Vol. ?, No. ?, ?, pp. ?–? ISSN (Print): 2008-7306 ISSN (Online): 2423-5865

Journal of Economic Geology

https://econg.um.ac.ir

RESEARCH ARTICLE 10.22067/econg.2026.1174 OPEN ACCESS

Study of Fluid Inclusions and Sulfur Isotopes in the Pirmalu Iron Ore Deposit (Asadabad, Iran)

Narges Aghaie [1], Mohammad Maanijou [2 *]

[1] M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, 65174-4161, Hamedan, Iran
[2] Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, 65174-4161, Hamedan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 13 May 2026
Revised: 15 November 2026
Accepted: 21 November 2026

Keywords

Sulfur isotope
Fluid inclusion
Iron ore deposit
Pirmalu

***Corresponding author**

Mohammad Maanijou
✉ mohammad@basu.ac.ir

ABSTRACT

The Pirmalu deposit is located 20 km north of Asadabad. The study area comprises three main lithological units. The first unit consists of a volcano-sedimentary sequence composed of metamorphosed felsic and mafic volcanic rocks, including metarhyolite, as well as sedimentary rocks such as limestone and dolostone that have undergone metamorphism to form marble. The second unit comprises a metasomatized volcano-sedimentary sequence consisting of metalimestone, mica schist, and calc-schist. The third unit consists of intrusive bodies with compositions ranging from felsic to mafic, including granitoids. The study area has undergone four main types of hydrothermal alteration: epidotization, carbonatization, chloritization, and silicification. Fluid inclusion studies were conducted on quartz associated with the mineralization stage and on quartz from post-mineralization quartz–carbonate veins to investigate the physicochemical characteristics and evolution of the hydrothermal fluids. In addition, pyrite and chalcopyrite associated with the mineralization stage were analyzed for their stable sulfur isotope compositions. Microthermometric analysis indicates that the homogenization temperatures of fluid inclusions associated with the mineralization stage range from 132 to 291 °C, whereas those of post-mineralization fluids range from 128 to 185 °C. The salinity of the mineralization-stage fluids ranges from 3.55 to 16.71 wt.% NaCl equivalent, whereas that of the post-mineralization fluids ranges from 2.57 to 7.76 wt.% NaCl equivalent. The fluid pressure was estimated at approximately 100 MPa (1 kbar), corresponding to a depth of approximately 3.5 km under hydrostatic conditions. The δ34S values range from 10.3 to 10.8‰, with an analytical uncertainty of less than ±0.1‰ and an average value of 10.5‰. The fluid inclusion data suggest that isothermal mixing of hydrothermal fluids may have occurred during the mineralization stage, whereas the post-mineralization fluid evolution was accompanied by boiling and subsequent mixing with relatively dilute surface-derived fluids**.** Based on the results obtained in this study, the fluid inclusion and sulfur isotope data indicate that interaction and mixing between magmatic fluids and metamorphic fluids derived from the host rocks played an important role in the formation of the iron mineralization. These results support the interpretation of the Pirmalu deposit as a metamorphosed iron skarn deposit.

How to cite this article

Aghaie, N. and Maanijou, M., ?. Study of Fluid Inclusions and Sulfur Isotopes in the Pirmalu Iron Ore Deposit (Asadabad, Iran). Journal of Economic Geology, ?(?): ?–?. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.2026.1174

©2026 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 Pirmalu deposit is located 50 km north of Hamadan, 35 km southeast of Qorveh, and 20 km north of Asadabad. From both structural and geological perspectives, the study area is located within the Sanandaj–Sirjan Zone (SSZ). The Sanandaj–Sirjan structural zone, which trends NW–SE, developed in association with the opening of the Neotethys Ocean during the Permian and the subsequent subduction of oceanic crust beneath the continental crust during the Cretaceous. The SSZ is recognized as one of the most dynamic tectonic domains in Iran owing to its widespread metamorphism, magmatism, and complex tectonic history. These geological processes have played an important role in the formation of various types of mineral deposits throughout the region. Iron mineralization during the Paleozoic–Early Triassic was less extensive than that developed during the Late Proterozoic–Early Cambrian. In contrast, Cenozoic iron mineralization became widespread during the Tertiary. The main types of iron deposits developed during this period include Kiruna-type, iron oxide–copper–gold (IOCG), and skarn deposits (Ghorbani, 2008; Nabatian et al., 2015). The present study focuses on the Pirmalu iron deposit and aims to investigate the characteristics and evolution of the ore-forming fluids using fluid inclusion microthermometry and stable sulfur isotope data. The results indicate that the mineralizing fluids were characterized by homogenization temperatures ranging from 132 to 291 °C and salinities of 3.55–16.71 wt.% NaCl equivalent. The fluid inclusion data suggest that isothermal mixing of hydrothermal fluids may have occurred during the mineralization stage, whereas the post-mineralization fluids record evidence of boiling and subsequent mixing with relatively dilute surface-derived fluids. The fluid inclusion and sulfur isotope data further suggest that interaction and mixing between magmatic fluids and metamorphic fluids derived from the host rocks played an important role in the formation of the iron mineralization. Based on these findings, the Pirmalu deposit is interpreted as a metamorphosed iron skarn deposit.

Materials and Methods

This study focuses on fluid inclusions and stable sulfur isotopes to investigate the characteristics and evolution of the hydrothermal fluids associated with the Pirmalu iron deposit. Four doubly polished quartz sections associated with the mineralization stage and one quartz sample from post-mineralization quartz–calcite veins were selected to investigate the evolution of the hydrothermal fluids following mineralization. Fluid inclusion petrographic and microthermometric studies were conducted at Tarbiat Modares University using a Linkam THMCG 600 heating–freezing stage. The instrument permits temperature measurements over a range of −196 to +600 °C. For stable sulfur isotope analysis, two samples of pyrite and chalcopyrite associated with the mineralization stage were separated, prepared, and analyzed at the Stable Isotope Laboratory in Arak. Sulfur isotope compositions were measured relative to the Canyon Diablo Troilite (CDT) standard, with an analytical uncertainty of ±0.1‰.

Results

The study area consists of three main lithological units: (1) a metamorphosed volcano-sedimentary unit consisting mainly of marble and mica schist; (2) a metasomatized volcano-sedimentary unit comprising metalimestone, schist, and calc-schist; and (3) an intrusive unit consisting of granitoid, gabbro, and diorite. The mineralization is primarily hosted by the metalimestone–schist unit. The study area underwent three main types of hydrothermal alteration, including epidotization, carbonatization, and silicification. Petrographic studies indicate that magnetite occurs in three generations and constitutes the principal ore mineral in the deposit. Hematite occurs in minor amounts, mainly as martite rims around magnetite grains. According to the classification of Shepherd et al. (1985) two main types of fluid inclusions were identified: vapor-rich (V) inclusions and liquid-rich (L+V) two-phase inclusions. The coexistence of vapor-rich (V) and liquid-rich (L+V) two-phase inclusions provides evidence for fluid phase separation and boiling during the evolution of the hydrothermal system, particularly during the post-mineralization stage. The homogenization temperatures (Th) of liquid-rich two-phase fluid inclusions associated with the mineralization stage range from 132 to 291 °C, whereas those of post-mineralization fluids range from 128 to 185 °C. The salinity of the

mineralization-stage fluids ranges from 3.55 to 16.71 wt.% NaCl equivalent, whereas the post-mineralization fluids have salinities ranging from 2.57 to 7.76 wt.% NaCl equivalent. The δ34S values range from 10.3 to 10.8‰, with an analytical uncertainty of less than ±0.1‰ and an average value of 10.5‰. Based on the relationship between sulfur isotope composition and temperature reported by Ohmoto and Rai (1979), the obtained δ34S values are consistent with the sulfur isotope composition of hydrothermal sulfur under the estimated temperature conditions.

Discussion

Fluid inclusion data indicate that the ore-forming fluids interacted and mixed with another fluid component, resulting in variations in both temperature and salinity. During the ore-forming stage, isothermal mixing of fluids may have occurred at depth, leading to changes in the physicochemical conditions of the hydrothermal system and ultimately contributing to ore deposition. During the post-mineralization stage, the coexistence of vapor-rich and liquid-rich two-phase fluid inclusions indicates fluid boiling, followed by mixing with relatively dilute surface-derived fluids, which contributed to the subsequent evolution of the hydrothermal system. Considering the homogenization temperatures and salinity values obtained from the fluid inclusion data, the fluid pressure was estimated at approximately 100 MPa (1 kbar) based on the pressure–temperature relationships of Potter (1977). Under hydrostatic conditions, this pressure corresponds to an estimated depth of approximately 3.5 km. The moderate homogenization temperatures, variable salinities, and estimated pressure conditions, together with the sulfur isotope compositions, suggest that the ore-forming fluids resulted from interaction and mixing between magmatic fluids and metamorphic fluids derived from the host rocks. This fluid interaction likely played an important role in the precipitation of magnetite and the formation of the iron mineralization. Accordingly, the Pirmalu deposit is interpreted as a metamorphosed iron skarn deposit.

Acknowledgment

We are grateful to the Karmania company for their cooperation. The authors express their sincere gratitude to the reviewer of Journal of Economic Geology for their valuable and insightful comments.

دوره ؟، شماره ؟، ؟، صفحه ؟ تا ؟ شاپا چاپی: ۷۳۰۶-۲۰۰۸ شاپا الکترونیکی: ۵۸۶۵-۲۴۲۳

زمین‌شناسی اقتصادی

https://econg.um.ac.ir

مقاله پژوهشی 10.22067/econg.2026.1174 OPEN ACCESS

بررسی میان‌بارهای سیال و ایزوتوپ‌های گوگرد در کانسارآهن پیرملو (اسدآباد، ایران)

نرگس آقائی[۱]، محمد معانی‌جو[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، ۶۵۱۷۴۴۱۶۱، همدان، ایران

[*]استاد، گروه زمین‌شناسی ، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، ۶۵۱۷۴۴۱۶۱، همدان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۳۰

واژه‌های کلیدی

ایزوتوپ گوگرد

میان‌بار سیال

کانسار آهن

پیرملو

نویسنده مسئول

محمد معانی‌جو

mohammad@basu.ac.ir

چکیده

کانسار آهن پیرملو در ۲۰ کیلومتری شمال اسدآباد قرارگرفته است. منطقه مورد بررسی دارای ۳ واحد سنگی است که شامل واحد آتشفشانی- رسوبی با سنگ‌های دگرگون‌شده اسیدی و بازی (متاریولیتی) و همچنین سنگ‌های رسوبی مانند سنگ‌های آهکی و دولومیتی که در اثر دگرگونی تبدیل به مرمر شده اند، واحد آتشفشانی- رسوبی متاسوماتیزم شده (متالایمستون، شیست و کالک شیست) و واحد نفوذی با مجموعه سنگ‌های متنوع اسیدی (گرانیتوئید) تا حد واسط است. کانسار مورد بررسی دارای ۷۰۰ هزار تن ذخیره آهن با عیار متوسط ۲۷ درصد و عیار حد ۲۰ درصد است. طبق بررسی‌های انجام‌شده منطقه مورد بررسی دارای دگرسانی‌های اپیدوتی‌شدن، کربناتی‌شدن، کلریتی‌شدن و سیلیسی‌شدن است. بررسی‌های سیال‌های درگیر روی کانی کوارتز، در کوارتزهای همزمان با کانه‌زایی و کوارتزهای پس از کانه‌زایی، متعلق به رگه کوارتز-کربنات انجام‌شده‌است. همچنین برای بررسی ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد، از پیریت و کالکوپیریت‌های مرتبط با مرحله کانه‌زایی استفاده شد. بررسی میکروترمومتری نشان می‌دهد که سیال‌های مرتبط با کوارتزهای همزمان با کانه‌زایی، دارای دمای همگن‌شدن از ۱۳۲تا ۲۹۱ درجه سانتی‌گراد هستند. همچنین سیال‌های پس از کانه‌زایی دارای طیف تغییر دما از ۱۲۸ تا ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد هستند. درجه شوری سیال‌های همزمان با کانه‌زایی از ۳/۵۵ تا ۱۶/۷۱ معادل درصد وزنی NaCl است. شوری برای سیال‌های پس از کانه‌زایی از ۲/۵۷ تا ۷/۸۶ معادل درصد وزنی نمک طعام است. مقادیر $\delta^{34}S$ در نمونه‌های مورد بررسی بین ۱۰/۳ تا ۱۰/۸ است که بیانگر اختلاط آب‌های ماگمایی و آب‌های دگرگونی است. در نتیجه کانسار آهن پیرملو به عنوان یک اسکارن متاسوماتیک معرفی می‌شود.

استناد به این مقاله

آقائی، نرگس و معانی‌جو، محمد، ؟. بررسی میان‌بارهای سیال و ایزوتوپ‌های گوگرد در کانسارآهن پیرملو (اسدآباد، ایران). زمین‌شناسی اقتصادی، ؟(؟): ؟-؟.

https://doi.org/10.22067/econg.2026.1174

مقدمه

ایران به دلیل تنوع ساختاری و تاریخچه پیچیده زمین شناسی- ماگمایی خود، میزبان مجموعه‌ای متنوع از ذخایر آهن با ویژگی‌های ژنتیکی متفاوت است. این ذخایر در ارتباط با فرایندهای مختلف زمین‌شناسی، از جمله فعالیت ماگمایی و گرمابی، فرایندهای رسوبی و دگرگونی شکل گرفته‌اند. در میان آنها، ذخایر آتشفشانی- رسوبی، مگنتیتی نوع کایرونا، اسکارنی و اکسید آهن- آپاتیت از مهم‌ترین انواع کانه‌زایی آهن گزارش‌شده در ایران هستند (Nabatian et al., 2015; Mohseni and Aftabi, 2015). پراکندگی این ذخایر در پهنه‌های زمین‌شناسی مختلف کشور، از جمله ایران مرکزی، سنندج— سیرجان و شمال‌شرق ایران، نشان‌دهنده نقش شرایط زمین‌شناسی و فرایندهای کانه‌زایی متفاوت در شکل‌گیری آنهاست (Nabatian et al., 2015).

در میان این ذخایر، کانه‌زایی اسکارنی آهن اغلب در مجاورت توده‌های نفوذی و در سنگ‌های کربناته توسعه‌یافته و حاصل برهم‌کنش سیال‌های گرمابی با سنگ‌های دربرگیرنده است (Masoumipour et al., 2023; Ghasemi Siani et al., 2025). این فرایند با ایجاد مجموعه‌های کانی‌شناسی اسکارنی و تمرکز آهن همراه بوده و در برخی از پهنه‌های متالوژنی ایران گزارش‌شده است (Nabatian et al., 2015). بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و سیال‌های کانه‌زا در این ذخایر، از اهمیت ویژه‌ای در شناخت فرایندهای مؤثر بر تشکیل و تکامل کانه‌زایی اسکارنی آهن برخوردار است.

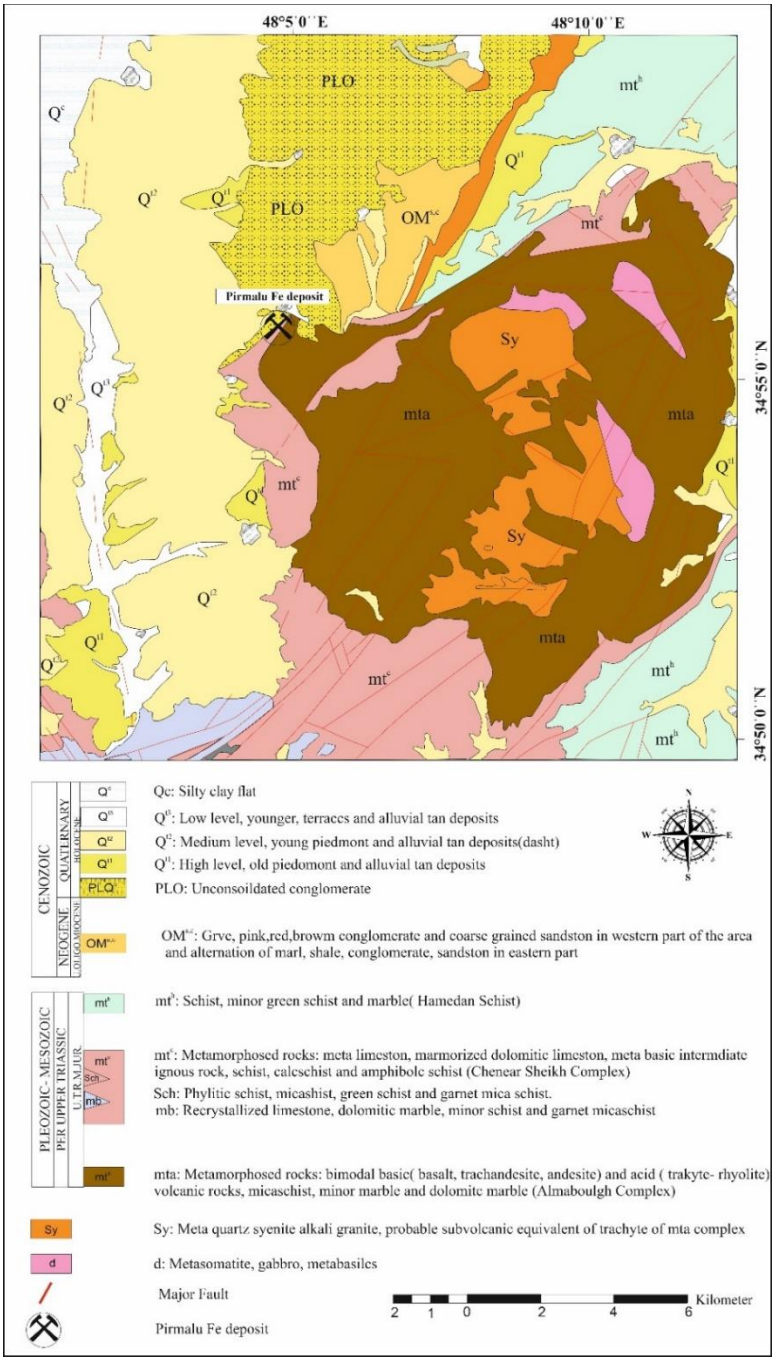
در محدوده زمانی پالئوزوئیک- تریاس اولیه، کانی‌سازی آهن در مقایسه با محدوده زمانی پروتروزوئیک پسین- کامبرین ضعیف‌تر است و در این دوران نیز کانی‌سازی از نوع آتشفشانی- رسوبی است و تنها چند ذخیره کوچک شامل آبپونه در اصفهان و ظفرآباد در کردستان تشکیل‌شده است. در دوران مزوزوئیک می‌توان کانسار آهن باباعلی، گلالی و چنارعلیا در منطقه همدان را نام‌برد که منشأ آتشفشانی— رسوبی دارند و در امتداد زون سنندج- سیرجان قرار دارند. در دوران سنوزوئیک، کانی‌سازی بیشتر در ترشیری گسترش‌داشته است و کانی‌سازی این دوران از نوع ذخایر نوع کایرونا، نوع IOCG و همچین از نوع اسکارن بوده است. کانسارهای این دوران شامل کانسارهای آهن زون ارومیه دختر، مثل شهرک در زنجان، نیاسر در کاشان و کوه بابا در جنوب‌شرقی هشترود، کانسارهای آهن ماگمایی البرز مثل سرخه دیزج و مروارید است (Ghorbani, 2008; Nabatian et al., 2015).

کانسار پیرملو در ۵۰ کیلومتری شمال‌غرب شهر همدان، ۳۵ کیلومتری جنوب‌شرق قروه و ۲۰ کیلومتری شمال اسدآباد قرارگرفته‌است. منطقه مورد بررسی بین طول جغرافیایی ´´۲۵ ´۴۸ °۴۸ تا ´´۰۴ ´۰۵ °۴۸ وعرض ´´۰۸ ´۵۵ °۳۴ تا ´´۴۰ ´۵۵ °۳۴ قرار دارد. نتیجه عملیات اکتشافی در این منطقه، کشف ۲۰۰ هزار تن ذخیره قطعی آهن با عیار میانگین ۲۷ درصد است. در این میان، ۵۰۰ هزار تن به عنوان ذخیره احتمالی معرفی‌شده است (Maanijou, 2022). از لحاظ زمین‌شناسی در شمال زون سنندج- سیرجان قرار دارد (Stöcklin, 1968). از جمله کانسارهای آهن منطقه می‌توان ازکانسارهای آهن چنارعلیا، باباعلی و گلالی نام‌برد. این کانسار در بخش جنوب‌غربی چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ همدان (Sabzeai, 1997) و در ورقه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تویسرکان قرار دارد (شکل ۱) (Eshraghi, 2002).

هدف از این پژوهش، شناسایی چگونگی تشکیل کانسار، شناسایی شرایط فیزیک و شیمیایی سیال‌های درگیر کانه‌ساز، چگونگی رفتار سیال‌های درگیر در نحوه تشکیل کانسار و طبقه‌بندی ژنتیکی کانسار آهن پیرملو است. این امر با بررسی روش‌های علمی، مانند بررسی سیال‌های درگیر و تجزیه و تحلیل ایزوتوپ‌های پایدار میسر است. مؤلفه‌های فیزیکی و شیمیایی، مانند شوری، دما و فشار، از جمله عوامل مؤثر در فرایند کانه‌زایی به شمار می‌روند که تعیین آنها با استفاده از بررسی‌های سنگ‌نگاری و میکروترمومتری بر روی شواهد به جا مانده از سیال‌های درگیر امکان‌پذیراست (Roedder, 1984). در نهایت، نتایج به دست آمده از این

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

بررســی‌ها در جهت تبیین فرایندهای مؤثر بر تشــکیل کانه‌زایی و بهبود شناخت شرایط فیزیکی– شیمیایی حاکم بر تشکیل کانسار آهن پیرملو مورد اســتفاده قرار خواهد گرفت و می‌تواند شــواهد ارزشــمندی برای ارزیابی ماهیت و جایگاه ژنتیکی کانســار فراهم آورد.



شکل ۱. موقعیت کانسارآهن پیرملو روی ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تویسرکان (Eshraghi, 2002)

Fig. 1. The location of the Pirmalu iron deposit on the 1:100,000 geological sheet of Tuyserkan (Eshraghi, 2002)

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

روش مطالعه

برای بررسی سیال‌های درگیر و بررسی ایزوتوپ‌های پایدار باید ابتدا توالی هم‌یافت کانی‌ها بررسی‌شود. در نهایت باید کانی‌های شفاف مناسب برای بررسی سیال‌های درگیر و همزاد کانه‌زایی ، انتخاب‌شود. طی این بررسی تعداد ۴ نمونه مقطع دوبر صیقلی از سنگ‌هایی که کانی‌های کوارتز موجود در آنها با کانه‌زایی مرتبط بودند، انتخاب و مورد بررسی قرارگرفت. همچنین ۱ نمونه مقطع دوبر صیقلی شامل کانی‌های کوارتز مرتبط با رگه تأخیر کوارتز-کربنات، برای بررسی رفتار سیال پس از کانه‌زایی انتخاب‌شد. برای بررسی‌های سنگ‌نگاری و میکروترمومتری از دستگاه Linkam THMCG 600در دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد. این دستگاه قادر است دما را در بازه ۱۹۶- تا۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری کند و همچنین برای اطمینان از درستی اندازه‌گیری دما، دستگاه توسط $C_4H_3CH_3$ بهنجار شده است. این دستگاه علاوه بر ویژگی‌هایی که بیان‌شد دارای دقت ۰/۰۱ است. برای بررسی ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد، دو نمونه از پیریت و کالکوپیریت‌های مرتبط با مرحله سولفیدزایی انتخاب‌شد. ابتدا نسل‌های مختلف این کانی‌ها بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی شناسایی و تفکیک‌شدند. سپس نمونه‌ها خرد شده و دانه‌های پیریت و کالکوپیریت با استفاده از دستگاه باینوکولار جداسازی و برای انجام تجزیه و تحلیل آماده شدند. نمونه‌های آماده‌شده در ادامه به آزمایشگاه ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه اراک ارسال‌شدند. مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار نسبت به استاندارد ایزوتوپی ترویلیت شخانه آهنی کانیون دیابلو با دقت ۰/۱± اندازه‌گیری‌شده است. برای انجام تجزیه و تحلیل، ابتدا نمونه جامد خرد و تبدیل به پودری همگن می‌شود. سپس نمونه به وسیله دستگاه تجزیه عنصری، در دمای بالا و در حضور اکسیژن اضافی سوزانده می‌شود. در نتیجه، گاز SO_2 در اثر فعل و انفعالاتی که روی گوگرد صورت می‌گیرد، به وجود می‌آید.گاز SO_2 پس از خالص‌سازی، از طریق سامانه جریان مداوم همراه گاز هلیوم وارد دستگاه اسپکترومتر جرمی نسبت ایزوتوپی می‌شود. برای اندازه‌گیری نسبت ایزوتوپی $^{34}S/^{32}S$، نسبت شدت مولکولی جرم‌های ۶۶ به ۶۴ اندازه‌گیری و گزارش می‌شود.

زمین شناسی عمومی

کانسار آهن پیرملو در بخش شمالی پهنه ساختاری سنندج-سیرجان واقع‌شده است. این کانسار در امتداد پهنه‌ای قرار دارد که میزبان برخی از کانسارهای مهم آهن، از جمله گلالی، همه‌کسی و چنارعلیاست. در محدوده پیرملو، توده‌های نفوذی ژوراسیک میانی، اسیدی (گرانیتوئید) تا حد واسط ، درون سنگ‌های دگرگونی تریاس پسین نفوذ کرده‌اند. مجاورت فضایی این توده‌های نفوذی با کانه‌زایی آهن، می‌تواند نشان‌دهنده ارتباط میان فعالیت‌های ماگمایی و شکل‌گیری کانه‌زایی در منطقه باشد؛ با این حال، تعیین نقش دقیق این توده‌ها در فرایند تشکیل کانسار نیازمند بررسی شواهد کانی‌شناسی، دگرسانی و سیال‌های کانه‌زاست.

زمین‌شناسی کانسار پیرملو

نقشه ۱:۱۰۰۰ کانسار آهن پیرملو توسط شرکت مس کارمانیا تهیه‌شده است (شکل ۲) و مشخص می‌کند که این منطقه شامل سه واحد سنگی است. واحدها به ترتیب از قدیم به جدید شرح‌داده می‌شود.

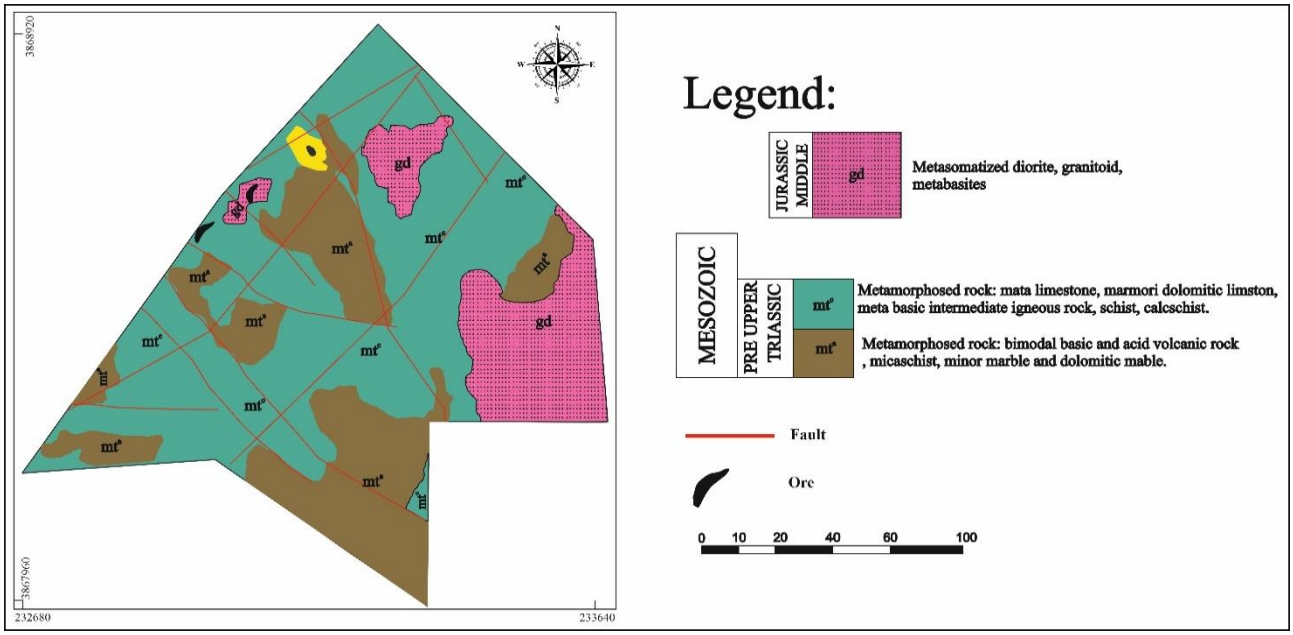
واحد mt^a: این واحد متعلق به دوران تریاس پیشین است وکهن‌ترین واحد سنگی در منطقه است. این واحد به کمپلکس آلموبولاغ مشهور است. کمپلکس آلموبولاغ شامل سنگ‌های رسوبی آتشفشانی است. ترکیب کلی سنگ‌های آن متاریولیتی است. رنگ این واحد در بررسی‌های صحرایی خاکستری روشن تا صورتی است و شامل کانی‌هایی همچون کوارتز، ارتوکلاز ، میکروکلین، پلاژیوکلاز، پیروکسن و مقداری میکا شامل مسکویت است. بافت این سنگ‌ها بیشتر پورفیریتیک است. دگرسانی باعث منظره سبز رنگی در واحد شده است. دگرسانی،

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

کانی‌هایی همچون اپیدوت، سریسیت و کلریت را به وجود آورده است. گاهی در درزه‌ها و شکستگی‌ها شاهد اکسیدهای آهن و کربنات ثانویه هستیم (Maanijou, 2022).

واحد mt^c: این واحد نیز به تریاس پیشین تعلق دارد؛ ولی جوان‌تر از واحد mt^a است و بخش وسیعی از منطقه را به خود اختصاص‌داده و دارای ظاهری خشن به رنگ تیره است. این واحد توالی نامنظمی از سنگ‌های آهکی با تبلور دوباره، مرمر و مرمر دولومیتی‌شده، سنگ‌های آتشفشانی دگرگونه، شیست، آمفیبول شیست و گروناشیست دارد که با نام مجموعه چنارشیخ شناخته‌شده است. سنگ‌های این واحد دارای بافت نماتوبلاستیک و لپیدوبلاستیک است. از لحاظ کانی‌شناسی این واحد دارای کانی‌های کلسیت، کوارتز، پلاژیوکلاز، ارتوکلاز، اکتینولیت، آمفیبول، پیروکسن، گارنت و غیره است.

واحد gd: این واحد جوان‌ترین واحد سنگی رخنمون‌یافته در محدوده مورد بررسی است و از سنگ‌های نفوذی گرانیتوئیدی با ترکیب اسیدی تا حد واسط تشکیل‌شده است. بر اساس بررسی‌های سن‌سنجی انجام‌شده بر روی گرانیتوئیدهای زون سنندج- سیرجان، این توده‌های نفوذی اغلب به ژوراسیک میانی نسبت‌داده شده‌اند (Ahadnejad et al., 2011). حضور این توده‌های نفوذی در مجاورت واحدهای کربناته و توسعه دگرگونی مجاورتی و فرایند متاسوماتیکی در سنگ‌های دربرگیرنده، بیانگر نقش حرارتی توده نفوذی در شکل‌گیری سامانه اسکارنی منطقه است. از این رو، این واحد به عنوان یکی از عوامل مؤثر در ایجاد شرایط مناسب برای تشکیل کانه‌زایی اسکارنی در محدوده مورد بررسی در نظرگرفته می‌شود. سنگ‌های این واحد در بخش‌هایی تحت‌تأثیر تغییر شکل قرار گرفته‌اند و بافت میلونیتی نشان می‌دهند. روابط بافتی میان ساخت‌های میلونیتی و کانی‌زایی نشان می‌دهد که تغییر شکل پیش از تشکیل کانه‌زایی رخ‌داده است. بر این اساس، ساخت‌های میلونیتی را می‌توان به عنوان یکی از شواهد رویدادهای زمین‌ساختی پیش از کانه‌زایی در محدوده مورد بررسی در نظرگرفت. برای اکتشاف اسکارن توجه به این واحد مفید خواهد بود (Maanijou, 2022).



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ کانسارآهن پیرملو (Karmania Co., 2022)

Fig. 2. The geological map of the Pirmalu iron deposit was compiled at a scale of 1:1,000 (Karmania Co., 2022)

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

دگرسانی

کلیه تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی که در اثر تأثیر سیال‌های گرمابی و ماگمایی در سنگ‌ها ایجاد می‌شوند و همچنین جایگزینی کانی‌های جدید به جای کانی‌های اولیه، دگرسانی نام‌دارد. دگرسانی تحت‌تأثیر عواملی مانند دما، فشار (عمق)، شرایط Eh و pH و ترکیب شیمیایی سیال‌ها و سنگ میزبان کنترل می‌شود. دگرسانی در اثر واکنش سیال‌ها با سنگ‌های میزبان ایجاد می‌شود. عواملی مانند pH سیال گرمابی، سنگ اولیه و کانی ثانویه حاصل از دگرسانی باعث ایجاد تفاوت در رفتار و غلظت عناصر در زون‌های مختلف دگرسانی می‌شود (Masoomi et al., 2023). دگرسانی در منطقه پیرملو به دلیل نفوذ توده و تأثیر سیال‌های گرمابی تشکیل‌شده است. از سوی دیگر، فعالیت‌های زمین‌ساختی منطقه با ایجاد درزه‌ها و شکستگی‌ها، مسیرهای مناسبی برای عبور سیال‌های گرمابی فراهم‌کرده است. عبور سیال‌های گرمابی از این درزها و شکستگی‌ها باعث ایجاد دگرسانی می‌شود. دگرسانی‌های موجود در منطقه شامل اپیدوتی‌شدن، کربناتی‌شدن،کلریتی‌شدن (شکل ۳-C) و سیلیسی‌شدن است .

در بخش وسیعی از منطقه مورد بررسی، پهنه‌هایی با رنگ سبز مشاهده می‌شود که بررسی‌های میکروسکوپی، منشأ آنها را به دگرسانی اپیدوتی نسبت می‌دهد. اپیدوت‌ها اغلب به صورت دانه‌های ریز تا درشت و با شکل‌های نامنظم دیده می‌شوند و رنگ آنها از قهوه‌ای تا نخودی متغیر است. همچنین، بررسی مقاطع نازک نشان می‌دهد که اپیدوت با کانی‌های اکسید آهن، اکتینولیت و گارنت همراه است (شکل ۳-A)

دگرسانی سیلیسی در منطقه مورد بررسی با حضور کوارتز به صورت پراکنده، توده‌ای و رگه‌ای مشخص می‌شود. بررسی مقاطع میکروسکوپی نشان می‌دهد که کوارتزهای رگه‌ای در اثر رسوب سیلیس از سیال‌ها تشکیل شده‌اند. در برخی بخش‌ها، کوارتز با کانه‌زایی آهن همراه است؛ در حالی که در بخش‌های دیگر، رگه‌های کوارتزی کانه‌زایی را قطع می‌کنند (شکل ۳-B).

دگرسانی کربناتی گاه به صورت دانه‌های ریز بلور و گاه به شکل دانه‌های درشت‌بلور و رگه‌ای مشاهده می‌شوند. رنگ کانی‌های کربناته از قهوه‌ای تا نخودی رنگ تغییر می‌کند. دگرسانی کربناته اغلب به صورت کانی‌های کلسیت نمایان شده‌اند. کانی‌های کلسیت شامل دونسل هستند: نسل اول، کانی‌های انهدرال با رخ‌های لوزوی شاخص و نسل دوم، کلسیت‌های رگه‌ای هستند که نسل اول را قطع کرده‌اند. یکی از مراحل هم‌یافتی اسکارن رگه‌های کوارتز- کربنات است. در مقاطع مشاهده شده، رگه‌های کوارتز- کربنات سایر کانی‌ها را قطع کرده‌اند (شکل ۳-D). در برخی بخش‌ها این رگه دارای اکسیدهای آهن به صورت پراکنده هستند.

کانی‌سازی

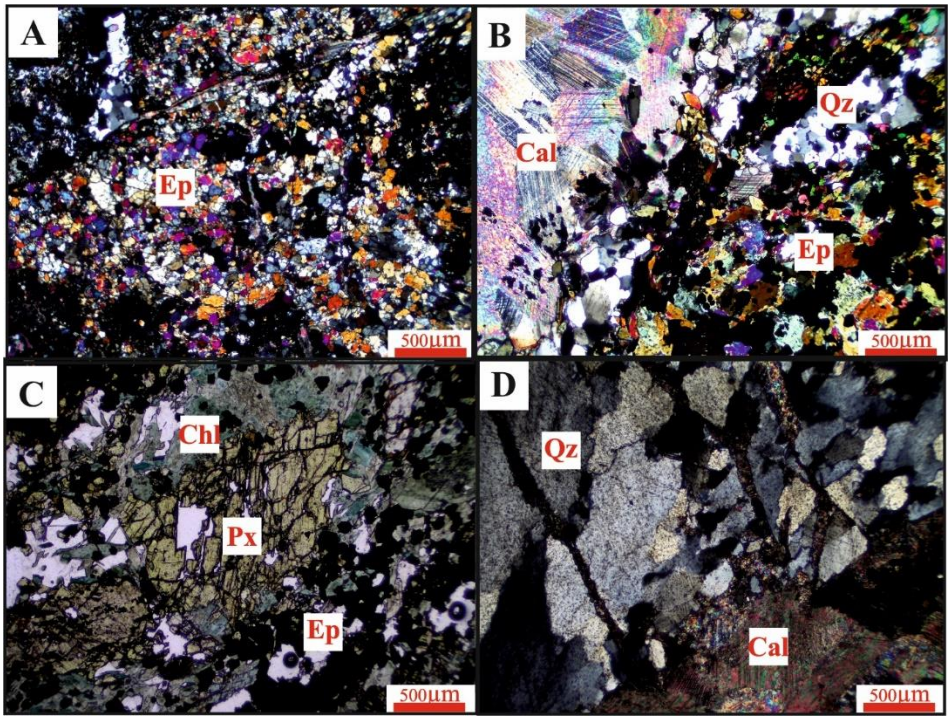
کانه اصلی در کانسار آهن پیرملو، مگنتیت است. کانه‌زایی در محدوده مورد بررسی به صورت توده‌ای، رگه‌ای و دانه پراکنده قابل مشاهده است (شکل ۴-D). بر اساس بررسی‌های مقاطع نازک، مگنتیت‌ها از نظر ساخت، بافت و مرحله تشکیل در سه نسل قابل تفکیک هستند (شکل ۴). نسل نخست، دارای حفره‌های فراوان بوده و نسل دوم در پیرامون آن رشدکرده است. نسل سوم نیز هم‌زمان با مرحله پاراژنتیکی کوارتز- کربنات، در رگه‌های کوارتز و کلسیت به صورت پراکنده مشاهده می‌شود. هماتیت در این کانسار سهم اندکی داشته و اغلب به صورت جانشینی و بافت مارتیتی در حاشیه مگنتیت‌ها تشکیل‌شده است.

توالی هم‌یافت

هم‌یافت به مجموعه کانی‌های کانسنگ و باطله‌ای گفته می‌شود که در ارتباط با یکدیگر تشکیل‌شده و بیانگر منشأ و شرایط تشکیل

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

مشـــترک آنها هســـتند. بررســـی توالی هم‌یافتی، اطلاعاتی درباره تاریخچه زمین‌شناسی و فرایندهای تشکیل کانسار فراهم می‌کند و بر اساس شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، بافت کانی‌ها و روابط قطع‌شدگی آنها تعیین می‌شود.



شـکل ۳. دگرسـانی در کانسـار آهن پیرملو. A: دگرسـانی اپیدوتی همراه با کانی‌های کدر مگنتیت، B: دگرسـانی کربناتی، سـیلیسـی و اپیدوتی همراه کانی‌های کدر مگنتیت، C: تصویر PPL پیروکسن که از اطراف به کلریت تبدیل‌شده است و D: رگه‌هایی از کوارتز که توسط کلسیت بریده شده‌اند. علائم اختصـاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس‌شـده اسـت (Ep: اپیدوت، Cal: کلریت، Qz: کوارتز، Chl: کلریت، Px: پیروکسن).

Fig. 3. Alteration in the Pirmalu iron deposit. A: Epidote alteration associated with opaque minerals magnetite, B: Carbonate, silica, and epidote alteration accompanied by opaque minerals magnetite, C: PPL image of pyroxene partially replaced by chlorite from the margins, and D: Quartz veins cross-cut by calcite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ep: Epidote, Cal: Calcite, Qz: Quartz, Chl: Chlorite Px: Pyroxene).

بر اسـاس بررسـی‌های انجام‌شـده، توالی هم‌یافتی منطقه در چهار مرحله اصلی قابل تفکیک است:

۱) مرحله ایزوشـیمیایی یا پیش اسـکارنی: با نفوذ توده نفوذی در سـنگ میزبان و ایجاد دگرگونی مجاورتی آغاز می‌شـود. در این مرحله تبادل کاتیونی و آنیونی رخ نمی‌دهد و کانی‌های دما پایین به کانی‌های دما بالاتر تبدیل می‌شـوند؛ مانند تبدیل کلسـیت به مرمر.

۲) مرحله پیش‌رونده: در این مرحله اسکارن پیش‌رونده تشکیل‌شده اسـت و کانی‌های سـیلیکاته بی‌آب، به ویژه گارنت، گارنت‌ها در این بررسی‌ها به دو نسل تفکیک می‌شوند. نسل اول که کانی‌های گارنت جزیره‌ای (آتول) است که نفوذ رگه‌های کلسیت و کوارتز در بین گارنت، این بافت را به وجودآورده است. نسل دوم گارنت، دارای منطقه‌بندی است. گارنت‌های دارای منطقه‌بندی (نسل دوم) بعد از گارنت‌های آتول (نسل اول) تشکیل شده‌اند.

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

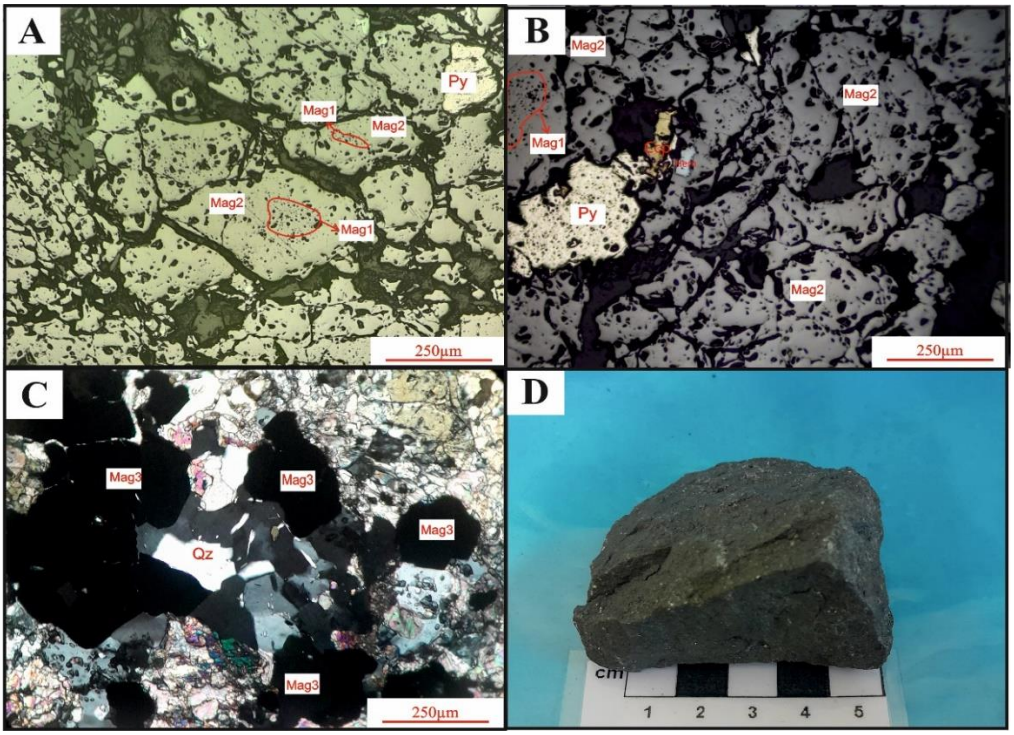
۳) مرحله پس‌رونده: این مرحله شامل سه بخش است:

بخش اول: مرحله دگرسانی اسکارنی پس‌رونده و تشکیل کانی‌های آبدار سیلیکاتی مانند اپیدوت و اکتینولیت، همراه با مگنتیت و هماتیت. مگنتیت دارای سه نسل است (شکل ۴-A). نسل اول و دوم در این مرحله تشکیل شده‌اند. نسل اول دارای حفره‌های فراوان بوده و نسل دوم به صورت جانشینی در اطراف آن تشکیل‌شده است. هماتیت نیز در اثر مارتیتی‌شدن ایجادشده است.

بخش دوم: مرحله سولفیدی، مرحله اصلی کانی‌سازی سولفیدی است که در آن کالکوپیریت و پیریت تشکیل شده‌اند. فراوانی بیشتر کالکوپیریت به صورت میان‌بار در مگنتیت، تشکیل زودتر آن نسبت به پیریت را نشان می‌دهد (شکل ۴-B).

بخش سوم: مرحله کوارتز- کربنات، کوارتز و کربنات‌ها کانه‌های مگنتیت را قطع می‌کنند. مگنتیت نسل سوم همراه با رگه‌های کوارتز تشکیل‌شده و بیانگر کانی‌سازی انتهایی مگنتیت است (شکل ۴-C). برخی کوارتزها نیز حاوی کانی‌های فرعی مانند آپاتیت هستند.

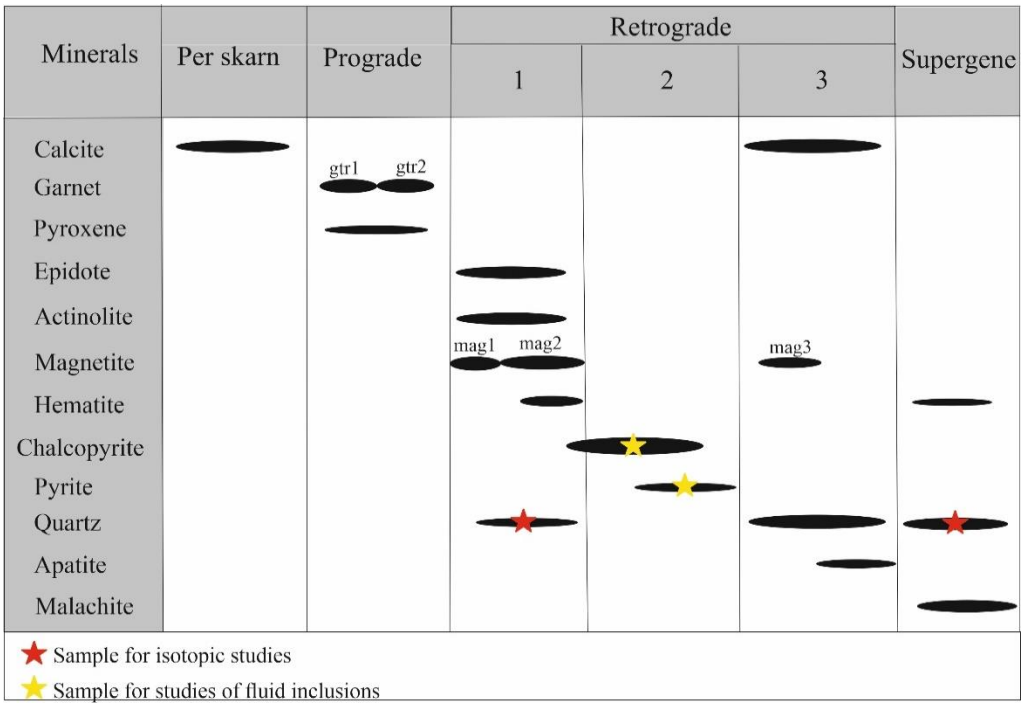
۴)مرحله سوپرژن: در این مرحله، کانی‌های ثانویه مانند مالاکیت تشکیل شده‌اند که در نمونه‌های دستی مشاهده شده‌اند. همچنین رگه‌های کوارتز- کربنات نیز در این مرحله حضور دارند و بیانگر فعالیت سیال‌های متأخر در کانسار هستند (شکل ۵).



شکل ٤. کانه‌زایی در کانسار آهن پیرملو. A: نمایی از مگنتیت‌های نسل اول و دوم، هماتیت و پیریت در مقاطع میکروسکوپی، B: نمایی از کانه‌های موجود در محدوده پیرملو در نور XPL، C: نمایی از مگنتیت‌های نسل سوم پراکنده در رگه‌های سیلیسی و D: نمونه دستی مگنتیت. علائم اختصاری از وبتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس‌شده است (Mag: مگنتیت، Qz: کوارتز، Py: پیریت).

Fig. 4. Mineralization in the Pirmalu iron deposit. A: First- and second-generation magnetite, hematite, and pyrite in thin sections, B: View of ore minerals present in the Piramlu area under cross-polarized light (XPL), C: View of third-generation magnetites disseminated within siliceous veins, and D: Hand specimen of magnetite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Mt = Magnetite, Qz = Quartz, Py = Pyrite).

DOI: 10.22067/econg.2026.1174



شکل ۵. توالی هم‌یافتی کانه‌ها و باطله‌ها در کانسار آهن پیرملو. علائم اختصاری از وبتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس‌شده است (grt: گارنت، mag: مگنتیت).

Fig. 5. Paragenetic sequence of ore minerals and gangue minerals in the Pirmalu iron deposit Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (gtr: Garnet, mag; Magnetite).

سیال‌های درگیر

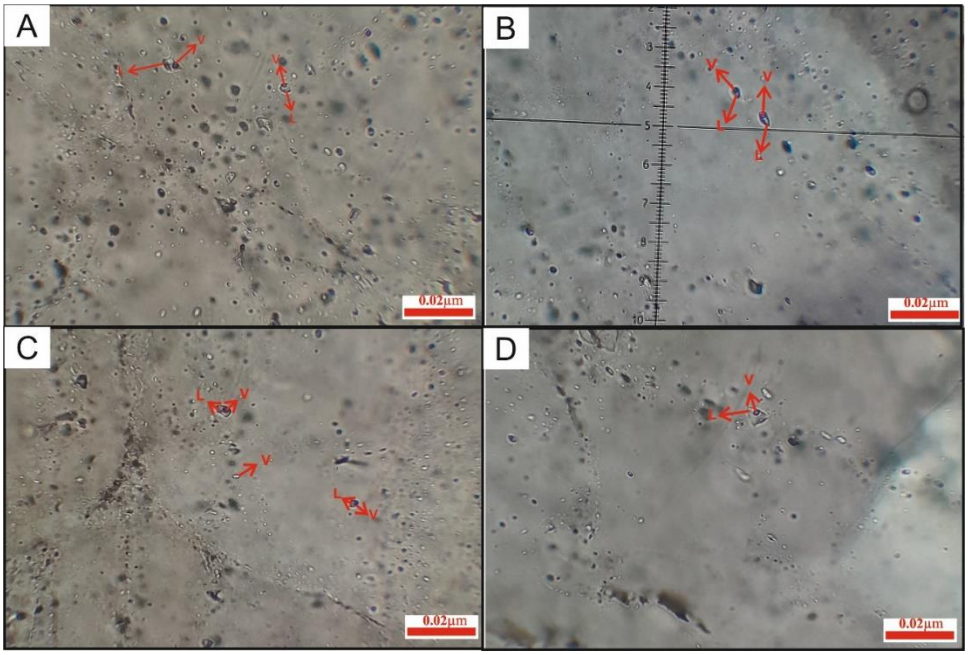
ذخایر معدنی از پدیده‌های جذاب و بسیار حیاتی در پوسته زمین به شمار می‌روند. دسترسی به این منابع اقتصای نقش مهمی در رشد و توسعه‌ی اقتصادی ایفا می‌کند. از این رو، برای شناخت بهتر فرایندهای مؤثر بر تشکیل این ذخایر، بررسی ویژگی‌های سیال‌های گرمابی و نقش آنها در انحلال، انتقال و رسوب عناصر کانه‌ساز، از جمله آهن ضروری است. این بررسی‌ها از طریق بررسی سیال‌های درگیر امکان‌پذیر است (Shepherd et al., 1985; Wilkinson, 2001; Masoumipour et al., 2023; Ghasemi Siani et al., 2025). در این پژوهش، بررسی‌ها بر روی ۵ نمونه انجام‌شد که در مجموع ۳۶ سیال درگیر مربوط به مرحله هم‌زمان با کانه‌زایی و ۱۵ سیال درگیر مربوط به مرحله پس از کانه‌زایی مورد بررسی قرارگرفت. اندازه این سیال‌ها در بازه ۵ تا ۱۲ میکرون متغیر است.

سنگ‌نگاری

سیال‌های درگیر در بررسی‌های سنگ نگاری بر اساس نحوه قرار گیری سیال‌ها در بلور میزبان، به سه گروه سیال‌های اولیه، سیال‌های ثانویه و ثانویه کاذب تقسیم‌بندی می‌شوند. در این پژوهش، سیال‌های درگیر از نظر فازی شامل میان‌بارهای غنی از گاز هستند که به صورت همزیست با میان‌بارهای دوفازی غنی از مایع مشاهده می‌شوند (شکل ۶-B) (Hassanpour and Rajabpour, 2020). فاز غنی از گاز اغلب به شکل بیضوی مشاهده می‌شود (شکل ۶-C). اندازه این سیال‌های درگیر بین ۲ تا ۸ میکرون متغیر بوده است. به دلیل نبود فاز غنی از مایع، استفاده از این نوع سیال‌های درگیر برای انجام بررسی‌های میکروترمومتری

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

امکان‌پذیر نیست. سیال‌های دوفازی مایع- بخار که بخش عمده حجم آنها را فاز مایع تشکیل می‌دهد، فراوان‌ترین نوع سیال‌های درگیر در نمونه‌ها به شمار می‌روند (شکل ۶-A و D). این سیال‌ها اغلب به شکل بیضوی و کشیده مشاهده می‌شوند و میزان پرشدگی در این میان‌بارهای سیال بین ۹۵ تا ۷۰ درصد محاسبه‌شده است.



شکل ٦. سیال‌های درگیر کانسار آهن پیرملو A: مجموعه سیال‌های (FIA) موجود در کانسار آهن پیرملو، B: سیال‌های L+V غنی از مایع موجود در کانسار آهن پیرملو، C: همزیستی سیال‌های غنی ازگاز و سیال‌های L+V غنی از مایع موجود در کانسار آهن پیرملو و D: سیال‌های بی شکل L+V غنی از مایع موجود در کانسار آهن پیرملو

Fig. 6. Fluid inclusions in the Pirmalu iron deposit. A: Fluid inclusion assemblage (FIA) identified in the Pirmalu iron deposit, B: Liquid rich (L+V) fluid inclusions in the Pirmalu iron deposit, C: Coexistence of gas-rich fluid inclusions and liquid-rich L+V fluid inclusions in the Pirmalu iron deposit, and D: Irregular liquid-rich L+V fluid inclusions in the Pirmalu iron deposit

میکروترمومتری

در طی فرایند گرمادهی، تغییرات نسبت حجمی فازهای مایع و بخار در میان‌بارها تا رسیدن به حالت همگن دنبال می‌شود و دمای همگن‌شدگی به عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی در بررسی‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال تعیین می‌شود (Wilkinson, 2001; Chi et al., 2021). دمای همگن‌شدگی سیال‌ها در کانی کوارتز هم‌زمان با کانه‌زایی در بازه ۱۳۲ تا ۲۹۱ درجه سانتی‌گراد متغیر است (جدول ۱). همچنین، دمای همگن‌شدگی سیال‌ها در کانی‌های کوارتز پس از کانه‌زایی بین ۱۲۸ تا ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند (جدول ۲ و شکل ۷). دمای یوتکتیک اندازه‌گیری‌شده در سیال‌های درگیر در محدوده ۳۵/۸- تا ۴۱- درجه سانتی‌گراد قرار دارد (جدول ۱). درجه شوری سیال‌ها هم‌زمان با کانه‌زایی در محدوده ۳/۵۵ تا ۱۶/۷ معادل درصد وزنی نمک طعام (NaCl) و شوری سیال‌های پس از کانه‌زایی نیز بین ۲/۵۷ تا۷/۷۶ معادل درصد وزنی نمک طعام (NaCl) متغیر است (شکل ۸).

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

جدول ۱. داده‌های میکروترمومتری سیالات درگیر دوفازی غنی از مایع (L–V) در کانی کوارتز هم‌زمان با کانه‌زایی در کانسار آهن پیرملو

Table 1. Microthermometric data of liquid-rich two-phase (L–V) fluid inclusions in quartz contemporaneous with mineralization in the Pirmalu iron deposit. (L–V = Liquid-rich two-phase fluids)

Sample	Phase	T_{eutec}	Th V-L	salinity
BH3-52	L-V		236	16.24
BH3-52	L-V		176	14.77
BH3-52	L-V		172	15.17
BH3-52	L-V		179	15.67
BH3-52	L-V		240	16.53
BH3-52	L-V		245	14.46
BH3-52	L-V		236	14.25
BH3-52	L-V		189	14.97
BH3-52	L-V		246	15.17
BH3-52	L-V		196	15.76
BH3-52	L-V	-41	227	16.34
BH3-52	L-V		140	16.24
BH3-52	L-V		165	13.94
BH3-52	L-V	-37	198	14.77
BH3-52	L-V		132	15.86
BH3-52	L-V		203	16.71
BH2-43	L-V		231	8.95
BH2-43	L-V		206	6.59
BH2-43	L-V		225	9.08
BH2-43	L-V		186	4.49
BH2-43	L-V		210	6.88
BH2-54	L-V		169	6.88
BH2-54	L-V		238	10.11
BH2-54	L-V	-35.8	245	4.34
BH2-54	L-V		186	7.86
BH2-54	L-V		184	4.8
BH2-54	L-V		236	8.68
BH2-54	L-V		216	5.71
BH2-54	L-V		200	9.21
BH3-42	L-V	-39.2	194	4.34
BH3-42	L-V		168	7.86
BH3-42	L-V		203	10.86
BH3-42	L-V		246	11.58
BH3-42	L-V		291	5.11
BH3-42	L-V		161	3.55

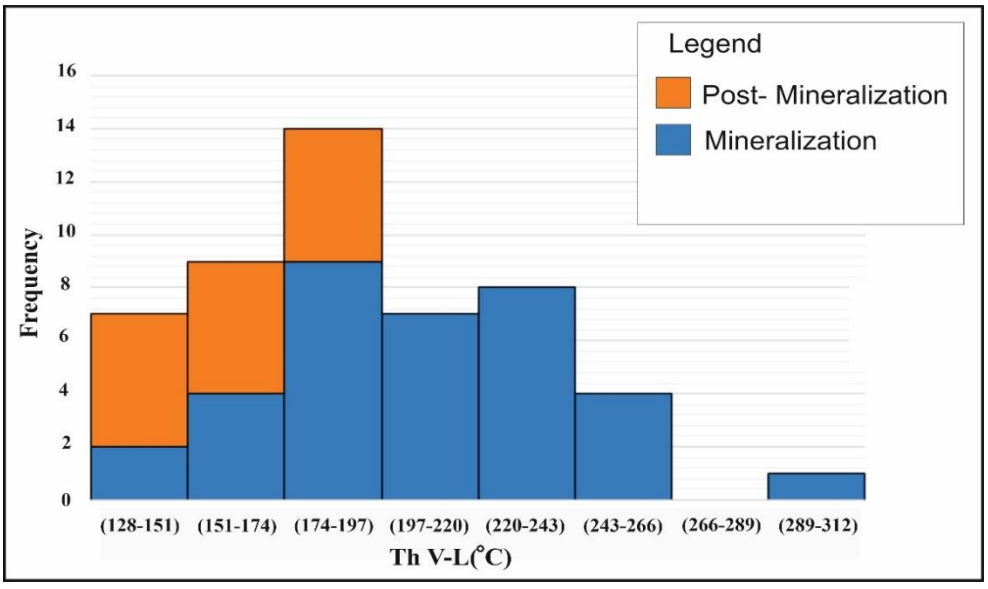
T_{eutec}=T Eutectic

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

جدول ۲. داده‌های میکروترمومتری سیال‌های درگیر در کانی کوارتز پس از کانه‌زایی در کانسار آهن پیرملو

Table 2. Microthermometric data of post-mineralization fluid inclusions in quartz from the Pirmalu iron deposit

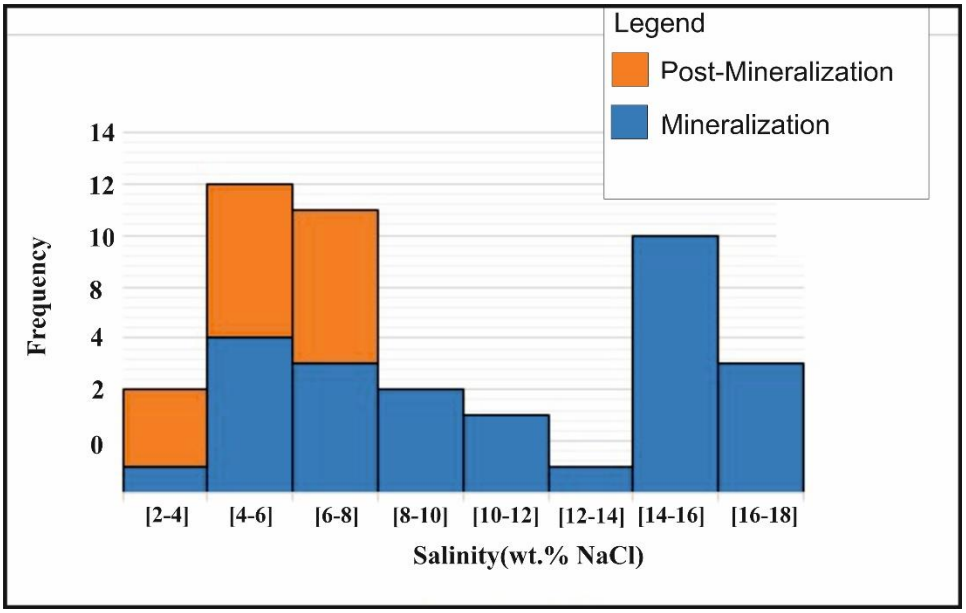
SAMPLE	PHASE	T_{EUTEC}	TH $_{V-L}$	SALINITY
BH3-45	L-V		165	5.11
BH3-45	L-V		135	2.57
BH3-45	L-V		180	5.26
BH3-45	L-V	28-	133	5.71
BH3-45	L-V		165	6.45
BH3-45	L-V		173	6.16
BH3-45	L-V		183	7.17
BH3-45	L-V		176	6.3
BH3-45	L-V		136	3.55
BH3-45	L-V		172	5.86
BH3-45	L-V		180	7.86
BH3-45	L-V		128	3.39
BH3-45	L-V		139	5.26
BH3-45	L-V		160	4.96
BH3-45	L-V		185	7.31



شکل ۷. نمودار فراوانی دمای همگن شدن ($Th_{(V-L)}$) سیال‌های درگیر در کانی‌های کوارتز هم‌زمان با کانه‌زایی و کوارتزهای پس از کانه‌زایی مربوط به کانسار پیرملو

Fig. 7. Frequency distribution diagram of homogenization temperatures (Th(V-L)) of fluid inclusions in quartz contemporaneous with mineralization and post-ore quartz from the Pirmalu deposit

DOI: 10.22067/econg.2026.1174



شکل ۸. نمودار فراوانی شوری سیال‌های درگیر در کانی‌های کوارتز هم‌زمان با کانه‌زایی و کوارتزهای پس از کانه‌زایی مربوط به کانسار پیرملو

Fig. 8. Frequency distribution diagram of salinity values for fluid inclusions in quartz contemporaneous with mineralization and post-ore quartz from the Pirmalu deposit

دامنه تغییرات دمای همگن‌شدگی و شوری میان‌بارها می‌تواند بیانگر تغییرات شرایط فیزیک و شیمیایی سیال در طول تکامل سامانه باشد. با توجه به گستردگی این دامنه‌ها، تفسیر آنها باید در کنار شواهد سنگ‌نگاری و نحوه توزیع میان‌بارها انجام شود (Wilkinson, 2001; Chi et al., 2021). کاهش دما وشوری در میان‌بارهای پس از کانه‌زایی نسبت به مرحله کانه‌زایی نیز می‌تواند با ورود و مشارکت سیال‌های رقیق‌تر در مراحل پایانی سامانه سازگار باشد (Hassanpour and Rajabpour, 2020; Masoumipour et al., 2023).

ایزوتوپ پایدار گوگرد

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره‌شد، بررسی سیال‌های درگیر یکی از روش‌های مؤثر برای شناخت منشأ، ماهیت و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی سیال‌های کانه‌ساز به شمار می‌رود. از دیگر روش‌های مهم در بررسی ماهیت، منشأ و ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی سیال‌ها، می‌توان به بررسی‌های ایزوتوپ پایدار اشاره‌کرد (Hoefs, 2015; Calagari, 2003; Sharp, 2007). ایزوتوپ گوگرد کاربردهای گسترده‌ای در بررسی‌های کانه‌زایی دارد که از جمله آنها می‌توان به تعیین منشأ سیال کانه‌دار، شناسایی اجزای سازنده کانسنگ، تعیین نسبت مؤثر آب به سنگ در طی فرایند کانی‌سازی، بررسی فرایند اختلاط سیال- سیال، تعیین منشأ و سازوکار احیای گوگرد و همچنین تعیین شرایط فیزیکی-شیمیایی سیال اشاره‌کرد (Ohmoto and Goldhaber, 1997; Hoefs, 2015; Rollinson, 1993). مقادیر $\delta^{34}S$ پیریت و کالکوپیریت در کانسار پیرملو در بازه ۱۰/۳ تا ۱۰/۸ در هزار با خطای استاندارد تحلیلی کمتر از ۰/۱ در هزار قرار دارد که میانگین آن برابر با ۱۰/۵ در هزار است. برای تعیین مقدار $\delta^{34}S$ سیال H_2S در تعادل با کانی پیریت و کالکوپیریت، از معادله تفکیک ایزوتوپی ارائه‌شده توسط اوموتو و رای (Ohmoto and Rye, 1979) و همچنین مقادیر

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

میانگین دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال در کوارتز استفاده شد. برای این منظور، از ضرایب تجربی (A) و (B) ارائه‌شده برای جفت‌های کانی H_2S–شامل پیریت H_2S– و کالکوپیریت H_2S–، به همراه دماهای همگن‌شدگی به دست‌آمده از بررسی‌های میکروترمومتری، در معادله تفکیک ایزوتوپی $1000\ln \alpha$- A/T2+B استفاده شد. بر این اساس، مقدار $\delta^{34}S$ سیال H_2S در کانسار پیرملو در محدوده ۹ تا ۹/۵ در هزار محاسبه‌شد (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد کانسار آهن پیرملو. مقادیر کمینه و بیشینه دمای تشکیل از بررسی‌های سیال‌های درگیر گرفته‌شده است. مقادیر $\delta^{34}S$ سیال H_2S با استفاده از تصحیحات اوموتو و رای (Ohmoto and Rye, 1979) تعیین‌شد.

Table 3. Sulfur stable isotope results for the Pirmalu iron deposit. The minimum and maximum formation temperatures obtained from fluid inclusion studies. The $\delta^{34}S$ values of the H_2S fluid were determined using the corrections of Ohmoto and Rye (1979).

Sample Name	$\delta^{34}S$ (‰) vs VCDT±1σ	δS_{H2S} (‰) Calculated	δS_{H2S} (‰) Calculated
P-2162	+10.3± 0.1	7.9	9
P-2163	+10.8± 0.1	8.4	9.5

بحث

منشأ و تکامل سیال‌های درگیر

سیال‌ها و همچنین کاتیون‌های فلزی موجود در کانسارها به احتمال زیاد از توده نفوذی موجود در منطقه منشأ گرفته‌اند (Bodnar, 1994; Hassanpour and Rajabpour, 2020; Masoumipour et al., 2023). افزون بر این، مشارکت سیال‌های جوی در سامانه کانه‌زایی موجب اختلاط سیال‌ها، رقیق‌شدن آنها و در نهایت نهشته‌شدن فلزها می‌شود. در این پژوهش، دمای یوتکتیک سیال‌های هم‌زمان با کانه‌زایی در بازه ۳۵- تا ۴۱- درجه‌ی سانتی‌گراد متغیر است. تغییرات مشاهده شده در دما و شوری سیال‌ها، اغلب ناشی از اختلاط سیال‌هاست. در مجموع، این ویژگی‌ها امکان پیش‌بینی روند حرکتی و ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی سیال را فراهم می‌سازد (Wilkinson, 2001). نتایج به دست آمده از بررسی‌های سیال‌های درگیر نشان می‌دهد که اغلب سیال‌های درگیر پس از کانه‌زایی حاصل جوشش و یا اختلاط با سیال‌های رقیق‌تر یا سطحی بوده‌اند که این فرایند به کاهش دما و شوری سیال‌ها منجرشده است. در سیال‌های هم‌زمان با کانه‌زایی، پدیده اختلاط ایزوترمال و به احتمال زیاد روند سردشدگی مشاهده می‌شود (Hassanpour and Rajabpour, 2020)؛ به گونه‌ای که در این حالت، توده نفوذی همچنان در اعماق قرار داشته و کاهش شوری بدون کاهش محسوس دما رخ‌داده است (شکل ۹). این فرایندها در نهایت به ته‌نشست ماده معدنی منجر شده‌اند.

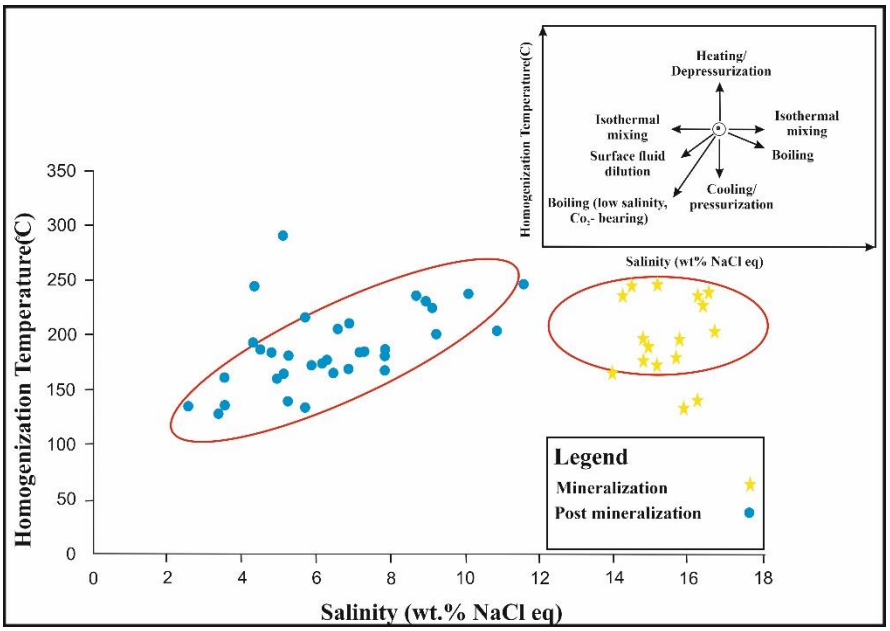
تعیین فشار

دمای همگن‌شدگی به دست آمده از بررسی‌های سیال‌های درگیر، اطلاعات ارزشمندی درباره شرایط دمایی تشکیل ذخایر کانسنگ و سیال کانه‌ساز فراهم می‌کند. با این حال، تفسیر دمای همگن‌شدگی به عنوان دمای واقعی تشکیل کانسار، به شرایط فشار و وضعیت فازی سیال هنگام به دام‌افتادن وابسته است. در سامانه‌های دارای شواهد جوشش، می‌توان با توجه به همزیستی میان‌بارهای غنی از بخار و مایع و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیال، شرایط حاکم بر به دام‌افتادن و تکامل سیال کانه‌ساز را ارزیابی کرد.

با توجه به نبود شواهدی از پدیده جوشش در مرحله هم‌زمان با

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

کانه‌زایی و همچنین با در نظرگرفتن میانگین دمای همگن‌شدگی (۲۱۱ درجه سانتی‌گراد) و میزان میانگین شوری (۱۰ معادل درصد وزنی نمک طعام (NaCl)) به دست آمده از بررسی‌های سیال‌های درگیر، دمای تصحیح‌شده با استفاده از داده‌های جدول ۴، حدود ۹۵ درجه سانتی‌گراد محاسبه‌شد. بر اساس نمودار ارائه‌شده توسط پوتر (Potter, 1977)، فشار سیال حدود ۱۰۰ مگا پاسکال، معادل ۱ کیلوبار، برآورد شده است. در نهایت، عمق تشکیل کانسار با استفاده از فشار محاسبه‌شده، حدود ۳/۵ کیلومتر به دست آمده است (شکل ۱۰).



شکل ۹. نمودار دمای همگن‌شدن در برابر شوری سیال‌های درگیر در کانسار آهن پیرملو که نشان‌دهنده وضعیت اختلاط سیال‌هاست.

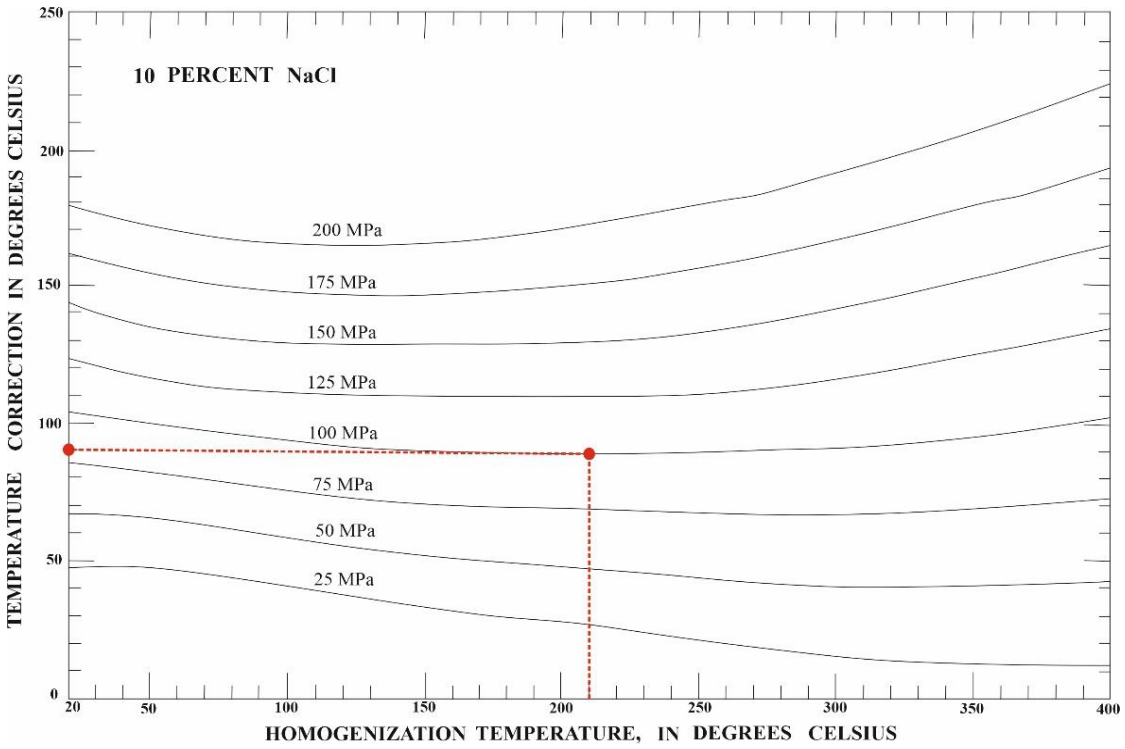
Fig. 9. Homogenization temperature versus salinity diagram illustrating fluid mixing in the Pirmalu iron deposit.

جدول ٤. مقایسه روش‌ها و روابط تصحیح فشار ارائه‌شده در منابع مختلف و کاربرد آنها در کانسار آهن پیرملو

Table 4. Comparison of pressure-correction methods and relationships reported in different references and their application to the Pirmalu iron deposit

Percent NaCL	ΔT(°C) for H.T. =150°C	ΔT(°C) for H.T. =250°C	ΔT(°C) for H.T. =400°C
B_0	B_{56}	B_{71}	**...**
1	…84	…84	**…130**
5	79-85	86-83	**154-121**
10	74-90	92-90	**104-102**
15	87-97	92-94	**91-99**
20	87-100	96-99	**87-93**
25	87-91	89-94	**86-103**

DOI: 10.22067/econg.2026.1174



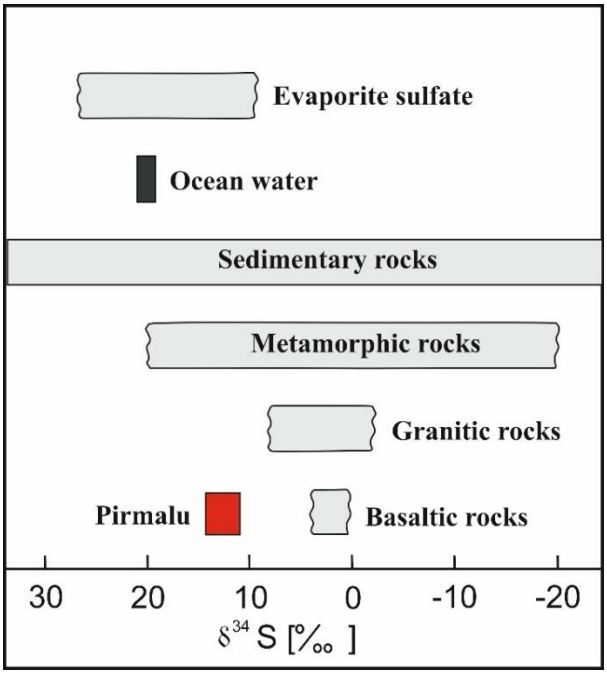
شکل ۱۰. نمودار تصحیح دما برای محلول‌های ۱۰ درصد NaCl به عنوان تابعی از دمای همگن‌سازی و فشار در کانسار آهن پیرملو (Potter, 1977)

Fig. 10. Temperature correction diagram for 10% NaCl solutions as a function of homogenization temperature and pressure in the Pirmalu iron deposit (Potter, 1977)

منشأ ایزوتوپ گوگرد

گوگرد موجود در سامانه‌های زمین‌شناسی می‌تواند از منابع مختلفی تأمین‌شود. از مهم‌ترین منابع احتمالی آن می‌توان به گوگرد با منشأ ماگمایی، سیال‌های گرمابی، سولفات موجود در آب دریا، سنگ‌های رسوبی و سولفیدهای پیشین و همچنین گوگرد حاصل از فرایندهای زیستی و احیای سولفات اشاره‌کرد. در سامانه‌های گرمابی، گوگرد می‌تواند در اثر آزاد شدن از ماگما یا شست‌وشوی سنگ‌های دربرگیرنده وارد سیال شود و یا منابع خارجی، از جمله سولفات آب دریا و سنگ‌های رسوبی، به سامانه گرمابی منتقل‌شود (Maanijou et al., 2012). از این رو، تعیین منشأ گوگرد در یک سامانه کانه‌زا مستلزم در نظرگرفتن شواهد زمین‌شناسی و زمین‌شیمیایی مختلف است و ترکیب ایزوتوپی گوگرد یکی از ابزارهای مناسب برای بررسی این موضوع به شمار می‌رود (Ohmoto and Goldhaber, 1997; Hoefs, 2015; Hassanpour and Rajabpour, 2020). در این پژوهش، تجزیه و تحلیل ایزوتوپی بر روی پیریت‌ها و کالکوپیریت‌های هم‌زمان با کانه‌زایی انجام‌شده است. با توجه به مقادیر پایین دمای همگن‌شدگی، شوری و فشار سیال‌های کانه‌ساز، می‌توان استنباط‌کرد که منشأ ایزوتوپ گوگرد در کانسار آهن پیرملو می‌تواند حاصل فرایند تبخیر و احیای سولفات‌ها باشد؛ با این حال، به دلیل نبود چنین شواهدی در منطقه مورد بررسی، این فرضیه از احتمال کمتری برخوردار است. از این رو، محتمل‌تر آن است که مقادیر ایزوتوپ گوگرد حاصل اختلاط سیال‌های ماگمایی با سیال‌های دگرگونی مشتق‌شده از سنگ‌های میزبان باشد (شکل ۱۱).

DOI: 10.22067/econg.2026.1174



شکل ۱۱. مقادیر ایزوتوپ پایدار گوگرد در کانسار آهن پیرملو (Hoefs, 2004)

Fig. 11. Stable sulfur isotope values in the Pirmalu iron deposit (Hoefs, 2004)

نتیجه‌گیری

در کانسار آهن پیرملو، توده نفوذی گرانیتی متعلق به ژوراسیک میانی نقش اصلی را در فرایند کانه‌زایی ایفاکرده و به احتمال زیاد به عنوان موتور حرارتی سامانه کانه‌ساز عمل‌کرده است. دگرسانی‌های اپیدوتی، کربناتی، کلریتی و سیلیسی در منطقه گسترش قابل‌توجهی دارند که در این میان، دگرسانی اپیدوتی غالب بوده و موجب ایجاد رنگ سبز مشخص در سطح منطقه شده است. کانه‌زایی اغلب به صورت توده‌ای و رگه‌ای در سطح زمین مشاهده می‌شود.

بررسی سنگ‌نگاری سیال‌های درگیر در کانسار آهن پیرملو نشان می‌دهد که این سیال‌ها اغلب شامل میان‌بارهای تک‌فازی غنی از گاز و میان‌بارهای دوفازی مایع- بخار هستند. نتایج بررسی‌های میکروترمومتری بیانگر آن است که دمای همگن‌شدگی *سیال‌های* درگیر همزمان با کانه‌زایی در بازه ۱۳۲ تا ۲۹۱ درجه سانتی‌گراد و برای سیال‌های پس‌از کانه‌زایی در محدوده ۱۲۸ تا ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد قرار دارد.

شوری سیال‌های هم‌زمان با کانه‌زایی بین ۳/۵۵ تا ۱۶/۷ معادل درصد وزنی نمک طعام (NaCl) و شوری سیال‌های پس‌از کانه‌زایی بین ۲/۵۷ تا ۷/۷۶ درصد وزنی NaCl محاسبه‌شده است. با توجه به نبود شواهدی از پدیده جوشش در مرحله هم‌زمان با کانه‌زایی و با در نظرگرفتن دمای همگن‌شدگی و میزان شوری سیال‌های درگیر، فشار سیال براساس نمودار پوتر (Potter, 1977)، حدود ۱۰۰ مگاپاسکال (معادل ۱ کیلوبار) برآورد شده است. بر این اساس، عمق تشکیل توده مورد بررسی حدود ۳/۵ کیلومتر محاسبه می‌شود.

مقادیر ایزوتوپ گوگرد ($\delta^{34}S$) در محدوده ۹ تا ۹/۵ در هزار قراردارد، با توجه به دمای پایین، شوری پایین و فشار پایین سیال‌ها و همچنین نبود شواهد محیط تبخیری در منطقه، محتمل‌تر آن است که ایزوتوپ‌های گوگرد کانسار آهن پیرملو حاصل اختلاط سیال‌های ماگمایی با سیال‌های دگرگونی مشتق‌شده از سنگ‌های

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

میزبان باشد.

در مجموع، شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی، سیال‌های درگیر و ایزوتوپ گوگرد، همراهی کانه‌زایی مگنتیتی با مجموعه کانی‌های اسکارنی و ارتباط فضایی آن با توده گرانیتوئیدی را نشان می‌دهند. این ویژگی‌ها با مشخصات کانه‌زایی اسکارن آهن همخوانی دارند و مجموعه داده‌های به دست‌آمده، مدل اسکارن آهن را برای تبیین چگونگی تشکیل کانه‌زایی در کانسار پیرملو معرفی می‌کند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان بیان‌نشده است.

1.Canyon Diablo Troilite (CDT)
2. Continuous- flow
3. Isotope Ratio Mass Spectrometer
4. Per- Skarn
5. Prograde
6. Retrograde
7. Sulfide stage
8. Quartz- Carbonate stage
9. Supergene
10. Teutectic
11. Isothermal mixing

DOI: 10.22067/econg.2026.1174

References

Ahadnejad, V., Valizadeh, M.V., Deevsalar, R. and Rezaei Kahkhaei, M., 2011. Age and geotectonic position of the Malayer granitoids: Implication for plutonism in the Sanandaj-Sirjan Zone, W Iran. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie – Abhandlungen, 261(1): 61–75. https://doi.org/10.1127/0077-7749/2011/0149

Bodnar, R.J., 1994. Synthetic fluid inclusions. XII. Experimental determination of the liquidus and isochores for a 40 wt.% H2O-NaCl solution. Journal of Geochimical et Cosmochimical Acta, 58(3): 1053–1063. https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90571-1

Calagari, A.A., 2003. Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phallic and potassic– phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaidjan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 21(7): 767–780. https://doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00083-4

Chi, G., Diamond, L.W., Lu, H., Lai, J. and Chu, H., 2021. Common Problems and Pitfalls in Fluid Inclusion Study: A Review and Discussion. Minerals, 11(1). https://doi.org/10.3390/min11010007

Eshraghi, S., 2002. Explanatory note of the Tuyserkan geological map, scale 1:100,000. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran.

Ghasemi Siani, M., Mehrabi, B., Ebrahimi Fard, H. and Neubauer, F., 2025. Mineralogy, mineral chemistry, fluid inclusions and skarnification processes in the Tappeh Ghermez (A′) iron skarn, Sangan iron-mining district, NE Iran. Journal of the Geological Society, 182(4): jgs2024-163. https://doi.org/10.1144/jgs2024-163

Ghorbani, M., 2008. Economic geology of Iran's natural and mineral deposits. Arian Zamin Publications, Tehran, Iran, 695 pp.

Hassanpour, Sh. and Rajabpour, Sh., 2020. Magmatic–hydrothermal evolution of the Anjerd Cu skarn deposit, NW Iran: Perspectives on mineral chemistry, fluid inclusions and stable isotopes. Ore Geology Reviews, 117:103269. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103269

Hoefs, J., 2004. Stable Isotope Geochemistry.Springer, Berlin, 244 pp.

Hoefs, J., 2015. Stable Isotope Geochemistry. Springer International Publishing, Cham, 389 pp.

Karmania Co., 2022. Geological map of Pirmalu deposit, scale: 1:1000. Exploration report of the Pirmalu deposit.

Maanijou, M., 2022. Final Report on Exploration Operations in the Pirmalu Magnetite Iron Area, Asadabad County, Hamadan Province. Mes Pajoohan Karmania Company, 57 pp. (in Persian)

Maanijou, M., Rasa, I. and Lentz, D.R., 2012. Petrology, Geochemistry, and Stable Isotope Studies of the Chehelkureh Cu-Zn-Pb deposit, Zahedan, Iran. Economic Geology, 107(4): 683–712. https://doi.org/10.2113/econgeo.107.4.683

Masoomi, R., Rahimsouri, Y., Jamali, H. and Abedini, A., 2023. Geochemical aspects of alteration system in the Kamar-Gov district., western Alborz-Azerbaijan magmatic belt, north-west of Iran. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 33(2): 43–66. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22071/gsj.2023.355165.2023

Masoumipour, Z., Jamali, H., Harris, C., Lentz, D.R. and Yousefi, F., 2023. Origin and evolution of the ore-forming fluids in the southern Abbas Abad iron skarn deposit, NE Isfahan, Central Iran: Insights from geology, fluid inclusions, and CO isotopes. Journal of Geochemical Exploration, 248: https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107194

Mohseni, S. and Aftabi, A., 2015. Structural, textural, geochemical and isotopic signatures of synglaciogenic Neoproterozoic banded iron formations (BIFs) at Bafq mining district (BMD), Central Iran: The possible Ediacaran missing link of BIFs in Tethyan metallogeny. Ore Geology Reviews, 71: 215–236. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.018

Nabatian, Gh., Rastad, E., Neubauer, F., Honarmand, M. and Ghaderi, M., 2015. Iron and Fe–Mn mineralisation in Iran: implications for Tethyan metallogeny. Australian Journal of Earth Sciences, 62(2): 211–241. http://dx.doi.org/10.1080/08120099.2015.1002001

Ohmoto, H. and Goldhaber, M.B., 1997. Sulfur and carbon isotopes. In: H.L. Barnes, (Editor), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, John Wiley & Sons, New York, pp. 517–611.

Ohmoto, H. and Rye, R.O., 1979. Isotope of sulfur and carbon. In: H.L. Barnes (Editor), Geochemistry of Hydrothermal deposits, John

Wiley & Sons, pp. 509–567. Retrieved November 13, 2026 from https://cir.nii.ac.jp/crid/1571698599027492864

Potter, R.W., 1977. Pressure corrections for fluid-inclusion homogenization temperatures based on the volumetric properties of the system NaCl-H_2O. Journal of Research U.S. Geological Survey, 5(5): 603–607. Retrieved May 26, 2026 from https://pubs.usgs.gov/publication/70164402

Roedder, E., 1984. Fluid Inclusions. Reviews in Mineralogy, Vol. 12, Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 644 pp.

Rollinson, H., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific and Technical, United Kingdom, 352 pp. Retrieved November 13, 2026 from https://libcat.canterbury.ac.nz/Record/419979

Sabzeai, M., 1997. Geological map of Hamedan (1:250,000 scale). Geological Survey and Mineral Exploration of Iran.

Sharp, Z., 2007. Principles of Stable Isotope Geochemistry. Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 344 pp. Retrieved November 13, 2026 from https://libcat.canterbury.ac.nz/Record/1061166/Details

Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies. Blackie, Glasgow, 239 pp. ISBN: 0412006014

Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 52(7): 1229-1258. https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D

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

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