedenquist, 2005; Simmons et al., 2005). کوارتز به عنوان فراوان‌ترین کانی باطله با بافت‌های قشری، گل کلمی و تیغه‌ای مشخص می‌شود (Simmons et al., 2005). میزان سولفید در این نوع کانسارها کم و از حدود ۲ تا ۱۰ درصد تغییر می‌کند (Sillitoe and Hedenquist, 2005). این کانسارها در دمای حدود ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و از سیالی با pH تقریباً خنثی تشکیل می‌شوند و با کانی‌هایی مثل ایلیت، اسمکتیت، آدولاریا و کلسیت

مشخص می‌شود (White and Hedenquist, 1995). ویژگی‌های زیر نشان می‌دهد که کانه‌زایی اپی‌ترمال در پتانسیل معدنی کهیاز از نوع سولفیداسیون پایین است: کانه‌زایی طلا در رگه‌های سیلیسی و در میزبان سنگ‌های آتشفشانی الیگوسن تشکیل شده است. کانه‌ها شامل الکتروم و آکانتیت است و فلزهای پایه از قبیل کالکوپریت، کوولیت، کالکوسیت و فلز واسطه شامل منگنیت به صورت فرعی حضور دارند. کانی‌های باطله شامل کوارتز، کلسیت و آدولاریاست و کوارتز به عنوان فراوان‌ترین کانی‌های باطله دارای ساخت-بافت‌های رگه‌ای-رگچه‌ای، گل کلمی، قشری، تیغه‌ای، شعله‌ای و پرکننده فضای خالی است. در منطقه مورد بررسی، دگرسانی آرژلیک پیشرفته با کانی‌های آلونیت، کائولینیت و پیروفیلیت مشخص می‌شود و شاخص سامانه‌های اپی‌ترمال سولفیداسیون بالاست (du Bray, 2017)، وجود ندارد. بررسی‌های میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که سیالات کانه‌ساز دارای دمای همگن‌شدگی ۱۶۹ تا ۲۷۸ درجه سانتی‌گراد و شوری کم تا متوسط (۷۳/۲ تا ۲۹/۱۰ درصد وزنی معادل NaCl) هستند. میان‌بارهای سیال اغلب از نوع دو فاز غنی از مایع

کانسارهای سولفیداسیون پایین، طلا همراه با کانی‌های باطله فراوان کوارتز، کلسیت و آدولاریا همراه است (Sillitoe, 1977; Buchanan, 1981; White et al., 1995). گسترش هاله‌های دگرسانی آرژیلیک و پروپلیتیک، جانشینی پلاژیوکلاز توسط ایلیت و اسمکتیت و کلریتی‌شدن کانی‌های فرومنیزین، بیانگر برهم‌کنش سیالات گرمابی با سنگ‌های آندزیتی می‌زبان است. بنابراین، ویژگی‌هایی مثل فراوانی آدولاریا، نبود کائولینیت، آلونیت و باریت، فراوانی کلسدون و کوارتز نهشته‌شده بر روی کلسیت تیغه‌ای، در مجموع نشان‌دهنده واکنش یک سیال دما پایین، pH خنثی، احیایی، حاوی CO_2 و H_2S در حال جوشش با سنگ‌های دیواره است. دگرسانی‌های آرژیلیک متوسط و پروپلیتیک از سیالات گرمابی تقریباً خنثی تا اسیدی ضعیف و فوق‌اشباع از کوارتز تشکیل می‌شوند. سپس، رگه‌های کوارتز غنی از آدولاریا و کلسیت از سیالات غنی از سیلیس و پتاسیم در حال جوشش به همراه الکتروم تشکیل می‌شود (John et al., 2003).

در منطقه مورد بررسی، گنبد‌های نیمه‌آتشفشانی داسیتی-ریوداسیتی منشأ سیالات گرمابی هستند که سبب توسعه دگرسانی و کانه‌زایی شده‌اند. بر اساس بررسی‌های میان‌بارهای سیال، سیالات با منشأ ماگمایی (با دما و شوری بالا؛ به ترتیب ۲۷۸ درجه سانتی‌گراد و ۱۰/۲۹ درصد وزنی معادل نمک طعام) از طریق مناطق ضعف ساختاری مانند گسل‌ها و شکستگی‌ها به سطوح کم‌عمق راه یافته‌اند و سپس در نتیجه اختلاط با سیالات جوی (با دما و شوری پایین؛ به ترتیب ۱۶۹ درجه سانتی‌گراد و ۲/۷۳ درصد وزنی معادل نمک طعام) و رخداد جوشش، بار فلزی خود را ته‌نشین کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

در منطقه پی‌جویی کهپاز، رگه‌های سیلیسی طلادار در سنگ میزبان آندزیتی-تراکی آندزیتی الیگوسن قرار گرفته‌اند. کوارتز فراوان‌ترین کانی باطله است که با ساخت-بافت رگه-رگچه‌ای، گل‌کلمی، قشری، تیغه‌ای مشخص می‌شود و میزبان اصلی طلاست. کلسیت و آدولاریا از دیگر کانی‌های باطله هستند که همراه کوارتز در رگه

(LV) بوده و حضور تعداد اندکی میان‌بارهای سه‌فازی حاوی فاز جامد، همراه با بافت‌های شاخصی نظیر کلسیت تیغه‌ای، کوارتز جانشین کلسیت، بافت‌های شانه‌ای و قشری، بیانگر وقوع جوشش موضعی سیال گرمابی است. علاوه بر این، دامنه تغییرات شوری و دمای همگن‌شدگی، اختلاط سیال گرمابی با سیالات کم‌شور را نیز نشان می‌دهد. این ویژگی‌ها با سیالات با pH نزدیک به خنثی، دمای متوسط و شوری کم تا متوسط که مشخصه سامانه‌های سولفیداسیون پایین هستند، مطابقت دارد. بنابراین، بر اساس بافت کانی‌ها، مجموعه کانی‌های باطله، مجموعه کانی‌های دگرسانی و ماهیت سیالات کانه‌ساز، می‌توان کانه‌زایی در کهپاز را به عنوان یک سامانه سولفیداسیون پایین طبقه‌بندی کرد.

فرایند کانه‌زایی

جوشش و اختلاط سیال از جمله فرایندهای اصلی هستند که در سامانه‌های زمین‌گرمایی رخ می‌دهند (Giggenbach and Stewart, 1982). در جریان سیال بالارونده در یک محیط سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا، رخداد جوشش سبب خارج‌شدن CO_2 و در نتیجه افزایش pH می‌شود (White and Hedenquist, 1995). این امر سبب ناپایداری ایلیت شده و آدولاریا به عنوان کانی پتاسیم‌دار به همراه کلسیت در این شرایط کلیایی تشکیل می‌شوند (Drummond and Ohmoto, 1985; Hedenquist et al., 2000). همچنین در طی جوشش، با ورود لیگاند سولفید به فاز بخار، کمپلکس‌های بی‌سولفید حاوی طلا ناپایدار شده و به ته‌نشست طلا منجر می‌شود (Buchanan, 1981; Henley et al., 1984; Brown, 1986; Cooke and Simmons, 2000). فرایند جوشش همچنین از طریق سردشدن و تغلیظ کاتیون‌های محلول از قیل سیلیس، سبب فوق‌اشباع شدن کوارتز و در نتیجه تشکیل کلونیدهای سیلیس می‌شود (Hedenquist et al., 2000; Taksavas, 2021). این کلونیدها به صورت ژل ته‌نشین شده و به کلسدون و کوارتز با بافت گل‌کلمی تبلور مجدد می‌یابند (Lindgren, 1933; Hedenquist et al., 2000). شاید به همین دلیل است که در

جوشش به کانه‌زایی منجر شده‌اند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه بوعلی سینا، همچنین از شرکت سرمایه‌گذاری توسعه صنایع و معادن کوثر و شرکت پارس اولنگ برای ارائه گزارش اکتشافی و کمک و راهنمایی برای نمونه‌برداری از مغزه‌های حفاری کمال تشکر و قدردانی را دارند. از سردبیر و داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی نیز به خاطر راهنمایی‌های علمی قدردانی می‌کنند.

مشاهده می‌شوند. رگه اصلی کانه‌زایی با دگرسانی‌های آرژیلیک متوسط و پروپلیتیک در برگرفته شده است. میزان گوگرد و در نتیجه کانی‌های فلزهای پایه مثل پیریت و کالکوپیریت پایین است. مشاهده ویژگی‌هایی از قبیل مجموعه کانی‌های دگرسانی، کانی‌های باطله، شواهد بافتی- ساختی، دما و شوری میان‌بارهای سیال، پایین بودن محتوای گوگرد و فلزهای پایه، کهیاز را به عنوان سامانه سولفیداسیون پایین طبقه‌بندی می‌کند. بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که طلا دارای بیشترین همبستگی با نقره است و کمترین همبستگی را با گوگرد و فلزهای پایه دارد. بررسی میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که سیالات مرتبط با کانه‌زایی دارای دمای متوسط تا بالا (۱۶۹ تا ۲۷۸ درجه سانتی‌گراد) و شوری پایین تا متوسط (۲/۷۳ تا ۱۰/۲۹ درصد وزنی معادل نمک طعام) بودند که در نتیجه فرایندهای اختلاط و

1. early and main ore stage
2. Opacity
3. open-space filling
4. Quartz pseudomorph after calcite
5. Comb
6. Crustiform
7. Colloform
8. Bladed
9. Chalcedony
10. Platy
11. pseudomorphic replacement
12. Intergrowth
13. banded vein
14. boiling

References

- Alavi, M., 1980. Tectonostratigraphic evolution of the Zagrosides of Iran. *Geology*, 8(3): 144–149. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1980\)8<144:TEOTZO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1980)8<144:TEOTZO>2.0.CO;2)
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations. *Tectonophysics*, 229(3–4): 211–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2)
- Allen, M., Jackson, J. and Walker, R., 2004. Late Cenozoic reorganization of the Arabia–Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23(2): TC2008. <http://dx.doi.org/10.1029/2003TC001530>
- Allen, M.B. and Armstrong, H.A., 2008. Arabia–Eurasia collision and the forcing of mid-Cenozoic global cooling. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 265(1–2): 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.04.021>
- Ayati, F., Yavuz, F., Asadi, H., Richards, J.P. and Jourdan, F., 2013. Petrology and geochemistry of calc-alkaline volcanic and subvolcanic rocks, Dalli porphyry copper-gold deposit, Markazi Province, Iran. *International Geology Review*, 55(2):158–184. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.689640>
- Azizi, H. and Moinevaziri, H., 2009. Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran. *Journal of Geodynamics*, 47(4): 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2008.12.002>
- Barati, B. and Aghazadeh, M., 2018. Geological map of Kahyaz, scale 1:1000, Kowsar Industries and Mines Development Investment Company.
- Berberian, F. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210–265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Brown, K.L., 1986. Gold deposition from geothermal discharges in New Zealand. *Economic Geology*, 81(4): 979–983. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.4.979>
- Browne, P.R.L., 1978. Hydrothermal alteration in active geothermal fields. *Annual Reviews Earth Planetary Sciences*, 6: 229–250. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.06.050178.001305>
- Buchanan, L.J., 1981. Precious metal deposits associated with volcanic environments in the southwest. *Arizona Geological Society Digest*, 14, pp. 237–262. Retrieved July 28, 2026 from <https://eurekamag.com/research/019/767/019767786.php>
- Chauvet, A., Bailly, L., André, A.S., Monié, P., Cassard, D., Tajada, F.L. and Tuduri, J., 2006. Internal vein texture and vein evolution of the epithermal Shila-Paula district, southern Peru. *Mineralium Deposita*, 41(4): 387–410. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0068-4>
- Cooke, D.R. and Simmons, S.F., 2000. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Reviews in Economic Geology*, V. 13, Society of Economic Geologists pp. 221–244. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.06>
- Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran—hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita*, 43(4): 383–404. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0167-x>
- Daliran, F., Paar, W.H., Neubauer, F. and Rashidi, B., 2005. New discovery of epithermal gold at Chahnali prospect, Bazman volcano, SE-Iran. In: J. Mao (Editor), *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting, Beijing, China, 18–21 August 2005, Vol. 2*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 917–919.
- Dargahi, S., Arvin, M., Pan, Y. and Babaei, A., 2010. Petrogenesis of post-collisional A-type granitoids from the Urumieh–Dokhtar magmatic assemblage, Southwestern Kerman, Iran: constraints on the Arabian–Eurasian continental collision. *Lithos*, 115(1–4): 190–204. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.12.002>
- Dong, G., Morrison, G. and Jaireth, S., 1995. Quartz textures in epithermal veins, Queensland—classification, origin, and implication. *Economic Geology*, 90(6): 1841–1856. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.6.1841>
- Drummond, S.E. and Ohmoto, H., 1985. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology*, 80(1): 126–147. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.1.126>
- du Bray, E.A., 2017. Geochemical characteristics of igneous rocks associated with epithermal mineral deposits—a review. *Ore Geology Reviews*, 80: 767–783.

- <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.023>
- Förster, H., 1978. Mesozoic-Cenozoic metallogenesis in Iran. *Journal of the Geological Society, London*, 135(4): 443–455.
<https://doi.org/10.1144/gsjgs.135.4.0443>
- Ghasemi, A. and Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6): 683–693. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.01.003>
- Giggenbach, W.F. and Stewart, M.K., 1982. Processes controlling the iso topic composition of steam and water discharges from steam vents and steam-heated pools in geothermal areas. *Geothermics*, 11 (2): 71–80. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(82\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0375-6505(82)90009-8)
- 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>
- Hassanzadeh, J., 1993. Metallogenic and tectonomagmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of central Iran (Shahr e Babak area, Kerman Province). Unpublished Ph.D. dissertation, University of California, Los Angeles, USA, 204 pp.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., Jr. and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Gold in 2000, Reviews in Economic Geology*, V. 13. Society of Economic Geologists, Littleton, CO, USA, pp. 245–277.
<https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>
- 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>
- Heidari, S.M., Daliran, F., Paquette, J.L. and Gasquet, D., 2015. Geology, timing, and genesis of the high sulfidation Au (–Cu) deposit of Touzlar, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 65(part 2): 460–486.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.013>
- Henley, R.W., Truesdell, A.H., Barton, P.B. and Whitney, J.A., 1984. Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems. *Society of Economic Geologists*, V. 1. <https://doi.org/10.5382/Rev.01>
- Jahangiri, A., 2007. Post-collisional Miocene adakitic volcanism in NW Iran: Geochemical and geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3–4): 433–447.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.11.008>
- John, D.A., Hofstra, A.H. and Theodore, T.G., 2003. Part 1. Regional studies and epithermal deposits. *Economic Geology*, 98(2): 225–234.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.2.225>
- John, D.A., Vikre, P.G., du Bray, E.A., Blakely, R.J., Fey, D.L., Rockwell, B.W., Mauk, J.L., Anderson, E.D. and Graybeal, F.T., 2018. Descriptive models for epithermal gold-silver deposits. U.S. Geological Survey, Reston, Scientific Investigations, Report 2010–5070–Q, 247 pp.
<https://doi.org/10.3133/sir20105070Q>
- Karimpour, M.H., Rezaei, M., Zarasvandi, A. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2021. Saveh-Nain-Jiroft Magmatic Belt replaces Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt: Investigation of genetic relationship between porphyry copper deposits and adakitic and non-adakitic granitoids. *Journal of Economic Geology*, 13(3): 465–506. (in Persian with English abstract)
<https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i3.1034>
- Keith, T.E. and Muffler, L.J.P., 1978. Minerals produced during cooling and hydrothermal alteration of ash flow tuff from Yellowstone drill hole Y-5. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 3(3–4): 373–402.
[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(78\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0377-0273(78)90044-6)
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Chang, Z. and Zaw, K., 2015. Constraints on the ore fluids in the Chah Zard breccia-hosted epithermal Au–Ag deposit, Iran: Fluid inclusions and stable isotope studies. *Ore Geology Reviews*, 65(part 2): 512–521.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.06.003>
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Zaw, K., Meffre, S. and Emami, M.H., 2012. Geological setting and timing of the Chah Zard breccia-hosted epithermal gold–silver deposit in the Tethyan belt of Iran. *Mineralium Deposita*, 47(4): 425–440.
<https://doi.org/10.1007/s00126-011-0382-3>
- Lattanzi, P., 1991. Applications of fluid inclusions in the study and exploration of mineral deposits. *European Journal of Mineralogy*, 3(4): 689–702.
<https://doi.org/10.1127/ejm/3/4/0689>
- Lindgren, W., 1933. *Mineral deposits*. McGraw-Hill, New York, USA, 930 pp.
- Maanijou, M., Mostaghimi, M., Riseh, M.A., Lentz, D.R. and Sepahi Gerow, A.A., 2022.

- Petrology and geochemistry of adakitic intrusions and dykes at Sarcheshmeh porphyry Cu-Mo±Au deposit, Iran: Insights into their source. *Resource Geology*, 72(1): e12297. <https://doi.org/10.1111/rge.12297>
- McQuarrie, N., Stock, J.M., Verdel, C. and Wernicke, B.P., 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. *Geophysical Research Letters*, 30(20): 2036. <https://doi.org/10.1029/2003GL017992>
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, 56(3): 263–287. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.853919>
- 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, Mexico. *Ore Geology Reviews*, 89: 143–170. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.024>
- Naden, J., Kilias, S.P. and Darbyshire, D.F., 2005. Active geothermal systems with entrained seawater as modern analogs for transitional volcanic-hosted massive sulfide and continental magmato-hydrothermal mineralization: The example of Milos Island, Greece. *Geology*, 33(7): 541–544. <https://doi.org/10.1130/G21307.1>
- Omrani, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. and Jolivet, L., 2008. Arc magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: a new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106(3–4): 380–398. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.09.008>
- Phillips, G.N., 2022. *Formation of Gold Deposits*. Springer, Singapore, 291 pp. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-3081-1>
- Richards, J.P., Razavi, A.M., Spell, T.L., Locock, A., Sholeh, A. and Aghazadeh, M., 2018. Magmatic evolution and porphyry–epithermal mineralization in the Taftan volcanic complex, southeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 95: 258–279. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.018>
- Richards, J.P., Wilkinson, D. and Ullrich, T., 2006. Geology of the Sari Gunay epithermal gold deposit, northwest Iran. *Economic Geology*, 101(8): 1455–1496. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1455>
- 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>
- 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>
- Shafiei, B., Haschke, M. and Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita*, 44(3): 265–283. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0216-0>
- Shahabpour, J., 2007. Island-arc affinity of the Central Iranian Volcanic Belt. *Journal of Asian Earth Science*, 30(5–6): 652–665. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.02.004>
- Shamanian, 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>
- Sholeh, A., Rastad, E., Huston, D., Gemmell, J.B. and Taylor, R.D., 2016. The Chahnalay low-sulfidation epithermal gold deposit, western Makran volcanic arc, Southeast Iran. *Economic Geology*, 111(3): 619–639. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.3.619>
- Sillitoe, R.H., 1977. Metallic mineralization affiliated to subaerial volcanism: A review, *Geological Society, London, Special Publications*, 7: 99–116. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1977.007.01.13>
- Sillitoe, R.H. and Hedenquist, J.W., 2005. Linkages between volcanotectonic 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*, V. 10. Society of Economic Geologists Special Publication, 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 Christenson, B.W., 1994. Origins 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, J.R. Goldfarb and J.P. Richards, (Editors), *Economic Geology*, 100th Anniversary, Society of Economic Geologists, pp. 485–522. <https://doi.org/10.5382/AV100.16>
- Stern, R.J., Moghadam, H.S., Pirouz, M. and Mooney, W., 2021. The geodynamic evolution of Iran. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49(1): 9–36. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071620-052109>
- Taksavas, T., 2021. Fluid-Fluid Interaction in Shallow Hydrothermal Systems: Implications to Silica Vein Textures in Epithermal Deposits. Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, 212 pp.
- Thiersch, P.C., Williams-Jones, A.E. and Clark, J.R., 1997. Epithermal mineralization and ore controls of the Shasta Au-Ag deposit, Toadogone district, British Columbia, Canada. *Mineralium Deposita*, 32(1): 44–57. <https://doi.org/10.1007/s001260050071>
- White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1995. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG Discovery*, (23): 1–13. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.1995-23.fea>
- White, N.C., Leake, M.J., McCaughey, S.N. and Parris, B.W., 1995. Epithermal gold deposits of the southwest Pacific. *Journal of geochemical exploration*, 54(2): 87–136. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(95\)00027-6](https://doi.org/10.1016/0375-6742(95)00027-6)
- 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)
- Yasami, N., Motlagh, S.H.M. and Ghaderi, M., 2025. Stable isotope, fluid inclusion, and petrological-mineralogical features of epithermal deposits in the structural zones of Iran: A review. *Ore Geology Reviews*, 186: 106851. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106851>