



Mineralogy, geochemistry, fluid inclusions and genesis of Fe-Cu-Au mineralization associated with Ahmadabad intrusions, Semnan

Fariba Tayefi ^{1*}, Behzad Mehrabi ² , Majid Ghasemi Siani ³

¹ M.Sc., Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 27 May 2021
 Revised: 19 October 2021
 Accepted: 31 October 2021

Keywords

Subvolcanic intrusion
 Hematite mineralization
 Fluid Mixing
 Hydrothermal iron ore deposit
 Alborz and Central Iran
 Ahmadabad

*Corresponding author

Fariba Tayefi
 ✉ tayefi.f85@gmail.com

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Hydrothermal iron ore deposits are formed at various depth, from shallow to deep environments mainly as veins, veinlets and stockworks (Guilbert and Park, 1997). Ahmadabad deposit is located in 30 km northeast of the Semnan province, between the Alborz and Central Iran sedimentary-tectonic structural zones. According to the previous studies in the Ahmadabad ore deposit (Haji Babaei and Ganji, 2018; Ketabforoush, 2016), there are major uncertainties on origin of mineralization and involved hydrothermal process. In previous studies, based on fluid inclusions data, Ahmadabad hematite-barite ore deposit is considered as a low-temperature hydrothermal barite ore deposit, and also considered as Ahmadabad barite-iron oxide ore deposit as a veins-type hydrothermal-magmatic ore deposit (Haji Babaei and Ganji, 2018). Ketabforoush (2016) based on lithological, mineralogical and alteration assemblage characteristics of the Ahmadabad iron ore mineralization, regarded it as an Iron Oxide-Copper-Gold (IOCG) type hydrothermal mineralization. This study attempts to use mineralogy, geochemistry and microthermometry of fluid inclusions data in quartz and barite for investigating the genesis of Fe-Cu-Au mineralization and possible style of mineralization at the Ahmadabad deposit.

Material and methods

During field work, 54 samples were collected from the host rocks, alteration and mineralized zones.

How to cite this article

Tayefi, F., Mehrabi, B. and Ghasemi Siani, M., 2022. Mineralogy, geochemistry, fluid inclusions and genesis of Fe-Cu-Au mineralization associated with Ahmadabad intrusions, Semnan. *Journal of Economic Geology*, 14(2): 65–91. (in Persian with English abstract) <https://dx.doi.org/10.22067/ECONG.2021.70627.1025>



©2022 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.

For petrography, mineralogy and paragenetic sequence studies, 48 thin-polished sections were prepared and studied by ZEISS Axioplan2 polarized microscope at Kharazmi University, Tehran branch. After careful ore petrography, 10 suitable ore samples were selected for bulk chemical analysis. Preparation, crushing and pulverizing of the samples were carried out in Kharazmi University and prepared samples were analyzed in the Zarazma and Iranian Mineral Processing Research Center (IMPRC) labs, for major, minor and rare earth elements using WD-XRF and ICP-MS methods. Geochemical analyses results are presented in Table 1 and Table 3. Microthermometric analyses were carried out on 3 doubly polished thin section of quartz and barite minerals using a Linkam THMS 600 freezing-heating stage, mounted on a ZEISS Axioplan2 research microscope at the IMPRC.

Discussion

Formation and associated processes of iron ore deposition has been much debated and discussed, with the main focus on hydrothermal and magmatic origin (Naslund et al., 2000). In Ahmadabad deposit, it seems that monzonite and monzodiorite subvolcanic intrusions has been emplaced in a volcanic sequence. During magma emplacement and crystallization, magmatic hydrothermal fluid, due to its lower density, was rising to the upper part of the intrusions and permeated into the volcanic host rocks, causing vein-type iron mineralization. Based on mineralogical and microthermometric studies of the fluid inclusions, mineralizing fluid of possibly magmatic origin; migrated, cooled down and diluted by mixing with meteoritic fluids. Temperature and pressure drop following the migration of the magmatic hydrothermal fluid to the shallow depths may changes the nature of mineralizing fluids from reduced to oxidant state and deposition of iron as hematite after sulfide (pyrite and chalcopyrite) and sulfate (barite) precipitation. Salinity and homogenization temperature of the fluid inclusions show that high temperature-salinity fluid mixed with low temperature-salinity fluid causing temperature and salinity drop, followed by cooling and dilution, provided the favorable condition for iron oxide deposition. Based on current studies, Ahmadabad deposit formed in the following stages:

- Intrusion's emplacement in the shallow depth,

caused migration and circulation of mineralized fluid in fractures and faults which act as fluid channeling conduits.

- Circulation of these fluids through fractured systems may also cause some metal leaching from the volcanic wall rocks.

- Moderate to high temperature and salinity magmatic hydrothermal fluid, while approaching the shallow depth were mixed with meteoric fluid and by cooling and dilution process, and possibly transition from the reduction-oxidation boundary, ore bearing fluid nature changed and resulted in hematite deposition after sulfide and sulfate phases.

Results

Based on field geology, mineralogy, geochemistry and microthermometry data, Ahmadabad iron ore mineralization is similar to the epigenetic deposits formed by magmatic-meteoric fluids due to fluid mixing. Mineralization in the Ahmadabad deposit may divided into two mineralization stages: 1) primary hydrothermal mineralization stage (hypogene), and 2) secondary stage (supergene). The main iron ore mineralization in Ahmadabad is hematite (specularite) which is mainly formed later than sulphides including pyrite and chalcopyrite, as open space-filling, vein-veinlet, massive and disseminated style. Barite, calcite and quartz are the main gangue minerals, though in some place's barite has economic potential. Based on field data and mineralogical studies, the subvolcanic intrusions of the Early Eocene age, after emplacement within the volcanic units controlled by fault and fracture zones, have caused extensive low-grade alterations and limited mineralization in intrusion and volcanic host rocks. Microthermometric studies of fluid inclusions show that the best possible model for development of the Ahmadabad ore deposit, is mixing of hot and high-salinity magmatic hydrothermal fluid with cold and low-salinity meteoric water.

Although iron ore grade changes significantly with variation in the silica contents, high grade Fe mineralization mainly occurred in the fault and fractured zones away from widespread intensive silicification which is mainly associated with Cu±Au mineralization. These features are the key exploration criteria for future exploration program in the region.



کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، میان‌بارهای سیال و منشأ کانه‌زایی آهن-مس-طلا همراه با توده‌های آذرین نفوذی احمدآباد، سمنان

فریبا طایفی^{۱*}، بهزاد مهربانی^۲ ID، مجید قاسمی سیانی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده

محدوده کانه‌زایی احمدآباد در شمال‌شرق استان سمنان و در حد فاصل زون‌های ساختاری البرز و ایران مرکزی واقع شده است. کانی‌سازی در کانسار به صورت اپی‌ژنتیک در بخش‌های کم‌عمق و سطحی کانسار با بافت‌های پرکننده فضای خالی، رگه-رگچه‌ای، توده‌ای و افشان در سنگ‌های میزبان نفوذی با ماهیت مونزونیت و مونزودیوریت و به مقدار کمتر گرانودیوریت و گرانیت و در واحدهای آتشفشانی آندزیت، تراکی آندزیت و داسیت رخ داده است. کانه‌زایی شامل انواع اکسیدی (هماتیت)، سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) و اکسی-هیدروکسیدی (گوتیت و لیمونیت) است و باریت، کلسیت و کوارتز باطله‌های اصلی در کانسار هستند. بر اساس بررسی‌های زمین‌شیمیایی روی کانسنگ آهن، نمونه‌ها به دو گروه کم‌عیار و عیارمتوسط دسته‌بندی می‌شود. بر اساس بررسی‌های میکروترمومتری، دمای همگن شدن و شوری میان‌بارهای سیال در کوارتز به ترتیب برابر ۱۹۴ تا ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد و ۱/۷۴ تا ۱۳/۰۷ درصد وزنی معادل نمک طعام و در کانی باریت ۱۱۵ تا ۲۵۶ درجه سانتی‌گراد و ۳/۶۲ تا ۱۹/۴۵ درصد وزنی معادل نمک طعام است. بر اساس این بررسی‌ها، سردشدن و رقیق‌شدگی سطحی سیال مسئول کانه‌زا در اثر اختلاط با سیال جوی، عامل اصلی کانی‌سازی در کانسار احمدآباد است. توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق ضمن صعود به مناطق کم‌عمق پوسته زمین، درون سنگ‌های آتشفشانی در بخش‌های گسلی و شکستگی‌ها جای گرفته‌اند و در نتیجه کاهش دما، فشار و افزایش فوگاسیته اکسیژن، در بخش‌های سطحی به کانی‌سازی گرمابی در سنگ‌های میزبان آتشفشانی و نفوذی منجر شده است. بر این اساس می‌توان کانه‌زایی در کانسار احمدآباد را از نوع کانی‌سازی‌های گرمابی دانست.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۹

واژه‌های کلیدی

توده نفوذی نیمه‌عمیق
کانه‌زایی هماتیت
اختلاط سیالات
کانسار آهن گرمابی
البرز و ایران مرکزی
احمدآباد

نویسنده مسئول

فریبا طایفی

tayefi.f85@gmail.com ✉

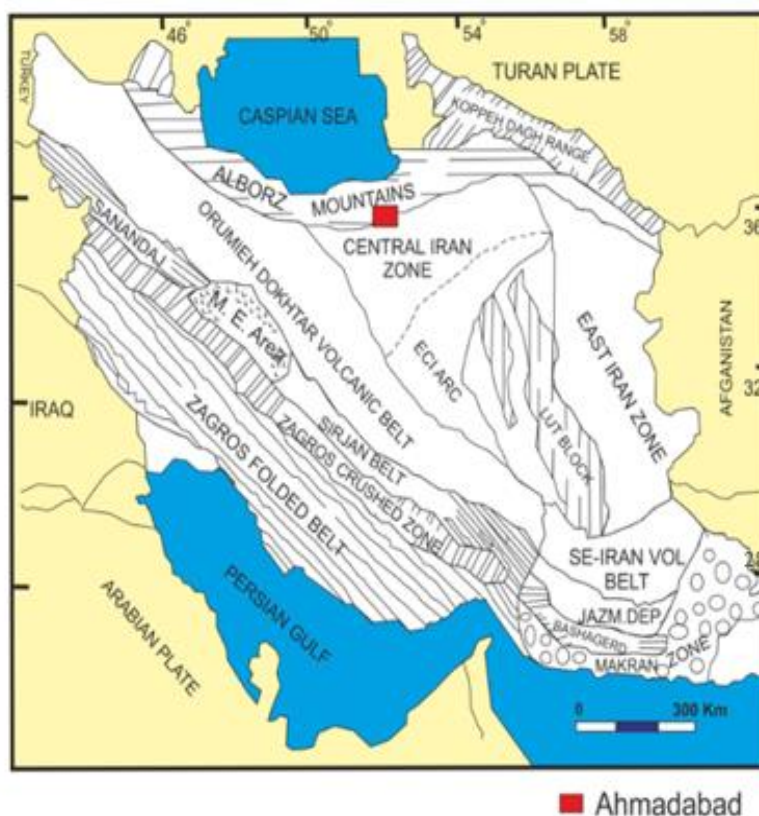
استناد به این مقاله

طایفی، فریبا؛ مهربانی، بهزاد و قاسمی سیانی، مجید، ۱۴۰۱. کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، میان‌بارهای سیال و منشأ کانه‌زایی آهن-مس-طلا همراه با توده‌های آذرین نفوذی احمدآباد، سمنان. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴(۲): ۶۵-۹۱. <https://dx.doi.org/10.22067/ECONG.2021.70627.1025>

مقدمه

سمنان، در نزدیکی غرب روستای احمدآباد و از نظر زمین‌ساختاری در حد فاصل زون‌های ساختاری البرز و ایران مرکزی قرار دارد (شکل ۱). با توجه به پژوهش‌هایی که بر روی کانسار آهن احمدآباد انجام شد، نظرهای مختلفی در مورد منشأ این کانسار وجود دارد. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به بررسی میان‌بارهای سیال کانسار هماتیت/باریت احمدآباد توسط حاجی بابایی و گنجی (Haji Babaei and Ganji, 2018) اشاره کرد که بر این اساس باریت‌ها مشابهت نزدیکی را با کانسارهای باریت گرمابی دماپایین نشان می‌دهند و کانسار اکسید آهن باریت‌دار احمدآباد را به عنوان یک کانسار گرمابی-ماگمایی رگه‌ای قلمداد کرده‌اند.

پراکندگی کانسارهای آهن در ایران از لحاظ زمانی منحصر به دوره خاصی نیست و از زمان پروتروزوئیک پسین تا تشریری قابل پیگیری است و در نقاط مختلف ایران پراکندگی کانسارهای ایران را شاهد هستیم (Ghorbani, 2003; Kordian et al., 2020; Nakhaei and Mohammadi, 2021; Yari et al., 2021). کانسارهای گرمابی آهن به شکل رگه‌ای و یا استوک ورک، از طریق فعالیت‌های سیال‌های گرمابی در اعماق بسیار متفاوت، از محیط‌های سطحی تا بسیار عمیق پدید می‌آیند و مگنتیت یا هماتیت، ماده معدنی اصلی در این کانسارهاست (Guilbert and Park, 1997). کانسار احمدآباد در ۳۰ کیلومتری شمال شرق



شکل ۱. موقعیت منطقه معدنی احمدآباد در نقشه پهنه‌های زمین‌ساختی-ماگمایی ایران با تغییرات از اشتوکلین (Stocklin, 1968) و نظافتی (Nezafati, 2006)

Fig. 1. Location map of Ahmadabad mining area in tectonomagmatic zones of Iran, modified after (Stocklin, 1968; Nezafati, 2006)

شکستگی‌ها و حفره‌ها و نیز مقادیر کم پیریت و کالکوپیریت به صورت پراکنده در شکستگی‌ها فراهم کرده است. در کانسار احمدآباد، کانی‌سازی بیشتر در بخش‌های سطحی و کم‌عمق و به صورت پراکنده فضای خالی، رگه-رگچه‌ای، توده‌ای و افشان (پراکنده) رخ داده است. دو سامانه گسلی اصلی در منطقه با روندهای شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و شمالی-جنوبی، نقشی مهم در جای‌گیری توده‌های نفوذی و به دنبال آن کانی‌سازی در منطقه احمدآباد دارد.

روش مطالعه

بعد از بازدید صحرایی از رخنمون‌های ماده معدنی و سنگ‌های دربرگیرنده، تعداد ۵۴ نمونه از زون‌های کانی‌سازی و سنگ‌های دربرگیرنده برداشت شد. برای بررسی کانی‌شناسی و توالی همیافتی، تعداد ۴۸ مقطع نازک، صیقلی و نازک-صیقلی از نمونه‌ها تهیه شد و در آزمایشگاه سنگ‌شناسی دانشگاه خوارزمی با میکروسکوپ دو منظوره عبوری-انعکاسی ZEISS مدل AxioPlan2 مورد بررسی قرار گرفت. طی بررسی‌های میکروسکوپی، تعداد ۱۰ نمونه برای تجزیه شیمیایی کانسنگ انتخاب شد. مراحل آماده‌سازی، خردایش و نمایش در دانشگاه خوارزمی انجام شد و نمونه‌ها برای تجزیه شیمیایی به روش XRF و ICP-MS به آزمایشگاه شرکت زرآزما و مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران برای اندازه‌گیری عناصر اصلی، فرعی و کمیاب ارسال شد. مقدار LOI آنها با نگهداری پودر سنگ‌ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. حد تشخیص برای نمونه‌های اکسیدهای اصلی و عناصر، ۰/۰۵ درصد تعیین شد. برای تعیین میزان عناصر کمیاب و نادر خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه در ترکیب لیتم متابورات/تتراپورات ذوب و سپس در اسید نیتریک حل شد. نتایج تجزیه شیمیایی در جدول ۱ و جدول ۳ ارائه شده است. تعداد ۳ مقطع دوبر صیقل از کانی‌های کوارتز و باریت، با جهت برش مناسب برای بررسی میان‌بارهای سیال تهیه و با دستگاه گرمایش و سرمایش Linkam مدل TMS600 و

کتابفروش (Ketabforoush, 2016)، بر اساس شواهد سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و دگرسانی، کانه‌زایی آهن احمدآباد را از کانی‌سازی‌های گرمایی نوع اکسید آهن-مس-طلا معرفی کرده است. با توجه به اینکه منشأ متفاوتی در کارهای انجام‌شده قبلی گزارش شده است، سؤال این است که منشأ نهایی محدوده کانی‌سازی احمدآباد به چه صورت بوده و آیا کانی‌سازی طلا نیز همراه با این کانسار شکل گرفته است. بنابراین، در این پژوهش سعی بر این است که با بررسی‌های کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و میکروترمومتری میان‌بارهای سیال روی کوارتز و باریت، علاوه بر ارائه مدل کانی‌سازی و تعیین نقش توده‌های نفوذی منطقه در کانی‌سازی آهن، منشأ کانی‌سازی آهن-مس-طلا در کانسار احمدآباد مورد بررسی قرار گیرد.

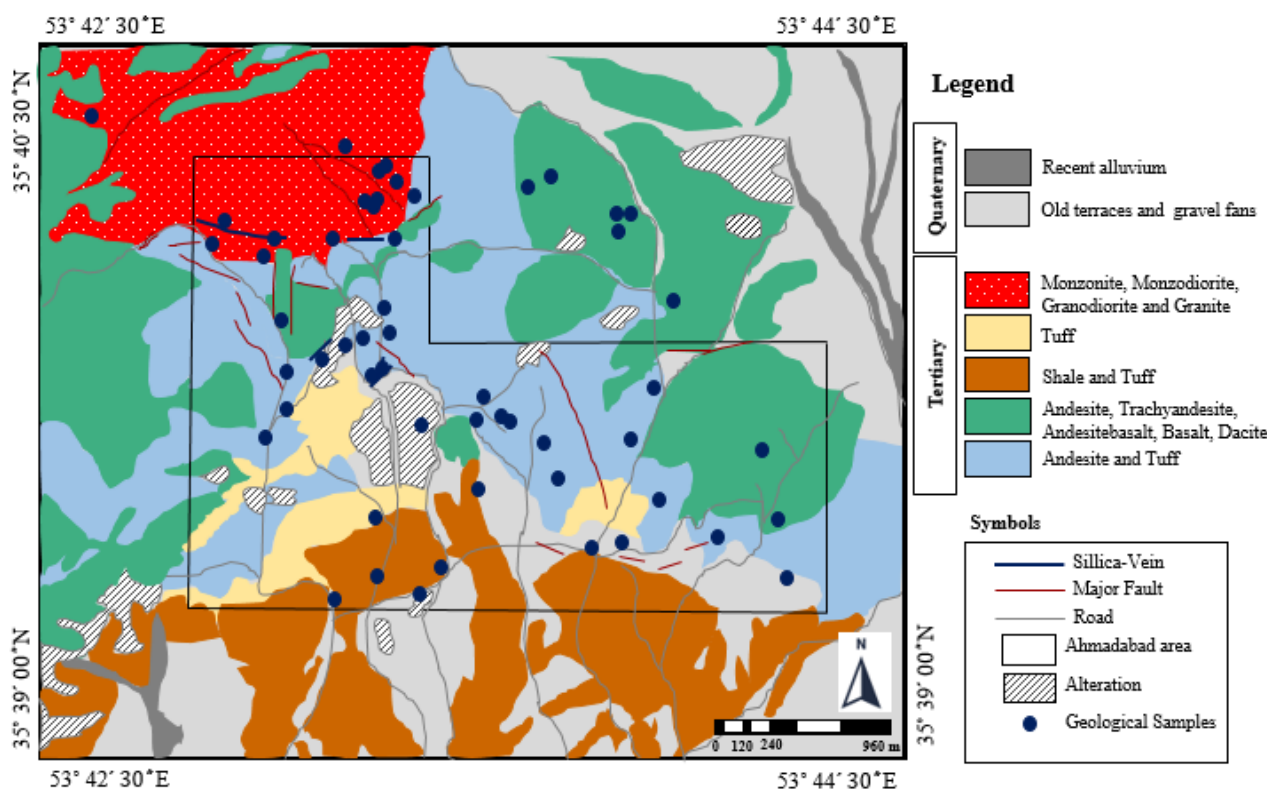
زمین‌شناسی

محدوده معدنی احمدآباد در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جام قرار گرفته که از دیدگاه پارینه جغرافیایی در این ورقه، دو بخش مختلف قابل تشخیص است. بخشی از شمال‌غربی ناحیه، به نام منطقه A (Zone A) که پیوسته با کوه‌های البرز است و بخش دیگر که در جنوب‌شرقی قرار گرفته است، به نام منطقه B (Zone B) که پیوسته با کوه‌های ایران مرکزی است. این دو بخش، از طریق گسل عطاری از یکدیگر جدا شده‌اند. بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ تهیه‌شده از منطقه (شکل ۲)، واحدهای سنگی موجود در منطقه احمدآباد، شامل سنگ‌های آتشفشانی و آواری-آتشفشانی به سن ائوسن که بخش‌های آتشفشانی آن، گدازه‌های آندزیتی، تراکی آندزیتی، آندزیت بازالتی، داسیتی و بازالتی و بخش‌های آواری-آتشفشانی آن شامل توف‌های سبز تا خاکستری و توف‌های اسیدی به رنگ کرم روشن است.

این مجموعه آواری-آتشفشانی، در اثر نفوذ توده‌های مونزونیتی و مونزودیوریتی و به مقدار کمتر گرانودیوریتی و گرانیتی متحمل دگرسانی‌های گسترده آرژیلیکی و سیلیسی شده و شرایط مناسبی را برای کانی‌سازی اکسید آهن به صورت اسپیکولاریت در

خنک کردن دستگاه در دمای بالا) است. کالیبراسیون مرحله گرمایش با دقت ± 0.6 درجه بوده که با نیترات سزیم و با نقطه ذوب 414 درجه صورت گرفت و در انجماد با دقت ± 0.2 درجه و با ماده استاندارد ان-هگزان با نقطه ذوب $94/3$ درجه سانتی‌گراد انجام شد.

میکروسکوپ نوری مدل ZEISS در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران مورد بررسی قرار گرفت. دامنه حرارتی دستگاه 196 تا $600+$ درجه سانتی‌گراد بوده، همچنین این دستگاه مجهز به دو کنترل‌گر، گرمایش (TP94) و سرمایش (LNP)، مخزن ازت (جهت پمپ نیتروژن برای انجماد) و مخزن آب (جهت



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه معدنی احمدآباد در مقیاس ۱:۵۰۰۰

Fig. 2. Geological map of Ahmadabad mining district, scale 1:5000

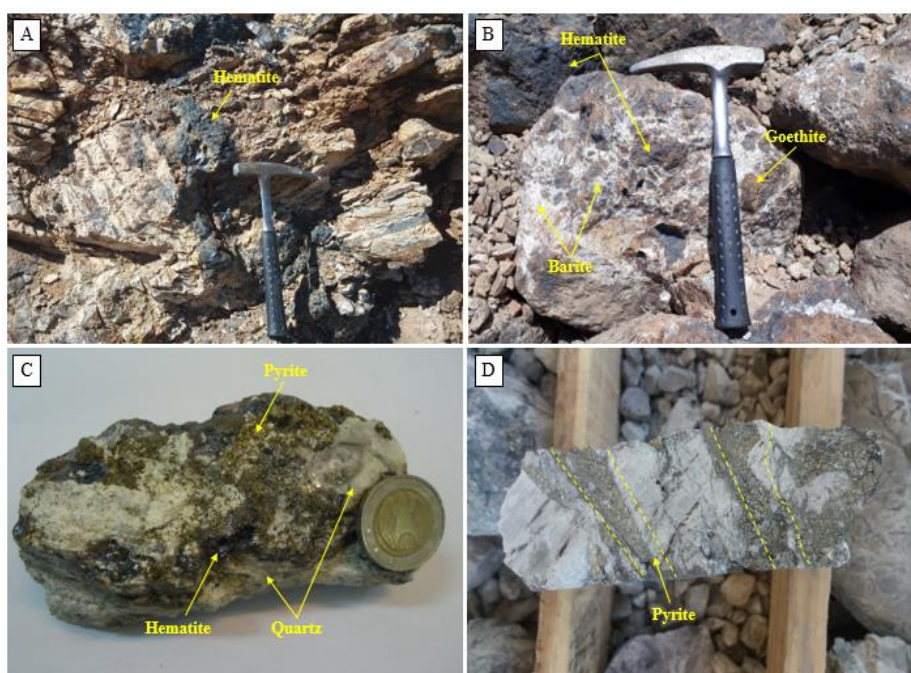
رخ داده است. هماتیت به عنوان اصلی‌ترین کانه اکسیدی منطقه به صورت رگه-رگچه‌ای (شکل ۳-A)، برشی با هیدروکسیدهای آهن و باریت (شکل ۳-B) و افشان (دانه پراکنده) تشکیل شده است. کانی‌سازی رگه‌ای، مهم‌ترین شکل کانی‌سازی در فاز اپی‌ژنتیک در کانسارهای آهن و منگنز گرمابی است. هماتیت‌های اسپیکولاریتی کانسار احمدآباد، هیپوژن بوده و در بخش‌هایی با فوگاسیته اکسیژن سیال بالا، تشکیل شده است. تشکیل

کانه‌زایی و دگرسانی

کانی‌سازی آهن در کانسار احمدآباد، در بخش‌های کم‌عمق و سطحی کانسار رخ داده است. کانه‌زایی از انواع اکسیدی (هماتیت)، سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) و اکسی-هیدروکسیدی (گوتیت و لیمونیت) بیشتر در سنگ‌های میزبان نفوذی مونزونیتی و مونزودایوریتی و به مقدار کمتر در سنگ‌های گرانودیوریتی و گرانیتی، آندزیتی-تراکی آندزیتی و داسیتی

یک صفحه S مانند زمین‌ساختی رشد می‌کنند (Rosiere et al., 2001). پیریت به عنوان کانی سولفیدی آهن‌دار، به صورت هیپوزن (اولیه) در بخش‌های سطحی، گمانه‌ها و محل نمونه‌برداری و اغلب به صورت افشان (پراکنده)، توده‌ای، برشی و رگه-رگچه‌ای همراه با هماتیت و رگه‌های کوارتز در کانسار قابل مشاهده است (شکل ۳-C و D).

اسپیکولاریت با تغییر شکل پلاستیک هماتیت توسط جابه‌جاشدگی آرام در صفحه‌های پایه هماتیت روی می‌دهد که با رشد دانه‌های تبلور یافته و آنیزوتروپ به واسطه نیروی کششی مستقر در بین بلورهای تغییر شکل یافته، دنبال می‌شود. در این فرایند، بلورهای هماتیت نسبت به مکان‌های مناسب برای خزش و جابه‌جایی اساسی چرخیده و به صورت دانه‌های موازی نسبت به

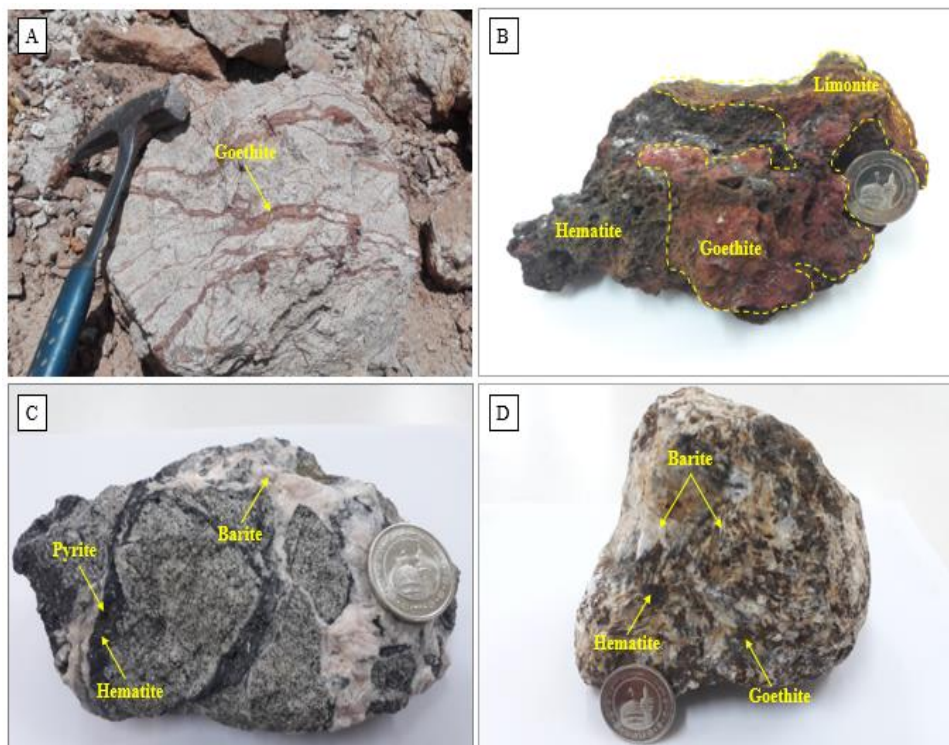


شکل ۳. A: رگچه‌های کانه‌دار در واحد میزبان مونزودیوریتی، B: کانی‌سازی هماتیت با ساختار برشی، C: کانی‌سازی هماتیت همراه با پیریت و رگچه‌های کوارتز در واحد مونزونیتی و D: رگچه‌های پیریت تشکیل شده در زون گسلی در منطقه احمدآباد

Fig. 3. A: Mineralized veinlets in monzodiorite host rock, B: hematite mineralization with breccia texture, C: hematite mineralization associated with pyrite and quartz veinlets in monzonite host rock, and D: pyrite veinlets occurred in the fault zone in Ahmadabad area

بوده که باریت دارای توانایی اقتصادی بالایی در منطقه است. باریت به رنگ سفید تا صورتی کم‌رنگ (وجود مقادیر کمی آهن) با ساخت‌های توده‌ای، رگه‌ای، برشی و سوزنی در کانسار قابل مشاهده است. سیالات گرمابی حاوی ترکیبات شیمیایی باریم‌دار، با تغییر فشار، دما و pH به تشکیل باریت در شکاف و شکستگی‌ها منجر شده است (شکل ۴-C و D).

بر اثر عملکرد سیالات جوی در شکاف و شکستگی‌های ایجاد شده تحت تأثیر تنش‌های زمین‌ساختی در سنگ، شرایط مناسب برای اکسایش کانه‌های سولفیدی و اکسیدی به جود آمده و هیدروکسیدهای آهن شامل گوتیت و لیمونیت به صورت توده‌ای و رگه-رگچه‌ای تشکیل شده است (شکل ۴-A و B). کانی‌سازی غیر فلزی در کانسار احمدآباد شامل باریت، کلسیت و کوارتز



شکل ۴. A: رگچه‌های گوتیت در واحد گرانیتی، B: ساخت توده‌ای گوتیت و لیمونیت، C: رگچه‌های کانی‌سازی شده هماتیت و پیریت همراه با رگچه‌های باریت در واحد میزبان مونزودیوریتی و D: کانی‌سازی هماتیت در فضای بین بلورهای باریت سوزنی شکل در منطقه احمدآباد

Fig. 4. A: Goethite veinlet in granite host rock, B: goethite and limonite with massive structure, C: mineralized veinlets of hematite and pyrite in association with barite veinlet in monzodiorite host rock, and D: hematite mineralization between needle-shaped barite in Ahmadabad area

کانسار احمدآباد قابل مشاهده است (شکل ۵- C و D). دگرسانی‌های کربناتی، سریستی، پروپلیتیکی و اکسید آهن در مقادیر کم در کانسار رخ داده است.

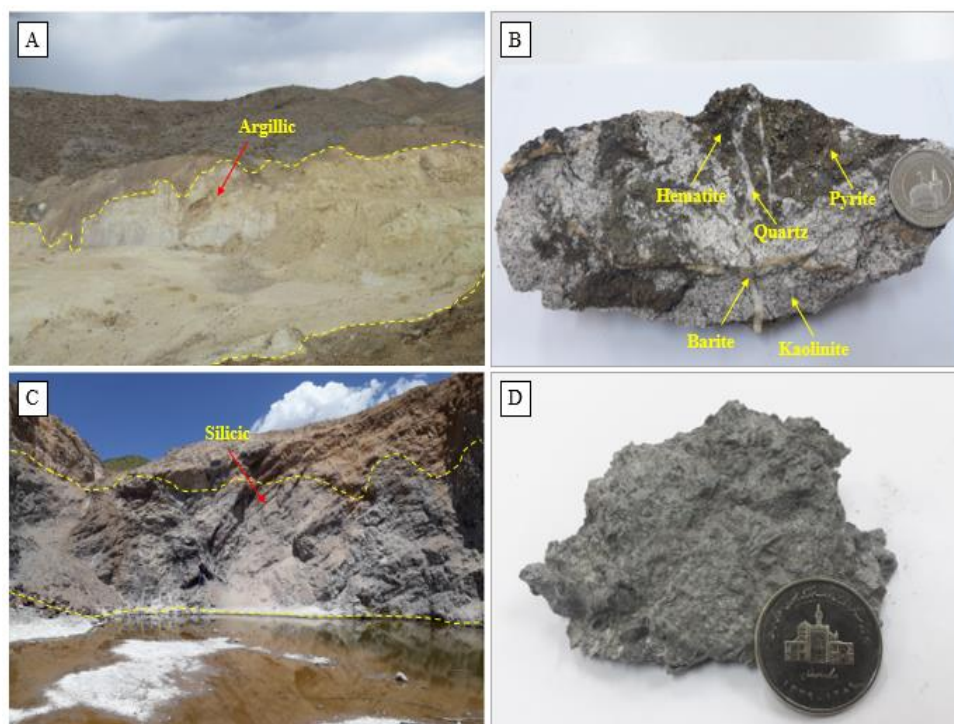
کانی‌شناسی و توالی همیافتی

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، هماتیت‌های اسپیکولاریتی به شکل بلورهای تیغه‌ای یا سوزنی شکل شعاعی ریز و درشت، با ابعاد ۱۰۰ تا ۴۰۰ میکرون و نیز به صورت پراکنده پیرامون بلورهای پیریت نسل اول (Py1) و کالکوپیریت قابل مشاهده است (شکل ۶- A و B). پیریت در این کانسار به صورت پیریت‌های نسل اول (Py1)، در مقاطع به صورت خودشکل و پراکنده در متن کانسنک

مجموعه دگرسانی‌های همراه با کانسار شواهدی از عملکرد فرایندهای گرمایی در حین تشکیل کانسنک است و ترکیب کانی‌های دگرسانی توسط شیمی سنگ میزبان، ترکیب شیمیایی سیال، شرایط دما و فشار سیال کانه‌ساز کنترل شده است. حضور گسترده کائولینیت در بخش‌های سطحی کانسار، شاخص دگرسانی آرژیلیک در کانسار احمدآباد است. این دگرسانی در داخل توده‌های مونزودیتی و مونزودیوریتی و همچنین در نهشته‌های آندزیتی، از دگرسان‌شدن بلورهای فلدسپار این سنگ‌ها طی واکنش با سیال گرمایی همراه با کانی‌سازی پیریت و هماتیت و رگه‌های کوارتز و باریت تشکیل شده است (شکل ۵- A و B). سیلیسی شدن در واحد مونزودیوریتی در سینه کار اصلی معدن در

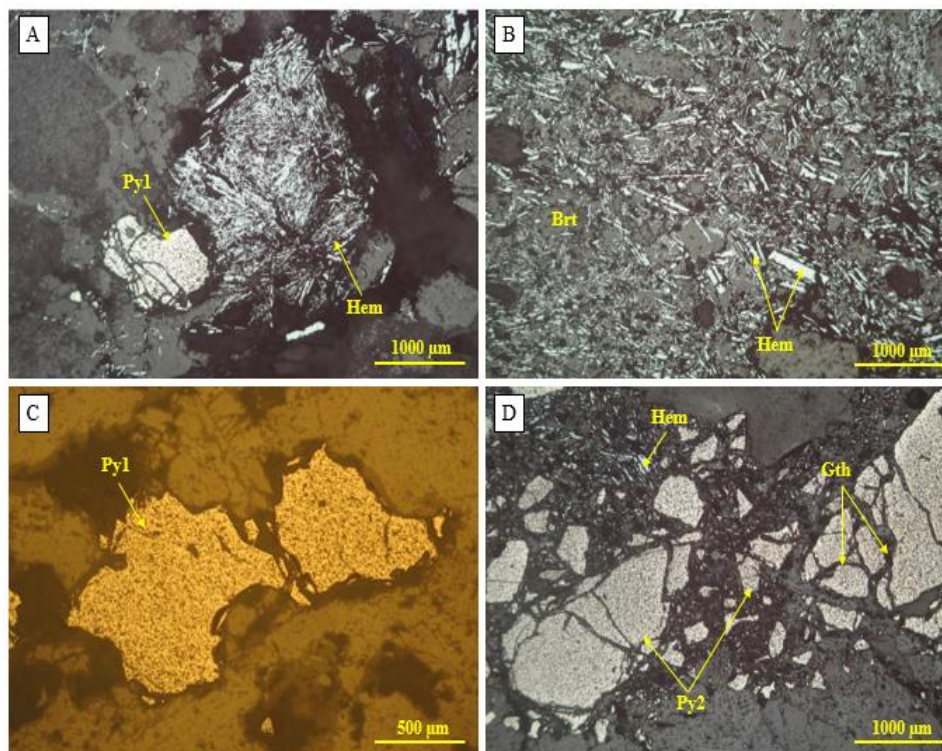
سولفیدی مقدم بر اکسیدی است. به نظر می‌رسد طی فرایند کانه‌زایی به طور مقطعی با افزایش غلظت یون مس و به دلیل حضور یون آهن و فوگاسیته گوگرد، کانی کالکوپیریت به طور جزئی به همراه پیریت تشکیل شده است. گوتیت به صورت جانیشینی در پیریت قابل مشاهده است (شکل ۷-۷-C). باریت به عنوان کانی غیرفلزی اقتصادی و باطله کانسار در مقاطع میکروسکوپی، به صورت بلورهای سوزنی شکل و طویل قابل مشاهده است (شکل ۷-۷-D). در بررسی‌های میکروسکوپی تنها یک ذره طلا به طول ۲۰۰ میکرون و نیمه گرد شده در فاز میزبان مونزونیتی شناسایی شد. با توجه به حضور رگچه‌های پیریت و کالکوپیریت احتمالاً ذرات طلا همراه این رگچه‌ها هستند که برای شناخت بهتر باید بررسی‌های الکترون مایکروپروب انجام شود (شکل ۸).

در بخش‌های عمیق کانسار و سنگ‌های میزبان کانه‌زایی و نیز به صورت پیریت‌های نسل دوم (Py2) در زون‌های برشی که تحت تأثیر تنش‌های زمین‌ساختی خرد و برشی شده‌اند، قابل مشاهده است که فضای بین آنها را بلورهای هماتیت پر کرده است (شکل ۶-C و D). در کانسار احمدآباد در بخش‌های به شدت خرد شده (برشی) و در مجاور گسل‌ها مقدار پیریت بیشتر است. در بخش‌های سطحی به دلیل شدت اکسایش، پیریت به گوتیت تبدیل شده و در بخش‌های عمیق کانسار پیریت سالم و بدون دگرسانی است. کالکوپیریت از فازهای سولفیدی فرعی در کانسار احمدآباد است که در مقادیر اندکی همراه با پیریت نسل اول (Py1) دیده می‌شود (شکل ۷-A و B). با توجه به اینکه پیریت و کالکوپیریت توسط هماتیت در بر گرفته شده و فضای بین بلورهای سولفیدی نیز توسط هماتیت پر شده، می‌توان گفت که کانی‌سازی



شکل ۵. A و B: دگرسانی‌های آرژیلیکی و سیلیسی، C: کائولینیت همراه با کانی‌سازی هماتیت، پیریت و رگچه‌های باریت و کوآرتز و D: دگرسانی سیلیسی شدن در واحد مونزودیوریتی در منطقه احمدآباد

Fig. 5. A and B: Argillic and silicic alteration, C: kaolinite in association with hematite, pyrite, barite and quartz veinlets, and D: silicic alteration in monzodiorite rock in Ahmadabad area

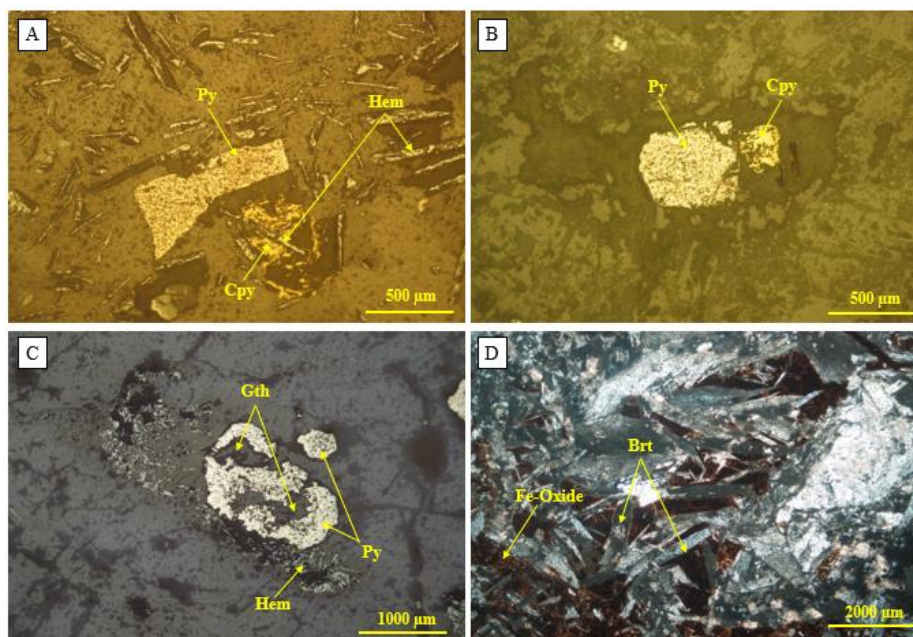


شکل ۶. A: بلورهای سوزنی‌شکل و شعاعی هماتیت (اسپیکولاریت) همراه با پیریت نسل اول (Py1)، B: بلورهای سوزنی هماتیت به صورت پراکنده درون گانگ باریت، C: پیریت‌های خودشکل نسل اول (Py1) و D: حضور پیریت‌های برشی و نسل دوم (Py2) در زون گسلی به همراه هماتیت در منطقه احمدآباد. علائم اختصاصی از ویتنی و اونز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (همه تصاویر در نور PPL گرفته شده، به جز تصویر C که در نور XPL است) (Hem: هماتیت، Py: پیریت، Gth: گوتیت و Brt: باریت).

Fig. 6. A: Hematite (specularite) needle and radial shape crystals associated with the first pyrite generation (Py1), B: scattered hematite needle (specularite) in barite, C: first generation euhedral pyrite (Py1), and D: breccia type and second pyrite generation (Py2) in fault zone associated with hematite in Ahmadabad area. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (All photomicrographs are in PPL except C which is in XPL light) (Hem: Hematite, Py: Pyrite, Gth: Goethite and Brt: Barite).

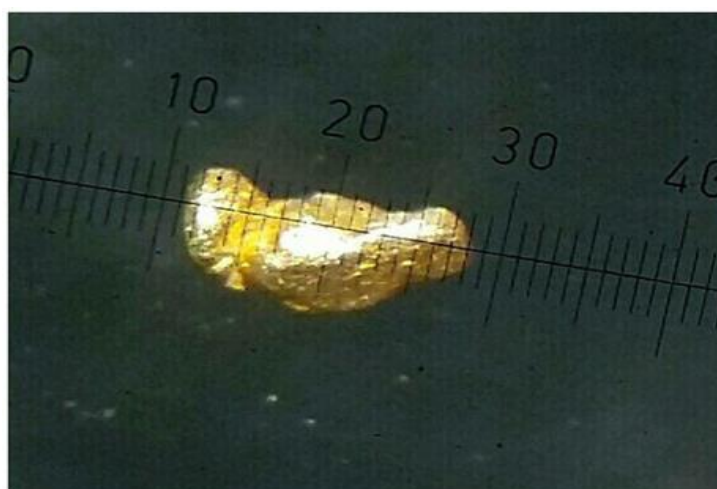
مرحله، باریت به عنوان کانی سولفاتی و باطله اصلی و در مرز بین کانی‌های سولفیدی و اکسیدی تشکیل شده است. کوارتز طی سیلیسی شدن اولیه در کانسار و نیز به صورت کوارتز-کلسیت فاز تأخیری در اواخر مرحله هیپوژن رخ داده است. هماتیت فاز اصلی اکسیدی بوده که بعد از تشکیل فازهای سولفیدی و سولفاتی نه‌نشست پیدا کرده است. بر اساس بررسی‌های بافتی مقاطع صیقلی، مشاهده شده که از نظر زمانی، پیریت‌ها زودتر ایجاد شده و سپس با تغییر pH و Eh و همچنین کاهش دما، هماتیت تشکیل شده است.

بررسی‌های کانی‌شناسی و زون‌های کانی‌سازی شده نشان داد که کانی‌سازی در این کانسار به صورت اپی‌ژنتیک و در ارتباط با ساختارهای زمین‌ساختی منطقه است. توالی همیافتی در کانسار احمدآباد را می‌توان به دو مرحله کانه‌زایی: الف) مرحله هیپوژن و ب) مرحله سوپرژن تقسیم کرد که این توالی در شکل ۹ نشان داده شده است. در مرحله هیپوژن، اغلب کانی‌های سولفیدی پیریت (به صورت پیریت‌های خودشکل نسل اول و پیریت‌های برشی نسل دوم) و کالکوپیریت در ابتدای این مرحله تشکیل شده‌اند. در این



شکل ۷. A: بلورهای سوزنی‌شکل هماتیت به همراه بلور خودشکل پیریت نسل اول و کالکوپیریت، B: پیریت خودشکل نسل اول همراه با کالکوپیریت، C: جانشینی پیریت توسط گوتیت و D: بلورهای سوزنی‌شکل باریت همراه با اکسیدهای آهن در منطقه احمدآباد (تصاویر نور عبوری). علائم اختصاری از ویتنی و اونز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (همه تصاویر در نور XPL گرفته شده، به جز تصویر C که در نور PPL است) (Hem: هماتیت، Py: پیریت، Cpy: کالکوپیریت، Gth: گوتیت و Brt: باریت).

Fig. 7. A: Needle-shaped hematite crystals associated with the first generation euhedral pyrite and chalcopyrite, B: first generation euhedral pyrite (Py1) associated with chalcopyrite, C: pyrite replacement by goethite, and D: needle-shaped barite crystals associated with Fe hydroxides in Ahmadabad area (taken in transmitted light). Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (All photomicrographs are in XPL except C which is in PPL light) (Hem: Hematite, Py: Pyrite, Cpy: Chalcopyrite, Gth: Goethite and Brt: Barite).



شکل ۸. ذره طلای نیمه گرد کشیده به طول ۲۰۰ میکرون در نمونه AH-30 در منطقه احمدآباد

Fig. 8. 200 microns elongated semi-rounded gold particle in AH-30 sample in the Ahmadabad area

تأخیری نبوده و با کانی‌های هیپوژن تشکیل شده است و فضای بین بلورهای باریت سوزنی با هماتیت پر شده است (شکل ۷-D). دگرسانی‌های گسترده آرژیلیکی (کائولینیتی شدن)، سیلیسی شدن و نیز سریسیتی و پروپیلیتیکی ناشی از عملکرد سیالات گرمابی در کانسار احمدآباد طی مرحله هیپوژن و در مراحل ابتدایی کانه‌زایی رخ داده است. در مرحله سوپرژن، کانسار تحت تأثیر فرایندهای تأخیری قرار گرفته و کانی‌هایی که تشکیل شده‌اند، اغلب ثانویه هستند. اکسایش در این مرحله به خاطر عملکرد شدید سیالات گرمابی و جوی زیاد بوده است. عملکرد گسل‌ها و شکستگی‌ها در انتقال سیال‌های کانه‌ساز بسیار مهم است. در اثر فرایند اکسایش هماتیت در کانسار، گوتیت و لیمونیت در محل گسل‌ها و شکستگی‌ها در بخش‌های سطحی تشکیل شده است.

با توجه به وجود زون برشی در منطقه و با در نظر گرفتن اینکه چنین مناطقی محلی مناسب برای نشست و نفوذ آب‌های جوی غنی از اکسیژن هستند، می‌توان بیان کرد که کاهش ناگهانی دما و احتمالاً فشار در اثر رسیدن سیال کانه‌ساز به مناطق کم‌عمق و برشی شده و اختلاط با آب‌های جوی و زیرزمینی اکسیدان که با کاهش اسیدیته سیال و قابلیت انحلال کمپلکس‌های آهن همراه است، باعث تغییرات زمین‌شیمیایی محلول کانه‌ساز از احیا به اکسیدان و نهشته شدن ترکیبات آهن‌دار به صورت اکسیدی (هماتیت) شده است. سازوکار بیان شده یکی از عوامل اصلی نهشته شدن ترکیبات آهن‌دار محسوب می‌شود (Monteiro et al., 2008). بنابراین، بر اساس این پژوهش و شواهد بافت و ساخت در منطقه احمدآباد، نهشت پیریت، کالکوپیریت و باریت رخ داده که هماتیت بعد از آنها در فضای بین این کانی‌ها تشکیل شده است. نهشت باریت

Minerals	Time	Hypogene Stage	Supergene Stage
Pyrite (Py1)		—	
Pyrite (Py2)		—	
Hematite			—
Chalcopyrite		—	
Goethite			—
Limonite			—
Barite		—	
Quartz		—	
Calcite			—
Gold		—	
Argillic		—	
Silicification		—	
Propylitization			—
Sericitization			—
Carbonitization		—	
Iron-Oxide alteration			—

شکل ۹. توالی همیافتی در کانسار احمدآباد

Fig. 9. Paragenetic sequence in Ahmadabad ore deposit

زمین‌شیمی

شرایط فیزیکوشیمیایی سیال و نوع سنگ میزبان در افزایش یا کاهش عیار آهن تأثیر داشته است. مقدار میانگین Fe در سنگ آهن عیار متوسط، ۴۷ درصد است. بررسی‌های زمین‌شیمیایی روی کانسنگ آهن احمدآباد نشان می‌دهد که مقدار FeOt در نمونه‌های برداشت‌شده برای تجزیه شیمیایی از ۱۳/۸۰ تا ۴۷/۰۶ درصد تغییر می‌کند (جدول ۱).

از داده‌های زمین‌شیمی و بررسی عناصر اصلی و کیمیا و نتایج آنها، برای پی‌بردن به نحوه تشکیل کانسارها استفاده می‌شود. بر اساس ترکیب شیمیایی سنگ آهن، کانسار احمدآباد به دو نوع عیار: ۱) کانسنگ اکسیدی (هماتیتی) عیار متوسط ($30\% < \text{FeOt} < 60\%$) و ۲) کانی‌سازی کم‌عیار ($\text{FeOt} < 30\%$) در گرانودیوریت-گرانیت‌ها قابل تقسیم است و به نظر می‌رسد

جدول ۱. نتایج اکسیدهای اصلی و فرعی به دست آمده از تجزیه XRF، ICP-MS در کانسار احمدآباد

Table 1. Results of major and trace elements analyzed by XRF and ICP-MS in Ahmadabad ore deposit

Sample no.	96AH48 Andesite	96AH47 Basaltic andesite	96AH44 Basaltic andesite	96AH30 Monzo-diorite	AA-3 Monzo-nite	AH19 Monzo-nite	AH14 Trachy-andesite	AH12 Monzo-diorite	AH3 Andesite	AA-26 Iron Ore
SiO ₂ Wt. %	47.82	41.80	42.90	48.60	49.15	49.90	46.80	48.70	47.20	30.26
TiO ₂	0.65	0.20	0.46	0.58	0.49	0.22	0.37	0.10	0.14	0.12
Al ₂ O ₃	12.03	7.13	3.25	9.85	13.01	12.58	8.30	3.37	5.24	5.22
FeOt	15.04	29.35	14.53	26.12	14.08	13.80	17.69	24.21	14.59	47.06
MnO	0.18	0.14	0.23	0.13	0.07	0.15	0.19	0.56	0.16	0.20
MgO	18.25	3.45	0.92	3.26	0.07	14.20	2.55	9.16	26.37	3.32
CaO	0.85	4.01	3.90	3.03	2.90	1.56	2.95	3.80	3.05	5.30
Na ₂ O	1.67	2.38	1.85	3.50	6.97	3.25	5.30	0.26	0.17	0.93
K ₂ O	0.50	0.09	0.55	0.97	0.11	0.06	0.13	0.12	0.12	0.10
P ₂ O ₅	0.19	0.11	1.21	0.21	0.27	0.17	0.17	0.04	0.03	0.25
CuO	0.0050	0.0020	0.1000	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0800	0.0100	0.0009
SO ₃	0.94	4.71	26.12	0.29	11.08	1.57	11.88	4.04	0.02	0.79
LOI	3.40	5.20	3.27	4.40	3.80	3.80	3.20	5.41	3.90	4.90
Total	101.52	98.57	101.29	100.94	102	101.26	99.53	99.85	101	99.26
Cu (ppm)	43	19	851	12	13	13	11	667	107	7.77
S	0.38%	1.89%	10.46%	0.12%	4.53%	0.63%	4.76%	1.22%	0.01%	0.32%
Ag	0.1	1.8	0.1	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0
Mo	3.40	67.00	16.50	3.50	5.12	6.90	11.70	0.80	0.10	4.76
V	136	67	189	148	23	89	58	117	88	80
Sn	0.1	0.1	0.1	0.2	0	0.1	0.1	0.1	0.3	0
Zn	468	34	22	46	4	4	10	50	93	8
Pb	314	29	8	7	12	1	2	1	1	4
Ba	5502	1409	112	2963	0	33	210	3317	20	308
Sr	267	127	139	259	62	82	196	174	111	460
Ni	11	28	147	45	44	33	10	15	1197	5
Co	21	33	280	68	0	112	88	28	63	35
As	19	78	78	14	20	8	7	3	4	4
Bi	0.10	0.10	0.20	0.10	0.62	0.10	0.10	0.10	0.10	0.32
Zr	38	62	59	81	93	48	43	22	16	14
Th	2.40	5.60	7.10	3.60	11.89	4.20	1.80	2.00	0.70	0.64

نمونه‌ها مقدار SiO_2 کاهش می‌یابد (شکل ۱۰-۱). با افزایش FeOt ، مقدار CaO احتمالاً به دلیل دگرسانی کربناتی همراه با کانی‌سازی افزایش می‌یابد (شکل ۱۰-۲). FeOt با MgO دارای ضریب همبستگی مثبت بوده که حضور کانی‌های فرومیزین همراه کانسنگ، دلیلی بر این همبستگی است (شکل ۱۰-۳). FeOt با Al_2O_3 ، P_2O_5 و TiO_2 دارای همبستگی منفی و با K_2O دارای همبستگی مثبت است (شکل ۱۰-۴ و ۱۰-۵). همبستگی مثبت آهن و مس با حضور کالکوپیریت در کانسار تطابق داشته و این همبستگی ناشی از حضور آنها در کانی‌های اکسیدی و سولفیدی سنگ‌های میزبان منطقه است. آرسنیک با مولیبدن و کادمیوم همبستگی مثبت دارد. حضور این عناصر در محیط‌های قلیایی نشان‌دهنده حمل این عناصر توسط سیالات گرمایی با ماهیت قلیایی است که با توجه به وجود رگه‌های سیلیسی در منطقه، می‌توان گفت که این عناصر طی تغییر ماهیت سیالات گرمایی در تماس با سنگ‌های منطقه، درون رگه‌های سیلیسی ته‌نشین شده‌اند.

تغییرات مقدار آهن، حتی در فاصله‌های کوتاه در نهشته‌های معدنی، نشان‌دهنده پیدایش اکسیدهای آهن از طریق پر کردن فضاهای خالی در سنگ‌های میزبان منطقه است. این پدیده پیامد رخداد درزه و شکستگی و برشی شدن با ابعاد گوناگون در سنگ میزبان است (Ohmoto and Goldhaber, 1997). وضعیت توزیع و پراکندگی عناصر مختلف در واحدهای سنگی یک کانسار و بررسی ارتباط و وابستگی این عناصر با یکدیگر از مهم‌ترین موارد در بررسی‌های زمین‌شیمیایی برای تشخیص فرایندهای مؤثر در تشکیل کانسار است (Barnes, 1979). در منطقه احمدآباد، برای بررسی ارتباط بین عناصر در نمونه‌های کانسنگ آهن، ماتریس همبستگی عناصر به روش اسپیرمن محاسبه و نمودارهای همبستگی دوتایی برای آنها ترسیم شد (جدول ۲ و شکل ۱۰).

مقایسه همبستگی‌ها نشان می‌دهد که FeOt با SiO_2 دارای ضریب همبستگی به شدت منفی است و با افزایش مقدار FeOt در

جدول ۲. ماتریس همبستگی اسپیرمن بر اساس نتایج تجزیه نمونه‌های زمین‌شیمیایی در کانسار احمدآباد

Table 2. Spearman correlation matrix based on geochemical analysis results in Ahmadabad ore deposit

	SiO_2	Al_2O_3	FeOt	MgO	CaO	P_2O_5	TiO_2	Cu	As	Co
SiO_2	1									
Al_2O_3	0.46	1								
FeOt	-1	-0.46	1							
MgO	0.43	0.20	0.43	1						
CaO	-0.29	0.07	0.29	0.51	1					
P_2O_5	-0.01	0.08	-0.09	-0.32	0.05	1				
TiO_2	0.55	0.85	-0.55	-0.56	-0.17	0.45	1			
Cu	0.06	0.17	0.07	0.17	0.41	-0.27	0.03	1		
As	0.024	0.39	-0.024	-0.707	-0.183	0.468	0.652	0.11	1	
Co	0.261	0.261	0.261	0.261	0.261	0.261	0.261	0.261	-0.261	1
Bi	-0.261	0.097	0.261	0.097	0.395	0.396	0.052	0.157	0.053	0.112
Mo	-0.274	0.109	0.274	-0.371	0.176	0.32	0.17	0.77	0.642	0.407
Ag	-0.683	-0.493	0.683	-0.121	-0.182	0.035	-0.415	0.398	0.187	-0.355
Sn	0.515	0.321	-0.515	0.157	-0.127	-0.396	0.231	0.231	0.023	0.216
S	-0.43	-0.139	0.43	-0.091	0.321	0.267	-0.067	0.103	0.372	0.236
Zn	0.2	0.503	-0.2	0.152	-0.079	-0.419	0.297	0.515	-0.03	-0.564
Ba	-0.03	0.188	0.03	-0.261	-0.103	0.043	0.237	0.042	0.177	-0.745
Pb	-0.129	0.546	0.129	-0.522	-0.129	0.351	0.644	0.092	0.784	-0.337
Cd	0.27	0.607	-0.27	-0.09	0.434	-0.008	0.479	0.742	0.422	0.36

ادامه جدول ۲. ماتریس همبستگی اسپیرمن بر اساس نتایج تجزیه نمونه‌های زمین‌شیمیایی در کانسار احمدآباد

Table 2 (Continued). Spearman correlation matrix based on geochemical analysis results in Ahmadabad ore deposit

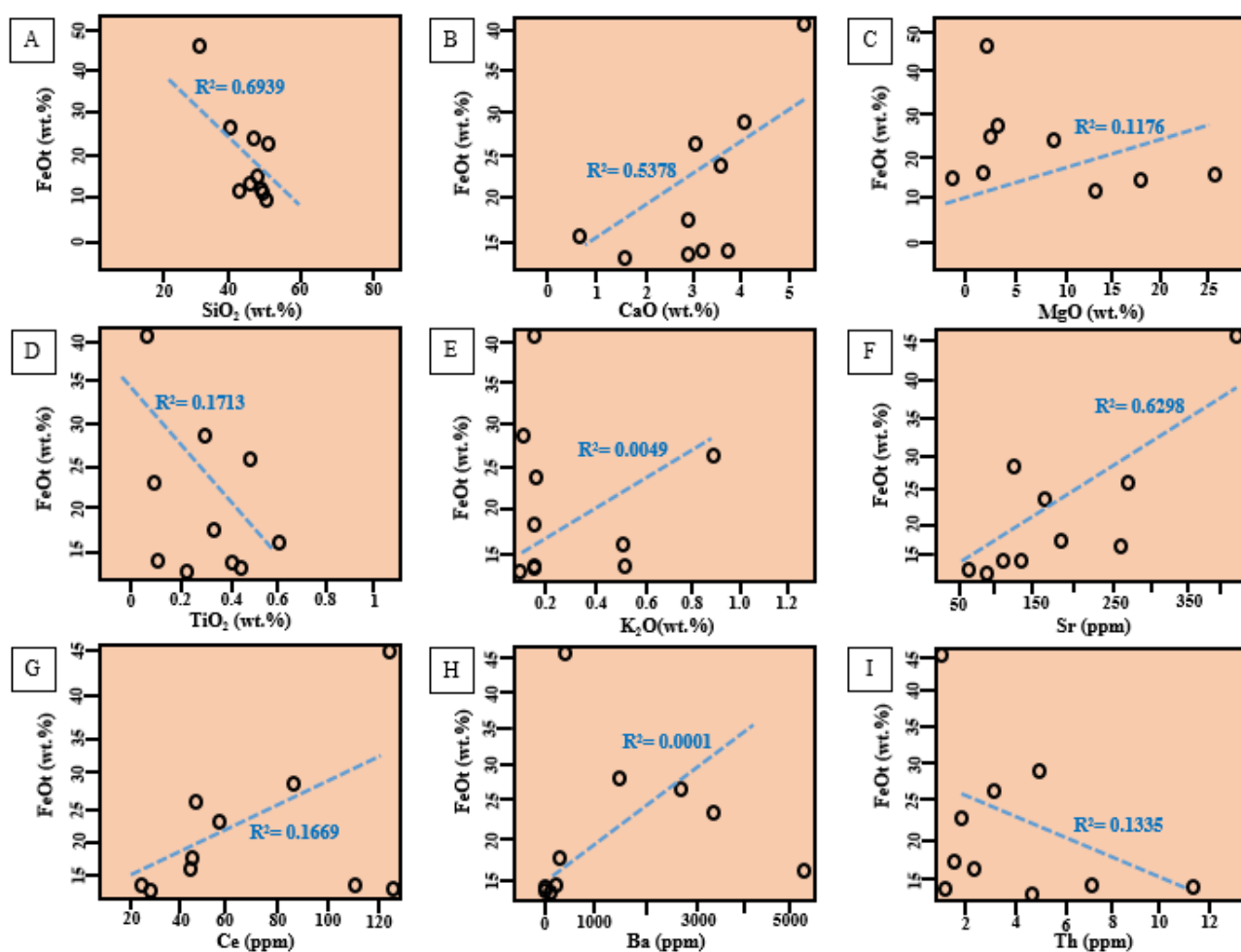
	Bi	Mo	Ag	Sn	S	Zn	Ba	Pb	Cd
Bi	1								
Mo	0.26	1							
Ag	0.16	0.39	1						
Sn	0.50	-0.39	-0.49	1					
S	-0.15	0.65	0.12	-0.39	1				
Zn	-0.12	-0.57	-0.32	0.50	-0.4	1			
Ba	-0.14	-0.18	0.10	-0.15	0.43	0.40	1		
Pb	0.27	0.40	0.29	-0.20	0.09	0.70	0.50	1	
Cd	0.32	0.33	-0.49	0.24	0.15	0.20	-0.10	0.30	1

کانی‌های پتاسیم‌دار مانند بیوتیت، مسکویت و آلکالی‌فلدسپار تجمع می‌یابد (Mason and Moore, 1982). عناصر نادر خاکی جزو عناصر با کمترین قابلیت انحلال بوده و در طول فرایندهای هوازدگی، دگرگونی درجه پایین و دگرسانی گرمایی غیرمتحرک هستند. در سامانه‌های گرمایی عوامل دما، pH، فوگاسیته اکسیژن و گونه لیگاند‌های تمرکز دهنده REE در مهاجرت و تمرکز REE نقش دارند. تغییرات در این عوامل نه تنها باعث تمرکز آن در سیال‌های گرمایی، بلکه باعث پایداری کانی‌های حاوی این عناصر نیز می‌شود (Rolland et al., 2007). عناصر نادر خاکی با انحلال‌پذیری ناچیز طی دگرگونی درجه پایین، هوازدگی و دگرسانی گرمایی نسبتاً نامتحرک هستند (Rollinson, 1993)، به جز در شرایطی که نسبت سیال به سنگ بسیار بالا باشد (Michard, 1989). تقریباً تمام عناصر اصلی و بسیاری از عناصر جزئی و حتی REE، طی فرایندهای گرمایی ناشی از چرخش سیال و همچنین طی میلوئیتی شدن، متحرک می‌شوند (Alderton et al., 1980; Palacios et al., 1986; Dickin, 1988; Selverstone et al., 1991). به عقیده فرکوس و لمی‌بانس (Ferkous and Lebank, 1995)، غنی‌شدگی از LREE در نمونه‌های دارای سولفید فراوان، نشان‌دهنده دگرسانی گرمایی است که بر روی سنگ‌های زون‌های برشی تأثیر داشته و موجب تجمع عناصر فرار و متحرک LREE شده است. غنی‌شدگی و روند ملایم در مقادیر LREE به سمت HREE در نمونه‌های

آهن با بیسموت، کبالت و مولیبدن همبستگی مثبت و با گوگرد همبستگی منفی نشان می‌دهد. هوازدگی و اکسایش باعث خروج گوگرد از ساختمان کانی‌ها و کاهش میزان گوگرد شده است که مرتبط با تبدیل کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در مناطق سطحی است. در نمونه‌های عیار بالا مقدار MgO و Al_2O_3 کاهش یافته است. حضور کانی‌های کلریت و بیوتیت در نمونه‌ها می‌تواند عامل افزایش MgO و نیز حضور سریسیت، کلریت و اپیدوت عامل افزایش Al_2O_3 باشد. همبستگی مثبت بین عناصر Ba و S، تأییدی بر کانی‌سازی باریت در منطقه است. کانسار احمدآباد از نوع ذخایر با مقادیر پایین TiO_2 است و مقدار آن در نمونه‌ها ۰/۱ تا ۰/۶۵ درصد متغیر است و میانگین آن در نمونه‌ها ۰/۳۳ درصد است. برای بررسی زمین‌شیمی عناصر اصلی و کمیاب در نمونه‌های کانسنگ آهن احمدآباد از نمودارهای ضریب همبستگی دوتایی استفاده شد (شکل ۱۰). مقدار میانگین Cu اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها از ۷/۷۷ تا ۸۵۱ گرم بر تن گزارش شده است. رخداد عنصر Cu در این کانسار مربوط به حضور کانی کالکوپیریت به مقدار کم در نمونه‌هاست. توجه به نمودارهای عناصر کمیاب در مقابل FeOt در نمونه‌های کانسنگ آهن نشان از آن دارد که عناصر Ce، Sr و Ba همراه با افزایش مقادیر FeOt روند صعودی دارند (شکل ۱۰-۱). در مقابل عنصر Th روند نزولی دارند (شکل ۱۰-۱). Rb از عناصری است که با پتاسیم جانشینی دارد؛ لذا همواره در

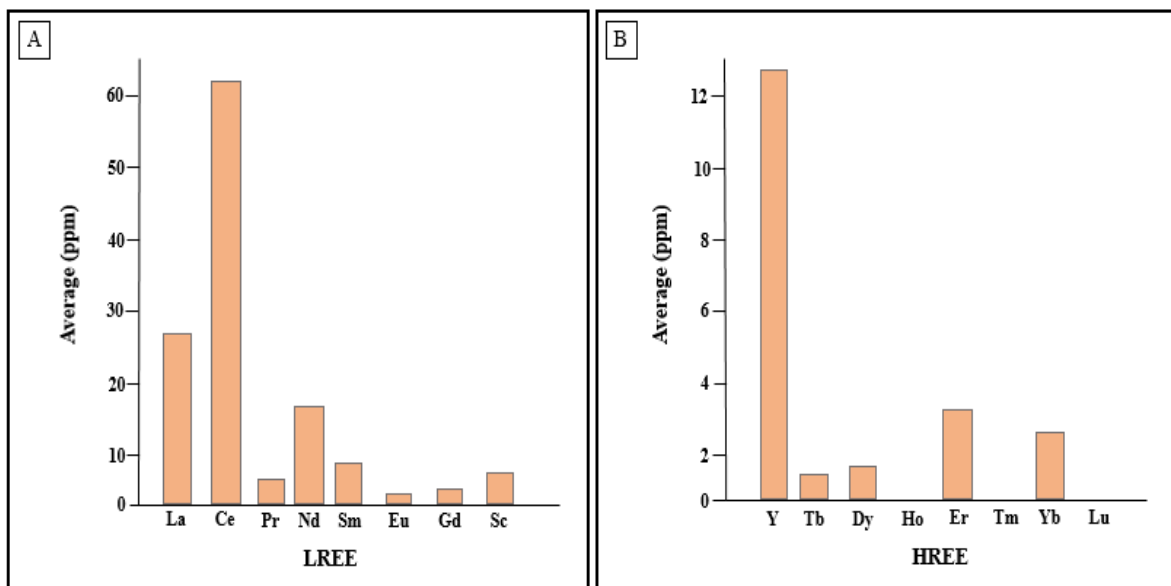
بتوان گفت که آنومالی منفی Eu از ویژگی‌های کانسارهای آهن اکسیدی است (Frietsch and Perdahl, 1995). با توجه به اینکه پلاژیوکلازها، حمل‌کننده اصلی Eu هستند، وجود آنومالی‌های مثبت و منفی Eu در نمونه‌ها، می‌تواند ناشی از تغییر در درجه تجزیه فلدسپارها و پلاژیوکلازها باشد (Kikawada, 2001). آنومالی منفی Eu، زمانی مشاهده می‌شود که فرایندهای دگرسانی به طور قابل توجهی پیشرفت کرده باشند. افزایش LREEها، احتمالاً به دلیل تحرک بالاتر و غنی‌شدگی بیشتر این عناصر در محلول‌های گرمابی است. میانگین نسبت HREE/LREE در نمونه‌ها ۰/۰۷ است (جدول ۳).

احمدآباد را می‌توان به دگرسانی و یا حجم بالای سیال به سنگ نسبت داد. بیشترین مقدار LREE ها با ۶۳/۲۸ ppm، مربوط به عنصر سریوم (Ce) و بیشینه مقدار HREE ها نیز با غلظت ppm ۱۴/۱۲ متعلق به عنصر ایتريوم (Y) است (شکل ۱۱-A و B). الگوی توزیع REE های بهنجارشده نسبت به کندریت در کانسنگ آهن احمدآباد، تقریباً توزیع منظمی را نشان می‌دهد؛ بدین معنا که با حرکت از سمت LREE به سمت HREE ها، تهی‌شدگی قابل تشخیص است (شکل ۱۲). آنومالی منفی Eu نشان‌دهنده شرایط اکسیدان حاکم بر پیدایش کانسار است (Rollinson, 1993; Jiang and Zhao, 2007). شاید



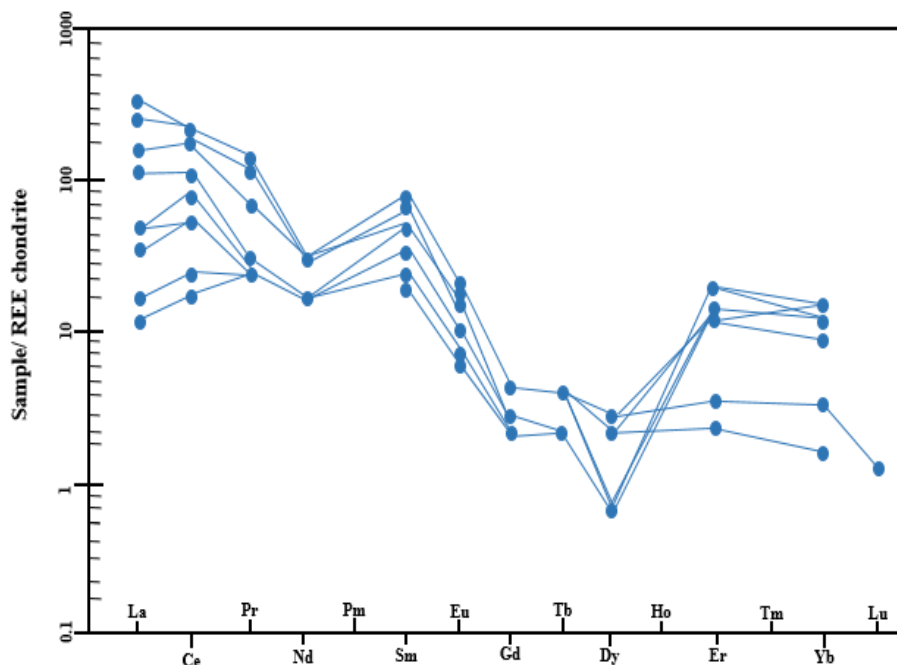
شکل ۱۰. نمودارهای همبستگی دوتایی نمونه‌های کانسنگ احمدآباد

Fig. 10. Binary correlation diagrams of Ahmadabad ore samples



شکل ۱۱. هیستوگرام مقادیر میانگین عناصر نادر خاکی در نمونه‌های کانسنگ آهن احمدآباد. A: عناصر نادر خاکی سبک و B: عناصر نادر خاکی سنگین

Fig. 11. Histograms of average REEs contents of Ahmadabad iron ore samples. A: light rare earth elements (LREEs), and B: heavy rare earth elements (HREEs)



شکل ۱۲. نمودار الگوی عناصر نادر خاکی بهنجارشده نمونه‌های کانسنگ آهن احمدآباد نسبت به کندریت (Boynton, 1984)

Fig. 12. Chondrite-normalized spider diagram of Ahmadabad iron ore samples (normalization based on Boynton, 1984)

جدول ۳. نتایج تجزیه عناصر نادر خاکی در نمونه‌های کانسنک کانسار احمدآباد تجزیه شده به روش ICP-MS در کانسار احمدآباد

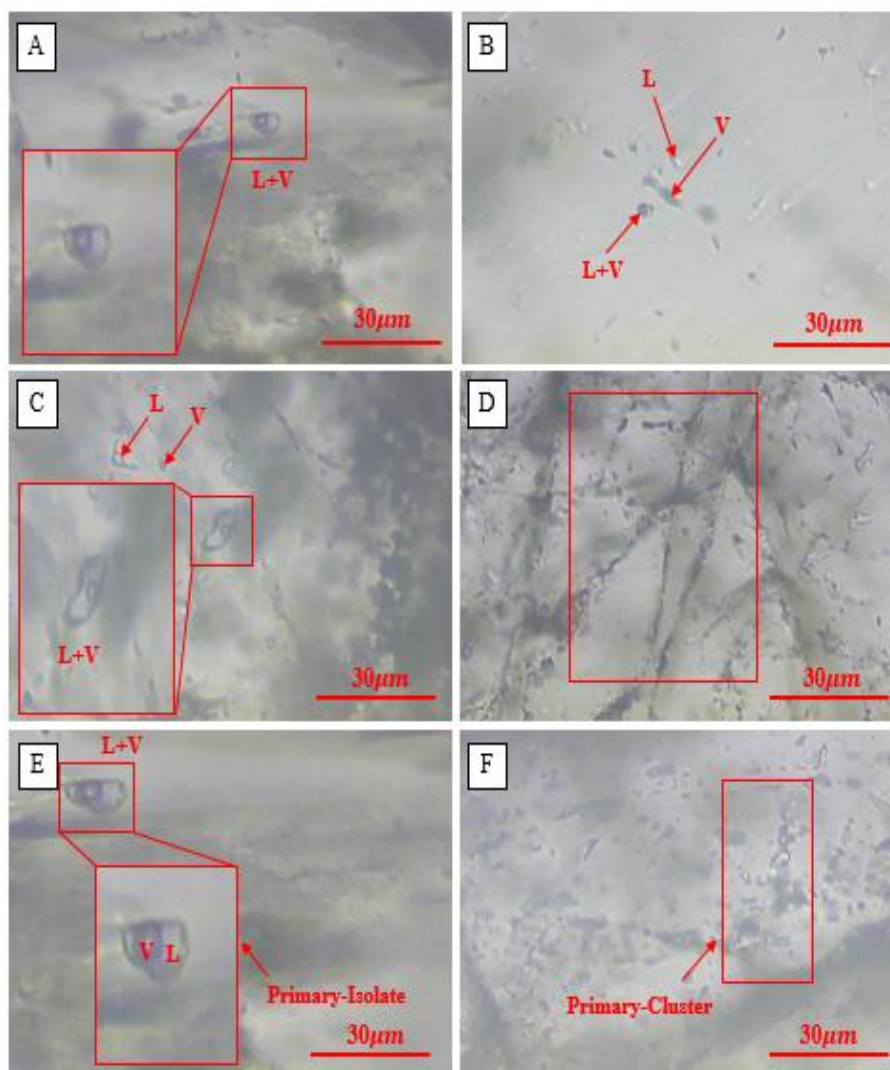
Table 3. Results of REEs in the Ahmadabad ore analyzed by ICP-MS in Ahmadabad ore deposit

Sample no.	AA-26	AH3	AH12	AH14	AH19	AA-3	96AH30	96AH44	96AH47	96AH48
Sc	7.52	12.10	14.10	4.00	2.90	4.38	7.50	5.60	5.00	9.20
La	61	4	15	11	5	77	15	45	36	15
Ce	122	22	58	43	28	125	44	112	86	42
Pr	12.64	2.80	2.70	0.70	0.10	11.11	1.80	7.90	2.70	2.60
Nd	44	1	12	8	3	41	11	27	12	12
Sm	5.06	6.50	10.70	8.10	6.40	4.38	6.20	11.50	13.20	6.30
Eu	0.91	0.50	2.60	1.20	0.70	0.53	1.20	1.80	1.00	1.30
Gd	1.96	0.10	0.20	0.10	0.10	1.81	1.00	6.40	5.60	2.40
Tb	0.15	0	0	0	0	0.11	0	0	0	0
Dy	1.54	1.40	5.30	1.10	0.20	1.61	1.30	1.70	0.20	0.10
Ho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Er	0.69	3.00	8.10	4.20	2.60	0.93	2.50	5.30	7.90	2.70
Tm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Yb	0.41	2.30	5.70	2.70	2.30	0.86	2.80	4.50	4.10	2.60
Lu	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0
Y	1	8	46	13	8	1	14	28	13	9
ΣREE	259.84	63.70	180.40	97.10	59.30	269.73	108.30	256.70	186.70	105.10
ΣLREE	245.66	36.30	98.40	70.80	42.50	258.22	78	203.40	149.90	77.90
ΣHREE	14	27	82	26	17	11	30	53	37	27
LREE/HREE	17.32	1.32	1.20	2.69	2.52	22.43	2.57	3.81	4.07	2.86
La/Ce	0.49	0.18	0.25	0.25	0.17	0.61	0.34	0.40	0.41	0.35
Eu/Sm	0.17	0.07	0.24	0.14	0.023	0.12	0.19	0.15	0.07	0.20

میان‌بارهای سیال

کانسار احمدآباد، انواع مختلفی از میان‌بارهای سیال اولیه و ثانویه مشاهده شد که با توجه به کوچک بودن و اهمیت کمتر سیالات ثانویه، از بررسی آنها صرف نظر شد (شکل ۱۳-D). برای افزایش سطح اعتماد داده‌ها، بررسی‌های بیشتر بر روی میان‌بارهای سیال اولیه با موقعیت قرارگیری منفرد و جدا^۲ و مجتمع^۳ در کانی‌های میزبان کوارتز و باریت متمرکز شد (شکل ۱۳-E و F). میان‌بارهای سیال مشاهده شده در کانی‌های کوارتز و باریت از نوع میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از مایع است. ۷۰ تا ۸۰ درصد حجم این میان‌بارها را فاز مایع تشکیل می‌دهد و همگی به فاز مایع همگن می‌شوند.

پس از بررسی پتروگرافی میان‌بارهای سیال، تعداد ۲۲ میان‌بار سیال برای اندازه‌گیری‌های میکروترموتری انتخاب شد. بر اساس رده‌بندی شفرد و همکاران (Shepherd et al., 1985) و روئدر (Roedder, 1984)، متداول‌ترین شکل‌های موجود در میان‌بارهای کوارتز و باریت بررسی شده شامل بیضوی، کروی، مثلی و بی‌شکل بوده که بیشتر آنها کروی تا بیضوی شکل هستند. اندازه میان‌بارهای سیال بررسی شده در بلور کوارتز از ۳ تا ۱۰ میکرون و در باریت از ۷ تا ۱۶ میکرون متفاوت است (شکل ۱۳-A و B و C). در نمونه‌های میان‌بارهای سیال بررسی شده در



شکل ۱۳. A و B: تصاویر میکروسکوپی از میان‌بارهای سیال کانسار احمدآباد، میان‌بارهای سیال دو فاز غنی از مایع در کوارتز، C: میان‌بار سیال دو فاز غنی از مایع در باریت، D: میان‌بارهای سیال ثانویه با روند خطی در باریت، E: میان‌بار سیال اولیه منفرد در کوارتز و F: میان‌بار سیال اولیه مجتمع در باریت

Fig. 13. A and B: Photomicrograph of Ahmadabad deposit fluid inclusion, liquid rich two-phase fluid inclusions in quartz, C: liquid rich two-phase fluid inclusions in barite, D: linear secondary fluid inclusions in barite, E: primary-isolated fluid inclusion in quartz, and F: primary cluster of fluid inclusions in barite

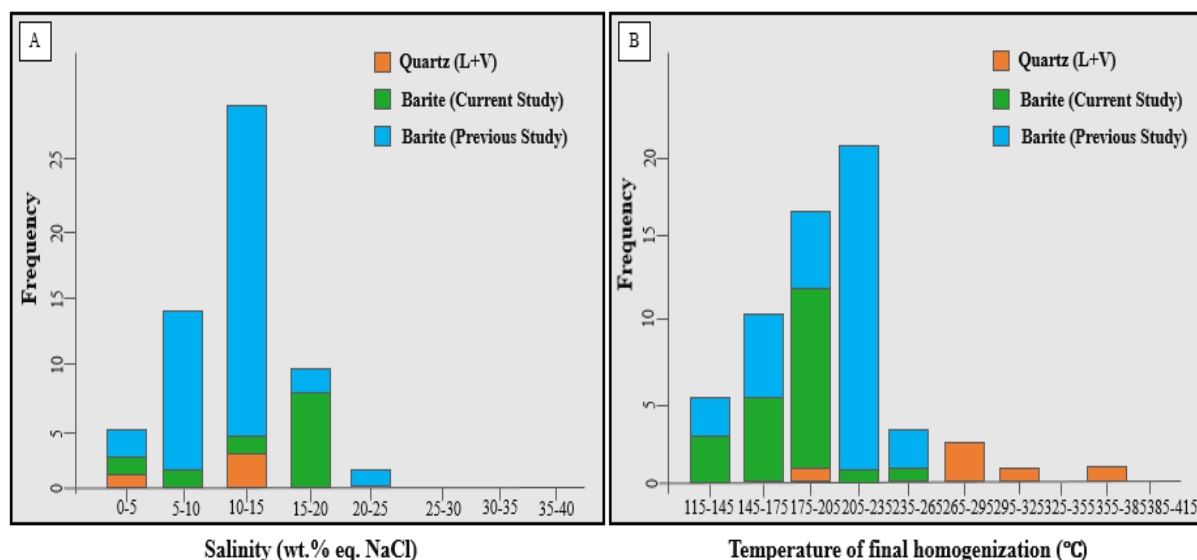
۱۹/۴۵ درصد وزنی معادل نمک طعام و در باریت‌های بررسی شده در پژوهش‌های قبلی از حاجی بابایی و گنجی (Haji Babaei and Ganji, 2018)، این مقادیر به ترتیب ۱۴۲ تا ۲۵۶ درجه سانتی‌گراد و ۳/۶۲ تا ۱۵/۱۸ درصد وزنی معادل نمک طعام گزارش شده است.

نتایج میکروترمومتری میان‌بارهای سیال در کانی کوارتز و باریت در جدول ۴ و شکل ۱۴ ارائه شده است. دمای همگن شدن و شوری برای میان‌بارهای سیال در کانی کوارتز به ترتیب برابر ۱۹۴ تا ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد و ۱/۷۴ تا ۱۳/۰۷ درصد وزنی معادل نمک طعام، در کانی باریت به ترتیب ۱۱۵ تا ۲۵۳ درجه سانتی‌گراد و ۴/۳۳ تا

جدول ۴. نتایج بررسی‌های میکروترمومتری میان‌بارهای سیال در کانی‌های کوارتز و باریت کانسار احمدآباد (n: تعداد سیال بررسی شده، $T_{m_{ice}}$: دمای ذوب نهایی یخ، Th: دمای همگن شدن سیال)

Table 4. Microthermometric results of fluid inclusions studies in quartz and barite minerals of Ahmadabad deposit (n: number of analyzed fluid inclusion, $T_{m_{ice}}$: final ice melting temperature, Th: final homogenization temperature)

Inclusion type	Host mineral	Origion	$T_{m_{ice}}$ (°C)	Thv-1 (°C)	Salinity (wt.%NaCl eq.)	Density (g/cm ³)
L+V	Quartz (n=8)	Primary	-1.0 to -9.2	194 to 370	1.74 to 13.07	0.716 to 0.960
L+V	Barite-A (n=14)	Primary	-10.0 to -16.0	115 to 253	4.33 to 19.45	0.943 to 1.070
L+V	Barite-B (n=3)	Primary	-2.7 to -15.5	142 to 256	3.62 to 15.18	0.880 to 1.00



شکل ۱۴. A: هیستوگرام مقادیر شوری میان‌بارهای سیال و B: هیستوگرام دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال در کانسار احمدآباد، داده‌های باریت بررسی شده در پژوهش‌های قبلی از حاجی بابایی و گنجی (Haji Babaei and Ganji, 2018)

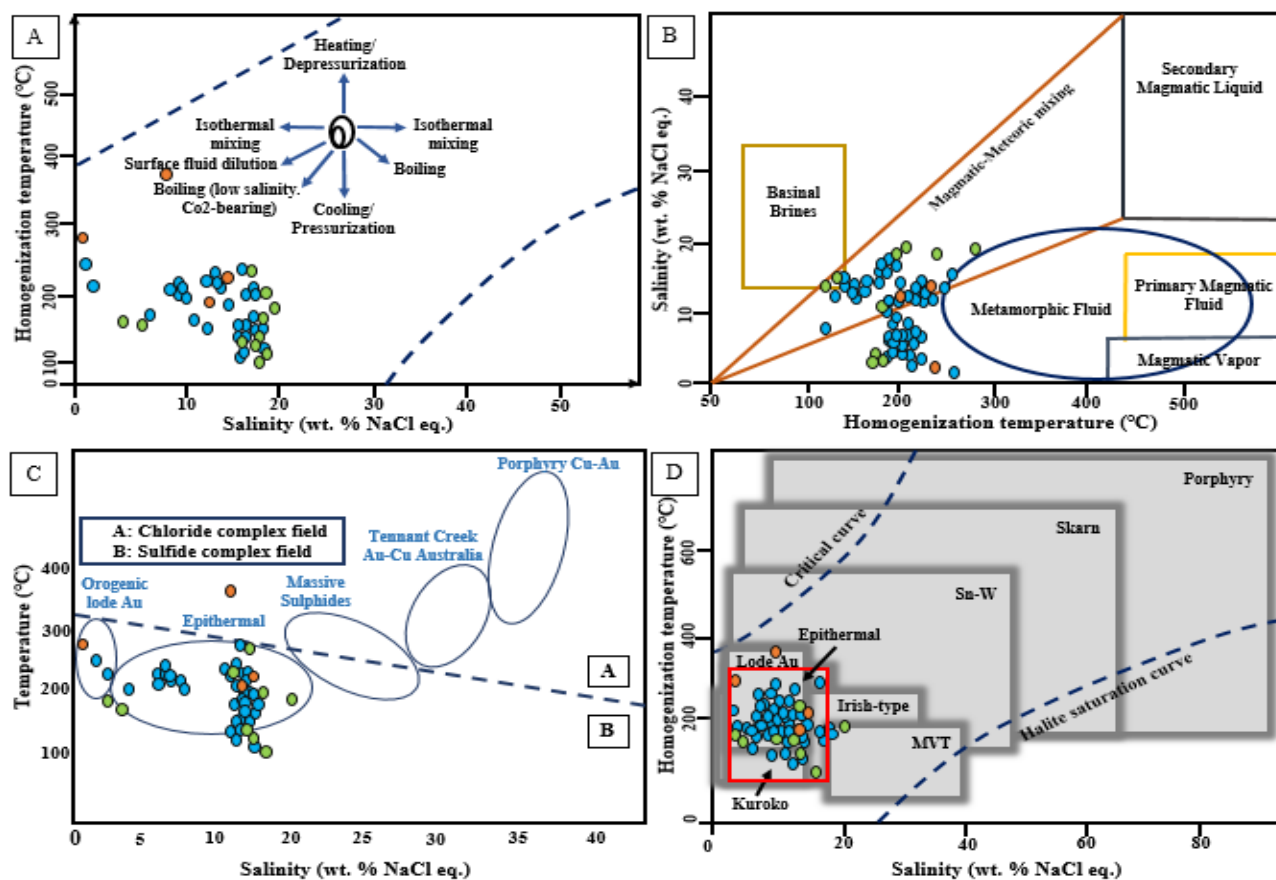
Fig. 14. A: Histogram of fluid inclusions salinity, and B: histogram of fluid inclusions homogenization temperature in Ahmadabad deposit, barite data is from previous study (Haji Babaei and Ganji, 2018)

که باعث سرد شدن و رقیق شدن سیال کانه‌ساز شده، بهترین مدل برای تشکیل کانسار احمدآباد است (Wilkinson, 2001). نقش یون‌های کمپلکس‌ساز و لیگاندها در انحلال، انتقال و ته‌نشست فلزها بسیار مهم است. بر اساس پژوهش بارنز (Barnes, 1997)، در سیال‌های گرمابی با شوری بالا و دماهای بالا، کمپلکس‌های

بر اساس نمودار شکل ۱۵-A، سازوکار اصلی نهشت ماده معدنی در کانسار احمدآباد، سرد شدن و رقیق‌شدگی با آب‌های سطحی است. بر اساس نمودار دمای همگن شدن-شوری و محدوده انواع مختلف سیالات کانه‌ساز (Bean, 1983) (شکل ۱۵-B)، مدل اختلاط آب ماگمایی گرم و شور با آب جوی سرد با شوری پایین

است، واقع شده‌اند (شکل ۱۵- C). مقایسه نتایج به دست آمده از بررسی‌های میکروترمومتری میان‌بارهای سیال در کانسار احمدآباد با نمودار ارائه شده توسط ویلکینسون (Wilkinson, 2001)، نشان می‌دهد که داده‌های میان‌بارهای سیال در محدوده کانسارهای اپی‌ترمال قرار گرفته‌اند (شکل ۱۵- D).

کلریدی و در دماهای پایین و شوری پایین، کمپلکس‌های سولفیدی فلزها پایدارترند. با توجه به اینکه نمونه‌های مورد بررسی در دو محدوده دما و شوری در نمودار لارج (Large, 1975) قرار گرفته‌اند، نمونه‌های میان‌بار سیال دو فازی با دما و شوری پایین در محدوده کمپلکس سولفیدی و تنها یک نمونه در محدوده کلریدی که مربوط به نمونه‌های میان‌بار سیال کوارتز دو فازی



شکل ۱۵. A: محدوده دما و شوری میان‌بارهای سیال در کانسار احمدآباد و فرایندهای احتمالی مؤثر در نهشت ماده معدنی (Wilkinson, 2001); B: محدوده دما و شوری میان‌بارهای سیال در کانسار احمدآباد به همراه محدوده انواع مختلف سیالات کانه‌ساز (Bean, 1983); C: دمای همگن شدن و شوری میان‌بارهای سیال برای تعیین کمپلکس‌های حمل‌کننده فلزها در محدوده احمدآباد (Large, 1975) و D: تعیین منشأ احتمالی کانسار بر اساس شوری و دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال (Wilkinson, 2001) (نمادهای استفاده شده به رنگ‌های نارنجی، سبز و آبی طبق شکل ۱۴ است).

Fig. 15. A: Homogenization temperature and salinity range of fluid inclusion in Ahmadabad deposit and possible effective processes in mineral deposition (Wilkinson, 2001), B: homogenization temperature and salinity diagram of Ahmadabad deposits, and range of different mineralizing fluids types (Bean, 1983), C: homogenization temperature and salinity of fluid inclusion and possible carrier metal complexes in Ahmadabad deposit (Large, 1975), and D: possible deposit genesis based on salinity and homogenization temperature diagram (Wilkinson, 2001) (orange, green and blue symbols used in the figure are as figure 14).

بحث

کوارتز، سربیسیت، کلریت و اپیدوت تشکیل شده‌اند. در ضمن این توده، خود نیز از میزبان‌های مهم کانه‌زایی در این کانسار است. با توجه به اینکه توده‌های نفوذی، خاستگاه اصلی کانی‌سازی آهن-مس در منطقه احمدآباد هستند، به روش U-Pb میانگین سن توده آذرین درونی مونزودیوریتی برابر با 51.76 ± 0.10 میلیون سال پیش معادل ائوسن آغازین^۴ به دست آمد (Tayefi, 2021). محدوده شوری و دمای همگن‌شدن میان‌بارهای سیال منطقه احمدآباد نشان می‌دهد که دو سیال دما-شوری بالا با سیالی با دما-شوری پایین آمیخته شده و کاهش دما و شوری و به دنبال آن رقیق‌شدگی، شرایط را برای ته‌نشست اکسید آهن و مس فراهم کرده است. فرایند اختلاط سیالات ماگمایی و جوی، باعث تغییرات pH و Eh محیط و در نتیجه ته‌نشینی فلزها می‌شود. بیشتر کانسارهای گرمابی در سنگ‌های آتشفشانی با توده‌های آذرین در ارتباط هستند (Hitzman et al., 1992; Hitzman, 2000; Williams et al., 2005; Groves et al., 2010). ماگماتیسم نقشی مهم در ایجاد موتور حرارت، چرخش سیالات و توسعه سامانه گرمابی دارد (Hart et al., 2004; Pollard, 2006; Groves and Berlin, 2007). کانسارهای گرمابی معمولاً در عمق کم تشکیل شده و تفریق ماگمایی باعث افزایش تمرکز سیالات در بخش بالایی توده‌های نفوذی و تزریق آنها به داخل سنگ‌های درون‌گیر و در نهایت دگرسانی و کانی‌سازی می‌شود (Pollard, 2006). بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، مراحل تشکیل کانسار احمدآباد را طی سه مرحله می‌توان توصیف کرد (شکل ۱۶):

الف) سامانه‌های گسلی و درز و شکاف‌های موجود در منطقه، باعث تسهیل در جای‌گیری توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق در محدوده معدنی و سهولت حرکت سیالات کانه‌ساز در منطقه شده است.

ب) توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق مونزودیتی و مونزودیوریتی طی جایگزینی در بخش‌های بالایی پوسته زمین و فرایند تبلور با تزریق در سنگ‌های میزبان آتشفشانی منطقه، باعث گرم‌شدن سیالات جوی نیز شده است. حرکت این سیالات از طریق سامانه‌های درز

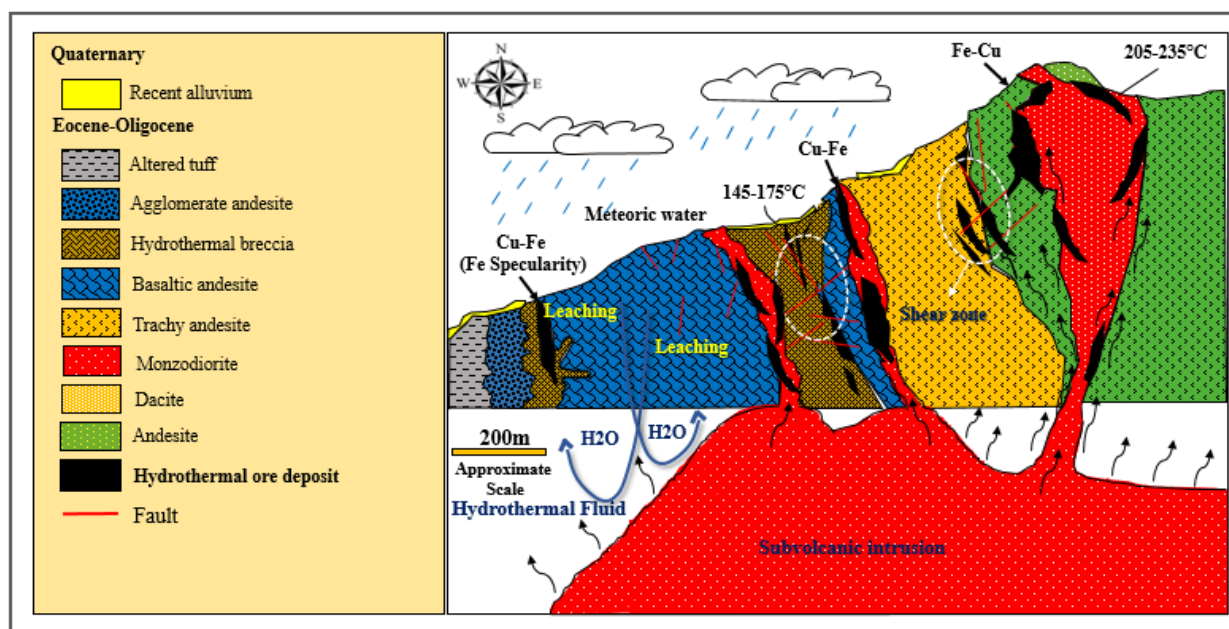
بیشتر شواهد در ذخایر اکسید آهن نشان می‌دهد که آنها در درجه اول محصول فرایندهای گرمابی در پوسته بالایی هستند. درباره چگونگی پیدایش کانسارهای آهن بسیار بحث شده است که محور بحث‌ها بیشتر بر خاستگاه گرمابی بودن آنها تمرکز یافته است (Naslund et al., 2000). درباره منشأ کانسار آهن احمدآباد می‌توان چنین برداشت کرد که توده نفوذی نیمه‌عمیق مونزودیتی و مونزودیوریتی سرشار از آهن و عناصر نادر خاکی از طریق درز و شکستگی‌ها در بخش‌های بالایی پوسته زمین جایگزین شده است. با آغاز انجماد و تبلور ماگما، مواد فرار از مذاب خارج و در سقف آشیانه ماگمایی انباشته شده‌اند. این سیال‌های ماگمایی پس از جدا شدن از مذاب، به علت داشتن چگالی کمتر از آن، به سوی بخش بالایی توده نفوذی بالا آمده و با فشار وارد شده، سقف توده نفوذی را شکسته‌اند. سپس درون سنگ‌های آتشفشانی منطقه نفوذ کرده‌اند و در درز و شکستگی‌های آن باعث کانه‌زایی آهن شده‌اند. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی و میکروترمومتری میان‌بارهای سیال، سیال‌های کانه‌ساز بیشتر خاستگاه ماگمایی دارند؛ البته سیال‌های جوی نیز در طی آمیختگی با سیال‌های اولیه ماگمایی، باعث کاهش دما و رقیق‌شدگی آن و در نتیجه ته‌نشینی مواد معدنی شده‌اند. حضور کانی‌های آب‌دار مانند بیوتیت و آمفیبول، نشان‌دهنده وجود مواد فرار در ماگما بوده و این سیال عاملی برای تحرک اکسیدهای آهن (هماتیت) و جدا شدن آن از مذاب است. پس کاهش دما و فشار در پی رسیدن سیال ماگمایی به بخش‌های کم‌عمق و برشی شده و آمیختگی با آب‌های جوی، سیال‌های کانه‌ساز را از حالت احیایی به اکسیدان تغییر داده و نهشته شدن ترکیب‌های آهن‌دار به صورت اکسیدی (هماتیت) را طی سرد شدن و رقیق‌شدن سیال کانه‌زا در پی داشته است. هم‌زمان با جایگزینی توده نفوذی در سنگ میزبان به علت افزایش مواد فرار، دگرسانی‌های متنوع و گسترده‌ای از جمله دگرسانی‌های آرژیلیکی و سیلیسی و به مقدار کم سربیسیتی، کربناتی و پروپیلیتیکی در محدوده معدنی رخ داده و کانی‌های کائولینیت،

سریسیتی‌شدن، سیلیسی‌شدن و ته‌نشینی مس به صورت کالکوپیریت، همه در پاسخ به سرد شدن و رقیق‌شدگی رخ می‌دهند.

در منطقه احمدآباد پس از پایان عملیات اکتشاف سطحی، بر اساس اطلاعات به دست آمده از تعداد ۷ گمانه اکتشافی (دو گمانه به روش مغزه‌گیری و و پنج گمانه به روش پودری حفاری شده) و نیز دیگر بررسی‌های انجام شده، شکل شماتیکی از مدل ژنتیکی کانسار ارائه شده است (شکل ۱۶).

و شکاف باعث افزایش شست‌وشوی فلزها و غنی‌شدگی هر چه بیشتر آنها ضمن عبور محلول‌ها از درون سنگ‌های مسیر عبور شده است.

ج) سیالات با دما و شوری متوسط تا بالا ضمن نزدیک شدن به سطح زمین و آمیختگی با آب‌های جوی و رقیق‌شدگی و در نتیجه کاهش بیشتر دما، باعث تغییر ماهیت سیالات و محیط ته‌نشست و در نتیجه کانه‌زایی شده است. بیشتر کانه‌های حاوی عناصر فلزی مهم در شرایط قلیایی و اکسیدان شکل گرفته‌اند. به طور کلی



شکل ۱۶. مدل ساده شده تشکیل کانسار گرمابی احمدآباد

Fig. 16. Simplified model of Ahmadabad hydrothermal ore deposit

نتیجه‌گیری

کانه‌زایی شامل: الف) مرحله کانی‌سازی اولیه (هیپوژن) و ب) مرحله سوپرژن (مرحله تأخیری) تقسیم‌بندی شده است. کانه‌زایی اصلی در کانسار احمدآباد، هماتیت (اسپیکولاریت) بوده که اغلب با پیریت و کالکوپیریت با بافت‌های پرکننده فضای خالی، رگه-رگچه‌ای، توده‌ای و افشان همراه است. باریت، کلسیت و کوارتز از کانی‌های باطله کانسار بوده که باریت دارای توانایی اقتصادی است. سنگ‌های میزبان این مجموعه را واحدهای توده نفوذی نیمه

اندیس‌های کانه‌زایی آهن احمدآباد در ۳۰ کیلومتری شمال شرق سمنان، در غرب روستای احمدآباد و در حد فاصل زون‌های ساختاری البرز و ایران مرکزی واقع شده است. بر اساس بررسی‌های صحرائی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و میکروترمومتری میان‌بارهای سیال این نهشت‌ها خاستگاه ماگمایی-جوی دارند. کانی‌سازی در کانسار احمدآباد به صورت اپی‌ژنتیک بوده و به دو مرحله

سیلیس افزایش یابد، کانی‌سازی آهن ناچیز است. بررسی وضعیت و گسترش مناطق گسلی و خرد شده با توزیع و عیار نمونه‌های عیار بالای آهن نشان می‌دهد که بررسی زون‌های خرد شده با میزان کم سیلیسی شدن، شاخص اکتشافی مناسبی برای تعیین زون‌های آهن‌دار اقتصادی است.

قدردانی

نویسندگان، از سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) برای حمایت‌های مالی، از مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران و مرکز زراآزما به خاطر انجام آزمایش‌ها تشکر و قدردانی می‌کنند. همچنین از شرکت زرین معدن چاف که داده‌ها و اطلاعات پایه‌ای ارزشمندی را درباره منطقه مورد بررسی در اختیار قرار داد، سپاسگزاریم. در پایان از داوران محترم که با حوصله و توجه فراوان، داوری این مقاله را متقبل شده‌اند، تشکر می‌نماییم.

عمیق و آتشفشانی تشکیل می‌دهد. توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق ائوسن بالایی پس از جای‌گیری و تزریق درون واحدهای آتشفشانی ائوسن و در بخش‌های گسلی و شکستگی‌ها، باعث دگرسانی‌های متنوع و گسترده در منطقه شده و شرایط فیزیکوشیمیایی مناسب بین سیال-سنگ برای ته‌نشست ماده معدنی را فراهم کرده است. سامانه‌های سیال گرمابی ناشی از فعالیت‌های ماگمایی و در اثر چرخش و داغ‌شدن آب‌های جوی، فازهای غنی از فلز را با خود حمل و در طی فرایندهای سرد شدن، تغییرات pH و Eh و کاهش فشار سیال باعث جدایش فازی فلزها به صورت خالص و اکسیدی می‌شود. بررسی‌های میکروترموتری میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که بهترین مدل برای تشکیل کانسار احمدآباد، مدل اختلاط سیال گرمابی-ماگمایی گرم و شور با سیالات جوی سرد با شوری پایین است. بر اساس بررسی‌های زمین‌شیمی، میزان تغییرات عیار Fe در کانسنگ منطقه به شدت با تغییرات میزان سیلیس در ارتباط است؛ به طوری که در جاهایی که

1. IOCG: Iron Oxide-Copper-Gold
2. Primary-Isolate
3. Primary-Cluster
4. Epirizian

References

- Alderton, D.M.H., Pearce, J.A. and Potts, P.J., 1980. Rare earth element mobility during granite alteration: evidence from Southwest England. *Earth Planet Scientific Letters*, 49(1): 149–165. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(80\)90157-0](https://doi.org/10.1016/0012-821x(80)90157-0)
- Barnes, H.L., 1979. Solubilities of ore minerals. In: H.L. Barnes (Editor), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. John Wiley and sons, New York, pp. 404–460. Retrieved September 10, 2022 from <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570291225829235712>
- Bean, R.E., 1983. The Magmatic-Meteoritic Transition. Geothermal Resources Council, California, Report 13, 253 pp.
- Boynnton, W.W., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: P. Henderson (Editor), *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, New York, pp. 63–114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Dickin, A.P., 1988. Evidence for limited REE leaching from the Roffna Gneiss, Switzerland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99(2): 273–275. Retrieved Sep 5, 2021 from <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00371468>
- Ferkous, K., and Leblanc, M., 1995. Gold mineralization in the west Hoggar shear zone, Algeria. *Mineral Deposita*, 30(3): 211–224. Retrieved Sep 5, 2021 from <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00196357>
- Frietsch, R. and Perdahl, J.A., 1995. Rare earth elements in apatite and Magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore type. *Ore Geology Reviews*, 9(6): 489–510. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(94\)00015-G](https://doi.org/10.1016/0169-1368(94)00015-G)
- Ghorbani, M., 2003. Introduction to the economic geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 695 pp.
- Groves, D.I. and Bierlein, F.P., 2007. Geodynamic setting of mineral deposit system. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 19–30. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-065>
- Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D. and Hitzman, M.W., 2010. Iron Oxide Copper- Gold (IOCG) Deposits through earth History: Implications for Origin, Lithospheric Setting, and Distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, 105(3): 641–654. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.641>
- Guilbert, J.M. and Park, C.F., 1997. *The Geology of Ore Deposits*. New York, American, 985 pp.
- Haji Babaei, A. and Ganji, A., 2018. Characteristics of the Ahmadabad Hematite/Barite deposit, Iran-studies of mineralogy, geochemistry and fluid inclusions. *Geologos*, 24(1): 55–68. <https://doi.org/10.2478/logos-2018-0004>
- Hart, C.J.R., Mair, J.L., Goldfarb, R.J. and Groves, D.I., 2004. Source and redox controls on metallogenic variations in intrusion-related ore systems, Tombstone-Tungsten Belt, Yukon Territory, Canada. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 95(1–2): 339–356. <https://doi.org/10.1017/S0263593300001115>
- Hitzman, M.W., 2000. Iron Oxide-Cu-Au deposits: what, where, when, and why. In: T.M. Porter (Editor), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related deposits: A global Perspective*, Adelaide, Australia, pp. 9–25. Retrieved September 10, 2022 from <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573668925672262656>
- Hitzman, M.W., Oreskes, N. and Einaudi, M.T., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, 58(1–4): 241–287. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90121-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90121-4)
- Jiang, S.Y. and Zhao, K.D., 2007. Rare earth element and yttrium analyses of sulfides from the Dachang Sn-polymetallic ore field, Guangxi Province, China: Implication for ore genesis. *Geochemical Journal*, 41(2): 121–134. <https://doi.org/10.2343/geochemj.41.121>
- Ketabforoush, Sh., 2016. Investigation of mineralization in Ahmadabad, Semnan region on the basis of petrological, mineralogical and alteration evidence. M.Sc. Thesis, Damghan University, Semnan, Iran, 132 pp.
- Kikawada, Y., 2001. Experimental studies on the mobility of lanthanides accompanying alteration of andesite by acidic hot spring water. *Chemical Geology*, 176(1–4): 137–149. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(00\)00375-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(00)00375-2)
- Kordian, Sh., Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H. and Veisheh, S., 2020. Geology, mineralogy, structure and texture, geochemistry and genesis of the Golestan Abad iron oxide-apatite deposit (east of

- Zanjan). *Journal of Economic Geology*, 12(3): 229–335. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v12i3.79628>
- Large, R.R., 1975. Zonation of hydrothermal minerals at the Juno mine, Tennant Creek goldfield, Central Australia. *Economic Geology*, 70(8): 1387–1413. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.8.1387>
- Mason, B. and Moore, C.B., 1982. *Principles of Geochemistry*. John Wiley and Sons, New York, 350 pp.
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Hitzman, M.W., Juliani, C., Filho, C.R.S. and Carvalho, E.R., 2008. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide-copper-gold deposit. Carajas Mineral Province, Brazil. *Ore geology Reviews*, 34(3): 317–336. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.01.003>
- Nakhaei, M. and Mohammadi, S.S., 2021. Petrography, geochemistry and tectonic setting of adakitic bodies in the Tighanab area and their relationship with iron skarn mineralization (southeast of Sarbisheh-east of Iran). *Journal of Economic Geology*, 12(4): 449–470. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v12i4.81783>
- Naslund, H.R., Aguirre, R., Dobbs, F.M., Henriquez, F. and Nystrom, J.O., 2000. The origin, emplacement and eruption of ore magmas. *Actas IX Congreso Geologico Chileno (Puerto Varas)* 24(2): 135–139. Retrieved June 29, 2021 from Retrieved June 29, 2021 from <https://www.researchgate.net/publication/284543849>
- Nezafati, N. 2006. Au-Sn-W-Cu-Mineralization in the Astaneh-Sarband Area, West Central Iran, including a comparison of the ores with ancient bronze artifacts from Western Asia Unpublished Ph.D. Thesis, University of Tuebingen, Tuebingen, Germany, 114 pp.
- Ohmoto, H. and Goldhaber, M.B., 1997. Sulfur and Carbon isotopes. In: H.L. Barnes (Editor), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. John Wiley and Sons, New York, pp. 517–612. Retrieved Oct 17, 2021 from Retrieved September 10, 2022 from <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572261550096186112>
- Palacios, C.M., Hein, U.F. and Dulski, P., 1986. Behaviour of rare earth elements during hydrothermal alteration at the Buena Esperanza copper-silver deposit, Northern Chile. *Earth Planet Scientific Letters*, 80(3–4): 208–216. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(86\)90105-6](https://doi.org/10.1016/0012-821x(86)90105-6)
- Pollard, P.J., 2006. An intrusion-related origin for Cu-Au mineralization in iron oxide-copper-gold (IOCG) provinces. *Mineralium Deposita*, 41(2): 179–187. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0054-x>
- Roedder, E., 1984. *Fluid inclusions*. Mineralogical Society of America, United States, 644 pp.
- Rolland, Y., Pillard, F. and Klapouczak, A., 2007. Exercise program for nursing home resident with Alzheimer's disease: A 1-year randomized, controlled trial. *Journal of the American Geriatrics Society*, 55(2): 158–165. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2007.01035.x>
- Rollinson, H.R., 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, Essex, 352 pp.
- Rosiere, C.A., Siemes, H., Quade, H., Brokmeier, H.G. and Jensen, E.M., 2001. Microstructures, texture and deformation mechanisms in hematite. *Journal of Structural Geology*, 23(9): 1429–1440. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00009-8)
- Selverstone, J., Morteani, G. and Stuade, J.M., 1991. Fluid channelling during ductile shearing: transformation of granodiorite into aluminous schist in the Tauern Window, eastern Alps. *Journal of Metamorphic Geology*, 9(4): 419–431. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1991.tb00536.x>
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M. 1985. *A practical guide to Fluid inclusion studies*. Blackie, London, 239 pp.
- Stocklin, J., 1968. Structure history and tectonics of Iran: A review. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(7): 1229–1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Tayefi, F. 2021 *Mineralogy, geochemistry and microthermometry of siliceous Fe-Cu bearing veins associated with Ahmadabad intrusion, Semnan*. M.Sc. Thesis, Kharazmi University, Tehran, Iran, 194 pp.
- 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](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)

Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontbote, L., DeHaller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S. and Marschik, R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution and possible modes of origin. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb, and

J.P. Richards (Editors), *Economic Geology* 100th anniversary volume. Society of Economic Geologist, USA, pp. 371–405.

<https://doi.org/10.5382/AV100.13>

Yari, F., Zarrinkoub, M.H., and Mohammadi, S.S., 2021. Geology, petrography, mineral chemistry and fluid inclusion of the Kalate Shab iron skarn (East of Sarbisheh, Southern Khorasan). *Journal of Economic Geology*, 12(4): 563–584. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v12i4.77836>