



## Magnetite chemistry in the Dalli porphyry Cu-Au deposit, central Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA)

Alireza Zarasvandi <sup>1\*</sup> , Mohsen Rezaei <sup>2</sup> , Shima Azizi <sup>3</sup> , Mansour Adelpour <sup>4</sup> , Adel Saki <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>3</sup> M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>4</sup> Ph.D., Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>5</sup> Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article History

Received: 15 July 2022  
 Revised: 05 November 2022  
 Accepted: 09 November 2022

#### Keywords

Magnetite chemistry  
 hydrothermal evolution  
 Dalli porphyry  
 Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc  
 (UDMA)

#### \*Corresponding author

Alireza Zarasvandi  
[zarasvandi\\_a@scu.ac.ir](mailto:zarasvandi_a@scu.ac.ir)

### ABSTRACT

The Dalli porphyry Cu-Au deposit is located in the central parts of Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA). This deposit is formed via the emplacing of Miocene intrusions mainly containing diorite and quartz diorite within the Eocene andesite and porphyritic basaltic andesite units. Main alterations in this region include potassic, propylitic and to a lesser extent phyllic. In this study, magnetite chemistry in the potassic alteration zone is investigated. The results of EMPA show that magnetites of this Au-rich porphyry system are characterized by enrichment in Ti, Al, V, Mg, and Mn values. Also, the magnetites formed via the hydrothermal processes. Evidences such as magnetite martitization and exsolution of ilmenite lamellae imply for magnetite crystallization in high oxygen fugacity conditions. Moreover, based on the Al + Mn vs. Ti + V diagram studied magnetites follow the trend of temperature decreasing which could be considered as an important factor in increasing the potentials of sulfide mineralization thorough the hydrothermal system evolution. Compared with Daralou and Regan porphyry systems, the Dalli magnetites contain higher concentrations of Ni, Mn, Cr, and Co presenting an exploration key for discovering the Au-rich porphyry deposits.

### How to cite this article

Zarasvandi, A., Rezaei, M., Azizi, S., Adelpour, M. and Saki, A., 2023. Magnetite chemistry in the Dalli porphyry Cu-Au deposit, central Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA). *Journal of Economic Geology*, 15(1): 1–25. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2023.77655.1049>



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Porphyry copper deposits (PCDs) are related to the shallowly emplaced (5-10 km) oxidized magmatic systems in the subduction, syn-collisional, as well as post-collisional tectonic settings (Richards, 2011). They supply most of the world's Cu and Mo resources; ~80 % Cu and ~95 % Mo (Sun et al., 2015). In Iran, widespread occurrence of porphyry copper deposits has been discovered and mined in the Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA; Richards, 2015). These deposits are related to the evolution of the Neo-Tethys ocean starting with subduction in late Cretaceous to middle Miocene and subsequent prevailing the syn- to post-collisional tectonic regimes during the Neogene (Richards, 2015; Zarasvandi et al., 2018). Most of the porphyry bearing intrusions of UDMA exhibiting a spectrum of mineralization from weakly to highly mineralized systems were emplaced during the Miocene (e.g., Sarcheshmeh, Meiduk, and Dalli). Recent studies concerning on the source of mineralized porphyry granitoids in the UDMA (e.g., Asadi, 2018) specified a model comprising the partial melting of subduction-modified thickened mafic juvenile lower crustal rocks responsible to generation of adakite-like-hydrous, relatively oxidized magmas (Sun et al., 2015) with the high potential to form porphyry Cu ± Mo ± Au systems.

During the last decade, magnetite geochemistry has been the focus of several studies trying to constrain the physicochemical attributes of igneous and hydrothermal ore systems (e.g., Dare et al. 2014). Magnetite can form under various conditions having the capability of fixing various minor and trace elements (e.g., Co, Cr, V, Ti, Mn, Mg, and Al) in its spinel structure (Nadoll et al., 2015). This makes magnetite able to record many environmental variables which are very important in mineralization potential of porphyry Cu-systems (e.g., oxygen fugacity, temperature, and ratios of fluid-rock interaction). Although the Dalli porphyry Cu-Au deposit has been the subject of many studies mainly focusing on the magmatic evolution, fluid inclusion, silicate (plagioclase, biotite, and amphibole) and sulfide (pyrite and chalcocopyrite) chemistry (Ayati et al., 2013; Zarasvandi et al., 2015a; Zarasvandi et al., 2018; Zarasvandi et al., 2019c); none focused on the oxide minerals (magnetite composition). The present

work reports petrographic and chemical data of magnetite and tries to constrain the factors controlling the formation of Dalli deposit.

### Material and Methods

Sampling was carried out on drill cores and special care was undertaken to select the samples showing no obvious overprint of low temperature alteration. Polished thin sections were prepared from 1-2 cm sized blocks for microscopy and electron probe microanalyzer (EPMA) studies. Wavelength-dispersive (WDS) EPMA analyses of oxides were conducted at the Chair of Resource Mineralogy, Montanuniversität Leoben, Austria using the Jeol JXA 8200 instrument and the following analytical conditions: 15 kV accelerating voltage, 10 nA beam current and beam size to spot mode (of about 1µm). K lines were used for Mn, Fe, Ti, Mg, Al, Cr, and V. The counting times for element peaks and background (upper and lower) were 100 s and 20 s, respectively. The lower limit of detection for these elements (single standard deviation) as calculated by the integrated Jeol software.

### Results

In the Dalli porphyry Cu-Au deposit, hypogene mineralization mostly includes pyrite, chalcocopyrite, and magnetite with minor chalcocite and bornite. Ore minerals occur as aggregates, in veinlets or disseminations within the potassic alteration, and to a lesser extent in the phyllic alteration zones. In the all analyzed samples, the values of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MnO were upper than detection limit. Conformably, detectable values were mainly obtained for TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MgO. On the contrary NiO, SiO<sub>2</sub>, CuO were mainly below the detection limit. The FeO content (wt. %) in the analyzed magnetites varies between 91.01 to 98.57 (average; 97.01), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> between 0.063 -5.07 wt. % (average 0.62 wt. %), and the lowest and highest values of V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> are 0.02 and 0.34 (wt. %), respectively. The average of MnO and MgO in the analyzed samples is 0.25 and 0.07 (wt. %), respectively. Additionally, the TiO<sub>2</sub> content varies between 0.01 and 2.45 (wt. %); averaging 0.34 (wt. %).

### Discussion

On the Ti (ppm) vs. V (ppm) discrimination diagram, most of the analyzed magnetites extended to the field of hydrothermal field providing insight into the

formation of magnetite owing to the exsolving of hydrothermal fluids through the potassic alteration. Comparison of the magnetite composition in the Dalli deposit with other PCDs in the UDMA implies that there are higher average contents (wt. %) of Mn, Fe, Mg, and Cr compared with Daralou (an example of pre-collisional porphyry intrusion) and Keder porphyry systems (an example of weakly mineralized collisional porphyry deposit). These features may highlight the importance of magnetite composition in establishing the discrimination diagrams of Au-rich porphyry Cu-deposits using magnetite composition. The documented oxy-exsolution of ilmenite as well as hematite intergrown with magnetite in the Dalli samples are the indicative of high  $fO_2$  in the potassic alteration stage. Under such highly oxidized conditions sulfur is present as oxidized species (such as  $SO_4^{2-}$ ) rather than as reduced species (such as  $S^{2-}$ ) preventing the extensive sulfide deposition in magmatic and early stages of potassic alteration (Zarasvandi et al., 2022).

This process could enhance the mineralization potential of the system by preserving the sulfur content, especially before the main mineralization stages. Besides optimum tectonomagmatic conditions, the physicochemical attributes of potassic alteration may also have a decisive role in predicting the mineralization potential of porphyry systems (Zarasvandi et al., 2018). Because bulk sulfide mineralization occurs at the end of potassic alteration (Richards, 2011). Prevailing of the high temperatures in potassic alteration could prevent the disproportion  $SO_2$  to  $H_2S$  which is necessary for sulfide precipitation (Richards et al., 2017; Zarasvandi et al., 2018). Conformably, the inability of hydrothermal systems for cooling could be linked to the low mineralization degree of the porphyry deposits. Based on the Al + Mn vs. Ti + V diagram (Zhao et al., 2018), samples of Dalli deposit follow the trend of temperature decreasing which indicate the desirable conditions for enhancing the sulfide mineralization in the Dalli porphyry Cu-Au deposit.



## شیمی مگنتیت در کانسار مس - طلای پورفیری دالی، بخش مرکزی کمان ماگمایی ارومیه - دختر

علیرضا زراسوندی<sup>۱\*</sup>، محسن رضایی<sup>۲</sup>، شیما عزیزی<sup>۳</sup>، منصور عادل پور<sup>۴</sup>، عادل ساکی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
<sup>۴</sup> دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
<sup>۵</sup> دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
کانسار مس - طلای پورفیری دالی در بخش مرکزی کمر بند ماگمایی ارومیه - دختر قرار دارد. این کانسار در اثر نفوذ توده‌هایی با ترکیب غالب دیوریت و کوارتز دیوریت به سن میوسن در واحدهای آتشفشانی با ترکیب آندزیت تا آندزیت بازالت پورفیری اتوسن تشکیل شده است. دگرسانی‌های اصلی در این منطقه شامل دگرسانی پتاسیک، پروپلیتیک و به طور محلی فیلیک است. در این پژوهش شیمی کانه مگنتیت در زون دگرسانی پتاسیک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تجزیه ریز کائوئند الکترونی از بلورهای مگنتیت نشان‌دهنده مقادیر بالای عناصر Ti، Al، V، Mg و Mn در این سامانه پورفیری غنی از طلاست. بر اساس نتایج حاصل از این آنالیز، خاستگاه مگنتیت را می‌توان گرمابی در نظر گرفت. شواهدی همانند مگنتیت‌های مارتیتی شده و رخداد اکسولوشن تیغه‌های ایلمنیت در مگنتیت، نشان‌دهنده تبلور مگنتیت‌های کانسار دالی طی شرایط فوگاسیته اکسیژن بالاست. همچنین، بر اساس نمودار Al + Mn در مقابل Ti + V، مگنتیت‌های متبلور شده طی دگرسانی پتاسیک از روند افت دمایی پیروی می‌کنند که از عوامل مهم در ارتقای کانه‌زایی سولفیدی در خلال تکامل سامانه گرمابی این کانسار محسوب می‌شود. نتایج نشان‌داد، در مقایسه با سامانه‌های مس پورفیری در آلو و کدر مقادیر Ni، Mn، Cr و Co، دارای بیشترین فراوانی در مگنتیت‌های کانسار پورفیری مس - طلای دالی هستند که این ویژگی می‌تواند به عنوان کلیدی اکتشافی برای شناسایی ذخایر مس پورفیری غنی از طلا قلمداد شود.	<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸</p> <p><b>واژه‌های کلیدی</b></p> <p>شیمی مگنتیت تکامل سامانه گرمابی کانسار پورفیری کمان ماگمایی ارومیه - دختر</p> <p><b>نویسنده مسئول</b></p> <p>علیرضا زراسوندی zarasvandi_a@scu.ac.ir ✉</p>

## استناد به این مقاله

زراسوندی، علیرضا؛ رضایی، محسن؛ عزیزی، شیما؛ عادل پور، منصور و ساکی، عادل. ۱۴۰۲. شیمی مگنتیت در کانسار مس - طلای پورفیری دالی، بخش مرکزی کمان ماگمایی ارومیه - دختر. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۵(۱): ۱-۲۵. <https://doi.org/10.22067/econg.2023.77655.1049>

## مقدمه

کانسارهای مس پورفیری در ارتباط با جای گیری کم عمق (۵ تا ۱۰ کیلومتر) سامانه‌های ماگمایی اکسیدان در موقعیت‌های زمین‌ساختی فرورانشی، هم‌زمان با برخورد و یا پس از برخورد هستند (Richards, 2011). مگنتیت ( $Fe_3O_4$ ) یک کانه اکسیدی با کاربردهای گسترده در پژوهش‌های متالورژیک و اکتشافات معدنی، به ویژه برای کانسارهای ماگمایی - گرمایی از جمله کانسارهای مس پورفیری و اسکارن است (Tian et al., 2021). در سال‌های اخیر، شیمی مگنتیت به طور فزاینده‌ای در بررسی‌های مربوط به کانسارهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Liu et al., 2022). مگنتیت می‌تواند میزبان طیف گسترده‌ای از عناصر، از جمله Ca, Al, Mg, Mn, Cu, Zn, Ti, Cr, V, Ni و Cr باشد (Deditius et al., 2018). ترکیبات عناصر یاد شده در مگنتیت می‌تواند شرایط دمایی، فوگاسیته اکسیژن ( $fO_2$ )، نرخ واکنش سیال/سنگ، رخداد فرایند تبلور مجدد، فوگاسیته گوگرد ( $fS_2$ ) و تغییرات ترکیب سیال ماگمایی - گرمایی در زمان تشکیل مگنتیت را نشان دهد (Sun et al., 2019). بررسی شیمی کانه مگنتیت توسط ریز کاونده الکترونی<sup>۱</sup> از جمله روش‌های دقیقی است که در شناسایی خاص‌نگاه و تفسیر شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کانسارها استفاده می‌شود (Darbani et al., 2020). رخنمون گسترده‌ای از ذخایر مس پورفیری در طول کمان ماگمایی ارومیه - دختر گزارش شده است (Richards, 2015). شکل‌گیری این ذخایر در ارتباط با تکامل نئوتتیس است (Zarasvandi et al., 2018). پژوهش‌های اخیر بر روی منشأ گرانتیوئیدهای مولد کانه‌زایی مس پورفیری در طول کمربند ارومیه - دختر نشان می‌دهد، ماگماهای آداکتی اکسیدان و غنی از آب دارای پتانسیل قابل توجه کانه‌زایی مس پورفیری این کمربند، از ذوب‌بخشی پوسته پایینی مافیک جوان شده که بر اثر مواد فرورانشی تغییر یافته منشأ گرفته است (Asadi, 2018; Zarasvandi et al., 2019a). کانسار مس - طلای پورفیری

دالی، واقع در بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه - دختر، با میزان عیار ۰/۷۵ گرم بر تن طلا و ۰/۵ درصد مس و همچنین میزان ذخیره ۸ میلیون تن، به عنوان اولین کانسار شناخته شده مس پورفیری غنی از طلای ایران شناخته شده است (Zarasvandi et al., 2015a). تاکنون این کانسار از جنبه‌های مختلفی نظیر بررسی سیالات درگیر و تکامل سامانه گرمایی، پتروژنز توده‌های نفوذی میزبان، شیمی سیلیکات‌ها (پلاژیو کلاز، بیوتیت و آمفیبول) و شیمی سولفیدها (پیریت و کالکوپیریت) مورد ارزیابی قرار گرفته است (Ayati et al., 2013; Zarasvandi et al., 2015a; Zarasvandi et al., 2018, Zarasvandi et al., 2019c). با این وجود اطلاعاتی در خصوص شیمی کانه‌های اکسیدی (مگنتیت) این کانسار وجود ندارد. با توجه به اهمیت و جایگاه ویژه شیمی مگنتیت در بررسی سامانه‌های ماگمایی - گرمایی مرتبط با کانسارهای مس - طلای پورفیری، این پژوهش به بررسی رخداد و شیمی مگنتیت و ارتباط آن با تکامل سامانه گرمایی کانسار مس - طلای پورفیری دالی می‌پردازد. از طرفی با توجه به طبیعت غنی از طلای این سامانه مس پورفیری، اطلاعات ارائه شده در خصوص شیمی مگنتیت این کانسار، می‌تواند در اکتشاف بهینه کانسارهای مس پورفیری غنی از طلا حائز اهمیت باشد. نتایج حاصل از این پژوهش با داده‌های مگنتیت دگرسانی پتاسیک کانسار مس پورفیری برخورداری (پورفیری کدر) و کانسار پیش از برخورد (پورفیری درآلو) که در کمان ماگمایی ارومیه - دختر واقع شده‌اند، مقایسه شده است. کانسار مس پورفیری درآلو در ۱۳۰ کیلومتری جنوب استان کرمان و در زون متالورژنی دهج - ساردوئیه واقع شده است. رخنمون‌های سنگی منطقه مورد بررسی، متشکل از یک توده نفوذی گرانودیوریت پورفیری با سن الیگومیوسن است که در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن با ترکیب غالب آندزیت، داسیت و پیروکلاستیک نفوذ کرده است. در این کانسار، کانه‌زایی مس درون توده‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی اسیدی (داسیت) واقع شده است (Hasanzadeh et

(al., 2021). کانسار مس پورفیری کدر در ۱۴ کیلومتری جنوب غرب دهج در شمال شرق کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان واقع شده و در ارتباط با نفوذی‌های دیوریت تا کوارتز دیوریت است. در این کانسار کانه‌زایی به صورت رگچه‌ای در سنگ میزبان پورفیری رخ داده است (Heydari et al., 2018).

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش شیمی کانه مگنتیت نمونه‌های پهنه دگرسانی پتاسیک در کانسار مس - طلای پورفیری دالی و مقایسه آن با سایر کانسارهای مس پورفیری کمر بند ماگمایی ارومیه - دختر انجام شده است. برای انتخاب نمونه‌های شاخص برای آنالیز، کانه‌نگاری نمونه‌ها همراه با بررسی طیف EDX و تصویرهای میکروسکوپ الکترونی BSE برای تعیین دقیق ادخال‌ها و کانی‌های همراه مگنتیت، جدایش تیغه‌های ایلمنیت و نمونه‌های دارای اکسایش پیش‌رونده (مارتیتی شده) انجام شد. کلیه نمونه‌ها در آزمایشگاه EMPA دانشگاه مونتان یونیورسیتات لئوبن<sup>۲</sup> کشور اتریش تهیه شدند و مورد آنالیز قرار گرفتند. دستگاه مورد استفاده مدل Jeol JXA 8200 است. آنالیزها طی ولتاژ ۱۵ KV، جریان با آمپر ۱۰ nA و با قطر باریکه الکترونی ۱ میکرومتر انجام شد. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، قبل از انجام آنالیز کلیه نمونه‌ها تحت پوشش کربنی قرار گرفتند. در طول انجام آنالیز، زمان خوانش دستگاه برای پیک و پس‌زمینه به ترتیب ۱۰۰ و ۲۰ ثانیه بوده است. حد تشخیص (به صورت درصد وزنی) توسط نرم‌افزار Integrated Jeol Software درونی دستگاه محاسبه و شامل ۰/۰۱ برای آلومینیم، ۰/۰۲۴ برای کروم، ۰/۰۲۳ برای آهن و منگنز، ۰/۰۱۲ برای منیزیم، ۰/۰۱۹ برای تیتانیم و ۰/۰۲۷ برای وانادیم است. علاوه بر این، همین دستگاه برای تهیه نقشه عنصری با استفاده از روش طیف‌سنجی پراکندگی طول موج<sup>۳</sup> مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور، پس از انتخاب کانه‌های مگنتیت و ورود مختصات چهار گوش کانه مگنتیت به دستگاه، نقشه برداری

عنصری طی ۱۲ ساعت کارکرد دستگاه ریز کاوند الکترونی در طول شب انجام شد. نتایج مربوط به کانه‌های آنالیز شده در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول نقاط آنالیزی ۱۶، ۱۷ و ۲۰ مربوط به نواحی نزدیک به اکسولوشن فازهای ایلمنیتی است. علاوه بر این، برای مقایسه نتایج با سایر سامانه‌های مس پورفیری، داده‌های مگنتیت متعلق به دگرسانی پتاسیک سایر کانسار مس پورفیری برخورداری (پورفیری کدر) و کانسار پیش از برخورد (پورفیری در آلو) زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2019b) مورد استفاده قرار گرفت.

## زمین‌شناسی منطقه

از دیدگاه زمین‌شناسی، پهنه کوه‌زایی آلپ - هیمالیا از پهنه‌های کلاسیک برای رخداد ذخایر پورفیری به‌شمار می‌رود (Hou et al., 2011). کمر بند ماگمایی ارومیه - دختر بخشی از این پهنه کوه‌زایی است و بر اساس رخداد ذخایر مس پورفیری از شمال غربی به جنوب شرقی، به سه بخش قابل تقسیم است (Zarasvandi et al., 2005). کانسار مس - طلای پورفیری دالی در موقعیت جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی در جنوب شرق استان مرکزی در بخش مرکزی کمر بند ماگمایی ارومیه - دختر واقع شده است (شکل ۱- A). بر اساس بررسی‌های سنگ‌زایی و ساختاری، در پی عملکرد گسل‌های منطقه، سنگ‌های آذرین با ترکیب حدواسط در بازه زمانی نئوژن در سنگ‌های رسوبی قدیمی تر نفوذ کرده‌اند (Nadri et al., 2010; Monsef, 2011). سنگ‌های آتشفشانی و نیمه آتشفشانی نئوژن در دو مرحله ماگمایی ایجاد شده است. مرحله اول فوران‌های پس از برخورد با سن میوسن میانی تا بالایی بوده است. سنگ‌های این مرحله شامل گدازه‌ها و آذرآواری‌ها با ترکیب آندزیت تا آندزیت‌بازالت است. فاز دوم با فوران‌های آندزیتی - داسیتی مشخص می‌شود و نشان‌دهنده اسیدی‌تر شدن فعالیت‌های ماگمایی منطقه است و دارای نشانه‌های آواری مانند گسترش دهانه آتشفشانی کوه خستک است (Monsef, 2011).

جدول ۱. نتایج تجزیه EMPA مگنتیت‌های زون دگرسانی پتاسیک کانسار دالی (بر حسب درصد وزنی)

Table 1. EMPA results (wt. %) of magnetite analysis from the potassic alteration zone of Dalli deposit

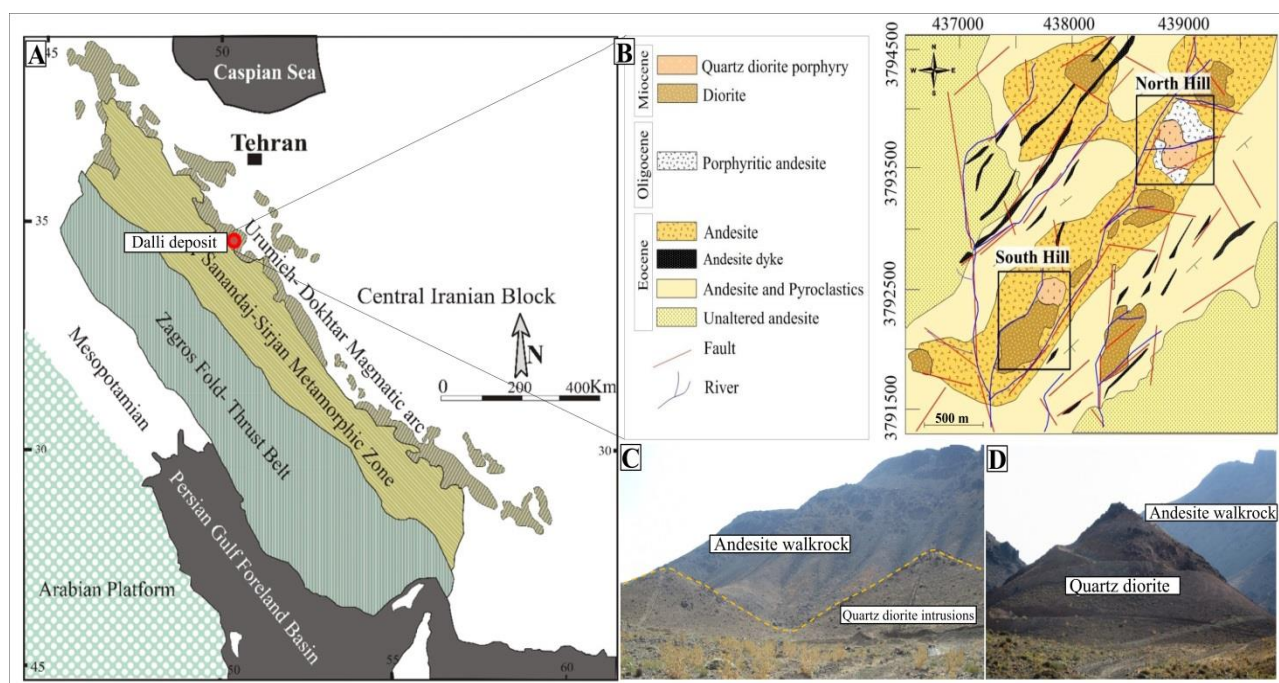
Point No.	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	NiO	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	ZnO	CoO	Total
9	0.062	0.193	0.171	97.38	0.094	0.391	n.d.	0.245	0.02	n.d.	n.d.	98.556
10	0.073	0.562	0.174	96.919	0.033	0.389	0.019	0.279	n.d.	n.d.	0.029	98.477
11	0.061	0.513	0.28	97.444	0.027	0.394	n.d.	0.266	n.d.	0.025	n.d.	99.01
12	n.d.	0.77	0.375	97.702	0.038	0.371	n.d.	0.179	0.134	n.d.	0.074	99.643
13	0.034	0.248	0.133	97.997	0.067	0.38	n.d.	0.204	0.029	0.033	0.017	99.142
14	0.014	0.422	0.122	98.277	0.099	0.263	n.d.	0.24	n.d.	n.d.	0.011	99.448
15	n.d.	0.516	0.242	98.579	0.046	0.176	n.d.	0.279	n.d.	n.d.	n.d.	99.838
16*	0.079	2.85	2.455	92.728	0.062	0.244	n.d.	0.216	n.d.	0.424	n.d.	99.058
17*	0.298	5.083	2.272	91.008	0.112	0.266	n.d.	0.229	n.d.	1.373	n.d.	100.641
18	n.d.	0.291	0.207	97.467	0.042	0.215	n.d.	0.272	0.083	n.d.	n.d.	98.577
19	n.d.	0.693	0.392	97.976	0.055	0.146	n.d.	0.282	n.d.	0.141	n.d.	99.685
20*	0.096	1.06	2.07	95.352	0.108	0.158	0.008	0.288	n.d.	0.139	n.d.	99.279
21	0.106	1.875	0.341	96.717	0.05	0.17	n.d.	0.248	n.d.	0.054	n.d.	99.561
22	0.113	0.463	0.262	97.757	0.067	0.387	n.d.	0.337	n.d.	n.d.	n.d.	99.386
23	0.144	0.612	0.358	96.898	0.08	0.347	n.d.	0.273	n.d.	0.061	0.008	98.781
24	0.089	0.262	0.213	97.693	0.085	0.204	n.d.	0.224	0.044	0.048	n.d.	98.862
25	0.085	1.303	0.895	95.391	0.046	0.171	n.d.	0.2	n.d.	0.182	n.d.	98.273
26	0.11	0.433	0.179	96.841	0.02	0.346	n.d.	0.181	0.006	0.019	0.017	98.152
117	0.011	0.351	0.041	98.023	0.004	0.113	n.d.	0.093	n.d.	0.097	0.02	98.753
118	0.003	0.302	0.075	98.132	0.023	0.001	n.d.	0.186	n.d.	0.043	0.025	98.79
119	0.003	0.06	0.018	94.293	n.d.	0.057	n.d.	0.02	0.031	n.d.	n.d.	94.482
120	n.d.	0.237	0.068	98.009	0.063	0.032	n.d.	0.129	n.d.	n.d.	0.013	98.551
121	0.008	0.304	n.d.	97.208	0.05	0.084	n.d.	0.147	n.d.	n.d.	n.d.	97.801
122	0.027	0.191	0.037	97.192	0.05	0.091	n.d.	0.199	n.d.	n.d.	0.008	97.795
123	0.035	0.31	0.013	98.368	n.d.	0.084	n.d.	0.161	n.d.	0.002	n.d.	98.973
124	0.025	0.214	0.015	98.523	n.d.	0.083	n.d.	0.129	n.d.	0.091	n.d.	99.08
125	0.012	0.48	0.049	97.491	0.077	0.144	n.d.	0.136	n.d.	n.d.	n.d.	98.389
126	0.054	0.28	n.d.	97.922	0.062	0.11	n.d.	0.097	0.08	n.d.	n.d.	98.605
127	0.25	0.193	0.024	97.846	0.041	0.664	n.d.	0.276	n.d.	n.d.	0.031	99.325
128	0.253	0.224	0.039	96.221	0.025	0.596	0.054	0.242	n.d.	n.d.	0.064	97.718
129	0.176	0.611	0.197	97.074	0.056	0.196	n.d.	0.199	n.d.	0.083	0.058	98.65
130	0.127	0.273	0.033	97.534	0.039	0.378	n.d.	0.258	n.d.	n.d.	n.d.	98.642
131	0.13	0.21	0.081	96.498	0.054	0.431	n.d.	0.147	0.047	0.049	0.011	97.658
132	0.201	0.184	0.076	97.533	0.041	0.633	n.d.	0.206	n.d.	n.d.	0.014	98.888
133	0.205	0.531	0.198	96.907	0.047	0.387	0.042	0.186	n.d.	0.031	0.034	98.568
134	0.032	0.197	0.084	97.828	0.032	0.08	n.d.	0.235	n.d.	0.042	n.d.	98.53
135	0.021	0.317	0.048	96.581	0.079	0.103	n.d.	0.195	n.d.	n.d.	0.017	97.361
136	n.d.	0.161	0.062	96.953	0.05	0.139	n.d.	0.237	n.d.	n.d.	n.d.	97.602

n.d. = Not detected

\* Analyzing point near Ti-phase exsolution

کوارتز دیوریتی هستند (شکل ۱- B) که در امتداد روند خطی شمال شرقی جای گیر شده‌اند (Zarasvandi et al., 2015b). بر اساس سن سنجی  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ، جای گیری این توده‌ها حدود ۲۱ میلیون سال قبل رخ داده است (Ayati et al., 2013). به طور کلی، توده‌های نفوذی مولد کانه‌زایی در محدوده دالی در دو بخش مجزای شمالی و جنوبی جای گیر شده‌اند که به ترتیب تحت عنوان استوک‌های شمالی و جنوبی نامیده می‌شوند (شکل ۱- C و D).

نهبشته‌های کنگلومرای و رسوب‌های آواری- تبخیری سازند قرمز زیرین، رسوب‌های دریایی سازند قم و رسوب‌های تبخیری- قاره‌ای سازند قرمز بالایی، رسوب‌های الیگومیوسن منطقه و جوان‌ترین رسوب‌های آبرفتی کواترنری، بخش بزرگی از منطقه را در بر گرفته‌اند. نمای کلی کانسار، نشان‌دهنده دهانه آتشفشانی با ترکیب آندزیت تا آندزیت‌بازالت است که استوک‌های حدواسط گرانیتوئیدی به درون آنها نفوذ کرده‌اند. نفوذی‌های مرتبط با کانه‌زایی در این محدوده اغلب شامل استوک‌های دیوریتی و



شکل ۱. A: موقعیت کانسار مس- طلای پورفیری دالی بر روی کمان ماگمایی ارومیه- دختر (Alavi, 2007); B: نقشه زمین‌شناسی کانسار دالی (Zarasvandi et al., 2015a); C: نفوذ استوک‌های کوارتز دیوریتی درون آندزیت‌های ائوسن در بخش شمالی کانسار دالی و D: استوک دیوریتی- کوارتز دیوریتی در بخش جنوبی کانسار دالی

**Fig. 1.** A: Location of Dalli porphyry Cu-Au deposit in Urumieh– Dokhtar Magmatic Arc (Alavi, 2007), B: Geological map of Dalli deposit (Zarasvandi et al., 2015a), C: Quartz diorite stocks emplaced within Eocene andesites in the northern part of Dali deposit, and D: Diorite-quartz diorite stock in the southern part of Dalli deposit

تمامی واحدهای نفوذی این محدوده درون آندزیت‌بازالت‌های ائوسن و پیروکلاستیک‌های با ترکیب غالب آندزیت و ریوداسیت

در هر دو بخش شمالی و جنوبی، توده‌های نفوذی با ترکیب دیوریت، کوارتز دیوریت، تونالیت و گرانودیوریت دیده می‌شوند.

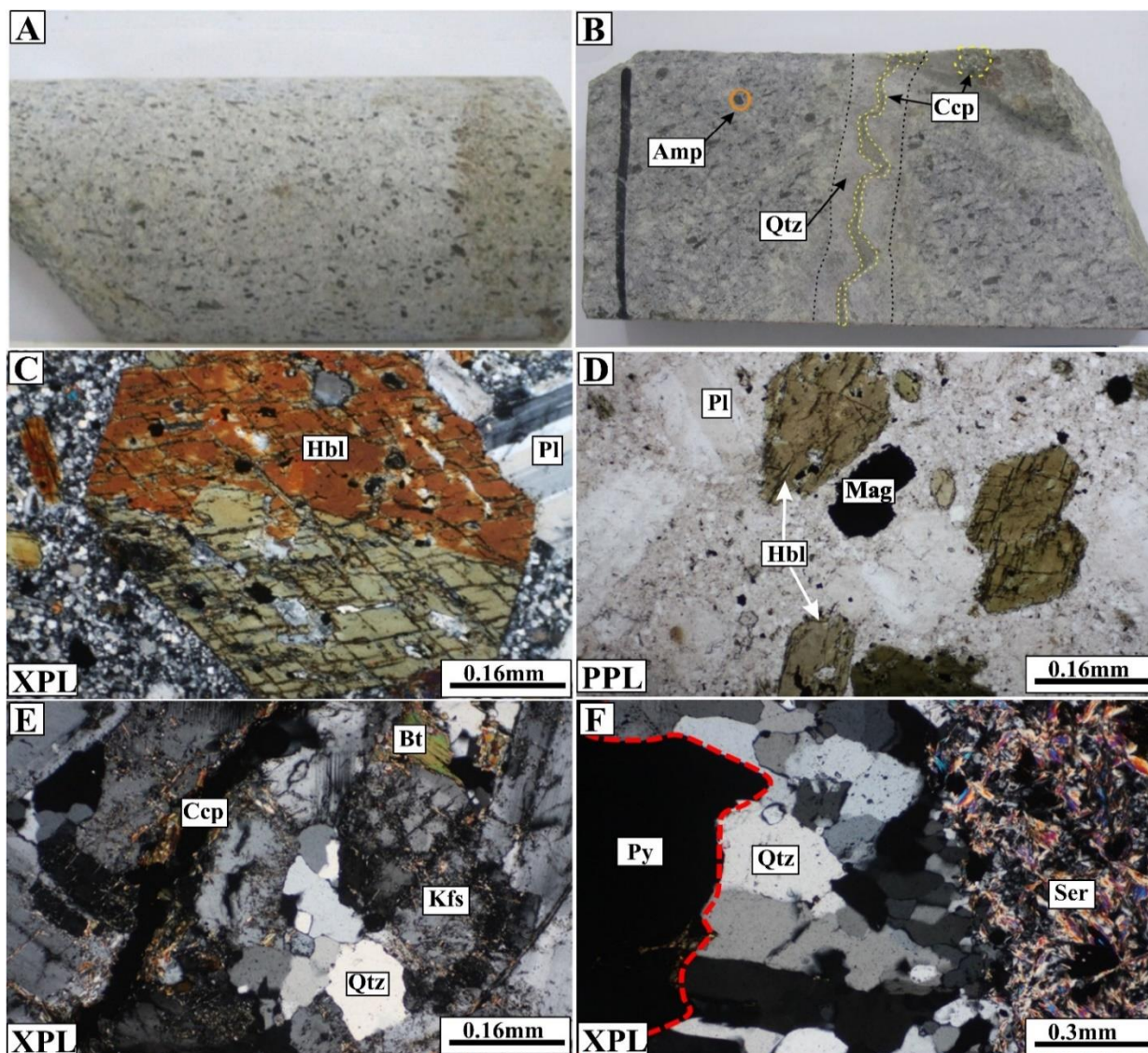


جای گیر شده‌اند. استوک جنوبی در محدوده‌ای به ابعاد  $180 \times 190$  متر رخنمون دارد و اغلب شامل واحدهای نفوذی دیوریتی و کوارتز دیوریتی است (شکل ۲-۲A). بخش شمالی این کانسار دارای استوک‌هایی با ترکیب تونالیت و هورنبلند کوارتز دیوریت است که در محدوده‌ای به ابعاد  $400 \times 250$  متر گسترش یافته است. کانه‌های فلزی بیشتر پیریت و کالکوپیریت به همراه مقادیر کمتری بورنیت و مگنتیت، به صورت پراکنده و رگچه، دیده می‌شوند (شکل ۲-۲B). در این کانسار، دگرسانی پتاسیک به خوبی در استوک‌های کوارتز دیوریتی بخش شمالی و جنوبی و نیز آندزیت‌های پورفیری احاطه‌کننده استوک شمالی توسعه یافته است. دگرسانی در این کانسار اغلب شامل پتاسیک در بخش مرکزی و پروپلیتیک در بخش سنگ دیواره آندزیتی است و آثار دگرسانی سریستی و آرژیلیک، بسیار نادر و جزئی است (Saremi, 2014).

### سنگ‌نگاری

بر اساس مشاهدات صحرایی و بررسی‌های سنگ‌نگاری، مجموعه سنگ‌های این منطقه به طور عمده از گدازه‌های آندزیتی و آندزیت‌بازالت با سن ائوسن و دیوریت و کوارتز دیوریت آمفیبول‌دار با سن ۲۱ میلیون سال، به صورت آتشفشانی و نیمه‌آتشفشانی و همچنین رسوبات و واریزه‌های عهد حاضر تشکیل شده است. بر مبنای بررسی‌های سنگ‌نگاری، ترکیب کانی‌شناسی واحدهای نفوذی شمالی و جنوبی کانسار تقریباً یکسان است. می‌توان گفت واحدهای دیوریتی و کوارتز دیوریتی اغلب شامل فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت هستند که درون زمینه‌ای با مقادیر متغیر کوارتز و پلاژیوکلاز قرار دارند. علاوه بر این، مگنتیت، زیرکن و آپاتیت همراه با میزان کمتری سریسیت از کانی‌های متداول همراه با واحدهای نفوذی منطقه هستند (شکل ۲-۲C و D). علاوه بر این در نفوذی‌های منطقه تغییر در اندازه فنوکریست‌ها مشاهده می‌شود؛ به نحوی که از حاشیه به سمت مرکز، اندازه فنوکریست‌ها افزایش پیدا می‌کند

محلول‌های گرمابی تأخیری هستند. رایج‌ترین حالت‌های پیدایش فلدسپات پتاسیم در کانسار دالی به صورت توده‌ای، دانه‌های هم‌بعد ثانویه و رگه‌های نسل اول کانه‌زایی است. کانی فلدسپات پتاسیم در نتیجه دگرسانی به صورت جانشینی فلدسپات‌های اولیه یا پرکننده رگه‌ها همراه با کانه‌هایی مثل کالکوپیریت دیده می‌شود (شکل ۳-۲A و B). هورنبلند پس از پلاژیوکلاز در سنگ‌های این منطقه به صورت فراوان در مقاطع نازک و نمونه‌های دستی موجود است (شکل ۳-۲C و D). در مقاطع میکروسکوپی، این کانی در سنگ‌ها به رنگ‌های سبز یا قهوه‌ای و به صورت شکل‌دار و نیمه شکل‌دار با مقاطع طولی و عرضی به فراوانی دیده می‌شود. درشت‌بلورهای هورنبلند در نمونه‌های دگرسان نشده، به صورت فاز اولیه که نشان‌دهنده ماگمای گرانیتوئیدی با محتوای بیش از ۳ درصد وزنی  $H_2O$  است، وجود دارد (Pourkaseb et al., 2017). در برخی موارد هورنبلندها به صورت جزئی و یا کلی به بیوتیت تبدیل شده‌اند. حضور شکل‌های کاذب بیوتیت ثانویه به جای درشت‌بلور هورنبلند در دگرسانی پتاسیک معمول است (Rezaei and Zarasvandi, 2020). بیوتیت نیز در توده نفوذی میزبان با چندرنگی قهوه‌ای دیده می‌شود که از دگرسانی هورنبلند شکل گرفته و بیانگر دگرسانی پتاسیک است. پلاژیوکلاز که فراوان‌ترین کانی در این توده است، به صورت کشیده و درشت‌بلورهای خودشکل تا نیمه‌شکل‌دار و نیز به صورت ریزبلورهایی در زمینه دیده می‌شود.



شکل ۲. A: تصویر نمونه دستی مربوط به کوارتز دیوریت متعلق به بخش شمالی کانسار دالی، B: نمونه دستی از کوارتز دیوریت در کانسار دالی با کانه‌زایی کالکوپریت، C: فنو کریست هورنبلند در نمونه کوارتز دیوریت بخش جنوبی، D: فنو کریست‌های هورنبلند به همراه مگنتیت ماگمایی که به صورت کانی کدر در نمونه‌های کوارتز دیوریت بخش شمالی قابل مشاهده است، E: بلورهای کوارتز ماگمایی در نزدیکی رگچه کانه‌زایی کالکوپریت و F: رخداد سریسیت در حاشیه رگه کانه‌دار حاوی کوارتز و پیریت. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qtz: کوارتز، Bt: بیوتیت، Hbl: هورنبلند، Kfs: فلدسپار پتاسیم، Pl: پلاژیو کلاز، Mag: مگنتیت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپریت، Amp: آمفیبول و Ser: سریسیت).

**Fig. 2.** A: Hand specimen image showing the quartz diorite sample belonging to the northern section of Dalli deposit, B: Hand specimen from quartz diorite in the Dalli deposit containing chalcopyrite mineralization, C: Hornblende phenocryst in the quartz diorite sample of southern section, D: Hornblende phenocrysts accompanied with magmatic magnetite occurring as opaque mineral in the quartz-diorite samples of northern section, E: Magmatic quartz in the vicinity of veinlet having chalcopyrite mineralization, and F: Sericite occurrence in the marginal part of mineralized vein containing quartz and pyrite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Qtz: quartz, Bt: biotite, Hbl: hornblende, Kfs: K-feldspar, Pl: plagioclase, Mag: magnetite, Py: pyrite, Ccp: chalcopyrite, AMP: amphibole, Ser: sericite).

البته درجات شدید این دگرسانی در آندزیت‌های پورفیری بخش شمالی نیز قابل مشاهده است. در این کانسار، دگرسانی پروپلیتیک به صورت گسترده دگرسانی‌های پتاسیک و فلیک را احاطه کرده است و بیشترین گسترش آن در آندزیت‌های احاطه‌کننده توده‌های نفوذی دیده می‌شود. این دگرسانی دارای کانی‌شناسی غالب اپیدوت، کلریت و کلسیت است. دگرسانی آرژیلیک بیشتر به طور محلی گسترش یافته و در اعماق از شدت کمتری برخوردار است. آثار آن بیشتر به صورت تخریب واحدهای سنگی و تبدیل کانی‌های سیلیکاته به کانی‌های رسی در نمونه‌های دستی قابل تشخیص است. از کانی‌های غالب این دگرسانی در کانسار دالی می‌توان به وجود کوارتز، آلپیت، مونتموریلونیت و کائولینیت به صورت فاز اصلی و کلریت و ایلیت به صورت فاز فرعی اشاره کرد. این ترکیب کانی‌شناسی بیانگر وجود دگرسانی آرژیلیک حدواسط است. دگرسانی فلیک در محدوده کانسار دالی بیشترین تأثیر خود را در منطقه جنوبی در واحدهای آندزیتی نشان می‌دهد که آثار آن به صورت واحدهای نسبتاً سست به رنگ سفید تا سبز کم‌رنگ با گسترشی در مقیاس محلی و اغلب همراه با حضور رگچه‌های کوارتز دیده می‌شود. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی، کانی‌های تشکیل‌دهنده این دگرسانی عبارتند از: کلریت، سریسیت، کوارتز و پیریت. از آنجا که این مجموعه کانی‌ها به عنوان کانی‌های فرعی با مجموعه پتاسیک نیز رخ می‌دهند؛ شاخص پهنه کوارتز - سریسیت - پیریت، وجود این کانی‌های بدون حضور فلدسپات پتاسیم است. عمده این کانی‌ها از تخریب و دگرسانی کانی‌های مافیک اولیه نظیر بیوتیت و هورنبلند و همچنین پلاژیوکلاز به وجود آمده‌اند. آثار تخریب فلدسپات‌ها به سریسیت، بیشتر در مرزها و شکستگی‌های موجود در درشت‌بلورهای فلدسپات قابل مشاهده است. کانه‌زایی هیپوژن اغلب همراه با دگرسانی پتاسیک و شامل پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت به همراه مقادیر کمتر کالکوسیت و بورنیت است. طلا به صورت آزاد و یا به صورت ادخال در پیریت شناسایی شده است. یکی از رایج‌ترین و گسترده‌ترین کانه‌های سولفیدی که در بخش

این کانی دارای ماکل نواری و ساختمان منطقه‌بندی مشخص است. همچنین در راستای حاشیه، شکستگی و مقدار کمی سریسیتی شدن را نشان می‌دهند. منطقه‌بندی در پلاژیوکلازها را می‌توان به نوسان‌های فشار آب به دلیل ورود سیالات خارجی و یا خروج آن به صورت گاز و نیز تغییرات دمایی و ترکیب ماگما به دلیل رخداد فرایندهایی نظیر تبلور یا شارژ ماگمایی دانست (Cao et al., 2014). در مقاطع میکروسکوپی، مگنتیت به عنوان کانی فلزی همراه هماتیت، کالکوپیریت و پیریت دیده می‌شود (شکل ۳-E). در بعضی موارد پدیده مارتیتی شدن نیز دیده می‌شود. این پدیده به جانشینی هماتیت به جای مگنتیت از طریق اکسایش اطلاق می‌شود (Sun et al., 2015).

### دگرسانی و کانه‌زایی

بررسی‌های کانی‌شناسی برای درک نحوه پیدایش، بافت، نوع کانی‌های موجود در سامانه کانی‌سازی - دگرسانی بسیار حائز اهمیت است. دگرسانی گرمابی فرایند متاسوماتیسمی است که کانی‌شناسی، ترکیب و بافت سنگ‌های تشکیل‌دهنده ذخایر مس پورفیری را تغییر می‌دهد. این فرایند بسیار گسترده بوده و چه در مقیاس کانسار و چه در اطراف هر رگه و شکستگی، دارای منطقه‌بندی است. دگرسانی در کانسارهای مس - طلای پورفیری شامل یک زون دگرسانی پتاسیک در هسته است که قدیمی‌تر از سایر زون‌هاست. این دگرسانی مرتبط با زون‌های سولفیدی اقتصادی هستند (Rezaei and Zarasvandi, 2022). از آثار مشاهده شده در کانسار مس - طلای پورفیری دالی رخداد فرایندهای دگرسانی سامانه‌های پورفیری شامل پتاسیک، فلیک و پروپلیتیک همراه با مقادیر ناچیزی دگرسانی آرژیلیک است که به صورت هم‌مرکز از نفوذی‌های دیوریتی به سمت آندزیت‌های دیواره گسترش یافته‌اند. شاخص‌ترین کانی‌های دگرسانی پتاسیک کانسار مس - طلای پورفیری دالی به ترتیب شامل کوارتز، بیوتیت (ثانویه و تعادل مجدد یافته)، فلدسپار پتاسیم ثانویه، مگنتیت، کالکوپیریت، پیریت و به میزان کمتری بورنیت هستند. می‌توان گفت نفوذی‌های کوارتز دیورتی در هر دو بخش شمالی و جنوبی به نسبت نشان‌دهنده درجات شدیدتر دگرسانی پتاسیک هستند.

ریز کاونده الکترونی انتخاب شد. چنان که در تصویرهای میکروسکوپ الکترونی BSE مشخص شده است (شکل ۴)، مگنتیت‌های آنالیز شده اغلب به صورت دانه پراکنده و یا به صورت دسته‌های مگنتیت هستند. جدایش تیغه‌های اکسولوشن ایلمنیت درون دانه‌های مگنتیت و یا در حاشیه بلورهای مگنتیت به وفور قابل مشاهده است (شکل ۴-۴). علاوه بر این، مگنتیت‌ها اغلب دارای ادخال آپاتیت بوده و گاه واجد ادخال‌های پیریت و یا زیرکن نیز هستند (شکل ۴-۵). جدایش فازهای تیتانیوم دار (ایلمنیت) در نقشه‌های عنصری WDS از دانه‌های مگنتیت نیز به وضوح قابل مشاهده است (شکل ۵). چنین ویژگی‌های کانی‌شناسی-بافتی در گذشته نیز در مگنتیت‌های مربوط به دگرسانی پتاسیک کانسارهای مس پورفیری بخش جنوبی کمان ماگمایی ارومیه دختر گزارش شده است (Zarasvandi et al., 2019b).

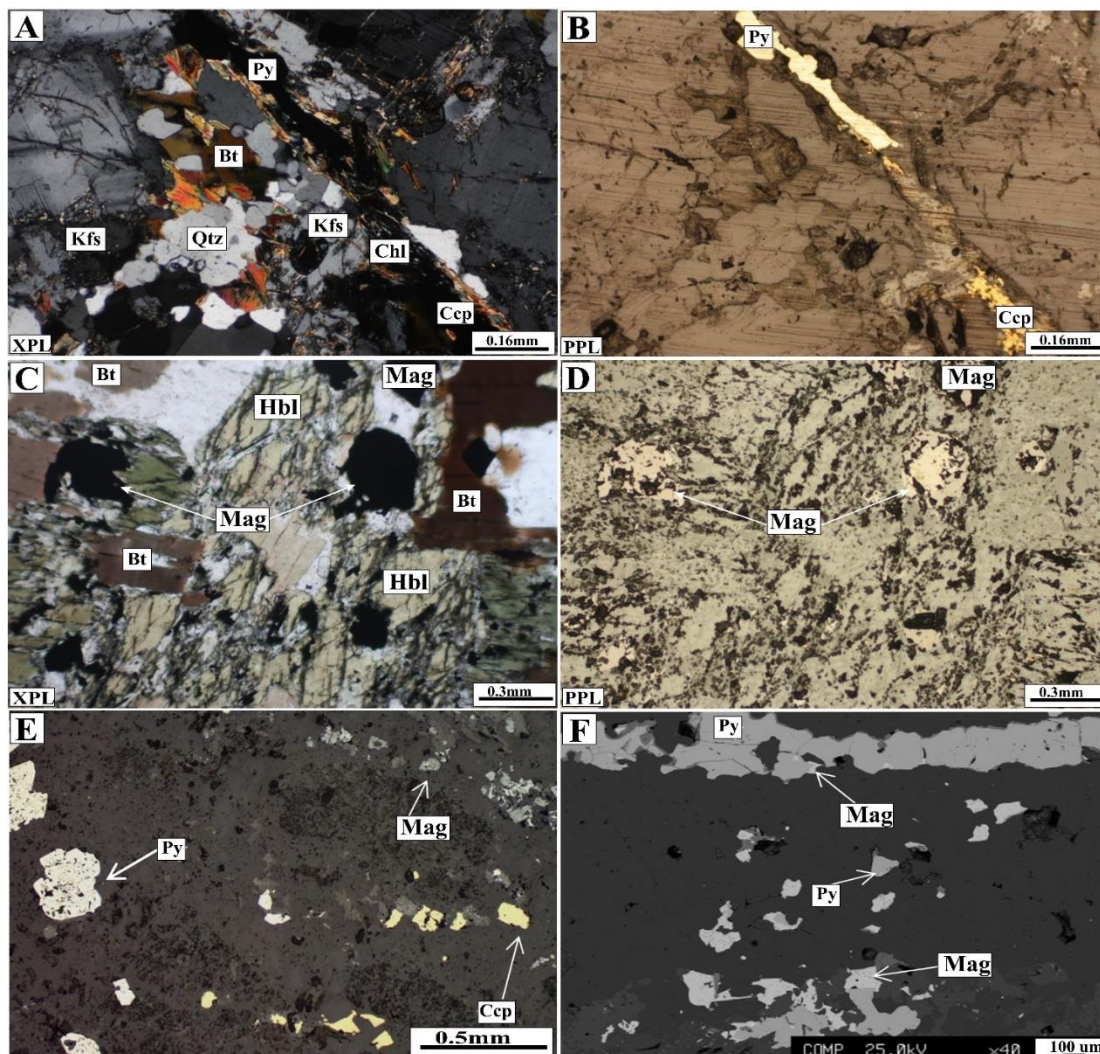
عناصری نظیر Ni، V، Cr، Cu، Mn، Mg، Ti، Al و Fe و Co مهم‌ترین عناصر موجود در ساختار کانیایی مگنتیت را شامل می‌شوند (Dupuis and Beaudoin, 2011; Nadoll et al., 2015). در تمامی نمونه‌های آنالیز شده میزان  $Al_2O_3$ ،  $FeO$ ،  $MnO$  و  $V_2O_3$  بالاتر از حد تشخیص است. مقادیر  $TiO_2$ ،  $Cr_2O_3$  و  $MgO$  نیز در بیشتر آنالیزها بالاتر از حد تشخیص هستند؛ در حالی که میزان  $NiO$ ،  $SiO_2$  و  $CuO$  اغلب پایین‌تر از حد تشخیص هستند. میزان  $FeO$  در مگنتیت‌های مورد بررسی در گستره ۹۱/۰۱ تا ۹۸/۵۸، با میانگین ۹۷/۰۱ درصد وزنی در تغییر است. چنان که در جدول ۱ مشخص شده است، مقادیر پایین  $FeO$  مربوط به نقاط آنالیزی نزدیک به جدایش تیغه‌های ایلمنیتی است. در شکل ۶ مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین عناصر مختلف در مگنتیت‌های مورد بررسی مشخص شده است. بر اساس نتایج تجزیه‌های انجام شده، تغییرات  $Al_2O_3$  در بازه‌ای از ۰/۶۳ تا ۵/۰۷، با میانگین ۰/۶۲ درصد وزنی متغیر است. بیشترین و کمترین میزان  $V_2O_3$  به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۳۴ درصد وزنی است.

هیوژن بعد از کالکوپیریت به وفور یافت می‌شود، پیریت است که با رنگ طلایی در نمونه دستی و با رنگ زرد مایل به برنجی با جلای فلزی و سطوح خط‌دار و شکل مکعبی از کالکوپیریت قابل تشخیص است (شکل ۳-E و F). بر اساس ترکیب کانی‌شناسی و روابط قطع‌شدگی رگه‌ها، سه مرحله اصلی تکامل سامانه گرمایی-کانه‌زایی در کانسار دالی شناخته شده است (Zarasvandi et al., 2015a) که عبارت است از رگه‌های اولیه مرتبط با کان‌زایی که با کانی‌شناسی کوارتز  $\pm$  پتاسیم فلدسپار  $\pm$  مگنتیت  $\pm$  کالکوپیریت و همراه با دگرسانی پتاسیک دیده می‌شود. این رگه‌ها اغلب قطع‌کننده رگه‌های کوارتزی بدون کان‌زایی مربوط به مراحل ابتدایی تکامل سامانه گرمایی هستند. رگه‌های مرحله میانی کان‌زایی بیانگر کان‌زایی اصلی در این کانسار هستند که با کانی‌شناسی کوارتز  $\pm$  کالکوپیریت  $\pm$  بورنیت  $\pm$  کولیت  $\pm$  کالکوسیت همراه هستند. البته این مجموعه کانی‌ها بیانگر احتمال نقش آفرینی فرایندهای ثانویه برون‌زاد بر روی کان‌زایی سولفیدی اولیه است. این رگه‌ها همراه با زون دگرسانی پتاسیک و یا دگرسانی‌های فیلیک ناشی از هم‌پوشانی دگرسانی پتاسیک دیده می‌شوند. در نهایت مرحله انتهایی کان‌زایی با رگه‌های کوارتز  $\pm$  بیوتیت و کلریت شناخته می‌شود (Zarasvandi et al., 2015a).

## نتایج و بحث

### شیمی مگنتیت

رگه‌های حاوی مگنتیت در سامانه‌های پورفیری به صورت معمول از رگه‌های اولیه شامل مگنتیت تا رگه‌های پیچیده شامل مگنتیت-پیریت-کالکوپیریت-کوارتز-اپیدوت مشاهده می‌شوند (Sillitoe, 2010). فراوانی بیش از ۱۰ درصدی مگنتیت در کانسارهای پورفیری سبب شده است که بررسی شیمی این کان‌ه به ویژه پراکنش عناصر کمیاب، از اهمیت ویژه‌ای برای بررسی کانسارهای پورفیری برخوردار باشد (Nadoll et al., 2014, 2015). در این پژوهش، پس از بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها، تعداد سه نمونه نماینده<sup>۴</sup> برای انجام آنالیز

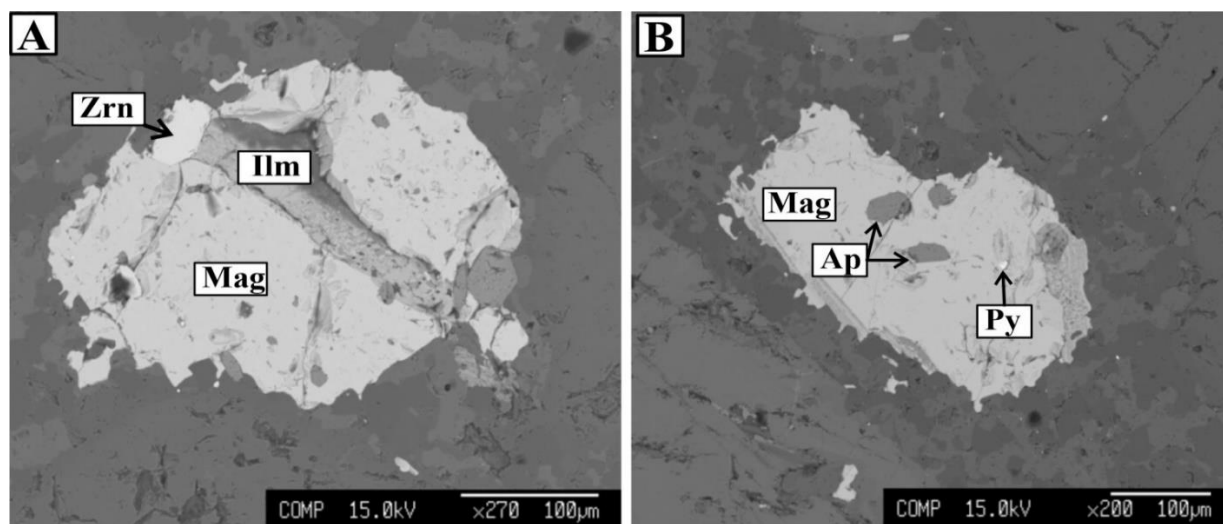


**شکل ۳.** A و B: تصویر نمونه کوارتز دیوریت بخش جنوبی کانسار مس- طلای پورفیری دالی که توسط رگه حاوی کانه‌زایی سولفیدی پیریت و کالکوپیریت قطع شده است. در این تصویر، کلریتی شدن بیوتیت‌های گرمابی و فلدسپار پتاسیم ثانویه در اطراف کانه‌زایی سولفیدی مشهود است، C و D: بیوتیتی شدن کانی هورنبلند در نمونه دیوریتی طی شرایط دگرسانی (پتاسیک) که با تشکیل مگنتیت به صورت فاز کدر همراه شده است، E: رخداد پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت به صورت دانه‌پراکنده در نمونه کوارتز دیوریت و F: تصویر BSE نشان‌دهنده دو نسل پیریت به صورت رگه‌ای و دانه پراکنده است. علاوه بر این، رخداد مگنتیت به صورت دانه‌ریز در رگه پیریتی و زمینه قابل مشاهده است. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qtz: کوارتز، Bt: بیوتیت، Hbl: هورنبلند، Kfs: فلدسپار پتاسیم، Mag: مگنتیت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت و Chl: کلریت).

**Fig. 3.** A and B: Image of quartz-diorite sample from the southern hill of Dalli porphyry Cu-Au deposit containing a veinlet with pyrite and chalcopyrite mineralization. In this image chloritization of hydrothermal biotites and secondary K-feldspars are evident around the sulfide mineralization, C and D: Hornblende in the diorite sample gives way to biotite through potassic alteration leading to the magnetite occurring as opaque phase, E: Disseminations of pyrite, chalcopyrite and magnetite in the quartz diorite sample, and F: Backscattered electron image (BSE) showing the two generation of pyrite occurring as veinlet and dissemination. Additionally, fine-grained magnetite occurred in the pyrite veinlet and groundmass. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Qtz: quartz, Bt: biotite, Hbl: hornblende, Kfs: K-feldspar, Mag: magnetite, Py: pyrite, Ccp: chalcopyrite, Chl: chlorite).

متغیر است. این میزان در بعضی نقاط اندازه گیری شده بیش از ۲ درصد وزنی است (جدول ۱).

میانگین MnO و MgO در مگنتیت های آنالیز شده به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۰۷ درصد وزنی است. میزان TiO<sub>2</sub> در مگنتیت های مورد بررسی در گستره ۰/۰۱ تا ۲/۴۵، با میانگین ۰/۳۴ درصد وزنی

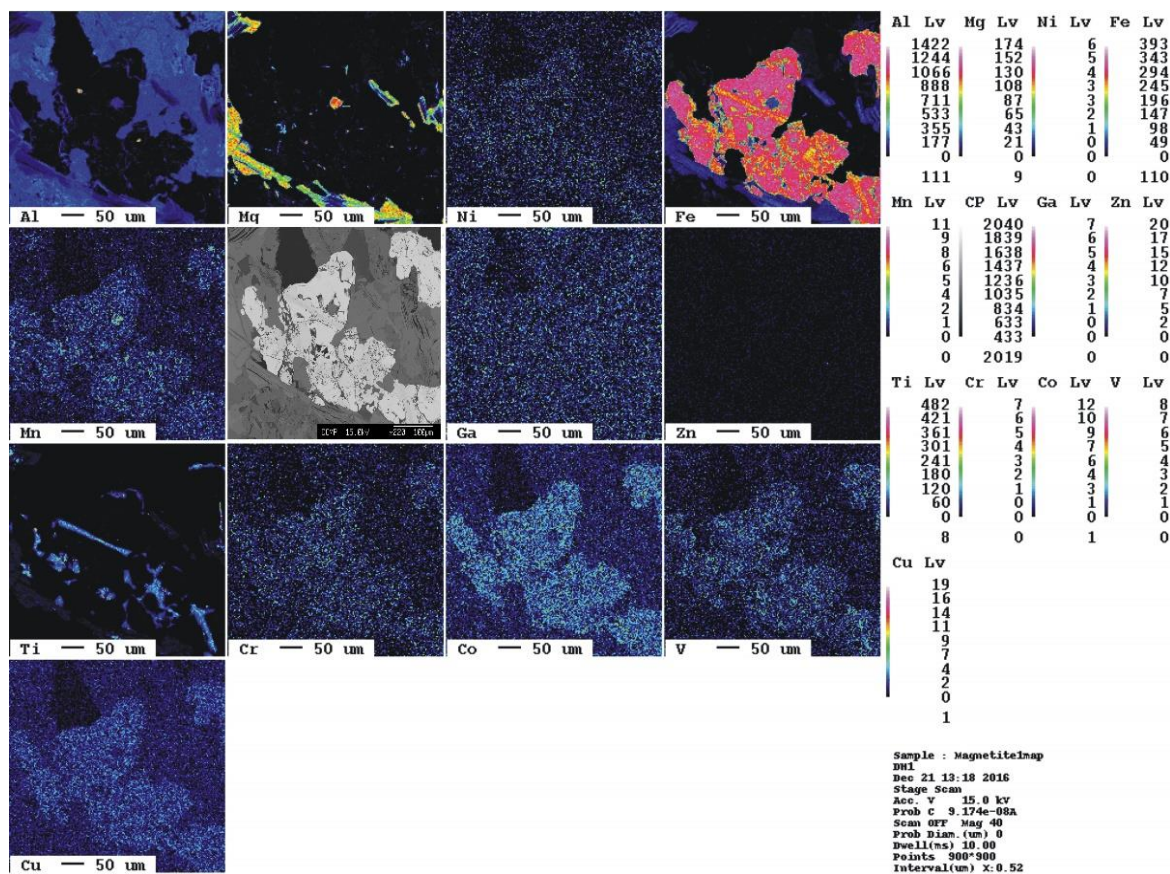


شکل ۴. A و B: تصویرهای میکروسکوپ الکترونی BSE بلورهای مگنتیت کانسار دالی نشان دهنده ویژگی های بافتی و کانی های همراه مگنتیت آنالیز شده. نشانه های اختصاری کانی ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ilm: ایلمنیت، Mag: مگنتیت، Ap: آپاتیت، Py: پیریت، Zrn: زیرکن).

**Fig. 4.** A and B: Backscattered electron image (BSE) showing the textural features and paragenesis of analyzed magnetites of Dalli Deposit. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ilm: menite, Mag: magnetite, Ap: apatite, Py: pyrite, Zrn: zircon).

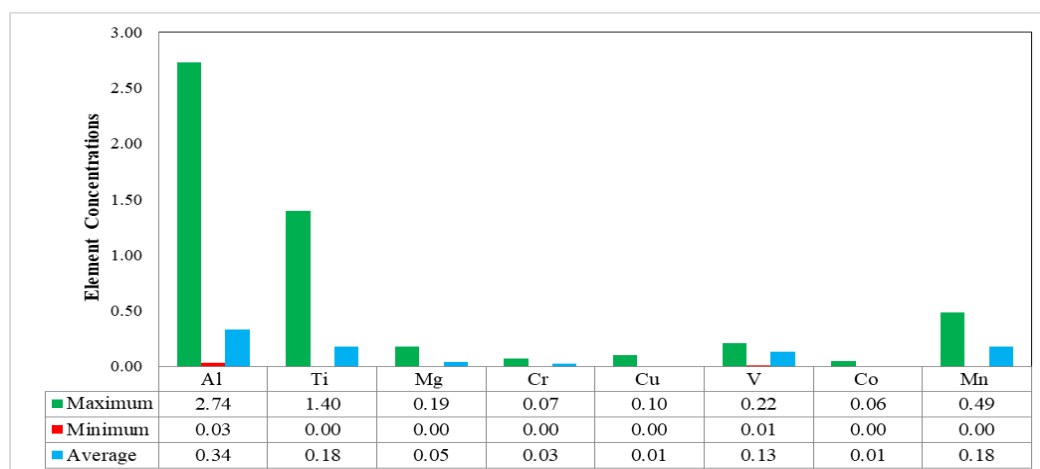
طی سال های اخیر نظرهای متعددی در خصوص تکامل ماگمایی زون ارومیه- دختر ارائه شده است (Richards, 2015; Chiu et al., 2013; Asadi, 2018). بر اساس جای گیری سامانه های ماگمایی مولد کانه زایی مس پورفیری، مشخص شده است که در طول این کمربند یک روند تکامل زمانی در جای گیری سامانه های پورفیری قابل مشاهده است (Shafiei et al., 2009; Asadi et al., 2019a). به نحوی که سامانه های پورفیری ائوسن- الیگوسن تحت عنوان پیش از برخورد<sup>۵</sup> شناخته می شوند (Asadi et al., 2014). این سامانه های ماگمایی اغلب دارای کانه زایی ضعیف یا نابارور هستند (مانند پورفیری های ریگان و درآلو (Asadi et al., 2014; Zarasvandi et al., 2015b). در مقابل، سامانه های پورفیری میوسن، برخوردی<sup>۶</sup> و دارای درجات مختلف کانه زایی از ضعیف (پورفیری کدر) تا کانه زایی قابل توجه (مانند پورفیری های سرچمشه، میدوک و دالی) هستند (Zarasvandi et al., 2018; Zarasvandi et al., 2019c). در شکل ۷، مقادیر عناصر موجود در مگنتیت های پورفیری دالی با دو کانسار بدون کانه زایی قابل توجه، نظیر پورفیری کدر (برخوردی) و درآلو (پیش از برخورد) مقایسه سازی شده است. میانگین Al در کانسار پیش از برخوردی درآلو بیش از دو کانسار دیگر است. در مقابل، میانگین میزان Mg در کانسار مس- طلای پورفیری دالی دیده می شود (شکل ۷).

طی سال های اخیر نظرهای متعددی در خصوص تکامل ماگمایی زون ارومیه- دختر ارائه شده است (Richards, 2015; Chiu et al., 2013; Asadi, 2018). بر اساس جای گیری سامانه های ماگمایی مولد کانه زایی مس پورفیری، مشخص شده است که در طول این کمربند یک روند تکامل زمانی در جای گیری سامانه های پورفیری قابل مشاهده است (Shafiei et al., 2009; Asadi et al., 2019a). به نحوی که سامانه های پورفیری ائوسن- الیگوسن تحت عنوان پیش از برخورد<sup>۵</sup> شناخته می شوند (Asadi et al., 2014). این سامانه های ماگمایی اغلب دارای کانه زایی ضعیف یا نابارور هستند (مانند پورفیری های ریگان و درآلو (Asadi et al., 2014; Zarasvandi et al., 2015b). در مقابل، سامانه های پورفیری میوسن، برخوردی<sup>۶</sup> و دارای درجات مختلف کانه زایی از ضعیف (پورفیری کدر) تا کانه زایی قابل توجه (مانند پورفیری های سرچمشه، میدوک و دالی) هستند (Zarasvandi et al., 2018; Zarasvandi et al., 2019c). در شکل ۷، مقادیر عناصر موجود در مگنتیت های پورفیری دالی با دو کانسار بدون کانه زایی قابل توجه، نظیر پورفیری کدر (برخوردی) و درآلو (پیش از برخورد) مقایسه سازی شده است. میانگین Al در کانسار پیش از برخوردی درآلو بیش از دو کانسار دیگر است. در مقابل، میانگین میزان Mg در کانسار مس- طلای پورفیری دالی دیده می شود (شکل ۷).



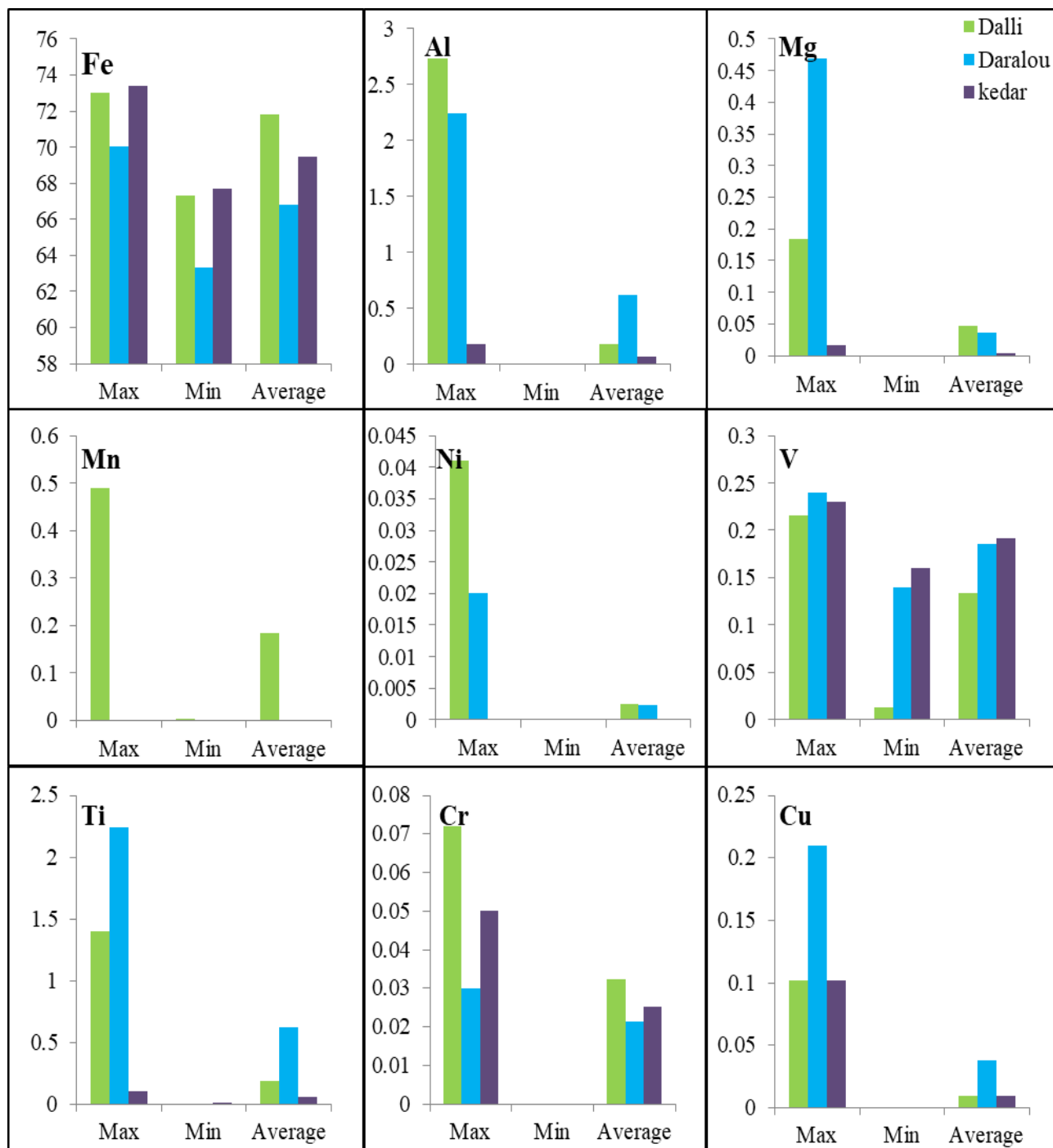
شکل ۵. نقشه عنصری WDS از کانه‌های مگنتیت کانسار دالی. چنان‌که در نقشه پراکندگی Ti دیده می‌شود، رخداد اکسولوشن فازهای ایلمنیت به وضوح قابل مشاهده است.

Fig. 5. Wave-length destructive (WDS) elemental mapping from the magnetite of Dalli deposit. Exsolution of ilmenite phases is evident in the Ti map.



شکل ۶. مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین عناصر مختلف در مگنتیت‌های کانسار دالی

Fig. 6. Maximum, minimum, and the average of different elements in the magnetites of Dalli deposit.



شکل ۷. مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین مقادیر Fe، Al، Mg، Mn، Ni، V، Ti، Cr و Cu در مگنتیت‌های کانسار دالی و مقایسه آن با سایر کانسارهای پیش از برخورد (پورفیری درآلو) و برخوردی کم عیار (پورفیری کدر). داده‌های مگنتیت پورفیری‌های درآلو و کدر برگرفته از زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2019b) است.

**Fig. 7.** Maximum, minimum, and the average of Fe, Al, Mg, Mn, Ni, V, Ti, Cr, and Cu values of Dalli, magnetites compared with the pre-collisional (Daralou porphyry) and weakly mineralized collisional deposits (Keder porphyry). Magnetite data of Daralou and Keder porphyries after [Zarasvandi et al. \(2019b\)](#).



کانسارهای مختلف از جمله کانسارهای پورفیری است. در مقایسه با کانسارهای درآلو (Cr و Co به ترتیب برابر ۳۰۰ و ۰ ppm) و کدر (Cr و Co به ترتیب برابر ۵۰۰ و ۱۰۰ ppm)، Cr و Co، دارای بیشترین فراوانی در مگنتیت‌های کانسار مس - طلای دالی هستند (مقادیر Cr و Co به ترتیب برابر ۷۲۰ و ۵۵۰ ppm است) که از این ویژگی نیز می‌توان برای تفکیک سامانه‌های مس پورفیری غنی از طلا استفاده کرد. با توجه به تأثیرپذیری میزان Cr مگنتیت از میزان تفریق‌یافتگی سنگ میزبان، احتمالاً علت فراوانی قابل توجه Cr در مگنتیت‌های دالی نسبت به پورفیری‌های بخش جنوبی زون ارومیه - دختر، به علت سرشت کمتر تفریق‌یافته نفوذی‌های مولد این پورفیری است (Zarasvandi et al., 2015b). عنصر Cu می‌تواند از طریق جایگزینی با  $Fe^{2+}$  در ساختار مگنتیت قرار گیرد (Zaki, 2007). افزون بر این، میزان مس در مگنتیت در تعادل با سیالات دارای Cl یا S در دمای ۷۰۰ درجه، معمولاً کمتر از ۵۰ گرم در تن است (Simon et al., 2008). بررسی غلظت مس در مگنتیت‌های آنالیز شده نشان می‌دهد که میانگین فراوانی مس در کانسار پیش از برخوردی درآلو (۲۱/۰ درصد وزنی) از کانسارهای برخوردی دالی (۲۰/۱۰۲ درصد وزنی) و کدر (۱۰۱/۰ درصد وزنی) بالاتر است و کانسارهای برخوردی عملاً نشان‌دهنده مقادیر یکسان مس در ساختار مگنتیت خود هستند.

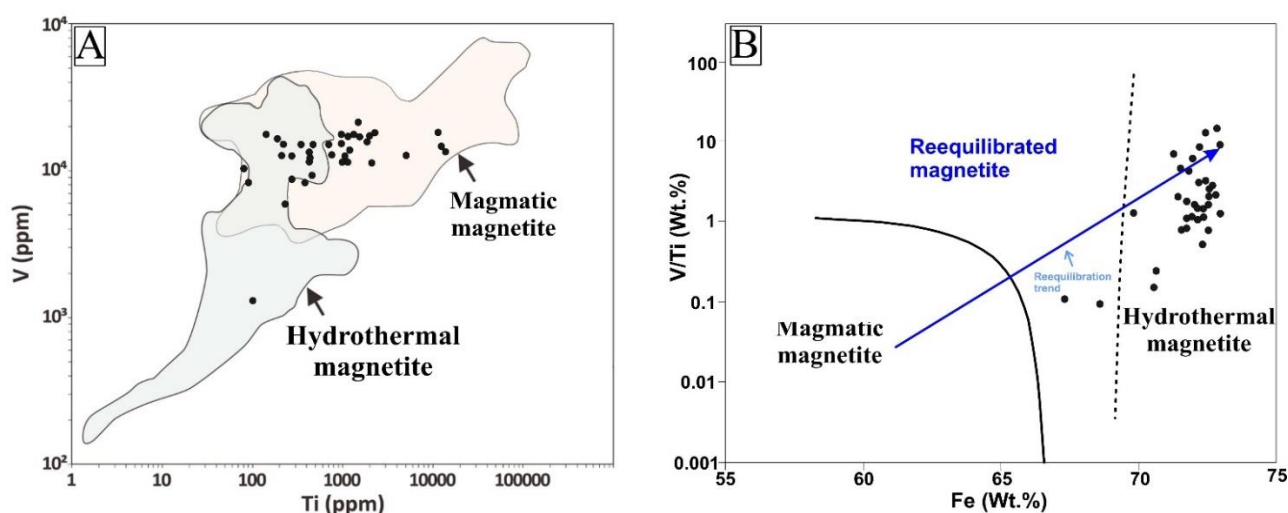
### زایش مگنتیت در کانسار مس - طلای پورفیری دالی

بر اساس پژوهش زائو و همکاران (Zao et al., 2018)، میزان بالای V، Ni، Co و Mn نشان‌دهنده احتمال تشکیل مگنتیت توسط سیالات گرمابی حرارت بالا (۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) مرتبط با منشأ ماگمایی - گرمابی است. عناصری نظیر Ti، Mg، V، Mn، Co و Zn از عناصر کلیدی برای تمایز مگنتیت‌های گرمابی در کانسارهای پورفیری به شمار می‌روند؛ در حالی که در مگنتیت‌های ماگمایی، از تغییرات فراوانی Al، Mn، Zn و V استفاده می‌شود (Nadoll et al., 2015). علاوه بر این، بر اساس پژوهش‌های دایر و همکاران (Dare et al., 2014)، می‌توان از

به صورت شاخص، بیشترین میزان Mn در نمونه‌های مگنتیت کانسار مس - طلای پورفیری دالی مشاهده می‌شود که از این ویژگی می‌توان به عنوان یک کلید اکتشافی ذخایر مس پورفیری غنی از طلا استفاده کرد (Canil et al., 2016). علاوه بر این، نیکل دارای بیشترین فراوانی در کانسار پورفیری غنی از طلای دالی است و پس از آن کانسار پیش از برخورد درآلو قرار دارد. بررسی‌هایی که بر روی کانسارهای پورفیری انجام شده است، نشان می‌دهد مگنتیت‌های این نوع ذخایر همواره واجد عناصر V و Ti هستند (Canil et al., 2016). عنصر Ti از عناصر بسیار نامحلول در سیالات گرمابی است و غلظت آن در مگنتیت‌های شکل گرفته در محیط گرمابی فقط توسط دما کنترل می‌شود (Mysen, 2012). به طور معمول، پورفیری‌های پیش از برخورد در زون ماگمایی ارومیه - دختر اغلب نیمه اقتصادی و بدون کانه‌زایی قابل توجه هستند. بیشترین میزان Ti در کانسار پیش از برخوردی درآلو مشاهده می‌شود. به طور معمول، کانه‌زایی سولفیدی در کانسارهای پورفیری در حرارت کمتر از ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد روی می‌دهد (Richards, 2015). از طرف دیگر، اگر دمای کمتر از ۷۰۰ درجه برای سیالات ماگمایی - گرمابی تشکیل‌دهنده کانسارهای پورفیری در نظر گرفته شود، بیشینه میزان Ti و Al در مگنتیت‌های گرمابی نباید از ۱۰۰۰۰ و ۴۰۰۰ گرم در تن تجاوز کند (Canil et al., 2016). لذا همواره مقدار Ti در مگنتیت‌های آذرین بسیار بیشتر از گرمابی است (Dare et al., 2014). علاوه بر Ti، بیشینه مقدار V نیز در کانسار پیش از برخوردی (درآلو) دیده می‌شود.  $V^{3+}$  به دلیل تشابه شعاع یونی با  $Fe^{3+}$ ، در ساختار مگنتیت از فراوانی بالایی برخوردار است (Balán et al., 2006). این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده تأثیرپذیری غلظت V از شرایط غلظت فوگاسیته اکسیژن سیال ماگمایی - گرمابی باشد. وانادیوم، کروم و منگنز ظرفیت‌های متفاوتی دارند و شرکت و حضور آنها در شبکه مگنتیت، وابسته به فوگاسیته اکسیژن است (Nadoll et al., 2014; Parvareh Darbandi et al., 2022). Cr نیز از عناصر مهم در بررسی شیمی مگنتیت در

دارای نسبت Ni/Cr کمتر از ۱ و بیشتر از ۱ هستند (Dare et al., 2014). همچنین از عناصر V و Ti (شکل ۸-۸) و نمودار V/Ti در مقابل Fe (شکل ۸-۸) نیز می توان برای تفکیک مگنتیت های ماگمایی و گرمابی استفاده کرد (Wen et al., 2017; Guo et al., 2020). شکل ۸-۸ نشان می دهد که نمونه های مورد بررسی اغلب در محدوده مشترک ماگمایی- گرمابی پراکنش یافته اند. علاوه بر این، در شکل ۸-۸ مشخص است که مگنتیت های مورد بررسی در رده گرمابی قرار می گیرند. قرارگیری نمونه های مگنتیت مورد بررسی بر روی نمودار (wt.% Fe) در مقابل V/Ti نشان می دهد، تنها دو نمونه بیانگر ویژگی زمین شیمیایی مگنتیت های تعادل مجدد یافته هستند و عمده نمونه ها بر اثر نقش آفرینی سیالات گرمابی طی تکامل سامانه گرمابی کانسار مس- طلای پورفیری دالی متبلور شده اند. علاوه بر این، این موضوع نشان می دهد، شیمی مگنتیت های مورد بررسی می تواند به منظور تفکیک گروه های زایشی ذخایر (بر اساس شیمی مگنتیت) مورد استفاده قرار گیرد.

تغییرات عنصری Ti، Ni و Cr برای تمایز مگنتیت های گرمابی از آذرین استفاده کرد. فراوانی کبالت در مگنتیت های گرمابی کانسارهای مس پورفیری از مگنتیت های آذرین و اسکارن بیشتر است (Nadoll et al., 2015). فراوانی این عناصر در مگنتیت های کانسار مس- طلای پورفیری دالی نشان دهنده نقش آفرینی سیالات گرمابی در شکل گیری این مگنتیت هاست. یکی از موارد مهمی که در بررسی مگنتیت های موجود در سامانه های ماگمایی- گرمابی باید مد نظر قرار گیرد، بحث رخداد تعادل مجدد است. به عبارتی، رخداد چندین مرحله تکامل سیال ماگمایی- گرمابی می تواند باعث تغییر سرشت زمین شیمیایی مگنتیت های اولیه ماگمایی و یا حتی مگنتیت های گرمابی شود (Hu et al., 2015). تعادل مجدد می تواند باعث تغییر در پراکنش زمین شیمیایی عناصری نظیر Si، Mg، Ca، Al، Mn و Ti (Hu et al., 2015) و در نتیجه باعث ایجاد اختلال در تفسیر زمین شیمی مگنتیت شود. رفتار زمین شیمیایی عناصر Ni و Cr در مگنتیت ماگمایی از مگنتیت گرمابی بسیار متفاوت است (Tian et al., 2021)؛ به عنوان مثال، مگنتیت ماگمایی و گرمابی به ترتیب



شکل ۸.۸: نمودار Ti در مقابل V برای تفکیک مگنتیت های ماگمایی و گرمابی در کانسار دالی (Nadoll et al., 2015) و B: نمودار Fe در مقابل V/Ti برای تفکیک مگنتیت های ماگمایی، تعادل مجدد یافته و گرمابی (Wen et al., 2017)

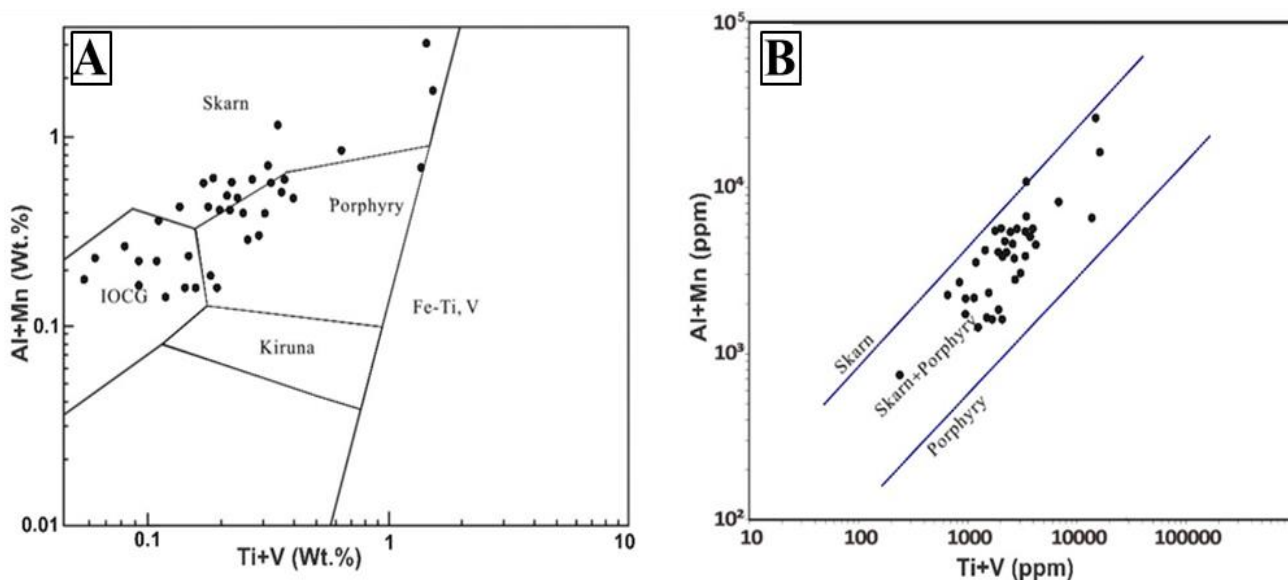
Fig. 8. A: Ti vs. V plot for discrimination of magmatic and hydrothermal magnetites in the Dalli deposit (Nadoll et al., 2015), and B: Fe vs. V/Ti for the discrimination of magmatic, re-equilibrated, and hydrothermal magnetites (Wen et al., 2017).

### تفکیک زایش ذخایر با استفاده از شیمی مگنتیت

بر اساس غلظت عناصر  $Zn$  و  $Cu$ ،  $Mn$ ،  $Cr$ ،  $V$ ،  $Ti$ ،  $Al$ ،  $Ca$  در مگنتیت، می‌توان نمودارهایی را برای تفکیک کانسارهای مختلف ترسیم کرد (Dupuis and Beaudoin, 2011). از نمودار  $Al+Mn$  در مقابل  $Ti+V$  که بر اساس شیمی مگنتیت پایه‌گذاری شده است، می‌توان برای تفکیک کانسارهای IOCG، مس پورفیری، آهن‌نواری، اسکارن و کانه‌زایی‌های  $Fe-Ti$  و  $V$  ماگمایی استفاده کرد (Nadoll et al., 2015; Wen et al., 2017). در این رابطه می‌توان گفت مگنتیت در سامانه کانه‌زایی اسکارن از مقادیر  $Al+Mn$  بالا ولی از مقادیر  $Ti+V$  به نسبت پایینی برخوردار است؛ در حالی که در کانسارهای مس پورفیری، فراوانی  $Ti+V$  بالا و در مقابل، میزان  $Al+Mn$  پایین است. با توجه به این نمودار، عمده نمونه‌های مگنتیت مربوط به کانسار دالی در محدوده بین کانسارهای IOCG، کانسارهای پورفیری و اسکارن ترسیم شده‌اند (شکل ۹-۱). تشابه میان ویژگی‌های زمین‌شیمیایی مگنتیت‌های مس پورفیری و سامانه‌های کانه‌زایی

IOCG در پژوهش‌های دیگر نیز اثبات شده است (Knipping et al., 2015). بر این اساس پیشنهاد تغییر در این نمودار به منظور تفکیک بهتر سامانه‌های کانه‌زایی ماگمایی-گرمايي ارائه شده است (Rezaei, 2017). به نظر می‌رسد، وجود تشابه زیاد میان سامانه ماگمایی کانسارهای IOCG و مس پورفیری باعث مشابهت در ترکیب مگنتیت‌های این دو سامانه کانه‌زایی شده است. این موضوع نشان می‌دهد علاوه بر زمین‌شیمی مگنتیت، سایر مؤلفه‌ها نیز باید در تفکیک زایش این ذخایر مدنظر قرار گیرند. به عنوان مثال، زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2015a) نشان دادند تکامل سیال ماگمایی-گرمايي در کانسار دالی به صورت شاخص مشابه سامانه‌های پورفیری طلادار و متفاوت با سامانه‌های IOCG است.

بر اساس نمودار  $Al+Mn$  در مقابل  $Ti+V$  (Nadoll et al., 2015)، مگنتیت‌های دالی اغلب در محدوده پورفیری-اسکارن ترسیم شده‌اند (شکل ۹-۱).



شکل ۹. A: موقعیت نمونه‌های کانسار دالی بر روی نمودار  $Ti+V$  در مقابل  $Al+Mn$  (Nadoll et al., 2015) و B: نمودار  $Ti+V$  در مقابل  $Al+Mn$  (Nadoll et al., 2014) بر اساس شیمی مگنتیت در کانسار دالی

Fig. 9. A: Plot of the Dalli samples on the  $Ti+V$  vs.  $Al+Mn$  (wt. %) diagram (Nadoll et al., 2015), and B:  $Ti+V$  vs.  $Al+Mn$  (ppm) diagram (Nadoll et al., 2014) based on the magnetite composition of Dalli deposit

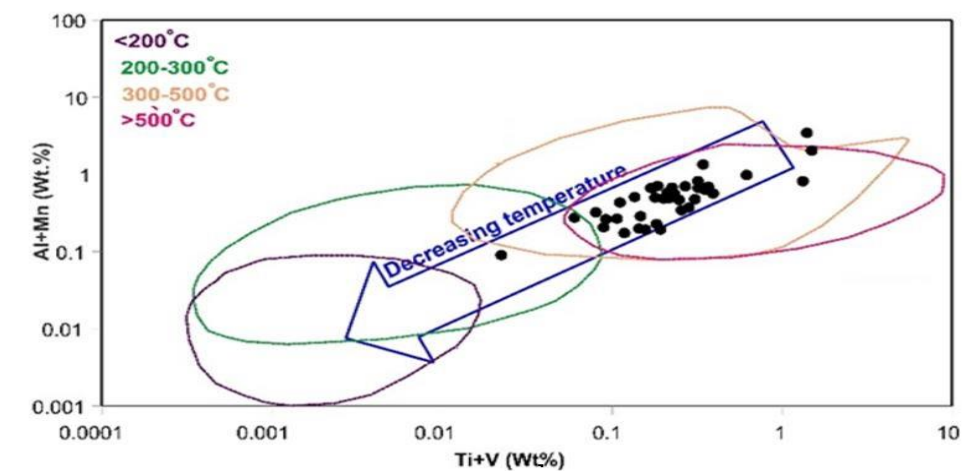
با توجه به اینکه سامانه‌های کانه‌زایی اسکارن اغلب نشان‌دهنده نرخ بالای واکنش سیال ماگمایی - گرمایی و سنگ میزبان هستند، تغییر سرشت زمین‌شیمیایی مگنتیت‌های دالی از پورفیری به سمت پورفیری - اسکارن می‌تواند بازگوکننده این ویژگی در مگنتیت‌های کانسار دالی باشد. همچنین، این ویژگی می‌تواند به منظور تفکیک سامانه‌های پورفیری غنی از طلا نیز مدنظر قرار گیرد. از طرفی، سایر سامانه‌های ماگمایی - گرمایی غنی از طلا نیز نظیر کانسارهای IOCG بیانگر نرخ بالای واکنش سیال و سنگ دیواره هستند (Richards et al., 2017) که این موضوع نیز می‌تواند تأییدکننده موارد ذکر شده باشد.

### شرایط فیزیکوشیمیایی کانه‌زایی

پژوهش هاگرتی (Haggerty, 1991)، مالو و همکاران (Mollo et al., 2013) و همچنین زائو و همکاران (Zhao et al., 2018) نشان‌دهنده است که شیمی مگنتیت توسط شاخص‌هایی نظیر فوگاسیته اکسیژن و گوگرد، دما، فشار، سرعت سرد شدن و شیمی سیال کنترل می‌شود. تمام این مؤلفه‌ها در پتانسیل کانه‌زایی نقش دارند و بنابراین می‌توان از شیمی مگنتیت برای تفکیک سامانه‌های کانه‌زا از غیر کانه‌زا استفاده کرد (Dupuis and Beaudoin, 2011; Nadoll et al., 2015).

با توجه به تأثیرپذیری V از شرایط فوگاسیته اکسیژن در ماگما و سیالات، تغییرات در میزان V در کانسارهای مختلف می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات  $fO_2$  هنگام تشکیل کانسارهای پورفیری باشد (Rusk et al., 2009). باید توجه داشت که با افزایش فوگاسیته اکسیژن در سیالات، مقدار V در ترکیب مگنتیت کاهش می‌یابد (Robert and Anderson, 2016). بنابراین غلظت V در مگنتیت با فوگاسیته اکسیژن ارتباط عکس دارد. غالب بودن شرایط فوگاسیته اکسیژن بالا در ادامه تبلور مگنتیت می‌تواند باعث رخداد ماریتی شدن مگنتیت و یا جدایش تیغه‌های اکسولوشن فازهای تیتانیوم‌دار شود (Hu et al., 2015). این ویژگی در نقشه‌های

عنصری تهیه شده از مگنتیت‌های دالی که در شکل ۵ مشخص شده، قابل ملاحظه است. البته در جدایش و اکسولوشن تیغه‌های فازهای تیتانیوم‌دار سایر مؤلفه‌ها نظیر افت دما نیز مؤثر است (Hu et al., 2015) که در ادامه مورد بحث قرار گرفته است. بالا بودن شرایط فوگاسیته اکسیژن طی مراحل ماگمایی و در ابتدای تکامل سامانه گرمایی (قبل از شروع کانه‌زایی سولفیدی) می‌تواند باعث حفظ‌شدگی محتوای گوگرد سامانه کانه‌زایی شود؛ زیرا این شرایط باعث می‌شود گونه‌های اکسیدی گوگرد ( $SO_4^{2-}$ ) به راحتی انتقال یافته و از جدایش اولیه گوگرد (و عناصر کالکوفیل مانند مس و مولیبدن) جلوگیری به عمل آید که در نتیجه باعث ارتقای کانه‌زایی سولفیدی می‌شود (Zarasvandi et al., 2022). علاوه بر فوگاسیته اکسیژن، با استفاده از شیمی مگنتیت می‌توان تغییرات دمایی در هنگام تشکیل مگنتیت را بررسی کرد (Tian et al., 2021). در این راستا چنان‌که پیشتر نیز بیان شد، مقادیر Ti در مگنتیت ارتباطی مستقیم با شرایط دمایی تبلور مگنتیت دارد (Huang et al., 2015). در این خصوص دیدیتوس و همکاران (Deditius et al., 2018)، نمودار Al + Mn در مقابل Ti + V را برای تخمین شرایط دمایی طی تبلور مگنتیت پیشنهاد کردند. ترسیم نتایج آنالیز مگنتیت بر روی نمودار Al + Mn در مقابل Ti + V نشان‌داد مگنتیت‌های دالی از روند افت دمایی پیروی می‌کنند (شکل ۱۰). این ویژگی از دیدگاه کانه‌زایی سولفیدی بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا افت دمایی عملاً باعث تسهیل تبدیل گوگرد سولفات به گونه‌های سولفیدی می‌شود و در نتیجه یکی از عوامل مهم در شروع کانه‌زایی سولفیدی است (Zarasvandi et al., 2018). این موضوع (افت دمایی) قبلاً در پژوهش‌های انجام شده بر روی سیالات درگیر کانسار دالی (Zarasvandi et al., 2016; Zarasvandi et al., 2015a) نیز به اثبات رسیده است که نشان‌دهنده درستی این روش برای تخمین شرایط دمایی کانه‌زایی سولفیدی در سامانه‌های پورفیری است.



شکل ۱۰. ترسیم داده‌های مگنتیت دالی بر روی نمودار Al+Mn و Ti+V (Deditius et al., 2018) برای اندازه‌گیری تغییرات دمای تبلور

**Fig. 10.** Plot of the Dalli magnetite samples on the Al+Mn vs. Ti+V diagram (Deditius et al., 2018) for measure changes in crystallization temperature

### نتیجه‌گیری

شواهدی نظیر مگنتیت‌های مارتیتی شده و رخداد اکسولوشن تیغه‌های ایلمنیت در مگنتیت، می‌تواند نشان‌دهنده تبلور مگنتیت‌های کانسار دالی طی شرایط فوگاسیته اکسیژن بالا باشد که این شرایط در حفظ‌شدگی محتوای گوگرد، پیش از شروع کانه‌زایی سولفیدی اصلی بسیار حائز اهمیت است. علاوه بر این، بر اساس نمودار Al + Mn در مقابل Ti + V، نمونه‌های مگنتیت از روند افت دمایی پیروی می‌کنند. افت دمایی به عنوان یکی از عوامل مهم در شکستن SO<sub>4</sub> (فرم اکسیدی گوگرد) و تبدیل آن به H<sub>2</sub>S و به دنبال آن شروع کانه‌زایی سولفیدی در زون دگرسانی پتاسیک است.

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

بر اساس نمودار Al+Mn در مقابل Ti+V، نمونه‌های مگنتیت کانسار دالی در محدوده بین کانسارهای پورفیری، اسکارن و IOCG قرار می‌گیرند که دلیل آن، این است که این مگنتیت‌ها بر اثر سیالات ماگمایی- گرمابی دخیل در دگرسانی پتاسیک حاصل شده‌اند و از نظر زمین‌شیمیایی دارای برخی مشابهت‌ها با سایر سامانه‌های کانه‌زایی گرمابی هستند. در مقایسه با کانسارهای پیش از برخورد (نظیر پورفیری در آلو)، Fe در مگنتیت‌های کانسار دالی و سایر کانسارهای برخوردی نظیر کدر دارای میانگین فراوانی بیشتری است. موقعیت قرارگیری نتایج آنالیز مگنتیت‌های متعلق به کانسار دالی بر روی نمودار Fe در مقابل V/Ti نشان داد که مگنتیت‌های مورد بررسی در رده گرمابی قرار می‌گیرند.

1. Electron Microprobe Analysis (EMPA)
2. Montanuniversitat Leoben
3. Wavelength-Dispersive Spectroscopy (WDS)
4. Representative
5. Pre-collision
6. Collisional

## References

- Alavi, M., 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American Journal of Science*, 307(9): 1064–1095.  
<https://doi.org/10.2475/09.2007.02>
- Asadi, S., 2018. Triggers for the generation of post-collisional porphyry Cu systems in the Kerman magmatic copper belt, Iran: New constraints from elemental and isotopic (Sr–Nd– Hf–O) data. *Gondwana Research*, 64: 97–121.  
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.06.008>
- Asadi, S., Moore, F. and Zarasvandi, A., 2014. Discriminating productive and barren porphyry copper deposits in the southeastern part of the central Iranian volcano-plutonic belt, Kerman region, Iran: a review. *Earth-Science Reviews*, 138: 25–46.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.001>
- Ayati, F., Yavuz, F., Asadi, H., Richards, J.P. and Jourdane, F., 2013. Petrology and geochemistry of calc-alkaline volcanic and subvolcanic rocks, Dalli porphyry copper-gold deposit, Markazi Province, Iran. *International Geology Reviews*, 55(2): 158–184.  
<https://doi.org/10.1080/00206814.2012.689640>
- Balan, E., De Villiers, J.P.R., Eeckhout, S.G., Glatzel, P., Toplis, M.J., Fritsch, E., Allard, T., Galois, L. and Calas, G., 2006. The oxidation state of vanadium in titanomagnetite from layered basic intrusions. *American Mineralogist*, 91(5–6): 953–956.  
<https://doi.org/10.2138/am.2006.2192>
- Canil, D., Grondahl, C., Lacourse, T. and Pisiak, L.K., 2016. Trace elements in magnetite from porphyry Cu-Mo-Au deposits in British Columbia, Canada. *Ore Geology Reviews*, 72(Part 1): 1116–1128.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.10.007>
- Cao, M., Qin, K., Li, G., Jin, L., Evans, N.J. and Yang, X., 2014. Baogutu: an example of reduced porphyry Cu deposit in western Junggar. *Ore Geology Review*, 56: 159–180.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.08.014>
- Chiu, H.Y., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S., Khatib, M.M. and Iizuka, Y., 2013. Zircon U–Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neotethyan subduction and Zagros orogeny. *Lithos*, 162–163: 70–87.  
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.006>
- Darbani, M.H., Abedini, A., Aliyari, F. and Kalagari, A., 2020. Magnetite mineral chemistry and characteristics of fluid shortcuts in Kuh-e-Baba iron deposit, south of Hashtrood, northwest of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 27(4): 755–766. (in Persian) Retrieved October 16, 2019 from  
<https://ijcm.ir/article-1-1361-en.html>
- Dare, S.A.S., Barnes, S.J., Beaudoin, G., M'eric, J., Boutroy, E. and Potvin-Doucet, C., 2014. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators. *Mineralium Deposita*, 49(7): 785–796.  
<https://doi.org/10.1007/s00126-014-0529-0>
- Deditius, A., Reich, M., Simon, A.C., Suvorova, A., Knipping, J., Roberts, M.P., Rubanov, S., Dodd, A. and Saunders, M., 2018. Nanogeochemistry of hydrothermal magnetite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173(46): 1–20.  
<https://doi.org/10.1007/s00410-018-1474-1>
- Dupuis, C. and Beaudoin, G., 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Mineralium Deposita*, 46(4): 319–335.  
<https://doi.org/10.1007/s00126-011-0334-y>
- Guo, J.H., Leng, C.B., Zhang, X.C., Wei, Z.T., Wei, T.C., Tian, Z.D., Tian, F. and Lai, C.K., 2020. Textural and chemical variations of magnetite from porphyry Cu-Au and Cu skarn deposits in the Zhongdian region, northwestern Yunnan, SW China. *Ore Geology Reviews*, 116: 103245.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103245>
- Haggerty, S.E., 1991. Oxide mineralogy of the upper mantle. In: D.H. Lindsley (Editor), *Oxide minerals: petrologic and magnetic significance*. De Gruyter, pp. 355–416.  
<https://doi.org/10.1515/9781501508684-013>
- Hasanzadeh, F., Shamsaddini, M., Rahimipour, G.R., 2021. Comparison of zonality indices in position determination of porphyry copper ore in Daralu, south of Kerman province. *Journal of Mining Engineering*, 16(52): 51–62.  
<https://doi.org/10.22034/IJME.2021.122094.1811>
- Heydari, M., Zarasvandi, A., Rezaei, M., Asadi, S., 2018. Reconstructing physicochemical attributes using chemistry of biotite and chlorite in the Keder porphyry copper deposit, Kerman Cenozoic magmatic arc. *Iranian Journal of Geology*, 47(12): 63–85. Retrieved October 20, 2018 from

- <http://geology.saminattech.ir/Article/9614>
- Hou, Z., Zhang, H., Pan, X. and Yang, Z., 2011. Porphyry Cu (–Mo–Au) Deposits related to melting of thickened mafic lower crust: examples from the eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geology Reviews*, 39(1–2): 21–45. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.09.002>
- Hu, H., Lentz, D., Li, J.W., McCarron, T., Zhao, X.F. and Hall, D., 2015. Re-equilibration processes in magnetite from iron skarn deposits. *Economic Geology*, 110 (1): 1–8. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.1.1>
- Huang, X.W., Zhou, M.-F., Qiu, Y.Z. and Qi, L., 2015. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: The Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, North China. *Ore Geology Reviews*, 65(Part 4): 884–899. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.010>
- Knipping, J.L., Bilinker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A.P., Wälle, M., Heinrich, C.A., Holtz, F. and Munizaga, R., 2015. Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes. *Geochimica et Cosmochim. Acta*, 171: 15–38. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.08.010>
- Liu, Y., Fan, Y., Zhou, T., Yan, L., Fu, B., Wang, F. and Wang, G., 2022. Trace element evolution of magnetite in iron oxide-apatite deposits: Case study of Daling deposit, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 144: 104842. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104842>
- Mollo, S., Putirka, K., Iezzi, G. and Scarlato, P., 2013. The control of cooling rate on titanomagnetite composition: implications for a geospeedometry model applicable to alkaline rocks from Mt. Etna volcano. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 165: 457–475. <https://doi.org/10.1007/s00410-012-0817-6>
- Monsef, R., 2011. Geochemistry, petrogenesis and tectonomagmatic aspects of Neogene volcanic and sub-volcanic rocks in west of Salafchegan to north of Deligan (Central Iran). Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 270 pp.
- Mysen, B.O., 2012. High-pressure and high-temperature titanium solution mechanisms in silicate-saturated aqueous fluids and hydrous silicate melts. *American Mineralogist*, 97(7): 1241–1251. <https://doi.org/10.2138/am.2012.4084>
- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J.L., French, D. and Walshe, J., 2014. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. *Ore Geology Reviews*, 61: 1–32. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.013>
- Nadoll, P., Mauk, J.L., Leveille, R.A. and Koenig, A.E., 2015. Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States. *Mineralium Deposita*, 50(1): 493–515. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0539-y>
- Nadri, R., Mohajjel, M. and Behrodi, A., 2010. Bidhend strike-slip fault (south Qom). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 19(74): 177–184 (in Persian) <https://doi.org/10.22071/gsj.2010.57355>
- Parvareh Darbandi, M., Malekzadeh Shafaroudi, A., Azimzadeh, A.M., Karimpour, M.H. and Klötzli, U., 2022. Textures and chemical compositions of the Narm iron oxide-apatite deposit in Kuh-e-Sarhangi District (Central Iran): Insights into the magmatic-hydrothermal mineralization. *Ore Geology Reviews*, 141: 104631. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104631>
- Pourkaseb, H., Zarasvandi, A., Saed, M. and Davoudian Dehkordy, A.R., 2017. Magmatic-hydrothermal fluid evolution of the Dalli porphyry Cu-Au deposit; using amphibole and plagioclas mineral chemistry. *Journal of Economic Geology*, 9(1): 73–92. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.V9I1.51704>
- Rezaei, M., 2017. Effective parameters in mineralization potential of economic and subeconomic porphyry copper deposits in Urumieh- Dokhtar magmatic zone: using geochemical and fluid inclusion studies. Ph.D. Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, 204 pp.
- Rezaei, M. and Zarasvandi, A., 2020. Titanium-in-biotite thermometry in porphyry copper systems: Challenges to application of the thermometer. *Resource Geology*, 70: 157–168. <https://doi.org/10.1111/rge.12227>
- Rezaei, M. and Zarasvandi, A., 2022. Combined Feldspar-Destructive Processes and Hypogene Sulfide Mineralization in the Porphyry Copper Systems: Potentials for Geochemical Signals of Ore Discovering. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 46(5): 1413–1424.

- <https://doi.org/10.1007/s40995-022-01350-1>
- Richards, J.P., 2011. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.05.006>
- Richards, J.P., 2015. Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision. *Ore Geology Reviews*, 70: 323–345. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.11.009>
- Richards, J.P., López, G.P., Zhu, J.J., Creaser, R.A., Locock, A.J. and Mumin, A.H., 2017. Contrasting tectonic settings and sulfur contents of magmas associated with Cretaceous porphyry Cu ± Mo ± Au and intrusion-related iron oxide Cu-Au deposits in Northern Chile. *Economic Geology*, 112(2): 295–318. <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.2.295>
- Robert, A. and Anderson, A., 2016. Experimental calibration of a new oxybarometer for silicic magmas based on the partitioning of vanadium between magnetite and silicate melt. EGU General Assembly, 18: 12–29. Retrieved February 14, 2016 from <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016EGUGA..1812829A/abstract>
- Rusk, B., Oliver, N., Brown, A., Lilly, R. and Jungmann, D., 2009. Barren magnetite breccias in the Cloncurry region, Australia; comparisons to IOCG deposits. 10<sup>th</sup> Biennial SGA Meeting, Townsville, Australia.
- Saremi, F., 2014. Hydrothermal alteration mapping using combination of the ASTER data and spectroscopic minerals in the Dalli porphyry Cu-Au deposit, Delijan, Markazi province. M.Sc. Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, 142 pp. (in Persian with English abstract)
- Shafiei, B., Haschke, M. and Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, Southeastern Iran. *Mineralium Deposita*, 44(3): 265–283. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0216-0>
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Simon, A.C., Candela, P.A., Piccoli, P.M., Mengason, M. and Englander, L., 2008. The effect of crystal-melt partitioning on the budgets of Cu, Au, and Ag. *American Mineralogist*, 93(8–9): 1437–1448. <https://doi.org/10.2138/am.2008.2812>
- 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>
- Sun, W., Yuan, F., Jowitt, S.M., Zhou, T., Liu, G., Li, X., Wang, F. and Troll, V.R., 2019. In situ LA-ICP-MS trace element analyses of magnetite: genetic implications for the Zhonggu orefield, Ningwu volcanic basin, Anhui Province, China. *Mineralium Deposita*, 54(1): 1243–1264. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00872-w>
- Tian, J., Zhang, Y., Gong, L., Francisco, D.G. and Berador, A., 2021. Genesis, geochemical evolution and metallogenic implications of magnetite: Perspective from the giant Cretaceous Atlas porphyry Cu–Au deposit (Cebu, Philippines). *Ore Geology Reviews*, 133: 104084. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104084>
- Wen, G., Li, J.W., Hofstra, A.H., Koenig, A.E., Lowers, H.A. and Adams, D., 2017. Hydrothermal reequilibration of igneous magnetite in altered granitic plutons and its implications for magnetite classification schemes: Insights from the Handan-Xingtai iron district, North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 213: 255–270. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.06.043>
- Whitney, D. L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Zaki, M.H., 2007. Temperature dependence of dielectric properties for copper doped magnetite. *Journal of Alloys and Compounds*, 439(1–2): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.08.084>
- Zarasvandi, A., Asadi, F., Pourkaseb, H., Ahmadnejad, F. and Zamanian, H., 2016. Hydrothermal Fluid evolution in the Dalli porphyry Cu-Au Deposit: Fluid Inclusion microthermometry studies. *Journal of Economic Geology*, 7(2): 277–306. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.V7I2.38447>



- Zarasvandi, A., Heidari, M., Raith, J.G., Rezaei, M. and Saki, A., 2019a. Geochemical characteristics of collisional and pre-collisional porphyry copper systems in Kerman Cenozoic Magmatic Arc, Iran: Using plagioclase, biotite and amphibole chemistry. *Lithos*, 326–327: 279–297. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.12.029>
- Zarasvandi, A., Heidari, M., Rezaei, M., Raith, J.G., Asadi, S., Saki, A. and Azimzadeh, A., 2019b. Magnetite Chemistry in the Porphyry Copper Systems of Kerman Cenozoic Magmatic Arc, Kerman, Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 43: 839–862. <https://doi.org/10.1007/s40995-019-00677-6>
- Zarasvandi, A., Liaght, S. and Zentilli, M., 2005. Porphyry copper deposits of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran, Super Porphyry Copper and Gold deposits: A global perspective. PGC publishing, Adelaide, 2: 441–452. Retrieved November 10, 2006 from <https://www.geokniga.org/books/5049>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Asadi, S. and Lentz, D.R., 2019c. Hydrothermal fluid evolution in collisional Miocene porphyry copper deposits in Iran: Insights into factors controlling metal fertility. *Ore Geology Reviews*, 105: 183–200. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.027>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G. and Lentz, D.R., 2022. Why are there no Cu-porphyry deposits in Jurassic Sanandaj-Sirjan zone intrusions of Iran? *International Geology Review*, 64(4): 530–544. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1864792>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Lentz, D.R., Azimzadeh, A.M. and Pourkaseb, H., 2015a. Geochemistry and fluid characteristics of the Dalli porphyry Cu–Au deposit, Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 175–191. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.07.029>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Pourkaseb, H., Asadi, S., Saed, M. and Lentz, D.R., 2018. Metal endowment reflected in chemical composition of silicates and sulfides of mineralized porphyry copper systems, Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 223: 36–59. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.11.012>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Sadeghi, M., Lentz, D., Adelpour, M. and Pourkaseb, H., 2015b. Rare earth element signatures of economic and sub-economic porphyry copper systems in Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMB), Iran. *Ore Geology Reviews*, 70: 407–423. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.010>
- Zhao, L., Chen, H., Zhang, L., Li, D., Zhang, W., Wang, C., Yang, J. and Yan, X., 2018. Magnetite geochemistry of the Heijianshan Fe–Cu (–Au) deposit in Eastern Tianshan: Metallogenic implications for submarine volcanic-hosted Fe–Cu deposits in NW China. *Ore Geology Reviews*, 100: 422–440. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.07.022>