



Sagh iron oxide Cu-Ag±Au mineral occurrence, SE of Torbat-e-Heydarieh: evidence of Geology, mineralization, geochemistry and fluid inclusion

Mohammad Saghi¹, Mohammad Hassan Karimpour^{2*} , Ali Asghar Sepahi Gerow³

¹ M.Sc. student, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Professor, Department of Geology and Research Center for Ore Deposits of Eastern Iran, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 15 August 2023
 Revised: 20 September 2023
 Accepted: 20 September 2023

Keywords

Geology
 Mineralization
 Geochemistry
 Iron oxide Cu-Au deposits
 Sagh
 Khaf-Kashmar-Bardaskan
 magmatic belt

*Corresponding author

Mohammad Hassan Karimpour
 ✉ karimpur@um.ac.ir

ABSTRACT

Sagh mineral occurrence is located southeast of Torbat-e-Heydarieh, Khorasan Razavi province, and in the eastern part of the Khaf-Kashmar-Bardaskan magmatic belt. The rock units of area are divided into two categories: intrusions (monzonite, monzodiorite, diorite, and syenite) in the southern half, and conglomerate in the northern half. One square kilometer of continuous mineralization may be observed as stockwork, while there are other locations where it has a linear trend and is supported by intrusive rocks. Primary minerals include specularite, chalcopryrite, pyrite, galena, and sulfosalt, and secondary minerals include malachite, goethite, hematite, chalcocite, caveolite, and anglesite. The mineralization textures are vein-veinlet, disseminated, replacement, and cloform, mainly with a strong chloritic-silicified alteration. The average amount of copper is 0.8 with a maximum of more than 3%, the average amount of silver is 24.4 with a maximum of more than 113 ppm, and the average amount of gold is 44 with a maximum of 250 ppb. The average amount of lead is 761 ppm with a maximum of 0.4% and the average amount of zinc is 430 ppm with a maximum of 0.1%. The formation temperature of ore-forming fluid is between 159 and 328 °C and the salinity is between 7.2 and 16.7 wt.% equiv. NaCl. The mixing of magmatic fluids with meteoric waters with low temperatures and salinity was the most important mechanism of mineral formation. Based on the evidence of tectonic setting, lithology, type of alteration, shape, and state of mineralization, and the presence of abundant specularity with copper, silver, and gold anomalies, probably the Sagh area is iron oxide Cu-Ag±Au type.

How to cite this article

Saghi, M., Karimpour, M.H. and Sepahi Gerow, A.A., 2023. Sagh iron oxide Cu-Ag±Au mineral occurrence, SE of Torbat-e-Heydarieh: evidence of Geology, mineralization, geochemistry and fluid inclusion. *Journal of Economic Geology*, 15(4): 81–114. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2023.83949.1084>



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The geological settings, hydrothermal alteration, and mineralizing fluid compositions vary among the deposits of “IOCG-type” (Hitzman et al., 1992; Sillitoe, 2003). However, they belong to a family of Cu ±Au deposits that include substantial hydrothermal alkali (Na/Ca/K) alteration and a lot of low-Ti iron oxide (magnetite and/or hematite). According to Williams et al. (2005), these deposits likewise exhibit strong structural constraints and a temporal but not a tight geographical relationship with igneous rocks. They formed in rift or subduction settings (Hitzman, 2002) from the Late Archean to the Pliocene (Groves et al., 2010).

Sagh mineral occurrence is located the southeast of Torbat-e-Heydarieh, Khorasan Razavi province, and in the eastern part of the Khaf-Kashmar-Bardaskan magmatic belt (Fig.1). This belt has a high potential for iron oxide copper-gold type deposits and sometimes skarn and porphyry copper (Karimpour, 2004).

The purpose of this research is geological studies and determine the relationship of intrusions with mineralization, examine the total paragenesis sequence, geochemistry, fluid inclusions studies and finally determine the mineralization model, and the formation of mineral occurrences in the Sagh area, for the first time is done.

Materials and methods

To investigate the lithology, alteration, and mineralization of the Sagh area, 61 samples were taken mainly from the intrusions. 32 samples for the thin section and 10 samples for the polished thin section and polished block were selected, prepared, and studied. Then, the geological and alteration-mineralization map with a scale of 1:5000 was prepared in Arc GIS software. Furthermore, for geochemical studies of mineralization zones and veins, 24 samples were taken and sent to the Zarazma laboratory for analysis. Analysis was done by the ICP-OES method. Furthermore, 11 samples were selected for gold analysis with Fire assay, and sent to Zarazma laboratory. Using a cooling and heating system made by Linkam Company, model THM 600, microthermometric tests and salinity determination were performed on 2 wafers of quartz minerals and 31 fluid inclusions at Ferdowsi University of

Mashhad.

Result

The rock units of the area are divided into two categories: subvolcanic and plutonic intrusions in the southern half and conglomerate units in the northern half. Intrusive rocks are composed of monzonite, monzodiorite, diorite and syenite. Mineralization can be seen in the form of stockwork in a wide and continuous zone with an area of about one square kilometer, but in some places, it has a linear trend (NE-SW and NW-SE trend) which is hosted by intrusive rocks. Primary minerals include specularite, chalcopyrite, pyrite, galena, and sulfosalt, and secondary minerals include malachite, goethite, hematite, chalcocite, covellite, and anglesite. Vein-veinlet, disseminated, replacement, and cloform mineralization textures are seen, with a dominant chloritic-silicified alteration. The average concentration of copper is 0.8%, with a maximum concentration of more than 3%, silver is 24.4 ppm, with a maximum concentration of more than 113 ppm, and gold is 44 ppb, with a maximum concentration of more than 250 ppb, according to geochemical data. The average amount of lead is 761 ppm with a maximum of 0.4% and the average amount of zinc is 430 ppm with a maximum of 0.1%. Based on fluid inclusions studies, the formation temperature of ore-forming fluid is between 159 and 328 °C, and the salinity is between 7.2 and 16.7 wt.% equiv. NaCl.

Discussion and Conclusion

Comparing the characteristics of Sagh prospect area with other copper-bearing deposits shows that this area is very similar to iron oxide copper-gold deposits. An empiric definition of IOCG deposits is summarized as having the following five characteristics (Williams et al., 2005): (1) copper, with or without gold, as economic metals, (2) hydrothermal ore styles and strong structural controls, (3) abundant magnetite and/or hematite, (4) Fe oxides with Fe/Ti ratios greater than those in most igneous rocks and bulk crust, and (5) no clear spatial associations with igneous intrusions as, for example, displayed by porphyry and skarn ore deposits. Sillitoe (2003) proposed a close genetic relationship between IOCG deposits in northern Chile, and dioritic plutons. Mineralization in the Sagh area has a close relationship with monzonitic, monzodiorite,

and diorite, which are similar to Kuh-e-Zar, Bahariyeh, Namaq, Fadiheh, Chenar, and other KKBMB deposits (Table 3).

The main alteration related to mineralization in the Sagh is propylitic-silicified, and its propylitic alteration is characterized by chlorite mineral. Extensive chlorite alteration in the Sagh area is similar to Monteverde deposit in Peru (Vila et al., 1998), Mont-del-Aigle in Canada (Simard et al., 2006), Kuh-e-Zar Tarbat Heydarieh (Karimpour et al., 2017), and other IOCG type deposits in the KKBMB belt (Almasi et al., 2015; Taghadosi and Malekzadeh Shafaroudi, 2018; Najmi et al., 2023; Sahebi Khader et al., 2021; Behnamnia et al., 2023) and Qala Zari (Karimpour, 2005) in the Lut block, where the temperature and salinity of ore-fluid are lower than some IOCG type deposits in the world.

Based on the available evidence, the mineral occurrence of the Sagh includes 1) the presence of oxidant intrusions formed in the subduction zone in the KKBMB, 2) mineral paragenesis of specularite, chalcopyrite, pyrite, and galena, 3) structural control of mineralization, 4) copper, silver, gold, and lead geochemical anomaly, 5) chloritic-silicified alteration, which is very compatible with iron oxide copper-silver-gold systems. The location of this area in the KKBMB belt, which has great potential for

IOCG deposits, and near other IOCG deposits that have many similarities (Almasi et al., 2015; Karimpour et al., 2017; Sahebi Khader et al., 2021; Najmi et al., 2023), is a confirmation of this claim.

Although monzonitic, monzodiorite, diorite, and syenitic intrusions are the host rock of mineralization and mineralization is controlled by structures and faults, this magmatism can be represented of source rock at deep. The mineral paragenesis of the Sagh and the abundance of specularite with sulphide minerals of copper, lead, and silver, which are associated with quartz and chlorite, show that mineralization generated from a high fO_2 , Fe-Si rich ore fluid.

The metal originated from an oxidant magmatism from deep, and moved up through faults, joints, and fractures. The mixing of magmatic ore solution with higher temperature and salinity with meteoric water with lower temperature and salinity has finally led to the deposition of sulfides, and the formation of mineralization. Temperature-salinity and alteration evidence show that we are currently in the upper parts of the system, and we need more information. The relevance of this magmatic belt in eastern Iran as a significant metallogenic zone for deposits of copper, gold, and silver is growing as more and more IOCG mineral occurrences are found there.



رخداد معدنی مس - نقره ± طلا همراه با اکسید آهن ساق، جنوب شرقی تربت حیدریه: شواهدی از زمین‌شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمی و سیالات درگیر

محمد ساقی^۱، محمدحسن کریم‌پور^{۲*}، علی اصغر سپاهی‌گرو^۳ 

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>رخداد معدنی ساق در جنوب شرقی تربت حیدریه، استان خراسان رضوی و در بخش شرقی کمربند ماگمایی خواف - کاشمر - بردسکن واقع شده است. واحدهای سنگی منطقه به دو دسته کلی توده‌های نفوذی (مونزونیت، مونزودیوریت، دیوریت و سینیت) در نیمه جنوبی و واحد کنگلومرا در نیمه شمالی تقسیم می‌شود. کانی‌سازی در یک زون پیوسته به وسعت حدود یک کیلومتر مربع به شکل استوک ورک دیده می‌شود؛ ولی در برخی نقاط روند خطی داشته و در توده‌های نفوذی تشکیل شده است. کانی‌های اولیه شامل اسپیکیولاریت، کالکوپیریت، پیریت، گالن و سولفوسالت بوده و کانی‌های ثانویه شامل مالاکیت، گوتیت، همتیت، کالکوسیت، کولیت و آنگلزیت است. بافت کانه‌زایی به صورت رگه - رگچه، پراکنده، جانشینی ثانویه و کلو فرم اغلب همراه با دگرسانی کلریتی - سیلیسی شدید دیده می‌شود. میانگین مقدار مس ۰/۸ با بیشینه بیش از ۳ درصد، میانگین مقدار نقره ۲۴/۴ با بیشینه بیش از ۱۱۳ گرم در تن، میانگین مقدار طلا ۴۴ با بیشینه ۲۵۰ میلی گرم در تن، میانگین مقدار سرب ۷۶۱ گرم در تن با بیشینه ۰/۴ درصد و میانگین مقدار روی ۴۳۰ گرم در تن با بیشینه ۰/۱ درصد است. دمای تشکیل سیال کانه‌ساز بین ۱۵۹ تا ۳۲۸ درجه سانتی‌گراد و شوری بین ۷/۲ تا ۱۶/۷ درصد وزنی است. مخلوط‌شدگی سیال ماگمایی با آب‌های جوی با دما و شوری پایین مهم‌ترین سازوکار تشکیل کانی‌سازی بوده است. بر اساس شواهد موقعیت زمین‌ساختی، سنگ‌شناسی، نوع دگرسانی، شکل و حالت کانی‌سازی، وجود اسپیکیولاریت فراوان همراه با آنومالی مس، نقره و طلا، احتمالاً کانی‌سازی در منطقه ساق از نوع مس - نقره ± طلا همراه با اکسید آهن است.</p>	<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹</p> <p>واژه‌های کلیدی</p> <p>زمین‌شناسی کانی‌سازی زمین‌شیمی کانسارهای مس-طلا همراه با اکسید آهن ساق کمربند ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن</p> <p>نویسنده مسئول</p> <p>محمدحسن کریم‌پور karimpur@um.ac.ir </p>

استناد به این مقاله

ساقی، محمد؛ کریم‌پور، محمدحسن و سپاهی‌گرو، علی اصغر، ۱۴۰۲. رخداد معدنی مس - نقره ± طلا همراه با اکسید آهن ساق، جنوب شرقی تربت حیدریه: شواهدی از زمین‌شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمی و سیالات درگیر. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۵(۴): ۸۱-۱۱۴. <https://doi.org/10.22067/econg.2023.83949.1084>

مقدمه

کانسارهای اکسید آهن همراه با مس - طلا، نخستین بار توسط هیتzman و همکاران (Hitzman et al., 1992) معرفی شد و در ادامه توسط پژوهشگران بعدی توصیف و دسته بندی شدند. ذخایر IOCG بین ۱ تا ۵ درصد تولیدات جهانی مس و طلا را شامل می شوند و بعد از ذخایر پورفیری بیشترین ذخایر مس و طلا را دارا هستند. هیتzman (2002) این نوع کانسارها را به دو گروه نوع مگنتیت - آپاتیت و کانسارهای اکسید آهن همراه با مس - طلا طبقه بندی کرد. کریم پور (Karimpour, 2004) کانسارهای اکسید آهن را به دو گروه نوع مگنتیت و نوع مس - طلای همراه با اکسید آهن تقسیم کرده است. در این تقسیم بندی کانسارهای نوع مگنتیت به سه زیر دسته ذخایر مگنتیت - آپاتیت، مگنتیت - عناصر نادر خاکی و حاوی مگنتیت تفکیک شده است. از طرفی کانسارهای نوع مس - طلای همراه با اکسید آهن نیز به سه زیر دسته ذخایر IOCG همراه با مگنتیت (مس - طلا - اورانیوم - عناصر نادر خاکی)، IOCG همراه با مگنتیت (مس - طلا) و IOCG همراه با اسپیکولاریت (مس - طلا) تقسیم شده است. کریم پور و همکاران (Karimpour et al., 2006) این تقسیم بندی را کامل تر کرده و قسمت IOCG را به ۶ قسمت افزایش می دهند: ۱- ذخایر IOCG نوع اسپیکولاریت حاوی طلا، ۲- ذخایر IOCG نوع اسپیکولاریت حاوی مس و طلا، ۳- ذخایر IOCG نوع اسپیکولاریت - مگنتیت حاوی مس و طلا، ۴- ذخایر IOCG نوع مگنتیت حاوی مس و طلا، ۵- ذخایر IOCG نوع مگنتیت حاوی طلا و ۶- ذخایر IOCG نوع اسپیکولاریت - مگنتیت حاوی مس، طلا، اورانیوم و عناصر نادر خاکی. به طور کلی، ذخایر IOCG دارای ویژگی های متمایز کننده و کلی زیر هستند (Hitzman et al., 1992; Hitzman, 2002; Barton and Johnson, 1996; Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Chen et al., 2011):

(۱) ذخایری با محتوای تیتانیم پایین هستند که دارای دو کانه اصلی مگنتیت، اسپیکولاریت (هماتیت) و یا هر دو نوع هستند،

(۲) ذخایری دارای مس هستند که می توانند دارای طلا یا بدون آن باشند،

(۳) دارای طیف گسترده ای از دگرسانی گرمابی هستند،

(۴) ذخایری با کنترل ساختاری بسیار بالا هستند و تشکیل ذخیره ارتباط نزدیکی با این ساختارها دارد،

(۵) تشکیل ذخیره مرتبط با توده های نفوذی بوده؛ ولی موقعیت فضایی و مکانی توده های نفوذی با محل ذخیره به طور آشکار مشخص نیست و رابطه مکانی واضحی با ذخیره وجود ندارد،

(۶) دارای سنگ میزبان های متنوعی از گرانیت تا واحدهای آندزیتی و سنگ های آذر آواری هستند،

(۷) این ذخایر در محیط های زمین ساختی متنوعی از ریفت درون قاره ای تا زون های فرورانش تشکیل شده اند و

(۸) در گستره وسیع سنی یعنی از آرکن تا پلیوسن مشاهده می شوند.

منطقه اکتشافی ساق در جنوب شرقی تربت حیدریه در استان خراسان رضوی بین طول های جغرافیایی ۴۹° ۵۹' و ۳۹° ۵۱' ۵۹° و عرض های جغرافیایی ۴۵° ۵۱' ۳۵" و ۵۶° ۵۱' ۳۵" قرار دارد. منطقه ساق در شرق کمربند ماگمایی خواف - کاشمر - بردسکن واقع شده است (شکل ۱- A). این کمربند ماگمایی اغلب از سنگ های آتشفشانی اسیدی تا حد واسط و گاهی مافیک تشکیل شده که توده های نفوذی با سن ائوسن میانی در آن نفوذ کرده اند. شواهد زمین شیمیایی نشان می دهد که ماگماتیسم این کمربند در زون فرورانش حاشیه قاره تشکیل شده است (Karimpour et al., 2006; Malekzadeh Shafaroudi et al., 2013; Golmohammadi et al., 2014; Golmohammadi et al., 2015; Almasi et al., 2015; Shafaii Moghaddam et al., 2015; Karimpour et al., 2017; Hossieni et al., 2018).

این کمربند، پتانسیل بالایی برای کانسارهای نوع IOCG و گاهی اسکارن و مس پورفیری دارد (Karimpour, 2004). از مهم ترین رخداد های کانه زایی KKBMB می توان به کانی سازی اسکارن آهن سنگان (Golmohammadi et al., 2015)، ذخیره IOCG

شوری بر روی ۲ مقطع دو برصیقل از کانی کوارتز و ۳۱ سیال درگیر انجام شد. آزمایش‌های مربوطه با استفاده از یک دستگاه سردکننده و گرم‌کننده ساخت شرکت لینکام مدل THM 600 در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. دقت کار دستگاه در مرحله سرد و گرم کردن ± 1 درجه سانتی‌گراد و محدوده حرارتی دستگاه بین (۱۹۰-) تا (۶۰۰+) درجه سانتی‌گراد است. مقدار شوری در سامانه $H_2O-NaCl$ با استفاده از نرم‌افزار (Lecumberri-Sanchez) HOKIEFLINCS- $H_2O-NaCl$ (Steele-MacInnis et al., 2012; et al, 2012) محاسبه شد.

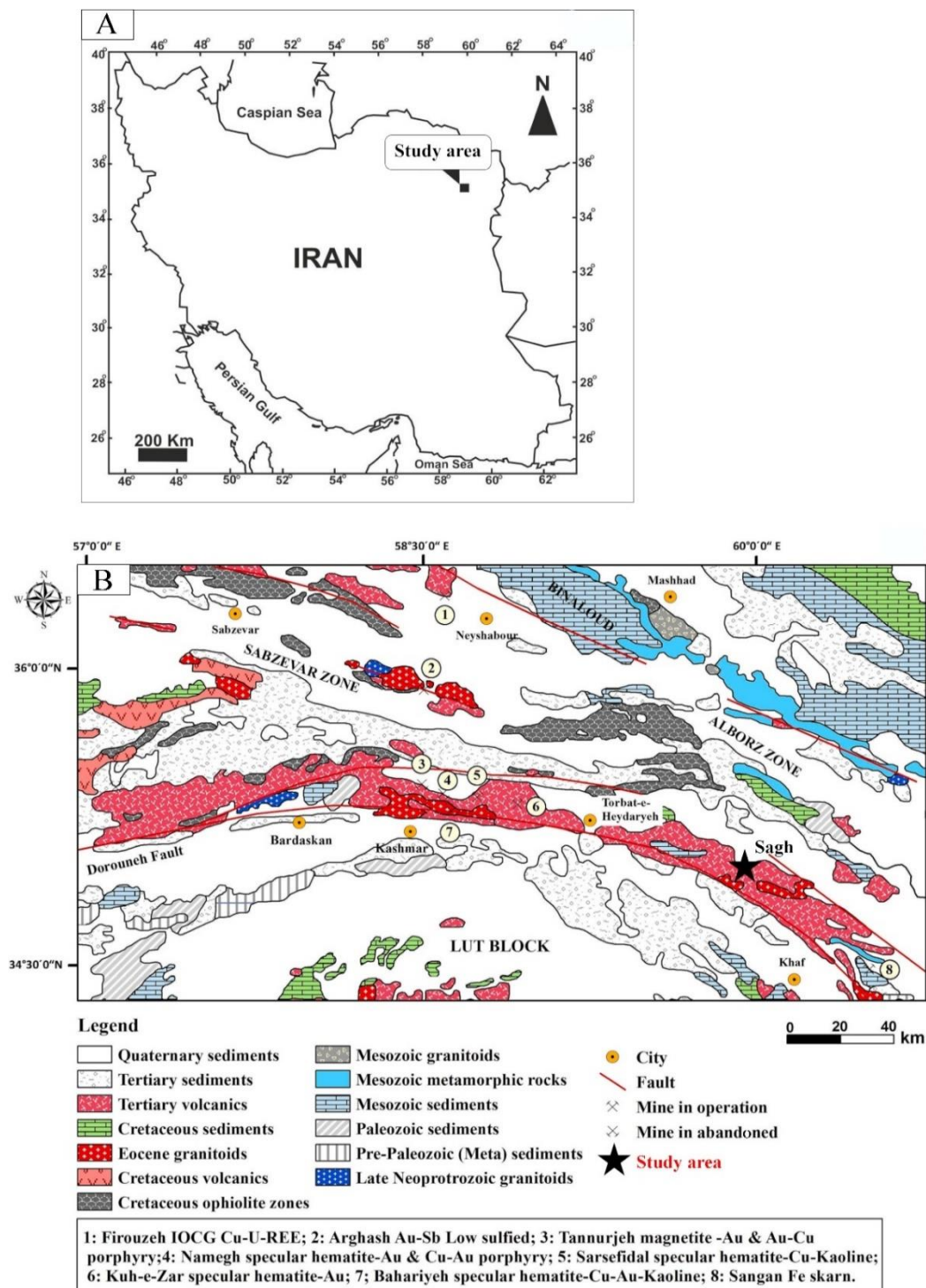
زمین‌شناسی

کمربند ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن در جنوب اقیانوس‌های سبزواری-تربت حیدریه در طی کرتاسه تا پلیو-کواترنر گسترش یافته است که از یک سو تا افغانستان و از سوی دیگر تا بیارجمند ادامه دارد. این کمربند طولی بیش از ۳۵۰ کیلومتر و عرض متغیر از ۱۵ تا ۹۰ کیلومتر دارد. کمربند ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن با گسترش شرقی-غربی و خمیدگی به سوی شمال، در شمال گسل درونه (گسل کویر بزرگ) جای گرفته است. این کمربند ماگمایی اغلب از سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط و گاهی مافیک با سن ترشیاری تشکیل شده که توده‌های گرانیتوئیدی سری مگنتیت نوع I ائوسن با ترکیب اغلب گرانیت تا مونزونیت در آنها نفوذ کرده‌اند. فعالیت‌های ماگمایی در KKBMB در قالب فوران‌های آتشفشانی با تشکیل سنگ‌هایی نظیر توف‌های خاکستری تیره و گاه ایگنمبریتی شروع شده و با تشکیل گدازه‌های آندزیتی ادامه یافته است. سپس بر روی این واحدها، ضخامت زیادی از توف‌های برشی-ماسه‌ای، برش‌های آتشفشانی و ایگنمبریت قرار گرفته است و آخرین محصول فعالیت‌های آتشفشانی در این زمان گدازه‌هایی با ترکیب آندزیت-تراکی آندزیت و آلکالی‌بازالت است (Karimpour et al., 2006).

کوه زر تربت حیدریه (Karimpour et al., 2017) در شرق کمربند، طلا-مس پورفیری تنورچه (Karimpour et al., 2018; Hossieni et al., 2006)، مگنتیت-اسپیکولاریت-مس-طلای شهرک (Yousefi et al., 2008)، منطقه اکتشافی چنار (Behnamnia et al., 2023)، منطقه IOCG فدیبه (Sahebi Khader et al., 2021)، آهن-مس نامق (IOC) در شمال شرق کاشمر (Taghadosi and Malekzadeh, 2018)، کانی‌سازی‌های نوع IOCG شمال شرق کاشمر (Almasi et al., 2015)، کانسار IOCG بهاریه (Najmi et al., 2023) و ذخایر غیرفلزی مهمی چون کائولن بهاریه، اوچ پلنگ و سرسفیدال اشاره کرد (شکل ۱-B). هدف از این پژوهش، بررسی‌های زمین‌شناسی و تعیین ارتباط توده‌های نفوذی با کانی‌سازی، بررسی مجموع توالی هم‌یافتی، زمین‌شیمی ماده معدنی و بررسی‌های سیالات درگیر و در نهایت تعیین مدل کانی‌سازی و نحوه تشکیل رخداد معدنی در محدوده ساق است که برای نخستین بار انجام شده است.

روش مطالعه

برای بررسی سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی منطقه اکتشافی ساق، تعداد ۶۱ نمونه اغلب از نیمه جنوبی محدوده و توده‌های نفوذی عمیق تا نیمه عمیق برداشت شد. تعداد ۳۲ نمونه سنگی برای مقطع نازک و ۱۰ نمونه برای مقطع نازک صیقل و بلوک صیقل انتخاب، تهیه و مطالعه شدند. سپس نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی-کانی‌سازی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ در نرم افزار Arc GIS تهیه شد. همچنین برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی زون‌ها و رگه‌های کانی‌سازی، تعداد ۲۴ نمونه خرده سنگی برداشت و برای تجزیه به آزمایشگاه زرآما ارسال شد. تجزیه به روش ICP-OES (روش آماده‌سازی نمونه چهار اسید بوده است) انجام شد. همچنین پس از بررسی نتایج آنالیزها و بر اساس مقادیر عناصر مس و نقره، تعداد ۱۱ نمونه خرده سنگی برای تجزیه طلا با Fire assay انتخاب شده و به آزمایشگاه زرآما ارسال شد. بررسی‌های دماسنجی و تعیین



شکل ۱. A: موقعیت منطقه اکتشافی ساق در شمال شرق ایران و B: نقشه زمین شناسی ساده شده کمربند ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن (KKBMB) و موقعیت محدوده ساق بر روی آن

Fig. 1. A: Location of Sagh prospect area in northeast of Iran, and B: Simplified geological map of Khaf-Kashmar-Bardaskan magmatic belt (KKBMB) and location of Sagh area on it

بر اساس بررسی‌های پترولوژیکی در بخش‌های مختلف KKBMB، توده‌های نفوذی از ذوب بخشی گارنت-اسپینل لرزولیت گوه گشته‌ای در بالای اسلب اقیانوسی نئوتتیس فرورانده شده به زیر صفحه جنوب غرب اوراسیا تشکیل شده و ضمن صعود به سمت بالا اندکی با پوسته بالایی آلوده شده‌اند. سن توده‌ها با استفاده از روش U-Pb در کانی زیرکن بین ۳۹/۳ تا ۴۲ میلیون سال (اوسن میانی) تعیین شد (Karimpour et al., 2006; Malekzadeh Shafaroudi et al., 2013; Golmohammadi et al., 2014; Almasi et al., 2015; Golmohammadi et al., 2015; Shafaii Moghaddam et al., 2015; Karimpour et al., 2017; Hossieni et al., 2018).

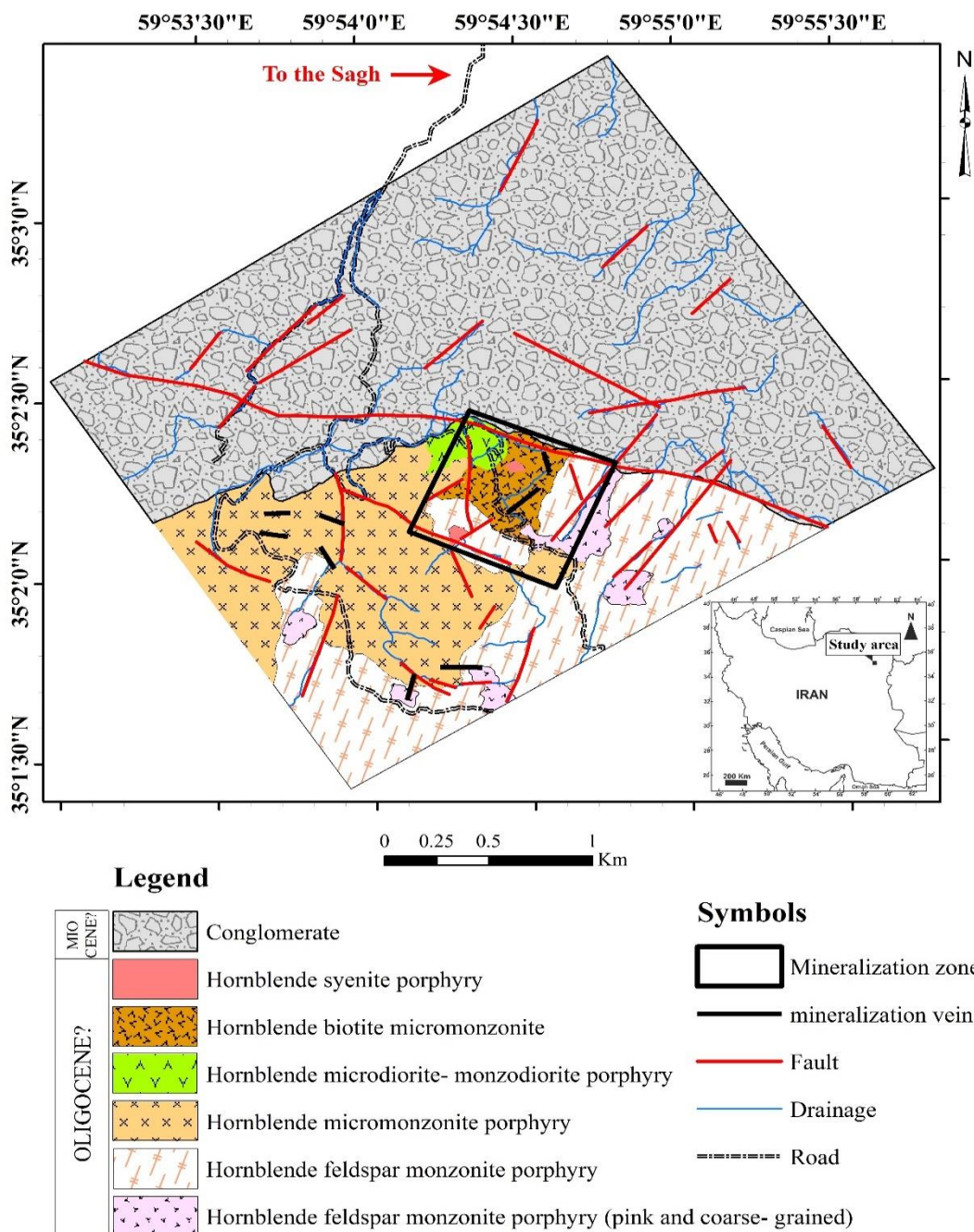
بر اساس بررسی‌های صحرائی و میکروسکوپی، واحدهای سنگی محدوده اکتشافی ساق به دو دسته کلی توده‌های نفوذی عمیق و نیمه عمیق در نیمه جنوبی و واحد رسوبی کنگلومرا در نیمه شمالی تقسیم می‌شود. از لحاظ سنی، توده‌های نفوذی عمیق و نیمه عمیق از قدیم به جدید عبارتند از: هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری (درشت بلور به رنگ صورتی)، هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری، هورنبلند میکرومونزونیت پورفیری، هورنبلند میکرودیوریت-مونزودیوریت پورفیری، هورنبلند بیوتیت میکرومونزونیت و هورنبلند سینیت پورفیری. هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری (درشت بلور به رنگ صورتی) در جنوب، جنوب شرقی و جنوب غربی منطقه مورد بررسی رخنمون دارد (شکل ۲) این واحد در صحرا ریخت شناسی صخره ساز دارد و ویژگی آن بافت پورفیری تا سری ایت و وجود فلدسپارهای سفید تا صورتی بسیار درشت (تا ۵ سانتی متر) در زمینه دانه درشت است (شکل ۳-A). پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار و کوارتز در نمونه دستی دیده می‌شود.

هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری یکی از گسترده ترین توده‌های نفوذی نیمه عمیق منطقه ساق است که در جنوب و به سمت جنوب شرقی و غربی رخنمون دارد (شکل ۲). این واحد در صحرا ریخت شناسی صخره ساز دارد و ویژگی آن بافت پورفیری

با زمینه خاکستری دانه ریز و وجود فلدسپارهای سفید نسبتاً درشت (تا ۲ سانتی متر) است (شکل ۳-B). هورنبلند میکرومونزونیت پورفیری در مرکز و غرب منطقه ساق قرار دارد. این مجموعه در واحد فلدسپار مونزونیت پورفیری نفوذ کرده است (شکل ۲). این واحد دارای ریخت شناسی صخره ساز و ویژگی آن بافت پورفیری است. دگرسانی پروپلیتیک متوسط در بخش‌های مرکزی این توده مشاهده می‌شود؛ اما بخش زیادی از این مجموعه دارای دگرسانی ضعیف است (شکل ۳-C). آثاری از کانی سازی اسپکیولاریت و گاهی مالاکیت در این واحد دیده می‌شود. هورنبلند میکرودیوریت-مونزودیوریت پورفیری در مرکز محدوده مورد بررسی رخنمون دارد (شکل ۲). این واحد در صحرا دارای ریخت شناسی تپه ماهور و دارای بافت پورفیری است. دگرسانی پروپلیتیک-سیلیسی شدید این توده را تحت تأثیر قرار داده است و یکی از مهم ترین واحدهای سنگی مرتبط با کانی سازی است (شکل ۳-D). هورنبلند بیوتیت میکرومونزونیت دارای بافت گرانولار با ریخت شناسی صخره ساز در بخش مرکزی محدوده مورد بررسی قرار دارد (شکل ۳-E و شکل ۲). کلریت، اپیدوت و کوارتز فراوان در این واحد دیده می‌شود. دگرسانی پروپلیتیک-سیلیسی شدید این توده را نیز تحت تأثیر قرار داده است. این واحد یکی از دیگر واحدهای سنگی مهم مرتبط با کانی سازی است. هورنبلند سینیت پورفیری دو رخنمون کوچک در مرکز منطقه ساق دارد (شکل ۲). این واحد دارای بافت پورفیری است. به دلیل داشتن درشت بلورهای آلکالی فلدسپار فراوان رنگ این توده صورتی رنگ است. کانی سازی در این واحد نیز دیده می‌شود (شکل ۳-F).

بخش اعظم منطقه در نیمه شمالی منطقه ساق پوشیده از کنگلومراست (شکل ۲). این واحد ریخت شناسی بسیار خشن و صخره ساز دارد (شکل ۳-G). اندازه قطعه‌های کنگلومرا از چند سانتی متر تا چند ده سانتی متر متغیر بوده و شامل انواع توده‌های نفوذی عمیق و نیمه عمیق است (شکل ۳-H). از آنجایی که توده‌های نفوذی مختلف در کنگلومرا دیده می‌شود، کنگلومرا

جوان تر از همه توده‌هاست. ضخامت زیاد کنگلومرا و رخنمون توده‌های نفوذی در سطح نشان می‌دهد که منطقه حداقل ۱/۵ تا ۲ کیلومتر تحت تأثیر فرسایش قرار گرفته است.



شکل ۲. نقشه زمین شناسی منطقه اکتشافی ساق

Fig. 2. Geological map of Sagh prospect area



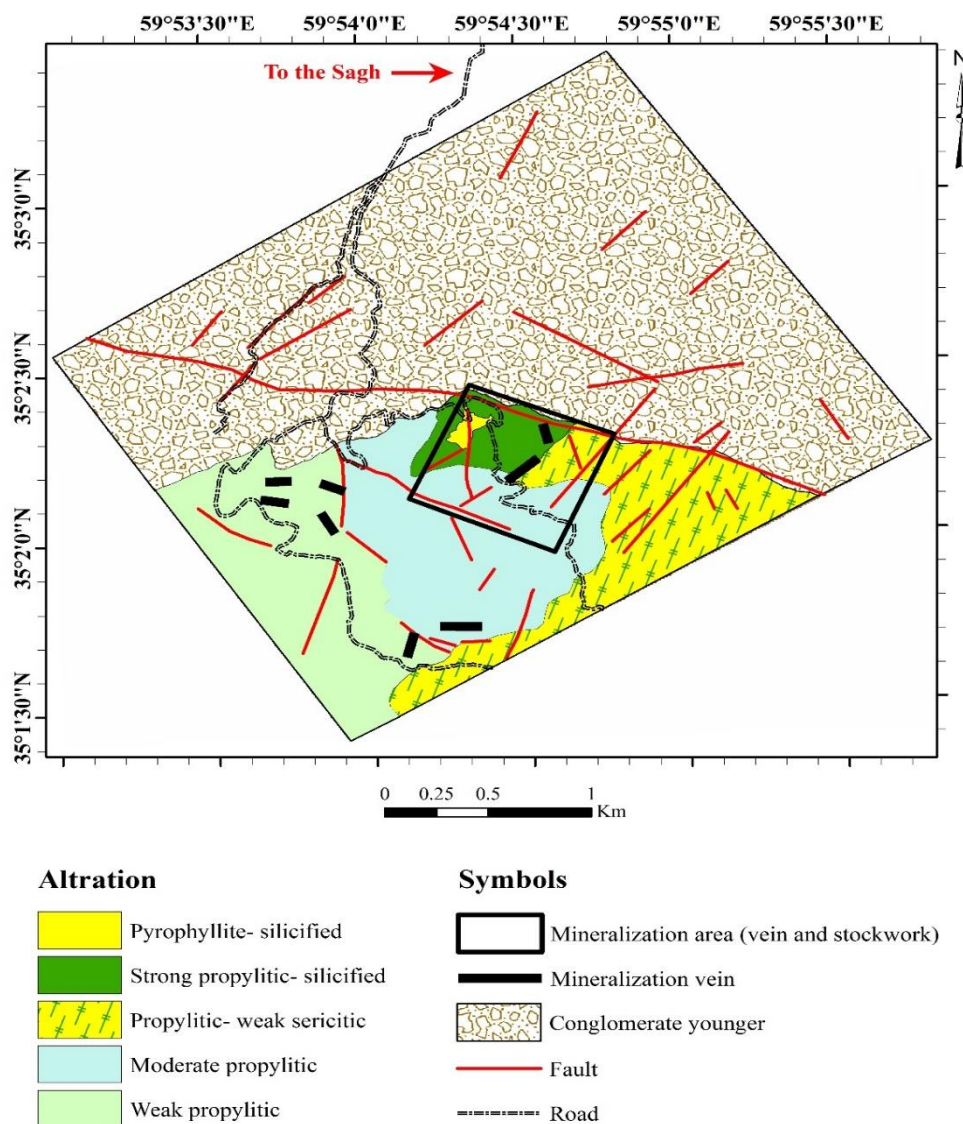
شکل ۳. نمایی از واحدهای سنگی مختلف منطقه اکتشافی ساق، A: هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری (صورتی و درشت بلور) (دید به جنوب غرب)، B: هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری (دید به جنوب)، C: هورنبلند مونزونیت پورفیری (دید به غرب)، D: هورنبلند میکرودیوریت-مونزودیوریت پورفیری (دید به شمال غرب)، E: هورنبلند بیوتیت میکرومونزونیت (دید به شمال شرق)، F: هورنبلند سینیت پورفیری (دید به شرق)، G: کنگلومرا (دید به شمال شرق) و H: قطعه‌های توده نفوذی داخل کنگلومرا

Fig. 3. A view of different rock types of Sagh prospect area. A: Hornblende feldspar monzonite porphyry (pink and coarse-grained) (view to the SW), B: Hornblende feldspar monzonite porphyry (view to the S), C: Hornblende monzonite porphyry (view to the W), D: Hornblende microdiorite-monzodiorite porphyry (view to the NW), E: Hornblende biotite micromonzonite (view to the NE), F: Hornblende syenite porphyry (view to the E), G: Conglomerate (view to the NE), and H: intrusion fragments within conglomerate.

دگرسانی

بر اساس بررسی های صحرایی، دگرسانی فقط در نیمه جنوبی محدوده اکتشافی ساق و منطق بر توده های نفوذی نیمه عمیق به ویژه قسمت جنوب شرقی دیده می شود. این زون های دگرسانی به

۵ دسته زیر تقسیم می شود (شکل ۴): ۱- پیروفیلیت- سیلیسی، ۲- پروپیلیتیک- سیلیسی شدید، ۳- پروپیلیتیک- سربستیک ضعیف، ۴- پروپیلیتیک متوسط و ۵- پروپیلیتیک ضعیف.



شکل ۴. نقشه دگرسانی- کانی سازی منطقه اکتشافی ساق

Fig. 4. Alteration-mineralization map of Sagh prospect area

است (شکل ۵-۵A). عرض زون دگرسانی شده حدود ۲۰ الی ۴۰ متر و طول آن نزدیک به ۲۵۰ متر است که درون زون گسلی

زون دگرسانی پیروفیلیت- سیلیسی تقریباً در مرکز محدوده، یک ذخیره نیمه اقتصادی از ماده معدنی غیرفلزی را به وجود آورده

که بیشتر واحدهای آذرین را تحت تأثیر قرار داده است، دگرسانی پروپلیتیک متوسط است. این زون دگرسانی در جنوب محدوده و منطبق بر توده‌های هورنبلند میکرومونزونیت پورفیری، هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری و هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری (درشت بلور به رنگ صورتی) گسترش یافته است (شکل ۴). کانی‌های اصلی زون پروپلیتیک متوسط شامل کلریت، اپیدوت و کلسیت هستند (شکل ۵-E). کلریت‌های موجود اغلب از تجزیه کانی هورنبلند (بین ۲۰ تا ۴۵ درصد) همراه با اپیدوت (کمتر از ۱۰ درصد) ایجاد شده‌اند. کلسیت نیز از تبدیل درشت بلورهای هورنبلند (حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد) و پلاژیوکلاز (حدود ۲۵ تا ۵۰ درصد) به دست آمده است.

بخشی از رگه - رگچه‌های کانهدار همراه با زون پروپلیتیک ضعیف رخ داده است. این زون دگرسانی در جنوب و جنوب غربی محدوده و منطبق بر توده هورنبلند میکرومونزونیت پورفیری، هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری و هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری (درشت بلور به رنگ صورتی) قابل مشاهده است (شکل ۴). مهم‌ترین شاخصه این زون نبود اپیدوت و حضور کلریت و کلسیت به عنوان کانی‌های ثانویه این زون است. کانی کلریت از تبدیل هورنبلندها (کمتر از ۵ درصد) و کلسیت در نتیجه تجزیه هورنبلند و پلاژیوکلاز (کمتر از ۵ تا ۱۰ درصد) به وجود آمده است (شکل ۵-F).

کانی‌سازی

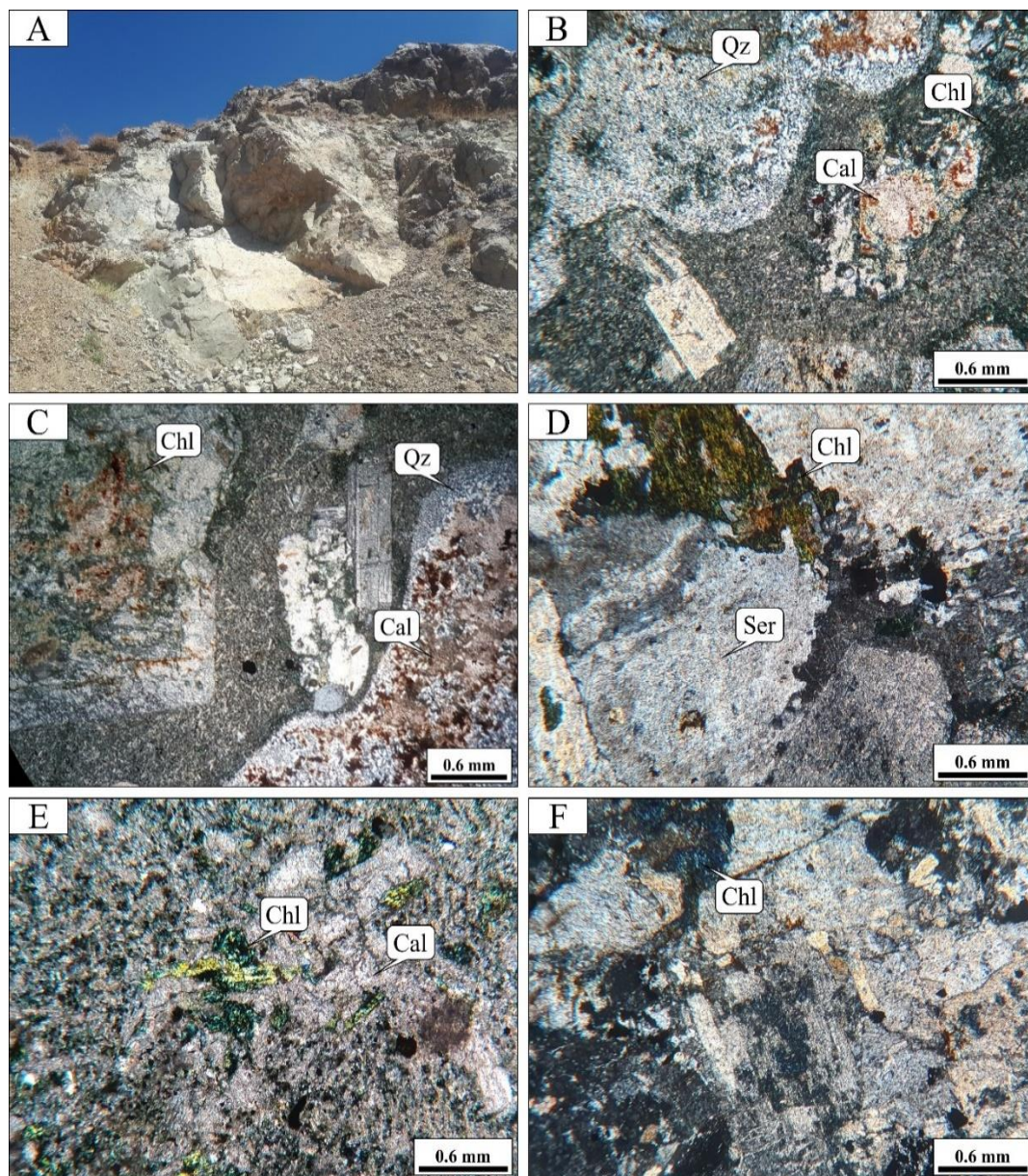
کانی‌سازی در محدوده اکتشافی ساق با کنترل ساختاری فقط در نیمه جنوبی محدوده و به میزبانی توده‌های نفوذی نیمه عمیق و عمیق هورنبلند میکرودیوریت - مونزودیوریت پورفیری، هورنبلند بیوتیت میکرومونزونیت، هورنبلند سینیت پورفیری و کمی هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری (درشت بلور به رنگ صورتی) رخ داده است. روند گسل‌های منطقه اغلب شمال شرق - جنوب غرب و شمال غرب - جنوب شرق است.

واقع شده است. تجزیه پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که پهنه رسی شده محدوده اکتشافی ساق دارای ترکیب کانی‌شناسی پیروفیلیت، دیاسپور و جزئی کوارتز است.

زون پروپلیتیک - سیلیسی شدید مهم‌ترین دگرسانی همراه با کانی‌سازی است که توده‌های هورنبلند میکرودیوریت - مونزودیوریت و میکرومونزونیت پورفیری را تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۴). کلریت، اپیدوت، کلسیت و کوارتز کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این زون هستند. کلریت اغلب در نتیجه جان‌نشینی و تبدیل هورنبلندها ایجاد شده است و به صورت رگچه‌های ظریف در متن سنگ مشاهده می‌شود (۲۰ تا ۲۵ درصد). اپیدوت‌های موجود از تبدیل پلاژیوکلاز و هورنبلندهای اولیه ایجاد شده است و در نزدیکی کانی‌های سولفیدی در متن سنگ نیز حضور دارد (کمتر از ۱ درصد). کلسیت در نتیجه تجزیه شدگی کانی‌های هورنبلند، پلاژیوکلاز و گاه آلکالی فلدسپار تشکیل شده است (۱۰ تا ۱۵ درصد). کوارتز ثانویه با فراوانی (۲۰ تا ۲۵ درصد) به صورت تجمعات سیلیسی ریزدانه (کمتر از ۰/۱ میلی‌متر) در متن سنگ و رگچه‌ای قابل رؤیت است (شکل ۵-B و C).

گسترده‌گی دگرسانی پروپلیتیک - سرسیتیک ضعیف در منطقه اکتشافی ساق از زون پروپلیتیک - سیلیسی شدید بیشتر بوده و رخنمون‌های آن در جنوب و جنوب شرقی محدوده و منطبق بر توده‌های هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری و هورنبلند فلدسپار مونزونیت پورفیری (درشت بلور به رنگ صورتی) قابل رؤیت است (شکل ۴). کانی‌های کلریت، کلسیت و به طور جزئی سرسیت کانی‌های اصلی این زون محسوب می‌شوند. بخشی از کانی‌های فلدسپاتی این واحد سنگی مانند آلکالی فلدسپار و پلاژیوکلاز به سرسیت تبدیل شده‌اند و درشت بلورهای فلدسپاتی نیز بین ۵ تا ۱۰ درصد سرسیتی شده‌اند. پلاژیوکلاز و هورنبلند بین ۵ تا ۲۰ درصد به کانی کلریت و کمتر از ۱۰ درصد به کلسیت تبدیل شده‌اند (شکل ۵-D).

یکی از گسترده‌ترین دگرسانی‌های موجود در منطقه اکتشافی ساق

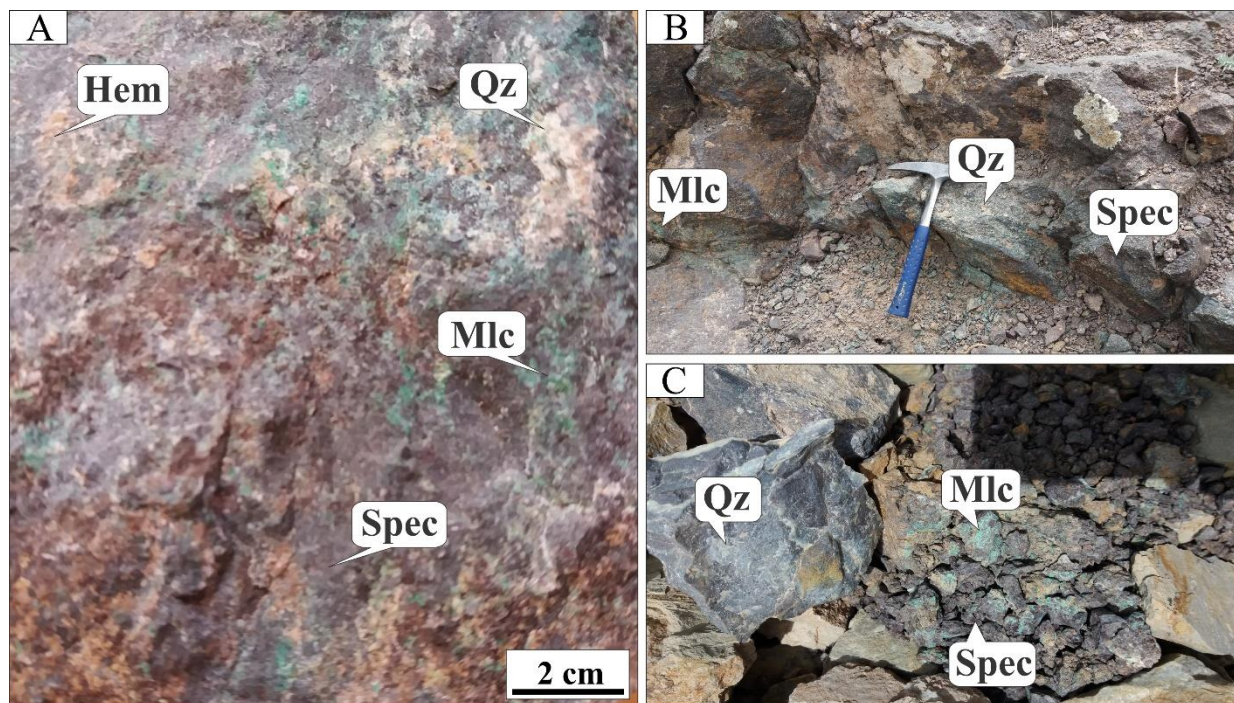


شکل ۵. نمایی از دگرسانی‌های مختلف منطقه اکتشافی ساق. A: زون پیروفیلیت-سیلیسی در صحرا (دید به شمال شرق)، B: کلریت، کلسیت و کوارتز در زون پروپیلیتیک-سیلیسی شدید (XPL)، C: تبدیل پلاژیوکلاز به کلریت و کلسیت در زون پروپیلیتیک-سیلیسی شدید (XPL)، D: کلریت و کلسیت در زون پروپیلیتیک-سرسیتیک ضعیف (XPL)، E: کلریت و کلسیت در زون پروپیلیتیک متوسط (XPL) و F: کلریت در زون پروپیلیتیک ضعیف (XPL). علائم اختصاری کانی‌ها از ویتی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Chl: کلریت، Qz: کوارتز، Cal: کلسیت، Ser: سریسیت).

Fig. 5. A view of different alteration types of Sagh prospect area. A: Pyrophyllite-silicified zone in field (view to the NE), B: Chlorite, calcite and quartz in strong propylitic-silicified zone (XPL), C: Plagioclase altered to chlorite and calcite in strong propylitic-silicified zone (XPL), D: Chlorite and calcite in propylitic-weak sericitic zone (XPL), E: Chlorite and calcite in moderate propylitic (XPL), and F: Chlorite in weak propylitic zone (XPL). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Chl: chlorite, Qz: quartz, Cal: calcite, Ser: sericite).

جنوب شرق دیده می شود (شکل ۴).
کانی سازی اغلب به صورت رگه- رگچه، پراکنده، جانمایی ثانویه و کلو فرم دیده می شود. کانی های اولیه شامل اسپکیولاریت، کالکوپیریت، پیریت، گالن و سولفوسالت بوده و کانی های ثانویه شامل مالاکیت، گوتیت، هماتیت، کالکوسیت، کولیت و آنگلیزیت است. مهم ترین دگرسانی همراه با کانی سازی زون پروپیلیتیک- سیلیسی شدید است (شکل ۶- A تا C).

کانی سازی در منطقه اغلب یک زون وسیع و پیوسته به وسعت حدود یک کیلومتر مربع را به شکل استوک ورک دربر می گیرد؛ ولی در برخی نقاط روند خطی داشته و از زون های گسلی پیروی می کند. کانی سازی در بخش استوک ورک به طول ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر و ضخامت تا ۴۰ متر با امتداد شمال شرق- جنوب غرب دیده می شود. تراکم رگچه ها در این بخش تا ۲۰ رگچه در متر می رسد؛ اما در بخش های رگه ای کانی سازی تا طول ۵۰ متر و ضخامت تا حدود ۵ متر با روندهای شمال شرق- جنوب غرب و شمال غرب-



شکل ۶. نمای صحرایی از کانی سازی های موجود در منطقه اکتشافی ساق. A: مالاکیت و اسپکیولاریت همراه با اکسید آهن ثانویه و کوارتز، B: مالاکیت همراه با اکسید آهن ثانویه و کمی اسپکیولاریت و C: مالاکیت همراه با اسپکیولاریت و کوارتز. علائم اختصاری کانی ها از ویتنی و اوانز اقتباس شده است (Whitney and Evans, 2010) (Spec: اسپکیولاریت، Qz: کوارتز، Hem: هماتیت، Mlc: مالاکیت).

Fig. 6. A view of mineralization in Sagh prospect area. A: Malachite and specularite associated with secondary iron oxide and quartz, B: Malachite associated with secondary iron oxide and minor specularite, and C: Malachite associated with specularite and quartz. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Spec: specularite; Qz: quartz, Hem: hematite, Mlc: malachite)

شناسایی شده در منطقه اکتشافی ساق است. همچنین در قسمت هایی که رگچه ها دارای تراکم بالاتری هستند، یکدیگر را

بافت ماده معدنی
رگه- رگچه ای: بافت رگه- رگچه ای اصلی ترین و مهم ترین بافت

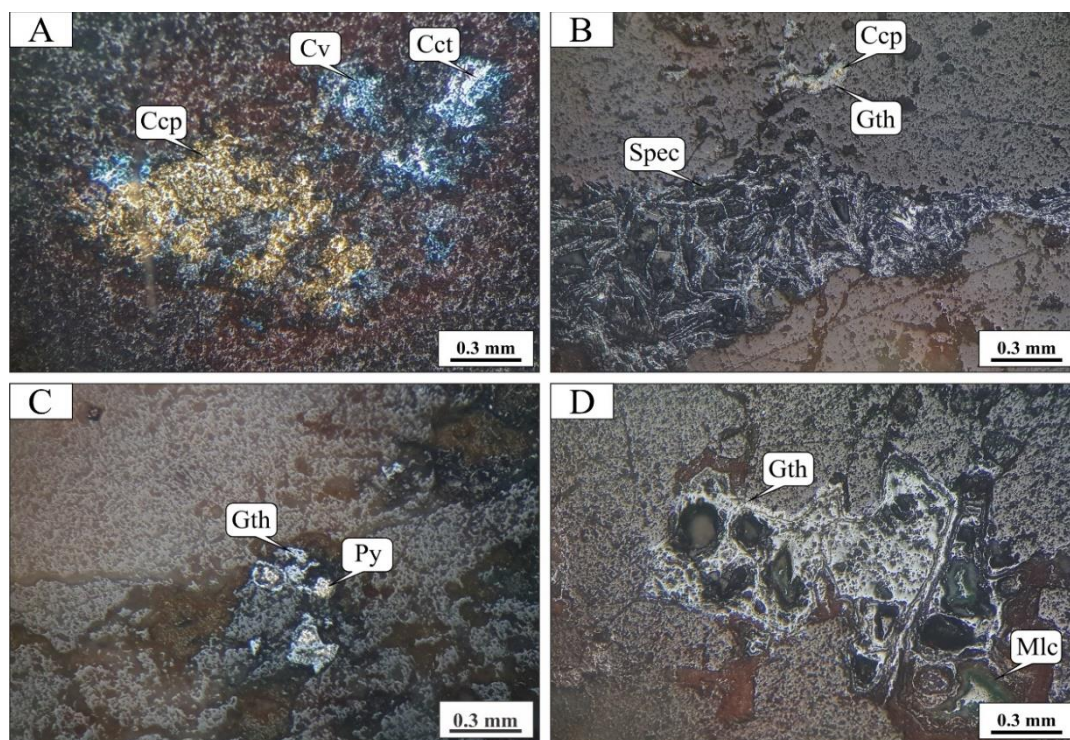
تشکیل شده‌اند. این بافت گسترش چندانی در منطقه مورد بررسی نداشته و تنها در اطراف رگه‌های کانی‌سازی قابل مشاهده است (شکل ۷- C).

جانشینی: در منطقه اکتشافی ساق کولیت، کالکوسیت، مالاکیت و گوتیت اغلب جانشین کالکوپیریت، گوتیت همچنین جانشین پیریت و انگلریت جانشین گالن شده است (شکل ۷- A تا C).

کلوفرم: این بافت اغلب در بخش اکسیدان منطقه ساق حضور دارد. بافت کلوفرم در کانی گوتیت مشاهده می‌شود (شکل ۷- D).

به صورت داربستی قطع کرده و به نوعی حالت بافت استوک‌ورک به خود می‌گیرند. بافت رگه-رگچه‌ای در واحد هورنبلند بیوتیت میکروموزونیت حضور پررنگ‌تری دارد. سه نوع رگه-رگچه در زون کانی‌سازی منطقه اکتشافی ساق قابل تفکیک است که عبارتند از: (۱) کوارتز+ اسپکیولاریت+ کالکوپیریت± گالن± سولفوسالت، (۲) کوارتز+ اسپکیولاریت+ کالکوپیریت+ پیریت و (۳) کوارتز+ کالکوپیریت (شکل ۷- A و B).

دانه پراکنده: بافت دانه‌پراکنده در بخش‌هایی از منطقه اکتشافی ساق داخل توده‌های نفوذی قابل مشاهده است. کانی‌های پیریت، کالکوپیریت و جزئی اسپکیولاریت به صورت پراکنده



شکل ۷. انواع بافت در منطقه اکتشافی ساق. A: رگچه اسپکیولاریت (PPL)، B: رگچه کالکوپیریت‌دار و تبدیل آن به کولیت و کالکوسیت (PPL) C: بافت پراکنده پیریت و تبدیل آن به گوتیت (PPL) و D: بافت کلوفرم در گوتیت (PPL). علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Spec: اسپکیولاریت، Ccp: کالکوپیریت، Gth: گوتیت، Cv: کولیت، Cct: کالکوسیت، Py: پیریت، Mlc: مالاکیت).

Fig. 7. Different texture of Sagh prospect area. A: Specularite veinlet (PPL), B: Chalcopyrite-bearing veinlet and its convert to covellite and chalcosite (PPL), C: Disseminated texture of pyrite and its conversion to goethite (PPL), and D: Colofrom texture of goethite (PPL). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Spec: specularite, Ccp: chalcopyrite, Gth: goethite, Cv: covellite, Cct: chalcosite, Py: pyrite, Mlc: malachite).

توصیف انواع رگه - رگچه‌ها

کوارتز + اسپیکولاریت + کالکوپیریت ± گالن ± سولفوسالت: ضخامت این نوع رگه - رگچه‌ها بین ۰/۵ تا ۱۵ میلی متر متغیر است. در این نوع رگه - رگچه اسپیکولاریت اصلی ترین و فراوان ترین کانه اولیه موجود است. این کانه در تعدادی از رگه - رگچه‌ها دارای فراوانی ۵ تا ۱۰ درصد و در برخی دیگر بین ۷۰ تا ۷۵ درصد متغیر است. این کانی به صورت بلورهای سوزنی و تیغه‌ای درون رگه - رگچه‌ها دیده می شود و اندازه بلورهای آن از حدود ۰/۱ تا ۱ میلی متر متغیر است. کالکوپیریت مهم ترین کانه سولفیدی حاوی مس در این رگچه است. این کانه با فراوانی حدود ۳ تا ۵ درصد به صورت بی شکل و اغلب پراکنده درون رگه - رگچه‌ها دیده می شود و اندازه دانه‌های آن از حدود ۰/۵ تا ۱/۵ میلی متر متغیر است. علاوه بر این، تحت تأثیر فرایند هوازدگی و اکسایش کالکوپیریت‌های موجود از حاشیه در حال تبدیل به کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت و گوتیت هستند. گالن دیگر کانی اولیه موجود در این نوع رگچه‌هاست. گالن با رخ مثلثی و فراوانی جزئی مشاهده می شود که از حاشیه توسط انگلزیته جانشین شده است. سولفوسالت نقره دار دیگر کانه اولیه موجود در این رگه - رگچه‌ها با فراوانی بسیار جزئی به صورت دانه پراکنده درون این رگه - رگچه‌ها حضور دارد. فراوانی هر دو کانه گالن و سولفوسالت در این نوع رگه - رگچه‌ها کمتر از ۱ درصد است. کوارتز نیز مهم ترین کانی باطله همراه با کانه‌ها در این رگه - رگچه‌هاست که گاهی در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد حجم آنها را اشغال کرده است.

کوارتز + اسپیکولاریت + کالکوپیریت + پیریت: این نوع رگچه‌ها دارای ضخامت متغیر بین ۱ تا ۳ میلی متر هستند. در نمونه دستی و میکروسکوپی، سوزن‌ها و تیغه‌های اسپیکولاریت به صورت دانه‌های پراکنده با ابعاد تقریبی ۰/۵ تا ۱/۵ میلی متر در زمینه‌ای از کوارتز دیده می شود. اسپیکولاریت مهم ترین کانه موجود در این نوع رگه - رگچه‌هاست که به طور میانگین در حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد حجمی آنها را فرا گرفته است. کالکوپیریت به صورت دانه‌های بی شکل پراکنده با اندازه تقریبی ۰/۲ تا ۱

میلی متر و فراوانی بین ۶ تا ۷ درصد قابل مشاهده است که در حال تبدیل به مالاکیت است. پیریت دیگر کانه سولفیدی با فراوانی کمتر از ۱ تا ۳ درصد به صورت افشان و پراکنده درون این رگه - رگچه‌ها حضور دارد. اندازه دانه‌های آن از کمتر ۰/۵ میلی متر است و در برخی نقاط در حال تبدیل به گوتیت و سایر کانی‌های آهن دار است. کوارتز به عنوان مهم ترین کانی باطله در حدود ۴۵ تا ۵۰ درصد حجم این نوع رگچه‌ها را در بر می گیرد. اندازه دانه‌های تجمعی کوارتز تا ۲ میلی متر متغیر است.

کوارتز + کالکوپیریت: ضخامت این رگه - رگچه‌ها بین ۱/۵ تا ۲ میلی متر متغیر است. کانی شناسی این نوع رگه - رگچه‌ها نسبتاً ساده و متشکل از کالکوپیریت و کوارتز است. کالکوپیریت به عنوان اصلی ترین کانه حاوی مس به صورت پراکنده درون این رگچه‌ها است که ابعاد بلورهای بی شکل آن بین ۰/۲ تا ۲/۵ میلی متر متغیر است. این کانی سولفیدی در برخی از رگچه‌ها بین ۸ تا ۱۰ درصد و در برخی بیش از ۹۵ درصد فراوانی دارد. بخش عمده این کانی تحت تأثیر فرایندهای اکسیدان و سوپرژن به مالاکیت و گوتیت تبدیل شده است. کوارتز تنها کانی باطله موجود در این رگه - رگچه‌ها دارای فراوانی متغیر بین ۵ تا ۹۰ درصد حجمی بوده که به صورت دانه ریز تا دانه متوسط تجمعی کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند.

کانی شناسی ماده معدنی

اسپیکولاریت: اسپیکولاریت فراوان ترین و اصلی ترین کانه شناسایی شده در منطقه اکتشافی ساق است (شکل ۸-۸). این کانی به صورت بلورهای تیغه‌ای و سوزنی شکل به صورت پراکنده درون رگه - رگچه‌هایی با ضخامت متغیر مشاهده می شود. در این رگچه‌ها کالکوپیریت، پیریت، گالن و کوارتز کانی‌های اصلی همراه اسپیکولاریت هستند. فراوانی اسپیکولاریت در این رگچه‌ها متغیر بوده و در بخش‌هایی بین ۳ تا ۵ درصد و در برخی قسمت‌ها تا حدود ۷۰ درصد است. اندازه سوزن‌ها و تیغه‌های اسپیکولاریت بین ۰/۱ تا ۰/۵ میلی متر متغیر است.

کالکوپیریت: کالکوپیریت، کانه اصلی اولیه مس در منطقه

سولفیدی منطقه شده‌اند. مقدار هماتیت کمتر از گوتیت است (شکل ۸-۱).

انگلزیت: انگلزیت مهم‌ترین کانی برون‌زاد حاوی سرب در منطقه اکتشافی ساق بوده که با بافت عمده جانشینی در حاشیه کانی گالن ایجاد شده است (شکل ۸-۲).

توالی هم‌یافت

کانی‌سازی اصلی در منطقه اکتشافی ساق درون توده‌های نیمه‌عمیق - عمیق مرتبط با دگرسانی پروپلیتیک - سیلیسی شدید رخ داده است. ترتیب تشکیل کانه‌های فلزی هیپوزن درون رگه - رگچه‌ها به ترتیب شامل کالکوپیریت، پیریت و اسپیکولاریت است. شواهد میکروسکوپی نشان می‌دهد که کالکوپیریت و پیریت در برخی قسمت‌ها توسط اسپیکولاریت قطع شده است. در ادامه کانی گالن و سولفوسالت نیز تشکیل شده‌اند. در زون اکسیدان کانی‌های مالاکیت، کوولیت، کالکوسیت، انگلزیت، هماتیت و گوتیت تشکیل شده‌اند (شکل ۹).

کوارتز به عنوان فراوان‌ترین کانی باطله در قالب رگه - رگچه‌های سیلیسی دارای اسپیکولاریت و کانی‌های سولفیدی دیده می‌شود. این کانی اولین کانی تشکیل شده همراه با کانی‌های فلزی بوده است. کلریت نیز با گسترش زیاد و اپیدوت و کلسیت با مقدار کمتر همراه با کوارتز در تمام مراحل کانی‌سازی دیده می‌شود. سریسیت و پیروفیلیت نیز به صورت تأخیری در بخش‌هایی محدود از کانی‌سازی مشاهده می‌شوند (شکل ۹).

زمین‌شیمی ماده معدنی

نتایج عناصر مهم مس، نقره، طلا، سرب و روی در نمونه‌های خرده سنگی برداشت شده از زون‌ها و رگه‌های کانی‌سازی منطقه ساق در جدول ۱ ارائه شده است.

مس: مقدار مس در منطقه ساق بسیار بالا و امیدبخش است. این عنصر بین ۴۵ تا ۳۳۰۲۶ گرم در تن متغیر است. این در حالی است که مقدار زمینه عنصر مس در سنگ‌های آذرین حدواسط بین ۲۰ تا ۴۰ گرم در

اکتشافی ساق است. کالکوپیریت به صورت پراکنده و بی‌شکل و با مقدار ۳ تا ۵ درصد و گاهی تا ۹۵ درصد همراه با اسپیکولاریت، کوارتز و پیریت درون رگچه‌ها دیده می‌شود. اندازه دانه‌های بی‌شکل آن از ۰/۵ تا ۲/۵ میلی‌متر متغیر است. کالکوپیریت به عنوان یک کانه هیپوزن تحت تأثیر فرایندهای اکسایش و سوپرژن قرار گرفته و به کانه‌های ثانویه کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت و نیز گوتیت تبدیل شده است (شکل ۸-۳ و ۸-۴).

پیریت: این کانه سولفیدی به صورت دانه پراکنده و افشان با ابعادی کمتر از ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر درون رگچه‌ها مشاهده می‌شود. پیریت‌های موجود اغلب نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار هستند و در حدود ۱ تا ۳ درصد حجم کل رگه - رگچه‌های کانه‌دار منطقه اکتشافی ساق را در برمی‌گیرند. به نظر می‌رسد بخش عمده‌ای از پیریت‌های توسط گوتیت جانشین شده است (شکل ۸-۵).

گالن: فراوانی گالن کمتر از ۵ درصد است. بلورهای پراکنده و بی‌شکل این کانه سولفیدی حاوی سرب بین ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر در تغییر بوده و این کانی در بعضی قسمت‌ها از حاشیه یا محل رخ‌ها به انگلزیت تبدیل شده است (شکل ۸-۶).

سولفوسالت: یکی از کانی‌های شناسایی شده در منطقه ساق سولفوسالت است. این کانی به صورت شکل‌دار و اندازه کمتر از ۰/۳ میلی‌متر به میزان خیلی جزئی در زون هیپوزن کانی‌سازی دیده می‌شود (شکل ۸-۷).

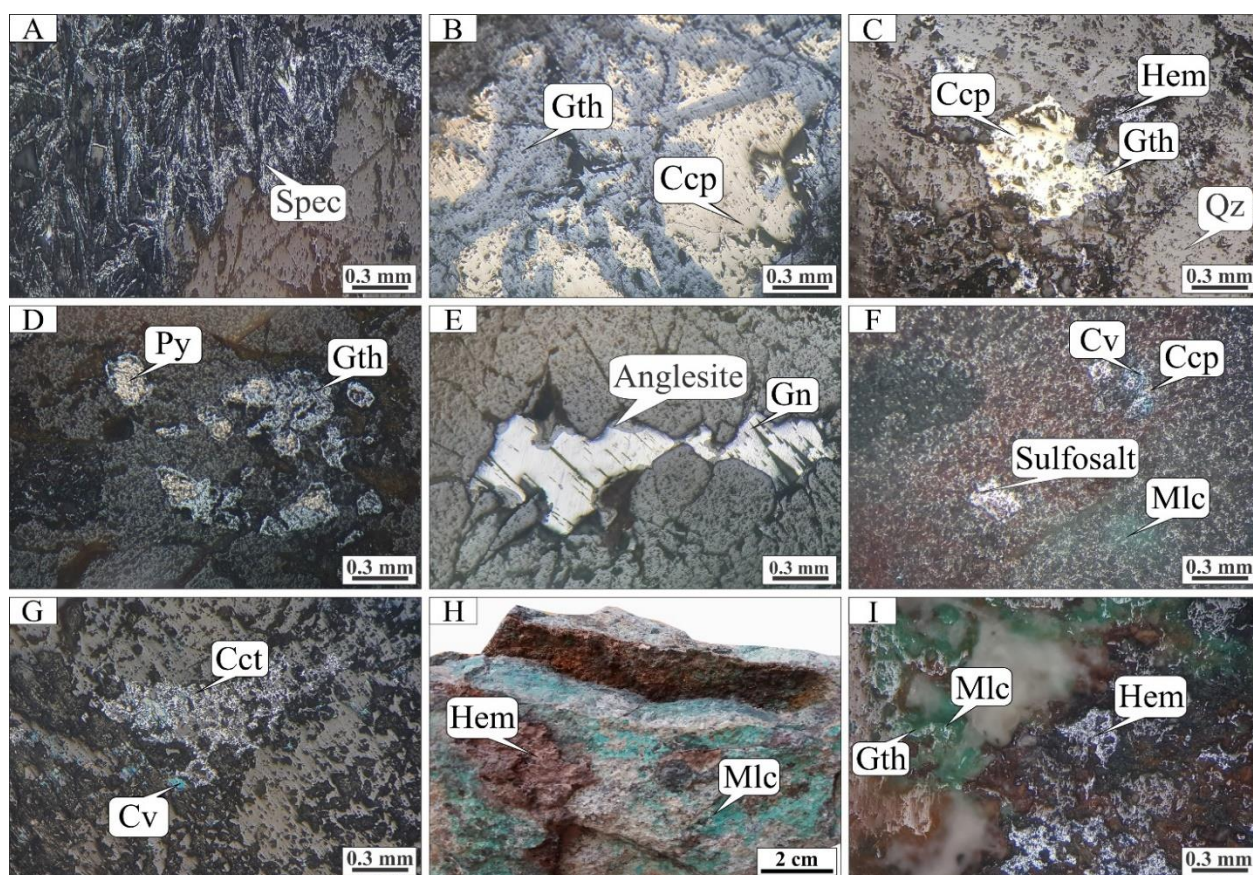
کوولیت و کالکوسیت: این کانه‌های سولفیدی مس نیز به صورت ثانویه طی مرحله برون‌زاد (سوپرژن) اغلب به صورت جانشینی و بی‌شکل درون رگچه - رگچه‌ها ایجاد شده است. این کانی‌ها جانشین کالکوپیریت شده‌اند. هر دو کانی کوولیت و کالکوسیت حجم اندکی داشته و فراوانی آنها به کمتر از ۱ درصد می‌رسد (شکل ۸-۷ و ۸-۸).

مالاکیت: مالاکیت فراوان‌ترین و مهم‌ترین کانی ثانویه مس است که جانشین کالکوپیریت شده است. مقدار آن در منطقه بین ۱۰ تا ۵۰ درصد در برخی نقاط متغیر است (شکل ۸-۸ و ۸-۹).

هماتیت و گوتیت: هماتیت و گوتیت جانشین کانی‌های

مقدار زمینه عنصر نقره در سنگ‌های آذرین حدواسط کمتر از ۰/۵ گرم در تن است. تعداد ۵ نمونه بین ۵۱ تا ۱۱۳ و ۴ نمونه بین ۲۶ تا ۵۰ گرم در تن نقره دارند (شکل ۱۰-B). با توجه به قیمت نقره این عنصر بسیار مهم‌تر از مس در منطقه ساق است. آثاری از کانی‌های سولفوسالت در بلوک‌های صیقلی دیده شده است که نقره در قالب این کانی‌ها و در ساختار کانی گالن در منطقه حضور دارد.

تن است. تعداد ۷ نمونه از ۲۴ نمونه آنالیز شده بین ۱ تا بیش از ۳ درصد دارای مس هستند و ۱۲ نمونه بین ۰/۱ تا ۱ درصد مس دارند (شکل ۱۰-A). بنابراین مقدار مس بسیار قابل توجه و کاملاً اقتصادی است که با توجه به آثار زیاد مالاکیت و کانی اولیه کالکوپیریت قابل توجه است. نقره: مقدار نقره بین ۱ تا ۱۱۳ گرم در تن متغیر است؛ در حالی که



شکل ۸. انواع کانه‌ها در منطقه اکتشافی ساق. A: اسپیکولاریت، B: تبدیل کالکوپیریت به گوتیت، C: تبدیل کالکوپیریت به گوتیت و هماتیت، D: تبدیل پیریت به گوتیت، E: تبدیل گالن به آنگلیت، F: سولفوسالت، G: کالکوسیت و کولیت، H: مالاکیت و هماتیت در نمونه دستی و I: مالاکیت، گوتیت و هماتیت (PPL). علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است: Spec: اسپیکولاریت، Ccp: کالکوپیریت، Gth: گوتیت، Hem: هماتیت، Gn: گالن، Cv: کولیت، Cct: کالکوسیت، Py: پیریت، Mlc: مالاکیت، Qz: کوارتز).

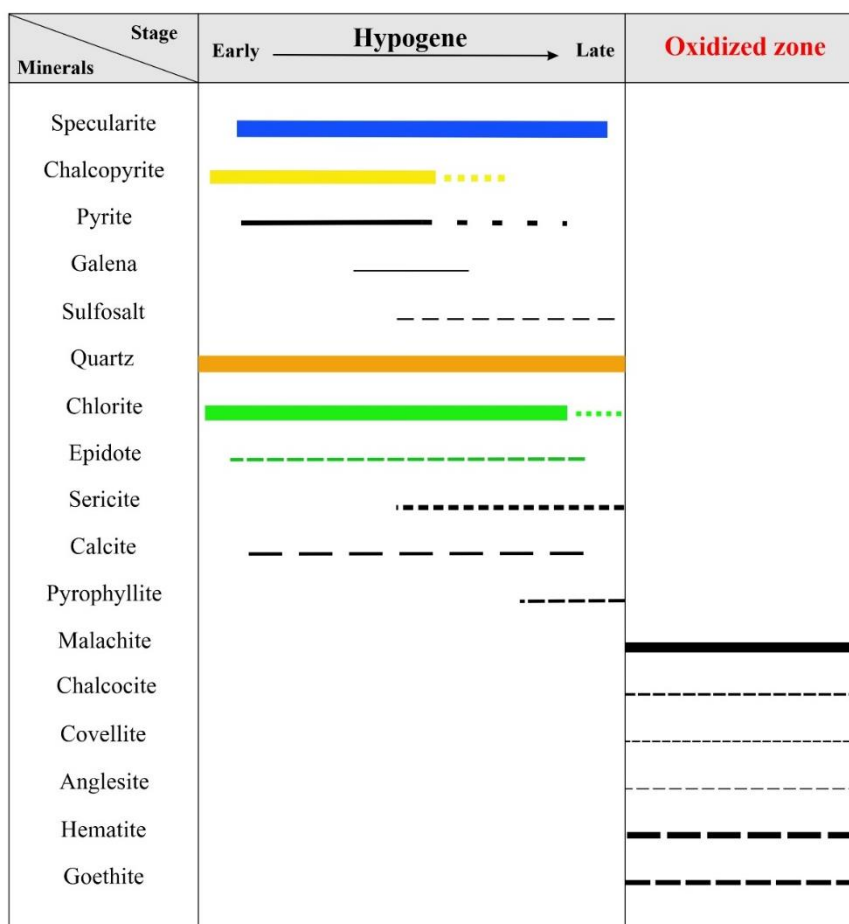
Fig. 8. Different ores of Sagh prospect area. A: Specularite, B: Convert of chalcopyrite to goethite, C: Convert of chalcopyrite to goethite and hematite, D: Convert of pyrite to goethite, E: Convert of galena to anglesite, F: Sulfosalt, G: Chalcosite and covellite, H: Malachite and hematite in hand specimen, and I: Malachite T goethite and hematite (PPL). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Spec: specularite, Ccp: chalcopyrite, Gth: goethite, Hem: hematite, Gn: galena, Cv: covellite, Cct; chalcosite, Py: pyrite, Mlc: malachite, Qz: quartz).

نمونه‌ها قابل توجه است (شکل ۱۰-D). این عنصر در قالب کانی گالن و آنگلیزیت باتوجه به وجود این کانی در مقاطع صیقلی در منطقه حضور دارد.

روی: مقدار روی بین ۷ تا ۱۱۷۰ گرم در تن متغیر است؛ در حالی که مقدار زمینه عنصر روی در سنگ‌های آذرین حدواسط بین ۲۰ تا ۳۰ گرم در تن است. تعداد ۴ نمونه بین ۷۰۰ تا ۱۱۷۰ گرم در تن و ۱۰ نمونه بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ گرم در تن روی دارند. مقدار روی نیز در نمونه‌ها قابل توجه بوده و آنومالی بالایی نشان می‌دهد؛ اگرچه کانی روی دار در بلوک‌های مورد بررسی دیده نشده است.

طلا: مقدار طلا بین ۵ تا ۲۵۰ میلی گرم در تن متغیر است؛ در حالی که مقدار زمینه عنصر طلا در سنگ‌های آذرین حدواسط ۵ میلی گرم در تن است. تعداد ۱ نمونه بین ۸۵ تا ۲۵۰ و ۵ نمونه بین ۶ تا ۸۴ میلی گرم در تن طلا دارند (شکل ۱۰-C). بالاترین مقادیر طلا در نمونه ۱۹ دیده می‌شود که دارای استوک‌ورک‌های فراوان کوارتز-اسپکیولاریت با مقادیر جزئی مالاکیت تقریباً در مرکز محدوده است.

سرب: مقدار سرب بین ۱۰ تا ۴۳۳۸ گرم در تن متغیر است؛ در حالی که مقدار زمینه عنصر سرب در سنگ‌های آذرین حدواسط بین ۲۰ تا ۳۰ گرم در تن است. تعداد ۵ نمونه بین ۱۵۰۰ تا بیش از ۴۰۰۰ گرم در تن و ۳ نمونه بین ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ گرم در تن سرب دارند. مقدار سرب نیز در



شکل ۹. توالی هم‌یافت کانی‌های فلزی و غیرفلزی منطقه اکتشافی ساق

Fig. 9. Paragenesis sequence of metallic and non-metallic minerals of Sagh prospect area

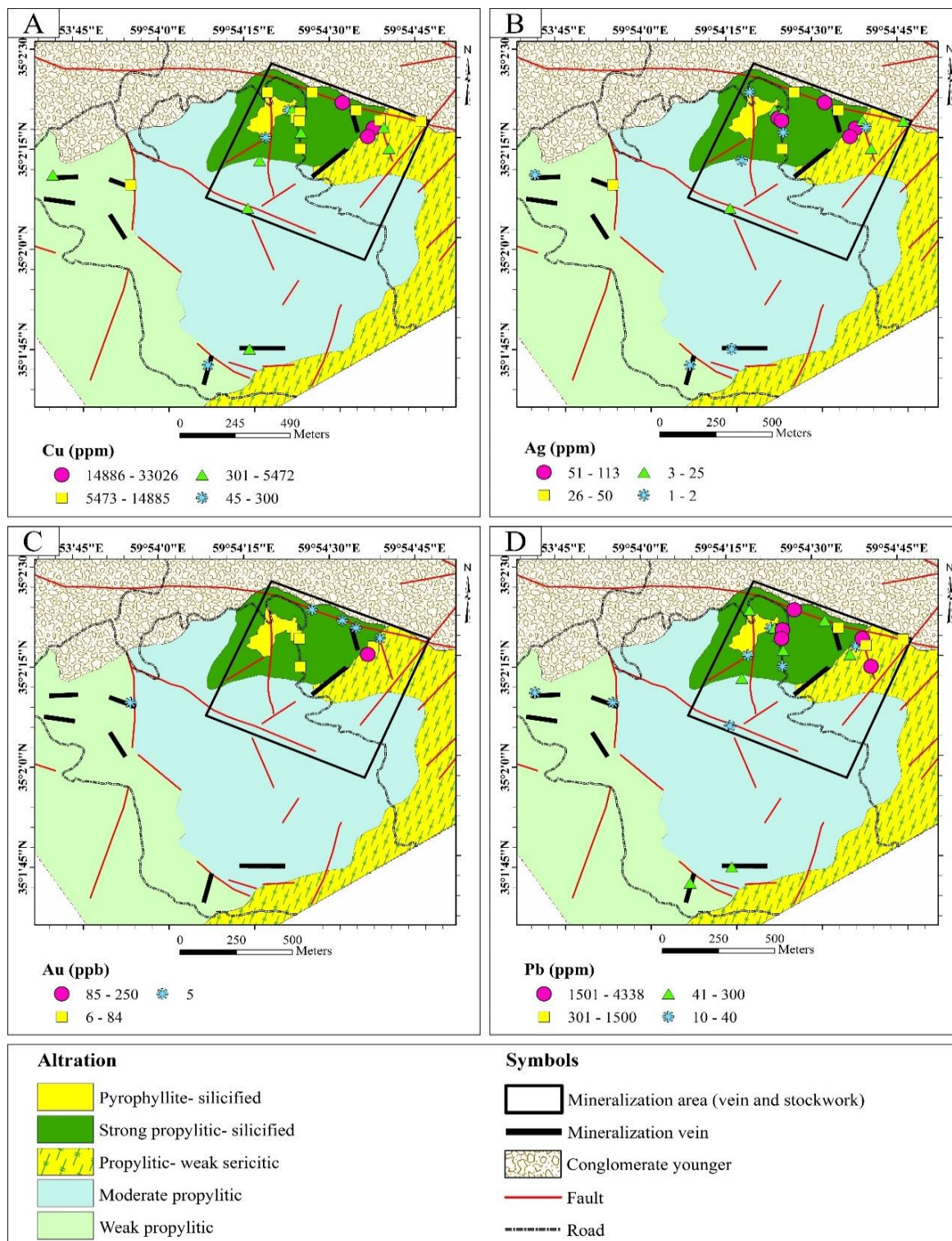
جدول ۱. نتایج آنالیز مس، نقره، طلا، سرب و روی نمونه‌های خرده‌سنگی منطقه اکتشافی ساق (طلا بر اساس میلی گرم در تن و بقیه عناصر گرم بر تن است)

Table 1. Results of Cu, Ag, Au, Pb and Zn from Sagh chip composite samples (Au is ppb and other elements are ppm)

	X	Y	Ag	Cu	Pb	Zn	Au
1	59.905161	35.0396	1.76	7731	150	226	
2	59.907341	35.039566	48.33	8679	3865	595	5
3	59.908803	35.03908	68.8	33026	167	348	5
4	59.909449	35.038758	32.77	9566	722	310	5
5	59.910276	35.037972	80.08	27357	28	420	9
6	59.910617	35.038297	22.79	8436	2872	361	5
7	59.910782	35.038005	0.79	393	454	147	
8	59.911002	35.037116	2.28	5472	4338	1170	
9	59.904694	35.036778	0.54	624	55	179	
10	59.906167	35.038833	<0.5	45	18	9	
11	59.906361	35.038833	6.66	1450	115	528	7
12	59.906528	35.0385	59.26	10116	144	586	55
13	59.905028	35.037722	<0.5	116	10	7	
14	59.90675	35.03875	13.57	7334	2231	747	
15	59.906694	35.038389	55.22	7803	1916	511	55
16	59.90675	35.037889	0.91	1762	270	287	
17	59.906694	35.037222	26.3	14885	27	338	84
18	59.903918	35.028931	1.27	2400	54	249	
19	59.910000	35.037639	113.34	27790	204	566	250
20	59.912611	35.038222	4.46	10613	504	1083	
21	59.904038	35.034796	3.11	2633	21	444	
22	59.894594	35.03641	1.28	2659	14	186	
23	59.898368	35.035905	39.68	8886	24	907	5
24	59.909806	35.0375	0.74	217	58	136	

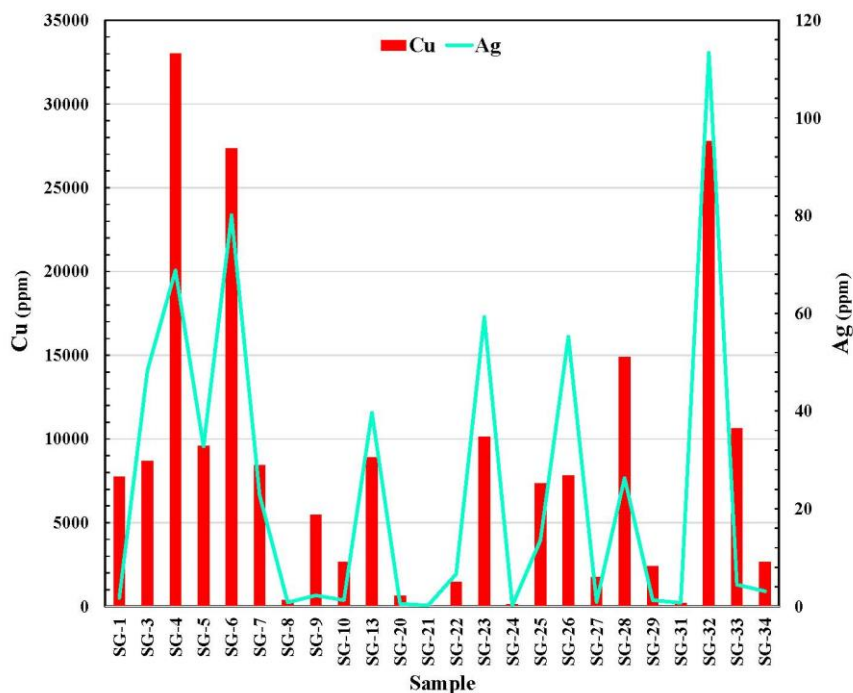
افزایش یافته است، حتماً مقدار طلا بالا نیست. اگرچه که بالاترین طلا در همان نمونه با بیشترین مقدار مس دیده می‌شود. بین دو عنصر نقره و طلا هیچ گونه هماهنگی مثبتی در منطقه اکتشافی ساق دیده نمی‌شود (شکل ۱۳)؛ به طوری که در نمونه‌هایی که نقره افزایش یافته است، حتماً مقدار طلا بالا نیست. البته بیشترین مقدار طلا با بیشترین مقدار نقره در یک نمونه دیده شده است.

بین دو عنصر مس و نقره هماهنگی مثبتی در منطقه اکتشافی ساق دیده می‌شود (شکل ۱۱)؛ به طوری که هر جایی که افزایش یافته است، مقدار نقره نیز افزایش نشان می‌دهد. مس در قالب کانی کالکوپیریت و نقره در قالب کانی‌های گالن و سولفوسالت در محدوده حضور دارد. بین دو عنصر مس و طلا هیچ گونه هماهنگی مثبتی در منطقه اکتشافی ساق دیده نمی‌شود (شکل ۱۲)؛ به طوری که در نمونه‌هایی که مس



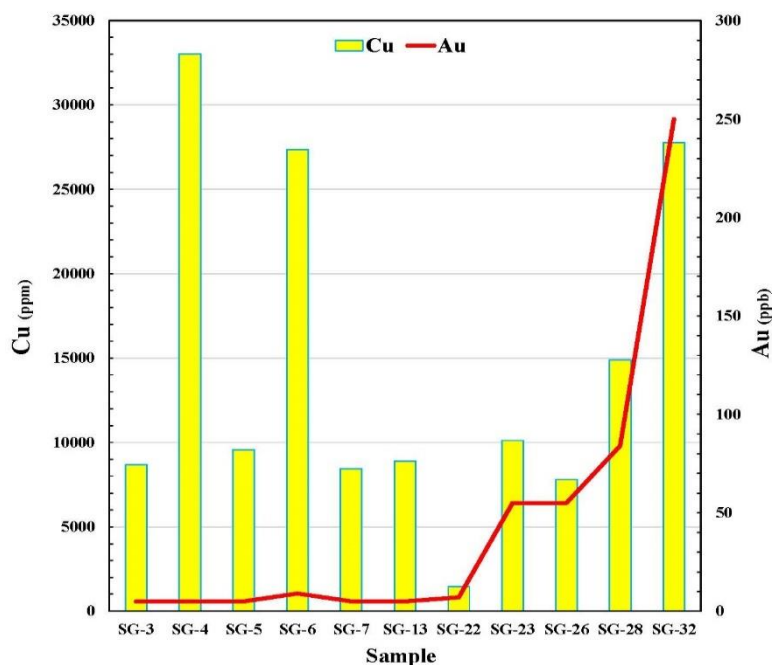
شکل ۱۰. نقشه‌های زمین شیمیایی- دگرسانی منطقه اکتشافی ساق. A: عنصر مس، B: عنصر نقره، C: عنصر طلا و D: عنصر سرب

Fig. 10. Geochemical-alteration map of Sagh prospect area. A: Cu element, B: Ag element, C: Au element, and D: Pb element



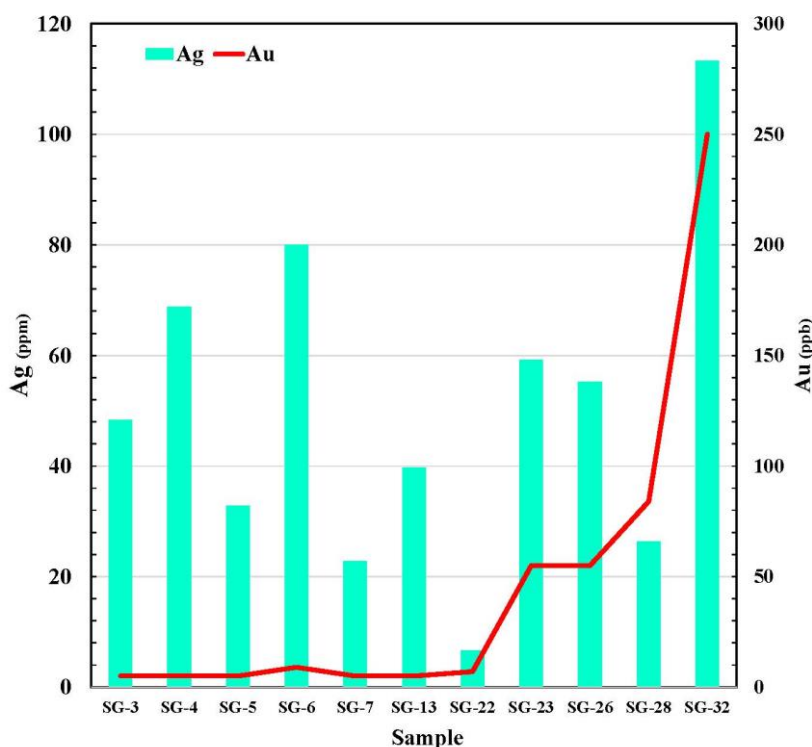
شکل ۱۱. رابطه مس و نقره در منطقه اکتشافی ساق

Fig. 11. Relation of Cu and Ag in the Sagh prospect area



شکل ۱۲. رابطه مس و طلا در منطقه اکتشافی ساق

Fig. 12. Relation of Cu and Au in the Sagh prospect area



شکل ۱۳. رابطه نقره و طلا در منطقه اکتشافی ساق

Fig. 13. Relation of Ag and Au in the Sagh prospect area

جدول ۲ ارائه شده است.

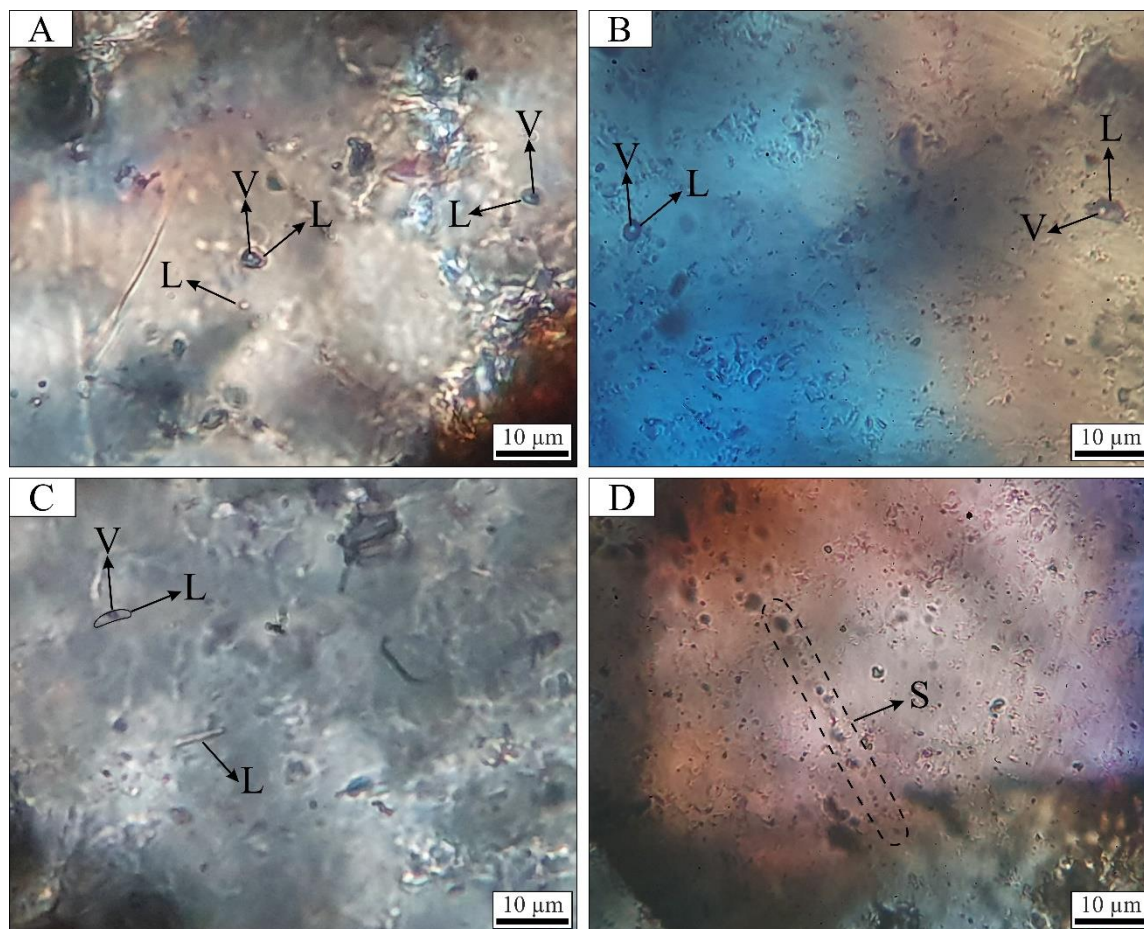
بر اساس ریزدماسنجی انجام شده، دمای همگن شدن (T_h) در سیالات درگیر منطقه اکتشافی ساق در محدوده بین ۱۵۹ تا ۳۲۸ درجه سانتی گراد با میانگین ۲۴۱ درجه سانتی گراد است (شکل ۱۵-A). دو دسته دمایی کاملاً مجزا از ۱۵۹ تا ۲۰۵ و ۲۴۹ تا ۳۲۸ درجه سانتی گراد برای دو نمونه رگچه دیده می شود. مقدار دمای اولین ذره یخ ذوب شده (T_{fm}) در دو نمونه نشان می دهد که نوع املاح علاوه بر NaCl می تواند شامل $CaCl_2$ و KCl نیز باشد. مقدار آخرین دمای ذوب یخ (T_m) در دو رگچه متفاوت است؛ به طوری که در رگچه دما بالا از ۱۱/۳- تا ۱۲/۸- و در رگچه دما پایین از ۴/۵- تا ۶/۳- درجه سانتی گراد متغیر است (شکل ۱۵-B). محاسبه میزان شوری بر اساس سامانه $H_2O-NaCl$ ، مقدار شوری را بین ۷/۲ و ۱۶/۷ درصد وزنی با میانگین ۱۱/۶ درصد وزنی برای

بررسی سیالات درگیر

پس از بررسی های دقیق سنگ نگاری، تعداد ۲ مقطع دو برصیقل از رگچه کوارتز+ اسپیکیولاریت+ کالکوپیریت± گالن± سولفوسالت برای بررسی های سیالات درگیر انتخاب و ریزدماسنجی بر روی آن انجام شد. بر اساس بررسی های ریزدماسنجی انجام شده بر روی کانی کوارتز، اندازه سیالات درگیر بررسی شده حدود ۳ تا ۷ میکرون است؛ اما اغلب آنها دارای اندازه ۶ میکرون هستند. اغلب سیالات درگیر در نمونه های بررسی شده شکل دار و به صورت کروی، بیضوی، میله ای و بی شکل است. بر اساس تقسیم بندی های متداول از لحاظ منشأ (Roedder, 1984; Shepherd et al., 1985)، سیالات درگیر بررسی شده از نوع دو فاز غنی از مایع (LV) و تک فاز مایع (L) هستند (شکل ۱۴-A تا D). خلاصه نتایج دماسنجی بر روی سیالات درگیر دو فاز غنی از مایع در

درصد وزنی و رگچه دما پایین دارای شوری پایین تر بین ۷/۲ تا ۹/۶ درصد وزنی است (شکل ۱۵-C).

سیالات درگیر نشان می دهد. دو شوری متفاوت برای دو نمونه دیده می شود. رگچه دما بالا دارای شوری بالاتر بین ۱۵/۳ تا ۱۶/۷



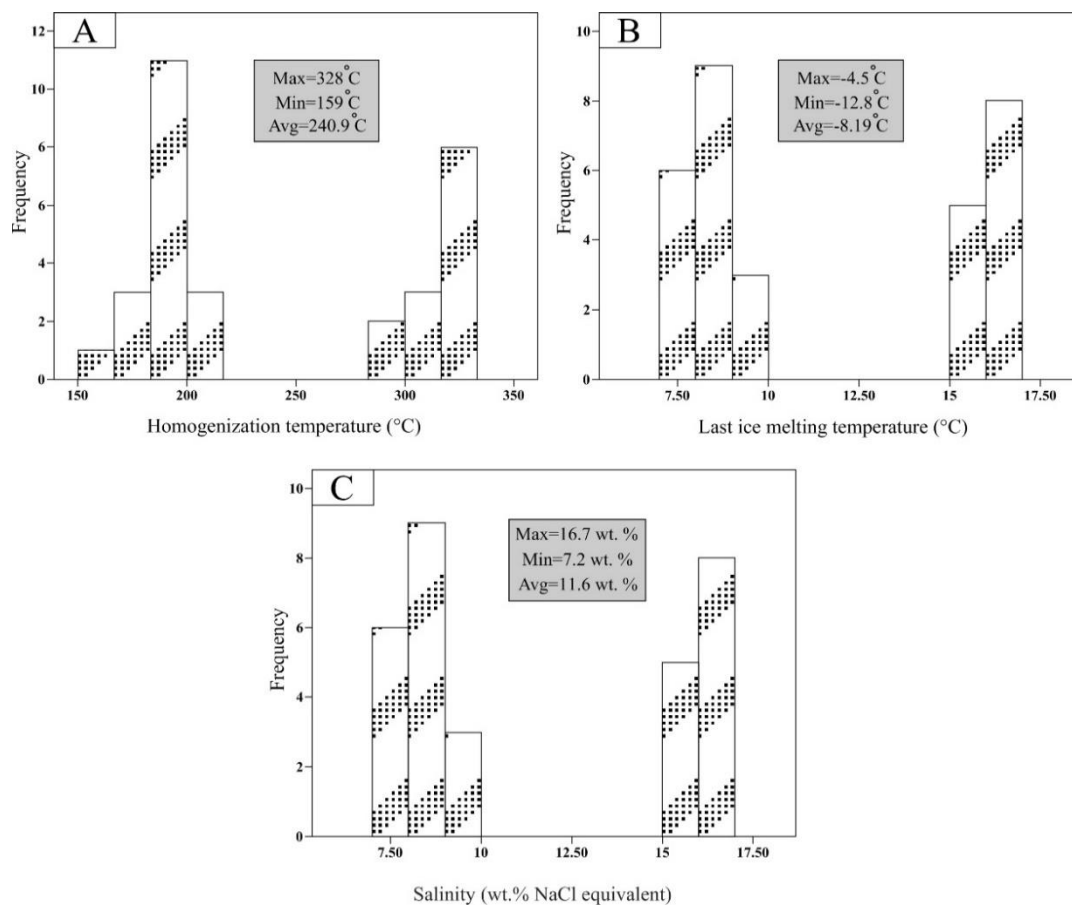
شکل ۱۴. تصویرهایی از سیالات درگیر در رگچه های کانه دار منطقه اکتشافی ساق. A، B و C: دو فاز غنی از مایع (LV) و تک فاز مایع (L) و D: سیالات درگیر ثانویه (S)

Fig. 14. Images of fluid inclusions in ore-bearing veinlets of Sagh prospect area. A, B and C: Two phases liquid-rich (LV) and liquid mono-phase (L), and D: Secondary fluid inclusions (S)

جدول ۲. خلاصه نتایج ریزدماسنجی و تعیین شوری سیالات درگیر نوع LV در کانی کوارتز در رگچه های کانه دار منطقه اکتشافی ساق

Table 2. Simplified results of microthermometry and determination of salinity of LV-type fluid inclusions within quartz mineral in ore-bearing veinlets of Sagh prospect area

Sample No.	number	Th (°C)	T _{fm} (°C)	T _{m ice} (°C)	Salinity (wt.% NaCl equiv)
SG28	18	159-205	-48.6 to -46	-6.3 to -4.5	9.6 to 7.2
SG7	13	294-328	-49.6 to -49	-12.8 to -11.3	16.7 to 15.3



شکل ۱۵. هیستوگرام‌های ریزدماسنجی منطقه اکتشافی ساق. A: دمای همگن شدن، B: آخرین دمای ذوب یخ و C: شوری

Fig. 15. Microthermometry histograms of Sagh prospect area. A: Homogenization temperature, B: Last ice melting temperature, and C: Salinity

بحث

تکامل سیال کانه‌دار

و دما- شوری پایین مطابقت دارد (شکل ۱۶). فرایند مخلوط‌شدگی سیال نقش مهمی در ته‌نشست کانی‌های فلزی در ذخایر گرمابی دارد (Fan et al., 2011; Gu et al., 2011; Zhai et al., 2013). عناصر فلزی از ماگمای مادر در عمق توسط محلول ماگمایی با دما و شوری بالا حمل شده و به دلیل حرارت بالای توده نفوذی به طرف بالا حرکت می‌کند. آب‌های جوی با دما و شوری پایین از فضای درز و شکستگی‌ها و گسل‌ها به عمق راه پیدا کرده و با محلول ماگمایی مخلوط می‌شوند و فرایند همرفتی-مخلوط‌شدگی سیال ماگمایی و جوی ایجاد می‌شود (شکل ۱۷). مقدار دما و شوری سیالات در گیر منطقه اکتشافی ساق در نمودار

بر اساس بررسی‌های سیالات درگیر، دمای تشکیل ماده معدنی در منطقه اکتشافی ساق بین ۱۵۹ تا ۳۲۸ درجه سانتی‌گراد بوده و از محلولی محتوی نمک‌های CaCl_2 ، KCl و NaCl با درجه شوری بین ۷/۲ تا ۱۶/۷ درصد به وجود آمده است. قرارگیری سیالات درگیر در منطقه اکتشافی ساق در نمودار دمای همگن شدن در مقابل شوری (Shepherd et al., 1985)، نشان‌دهنده دو مرحله مجزای دما و شوری در تشکیل رگچه‌های کانه‌دار است. این دو مرحله با روند مخلوط‌شدگی بین دو سیال دما- شوری بالا

طلا همراه با اکسید آهن همان IOCG دارد (جدول ۳). مهم ترین ویژگی فراوانی مقدار کانی اسپیکولاریت همراه با کانی سازی مس است.

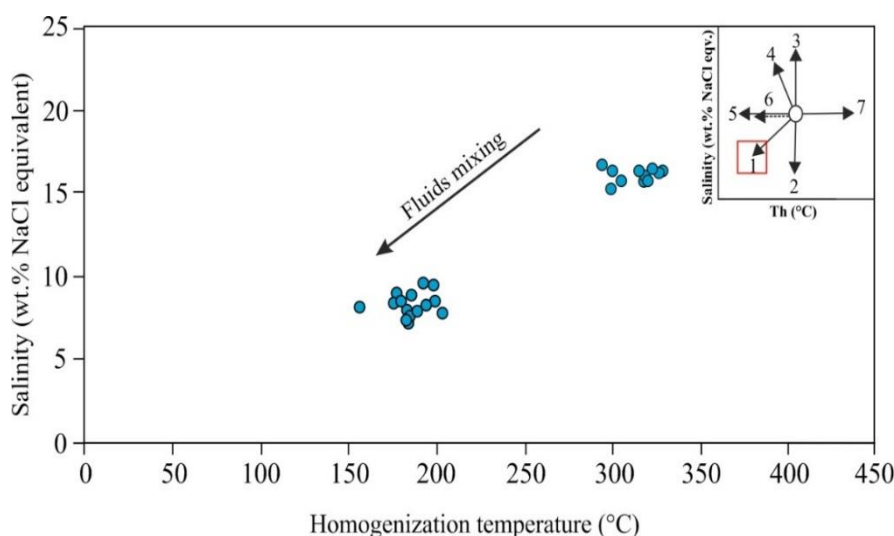
موقعیت زمین ساختی KKBMB که منطقه ساق بر روی آن قرار گرفته، کمان ماگمایی زون فروانش است (Karimpour et al., 2006; Malekzadeh Shafaroudi et al., 2013; Golmohammadi et al., 2014; Shafaii Moghaddam et al., 2015; Golmohammadi et al., 2015; Almasi et al., 2015; Karimpour et al., 2017; Hossieni et al., 2018

که مشابه با ذخایر IOCG است. کانسارهای IOCG در محیط های کوهزایی، ریفت داخل قاره و محیط کششی وابسته به زون فروانش تشکیل می شوند (Hitzman, 2002; Williams et al., 2005).

دما- فشار، نشان می دهد که دست کم بخشی از کانی سازی در فشار بین ۱۰ تا ۲۰ مگاپاسکال و بخشی از آن در فشار کمتر از ۱۰ مگاپاسکال تشکیل شده است. این مقدار فشار با عمق کمتر از یک کیلومتر بر اساس فشار لیتواستاتیک مطابقت دارد (شکل ۱۸). لذا این بخش از کانی سازی که در حال حاضر قابل دیدن است، در عمق کم تشکیل شده است و برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر نیازمند اطلاعات عمقی و بررسی بیشتر سیالات در گیر در اعماق مختلف هستیم.

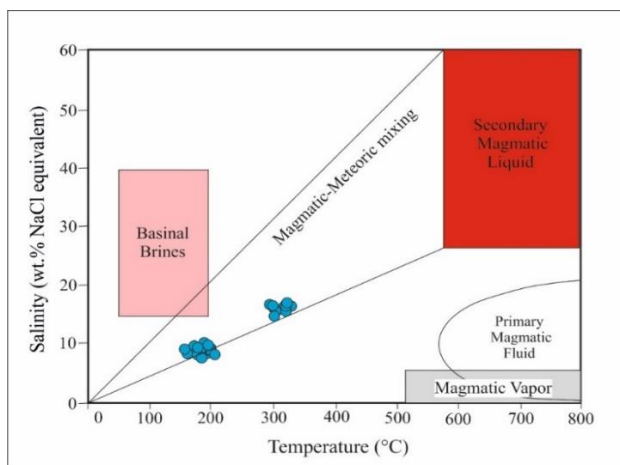
مدل کانی سازی

مقایسه ویژگی های منطقه اکتشافی ساق با دیگر کانسارهای مس دار نشان می دهد که این منطقه شباهت زیادی به ذخایر مس-



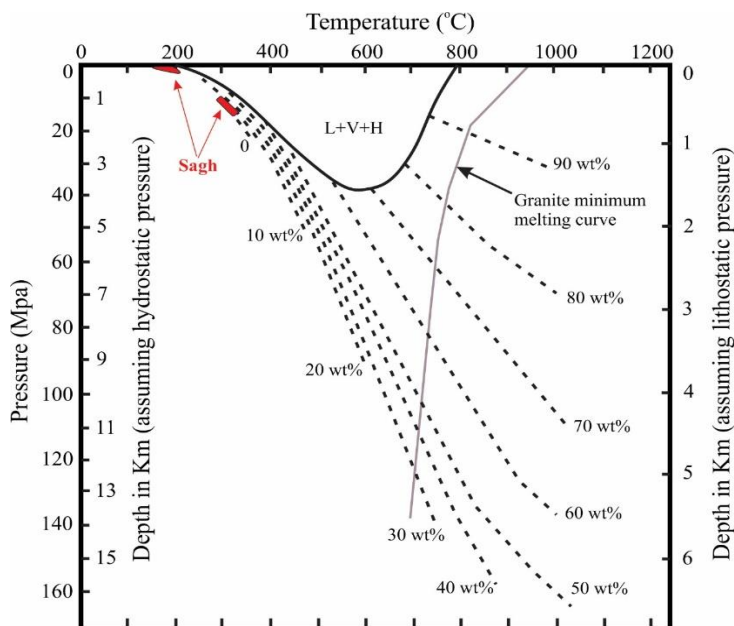
شکل ۱۶. دمای همگن شدن در مقابل شوری سیالات در گیر در منطقه اکتشافی ساق. روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما-شوری، شفرد و همکاران (Shepherd et al., 1985)، روند ۱ سیال اولیه A با سیال سرد کم شوری B مخلوط شده است، روند ۲ و ۳ نتیجه مخلوط شدن سیال A هم دما با سیال B با شوری متفاوت، روند ۴ نشان می دهد که شوری فاز باقی مانده افزایش یافته است، روند ۵ نشان دهنده سرد شدن سیال A، روند ۶ نشان دهنده گردنکشی سیال در گیر، روند ۷ نشان دهنده تراوش سیال در گیر در طول گرمایش

Fig. 16. Homogenization temperature versus salinity of fluid inclusions in the Sagh prospect area. Several possible trends of fluid evolution in a temperature-salinity diagram from Shepherd et al. (1985). Trend 1 represents primitive fluid A mixed with cold and low salinity fluid B, trends 2 and 3 represent the result of fluid A isothermally mixing with different salinity fluid B, trend 4 represents the salinity of residual phase increased, caused by boiling of fluid A, trend 5 represents cooling of fluid A, trend 6 represents necking of the fluid inclusion, trend 7 represents leakage of fluid inclusions during heating



شکل ۱۷. نمودار دمای همگن شدن در مقابل شوری سیالات درگیر در منطقه اکتشافی ساق. محدوده انواع مختلف سیال از بین (Beane, 1983)

Fig. 17. Homogenization temperature versus salinity diagram for fluid inclusions in the Sagh prospect area. Fields for various fluid types after Beane (1983)



شکل ۱۸. نمودار دما-فشار نشان دهنده روابط فازی در سامانه NaCl-H₂O در فشارهای لیتواستاتیک و هیدرواستاتیک (Fournier, 1999). L= مایع، V= بخار، H= حالت. خطوط ناپیوسته مقدار NaCl حل شده در شورابه را نشان می دهد. خط خاکستری کامل نشان دهنده منحنی ذوب حداقل گرانیات است. خط تیره نشان دهنده مرز سه فازی، L+V+H، برای سامانه NaCl-KCl-H₂O با Na/K در محلول ثابت شده در تعادل با آلپیت و فلدسپار پتاسیم در حرارت نشان داده شده است. موقعیت سیالات درگیر ساق روی آن رسم شده است.

Fig. 18. Pressure-Temperature diagram showing phase relationships in the NaCl-H₂O system at lithostatic and hydrostatic pressures (Fournier, 1999). L= liquid, V= vapor, H= halite. Thin dashed lines are contours of constant wt percent NaCl dissolved in brine. Filled gray line indicates granite minimum melting curve. Filled dark line shows the three-phase boundary, L+V+H, for the system NaCl-KCl-H₂O with Na/K in solution fixed by equilibration with albite and K-feldspar at the indicated temperatures. Location of Sagh fluid inclusions data plotted on it.

IOCG وجود دارد؛ ولی رابطه مکانی مشخصی دیده نمی‌شود. این توده‌های نفوذی معمولاً مافیک تا فلسیک آلکالن تا کالک آلکالن هستند. کانی‌سازی در منطقه اکتشافی ساق رابطه نزدیکی با توده‌های مونزونیتی، مونزودیوریتی و دیوریتی دارد که مشابه مناطق کوه‌زر، بهاریه، نامق، فدیپه، چنار و دیگر ذخایر KKBMB است (جدول ۳).

بر طبق پولارد (Pollard, 2000)، توده‌های نفوذی همراه با IOCG معمولاً گرانیت است؛ در حالی که سیلیتو (Sillitoe, 2003) پیشنهاد کرد که یک رابطه ژنتیکی بین ذخایر IOCG شمال شیلی و توده‌های دیوریتی وجود دارد. هیتزمان و همکاران (Hitzman et al., 1992)، ویلیام و همکاران (Williams et al., 2005) و گرو و همکاران (Groves et al., 2010) پیشنهاد دادند که رابطه زمانی واضح بین توده‌های نفوذی و کانسارهای

جدول ۳. مقایسه منطقه اکتشافی ساق با کانسارهای مهم IOCG دنیا و برخی ذخایر IOCG شرق ایران

Table 3. Comparison of Sagh prospect area with important IOCG deposits of world and some IOCG deposits of east of Iran

Deposit	Olympic Dam (Australia)	Candelaria (Chile)	Mont-de-l Aigle (Canada)	Qale Zari (Lut block, Iran)	Baharieh (KKBMB, Iran)
Tectonic setting	Anorogenic	Back-arc basins	Intracontinental orogenic collapse	Subduction-related arc magmatism	Subduction-related arc magmatism
Intrusive rocks	Granite	Diorite	Mafic to felsic	Felsic intrusions in region	Monzodiorite to diorite
Alteration	Albitic, potassic, propylitic, sericitic, argillic, silicified	Potassic, silicified, Carbonate, actinolite	Potassic, Sodic, chloritic, Silicified	Propylitic, silicified	Chloritic, silicified
Deposit style	Breccias	Breccias, stockwork, veins, replacement	Breccias, stockwork, veins	Vein, veinlet	vein
Ore minerals	Chalcopyrite, magnetite, specularite, pyrite, bornite, pitchbelende	Chalcopyrite, specularite, magnetite, pyrite,	Chalcopyrite, specularite, magnetite, pyrite	Chalcopyrite, specularite, pyrite, shalerite, galena, sulfosal	Chalcopyrite, specularite, pyrite
Geochemistry	Ag, U, Cu, Au, REE	Mo, LREE, Cu, Au Zn, As	Cu, Au	Pb, Ag, Zn, Au, Cu	Cu ± Au
Fluid inclusions study	T=100-300°C S=7-42 wt. %	T=220-310°C S=12-24 wt. %	T=280-347°C S=0-26 wt. %	T=240-360°C S=1-6 wt. %	T=271-500°C S=7.9-26.3 wt. %
Ref.	Hitzman, 2002; Pollard, 2000	Marschik and Fontbote, 2001; Sillitoe, 2003; Marschik et al., 2003	Simard et al., 2006	Karimpour, 2005	Najmi et al., 2023

ادامه جدول ۳. مقایسه منطقه اکتشافی ساق با کانسارهای مهم IOCG دنیا و برخی ذخایر IOCG شرق ایران

Table 3 (Continued). Comparison of Sagh prospect area with important IOCG deposits of world and some IOCG deposits of east of Iran

Deposit	Kuh-e-Zar (KKBMB, Iran)	Chenar (KKBMB, Iran)	Nameq (KKBMB, Iran)	Sagh (KKBMB, Iran)
Tectonic setting	Subduction-related arc magmatism	Subduction-related arc magmatism	Subduction-related arc magmatism	Subduction-related arc magmatism
Intrusive rocks	Monzonite to syenogranite	Diorite	-	Monzonite, monzodiorite, diorite, syenite
Alteration	Silicified, chloritic, minor sericitic, albitic	Chloritic, silicified	Chloritic, silicified	Chloritic, silicified
Deposit style	Breccias, stockwork, veins	Breccias, veins	vein	stockwork, veins
Ore minerals	Specularite, minor chalcopryrite, pyrite, galena	Chalcopryrite, specularite, pyrite	Chalcopryrite, specularite, magnetite	Chalcopryrite, specularite, pyrite, shalerite, galena, sulfosalt
Geochemistry	Ag, W, Au, Cu, LREE	Cu	Cu	Cu, Ag, Au, Pb
Fluid inclusions study	T=248-491°C S=4-19.2 wt. %	T=307-400°C S=13.4-15.5 wt. %	T=300-496°C S=11-22 wt. %	T=159-328°C S=7.2-16.7 wt. %
Ref.	Karimpour et al., 2017	Behnamnia et al., 2023	Taghadosi and Malekzadeh Shafaroudi, 2018	This study

عمق کمتر کندلاریا و المپیک دم دیده می شود و آلپیتی شدن در ذخایر IOCG کم دما گسترش ندارد (Hitzman et al., 1992; Sillitoe, 2003). دگرسانی کلریتی گسترده در منطقه ساق شبیه کانسار مونتته ورده پرو (Vila et al., 1998)، مونتدل-آیگل کانادا (Simard et al., 2006)، کوه زر تربت حیدریه (Karimpour et al., 2017)، دیگر کانسارهای نوع IOCG کمربند KKBMB (Almasi et al., 2015; Taghadosi and

دگرسانی اصلی مرتبط با کانی سازی در منطقه اکتشافی ساق پروپیلیتی-سیلیسی شدید است که پروپیلیتی آن نیز بیشتر با کانی کلریت مشخص می شود. دگرسانی های آلپیتی، پتاسیک، سربسیتی، آرژیلیک و پروپیلیتی در کانسارهای IOCG دیده شده است. الیور و همکاران (Oliver et al., 2004) علت تشکیل آلپیتی شدن را مخلوط شدن سیالات گوگردار ماگمایی و شورابه ها در ناحیه کلانگری تعیین کرده اند. دگرسانی پتاسیک در

اکتشافی ساق از مقدار طلا در سنگ میزبان اطلاعاتی در دسترس نیست؛ اما مخلوط شدن سیال و سرد شدن عاملی مهم برای تشکیل کانی سازی بوده است. از طرفی مقدار آنالیزهای انجام شده برای طلا بسیار محدود بوده و شاید نتوان بر اساس آن برای مقدار عیار طلا در منطقه قضاوت کرد. این موضوع نیاز به آنالیزهای سطحی و عمقی زیادی دارد؛ اما مقدار مس و نقره بسیار بالا و قابل توجه است.

نتیجه گیری

رخداد معدنی ساق با توجه به شواهد موجود شامل: ۱- وجود توده های نفوذی اکسیدان تشکیل شده در زون فرورانش در KKBMB، ۲- هم یافت مینرالی اسپکیولاریت، کالکوپیریت، پیریت و گالن، ۳- کنترل ساختاری کانی سازی، ۴- آنومالی زمین شیمیایی مس، نقره، طلا، سرب و ۵- دگرسانی کلریتی- سیلیسی، انطباق زیادی با سامانه های مس- نقره- طلا همراه با اکسید آهن (IOCG) دارد. قرارگیری این منطقه در کمربند KKBMB که پتانسیل زیادی برای کانسارهای نوع IOCG دارد و در نزدیکی دیگر ذخایر IOCG که شباهت های زیادی با هم دارند، تأییدی بر این مدعاست.

توده های نفوذی مونزونی، مونزودیوریتی، دیوریتی و سینیتی سنگ میزبان کانی سازی هستند و کانه زایی توسط ساختارها و گسل ها کنترل می شود؛ ولی این ماگماتیسیم می تواند نماینده توده های نفوذی منشأ در عمق باشد. هم یافت مینرالی منطقه اکتشافی ساق و فراوانی اسپکیولاریت همراه با کانی های سولفیدی مس، سرب و نقره که با باطله کوارتز و کلریت همراه است، نشان می دهد که کانی سازی از یک محلول فوق اکسیدان غنی از سیلیس و آهن همراه با عناصر فلزی از یک ماگماتیسیم فوق اکسیدان از عمق نشأت گرفته و از طریق گسل ها و درز و شکستگی ها به سمت بالا حرکت کرده است. مخلوط شدن محلول کانه دار ماگمایی با دما و شوری بالاتر با آب های جوی با دما و شوری کمتر در نهایت به ته نشست سولفیدها و تشکیل کانی سازی منجر شده است. شواهد

Malekzadeh Shafaroudi, 2018; Najmi et al., 2023; (Sahebi Khader et al., 2021; Behnamnia et al., 2023

و قلعه زری (Karimpour, 2005) در بلوک لوت است که دما و شوری پایین تری دارند.

شوری سیالات درگیر المپیک دم بین ۷ تا ۴۲ درصد وزنی متغیر است (Haynes et al., 1995). شوری محلول کانه دار در ساق شبیه به کوه زر تربت حیدریه ۵ تا ۲۰ درصد وزنی (Karimpour et al., 2017)، بهاریه ۷ تا ۲۶ درصد وزنی (Najmi et al., 2023) و دیگر کانه زایی های IOCG در KKBMB در شرق ایران و موندل- آیکل کانادا صفر تا ۲۶ درصد وزنی (Simard et al., 2006) و کندلاریا شیلی ۱۲ تا ۲۴ درصد وزنی (Marschik and Fontbote, 1998) و در مجموع پایین است. شوری بالای سیال در ذخایر IOCG رابطه ای مستقیم با گسترش دگرسانی آلیتی (Pollard, 2000; Pollard, 2001; Oliver et al., 2004) یا ورود شورابه ها و مواد تبخیری دارد (Barton and Johnson, 1996).

بر اساس نظر سیلیتو (Sillitoe, 2003)، کانسارهای IOCG به وسیله عیار بالای مس نسبت به کانسارهای مس پورفیری (بیش از ۱ درصد) و تنوعی از عیارهای پایین طلا مشخص می شوند. برای مثال کانسار ترسا دل کولمو در شیلی عیار ۰/۸ درصد مس با آنومالی طلای بسیار پایین دارد (Hopper and Correa, 2000)؛ در حالی که مونتروساس پرو ۱/۲ درصد مس و ۶ گرم در تن طلا دارد (Injoque, 2002). میانگین عیار طلای کوه زر ۳ گرم در تن و مس کمتر از ۰/۵ درصد است (Karimpour et al., 2017). ژو (Zhu, 2016) عقیده دارد که مقدار طلا در کانسارهای IOCG و عوامل کنترل کننده آن مشخص نیست. او پیشنهاد می کند که برای اکتشاف کانسارهای IOCG غنی از طلا باید روی سنگ میزبان غنی از طلا و سازوکارهای ته نشست کافی برای این عنصر مانند سرد شدن، واکنش سیال- سنگ و مخلوط شدن سیال تمرکز کرد. در مجموع کانسارهای غنی از طلا دارای محلول کانه دار کم دما هستند (Zhu, 2016). در منطقه

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد طی طرح شماره ۶۰۳۱۸/۳ مورخ ۱۴۰۲/۴/۲۴ انجام شده است. از آقای مهندس علی اکبر اکبری به خاطر کمک‌های بی‌دریغ در زمان عملیات صحرایی صمیمانه سپاسگزاریم

دما- شوری و دگرسانی نشان می‌دهد که در حال حاضر در بخش‌های بالایی سامانه هستیم و اثبات بیشتر مدل و نحوه تشکیل کانی‌سازی نیاز به اطلاعات عمقی و آنالیزهای بیشتر دارد. اکتشاف هرچه بیشتر رخدادهای معدنی نوع IOCG در KKBMB بر اهمیت این کمربند ماگمایی در شرق ایران به عنوان یک زون متالوژنی مهم مس و طلا و نقره و این نوع ذخایر می‌افزاید.

1. Iron Oxide Copper Gold: IOCG
2. Iron Oxide-Apatite: IOA
3. Khaf-Kashmar-Bardaskan Magmatic Belt: KKBMB
4. X-Ray Diffraction

References

- Almasi, A., Karimpour, M.H., Ebrahimi Nasrabadi, Kh., Rahimi, B., Klötzli, U. and Santos, J.F., 2015. Geology, mineralization, U-Pb dating and Sr-Nd isotope geochemistry of intrusive bodies in northeast of Kashmar. *Journal of Economic Geology*, 7(1): 69–90. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v7i1.44721>
- Barton, M.D. and Johnson, D.A., 1996. Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide–(REE–Cu–Au–U) mineralization. *Geology*, 24(3): 259–262. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0259:ESMFIR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0259:ESMFIR>2.3.CO;2)
- Beane, R.E., 1983. The Magmatic–Meteoritic Transition. Geothermal Resources Council, Special Report 13, pp. 245–253.
- Behnamnia, O., Malekzadeh Shafaroudi, A., Mazloumi Bajestani, A. and Hajimirzajan, H., 2023. Mineralization, geochemistry and fluid inclusion studies in the Chenar prospect area, east of Kashmar: Evidence of copper mineralization with iron oxide. *Advanced Applied Geological Journal*. In press. (in Persian with English abstract)
- Chen, H., Kyser, T.K. and Clark, A.H., 2011. Contrasting fluids and reservoirs in the contiguous Marcona and Mina Justa iron oxide–Cu (–Ag–Au) deposits, south-central Perú. *Mineralium Deposita*, 46: 677–706. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0343-x>
- Fan, H.R., Hu, F.F., Wilde, S.A., Yang, K.F. and Jin, C.W., 2011. The Qiyugou gold-bearing breccia pipes, Xiong'er shan region, central China: Fluid-inclusion and stable-isotope evidence for an origin from magmatic fluids. *International Geology Reviews* 53(1): 25–45. <https://doi.org/10.1080/00206810902875370>
- Fournier, R.O., 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment. *Economic Geology*, 94(8): 1193–1212. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.8.1193>
- Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Mazaheri, S.A., 2014. Petrology and U-Pb zircon dating of intrusive rocks from A, C-south, and Dardvay districts, Sangan iron stone mine, Khaf. *Journal of Economic Geology*, 5(9): 155–174. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v5i2.31716>
- Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Mazaheri, S.A., 2015. Alteration mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 545–563. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.005>
- Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D. and Hitzman, M.W., 2010. Iron oxide copper–gold (IOCG) deposits through Earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, 105(3): 641–654. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.641>
- Gu, L.X., Wu, C.Z., Zhang, Z.Z., Franco, P., Ni, P., Chen, P.R. and Xiao, X.J., 2011. Comparative study of ore-forming fluids of hydrothermal copper-gold deposits in the lower Yangtze River Valley, China. *International Geology Reviews*, 53(5–6): 477–498. <https://doi.org/10.1080/00206814.2010.533873>
- Haynes, D.W., Cross, K.C., Bills, R.T. and Reed, M.H., 1995. Olympic Dam ore genesis: a fluid-mixing model. *Economic Geology*, 90(2): 281–307. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.2.281>
- Hitzman, M.W., 2002. Iron oxide–Cu–Au deposit: what, where, when, and why. In: T.M. Porter, (Editor), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold And Related Deposits: a Global Perspective V1*. PGC Publishing, Adelaide, pp. 9–26. Retrieved June 3–5, 2023 from https://books.google.com/books/about/Hydrothermal_Iron_Oxide_Copper_gold_Related.html?id=NXpXAAAAMAAJ
- Hitzman, M.W., Oreskes, N. and Einaudi, M.T., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu–U–Au–REE) deposits. *Precambrian Research*, 58(1–4): 241–287. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90121-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90121-4)
- Hopper, D. and Correa, A., 2000. The Panulcillo and Teresa de Colmo copper deposits: two contrasting examples of Fe-ox-Cu-Au mineralisation from the Coastal Cordillera of Chile. In: T.M. Porter, (Editor), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective 2*, PGC Publishing, Adelaide, 1: 177–189. Retrieved June 3–5, 2023 from

- <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-14panulcillo-and-teresa-de-colmodhopper.pdf>
- Hossieni, R., Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2018. Petrography, geochemistry, U-Pb dating and Sr-Nd isotopes of igneous rocks in Tannurjeh porphyry Au-Cu prospect area (NE Kashmar). *Petrological Journal*, 9(1): 45–70. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22108/ijp.2017.82019.0>
- Injoque, E.J., 2002. Fe oxide-Cu-Au deposits in Peru: An integrated view. In: T.M. Porter, (Editor), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits. A global perspective 2*, PGC Publishing, Adelaide, 2: 97–113. Retrieved June 3–5, 2023 from
<https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-07iocg-peru.pdf>
- Karimpour, M.H., 2004. Mineralogy, Alteration, source rock, and tectonic setting of Iron–Oxides Cu–Au deposits and examples of Iran. 11th symposium of Iranian Crystallography and Mineralogy Society, Department of Geology, University of Yazad, Yazad, Iran, pp. 184–189. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H., 2005. Comparison of Qaleh Zari Cu-Au-Ag deposit with other Iron Oxides Cu-Au (IOGC-type) deposits, a new classification. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 13(1): 167–184. Retrieved September 10, 2023 from
<https://ijcm.ir/article-1-734-en.html>
- Karimpour, M. H., Saadat, S. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2006. Geochemistry, petrology, and Mineralization of Tannurjeh porphyry gold-copper. *Journal of Science (University of Tehran) (JSUT)* 3(33): 173–185. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Mazloumi Bajestani, A., Keith Schader, R., Stern, Ch.R., Farmer, L. and Sadeghi, M., 2017. Geochemistry, geochronology, isotope and fluid inclusion studies of the Kuh-e-Zar deposit, Khaf-Kashmar-Bardaskan magmatic belt, NE Iran: Evidence of gold-rich iron oxide–copper–gold deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, 183(Part A): 58–78.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.001>
- Lecumberri-Sanchez P., Steel-MacInnis M. and Bodnar R.J., 2012. A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 92: 14–22.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.05.044>
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Golmohammadi, A., 2013. Zircon U–Pb geochronology and petrology of intrusive rocks in the C-North and Baghak districts, Sangan iron mine, NE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64: 256–271.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.028>
- Marschik, R. and Fontboté, L., 1998. Copper (–Iron) mineralization and superposition of alteration events in the Punta del Cobre belt, Northern Chile. In: F. Camus, R.H. Sillitoe, R. Peterson, (Editors), *Andean copper deposits: new discoveries, mineralization, styles and metallogeny*, Society of Economic Geology, Specific Publication, 5: 171–190.
<https://doi.org/10.5382/SP.05.12>
- Marschik, R. and Fontboté, L., 2001. The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu–Au–Zn–Ag deposits. Chile. *Economic Geology*, 96(8): 1799–1826.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1799>
- Marschik, R., Fontignie, D., Chiaradia, M. and Voldet, P. 2003. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotope composition of granitoids of the Early Cretaceous Copiaco plutonic complex (27° 30'S), Chile. *Journal of South America Earth Sciences*, 16(5): 381–398. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(03\)00104-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(03)00104-4)
- Najmi, F., Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Simon, R.P., 2023, The Bahariyeh iron oxide copper–gold deposit, Khaf-Kashmar-Bardaskan magmatic belt, NE Iran: Constraints from geochemical, fluid inclusions, and O-S isotope studies. *Ore Geology Reviews*, 159: 105501.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105501>
- Oliver, N.H.S., Cleverley, J.S., Mark, G., Pollard, P.J., Fu, B., Marshall, L.J., Rubenach, M.J., Williams, P.J. and Baker, T., 2004. Modeling the role of sodic alteration in the genesis of iron–oxide–copper–gold deposits, eastern Mount Isa block, Australia. *Economic Geology*, 99(6): 1145–1176.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.6.1145>
- Pollard, P.J., 2001. Sodic (–calcic) alteration in Fe–oxide–Cu–Au districts: an origin via unmixing of magmatic H₂O–CO₂–NaCl ± CaCl₂–KCl fluids. *Mineralum Deposita*, 36: 93–100.
<https://doi.org/10.1007/s001260050289>

- Pollard, P.J., 2000. Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu–Au mineralization. In: T.M. Porter (Editor), *Hydrothermal iron oxide copper–gold and related deposits: a global perspective 1*, PGC Publishing, Adelaide, 1: 27–41. Retrieved June 3–5, 2023 from <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-04magmatic-fluid-and-metal-sourceppollard.pdf>
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. In: P.E. Ribbe (Editor), *Reviews in Mineralogy 12*. Mineralogy Society of America, 12:644 pp. Retrieved June 3–5, 2023 from [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexj455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1868459](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexj455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1868459)
- Sahebi Khader, J., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Mazloumi Bajestani, A., 2021. Mineralogy, structure and texture and geochemistry of Fadiheh Cu-Au mineral occurrence, northwestern Torbat Heydariyeh. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 30(1): 57–74. <http://dx.doi.org/10.52547/ijcm.30.1.57>
- Shafaii Moghadam, H., Li, X.-H., Ling, X.-X., Santos, J.F., Stern, R.J., Li, Q. and Ghorbani, Gh., 2015. Eocene Kashmar granitoids (NE Iran): Petrogenetic constraints from U–Pb zircon geochronology and isotope geochemistry. *Lithos*, 216-617: 118-135. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.12.012>
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. *A practical guide to fluid inclusion studies*. London, UK: Blackie. Press, London, 239 pp.
- Sillitoe, R.M., 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralum Deposita*, 38: 787–812. <https://doi.org/10.1007/s00126-003-0379-7>
- Simard, M., Beaudoin, G., Bernard, J. and Hupe, A., 2006. Metallogeny of the Mont-de-l’Aigle IOCG deposit, Gaspé Peninsula, Québec, Canada. *Mineralum Deposita*, 41: 607–636. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0061-y>
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P. and Bodnar, R.J., 2012. HOKIEFLINCS-H₂O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H₂O–NaCl. *Computer in Geosciences*, 49: 334–337. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.01.022>
- Taghadosi, H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2018. Mineralogy, Alteration, geochemistry, and fluid inclusion studies of Fe oxide-copper mineralization of Namegh area, NE Kashmar. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 26(3): 541-554. (in Persian with English abstract) <http://dx.doi.org/10.29252/ijcm.26.3.541>
- Vila, T., Lindsay, N. and Zamora, R., 1998. Geology of the Manto Verde copper deposit, northern Chile: a specularite-rich hydrothermal tectonic breccia related to the Atacama fault zone. In: F. Camus, R.H. Sillitoe, R. Petersen, (Editors), *Andean copper deposits: new discoveries, mineralization, styles and metallogeny*. Society of Economic Geology, Special Publication, 5: 157–170. <https://doi.org/10.5382/SP.05.11>
- 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>
- Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., de Haller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S. and Marschik, R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: Geology, Space-time distribution, and possible modes of origin. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Ricards (Editors), *100th Anniversary of Economic Geology*, Society of Economic Geologists pp. 371–405. <https://doi.org/10.5382/AV100.13>
- Yousefi, L., Haidarian Shahri, M.R. and Karimpour, M.H., 2008. Geology, mineralogy, fluid inclusion thermometry and ground magnetic of Shahrak Magnetite-Specularite Cu-Au prospecting area, Torbat-eHeydariyeh, Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 16(3): 505–516. (in Persian with English abstract) Retrieved June 3, 2023 from <http://ijcm.ir/article-1-631-en.html>
- Zhai, D.G., Liu, J.J., Wang, J.P., Yao, M.J., Wu, SH., Fu, C., Liu, Z.J., Wang, S.G. and Li, Y.X., 2013. Fluid evolution of the Jiawula Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia: mineralogical, fluid inclusion, and stable isotopic evidence. *International Geology Reviews*, 55(2): 204–224. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.692905>
- Zhu, Z., 2016. Gold in iron oxide copper–gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 72(Part 1): 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.07.001>