



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2025.1063



Dogan copper deposit (south of Shahroud): copper-molybdenum porphyry mineralization in the Toroud-Chah Shirin magmatic arc

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, German

ARTICLE INFO

Article History

Received: 13 January 2023
Revised: 13 February 2025
Accepted: 15 February 2025

Keywords

Copper and Molybdenum
Potassic alteration
Geochemistry
Fluid inclusion
Porphyry system
Dogan
Toroud- Chah Shirin

*Corresponding author

Maryam Sheibi
✉ sheibi@shahroodut.ac.ir

ABSTRACT

The Dogan copper-molybdenum deposit is located in the northern Central Iranian magmatic arc, south of Shahrood. Mineralization in this area is caused by the injection of a microdioritic subvolcanic intrusion into Eocene volcanic rocks. Mineralization occurs frequently as veins, veinlets, and disseminated ores and is mineralogically composed of primary minerals like pyrite, chalcopyrite, bornite, and molybdenite as well as secondary minerals like chalcocite, iron oxides and hydroxides, and malachite. The alteration zoning in the Dogan deposit is circular and concentric and changes from potassic in the central part to phyllic alteration and then propylitic alteration in the margins. Some parts of argillic alteration are observed in the upper and surface parts of the phyllic zone. The fluids producing potassic alteration were rich in liquid and a small amount of steam (L + V), had a high temperature (398 to 513°C), and a high salinity (50 wt% NaCl), according to fluid inclusions studies. These fluids were most likely magmatic in origin and were responsible for the formation of the V1 and V2 veins. The activity of meteoric fluids containing liquid vapor phases (V + L) with lower temperature (210 to 360°C) and salinity less than 10 wt % NaCl causes phyllic alteration (V3 veins). In terms of geochemistry, the studied igneous samples are adakitic in nature and are located in the domain of calc-alkaline magmas of the active continental margin. The presence of potassic alteration in surface and deep cores, the high salinity and temperature of hydrothermal fluids, the type of mineralization (disseminated and vein-veinlet), the high potential of copper and molybdenum, and the zonation of existing alterations are all indicative of a porphyry system. The Dogan mining area is similar to copper-molybdenum porphyry deposits in terms of tectonic environment of formation, host rock type, texture and structure, mineralogy, and alteration zonation.

How to cite this article

Eskandari, M., Sheibi, M., Mousivand, F. and Lehmann, B., 2025. Dogan copper deposit (south of Shahroud): copper-molybdenum porphyry mineralization in the Toroud-Chah Shirin magmatic arc. *Journal of Economic Geology*, 17(1): 105–128. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1063>



©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

One of the ore-bearing magmatic arcs in the northern structural zone of Central Iran is the Toroud-Chah-Shirin magmatic arc (TCMA) (Fig. 1A). It hosts a significant volume of Eocene volcanic and pyroclastic rocks and equivalent subvolcanic and intrusive bodies. According to the distribution of mineralized systems in the aforementioned magmatic arc, the majority of the ore deposits under investigation are epithermal (see, for instance, [Sheibi and Mousivand, 2018](#); [Mehrabi and Ghasemi Siani, 2012](#); [Tale Fazel et al., 2019](#)). This study has shown the geological proof of a typical Cu-Mo porphyry ore deposit at Dogan, which is 130 km southeast of Shahrood (in the province of Semnan) and 18 km north of the village of Toroud.

Materials and methods

Precise microscopic investigations of mineralogy, texture, and mineralogrophy were made on 10 thin and 27 thin-polished sections. In the Vancouver (ACME) laboratory in Canada and the TU Clausthal laboratory (IELF) in Germany, whole rock geochemistry of microdioritic samples with the least alteration was examined by XRF, ICP-OES and ICP-MS methods. Fluid inclusion thermometry is measured using the Linkham MDSG600 heating/freezing stage at the economic geology laboratory of the Shahrood University of Technology. At the Clausthal Laboratory (IELF) in Germany, the Linkham MDSG600 heating/freezing stage and the XRD methods have been used to identify some very fine fluid inclusion analyses and clay minerals, respectively.

Results

A subvolcanic intrusion was introduced into Eocene volcanic rocks, resulting in the development of the Dogan Cu-Mo deposit. The microdiorites have a distinct LREE/HREE fractionation and are enriched in large ion lithophile elements (LILE) and depleted in high field-strength elements (HFSE). In addition, the Nb and Ti negative anomalies indicate a magmatic arc signature. However, they differ from typical volcanic arc magmas geochemically due to having $\text{SiO}_2 \geq 40$ wt.%, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 10$ wt%, $1 < \text{MgO} < 5$ wt%, $\text{Sr} \geq 200$ and $\text{Y} > 18$ ppm, along with the

depletion of HREE have adakitic affinities. Based on field and laboratory studies, potassic alteration, propylitic, phyllic, argillic alterations have been detected in the Dogan deposit. Potassic alteration is located in the central part of the system and varies from abundant potassium feldspar veins in the superficial parts to microdiorite containing abundant hydrothermal biotites and potassium feldspar in boreholes. For the samples that have undergone potassic alteration, the fluid inclusion homogenization temperature is greater than 590°C and is similar to values found in other porphyry deposits. This alteration also led to the formation of two known mineralized veins, namely V_1 : quartz + potassium feldspar + biotite + pyrite + magnetite + chalcopyrite, and V_2 : potassium feldspar + anhydrite/gypsum + pyrite + molybdenite + chalcopyrite. Sericitic (phyllic) alteration in Dogan is frequently restricted to the fractures where quartz, sericite, and pyrite have been produced as a result of hydrolysis of the potassic- altered rocks.

In phyllic altered rocks, the majority of third type veins (V_3) containing quartz and trace amounts of pyrite + chalcopyrite $\pm$ bornite have been observed. Like many copper and copper-molybdenum porphyry systems (for example: Lepanto Far Southeast deposit in [Hedenquist et al., 1998](#)), advanced argillic alteration is observed exactly in the upper part of the Dogan deposit. Significant amounts of Na, Ca, and Mg are removed from the structure of pre-existing minerals during this process due to the low pH ([Clark et al., 2003](#)). Propylitic alteration is found at the periphery, from the surface to medium depths, and close to phyllic and argillic alteration in the Dogan deposit.

Discussion

The microdioritic intrusion has formed at an active continental margin with an adakitic nature. The hypogene sulfide mineralization occurs mainly as disseminated chalcopyrite and pyrite, typically in the matrix or associated stockworks containing potassium feldspar-gypsum/anhydrite, especially in the rocks affected by potassic and phyllic processes. The fluids producing potassic alteration are rich in liquid and less vapor (LV); they have high temperatures (398 to 513°C) and high salinity (more than 50 wt% NaCl). These fluids have a magmatic origin and are considered to be the cause of mineralized veins. Phyllic alteration is caused by the

activity of fluids containing vapor and liquid phases at lower temperatures (210 to 360°C) and less than 10 wt% NaCl salinity.

The low temperature homogenization of the fluid inclusions in phyllic altered rocks (210°C) indicates that the thermal gradients have decreased and the meteoric fluids have flowed. In the next stage with decreasing temperature, the addition of significant amounts of meteoric fluids causes Na-Mg-Ca metasomatism and a mineral assemblage of propylitic alteration, *i.e.*, epidote, chlorite and calcite. The subvolcanic nature of the host rocks (microdiorite) and their formation in the magmatic arc, the presence of potassic alteration evidence in

surface and drilled cores, the salinity and high temperature of hydrothermal fluids, the type of mineralization (disseminate and vein-veinlet), the high potential of copper and molybdenum, and zonation of existing alterations all indicate the occurrence of a porphyry system. Geologists should be motivated by the supplied information to look for undiscovered porphyry systems in the Toroud-Chah-Shirin and other Iranian magmatic arcs.

Acknowledgments

We sincerely thank Tavan Energy Resources Development Company for providing access to the boreholes and support on the field.



مس دوگان (جنوب شاهرود): کانه‌زایی مس - مولیدن پورفیری در کمان ماگمایی تروود - چاه شیرین

محدثه اسکندری^۱، مریم شبی^{۲*}، فردین 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 - زلرلد، آلمان

چکیده

اطلاعات مقاله

کانسار مس - مولیدن دوگان در جنوب شاهرود و در کمربند ماگمایی شمال ایران مرکزی واقع شده است. در این منطقه، توده‌ای نیمه عمیق با ترکیب میکرودیوریتی به درون سنگ‌های آتشفشانی انوسن تزریق و موجب کانه‌زایی شده است. کانه‌زایی به صورت رگه - رگچه‌ای و دانه پراکنده بوده و از لحاظ کانی‌شناسی، کانسنگ از کانی‌های اولیه پیریت، کالکوپریت، بورنیت، مولیدنیت و کانی‌های ثانویه مانند کالکوسیت، اکسید - هیدروکسیدهای آهن و مالاکیت تشکیل شده است. پهنه‌بندی دگرسانی در کانسار دوگان به صورت حلقوی و هم‌مرکز بوده و از پتاسیک در بخش مرکزی تا دگرسانی فلیک و سپس دگرسانی پروپلیتی در حواشی سامانه تغییر می‌کند. دگرسانی آرژلیک در بخش‌های بالایی و سطحی پهنه فلیک مشاهده می‌شود. بر اساس بررسی میان‌بارهای سیال، سیالات مولد دگرسانی پتاسیک غنی از مایع و مقدار اندکی بخار ($L+V$) بوده؛ درجه حرارت بالا (۳۹۸ تا ۵۱۳ درجه سانتی‌گراد) و شوری زیاد (بیش از ۵۰ درصد وزنی $NaCl$) دارند. احتمالاً این سیالات دارای منشأ ماگمایی بوده و عامل ایجاد رگه‌های V_1 و V_2 بوده‌اند. دگرسانی فلیک (رگه‌های V_3) بر اثر فعالیت سیالات اغلب جوی حاوی فازهای بخار + مایع ($V+L$) با درجه حرارت کمتر (۲۱۰ تا ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد) و شوری کمتر از ۱۰ درصد وزنی $NaCl$ ایجاد شده است. از نظر زمین‌شیمی، نمونه‌های آذرین مورد بررسی در قلمرو ماگماهای کالک‌آلکان حاشیه فعال قاره‌ای قرار گرفته‌اند و ماهیت آداکتی دارند. ماهیت نیمه عمیق سنگ‌های میزبان (میکرودیوریت) و تشکیل آنها در کمان ماگمایی، حضور دگرسانی پتاسیک در بررسی‌های سطحی و عمقی، شوری و دمای بالای سیالات گرمایی، نوع رخداد کانه‌زایی (پراکنده و رگه - رگچه‌ای)، پتانسیل بالای مس و مولیدن و پهنه‌بندی دگرسانی‌های موجود همگی بیانگر رخداد یک سامانه پورفیری است. به طور کلی، محدوده معدنی دوگان از نظر محیط زمین‌ساختی تشکیل، جنس سنگ میزبان، بافت و ساخت، کانی‌شناسی و پهنه‌بندی دگرسانی شباهت‌های زیادی با کانسارهای مس - مولیدن پورفیری نشان می‌دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

واژه‌های کلیدی

کانه‌زایی مس و مولیدن

دگرسانی پتاسیک

زمین‌شیمی

میان‌بار سیال

سامانه پورفیری

دوگان

تروود - چاه شیرین

نویسنده مسئول

مریم شبی

sheibi@shahroodut.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

اسکندری، محدثه؛ شبی، مریم؛ موسیوند، فردین و لهما، برند، ۱۴۰۴. مس دوگان (جنوب شاهرود): کانه‌زایی مس - مولیدن پورفیری در کمان ماگمایی تروود - چاه شیرین. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۷(۱): ۱۰۵-۱۲۸. <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1063>

مقدمه

کمان ماگمایی تروود-چاه شیرین جزئی از کمان ماگمایی کانه‌دار شمال پهنه ساختاری ایران مرکزی است که حاوی حجم قابل توجهی از سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن است. تعداد زیادی توده‌های نفوذی و نیمه‌عمیق در داخل این مجموعه آذرین مستقر شده‌اند (شکل ۱-۱). توزیع سامانه‌های کانه‌زایی در این کمان ماگمایی به ویژه در کانسارهای چاه موسی، چشمه حافظ، گندی و ... نشان می‌دهد که اغلب ذخایر بررسی شده از نوع اپی ترمال هستند (Mehrabi and Ghasemi Siani, 2012; Sheibi and Mousivand, 2018; Tale Fazel et al., 2019). کانسار مس - مولیدن دوگان با موقعیت جغرافیایی $55^{\circ} 12'$ تا $54^{\circ} 56' 39''$ عرض $54^{\circ} 56' 39''$ تا $35^{\circ} 34' 51''$ طول شرقی و $35^{\circ} 34' 51''$ شمالی در 130 کیلومتری جنوب شرق شاهرود (شرق استان سمنان)، 18 کیلومتری شمال روستای تروود و 12 کیلومتری شمال شرق کانسار مس چاه موسی قرار دارد (شکل ۱-۲). مهم‌ترین راه دسترسی از طریق جاده اصلی شاهرود- تروود است. این محدوده معدنی تاکنون از دیدگاه سنگ‌شناسی و به ویژه زمین‌شناسی اقتصادی مورد بررسی قرار نگرفته است و تنها داده زمین‌شناسی موجود به برداشت‌های ساختاری محدود می‌شود (Tadayon and Katal, 2020). بر اساس یافته‌های پژوهش اخیر، اغلب گسل‌ها دارای امتداد شرقی- غربی تا شمال شرقی - جنوب غربی بوده و پهنه‌ای گسلی با سازوکار امتداد لغز راست گرد در منطقه شناسایی شده است. در این پژوهش، شواهد واضحی از یک سامانه پورفیری تیپیک در کانسار مس - مولیدن دوگان واقع در انتهای شمال شرقی کمان ماگمایی تروود- چاه شیرین ارائه می‌شود. امید است نتایج به دست آمده از این پژوهش به اکتشاف ذخایری مشابه در کمربند ماگمایی شمال ایران مرکزی منجر شود. در این راستا ویژگی‌های صحرایی، کانی‌شناسی، کانه‌نگاری، زمین‌شیمی و داده‌های میان‌بار سیال از نمونه‌های سطحی و مغزه‌های حفاری در این محدوده معدنی با دقت مورد بررسی

قرار گرفته است.

روش مطالعه

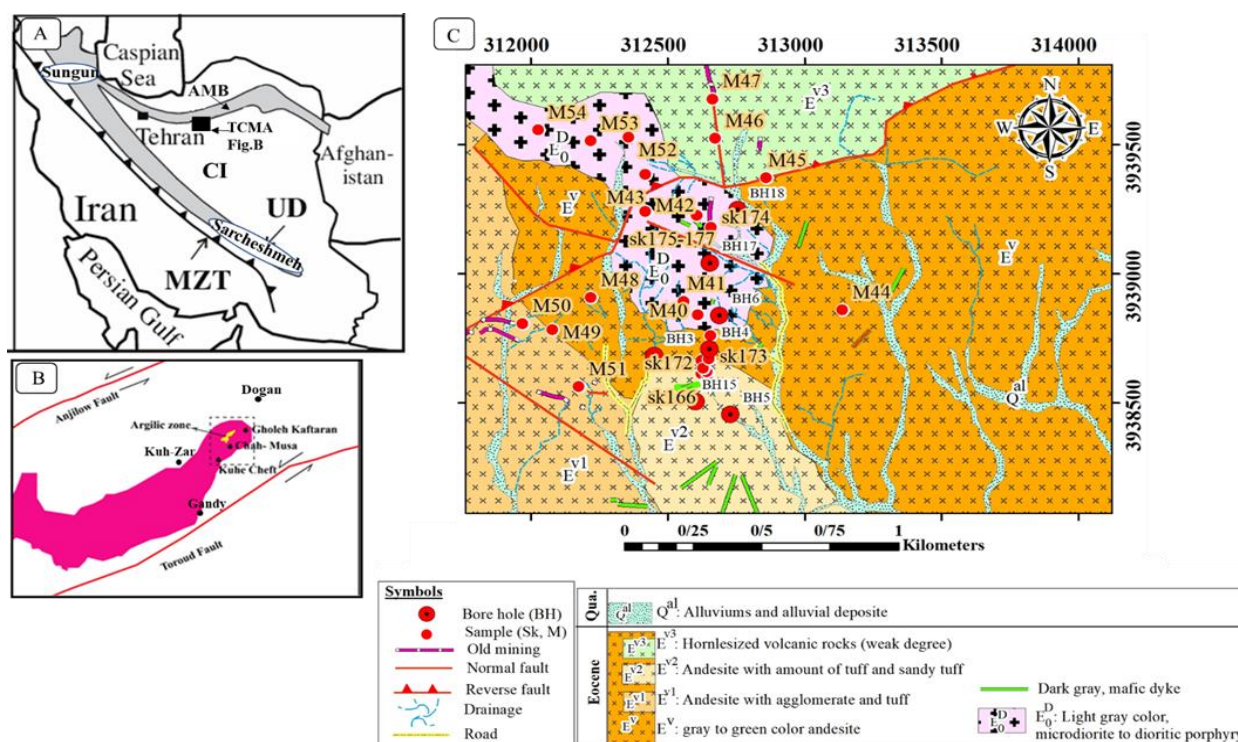
پس از بررسی تصویرهای ماهواره‌ای، نقشه‌های زمین‌شناسی و بررسی مقاله‌ها و گزارش‌های موجود، عملیات صحرایی و نمونه‌برداری از واحدهای سنگی و کانسنگی (رخمون‌ها و مغزه‌های حفاری) جهت بررسی‌های سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی، کانه‌نگاری، بافت و ساخت و ترسیم توالی هم‌یافتی کانی‌ها انجام شد. در این راستا تعداد 30 نمونه از انواع سنگ‌های آذرین و بخش‌های کانه‌دار سطحی و تعداد 22 نمونه از گمانه‌های منتخب برداشت شد. در محدوده معدنی دوگان تعداد 7 گمانه و 3 ترانشه اکتشافی حفاری شده است؛ ولی در این پژوهش به دلیل برخی محدودیت‌ها، تنها 3 گمانه (BH.4, BH.17, BH.18) بررسی شده است. موقعیت نمونه‌های مختلف برداشت شده و گمانه‌ها در شکل‌های ۱ و ۲ آورده شده است. تعداد 10 مقطع نازک میکروسکوپی و 27 مقطع نازک- صیقلی تهیه و از نظر کانی‌شناسی، سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری بررسی شدند. تعدادی از نمونه‌های سنگی با کمترین دگرسانی انتخاب و در آزمایشگاه اکی و نکوور کشور کانادا و آزمایشگاه آی ال اف دانشگاه صنعتی کلاوستال کشور آلمان به روش‌های XRF, ICP-OES و ICP-MS از نظر عناصر اصلی و کمیاب تجزیه شدند. دقت تجزیه و تحلیل، بر اساس تجزیه‌های مکرر، برای عناصر اصلی 1% $\pm$ است؛ در حالی که بیشتر عناصر کمیاب دارای عدم قطعیت 0.5% $\pm$ هستند. به منظور انجام بررسی‌های ریزدماسنجی سیالات کانه‌دار، تعداد 5 مقطع دوبرصیقل از رگه‌های کوارتزی سطحی (3 نمونه) و ژپس و انیدریت عمقی (2 نمونه از گمانه BH17 با مترژهای 280 و 330 متر) تهیه و بررسی شده است. دما و شوری میان‌بارهای سیال در آزمایشگاه زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از دستگاه Linkam MDSG600 و همچنین تعدادی نیز در دانشگاه صنعتی کلاوستال آلمان با

1978) و ۱:۱۰۰۰۰۰ خورس (در دست تهیه) است که اغلب سنگ‌های آذرآواری-آتشفشانی ائوسن و توده‌های نیمه عمیق ائوسن-الیگوسن را شامل می‌شود. توالی آذرآواری-آتشفشانی طیفی از انواع توف، برش و آگلومرا با میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سیلتستون، کنگلومرا با قطعه‌های آهکی و سیلیسی را در بر می‌گیرد (Houshmandzadeh et al., 1978). عمده واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در محدوده مس دوگان شامل گدازه‌های آندزیتی سبز تا خاکستری تیره و توف‌های آذرآواری ائوسن و توده‌ای نیمه عمیق با ترکیب میکرودیوریت هستند (شکل ۱- C) که توصیف آنها به صورت زیر است:

استفاده از صفحه گرم‌کننده و منجمدکننده Linkam THSMG- 600 نصب‌شده روی میکروسکوپ پلاریزان Leitz با دقت اندازه‌گیری در دماهای زیر ۳۰ درجه سانتی‌گراد ± 0.2 و در دمای بالای ۳۰ درجه سانتی‌گراد ± 2 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. کانی‌های رسی در آزمایشگاه (موسسه تحقیقات مخزن) کلاوستال کشور آلمان به روش XRD شناسایی شده‌اند. در این روش ۵ گرم پودر نمونه به همراه ۱ گرم پارافین مخلوط شده است.

زمین‌شناسی

محدوده معدنی دوگان بخشی از قسمت شمال‌شرقی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ ترود (Houshmandzadeh et al., ۲۰۲۰) است.



شکل ۱. A: موقعیت محدوده معدنی دوگان در نقشه زون‌های ساختمانی ایران، B: موقعیت کمان ماگمایی ترود-چاه شیرین و کانسارهای دوگان و چاه‌موسی و C: نقشه زمین‌شناسی تهیه شده از کانسار مس دوگان. داده‌های ساختمانی از تدین و کتال (Tadayon and Katal, 2020) اقتباس شده است. موقعیت نمونه‌های برداشت‌شده و گمانه‌های حفاری نشان‌داده شده است.

Fig. 1. A: The location of the Dogan ore deposit in the structural zone map of Iran, B: Location of the Toroud-Chah Shirin magmatic arc and the Dogan and Chah-Musa deposits, and C: A geological map prepared from the Dogan copper deposit. Structural data are adapted from Tadayon and Katal (2020). The locations of the collected samples and drilling holes are shown.

آندزیت پورفیری ائوسن زیرین تا میانی (E^V): توالی ضخیمی از توف داسیتی، گدازه‌های پیروکسن آندزیت، توف آندزیتی - داسیتی که توسط هوشمندزاده و همکاران (Houshmandzadeh et al., 1978) به عنوان واحد برش آتشفشانی زیرین نام‌گذاری شده‌اند، در این منطقه گسترش وسیعی دارند. سنگ‌های آتشفشانی ترکیبی از آندزیت، آندزی بازالت، تراکی آندزیت و داسیت به سن اوایل تا اواسط ائوسن را شامل می‌شود.

توده میکرودیوریتی (E^D): در محدوده معدنی دوگان، در کنار گسل‌های شرقی - غربی، گسل‌های شمال شرقی - جنوب غربی با سازوکار غالب معکوس رخنمون دارند که سبب بالا آمدن توده‌های نفوذی از عمق به سطح در فرادیواره‌های خود شده‌اند (Tadayon and Katal, 2020). بر اساس شواهد صحرایی توده‌ای نیمه عمیق به درون سنگ‌های آتشفشانی - آذرآواری ائوسن جایگزین شده است که میزبان اصلی کانه‌زایی است. به همین دلیل بیشتر گمانه‌های موجود در این واحد حفاری شده‌اند. این سنگ‌ها در صحرا دارای ساخت دانه‌ای ریز بوده و از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، بیوتیت و هورنبلند تشکیل شده‌اند. همچنین در زیر میکروسکوپ دارای بافت‌های پورفیری تا میکروگرانولار و ترکیب میکرودیوریتی تا دیوریت هستند. بر مبنای بررسی‌های دقیق کانی‌شناسی، ابعاد و نسبت درشت‌بلور به زمینه از نمونه‌های سطحی به گمانه‌های عمیق‌تر افزایش می‌یابد.

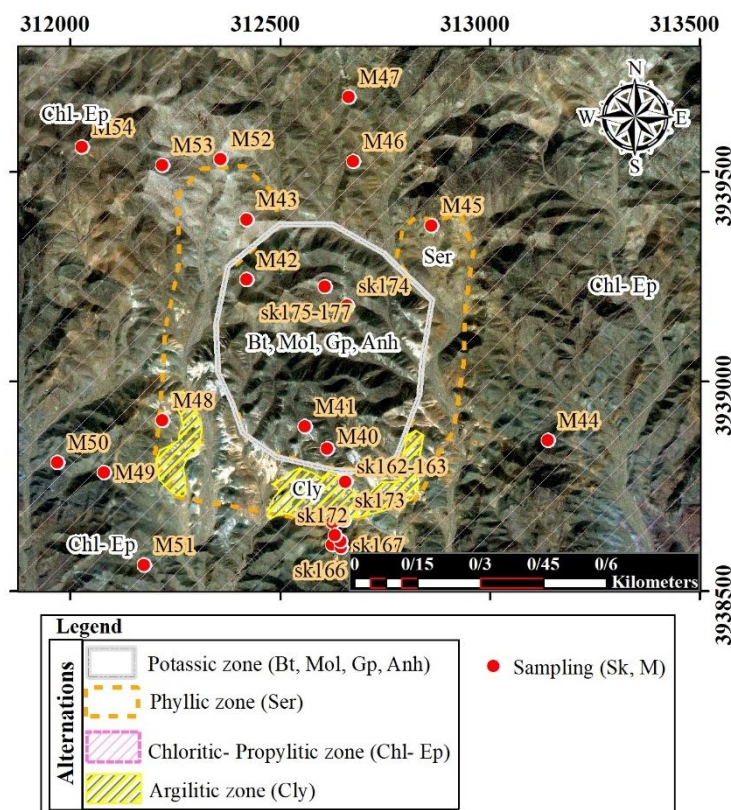
دگرسانی و کانه‌زایی

بر اساس بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی، انواع دگرسانی‌های پتاسیک (Anh, Gp, Mol و Bt)، پروپیلیتی (Chl-Ep)، فلیک (Ser) و آرژیلیک (Cly) در محدوده معدنی دوگان شناسایی شده است. به طور کلی، در این کانسار پهنه‌بندی هم‌مرکز واضحی مشاهده می‌شود؛ به طوری که از مرکز به سمت اطراف دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک، آرژیلیک و سپس پروپیلیتی گسترش دارند (شکل ۲). رگه‌های اکسید آهن ثانویه و سیلیس نیز

به صورت تأخیری در واحدهای آتشفشانی - نیمه عمیق پراکنده شده‌اند. دگرسانی‌ها در مجاورت رگه‌ها و مسیرهای عبور سیالات گرمابی شدت می‌یابد. دگرسانی‌های پتاسیک و فلیک اغلب به واحد میکرودیوریتی محدود شده؛ اما دگرسانی‌های پروپیلیتی و آرژیلیک در توده نیمه عمیق و سنگ‌های آتشفشانی اطراف نیز گسترده شده‌اند (شکل ۲). در ادامه برخی از مهم‌ترین شواهد هر کدام از دگرسانی‌ها آورده شده است.

در محدوده معدنی دوگان دگرسانی پتاسیک در سطح زمین در قالب رگه‌های فلدسپار پتاسیم فراوان (شکل ۳-A و B) و در گمانه‌های عمقی متعدد با حضور کانی‌های شاخص بیوتیت ثانویه و فلدسپار پتاسیم در میکرودیوریت مشاهده می‌شود (شکل ۳-C). در نمونه‌های میکرودیوریتی برداشت شده از گمانه‌های عمیق‌تر، دو نسل بیوتیت شامل انواع ورقه‌ای - ماگمایی به شدت کلریتی شده و بیوتیت‌های ریز گرمابی - ثانویه حضور دارند (شکل ۳-D). از دیگر شواهد بارز این دگرسانی می‌توان به رگه‌های حاوی فلدسپار پتاسیم، انیدریت و ژیس اشاره کرد (شکل ۳-E و F). در اغلب این نمونه‌ها، کله‌های منیتیت، پیریت، کالکوپریت و مولیدینیت به فراوانی مشاهده شده‌اند (شکل ۳-G و H).

نمونه‌های متأثر از دگرسانی پروپیلیتی که در صحرا با رنگ سبز و در زیر میکروسکوپ با کانی‌های شاخص اپیدوت، کلریت، کلسیت و کوارتز شناسایی می‌شوند، در سنگ‌های آتشفشانی (برای مثال آگلومرا، شکل ۳-I) و حواشی واحد میکرودیوریتی حضور دارند. این نوع دگرسانی در گمانه‌های BH.4 و BH.17 در نمونه‌های نزدیک به سطح و به طور ویژه‌ای در گمانه شماره BH.18 از سطح تا عمق ۷۱ متری گسترش دارد. در اغلب مقاطع بررسی شده، آثار این دگرسانی (کلریت و کلسیت) بر روی سنگ‌های دارای کانی‌های شاخص دگرسانی پتاسیک (فلدسپار پتاسیم و ژیس) برنقش شده است (شکل ۳-J). کانه‌های پیریت، کالکوسیت، بورنیت و کوولیت (ثانویه) در سنگ‌های حاصل از این دگرسانی حضور دارند (شکل ۳-K).

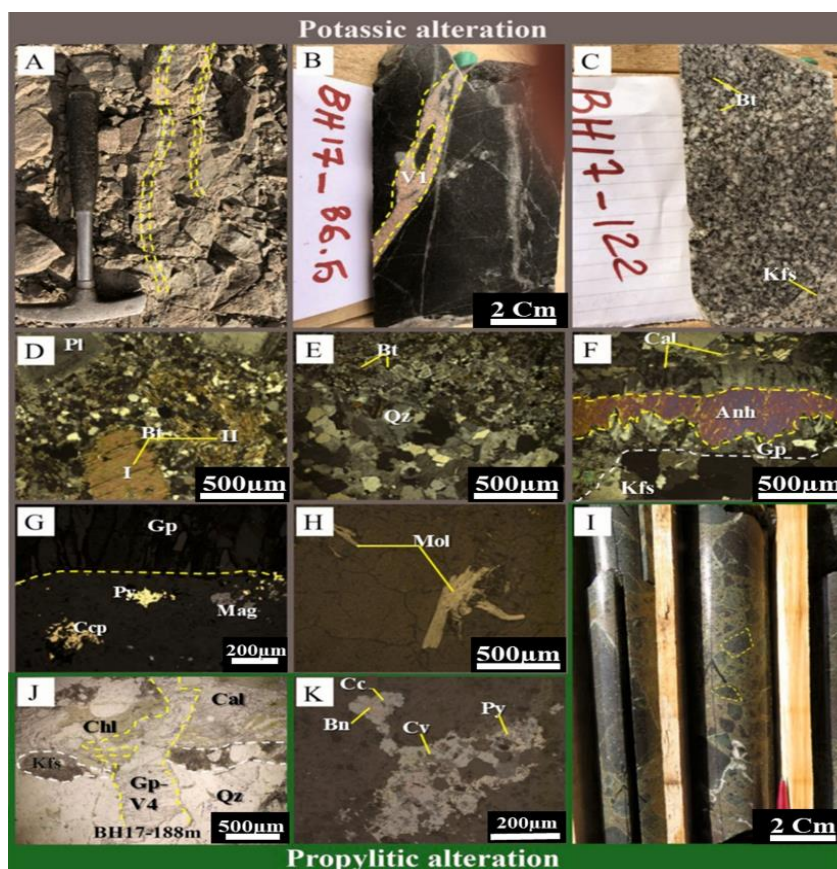


شکل ۲. تصویری از موقعیت دگرسانی‌های رخنمون‌یافته در کانسار مس-مولیبدن دوگان به همراه شماره ایستگاه‌هایی که نمونه‌های سنگی مورد نیاز برای بررسی‌های میکروسکوپی، زمین‌شیمی و ریزدماسنجی برداشت شده‌اند، نشان داده شده است. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است: Bt: بیوتیت، Mol: مولیبدن، Gp: ژپس، Anh: انیدریت، Ep: اپیدوت، Chl: کلریت، Ser: سریسیت، Cly: کانی‌های رسی).

Fig. 2. The alteration zonation in the Dogan copper-molybdenum deposit. The labeled numbers represent the stations where the required hand specimens were collected for microscopic, geochemical, and microthermometric analyses. Abbreviations after Warr (2021) (Bt: Biotite, Mol: Molybdenite, Gp: Gypsum, Anh: Anhydrite, Ep: Epidote, Chl: Chlorite, Ser: Sericite, Cly: Clay minerals).

اکسید آهن سوپرژن را نشان می‌دهد. در این دگرسانی تقریباً تمام سیلیکات‌های سنگ‌ساز با سریسیت و کوارتز جایگزین شده است (شکل ۴-ب). در اغلب مقاطع بررسی شده، آثار دگرسانی فیلیک بر روی دگرسانی‌های پتاسیک قبلی برنقش شده است؛ به گونه‌ای که اغلب فلدسپارها به سریسیت و بیوتیت‌ها به کلریت دگرسان شده‌اند. در شکل ۴-ج شواهدی از برنقش شدن دگرسانی فیلیک (کوارتز-سریسیت) بر روی رگه ژپسی حاصل از دگرسانی پتاسیک نشان داده شده است.

دگرسانی فیلیک در سطح زمین در اطراف دگرسانی پتاسیک به صورت پهنه U شکل (نعل اسبی) گسترش زیادی دارد و دارای ریخت‌شناسی نرم است (شکل ۲). در مغزه‌های حفاری نیز شواهدی از این دگرسانی به ویژه در میکرودیوریت‌ها و به مقدار کمتر در آندزیت‌های میزبان به صورت محدود و با عرض چند میلی‌متر در اطراف گسل‌ها و شکستگی‌های موجود مشاهده می‌شود. در سنگ‌های دارای شکستگی‌های بیشتر، این دگرسانی شدت می‌یابد. شکل ۴-ا تصویری از گسترش دگرسانی فیلیک در میکرودیوریت برشی شده همراه با کانه‌زایی سولفید مس و



شکل ۳. مهم‌ترین شواهد صحرایی و میکروسکوپی از دگرسانی‌های پتاسیک و فلیک در کانسار دوگان. A و B: نمایی نزدیک از رگه‌های فلدسپار پتاسیم در صحرا و گمانه‌ها، C: واحد میکرودیوریتی متأثر از دگرسانی پتاسیک حاوی فلدسپار پتاسیم و بیوتیت‌های فراوان ماگمایی، D: تصویر میکروسکوپی از بیوتیت ورقه‌ای ماگمایی در کنار بیوتیت ثانویه در نور عبوری (BH17-267)، E: تصویر میکروسکوپی از رگه فلدسپار پتاسیم در واحد میکرودیوریت (BH17-88)، F: تصویر میکروسکوپی رگه حاصل از دگرسانی پتاسیک، در این رگه به ترتیب از حاشیه به مرکز فلدسپار پتاسیم، ژپس، انیدریت و مقدار کمی کلسیت حضور دارند (BH17-188)، G و H: تصاویرهای میکروسکوپی از کانه‌های منیتیت، پیریت، کالکوپیریت و مولیبدنیت در نور انعکاسی، I: آگلومرا متأثر از دگرسانی پروپلیتی، J: برنقش کانی‌های کلریت و کلسیت (دگرسانی پروپلیتی) بر روی کانی‌های شاخص دگرسانی پتاسیک (فلدسپار پتاسیم و ژپس) و K: کانه‌های پیریت، کالکوسیت، بورنیت و کوولیت (ثانویه). علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است (Bt: بیوتیت، Kfs: فلدسپار پتاسیم، Pl: پلاژیو کلاز، Qz: کوارتز، Gp: ژپس، Anh: انیدریت، Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Ccp: کالکوپیریت، Py: پیریت، Mag: منیتیت، Mol: مولیبدن، Cc: کالکوسیت، Bn: بورنیت و Cv: کوولیت).

Fig. 3. Field and microscopic evidences from potassic and phyllic alterations in the Dogan deposit. A and B: Close views of K-feldspar veins in the outcrop and boreholes, respectively, C: Microdiorite affected by potassic alteration containing abundant K-feldspar and magmatic biotites, D: Photomicrograph of magmatic biotite adjacent to the secondary ones in XPL (BH17-267), E: Photomicrograph of K-feldspar vein in microdiorite (BH17-88), F: Photomicrograph of a vein resulting from potassic alteration in which K-feldspar, gypsum, anhydrite, and some calcite are present from margin to center (BH17-188), G and H: Photomicrographs of magnetite, pyrite, chalcopyrite and molybdenite in reflected light, I: Brecciate agglomerate affected by propylitic alteration, J: Overprinting of chlorite and calcite (propylitic alteration) on potassic alteration (K-feldspar and gypsum), and K: Pyrite, chalcocite, bornite, and covellite minerals (secondary). Abbreviations after Warr (2021) (Bt: Biotite, Kfs: K-feldspar, Pl: Plagioclase, Qz: Quartz, Gp: Gypsum, Anh: Anhydrite, Cal: Calcite, Chl: Chlorite, Ccp: Chalcopyrite, Py: Pyrite, Mag: Magnetite, Mol: Molybdenite, Cc: Chalcocite, Bn: Bornite, Cv: Covellite).

ضخیمی همراه با شواهدی از دگرسانی پتاسیک در سنگ حضور دارند (شکل ۵-E). در این نوع رگه‌ها، کانی‌های سولفیدی فراوان همانند پیریت، کالکوپیریت و به ویژه مولبدنیت حضور دارند (شکل ۵-F و G). مولبدنیت به صورت پولکی و ورقه‌های خمیده همراه با پیریت، منیتیت و کالکوپیریت در گمانه BH17 از عمق ۱۶۰ تا ۲۵۰ متری حضور داشته و در مقایسه با پیریت و کالکوپیریت یک کانی تأخیری است.

رگه‌های گروه ۳ (V3): این رگه‌ها در مقایسه با دو گروه قبلی تأخیری‌تر بوده و بیشتر در بخش‌های متأثر از دگرسانی فلیک و یا حتی آرژیلیک متمرکز شده‌اند (شکل ۵-H). در بسیاری از گمانه‌های بررسی شده، این نوع از رگه‌ها به طور چیره از کوارتز و فازهای سولفیدی نظیر پیریت $\pm$ کالکوپیریت $\pm$ بورنیت تشکیل شده‌اند (شکل ۵-I).

رگه‌های گروه ۴ (V4): این رگه‌ها در مقایسه با سایر انواع بیان‌شده، بسیار باریک بوده، فقط از کلسیت و کوارتز تشکیل شده است و بدون کانه‌زایی هستند (شکل ۵-J، K، L و M). از آنجایی که رگه‌های اخیر رگه‌های مراحل قبلی را قطع کرده‌اند و در همه پهنه‌های دگرسان‌شده گسترش دارند، به رگه‌های تأخیری معروف بوده و احتمالاً به دلیل فعالیت‌های زمین‌ساختی بعدی تشکیل شده‌اند. در شکل ۵-L و M، رگه‌های V1 و V2 توسط رگه‌های تأخیری ژپس و کوارتز (V3) قطع شده‌اند.

کانی‌شناسی و توالی همبرزادی

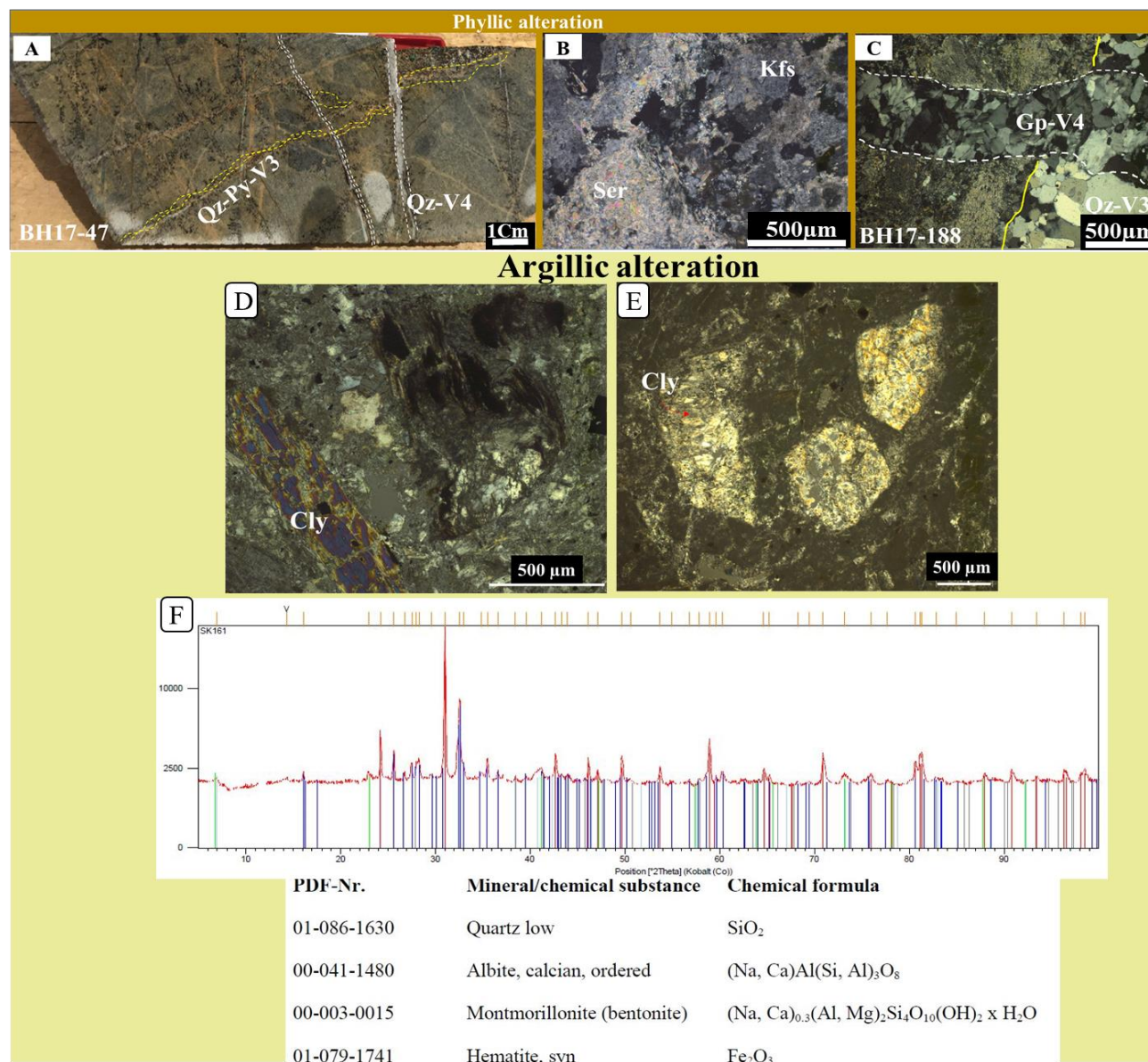
کانی‌زایی در کانسار دوگان در عمق (بیش از ۱۰۰ متر)، به صورت اکسیدها و سولفیدهای هیپوژن و در نزدیک سطح و بخش‌های سطحی و سوپرژن به صورت اکسید-هیدروکسید و سولفیدهای ثانویه قابل مشاهده است. کانی اکسیدی در بخش هیپوژن شامل منیتیت بوده که اغلب در رگه-رگه‌ها و یا افشان در سنگ‌های حاصل از دگرسانی پتاسیک و به مقدار کمتر در پهنه دگرسانی فلیک رخ داده است.

دگرسانی آرژیلیک به صورت بخش‌های محدود در داخل پهنه دگرسانی فلیک در محدوده مورد بررسی به وضوح قابل مشاهده است که بر روی پهنه فلیک برنقش شده است (شکل ۲-B). دگرسانی آرژیلیک که با رنگ زرد-سفید شناسایی می‌شود، فقط در بخش‌های سطحی کانسار به خصوص در نزدیکی مرز دگرسانی‌های فلیک و پروپیلیتی گسترش دارد (شکل‌های ۲ و ۴). بر اساس بررسی‌های ساختاری انجام‌شده در محدوده معدنی دوگان (Tadayon and Katal, 2020)، پهنه دگرسانی آرژیلیکی در واقع بخشی از یک زون گسلی در بخش جنوبی دوگان است که به شدت متأثر از فعالیت گسل‌هایی با امتدادهای مختلف است. در این بخش، قطعه‌های گسلی با امتدادهای شمال‌غرب-جنوب‌شرق تا شمالی-جنوبی در قسمت‌های جنوب و شمال پهنه دگرسانی آرژیلیک شناسایی شده‌اند. در مشاهدات میکروسکوپی و نتایج پراش پرتو ایکس نمونه‌های برداشت‌شده از بخش‌های عمیق‌تر این پهنه، کانی‌های رسی (از قبیل مونت موریلونیت)، هماتیت و لیمونیت شناسایی شده‌اند (شکل ۴-D، E و F).

بر مبنای رده‌بندی سلیتو (Sillitoe, 2010) و بررسی‌های دقیق انجام‌شده در محدوده معدنی دوگان، چهار نوع رگه بر حسب رخداد پیدایش شناسایی شده است (جدول ۱):

رگه‌های گروه ۱ (V1): این نوع رگه‌ها که درون توده میکرودیوریت و به ویژه در سنگ‌های متأثر از دگرسانی پتاسیک بیشترین گسترش را دارند، از مجموعه کانی‌های فلدسپار پتاسیم، بیوتیت و کوارتز تشکیل شده‌اند (شکل ۵-A و B). مهم‌ترین کانه‌های موجود در این نوع رگه‌ها شامل منیتیت (شکل ۵-C) و به مقدار کمتر پیریت است. بر اساس هم‌یافت کانیایی این نوع رگه‌ها در دمای بالاتری تشکیل شده‌اند (Sillitoe, 2010).

رگه‌های گروه ۲ (V2): در گمانه‌های بررسی شده، رگه‌های نوع ۲ مشابه رگه‌های گروه ۱ در میکرودیوریت‌های متأثر از دگرسانی پتاسیک مشاهده می‌شوند (شکل ۵-D). در بسیاری از این رگه‌ها، انیدریت که در دماهای بالا پایدار است، به صورت رگه‌های



شکل ۴. شواهدی از دگرسانی‌های فلیک و آرژیلیک در کانسار دوگان. A: تصویری از توسعه دگرسانی فلیک در میکرودیوریت برشی شده همراه با سولفید مس و اکسید آهن سوپرژن، B: تصویر میکروسکوپی از گسترش سریسیت بر روی بلورهای پلاژیوکلاز، C: برنقش شدن کانی‌های کوارتز-سریسیت (دگرسانی فلیک) بر روی سنگ‌های متأثر از دگرسانی پتاسیک (رگه ژپس). رگه کوارتزی دارای کانه‌زایی پیریت است، D و E: تصویرهای میکروسکوپی از کانی‌های رسی در بخش دگرسانی آرژیلیک و F: نتایج پراش پرتو ایکس نمونه شماره Sk-161 متأثر از دگرسانی آرژیلیک. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است (Kfs: پتاسیم فلدسپار، Gp: ژپس، Ser: سریسیت، Qz: کوارتز، Cly: کانی رسی و Py: پیریت).

Fig. 4. Field and microscopic evidences from phyllic and argillic alterations in the Dogan deposit. A: Development of phyllic alteration in brecciate microdiorite associated with supergene copper sulfide and iron oxides, B: Photomicrograph of sericitization of plagioclases, C: A gypsum vein resulting from potassic alteration overprinted by phyllic alteration (quartz-sericite). The quartz vein contains pyrite mineralization, D and E: Photomicrograph of clay minerals the argillic zone, and F: X-ray diffraction results of SK161 affected by argillic alteration. Abbreviations after Warr (2021) (Kfs: K-feldspar, Gp: Gypsum, Ser: Sericite, Qz: Quartz, Cly: Clay minerals and Py: Pyrite).

جدول ۱. انواع رگه‌های موجود در کانسار دوگان

Table 1. A variety of vein types in the Dogan deposit

Group	Minerals	Alteration	Other
First group (V ₁)	Orthoclase+anhydrite/gypsum+pyrite±chalcopyrite±magnetite	Potassic	With Cu mineralization
Second group (V ₂)	Quartz±K-feldspar+pyrite+molybdenite±chalcopyrite±magnetite	Potassic	With Cu-Mo mineralization
Third group (V ₃)	Quartz+pyrite+chalcopyrite+bornite	Phyllic	With Cu mineralization
Fourth group (V ₄)	Quartz±gypsum±calcite	-	None mineralization and produced by tectonic activity

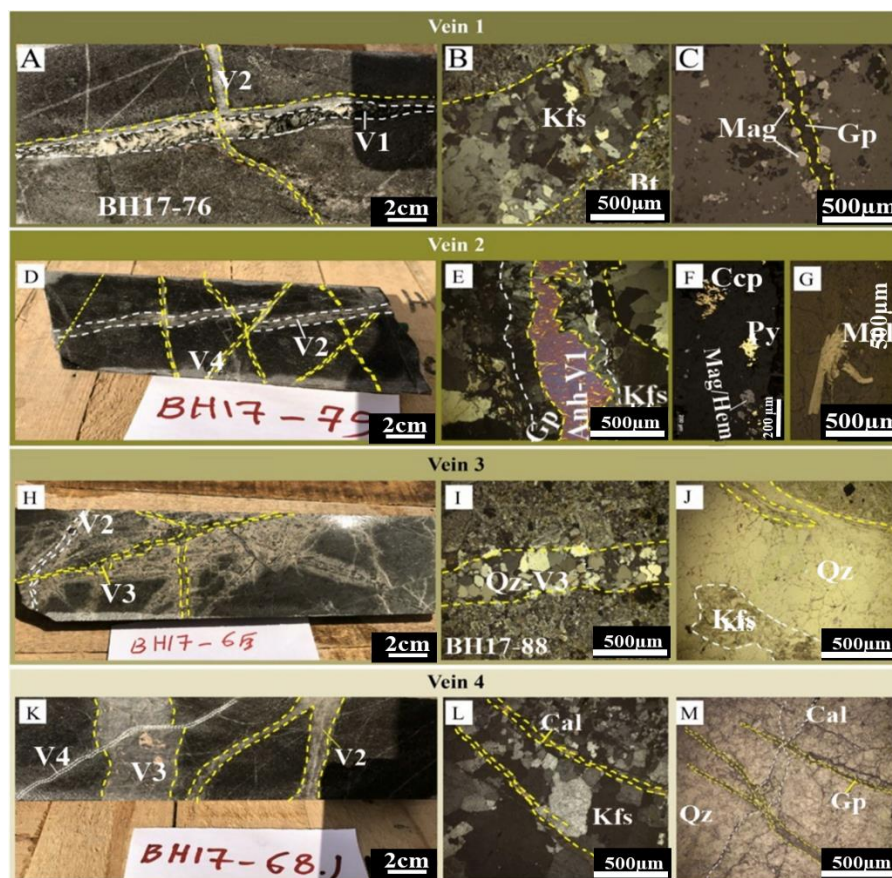
1983) اغلب نمونه‌های آذرین مورد بررسی در قلمرو ماگماهای کالک آلکالن حاشیه فعال قاره‌ای قرار گرفته‌اند (شکل ۷-۱). در نمودار Zr/TiO₂ در مقابل Nb/Yb برگرفته از وینچستر و فلوئید (Winchester and Floyd, 1977) که برای کمک به طبقه‌بندی سنگ‌های آذرین دگرسان‌شده طراحی شده است، اغلب نمونه‌های مورد بررسی در محدوده دیوریت قرار گرفته‌اند (شکل ۷-۲). در شکل ۷ داده‌های زمین‌شیمی توده نیمه عمیق دوگان با توده نیمه عمیق چاه‌موسی که میزبان کانه‌زایی اپی‌ترمال با سولفید پایین است (Sheibi and Mousivand, 2018) مقایسه شده است.

برای بررسی میزان تغییر و تحولات ماگمای مولد نسبت به ماگمای اولیه، همچنین منشأ و نزدیکی ژنتیکی آنها از نمودارهای چند عنصری عادی‌سازی شده نسبت به ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) و کندریت (Boynton, 1984) استفاده شده است (شکل ۷-۳ و ۷-۴). در نمودار عادی‌سازی شده نسبت به گوشته اولیه، نمونه‌های مورد بحث الگوی شاخص ماگماهای زون‌های فروران‌ش را دارند (Wilson, 1989)؛ به گونه‌ای که از عناصر سنگ‌دوست بزرگ‌یون (LILE = Cs, Rb, Ba, Th, U, Pb) غنی‌شدگی و از Nb و Ti تهی‌شدگی شدیدی نشان می‌دهند. در نمودار عادی‌سازی نسبت به کندریت، این توده آذرین نسبت La/Yb بالا (۴۰-۷۰) داشته و از عناصر نادر خاکی سنگین به شدت تهی شده‌اند.

همچنین کالکوپریت و مقادیر زیادی مولیبدنیت در داخل رگه‌های فلدسپار پتاسیم-ژیس / انیدریت و در زمینه سنگ با دگرسانی‌های پتاسیک و فلیک دیده می‌شوند. یک زون اکسیدی و سوپرژن متشکل از کانسنگ‌های اکسیدشده از عمق ۲۰ تا ۸۰ متری از سطح زمین گسترش یافته و اغلب متشکل از هماتیت، لیمونیت و گوتیت، مالاکیت، کوولیت و کالکوسیت است. در شکل ۶، توالی همبرزادی کانسار دوگان بر اساس بررسی‌های دقیق میکروسکوپی و مستندات ارائه‌شده در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ ارائه شده است.

زمین‌شیمی

بعد از دریافت نتایج تجزیه زمین‌شیمی، تصحیحات لازم از جمله حذف مواد فرار به روش‌های معمول در سنگ‌شناسی اعمال شده است. نتایج تجزیه زمین‌شیمی سنگ کل این نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به اینکه در بررسی‌های میکروسکوپی، اغلب نمونه‌های سنگی برداشت‌شده از توده نیمه عمیق دوگان متأثر از فعالیت سیالات گرمایی بوده و احتمال تحرک عناصر در آنها محتمل است، برای نام‌گذاری این سنگ‌ها از نمودارهایی استفاده شده است که در آن مرز بین ترکیب‌های سنگی بر مبنای ویژگی‌های عناصر کمیاب نام‌تحرک تعریف شده است. در نمودار عناصر کمیاب و نام‌تحرک Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce,



شکل ۵. مشخصات نمونه دستی و میکروسکوپی از انواع رگه و رگچه‌های شناسایی شده در کانسار دوگان. A: نمایی نزدیک از V_1 حاوی فلدسپار پتاسیم و بیوتیت ثانویه، B: تصویر میکروسکوپی از رگه V_1 متشکل از فلدسپار پتاسیم و کوارتز، C: بلورهای منیتیت در رگه فلدسپار پتاسیم در نور انعکاسی، D: نمایی نزدیک از رگه انیدریت کانه‌دار (V_2) که توسط رگه‌های تأخیری تر (V_4) قطع شده است، E: تصویر میکروسکوپی از رگه V_2 حاوی فلدسپار پتاسیم و انیدریت، F و G: تصاویرهای میکروسکوپی از رگه‌های فلدسپار پتاسیمی حاوی منیتیت، کالکوپیریت، پیریت و مولیبدنیت، H: رگه‌های V_3 در اطراف رگه‌های V_1 به شدت دگرسان‌شده؛ بقایای فلدسپار پتاسیم در این رگه‌ها مشاهده می‌شود، I: تصویر میکروسکوپی از رگه کوارتزی حاوی کالکوپیریت، پیریت و منیتیت، L: تصویر میکروسکوپی از رگه‌های کوارتز، K: رگه کلسیتی تأخیری V_4 که رگه‌های انیدریت قبلی را قطع کرده است. L: تصویر رگه‌های کوارتزی بدون کانه در نور عبوری. M: رگه کلسیتی تأخیری، رگه‌های ژپس و کوارتزی قبلی را قطع نموده است. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است (Bt: بیوتیت، Kfs: فلدسپار پتاسیم، Qz: کوارتز، Gp: ژپس، Cal: کلسیت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Hem: منیتیت، Mag: هماتیت و Mol: مولیبدنیت).

Fig. 5. The hand specimens and photomicrographs of the identified vein types in Dogan. A: Closed view of V_1 containing K-feldspar and secondary biotite, B: Photomicrograph of V_1 consisting of K-feldspar and quartz, C: Photomicrograph of magnetite at V_1 in reflected light, D: Closed view of the mineralized anhydrite vein (V_2) which is subsequently cut by later veins (V_4), E: Photomicrograph of V_2 vein containing K-feldspar and anhydrite, F and G: Photomicrographs of K-feldspar veins containing magnetite, chalcopyrite, pyrite and molybdenite, respectively, H: V_3 vein is developed around strongly modified V_1 ; the remnant K-feldspars can be seen in these veins, I: Photomicrograph of a quartz vein containing chalcopyrite, pyrite and magnetite, J: Photomicrograph of quartz veins without mineralization, K: Late calcite veins (V_4) cut the previous veins, L: Photomicrograph of quartz veins without ore in transmitted light M: Late calcite veins (V_4) cut the gypsum and quartz veins. Abbreviations after Warr (2021) (Bt: Biotite, Kfs: K-feldspar, Qz: Quartz, Gp: Gypsum, Cal: Calcite, Py: Pyrite, Mag: Magnetite, Hem: Hematite, Mol: Molybdenite).

Stages Minerals	Hydrothermal Stages					Tectonic	Weathering and supergene
	Stage 1 (V1) (Potassic)	Stage 2 (V2) (Potassic)	Stage 3 (Propylitic)	Stage 4 (V3) (Phyllic)	Stage 5 (Argillic)	Stage 6 (V4)	
Magnetite	◆	◆					
Pyrite	◆	◆	◆	◆			
Chalcopyrite	◆	◆		◆			
Molybdenite		◆					
Bornite				◆			
Hematite							◆
Malachite							◆
Chalcocite							◆
Covellite							◆
Quartz	◆	◆		◆		◆	
K-Feldspar	◆	◆					
Biotite	◆						
Sericite				◆			
Chlorite			◆				
Epidote			◆				
Calcite			◆			◆	
Clay minerals					◆		◆
Anhydrite	◆	◆					
Gypsum	◆	◆				◆	◆

شکل ۶. توالی همبستگی کانی‌ها در کانسار دوگان

Fig. 6. Paragenetic sequence of minerals of the Dogan deposit

میان‌بار سیال

میان‌بارهای سیال فروانی در رگه‌های متعدد موجود در کانسار دوگان حضور دارند. بیشتر بررسی‌های میکروترمومتری در این پژوهش بر روی میان‌بارهای سیال موجود در رگه‌های V_1 ، V_2 و V_3 و بر روی کوارتز، ژپس و انیدریت انجام شده است. تعدادی از میان‌بارهای کوچک‌تر (قطر ۱ تا ۳ میلی‌متر) از نظر میکروترمومتری قابل اندازه‌گیری نبوده‌اند (جدول ۳).

به طور کلی، از تعداد ۵۷ میان‌بار سیال بررسی شده می‌توان آنها را بر اساس فراوانی، ماهیت و نسبت فازها به سه گروه طبقه‌بندی کرد (شکل ۸): میان‌بارهای سیال نوع I (دوفازی $L+V$) که شامل فازهای مایع + بخار و از نظر حجمی غالب با مایع است. این میان‌بارها با قطر ۲ تا ۳ میلی‌متر در همه رگه‌های کوارتز کانه‌دار و در زمینه سنگ رایج هستند. حباب‌های بخار موجود از نظر اندازه

در نمودار Nb در برابر Y (Pearce et al., 1984) که به منظور تعیین جایگاه زمین‌ساختی و نمودار AFM (Irvine and Baragar, 1971) به منظور تعیین منشأ احتمالی تشکیل ماگمای کالک‌آلکالن سازنده سنگ‌های مورد بررسی استفاده شده است، نمونه‌های مورد بررسی در محدوده گرانیوئیدهای کمان‌های آتشفشانی و به ویژه در قلمرو آداکیت‌ها (Martin, 1999) واقع شده‌اند (شکل ۷-E و F).

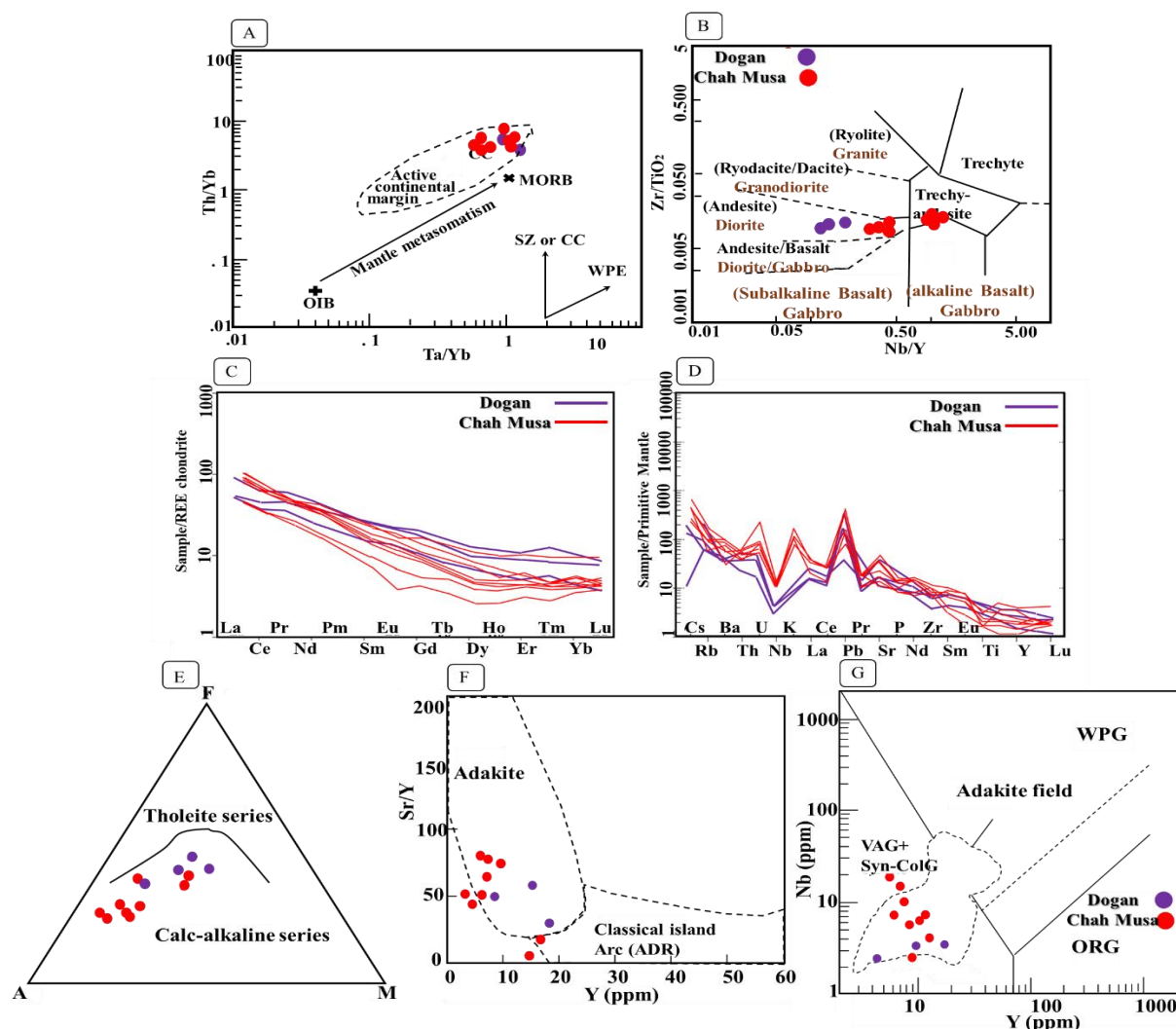
در نمودار Sr/Y در مقابل Y (شکل ۷-G) نیز نمونه‌های مورد بررسی، در قلمرو آداکیت‌ها قرار می‌گیرند. بنابراین ویژگی‌های زمین‌شیمی نظیر $\text{SiO}_2 \geq 40 \text{ wt.}\%$ ، $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 10 \text{ wt.}\%$ ، $1 < \text{MgO} < 5 \text{ wt.}\%$ و $\text{Sr} \geq 200$ ، $\text{Y} < 18 \text{ ppm}$ ، همراه با تهی-شدگی از HREE (Martin, 1999)، ماهیت آداکیتی این سنگ‌ها را تأیید می‌کند.

متغیر بوده و کمتر از ۲۵ درصد از حجم میان‌بار را تشکیل می‌دهند. میان‌بارها را تشکیل می‌دهند. این میان‌بارها به ندرت با حرارت با حرارت دادن، اجزاء به مایع تبدیل می‌شوند. میان‌بارهای سیال نوع II (دو فاز V+L) که حاوی فازهای بخار+مایع بوده و حباب‌های بخار با ابعاد متغیر بیش از ۷۰ درصد حجمی این غنی از بخار (V) که اغلب به صورت تجمعی در زمینه و به صورت همزیست با میان‌بارهای دو فاز دیده می‌شوند.

جدول ۲. زمین‌شیمی سنگ‌های آذرین منطقه دوگان. اکسیدهای عناصر اصلی به صورت درصد وزنی (wt.%) و مقادیر عناصر کمیاب و کمیاب خاکی به صورت قسمت در میلیون (ppm) گزارش شده است.

Table 2. Geochemical analyses data of the of the Dogan deposit. The oxides of the major elements are reported as wt.% and trace and REEs in ppm.

No.	BH4-120	BH17-188	BH17-249	BH18-62
Long.	312654	312655	312655	312757
Lat.	3938709	3939043	3939043	3939249
Rb	61.1	42.2	41.6	138
Cs	1.1	<0.1	1.6	-
Sr	415.6	404.1	881.5	273
Ba	279	347	294	337
Y	18.9	8.1	14.4	-
La	12.1	11.7	19.1	-
Zr	77.7	50	95	92
Ce	26.1	21.3	35.5	-
Th	3.4	2.2	4.6	-
Nb	3.6	2.6	3.7	-
Ta	0.4	1.5	1	-
Pr	3.41	2.7	4.52	-
Nd	16.4	11.1	20.2	-
U	0.9	0.4	1.1	-
Sm	3.65	2.19	3.76	-
Eu	1.18	0.77	1.19	-
Gd	3.91	2.17	3.57	-
Tb	0.54	0.29	0.45	-
Dy	3.18	1.8	2.54	-
Er	1.86	0.89	1.48	-
Tm	0.27	0.13	0.19	-
Yb	1.69	0.74	1.32	-
Lu	0.22	0.1	0.2	-
SiO ₂	47.87	51.87	56.08	39.54
TiO ₂	0.69	0.31	0.59	0.64
Al ₂ O ₃	16.78	10.7	18.57	19.91
MgO	5.01	1.35	3.2	4.2
Na ₂ O	2.42	1.99	4.31	1.57
K ₂ O	2.51	2.37	1.71	4.33
LOI	0.18	0.54	0.35	8.529



شکل ۷. ویژگی‌های زمین‌شیمی توده نیمه عمیق میکرودیوریتی در کانسار دوگان در مقایسه با توده نیمه عمیق چاه‌موسی (Sheibi and Mousivand, 2018). A: نمودار Zr/TiO_2 در مقابل Nb/Y برگرفته از وینچستر و فلوید (Winchester and Floyd, 1977) برای تعیین ترکیب سنگ‌شناسی، B: نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce, 1983) برای تعیین سری ماگمایی؛ مقادیر N-MORB و OIB از سان و مک‌دوناف (Sun and McDonough, 1989) و پوسته قاره‌ای (CC) از رادنیک و ژائو (Rudnick and Gao, 2003)، C و D: نمودار عناصر نادر خاکی و کمیاب که به ترتیب نسبت به کندریت (Boynnton, 1984) و گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) عادی‌سازی شده‌اند، E: نمودار AFM برای تعیین سری ماگمایی (Irvine and Baragar, 1971)، F: نمودار Sr/Y در برابر Y (Martin, 1999) و G: نمودار Nb در برابر Y برای تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ‌های آذرین (Pearce et al., 1984)

Fig. 7. Geochemistry of subvolcanic microdiorite intrusion of the Dogan deposit and the Chah-Musa subvolcanic intrusion (Sheibi and Mousivand, 2018). A: Zr/TiO_2 versus Nb/Y diagram from Winchester and Floyd (1977) to determine the lithological composition, B: Th/Yb versus Ta/Yb diagram (Pearce, 1983) to determine the magmatic series; N-MORB and OIB values from Sun and McDonough (1989) and continental crust (CC) from Rudnick and Gao (2003), C and D: Chondrite normalized REE pattern (Boynnton, 1984) and Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (Sun and McDonough, 1989), E: AFM diagram to determine the Magmatic Series (Irvine and Baragar, 1971), F: Sr/Y versus Y plot (Martin, 1999), and G: Nb versus Y plot to determine tectonic setting of the igneous rocks (Pearce et al., 1984)

جدول ۳. داده‌های ریزدماسنجی مجموعه‌های سیال درگیر در کانسار دوگان. N معرف تعداد میان‌بارهای سیال اندازه‌گیری شده است. شوری سیال بر اساس بودنار (Bodnar, 1993) محاسبه شده است.

Table 3. Microthermometric Data for 57 fluid inclusions in the Dogan deposit. N represents the number of measured fluid inclusions. Fluid salinity was calculated based on Bodnar (1993).

Sample code	Host Mineral	Alteration type	FI type	FIA	Type	N	Vapour liquid ratio	T _{mice} (°C)	Salinity (Wt% NaCl)	TH(°C)
BH17-12	Quartz	propylitic	Primary	FIA -1	L+V	3	20	-17.22 to -12.20	2.95 to 16.50	185.20 to 241.87
				FIA -2	L+V	4	30	-2.83 to -9.32	4.64 to 13.17	195.62 to 222.81
				FIA -3	L+V	2	25	-1.85 to -4.91	3.25 to 7.74	195.24 to 200.23
				FIA -4	V+L	4	80	-1.55 to -11.73	2.52 to 15.67	198.74 to 250.12
BH17-9.60	Quartz ± Pyrite	propylitic - phyllic	Primary	FIA -1	V+L	8	20	-1.57 to -13.16	2.54 to 16.98	169.20 to 360.16
				FIA -2	V+L	3	10	-4.82 to -7.98	7.52 to 11.5	225.38 to 350.74
				FIA -3	V+L	1	30	-3.77	6.30	222.10
BH17-47	Quartz	propylitic	Primary	FIA -1	L+V	5	10	-3.14 to -13.54	4.97 to 17.39	195.30 to 231.10
				FIA -2	L+V	2	20	-2.26 to -4.20	3.70 to 6.44	221.05 to 225.72
				FIA -3	L+V	2	30	-2.87 to -5.69	4.65 to 8.62	225.06 to 226
BH17-280	Gypsum/Anhydrite ± Quartz ± Pyrite ± Chalcopyrite	potassic	Primary	FIA -1	L+V	7	20	-3.56 to -16.34	43.75 to 58.60	350.41 to 484.22
				FIA -2	L+V	3	30	-10.81 to -15.32	47.91 to 55.95	299.15 to 438.97
				FIA -3	V+L	2	60	-7.47 to -9.63	15.73 to 53.76	204.53 to 450.80
BH17-330	Gypsum/Anhydrite	potassic	Primary	FIA -1	L+V	2	10	-12.35 to -12.90	57.82 to 59.40	450.32 to 480.42
				FIA -2	L+V	6	20	-10.62 to -13.53	50.67 to 59.4	485.15 to 580.29
				FIA -3	L+V	2	30	-9.97 to -10.48	58.35 to 58.55	502.36 to 562.47

فرایندهای اصلی مؤثر در ته‌نشست مواد معدنی از سیال کانه‌ساز، شامل فرایندهای جوشش و رقیق‌شدگی بوده (شکل ۸-۸ E) است. با توجه به وجود دو گروه اصلی سیالات درگیر شامل گروه با دما و شوری بالا و گروه با دما و شوری پایین (شکل ۸-۸ E)، احتمالاً فرایند اختلاط آب‌های ماگمایی با شوری و دمای بالا با آب‌های جوی با شوری و دمای پایین نقش مؤثری در نهشت عناصر از سیال داشته است.

بحث

الف) محیط زمین‌ساختی سنگ‌های آذرین

غنی‌شدگی سنگ‌های آذرین میزبان از عناصر سنگ‌دوست بزرگ‌یون مانند (Ba و K، Sr) و آنومالی‌های منفی Nb و Ti، نشان‌دهنده شکل‌گیری این سنگ‌ها در یک محیط فرورانش است. این سنگ‌ها بر پایه نسبت‌های Y/Sr و Yb/La دارای گرایش آداکتی الگوهای عناصر نادر خاکی به شدت تفریق‌یافته است و فاقد بی‌هنجاری Eu مشخص هستند. بر اساس جان و همکاران (John et al., 2010)، توده‌های نیمه‌عمیق کانه‌دار سامانه‌های پورفیری در مقایسه با سایر توده‌های نفوذی بدون کانه، الگوی عناصر نادر خاکی تفریق‌یافته‌تری دارند. به علاوه، نمونه‌های مورد بحث آنومالی منفی یا مثبت اندکی از Eu نشان می‌دهند (شکل ۷-۷ C و D). نبود یک ناهنجاری Eu منفی ممکن است بیانگر شرایط ماگمایی با اکسایش بالا باشد (Lang and Titley, 1998; Richards et al., 2001) که با فراوانی منیتیت در این سنگ‌ها سازگار است. در واقع به دلیل فوگاسیته بالای اکسیژن، این عنصر بیشتر به صورت Eu^{+3} و کمتر به صورت Eu^{+2} در ماگما حضور دارد. بنابراین به مقدار کمتری جایگزین پلاژیوکلاز می‌شود. ویژگی‌های زمین‌شیمیایی توده‌های نفوذی میزبان کانسار دوگان با ویژگی‌های میزبان کانسارهای مس-مولیبدن پورفیری (Sun et al., 2015) سازگار است.

ب) الگوی تشکیل: دگرسانی و تحولات سیال کانه‌ساز

ماهیت نیمه عمیق سنگ‌های میزبان (میکرودیوریت) و تشکیل آنها

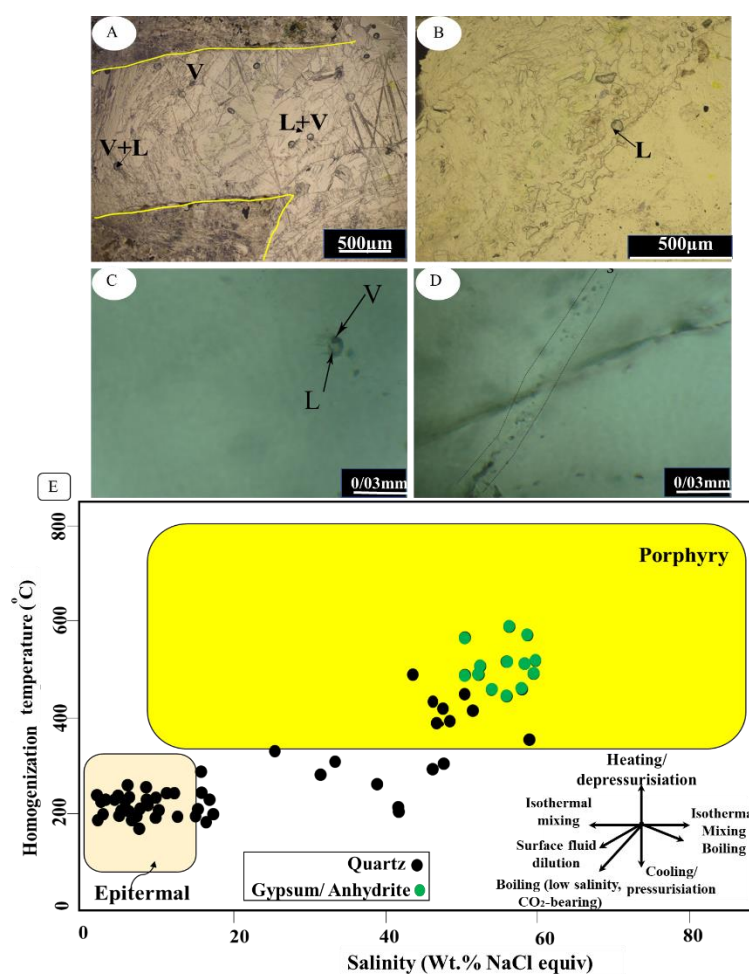
اغلب میان‌بارهای سیال بررسی شده دوکی و دارای انتهای گرد هستند. در مجموع، میان‌بارهای سیال نوع V و LV غنی از مایع فراوان‌ترند (شکل ۸-۸ A، B و C). میان‌بارهای دوفازی غنی از مایع و یا غنی از گاز نیز اغلب به صورت منفرد حضور دارند. میان‌بارهای سیال LV در همه رگه‌ها یافت می‌شوند؛ اما در رگه‌های کوارتز کم عمق مناطق دارای دگرسانی فلیک و پروپیلیتی شایع‌تر هستند. همچنین به وضوح در امتداد سطوح شکستگی قرار داشته و منشأ ثانویه دارند (شکل ۸-۸ D).

بررسی‌های ریزدماسنجی بر روی ۵ نمونه کوارتز، ژپیس و انیدریت از رگه‌ها و بلورهای برداشت‌شده از نمونه‌های سطحی تر (BH17-9.60, 12, 47) و عمقی‌تر (BH17-280, 330) انجام شده است (جدول ۳). نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که دمای همگن‌شدن سه نمونه برداشت‌شده از بخش‌های سطحی‌تر گمانه BH17 (اعماق ۹/۶، ۱۲ و ۴۷ متر)، ۲۱۰ تا ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد است. به علاوه، این نمونه‌ها دمای ذوب یخ (T_{mice}) ۵/۴۲ تا ۶/۶۴- درجه سانتی‌گراد و شوری ۸ تا ۹/۵۱ درصد وزنی معادل نمک طعام دارند (جدول ۳).

دمای همگن‌شدن نمونه‌های عمقی (گمانه BH17 اعماق ۲۸۰ و ۳۳۰ متر) بین ۳۹۸ تا ۵۱۳ درجه سانتی‌گراد متغیر است. همچنین دمای ذوب یخ (T_{mice}) از ۴۹ تا ۵۳/۲۶ درجه سانتی‌گراد و میزان شوری آنها از ۴۷/۴۹ تا ۵۶/۱ درصد وزنی معادل نمک طعام تغییر می‌کند. در نمودار دمای همگن‌سازی در مقابل شوری میان‌بارهای سیال (Wilkinson, 2001)، نمونه‌های نزدیک‌تر به سطح کانسار مس دوگان در قلمرو دما و شوری پایین‌تر (کانسارهای اپی‌ترمال) و دو نمونه متعلق به اعماق بیشتر در قلمرو دما و شوری بالا (سامانه‌های پورفیری) قرار گرفته‌اند (شکل ۸-۸ E). طیف وسیع تغییرات دما و شوری میان‌بارهای سیال، همزیستی میان‌بارهای سیال غنی از گاز (V)، غنی از مایع (L+V) و مایع (L) (Ronacher et al., 2000) به همراه همگن‌شدن برخی از سیالات به بخار در دمای بالا، از مهم‌ترین شواهد رخداد جوشش در سیالات گرمایی این منطقه است. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که

شواهد همگی بیانگر رخداد یک سامانه پورفیری است. به طور کلی، محدوده معدنی دوگان از نظر محیط زمین‌ساختی تشکیل، جنس سنگ میزبان، بافت و ساخت، کانی‌شناسی و پهنه‌بندی دگرسانی شباهت‌های زیادی با کانسارهای مس-مولیبدن پورفیری نشان می‌دهد.

در کمان ماگمایی، حضور دگرسانی پتاسیک در بررسی‌های سطحی و عمقی، شوری و دمای بالای سیالات گرمایی، نوع رخداد کانه‌زایی (پراکنده و رگه-رگچه‌ای)، پتانسیل بالای مس و مولیبدن و پهنه‌بندی دگرسانی‌های موجود (پتاسیک، فلیک، آرژیلیک و پروپیلیتی) در کانسار دوگان مشاهده شده است. این



شکل ۸. A-D: تصویرهای میکروسکوپی از انواع میان‌بارهای سیال بررسی شده در کانی‌های کوارتز، ژپس و انیدریت. **A:** میان‌بارهای دوفازی غنی از مایع (L+V) و غنی از گاز (V+L) در رگه ژپس، **B:** میان‌بارهای تک‌فازی مایع (L) در رگه انیدریت، **C:** میان‌بار دوفازی غنی از مایع به صورت انفرادی و اولیه در کانی کوارتز، **D:** میان‌بارهای سیال ثانویه در زمینه کوارتز، **E:** نمودار دمای همگن‌سازی در مقابل شوری میان‌بارهای سیال در کانسار دوگان

Fig. 8. A-D) Microscopic images of different fluid inclusions studied in quartz, gypsum, and anhydrite minerals; A: Liquid-rich (L+V) and gas-rich (V+L) two-phase fluid inclusions in the gypsum vein, B: Liquid single-phase inclusions (L) in the anhydrite vein, C: Individual and primary fluid-rich two-phase inclusions in the quartz, and D: Secondary fluid inclusions in the quartz; E) Graph of homogenization temperature versus salinity of fluid inclusions in the Dogan deposit

دگرسانی سریستی (۲۱۰ تا ۳۶۰ درجه سانتی گراد) در کانسار مورد بررسی بیانگر پایین آمدن گرادیان‌های حرارتی و هجوم سیالات جوی است. اغلب رگه‌های نوع سوم (V_3) حاوی کوارتز و مقادیر کمی پیریت + کالکوپیریت + بورنیت در نمونه‌های با دگرسانی فلیک هستند.

با عملکرد فرایند هیدرولیز شدیدتر، دگرسانی آرژلیک متوسط و در نهایت آرژلیک پیشرفته ایجاد می‌شود. وجود مقادیر قابل توجهی کائولینیت، مونتموریونیت یا کانی‌های رسی که به طور عمده جایگزین پلاژیوکلاز می‌شوند، ویژگی دگرسانی آرژلیک متوسط است (Moyle, 1990). همانند بسیاری از سامانه‌های مس و مس - مولیدن پورفیری (برای مثال کانسار لپانتو فار جنوب شرقی در هدنکوئیست (Hedenquist et al., 1998))، در کانسار دوگان نیز دگرسانی آرژلیک پیشرفته به طور دقیق در بخش بالایی سامانه و بر روی دگرسانی‌های پتاسیک و سریستی مشاهده می‌شود؛ هر چند که رخنمون امروزی پهنه دگرسانی آرژلیک مرتبط با فعالیت گسل‌هایی با امتدادهای مختلف در این منطقه است. در این دگرسانی، به دلیل pH پایین، مقادیر قابل توجهی از Na، Ca و Mg از ساختار کانی‌های از قبل موجود حذف می‌شود (Clark et al., 2003). کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتی آلایت، اپیدوت، کلریت $\pm$ زئولیت، اسمکتیت، پرهنیت، پومپله‌ایت، اکتینولیت، کلسیت و دولومیت هستند. این مجموعه تا حد زیادی با کانی‌های مشخصه دگرگونی رخساره شیست سبز مطابقت داشته و ایزوشیمیایی است (Clark et al., 2003). پهنه‌های دگرسانی پروپیلیتی در اطراف توده‌های نفوذی معمولاً بسیار وسیع بوده و تا چندین کیلومتر گسترش دارند. در بیشتر موارد دارای منطقه‌بندی هستند؛ در بخش داخلی به شدت کلریتی و اپیدوتی شده‌اند؛ به تدریج شیمی کلریت تغییر کرده و آثار دگرسانی، دگرگونی و دیاژنتیکی بیشتر می‌شود. دگرسانی پروپیلیتی دوگان در حاشیه سامانه و از بخش‌های سطحی تا اعماق متوسط و در مجاورت دگرسانی‌های فلیک و آرژلیک گسترده شده است.

دگرسانی پتاسیک که به دلیل متاسوماتیسم پتاسیم حادث می‌شود، با حضور کانی‌های شاخص فلدسپار پتاسیم، بیوتیت، انیدریت و کانه‌های منیتیت و به مقدار کمتر سولفیدهای مس و مولیدن شناسایی می‌شود. این مجموعه کانیایی از نظر زمانی هم‌زمان با استقرار توده نیمه عمیق، در دمای بالا (۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد) و به ازای fO_2 و S بالا تشکیل می‌شوند (Gustafson and Hunt, 1975; Dilles and Einaudi, 1992; Clark et al., 2003). دگرسانی پتاسیک در دماهای بالاتر و به ازای نسبت بالاتر K^+ / H^+ تشکیل می‌شود (Guilbert and Park, 1986). دگرسانی پتاسیک در دوگان در بخش مرکزی سامانه واقع شده است و از رگه‌های فلدسپار پتاسیم فراوان در بخش‌های سطحی تا میکرودیوریت حاوی بیوتیت‌های گرمابی و فلدسپار پتاسیم فراوان در گمانه‌های عمقی متعدد تغییر می‌کند. داده‌های ژئوترموتری میان‌بارهای سیال در نمونه‌های دگرسانی پتاسیک، دمای همگن شدن فاز بخار و نمک را بیشتر از ۵۹۰ درجه سانتی گراد نشان داده است که با مقادیر به دست آمده از دیگر نهشته‌های پورفیری مطابقت دارند. مجموعه رگه‌های کانه‌زای شناسایی شده V_1 (کوارتز + فلدسپار پتاسیم + بیوتیت + منیتیت)، و V_2 (فلدسپار پتاسیم + انیدریت / ژپس + پیریت + مولیدنیت $\pm$ کالکوپیریت) نیز در طی این دگرسانی تشکیل شده‌اند. حضور منیتیت و انیدریت فراوان در این رگه‌ها، بیانگر محیط اکسیدان در زمان تشکیل این کانی‌هاست (Rowins, 2000).

دگرسانی سریستی (فلیک) معمولاً از هیدرولیز (متاسوماتیسم H^+) در حواشی سامانه به سرعت سرد شده و به ویژه در امتداد شکستگی‌ها حادث می‌شود. فلدسپارهای پتاسیک و پلاژیوکلاز هر دو به سریست $\pm$ کائولینیت تبدیل شده و پیریت فراوانی تشکیل می‌شود (Clark et al., 2003). این دگرسانی که در دوگان اغلب به شکستگی‌ها و گسل‌ها محدود شده است، کانی‌های شاخص دگرسانی پتاسیک مرحله قبل را هیدرولیز و آنها را به مجموعه کوارتز، سریست و پیریت تبدیل کرده است. دمای پایین همگن شدن فاز بخار و نمک میان‌بارهای سیال سنگ‌های متأثر از

پ) مقایسه کانسار دوگان با برخی کانسارهای پورفیری ایران و جهان

ویژگی‌های کانسار مس-مولیبدن دوگان با کانسارهای بزرگ مس-مولیبدن پورفیری ایران و جهان مقایسه شده است (جدول ۴). این مقایسه بیانگر آن است که ویژگی‌های کانی‌سازی کانسار

جدول ۴. مقایسه کانسار دوگان با کانسارهای بزرگ مس-مولیبدن پورفیری ایران و جهان

Table 4. Comparison of Dogan deposit with the major porphyry Cu-Mo deposits of Iran and the world

	Dogan	Songoun	Sarcheshmeh	Escondida, Los Pelambres (Chile)
Tectonic setting	Magmatic arc	Magmatic arc	Magmatic arc	Magmatic arc
Host intrusion	Diorite-Microdiorite	Quartz monzodiorite-Granodiorite	Trachyandesite-Granodiorite	Diorite-Dacite
Wall rock alteration	Potassic-Phylic-Prophylic-Argilic	Potassic-Phylic-Silicification	Potassic-Phylic-Silicification	Potassic-Phylic-Prophylic-Argilic
Ore textures	Stockwork	Stockwork	Stockwork	Stockwork
Comodities	Cu+Mo	Cu+Mo+Au+Ag	Cu+Mo+Au+Ag	Cu+Mo
Ore grade	-	Cu=0.75%, Mo=0.01%	Cu=0.6%, Mo=0.02%, Au=0.27 gr/t, Ag= 3.9 g/t	Cu= 95 Mt, Mo=1.4 Mt
Structural zone	North Central Iran	Urumieh- Dokhtar	Urumieh- Dokhtar	-
References	Present study	Zaravandi et al., 2005; Calagari, 1997	Zaravandi et al., 2005; Waterman and Hamilton., 1975; Aghazadeh et al., 2015	Perelló et al., 2012; Richards et al., 2001

نتیجه‌گیری

توده نیمه عمیق و میکرودیوریتی دوگان به داخل سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی ائوسن تزریق و موجب رخداد کانه‌زایی مس-مولیبدن شده است. سنگ‌های آتشفشانی شامل انواع توف، برش و آگلومرا با میان‌لایه‌هایی از ماسه سنگ و سیلتستون، کنگلومرا هستند. به نظر می‌رسد که سنگ‌های آذرین مورد بحث به دلیل عملکرد گسل‌های معکوس موازی با پهنه گسلی تروود دچار برخاستگی شده و در سطح زمین رخنمون دارند. کانه‌زایی به

صورت رگه-رگچه‌ای و دانه پراکنده بوده و از نظر کانی‌شناسی، کانسنسنگ از کانی‌های اولیه پیریت، کالکوپیریت، بورنیت و مولیبدنیت و کانی‌های ثانویه کالکوسیت، اکسید-هیدروکسیدهای آهن و مالاکیت تشکیل شده است. دگرسانی در کانسار دوگان به صورت هم‌مرکز بوده و از پتاسیک در بخش مرکزی تا دگرسانی فلیک و سپس دگرسانی وسیع پروپلیتی در حواشی سامانه تغییر می‌کند. البته شواهدی از دگرسانی آرژیلیک گسترده متأثر از عملکرد گسل‌های فعال در بخش‌های بالایی و سطحی سامانه

مولیبدن پورفیری نشان می‌دهد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

از مسئولان محترم مجموعه معدنی دوگان و شرکت توسعه منابع انرژی به دلیل مساعدت در انجام عملیات صحرایی و دسترسی به گمانه‌ها قدردانی می‌شود.

مشاهده می‌شود. ماهیت نیمه عمیق سنگ‌های میزبان (میکرودیوریت) و تشکیل آنها در کمان ماگمایی، حضور دگرسانی پتاسیک در بررسی‌های سطحی و عمقی، شوری و دمای بالای سیالات گرمایی، نوع رخداد کانه‌زایی (پراکنده و رگه-رگچه‌ای)، پتانسیل بالای مس و مولیبدن و پهنه‌بندی دگرسانی‌های موجود همگی بیانگر رخداد یک سامانه پورفیری است. به طور کلی، محدوده معدنی دوگان از نظر محیط زمین‌ساختی تشکیل، جنس سنگ میزبان، بافت و ساخت، کانی‌شناسی و پهنه‌بندی دگرسانی شباهت‌های زیادی با کانسارهای مس-

1. Toroud- Chah Shirin Magmatic Arc (TCMA)
2. Applied Conservation Macro Ecology (ACME)
3. Institut für Endlagerforschung (IELF)
4. X-Ray Diffraction
5. Heavy rare earth elements (HREE)
6. Large ion lithophile elements (LILE)
7. Lepanto Far Southeast

References

- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z. and Zhou, L., 2015. Temporal-spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology. *Ore Geology Reviews*, 70: 385–406.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.003>
- 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)
- Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorites studies. In: P. Henderson (Editor), *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 63–114.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Calagari, A.A., 1997. Geochemical, stable isotope, noble gas and fluid inclusion studies of mineralization and alteration at Sungun porphyry copper deposit, East Azarbaijan, Iran: Implications for genesis. Ph.D. Thesis, the University of Manchester, Manchester, England, 550 pp. Retrieved April 26, 2023 from <https://www.proquest.com/openview/c4af0175edfcd6c68aa05f548baef45>
- Clark, D.A., Geuna, S. and Schmidt, P.W., 2003. Predictive magnetic exploration models for porphyry, epithermal and iron oxide copper-gold deposits: Implications for exploration. *AMIRA Exploration and Mining Report 1073R*, 398 pp.
- Dilles, J.H. and Einaudi, M.T., 1992. Wall-rock alteration and hydrothermal flow paths about the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada; a 6-km vertical reconstruction. *Economic Geology*, 87(8): 1963–2001.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.8.1963>
- Guilbert, J.M. and Park, C.F., 1986. *The Geology of Ore Deposits*. Freeman, New York, 650 pp.
- Gustafson, L.B. and Hunt, J.P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 70(5): 857–912.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.5.857>
- 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>
- Houshmandzadeh, A.R., Alavi Naini, M. and Haghipour, A.A., 1978. Evolution of geological phenomenon in Torud area. Geological Survey of Iran, Tehran, Report 5H, 136 pp. (in Persian)
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548.
<https://doi.org/10.1139/e71-055>
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H. and Vikre, P.G., 2010. Porphyry copper deposit model. Chapter B of Mineral deposit models for resource assessment. US Geological Survey, Reston, VA, Scientific Investigations Report 2010-5070-B, 169 pp. <https://doi.org/10.3133/sir20105070B>
- Lang, J.R. and Titley, S.R., 1998. Isotopic and geochemical characteristics of Laramide magmatic systems in Arizona and implications for the genesis of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 93(2): 138–170.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.2.138>
- Martin, H., 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429.
[https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00076-0)
- 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>
- Moyle, A.J., 1990. Ladolam gold deposit, Lihir island. In: F.E. Hughes (Editor), *Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea*. Melbourne, Australian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 1793–1805.
- Pearce, J.A., 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: C.J. Hawkesworth and M.J. Norry (Editors), *Continental basalts and mantle xenoliths*, Nantwich, Cheshire: Shiva Publications, pp. 230–249. Retrieved Jun 04, 2017 from <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/8626>
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.
<https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Perelló, J., Sillitoe, R.H., Mpodozis, C., Brockway, H. and Posso, H., 2012. Geologic setting and evolution of the porphyry copper-molybdenum

- and copper-gold deposits at Los Pelambres, central Chile. In: J.F. Hedenquist, M. Harris and F. Camus (Editors), *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe*. Geo Science world, Tysons Galleria, 79–104. Retrieved January 01, 2012 from <https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/books/book/1385/chapter-abstract/107046729/Geologic-Setting-and-Evolution-of-the-Porphyry?redirectedFrom=fulltext>
- Richards, J.P., Boyce, A.J. and Pringle, M.S., 2001. Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: A model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization. *Economic Geology*, 96(2): 271–305. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.2.271>
- 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>
- Rowins, S.M., 2000. Reduced porphyry copper-gold deposits: A new variation on an old theme. *Geology*, 28(6): 491–494. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<491:RPCDAN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<491:RPCDAN>2.0.CO;2)
- Rudnick, R.L. and Gao, S. 2003. Composition of the Continental Crust. In: H.D. Holland and K.K. Turekian, (Editors), *Treatise on Geochemistry*, V. 3, The Crust, Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 1–64. <http://dx.doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>
- Sheibi, M. and Mousivand, F., 2018. Petrology, geochemistry and magnetic susceptibility of Chah-Musa pluton- host of Cu mineralization- (NW Toroud, South Shahrood) with special reference to the mineralization. Middle East Mines & Mineral Industries Development Holding Company of Iran, Tehran, unpublished Report 1, 200 pp. (in Persian)
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Sun, W., Huang, R., Li, H., Hu, Y., Zhang, C., Sun, S., Zhang, L., Ding, X., Li, C., Zartman, R.E. and Ling, M., 2015. Porphyry deposits and oxidized magmas. *Ore Geology Reviews*, 65(part 1): 97–131. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.004>
- Tadayon, M. and Rashid Katal, R.K., 2020. Structural analysis of the Dogan copper mine area, north Toroud fault zone (Central Iran). *Journal of Tectonics*, 4(13): 87–111. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22077/jt.2021.1603>
- Tale Fazel, E., Mehrabi, B. and GhasemiSiani, 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>
- Warr, L.N., 2021. IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85(3): 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Waterman, G. C. and Hamilton, R.L., 1975. The Sar Cheshmeh porphyry copper deposit. *Economic Geology*, 70(3): 568–576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.3.568>
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. Unwin Hyman, London, 466 pp. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6788-4>
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- Zarasvandi, A., Liaghat, S. and Zentilli, M., 2005. Geology of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad porphyry copper deposits, central Iran. *International Geology Review*, 47(6): 620–646. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.47.6.620>