



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2025.1147



Low-sulfidation epithermal Au mineralization in the Tikmehdash 2 deposit (southeast of Bostan Abad): Constraints on geology, mineralization, geochemistry, and fluid inclusions

Hamid Hashempour¹ , Hossein Kouhestani^{2*} , Mir Ali Asghar Mokhtari³ , Ghafour Alavi⁴ ¹ M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran³ Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran⁴ Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 14 March 2025

Revised: 05 June 2025

Accepted: 09 June 2025

Keywords

Gold mineralization

Epithermal

low-sulfidation

Tikmehdash

Miyaneh-Bostan Abad subzone

ABSTRACT

Tikmehdash 2 gold (Au) deposit is part of the Miyaneh-Bostan Abad metallogenic subzone. Au mineralization occurs in Mn- and Au-bearing quartz veins hosted by Eocene and Miocene volcanic-sedimentary sequences. The ore veins trend northeast-southwest have NE-SW trends and dip approximately 65–80° northwestward. They range from 30 to 500 meters in length, with thicknesses between 0.1 and 3 meters. Au grades vary from less than 1 g/t up to 88 g/t. Pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite (Fe-rich), native gold, arsenopyrite, tennantite-tetrahedrite, psilomelane, and primary pyrolusite are ore assemblages; quartz, calcite, and barite are gangue minerals. Supergene minerals include goethite, malachite, secondary pyrolusite, and braunite. The ores display various textures, such as vein-veinlets, brecciated, comb, cockade, plumose, disseminated, crustiform, colloform, bladed, and vug infills. The mineralization at Tikmehdash 2 can be divided into six stages, with gold occurring predominantly during the second stage. Hydrothermal alterations include silicification, carbonate, intermediate argillic, and propylitic alteration. Geochemical investigations of ore samples show weak positive correlation between base metals and Au, as well as weak to moderate positive correlation between Au and As, Sb, and Ag. Fluid inclusion microthermometry indicates that ore-forming fluids belong to the high- to moderate-temperature (224–292 °C), and low- to moderate-salinity (0.7–13.4 wt.% NaCl equiv.) H₂O–NaCl system. These data suggest that boiling and mixing processes played a key role in the evolution of the ore-forming fluids. The characteristics of the Au mineralization align with those of low-sulfidation epithermal deposits in the Tikmehdash 2 deposit.

*Corresponding author

Hossein Kouhestani

✉ kouhestani@znu.ac.ir

How to cite this article

Hashempour, H., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A. and Alavi, Gh., 2025. Low-sulfidation epithermal Au mineralization in the Tikmehdash 2 deposit (southeast of Bostan Abad): Constraints on geology, mineralization, geochemistry, and fluid inclusions. *Journal of Economic Geology*, 17(2): 147–189. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1147>



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

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Tikmehdash 2 Au deposit is located in the Western Alborz-Azerbaijan zone (Nabavi, 1976), forming part of the Miyaneh-Bostan Abad metallogenic subzone. This subzone is a prominent regional metallogenic area in northwest Iran, hosting numerous deposits of metallic (Cu, Mo, Pb-Zn, Au, Mn), and non-metallic (pumice and perlite) deposits and occurrences (see Nabatian et al., 2017; Alizadeh et al., 2021; Sohbatloo, 2021; Hassani Soughi et al., 2021; Jafari et al., 2002; Sohbatloo et al., 2023; Hassani Soughi et al., 2023; Barati et al., 2023; Jahangiryan et al., 2023). Located approximately 20 km southwest of Bostan Abad, the Tikmehdash 2 Au deposit, is a relatively recent discovery in this district. Despite the presence of ancient mining activities such as filled trenches and collapsed tunnels on Au-bearing veins, and ongoing exploration of Fe skarn mineralization and Au-bearing veins in the area, the genesis of Tikmehdash 2 Au deposit remains poorly understood. This study investigated the geological, mineralization, alteration, geochemical, and fluid inclusion characteristics of the Tikmehdash 2 Au deposit to constrain its ore genesis and mineralization style. The results are intended to aid regional exploration programs within the Miyaneh-Bostan Abad metallogenic subzone and elsewhere in northwest Iran.

Materials and methods

This research combines fieldwork and laboratory analyses. During investigations, a geological map, at a 1:5000 scale of the Tikmehdash 2 area was prepared. Fifty samples were collected from various ore veins, host rocks, and intrusive bodies. Among these, eighteen thin and twenty-five polished-thin sections were prepared and examined under transmitted and reflected polarized light microscopes at the mineralogy laboratory of the University of Zanjan, Zanjan, Iran. Additionally, 105 samples from ore veins were analyzed for Au and other metal contents using Fire Assay and ICP-MS techniques at Zarazma and Novin Shimyar Analytical Laboratories in Tehran. Fluid inclusion studies were conducted on four doubly polished thick sections (~150 µm) containing quartz crystals from the second, and

fourth ore stages. Microthermometric measurements were performed using a Linkam THMS600 heating–freezing stage attached to an Olympus BX60 microscope in the fluid inclusion laboratory of Payam-e Noor University, Tabriz, Iran.

Results and Discussion

The geological units in the Tikmehdash 2 area belong to the Eocene and the Miocene volcano-sedimentary strata that were intruded by early Miocene (Kouhestani, 2025) gabbro-gabbro diorite, and quartz diorite intrusions. The mineralization at the Tikmehdash 2 Au deposit is predominantly hosted in NE–SW to NW–SE trending Mn- and Au-bearing quartz veins, which dip steeply (65–80°) to the northwest. These veins extend from 30 to 500 meters in length, with thicknesses ranging from 0.1 to 3 meters, and Au grades ranging from <1 to 88 g/t. Hydrothermal alterations include silicification, carbonate, intermediate argillic, and propylitic alteration; among these, the first three are intimately associate with the ore veins, whereas propylitic alterations affect the surrounding host rocks. Mineral assemblages include pyrite, chalcopyrite, galena, Fe-rich sphalerite, native gold, arsenopyrite, tennantite-tetrahedrite, psilomelane, and primary pyrolusite. Gangue minerals are quartz, calcite, and barite. Goethite, malachite, secondary pyrolusite, and braunite are supergene minerals. The ores display a variety of textures, such as vein-veinlets, brecciated, comb, cockade, plumose, disseminated, crustiform, colloform, bladed, and vug infillings.

Ore formation can be divided into six stages. Stage 1 is signified by the silicification of host rocks containing minor disseminated pyrite. Stage 2 is considered by Au-bearing quartz veins-veinlets, and hydrothermal breccias with quartz-sulfide (pyrite, chalcopyrite, arsenopyrite) cements with minor barite. Stage 3 is marked by pyrite, galena, sphalerite, and tennantite-tetrahedrite-bearing calcite veins. Stage 4 is marked by veinlets or vug infill textures of manganese ores (pyrolusite and psilomelane) and quartz. Stage 5 is represented by quartz and calcite with vein-veinlets and vug infill textures. Stage 6 corresponds to supergene processes, forming goethite, malachite, secondary pyrolusite, and braunite with vug infill, replacement, and residual textures. Geochemical investigations of ore samples reveal weak positive correlation between base metals (Pb, Zn, and Cu) and Au, as well as weak to moderate

positive correlations between Au and As, Sb, and Ag. Notably, silver correlates moderately with lead, while cadmium and zinc show positive relationships, and gold and manganese exhibit weak correlations. Fluid inclusion microthermometry suggests ore-forming fluids at Tikmehdash 2 Au deposit belong to high- to moderate-temperature (224–292 °C), and low- to moderate-salinity (0.7–13.4 wt.% NaCl equiv.) H₂O–NaCl system. Fluid inclusion data shows that fluid boiling and mixing were key factors in the evolution of the ore-forming fluids at Tikmehdash 2 Au deposit. These data specify that estimated trapping pressure of the fluids varies from

45 to 71 bars, which corresponds to entrapment depths of 460 to 730 m beneath the paleowater table. Characteristics of the Tikmehdash 2 Au deposit are similar to the low-sulfidation type of epithermal deposits. The close spatial association between late Miocene dacite-rhyodacite domes, and epithermal mineralization in the Miyaneh-Bostan Abad metallogenic subzone suggests the role of magmatic-hydrothermal activities during late Miocene magmatism in providing metals and ore-forming hydrothermal fluids for this type of mineralization in NW Iran, which should be considered in exploration programs.



کانه‌زایی اپی‌ترمال طلای نوع سولفیداسیون پایین در کانسار تیکمه‌داش ۲ (جنوب شرقی بستان آباد): شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال

حمید هاشم‌پور^۱، حسین کوهستانی^{۲*}، میر علی اصغر مختاری^۳، غفور علوی^۴

^۱ 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

^۴ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

چکیده

کانسار طلای تیکمه‌داش ۲ بخشی از زیرپهنه فلززایی میانه-بستان آباد است. کانه‌زایی طلا به صورت رگه‌های سیلیسی منگنز و طلادار درون توالی آتشفشانی-رسوبی ائوسن و میوسن رخ داده است. رگه‌های کانه‌دار دارای امتداد شمال شرقی-جنوب غربی با شیب ۶۵ تا ۸۰ درجه به سمت شمال غرب هستند. رگه‌ها دارای ۳۰ تا ۵۰۰ متر درازا و ۱/۰ تا ۵ متر ضخامت هستند. عیار طلا بین کمتر از ۱ گرم در تن تا ۸۸ گرم در تن متغیر است. پیریت، کالکوپریت، گالن، اسفالریت (غنی از آهن)، طلای آزاد، آرسنوپریت، تنانتیت-تراهدریت، پیرولوسیت اولیه و پسیلوملان، مواد معدنی و کوارتز، کلسیت و باریت کانی‌های باطله هستند. گوتیت، مالاکیت، پیرولوسیت ثانویه و بروانیت در نتیجه فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. بافت کانسنگ شامل رگه-رگچه‌ای، برشی، شانه‌ای، کاکلی، پرماند، دانه‌پراکنده، قشرگون، گل کلمی، تیغه‌ای و پُرکننده فضای خالی است. شش مرحله کانی‌سازی در تیکمه‌داش ۲ قابل تفکیک است که کانه‌زایی طلا در مرحله دوم رخ داده است. دگرسانی‌های گرمابی شامل سیلیسی، کربناتی، آرژلیک حدودا و پروپیلیتیک هستند. بررسی‌های زمین‌شیمی بیانگر همبستگی مثبت ضعیف فلزهای پایه با طلا و همبستگی مثبت ضعیف تا متوسط طلا با آرسنیک، آنتیموان و نقره است. داده‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد، سیالات مسؤل کانه‌زایی یک سامانه $H_2O-NaCl$ با دمای بالا تا متوسط (۲۲۴ تا ۲۹۲ درجه سانتی‌گراد) و شوری متوسط تا پایین (۰/۷ تا ۱۳/۴ درصد وزنی معادل نمک طعام) هستند. بر اساس این داده‌ها، روند تکامل سیال کانه‌ساز با فرایندهای اختلاط و جوشش سیالات همخوانی دارد. ویژگی‌های کانه‌زایی طلا در کانسار تیکمه‌داش ۲ با کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون پایین قابل مقایسه است.

واژه‌های کلیدی

کانه‌زایی طلا
اپی‌ترمال
سولفیداسیون پایین
تیکمه‌داش
زیرپهنه میانه-بستان آباد

نویسنده مسؤل

حسین کوهستانی

kouhestani@znu.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

هاشم‌پور، حمید؛ کوهستانی، حسین؛ مختاری، میر علی اصغر و علوی، غفور، ۱۴۰۴. کانه‌زایی اپی‌ترمال طلای نوع سولفیداسیون پایین در کانسار تیکمه‌داش ۲ (جنوب شرقی بستان آباد): شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۷(۲): ۱۴۷-۱۸۹.

<https://doi.org/10.22067/econg.2025.1147>

مقدمه

کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ در پهنه البرز غربی- آذربایجان واقع شده (Nabavi, 1976) و بخشی از زیرپهنه فلززایی میانه- بستان‌آباد است (Maghsoudi et al., 2005). از نظر فلززایی، این زیرپهنه دارای کانه‌زایی‌های مس، مولیبدن، سرب- روی، طلا، منگنز و ذخایر غیرفلزی مانند پوکه معدنی و پرلیت است. گسترش وسیع آثار معدن‌کاری مس، طلا، مولیبدن و سرب و روی در ارتباط با رگه‌های سیلیسی موجود در توده‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی (Nabati et al., 2017; Jafari et al., 2002; Alizadeh et al., 2021; Alizadeh et al., 2021; Sohbatloo, 2021; Sohbatloo et al., 2023; Hassani Soughi et al., 2023; Barati et al., 2023; Khaleghi et al., 2013; Jahangiriyar et al., 2023) نشان‌دهنده گسترش و اهمیت معدن‌کاری عناصر مزبور در این زیرپهنه است. کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ در ۲۰ کیلومتری جنوب‌شرق بستان‌آباد واقع شده و بخشی از نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ بستان‌آباد (Behrouzi et al., 1998) است. این کانسار یکی از کانه‌زایی‌های موجود در زیرپهنه میانه- بستان‌آباد است که آثار فعالیت‌های اکتشافی و استخراجی قدیمی به صورت ترانشه‌های پُر شده و تونل‌های ریزش کرده در آن دیده می‌شود. با وجود فعالیت‌های استخراجی قدیمی بر روی رگه‌های طلادار و بررسی‌های اکتشافی جدید بر روی کانه‌زایی آهن اسکارنی و رگه‌های طلادار موجود در منطقه (Mokhtari, 2022)، تاکنون بررسی علمی دقیقی بر روی کانه‌زایی طلای آن انجام نشده است. در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، دگرسانی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ مورد بررسی قرار گرفته و نوع کانه‌زایی و زایش آن تعیین شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان الگوی اکتشافی در زیرپهنه فلززایی میانه- بستان‌آباد و دیگر بخش‌های پهنه البرز غربی- آذربایجان مورد استفاده قرار گیرد.

روش مطالعه

این پژوهش دربردارنده دو بخش بررسی صحرایی و آزمایشگاهی است. در بخش بررسی صحرایی، برای تهیه نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰ منطقه و بررسی چگونگی ارتباط رگه‌های کانه‌دار با سنگ‌های میزبان، تعداد ۵۰ نمونه از واحدهای سنگی و رگه‌های کانه‌دار برای بررسی‌های آزمایشگاهی برداشت شد. از بین این نمونه‌ها، تعداد ۱۸ عدد مقطع نازک و ۲۵ مقطع نازک- صیقلی برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت، تهیه و مطالعه شد. برای بررسی محتوای عیار عناصر کانساری، ابتدا ۴۹ نمونه از رگه‌های کانه‌دار به صورت لب‌پری برداشت و برای اندازه‌گیری مقادیر طلا به روش آماده‌سازی آذرمحک یا Fire Assay در شرکت‌های زراژما (۳۲ نمونه) و نوین شیمیار (۱۷ نمونه) در تهران تجزیه شد. برای بررسی ضرایب همبستگی عناصر، ۵۶ نمونه از رگه‌های کانه‌دار به صورت شیاربرداری برداشت و برای اندازه‌گیری مقادیر طلا به روش Fire Assay و سایر عناصر به روش ICP-OES در شرکت زراژما در تهران تجزیه شد. برای این بررسی‌ها، ابتدا نمونه‌ها توسط خردکننده فولادی تا ابعاد حدود ۵ مش (۴ میلی‌متر) خردایش شده و سپس توسط آسیاب آگات به مدت ۲ دقیقه تا ابعاد حدود ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر و میزان ۵۰ گرم از پودر نمونه‌ها برای تجزیه انتخاب شد. برای تعیین میزان عناصر کیمیا و کیمیا خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه به روش چند اسید و با استفاده از ماکروویو هضم شد. میزان دقت برای عناصر کیمیا و کیمیا خاکی بین ۰/۱ تا ۱ گرم در تن بوده است. برای تعیین میزان فلزهای پایه، به صورت جداگانه حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه در تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه سانتی‌گراد) حل شد. در روش آماده‌سازی Fire Assay برای اندازه‌گیری میزان طلا، به صورت جداگانه حدود ۳۰ گرم از هر نمونه تا دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شد تا طلا از سرباره جدا شده و جذب ملغمه سربی شود. در مرحله بعد، سرب حذف و طلا و نقره در ملغمه نقره‌ای جدا شدند. در پایان، ملغمه نقره‌ای با استفاده از

تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه سانتی گراد) محلول‌سازی شده و میزان طلا به روش ICP-MS قرائت شد. برای تعیین ویژگی‌های دما، فشار و شوری سیالات مسئول کانه‌زایی و دگرسانی، تعداد ۴ نمونه از رگه‌ها و برش‌های کانه‌دار انتخاب و از آنها مقاطع دوبر صیقل ضخیم (حدود ۱۵۰ میکرون) تهیه شد. بررسی‌های ریزدماسنجی با استفاده از دستگاه Linkam THMS600 متصل به میکروسکوپ الپوس BX60 و مجهز به کنترل‌کننده حرارتی TMS94 و سردکننده LNP با دامنه حرارتی ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی گراد در آزمایشگاه میان‌بارهای سیال دانشگاه پیام نور تبریز انجام شد. برای کالیبراسیون دستگاه در حالت گرمایش از پودر سفید نیترات سدیم با نقطه ذوب ۳۰۶/۸+ درجه سانتی گراد و در حالت سرمایش از مایع هگزان با نقطه انجماد ۹۰- درجه سانتی گراد استفاده شده است. خطای دستگاه در حالت گرمایش ± 1 درجه سانتی گراد و در حالت سرمایش ± 0.2 درجه سانتی گراد بوده است. میزان شوری به صورت معادل درصد وزنی نمک طعام (wt.% NaCl) و از طریق دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{m-ice}) با استفاده از فرمول ارائه شده توسط بودنار (Bodnar, 1993) و مقادیر چگالی با استفاده از معادله جانگ و فرانتز (Zhang and Frantz, 1987) در نرم‌افزار FLUIDS (Bakker, 2003) محاسبه شده است.

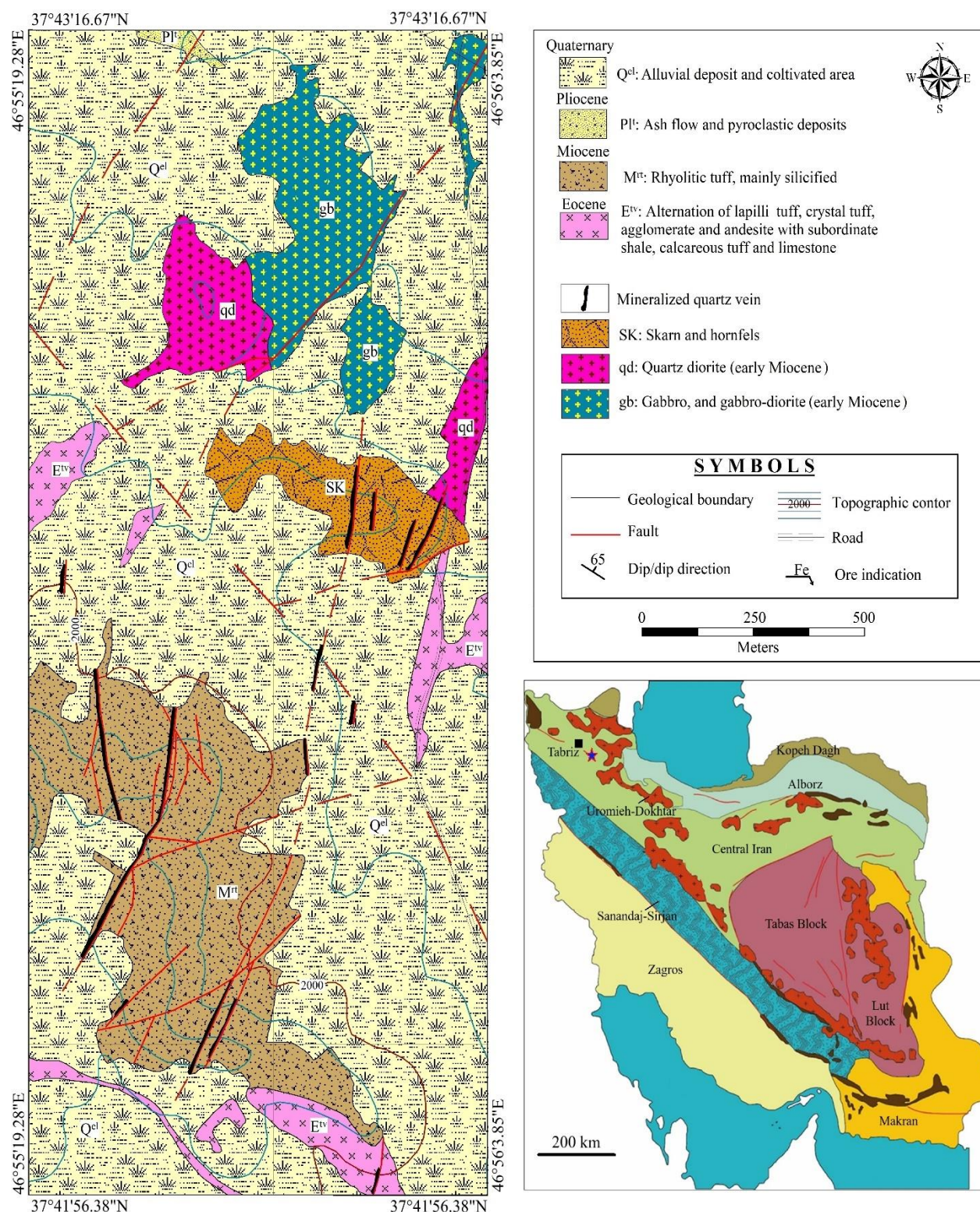
زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه تیکمه‌دش ۲

با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ترکمن‌چای-قره‌چمن (Asadian et al., 1993) و بستان‌آباد (Behrouzi et al., 1998) و بر اساس پیمایش‌های صحرایی در قالب تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ (شکل ۱)، واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در این منطقه به شرح زیر است:

واحد E^{IV} : این واحد شامل توالی لاپیلی توف، توف بلورین، آگلومرا و آندزیت همراه با مقادیر محدودی شیل، توف آهکی و سنگ آهک است (شکل ۲-۱). در مرکز منطقه، واحد E^{IV} در

تماس با توده‌های نفوذی متحمل دگرگونی مجاورتی (واحد Sk) شده است (شکل ۱). واحد Sk دربرگیرنده رخنمون‌های متعدد کانه‌زایی آهن است که عملیات اکتشافی-استخراجی بر روی آنها انجام شده است (شکل ۲-۲). نمونه برداشت شده از گدازه‌های آندزیتی واحد E^{IV} بیانگر وجود بافت‌های پورفیری و گلومروپورفیری همراه با درشت‌بلورهای پلاژیو کلاز و کانی‌های مافیک جانشین شده با کلسیت در این سنگ‌هاست (شکل ۳-۱). پلاژیو کلاز (با ابعاد تا ۷ میلی‌متر) درشت‌بلور اصلی سنگ است که به صورت بلورهای شکل‌دار با دگرسانی ضعیف به کانی‌های رسی دیده می‌شود. در برخی از بلورهای پلاژیو کلاز، منطقه‌بندی ضعیف دیده می‌شود. با توجه به زاویه نوری به نظر می‌رسد پلاژیو کلازها از نوع آندزین باشند. آمفیبول، دیگر درشت‌بلور (ابعاد تا ۱/۵ میلی‌متر) سنگ است که اغلب توسط کلسیت و گاه کانی‌های کدر جانشین شده‌اند. تجمع درشت‌بلورهای یادشده، به تشکیل بافت گلومروپورفیری در برخی نقاط منجر شده است. زمینه از بلورهای تیغه‌ای پلاژیو کلاز و کانی‌های کوچک با دگرسانی کامل به کلسیت تشکیل شده است. تمرکز نسبتاً بالایی از کانی‌های کدر بی‌شکل (تا ۵ درصد) در زمینه سنگ مشاهده می‌شود.

نمونه‌های برداشت شده از واحد Sk بیانگر ترکیب گارنت اسکارن و کالک‌سیلیکات هورنفلز برای این مجموعه است. گارنت اسکارن‌ها دارای بافت گرانوبلاستیک متشکل از کانی‌های گارنت، کلسیت، اپیدوت، کلریت، کانی‌های رسی و کانی‌های کدر هستند. کانی مهم و عمده این سنگ‌ها بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار گارنت (فراوانی حدود ۷۰ درصد و ابعاد تا ۱ میلی‌متر) است (شکل ۳-۲). بلورهای گارنت به دو صورت ایزوتروپ و انیزوتروپ (با منطقه‌بندی مشخص) مشاهده می‌شوند. برخی از گارنت‌های ایزوتروپ، دارای حاشیه باریک انیزوتروپ هستند. دگرسانی شدید به کلسیت همراه با کانی‌های رسی و مقداری کلریت در بیشتر بلورهای گارنت مشاهده می‌شود.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰ کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ (ابعاد رگه‌های کانه‌دار، بزرگ‌نمایی شده است)

Fig. 1. Geologic map, scale: 1:5000 of the Tikmehdash 2 Au deposit (The dimension of the ore veins was exaggerated)

واحد M^I : این واحد شامل رخنمون‌هایی نسبتاً مرتفع از واحدهای توفی اسیدی (ریولیتی) است که میزبان رگه‌های کوارتزی طلادار منطقه هستند (شکل ۲-C). لایه‌بندی نسبتاً مشخصی در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود که بیانگر ماهیت آذرآواری آنهاست. در نتیجه عملکرد سیالات گرمایی، بخش‌هایی از این سنگ‌ها کاملاً سیلیسی شده است. این واحد سنگی به صورت ناپیوسته بر روی توالی سنگی واحد E^{IV} قرار گرفته است. بررسی میکروسکوپی نمونه‌های برداشت‌شده از توف‌های اسیدی بیانگر ماهیت ریولیتی-ریوداسیتی آنهاست که متحمل دگرسانی سیلیسی شده‌اند (شکل ۳-E). در زمینه دانه‌ریز سیلیسی سنگ، علاوه بر کوارتزهای بی‌شکل ثانویه که کانی عمده سنگ هستند، تعداد کمی بلور آلکالی‌فلدسپار دگرسان‌شده به سریسیت و کانی‌های رسی نیز دیده می‌شود (شکل ۳-F). در برخی نقاط، آثار ماکل‌های نواری در برخی از بلورها قابل شناسایی است که به نظر می‌رسد بلورهای مزبور از نوع پلاژیوکلاز هستند (شکل ۳-E). بلورهای یادشده نیز به سریسیت دگرسان شده‌اند. ابعاد بلورهای زمینه کمتر از ۰/۳ میلی‌متر است. به مقدار محدود، زمینه کلریتی شده نیز مشاهده می‌شود. علاوه بر کوارتزهای ریز زمینه، بلورهای درشت‌تر کوارتز (در ابعاد تا ۱ میلی‌متر) به صورت تجمع‌های کوارتزی (شکل ۳-F) و گاه به صورت رگچه‌ای قابل مشاهده است. به مقدار محدود، کانی‌های کدر کوچکی در متن سنگ و حاشیه تجمع‌ها و رگچه‌های کوارتزی وجود دارد.

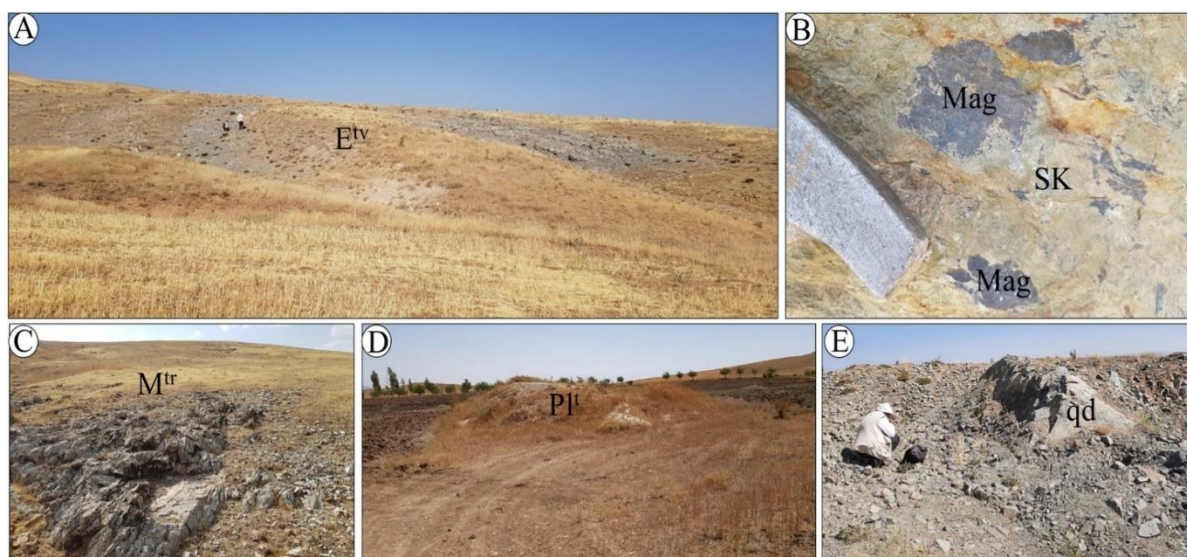
واحد PI : این واحد شامل خاکستر توف‌ها و واحدهای پیروکلاستیکی مربوط به فعالیت آتشفشانی سهند است که اغلب توسط زمین‌های کشاورزی پوشیده شده و رخنمون محدودی از آنها به صورت تپه‌های کم‌ارتفاع سفید رنگ قابل مشاهده است. گاه در محل چاه‌های آب و مناطق کنده‌شده برای چشمه‌های آب نیز آثاری از این واحد سنگی مشاهده می‌شود (شکل ۲-D). این واحدهای سنگی، به صورت پوششی مجموعه واحدهای سنگی قدیمی‌تر را پوشانده‌اند.

کلسیت دیگر کانی عمده سنگ است که به سه حالت: ۱- بلورهای حاصل از تجدید تبلور سنگ اولیه، ۲- بلورهای ریز کلسیت حاصل از تجزیه گارنت‌ها و ۳- به صورت رگه-رگچه‌های کلسیتی تأخیری در سنگ حضور دارد. در چند نقطه، بلورهای شکل‌دار اپیدوت (ابعاد تا ۲/۵ میلی‌متر) در نمونه‌ها قابل مشاهده است. کلریت و کانی‌های رسی محصول دگرگونی پس‌رونده گارنت‌ها هستند. کلریت‌ها به صورت رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی دیده می‌شوند. کانی‌های کدر به صورت دانه‌پراکنده حاصل از دگرسانی گارنت‌ها و یا به صورت رگه-رگچه‌ای در سنگ دیده می‌شوند.

کالک‌سیلیکات هورنفلس‌ها دارای بافت‌های گرانوبلاستیک و نماتوبلاستیک بوده و متشکل از کانی‌های گارنت، اپیدوت، اکینولیت، کلریت، کوارتز، کلسیت و کانی‌های کدر هستند. گارنت (فراوانی حدود ۱۵ درصد و ابعاد تا ۱/۵ میلی‌متر) به صورت بلورهای شکل‌دار انیزوتروپ حضور دارد (شکل ۳-C و D). اپیدوت (فراوانی حدود ۲۵ درصد و ابعاد تا ۰/۵ میلی‌متر) به صورت بلورهای شکل‌دار در متنی از کلسیت و به‌ندرت کوارتز قابل مشاهده است (شکل ۳-C). کلسیت (فراوانی حدود ۳۵ درصد) کانی عمده سنگ است که به صورت بلورهای درشت حاوی ماکل‌های نواری، زمینه دیگر کانی‌ها را تشکیل داده است. کوارتز (فراوانی حدود ۱۰ درصد) به صورت بلورهای بی‌شکل درشت حضور داشته و اغلب میزبان کانی‌های دیگر مانند گارنت و اپیدوت است. تجمع‌هایی از کلریت همراه با گارنت‌ها مشاهده می‌شود. فراوانی کلریت حدود ۱۰ درصد است. این کانی‌ها محصول دگرسانی گارنت‌های اولیه هستند. در برخی نقاط، بلورهای رشته‌ای و سوزنی با بافت شعاعی و فراوانی حدود ۱ درصد در متنی از کلسیت و کوارتز دیده می‌شود که به نظر می‌رسد از نوع اکینولیت هستند. کانی‌های کدر (فراوانی حدود ۵ درصد) به صورت بلورهای ورقه‌ای شکل‌دار و گاه سوزنی با ابعاد تا ۴ میلی‌متر در متن سنگ پراکنده هستند که به نظر می‌رسد اغلب از نوع هماتیت باشند.

معدن کاری برای استخراج سنگ لاشه بر روی آنها دیده می‌شود (شکل ۲-۲). (E^{iv})

توده‌های نفوذی: در بخش‌های شمالی منطقه، رخنمون‌هایی از توده‌های نفوذی با ترکیب حدواسط-بازیک قابل مشاهده است. رخنمون این توده‌ها به صورت تپه‌های کم‌ارتفاع بوده و آثار



شکل ۲. تصویرهای صحرایی از واحدهای سنگی موجود در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲. A: نمایی از تناوب لایه‌های توفی و گدازه‌ای (واحد E^{iv}) (دید به سمت شمال‌غرب)، B: نمایی نزدیک از واحد دگرگونی مجاورتی و اسکارنی حاوی عدسی‌های مگنتیتی (واحد SK)، C: نمایی از توالی لایه‌های نازک توف‌های اسیدی (واحد M^{tr}) (دید به سمت غرب)، D: نمایی از لایه‌های خاکستر توف (واحد Pl^t) (دید به سمت شمال‌غرب) و E: نمایی از توده نفوذی کوارتز دیوریتی (واحد qd) در بخش شمالی منطقه (دید به سمت شمال). علامت اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Mag: مگنتیت).

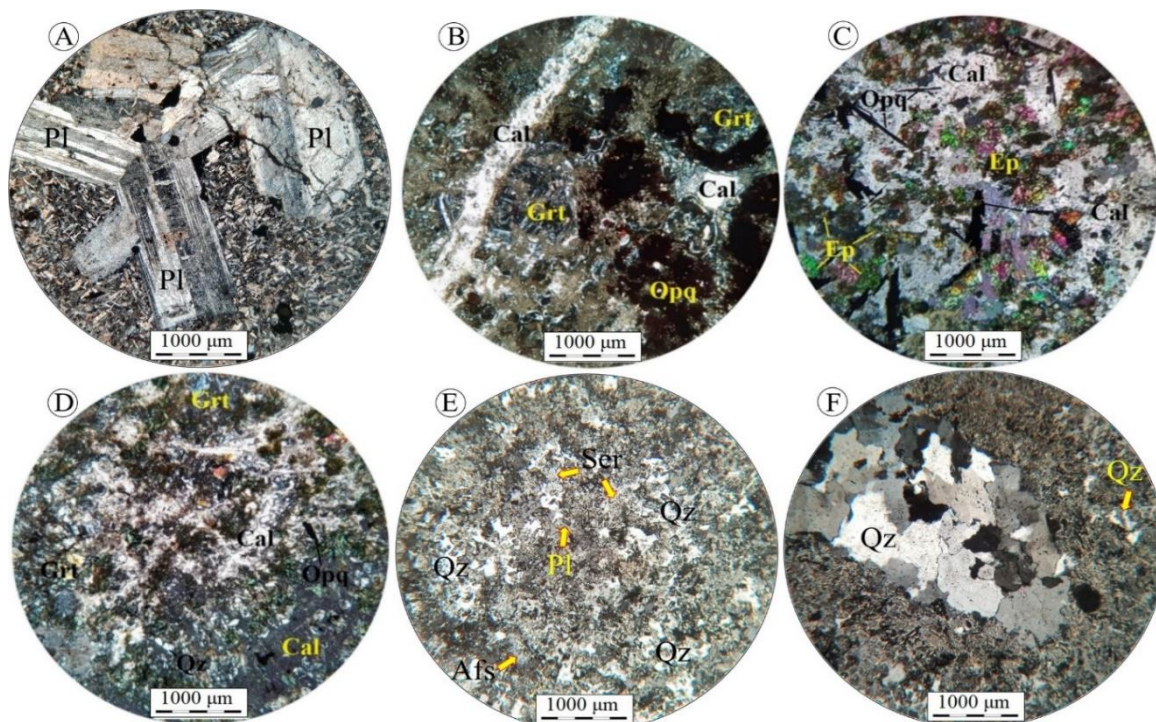
Fig. 2. Filed photographs of rock units in the Tikmehdash 2 Au deposit. A: A view of the alternation of the tuff, and lava layers (E^{iv} unit), looking northwest, B: A close view of contact metamorphism and skarn unit with magnetite lenses (SK unit), C: A view of thin-bedded acidic tuff strata (M^{tr} unit), looking to the west, D: A view of ash tuff layers (Pl^t unit), looking northwest, and E: A view of quartz diorite intrusion (qd unit) in the north part of the area, looking to the north. Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (Mag: magnetite).

نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ استان‌آباد (Behrouzi et al., 1998)، سن این توده‌ها الیگوسن در نظر گرفته شده است؛ اما بررسی‌های سن‌سنجی جدید انجام‌شده توسط کوهستانی (Kouhestani, 2025) سن آنها را میوسن زیرین تعیین کرده است. در بخش‌های جنوبی توده‌های نفوذی، امتداد رگه‌های کوارتزی طلادار در داخل توده‌های نفوذی مشاهده می‌شود که بیانگر تشکیل کانه‌زایی بعد از توده‌های نفوذی است.

بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی بیانگر تغییر ترکیب آنها از کوارتز دیوریت تا گابرو است؛ به نحوی که واحدهای گابرویی در سمت شمال و واحدهای کوارتز دیوریتی در سمت جنوب قرار گرفته‌اند. در محل تماس توده‌های کوارتز دیوریتی با توالی سنگی واحد E^{iv}، دگرگونی مجاورتی رخ داده و این سنگ‌ها به اسکارن و کالک‌سیلیکات هورنفلس (واحد SK) تبدیل شده و کانه‌زایی آهن در داخل آنها به صورت عدسی شکل تشکیل شده است. در

اساس این بررسی‌ها، کوارتز دیوریت‌ها دارای بافت‌های پورفیری و پورفیروئیدی بوده و متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، کوارتز و هورنبلند هستند.

نتایج بررسی‌های میکروسکوپی نمونه‌های برداشت‌شده از بخش‌های مختلف توده‌های نفوذی بیانگر ترکیب کوارتز، مونزوگابرو، پیروکسن کوارتز دیوریت، پیروکسن کوارتز، کوارتز مونزو دیوریت و کوارتز دیوریت است. بر



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از کانی‌شناسی و بافت واحدهای سنگی در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲. A: تجمع درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز و تشکیل بافت گلومروپورفیری در گدازه‌های آندزیتی، B: بلورهای گارنت انیزوتروپ دگرسان‌شده در گارنت اسکارن‌ها که توسط رگچه‌های کلسیتی تأخیری قطع شده‌اند، C: بلورهای اپیدوت همراه با کانی‌های کدر ورقه‌ای و سوزنی در متنی از کلسیت در کالک‌سیلیکات هورنفلس‌ها، D: بلورهای گارنت انیزوتروپ همراه با مقداری اپیدوت در متنی از کلسیت در کالک‌سیلیکات هورنفلس‌ها، E: بلورهای آلکالی فلدسپار سریسیتی‌شده همراه با تعداد کمی پلاژیوکلاز و کوارتزهای ثانویه در زمینه سنگ در توف‌های اسیدی و F: تجمع بلورهای کوارتز ثانویه به صورت عدسی‌شکل در متنی دانه‌ریز با دگرسانی سریسیتی و سیلیسی در توف‌های اسیدی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Afs: آلکالی فلدسپار، Cal: کلسیت، Ep: اپیدوت، Grt: گارنت، Opq: کانی کدر، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت).

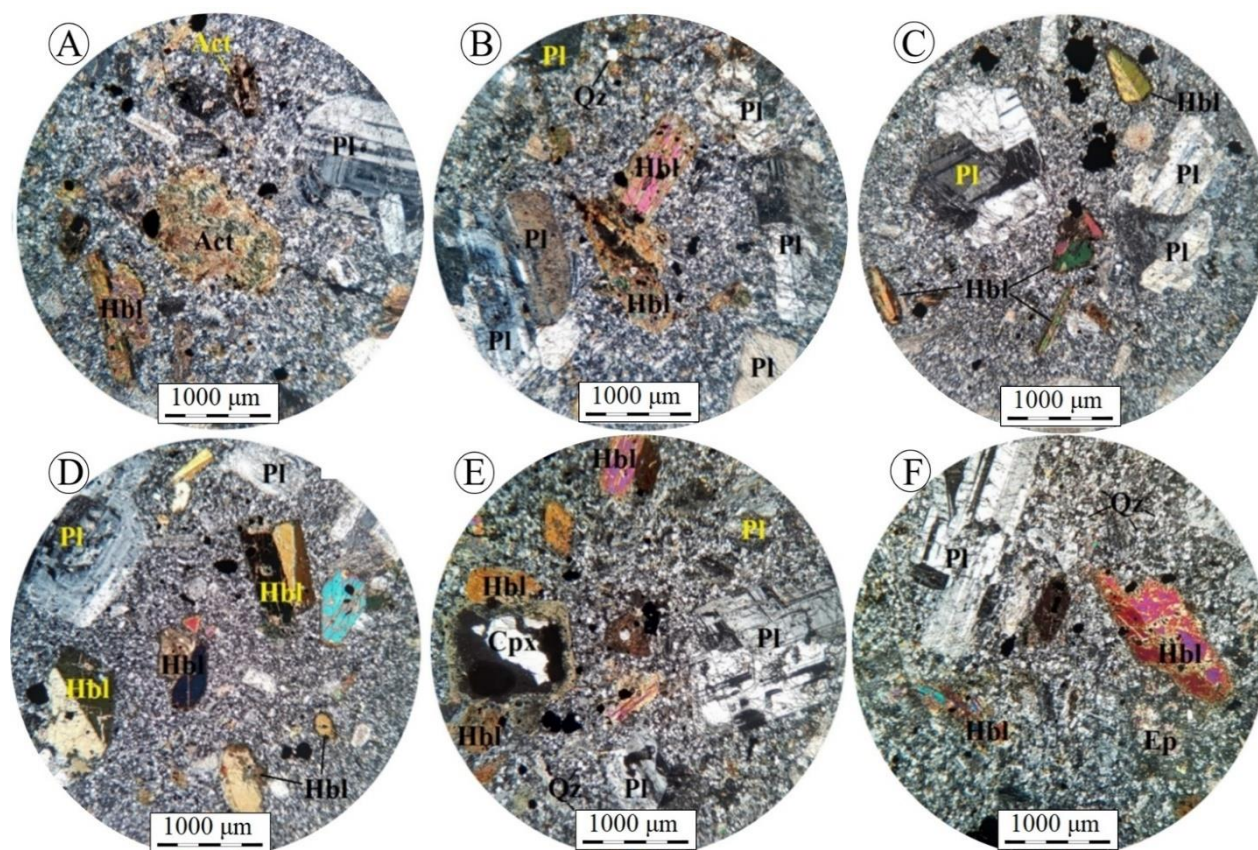
Fig. 3. Photomicrographs (transmitted cross-polarized light, XPL) of mineralogy and texture of the rock units in the Tikmehdash 2 Au deposit. A: Clustering of plagioclase phenocrysts in a fine-grained matrix and formation of glomeroporphyritic texture in andesitic lavas, B: Anisotropic altered garnet crystals in garnet skarns that are cut by late calcite veinlets, C: Epidote crystals with lamellar and acicular opaque minerals within a calcite matrix in calc-silicate hornfels, D: Anisotropic garnet crystals with some epidote in a calcite matrix in calc-silicate hornfels, E: Sericitized alkali feldspar crystals with small amounts of plagioclase and secondary quartzes in matrix in acidic tuffs, and F: Clustering of lenticular secondary quartz crystals in a sericitic and silicified fine-grained matrix in acidic tuffs. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Afs: alkali feldspar, Cal: calcite, Ep: epidote, Grt: garnet, Opq: opaque mineral, Pl: plagioclase, Qz: quartz, Ser: sericite).

دانه‌ریز سنگ متشکل از بلورهای ریز کوارتز و آلکالی فلدسپار همراه با مقداری هورنبلند و پلاژیو کلاز است. ابعاد بلورهای مزبور کمتر از ۰/۲ میلی‌متر است.

گاه مقادیر محدودی درشت‌بلور کلینوپیروکسن نیز در سنگ دیده می‌شود. در یکی از نقاط، بلور کلینوپیروکسن از حاشیه توسط هورنبلند احاطه شده است (شکل ۴-۴). کانی‌های کدر هم به صورت اولیه و پراکنده در متن سنگ (به ویژه در همراهی با هورنبلندها) و هم به صورت ثانویه از دگرسانی هورنبلندها حاصل شده‌اند.

پیروکسن کوارتز دیوریت‌ها دارای بافت گرانولار با کانی‌های اصلی پلاژیو کلاز، هورنبلند، کوارتز و کلینوپیروکسن هستند. پلاژیو کلازها به عنوان کانی عمده سنگ با فراوانی حدود ۵۵ درصد به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار مشاهده می‌شوند (شکل ۵-۴ و B). ابعاد بلورهای پلاژیو کلاز گاه تا ۴ میلی‌متر نیز می‌رسد. منطقه‌بندی در بیشتر بلورها وجود دارد. از بخش‌های مرکزی، برخی از بلورهای پلاژیو کلاز به کلسیت و گاه کلریت دگرسان شده‌اند. با توجه به زاویه نوری، پلاژیو کلازها از نوع آندزیت-لابرادوریت هستند. برخی از بلورهای پلاژیو کلاز دارای بخش‌های مرکزی هضم شده و خرد شده هستند. هورنبلند دیگر کانی عمده سنگ است که به طور کامل توسط مجموعه کلسیت، کلریت و کانی‌های کدر جانشین شده است (شکل ۵-۴ A و B). فراوانی هورنبلندها حدود ۳۰ درصد بوده و ابعاد آنها تا ۲ میلی‌متر می‌رسد. بلورهای کلینوپیروکسن سالم در همراهی با پیروکسن‌هایی با دگرسانی به کلریت و کانی‌های کدر با فراوانی مجموع حدود ۵ درصد در این سنگ مشاهده می‌شوند (شکل ۵-۴ B). ابعاد بلورهای مزبور تا ۱/۵ میلی‌متر می‌رسد. کوارتز به صورت بلورهای بی‌شکل با ابعاد کمتر از ۰/۵ میلی‌متر و فراوانی حدود ۵ درصد در بین دیگر کانی‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۵-۴ A و B). کانی‌های کدر اولیه همراه با کانی‌های کدر ثانویه حاصل از دگرسانی هورنبلندها و پیروکسن‌ها با فراوانی حدود ۵ درصد در متن سنگ پراکنده هستند.

پلاژیو کلاز درشت‌بلور عمده سنگ است که به صورت بلورهای شکل‌دار در ابعاد تا ۳ میلی‌متر حضور دارند (شکل ۴-۴ A تا D). منطقه‌بندی مشخصی در برخی بلورهای پلاژیو کلاز دیده می‌شود (شکل ۴-۴ C و D). برخی بلورها با درجه‌های محدودی به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند. گاه ادخال‌های کوچکی از هورنبلند داخل پلاژیو کلازها دیده می‌شود. با توجه به زاویه نوری، پلاژیو کلازها از نوع آندزین هستند. هورنبلندها دیگر درشت‌بلورهای سنگ هستند که به صورت بلورهای شکل‌دار دیده شده و گاه به اکتینولیت دگرسان شده‌اند (شکل ۴-۴ A تا D). ابعاد بلورهای هورنبلند به حدود ۱/۵ میلی‌متر نیز می‌رسد. ماکل نواری و دوتایی در برخی از بلورهای هورنبلند قابل مشاهده است (شکل ۴-۴ D). تعداد کمی درشت‌بلور بی‌شکل کوارتز در ابعاد کمتر از ۰/۵ میلی‌متر در این سنگ‌ها دیده می‌شود (شکل ۴-۴ B). درشت‌بلورهای یادشده در یک زمینه دانه‌ریز (ابعاد کمتر از ۰/۱ میلی‌متر) متشکل از بلورهای بی‌شکل کوارتز و پلاژیو کلازهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل همراه با مقدار کمی هورنبلند با دگرسانی به اکتینولیت، پراکنده هستند. کانی‌های کدر نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با فراوانی کمتر از ۱ درصد در متن سنگ پراکنده هستند. کوارتز مونوزدیوریت‌ها دارای بافت پورفیروئیدی متشکل از کانی‌های پلاژیو کلاز، هورنبلند، کوارتز و آلکالی فلدسپار هستند. پلاژیو کلاز کانی عمده سنگ بوده که به صورت بلورهای درشت شکل‌دار در ابعاد تا ۲/۵ میلی‌متر حضور دارند (شکل ۴-۴ E و F). برخی از بلورهای پلاژیو کلاز دارای منطقه‌بندی هستند (شکل ۴-۴ E). با توجه به زاویه نوری، پلاژیو کلازها از نوع آندزین هستند. در برخی از بلورها دگرسانی به اپیدوت و کلریت نیز دیده می‌شود. در زمینه دانه‌ریز سنگ نیز بلورهای کوچک پلاژیو کلاز مشاهده می‌شود. هورنبلند دیگر کانی اصلی سنگ است که به صورت بلورهای شکل‌دار در ابعاد تا ۲ میلی‌متر قابل مشاهده است (شکل ۴-۴ E و F). بلورهای هورنبلند در برخی نقاط به کلریت و اکتینولیت و گاه اپیدوت دگرسان شده‌اند. علاوه بر بلورهای درشت، در زمینه دانه‌ریز سنگ نیز بلورهای هورنبلند دیده می‌شوند. زمینه



شکل ۴. تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از کانی‌شناسی و بافت توده‌های نفوذی در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲. A تا D: درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند در زمینه دانه‌ریز متشکل از کوارتز و پلاژیوکلاز در کوارتز دیوریت‌ها. در تصویر A، بلورهای هورنبلند دگرسان‌شده به اکتینولیت و در تصویر D، بلورهای هورنبلند سالم با ماکل دوتایی قابل مشاهده است. E و F: درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند در زمینه دانه‌ریز متشکل از کوارتز و آلکالی فلدسپار در کوارتز مونزودیوریت‌ها. در تصویر E، بلور درشت کلینوپیروکسن در داخل هورنبلند و در تصویر F، دگرسانی هورنبلند به اپیدوت دیده می‌شود. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Act: اکتینولیت، Cpx: کلینوپیروکسن، Ep: اپیدوت، Hbl: هورنبلند، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز).

Fig. 4. Photomicrographs (transmitted crossed-polarized light, XPL) of mineralogy and texture of the intrusions in the Tikmehdash 2 Au deposit. A–D: Plagioclase and hornblende phenocrysts in a fine-grained matrix of quartz and plagioclase in quartz diorite. In A, hornblende crystals are altered to actinolite and, in D, fresh hornblende crystals with double twinning are also observed. E and F: Plagioclase and hornblende phenocrysts in a fine-grained matrix of quartz and alkali feldspar in quartz diorite. In E, coarse-grained clinopyroxene crystal within hornblende, and in F, alteration of hornblende to epidote is also observed. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Act: actinolite, Cpx: clinopyroxene, Ep: epidote, Hbl: hornblende, Pl: plagioclase, Qz: quartz).

حدود ۵۵ درصد است که به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در ابعاد تا ۲ میلی‌متر در سنگ حضور دارند (شکل ۵- C و D). آثار دگرسانی به سرسیت و کانی‌های رسی در برخی

پیروکسن کوارتز مونزودیوریت‌ها دارای بافت گرانولار با کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، هورنبلند، کلینوپیروکسن، کوارتز و آلکالی فلدسپار هستند. پلاژیوکلاز کانی عمده سنگ با فراوانی

اکتینولیت دگرسان شده‌اند. گاه ادخال‌هایی از پلاژیوکلاز داخل بلورهای درشت کلینوپیروکسن دیده می‌شود که به تشکیل بافت افیتیک منجر شده است (شکل ۵-۵). کوارتز به صورت بلورهای بی‌شکل با فراوانی حدود ۵ درصد و در ابعاد کمتر از ۰/۵ میلی‌متر در بین دیگر کانی‌ها حضور دارد (شکل ۵-۵ و F). آلکالی فلدسپارهای ریز نیز به صورت بلورهای بی‌شکل با فراوانی حدود ۵ درصد در بین دیگر کانی‌ها مشاهده می‌شوند. کانی‌های کدر اولیه و ثانویه (حاصل از دگرسانی کلینوپیروکسن‌ها) با فراوانی حدود ۳ درصد در متن سنگ پراکنده هستند. تعداد کمی بیوتیت ریزبلور و گاه دگرسان‌شده به کلریت در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود.

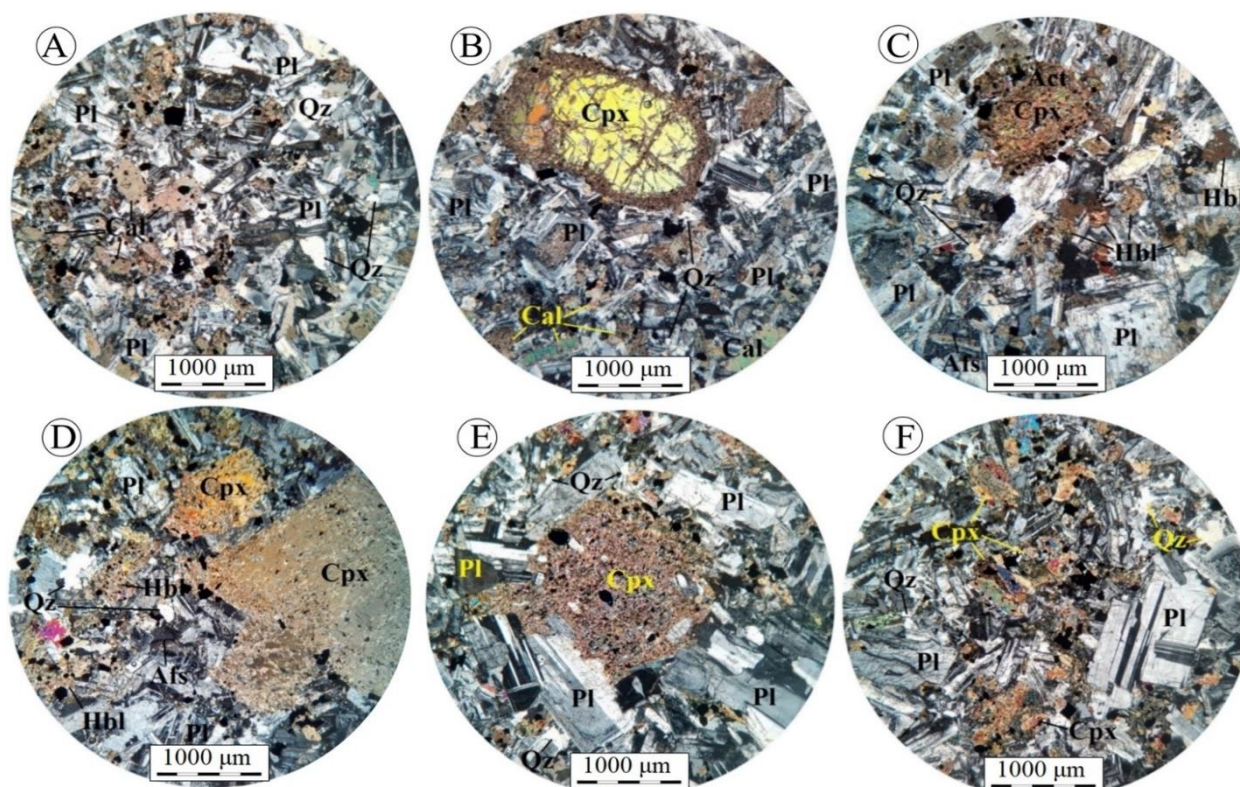
روند کلی ساختارها و گسل‌ها در منطقه تیکمه‌دش شمال‌شرقی - جنوب‌غربی، شمالی - جنوبی و شمال‌غربی - جنوب‌شرقی است. گسل‌های شمال‌شرقی - جنوب‌غربی، گسل‌های اصلی منطقه هستند. این گسل‌ها شیب ۶۵ تا ۸۰ درجه به سمت شمال‌غرب دارند. عمده رگه‌های کانه‌دار منطقه در امتداد این گسل‌ها تشکیل شده‌اند. این گسل‌های محلی، شاخه‌های فرعی از گسل بزرگ شمال تبریز هستند (Behrouzi et al., 1998).

کانه‌زایی

کانه‌زایی در کانسار تیکمه‌دش ۲ به صورت رگه‌های سیلیسی منگنز و طلا‌دار درون توالی‌های آتشفشانی - رسوبی اتوسن (واحد E^{IV}) و میوسن (واحد M^T) رخ داده است. بر اساس مشاهدات صحرایی، پهنه‌های کانه‌دار در این کانسار را می‌توان به دو بلوک A و B تفکیک کرد (شکل ۶-۶). بلوک A در شمال منطقه و در محل سینه‌کارها و ترانشه‌های استخراجی کانه‌زایی آهن اسکارنی واقع شده است و رگه‌های سیلیسی کانه‌دار آن، کانه‌زایی آهن اسکارنی - هورنفلسی منطقه را قطع کرده‌اند (شکل ۶-۶). رگه‌های کانه‌دار دارای امتداد شمال‌شرقی - جنوب‌غربی (N10-20E) با شیب بین ۶۵ تا ۸۰ درجه به سمت شمال‌غرب بوده و پهنایی بین ۰/۱ تا ۵ متر دارند.

از بلورهای پلاژیوکلاز مشاهده می‌شود. با توجه به زاویه نوری، پلاژیوکلازها از نوع آندزین - لابرادوریت هستند. هورنبلند دیگر کانی اصلی سنگ با فراوانی حدود ۲۰ درصد است که به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با ابعاد تا ۱ میلی‌متر مشاهده می‌شود (شکل ۵-۵ و C و D). دگرسانی شدید به کلریت و کلسیت در اغلب بلورهای هورنبلند دیده می‌شود. کوارتز به صورت بلورهای بی‌شکل در ابعاد کمتر از ۱ میلی‌متر با فراوانی حدود ۵ درصد در بین دیگر کانی‌ها پراکنده است. کلینوپیروکسن به صورت بلورهای شکل‌دار در ابعاد تا ۲/۵ میلی‌متر با فراوانی حدود ۱۰ درصد حضور دارند (شکل ۵-۵ و C و D). اغلب بلورهای کلینوپیروکسن با درجه‌های شدیدی به کلریت، اکتینولیت و کانی‌های کدر دگرسان شده‌اند. آلکالی فلدسپار با فراوانی حدود ۵ درصد به صورت بلورهای بی‌شکل در ابعاد کمتر از ۰/۵ میلی‌متر در بین دیگر کانی‌های سنگ دیده می‌شود (شکل ۵-۵ و C و D). کانی‌های کدر اولیه شکل‌دار همراه با کانی‌های کدر بی‌شکل حاصل از دگرسانی کانی‌های مافیک با فراوانی حدود ۳ درصد در متن سنگ پراکنده‌اند.

پیروکسن کوارتزومنزوگابروها دارای بافت‌های گرانولار و افیتیک بوده و متشکل از کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن، آلکالی فلدسپار و کوارتز هستند. بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار پلاژیوکلاز کانی عمده سنگ هستند که با فراوانی حدود ۵۵ درصد حضور دارند (شکل ۵-۵ و E و F). ابعاد بلورهای پلاژیوکلاز تا ۳ میلی‌متر می‌رسد ولی اغلب اندازه آنها بین ۱ تا ۱/۵ میلی‌متر است. برخی از بلورهای پلاژیوکلاز دارای منطقه‌بندی بوده و برخی با درجه‌های ضعیف به سرسیت دگرسان شده‌اند. با توجه به زاویه نوری، پلاژیوکلازها از نوع لابرادوریت - آندزین هستند. کلینوپیروکسن دیگر کانی عمده سنگ با فراوانی حدود ۳۰ درصد است که به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در ابعاد تا ۲ میلی‌متر در سنگ حضور دارند (شکل ۵-۵ و E و F). بخش عمده بلورهای کلینوپیروکسن به طور کامل توسط کلریت و کانی‌های کدر جانشین شده‌اند. برخی از بلورهای کلینوپیروکسن به



شکل ۵. تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از کانی‌شناسی و بافت توده‌های نفوذی در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲. A: بافت گرانولار متشکل از بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلندهای جانشین شده با کلسیت در پیروکسن کوارتز دیوریت‌ها، B: بلور درشت کلینوپیروکسن در بین بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلندهای جانشین شده توسط کلسیت در پیروکسن کوارتز دیوریت‌ها. بلورهای کوارتز در بین دیگر کانی‌ها مشاهده می‌شوند، C: بلور درشت کلینوپیروکسن با دگرسانی به اکتینولیت همراه با بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلندهای با دگرسانی به کلریت و کلسیت در پیروکسن کوارتز مونوزودیوریت‌ها. تعدادی بلور کوچک کوارتز و آلکالی فلدسپار نیز در تصویر دیده می‌شود، D: بلورهای درشت کلینوپیروکسن همراه با پلاژیوکلاز، هورنبلندهای با دگرسانی به کلسیت در پیروکسن کوارتز مونوزودیوریت‌ها. تعدادی بلور کوچک کوارتز و آلکالی فلدسپار نیز در تصویر دیده می‌شود، E و F: بافت گرانولار متشکل از بلورهای کلینوپیروکسن اکتینولیتی شده و پلاژیوکلاز در پیروکسن کوارتز مونوزوگابروها. بلورهای ریز کوارتز در بین آنها مشاهده می‌شود. در تصویر E، بافت افیتیک نیز قابل مشاهده است. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Act: اکتینولیت، Afs: آلکالی فلدسپار، Cal: کلسیت، Cpx: کلینوپیروکسن، Hbl: هورنبلند، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز).

Fig. 5. Photomicrographs (transmitted crossed-polarized light, XPL) of mineralogy and texture of the intrusions in the Tikmehdash 2 Au deposit. A: Granular texture consisting of plagioclase crystals and hornblendes replaced by calcite in pyroxene quartz diorite, B: Coarse-grained clinopyroxene crystals among plagioclase crystals and hornblende replaced by calcite in pyroxene quartz diorite. Quartz crystals are found among other minerals, C: Coarse-grained clinopyroxene crystals altered to actinolite, along with plagioclase and hornblende crystals that altered to chlorite and calcite in the pyroxene quartz monzodiorite. Some small quartz and alkali feldspar crystals are also observed, D: Coarse-grained clinopyroxene crystals with plagioclase and hornblendes that altered to calcite in pyroxene quartz monzodiorite. Some small quartz and alkali feldspar crystals are also observed, E and F: Granular texture consisting of actinolitic clinopyroxene and plagioclase crystals in pyroxene quartz monzogabbro. Fine-grained quartz crystals are observed among them. In F, ophitic texture is also observed. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Act: actinolite, Afs: alkali feldspar, Cal: calcite, Cpx: clinopyroxene, Hbl: hornblende, Pl: plagioclase, Qz: quartz).

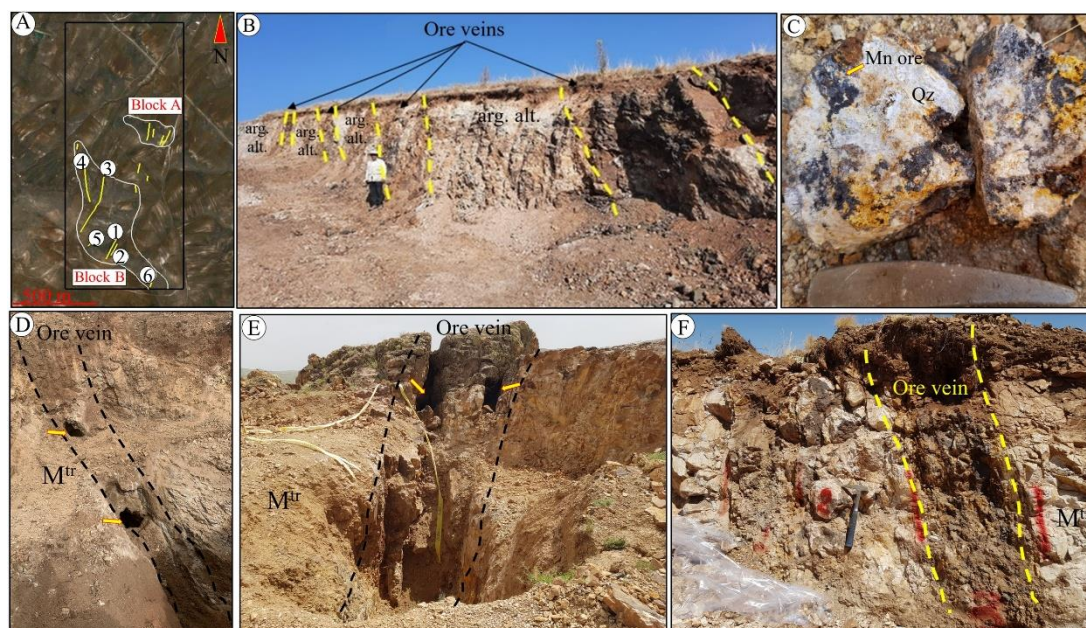
این رگه‌ها توسط هاله‌های دگرسانی آرژیلیک حدواسط با پهنایی تا ۳ متر در بر گرفته شده‌اند (شکل ۶-B). در برخی مناطق، رگه و رگچه‌های سیلیسی طلا دار نزدیک به هم تشکیل شده و یک پهنه کانی‌سازی را به وجود آورده‌اند که بین ۵ تا ۱۵ متر پهن دارند (شکل ۶-B). رگه‌های کانه‌دار این بخش، متراکم (ریزبلور) بوده و دارای پیریت‌های دانه‌پراکنده و بافت‌های دروزی، شکافه پرکن و حفره‌ای هستند. اغلب رگه- رگچه‌های سیلیسی پرعیار این بخش، با اکسیدها- هیدروکسیدهای منگنز همراهی می‌شوند (شکل ۶-C). نمونه‌های برداشت‌شده به صورت کانالی و لب‌پری از رگه‌های سیلیسی کانه‌دار و هاله‌های دگرسانی آرژیلیک حدواسط حاشیه آنها، عیار طلا را ۴۹ میلی گرم در تن تا ۱/۱۵ گرم در تن نشان داده است.

بلوک B در جنوب منطقه واقع شده و شامل ۶ رگه سیلیسی کانه‌دار است (شکل ۶-A). رگه شماره ۱، رگه سیلیسی طلا دار مهم و اصلی در کانسار تیکمه‌داش ۲ است که فعالیت‌های استخراجی قدیمی متعددی بر روی آن قابل مشاهده است (شکل ۶-D و E). این رگه حدود ۲۵۰ متر درازا و بین ۰/۵ تا ۲ متر پهن داشته و دارای روند عمومی شمال شرق- جنوب غرب است. بالاترین عیارهای طلای اندازه‌گیری شده (۸۴/۹ و ۸۸/۳ گرم در تن) مربوط به این رگه است. ادامه این رگه به سمت شمال شرق، داخل زمین‌های کشاورزی قابل پیگیری بوده و در نهایت به رگه‌های کانه‌دار موجود در سینه کارهای استخراجی کانه‌زایی آهن اسکارنی در بلوک A می‌پیوندد. رگه شماره ۲ به موازات رگه شماره ۱ و در فاصله حدود ۲۵ متری شرق آن رخنمون داشته و حدود ۶۰ متر درازا و ۰/۳ تا ۱/۵ متر پهن دارد. بر روی این رگه نیز آثار معدن کاری قدیمی دیده شده و ادامه آن به سمت شمال شرق، درون زمین‌های کشاورزی قابل پیگیری است (شکل ۶-A). رگه شماره ۳ در بخش غربی بلوک B واقع شده است و با راستای شمال شرقی- جنوب غربی حدود ۵۰۰ متر درازا و بین ۰/۵ تا ۱/۵ متر پهن دارد. آثار معدن کاری قدیمی (به طول حدود ۲۵۰ متر) اغلب در بخش‌های جنوبی این رگه دیده شده و بخش‌های شمالی

بدون هرگونه عملیات استخراجی قدیمی است. رگه شماره ۴ در غرب رگه شماره ۳ با راستای شمال غربی- جنوب شرقی رخنمون داشته و حدود ۲۵۰ متر درازا و ۱/۵-۱ متر پهن دارد. بر روی این رگه، هیچ‌گونه آثار معدن کاری قدیمی مشاهده نمی‌شود (شکل ۶-F). ادامه این رگه به سمت شمال غرب، به رخنمون‌های کوچکی از رگه کوارتزی داخل مزارع کشاورزی ختم می‌شود. نمونه‌های برداشت‌شده از این رگه، عیارهای بالایی از طلا (عیارهای ۹/۸ و ۹/۶ گرم در تن) را نشان داده است. رگه شماره ۵ در جنوب غرب بلوک B و در غرب رگه شماره ۱ رخنمون دارد. این رگه دارای راستای شمال شرقی- جنوب غربی بوده و حدود ۱۵۰ متر درازا و ۰/۵ تا ۳ متر پهن دارد. آثار معدن کاری قدیمی بر روی این رگه نیز دیده می‌شود که قطعه‌های رگه در اطراف آنها دپو شده است. رگه شماره ۶ در جنوب شرق بلوک B با راستای شمال شرقی- جنوب غربی رخنمون داشته و حدود ۳۰ متر درازا و تا ۰/۵ متر پهن دارد. آثار معدن کاری قدیمی بر روی این رگه نیز قابل مشاهده بوده و موقعیت رگه به صورت ترانسه استخراجی قدیمی مشخص و قطعه‌های رگه در داخل آن دپو شده است.

دگرسانی گرمایی

بر اساس نتایج بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، دگرسانی گرمایی در کانسار طلای تیکمه‌داش ۲ شامل انواع دگرسانی‌های سیلیسی، کربناتی، آرژیلیک حدواسط و پروپیلیتیک است که در این بین، دگرسانی‌های سیلیسی، کربناتی و آرژیلیک حدواسط منطبق بر بخش‌های کانه‌دار هستند؛ اما دگرسانی پروپیلیتیک، سنگ‌های میزبان را تحت تأثیر قرار داده است. دگرسانی سیلیسی به صورت رگه- رگچه‌ای و یا سیمان برش‌های گرمایی رخ داده (شکل ۷-A و B) و منطبق بر بخش‌های کانه‌دار است. ضخامت رگه- رگچه‌های کوارتزی تا ۲۰ سانتی متر می‌رسد. کوارتز در مقاطع میکروسکوپی به صورت بلورهای نیمه‌شکل دار تا بی‌شکل با اندازه‌های ریز تا درشت (تا ۲ سانتی متر) دیده می‌شود.



شکل ۶. تصویرهای ماهواره‌ای و صحرایی از موقعیت و وضعیت رگه‌های کانه‌دار در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲. A: موقعیت رگه‌های سیلیسی طلادار (خط‌های زرد رنگ) بر روی تصویر ماهواره‌ای، B: نمایی از رگه‌های سیلیسی منگنز و طلادار و هاله‌های دگرسانی آرژیلیک حدواسط اطراف آنها درون ترانسه‌های اکتشافی - استخراجی کانه‌زایی آهن اسکارنی در بلوک A در شمال منطقه (دید به سمت غرب - شمال غرب)، C: نمایی نزدیک از قطعه‌های رگه‌های سیلیسی طلادار همراه با اکسیدهای منگنز در بلوک A در شمال منطقه، D و E: نماهایی از فعالیت‌های معدنی قدیمی (فلش‌های زرد رنگ) بر روی رگه طلادار شماره ۱ در بلوک B در جنوب منطقه (دید تصاویر به ترتیب به سمت جنوب و شمال شرق) و F: نمایی از رگه طلادار شماره ۴ در بلوک B در جنوب منطقه (دید به سمت جنوب). علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Mn ore: کانه‌های منگنز، Qz: کوارتز).

Fig. 6. Satellite image and field photographs of the location and condition of ore veins in the Tikmehdash 2 Au deposit. A: Location of Au-bearing silica veins (yellow lines) on the Satellite image, B: A view of Mn- and Au-bearing silica veins and their intermediate argillic alteration halos within exploration-extraction trenches of iron skarn mineralization of the Block A in the northern part of the area, looking to the west-northwest, C: A Close view of fragments of Au-bearing silica veins with manganese oxides of the Block A in the northern part of the area, D and E: Views of ancient mining activities (yellow arrows) on the number 1 Au-bearing vein in the Block B in the southern part of the area, looking to the south, northeast, respectively, and F: A view of number 4 Au-bearing vein in the Block B in the southern part of the area, looking to the south. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Mn ore: manganese ore, Qz: quartz).

تمرکزهای کلسیت تأخیری بدون کانه‌زایی با بافت‌های رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضاهای خالی است (شکل ۷-E). رگه-رگچه‌های کلسیتی تأخیری معمولاً رگچه‌های کوارتزی کانه‌دار را قطع کرده‌اند که بیانگر تشکیل آنها در مراحل پایانی دگرسانی گرمایی است. دگرسانی آرژیلیک حدواسط با ضخامت تا ۳ متر، اطراف رگه‌های کوارتزی کانه‌دار را در بر گرفته است (شکل ۶-۷).

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، دو نوع دگرسانی کربناتی در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ وجود دارد. دگرسانی کربناتی نوع اول شامل کلسیت‌های با بافت‌های تیغه‌ای و گل کلمی است که همراه با کوارتز در سیمان برش‌های گرمایی کانه‌دار دیده می‌شوند (شکل ۷-C و D). این نوع از دگرسانی کربناتی ارتباط نزدیکی با پهنه‌های سیلیسی کانه‌دار دارد. دگرسانی کربناتی نوع دوم شامل

(B). بر اساس بررسی‌های صحرایی، دگرسانی آرژیلیک حدواسط توسط شکستگی‌ها کنترل شده و در مقیاس رخنمون سبب تغییر رنگ سفید تا زرد سنگ‌ها شده است. در مقاطع میکروسکوپی، دگرسانی آرژیلیک حدواسط محصول جانشینی پلاژیوکلاز توسط مجموعه سریسیت و ایلیت (شناسایی توسط تجزیه پراش پرتو ایکس) همراه با مقادیر اندکی کوارتز و کلسیت است (شکل ۷-F و G). دگرسانی پروپیلیتیک در خارج از بخش‌های کانه‌زایی دیده می‌شود. در اثر این دگرسانی، سنگ‌ها در رخنمون‌های صحرایی به رنگ سبز دیده می‌شوند. دگرسانی پروپیلیتیک دارای شدت‌های کم تا متوسط است و بافت کانی‌ها در آن حفظ شده است. این دگرسانی معمولاً با جانشینی کانی‌های اولیه سنگ توسط مجموعه کلریت، کلسیت، اپیدوت و سریسیت مشخص می‌شود (شکل ۷-H و I).

کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

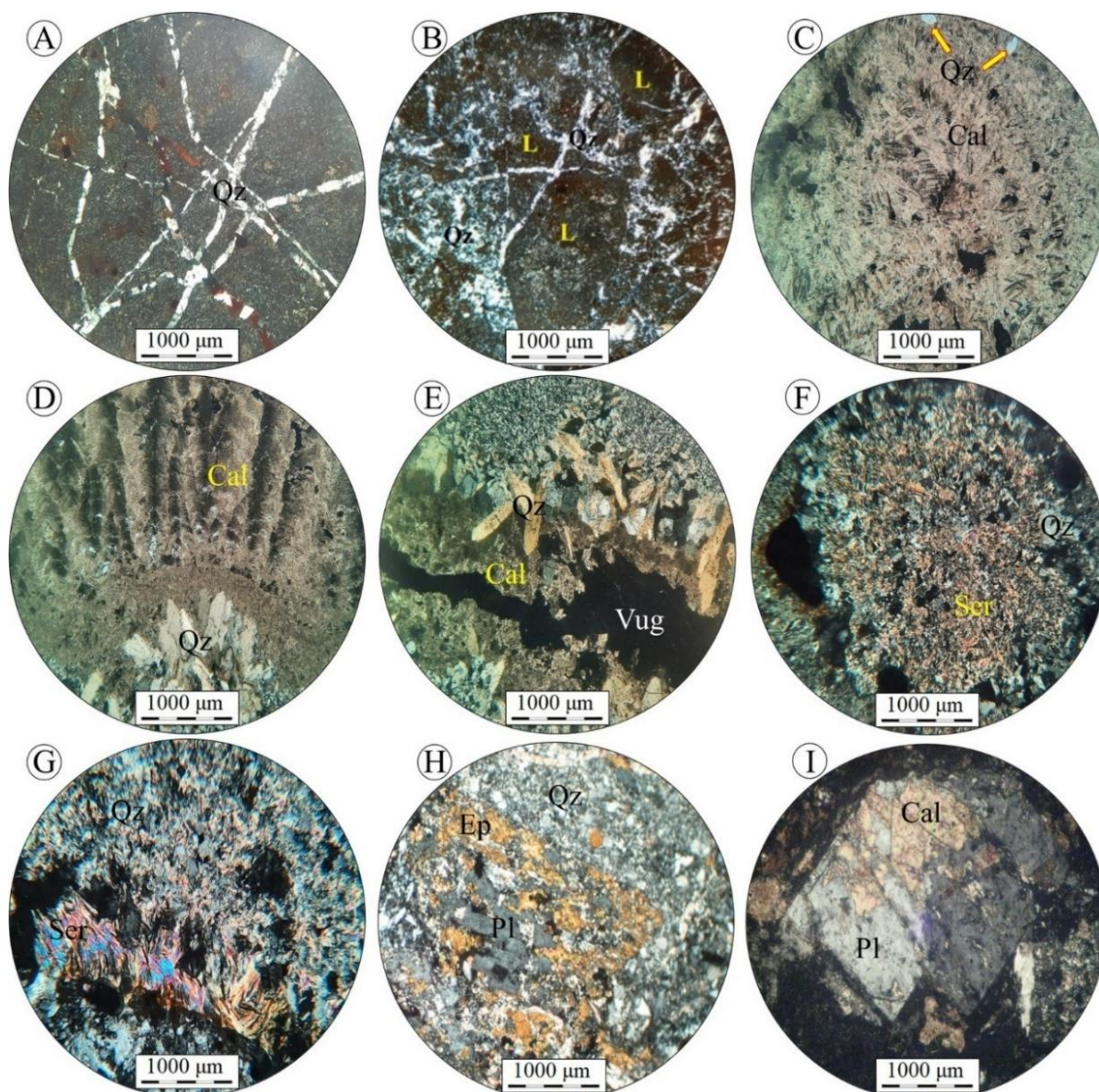
پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، طلای آزاد، تنانیت-تتراهدريت، آرسنوپیریت، پیرولوسیت و پسیلوملان، کانه‌های موجود در کانسار طلای تیکمه‌داش ۲ هستند. گویت، مالاکیت، پیرولوسیت ثانویه و بروانیت در نتیجه فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. کوارتز، کلسیت و باریت کانی‌های باطله هستند. انواع بافت کانسنگ شامل رگه-رگچه‌ای، برشی، شانه‌ای، کاکلی، پرماند، دانه‌پراکنده، قشرگون، گل کلمی، تیغه‌ای، پُرکننده فضای خالی، جانشینی، بازماندی و جزیره‌ای است.

پیریت معمولاً به صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار با بافت دانه‌پراکنده در رگه‌های کانه‌دار و حاشیه‌های سیلیسی شده رگه‌ها دیده می‌شود (شکل ۸-A). این کانی اغلب از حاشیه‌ها به گویت دگرسان شده و گاه باقی‌مانده‌هایی از آن به صورت بافت‌های بازماندی و جزیره‌ای دیده می‌شود (شکل ۸-B). کالکوپیریت به مقدار اندک و به صورت بلورهای ریز نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با بافت دانه‌پراکنده در بخش‌های کانه‌دار

دیده می‌شود (شکل ۸-C). گاه ادخال‌های ریزی از کالکوپیریت درون گالن و اسفالریت دیده می‌شود که بیانگر تبلور زودتر کالکوپیریت در توالی همیافتی است (شکل ۸-D و E). گالن به میزان کم در رگه‌های کلسیتی کانه‌دار مشاهده می‌شود. این کانی اغلب به صورت بلورهای درشت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و گاه با رخ‌های مثلی در نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۸-D). گالن معمولاً از حاشیه به سروزیت دگرسان شده است. در برخی از نمونه‌ها، گالن با پیریت و اسفالریت هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل ۸-F و G). گالن گاهی دارای ادخال‌هایی از کالکوپیریت و تنانیت-تتراهدريت است (شکل ۸-D). اسفالریت اغلب به صورت بلورهای متوسط بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار تیره (غنی از آهن) در رگه‌های کلسیتی دیده می‌شود. در مقاطع میکروسکوپی، اسفالریت معمولاً با گالن و پیریت هم‌رشدی دارد (شکل ۸-F تا H). گاه ادخال‌های ریز کالکوپیریت درون اسفالریت قابل مشاهده است (شکل ۷-E). تنانیت-تتراهدريت با فراوانی کم و به صورت ادخال‌های ریز بی‌شکل درون گالن دیده می‌شوند (شکل ۸-D و G).

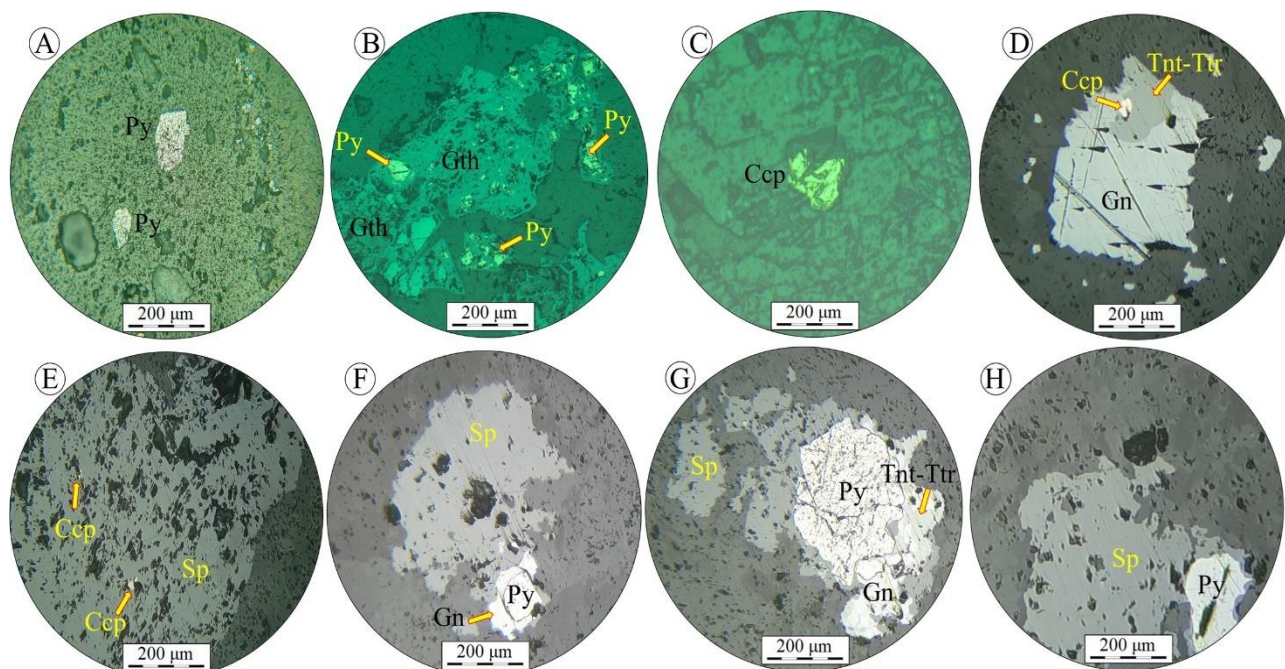
طلا به صورت ذرات ریز بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار در ابعاد اغلب کمتر از ۵۰ میکرون و گاه تا ۳۰۰ میکرون در رگه‌های سیلیسی قابل مشاهده است (شکل ۹-A و B). آرسنوپیریت به صورت بلورهای ریز (تا ۱۰۰ میکرون) شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با بافت دانه‌پراکنده در برخی از رگه‌های کانه‌دار مشاهده می‌شود (شکل ۹-C).

پیرولوسیت و پسیلوملان به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار با بافت‌های پُرکننده فضای خالی، قشرگون و گل کلمی در بخش‌های کانه‌دار دیده می‌شوند (شکل ۹-D و E). در برخی نقاط، جانشینی بلورهای پیرولوسیت اولیه و پسیلوملان توسط براونیت و پیرولوسیت ثانویه دیده شده (شکل ۹-F و G) و گاه رگچه‌های پیرولوسیت ثانویه، بلورهای پیرولوسیت اولیه و پسیلوملان را قطع کرده است (شکل ۹-G).



شکل ۷. تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از انواع دگرسانی‌ها در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲. A و B: کوارتز با بافت رگه-رگچه‌ای (A) و سیمان پرش‌های گرمایی (B) در دگرسانی سیلیسی، C و D: کلسیت‌های با بافت تیغه‌ای (C) و گل کلمی (D) در دگرسانی کربناتی نوع اول، E: کلسیت با بافت پرکننده فضای خالی در دگرسانی کربناتی نوع دوم، F و G: سریسیت در دگرسانی آرژلیک حدواسط، H و I: دگرسانی پلاژیو کلاز به اپیدوت (H) و کلسیت (I) در دگرسانی پروپلیتیک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Ep: اپیدوت، L: قطعه سنگ، Pl: پلاژیو کلاز، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت، Vug: فضای خالی).

Fig. 7. Photomicrographs (transmitted crossed-polarized light, XPL) of hydrothermal alteration types in the Tikmehdash 2 Au deposit. A and B: Quartz with vein-veinlets (A) and hydrothermal breccia cement (B) textures in silica alteration, C and D: Calcite with bladed (C), and colloform (D) textures in type 1 carbonate alteration, E: Calcite with vug infill texture in type 2 carbonate alteration, F and G: Sericite in intermediate argillic alteration, H and I: Alteration of plagioclase to epidote (H), and calcite (I) in propylitic alteration. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Ep: epidote, L: lithic fragment, Pl: plagioclase, Qz: quartz, Ser: sericite, Vug: open space).



شکل ۸. تصویرهای میکروسکوپی (نور بازتابی) از کانی‌شناسی و بافت کانسنگ در کانسار طلای تیکمه‌داش ۲. A: بلورهای نیمه‌شکل‌دار و ریز پیریت با بافت دانه‌پراکنده، B: بلور درشت و بی‌شکل پیریت دگرسان‌شده به گوتیت، C: بلور ریز و بی‌شکل کالکوپیریت، D: بلور درشت و بی‌شکل گالن با ادخال‌های کالکوپیریت و تنانتیت-تراهدریت، E: ادخال‌های بسیار ریز کالکوپیریت داخل اسفالریت و F تا H: هم‌رشدی‌های پیریت، گالن و اسفالریت. در تصویر G، ادخال‌های تنانتیت-تراهدریت داخل گالن نیز دیده می‌شود. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ccp: کالکوپیریت، Gn: گالن، Gth: گوتیت، Py: پیریت، Sp: اسفالریت، Tnt-Ttr: تنانتیت-تراهدریت).

Fig. 8. Photomicrographs (reflected light) of the ore mineralogy and texture in the Tikmehdash 2 Au deposit. A: Subhedral fine-grained disseminated pyrite crystals, B: Coarse-grained anhedral pyrite crystal altered to goethite, C: Fine-grained anhedral chalcopyrite crystal, D: Coarse-grained anhedral galena crystal with chalcopyrite, and tennantite-tetrahedrite inclusions, E: Fine-grained chalcopyrite inclusions within sphalerite, and F–H: Intergrowth of pyrite, galena, and sphalerite. In G, tennantite-tetrahedrite inclusions within galena are also observed. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ccp: chalcopyrite, Gn: galena, Gth: goethite, Py: pyrite, Sp: sphalerite, Tnt-Ttr: tennantite-tetrahedrite).

تیکمه‌داش ۲ هستند. کوارتز به صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل تا شکل‌دار (کمتر از ۲۰۰ میکرون تا ۲ سانتی‌متر) و یا توده‌ای در رگه‌های سیلیسی کانه‌دار دیده می‌شود. کوارتزها بیشتر بافت‌های رگه-رگچه‌ای (شکل ۱۰-A)، شانه‌ای (شکل ۱۰-A) و پرکننده فضاهای خالی (شکل ۱۰-B) دارند. در برخی موارد، بافت‌های کاکلی، گل‌کلی و پرماند در بلورهای کوارتز دیده می‌شود (شکل ۱۰-C تا G). کلسیت معمولاً بافت‌های تیغه‌ای، گل‌کلی و پرکننده فضاهای خالی نشان می‌دهد (شکل ۱۰-C تا

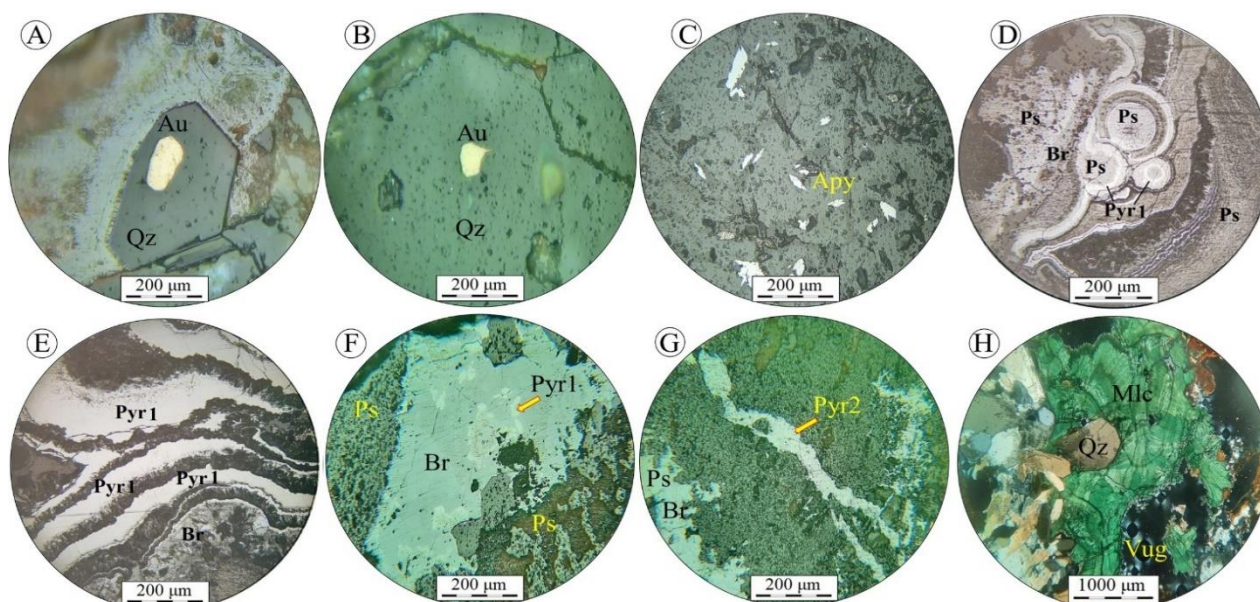
گوتیت، مالاکیت، پیرولوسیت ثانویه و براونیت، کانی‌های برون‌زاد در کانسار طلای تیکمه‌داش ۲ هستند. گوتیت محصول دگرسانی پیریت و کالکوپیریت است. مالاکیت با بلورهای شعاعی و بافت پرکننده فضاهای خالی در نمونه‌های کانه‌دار قابل مشاهده است (شکل ۹-H). براونیت و پیرولوسیت ثانویه محصول دگرسانی کانه‌های اولیه منگنز (پیرولوسیت اولیه و پسیلوملان) هستند (شکل ۷-F و G). کوارتز، کلسیت و باریت کانی‌های باطله در کانسار طلای

مرحله قابل تفکیک است. مرحله اول کان‌زایی با سیلیسی‌شدن (کوارتزهای ریزبلور) سنگ‌های میزبان مشخص می‌شود. پیریت تنها کانی‌های سولفیدی این مرحله است که بیشتر به صورت بلورهای ریز دانه‌پراکنده در متن سیلیسی‌شده سنگ دیده می‌شوند. این مرحله بیشتر به عنوان زمینه‌ساز مراحل بعدی کان‌زایی عمل کرده است (شکل ۱۱-A, B, D, F تا I). مرحله دوم کان‌زایی با حضور رگه-رگچه‌ها و برش‌های گرمایی طلادار با سیمان کوارتز-سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت) همراه با اندکی باریت مشخص می‌شود.

(E). باریت بیشتر به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در برخی از مقاطع میکروسکوپی دیده شده است و ابعاد طولی بلورهای درشت آن گاه تا ۲ سانتی‌متر نیز می‌رسد (شکل ۱۰-H و I).

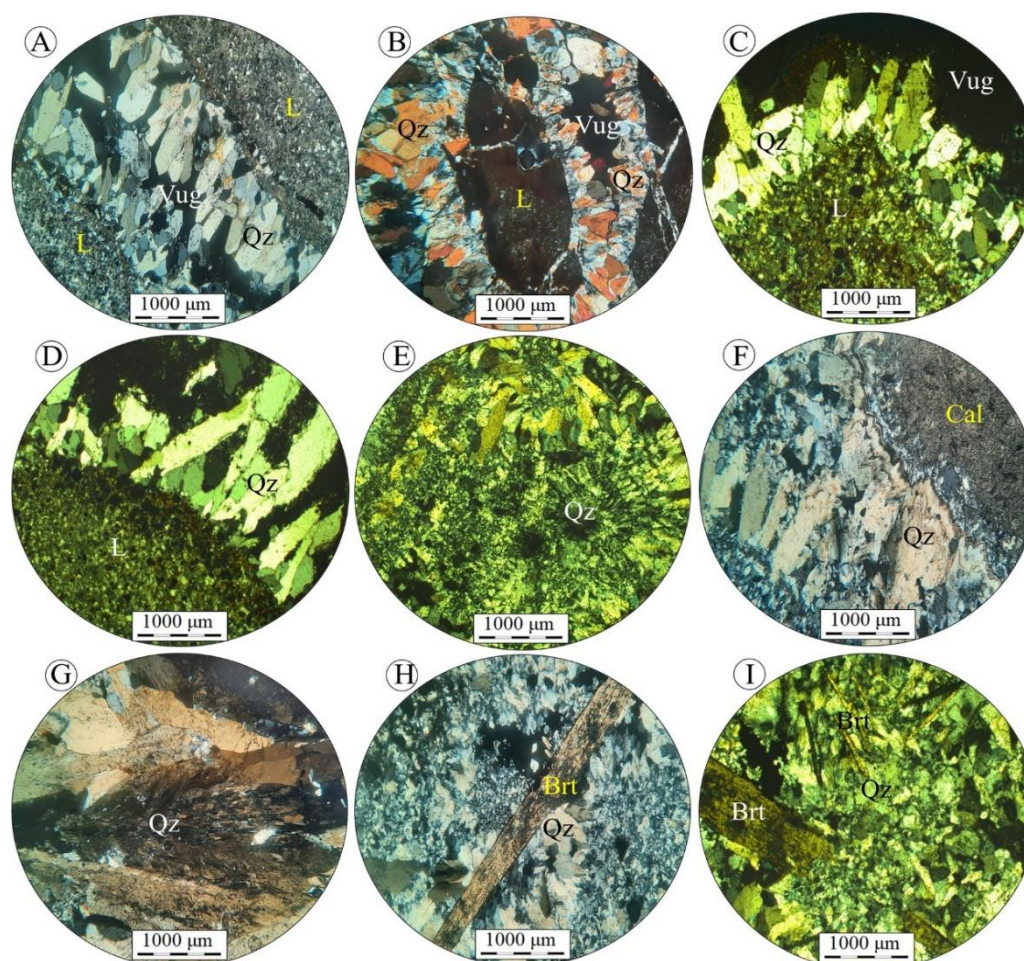
مراحل کان‌زایی و توالی همبافتی کانی‌ها

با توجه به بررسی‌های صحرایی، بررسی نمونه‌های دستی، بررسی‌های میکروسکوپی و بر مبنای روابط بافتی موجود بین کانی‌ها، مراحل کان‌سازی در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ به شش



شکل ۹. تصویرهای میکروسکوپی (تصویر H در نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL و بقیه در نور بازتابی) از کانی‌شناسی و بافت کانسنگ در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲. A و B: ذرات طلای آزاد داخل کوارتز، C: بلورهای ریز آرسنوپیریت، D و E: پیرولوسیت اولیه و پسیلوملان با بافت‌های گل‌کلمی و نواری. دگرسانی به براونیت در هر دو تصویر دیده می‌شود، F: دگرسانی کانی‌های پیرولوسیت اولیه و پسیلوملان به براونیت و پیرولوسیت ثانویه، G: رگچه پیرولوسیت ثانویه و H: مالاکیت با بافت پرکننده فضای خالی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Apy: آرسنوپیریت، Au: طلای آزاد، Br: براونیت، Mlc: مالاکیت، Ps: پسیلوملان، Pyr1: پیرولوسیت اولیه، Pyr2: پیرولوسیت ثانویه، Qz: کوارتز، Vug: فضای خالی).

Fig. 9. Photomicrographs (H in transmitted crossed-polarized light, XPL, and the rest in reflected light) of the ore mineralogy and texture in the Tikmehdash 2 Au deposit. A and B: Free Au inclusions within quartz, C: Fine-grained arsenopyrite crystals, D and E: Primary pyrolusite and psilomelane with colloform and banded textures. Alteration to braunite is observed in both photos, F: Alteration of primary pyrolusite and psilomelane crystals into braunite and secondary pyrolusite, G: Secondary pyrolusite veinlet, and H: Malachite with vug infill texture. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Apy: arsenopyrite, Au: free gold, Br: braunite, Mlc: malachite, Ps: psilomelane, Pyr1: primary pyrolusite, Pyr2: secondary pyrolusite, Qz: quartz, Vug: open space).

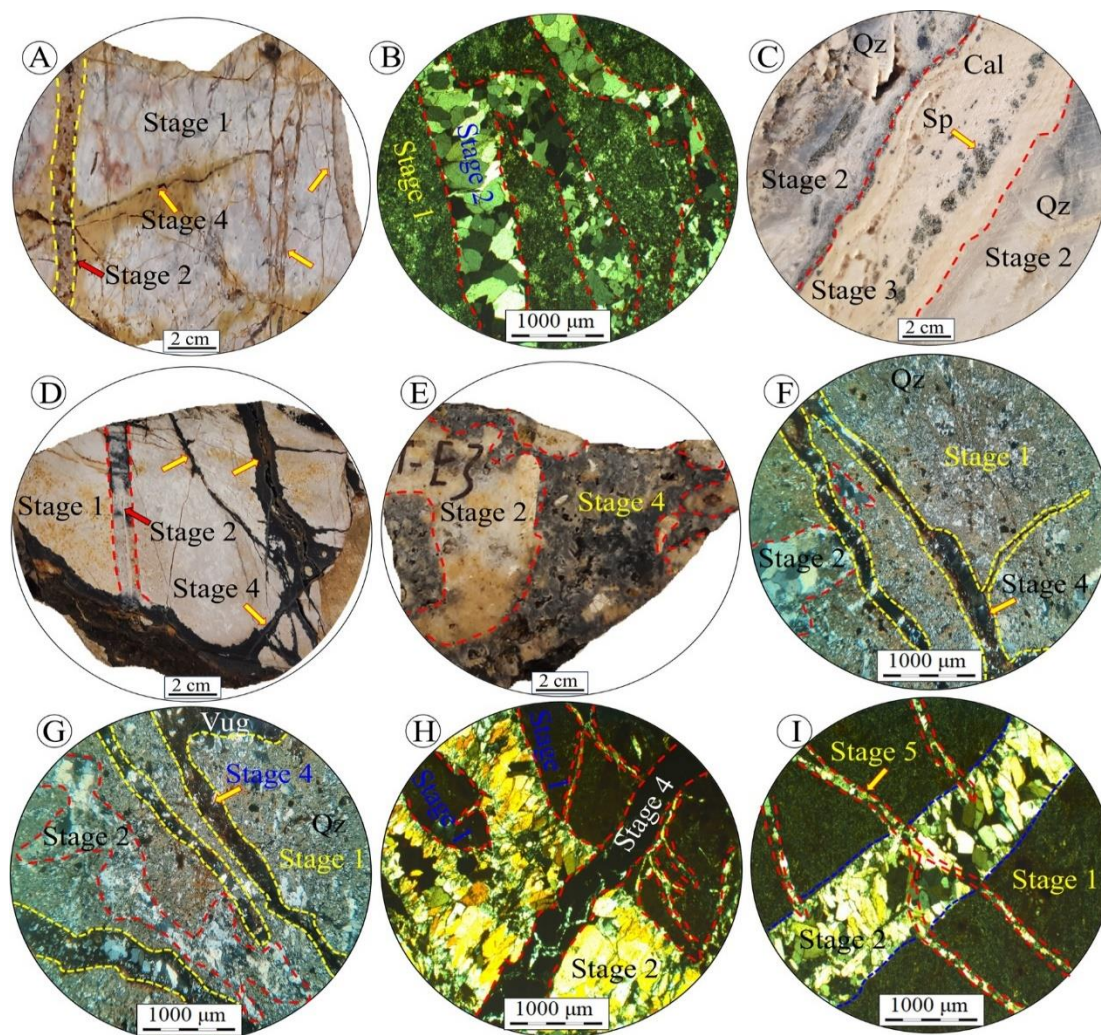


شکل ۱۰. تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از کانی‌های باطله و بافت آنها در کانسار طلای تیکمه‌داش ۲. A: کوارتز با بافت شانه‌ای، B: بلورهای درشت کوارتز با بافت‌های پرکننده فضای خالی و کاکلی، C و D: رشد بلورهای درشت کوارتز با بافت کاکلی بر روی قطعه‌های توفی، E: کوارتز با بافت گل‌کلمی، F و G: بلورهای درشت کوارتز با بافت پرمانند. در تصویر F، بافت گل‌کلمی نیز دیده می‌شود، H و I: بلورهای شکل‌دار و درشت باریت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Brt: باریت، Cal: کلسیت، L: قطعه توفی، Qz: کوارتز، Vug: فضای خالی).

Fig. 10. Photomicrographs (transmitted crossed-polarized light, XPL) of gangue minerals and textures in the Tikmehdash 2 Au deposit. A: Quartz with comb texture, B: Coarse-grained quartz crystals with vug infill and cockade textures, C and D: Cockade texture of quartz developed around the tuff fragments, E: Colloform texture of quartz, F and G: Plumose texture of coarse-grained quartz crystals. In F, colloform texture is also observed, H and I: Coarse-grained euhedral barite crystals. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Brt: barite, Cal: calcite, L: tuff fragment, Qz: quartz, Vug: open space).

کانه‌زایی قطع شده است؛ به طوری که بخش‌هایی از آن به صورت قطعه‌های برشی در سیمان برش‌های گرمایی مراحل بعدی کانه‌زایی دیده می‌شود (شکل ۱۱-A، C و D تا I).

ضخامت رگه-رگچه‌های کوارتز-سولفیدی این مرحله تا ۲۰ سانتی‌متر می‌رسد. مرحله دوم کانه‌زایی، مرحله اول را قطع و برشی کرده (شکل ۱۱-A، B، D، F تا I) و خود توسط مراحل بعدی



شکل ۱۱. تصویرهای نمونه دستی و میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از مراحل کانه‌زایی در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲. A و B: مرحله اول کانه‌زایی به صورت سیلیسی شدن سنگ میزبان که توسط رگچه‌های کوارتز-سولفیدی مرحله دوم قطع شده است. در تصویر A، رگچه‌های کوارتز-سولفیدی مرحله دوم کانه‌زایی توسط رگچه‌های کوارتز-اکسیدهای منگنز مرحله چهارم (فلش‌های زرد رنگ) قطع شده‌اند، C: رگه کلسیتی سولفیددار مرحله سوم که رگه‌های کوارتز-سولفیدی مرحله دوم را قطع کرده است، D تا H: رگچه‌های کوارتز-اکسیدهای منگنز مرحله چهارم کانه‌زایی که سنگ سیلیسی شده مرحله اول و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی مرحله دوم را قطع کرده‌اند. در تصویر E، قطعه‌های برشی کانه‌زایی مرحله دوم در سیمان برش‌های گرمایی مرحله سوم قابل مشاهده است و I: رگچه‌های کوارتزی مرحله پنجم کانه‌زایی که رگچه کوارتز-سولفیدی مرحله دوم را قطع کرده است. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Qz: کوارتز، Sp: اسفالریت، Vug: فضای خالی).

Fig. 11. Hand specimen and microscopic (transmitted crossed-polarized light, XPL) photographs of mineralization stages in the Tikmehdash 2 Au deposit. A and B: Stage 1 mineralization as silicification of the host rock that crosscut by stage 2 quartz-sulfide veinlets. In A, stage 2 quartz-sulfide veinlets are, in turn, cut by stage 4 quartz-Mn oxide veinlets (yellow arrows), C: Stage 3 sulfide-bearing calcite vein that crosscut the stage 2 quartz-sulfide vein, D-H: Stage 4 quartz-Mn oxide veinlets that crosscut stage 1 silicified rock, and stage 2 quartz-sulfide veinlets. In E, stage 2 breccia fragments can be observed within the stage 3 hydrothermal breccia cements, and I: Stage 5 quartz veinlets that crosscut stage 2 quartz-sulfide veinlets. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Qz: quartz, Sp: sphalerite, Vug: open space).

به صورت رگه- رگچه‌ای و پرکننده فضاهاى خالى مشخص مى‌شود (شکل ۱۱-I). ضخامت رگه- رگچه‌هاى کوارتز- کلسیتی معمولاً کمتر از ۱ سانتی‌متر است. هیچ کانی سولفیدی و اکسیدی با این مرحله تشکیل نشده است. مرحله ششم کانه‌زایی مربوط به فرایندهای برون‌زاد بوده و طی آن کانی‌های گوتیت، مالاکیت، پیرولوسیت ثانویه و براونیت با بافت‌های پرکننده فضای خالی، بازماندی و جانشینی تشکیل شده‌اند. توالی همیافتی کانی‌ها در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

داده‌های زمین‌شیمیایی

نتایج تجزیه‌های شیمیایی به دست آمده از نمونه‌های کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

کانه‌زایی مرحله سوم با حضور رگه‌های کلسیتی حاوی پیریت- گالن- اسفالریت و تنانتیت- تراهدریت به ضخامت تا ۳ سانتی‌متر مشخص می‌شود (شکل ۱۱-C). رگه‌های کلسیتی این مرحله، مرحله اول و دوم کانه‌زایی را قطع کرده‌اند؛ اما ارتباط آن با مراحل دیگر کانه‌زایی مشخص نیست. مرحله چهارم کانه‌زایی با حضور کانه‌های منگنز (پیرولوسیت و پسیلوملان) و کوارتز به صورت رگچه‌ای و پرکننده فضاهاى خالى مشخص مى‌شود. ضخامت رگه- رگچه‌های این مرحله تا ۵ سانتی‌متر می‌رسد. رگه‌های کوارتز- منگنز این مرحله معمولاً مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده (شکل ۱۱-A و D تا H) و خود توسط مرحله پنجم کانه‌زایی قطع شده‌اند. مرحله پنجم کانه‌زایی یک مرحله عقیم بعد از کانه‌زایی بوده و به آخرین فعالیت‌های گرمایی در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ مرتبط است. این مرحله با حضور کوارتز و کلسیت

	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 5	Supergene
Pyrite						
Chalcopyrite						
Gold						
Arsenopyrite						
Galena						
Sphalerite						
Tennantite-Tetrahedrite						
Pyrolusite						
Psilomelane						
Goethite						
Malachite						
Braunite						
Quartz						
Calcite						
Barite						
Disseminated						
Vein-Veinlets						
Brecciated						
Comb						
Colloform						
Cockade						
Crustiform						
Bladed						
Plumose						
Vug Infill						
Relict						
Replacement						

شکل ۱۲. مراحل کانی‌سازی و توالی همیافتی کانه‌ها و کانی‌ها در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲

Fig. 12. Mineralization stages and paragenetic sequences of ore and minerals at the Tikmehdash 2 Au deposit

جدول ۱. داده‌های تجزیه Fire Assay (گرم در تن) نمونه‌های کانه‌دار در کانسار طلای تیکمه‌داش ۲

Table 1. Fire-Assay data (ppm) of ore samples from the Tikmehdash 2 Au deposit

Sample Number	Au	Sample Number	Au	Sample Number	Au
Zarazma Labs		Novin Shimyar Labs			
TK-01-ZA	0.35	TK-27-ZA	2.48	TK-04-NSH	12.14
TK-02-ZA	3.36	TK-28-ZA	84.98	TK-05-NSH	1.65
TK-03-ZA	0.98	TK-29-ZA	2.20	TK-07-NSH	4.26
TK-04-ZA	18.52	TK-31-ZA	0.94	TK-08-NSH	0.68
TK-05-ZA	2.33	TK-32-ZA	2.91	TK-10-NSH	0.69
TK-06-ZA	1.79	TK-34-ZA	0.06	TK-11-NSH	0.11
TK-07-ZA	5.40	TK-35-ZA	0.46	TK-12-NSH	0.23
TK-08-ZA	1.06	TK-36-ZA	0.05	TK-13-NSH	9.83
TK-09-ZA	0.26	TK-37-ZA	0.21	TK-21-NSH	0.05
TK-10-ZA	0.66	TK-41-ZA	0.03	TK-25-NSH	0.05
TK-11-ZA	0.16	TK-52-ZA	0.41	TK-26-NSH	1.12
TK-12-ZA	0.28	TK-53-ZA	3.63	TK-28a-NSH	3.51
TK-13-ZA	9.62	TK-51-ZA	0.68	TK-28b-NSH	88.35
TK-21-ZA	0.09	TK-54-ZA	1.53	TK-32-NSH	2.23
TK-23-ZA	2.46	TK-50-ZA	0.56	TK-34-NSH	0.03
TK-25-ZA	0.05			TK-36-NSH	0.09
TK-26-ZA	1.41			TK-37-NSH	0.19

جدول ۲. داده‌های تجزیه Fire Assay (طلا، میلی گرم در تن) و ICP-OES (سایر عناصر، گرم در تن) نمونه‌های کانه‌دار در کانسار طلای تیکمه‌داش

۲

Table 2. Fire-Assay (Au, ppb), and ICP-OES (other elements, ppm) data of ore samples from the Tikmehdash 2 Au deposit

	Au	Ag	As	Ba	Cd	Cu	Mn	Mo	Pb	S	Sb	Zn
Detection Limit	5	5	0.5	5	0.10	1	5	0.50	1	50	0.50	1
01-TKD-100	305	19.5	26.5	232	0.36	501	432	418.1	2389	832	14	91
01-TKD-D-1	2216	60.8	58.2	233	35.7	1970	>20000	17.4	>30000	683	>100	5680
01-TKD-D-2	3624	89.3	96.2	2034	27.6	514	>20000	236.1	8046	593	>100	6917
01-TKD-D-3	8744	46.2	60	590	41	280	>20000	16.2	4759	685	>100	6401
01-TKD-D'-1	558	12.7	82.9	839	8.9	104	>20000	13.1	2853	545	65.7	2187
01-TKD-D''-2	15834	5	19.3	629	0.39	34	8716	1.3	230	360	35.6	118
01-TKD-TRA1-1	180	5	32.3	426	0.8	347	5857	9.8	1597	464	46.3	507
01-TKD-TRA1-2	123	5	15	439	0.48	191	1272	3.2	388	578	1.23	312
01-TKD-TRA2-1	1688	22.4	18.3	409	29.2	3728	>20000	158.9	15887	438	11.2	5793
01-TKD-TRA3-1	1604	31.8	17.2	153	9	4166	>20000	26.7	18924	388	18.1	1412
01-TKD-TRA3-2	6120	11.7	27.5	128	1.5	1120	17303	25.4	16627	431	21.7	1050
01-TKD-TRA5-1	2131	57.2	33	529	1.2	1680	4549	33.1	12606	998	22.5	2048
01-TKD-TRAB-2	3578	33.9	96.1	3142	19.3	1120	>20000	19.5	2537	690	>100	4952
01-TKD-TRB2-1	470	13.4	71.4	907	8.8	1920	18814	23.9	4677	573	>100	3101

ادامه جدول ۲. داده‌های تجزیه Fire Assay (طلا، میلی گرم در تن) و ICP-OES (سایر عناصر، گرم در تن) نمونه‌های کانه‌دار در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲

Table 2 (Continued). Fire-Assay (Au, ppb), and ICP-OES (other elements, ppm) data of ore samples from the Tikmehdash 2 Au deposit

	Au	Ag	As	Ba	Cd	Cu	Mn	Mo	Pb	S	Sb	Zn
Detection Limit	5	5	0.5	5	0.1	1	5	0.5	1	50	0.5	1
01-TKD-TRC1-2	896	5.1	44.3	193	0.7	309	8017	34.	13029	548	62.	256
01-TKD-TRC3-1	1790	32.	69.3	105	33.	481	>20000	8.8	14855	475	40.	6599
01-TKD-TRC3-1	2422	36.	>10	175	23.	509	>20000	9.5	12681	640	36.	5434
01-TKD-TRC4-1	6130	15.	>10	118	17.	154	>20000	27.	3943	682	100	4946
01-TKD-TRC4-2	3079	65.	>10	128	32.	421	>20000	5.7	3516	519	100	8367
01-TKD-TRC5-2	4281	26.	>10	193	19.	184	>20000	31.	9450	818	100	6170
01-TRC6-TKD1	6022	27.	>10	992	16.	251	>20000	30	5206	444	100	3646
01-TKD-TRC6-1	663	2.3	13.9	796	1.1	157	5258	4.2	320	420	70.	455
01-TKD-TRC6-3	4461	55.	100	684	13.	258	>20000	29.	6857	660	100	3192
01-TKD-TRC7-2	6098	33.	54.4	188	3.4	269	6300	23.	3760	462	100	455
01-TKD-TRC8-2	38	2	2.6	631	0.4	103	1815	1.5	436	238	10.	123
01-TKD-TRC9-1	7579	8	52.3	115	0.2	182	14371	3.8	19	420	10.	107
01-TKD-TRC9-5	156	2.4	100	923	0.3	401	15416	2.7	21	456	7.7	139
01-TKD-TR-D1	986	5.9	25.9	163	0.4	87	5056	11	495	664	83.	169
01-TKD-TRD1-3	778	71.	>10	366	8.1	656	>20000	13.	1702	514	100	2473
01-TKD-TRD2-2	23	6.8	19.7	313	3.7	372	6330	0.6	542	287	25.	258
01-TKD-TRD2-5	3173	2.9	13.9	696	0.4	83	6487	0.7	301	351	1.0	306
01-TKD-TRD3-2	213	12.	4.9	505	0.4	161	3006	3	284	345	20.	130
01-TKD-TRD4-1	117	3.6	12.9	874	0.4	105	4687	4.1	186	489	57.	200
01-TKD-TRE1-2	737	64.	100	719	17.	831	>20000	20.	>30000	647	100	1889
01-TKD-TRE1-1	7136	10.	100	744	6.1	125	>20000	54.	390	410	100	155
01-TK-A1-27.5-28	50	4.9	32.7	729	1.8	494	2853	5.3	441	775	18.	318
01-TK-C5-1-53.3-	1597	15	39.2	485	0.5	104	1773	3.4	5536	2220	32.	291
01-TK-C6-41.8-42	47	4.8	22.3	153	5	75	17622	8.9	382	582	1.3	1877
01-TK-C7-23.5-24.8	9658	71.	74.7	727	29.	730	>20000	12.	5829	408	100	2230
01-TKD-TRE2-5	4601	14.	100	688	3	139	10757	6.8	6405	434	100	827
01-TKD-TRE3-3/1	4728	38	100	808	3.2	760	12131	15.	2638	465	100	583
01-TK-D1-15.2-15.8	151	4.6	61.4	165	4.9	162	>20000	8.2	4145	625	22.	3000
01-TK-D1-16.9-18.3	4679	61.	83.7	401	12.	792	>20000	34	1082	534	100	5353
01-TK-D1-20.4-20.8	954	6.8	24.3	545	1.9	70	8502	5.4	231	319	35.	1330
01-TK-D2-63.5-64.3	5436	18.	45.6	446	1.1	113	4079	4.9	105	722	54.	421
01-TK-D2-82.7-83.5	232	2.8	5.8	919	0.3	25	14447	9.3	136	831	1.1	581
01-TK-D3-41.2-43.7	976	33.	77.7	977	2.5	247	>20000	14.	514	614	100	471
01-TK-D4-63.8-64.8	1496	59.	>10	153	4.9	502	16522	14.	5794	918	99.	915
01-TK-D4-64.8-65.2	3547	65.	>10	188	11.	640	>20000	19.	9373	515	100	2357
01-TK-D1-2-77.1-	121	4.2	20.1	117	2.2	159	1745	1.7	781	19912	36	841
01-TK-D1-2-109.8-	82	2.7	39.9	128	9.3	413	253	25.	1185	>20000	1.0	2213
01-TK-D1-2-151-	377	26.	37.8	629	40.	416	>20000	1.8	5213	11476	100	1451
01-TK-D2-3-74.1-	209	6.3	23.3	789	0.9	692	1526	5.6	478	3073	1.0	824
01-TK-D2-3-95.5-	931	51.	50.4	703	55.	493	>20000	4.8	6215	12242	100	1402
01-TKD-TRE0-3	16	0.7	37.5	878	0.3	16	2090	0.5	5	478	1.0	91
01-TKD-TRE0-7	23	0.5	42.2	123	0.3	26	1014	1.3	339	286	0.9	177

بحث و بررسی

محتوای عیار ی عناصر

بر اساس داده‌های **جدول ۱**، دامنه تغییرات عیارهای طلا در نمونه‌های تجزیه‌شده در شرکت زراآزما (۳۲ نمونه) بین ۲۴ میلی گرم در تن تا ۸۴/۹۷ گرم در تن اندازه‌گیری شده است. از بین ۳۲ نمونه تجزیه‌شده، تنها ۵ نمونه عیار کمتر از ۱۰۰ میلی گرم در تن (بین ۲۴ تا ۸۸ میلی گرم در تن) دارند و تعداد ۱۳ نمونه (حدود ۴۸ درصد نمونه‌ها) دارای عیارهای بالاتر از ۱ گرم در تن هستند. در داده‌های تجزیه‌ای شرکت نوین شیمیاری (۱۷ نمونه) تکراری انتخاب‌شده از بین ۳۲ نمونه ارسالی به شرکت زراآزما، دامنه تغییرات عیارهای طلا بین ۲۹ میلی گرم در تن تا ۸۸/۳۵ گرم در تن اندازه‌گیری شده است که از این نظر با داده‌های شرکت زراآزما مطابقت بسیار خوبی دارد. از بین ۱۷ نمونه تجزیه‌شده در این شرکت، تنها ۳ نمونه عیار کمتر از ۱۰۰ میلی گرم در تن (بین ۲۹ تا ۴۹ میلی گرم در تن) دارند و تعداد ۷ نمونه (حدود ۴۱ درصد نمونه‌ها) دارای عیارهای بالاتر از ۱ گرم در تن هستند.

بر اساس داده‌های **جدول ۲**، مقدار طلا در ۵۶ نمونه تجزیه‌شده بین ۱۶ میلی گرم در تن تا ۴۴/۶۲ گرم در تن (میانگین ۳/۵۴ گرم در

تن) متغیر است. بر همین اساس، مقادیر نقره بین ۰/۵۴ تا ۸۹/۳ گرم در تن (میانگین ۲۴/۹۵ گرم در تن)، مقادیر مس بین ۱۶ گرم در تن تا ۰/۸۳ درصد (میانگین ۰/۱۱ درصد)، مقادیر سرب بین ۵ گرم در تن تا بیش از ۳ درصد (میانگین ۰/۴۹ درصد) و مقادیر روی بین ۹ گرم در تن تا ۱/۲۵ درصد (میانگین ۰/۲۵ درصد) متغیر هستند. منگنز در بیشتر نمونه‌های تجزیه‌شده دارای تمرکزهای بالا (بیش از ۲ درصد) اندازه‌گیری شده است. محتوای مولیبدن و آنتیموان در برخی از نمونه‌ها بالا بوده و به ترتیب تا ۴۱۸ گرم در تن و بیشتر از ۰/۰۱ درصد می‌رسد. گوگرد در نمونه‌های تجزیه‌شده دارای تمرکز پایین است که می‌تواند بیانگر محتوای پایین کانی‌های سولفیدی در نمونه‌های تجزیه‌شده باشد.

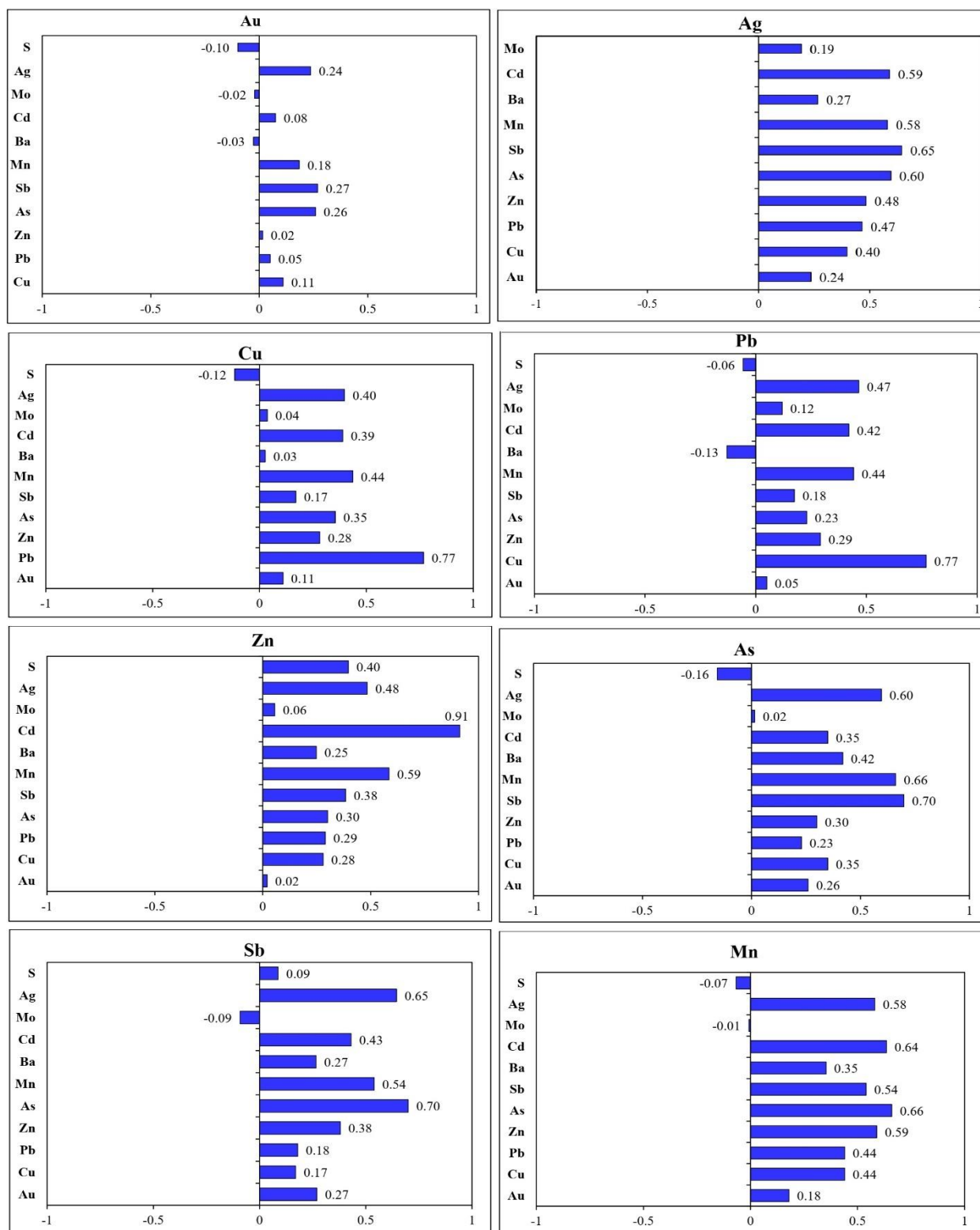
ضرایب همبستگی عناصر

ضرایب همبستگی عناصر کانه‌ساز در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ در **جدول ۳** و **شکل ۱۳** آورده شده است. بر این اساس، طلا دارای همبستگی مثبت ضعیف با عناصر نقره (۰/۲۴)، آنتیموان (۰/۲۷)، آرسنیک (۰/۲۶) و منگنز (۰/۱۸) بوده و همبستگی منفی بسیار ضعیفی با عناصر بارییم (۰/۰۳-)، مولیبدن (۰/۰۲-) و گوگرد (۰/۱-) دارد.

جدول ۳. ضرایب همبستگی عناصر (محاسبه‌شده بر مبنای **جدول ۲**) برای نمونه‌های کانسنگ در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲

Table 3. Elemental correlation coefficient (calculated based on **Table 2**) for ore samples at the Tikmehdash 2 Au deposit

	Au	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Mn	Ba	Cd	Mo	Ag	S
Au	1.00											
Cu	0.11	1.00										
Pb	0.05	0.77	1.00									
Zn	0.02	0.28	0.29	1.00								
As	0.26	0.35	0.23	0.30	1.00							
Sb	0.27	0.17	0.18	0.38	0.70	1.00						
Mn	0.18	0.44	0.44	0.59	0.66	0.54	1.00					
Ba	-0.03	0.03	-0.13	0.25	0.42	0.27	0.35	1.00				
Cd	0.08	0.39	0.42	0.91	0.35	0.43	0.64	0.14	1.00			
Mo	-0.02	0.04	0.12	0.06	0.02	-0.09	-0.01	-0.02	0.07	1.00		
Ag	0.24	0.40	0.47	0.48	0.60	0.65	0.58	0.27	0.59	0.19	1.00	
S	-0.10	-0.12	-0.06	0.40	-0.16	0.09	-0.07	-0.01	0.28	-0.08	-0.02	1.00



شکل ۱۳. نمودار همبستگی عناصر کانه‌ساز برای نمونه‌های کانسنگ در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲

Fig. 13. Correlation chart of ore-forming elements for ore samples at the Tikmehdash 2 Au deposit

ضعیف بین طلا و منگنز نیز می‌تواند بیانگر عدم همراهی این دو عنصر در یک مرحله کانه‌زایی باشد که با شواهد صحرایی و میکروسکوپی همخوانی دارد.

بررسی میان‌بارهای سیال

بررسی میان‌بارهای سیال بر روی کوارتزهای بلورین و شفاف موجود در رگه‌ها و سیمان گرمایی پرش‌های مراحل دوم (کوارتز-سولفید) و چهارم (کوارتز-اکسیدهای منگنز) کانه‌زایی انجام شد. به دلیل ریز بودن، هیچ میان‌بار سیالی در کوارتزهای موجود در مراحل اول و پنجم کانه‌زایی و همچنین کلسیت‌های موجود در رگه‌های مراحل سوم و پنجم کانه‌زایی بررسی نشد.

سنگ‌نگاری

میان‌بارهای سیال موجود در نمونه‌های کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ بیشتر از نوع اولیه هستند که اغلب به صورت پراکنده در متن کانی میزبان قابل مشاهده هستند. به میزان اندک، در برخی از نمونه‌ها میان‌بارهای سیال ثانویه کاذب نیز قابل مشاهده است. بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری و بر مبنای نوع فازهای موجود در دمای اتاق، ۴ نوع میان‌بار سیال در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ قابل شناسایی است (شکل ۱۴- A تا F): ۱- میان‌بارهای دو فاز غنی از مایع (LV): در درجه پرشدگی در این نوع میان‌بارها بین ۶۰ تا ۹۵ درصد است. در مجموع و تقریباً ۸۰ درصد میان‌بارهای سیال مشاهده شده از این نوع هستند. ۲- میان‌بارهای دو فاز غنی از گاز (VL): درجه پرشدگی این نوع میان‌بارها کمتر از ۵۰ درصد و فاز گازی آنها خیلی بزرگ است. ۳- میان‌بارهای سه فاز حای فاز جامد (LVS): تعداد این نوع میان‌بارها بسیار کم بوده و به کمتر از ۳ درصد میان‌بارها می‌رسد. ۴- میان‌بارهای تک فاز گاز (V): این نوع میان‌بارها کاملاً تیره دیده می‌شوند و نشان‌دهنده فراوانی گاز در سیالات کانه‌دار هستند. حدود ۱۵ درصد میان‌بارها از این نوع هستند. به صورت محدود، در برخی از نمونه‌ها، میان‌بارهای تک فاز مایع (L) قابل مشاهده است. این نوع میان‌بارها معمولاً نتیجه پدیده باریک‌شدگی یا دم‌بردگی در نظر گرفته

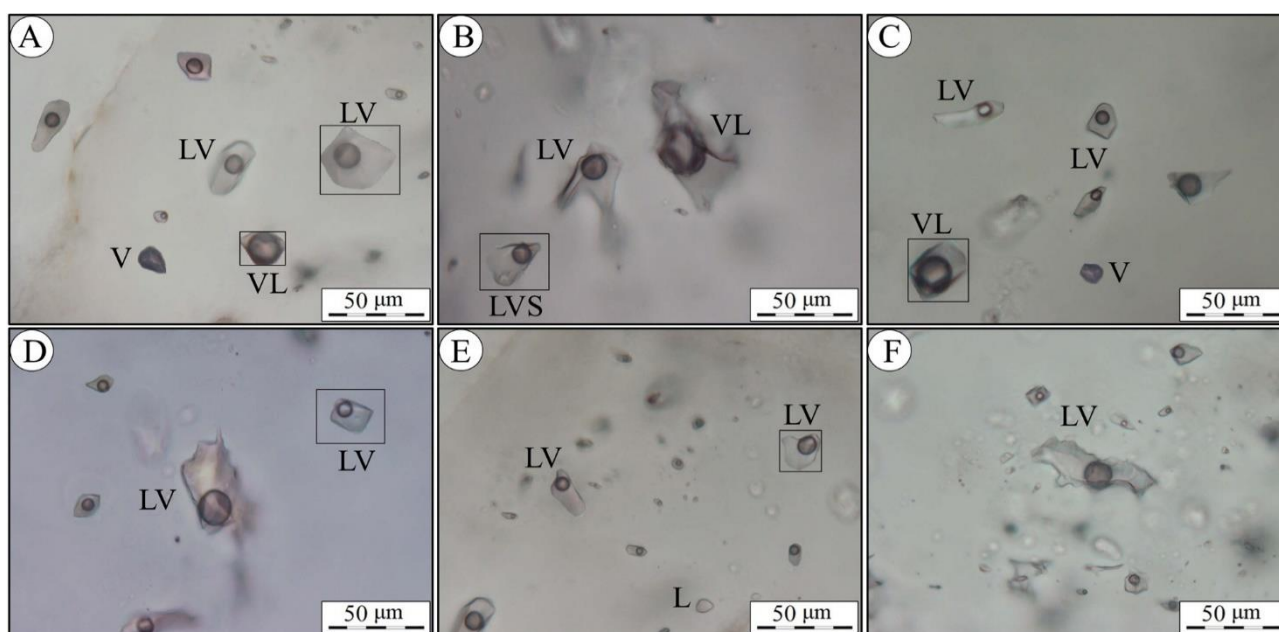
نقره دارای همبستگی مثبت متوسط با آنتیموان (۰/۶۵)، آرسنیک (۰/۶)، منگنز (۰/۵۸)، کادمیم (۰/۵۹)، روی (۰/۴۸)، سرب (۰/۴۷) و مس (۰/۴) است. مس دارای همبستگی مثبت قوی با سرب (۰/۷۷) و همبستگی مثبت متوسط با منگنز (۰/۴۴)، نقره (۰/۴)، کادمیم (۰/۳۹) و آرسنیک (۰/۳۵) بوده و همبستگی منفی ضعیفی با گوگرد (۰/۱۲-) دارد. سرب دارای همبستگی مثبت قوی با مس (۰/۷۷) و همبستگی مثبت متوسط با منگنز (۰/۴۴)، نقره (۰/۴۷) و کادمیم (۰/۴۲) بوده و همبستگی مثبت ضعیفی با روی (۰/۲۹)، آرسنیک (۰/۲۳) و آنتیموان (۰/۱۸) دارد. روی همبستگی مثبت بسیار قوی با کادمیم (۰/۹۱)، همبستگی مثبت متوسط با منگنز (۰/۵۹)، نقره (۰/۴۸)، گوگرد (۰/۴) و آنتیموان (۰/۳۸) و همبستگی مثبت ضعیف با آرسنیک (۰/۳)، مس (۰/۲۸)، سرب (۰/۲۹) و باریم (۰/۲۵) نشان می‌دهد. آرسنیک همبستگی مثبت قوی با آنتیموان (۰/۷)، منگنز (۰/۶۶) و نقره (۰/۶) دارد. آنتیموان نیز همبستگی مثبت قوی با نقره (۰/۶۵) و آرسنیک (۰/۷) و همبستگی مثبت متوسط با منگنز (۰/۵۴)، کادمیم (۰/۴۳) و روی (۰/۳۸) نشان می‌دهد. منگنز همبستگی مثبت متوسط با مس (۰/۴۴)، سرب (۰/۴۴)، روی (۰/۵۹)، آنتیموان (۰/۵۴)، کادمیم (۰/۶۴)، نقره (۰/۵۸)، باریم (۰/۳۵) و آرسنیک (۰/۶۶) داشته و همبستگی مثبت ضعیفی با طلا (۰/۱۸) نشان می‌دهد. منگنز همبستگی مشخصی با مولیبدن و گوگرد نشان نمی‌دهد.

به طور کلی، با توجه به داده‌های جدول ۳ می‌توان اظهار داشت، فلزهای پایه (سرب، روی و مس) ارتباط زایشی ضعیفی با طلا دارند. همبستگی مثبت قوی عناصر آرسنیک، آنتیموان و نقره با یکدیگر و همچنین همبستگی مثبت ضعیف تا متوسط این عناصر با طلا می‌تواند بیانگر تشکیل این عناصر در ارتباط با یک فاز کانه‌زایی باشد. همبستگی مثبت ضعیف طلا و نقره نشان می‌دهد ذرات طلای آزاد مشاهده شده در نمونه‌ها اغلب طلای خالص بوده و الکتروم نیستند. همبستگی مثبت متوسط نقره با سرب می‌تواند بیانگر حضور بخشی از نقره در شبکه گالن باشد. همبستگی مثبت کادمیم و روی می‌تواند به دلیل شباهت ویژگی‌های شیمیایی Zn^{2+} با Cd^{2+} و جایگزینی Cd^{2+} به جای Zn^{2+} در ساختار اسفالریت باشد. وجود همبستگی مثبت

داده‌های ریزدماسنجی

در این بررسی، تعداد ۱۳۰ میان‌بار سیال اولیه نوع LV شامل ۵۷ سیال در کوارتزهای مرحله دوم کان‌زایی و ۷۳ سیال در کوارتزهای مرحله چهارم کان‌زایی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، دمای ذوب اولیه یخ (T_{fm}) اندازه‌گیری‌شده در تمامی میان‌بارهای سیال بررسی‌شده در کوارتزهای دو مرحله کان‌زایی در محدوده ۲۱- تا ۳۰- درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند (جدول ۴) که می‌تواند بیانگر وجود نمک‌های سدیم و پتاسیم در سیالات گرمابی باشد (Roedder, 1984; Shepherd et al., 1985; Davis et al., 1990; Goldstein, 2003).

می‌شوند (Kouhestani et al., 2022). در اغلب نمونه‌های بررسی‌شده، میان‌بارهای سیال نوع LV، VL و V در کنار یکدیگر قابل مشاهده هستند. در هیچ یک از میان‌بارهای سیال بررسی‌شده، فاز مایع دی اکسید کربن مشاهده نشد. از لحاظ ریخت‌شناسی، میان‌بارهای سیال بررسی‌شده بیشتر دارای شکل‌های منفی بلور و بی‌شکل هستند. گاهی شکل‌های بیضوی کشیده، چندوجهی، مثلثی، مربعی و مستطیلی هم دیده می‌شود. اندازه میان‌بارهای سیال معمولاً بین ۵ تا ۲۰ میکرون در تغییر هستند. در برخی از نمونه‌ها، میان‌بارهای سیال تا اندازه ۳۰ میکرون هم قابل مشاهده است.



شکل ۱۴. تصویرهای میکروسکوپی (در دمای اتاق و نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) از انواع میان‌بارهای سیال در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲. A تا C: میان‌بارهای سیال اولیه دوفازی نوع LV با شکل‌های بیضوی، چندوجهی، بی‌شکل و منفی بلور در کنار میان‌بارهای سیال دوفازی نوع VL و تک فازی نوع V در کوارتزهای مرحله دوم کان‌زایی نشان‌دهنده رخداد جوشش. D تا F: میان‌بارهای سیال اولیه نوع LV با شکل‌های بی‌شکل و چندوجهی در کوارتزهای مرحله چهارم کان‌زایی. میان‌بارهای سیال مشخص‌شده در کادرهای مستطیلی مربوط به عمق‌های مختلفی هستند که برای وضوح به این صورت نمایش داده شده‌اند (L: مایع، V: بخار، S: جامد).

Fig. 14. Photomicrographs (at room temperature, plane-polarized light) of fluid inclusion types from Tikmehdash 2 Au deposit. A–C: Elliptical, polyhedral, anhedral, and negative-shaped primary two-phase LV fluid inclusions coexisting with VL, and one-phase V fluid inclusions in stage 2 quartz as evidence of boiling, and D–F: Anhedral, and polyhedral primary two-phase LV fluid inclusions in stage 4 quartz. Fluid inclusions enclosed in the rectangles are from different depths and were brought to focus as insets (L: liquid, V: vapor, S: solid).

تصحیح دمایی بر روی مقادیر دمای همگن‌شدن میان‌بارهای سیال اعمال نشد. بر این اساس، دمای همگن‌شدن نهایی ($T_{h(total)}$) میان‌بارهای سیال موجود در کوارتزهای مرحله دوم و چهارم کان‌زایی به ترتیب در محدوده بین ۲۲۷ تا ۲۹۲ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۲۶۹ درجه سانتی‌گراد) و ۱۵۳ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۲۲۴ درجه سانتی‌گراد) است (جدول ۴). مقادیر چگالی برای میان‌بارهای سیال در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ بین ۰/۷۵ تا ۰/۹۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد (جدول ۴).

دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{m-ice}) در میان‌بارهای سیال موجود در کوارتزهای مرحله دوم کان‌زایی بین ۷- تا ۴/۳- درجه سانتی‌گراد و در کوارتزهای مرحله چهارم کان‌زایی بین ۳/۷- تا ۰/۴- درجه سانتی‌گراد است (جدول ۴). بر این اساس و با توجه به رابطه بودنار (Bodnar, 1993)، میزان شوری میان‌بارهای سیال در کوارتزهای مرحله دوم کان‌زایی بین ۶/۹ تا ۱۳/۴ (میانگین ۹/۱) و در کوارتزهای مرحله چهارم کان‌زایی بین ۰/۷ تا ۶ (میانگین ۴/۶) درصد وزنی معادل نمک طعام است (جدول ۴). تمامی میان‌بارهای سیال بررسی‌شده، به فاز مایع همگن شدند. به علت وقوع رخداد جوشش، هیچ‌گونه

جدول ۴. خلاصه نتایج بررسی‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال اولیه نوع LV در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲. اعداد داخل پرانتز، مقدار میانگین اندازه‌گیری شده است.

Table 4. Microthermometric data summary for primary LV fluid inclusions from Tikmehdash 2 Au deposit. The digit in the parenthesis is the mean value of inclusion measured.

Mineral	Size (μm)	T_{fm} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{m-ice} ($^{\circ}\text{C}$)	wt.% NaCl	$T_{h(total)}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Density (g/cm^3)
Stage 2 Qz (n = 57)	5–25	–21 to –30	–7.0 to –4.3	6.9–13.4 (9.1)	227–292 (269)	0.75–0.91
Stage 4 Qz (n = 73)	1–43	–21 to –30	–3.7 to –0.4	0.7–6.0 (4.6)	153–250 (224)	0.81–0.96

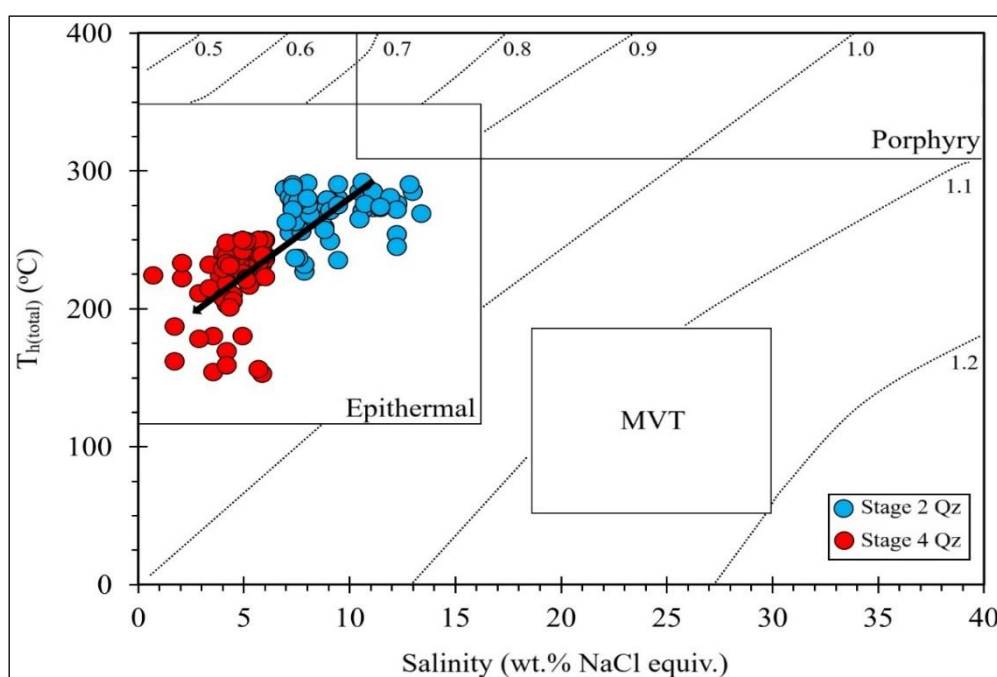
در فرایند اختلاط سیالات، بین دمای همگن‌شدن نهایی و شوری سیالات کان‌ساز، رابطه مستقیم و در فرایند جوشش، رابطه معکوس گزارش شده است (Shepherd et al., 1985; Zhai et al., 2009; Li et al., 2019; Zhai et al., 2013; Canet et al., 2011). در نمودار دمای همگن‌شدن نهایی و شوری (شکل ۱۵)، داده‌های میان‌بارهای سیال در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ در محدوده کانسارهای اپی ترمال و نزدیک به محدوده سیالات ماگمایی (Roedder, 1984) قرار می‌گیرند. شوری سیالات ماگمایی را اغلب بین ۵ تا ۱۰ درصد وزنی معادل نمک طعام در نظر گرفته‌اند (Hedenquist and Lowenstern, 1994; Yardley, 2005; Simmons and Brown, 2006). هرچند سیالات ماگمایی با شوری بیشتر نیز معمولاً وجود دارد. لذا، محدوده نسبتاً گسترده داده‌های شوری (۰/۷ تا ۱۳/۴ درصد وزنی معادل نمک طعام) برای

تحول سیال کان‌ساز

سیالات زیادی در شکل‌گیری و تحول کانسارهای گرمایی نقش دارند (Zhu et al., 2001; Cooke and McPhail, 2001; Fan et al., 2011; Zhai et al., 2013). داده‌های میان‌بارهای سیال در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ نشان می‌دهد سیالات مسئول کان‌زایی در این کانسار با یک سامانه $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ با دمای بالا تا متوسط و شوری متوسط تا پایین مرتبط است (جدول ۴). تکامل این سامانه از مرحله دوم کان‌زایی به مرحله چهارم کان‌زایی، با کاهش دما از حدود ۲۶۹ درجه سانتی‌گراد به ۲۲۴ درجه سانتی‌گراد تغییر کرده است. بر پایه نمودار دمای همگن‌شدن نهایی در مقابل میزان شوری (شکل ۱۵)، داده‌های میان‌بارهای سیال در کوارتزهای کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ بیانگر اختلاط یک سیال با دمای بالا و شوری متوسط با یک سیال دیگر با دما و شوری پایین‌تر است.

و در نتیجه افزایش بیشتر شوری سیال باقی مانده منجر می‌شود (Wilkinson, 2001; Canet et al., 2011). این تفسیر برای مقادیر شوری کم تا متوسط میان‌بارهای سیال در بسیاری از سامانه‌های کانه‌زایی اپی ترمال استفاده شده 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).

میان‌بارهای سیال در کانسار طلای تیکمه‌داش ۲ می‌تواند نشان‌دهنده اختلاط سیالات ماگمایی و جوی باشد. علاوه بر این، وجود برش‌های گرمایی، کلسیت‌های تیغه‌ای و کوارتزهای با بافت پرماند، کاکلی و قشرگون در این کانسار بیانگر رخداد جوشش حین تکامل سیال کانه‌ساز در سامانه گرمایی در کانسار طلای تیکمه‌داش ۲ است. جوشش سیال اغلب به تفکیک شدید یک سیال شور به فازهای بخار



شکل ۱۵. نمودار دمای همگن شدن نهایی در مقابل شوری برای میان‌بارهای سیال اولیه نوع LV در کانسار طلای تیکمه‌داش ۲. محدوده‌های مشخص شده برای کانسارهای پورفیری، اپی ترمال و MVT بر اساس ویلکینسون (Wilkinson, 2001) ترسیم شده‌اند. خطوط مقطع نشان‌دهنده چگالی سیالات در سامانه‌های H₂O-NaCl است (Haas, 1971).

Fig. 15. Total homogenization temperatures vs. equivalent salinity diagram for primary LV fluid inclusions from Tikmehdash 2 Au deposit. 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).

حضور هم‌زمان میان‌بارهای سیال دوفازی نوع LV و VL در یک مجموعه از میان‌بارهای سیال است (Bodnar et al., 1985a; White and Hedenquist, 1995; Moncada et al., 2017). میان‌بارهای سیال تک فازی نوع V نیز شواهدی دیگر از رخداد

شواهد جوشش سیال کانه‌دار

داده‌های میان‌بارهای سیال و شواهد بافتی در کانسار طلای تیکمه‌داش ۲ بیانگر رخداد جوشش حین تکامل سامانه کانه‌زایی در این کانسار است. یکی از شواهد اصلی رخداد جوشش در سامانه‌های اپی ترمال

جوشش در سیالات کانه‌ساز هستند (Ronacher et al., 2000; Moncada et al., 2017). حضور هم‌زمان میان‌بارهای سیال نوع LV، VL و V در کانی‌های کوارتز مرحله دوم در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ می‌تواند نشان‌دهنده 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 یا از طریق نشت و پدیده باریک‌شدگی (Rusk et al., 2008) نیز تعبیر شود.

علاوه بر این، احتمال رخداد جوشش با حضور کلسیت‌های تیغه‌ای و کوارتزهای با بافت‌های پَرمانند، کاکلی و قشرگون در رگه‌ها و سیمان گرمابی برش‌ها مطابقت دارد. بافت پَرمانند کوارتز، محصول فوق اشباع شدن سیال ناشی از کاهش سریع فشار مرتبط با رخداد جوشش و به دنبال آن کاهش دماست که سبب ته‌نشست سیلیس بی‌شکل می‌شود (Henley and Hughes, 2000). بافت‌های کاکلی و قشرگون (پوسته‌ای) از بافت‌های اولیه سیلیس هستند که به ته‌نشست سریع و متناوب کوارتز نوع کلسدونی در فضا‌های خالی در سامانه‌های اپی ترمال کم‌عمق مرتبط هستند (Roedder, 1984; Bodnar et al., 1985a; Fournier, 1985). این بافت‌ها در حین باز شدن سریع درز و شکستگی‌های مرتبط با کاهش فشار و به دنبال آن کاهش سریع دمای مرتبط با فرایند جوشش تشکیل می‌شوند (Henley and Hughes, 2000; Taylor, 2009; Moncada et al., 2012).

رخداد جوشش سیالات در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ با رخداد گسترده برش‌های گرمابی 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 گرمابی شوند (Cole and Drummond, 1986; Jobson et al., 1994; Jébrak, 1997). علاوه بر این، رگه‌های کانه‌دار در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ دارای مرز تماس مستقیم با واحدهای میزبان خود هستند. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که رگه و رگچه‌های کانه‌دار از طریق پر کردن فضا‌های خالی تحت فشار هیدروستاتیک تشکیل شده‌اند (Hedenquist et al., 1998; Liu, 1998).

تعیین عمق و فشار تشکیل

معمولاً کانسارهای اپی ترمال در اعماق چند صد متری زیر سطح ایستایی قدیمی برابر با چند ده بار فشار هیدروستاتیک تشکیل می‌شوند (Cooke and Simmons, 2000; Hedenquist et al., 2000; Simmons et al., 2005). در چنین شرایط فشار پایینی، دمای همگن شدن نهایی میان‌بارهای سیال به عنوان تخمینی خوب از دمای سیال کانه‌ساز در نظر گرفته می‌شوند (Takács et al., 2017). حضور هم‌زمان میان‌بارهای سیال نوع LV و VL در کوارتزهای موجود در رگه‌ها و برش‌های گرمابی در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ نشان می‌دهد که سیالات گرمابی مسئول کانه‌زایی در این کانسار به نقطه اشباع بخار رسیده‌اند. در این حالت، دمای همگن شدن نهایی میان‌بارهای سیال نوع LV را می‌توان به عنوان دمای به دام افتادن تلقی کرده و فشار سیال در این دما را به عنوان فشار به دام افتادن لحاظ کرد (Roedder and Bodnar, 1980; Ouyang et al., 2014; Rabiei et al., 2017). لذا، به پیروی از آلبنسون (Albinson, 1988) و هدنکوئیست و همکاران (Hedenquist et al., 1998)، بالاترین دمای میان‌بارهای سیال نوع LV (۲۵۰ تا ۲۹۲ درجه سانتی‌گراد) برای تخمین فشار سیالات در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ استفاده شد. بر اساس داده‌های تجربی هاس (Haas, 1971) و بودنار و همکاران (Bodnar et al., 1985b)، فشار به دام افتادن سیالات در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ بین ۴۵ تا ۷۱ بار به دست می‌آید. هرچند این مقادیر فشار پایین نمی‌تواند بیانگر مقادیر دقیق فشار سیال باشد؛ اما احتمالاً نشان‌دهنده شرایطی است که جوشش در آن محل رخ داده است. با توجه به میانگین چگالی میان‌بارهای سیال (۰/۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، عمق کانه‌زایی در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ بین ۴۶۰ تا ۷۳۰ متر زیر سطح ایستایی قدیمی قابل محاسبه است که منطبق با عمق کانه‌زایی در سامانه‌های اپی ترمال

(Simmons et al., 2005; Pirajno, 2009) است.

نوع کان‌زایی

مقایسه ویژگی‌های زمین‌شناسی، کان‌زایی، دگرسانی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ با انواع کانسارهای طلا نشان می‌دهد که این کانسار را می‌توان در دسته کانسارهای اپی ترمال طبقه‌بندی کرد. این کانسارها که در بخش‌های کم‌عمق (کمتر از ۱/۵ کیلومتر) پوسته در کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای و جزایر کم‌اندکی تشکیل می‌شوند (Cooke and Simmons, 2000; Sillitoe and Hedenquist, 2005; Simmons et al., 2005)، علاوه بر طلا و نقره، حاوی مقادیر بالایی از فلزهای پایه (سرب، روی و مس) بوده و بر اساس ویژگی‌های کان‌زایی، نوع دگرسانی‌های گرمایی و ترکیب کانی‌شناسی به انواع سولفیداسیون بالا، سولفیداسیون پایین و سولفیداسیون حدواسط تفکیک می‌شوند (White and Hedenquist, 1990; Cooke and Simmons, 2000; John, 2001; Einaudi et al., 2003; Sillitoe and Hedenquist, 2005; Simmons et al., 2005; Saunders et al., 2014; Wang et al., 2019).

کانسارهای اپی ترمال نوع سولفیداسیون بالا با دگرسانی گسترده و شدید سیلیسی و آرژیلیک پیشرفته همراهی می‌شوند. این نوع کانسارها، ارتباط نزدیکی با کانسارهای پورفیری داشته (Sillitoe, 2010) و سیالات کان‌زایی مسئول تشکیل آنها به شدت اسیدی (pH = 0) است که این امر موجب دگرسانی گسترده در سنگ میزبان آنها می‌شود. این کانسارها به صورت رگه‌ای نیز دیده می‌شوند؛ اما عمده کان‌زایی در آنها به صورت دانه‌پراکنده و جانشینی در سنگ میزبان دگرسان‌شده قابل مشاهده است (White and Hedenquist, 1995). کانسارهای اپی ترمال نوع سولفیداسیون پایین حاصل فعالیت سامانه‌های زمین گرمایی متشکل از رگه‌های کوارتزی دارای فلزهای گران‌بها و مقادیر متغیری از فلزهای پایه هستند که از سیالات با pH نزدیک به خنثی ته‌نشست شده‌اند (Hedenquist et al., 2000). این کانسارها برخلاف نوع سولفیداسیون بالا، به صورت رگه‌ای و استوک‌ورک دیده شده و کان‌زایی دانه‌پراکنده و جانشینی در آنها

کمتر دیده می‌شود. کانسارهای اپی ترمال نوع سولفیداسیون پایین با توجه به ویژگی‌هایی از جمله میزان شوری و دمای سیال کان‌ساز و مقادیر فلزهای پایه، به دو گروه تقسیم شده‌اند. گروه اول حاوی فلزهای گران‌بها بوده و میزان فلزهای پایه در آنها لندک است. گروه دوم، ذخایر فلزهای گران‌بها و فلزهای پایه هستند که مقدار فلزهای پایه در آنها بیش از گروه اول بوده و در برخی از موارد از طلا فقیر و از نقره غنی هستند. برای تفکیک بیشتر این دو گروه، هدنکوئیست و همکاران (Hedenquist et al., 2000) گروه دوم را سولفیداسیون حدواسط نام‌گذاری کرده‌اند.

نتایج بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ نشان می‌دهد: ۱- کان‌زایی طلا در این کانسار به صورت رگه‌های سیلیسی درون ساختارهای گسلی رخ داده و دارای سنگ‌های میزبان آتشفشانی-رسوبی ائوسن و میوسن است. ۲- دگرسانی‌های گرمایی در تیکمه‌دش ۲ دارای کانی‌های دگرسانی دما پایین تا متوسط مانند کلسیت و سریسیت است. ۳- کان‌های معدنی در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ شامل پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت (غنی از آهن)، طلای آزاد و آرسنوپیریت همراه با مقادیر اندکی تنانتیت-تراهدریت و پیرولووسیت و پسولوملان هستند که با کانی‌های باطله کوارتز، کلسیت و باریت همراهی می‌شوند. ۴- ساخت و بافت‌های موجود در ذخایر اپی ترمال مانند رگه-رگچه‌ای، برشی، شانه‌ای، کاکلی، پرماند، دانه‌پراکنده، قشرگون، گل کلمی، تیغه‌ای و پُرکننده فضای خالی به خوبی در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ توسعه یافته است. مقایسه این ویژگی‌ها با انواع کانسارهای اپی ترمال (جدول ۵) نشان می‌دهد که این کانسار از نظر شوری سیالات کان‌ساز، عمق کان‌زایی و تا حدودی الگوی دگرسانی‌ها با کانسارهای اپی ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط مشابه است؛ اما از نظر سنگ میزبان، کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ، عناصر فلزی (مقادیر بالای طلا و نقره همراه با مقادیر پایین فلزهای پایه) و نوع رخداد طلا (طلای آزاد)، بیشترین شباهت را با کانسارهای اپی ترمال نوع سولفیداسیون پایین دارد.

جدول ۵. مقایسه ویژگی‌های اصلی کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ با انواع مختلف کانسارهای اپی‌ترمال

Table 5. Comparison of main characteristics of the Tikmehdash 2 Au deposit with different types of epithermal deposits

	Tikmehdash 2	Epithermal deposits		
		Low-sulfidation	Intermediate-sulfidation	High-sulfidation
Host rock	Volcano-sedimentary units	Basalt-rhyolite	Andesite-rhyodacite	
Ore controls	Faults and fractures	Extensional to strike-slip faults		Arc parallel faults, diatreme, hydrothermal breccias
Key ore minerals	Py, Ccp, Gn, Fe-rich Sp, Au, Apy, Tnt-Ttr	Sp, Gn, Tnt-Ttr, Ccp, Apy, Prg, Acn	Fe-poor Sp, Gn, Tnt-Ttr, Ccp, Stb	Eng, Lzn, Fmt, Cv, Dg
Gangue minerals	Qz, Cal, Brt	Qz, Adl, non-Mn bladed Cal, Brt, Clt, Fl	Qz, Mn Cal, Brt	Qz, Alu, Anh, Brt
Hydrothermal alteration	Silicification, intermediate argillic, carbonatization, propylitic	Argillic, silicification, carbonatization	Sericitization, intermediate, argillic, silicification, propylitic	Sericitization, advanced argillic, silicification, propylitic
Ore textures	Vein-veinlet, brecciated, comb, cockade, crustiform, plumose, colloform, bladed, vug infill	Vein-veinlet, comb, bladed, replacement, colloform, crustiform brecciated	Vein-veinlet, comb, crustiform, vug infill, cockade	Vuggy Qz, vein-veinlet, cockade, vug infill, brecciated, comb, replacement
Metal associations	Pb, Zn, Cu (Ag, As, Sb)	Au, Ag (Zn, Pb, Cu, Mo, As, Sb, Hg)	Au, Ag, Pb, Zn, Cu (Mo, As, Sb)	Au, Ag, Cu, As, Sb (Zn, Pb, Bi, W, Mo, Sn, Hg)
Ag/Au ratio	0.1–5	0.2–5	10–1500	1–10 (often > 20)
Temperature and salinity	153–292 °C, 0.13–7.4 wt.% NaCl equ.	150–300 °C, < 2 wt.% NaCl equ.	200–300 °C, 0–23 wt.% NaCl equ.	180–320 °C, < 5 to ~10 wt.% NaCl equ.
Depth of formation	460–730 m	< 300 m	300–800 m, rarely >1000 m	< 500–1000 m
Fluid characteristics	Meteoric > magmatic	Meteoric > magmatic	Magmatic-meteoric	Magmatic > meteoric
References	Hashempour (2025), This study	White and Hedenquist (1990); Cooke and Simmons (2000); Hedenquist et al. (2000); Albinson et al. (2001); Sillitoe and Hedenquist (2005); Simmons et al. (2005); Saunders et al. (2014); Wang et al. (2019)		

Abbreviations: Acn: acanthite, Adl: adularia, Alu: alunite, Anh: anhydrite, Apy: arsenopyrite, Brt: barite, Cal: calcite, Ccp: chalcopryrite, Clt: celestine, Cv: covellite, Dg: digenite, Eng: enargite, Fl: fluorite, Fmt: famatinite, Gn: galena, Ill: illite, Lzn: luzonite, Prg: pyrrargyrite, Py: pyrite, Qz: quartz, Sd: siderite, Ser: sericite, Sp: sphalerite, Stb: stibnite, Tnt: tennantite, Ttr: tetrahedrite. Abbreviations after [Whitney and Evans \(2010\)](#).

زایش کانه‌زایی

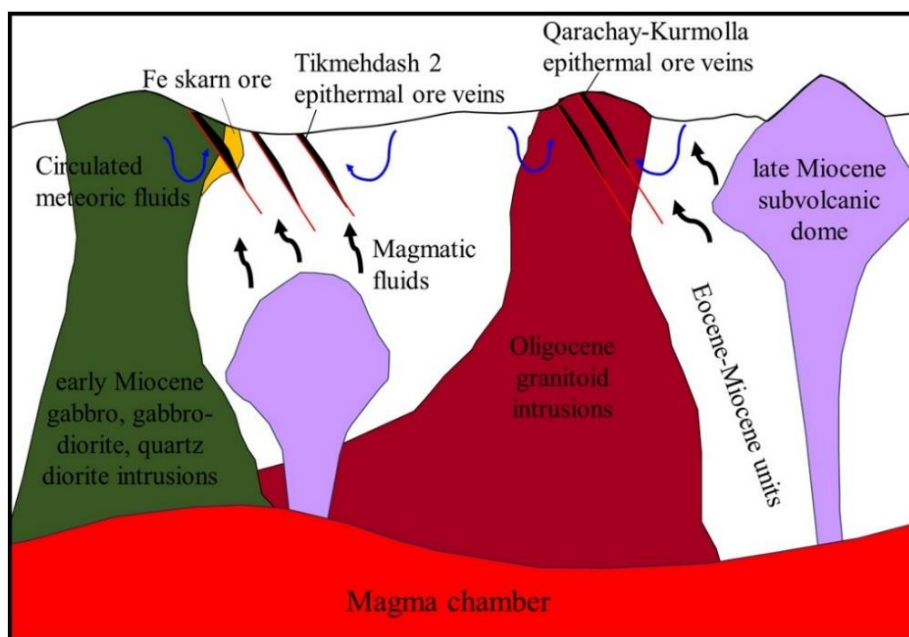
سیالات کانه‌ساز در کانسارهای اپی ترمال، مخلوطی از سیالات ماگمایی و جوی هستند (Sillitoe and Hedenquist, 2005; Simmons et al., 2005). ته‌نشست فلزهای پایه و گران‌بها در این کانسارها مرتبط با فرایندهای جوشش، اختلاط سیالات، واکش سیال-سنگ و یا مجموعه‌ای از آنهاست (Hemley et al., 1987; Giggenbach, 1992; Hemley and Hunt, 1992; Hayba, 1997; Hedenquist et al., 2000; Cooke and McPhail, 2001; Federico et al., 2002; Zhai et al., 2009; Lesage et al., 2013; Corral et al., 2017; Tindell et al., 2018). جوشش سیالات اغلب در بخش‌های بالایی سامانه کانه‌زایی که نفوذپذیری بیشتر است، رخ داده است و در بیشتر کانسارهای اپی ترمال عامل اصلی ته‌نشست و غنی‌شدگی فلزهای گران‌بها محسوب می‌شود (John et al., 2003; Koděra et al., 2005; Gamarra et al., 2015; Kouhestani et al., 2013). در مقابل، اختلاط سیالات در بخش‌های پایینی و حاشیه‌ای سامانه کانه‌زایی که نفوذپذیری کمتر است، رخ داده و عامل مهم در ته‌نشست فلزهای پایه قلمداد می‌شود (Spycher and Reed, 1989; Rossetti and Colombo, 1999; Yilmaz et al., 2007, Yilmaz et al., 2010; Márquez-Zavalía and Heinrich, 2016).

در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲، رگه‌های کانه‌دار ارتباط مکانی نزدیکی با توده‌های گابرو-گابرو دیوریتی و کوارتز دیوریتی میوسن زیرین (Kouhestani, 2025) دارند. لذا چنین به نظر می‌رسد که سیالات گرمایی مشتق شده از این توده‌ها در تشکیل رگه‌های کانه‌دار منطقه نقش داشته باشد. با این وجود، بررسی‌های دقیق صحرایی نشان می‌دهد رگه‌های کانه‌دار در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ علاوه بر قطع کردن توده‌های گابرو-گابرو دیوریتی و کوارتز دیوریتی، هاله‌های هورنفلسی و کانه‌زایی آهن اسکارنی ایجاد شده توسط این توده‌ها در واحدهای سنگی انوسن را نیز قطع کرده‌اند. از این رو، تشکیل رگه‌های کانه‌دار، جوان‌تر از توده‌های مزبور است. در فاصله هوایی حدود ۵ تا ۱۰ کیلومتری جنوب منطقه و در کانه‌زایی‌های فلزهای پایه و گران‌بهای قزل‌احمد و قره‌چای-کورملا، واحدهای

سنگی انوسن و توده‌های گرانیتوئیدی الیگوسن، میزبان رگه‌های اپی ترمال معرفی شده‌اند (Alizadeh et al., 2021; Hassani, 2023). این پژوهشگران عامل کانه‌زایی در این منطقه را توده‌های گرانیتوئیدی الیگوسن در نظر گرفته‌اند؛ اما قطع شدن این توده‌ها توسط رگه‌های اپی ترمال به وضوح نشان می‌دهد رگه‌های مزبور از نظر سنی از توده‌های گرانیتوئیدی میزبان خود جوان‌تر هستند. بررسی‌های دقیق صحرایی بیانگر وجود رخنمون گنبد‌های نیمه‌آشفشانی داسیتی-ریوداسیتی (Behrouzi et al., 1998) در جنوب تا جنوب شرق منطقه مورد بررسی و کانه‌زایی‌های مزبور است که می‌توان ارتباط زمانی و مکانی بین آنها و کانه‌زایی‌های اپی ترمال منطقه در نظر گرفت. داده‌های سن‌سنجی برای این گنبد‌ها در دسترس نیست؛ اما بر اساس روابط صحرایی، سن میوسن بالایی را می‌توان به آنها نسبت داد. این امر نشان‌دهنده ارتباط کانه‌زایی‌های اپی ترمال موجود در زیرپهنه فلززایی میله-بستان آباد با فعالیت‌های ماگمایی-گرمایی ماگماتیسیم میوسن بالایی است که توسط صحبتلو (Sohbatloo, 2021) و صحبتلو و همکاران (Sohbatloo et al., 2023) نیز بیان شده است. در چنین حالتی، گنبد‌های نیمه‌آشفشانی داسیتی-ریوداسیتی میوسن بالایی به عنوان موتور حرارتی عمل کرده و سبب چرخش سیالات جوی و توسعه پهنه‌های دگرسانی و کانه‌زایی در منطقه شده‌اند. احتمال اینکه بخشی از ماده معدنی و سیالات گرمایی از این گنبد‌ها منشأ گرفته باشد نیز وجود دارد. در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲، داده‌های میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که سیالات با منشأ ماگمایی (دمای ۲۹۲ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱۳/۴ درصد وزنی معادل نمک طعام) از طریق ساختارهای گسلی به سطوح کم‌عمق منتقل و سپس از طریق فرایندهای جوشش و اختلاط با سیالات جوی (دمای ۱۵۳ درجه سانتی‌گراد و شوری ۰/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام) سبب ته‌نشست فلزهای کانه‌ساز شده‌اند. در چنین سامانه‌هایی، معمولاً جوشش سیالات و تا حدودی اختلاط سیالات سبب ته‌نشست طلا و نقره از کمپلکس‌های بی‌سولفیدی می‌شود (Spycher and Reed, 1989; Kouhestani et al., 2015). در مقابل، ته‌نشست فلزهای پایه از کمپلکس‌های

مطالب بالا، مدل تشکیل کنه‌زایی طلا در کانسار تیکمه‌داش ۲ به صورت شماتیک در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

کلریدی ناشی از سرد شدن و یا افزایش pH در نتیجه جوشش سیالات و خروج مواد فرار است (Thiersch et al., 1997). با توجه به



شکل ۱۶. تصویر شماتیک از مدل زایشی کان‌زایی طلا در کانسار تیکمه‌داش ۲ و مناطق مجاور. این مدل نشان می‌دهد که سیالات کان‌ساز منشأ گرفته از گنبد‌های داسیتی-ریوداسیتی میوسن بالایی از طریق گسل‌ها به سطح منتقل و در اثر اختلاط با آب‌های جوی در حال گردش، سبب تشکیل رگه‌های کوارتز-سولفیدی در سامانه‌های کان‌زایی اپی ترمال کم‌عمق می‌شوند.

Fig. 16. Schematic representation of the genetic model of Au mineralization in the Tikmehdash 2 deposit and adjacent areas. The model shows ore-forming fluids that originated from late Miocene dacite-rhyodacite domes, transported via faults, mixed with deeply circulating meteoric water, and formed epithermal quartz-sulfide veins in the shallow epithermal mineralization system.

نتیجه‌گیری

تتراهدريت، پیرولوسیت، پسیلوملان، کوارتز، کلسیت و باریت است. این کانسار از نظر شوری سیالات کنه‌ساز، عمق کنه‌زایی و تا حدودی الگوی دگرسانی‌ها با کانسارهای اپی ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط مشابه است؛ اما از نظر سنگ میزبان، کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ، عناصر فلزی (مقادیر بالای طلا و نقره همراه با مقادیر پایین فلزهای پایه) و نوع رخداد طلا (طلای آزاد)، بیشترین شباهت را با کانسارهای اپی ترمال نوع سولفیداسیون پایین دارد. بررسی‌های شیمیایی بیانگر همبستگی مثبت ضعیف فلزهای پایه

کانه‌زایی در کانسار طلای تیکمه‌داش ۲ به صورت رگه‌های سیلیسی منگنز و طلا دار با بافت‌های رگه-رگچه‌ای، پرشی، شانه‌ای، کاکلی، پرماند، دانه پراکنده، قشرگون، گل کلمی، تیغه‌ای و پُرکننده فضای خالی درون توالی آتشفشانی-رسوبی انوسن و میوسن رخ داده و توسط هاله‌های دگرسانی آرژلیک حدواسط در بر گرفته شده است. مواد معدنی و باطله در این کانسار شامل پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت (غنی از آهن)، طلای آزاد، آرسنوپیریت، تنانتیت-

کانه‌زایی‌ها در این بخش از ایران است که باید در برنامه‌های اکتشافی مورد توجه قرار گیرد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان و صبا فولاد رادین برای انجام این پژوهش و از سردبیر و داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی به‌خاطر راهنمایی‌های علمی که به غنای بیشتر مقاله حاضر منجر شده است، تشکر می‌نمایند.

(سرب، روی و مس) با طلا و همبستگی مثبت ضعیف تا متوسط طلا با آرسنیک، آنتیموان و نقره در کانسار طلای تیکمه‌دش ۲ است. سیالات مسئول کانه‌زایی در این کانسار متعلق به یک سامانه $H_2O-NaCl$ با دمای بالا تا متوسط (۲۲۴ تا ۲۹۲ درجه سانتی‌گراد) و شوری متوسط تا پایین (۰/۷ تا ۱۳/۴ درصد وزنی معادل نمک طعام) بوده و عامل اصلی در ته‌نشست فلزهای پایه و گران‌بهای آن، فرایندهای اختلاط و جوشش سیالات بوده است. ارتباط فضایی نزدیک گنبد‌های نیمه‌آتشفشانی داسیتی-ریوداسیتی میوسن بالایی و کله‌زایی‌های اپی ترمال در زیرپهنه فلززایی میانه-بستان‌آباد نشان‌دهنده نقش فعالیت‌های ماگمایی-گرمابی ماگماتیسیم میوسن بالایی در تأمین عناصر کانسار ساز و سیالات گرمابی برای این نوع از

References

- Albinson, T.F., 1988. Geologic reconstruction of paleosurfaces in the Sombrosete, Colorado, and Fresno districts, Zacatecas State, Mexico. *Economic Geology*, 83(8): 1647–1667. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.8.1647>
- 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>
- Alizadeh, R., Sohrabi, Gh., Ahmadzadeh, G.R. and Ravaghi, A., 2021. Textural, alteration, and mineralization studies of gold and silver mineralization in the Ghezel Ahmad area. South of Tikmehdash, (East Azarbaijan Province). 6th National Conference on Mining Engineering and Earth Sciences, Eshragh Institute for Science and Technology Studies, Kish Island, Iran. (in Persian)
- Asadian, A., Amini Fazl, A. and Khodabandeh, A., 1993. Geological map of Torkamanchay-Qarachaman, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Bakker, R.J., 2003. Package FLUIDS 1, Computer programs for analysis of fluid inclusions data and for modeling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 194(1–3): 3–23. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00268-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00268-1)
- Barati, M., Molaei, F. and Yousefi, T., 2023. Determining primary geochemical halos for copper exploration in Bashmaq copper deposit, northeast of Hashtroud, northwest of Iran. 26th Conference of Geological Society of Iran, Urmia University, Urmia, Iran. (in Persian)
- Behrouzi A., Amini Fazl, A. and Amini Azar, R., 1998. Geological map of Bostanabad, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- 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, P.M. Bethke and J.M. Robertson (Editors), *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 73–97. <https://doi.org/10.5382/Rev.02.05>
- 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)
- Cooke, D.R. and McPhail, D.C., 2001. Epithermal Au–Ag–Te mineralization, Acupan, Baguio district, Philippines: Numerical simulations of mineral deposition. *Economic Geology*, 96(1): 109–131. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.1.109>
- Cooke, D.R. and Simmons, S.F., 2000. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Gold in 2000*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 221–244. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.06>
- Corral, I., Cardellach, E., Corbella, M., Canals, À., Griera, A., Gómez-Gras, D. and Johnson, C.A., 2017. Origin and evolution of mineralizing fluids and exploration of the Cerro Quema Au–Cu deposit (Azuer Peninsula, Panama) from a fluid inclusion and stable isotope perspective. *Ore*

- Geology Reviews, 80: 947–960.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.008>
- 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)
- 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>
- Fan, H.R., Hu, F.F., Wilde, S.A., Yang, K.F. and Jin, C.W., 2011. The Qiyugou gold-bearing breccia pipes, Xiong'er shan region, central China: fluid-inclusion and stable-isotope evidence for an origin from magmatic fluids. *International Geology Review*, 53(1): 25–45.
<https://doi.org/10.1080/00206810902875370>
- Federico, C., Aiuppa, A., Allard, P., Bellomo, S., Jean-Baptiste, P., Parello, F. and Valenza, M., 2002. Magma-derived gas influx and water-rock interactions in the volcanic aquifer of Mt. Vesuvius, Italy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(6): 963–981.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00813-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00813-4)
- 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>
- Gamarra, D., Cámara, A.L., Monte, M., Rasmussen, S.B., Chinchilla, L.E., Hungría, A.B. and Martínez-Arias, A., 2013. Preferential oxidation of CO in excess H₂ over CuO/CeO₂ catalysts: Characterization and performance as a function of the exposed face present in the CeO₂ support. *Applied Catalysis B: Environmental*, 130–131: 224–238.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.11.008>
- Giggenbach, W.F., 1992. Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Earth and Planetary Science Letters*, 113(4): 495–510.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(92\)90127-H](https://doi.org/10.1016/0012-821X(92)90127-H)
- Goldstein, R.H., 2003. Petrographic analysis of fluid inclusions. In: I. Samson, A. Anderson and D. Marshall (Editors), *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Vancouver, pp. 9–53.
<https://doi.org/10.3749/9780921294672.ch02>
- 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>
- Hashempour, H., 2025. Geology, geochemistry, and genesis of Tikmehdash 2 Au mineralization, southeast of Bostan Abad. Unpublished MSc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 93 pp. (in Persian with English abstract)
- Hassani Soughi, Z., Calagari, A.A., Sohrabi, Gh., 2021. Investigations of gold-sulfide mineralization and microthermometry within quartz veins/veinlets in the Gharehchay area, south of Tikmehdash, East-Azarbaidjan province, NW Iran. *Iranian journal of Crystallography and Mineralogy*, 29(1): 97–110. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/doi:10.52547/ijcm.29.1.97>
- Hassani Soughi, Z., Calagari, A.A., Sohrabi, Gh., 2023. The genesis of base and precious metals-bearing epithermal veins in the Gharehchay-Kurmolla area, south of Tikmehdash, NW Iran. *Geological Quarterly*, 67: 43. Retrieved May 26, 2025, from <https://bibliotekanauki.pl/articles/58907083>
- Hayba, D.O., 1997. Environment of ore deposition in the Creede mining district, San Juan Mountains, Colorado; Part V, Epithermal mineralization from fluid mixing in the OH Vein. *Economic Geology*, 92(1): 29–44.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.92.1.29>
- 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. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>
- Hedenquist, J.W. and 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 Lowenstern, 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>
- Hemley, J.J. and Hunt, J.P., 1992. Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered systems; II, Some general geologic applications. *Economic Geology*, 87(1): 23–43. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.1.23>
- Hemley, R.J., Bell, P.M. and Mao, H.K., 1987. Laser techniques in high-pressure geophysics. *Science*, 237(4815): 605–612. <https://doi.org/10.1126/science.237.4815.605>
- 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>
- Jafari, F., Moayyed, M. and Karimzadeh Somarin, A.R., 2002. Petrological studies of intrusive bodies in Qebchaq and Tikmehdash regions with special consideration on the economic potential of the area. 5th Conference of Geological Society of Iran, Tehran University, Tehran, Iran. (in Persian)
- Jahangiryan, F., Alipour, S., Simmonds, V., Tovalcherlidze, A., 2023. Geochemistry and gold mineralization in Miyardan area, west of Bostan Abad. 26th Conference of Geological Society of Iran, Urmia University, Urmia, Iran (in Persian)
- Jébrak, M., 1997. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: a review of mechanisms, morphology, and size distribution. *Ore Geology Reviews*, 12(3): 111–134. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00009-7)
- 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>
- John, D.A., Hofstra, A.H., Fleck, R.J., Brummer, J.E. and Saderholm, E.C., 2003. Geologic setting and genesis of the Mule Canyon low-sulfidation epithermal gold-silver deposit, north-central Nevada. *Economic Geology*, 98(2): 425–463. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.2.425>
- Khaleghi, F., Hosseinzadeh, Gh., Rasa, I. and Moayyed, M., 2013. Geological and geochemical characteristics of the Syah Kamar porphyry molybdenum deposit, west of Mianeh, NW Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 22(88): 187–196. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22071/gsj.2013.53692>
- 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>
- Koděra, P., Lexa, J., Rankin, A.H. and Fallick, A.E., 2005. Epithermal gold veins in a caldera setting: Banská Hodruša, Slovakia. *Mineralium Deposita*, 39: 921–943. <https://doi.org/10.1007/s00126-004-0449-5>
- Kouhestani, H., 2025. Temporal–spatial relationships between epithermal mineralization and dacite-rhyodacite subvolcanic domes at the Miyaneh–Bostan Abad subzone, northwestern Iran. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, Unpublished Report, 40 pp.
- 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., Mokhtari, M.A.A., Chang, Z., Qin, K.Z. and Aghajani Marsa, S., 2022. Fluid inclusion, zircon U–Pb geochronology, and O–S isotopic constraints on the origin and evolution of ore-forming fluids of the Tashvir and Varmazyar epithermal base metal deposits, NW Iran. *Frontiers in Earth Science*, 10: 990761. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.990761>
- Lesage, G., Richards, J.P., Muehlenbachs, K. and Spell, T.L., 2013. Geochronology, geochemistry, and fluid characterization of the late Miocene Buriticá gold deposit, Antioquia department, Colombia. *Economic Geology*, 108(5): 1067–1097. <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.5.1067>
- 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>
- Liu, J., Mao, J.W., Wu, G., Wang, F., Luo, D.F., Hu, Y.Q. and Li, T.G., 2014. Fluid inclusions and H–O–S–Pb isotope systematics of the Chalukou giant porphyry Mo deposit, Heilongjiang Province, China. *Ore Geology Reviews*, 59: 83–96.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.006>
- Maghsoudi, A., Rahmani, M. and Rashidi, B., 2005. Gold deposits and occurrences in Iran. Pars Arian Zamin, Tehran, 388 pp.
- Márquez-Zavalía, M.F. and Heinrich, C.A., 2016. Fluid evolution in a volcanic-hosted epithermal carbonate–base metal–gold vein system: Alto de la Blenda, Farallón Negro, Argentina. *Mineralium Deposita*, 51: 873–902.
<https://doi.org/10.1007/s00126-016-0639-y>
- Mokhtari, M.A.A., 2022. Report of Au exploitation in the Tikmehdash iron mine. Industry, Mine and Trade Organization of East Azerbaijan, Tabriz, 220 pp. (in Persian)
- 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>
- 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>
- Nabatian, G., Wan, B. and Honarmand, M., 2017. Whole rock geochemistry, molybdenite Re–Os geochronology, stable isotope and fluid inclusion investigations of the Siah-Kamar deposit, western Alborz-Azarbayjan: New constraints on the porphyry Mo deposit in Iran. *Ore Geology Reviews*, 91: 638–659.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.08.030>
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 109 pp. (in Persian)
- 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>
- Pirajno, F., 2009. Hydrothermal processes and mineral systems. Springer, Berlin, 1250 pp.
- 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., 1984. Fluid inclusions. Mineralogical Society of America, Virginia, 644 pp.
- 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>
- Rossetti, P. and Colombo, F., 1999. Adularia-sericite gold deposits of Marmato (Caldas, Colombia): Field and petrographical data. Geological Society, London, Special Publications, 155(1): 167–182.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.155.01.13>
- 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>

- Saunders, J.A., Hofstra, A.H., Goldfarb, R.J. and Reed, M.H., 2014. Geochemistry of hydrothermal gold deposits. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors) *Treatise on Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, England, pp. 33–424. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01117-7>
- 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>
- 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>
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- 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>
- 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., 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>
- Sohbatloo, M., 2021. Geology, geochemistry, and genesis of Qebchaq base and precious metals mineralization, NW Qarehchaman. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 95 pp. (in Persian with English abstract)
- Sohbatloo, M., Kouhestani, H. and Mokhtari, M.A.A., 2023. Intermediate-sulfidation epithermal base and precious metals mineralization in the Qebchaq deposit (NW Qarachaman, East Azerbaijan): Geology, mineralization, and geochemical evidence. *Journal of Economic Geology*, 15(1): 53–85. (in Persian with extended English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2022.75340.1041>
- Spycher, N.F. and Reed, M.H., 1989. Evolution of a Broadlands-type epithermal ore fluid along alternative PT paths; implications for the transport and deposition of base, precious, and volatile metals. *Economic Geology*, 84(2): 328–359. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.84.2.328>
- Takács, Á., Molnár, F., Turi, J., Mogessie, A. and Menzies, J.C., 2017. Ore mineralogy and fluid inclusion constraints on the temporal and spatial evolution of a high-sulfidation epithermal Cu–Au–Ag deposit in the Recsk ore complex, Hungary. *Economic Geology*, 112(6): 1461–1481. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2017.4517>
- 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, Toadoggon District, British Columbia, Canada. *Mineralium Deposita*, 32(1): 44–57. <https://doi.org/10.1007/s001260050071>
- Tindell, T., Watanabe, K., Imai, A., Takahashi, R., Boyce, A.J., Yonezu, K. and Ogata, T., 2018. The Kago low-sulfidation gold and silver deposit: A peripheral mineralisation to the Nansatsu high-sulfidation system, southern Kyushu, Japan. *Ore Geology Reviews*, 102: 951–966. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.10.027>
- 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>
- 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., 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, O., Arehart, G.B., Colakoglu, A.R. and Billor, Z., 2007. Low-sulfidation type Au-Ag mineralization at Bergama, Izmir, Turkey. *Ore Geology Reviews*, 32(1–2): 81–124.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.10.007>
- 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>
- Zhai, D., Liu, J., Wang, J., Yao, M., Wu, S., Fu, C., Liu, Z., Wang, S. and 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>
- Zhai, W., Sun, X., Sun, W., Su, L., He, X. and Wu, Y., 2009. Geology, geochemistry, and genesis of Axi: a Paleozoic low-sulfidation type epithermal gold deposit in Xinjiang, China. *Ore Geology Reviews*, 36(4): 265–281.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.04.003>
- Zhang, Y. and Frantz, J.D., 1987. Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl–KCl–CaCl₂–H₂O using synthetic fluid inclusions. *Chemical Geology*, 64(3–4): 335–350.
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(87\)90012-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(87)90012-X)
- Zhu, Y.F., Zeng, Y.S. and Jiang, N., 2001. Geochemistry of the ore-forming fluids in gold deposits from the Taihang Mountains, northern China. *International Geology Review*, 43(5): 457–473.
<https://doi.org/10.1080/00206810109465026>