



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2025.1135



Geology, alteration and mineralization style of the lithocaps in the north-northeastern Chah Musa deposit, part of the Toroud-Chah Shirin magmatic arc (south of Shahrood)

Mohadeseh Eskandari¹ , Maryam Sheibi^{2*} , Fardin Mousivand³ , Bernd Lehmann⁴

¹ Ph.D. student, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² Associate professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

³ Associate professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

⁴ Professor, Department of Geology, Institute of Mineralogy and Mineral Resources, Technical University of Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, Germany

ARTICLE INFO

Article History

Received: 05 December 2024

Revised: 22 May 2025

Accepted: 24 May 2025

Keywords

Geology
fluid inclusion microthermometry
Lithocap
High sulfidation
Argillic zone
Toroud-Chah Shirin

*Corresponding author

Maryam Sheibi
✉ sheibi@shahroodut.ac.ir

ABSTRACT

The study area is situated in the northern part of the Central Iranian structural zone, northeast of the Toroud-Chah Shirin magmatic arc. In this area, late Eocene hypabyssal intrusions are emplaced within Eocene volcano-sedimentary sequences. Hydrothermal fluid activity has completely destroyed the original structure and mineralogical composition of these rocks, leading to the formation of significant amounts of fine-grained quartz (indicative of silicic alteration) and kaolinite, along with secondary iron oxides such as hematite and goethite. Mineralization in this area has developed in at least four argillic-silicic zones associated with breccia, vuggy quartz, and veins. The highest occurrences of sulfide mineralization are formed within the silicic veins. In these mineralized zones, vuggy to brecciated silicic rocks—referred to as lithocaps—are present alongside advanced argillic alteration containing pyrophyllite. Surrounding these central features, propylitic alteration is also observed. The primary ore minerals identified include pyrite, chalcopyrite, enargite, magnetite, hematite, and goethite. Results from analyses of trapped two-phase fluid inclusions (L+V) in quartz reveal that homogenization temperatures range from 160 to 362.8 °C, with salinity varying between 2.24 and 9.08 wt.% NaCl eq. Comparative investigation of structural characteristics, texture, mineralogy, alteration features, and properties of ore-forming fluids indicate that the copper-gold vein mineralizations in this area significant similarities to high-sulfidation (HS) epithermal deposits.

How to cite this article

Eskandari, M., Sheibi, M., Mousivand, F. and Lehmann, B., ?. Geology, alteration and mineralization style of the lithocaps in the north-northeastern Chah Musa deposit, part of the Toroud-Chah Shirin magmatic arc (south of Shahrood). Journal of Economic Geology, ?(?): ?-?. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1135>



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

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Toroud-Chah Shirin magmatic arc (TCSMA) is situated in the northern part of the Central Iran zone, as shown in the 1:250,000 geological map of Toroud (Houshmandzadeh et al., 1978) and the 1:100,000 geological map of Moalleman (Eshraghi and Jalali, 2006). The magmatic activity in this arc and surrounding regions is attributed to the subduction of the Sabzevar-Daruneh branch of the Neo-Tethys Ocean beneath Central Iran (Yousefi et al., 2017). The studied area contains a substantial volume of volcanic and pyroclastic rocks from the Eocene epoch, as well as numerous subvolcanic intrusions. Previous studies conducted within this magmatic arc have identified a range of epithermal mineralization events characterized by low to moderate sulfide content (e.g., Mehrabi and Ghasemi Siani, 2012; Roohbakhsh et al., 2018; Mahabadi and Fardoust, 2018; Eskandari et al., 2024; Tale Fazel et al., 2019). Geological investigations in the northeastern section of the Toroud-Chah Shirin magmatic arc (coordinates 54°50' to 54°51' E and 35°30' to 35°29' N) reveal a diverse array of alteration types, including propylitic, argillic, and quartz-alunite alterations, with extensive advanced argillic alteration. These investigations have also documented several silica caps and clear evidence of mineralization that has not been addressed in previous studies. Among the limited research conducted in this area, Zadsaleh et al. (2012) identified indicators of argillic alteration (kaolinite and montmorillonite) and advanced argillic alteration (pyrophyllite and alunite) based on X-ray diffraction method. Therefore, this research aims to systematically investigate the mineralogy, existing alteration types and their zoning patterns, geochemistry, microthermometry of fluid inclusions, and structural geological features, ultimately striving to achieve a comprehensive understanding of the genesis of this mineralization zone. The introduction of this mineralization system not only provides critical insights for exploration in the studied area but may also facilitate the identification of other epithermal-porphyry systems in the Toroud-Chah Shirin magmatic arc and other regions of Iran.

Material and methods

After completing field studies and processing

satellite images, sampling was conducted across various silicic-argillic zones. A total of 30 polished thin sections and 20 thin sections were prepared for petrological, mineralogical, and ore microscopy studies. These samples were examined using an Olympus polarizing microscope at Clausthal University of Technology in Germany and Shahrood University of Technology. Additionally, two doubly polished sections from quartz-calcite veins were prepared to investigate the physicochemical properties of the mineralizing fluids. The temperature and salinity of the fluid inclusions were measured in the Economic Geology Laboratory at Shahrood University of Technology using a heating and freezing stage mounted on a polarized microscope with Linkam MDSG600 model. Following these procedures, X-ray diffraction (XRD) was conducted on 11 samples collected from altered sections (silicic and argillic) to identify the composition of clay minerals. The XRD was performed using a diffractometer equipped with copper tubes coated with nickel at Zarazma Laboratories in Tehran and the IELF at Clausthal University of Technology. Furthermore, several rock samples with minimal alteration, altered and mineralized ones were selected and examined at Acme Laboratories in Vancouver, Canada, using ICP-OES and ICP-MS methods to assess both major and trace elements. The analytical precision for major elements is $\pm 1\%$, while most trace elements have an uncertainty of $\pm 0.05\%$.

Results

The mineralized region features several argillic alteration zones and silica caps, located approximately 2 to 7 km north-northwest of the Chah Musa copper deposit (Figures 1 and 2). During field observations, several relatively intact outcrops of andesite were documented; however, many of these rocks have experienced significant silicic and argillic alterations, leading to a complete loss of their original texture and mineralogical composition. Based on field and laboratory evidences, it appears that the mineral assemblages influenced by hydrothermal fluid activity exhibit a distinct zoning pattern. This distribution, identified solely through surface observations due to the absence of exploratory drilling, includes propylitic alteration (chlorite-epidote-albite-carbonate) at the outer margins, moderate argillic alteration (quartz-

montmorillonite-smectite-illite-natrojarosite), and advanced argillic alteration (vuggy quartz, quartz-alunite, kaolinite, montmorillonite-illite) towards the center. The silica caps, vuggy quartz structures, and this zoning pattern (Figure 5) are consistent with the alteration patterns of high-sulfidation systems described by White and Hedenquist (1990), indicating the presence of hydrothermal fluids with a pH of less than 2 in this area (Stoffregen, 1987). These acidic fluids have resulted in the complete leaching of elements from the mineral-bearing rocks, forming residual silica in the silica caps or as quartz crystals filling the cavities.

Field studies and hand samples collected from the mineralized area under investigation reveal that the andesitic rocks contain silica-sulfide veins with varying thicknesses, ranging from 1 centimeter to 2 meters (Figure 3a). Mineralization is present as veins and veinlets that fill void spaces, as well as through replacement and disseminated occurrences (Figure 3a). The mineralized veins include hypogene sulfide phases such as pyrite, chalcopyrite, enargite, and galena, alongside supergene minerals like rutile, hematite, goethite, and limonite. The gangue minerals consist of variably thick quartz (both banded and vuggy), calcite, and clay minerals (Figure 6). At the surface, the hypogene sulfides have largely oxidized due to supergene processes, leading to their replacement by iron hydroxides, oxides, copper silicates (chrysocolla), copper carbonates (malachite, azurite), hematite, goethite, and limonite. Fluid inclusion studies were conducted to investigate the nature and composition of the fluids involved in the mineralization processes observed in calcite and massive quartz crystals collected from the examined mineralized area. The results of the fluid inclusion study reveal final homogenization temperatures (T_h) for the liquid phase ranging from 160 to 362.8 °C, final melting temperatures of ice ($T_{m_{ice}}$) between 1.3 and 5.9 °C, and salinity levels between 2.24 and 9.08 wt.% NaCl equivalent (Table 2 and Figure 9). These values align with those found in high-sulfidation (HS) epithermal systems (Hedenquist et al., 1998; Jannas et al., 1999).

Discussions

The studied area is situated in the northeastern section of the Toroud-Chah Shirin magmatic arc and lies within the northern margin of the structural zone of Central Iran. The mineralized veins are hosted in Eocene andesite rock and have experienced alteration due to the intrusion of hydrothermal fluids, leading to advanced silicification, argillic alteration, and propylitic alteration. Indicators such as the presence of enargite (a significant copper mineral in high-sulfidation deposits), vuggy quartz, extensive advanced argillic alteration in a hypogene form, and hypogene alunite (an indicator mineral for high-sulfidation deposits) suggest that the northeast mineralization area of Chah Musa is characteristic of high-sulfidation epithermal deposits.

The analysis indicates evidence of advanced argillic and silicic hydrothermal alterations, characterized by a silicified cap or lithocap at the center, with propylitic alteration surrounding it. Notable features in the studied area include vein texture and structure, hydrothermal breccia, vuggy quartz, and the mineralogical composition of the mineralization, which includes enargite and alunite. Mineralization occurs in two stages: hypogene stage (e.g., pyrite, chalcopyrite, enargite, galena, magnetite, and specularite) and supergene stage (e.g., goethite, limonite, malachite, and azurite). Gold concentrations in the analyzed samples are at anomalous levels. Results from the study of trapped two-phase fluid inclusions (L+V) in quartz reveal homogenization temperatures ranging from 160 to 362.8 °C, with salinity levels between 2.24 and 9.08 wt.% NaCl equivalent. Based on comparisons of structural characteristics, texture, mineralogy, alteration features, and ore-forming fluid properties, the copper-gold vein mineralizations in the studied area exhibit significant similarities to high-sulfidation epithermal deposits, which may potentially be associated with porphyry copper-gold-molybdenum deposits at depth.



زمین‌شناسی، دگرسانی و نوع کانی‌سازی پوش‌سنگ‌ها در شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی، بخشی از کمان ماگمایی تروود-چاه شیرین (جنوب شاهرود)

محدثه اسکندری^۱، مریم شبیبی^{۲*}، فریدین موسیوند^۳، برند لهما^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۳ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۴ استاد، دانشکده کانی‌شناسی و منابع معدنی، دانشگاه صنعتی کلاوستان، کلاوستان-زلفلد، آلمان

چکیده

محدوده معدنی مورد بررسی بخشی از شمال پهنه ساختاری ایران مرکزی بوده و در شمال‌شرق کمان ماگمایی تروود-چاه شیرین واقع شده است. در این منطقه واحدهای آذرین نیمه عمیق به سن اواخر ائوسن در توالی‌های رسوبی-آتشفشانی ائوسن جای گرفته‌اند. به دلیل عملکرد سیالات گرمایی، ساخت و ترکیب کانی‌شناسی اولیه در این سنگ‌ها به طور کامل از بین رفته و در زمینه آنها مقادیر زیادی کوارتزهای دانه‌ریز (دگرسانی سیلیسی) و کائولینیت به همراه اکسیدهای آهن ثانویه (گوتیت) شکل گرفته است. کانی‌زایی در محدوده معدنی به صورت رخدادهای برشی، کوارتز حفره‌ای و رگه‌ای همراه با کمین چهار پهنه دگرسانی آرژلیک-سیلیسی حادث شده است. بیشترین کانی‌زایی سولفیدی درون رگه‌های سیلیسی مشاهده می‌شود. در پهنه‌های کانه‌زایی، توده‌های سنگی سیلیسی **حفره‌دار** تا برشی (با ریخت‌شناسی سخت و برجسته) که به عنوان **پوش‌سنگ** شناخته می‌شوند، همراه با دگرسانی آرژلیک پیشرفته حاوی پیروفلیت (با ریخت‌شناسی نرم) در بخش مرکزی سامانه گرمایی و دگرسانی پروپلیتیک نیز در اطراف آنها دیده می‌شوند. پیریت، کالکوپیریت، انارژیت، مگنتیت، هماتیت اسپیکولار و گوتیت کانی‌های معدنی عمده هستند. نتایج به دست آمده از بررسی میان‌بارهای سیال دو فاز (L+V) به دام افتاده در کانی کوارتز نشان می‌دهد که دمای همگن‌شدگی در میان‌بارهای سیال بین ۱۶۰ تا ۳۶۲/۸۰ درجه سانتی‌گراد و شوری نیز بین wt.% NaCl eq. ۲/۲۴ تا ۹/۰۸ تغییر می‌کند. بر اساس مقایسه ویژگی‌های ساخت، بافت، کانی‌شناسی، دگرسانی و سیالات کانه‌ساز، کانه‌زایی‌های رگه‌ای مس-طلا در منطقه مورد بررسی دارای شباهت زیادی با کانسارهای رگه‌ای اپی‌ترمال **سولفیداسیون بالا** هستند.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

واژه‌های کلیدی

زمین‌شناسی

ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال

پوش‌سنگ

سولفیداسیون بالا

پهنه آرژلیک

تروود-چاه شیرین

نویسنده مسئول

مریم شبیبی

sheibi@shahrud.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

اسکندری، محدثه؛ شبیبی، مریم؛ موسیوند، فریدین و لهما، برند. ۹. زمین‌شناسی، دگرسانی و نوع کانی‌سازی پوش‌سنگ‌ها در شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی، بخشی از کمان ماگمایی تروود-چاه شیرین (جنوب شاهرود). زمین‌شناسی اقتصادی، ۹(۴): ۴-۹. <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1135>

مقدمه

کمان ماگمایی تروود - چاه شیرین از سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری (ائوسن) و توده‌های آذرین عمیق- نیمه عمیق (اواخر ائوسن) تشکیل شده است. فعالیت‌های ماگمایی در این کمان و مناطق مجاور به فروانش پوسته اقیانوسی شاخه سبزوار- درونه به زیر صفحه ایران مرکزی نسبت داده شده است (Yousefi et al., 2017). در پی عملکرد دو گسل اصلی تروود- انجیلو و شکستگی‌ها، درزه‌ها و گسل‌های فرعی مرتبط مجموعه دگرسانی‌های گرمابی متعددی شامل انواع فلیک، پروپلیتیک، آرژیلیک، سریستی و سیلیسی شکل گرفته‌اند. همچنین اختلاط سیالات جوی و ماگمایی سبب شسته شدن عناصر فلزی و نهشت آنها در رگه- رگچه‌ها و ایجاد کانسارهای فلزی شده است (Imamjomeh et al., 2009; Mehrabi and Ghasemi Siani, 2012; Sheibi and Mousivand, 2018; Tale Fazel et al., 2019; Khalaj et al., 2021). در اغلب پژوهش‌های پیشین انجام شده در این کمان ماگمایی، رخدادهای متنوعی از کانی‌سازی نوع اپی ترمال سولفیداسیون پایین (سریست- آدولاریا) تا سولفیداسیون متوسط (آدولاریا- پیروفلیت یا آلونیت- انارژیت) گزارش شده است (Mehrabi and Ghasemi Siani, 2012; Roohbakhsh et al., 2018; Mahabadi and Fardoust, 2018; Tale Fazel et al., 2019; Eskandari et al., 2024). پوش سنگ یک پهنه دگرسانی بزرگ از دگرسانی سیلیسی همراه با آرژیلیک پیشرفته است که در بالای بدنه اصلی سامانه پورفیری و در میان مجموعه نفوذی کانه دار تشکیل می‌شود (Sillitoe, 1995). این پهنه از سیالات هیوژن، داغ یا سوپرژن یا ترکیبی از هر دو به وجود آمده و معمولاً کیلومترها (به طور جانبی در ابعاد 10×10 کیلومتر مربع و یک کیلومتر عمق) گسترش یافته است (Sillitoe, 1995; Chang et al., 2011; Cooke et al., 2017).

بررسی‌های زمین‌شناسی انجام شده در بخش شمال شرق کمان ماگمایی تروود- چاه شیرین با مختصات جغرافیایی $54^{\circ}50'$ تا $54^{\circ}51'$ طول شرقی و $35^{\circ}30'$ تا $35^{\circ}29'$ عرض شمالی بیانگر

طیف متنوعی از دگرسانی‌های مختلف (انواع پروپلیتیک، آرژیلیک، فلیک، کوارتز- آلونیت و نظایر آن) به خصوص آرژیلیک پیشرفته به همراه تعدادی پوش‌سنگ سیلیسی است که در بررسی‌های قبلی کمتر به آنها پرداخته شده است. از بررسی‌های انجام شده در این محدوده می‌توان به زادصالح و همکاران (Zadsaleh et al., 2012)، اشاره کرد که بر اساس شواهد پراش پرتو ایکس، کانی‌های شاخص دگرسانی آرژیلیک (کائولینیت و مونتموریونیت) و آرژیلیک پیشرفته (پیروفلیت و آلونیت) را گزارش کرده‌اند. این پژوهش با هدف بررسی کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی، شناسایی انواع دگرسانی‌های موجود و الگوی پهنه‌بندی آنها، بررسی میکروترمومتری میان‌بارهای سیال و در نهایت درک صحیحی از منشأ این محدوده کانه‌زایی انجام شده است. بدیهی است معرفی این سامانه کانه‌زایی علاوه بر ارائه کلیدهای اکتشاف در محدوده مورد بررسی، می‌تواند در شناسایی سایر سامانه‌های اپی ترمال- پورفیری موجود در کمان ماگمایی تروود- چاه شیرین و سایر نقاط ایران مفید واقع شود.

روش مطالعه

پس از انجام بررسی‌های صحرایی و پردازش تصویرهای ماهواره‌ای، نمونه‌برداری از پهنه‌های سیلیسی- آرژیلیک مختلف انجام شد. سپس به منظور انجام بررسی‌های سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی، کانه‌نگاری و شناسایی پهنه‌بندی دگرسانی، تعداد ۳۰ مقطع نازک- صیقلی و تعداد ۲۰ مقطع نازک تهیه و در دانشگاه‌های صنعتی کلاوستهال آلمان و صنعتی شاهرود با میکروسکوپ پلاریزان مدل الپوس بررسی شد. تعداد ۲ مقطع دوبرصیقل نیز از رگه‌های کوارتز- کلسیت به منظور بررسی میان‌بارهای سیال تهیه و بررسی شد. دما و شوری میان‌بارهای سیال در آزمایشگاه زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از صفحه گرم‌کننده و منجمدکننده Linkam MDSG600 نصب شده روی میکروسکوپ مخصوص اندازه‌گیری شده است. پس از مراحل بیان شده، با استفاده از روش

چاه‌موسی واقع شده است (شکل‌های ۱-C و ۲-A تا D). بر اساس بازدیدهای صحرایی، واحدهای رخنمون‌یافته در این محدوده شامل توالی آتشفشانی-آذرآواری (آندزیت، توف و آگلومرا) معادل E^{vb} هستند (شکل ۳). واحدهای توفی (E^t) با لایه‌بندی منظم و به رنگ‌های سبز تا خاکستری نمایان است (شکل ۴-A و B). واحد آندزیتی (E^{an}) به صورت تپه‌های کم ارتفاع و به رنگ‌های خاکستری روشن تا سبز رخنمون دارد (شکل ۴-C). این واحد به صورت گدازه با ساخت پورفیری و کمتر مگاپورفیری دیده می‌شود (شکل ۴-D و E).

در بررسی‌های صحرایی، تعدادی از رخنمون‌های نسبتاً سالم با ترکیب آندزیت مشاهده می‌شود؛ اما در نمونه‌های دستی بسیاری از این سنگ‌ها متحمل دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیک شده و ساخت و ترکیب کانی‌شناسی اولیه به طور کامل از بین رفته است (شکل ۴-D تا F). بلورهای درشت و خودشکل پلاژیوکلاز با ابعاد بیش از یک سانتی‌متر اغلب به کانی رسی دگرسان شده‌اند (شکل ۴-D). ساخت برشی و وجود آلونیت یکی از مهم‌ترین پدیده‌های زمین‌شناسی مشاهده شده در محدوده معدنی است که تا پیش از این پژوهش اشاره‌ای به آن نشده است (شکل ۴-G تا I).

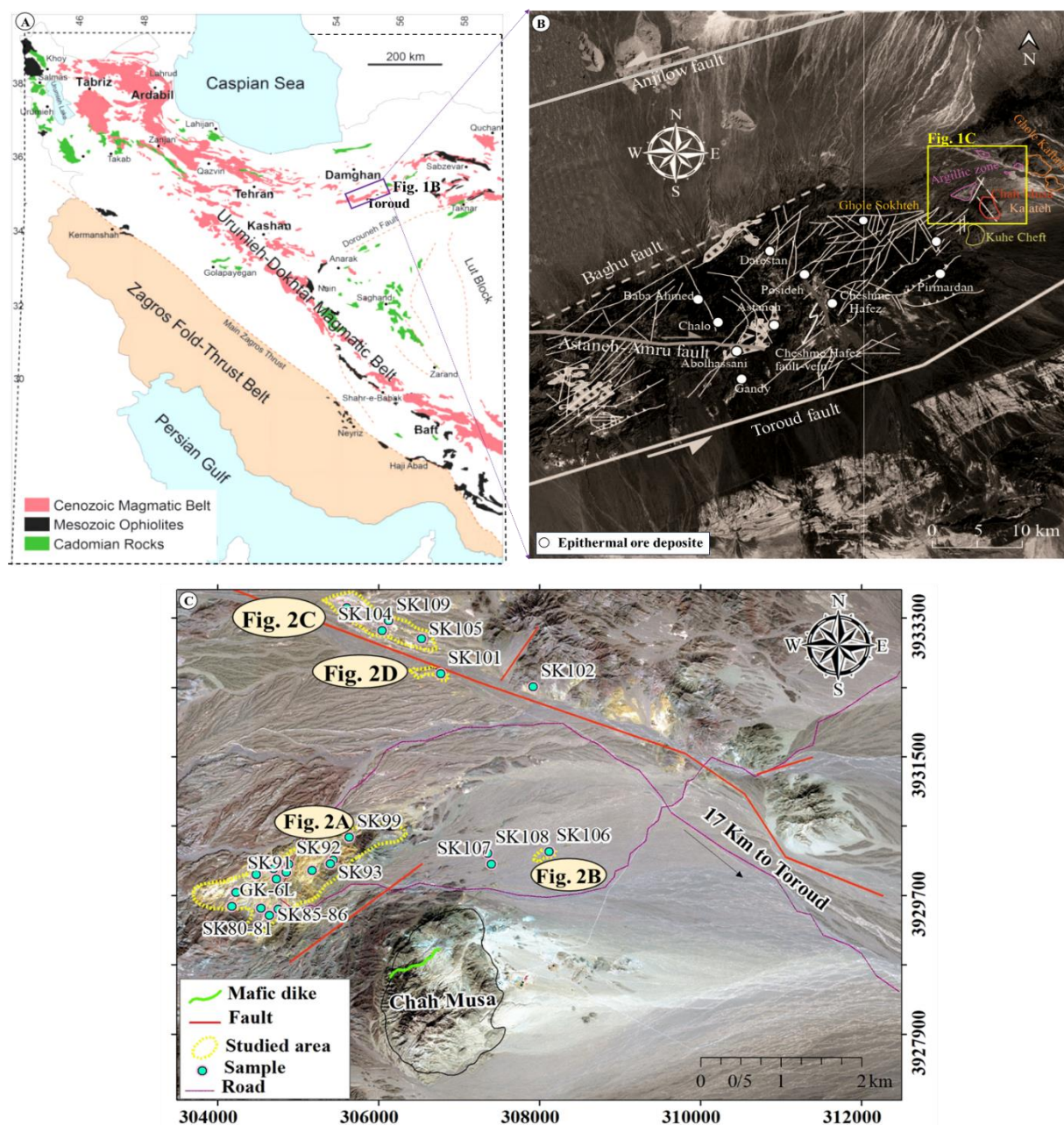
بررسی‌های سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که واحد آندزیتی دارای بافت پورفیری بوده و از درشت بلورهای پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت (کانی‌های اصلی) در یک زمینه دانه‌ریز تشکیل شده است (شکل ۵-A). بلورهای پلاژیوکلاز با اندازه ۵۰۰ میکرومتر تا بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر، بیش از ۲۵ درصد حجمی از سنگ را به خود اختصاص داده است. این کانی دارای ماکل پلی‌سنتتیک و منطقه‌بندی است (شکل ۵-A و B). هورنبلند و بیوتیت با اندازه متغیر (بزرگ‌تر از ۱ میلی‌متر) و ۵ تا ۱۵ درصد حجمی مشاهده شده است (شکل ۵-A و C). در این سنگ‌ها، بسیاری از بیوتیت‌ها به ایلیت و پلاژیوکلازها به کلسیت، کلریت و کانی‌رسی دگرسان شده‌اند (شکل ۵-B، D و E).

پراش پرتو ایکس بر روی تعداد ۱۱ نمونه جمع‌آوری شده از بخش‌های دگرسان‌شده (سیلیسی و آرژیلیک)، انواع کانی‌های رسی شناسایی شد. نتایج پراش پرتو ایکس، با استفاده از یک پراش سنج حاوی لوله‌های مسی با روپوش نیکلی و اشعه ایکس در آزمایشگاه‌های زراژما تهران و مؤسسه تحقیقات مخزن دانشگاه صنعتی کلاوستان آلما انجاء شد.

زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی

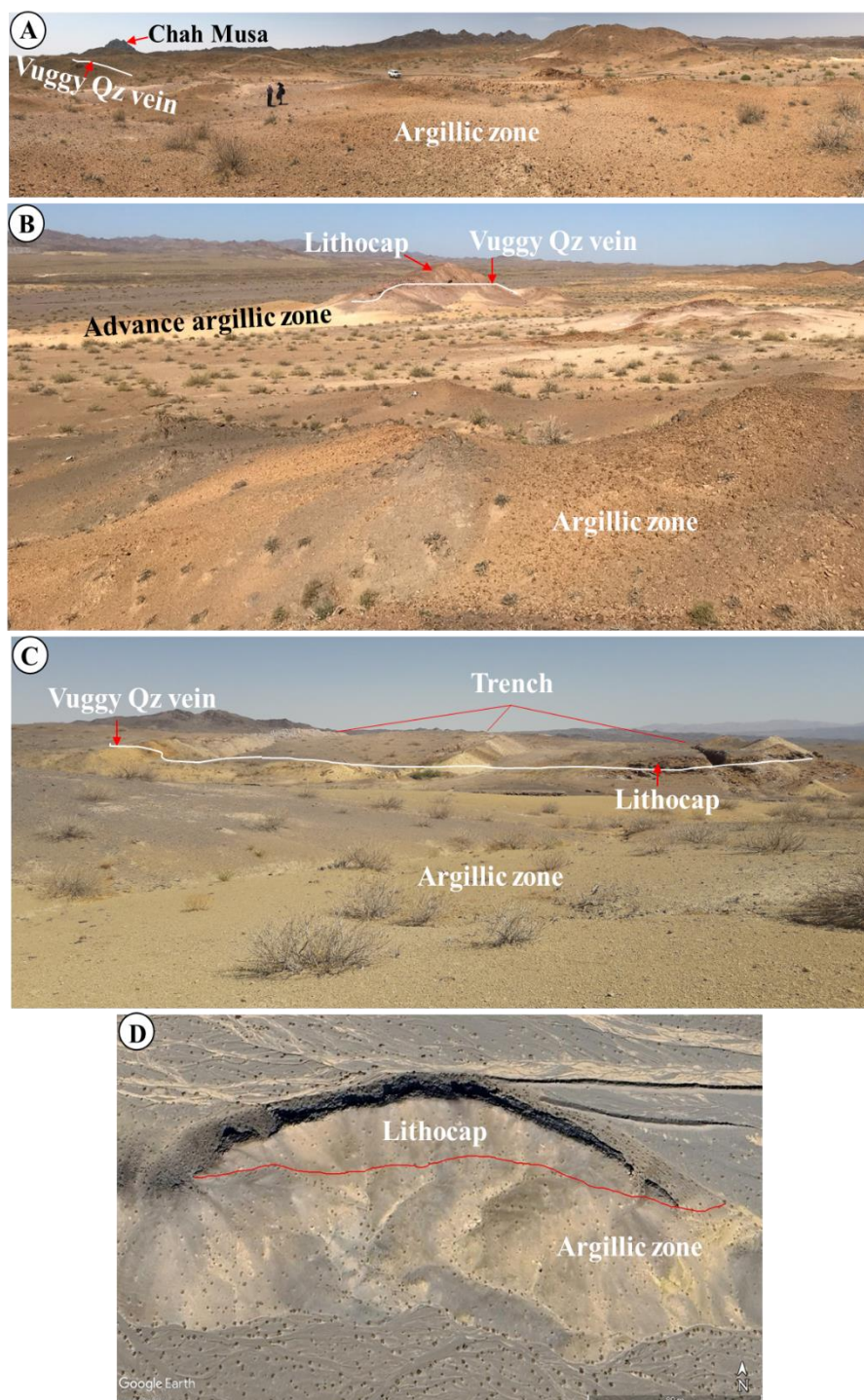
از نظر زمین‌شناسی، کمان ماگمایی تروود-چاه‌شیرین و این محدوده در شمال پهنه ایران مرکزی و در نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ تروود (Houshmandzadeh et al., 1978) و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان (Eshraghi and Jalali, 2006) واقع شده است (شکل ۱-A تا C). این کمان از لحاظ ساختاری بین دو گسل تروود-انجیلو قرار گرفته است (شکل ۱-B). در کمان ماگمایی تروود-چاه‌شیرین، سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی به سن اواسط تا اواخر ائوسن بیشترین برون‌زد را دارند (Houshmandzadeh et al., 1978). توالی سنگی سنوزوئیک در این کمان، بیشتر شامل تناوبی از سنگ‌های آواری، آذرآواری و آتشفشانی است. این مجموعه سنگی به سن اواسط ائوسن، طیفی از انواع توف، برش و آگلومرا با میان‌لایه‌هایی از ماسه سنگ و سیلتستون، کنگلومرا با قطعه‌های آهکی و سیلیسی را شامل می‌شود (Houshmandzadeh et al., 1978; Sheibi and Mousivand, 2018). سنگ‌های آتشفشانی ترکیبی از آندزیت، آندزیت بازالت، تراکی آندزیت، داسیت به سن اوایل تا اواسط ائوسن را شامل می‌شود و توده‌های نیمه عمیق-نفوذی با ترکیب گابرویدیوریت، مونزونیت، گرانودیوریت و گرانیت این توالی‌های آتشفشانی-رسوبی را قطع کرده‌اند. از دیدگاه زمین‌شیمی، سنگ‌های آتشفشانی این کمان دارای ماهیت کالک‌آلکالن هستند (Khajehzadeh, 2012).

این محدوده معدنی که دربرگیرنده چندین پهنه دگرسانی آرژیلیک است، در ۲ تا ۷ کیلومتری شمال و شمال‌شرق کانسار



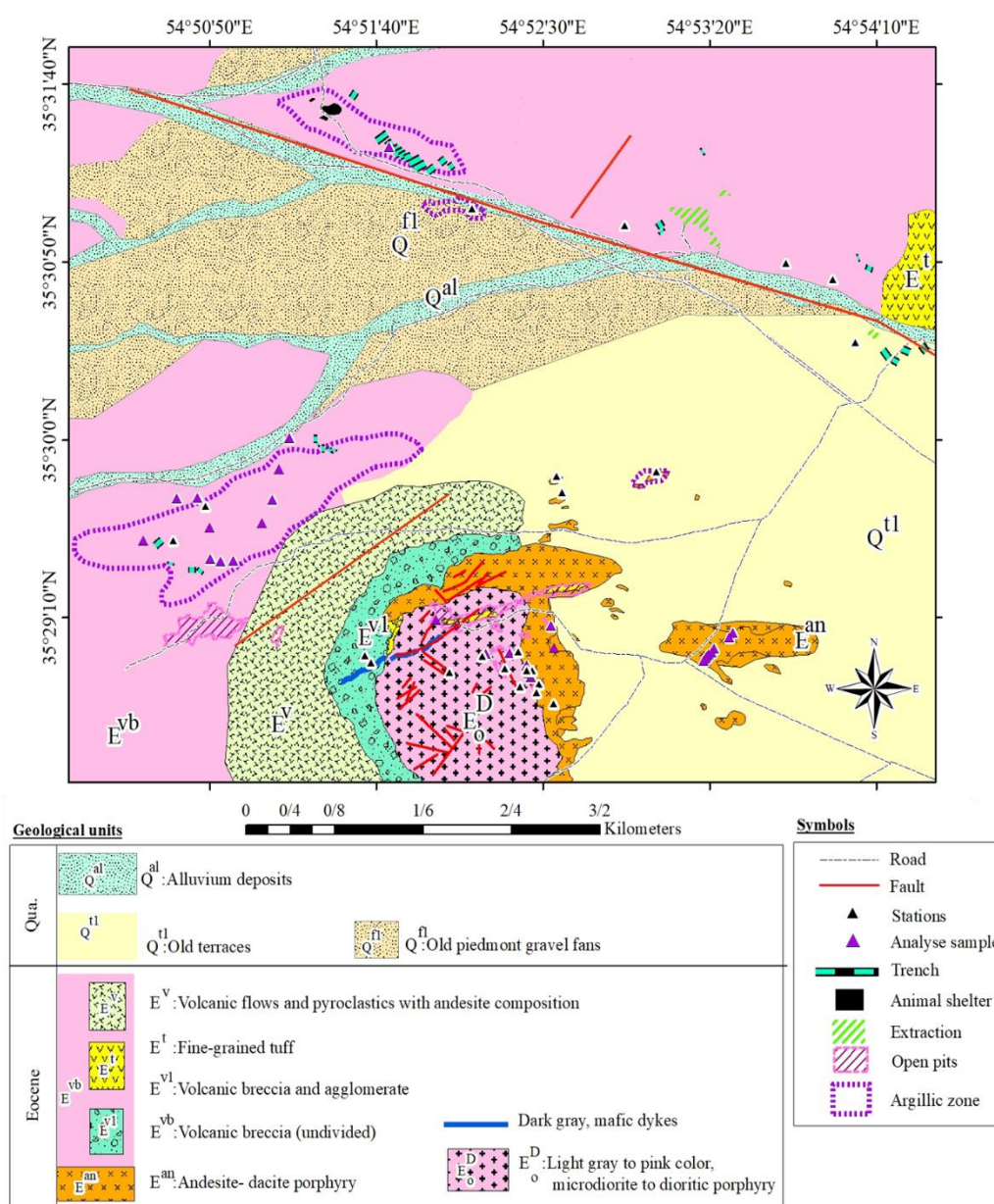
شکل ۱. A: موقعیت کمان ماگمایی ترود-چاه شیرین بر روی نقشه ساختاری ایران برگرفته از شفائی مقدم و همکاران (Shafaii Moghadam et al., 2018)، B: نقشه ساختاری از کمان ماگمایی ترود-چاه شیرین که موقعیت کانسارهای اپی‌ترمال و دو گسل اصلی ترود (در جنوب) و انجیلو (در شمال) را نشان داده است (Seifivand and Sheibi., 2019) و C: موقعیت محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی دارای پهنه‌های آرژیلیک و پوش‌سنگ‌های سیلیسی (خط چین زرد) نسبت به کانسار مس چاه موسی بر روی تصویر ماهواره‌ای

Fig. 1. A: The location of Toroud-Chah Shirin magmatic arc on the structural map of Iran taken from Shafaii Moghadam et al. (2018), B: The structural map of the Toroud-Chah Shirin magmatic arc, which includes epithermal deposits, as well as the Toroud Fault to the south and the Anjilow Fault to the north (Seifivand and Sheibi., 2019), and C: The location of the mining area in north and northeast of the Chah Musa deposit contains several argillic zones and silicic lithocaps (yellow dashed line) relative to the Chah Musa copper deposit on the satellite image



شکل ۲. A تا D: دورنمایی از پهنه‌های آرژیلیک، پوش‌سنگ و رگه‌های کوارتز حفره‌ای در محدوده معدنی شمال‌شرق کمان ماگمایی ترود-چاه شیرین (A: دید به سمت جنوب، B: دید به سمت جنوب‌شرق، C: دید به سمت شمال‌شرق و D: تصویر ماهواره‌ای از گوگل ارث)

Fig. 2. A–D: Prospects of argillic zones, lithocaps and vuggy quartz veins in the mining area north and northeast of Chah Musa deposit (A: View to the south, B: View to the southeast, C: View to the northeast, and D: Satellite image from Google Earth)

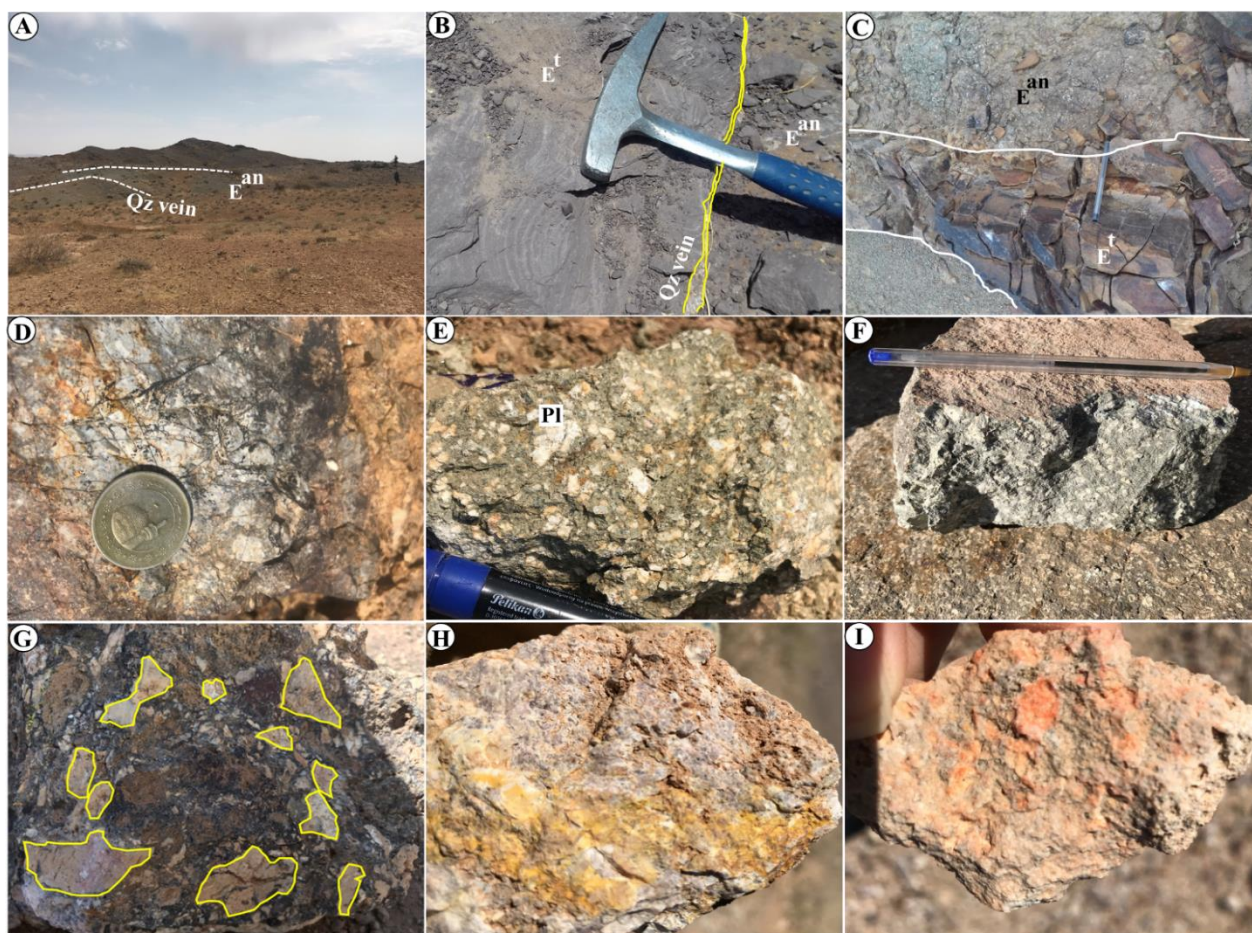


شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی از محدوده مورد بررسی و پوش‌سنگ‌های آرژیلیکی واقع در شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی

Fig. 3. A geological map of the study area and associated argillic lithocaps in the north and northeast Chah Musa deposit

تشکیل شده است، در امتداد رخ بیوتیت مشاهده می‌شوند (شکل ۵-۵). بلورهای آپاتیت به صورت شکل دار تا بی‌شکل و ریزبلور بوده است و فراوانی کمتر از ۱ درصد حجمی سنگ دارد.

در برخی از مقاطع بررسی شده، شدت دگرسانی به گونه‌ای است که تنها قالب کانی‌های اصلی باقی‌مانده است (شکل ۵-۵ و F). زیرکن با فراوانی کمتر از ۱ به صورت ادخال در کانی بیوتیت مشاهده شده است. تیتانیت که از دگرسانی بیوتیت و هورنبلند



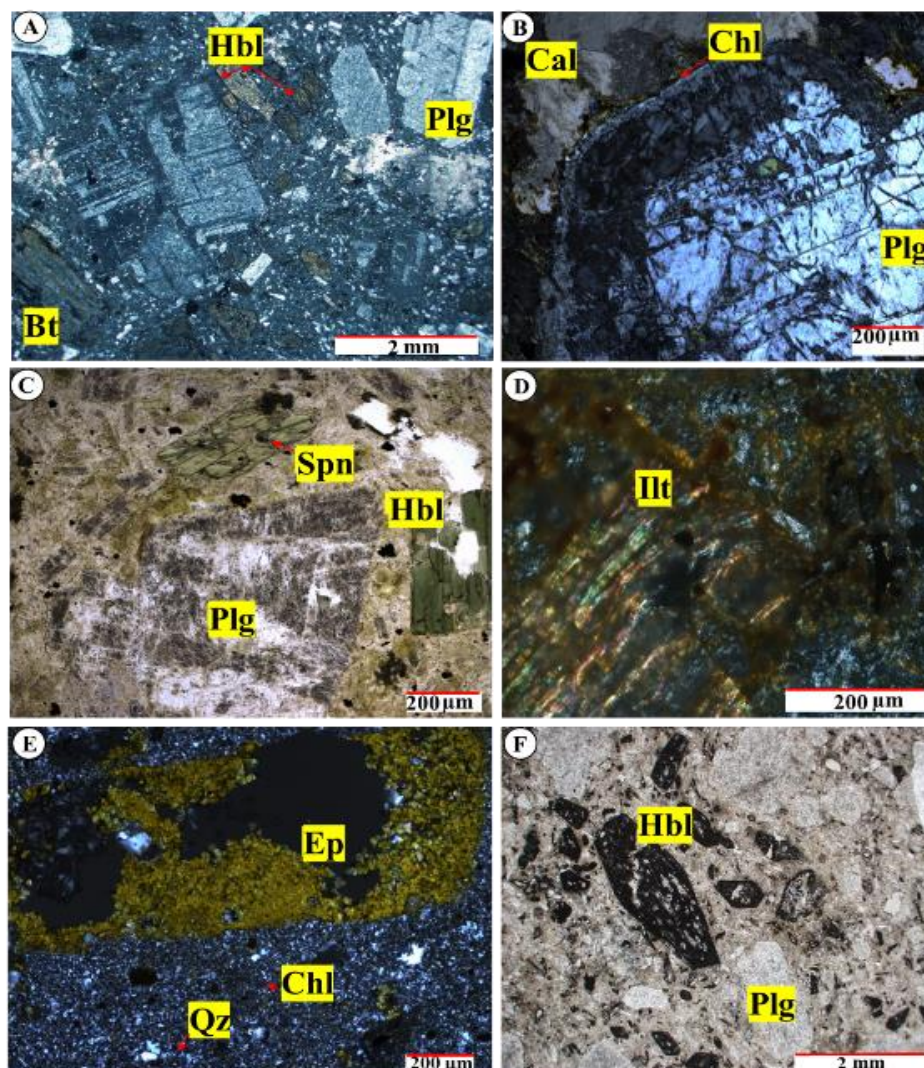
شکل ۴. تصویرهای صحرایی از رخنمون واحدهای سنگی در محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی. A و B: نمای نزدیک از محل تماس دو واحد سنگی آندزیت پورفیری و توف، C: دورنمایی از توالی واحدهای آندزیت پورفیری، توف و آگلومرا در محدوده مورد بررسی (دید به سمت جنوب)، D: نمونه دستی از آندزیت با ساخت پورفیری (درشت بلورهای درشت پلاژیوکلاز) و کمتر دگرسان‌شده، E: نمونه دستی از آندزیت سالم، F: نمای نزدیک از دگرسانی‌های سیلیسی و آرژلیک بر روی واحد آندزیت پورفیری، G: ساخت برشی، H و I: نمونه دستی از کانی آلونیت

Fig. 4. Field photos from the outcrops of rock units in the mining area north and northeast of Chah Musa deposit. A and B: A close-up view of the contact of two rock units, porphyry andesite and tuff, C: Perspective views of the sequence of porphyry andesite, tuff and agglomerate in the studied area (view to the south), D: Hand specimen of porphyry and less altered andesite (with coarse plagioclase phenocrysts), E: Hand specimen of fresh porphyry andesite, F: Close-up view of silicification and argillic alteration on porphyry andesite, G: Breccia structure, H, and I: Hand specimen of the alunite

دگرسانی

دگرسانی پروپیلیتیک در حاشیه‌های هر پهنه مشاهده می‌شود (شکل‌های ۱-C و ۲). تعدادی پوش سنگ سیلیسی با ابعاد متغیر از چند ده سانتی‌متر تا چند صد متر شناسایی شده است (شکل‌های ۱-C و ۲).

در مشاهدات میدانی و همچنین تصویرهای ماهواره‌ای سنجنده **استر** شمال‌شرق کمان ماگمایی تروود-چاه شیرین، دگرسانی گرمابی از گسترش وسیعی برخوردار بوده و علاوه بر چندین پهنه متأثر از دگرسانی‌های آرژلیک و سیلیسی، شواهد بارزی از

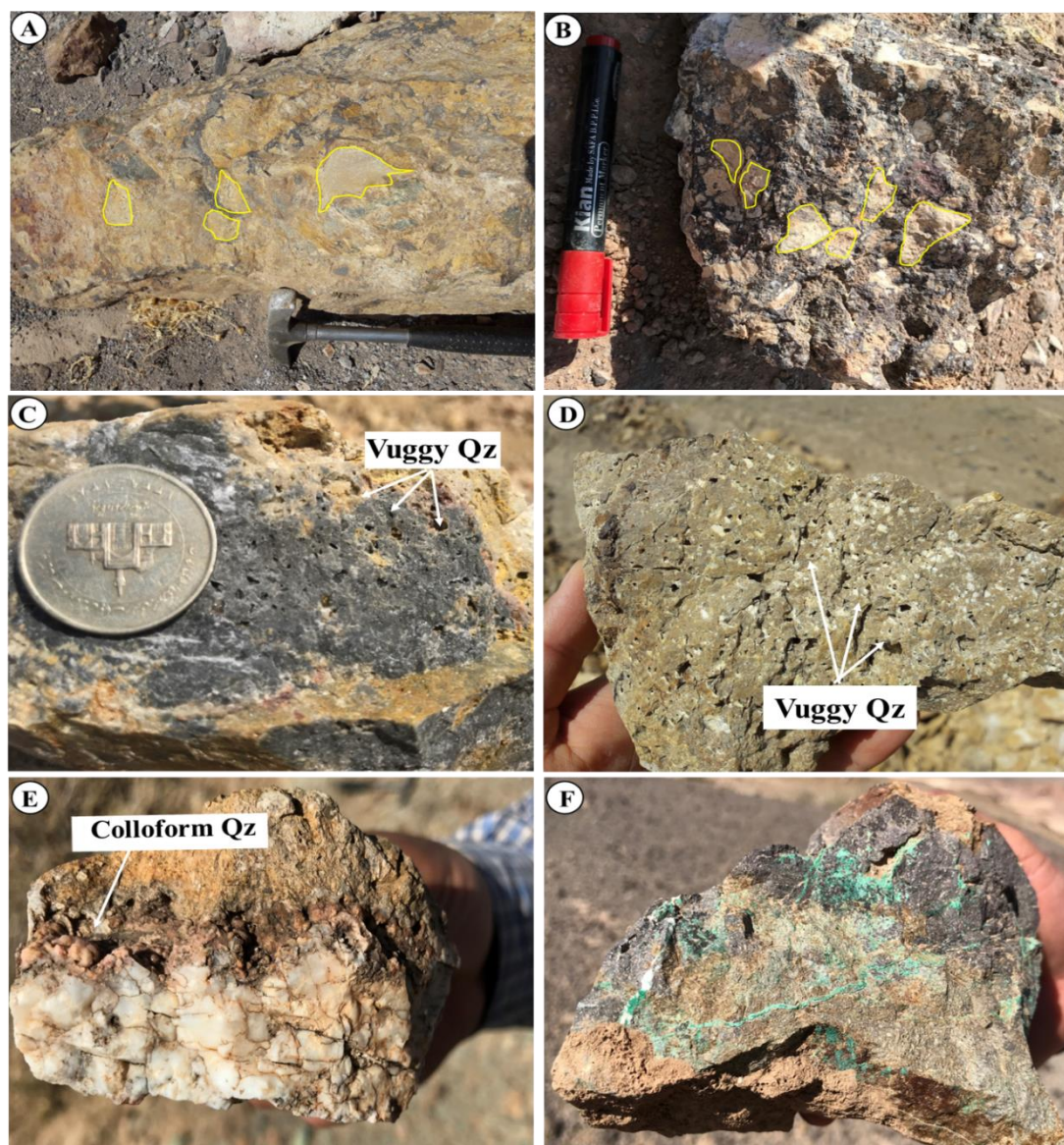


شکل ۵. برخی از مهم‌ترین شواهد میکروسکوپی در حاشیه و مرکز محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی. A: تصویر میکروسکوپی از آندزیت پورفیری نسبتاً سالم با فلوکریست‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت (نور عبوری متقاطع)، B: منطقه‌بندی در کانی پلاژیوکلاز همراه با کانی‌های ثانویه کلسیت و کلریت (نور عبوری متقاطع)، C: بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند همراه با اذخال‌های تنانتیت بر روی کانی هورنبلند (نور عبوری عادی)، D: تبدیل شدن بیوتیت به ایلیت (نور عبوری متقاطع)، E: حفره‌های پر شده با کانی‌های ثانویه (اپیدوت) در یک زمینه سیلیسی در حاشیه پهنه‌های آرژیلیک (نور عبوری متقاطع) و F: بقایایی از بلورهای هورنبلند در یک سنگ آندزیتی (نور عبوری عادی). علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Plg: پلاژیوکلاز، Bt: بیوتیت، Hbl: هورنبلند، Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Ep: اپیدوت، Qz: کوآرتز، Illt: ایلیت، Spn: اسفن).

Fig. 5. Some of the most important microscopic evidences in margin and center of the mining area north and northeast of Chah Musa deposit. A: A fresh porphyry andesite rock with phenocrysts of plagioclase, hornblende and biotite (XPL), B: Zoning in plagioclase mineral with calcite and chlorite secondary minerals (XPL), C: Plagioclase and hornblende crystals with tennantite inclusions on the hornblende mineral (PPL), D: Converting of biotite to illite (XPL), E: Cavities filled with secondary minerals (epidote) in a silicification field at the edge of argillic zones (XPL), and F: Remnants of hornblende crystals in an andesite rock. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Plg: Plagioclase, Bt: Biotite, Hbl: Hornblende, Cal: Calcite, Chl: Chlorite, Ep: Epidote, Qz: Quartz, Illt: Illite, Spn: Sphene).

شکل ۷) و تصویرهای پردازش شده حاصل از بررسی‌های سنجش از دور (Zadsaleh et al., 2012)، دگرسانی‌های زیر در محدوده مورد بررسی شناسایی شده است:

در این مناطق شواهدی از ساخت‌های برشی و به ویژه کوارتز حفره‌ای و کوارتز دارای ساخت کلوفرمی، رگه‌ای و پرکننده فضاهای خالی مشاهده می‌شود (شکل ۶- A تا F). بر مبنای بررسی‌های صحرایی، میکروسکوپی، پرتو ایکس (جدول ۱ و



شکل ۶. برخی از ساخت و بافت‌های کانه‌زایی در محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی. A و B: ساخت برشی، C و D: ساخت شاخص کوارتز حفره‌دار، E: ساخت کوارتز کلوفرم و F: ساخت رگه‌ای و پرکننده فضای خالی

Fig. 6. Certain mineralization structures and textures in the mining area north and northeast of Chah Musa deposit. A and B: Breccia structure, C and D: Vuggy quartz structure, E: Colloform quartz structure, and F: vein and filling the opening space structure

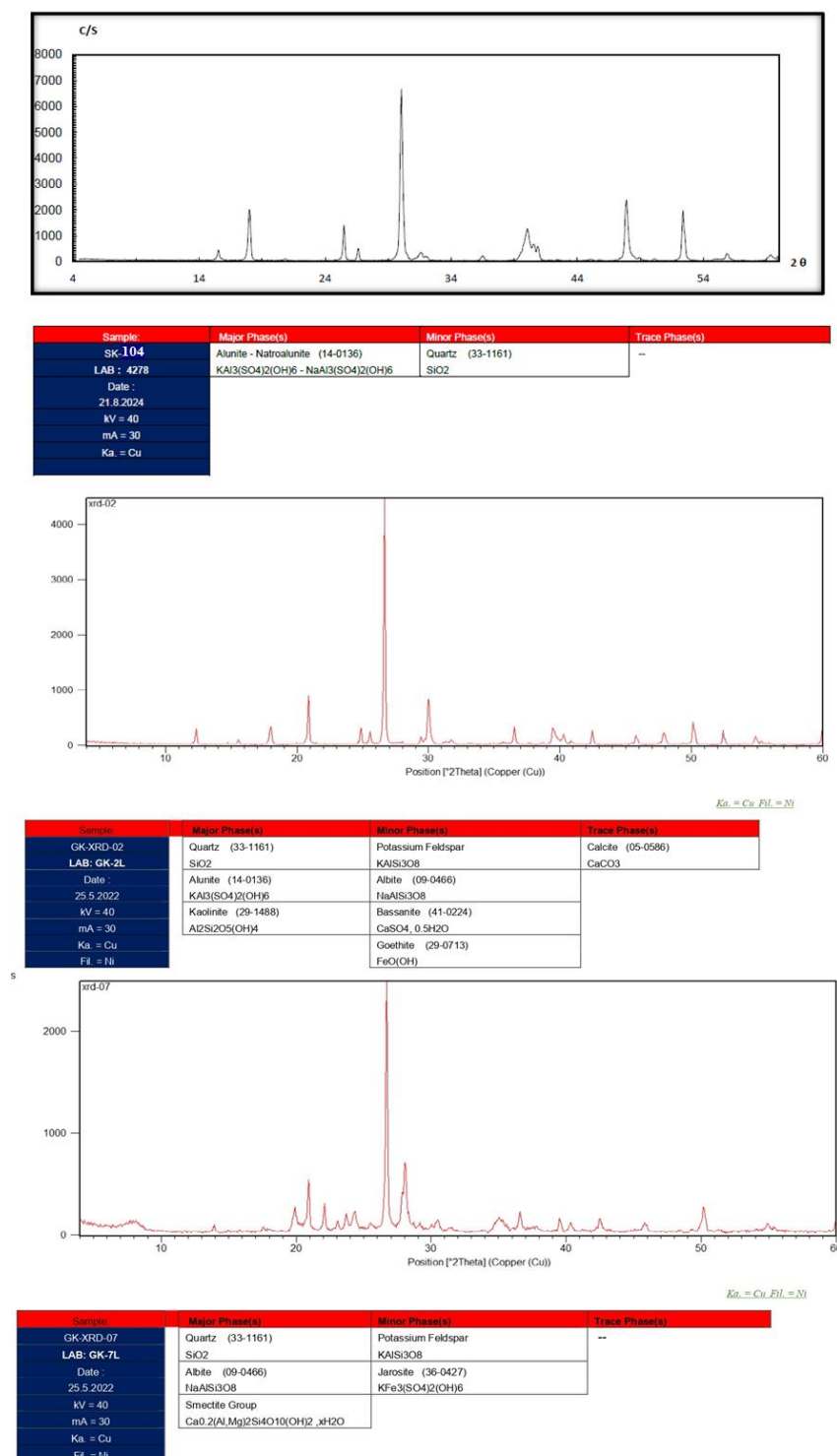
جدول ۱. نتایج بررسی‌های پراش پرتو ایکس به ترتیب از مرکز به حاشیه (از نمونه GK-2L به سمت GK-6L) از دگرسانی‌های آرژیلیک پیشرفته تا متوسط در محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی

Table 1. The results of the X-ray diffraction results from the center to margin (from GK-2L to GK-6L) from advance argillic to intermediate in the mining area north and northeast of Chah Musa deposit

Sample No.	Essential mineral	Accessory minerals
GK-2L	Quartz (SiO_2)	Basanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)
	Alunite ($\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_2$)	Goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$)
	Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)	-
SK-93	Quartz (SiO_2)	-
	Digenite (Cu_2S)	
	Laumontite ($\text{Ca}_{0.9}, \text{K}_{0.05}(\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12})(\text{H}_2\text{O})_{4.31}$)	
	Chalcopyrite (CuFeS_2)	
GK-1L	Anorthite ($\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$)	Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)
	Quartz (SiO_2)	
	Smectite ($\text{Ca}_{0.2}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$)	
GK-6L	Quartz (SiO_2)	-
	Natrojarosite ($\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$)	
	Mineral clay (Illite and Smectite group)	

می‌شود (شکل ۸-C و D). این کانی اغلب با ابعاد متوسط تا درشت‌دانه شکستگی‌ها و حفره‌های سنگ‌های میزبان را پر کرده است (شکل ۸-C و D). همراهی لیمونیت-گوتیت و کانی‌های سولفیدی بیانگر منطقه‌ای اکسیدی-سولفیدی است (شکل ۱۰). دگرسانی آرژیلیک پیشرفته: این دگرسانی با گسترش محدود و در مجاورت رگه‌های سیلیسی کانه‌دار ایجاد شده است. همچنین عملکرد این دگرسانی بر روی سنگ میزبان (تراکی آن‌دزیت) تأثیر به سزایی داشته؛ به‌طوری که بافت اولیه سنگ را به طور کامل از بین برده و پلاژیو کلازهای سنگ میزبان را به کانی‌های رسی تبدیل کرده است (شکل ۴-D). تفکیک دو نوع دگرسانی آرژیلیک و آرژیلیک پیشرفته در صحرا دشوار است؛ اما بر مبنای نتایج طیف پراش پرتو ایکس (نمونه شماره GK-2L، جدول ۱)، حضور کائولینیت و به ویژه آلونیت، رخداد دگرسانی آرژیلیک پیشرفته تأیید می‌شود.

دگرسانی سیلیسی: سیلیسی شدن یکی از شاخص‌ترین دگرسانی‌های موجود در منطقه بوده و در قالب رگه-رگچه‌های کوارتز پیریت‌دار، کوارتزهای حفره‌ای فراوان و یا به صورت پوش‌سنگ‌های سیلیسی-آهنی در بخش‌های مرتفع و در نزدیکی مناطق کانه‌دار مشاهده می‌شود. در سنگ‌های آن‌دزیتی و توف سیلیسی‌شده، کوارتز به صورت دانه‌های ریز بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار در متن و یا در قالب بافت‌های کلوفرمی، پرکننده فضای خالی و حفره‌ها یافت می‌شود (شکل ۶-C). پوش‌سنگ‌های موجود شواهد واضحی از بافت حفره‌ای دارای تخلخل بالا (کوارتز حفره‌ای) و اکسیدهای آهن فراوان با آغشتگی‌هایی از لیمونیت و گوتیت دارند (شکل ۸-A و B). همچنین آلونیت که از کانی‌های شاخص کانسارهای اپی‌ترمال با مقادیر سولفیداسیون بالاست (Arribas, 1995)، در زیر میکروسکوپ با شکل‌های لوله‌ای و رومبهدرال دانه‌ریز در حد ۵ تا ۲۵۰ میکرون مشاهده



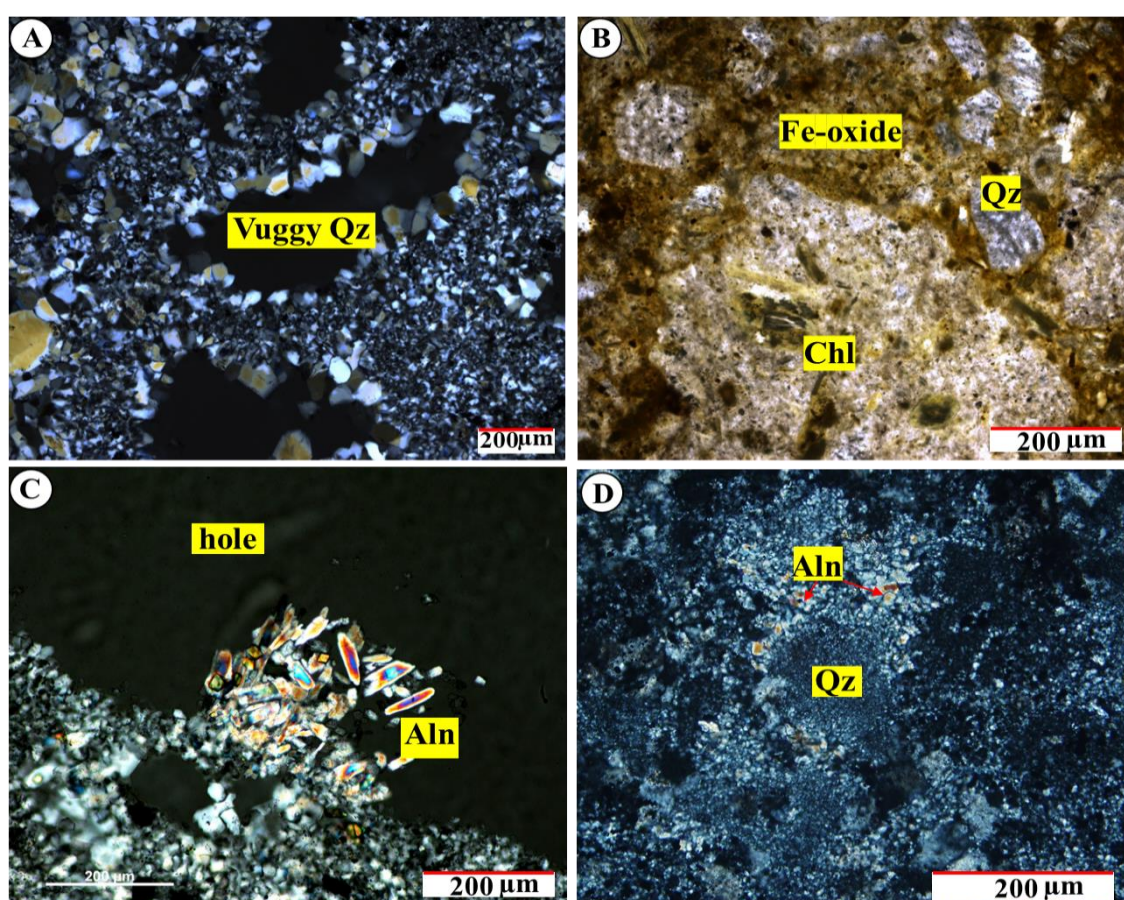
شکل ۷. نتایج آنالیز XRD از کانی‌های شاخص دگرسانی نظیر آلونیت، ژاروسیت و کائولینیت در محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی

Fig. 7. XRD analysis results of alteration indicator minerals such as alunite, jarosite, and kaolinite in the mining area north and northeast of Chah Musa deposit

GK-6L، جدول ۱) هستند.

دگرسانی پروپیلیتیک: در صحرا سنگ‌های آذرین متأثر از دگرسانی پروپیلیتیک در بیرونی‌ترین زون دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی رگه‌ای، به آسانی با حضور کانی‌های اپیدوت و کلریت سبز رنگ شناسایی می‌شوند (شکل ۵-B و E). در این سنگ‌ها، هورنبلند به کلریت و کلسیت تبدیل شده و پلاژیوکلاز با کلسیت، اپیدوت، کلریت و کانی‌های رسی جایگزین شده است.

دگرسانی آرژیلیک متوسط: سنگ‌های متأثر از دگرسانی آرژیلیک متوسط در صحرا دارای رنگ‌های زرد تا سفید بوده و در مقایسه با سایر دگرسانی‌های موجود از گسترش بیشتری برخوردار است. این دگرسانی در فاصله بیشتری از رگه‌های سیلیسی توسعه یافته است و به تدریج به دگرسانی پروپیلیتیک ختم می‌شود. بر مبنای نتایج پراش پرتو ایکس، کانی‌های رسی موجود دارای ترکیب ایلیت-اسمکتیت (نمونه شماره GK-1L و شماره



شکل ۸. برخی از مهم‌ترین شواهد میکروسکوپی کانی‌های شاخص دگرسانی در محدوده معدنی شمال و شمال شرق کانسار چاه‌موسی. A: بافت شاخص کوآرتز حفره‌ای در نور عبوری متقاطع، B: شواهدی از اکسید آهن و کلریت در زمینه سنگ، C: پر شدگی حفره‌ها با بلورهای آلونیت لوله‌ای شکل (نور عبوری متقاطع) و D: بلورهای آلونیت ریزدانه در یک زمینه سیلیسی (نور عبوری متقاطع). علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qz: کوآرتز، Chl: کلریت، Aln: آلونیت).

Fig. 8. Some of the most important microscopic evidences in the mining area north and northeast of Chah Musa deposit. A: Vuggy quartz indicator texture (XPL); B: evidences of oxide-iron and chlorite in matrix rock; C: Filling the holes with tubular alunite crystals (XPL), and D: Fine-grained alunite crystals in a silica matrix (XPL). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Qz: Quartz, Chl: Chlorite, Aln: Alunite).

به طور کلی، بر مبنای شواهد صحرایی و آزمایشگاهی به نظر می‌رسد مجموعه کانی‌های متأثر از عملکرد سیالات گرمایی، الگوی پهنه‌بندی مشخصی دارند. این الگوی توزیع که به دلیل نبود حفاری‌های اکتشافی، فقط در سطح زمین بررسی و شناسایی شده است، از بخش‌های داخلی و مجاور با سامانه‌های رگه‌ای دارای کانه‌زایی به سمت خارج، شامل دگرسانی سیلیسی (کوارتز حفره‌ای، کوارتز-آلونیت)، آرژیلیک پیشرفته (کائولینیت، موریونیت-ایلیت)، دگرسانی آرژیلیک (کوارتز-مونت موریونیت-اسمکتیت-ایلیت-ناتروژاروسیت) و دگرسانی پروپیلیتیک (کلریت-اپیدوت-آلیت-کلسیت) هستند (شکل‌های ۲ و ۹-A، B و C). این پهنه‌بندی دگرسانی و گسترش پوش‌سنگ‌های سیلیسی و ساخت کوارتز حفره‌ای (شکل ۶-B) با الگوی دگرسانی سامانه‌های با سولفیداسیون بالای وایت و هدنکوئیست (White and Hedenquist, 1990) به خوبی مطابقت داشته و نشان‌دهنده فعالیت سیالات گرمایی با pH کمتر از ۲ در این منطقه هستند (Stoffregen, 1987).

کانه‌زایی

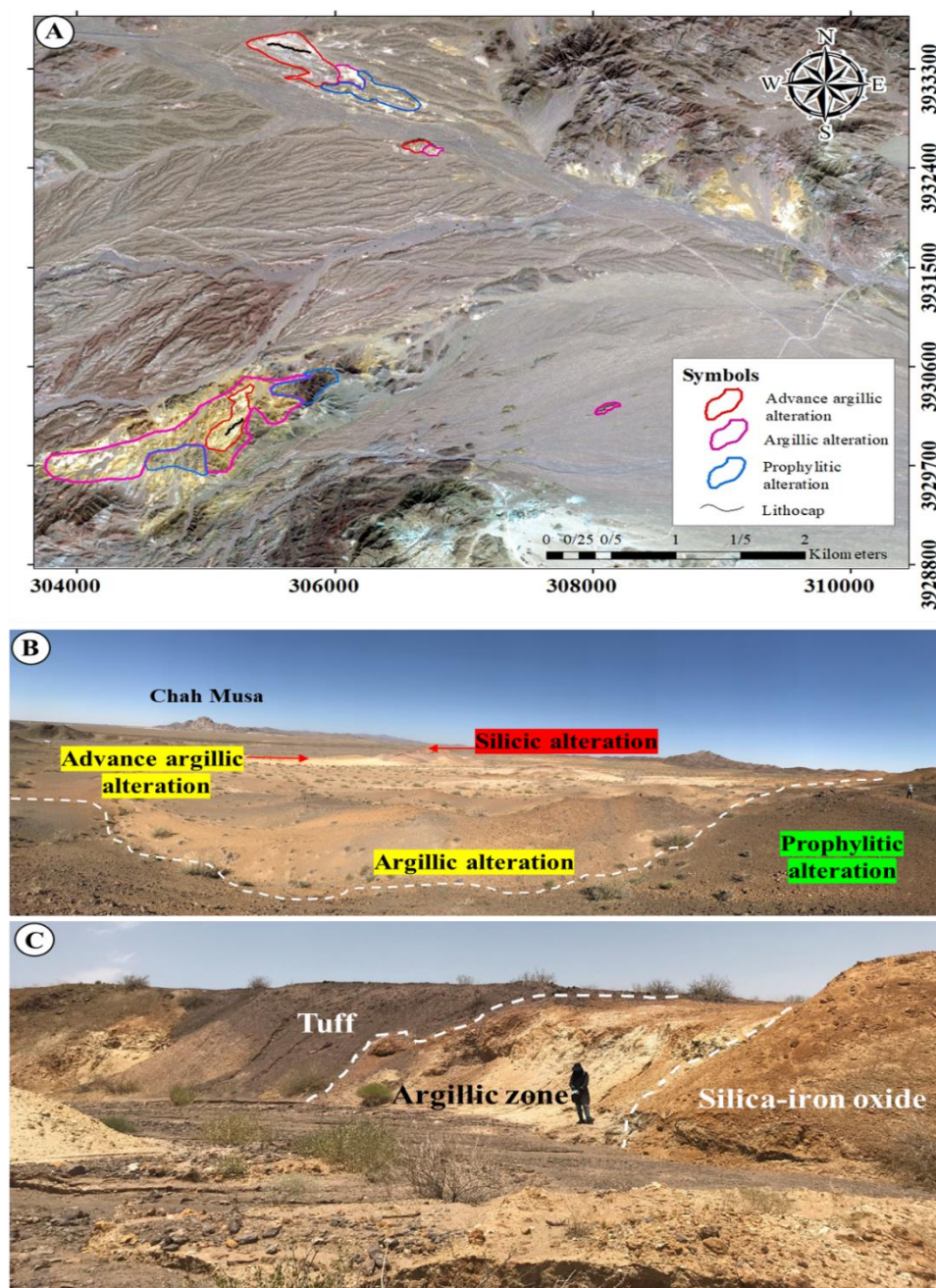
بر مبنای بررسی‌های میدانی و نمونه‌های دستی برداشت‌شده از محدوده معدنی مورد بررسی، سنگ‌های آندزیتی دارای رگه‌های سیلیسی-سولفیدی با ضخامت متغیر از ۱ سانتی‌متر تا ۲ متر میزبان کانی‌سازی هستند. کانی‌زایی به صورت رگه-رگچه، پرکننده فضای خالی، جانشینی و افشان مشاهده شده است (شکل ۱۰-A تا D). رگه‌های کانه‌دار حاوی فازهای سولفیدی هیپوزن پیریت، کالکوپیریت، انارژیت، گالن، مگنتیت و هماتیت اسپیکولار و کانه‌های سوپرژن روتیل، گوتیت و لیمونیت و کانی‌های باطله کوارتز شانه‌ای-قشری-حفره‌ای، کلسیت و کانی‌های رسی هستند (شکل ۱۰-A تا D). سولفیدهای هیپوزن در سطح تا حد زیادی توسط فرایندهای سوپرژن اکسید شده و با هیدروکسیدهای آهن، اکسیدها، سیلیکات‌های مس (کریزوکولا)، کربنات‌های مس (مالاکیت، آزوریت)، گوتیت و لیمونیت جایگزین شده‌اند و

یک پوش‌سنگ شسته‌شده را تشکیل داده‌اند.

پیریت و کالکوپیریت به عنوان مهم‌ترین کانه‌های سولفیدی در این محدوده معدنی به صورت نیمه بلورهای شکل‌دار تا خود شکل با طیفی از اندازه و با درصد فراوانی ۳۰ تا ۵۰ درصد مشاهده می‌شوند (شکل ۱۰-A تا C). پیریت که اغلب در سنگ‌های دگرسان و کانی‌سازی گرمایی رایج است، به صورت دانه‌ریز تا بلورهای درشت خود شکل-نیمه شکل دار دیده می‌شود (شکل ۱۰-A). پیریت کلوفرمی به عنوان آخرین نسل، در مراحل پایانی سامانه گرمایی تشکیل شده‌اند. انارژیت نیز از کانه‌های شاخص همراه دگرسانی آرژیلیک پیشرفته به صورت محلی و با فراوانی کمتر مشاهده شده است (شکل ۱۰-A). این سولفیدها به اکسیدهای آهن ثانویه از جمله گوتیت تبدیل شده است. پیریت و مگنتیت با ابعاد متفاوت به صورت هم‌رشدی با هماتیت اسپیکولار اولیه یافت شده است (شکل ۱۰-C و D). گالن با رخ‌های مثلثی شکل همراه با کالکوپیریت مشاهده شده است. مگنتیت به گوتیت و هماتیت تبدیل شده است (شکل ۱۰-C و D). روتیل به صورت دانه پراکنده در متن سنگ مشاهده شده است (شکل ۱۰-D). توالی هم‌برزادی کانی‌ها در محدوده معدنی نیز در شکل ۱۱ آورده شده است. در مقاطع میکروسکوپی بررسی شده، ذرات طلا مشاهده نشد؛ اما بر اساس نتایج تجزیه زمین‌شیمی تعدادی از نمونه‌ها، مقادیر اندکی طلا (بیشینه ۷۳ پی پی بی) و بین ۰/۳ تا ۰/۶ درصد وزنی سرب و روی گزارش شده است (Sheibi and Mousivand, 2018).

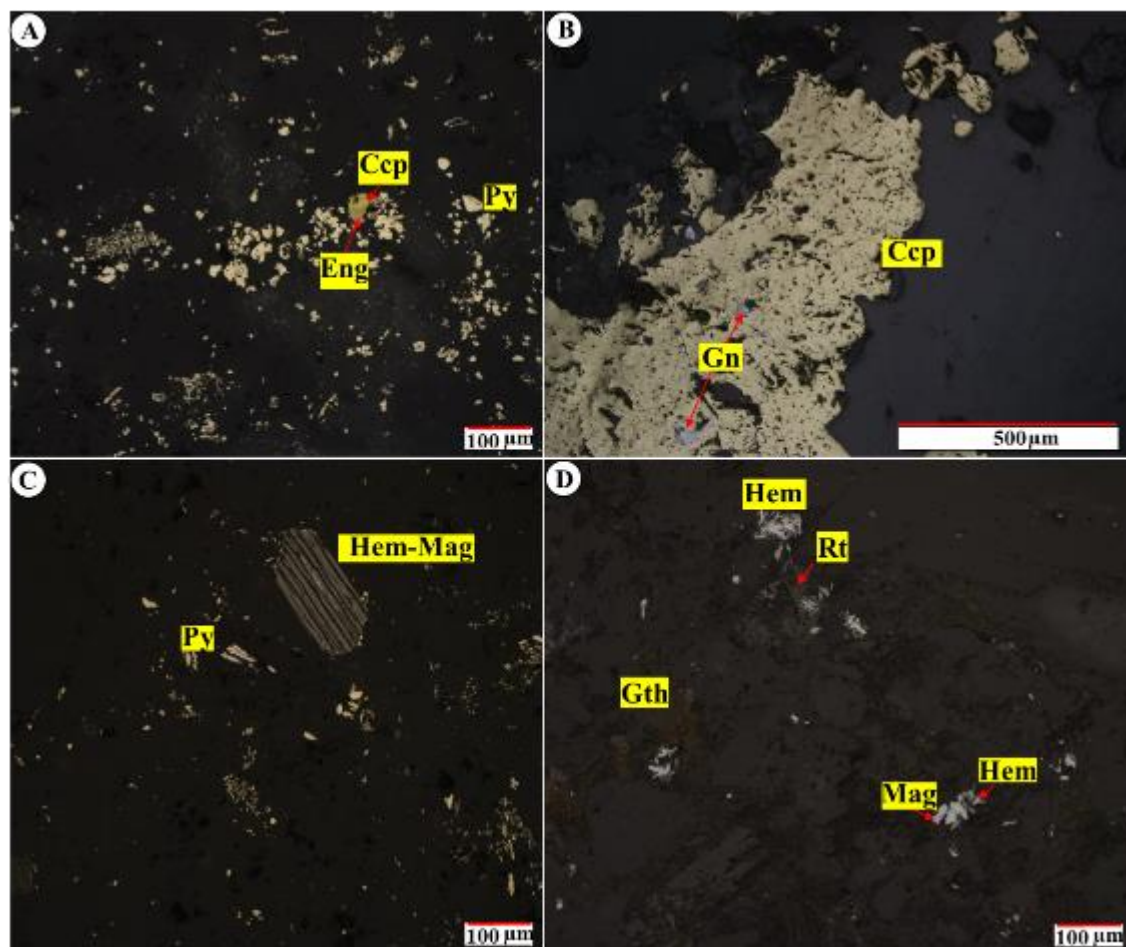
مراحل کانه‌زایی و توالی هم‌یافتی

بر پایه شواهد صحرایی و میکروسکوپی، کانه‌زایی در طی دو مرحله اصلی و سوپرژن شکل گرفته است (شکل ۱۰). کانه‌زایی اصلی شامل سه زیر مرحله سیلیسی شدن سنگ میزبان (Stage I)، رگه-رگچه‌های سیلیسی-سولفیدی (Stage II) و کانه‌زایی تأخیری (Stage III) است.



شکل ۹. A: پهنه‌بندی دگرسانی بر روی تصویر ماهواره‌ای در بخش شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی، B: تصویر صحرایی از پهنه‌بندی دگرسانی در یکی از پهنه‌های آرژیلیک بخش شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی (دید به سمت جنوب‌غرب). این دگرسانی‌ها به ترتیب از پوش‌سنگ‌های سیلیسی در دگرسانی آرژیلیک پیشرفته در بخش‌های مرکزی شروع شده و به دگرسانی‌های آرژیلیک متوسط و پروپیلیتیک در حاشیه ختم می‌شود و C: تصویر صحرایی از زون سیلیسی-اکسید آهن (دید به سمت شمال‌شرق)

Fig. 9. A: Alteration zoning on satellite imagery of the northeast part of the north and northeast part of the Chah Musa, B: Alteration zoning in one of the argillic zones of the north and northeast Chah Musa deposit (to southwest). These alterations start from silicic lithoscopes in advanced argillic alteration in the central parts and end in intermediate argillic and propylitic alterations in the margins, and C: Field photo of the silica-iron oxide zone (view to the northeast)



شکل ۱۰. تصاویرهای کانه‌نگاری از محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی. A: تصویر میکروسکوپی از دانه‌های پیریت کلوفرمی و دانه‌ریز به صورت پراکنده و هم‌رشدی کالکوپیریت با انارژیت در بخش مرکزی پهنه آرژلیک، B: همراهی کالکوپیریت با گالن درون رگه سیلیسی در حاشیه پهنه آرژلیک، C: هم‌رشدی پیریت و مگنتیت با هماتیت اسپیکولار در بخش مرکزی پهنه آرژلیک و D: تبدیل شدن مگنتیت به هماتیت تیغه‌ای و حضور گوتیت و روتیل. تمامی تصاویرها در نور انعکاسی و علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Eng: انارژیت، Gn: گالن، Hem: هماتیت، Mag: مگنتیت، Gth: گوتیت، Rt: روتیل).

Fig. 10. Photomicrograph of the ores of the mining area in north and northeast of Chah Musa deposit. A: Photomicrograph of colloform pyrite grains and small grains scattered and co-growth of chalcopyrite with enargite in the central part of the argillic zone, B: Association of chalcopyrite with galena in the silica vein at the edge of the argillic zone, C: Coexistence of pyrite and magnetite with specular hematite in the central part of the argillic zone, and D: Converting of magnetite to blade hematite and the presence of goethite and rutile. All images in reflected light and Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Py: Pyrite, Ccp: Chalcopyrite, Eng: Enargite, Gn: Galena, Hem: Hematite, Mag: Magnetite, Gth: Goethite, Rt: Rutile).

آرژلیک پیشرفته در این منطقه شده است. از سوی دیگر، رگه-رگچه‌های سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت) دومین فاز در مرحله Stage II و یا تناوب خروج سیال گرمابی محسوب می‌شوند. این

بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که سیال گرمابی به عنوان نخستین فاز در مرحله Stage I، سبب شسته‌شدن اولیه سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری و ایجاد دگرسانی

رگه- رگچه‌های سولفیدی (کانی‌زایی اصلی) به همراه دگرسانی سیلیسی در بخش مرکزی پهنه آرژلیک به صورت توده‌ای، حفره‌ای و رگه‌ای دیده می‌شود. رخداد این نوع دگرسانی و کوارتزهای حفره‌ای از نشانه‌های بارز توسعه یک کانسار اپی‌ترمال سولفیداسیون بالاست (شکل‌های A-۷ و B-۶) (Hedenquist et al., 2000; et al., 1998). همانند بسیاری از کانسارهای با نوع مشابه (برای مثال کانسار تزلار و چاه زرد

رگه- رگچه‌های سولفیدی (کانی‌زایی اصلی) به همراه دگرسانی سیلیسی در بخش مرکزی پهنه آرژلیک به صورت توده‌ای، حفره‌ای و رگه‌ای دیده می‌شود. رخداد این نوع دگرسانی و کوارتزهای حفره‌ای از نشانه‌های بارز توسعه یک کانسار اپی‌ترمال سولفیداسیون بالاست (شکل‌های A-۷ و B-۶) (Hedenquist et al., 2000; et al., 1998). همانند بسیاری از کانسارهای با نوع مشابه (برای مثال کانسار تزلار و چاه زرد

Minerals		Hydrothermal mineralization			Supergene
		Stage I	Stage II	Stage III	
Ore minerals	Pyrite	██████████	██████████		
	Galena		██████████		
	Magnetite		██████████		
	Digenite		██████████		
	Natrojarosite		██████████		
	Hematite		██████████		
	Goethite				██████████
	Limonite				██████████
Alteration minerals	Malachite				██████████
	Quartz	██████████	██████████	██████████	
	Calcite		██████████	██████████	
	Alunite	██████████	██████████		
	Pyrophyllite	██████████	██████████		
	Kaolinite	██████████	██████████		██████████
	Chlorite	██████████	██████████		
	Epidote	██████████	██████████		
	Illite	██████████	██████████		██████████
	Montmorillonite	██████████	██████████		██████████
Ore texture	Smectite	██████████	██████████		██████████
	Dissemination	██████████	██████████		
	Brecciated		██████████		
	Vein-Veinlets		██████████	██████████	██████████
	Vuggy		██████████		
	Colloform		██████████		
	Open- space fillings		██████████		██████████

شکل ۱۱. توالی هم‌یافتی کانی‌ها در محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی

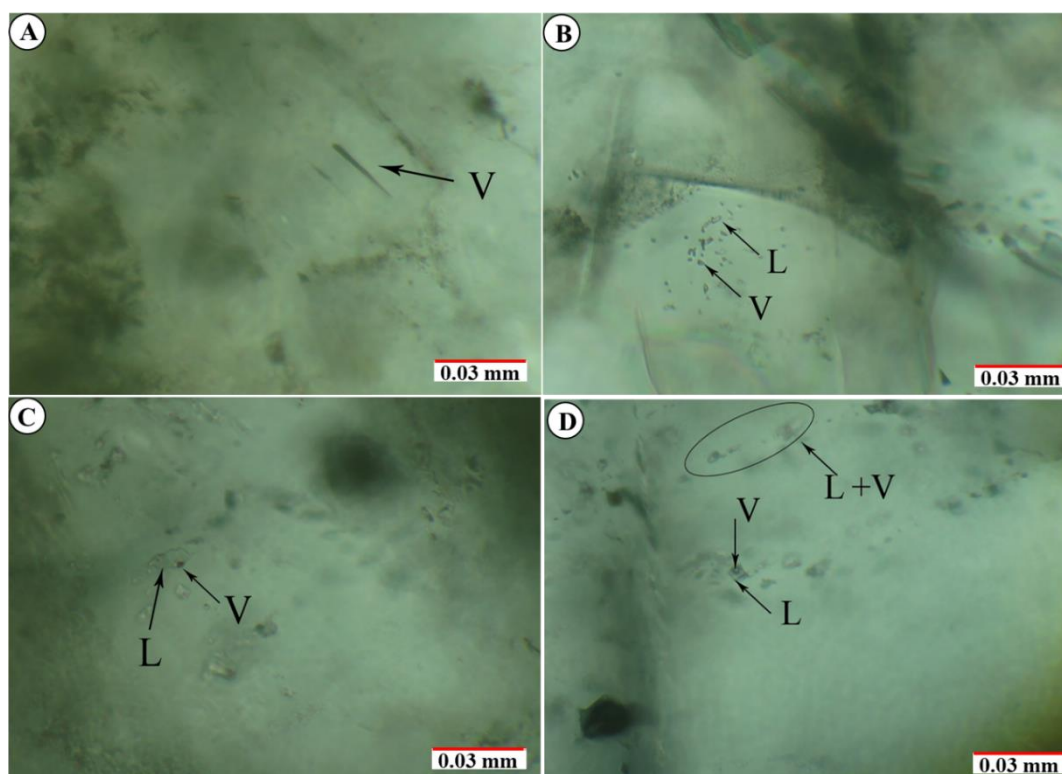
Fig. 11. Paragenetic sequence of minerals in the mining area north and northeast of Chah Musa deposit

سیال بررسی شده از نظر ژنتیکی، به سه گروه (اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب) تقسیم می‌شوند. بر اساس تقسیم‌بندی انجام‌شده توسط شفرد و همکاران (Shepherd and Allen, 1985)، سیالات موجود از نوع دو فازی مایع- بخار (L+V) غنی از مایع، تک

میان‌بارهای سیال مورد بررسی دارای شکل‌های دوکی، منفرد، کروی، پهن و نامنظم بوده و به صورت مجزا و یا تجمعی با ابعاد بین ۲ تا ۱۲ میکرون مشاهده شده است (شکل ۱۲). میان‌بارهای

میان‌بار سیال به دست آمده در این پژوهش در محدوده کانسارهای اپی‌ترمال قرار گرفته است (شکل ۱۳). قرارگیری میان‌بارهای سیالات در دو دسته دمایی نشان می‌دهد که احتمالاً علاوه بر فرایند سردشدگی، اختلاط یک سیال سردتر (آب جوی) با یک سیال ماگمایی داغ بالارونده موجب نهشته‌شدن کانی‌ها شده است. با استفاده از نمودار درجه حرارت و منحنی‌های فشار، با توجه به عدم رخداد احتمالی جوشش در کانسار، عمق میانگین به دست آمده بیشتر از ۴۵۰ متر بوده است (شکل ۱۴-A) (Cunningham, 1978). میزان فشار بخار نیز برای سیالات درگیر بین ۱۰ تا ۳۰۰ بار است (شکل ۱۴-B).

فازی بخار (V) و تک فازی مایع (L) هستند (شکل ۱۲-A تا D). میان‌بارهای دو فازی مایع-بخار به صورت دانه پراکنده مشاهده شده است و این نوع سیالات دارای فراوانی بیشتر از میان‌بارهای تک فازی مایع و میان‌بارهای تک فازی بخار هستند. نتایج به دست آمده از بررسی میان‌بارهای سیال، تغییرات دمای همگن‌شدن پایانی به فاز مایع (Th) بین ۱۶۰ تا ۳۶۲/۸۰ درجه سانتی‌گراد، تغییرات دمای ذوب پایانی یخ (T_{mice}) بین ۱/۳ تا ۵/۹- درجه سانتی‌گراد و میزان شوری بین ۲/۲۴ تا ۹/۰۸ درصد وزنی معادل نمک طعام را نشان می‌دهد (جدول ۲ و شکل ۱۳). در نمودار دمای همگن‌شدن در مقابل شوری ویلکینسون (Wilkinson, 2001)، داده‌های



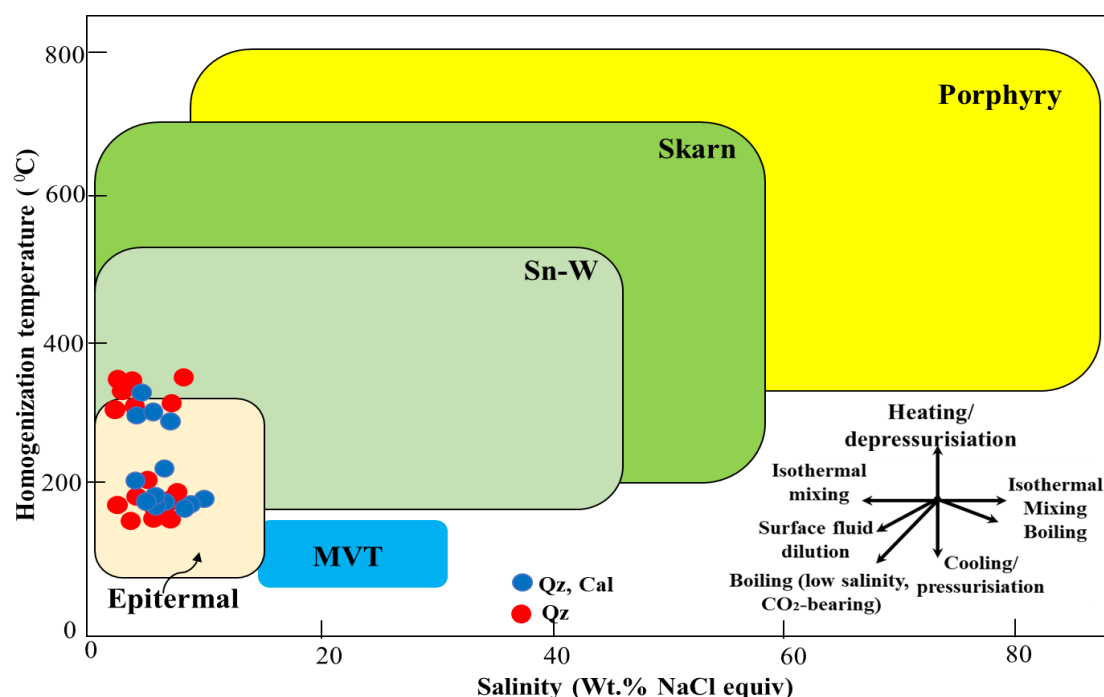
شکل ۱۲. تصویرهای میکروسکوپی از میان‌بارهای سیال در کانی‌های کوارتز و کلسیت محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی. A: میان‌بار سیال تک فازی غنی از بخار (SK100.1)، B: میان‌بار سیال تک فازی غنی از مایع و بخار (SK100.2)، C: میان‌بار سیال دو فازی غنی از مایع به صورت انفرادی (SK100.1) و D: میان‌بار سیال دو فازی غنی از مایع به صورت تجمعی همراه با میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از بخار (SK100.2)

Fig. 12. Microscopic images of fluid inclusions in quartz and calcite mineral in the mining area north and northeast of Chah Musa deposit. A: Vapor-rich single-phase fluid inclusion (SK100.1), B: Liquid-vapor (L+V) rich single-phase fluid inclusion (SK100.2), C: Liquid-rich single-phase fluid inclusion (SK100.1), and D: Cumulative liquid-rich two-phase fluid inclusions in conjunction with vapor-rich two-phase fluid inclusions (SK100.2)

جدول ۲. داده‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال در محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی. nO. بیانگر تعداد میان‌بارهای سیال اندازه‌گیری شده و FIA نیز بیانگر مجموعه میان‌بارهای سیال هستند. شوری بر اساس بودنار (Bodnar, 1993) محاسبه شده است.

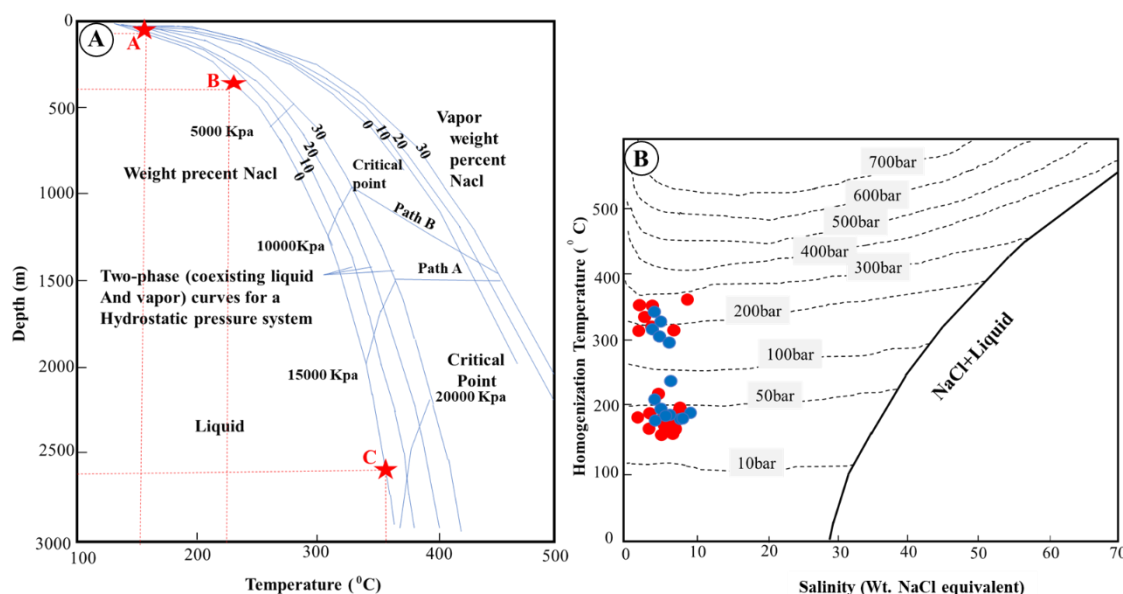
Table 2. Microthermometric data fluid inclusions in the mining area north and northeast of Chah Musa deposit. N represents the number of measured fluid inclusions and FIA represents fluid inclusion assemblages. Fluid salinity was calculated based on (Bodnar, 1993).

Sample	Host mineral	FI type	FIA	Type	no.	Vapor liquid ratio	T _{mice} (°C)	Th (°C)	Salinity (wt.% NaCl eq.)
FI-100.1	Qz	Primary	FIA-1	L+V	9	10	-1.45 to -4.90	160 to 355.92	2.41 to 7.31
			FIA-2	L+V	6	20	-3.15 to -5.75	162.53 to 362.80	5.11 to 8.81
			FIA-3	L+V	4	30	-1.32 to -4.32	165.25 to 338.45	2.24 to 6.88
			FIA-4	L+V	1	35	-3.45	168.15	5.56
FI-100.2	Cal	Primary	FIA-1	L+V	4	20	-2.80 to -4.95	180.20 to 310.32	4.65 to 7.73
	Qz		FIA-2	L+V	4	30	-2.95 to -5.10	181.15 to 325.34	4.80 to 8
			FIA-3	L+V	6	10	-2.55 to -5.90	185.37 to 334.35	4.03 to 9.08
	Cal		FIA-4	L+V	1	5	-2.65	182.82	4.34



شکل ۱۳. موقعیت سیالات درگیر محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی در نمودار برگرفته شده از ویلکینسون (Wilkinson, 2001)

Fig. 13. The location of the fluid inclusions in the mining area north and northeast of Chah Musa deposit the diagram taken from Wilkinson (2001)



شکل ۱۴. A: نمودار تعیین عمق بر حسب دمای همگن شدن (Cunningham, 1978) در محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی (A: معادل کمینه دمای همگن‌شدگی، B: معادل میانگین دمای همگن‌شدگی و C: معادل بیشینه دمای همگن‌شدگی) و B: تعیین فشار بخار بر اساس دمای همگن‌شدن و میزان شوری در محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی.

Fig. 14. A: The depth determination chart based on the homogenization temperature (Cunningham, 1978) in the mining area of north and northeast of Chah Musa deposit (A represents the minimum temperature of homogenization, B represents the average temperature of homogenization, and C represents the maximum temperature of homogenization), and B: The determination of vapor pressure based on the homogenization temperature and salinity in the north and northeast Chah Musa deposit

نوع کانه‌زایی و الگوی تشکیل

کانی‌سازی در محدوده مورد بررسی از نظر ویژگی‌های سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی، ساخت و بافت ماده معدنی و میان‌بارهای سیال، شباهت‌های زیادی را با کانسارهای اپی‌ترمال نشان می‌دهد (Pirajno, 2009; Kelley et al., 2020). ذخایر اپی‌ترمال بر اساس نوع دگرسانی گرمابی و مجموعه کانی‌های سولفیدی همراه به دو گروه آدولاریا-سریسیت (سولفیداسیون پایین) و آلونیت-کائولینیت (سولفیداسیون بالا) تقسیم می‌شوند (Misra, 2000; Robb, 2020). به دلیل حضور سنگ‌های متأثر از دگرسانی آرژلیک پیشرفته و پوش‌سنگ‌های سیلیسی متعدد، گسترش وسیع دگرسانی آرژلیک، ساخت‌های برشی، کلوفرمی، و حفره‌ای در کوارتز و مجموعه کانی‌های شاخص

انارژیت و آلونیت، محدوده معدنی مورد بررسی بیشترین شباهت را با سامانه‌های اپی‌ترمال با سولفیداسیون بالا نشان می‌دهد (Hedenquist et al., 2000; Sillitoe et al., 2005; Li et al., 2024). آلونیت و کوارتز حفره‌ای موجود در محدوده معدنی، در شرایط سیالی $\text{pH} \leq 3$ در مرکز یک سامانه اپی‌ترمال ایجاد شده‌اند (Stoffregen, 1987). ساخت برش گرمابی در سامانه‌های اپی‌ترمال و در محدوده مورد بررسی رایج است و شواهدی بر بیان سامانه‌های انتقالی اپی‌ترمال-پورفیری است (Sillitoe et al., 2005; Pirajno, 2009; Kelley et al., 2020). دگرسانی سیلیسی شدن مرتبط با دگرسانی‌های آرژلیک پیشرفته و پروپلیتیک در محدوده مورد بررسی، انتقال سامانه‌های مس پورفیری و سامانه‌های طلا-مس اپی‌ترمال مربوط به

شسته شده است. در چنین شرایطی، به دلیل پیدایش آنیون کربناته و افزایش pH، مالاکیت به صورت رگچه و یا آغستگی در زمینه سنگ تشکیل شده است. بنابراین نوع کانی‌زایی، با توجه به واکنش‌های سنگ دیواره و آب‌های جوی، از اسیدی به سوی خنثی و اکسیدی شدن پیش‌رفته است (Li et al., 2024). حضور بافت برشی وسیع در سنگ‌های آذرین محدوده مورد بررسی نخستین تظاهرات عملکرد یک سیال گرمابی است که ضمن آب‌شویی اولیه واحدهای آذرآواری و آتشفشانی منطقه، بستر مناسبی برای گسترش دگرسانی سیلیسی و آرژیلیک بعدی را فراهم کرده است. بر مبنای جان (John, 2001) آلونیت درشت بلور صورتی رنگ (شکل ۴-۱) موجود در دگرسانی آرژیلیک پیش‌رفته هیپوژن بوده و به واسطه عملکرد سیالات ماگمایی-گرمابی تشکیل شده است. کوارتز حفره‌ای (بازماندی) از ویژگی‌های بارز ذخایر سولفید بالاست که توسط شست‌وشوی شدید از یک سیال اسیدی غنی از سولفات ($T = 250^\circ\text{C}$, $\text{pH} < 2$)، از درشت بلورهای باقی‌مانده سنگ میزبان برجای می‌ماند (White and Hedenquist, 1990; Arribas, 1995).

میان‌بارهای سیال در سامانه‌های اپی‌ترمال توسط سیالاتی با شوری پایین مشخص می‌شوند (Wilkinson, 2001) و سیالی با شوری بالا در بخش پتاسیک سامانه‌های پورفیری در عمق باقی می‌ماند (Henley and McNabb, 1978; Redmond et al., 2004; Williams-Jones and Heinrich, 2005). نتایج حاصل از بررسی میان‌بارهای سیال، تغییرات دمای همگن شدن پایانی به فاز مایع (Th) بین ۱۶۰ تا ۳۶۲/۸۰ درجه سانتی‌گراد، تغییرات دمای ذوب پایانی یخ (T_{mice}) بین ۱/۳- تا ۵/۹- درجه سانتی‌گراد و میزان شوری ۲/۲۴ تا ۹/۰۸ درصد وزنی معادل نمک طعام را نشان می‌دهد (جدول ۲ و شکل ۱۳) که این مقادیر با سامانه‌های اپی‌ترمال HS شباهت دارد (Hedenquist et al., 1998; Jannas et al., 1999). بررسی‌ها نشان می‌دهد احتمالاً جوشش در ته‌نشست عناصر از سیال کانه‌ساز نقش نداشته و بلکه عامل اصلی سردشدگی سیال بوده است. میان‌بارهای غنی از گاز با توجه

ماگماهایی با ماهیت کالک‌آلکالن را نشان می‌دهد (Richards et al., 1997; Kelley et al., 1998; Kelley and Ludington, 2002; Richards et al., 2006). توده‌های نیمه عمیق چاه‌موسی و مناطق مجاور آن نیز از جهت زمین‌شیمیایی دارای ماهیت کالک‌آلکالن هستند (Sheibi and Mousivand, 2018). ایجاد یک کانسار با مقادیر سولفیداسیون بالا (HS) به تکامل سیال در سامانه پورفیری زیرین مرتبط است (Arribas, 1995; Hedenquist et al., 1998; Einaudi et al., 2003; Pudack et al., 2009). با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، ترکیب کانی‌شناسی، ساخت و بافت کانسنگ، پهنه‌بندی دگرسانی و میان‌بارهای سیال، کانی‌سازی در محدوده معدنی شمال‌شرق کمان ماگمایی تروود-چاه شیرین احتمالاً به صورت یک سامانه انتقالی از HS به پورفیری تکامل یافته است. به دلیل عدم دسترسی و نبود اطلاعات عمقی شواهدی از سامانه پورفیری مشاهده نشده است. با این حال، وجود سامانه اپی‌ترمال HS در این تحقیق محرز به نظر می‌رسد. همچنین الگوی پهنه‌بندی زمانی-مکانی دگرسانی رایج در سامانه‌های HS (White, 1991) در محدوده مورد بررسی به خوبی توسعه یافته است و از دگرسانی سیلیسی (کوارتز حفره‌ای، کوارتز)، آرژیلیک پیش‌رفته (کائولینیت، موریونیت-ایلیت، آلونیت) در بخش‌های داخلی و مجاور با سامانه‌های رگه‌ای کانه‌زایی شده تا دگرسانی آرژیلیک (کوارتز-مونت موریونیت-اسمکتیت-ایلیت-ناتروژاروسیت) و دگرسانی پروپیلیتیک (کلریت-اپیدوت-آلیت-کلسیت) در حاشیه سامانه تغییر می‌کند. رگه‌های سیلیسی-سولفیدی طلادار که مهم‌ترین شواهد کانه‌زایی در بخش مرکزی سامانه کانی‌زایی منطقه مورد بررسی هستند، اغلب درون سنگ‌های آذرین متأثر از دگرسانی قبلی و برشی شده تشکیل شده‌اند. در ادامه، با بالا آمدگی و فرسایش سنگ‌های روپوش، کانسنگ دستخوش اکسایش شده و به دلیل ناپایداری کانی‌های سولفیدی، آهن موجود در کالکوپیریت زودتر از مس آزاد شده و به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (گوتیت) تبدیل شده و بخشی از مس آنها

معدنی، نشان می‌دهد که میانگین دما و شوری سیالات مسئول کانی‌سازی طلای رگه‌ای دارای شوری و دمای متوسط تا پایین (به ترتیب ۲۳۳ درجه سانتی‌گراد و ۵/۴۱ wt.% NaCl) بوده است. شوری کم مشاهده شده در این محدوده معدنی می‌تواند مشابه برخی از ذخایر غنی از طلا و تا حدی کمتر باشد که طلا (و نقره) به عنوان کمپلکس‌های گوگردی به جای کمپلکس‌های کلریدی در محیط اپی‌ترمال منتقل می‌شوند (Bodnar et al., 2014).

بنابراین به نظر می‌رسد آب‌شویی اسیدی در مراحل اولیه و قبل از کانی‌سازی باعث ایجاد دگرسانی پروپلیتیک و آرژلیک شده و سیلیس باقی‌مانده در نزدیکی سطح به جای گذاشته است. این مرحله با تشکیل پوش‌سنگ سیلیسی و دگرسانی آرژلیک پیشرفته در مرحله بعدی ادامه یافته است. کانه‌سازی به صورت پراکنده و رگه‌ای در چندین مرحله رخ داد. در نخستین گام، بر اساس تامپسون و همکاران (Thompson et al., 1986)، وایت (White, 1991) و سیلیتو و همکاران (Sillitoe et al., 2005)؛ کانه‌های با سولفیداسیون بالا مانند انارژیت و سولفیدهای مس تشکیل شده‌اند؛ زیرا تشکیل آنها به سیالانی با منشأ ماگمایی نیاز دارد. متعاقباً آلونیت و کوارتزهای موجود در حفره‌ها در نواحی مرکزی سامانه به دلیل عملکرد سیالات با pH پایین (≥ 3) تشکیل شده‌اند (Stoffregen, 1987).

بر مبنای کلیه بررسی‌های انجام‌شده در این محدوده، می‌توان پهنه‌های وسیع دگرسانی آرژلیک شناسایی شده را پوش‌سنگ‌هایی در نظر گرفت که اغلب در بالای بدنه اصلی سامانه پورفیری تشکیل می‌شوند (Sillitoe, 1995). دگرسانی‌های شاخص معرفی شده برای چنین پوش‌سنگ‌هایی از نوع آرژلیک، آرژلیک پیشرفته و سیلیسی است که به خوبی با یافته‌های موجود در این پژوهش مطابقت می‌کند. پوش‌سنگ‌ها اغلب دارای پهنه‌بندی جانبی و عمودی مشخصی هستند؛ به گونه‌ای که از مجموعه دگرسانی آرژلیک پیش‌رونده در سطح، کوارتز-آلونیت-پیریت تا کوارتز-دیکیت-پیروفیلیت-پیریت در اعماق بیشتر ادامه یافته و در انتها به دگرسانی فلیک (یعنی کوارتز-

به کشیده بودن احتمالاً در اثر نشت میان‌بارهای سیال ایجاد شده‌اند و لذا همراهی آنها با میان‌بارهای غنی از مایع نمی‌تواند نشانه رخداد جوشش باشد. میان‌بارهای L+V و غنی از L مشاهده شده در محدوده مورد بررسی، مشابه میان‌بارهای غنی از بخار (V) در سامانه‌های پورفیری (Bodnar, 1993; Hedenquist et al., 1998; Muntean and Einaudi, 2000) و سامانه‌های اپی‌ترمال فلزهای گران‌بها (Buchanan, 1979; Moncada et al., 2012) است.

دگرسانی آرژلیک متوسط یا سوپرژن که با حضور کائولینیت، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن شناسایی می‌شود، به دلیل فرسایش و اکسایش سنگ‌های غنی از سولفید و در پی عملکرد سیالات گرمایی دمای پایین‌تر حادث شده است. این تغییرات نظام‌مند که در بسیاری از سامانه‌های اپی‌ترمال-پورفیری گزارش شده است (Hedenquist et al., 2000)، منعکس‌کننده کاهش تدریجی دما و خنثی‌شدن سیالات گرمایی اسیدی در تماس با سنگ دیواره با افزایش فاصله از مرکز سامانه است (Sillitoe, 1990; Corbett and Leach, 1998; Corbett, 2005). بر اساس بررسی‌های وایت و هدنکوئیست (White and Hedenquist, 1990) کانی‌های غالب ذخایر اپی‌ترمال سولفید بالا شامل پیریت (فراوانی بالا)، انارژیت و لازونیت (فراوانی متغیر) هستند که با کانی‌های تتراهدریت، بورنیت، کوولیت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن همراهی می‌شوند. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در این منطقه، کانه‌های پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت، آلونیت، همتایت اسپیکولار و گوتیت کانی‌های معدنی عمده به همراه مقادیری جزئی از انارژیت هستند. کانی‌های باطله موجود نیز شامل کوارتز دانه‌ریز (کانی غالب) بوده و باریت، آلونیت و کائولینیت کانی‌های فرعی را تشکیل می‌دهند. دما و شوری سیال تشکیل‌دهنده ذخایر اپی‌ترمال سولفید بالا بین ۱۰۰ تا ۳۴۵ درجه سانتی‌گراد و ۰ تا ۲۳ درصد وزنی معادل نمک طعام گزارش شده است (Bodnar et al., 2014). نتایج به دست آمده از بررسی‌های میکروترموتری بر روی کوارتز در این محدوده

مورد توجه قرار گیرند.

نتیجه‌گیری

محدوده معدنی مورد بررسی بخشی از شمال‌شرق کمان ماگمایی ترود-چاه شیرین بوده و در پهنه ماگمایی شمال ایران مرکزی واقع شده است. رگه‌های کانه‌دار در سنگ میزبان آندزیت انوسن تشکیل شده و بر اثر نفوذ سیالات گرمابی متحمل دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک پیشرفته، آرژیلیک و پروپلیتیک شده است. شواهدی همچون وجود انارژیت (کانی شاخص مس در کانسارهای HS)، حضور سیلیس حفره‌ای، گسترش دگرسانی آرژیلیک پیشرفته به صورت هیپوژن و حضور آلونیت هیپوژن (کانی شاخص دگرسانی در کانسارهای HS)، بیانگر آن است که محدوده کانه‌زایی شمال‌شرق چاه موسی، از کانسارهای نوع اپی‌ترمال سولفیداسیون بالاست.

در محدوده مورد بررسی، شواهدی از دگرسانی‌های آرژیلیک پیشرفته و سیلیسی به صورت کلاهیک سیلیسی یا پوش‌سنگ در مرکز مشاهده می‌شوند و شواهدی از دگرسانی پروپلیتیک در اطراف ظاهر شده است. همچنین، از ویژگی‌های بارز کانه‌زایی می‌توان به وجود بافت‌ها و ساختارهای رگه‌ای، برش گرمابی و کوارتز حفره‌دار به همراه ترکیب کانی‌شناسی خاص شامل انارژیت و آلونیت اشاره کرد. کانی‌سازی به صورت دو مرحله هیپوژن و سوپرژن رخ داده است. طلا در نمونه‌های تجزیه‌شده به صورت آنومالی حضور دارد. نتایج بررسی میان‌بارهای سیال دو فاز غنی از مایع موجود در کوارتز نشان می‌دهد که دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال بین ۱۶۰ تا ۳۶۲/۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است و درجه شوری نیز بین ۲/۲۴ تا ۹/۰۸ درصد وزنی نمک طعام است. با مقایسه ویژگی‌های ساختاری، بافتی، کانی‌شناسی، دگرسانی و ویژگی‌های سیالات کانه‌ساز مشخص می‌شود که کانه‌زایی‌های رگه‌ای مس-طلا در این منطقه به کانسارهای رگه‌ای اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا شباهت دارند.

موسکویت-پیریت) ختم می‌شوند (Sillitoe, 1995). در محدوده معدنی فقط پهنه‌بندی جانبی مشاهده شده است. تشخیص پوش‌سنگ‌ها به دلیل وجود حجم زیادی از سنگ‌های متأثر از دگرسانی‌های آرژیلیک و آرژیلیک پیشرفته، چالشی بزرگ در بررسی‌های اکتشافی به شمار می‌آید؛ اما شناسایی آنها می‌تواند راهنمای مؤثری در شناسایی سامانه‌های اپی‌ترمال با سولفیداسیون بالا و همچنین کانسارهای پورفیری احتمالی در عمق باشد. در اغلب مدل‌های ارائه‌شده برای ذخایر اپی‌ترمال سولفید بالا، محتوای فلزی آنها از یک سامانه گرمابی-ماگمایی تأمین شده است. این پژوهش بر روی بخش‌های سطحی کانه‌دار شمال کمان ماگمایی ترود-چاه شیرین متمرکز شده است؛ گرچه به دلیل عدم بررسی‌های اکتشافی و حفاری‌های عمیق در این منطقه، اظهارنظر قطعی در مورد ارتباط ژنتیکی سامانه کانه‌زایی موجود با یک سامانه پورفیری در عمق کاری دشوار خواهد بود.

در جدول ۳ ویژگی‌های اصلی محدوده معدنی منطقه مورد بررسی با سایر سامانه‌های اپی‌ترمال با مقادیر سولفیداسیون بالای مرتبط با سامانه‌های پورفیری مقایسه شده است.

با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، ترکیب کانی‌شناسی، ساخت و بافت کانسنگ، همچنین پهنه‌بندی دگرسانی و میان‌بارهای سیال، به نظر می‌رسد که کانی‌سازی در محدوده معدنی شمال‌شرق کمان ماگمایی ترود-چاه شیرین به صورت یک سامانه انتقالی از اپی‌ترمال HS به پورفیری تکامل یافته باشد. در حال حاضر اطلاعات عمقی از این منطقه معدنی در دسترس نیست؛ اما وجود سامانه‌های کانه‌زایی با سولفیداسیون متوسط در چاه موسی (Sheibi and Mousivand, 2018)، سولفیداسیون متوسط در کلاته (Eskandari et al., 2024) و همچنین کانسار مس-مولیدن پورفیری دوگان (Eskandari et al., 2022) در مناطق مجاور این محدوده، استقرار یک سامانه پورفیری عمقی را به شدت تقویت می‌کند. این شواهد نشان‌دهنده پتانسیل‌های بالای معدنی منطقه بوده و می‌تواند به عنوان نشانه‌هایی برای اکتشافات آینده

جدول ۳. مقایسه ویژگی‌های اصلی محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی با برخی از کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا همراه با کانسارهای پورفیری در ایران

Table 3. Comparison of the main characteristics of the mining area of north and northeast of Chah Musa deposit with some High sulfidation (HS) epithermal deposits along with porphyry deposits in Iran

Features of the deposit	Chah Shalghami	Halak Abad-Sheshtemad	Chodarchay	Tozlar	Choran	Argillic zone-N Chah Musa
Structure zone	Lut block	Central Iran	Western Alborz-Tarom	Urumieh-Dokhtar		Toroud-Chah Shirin
Metals	Au, Cu, As, Bi, Mo, Sb, Pb, Zn	Cu	Cu, Au	Au, Cu	Cu, Au	Cu, Au?
Host rock	Andesite, and andesite-basalt	Basalt, andesite, hornblende andesite, quartz andesite, and dacite	Trachyandesite, andesite, andesite-basalt, and rhyodacite	Andesite-trachydacite	Andesite	Andesite
Structure and texture	Vein-veinlet, and stockwork	Space fillings, and veinlet	Veinlet, space fillings, disseminated, and breccia	Vein-veinlet, disseminated, and space fillings	Vein-veinlet, banded, space fillings, and vuggy	Vein-veinlet, disseminated, breccia, and replacement
Mineralogy	Jarosite, Quartz, Alunite, Montmorillonite, Dikite	Quartz, Alunite, kaolinite, pyrophyllite, Barite, Diaspor	Quartz-Alunite, Enargite	Alunite, kaolinite, Jarosite, Jarosite	Quartz-Alunite	Quartz-Alunite, Enargite
Alteration	Propylitic, Argillic, Silicification	Argillic, Advance argillic, Propylitic, Silicification	Potassic, Propylitic, Sericitic-tourmaline, Argillic, Silicification	Propylitic, Argillic, Silicification, Phillic	Sodic-Calcite, Potassic, Phillic, Argillic, Alunite, Silicification	Propylitic, Argillic, Silicification

ادامه جدول ۳. مقایسه ویژگی‌های اصلی محدوده معدنی شمال و شمال‌شرق کانسار چاه‌موسی با برخی از کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا همراه با کانسارهای پورفیری در ایران

Table 3 Continued). Comparison of the main characteristics of the mining area of north and northeast of Chah Musa deposit with some High sulfidation (HS) epithermal deposits along with porphyry deposits in Iran

Features of the deposit	Chah Shalghami	Halak Abad-Sheshtemad	Chodarchay	Tozlar	Choran	Argillic zone-N Chah Musa
Fluid inclusions	-	-	-	Th=211-310 °C Salinity= 0.3 to 8 wt.% NaCl	-	Th=100-350 °C Salinity= 2 to 8 wt.% NaCl
Related to porphyry system	Cu-Mo porphyry Sorkhkuh, Cu porphyry Gezo, Cu-Au porphyry Maher Abad	-	-	Cu porphyry Sarcheshmeh, Meydook, sungun	-	-
Reference	Arjmand Zadeh et al., 2010	Ghorchi Ruki et al., 2012; Panahi Shahri et al., 2010	Yasami et al., 2017; Yasami and Ghaderi, 2019	Heidari et al., 2013	Zarasvandi et al., 2022	Current study

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

این مقاله بخشی از دستاوردهای رساله دکترای نویسنده اول است.

از سردبیر محترم، جناب آقای دکتر کریم‌پور و دیگر مسئولان محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی و همچنین داوران گرامی که با دقت نظر و تحلیل‌های عمیق خود، نکات ارزشمندی را برای بهبود این مقاله ارائه فرمودند، صمیمانه سپاسگزاریم.

1. Vuggy
2. lithocap
3. High Sulfidation (HS)
4. Toroud-Chah Shirin Magmatic Arc (TCSMA)
5. Low sulfidation (LS)
6. Intermediate sulfidation (IS)
7. X-ray Diffraction (XRD)
8. Institut für Endlagerforschung (IELF)
9. Aster
10. Vuggy quartz
11. Isolate
12. Cluster
13. cooling
14. mixing

References

- Arjmand Zadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, A., Francisco Santos, ZH., Medina, J. and Homam, S.M. 2010. Study of alteration zones, geochemistry and petrogenesis of the Chah Shalghami mineral index, eastern Iran. *Researchs in Earth Sciences*, 1(3): 74–89. Retrieved October 23, 2012 from https://esrj.sbu.ac.ir/article_94304_ccb23ba2c34e5ced3c9b2ab159180a58.pdf
- Arribas, A., 1995. Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. In: J.F.H. Thompson (Editor), *In magmas, fluids, and ore deposits*. Mineralogical Association of Canada Short Course, Canada, pp. 419–454. Retrieved September 12, 2000 from https://www.researchgate.net/publication/268376300_Characteristics_of_high-sulfidation_epithermal_deposits_and_their_relation_to_magmatic_fluid
- Bodnar, R., 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., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D. and Steele-MacInnis, M. 2014. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Treatise on geochemistry*, 13: 119–142. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-095975-7.01105-0>
- Buchanan, L.J., 1979. Las Torres mine, Guanajuato, Mexico: ore controls of a fossil geothermal system. *Mines Theses and Dissertations*, 3(1): 1970–1979. Retrieved January 20, 2002 from <https://hdl.handle.net/11124/171928>
- Chang, Z., Hedenquist, J.W., White, N.C., Cooke, D.R., Roach, M., Deyell, C.L. and Cuison, A.L., 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines. *Economic Geology*, 106(8): 1365–1398. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.8.1365>
- Cooke, D.R., White, N.C., Zhang, L., Chang, Z. and Chen, H., 2017. Lithocaps—characteristics, origins and significance for porphyry and epithermal exploration. In *Proceedings of the 14th SGA Biennial Meeting*, Canada, pp. 291–294. Retrieved June 24, 2019 from https://www.researchgate.net/publication/322087357_Lithocaps_-_characteristics_origins_and_significance_for_porphry_and_epithermal_exploration
- Corbett, G., 2005. Epithermal Au-Ag deposit types—implications for exploration. The Proexplo Conference, Peru, south America. Retrieved April 15, 2008 from https://www.researchgate.net/publication/237489786_EPITHERMAL_AU-AG_DEPOSIT_TYPES_-_IMPLICATIONS_FOR_EXPLORATION
- Corbett, G.J. and Leach, T.M., 1998. Southwest Pacific Rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization. *Society of Economic Geologists, USA*, 167 pp. <https://doi.org/10.5382/SP.06>
- Cunningham, G., 1978. Pressure gradients and boiling as mechanisms for localizing ore in porphyry systems, *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 6(6): 745–754. Retrieved April 22, 1978 from <https://pubs.usgs.gov/journal/1978/vol6issue6/report.pdf#page=53>
- Einaudi, F., Godard, M., Pezard, P., Cochemé, J.J., Coulon, C., Brewer, T. and Harvey, P., 2003. Magmatic cycles and formation of the upper oceanic crust at spreading centers: Geochemical study of a continuous extrusive section in the Oman ophiolite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(6): 1–25. <https://doi.org/10.1029/2002GC000362>
- Eskandari, M., Mousivand, F., Sheibi, M. and Lehmann, B., 2024. Mineralogy, alteration, fluid inclusions microthermometry and genesis of the Cu-Au Kalateh Dasht deposit, south of Shahrood, NE Iran. *Journal of Economic Geology*, 16(4): 125–147. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1121>
- Eskandari, M., Sheibi, M., Mousivand, F. and Lehmann, B., 2022. Mineralization, alteration and mineralogy pattern in the Dogan copper deposit, southeast of Shahrood, 41st National Conference of Earth Sciences, Geoscience Research Institute and Geological and Mineral Exploration Organization of the country, Tehran, Iran. (in Persian) Retrieved March 4, 2025 from <https://civilica.com/doc/1665486>
- Eshraghi, S. and Jalali, A., 2006. 1:100,000

- geological map of Moaleman. Geological Survey of Iran, Tehran. (in Persian) Retrieved April 12, 2010 from <https://nla.gov.au/nla.obj-233247255/view>
- Ghorchi Ruki, M., Karimpour, M.H. and Ebrahimi Nasrabadi, K., 2012. Investigation of alteration and mineralization of the Halakabad-Shashtamad area (south of Sabzevar). 31th Conference on Earth Sciences, Geology and Mineral Exploration Organization of the country, Tehran, Iran. (in Persian) Retrieved March 9, 2013 from <https://civilica.com/doc/186976>
- Hedenquist, J.W., Arribas, A.N. and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), Reviews in Economic Geology, Geoscienceworld, United States of America, pp. 245-277. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Reynolds, T.J., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system; Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4): 373-404. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.4.373>
- Heidari, S.M., Ghaderi, M. and Afzal, P., 2013. Delineating mineralized phases based on lithogeochemical data using multifractal model in Touzlar epithermal Au-Ag (Cu) deposit, NW Iran. *Geochemistry*, 31: 119-132. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.12.014>
- Henley, R.W. and McNabb, A., 1978. Magmatic vapor plumes and ground-water interaction in porphyry copper emplacement. *Economic Geology*, 73(1): 1-20. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.73.1.1>
- Houshmandzadeh, A., Alavi Nayini, M. and Haqipour, A., 1978. Evolution of Geological Phenomena in Toroud Region, from the Precambrian to the present era. Iran Geological and Mineral Exploration Organization, Tehran, 138 pp. (in Persian)
- Imamjomeh, A., Rastad, E., Bouzari, F. and Rashidnejad Omran, N., 2009. An introduction to individual disseminated-veinlet and vein mineralization system of cu (pb- zn) in the Chahmoosa-Gholekaftaran mining district, eastern part of Toroud-Chahshirin magmatic arc. *Scientific quarterly Journal of Geosciences*, 18(70): 112-125. (in Persian) <https://doi.org/10.22071/gsj.2009.57383>
- Jannas, R.R., Bowers, T.S., Petersen, U. and Beane, R.E., 1999. High-sulfidation deposit types in the El Indio district, Chile. In: Skinner, B.J, *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. Society of Economic Geologists, America, pp. 219-266. <https://doi.org/10.5382/SP.07.07>
- John, D.A. 2001. Miocene and early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the northern Great Basin, western United States: Characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Economic Geology*, 96(8): 1827-1853. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1827>
- Kelley, K.D. and Ludington, S. 2002. Cripple Creek and other alkaline-related gold deposits in the southern Rocky Mountains, USA: influence of regional tectonics. *Mineralium Deposita*, 37(1): 38-60. <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0229-4>
- Kelley, K.D., Romberger, S.B., Beaty, D.W., Pontius, J.A., Snee, L.W., Stein, H.J. and Thompson, T.B., 1998. Geochemical and geochronological constraints on the genesis of Au-Te deposits at Cripple Creek, Colorado. *Economic Geology*, 93(7): 981-1012. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.7.981>
- Kelley, K., Spry, P., McLemore, V., Fey, D. and Anderson, E. 2020. Alkalic-Type Epithermal Gold Deposit Model. Geological Survey Scientific Investigations, U.S, Report 2010-5070-R, 74 pp. <https://doi.org/10.3133/sir20105070R>
- Khajehzadeh, M.H., 2012. Petrography and geochemistry of igneous intrusive in North Moalleman, Shahrood University of Technology, 146 pp. (in Persian)
- Khalaj, M., Hassan-Nezhad, A., Alizadeh, H., Haji Babaei, A. and Ghorbani, G. 2021. Investigation of mineralization fluid evolution of hydrothermal vein copper deposits: Based on studies of fluid inclusions at Chah Mousa area (north of central Iran). *Advanced Applied Geology*, 11(1): 116-135. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22055/aag.2021.34599.2152>
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Zaw, K., Meffre, S. and Emami, M.H., 2012. Geological setting and timing of the Chah Zard breccia-hosted epithermal gold-silver deposit in the Tethyan belt

- of Iran. *Mineralium Deposita*, 47(1): 425–440. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0382-3>
- Li, X., Zhou, T., Fan, Y., Chen, J., White, N.C., Zhang, L. and Zhang, Y., 2024. Geology and exploration indications of the lithocap in Qianpu area, Luzong Basin, Anhui. *Ore Geology Reviews*, 164: 105811. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105811>
- Mahabadi, R. and Fardoust, F., 2018. Investigating the mineralization type of Abgareh copper deposit (south of Damghan) based on mineralogical, alteration and geochemical evidence. 10th National Conference of Economic Geology Association of Iran, University of Esfahan, Esfahan, Iran. (in Persian) Retrieved September 4, 2019 from <https://civilica.com/doc/804980>
- Mehrabi, B. and Ghasemi Siani, M., 2012. Intermediate sulfidation epithermal Pb-Zn-Cu ($\pm$ Ag-Au) mineralization at Cheshmeh Hafez deposit, Semnan province, Iran. *Journal of the Geological Society of India*, 80(4): 563–578. <https://doi.org/10.1007/s12594-012-0177-x>
- Misra, K.C., 2000. Formation of mineral deposits. In: K.C. Misra (Editor), *Understanding Mineral Deposits*. Springer, Dordrecht, pp. 5–92. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3925-0_2
- 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., 2000. Porphyry gold deposits of the Refugio district, Maricunga belt, northern Chile. *Economic Geology*, 95(7): 1445–1472. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.7.1445>
- Panahi Shahri, M., Karimpour, M.H. and Shabani, F., 2010. Mineralization and Geochemical Exploration in Volcanic-Plutonic Area of Halakabad Village (Sabzevar), Regarding to Cu-Porphyry Deposits. *Journal of Economic Geology*, 2(1): 21–37. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v2i1.3676>
- Pirajno, F., 2009. Water and hydrothermal fluids on earth. In: F. Pirajno (Editor), *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer Science and Business Media, Geological Survey of Western Australia, Australia, pp. 1–71. Retrieved October 2, 2011 from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8613-7_1
- Pudack, C., Halter, W.E., Heinrich, C.A. and Pettke, T., 2009. Evolution of magmatic vapor to gold-rich epithermal liquid: The porphyry to epithermal transition at Nevados de Famatina, northwest Argentina. *Economic Geology*, 104(4): 449–477. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.4.449>
- Redmond, P.B., Einaudi, M.T., Inan, E.E., Landtwing, M.R. and Heinrich, C.A., 2004. Copper deposition by fluid cooling in intrusion-centered systems: New insights from the Bingham porphyry ore deposit, Utah. *Geology*, 32(3): 217–220. <https://doi.org/10.1130/G19986.1>
- Richards, J.P., Bray, C.J., Channer, D.D. and Spooner, E.C., 1997. Fluid chemistry and processes at the Porgera gold deposit, Papua New Guinea. *Mineralium Deposita*, 32(1): 119–132. <https://doi.org/10.1007/s001260050079>
- Richards, J.P., Wilkinson, D. and Ullrich, T., 2006. Geology of the Sari Gunay epithermal gold deposit, northwest Iran. *Economic Geology*, 101(8): 1455–1496. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1455>
- Robb, L., 2020. Introduction to ore-forming processes. Blackwell science, Australia, 386 pp. Retrieved November 6, 2022 from https://kursatozcan.com/ders_notlari/Introduction_to_Ore_Forming_Processes.pdf
- Roohbakhsh, P., Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2018. Geology, mineralization, geochemistry and petrology of intrusive masses in the Kouh Zar gold-copper deposit, Damghan. *Journal of Economic Geology*, 10(1): 1–23. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.V10I1.64316>
- Seifivand, A. and Sheibi, M., 2019. Ballooning emplacement and alteration of the Chah-Musa subvolcanic intrusion (NE Iran) inferred from magnetic susceptibility and fabric. *Geological Magazine*, 157(4): 621–639. <https://doi.org/10.1017/S0016756819001158>
- Shafaii Moghadam, H., Griffin, W.L., Kirchenbaur, M., Garbe-Schönberg, D., Zakie Khedr, M., Kimura, J.I. and Maghdour-Mashhour, R., 2018. Roll-back, extension and mantle upwelling

- triggered Eocene potassic magmatism in NW Iran. *Journal of Petrology*, 59(7): 1417–1465. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy067>
- Sheibi, M. and Mousivand, F., 2018. Petrology, geochemistry and magnetic receptivity of Chah Musa intrusive, host of copper mineralization (northwest of Toroud, south of Shahroud) with a special view on mineralization, Middle East Mines Development and Expansion Company. unpublished Report 1, 200 pp. (in Persian)
- Shepherd, T. and Allen, P., 1985. Metallogenesis in the Harlech Dome, North Wales: A fluid inclusion interpretation. *Mineralium Deposita*, 20(1): 159–168, Retrieved July 18, 1985 from <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00204560>
- Sillitoe, R.H., 1995. Exploration of porphyry copper lithocaps. In *Pacific rim congress*, 95(1): 19–22.
- Sillitoe, R.H. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3): 373–388. <https://doi.org/10.1080/08120099708728318>
- Sillitoe, R., Richard, H. and Hedenquist, J., 2005. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. In: S.F. Simmons and I. Graham (Editors), *Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth*. Society of Economic Geologists, Springer, pp. 73. <https://doi.org/10.5382/SP.10.16>
- Stoffregen, R.E., 1987. Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado. *Economic Geology*, 82(6): 1575–1591. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.6.1575>
- Tale Fazel, E., Mehrabi, B. and Ghasemi Siani, M., 2019. Epithermal systems of the Torud–Chah Shirin district, northern Iran: Ore-fluid evolution and geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 109: 253–275. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.014>
- Thompson, J.F.H., Lessman, J. and Thompson, A. J.B. 1986. The Temora gold-silver deposit; a newly recognized style of high sulfur mineralization in the lower Paleozoic of Australia. *Economic Geology*, 81(3): 732–738. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.3.732>
- 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., 1991. High sulfidation epithermal gold deposits: Characteristics and a model for their origin. *Geological Survey of Japan, Japan, Report 277*, 10 pp. Retrieved Jun 13, 1999 from <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6455504>
- Whitney, D. and Evans, B., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wilkinson, J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)
- Williams-Jones, A.E. and Heinrich, C.A., 2005. Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits: 100th anniversary special paper. *Economic Geology*, 100(7): 1287–1312. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.7.1287>
- Yasami, N., Ghaderi, M., Madanipour, S. and Taghilou, B., 2017. Structural control on overprinting high-sulfidation epithermal on porphyry mineralization in the Chodarchay deposit, northwestern Iran. *Ore Geology Reviews*, 86: 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.028>
- Yasami, N. and Ghaderi, M., 2019. Distribution of alteration, mineralization and fluid inclusion features in porphyry–high sulfidation epithermal systems: The Chodarchay example, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 104: 227–245. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.11.006>
- Yousefi, F., Sadeghian, M., Wanhainen, C., Ghasemi, H., and Frei, D., 2017. Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of middle Eocene hypabyssal rocks of the Torud–Ahmad Abad magmatic belt: An implication for evolution of the northern branch of Neo-Tethys Ocean in Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 178: 1–15.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.03.008>
Zadsaleh, M., Taghipour, N. and Honarmand, M., 2012, Distinguishing intermediate argillic from advanced argillic alteration in the Qoleh Kaftran mineral area using SWIR bands of the ASTER remote sensing sensor. 4th Conference of the Iranian Economic Geology Society, University of Birjand, Birjand, Iran. (in Persian) Retrieved July 5, 2014 from <https://sid.ir/paper/864562/fa>
- Zarasvandi, A., Tashi, M., Rezaei, M., Saki, A. and Mousivand, F. 2022. Geology and geochemistry of the Choran porphyry-epithermal Cu-Au deposit in the Dehej-Sarduveyeh subzone, Urumieh-Dokhtar magmatic arc. Journal of Economic Geology, 14(1): 39–66. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.2021.52017.87614>