

Original Research Paper

# Geology, alteration, mineralization, and fluid inclusions in the Mahiroud area, SE Sarbisheh, south Khorasan province

Javad Shahalinejad<sup>1\*</sup>, Ali Asghar Calagari<sup>1</sup>, Ali Abedini<sup>2</sup>, and Rahim Masoumi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>2</sup> Department of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

<sup>3</sup> Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received: 2025 July 02

Accepted: 2025 September 22

Available online: 2025 December 22

### Keywords:

Alteration

Hypogene mineralization

Epithermal

Fluid inclusion

Mahiroud

South Khorasan

## ABSTRACT

The Mahiroud area is located about 130 km, SE Sarbisheh, South-Khorasan Province. The host rocks bearing quartz and calcite vein-veinlets consist of volcanic lavas and pyroclastic rocks (tuff) with intermediate composition belonging to Cretaceous. Various types of alterations including silicic, phyllic, argillic, and propylitic were developed in the study area. Both hypogene and supergene mineralization processes were recognized in the area. The hypogene mineralization also in turn occurred during two distinct stages. During the first stage of mineralization, the quartz veinlets containing pyrite, chalcopyrite, sphalerite, galena, magnetite, and gold were formed. The second stage of mineralization is distinguished by the presence of pyrite-bearing calcite veinlets. In the course of supergene alteration principally minerals such as goethite, hematite, malachite, azurite, and chalcocite were developed which superimposed the former hypogene minerals. Based on microthermometric studies, the homogenization temperatures and salinities of the fluid inclusions at Mahiroud vary within the range of 97-235°C and 1.74-7.86 wt.% NaCl eq., respectively. According to the microthermometric data, boiling and mixing with near-surface waters were the important mechanisms in ore deposition at Mahiroud. Evidence acquired from geology, alteration, mineralization, structures, and textures along with fluid inclusion data in current research indicate that mineralization in this area has similarity with low-sulfidation style epithermal deposits.

## 1. Introduction

The Mahiroud prospect area is located in approximately 130 km southeast of Sarbisheh, South- Khorasan province. Geographically,

the area extends from 60°, 46, 01" to 60°, 50, 20" east longitude and from 32°, 07, 00" to 32°, 09, 14" north latitude. From the viewpoint

\* Corresponding author: Javad Shahalinejad; E-mail: shahalinejad@gmail.com

### Citation:

Shahalinejad, J., Calagari, A.A., Abedini, A., and Masoumi, R., 2025. Geology, alteration, mineralization, and fluid inclusions in the Mahiroud area, SE Sarbisheh, south Khorasan province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 35(4), 138, 35-50. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.532087.2207>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2025.532087.2207

 dor: 20.1001.1.10237429.1404.35.4.4.1



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

of classification of the structural zones of Iran, the study area is situated in the Sistan suture zone (Tirrul et al., 1983). The Sistan suture zone was developed as the result of collision of the two Lut and Afghan blocks which took place in late Cretaceous (Zarrinkoub et al., 2012; Angiboust et al., 2013). The Eocene-Oligocene magmatism in the eastern Iran (Lut-Sistan) brought about the formation of volcanic rocks (lavas and pyroclastics) and hypabyssal intrusive bodies. In the current research, it has been endeavored to investigate certain important geological aspects including alteration and mineralization as well as the physico-chemical characteristics of the ore-forming fluids in the Mahiroud area.

## 2. Research methodology

This research has been carried out in two parts, field and laboratory. During field survey the outcrops of all lithologic units as well as the alteration and mineralization zones were thoroughly examined and the representative samples were collected. Also, the relationship between the ore-bearing vein-veinlets and the host rocks were accurately checked. During laboratory works, about 100 thin and 50 thin-polished sections were prepared and then petrographically examined. Furthermore, for implementing microthermometric (fluid inclusion) analysis 20 doubly-polished sections from the ore-bearing quartz and calcite veinlets were prepared.

## 3. Discussions and results

### 3.1. Geology

From the viewpoint of geological setting, the study area lies in the flyschic basin of the eastern Iran (Aghanabati, 2004), and encompasses the southern section of the Mahiroud (Cheshmeh-Ostad) volcanic-intrusive igneous complex. This complex extends along the Iran-Afghanistan border line and is situated in northeastern part of the Sistan suture zone (Tirrul et al., 1983). The overall trend of this complex is NNW-SSW. The volcanic rocks in this complex consist of andesite-basalt, andesite, microgabbro (diabase), pillow lavas, spilite, and dacitic dikes. There is also a sedimentary-clastic unit (red conglomerate and sandstone) interbedded with the volcanic associates.

### 3.2. Alteration

Alteration in the Mahiroud area is widespread and largely observed in and around the mineralized zone. Based on field observations and petrographic examinations, the principal alteration types in the area include silicic, phyllic, argillic, and propylitic. The silicic and phyllic alteration zones were developed mainly adjacent to the ore-bearing vein-veinlets. However, the argillic and propylitic zones are seen mostly in distances farther from the mineralized zones.

### 3.3. Mineralization

Based on field observations, mineralization in the study area mostly occurred in the form of quartz- calcite vein-veinlets being present chiefly along the fault and fracture zones. The ore-bearing vein-veinlets in the study area are hosted by Cretaceous volcanic rocks (lavas and pyroclastics) with andesitic composition. The mineralized vein-veinlets have lengths extending from a few meters up to 150 meters and widths varying from a few meters up to 30 meters. The vein-veinlets contain hypogene ore minerals such as pyrite, chalcopyrite, sphalerite, galena, magnetite, and gold which are superimposed by supergene mineral assemblage like goethite, hematite, malachite, azurite, and chalcocite. Quartz and calcite are the most important gangue minerals existing in the mineralized zone. The quartz crystals often display veinlet, brecciated, plumose, mosaic, vug infill, comb, and crustiform textures. Calcite is the second abundant gangue mineral and commonly depicts veinlet, comb, colloform, and banded textures.

### 3.4. Fluid inclusions

Based on microthermometric studies, the fluid inclusions at Mahiroud have salinities within the range of 1.74-7.86 wt% NaCl eq., and their homogenization temperatures vary from 97°C to 235°C. The ore-bearing fluids at the time trapping experienced hydrostatic pressures ranging from 20 to 40 bars which are almost equivalent to depths of formation about 200 to 400 meters below the underground water table level. The fluids also have densities within the range of 0.90-0.97 g/cm<sup>3</sup>. On the basis of evolutionary trends of the ore-bearing fluids depicted by the microthermometric data points in the TH versus salinity bivariate diagram, both boiling and mixing (by near-surface underground waters) were two important mechanisms in deposition of ore metals at Mahiroud. Moreover, the sulfide complexing ligands played most likely a crucial role in transportation of the ore metals.

## 4. Conclusion

According to the following evidence acquired in current research in the Mahiroud area, the final conclusions were drawn:

- The vein-veinlets control the ore mineralization.
- Various types of alterations (e.g., silicification, phyllic, argillic, propylitic) were developed.
- The hypogene (pyrite, chalcopyrite, sphalerite, galena, magnetite, and gold) and supergene (e.g., goethite, hematite, malachite, azurite, chalcocite) ore mineral assemblages are restricted mainly to the vein-veinlets hosted by pyroclastics volcanic rocks (e.g., andesite and andesite-basalt).
- The gangue minerals (quartz and calcite) display various open-space filling textures (veinlet, brecciated, mosaic, plumose, vug-infill, comb, crustiform, colloform, bladed, and banded).

- The ore-forming fluids had low to moderate temperatures, low to moderate salinities, and moderate densities.
- The depths of mineralization were certainly shallow (200-400 m below the underground water table level).
- Sulfide complexes were the prominent transporting agent for the

ore metals.

The above geological and geochemical data furnished sufficient convincing evidence to attribute the alteration and mineralization in the Mahiroud area to the low-sulfidation epithermal deposit.

# زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و میانبارهای سیال در منطقه ماهیرود، جنوب‌خاور سریشه، استان خراسان جنوبی

جواد شاه‌علی نژاد<sup>۱\*</sup>، علی اصغر کلاگری<sup>۱</sup>، علی عابدینی<sup>۲</sup> و رحیم معصومی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

<sup>۳</sup> گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

## چکیده

منطقه ماهیرود در فاصله ۱۳۰ کیلومتری جنوب‌خاور سریشه در استان خراسان جنوبی قرار دارد. سنگ‌های میزبان کانسار شامل گدازه‌های آتشفشانی و سنگ‌های آذرآواری (توف) بیشتر با ترکیب حدواسط متعلق به کرتاسه می‌باشند. انواع دگرسانی‌های سیلیسی، فلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک در منطقه مورد مطالعه توسعه یافته‌اند. دو فرایند کانه‌زایی درون‌زاد و برون‌زاد در این منطقه تشخیص داده شده است. کانه‌زایی درون‌زاد خود نیز در دو مرحله مشخص صورت گرفته است. در مرحله اول کانه‌زایی، رگچه‌های کوارتزی حاوی پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، مگنتیت و طلا تشکیل شده‌اند. مرحله دوم کانه‌زایی با حضور رگچه‌های کلسیتی حاوی پیریت مشخص می‌شود. در فرایند کانه‌زایی برون‌زاد به‌طور عمده از کانی‌های گوتیت، همتیت، مالاکت، آزوریت و کالکوسیت تشکیل شده‌اند. بر اساس مطالعات ریزدماسنجی، دمای همگن‌شدن و شوری میانبارهای سیال در ماهیرود به ترتیب در محدوده بین ۹۷ تا ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد و ۱/۷۴ تا ۷/۸۶ درصدوزنی معادل نمک تغییر می‌کنند. طبق یافته‌های ریزدماسنجی، جوشش و رقیق شدن سیال کانه‌ساز توسط سیالات سطحی مهم‌ترین سازوکار نهشت کانسنگ در منطقه ماهیرود می‌باشند. شواهد زمین‌شناسی، بافت و ساخت، دگرسانی و کانه‌زایی به‌همراه یافته‌های میانبارهای سیال نشان می‌دهند که کانه‌زایی در این منطقه بیشترین شباهت را با ذخایر اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون پایین دارد.

## اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

دگرسانی

کانه‌زایی درون‌زاد

اپی‌ترمال

میانبارهای سیال

ماهیرود

خراسان جنوبی

## ۱- پیش‌نوشتار

اپی‌ترمال ایران صورت گرفته است (اعلمی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶؛ Heidari et al., 2015; Kouhestani et al., 2020; Ghasemi Siani et al., 2022; Hassani Soughi et al., 2023a, b).

منطقه ماهیرود در فاصله تقریبی ۱۳۰ کیلومتری جنوب‌خاور سریشه در استان خراسان جنوبی با مختصات جغرافیایی "۰۱° ۴۶' ۶۰" تا "۰۲° ۵۰' ۶۰" طول خاوری و "۰۰° ۰۷' ۳۲" تا "۰۹° ۱۴' ۳۲" عرض شمالی واقع شده است. از دیدگاه طبقه‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران، منطقه مورد مطالعه در پهنه زمین‌درز سیستان

ذخایر اپی‌ترمال از ذخایر ارزشمند فلزات پایه و گرانبها به‌شمار می‌روند (Simmons et al., 2005). این ذخایر بیشتر در ژرفاهای کمتر از ۲ کیلومتر از سطح زمین توسط محلول‌هایی با دماهای بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری‌هایی در محدوده ۵ تا ۱۵ درصدوزنی معادل نمک ایجاد می‌شوند (Cooke and Simmons, 2000; Pirajno, 2009). ذخایر اپی‌ترمال به ۳ نوع سولفیداسیون بالا، متوسط و پایین تقسیم‌بندی شده‌اند (Hedenquist et al., 2000; Sillitoe and Hedenquist, 2003). تاکنون پژوهش‌های بسیاری در رابطه با ویژگی‌های سیال‌های گرمایی در ذخایر

\* نویسنده مسئول: جواد شاه‌علی نژاد؛ E-mail: shahalinejad@gmail.com

## ماخذنگاری:

شاه‌علی نژاد، ج، کلاگری، ع.ا، عابدینی، ع. و معصومی، ر. ۱۴۰۴، زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و میانبارهای سیال در منطقه ماهیرود، جنوب‌خاور سریشه، استان خراسان جنوبی. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۵(۴)، ۱۳۸-۵۰. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.532087.2207>

doi: 10.22071/gsj.2025.532087.2207



doi: 20.1001.1.10237429.1404.35.4.4.1

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

سانتی‌گراد و طی سرمایش (با دقت ۰/۲ درجه سانتی‌گراد) با استفاده از استاندارد ان-هگزان با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتی‌گراد صورت گرفت.

### ۳- داده‌ها و بحث

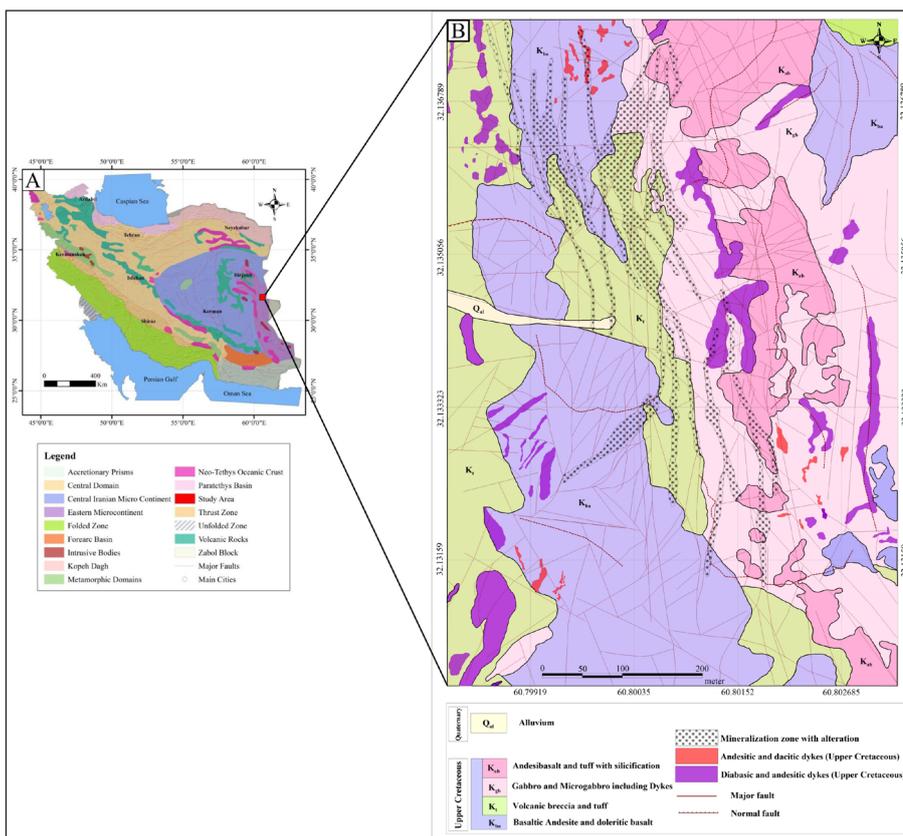
#### ۳-۱- زمین‌شناسی

از نظر جایگاه زمین‌شناسی، منطقه مورد مطالعه در حوضه فلیش خاور ایران (آقناباتی، ۱۳۸۳) قرار دارد (شکل ۱- A) و دربرگیرنده بخش جنوبی مجموعه نفوذی- آتشفشانی ماهیرود (یا چشمه استاد) می‌باشد. این مجموعه در امتداد مرز افغانستان برونزد دارد و در بخش شمال‌خاوری پهنه زمین‌درز سیستان واقع شده است (Tirru et al., 1983). روند عمومی این مجموعه شمال تا شمال‌باختری- جنوب تا جنوب‌خاوری می‌باشد. سنگ‌های آتشفشانی این مجموعه شامل آندزیت- بازالت، آندزیت، میکروگابرو (دیاباز)، گدازه‌های بالشی، اسپیلیت و دایک‌های داسیتی هستند. در بین واحدهای آتشفشانی یک واحد رسوبی- آواری کنگلومرا- ماسه‌سنگ قرمز رنگ وجود دارد (شکل ۱- B). مجموعه ماهیرود از دو پهنه ساختاری- سنگ‌شناختی متمایز تشکیل شده است (Tirru et al., 1983)؛ به گونه‌ای که در بخش باختری شامل جریان گدازه و لایه‌های رسوبی و در بخش خاوری به‌طور عمده شامل میکروگابرو است. هر دو مجموعه گدازه و میکروگابرو توسط دایک‌هایی با روند تقریبی شمالی- جنوبی قطع شده‌اند. گدازه‌های آندزیتی در منطقه بیشتر به‌رنگ خاکستری تیره تا خاکستری روشن برونزد دارند و به‌صورت سخت‌فرسا هستند (شکل‌های ۲- A و B). این گدازه‌ها اغلب ارتفاعات بخش میانی و خاوری منطقه را می‌سازند. مهم‌ترین واحدهای آذرآواری شامل توف و برش‌های آتشفشانی می‌باشند که به‌صورت میان لایه‌ای با گدازه‌های بازالت، میکروگابرو و یا آندزیت گسترش یافته‌اند (شکل ۲- A) و قسمت عمده دگرسانی‌ها در این واحدها مشاهده می‌شوند. برش‌های آتشفشانی بیشتر به‌رنگ خاکستری تیره تا روشن بوده و حاوی قطعات برشی در حد چند سانتی‌متر می‌باشند و به‌صورت نرم‌فرسا برونزد دارند. فرسایش‌پذیری این واحد به‌ویژه در بخش‌هایی که به‌صورت توف می‌باشد، شایان توجه است.

(Tirru et al., 1983) قرار دارد. پهنه زمین‌درز سیستان حاصل برخورد دو بلوک لوت و افغان بوده و بر اساس سن‌سنجی‌های انجام شده، زمان بسته شدن آن به کرتاسه پسین برمی‌گردد (Zarrinkoub et al., 2012; Angiboust et al., 2013). منطقه مورد مطالعه به‌دلیل دارا بودن ذخایر مس، طلا و سایر عناصر کانسنگی از دیرباز مورد توجه بسیاری از زمین‌شناسان بوده است. تاکنون چندین فعالیت‌های اکتشافی در این منطقه صورت گرفته که از جمله آن‌ها می‌توان به اکتشافات ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و حفر ترانشه‌های اکتشافی اشاره نمود (سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران، ۱۴۰۱؛ شرکت مهندسی مشاور زمین آب پی، ۱۴۰۲). بر اساس این مطالعات عیار مس، روی و طلا به‌ترتیب در حدود ۱ درصد، ۰/۳ درصد و ۱ تا ۳ گرم در تن اندازه‌گیری شده است. در این پژوهش، سعی شده تا ویژگی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی و همچنین ویژگی‌های سیال‌های کانه‌ساز در منطقه ماهیرود مورد مطالعه قرار گیرند.

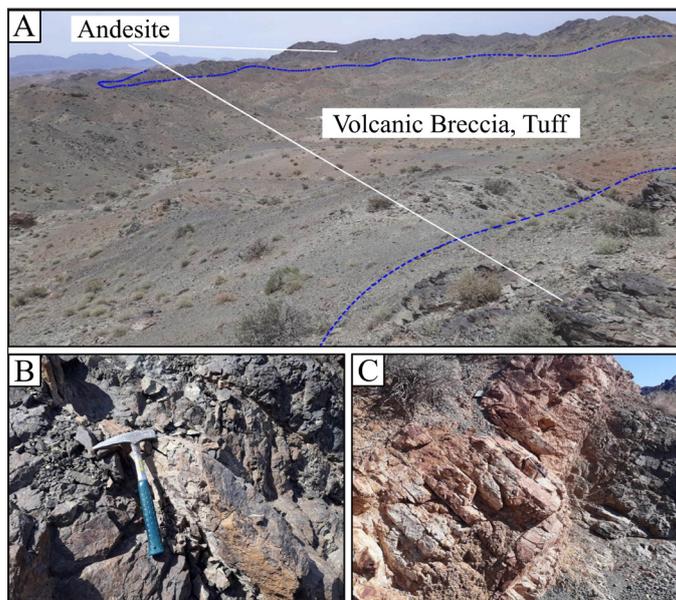
#### ۲- روش پژوهش

این پژوهش در دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. در ابتدا بازدید صحرایی از منطقه جهت بررسی رخنمون‌های سنگی و پهنه‌های دگرسانی و کانه‌دار و چگونگی ارتباط رگه‌های کانه‌دار با سنگ‌های میزبان انجام گرفت. سپس تعداد ۲۰۰ نمونه از واحدهای سنگی و رخنمون‌های کانه‌زایی برداشت شدند. نمونه‌برداری اغلب از مغزه‌های حفاری صورت گرفته است. در بخش آزمایشگاهی تعداد ۱۰۰ نمونه مقطع نازک و ۵۰ مقطع نازک- صیقلی تهیه و مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین به منظور انجام مطالعات میانبارهای سیال، تعداد ۲۰ مقطع دوبر صیقل از رگه‌های کانه‌دار تهیه شدند. بررسی‌های ریزدماسنجی در دانشگاه تربیت مدرس تهران با استفاده از دستگاه لینکام مدل THMSG600 نصب شده بر روی میکروسکوپ ZEISS انجام شد. این دستگاه قابلیت تغییرات دما از ۶۰۰+ تا ۲۰۰- درجه سانتی‌گراد را داراست. کالیبراسیون دستگاه طی گرمایش (با دقت ۰/۶ درجه سانتی‌گراد) با استفاده از استاندارد نیترات سزیم با نقطه ذوب ۴۱۴+ درجه



شکل ۱- A) موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران (آقناباتی، ۱۳۸۳). B) نقشه زمین‌شناسی منطقه ماهیرود با تغییراتی بعد از گیلو و همکاران (Guillou et al., 1981).

Figure 1- A) Location of the study area on the structural zones division map of Iran (Aghanabati, 2004). B) The geological map of the Mahiroud area, modified after Guillou et al. (1981).



شکل ۲- تصاویر صحرایی از واحدهای سنگی منطقه ماهیرود. (A) نمایی دور از گدازه‌های آندزیتی، توف و برش آتشفشانی (دید به سمت جنوب‌باختر). (B) نمایی نزدیک از گدازه‌های آندزیتی. (C) برون‌زد صحرایی از دایک‌های داسیتی.

Figure 2. Field images of rock units in the Mahiroud area. A) Distant view of andesitic lavas, tuff, and volcanic breccia (view toward southwest). B) Close-up view of andesitic lavas. C) An outcrop of dacitic dike.

و پروپیلیتیک در فاصله به نسبت دورتری از رگه‌های کانه‌دار دیده می‌شوند. دگرسانی سیلیسی چیره‌ترین نوع دگرسانی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد و به صورت رگه-رگچه‌ای و سیلیسی شدن سنگ‌های میزبان رخ داده است (شکل ۳-۱). این دگرسانی در ارتباط نزدیک با رگه‌های کانه‌دار در منطقه است. مهم‌ترین کانی موجود در این پهنه دگرسانی کوارتز می‌باشد که به صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل تا شکل‌دار تشکیل شده است (شکل ۴-۱). دگرسانی فیلیک در منطقه مورد مطالعه نسبت به سایر دگرسانی‌ها گسترش به نسبت کمتری دارد و بر پایه مطالعات میکروسکوپی این دگرسانی با حضور کانی‌های سریسیت، کوارتز و پیریت مشخص می‌شود (شکل ۴-۲). پولک‌های سریسیت موجود در این دگرسانی بیشتر به صورت جانشینی فلدسپارها مشاهده می‌شوند. در منطقه مورد مطالعه دگرسانی آرژیلیک از گسترش به نسبت زیادی برخوردار بوده و عمدتاً به رنگ سفید تا زرد قابل شناسایی است (شکل ۳-۲). در این دگرسانی، کانی‌های رسی به صورت جانشینی فلدسپارها و سریسیت تشکیل شده‌اند. دگرسانی پروپیلیتیک عمدتاً به رنگ سبز در منطقه قابل مشاهده است (شکل ۳-۳). مطابق با مطالعات میکروسکوپی، کلریت، اپیدوت و کلسیت مهم‌ترین کانی‌های سازنده این پهنه دگرسانی هستند (شکل ۴-۳ و ۴-۴). کلریت به رنگ سبز و آبی به صورت جانشینی کانی‌های فرومنیزین یافت می‌شود. اپیدوت و کلسیت نیز معمولاً به صورت رگچه‌ای و جانشینی فلدسپارها قابل مشاهده می‌باشند. در برخی موارد بلورهای خودشکل اپیدوت و کلسیت در داخل فضاهای خالی و شکستگی‌ها تشکیل شده‌اند.

### ۳-۳- کانی‌سازی

کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه در طی دو فرایند درون‌زاد و برون‌زاد رخ داده است. بر اساس مشاهدات صحرایی، کانه‌زایی درون‌زاد در منطقه مورد مطالعه بیشتر به صورت

سیال‌های حاصله از نفوذ توده‌های نیمه‌ژرف از نوع تونالیتی به سن کوتاه بالایی در واحدهای آتشفشانی و آذرآواری سبب ایجاد دگرسانی‌های گسترده در منطقه مورد مطالعه شده است. این سنگ‌ها در منطقه به رنگ خاکستری روشن رخنمون دارند و در نمونه‌های دستی حاوی بلورهای درشت پلاژیوکلاز و بیوتیت می‌باشند. در داخل توده‌های تونالیتی دایک‌های آپلیتی با ترکیب سینیتی تا سینیت‌های کوارتزار نفوذ نموده‌اند. در این ناحیه توده‌های دیابازی (میکروگابرو) به صورت تکتونیزه بوده و آپوفیزهای تونالیتی در آن نفوذ کرده‌اند. مشاهدات صحرایی و بررسی‌های سنگ‌شناختی گویای نفوذ دست کم دو نسل دایک با ترکیب دیابازی و داسیت-آندزیتی در منطقه می‌باشد که به طور عمده دارای راستای تقریبی شمالی-جنوبی می‌باشند (شکل ۲-۳). مهم‌ترین عنصر ساختاری در منطقه مورد مطالعه شامل شکستگی‌ها یعنی گسل‌ها و درزه‌ها هستند و چین‌خوردگی و آثار آن به دلیل رخنمون ناچیز واحدهای رسوبی کمتر به چشم می‌خورد. ساختار چیره در این منطقه، پهنه‌های گسلی راستالغز می‌باشند که آثار حرکتی آن اغلب توسط نهشته‌های آبرفت رودخانه‌ای پوشیده شده است.

### ۳-۲- دگرسانی

دگرسانی در منطقه ماهیرود از گستردگی زیادی برخوردار بوده و معمولاً در اطراف پهنه‌های کانه‌دار مشاهده می‌شود. پهنه‌های دگرسانی در این منطقه تا طول تقریبی ۵ کیلومتر و عرض ۱ تا ۲ کیلومتر گسترش یافته‌اند. بر اساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی، عمده‌ترین نوع دگرسانی‌ها در منطقه شامل دگرسانی‌های سیلیسی، فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک هستند. این دگرسانی‌ها بیشتر در واحدهای آتشفشانی (آندزیت-بازالت) و آذرآواری (توف) مشاهده می‌شوند. دگرسانی‌های سیلیسی و فیلیک بیشتر در نزدیکی رگه‌های کانه‌دار حضور دارند، اما دگرسانی‌های آرژیلیک

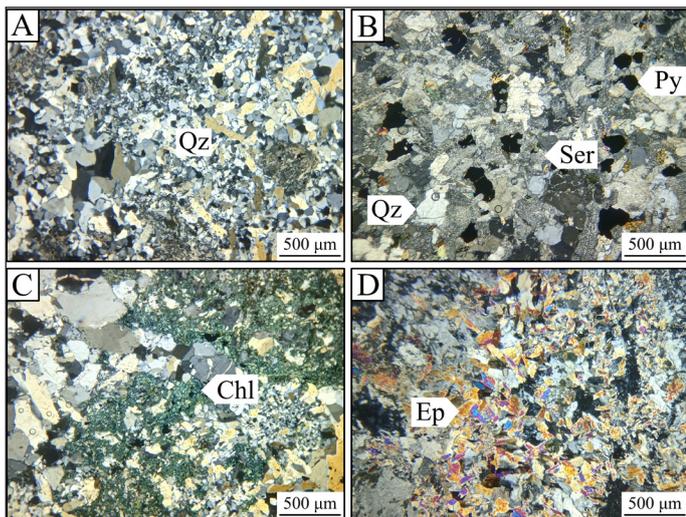
به کرتاسه میزبانی می‌شوند. طول رگه‌های کوارتزی-کلسیتی از چند متر تا ۱۵۰ متر متغیر بوده و ستبرای آن‌ها از چند متر تا ۳۰ متر تغییر می‌کند. کانه‌زایی در این رگه‌ها معمولاً شامل پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، مگنتیت و طلا می‌باشد.

رگه‌های کوارتزی-کلسیتی و در امتداد پهنه‌های گسلی و درون شکستگی‌ها رخ داده است (شکل ۵). این رگه‌ها با راستای چیره شمالی-جنوبی در منطقه توسط سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری (اغلب گدازه و توف) با ترکیب آندزیتی متعلق



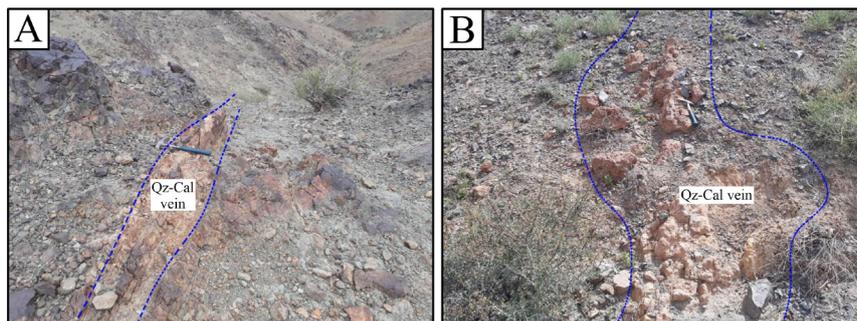
شکل ۳- تصاویر صحرایی از دگرسانی‌های منطقه ماهیرود. (A) دگرسانی سیلیسی در سنگ‌های آندزیت-بازالت. (B) دگرسانی آرژیلیک در سنگ‌های آندزیت-بازالت. (C) دگرسانی پروپیلیتیک در سنگ‌های بازالتی.

Figure 3. Field images of the alterations in the Mahiroud area. A) Silicic alteration in andesite-basalt rocks. B) Argillic alteration in andesite-basalt rocks. C) Propylitic alteration in basaltic rocks.



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی (XPL) از دگرسانی‌های منطقه ماهیرود. (A) تشکیل بلورهای کوارتز با اندازه‌های متفاوت در پهنه دگرسانی سیلیسی. (B) حضور کانی‌های سریسیت، کوارتز و پیریت در پهنه دگرسانی فیلیک. (C) تشکیل کانی کلریت در پهنه دگرسانی پروپیلیتیک. (D) حضور بلورهای اپیدوت در دگرسانی پروپیلیتیک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Chl: کلریت، Ep: اپیدوت، Py: پیریت، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت).

Figure 4. Microscopic images (XPL) of the alterations in the Mahiroud area. A) Formation of quartz crystals with different sizes in the silicic alteration zone. B) Presence of sericite, quartz and pyrite minerals in the phyllic alteration zone. C) Formation of chlorite mineral in the propylitic alteration zone. D) Presence of epidote crystals in the propylitic alteration. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Chl: chlorite, Ep: epidote, Py: pyrite, Qz: quartz, Ser: sericite).

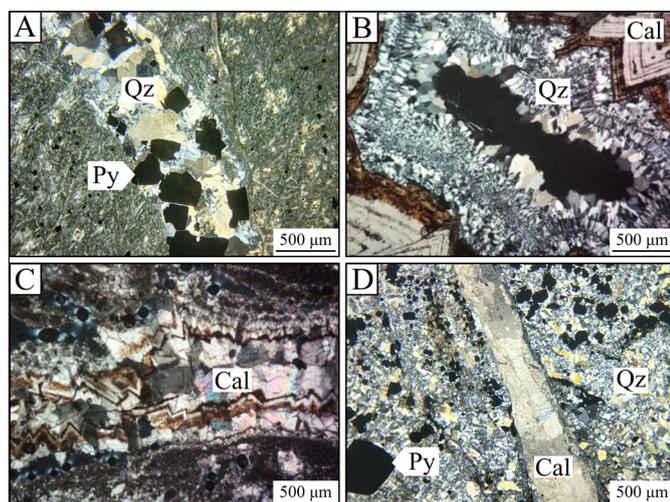


شکل ۵- A و B) برونزدهای صحرایی از رگه‌های کوارتزی-کلسیتی موجود در منطقه ماهیرود.

Figure 5- A and B) Field outcrops of quartz-calcite veins in the Mahiroud area.

می‌کنند. در طی مرحله دوم کانه‌زایی، رگچه‌های کلسیتی به سبزی‌های چند میکرون تا چند سانتی‌متر تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۶-C و D). در این رگچه‌ها به همراه کلسیت مقدار کمی پیریت نیز حضور دارد. رگچه‌های کلسیتی گاه رگچه‌های کوارتزی مربوط به مرحله اول کانه‌زایی را قطع نموده‌اند (شکل ۶-D) که خود نشانگر تاخیری بودن آن‌هاست. توالی پاراژنتیکی کانی‌های معدنی و باطله منطقه مورد مطالعه در شکل ۷ ارائه شده است.

بر اساس سیماهای تقاطعی، مجموعه کانیایی و روابط بافتی، کانه‌زایی درون‌زاد در منطقه مورد مطالعه به نظر می‌رسد که در طی دو مرحله صورت گرفته باشد. مرحله اول با حضور رگچه‌های کوارتزی به سبزی‌های چند میکرون تا چندین سانتی‌متر مشخص می‌شود (شکل‌های ۶-A و B) که اغلب توسط رگچه‌های مرحله دوم کانه‌زایی قطع شده‌اند. در رگچه‌های کوارتزی تشکیل شده طی این مرحله، کانی‌های سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن)، مگنتیت و طلا بلورهای کوارتز را همراهی



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی (XPL) از مراحل کانه‌زایی در منطقه ماهیرود. A) رگچه کوارتزی مربوط به مرحله اول کانه‌زایی. B) تشکیل بلورهای کوارتز با بافت پرکننده فضای خالی در مرحله اول کانه‌زایی. C) مرحله دوم کانه‌زایی به صورت رگچه‌های کلسیتی. D) قطع شدگی بلورهای کوارتز مرحله اول کانه‌زایی توسط رگچه کلسیتی مربوط به مرحله دوم کانه‌زایی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Py: پیریت، Qz: کوارتز).

Figure 6. Microscopic images (XPL) of the stages of mineralization in the Mahiroud area. A) Quartz veinlet related to the first stage of mineralization. B) Formation of quartz crystals with vug-infill texture in the first stage of mineralization. C) Second stage of mineralization in the form of calcite veinlets. D) Crosscutting of quartz crystals of the first stage of mineralization by a calcite veinlet of the second stage of mineralization. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Py: pyrite, Qz: quartz).

Minerals and textures		→ Decreasing time →		
		Hypogene Mineralization		Supergene Mineralization
		Stage 1	Stage 2	
Ore	Pyrite	██████████		
	Chalcopyrite	██████████		
	Sphalerite	██████████		
	Galena	██████████		
	Magnetite	██████████		
	Gold	██████████		
	Goethite			██████████
	Hematite			██████████
	Malachite			██████████
	Azurite			██████████
	Chalcocite			██████████
	Gangue	Quartz	██████████	
Calcite			██████████	
Textures	Vein-veinlets	██████████		
	Brecciated	██████████		
	Plumose	██████████		
	Mosaic	██████████		
	Vug infill	██████████		
	Comb		██████████	
	Crustiform	██████████		
	Colloform	██████████		
	Bladed		██████████	
	Ribbon		██████████	
	Disseminated	██████████		
	Replacement			██████████
	Relict			██████████

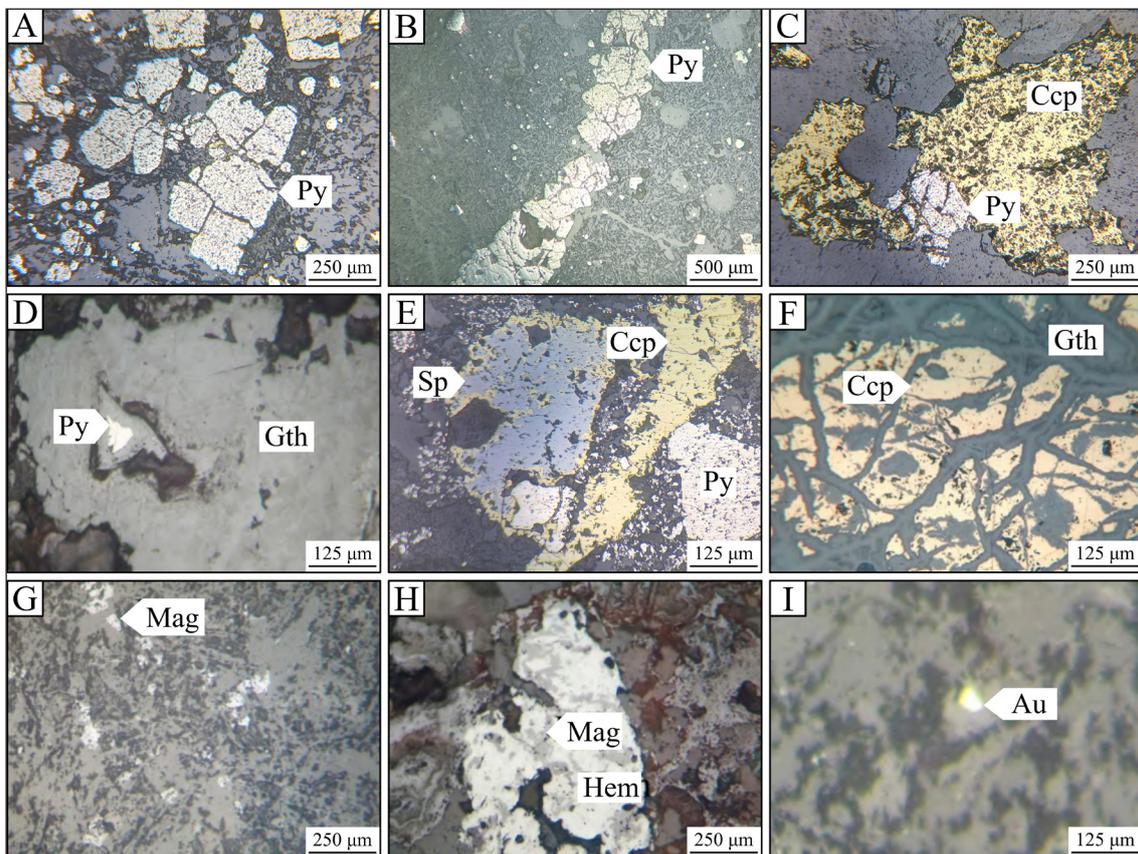
شکل ۷- توالی پاراژنتیکی کانی‌های معدنی و باطله در منطقه ماهیرود.

Figure 7. Paragenetic sequence of ore and gangue minerals in the Mahiroud area.

به گوتیت (شکل ۸- A)، مالاکیت، آزوریت و کالکوسیت دگرسان شده است. در برخی موارد شدت هوازدگی به گونه‌ای است که بخش اعظم کالکوپیریت از بین رفته و تنها بقایایی از آن به صورت بافت بازماندی یا جزیره‌ای قابل مشاهده می‌باشد. اسفالریت بیشتر به صورت بلورهای ریز تا متوسط بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار و به حالت دانه‌پراکنده دیده می‌شود. گاهی اسفالریت به صورت جانشینی بلورهای کالکوپیریت نیز قابل مشاهده است (شکل ۸- E)، به گونه‌ای که در برخی موارد ادخال‌هایی از کالکوپیریت درون اسفالریت به چشم می‌خورد. گالن غالباً به صورت بلورهای بسیار ریز و بی‌شکل در مقادیر ناچیز وجود دارد. مگنتیت بیشتر به صورت بلورهای ریز بی‌شکل با بافت دانه‌پراکنده مشاهده می‌شود (شکل ۸- G). این کانی عمدتاً از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها به هماتیت دگرسان (مارتیتی شدن) شده است (شکل ۸- H). طلا به طور معمول در ابعاد بسیار کوچک و به مقدار کم در زمینه کوارتزی مشاهده می‌شود (شکل ۸- I). همچنین در برخی موارد طلا به صورت ادخال‌های بسیار ریز درون کانی سولفیدی (پیریت) حضور دارد. گوتیت، هماتیت، مالاکیت، آزوریت و کالکوسیت طی فرایندهای برون‌زاد در منطقه ماهیرود تشکیل شده‌اند.

پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی در منطقه ماهیرود است که معمولاً به صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل تا شکل دار و اغلب با بافت دانه‌پراکنده و ریزرگچه‌ای مشاهده می‌شود (شکل‌های ۸- A و B). ریزرگچه‌های پیریتی اغلب ستبرایی بین چند میکرون تا چند صد میکرون دارند. در پهنه‌های کانه‌زایی، پیریت بیشتر به صورت هم‌رشد با کالکوپیریت دیده می‌شود. گاهی بلورهای پیریت از حاشیه توسط کالکوپیریت احاطه شده‌اند (شکل ۸- C) که نشانگر تبلور پیریت پیش از کالکوپیریت است. در پهنه‌های هوازده، بلورهای پیریت عمدتاً از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها به صورت بخشی به گوتیت و هماتیت تبدیل شده‌اند (شکل ۸- D). در برخی موارد شدت هوازدگی تا حدی بوده که تنها بقایایی از آن‌ها به صورت بافت بازماندی یا جزیره‌ای بر جای مانده است.

کالکوپیریت به صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار و به حالت دانه‌پراکنده یافت می‌شود (شکل ۸- C). این کانی‌ها عموماً همراه با پیریت حضور دارند و گاه توسط اسفالریت احاطه و جانشین شده‌اند (شکل ۸- E). در نتیجه فرایندهای برون‌زاد، کالکوپیریت اغلب از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی (XPL) از کانه‌های موجود در رگچه‌های کوارتزی منطقه ماهیرود. (A) حضور بلورهای ریز تا درشت پیریت در زمینه سیلیسی. (B) تشکیل بلورهای پیریت به صورت ریزرگچه‌ای. (C) احاطه شدن بلورهای پیریت از حاشیه توسط کالکوپیریت. (D) دگرسان شدن پیریت از حاشیه به گوتیت. (E) جانشینی بلورهای کالکوپیریت توسط اسفالریت. (F) دگرسانی کالکوپیریت به گوتیت. (G) حضور مگنتیت به صورت دانه‌پراکنده در زمینه کوارتزی. (H) دگرسانی مگنتیت به هماتیت (Martitization). (I) حضور طلا در ابعاد بسیار کوچک در زمینه سیلیسی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Au: طلا، Ccp: کالکوپیریت، Gth: گوتیت، Hem: هماتیت، Mag: مگنتیت، Py: پیریت، Sp: اسفالریت).

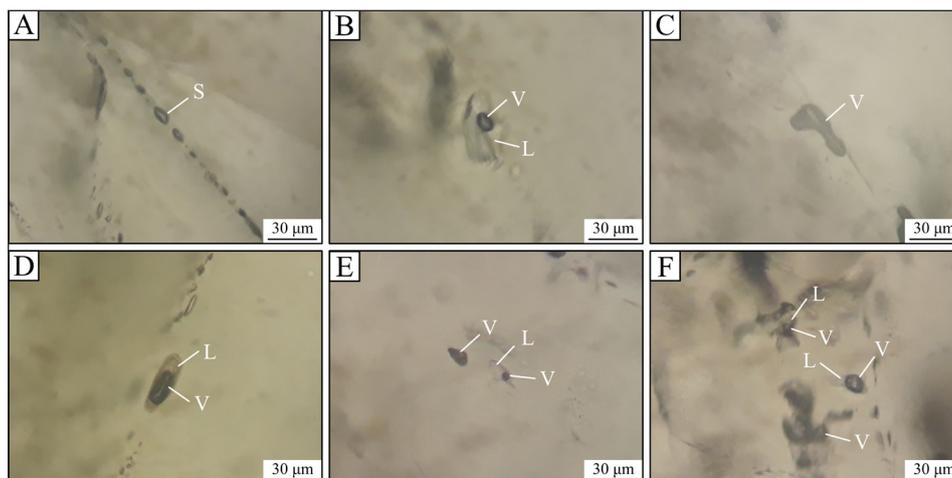
Figure 8. Microscopic images (XPL) of ore minerals in the quartz veinlets of the Mahiroud area. A) Presence of fine- to coarse-grained pyrite crystals in a silicic matrix. B) Formation of pyrite crystals in the form of micro-veinlets. C) Pyrite crystals surrounded by chalcopyrite. D) Alteration of pyrite to goethite. E) Replacement of chalcopyrite crystals by sphalerite. F) Alteration of chalcopyrite to goethite. G) Presence of magnetite in the form of disseminated grains in a quartz matrix. H) Alteration of magnetite to hematite (Martitization). I) Presence of gold bleb in microcrystalline silicic matrix. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Au: gold, Ccp: chalcopyrite, Gth: goethite, Hem: hematite, Mag: magnetite, Py: pyrite, Sp: sphalerite).

شکل منفی بلورمیزبان و نامنظم دیده می‌شوند (شکل ۹). پدیده باریک‌شدگی نیز در برخی میانبرهای سیال منطقه ماهیرود مشاهده شده است. بر پایه معیارهای پیشنهادی (Roedder, 1984; Goldstein, 2003)، میانبرهای سیال منطقه مورد مطالعه شامل انواع اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب می‌باشند (شکل ۹-۹A). مطالعات ریزدماسنجی منحصر بر روی میانبرهای سیال اولیه انجام گرفته است. با توجه به محتوای فازهای اصلی و طبقه‌بندی‌های ارائه شده (Roedder, 1984; Shepherd et al., 1985)، انواع میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع (LV)، تک‌فازی گاز (V) و دوفازی غنی از گاز (VL) در مقاطع بررسی شده شناسایی شدند (شکل‌های ۹-B تا F). هیچ‌گونه شواهدی از حضور فازهای جامد نوزاد یا CO<sub>2</sub> مایع یا گاز در میانبرهای سیال مشاهده نشد. میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع فراوانی بیشتری نسبت به انواع دیگر میانبرها نشان می‌دهند. در این میانبرها فاز مایع حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد و فاز بخار حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد حجم میانبرها را اشغال می‌کنند. میانبرهای سیال دوفازی غنی از گاز نسبت به انواع دیگر میانبرها فراوانی کمتری دارند. در این نوع میانبرها فاز بخار به‌طور تقریبی ۶۰ تا ۹۰ درصد و فاز مایع ۱۰ تا ۴۰ درصد حجم میانبرها را تشکیل می‌دهند. در برخی موارد، میانبرهای سیال دوفازی غنی از مایع به‌همراه میانبرهای سیال تک‌فازی گاز و دوفازی غنی از گاز مشاهده می‌شوند (شکل‌های ۹-E و F) که حضور هم‌زمان آن‌ها می‌تواند نشانگر رخداد جوشش سیالات کانه‌ساز در منطقه ماهیرود باشد.

کوارتز و کلسیت مهم‌ترین کانی‌های باطله موجود در پهنه‌های دگرسانی و کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. کوارتز اصلی‌ترین کانی باطله در منطقه به‌شمار می‌رود و عمدتاً به‌صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل تا شکل‌دار در رگه- رگچه‌های کانه‌دار حضور دارد. بلورهای کوارتز اغلب بافت‌های رگچه‌ای، برشی، پرمانند، موزاییکی، پرکننده فضاهای خالی، شانه‌ای و پوسته‌ای را به نمایش می‌گذارند (شکل‌های ۶-A و B). کلسیت دومین کانی باطله در منطقه ماهیرود بوده و بیشتر به‌صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل تا شکل‌دار دیده می‌شود. بلورهای کلسیت غالباً بافت‌های رگچه‌ای، شانه‌ای، کلوفرمی، تیغه‌ای و نواری را به نمایش می‌گذارند (شکل‌های ۶-C و D).

### ۳-۴- میانبرهای سیال

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته بر روی مقاطع کانسنجی منطقه ماهیرود، بلورهای کوارتز و کلسیت موجود در رگه- رگچه‌های کانه‌دار برای مطالعه میانبرهای سیال مناسب تشخیص داده شدند. در بررسی سنگ‌نگاری میانبرهای سیال ویژگی‌هایی از جمله اندازه، شکل، نوع، درجه پرشدگی و نسبت فازهای میانبرهای سیال مورد مطالعه قرار گرفتند. اندازه میانبرهای سیال منطقه ماهیرود از زیر ۵ تا ۲۰ میکرون تغییر می‌کند؛ اما بیشتر آن‌ها دارای اندازه‌ای کمتر از ۱۰ میکرون هستند. از نظر شکل ظاهری، میانبرهای سیال در ماهیرود بیشتر به‌صورت بیضوی، کروی، کشیده، سوزنی،



شکل ۹- تصاویر میکروسکوپی از میانبرهای سیال منطقه ماهیرود. (A) میانبرهای سیال ثانویه (S). (B) میانبر سیال دوفازی غنی از مایع. (C) میانبر سیال تک‌فازی گاز. (D) میانبر سیال دوفازی غنی از گاز. (E) حضور میانبر سیال دوفازی غنی از مایع در کنار میانبر سیال تک‌فازی گاز. (F) همراهی سه نوع میانبر سیال دوفازی غنی از مایع، میانبر سیال تک‌فازی گاز و دوفازی غنی از گاز.

Figure 9. Microscopic images of fluid inclusions in the Mahiroud area. A) Secondary fluid inclusions (S). B) Liquid-rich two-phase fluid inclusion. C) Mono-phase vapor fluid inclusion. D) Vapor-rich two-phase fluid inclusion. E) Presence of liquid-rich two-phase fluid inclusion next to mono-phase vapor fluid inclusion. F) Coexistence of three types of fluid inclusions: liquid-rich two-phase, mono-phase vapor, and vapor-rich two-phase.

قطعه یخ (T<sub>m</sub>) میانبرهای سیال اندازه‌گیری شد. دمای ذوب نخستین قطعه یخ در میانبرهای سیال مربوط به بلورهای کوارتز در گستره بین ۲۶- تا ۳۳/۵- درجه سانتی‌گراد و در میانبرهای سیال مربوط به بلورهای کلسیت در محدوده بین ۲۶/۱- تا ۲۶/۳- درجه سانتی‌گراد قرار دارند. این دماهای حاصله مربوط به اولین نقطه ذوب یخ (دماهای یوتکتیک) نشان می‌دهند که سیال‌های گرمابی در ماهیرود افزون بر NaCl حاوی مقادیر کمی هم از KCl و MgCl<sub>2</sub> نیز می‌باشند (Shepherd et al., 1985; Goldstein, 2003; Prokofiev et al., 2010). در مرحله بعد، دمای

مطالعات ریزدماسنجی میانبرهای سیال طی دو مرحله سرمایش و گرمایش بر روی ۶۲ میانبر سیال اولیه دوفازی غنی از مایع انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. از آنجا که در فرایند گرمایش میانبرهای سیال دوفازی غنی از گاز، تعیین دقیق دمای همگن‌شدگی به‌راحتی امکان‌پذیر نبود از این رو، جهت پرهیز از خطا، اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی بر روی این نوع میانبرها صورت نگرفت. در مرحله سرمایش انجماد نهایی میانبرها تا محدوده دمایی ۸۰- تا ۹۰- درجه سانتی‌گراد انجام شد. سپس با افزایش تدریجی دما، دمای ذوب نخستین

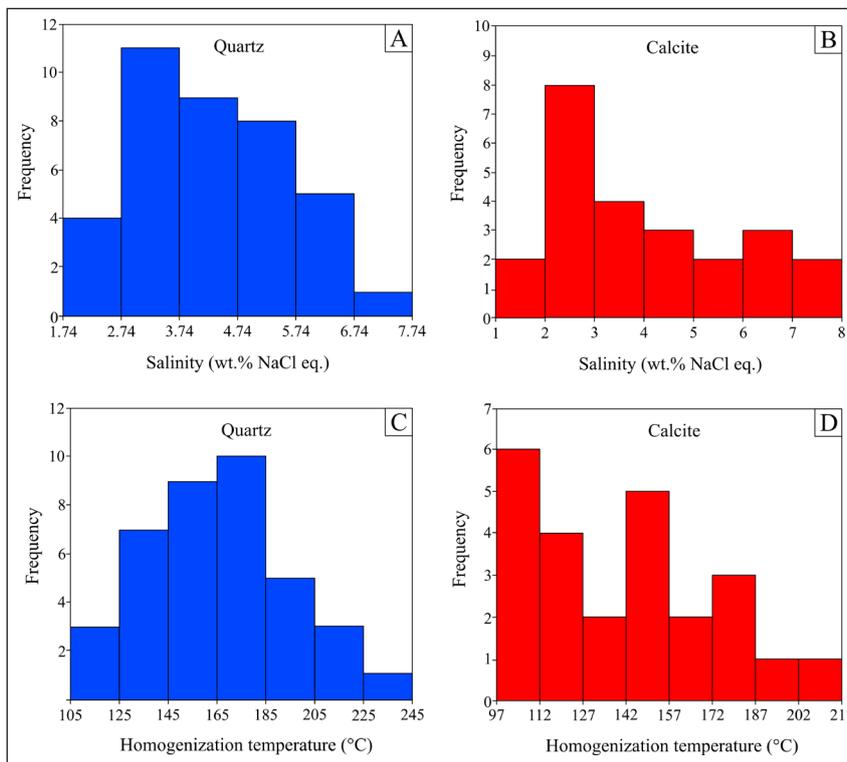
معادل نمک طعام و ۱/۷۴ تا ۷/۸۶ درصد وزنی معادل نمک طعام تعیین گردیدند (شکل‌های ۱۰-A و B). طی فرایند گرمایش، تمامی میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع با ناپدید شدن فاز گازی به فاز مایع همگن شدند. دماهای همگن شدن میانبارهای سیال مطالعه شده در بلورهای کوارتز در محدوده بین ۱۰۵ تا ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد و در بلورهای کلسیت در بازه بین ۹۷ تا ۲۰۸ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده‌اند (شکل‌های ۱۰-C و D).

ذوب آخرین قطعات یخ ( $T_{mice}$ ) در میانبارهای سیال موجود در بلورهای کوارتز و کلسیت تعیین گردیدند و مقادیر آنها در بازه دمایی بین ۱- تا ۴/۶- درجه سانتی‌گراد در بلورهای کوارتز و بین ۱- تا ۵- درجه سانتی‌گراد در بلورهای کلسیت متغیر می‌باشند. با توجه به رابطه ارائه شده توسط بودنار (Bodnar, 2003) و بر اساس دمای ذوب آخرین قطعات یخ ( $T_{mice}$ )، مقادیر شوری میانبارهای سیال بررسی شده در بلورهای کوارتز و کلسیت به ترتیب در محدوده بین ۱/۷۴ تا ۷/۳۱ درصد وزنی

جدول ۱- یافته‌های ریزدماسنجی میانبارهای سیال منطقه ماهیرود.

Table 1. Microthermometric data of fluid inclusions in the Mahiroud area.

Sample	Inclusion type	Number	Mineral	$T_m$ (°C)	$T_{mice}$ (°C)	Salinity (wt% NaCl equiv.)	Th (°C)
MH-01	LV	11	Quartz	-26 to -32	-1.2 to -4	2.07 to 6.45	125 to 189
MH-02	LV	16	Quartz	-31.8 to -33.5	-1 to -4.6	1.74 to 7.31	105 to 235
MH-03	LV	11	Quartz	-	-1.9 to -3.9	3.23 to 6.30	128 to 212
MH-04	LV	7	Calcite	-	-1.2 to -4.2	2.07 to 6.74	109 to 208
MH-05	LV	5	Calcite	-26.1 to -26.3	-2 to -4.1	3.39 to 6.59	131 to 179
MH-06	LV	6	Calcite	-	-1 to -4.6	1.74 to 7.31	97 to 147
MH-07	LV	6	Calcite	-	-1 to -5	1.74 to 7.86	110 to 167

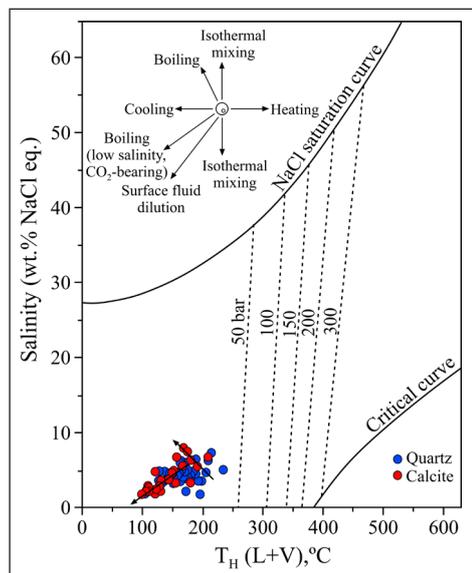


شکل ۱۰- نمودارهای ستونی شوری و دمای همگن شدن میانبارهای سیال منطقه ماهیرود. A) نمودار ستونی شوری میانبارهای سیال موجود در بلورهای کوارتز. B) نمودار ستونی شوری میانبارهای سیال موجود در بلورهای کلسیت. C) نمودار ستونی دمای همگن شدن میانبارهای سیال موجود در بلورهای کوارتز. D) نمودار ستونی دمای همگن شدن میانبارهای سیال موجود در بلورهای کلسیت.

Figure 10. Histograms of salinity and homogenization temperature of fluid inclusions in the Mahiroud area. A) Histogram of salinity of fluid inclusions in quartz crystals. B) Histogram of salinity of fluid inclusions in calcite crystals. C) Histogram of homogenization temperature of fluid inclusions in quartz crystals. D) Histogram of homogenization temperature of fluid inclusions in calcite crystals.

گرمایی شده که با حضور رگچه‌های کلسیتی (گاه با بافت تیغه‌ای) در داخل رگچه‌های کوارتز نمایان می‌شوند. در طی این فرایند شوری سیال‌ها تا حدود ۸٪ وزنی افزایش و دمای آن‌ها تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد پائین آمده است. در واقع فرایند جوشش سبب تفکیک نمک‌ها درون فاز مایع و در نتیجه، افزایش شوری سیال باقی‌مانده می‌شود (Wilkinson, 2001; Calagari, 2004).

یافته‌های مربوط به شوری و دمای همگنی میانبارهای سیال در ماهیرود در روی نمودار دومتغیره شوری در برابر دمای همگنی نمایش داده شده‌اند (شکل ۱۱). بر اساس این شکل، یافته‌های ریزدماسنجی نشان می‌دهند که سیال‌های اولیه دماهایی حدود ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد و شوری‌هایی حدود ۵٪ وزنی معادل نمک طعام داشته و سپس در دماهای حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد متحمل جوشش و ریزشکستگی

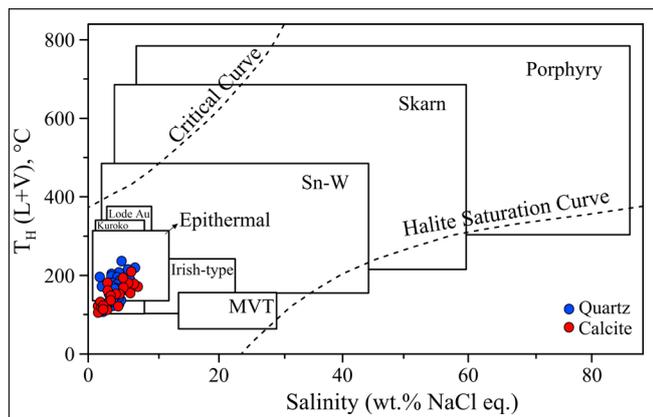


شکل ۱۱- نمودار دمای همگن شدن در برابر شوری (Shepherd et al., 1985; Wilkinson, 2001) جهت تعیین روند تکاملی سیالات کانه‌ساز منطقه ماهیرود که بر اساس آن جوشش و رقیق شدن (در اثر اختلاط با سیالات نزدیک سطحی) مهم‌ترین سازوکار (مکانیسم)‌های مؤثر در نهشت کانسنگ‌ها در نظر گرفته شده‌اند.

Figure 11. Homogenization temperature versus salinity diagram (Shepherd et al., 1985; Wilkinson, 2001) to determine the evolutionary trend of ore-forming fluids in the Mahiroud area, based on which boiling and dilution (due to mixing with near-surface fluids) are considered to be the most important effective mechanisms in ore deposition.

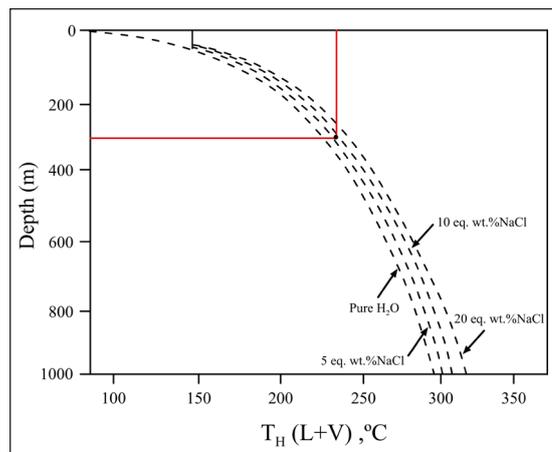
زیرا در چنین شرایطی سیال کانه‌ساز در زمان به تله افتادن به احتمال زیاد فشار هیدرواستاتیک را تجربه می‌کرده است. در نتیجه، دمای همگنی میانبارهای سیال می‌تواند تقریباً معادل با دمای به تله افتادن آن‌ها باشد (Roedder and Bodnar, 1980; Simmons et al., 2005; Simeone and Simmons, 1999). از آنجا که مقادیر فشار هیدرواستاتیک برای سیال‌های گرمایی در منطقه ماهیرود در گستره بین ۲۰ تا ۴۰ بار برآورد شده‌اند، می‌توان تخمین زد که این مقادیر فشار هیدرواستاتیک معادل با ژرفای نهشت بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ متری زیر سطح ایستایی بوده که کاملاً مشابه با ژرفای تشکیل اغلب ذخایر اپی‌ترمال می‌باشند (Hedenquist et al., 2000; Cooke and Simmons, 2000). همچنین برای تعیین ژرفای کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه از نمودار دمای همگن شدن در برابر ژرفا (Hass, 1971) استفاده شد. با در نظر گرفتن بیشترین دمای همگن شدن (۲۳۵ درجه سانتی‌گراد) و بیشترین شوری (۷/۸۶ درصد وزنی معادل نمک طعام) میانبارهای سیال، ژرفای تقریبی کانه‌زایی در این منطقه در حدود ۳۰۰ متری به‌دست آمد (شکل ۱۲). ترسیم یافته‌های ریزدماسنجی منطقه ماهیرود در نمودار شوری در برابر دمای همگن شدن (Wilkinson, 2001) نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در گستره کانه‌زایی نوع اپی‌ترمال قرار دارند (شکل ۱۳). چگالی سیالات کانه‌ساز در منطقه ماهیرود را می‌توان با استفاده از یافته‌های میانبارهای سیال و بدون در نظر گرفتن شرایط به تله افتادن آن‌ها محاسبه کرد. برای این منظور از نمودار دمای همگن شدن در برابر شوری (Wilkinson, 2001) استفاده شد که بر اساس این نمودار، چگالی سیال‌های کانه‌ساز در منطقه مورد بررسی بیشتر در محدوده بین ۰/۹ تا ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب تغییر می‌کند (شکل ۱۴). نوع کمپلکس‌های مؤثر در حمل فلزات کانسنگی منطقه مورد مطالعه نیز با استفاده از نمودار ارائه شده توسط پیراژنو (Pirajno, 2009) تعیین شد. بر اساس این نمودار، کمپلکس‌های سولفیدی نقش مهمی در حمل فلزات کانسنگی منطقه ایفا نموده‌اند (شکل ۱۵).

یکی دیگر از شواهد ریزدماسنجی که گویای جوشش است، همانا همراهی میانبارهای انواع LV، VL و V در کنار یکدیگر می‌باشد (Albinson et al., 2001). در دماهای کمتر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد سیال‌های گرمایی درون‌زاد کانه‌دار احتمالاً با آب‌های زیرزمینی (با دما و شوری پایین) اختلاط حاصل کرده که به کاهش شوری سیال تا حدود ۱/۷۵٪ وزنی و افت دما تا به زیر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجامیده است. افزون بر شواهد ریزدماسنجی، وجود برش‌های گرمایی در پهنه‌های کانه‌سازی شده و همچنین تشکیل بافت‌های پرماند، شانه‌ای، پوسته‌ای، کلوفرمی و نواری در رگه- رگچه‌های کانه‌دار و همچنین حضور بلورهای کلسیت با بافت تیغه‌ای می‌تواند نشانگر رخداد جوشش سیال کانه‌دار در منطقه مورد مطالعه باشد (Hedenquist et al., 2000; Moncada et al., 2012; Ni et al., 2018). بر اساس شکل ۱۱، اکثر میانبارهای سیال منطقه ماهیرود فشارهای کمتر از ۴۰ بار را در زمان کانی‌سازی تجربه می‌کردند. با توجه به رخداد پدیده جوشش، به یقین، سیال‌های گرمایی در زمان نهشت کانی‌های کانسنگی و باطاله تحت فشار هیدرواستاتیک بوده‌اند. افزون بر این که وجود مرز تند بین رگچه‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان می‌تواند در نتیجه پر شدن فضاهای خالی تحت فشار هیدرواستاتیک باشد (Hedenquist et al., 1998; Ouyang et al., 2014). روندهای تکاملی سیال‌های کانه‌ساز منطقه ماهیرود با استفاده از نمودار شوری در برابر همگن شدن میانبارهای سیال (Shepherd et al., 1985; Wilkinson, 2001) تعیین شدند (شکل ۱۱). بر اساس نمودار شکل ۱۱، میانبارهای سیال منطقه مورد مطالعه دو روند تکاملی جوشش و رقیق شدن توسط آب‌های زیرسطحی به‌عنوان مهم‌ترین سازوکارهای نهشت فلزات کانسنگی در ماهیرود در نظر گرفت. با توجه به رخداد پدیده جوشش سیال کانه‌ساز در منطقه ماهیرود، دماهای همگن شدن میانبارهای سیال نیاز به تصحیح فشار ندارند (Simeone and Simmons, 1999).



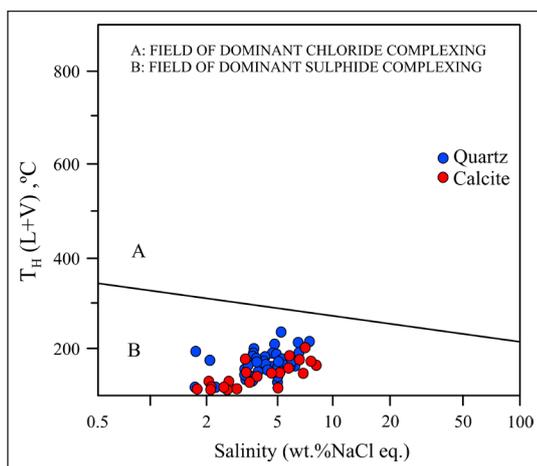
شکل ۱۳- نمودار دومتغیره دمای همگن شدن در برابر شوری (Wilkinson, 2001) که در آن نقاط مربوط به ریزدماسنجی منطقه ماهیرود بیشتر در محدوده اپی‌ترمال واقع شده‌اند.

Figure 13. Bivariate diagram of homogenization temperature versus salinity (Wilkinson, 2001) in which the microthermometric data of the Mahiroud area are mostly located in the epithermal domain.



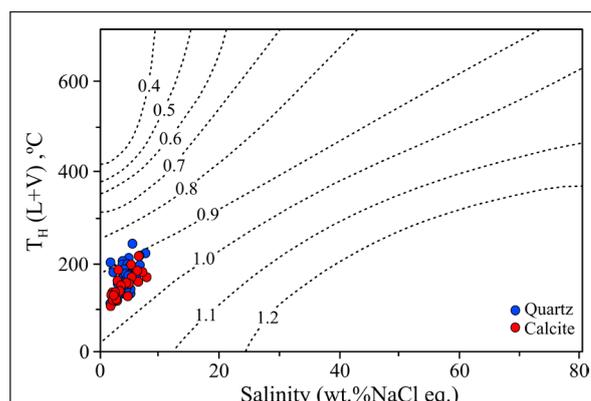
شکل ۱۲- نمودار دمای همگن شدن در برابر ژرفا (Hass, 1971) برای تعیین ژرفای کانی‌سازی در منطقه ماهیرود که بر اساس آن کانه‌زایی در این منطقه در ژرفای تقریبی ۳۰۰ متری صورت گرفته است.

Figure 12. Homogenization temperature versus depth diagram (Hass, 1971) to determine the depth of mineralization in the Mahiroud area, based on which mineralization in this area took place at a depth of approximately 300 m.



شکل ۱۵- نمودار شوری نسبت به دمای همگن شدن (Pirajno, 2009) جهت مشخص کردن نوع کمپلکس‌های حمل‌کننده فلزات. طبق این نمودار، کمپلکس‌های سولفیدی نقش مهمی در حمل فلزات منطقه ماهیرود داشته‌اند.

Figure 15. Salinity versus homogenization temperature diagram (Pirajno, 2009) for identifying the type of metal-transporting complexes. According to this diagram, sulfide complexes have played an important role in transportation of metals in the Mahiroud area.



شکل ۱۴- تغییرات مقادیر چگالی میانبارهای سیال منطقه ماهیرود در نمودار دمای همگن شدن در برابر شوری (Wilkinson, 2001) که عمدتاً در محدوده ۰/۹ تا ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار دارند.

Figure 14. Changes in the density values of the fluid inclusions of the Mahiroud area in the homogenization temperature versus salinity diagram (Wilkinson, 2001), which are mainly in the range of 0.9 to 0.97 g/cm<sup>3</sup>.

#### ۴- نتیجه‌گیری

بر پایه مطالعات زمین‌شناسی، دگرسانی، کانه‌زایی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت و ویژگی‌های سیال‌های کانه‌ساز در منطقه ماهیرود، کانه‌زایی در این منطقه را می‌توان از نوع اپی‌ترمال در نظر گرفت. کانی‌سازی در ماهیرود بیشتر به صورت رگه-رگچه‌ای با کنترل ساختاری بوده و در واحدهای آتشفشانی و آذرآواری (با ترکیب آندزیت و آندزیت-بازالت) رخ داده است. توسعه انواع دگرسانی‌های سیلیسی، فلیک، آرزلیک و پروپلیتیک در این منطقه گویای کانه‌زایی اپی‌ترمال می‌باشد. حضور مجموعه کانیایی پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، مگنتیت و طلا در رگه-

رگچه‌های منطقه مورد مطالعه با مجموعه کانیایی موجود در ذخایر اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون پایین مطابقت دارد. وجود بافت‌های رگچه‌ای، برشی، پرمانند، موزاییکی، پرکننده فضاهای خالی، شانه‌ای، پوسته‌ای، کلوفرمی، تیغه‌ای و نواری نیز نشانگر محیط اپی‌ترمال در منطقه است. افزون بر آن، دمای پایین تا متوسط (۹۷ تا ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد)، شوری پایین (۱/۷۴ تا ۷/۸۶ درصد وزنی معادل نمک طعام)، چگالی پایین (۰/۹ تا ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و ژرفای تشکیل سیال‌های کانه‌ساز (۲۰۰ تا ۴۰۰ متری) در منطقه ماهیرود با ذخایر اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون پایین هم‌خوانی دارد.

#### کتابنگاری

- آق‌باتی، س.ا.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.
- اعلمی‌نیا، ز.، باقری، ه.، صالحی، م.، ۱۳۹۶، بررسی‌های زمین‌شیمیایی، زمین‌فیزیکی و مطالعات سیالات درگیر در محدوده اکتشافی ظفرقند (شمال خاور استان اصفهان، ایران)، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، ۹(۲)، ص. ۲۹۵-۳۱۲. <https://doi.org/10.22067/econg.v9i2.56334>
- سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران، ۱۴۰۱، گزارش نهایی اکتشاف عمومی محدوده ماهیرود، استان خراسان جنوبی، ۴۵۶ ص.
- شرکت مهندسی مشاور زمین آب پی، ۱۴۰۲، گزارش پایان عملیات اکتشاف مواد معدنی پلی‌متال در محدوده اکتشافی ماهیرود، ۳۱۲ ص.

#### References

- Aghanabati, A., 2004. *Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 606 pp. (in Persian).*
- Alamina, Z., Bagheri, H., and Salehi, M., 2017. *Geochemical and geophysical investigations, and fluid inclusion studies in the exploration area of Zafarghand (Northeast Isfahan, Iran). Journal of Economic Geology 9 (2), 295-312. (in Persian). https://doi.org/10.22067/econg.v9i2.56334.*
- Albinson, T., Norman, D.I., Cole, D., and Chomiak, B., 2001. Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constraints from fluid inclusion and stable isotope data. In: Albinson, T., Nelson, C.E. (Eds.), *New Mines and Discoveries in Mexico and Central America. Society of Economic Geologists, Littleton, 1-32. https://doi.org/10.5382/SP.08.01.*
- Angiboust, S., Agard, P., De Hoog, J.C.M., Omrani, J., and Plunder, A., 2013. Insights on deep, accretionary subduction processes from the Sistan ophiolitic "mélange" (Eastern Iran). *Lithos 156, 139-158. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.11.007.*
- Bodnar, R.J., 2003. Introduction to aqueous-electrolyte fluid inclusions. In: Samson, I., Anderson, A., Marshal, D. (Eds.), *Fluid inclusions: Analysis and interpretation. Mineralogical Association of Canada, Vancouver, pp. 81-100.*
- Bodnar, R.J., Reynolds, T.J., and Kuehn, C.A., 1985. Fluid-inclusion systematics in epithermal systems. In: Berger, B.R., Bethke, P.M. (Eds.), *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 73-97. https://doi.org/10.5382/Rev.02.05.*
- Calagari, A.A., 2004. Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaijan, Iran. *J. Asian Earth Sci. 23 (2), 179-189. https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00085-3.*
- Cooke, D.R., and Simmons, S.F., 2000. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. *Rev. Econ. Geol. 13, 221-244. https://doi.org/10.5382/Rev.13.06.*
- Ghasemi Siani, M., Mehrabi, B., Nazarian, M., Lotfi, M., and Corfu, F., 2022. Geology and genesis of the Chomalu polymetallic deposit, NW Iran. *Ore Geol. Rev. 143, 104763. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104763.*
- Goldstein, R.H., 2003. Petrographic analysis of fluid inclusions. In: Samson, I., Anderson, A., Marshall, D. (Eds.), *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. Mineral Associated of Canada, Vancouver, 9-53.*
- Guillou, Y., Maurizot, P., and De La Villeon, H., 1981. Geological map of Mahiroud, Scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Haas, J.L., 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic geology 66(6), 940-946. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.6.940.*

- Hassani Soughi, F., Calagari, A.A., Sohrabi, G., and Sadeghi, R., 2023a. The origin and evolution of hydrothermal fluids in the Gow-Kamar epithermal Pb-Zn-Cu (Au) occurrence, Tarom-Hashtjin metallogenic belt, Ardebil province, NW Iran. *Periodico di Mineralogia*, 92 (3), 335-355. <https://doi.org/10.13133/2239-1002/18123>.
- Hassani Soughi, Z., Calagari, A.A., and Sohrabi, G., 2023b. The genesis of base and precious metals-bearing epithermal veins in the Gharehchay-Kurmolla area, south of Tikmehdash, NW Iran. *Geological Quarterly* 67: 43 <http://dx.doi.org/10.7306/gq.1730>.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., and Reynolds, T.J., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: far southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Econ. Geol.* 93 (4), 373-404. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.4.373>.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A.R., and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. In: Hagemann, S.G., Brown, P.E. (Eds.), *Gold in 2000*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 245-277. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>.
- Heidari, S.M., Daliran, F., Paquette, J.L., and Gasquet, D., 2015. Geology, timing, and genesis of the high sulfidation Au (-Cu) deposit of Touzlar, NW Iran. *Ore Geol. Rev.* 65, 460-486. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.013>.
- IMIDRO, 2023. *Final report of general exploration of the Mahiroud area, South Khorasan Province (in Persian)*. Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization, Iran, 456p.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K.Z., and Zhang, X.N., 2020. Genesis of the Abbasabad epithermal base metal deposit, NW Iran: Evidences from ore geology, fluid inclusion and O-S isotopes. *Ore Geol. Rev.* 126, 103752. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103752>.
- Moncada, D., Mutchler, S., Nieto, A., Reynolds, T.J., Rimstidt, J.D., and Bodnar, R.J., 2012. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: application to exploration. *J. Geochem. Expl.* 114, 20-35. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.12.001>.
- Moncada, D., Baker, D., and Bodnar, R.J., 2017. Mineralogical, petrographic and fluid inclusion evidence for the link between boiling and epithermal Ag-Au mineralization in the La Luz area, Guanajuato Mining District, Mexico. *Ore Geol. Rev.* 89, 143-170. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.024>.
- Ni, P., Pan, J.Y., Huang, B., Wang, G.G., Xiang, H.L., Yang, Y.L., Li, S.N., and Bao, T., 2018. Geology, ore-forming fluid and genesis of the Qiucun gold deposit: implication for mineral exploration at Dehua prospecting region, SE China. *J. Geochem. Explor.* 195, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.03.018>.
- Ouyang, H., Wu, X., Mao, J.W., Su, H., Santosh, M., Zhou, Z., and Li, C., 2014. The nature and timing of ore formation in the Budunhua copper deposit, southern Great Xing'an Range: evidence from geology, fluid inclusions, and U-Pb and Re-Os geochronology. *Ore Geol. Rev.* 63, 238-251. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.016>.
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer, Berlin, pp. 1250.
- Prokofiev, V.Y., Garofalo, P.S., Bortnikov, N.S., Kovalenker, V.A., Zorina, L.D., Grichuk, D.V., and Selektor, S.L., 2010. Fluid inclusion constraints on the genesis of gold in the Darasun district (eastern Transbaikalia). Russia. *Econ. Geol.* 105 (2), 395-416. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.2.395>.
- Roedder, E., 1984. *Fluid inclusions*. Mineralogical Society of America, Virginia, 644 pp.
- Roedder, E., and Bodnar, R.J., 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 8, 263-301. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.08.050180.001403>.
- Shepherd, T.J., Ranbin, A.H., and Alderton, D.H.M., 1985. *A practical guide to fluid inclusion studies*. Blackie, Glasgow, pp. 223.
- Sillitoe, R.H., and Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal deposits. In: Simmons, S.F., Graham, I.J. (Eds.), *Volcanic, geothermal and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth*. Society of Economic Geologists Special Publication 10, 315-343. <https://doi.org/10.5382/SP.10.16>.
- Simeone, R., and Simmons, S.F., 1999. Mineralogical and fluid inclusion studies of low sulfidation epithermal veins at Osilo (Sardinia), Italy. *Miner. Deposita* 34, 705-717. <https://doi.org/10.1007/s001260050229>.
- Simmons, S.F., White, N.C., and John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, J.R., Richards, J.P. (Eds.), *One Hundredth Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 485-522. <https://doi.org/10.5382/AV100.16>.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J., and Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 94(1), 134-150. <https://doi.org/10.1130/0016-7606>.
- Whitney, D.L., and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Am. Mineral.* 95 (1), 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.

- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55 (1-4), 229-272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5).
- ZAPCE, 2024. *Report on the end of polymetallic mineral exploration operations in the Mahiroud exploration area (in Persian)*. Zamin Ab Pey Consulting Engineers, Iran, 312p.
- Zarrinkoub, M.H., Pang, K.N., Chung, S.L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y., and Lee, H.Y., 2012. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 154, 392-405. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.007>.