

Hamzelou Cu deposit: Redbed type sediment-hosted copper mineralization in the Upper Red Formation, NW Zanjan

Aisan Ghasemlou¹, Hossein Kouhestani^{1*}, Mir Ali Asghar Mokhtari¹, Afshin Zohdi¹

1-Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Keywords: Sediment-hosted Cu mineralization, Redbed type, Upper Red Formation, Hamzelou, Zanjan

1-Introduction

Sediment-hosted stratabound copper (SSC) deposits can be defined as stratabound deposits, consisting of disseminated to veinlet native copper and copper sulfides hosted by chemically reducing sedimentary rocks, including organic-rich black shales (Cox et al., 2007; Hitzman et al., 2005; Hayes et al., 2015). SSC deposits occur in three subtypes divided by host lithology and by the corresponding type of reductant that precipitated sulfur and Cu from warm, oxidized, metals-transporting, sedimentary brines: (1) reduced-facies type (e.g. Kupferschiefer and Zambia deposits), (2) sandstone-type (Revelt) (e.g., Spar Lake, hosted in the Revelt Formation in Montana, USA), and (3) Redbed type (e.g. Nacimiento in New Mexico and Paradox basin's deposits in Colorado and Utah).

SSC deposits in Iran are usually formed during late Triassic, late Jurassic-early Cretaceous, and Miocene. They are mostly discovered in the Garadou Red Formation of the Ravar-Tabas basin and the Upper Red Formation (URF) in the Avaj-Zanjan-Tabriz-Khoy (AZTK) area. SSC deposits in the AZTK area, northwestern Iran, hosted by grey sandstone units of the URF. The Tasouj, Tazekand, Nahand-Ivand, Ortasou, Chehrabad, Hamzelou, Halab, Zaghelou and Avaj are the main important deposits in the AZTK area. These deposits consist predominantly of bedding-parallel replacement and disseminated Cu (Pb-Zn) sulfides, roughly concordant with the stratification.

Excepting small scale geological maps of the area, i.e., 1:250,000 geological maps of Takab and 1:100,000 geological maps of Mahneshan and a number of unpublished Cu exploration report, prior to this research no work had been done on Cu mineralization at Hamzelou. The present paper provides an overview of the geological framework, and the mineralization characteristics of the Hamzelou deposit with an application to the ore genesis. Identification of these characteristics can be used as an exploration model for this type of Cu mineralization in this area and elsewhere.

2-Materials and methods

Detailed field work has been carried out at different scales in the Hamzelou area. During the field works, detailed stratigraphic sections were measured, sampled and described. Additionally, color of the sandstone layers and the presence of plant fossils were scanned during the field work. About 29 polished thin and thin sections from host rocks and mineralized layers were studied by conventional petrographic and mineralogical methods at the University of Zanjan. In addition, 8 samples from barren red and grey host sandstones and mineralized samples were analyzed by ICP-MS for trace elements and REE at Zarazma Co., Tehran, Iran.

3- Discussion and conclusion

The Hamzelou Cu deposit, 70 km northwest of Zanjan, is located in the Central Iranian zone. Rock units exposed in this area belongs to the URF, and consist of alternations of red and green marl

* Corresponding author: kouhestani@znu.ac.ir

DOI: 10.22055/aag.2020.29873.1999

Received 2019-06-09

Accepted 202-01-15

intercalated with red to grey, medium- to thick-bedded sandstone. In this area, URF has 945 m thickness and consist of four main parts. These parts, from bottom to top, consist of 1- alternation of evaporates and gypsiferous green marls (300 m), 2- alternation of red marl and grey to red sandstone (355 m), 3- alternation of red and green marl intercalated with grey to red sandstone (150 m), and 4- alternation of green marls and green siltstones (140 m).

Cu mineralization in the Hamzelou deposit occurred in grey microconglomerate and sandstone units of the second part of the URF. Mineralization often formed around and within the fragments of the plant fossils, in the form of disseminated and solution seams sulfides. Based on field studies, mineralization at Hamzelou deposit occurred in two distinct northern and southern parts of reduced-grey microconglomerate and sandstone layers, with about 1.5 and 2 m thickness and about 200 and 1000 m length, respectively. The ore horizons contain red oxidized zone, bleached zone and mineralized reduced zone which the latter is located within the bleached zone. The red oxidized zone consists of red marl and sandstone layers containing of iron oxides which is located adjacent to the reduced horizons. The red color of this zone caused by the presence of iron oxides around the grains. The oxidized pyrite crystals are the main important minerals in this zone. Bleached zone is part of sandstone and microconglomerate sequences that the alteration processes caused changing in its color. Grey and green colors in this zone occurred by the presence of organic materials and diagenetic pyrites. Mineralization in reduced zone has occurred within the organic materials-bearing bleached zones. Plant debris, plant fossils, diagenetic pyrites and permeability of host rock had main important role for the Cu mineralization at Hamzelou deposit.

Chalcocite, and pyrite are the main ore minerals at Hamzelou deposit. Malachite, azurite, covellite, atacamite, goethite and hematite are formed during supergene processes. Disseminated and cemented textures along with lens-shaped, solution seams, replacement, and framboidal pyrite are the main ore textures at Hamzelou deposit.

Comparison of Chondrite normalized trace elements and REE patterns of barren red and grey host sandstones and mineralized samples at Hamzelou indicate that mineralized samples show lower concentrations of trace elements and REE relative to host rocks. This signature indicates mobility of these elements during bleaching and mineralization processes.

Based on tectonic setting, host rock, geometry, presence of plant fossils, ore structure and texture and mineralogy, it can be concluded that the Hamzelou deposit is a sediment-hosted Redbed type Cu deposit.

References

- Cox, D.P., Lindsey, D.A, Singer, D.A., Diggles, M.F., 2007. Sediment-hosted copper deposits of the world-deposit models and database. U.S. Geological Survey, Canada, open-file report 03-107, p. 50.
- Hayes, T.S., Cox, D.P., Piatak, N.M., Seal, R.R., 2015. Sediment-hosted stratabound copper deposit model. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-M, Reston, Virginia, p. 147.
- Hitzman, M., Kirkham, R., Broughton, D., Thorson, J., Selley, D., 2005. The sediment-hosted stratiform copper ore system. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.M. Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Ed.), Economic Geology One Hundred Anniversary volume, Littleton, Colorado, pp. 609-612.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Ghasemlou, A., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Zohdi, A., 2020. Hamzelou Cu deposit: Redbed type sediment-hosted copper mineralization in the Upper Red Formation, NW Zanjan. Adv. Appl. Geol. 9(4), 480- 497.
DOI: 10.22055/aag.2020.29873.1999
url: https://aag.scu.ac.ir/article_15292.html?lang=en

کانسار مس حمزه‌لو: کانه‌زایی مس با میزبان رسوبی تیپ Redbed در سازند قرمز بالایی، شمال‌باختر زنجان

آیسان قاسملو

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

حسین کوهستانی*

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

میر علی اصغر مختاری

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

افشین زهدی

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹

*kouhestani@znu.ac.ir

چکیده

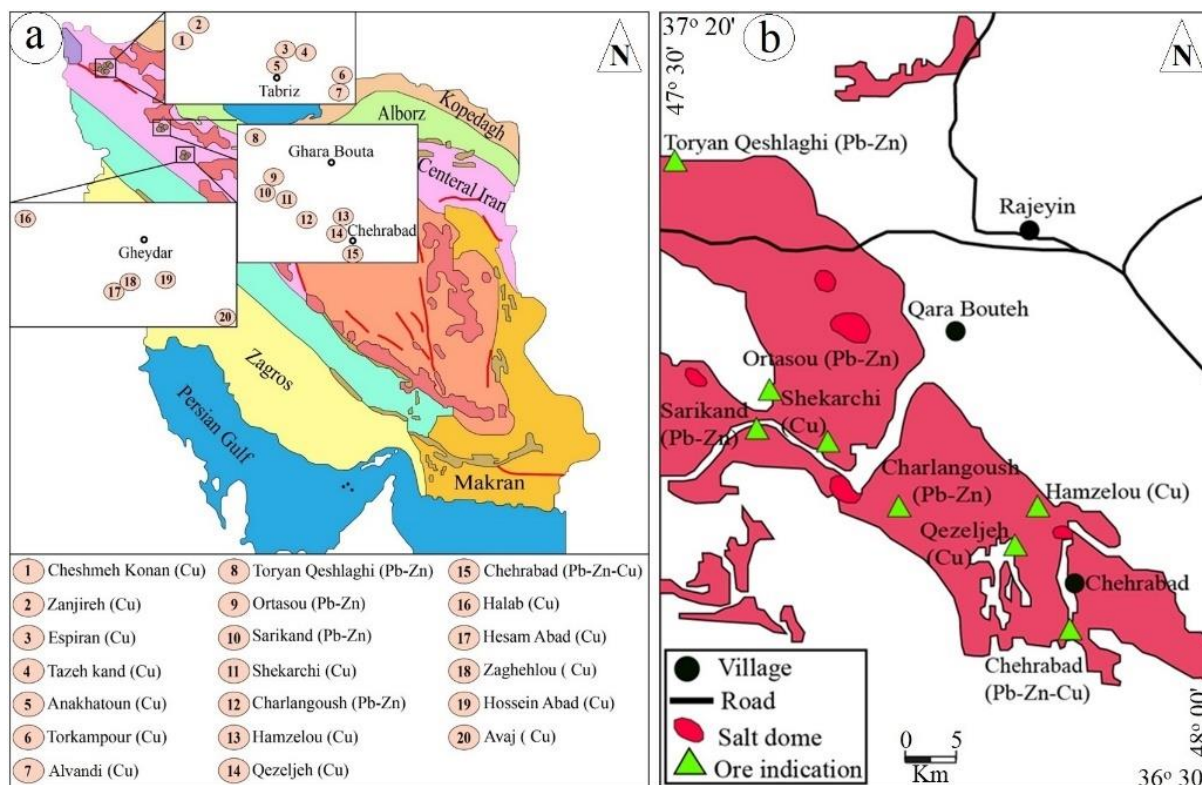
کانسار حمزه در پهنه ایران مرکزی و در فاصله ۷۰ کیلومتری شمال‌باختر زنجان قرار دارد. کانه‌زایی مس در این کانسار درون واحدهای میکروکنگلومرایی و ماسه‌سنگی خاکستری رنگ متعلق به سازند قرمز بالایی رخ داده است. بافت کانسنگ شامل دانه‌پراکنده، سیمان بین دانه‌ای، عدسی‌شکل، شبه‌لامینه‌ای، جان‌شینی و پیریت فرامبوئیدال می‌باشد. در افق‌های کانه‌دار، سه پهنه قرمز اکسیدان، شسته‌شده و احیایی کانه‌دار تشکیل شده است. کالکوسیت و پیریت، کانی‌های معدنی اصلی در کانسار حمزه‌لو هستند. مالاکیت، آزوریت، کوولیت، آتاکامیت، گوتیت و هماتیت در اثر فرآیندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. مقایسه الگوی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در نمونه‌های کانه‌دار و ماسه‌سنگ‌های قرمز و خاکستری بدون کانه‌زایی، بیانگر تپه‌شدگی در میزان این عناصر در نمونه‌های کانه‌دار است. این امر می‌تواند با خروج این عناصر طی فرآیندهای شسته‌شدن و کانه‌زایی تفسیر شود. با توجه به ویژگی‌هایی مانند محیط تکنونیکی، سنگ‌شناسی، چینه‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت و عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی (وجود آثار و بقایای گیاهی، وجود گنبد‌های نمکی، تخلخل و نفوذپذیری مناسب سنگ میزبان، گسل‌ها و شکستگی‌ها)، کانسار حمزه‌لو در دسته کانسارهای مس رسوبی تیپ Redbed قرار گرفته و از این نظر قابل مقایسه با دیگر کانسارهای مس رسوبی تیپ Redbed در منطقه ماه‌نشان می‌باشد. این کانسارها، ارتباط فضایی نزدیکی با واحدهای تبخیری و گنبد‌های نمکی موجود در سازند قرمز بالایی دارند که می‌بایست در مطالعات اکتشافی مورد توجه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: کانسار مس با میزبان رسوبی، تیپ Redbed، سازند قرمز بالایی، حمزه‌لو، زنجان

مقدمه

کانسارهای اورتاسو (Haghighi et al., in press)، چهارآباد (Rajabzadeh et al., 2016; Rajabzadeh, 2018; Rajabzadeh et al., in press)، دوزکند و مشمیا (Azizi et al., 2018)، حلب (Maleki, 2016)، زاغ‌لو و آوج (Sephri Rad and Fathjo, 2010) نام برد (شکل ۱b). کانسارها و اندیس‌های مس با میزبان رسوبی در منطقه ماه‌نشان، ارتباط فضایی نزدیکی با واحدهای تبخیری و گنبد‌های نمکی موجود در سازند قرمز بالایی در این منطقه دارد (شکل ۱b). این امر در اکتشاف این نوع از کانه‌زایی‌ها حائز اهمیت بوده و بایستی در مطالعات اکتشافی مورد توجه قرار گیرد. کانسار مس حمزه‌لو در فاصله ۷۰ کیلومتری شمال‌باختر زنجان قرار دارد. بررسی‌های قبلی انجام‌شده در این منطقه شامل تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس‌های ۱:۲۵۰,۰۰۰ چهارگوش تکاب (Alavi and Omid, 1976) و ۱:۱۰۰,۰۰۰ ورقه ماه‌نشان (Lotfi, 2001) و همچنین فعالیت‌های اکتشافی موضوعی در رابطه با اکتشاف مس (Hassasi, 2015) بوده است. در مطالعات یادشده، به نوع کانه‌زایی و ساز و کار تشکیل آن توجه چندانی نشده است. در پژوهش حاضر، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی و ساخت و بافت کانسار حمزه‌لو مورد بررسی قرار گرفته و تیپ کانه‌زایی و نحوه تشکیل آن بررسی شده است. مطالعه دقیق این نوع کانه‌زایی‌ها می‌تواند عوامل کلیدی توزیع زمانی و مکانی برای اکتشاف کانه‌زایی‌های مشابه در این بخش از پهنه ایران مرکزی را معرفی کرده و به‌عنوان الگوی اکتشافی مورد استفاده قرار گیرد.

کانسارهای مس با میزبان رسوبی پس از کانسارهای پورفیری مهم‌ترین منبع تأمین مس دنیا هستند به‌طوری‌که تقریباً ۲۳ درصد مس دنیا از این ذخایر تولید می‌شود (Hitzman et al., 2005; Cox et al., 2007; Hayes et al., 2015). این نوع کانسارها در ایران همراه با سازندهای رسوبی دوره‌های تریاس پسین، ژوراسیک پسین - کرتاسه پیشین، میوسن و همراه با گنبد‌های نمکی حوضه زاگرس مشاهده شده‌اند (Ghorbani, 2013). کانه‌زایی‌های مس با سنگ میزبان رسوبی مشاهده شده، عمدتاً در سازند سرخ‌گره‌دو در حوضه راور - طبس (Mahdavi, 2008; Mahdavi et al., 2011) و سازند قرمز بالایی در حوضه زنجان - تبریز - خوی (Sephri Rad and Fathjo, 2010; Sadati et al., 2016) متمرکز شده‌اند. با وجود اینکه سازند قرمز بالایی در نواحی ایران مرکزی و آذربایجان گسترش زیادی دارد، در مطالعات پیشین، کانه‌زایی مس با میزبان رسوبی در این سازند فقط در نواحی آذربایجان گزارش شده است. از مهم‌ترین این کانه‌زایی‌ها در حوضه کوه‌های میشو و شمال تبریز می‌توان به کانسارها و اندیس‌های تازه‌کند (Enayati Kolaie et al., 2016)، نهند - ایوند (Sadati, 2016; Sadati et al., 2016) و تسوج (Rajabpour et al., 2017) اشاره کرد (شکل ۱a). در بررسی‌ها و مطالعات جدیدتر، آثار این کانه‌زایی‌ها در منطقه ماه‌نشان و آوج نیز شناسایی شده است (Sephri Rad and Fathjo, 2010) که از مهم‌ترین آنها می‌توان



شکل ۱- (a) موقعیت کانسارها و نشانه‌های مس و سرب- روی با میزبان رسوبی در بخش شمال‌باختری پهنه ایران مرکزی (با تغییرات از Alavi, 1991). نوع ماده معدنی در داخل پراکنش مشخص شده است، (b) گسترش سازند قرمز بالایی در منطقه ماه‌نشان و موقعیت کانسارهای مس و سرب- روی با میزبان رسوبی (با تغییرات از Lotfi, 2001). به ارتباط نزدیک گنبد‌های نمکی و کانسارهای مس و سرب در این سازند توجه شود.

Fig. 1. (a) Location of sediment-hosted Cu and Pb-Zn deposits and occurrences in the northwestern part on the Central Iranian zone (after Alavi, 1991). (b) Distribution of the Upper Red Formation in the Mahneshan area along with location of sediment-hosted Cu and Pb-Zn mineralization (after Khodabandeh et al., 1998; Lotfi, 2001). Note the close relationship between salt domes and mineralization.

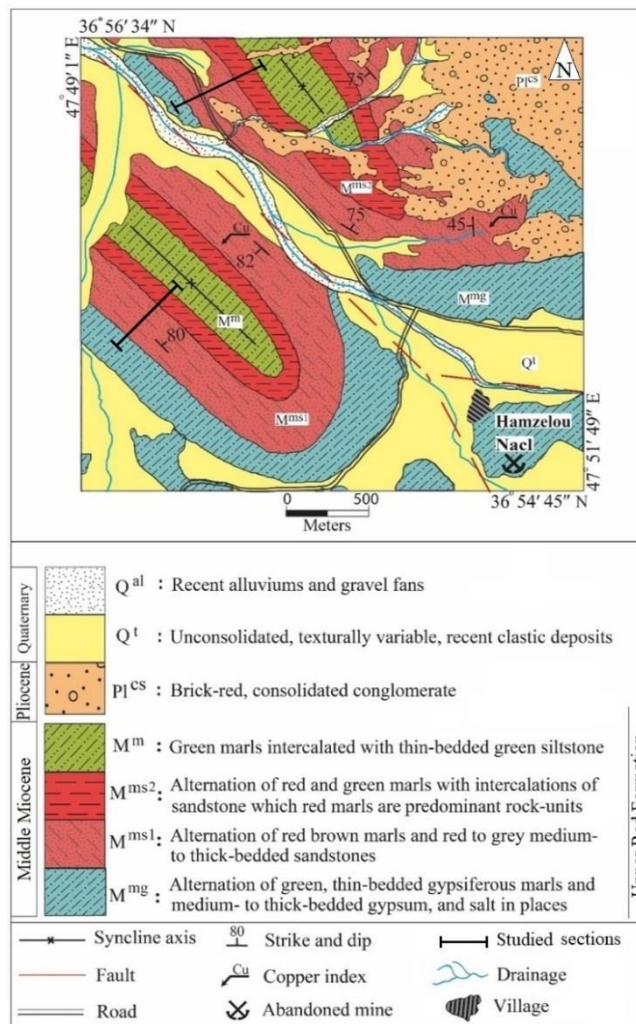
۲ دقیقه تا اندازه حدود ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر شدند. پس از آماده‌سازی، میزان ۲۰ گرم از پودر نمونه‌ها برای تعیین میزان عناصر کمیاب و کمیاب خاکی به روش ICP-MS به آزمایشگاه شرکت زرآزما در تهران، ارسال و مورد تجزیه قرار گرفت. برای تعیین میزان عناصر کمیاب خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه در لیتیم متابورات/تتراپورات ذوب و سپس در اسید نیتریک حل گردید. برای تعیین میزان فلزات پایه، به صورت جداگانه حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه در تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه سانتی‌گراد) حل گردید. حد پایین دقت اندازه‌گیری برای عناصر مختلف در جدول ۱ ذکر شده است.

زمین‌شناسی و چینه‌نگاری منطقه حمزه‌لو

با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ ورقه ماه‌نشان (Lotfi, 2001) و براساس مطالعات صحرایی انجام‌شده در قالب تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۵,۰۰۰ منطقه حمزه‌لو (شکل ۲)، واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در این منطقه به سازند قرمز بالایی تعلق دارند که توسط واحد کنگلومرای پلیوسن و رسوبات آبرفتی کوتاه‌تری پوشیده شده‌اند.

روش مطالعه

این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی می‌باشد. در مطالعات صحرایی، نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵,۰۰۰ منطقه تهیه گردید. طی برداشت‌های صحرایی، امتداد، شیب و ستبرای لایه‌های ماسه‌سنگی و ماری اندازه‌گیری و وجود و یا عدم وجود آثار گیاهی و ساخت‌های رسوبی در آنها بررسی گردید. علاوه بر آن، ستون سنگ‌چینه‌ای منطقه ترسیم و جایگاه ماده معدنی بر روی آن مشخص شد. در این راستا، ۵۰ نمونه از واحدهای سنگی و رخنمون‌های کانسارهای برای مطالعات سنگ‌شناسی و کانسارنگاری برداشت شد. سپس، تعداد ۱۶ مقطع نازک و ۱۳ مقطع نازک - صیقلی برای مطالعات سنگ‌شناسی، کانسارنگاری و ساخت و بافت، تهیه و مورد مطالعه قرار گرفت. سپس به منظور انجام مطالعات زمین‌شیمیایی، تعداد ۳ نمونه از ماسه‌سنگ‌های قرمز (نمونه ۲) و خاکستری بدون کانسارهای (نمونه ۱) و ۵ نمونه از بخش‌های کانساردار انتخاب شد. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها توسط خردکننده فولادی تا اندازه حدود ۵ مش (۴ میلی‌متر) خرد شده و سپس با استفاده از آگات به مدت



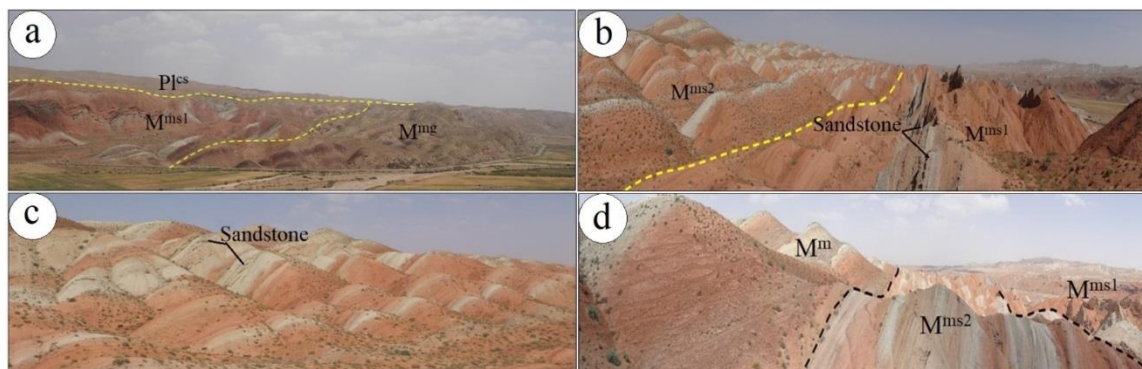
شکل ۲- نقشه زمین شناسی کانسار حمزه‌لو.

Fig. 2. Geological map of Hamzelou deposit.

واحد M^{ms2} از تناوب مارن‌های قرمز و سبز با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی تشکیل شده است که در آن مارن‌های قرمز غالب می‌باشد (شکل ۳c). بخش‌های مارن سبز این واحد، غنی از ژئیس هستند. این واحد بیشتر در بخش‌های شمالی و باختر تا جنوب منطقه گسترش دارد (شکل ۲). تحت تأثیر چین‌خوردگی‌ها و گسلش‌های موجود در منطقه، امتداد و شیب واحد M^{ms2} نیز متغیر می‌باشد. واحد M^m جوان‌ترین بخش سازند قرمز بالایی در منطقه حمزه‌لو می‌باشد. این واحد که هسته ناودیس‌های منطقه را تشکیل می‌دهد، بیشتر در بخش‌های شمال و جنوب‌باختر منطقه گسترش دارد (شکل ۲). واحد M^m از مارن‌های سبز رنگ حاوی ژئیس با میان‌لایه‌های نازک سیلت‌سنگی سبزرنگ تشکیل شده است (شکل ۳d).

واحد سنگی پلیوسن (Pl^{cs}) از کنگلومرای سخت‌شده به رنگ قرمز آجری تشکیل شده است. این واحد بیشتر در بخش شمال‌خاور منطقه حمزه‌لو گسترش دارد (شکل ۱). این واحد به‌صورت ناپیوسته واحدهای سازند قرمز بالایی را می‌پوشاند (شکل ۳a). واحدهای کواترنری (Q^1 و Q^{al}) در منطقه حمزه‌لو شامل رسوبات آواری سخت‌نشده با بافت به هم ریخته و پادگانه‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌های عهد حاضر می‌باشند که بیشتر در بخش‌های جنوب‌خاوری و باختر منطقه گسترش دارند (شکل ۲).

سازند قرمز بالایی در منطقه حمزه‌لو از چهار واحد M^{mg} ، M^{ms1} ، M^{ms2} و M^m تشکیل شده است که به‌صورت پیوسته و هم‌شیب بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند (شکل ۲). واحد M^{mg} قدیمی‌ترین واحد سنگی سازند قرمز بالایی در منطقه حمزه‌لو بوده و بیشتر در بخش‌های خاور، جنوب، جنوب‌خاور و جنوب‌باختر منطقه گسترش دارد (شکل ۲). این واحد از تناوب واحدهای تبخیری (گچ و نمک) و مارن‌های سبز با میان‌لایه‌های ژئیس‌دار نازک تا ضخیم‌لایه خاکستری رنگ تشکیل شده است (شکل ۳a). واحد M^{mg} میزان گنبد نمکی چهارآباد در بخش جنوب‌خاوری منطقه می‌باشد. واحد M^{ms1} شامل تناوب مارن‌های قرمز-قهوه‌ای با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی خاکستری و قرمز رنگ می‌باشد (شکل ۳b). ماسه‌سنگ‌ها عمدتاً متوسط تا ضخیم‌لایه هستند. این واحد میزان کانی‌زایی مس در منطقه حمزه‌لو بوده و بیشتر در بخش‌های مرکزی تا شمال-شمال‌باختر و باختر منطقه گسترش دارد (شکل ۲). به‌دلیل فرآیندهای چین‌خوردگی و گسلش، شیب و امتداد این واحد در قسمت‌های مختلف منطقه، متفاوت است به‌طوری‌که در بخش‌های مرکزی و جنوب‌باختری، دارای امتداد شمال‌باختر- جنوب‌خاور، با شیب‌های ۸۰ تا ۸۲ درجه به سمت شمال‌خاور و یا جنوب‌باختر است، اما در بخش‌های خاور و شمال‌خاور منطقه، امتداد آن شمال تا شمال‌باختر- جنوب تا جنوب‌خاور با شیب‌های ۴۵ تا ۷۵ درجه به سمت باختر، شمال‌خاور و جنوب‌باختر می‌باشد.

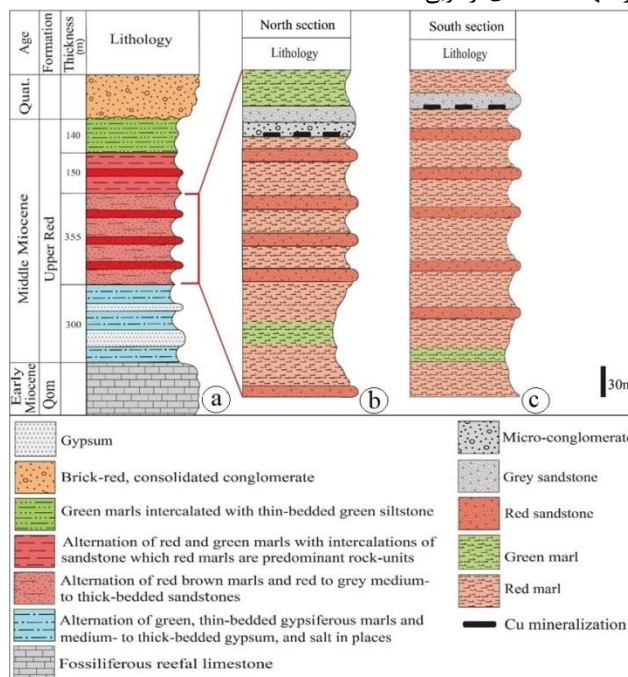


شکل ۳- (a) نمای از واحدهای M^{mg} ، M^{ms1} و Pl^{cs} در منطقه حمزه‌لو (دید به سمت شمال‌خاور)، (b) تناوب مارن‌های قرمز با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ خاکستری واحد M^{ms1} که توسط واحد M^{ms2} پوشیده شده‌اند (دید به سمت شمال‌باختر)، (c) تناوب مارن‌های قرمز و سبز با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی واحد M^{ms2} (دید به سمت باختر)، (d) نمایی از واحدهای مارنی M^m که به‌طور هم‌شیب بر روی واحدهای M^{ms1} و M^{ms2} قرار گرفته است (دید به سمت شمال‌باختر).

Fig. 3. (a) View of the M^{mg} , M^{ms1} and Pl^{cs} units at the Hamzelou area (looking northeast), (b) alternation of red marls intercalated with gray sandstones of the M^{ms1} unit, covered by the M^{ms2} unit (looking northwest), (c) alternation of red and green marl with sandstone intercalations of M^{ms2} unit (looking west), and (d) view of the marl units of the M^m covered the M^{ms2} and M^{ms1} units concordantly (looking northwest).

چینه‌بندی مورب مسطح و افقی، لایه‌بندی هترولیتیکی، قالب‌های وزنی و آثار ترک‌های گلی و موجودات حفار مشاهده می‌شود. براساس مطالعات میکروسکوپی، ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی در منطقه حمزه‌لو، عمدتاً دانریز تا دانه‌متوسط بوده و حاوی کوارتز (۲۰ درصد)، فلدسپات (۱۱ درصد) و خردسنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آتشفشانی (در مجموع ۲۷ درصد) می‌باشند (Ghasemlou, 2018). با توجه به اجزای تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌ها و براساس نام‌گذاری آنها به روش فولک (Folk, 1980)، ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی در منطقه حمزه‌لو عمدتاً از نوع فلدسپاتیک لیت‌آرنایت و به‌میزان کمتر از نوع لیت‌آرنایت هستند. جایگاه تکتونیکی این ماسه‌سنگ‌ها، حاشیه‌های فعال قاره‌ای و حوضه‌های فورلندی بوده و دارای سنگ متشاء حدواسط تا مافیک هستند که تحت تأثیر آب و هوای نیمه‌خشک قرار گرفته‌اند (Ghasemlou, 2018).

با توجه به ستون سنگ‌چینه‌ای تهیه‌شده، سازند قرمز بالایی در منطقه حمزه‌لو ۹۴۵ متر ستبراً داشته و به ۴ بخش قابل تفکیک است (شکل ۴a). این بخش‌ها به‌ترتیب از پایین به بالا شامل: ۱- تناوب واحدهای تخییری متوسط تا ضخیم‌لایه و مارن‌های سبز نازک‌لایه حاوی ژپس خاکستری رنگ با ستبرای ۳۰۰ متر، ۲- تناوب مارن‌های قرمز با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی قرمز و خاکستری رنگ با ستبرای ۳۵۵ متر، ۳- تناوب مارن‌های قرمز و سبز با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی خاکستری و قرمز رنگ با ستبرای ۱۵۰ متر و ۴- تناوب مارن‌های سبز-خاکستری با میان‌لایه‌های سیلت‌سنگ نازک‌لایه سبزرنگ با ستبرای ۱۴۰ متر می‌باشد. بخش دوم دارای ۶ لایه ماسه‌سنگی خاکستری و قرمز رنگ است که به‌صورت متناوب با لایه‌های مارنی قرمز رنگ قرار گرفته‌اند (شکل ۴b و c). این لایه‌های ماسه‌سنگی به‌طور میانگین بین ۰/۵ تا ۶ متر ستبراً داشته و در آنها ساخت‌های رسوبی مانند



شکل ۴- (a) ستون سنگ‌چینه‌ای سازند قرمز بالایی در کنسار حمزه‌لو، (b) موقعیت افق‌های کانه‌دار در بخش دوم سازند قرمز بالایی در برش‌های شمالی (b) و جنوبی (c) کنسار حمزه‌لو.

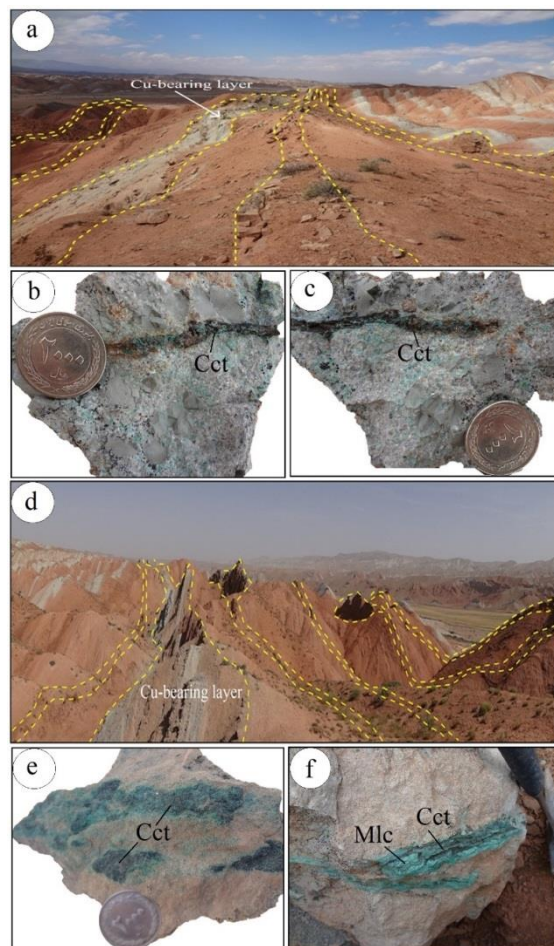
Fig. 4. (a) Stratigraphic column of Upper Red Formation in the Hamzelou deposit, (b-c) location of mineralized horizons at the second part of the Upper Red Formation in northern (b) and southern (c) sections at the Hamzelou deposit.

کانه‌زایی

فسیلی گیاهی شده است (شکل b5 و c). کالکوسیت تحت تأثیر فرایندهای برون‌زاد، اغلب به کوولیت و مالاکیت تبدیل شده است که اغلب بافت پُرکننده فضاهای خالی نشان می‌دهند.

در بخش جنوبی منطقه، افق کانه‌زایی حدود ۲ متر ستبراً داشته و از نظر طولی تا یک کیلومتر قابل پیگیری است. سنگ میزبان این افق، رخساره ماسه‌سنگی خاکستری رنگ با ریپل‌مارک‌های موجی است که در تناوب با مارن‌های قرمز رنگ قرار گرفته است (شکل d5). براساس مطالعات سنگ‌شناسی، این رخساره ماسه‌سنگی ترکیب لیت‌آرنایتی داشته و دارای ذرات ماسه‌ای ریز تا متوسط با جورشدگی خوب می‌باشد. کانی‌های موجود در این افق همانند افق بخش شمالی است با این تفاوت که تعداد قطعات فسیل گیاهی در آن کمتر از افق شمالی می‌باشد. کالکوسیت با بافت شبه لامینه‌ای و عدسی‌شکل به‌عنوان کانی اصلی این افق می‌باشد که گاه در اثر فرآیندهای برون‌زاد به کوولیت، مالاکیت، آزریت و آناکامیت دگرسان شده‌اند (شکل e5 و f).

کانه‌زایی مس در کانسار حمزه‌لو به شکل سولفیدهای جانشینی، شبه - لامینه‌ای و عدسی‌شکل درون واحدهای ماسه‌سنگی و میکروکنگلومرای خاکستری‌رنگ رخ داده است. در بخش شمالی منطقه، افق کانه‌زایی حدود ۱/۵ متر ستبراً و ۲۰۰ متر درازا دارد. سنگ میزبان مس در این بخش، رخساره میکروکنگلومرای خاکستری رنگ غنی از قطعات خُرده سنگی متنوع می‌باشد که در تناوب با مارن‌های قرمز و سبز قرار گرفته است (شکل a5). این رخساره دارای قطعات گراولی نیمه‌زاویه‌دار تا نیمه‌گردشده با جورشدگی ضعیف تا متوسط می‌باشد. اندازه قطعات گراولی آن در حد قلوه‌سنگ بوده و هیچ‌گونه جهت‌یافتگی در قطعات آن مشاهده نمی‌شود. براساس ترکیب سنگ‌شناسی، رخساره یادشده، پلی‌میکتیک (چند منشایی) بوده و دارای گراول توده‌ای و دانه‌پشتیبان می‌باشد. از کانی‌های موجود در این رخساره می‌توان به کوارتز، ارتوز، پلاژیوکلاز، خُرده‌سنگ رسوبی و دگرگونی، بیوتیت، کلریت و قطعات فسیلی (بیشتر از نوع گیاهی) با سیمان کربناته اشاره کرد. کانی‌سازی مس در این افق عمدتاً به‌صورت کالکوسیت می‌باشد که جانشین بافت‌های قطعات



شکل ۵- (a) نمای از لایه میکروکنگلومرای مس‌دار در بُرش شمالی کانسار حمزه‌لو (دید به سوی جنوب‌باختر)، (b و c) تصاویر نمونه دستی از میکروکنگلومرای خاکستری رنگ دارای کالکوسیت با بافت جانشینی در بخش شمالی کانسار حمزه‌لو، (d) نمای از لایه ماسه‌سنگی مس‌دار در بُرش جنوبی کانسار حمزه‌لو (دید به سوی شمال‌باختر)، (e و f) تصاویر نمونه دستی از ماسه‌سنگ‌های خاکستری رنگ دارای کالکوسیت با بافت شبه لامینه‌ای و عدسی‌شکل (e) و جانشینی (f) در بخش جنوبی کانسار حمزه‌لو. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Cct: کالکوسیت، Mlc: مالاکیت)

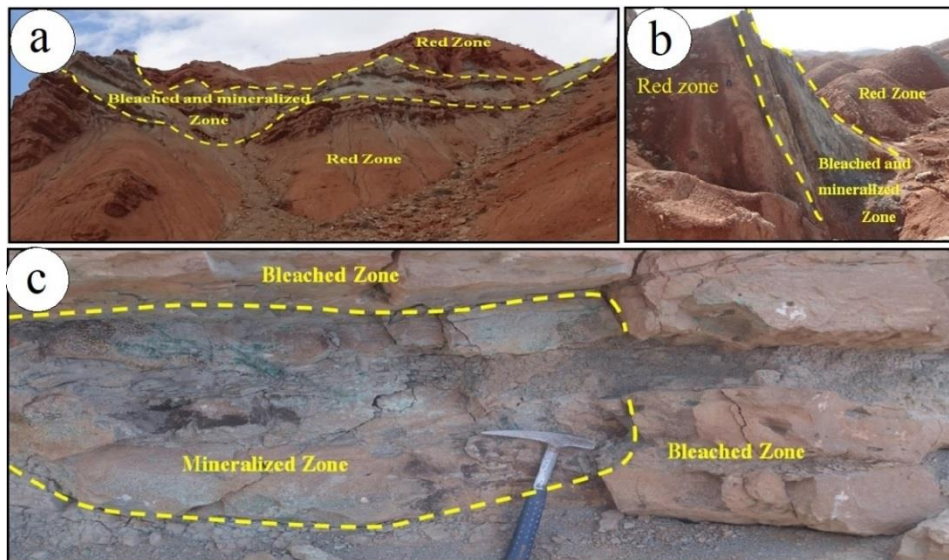
Fig. 5. (a) View of Cu-bearing micro-conglomerate layer in the northern part of the Hamzelou deposit (looking southwest), (b-c) hand specimen photos of chalcocite-bearing grey micro-conglomerate with replacement texture in northern part of the Hamzelou deposit, (d) view of Cu-bearing sandstone layer in the southern part of the Hamzelou deposit (looking northwest), (e-f) hand specimen photos of chalcocite-bearing grey sandstone with solution seams and lens-shaped (e) and replacement (f) textures in the southern part of the Hamzelou deposit. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans 2010; Cct: Chalcocite, Mlc: Malachite.

پهنه‌بندی و دگرسانی در افق‌های کانهدار

بر اساس مطالعات انجام‌شده، در افق‌های میکروکنگلومرایی و ماسه‌سنگی میزبان کانسار حمزه‌لو سه پهنه مجزا شامل پهنه قرمز اکسیدان، پهنه شسته‌شده و زیرپهنه احیایی کانهدار قابل تشخیص است (شکل ۶). این پهنه‌ها از نظر نوع دگرسانی، شرایط احیایی و اکسیدی، رنگ و نحوه پراکندگی عناصر با یکدیگر متفاوت می‌باشند. پهنه قرمز اکسیدان در بخش‌های بالا و پایین پهنه شسته‌شده قرار دارد (شکل ۶a و b). این پهنه به‌صورت مارن قرمز و در بعضی از قسمت‌ها به‌صورت ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز قرمز رنگ است که اطراف ماسه-سنگ‌های شسته‌شده را فرا گرفته است. در کانسار حمزه‌لو، ستبرای این پهنه بین ۵ تا ۱۰۰ متر متغیر است. از نظر ترکیب سنگ‌شناسی، ماسه‌سنگ‌های این پهنه از نوع فلدسپاتیک‌لیت‌آرنایت دانه‌ریز هستند. این ماسه‌سنگ‌ها دارای جورشدگی خوب، نیمه‌گرد شده با جهت‌یافتگی ضعیف بوده و ذرات تشکیل‌دهنده آنها شامل کوارتز، فلدسپات، خُرده‌سنگ‌های رسوبی و دگرگونی، بیوتیت و کلریت می‌باشند. پهنه قرمز اکسیدان دارای مقدار بالایی اکسید آهن است که به‌صورت سیمان و یا پوشاننده ذرات آواری تشکیل‌دهنده رسوبات

سیلیسی- آواری دیده می‌شود. پهنه قرمز اکسیدان فاقد هرگونه کانزایی سیلیسی می‌باشد.

پهنه شسته‌شده در بخش مرکزی پهنه‌بندی دگرسانی در افق‌های کانهدار قرار گرفته و از دو طرف توسط پهنه قرمز اکسیدان محصور شده است (شکل ۶a و b). ماسه‌سنگ‌های موجود در این پهنه بیشتر از نوع لی‌ت‌آرنایت تا فلدسپاتیک لی‌ت‌آرنایت با جورشدگی خوب و جهت‌یافتگی ضعیف می‌باشند. در کانسار حمزه‌لو، دگرسانی در پهنه شسته‌شده محدود به چند افق با ستبرای تا ۵ متر با گسترش طولی زیاد است. زیرپهنه احیایی کانهدار بخشی از پهنه شسته‌شده می‌باشد که کانزایی در آن رخ داده است. این زیرپهنه به شکل عدسی درون پهنه شسته شده و در بخش زیرین آن قرار دارد (شکل ۶c). میکروکنگلومرها و ماسه‌سنگ‌های این زیرپهنه در قسمت پوینت‌بار کانال‌های رودخانه‌های ماندردی تشکیل شده و معمولاً دارای ذرات درشت‌تر و قطعات فسیل گیاهی می‌باشند (Ghasemlou, 2018). کانزایی مس در کانسار حمزه‌لو رابطه نزدیکی با تجمعات قطعات فسیل‌های گیاهی دارد.



شکل ۶- (a و b) نماهایی از موقعیت پهنه قرمز اکسیدان و پهنه شسته‌شده در کانسار حمزه‌لو، (c) موقعیت زیرپهنه احیایی کانهدار درون بخش‌های پایینی پهنه شسته‌شده در کانسار حمزه‌لو.
Fig. 6. (a-b) Views of red zone and bleached zone at the Hamzelou deposit, and (c) location of mineralized reduce zone at the bottom parts of the bleached zone at the Hamzelou deposit.

است. در برخی بخش‌ها، کالکوسیت جانشین پیریت‌های فرامبوئیدال اولیه موجود در سنگ میزبان شده و به‌صورت بلورهای گرد دانه‌پراکنده با بافت فرامبوئیدال دیده می‌شود (شکل ۶c). بافت عدسی‌شکل محصول جانشینی کالکوسیت به‌جای قطعات فسیل گیاهی و مواد آلی است. در این بافت، کالکوسیت به‌صورت عدسی‌های تیره‌رنگ در میکروکنگلومرا و یا ماسه‌سنگ‌های میزبان حضور دارد (شکل ۶d). در بافت دانه‌پراکنده، کالکوسیت به‌صورت پراکنده در فضاهای خالی بین دانه‌های آواری سنگ میزبان تشکیل شده است (شکل ۶e). این بافت طی مرحله دیاژنز ثانویه و پس از احیایی شدن محیط طی دگرسانی شسته‌شدن، در اثر برخورد سیال اکسیدان با بخش‌های احیایی و دارای نفوذپذیری بالا تشکیل می‌شود (Woodward et al., 1974).

بافت سیمان بین دانه‌ای یکی دیگر از بافت‌های شاخص کالکوسیت در کانسار حمزه‌لو است که در آن کالکوسیت به‌صورت سیمان، فضای بین ذرات آواری سنگ‌های میزبان را پر کرده است (شکل ۶f). تشکیل این بافت می‌تواند محصول جانشینی کالکوسیت به‌جای سیمان کربناتی موجود در اطراف کانی-های کوارتز و فلدسپات و یا تهنشست کالکوسیت در خلل و فرج موجود در بافت

بحث و بررسی

کانی‌شناسی و ساخت و بافت مواد معدنی

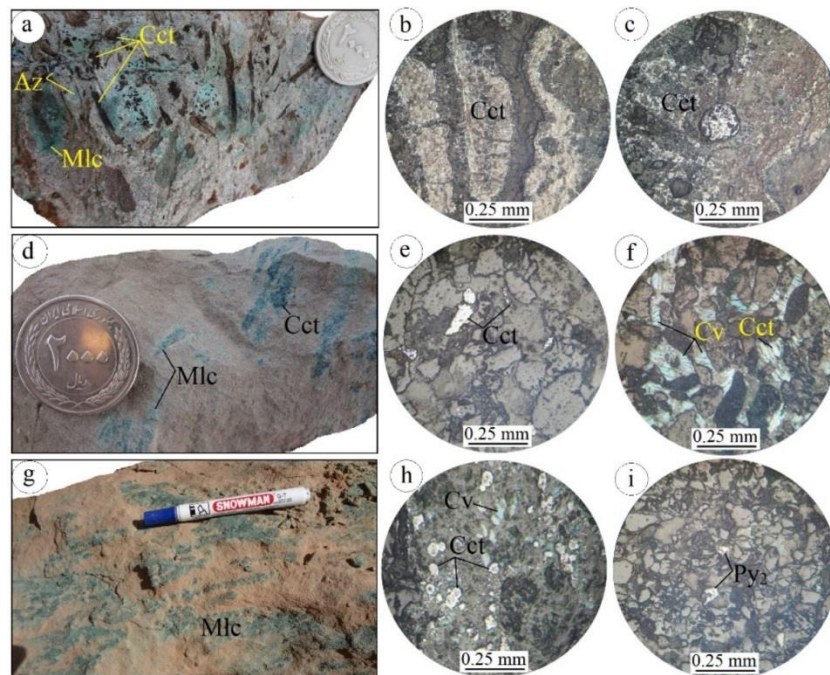
کالکوسیت و پیریت، کانی‌شناسی اصلی ماده معدنی را در کانسار حمزه‌لو تشکیل می‌دهند. مالاکیت، آزوریت، کوولیت، گوتیت و هماتیت در اثر فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. در مطالعات EPMA انجام‌شده توسط Ghasemlou (2018)، آتاکامیت ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) نیز در این کانسار تشخیص داده شده است. بافت مواد معدنی از نوع دانه‌پراکنده، سیمان بین دانه-ای، عدسی، شبه لامینه‌ای، جانشینی و پیریت فرامبوئیدال می‌باشد.

کالکوسیت معمولاً به‌صورت بافت‌های جانشینی، عدسی‌شکل، سیمان بین دانه‌ای، شبه لامینه‌ای و دانه‌پراکنده در افق‌های کانهدار دیده می‌شود. شاخص‌ترین بافت کالکوسیت در کانسار حمزه‌لو، بافت جانشینی در قالب فسیل‌های گیاهی است (شکل ۶a و b). در این بافت، کالکوسیت درون بافت و سلول‌های گیاهی (Subias et al., 2003) جانشین شده است. این جانشینی به دو صورت جانشینی سلولار (کالکوسیت جانشین تمام و یا بخشی از ساختمان سلول گیاهی می‌شود) و جانشینی در بافت و آوند گیاهی رخ داده

مراحل بعدی و طی کانه‌زایی توسط دیگر سولفیدها جایگزین شده (Durieux and Brown, 2007) و یا در اثر فرایندهای برون‌زاد، اکسیده می‌شوند. در کانسار حمزه‌لو این پیریت‌ها به‌صورت بلورهای ریز کروی شکل در اندازه حدود ۴۰ تا ۵۰ میکرون حضور داشته و در بیشتر موارد توسط کالکوسیت جانشین شده و یا به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن دگرسان شده‌اند (شکل ۷h). پیریت نسل دوم (Py₂) طی دگرسانی شسته‌شدن و احیایی شدن محیط تشکیل می‌گردد (Mahdavi et al., 2011). این پیریت‌ها معمولاً در مرحله دیاژنز و طی دگرسانی شسته‌شدن، جانشین مواد آلی و فسیل‌های گیاهی شده و در مرحله کانه‌زایی به‌وسیله دیگر سولفیدها جانشین می‌شوند. با این وجود، در بیشتر موارد پیریت شکل ابتدایی خود را حفظ می‌کند. پیریت‌های نسل دوم در کانسار حمزه‌لو در زیرپهنه‌های احیایی کانه‌دار و به‌صورت بلورهای ریز نیمه-شکل‌دار تا بی‌شکل با بافت دانه‌پراکنده مشاهده می‌شوند (شکل ۷i). این نسل از پیریت، اغلب به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن دگرسان شده است. براساس مطالعات میکروسکوپی انجام‌شده، مالاکیت، آزوریت، کولیت، گوتیت و هماتیت مهم‌ترین کانی‌های ثانویه موجود در افق‌های کانه‌دار کانسار حمزه‌لو هستند که از دگرسانی کانی‌های سولفیدی اولیه در اثر فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. فرایندهای برون‌زاد به‌طور چشم‌گیری موجب تغییرات کانی‌شناسی بعد از حوادث اصلی کانی‌سازی می‌گردند. این فرایندها در امتداد لایه‌بندی و یا شکستگی‌های سنگ میزبان رخ داده و بیشتر محدود به نقاط غنی از مواد آلی در میکروکنگلومراها و ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی می‌باشند.

سنگ در اثر ورود سیال کانه‌دار (Kirkham, 1989, 1996) باشد. در بافت شبه لامینه‌ای، کالکوسیت به‌صورت نوری، درزه‌های موجود در بین لایه‌بندی سنگ میزبان را پُر کرده است (شکل ۷g). این نوارها هم‌روند با لایه‌بندی سنگ میزبان هستند. بافت شبه لامینه‌ای یکی از شاخص‌های تشخیص شرایط رسوبی-دیاژنزی اولیه بوده و در اثر فشارهای ناشی از وزن لایه‌های بالایی طی دیاژنز تدفینی تشکیل می‌شود. بعد از دیاژنز اولیه و قبل از دیاژنز تأخیری، در سطوح موازی با لایه‌بندی ماسه‌سنگ‌ها، تحت تأثیر فشار لیتواستاتیکی، ذرات قابل حل به‌صورت شیمیایی انحلال پیدا می‌کنند و درزه‌های انحلالی را به‌وجود می‌آورند که کانی‌های سولفیدی و مواد غیرآلی غیرقابل انحلال در درون این درزه‌ها باقی مانده و بافت شبه لامینه‌ای را به‌وجود می‌آورند (Durieux and Brown, 2007).

پیریت به‌میزبان کم و به‌صورت بلورهای ریز با بافت دانه‌پراکنده در همراهی با کالکوسیت در هر دو افق کانه‌دار شمالی و جنوبی کانسار حمزه‌لو حضور دارد. براساس مطالعات بافتی، پیریت‌های موجود در کانسار حمزه‌لو را می‌توان به دو نسل تفکیک کرد. پیریت نسل اول (Py₁) به‌صورت پیریت‌های با بافت فرامبوئیدال قابل مشاهده است. این نسل از پیریت در مراحل اولیه دیاژنز و کمی پس از تنشست رسوبات به‌صورت فرامبوئیدال از ژل سولفیدی متبلور می‌شود (Durieux and Brown, 2007). این بافت بیانگر تنشست هم-زمان با رسوب‌گذاری تا ابتدای مرحله دیاژنز با درجه حرارت ۲۰ الی ۶۰ درجه سانتی‌گراد و pH نزدیک به خنثی است (Love and Brockley, 1973). این پیریت‌ها در اثر فرایندهای باکتریایی تولید شده و از لحاظ زمانی قبل از مرحله اصلی کانی‌سازی قرار دارند. به‌طور معمول، پیریت‌های فرامبوئیدال در



شکل ۷- کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانه‌ها در کانسار حمزه‌لو، (a و b) کالکوسیت جانشین‌شده در قالب قطعات فسیل گیاهی، (c) کالکوسیت جانشین‌شده به‌جای پیریت فرامبوئیدال، (d) کالکوسیت با بافت عدسی‌شکل، (e) کالکوسیت با بافت دانه‌پراکنده، (f) کالکوسیت با بافت سیمان بین دانه‌ای، (g) کالکوسیت (دگرسان‌شده به مالاکیت) با بافت شبه لامینه‌ای، (h) پیریت نسل اول با بافت فرامبوئیدال که توسط کالکوسیت جانشین شده‌اند و (i) پیریت‌های دانه‌پراکنده بی‌شکل نسل دوم. تصاویر میکروسکوپی در نور بازتابی تهیه شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Az: آزوریت، Cct: کالکوسیت، Cv: کولیت، Mlc: مالاکیت، Py: پیریت).

Fig. 7. Mineralogy and texture of ore minerals at Hamzelou deposit, (a-b) chalcocite replaced plant fossils, (c) chalcocite replaced framboidal pyrite, (d) chalcocite with lens-shaped texture, (e) chalcocite with disseminated texture, (f) chalcocite with cemented texture, (g) chalcocite (altered to malachite) with solution seams texture, (h) the first generation of pyrite with framboidal texture which replaced by chalcocite, and (i) disseminated and anhedral grains of the second generation of pyrite. All photomicrographs are taken in reflected light. Mineral abbreviations from Whitney and Evans 2010; Az: Azurite, Cct: Chalcocite, CV: Covellite, Mlc: Malachite, Py: pyrite).

داده‌های زمین‌شیمیایی

نتایج تجزیه‌های شیمیایی به‌دست آمده از نمونه‌های کانسار حمزه‌لو در جدول ۱ آورده شده است. الگوی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانسار و ماسه‌سنگ‌های قرمز (پهنه قرمز اکسیدان) و خاکستری (پهنه شسته-شده) بدون کانه‌زایی در کانسار حمزه‌لو که نسبت به کندریت (Thompson, 1989; Sun and McDonough, 1982) و شیل استرالیا (Taylor and

McLennan, 1985) به‌هنجار شده‌اند، در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود الگوی این عناصر برای نمونه‌های کانسار و ماسه‌سنگ‌های بدون کانه‌زایی مشابه است با این تفاوت که نمونه‌های کانسار نسبت به ماسه‌سنگ‌های بدون کانه‌زایی، تمرکزهای به نسبت پایین‌تری از عناصر کمیاب و کمیاب خاکی دارند.

جدول ۱- نتایج تجزیه‌های شیمیایی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای نمونه‌های ماسه‌سنگی و کانسار حمزه‌لو. تمامی داده‌ها بر حسب گرم در تن می‌باشند.

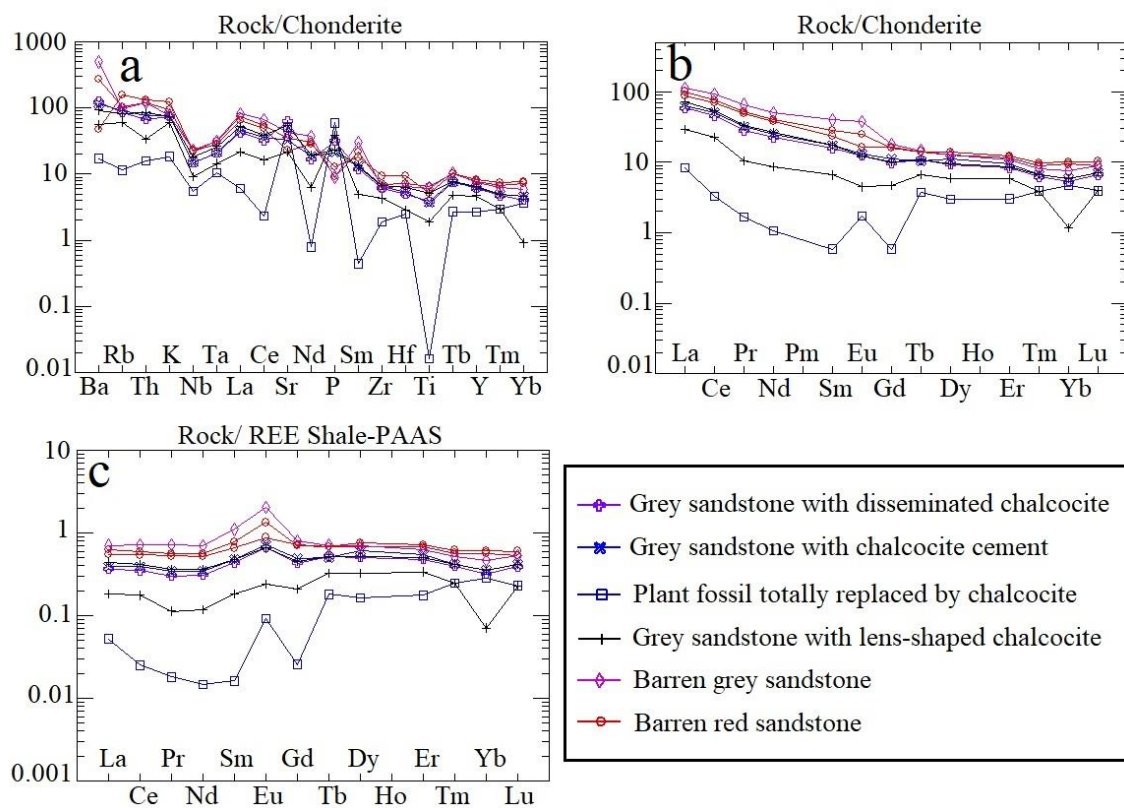
Table 1. Geochemical data of trace and rare earth elements for sandstone and mineralized samples from the Hamzelou deposit. All data in ppm.

	Ba	Ce	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Gd	Hf	K
D.L.	1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.03	0.1	0.05	0.1	0.04
H-1	851	28	1.6	>5%	2.38	1.37	0.72	2.02	0.99	8,990
H-4	799	31	1.70	>5%	2.85	1.56	0.77	2.30	1.06	9,346
H-11	1,858	47	1.80	210	3.21	1.94	1.45	3.27	1.45	11,155
H-28	3,419	57	1.80	33	3.25	1.80	2.20	3.77	1.28	9,310
H-31	325	43	3.60	19	3.54	2.05	0.95	3.33	1.88	14,742
H-45	638	33	1.50	>5%	2.40	1.42	0.71	2.12	1.25	8,983
H-47	118	2	0.50	>5%	0.76	0.50	0.10	0.12	0.50	2,205
H-48	383	14	1.10	>5%	1.51	0.96	0.26	0.97	0.57	7,156
	La	Lu	Nb	Nd	P	Pb	Pr	Rb	S	Sm
D.L.	0.1	0.01	0.1	0.3	0.01	0.1	0.02	0.1	0.02	0.05
H-1	14	0.17	5.2	10.5	1,467	14.00	2.68	30	6,324	2.43
H-4	15	0.18	5.20	11.70	963	11	3.04	32	5,088	2.66
H-11	24	0.23	7.90	19	419	17	5	36	619	4.36
H-28	27	0.23	8	23.60	413	101	6.34	34	1,125	6.13
H-31	21	0.26	7.70	17.70	590	11	4.65	55	554	3.63
H-45	17	0.18	6.30	12.30	1,058	25	3.16	29	13,957	2.67
H-47	2	0.10	1.90	0.50	2,733	222	0.16	4	>3%	0.09
H-48	7	0.10	3.20	4	1,778	54	1.00	21	12,054	1.01
	Sr	Ta	Tb	Th	Ti	Tm	Y	Yb	Zn	Zr
D.L.	0.5	0.1	0.01	0.2	0.01	0.01	0.1	0.05	1	0.1
H-1	738.9	0.42	0.40	2.85	2,369	0.16	12.2	0.9	34	42
H-4	386	0.42	0.39	3.17	2,284	0.17	12.7	1	37	44
H-11	410.6	0.63	0.53	5.04	3,994	0.23	15.6	1.60	55	48
H-28	508.70	0.63	0.55	5.09	3,816	0.21	14.90	1.30	49	43
H-31	265.5	0.57	0.53	5.51	3,150	0.25	16.4	1.70	64	64
H-45	647.80	0.52	0.40	3.52	3,162	0.17	12.80	1.00	31	46
H-47	601.70	0.21	0.14	0.66	10	0.10	5.30	0.80	13	13
H-48	253.00	0.29	0.25	1.42	1,177	0.10	9.40	0.20	54	29

H-1: Grey sandstone with disseminated chalcocite, H-4: Grey sandstone with chalcocite cement, H-28: Barren grey sandstone, H-11 and H-31: Barren red sandstone, H-47: Plant fossil totally replaced by chalcocite, H-45 and H-48: Grey sandstone with lens-shaped chalcocite

غلظت عناصر کمیاب از ماسه‌سنگ قرمز به سمت ماسه‌سنگ خاکستری و نمونه‌های کانه‌دار کمتر شده است (شکل ۸a) که این امر می‌تواند با خروج این عناصر طی فرایندهای شسته‌شدن و کانه‌زایی تفسیر شود. در مقایسه با نمونه‌های ماسه‌سنگی، تهی‌شدگی مشخصی در غلظت عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های کانه‌دار همراه با آنومالی ضعیف Eu دیده می‌شود (شکل ۸b). نمونه فسیل گیاهی جانشین شده توسط کالکوسیت تهی‌شدگی بیشتری در عناصر کمیاب خاکی همراه با آنومالی مثبت Eu را نشان می‌دهد. آنومالی منفی Eu در نمونه‌های کانه‌دار (به‌جز نمونه فسیل گیاهی) می‌تواند در ارتباط با شرایط احيائي سیال کانه‌ساز و محیط نهشت کانه‌ها باشد (Dokuz et al., 2005; Wang et al., 2006). به اعتقاد Alderton و همکاران (۱۹۸۰)، به‌دست آمدن یا از دست رفتن عناصر کمیاب خاکی طی دگرسانی توسط چند عامل کنترل می‌شود: ۱- تمرکز عناصر کمیاب خاکی در کانی‌های واکنش‌دهنده، ۲- پایداری نسبی کانی‌ها در برابر سیال، ۳- جذب عناصر کمیاب خاکی آزادشده

طی دگرسانی توسط کانی‌های ثانویه، ۴- غلظت عناصر کمیاب خاکی در سیالات و ۵- توانایی سیال به‌منظور به حرکت در آوردن عناصر کمیاب خاکی. بر این اساس، به نظر می‌رسد در منطقه حمزه‌لو، کانی‌شناسی کانی‌های ثانویه تشکیل‌شده طی دگرسانی و ماهیت احيائي سیالات کانه‌ساز (وجود آنومالی منفی Eu) در تمرکز و تحرک عناصر کمیاب خاکی نقش داشته است. الگوی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های ماسه‌سنگی و کانه‌دار کانسار حمزه‌لو که نسبت به شیل استرالیا (Taylor and McLennan, 1985) به‌هنگار شده‌اند، در شکل ۸c نشان داده شده است. براساس این شکل نیز نمونه‌های کانه‌دار در مقایسه با نمونه‌های ماسه‌سنگی، تهی‌شدگی مشخصی در غلظت عناصر کمیاب خاکی را نشان می‌دهند. در مقایسه با سایر نمونه‌های کانه‌دار، نمونه فسیل گیاهی جانشین شده توسط کالکوسیت، تهی‌شدگی بیشتری در عناصر کمیاب خاکی و الگوی متفاوت‌تری دارد.



شکل ۸- (a) الگوهای چند عنصری به‌نجارشده نسبت به کندریت (Thompson, 1982) برای نمونه‌های کانه‌دار و ماسه‌سنگ‌های قرمز و خاکستری بدون کانه‌زایی در کانسار حمزه‌لو، (b) الگوهای عناصر کمیاب خاکی به‌نجارشده نسبت به کندریت (Sun and McDonough, 1989) برای نمونه‌های کانه‌دار و ماسه‌سنگ‌های قرمز و خاکستری بدون کانه‌زایی در کانسار حمزه‌لو، (c) الگوهای عناصر کمیاب خاکی به‌نجارشده نسبت به شیل استرالیا (Taylor and McLennan, 1985) برای نمونه‌های کانه‌دار و ماسه‌سنگ‌های قرمز و خاکستری بدون کانه‌زایی در کانسار حمزه‌لو.

Fig. 8. (a) Chondrite-normalized multi-element patterns (Thompson, 1982) for the mineralized and barren red and grey sandstone samples in the Hamzelou deposit, (b) chondrite-normalized REE patterns (Sun and McDonough, 1989) for the mineralized and barren red and grey sandstone samples in the Hamzelou deposit. (c) Post-Archean Average Australian Shale (PAAS)-normalized REE patterns (Taylor and McLennan, 1985) for the mineralized and barren red and grey sandstone samples in the Hamzelou deposit.

به این مسئله دامن زده است. با این وجود، با در نظر گرفتن اثرات این فرایندها و بررسی بخش‌هایی که کمتر دچار دگرسانی شده‌اند، توالی پاراژنتیک کانی‌ها در کانسار حمزه‌لو را می‌توان به ۳ مرحله قبل از کانه‌زایی، کانه‌زایی و پس از کانه‌زایی تفکیک کرد (شکل ۹).

توالی پاراژنتیک و مراحل تشکیل و تحول کانه‌ها

با توجه به تاثیر فرایندهای برون‌زاد، بسیاری از کانی‌های اولیه و بافت آنها در کانسار حمزه‌لو از بین رفته است. از این رو، ارائه یک سکانس پاراژنتی دقیق برای این کانسار تا حدودی مشکل است. عدم دسترسی به نمونه‌های عمقی نیز

	Pere-Mineralization		Mineralization		Post-Mineralization
	Diagenesis				
	Syn-sedimentary	Early diagenesis	Middle diagenesis	Late diagenesis	Supergene
Redding	---	---			
Calcite cement		---			
Organic destruction and acidic solution		---	---		
Porosity generation		---	---		
Bleaching			---		
Compaction				---	
Fracture				---	
Iron Oxide		---			
Pyrite-I	---	---			
Pyrite-II			---		
Chalcocite			---		
Covellite					---
Malachite					---
Azurite					---
Atacamite					---
Goethite					---
Hematite					---
Textures	Framboidal				
	Solution seams		---		
	Grain cement		---		
	Impregnation		---		
	Disseminated		---		
	Replacement		---		

شکل ۹- توالی پاراژنتیک و ساخت و بافت مواد معدنی و باطله در کانسار حمزه‌لو.

Fig. 9. Paragenetic sequences and structure and texture of gangues and ore minerals at the Hamzelou deposit.

طریق گسل‌های هم‌زمان با رسوب‌گذاری و تخلخل و نفوذپذیری سنگ‌های - میزبان درون رسوبات به چرخش در می‌آیند. این سیالات هنگام عبور از رسوبات قرمز منطقه، مس و سایر فلزات آزاد شده از دانه‌های سیلیکاته ناپایدار را شسته و همراه خود به درون افق‌های احیایی حمل می‌کنند (Hitzman et al., 2005; Cox et al., 2007). مهم‌ترین شکل انتقال عناصر فلزی در محلول‌های کانه‌دار، کمپلکس‌های کلریدی می‌باشد (Rose, 1976). سیالات مزبور ضمن عبور از بخش‌های غنی از مواد آلی (فسیل گیاهی) تحت تأثیر احیای باکتریایی سولفات موجود در آن و تولید H_2S باعث گسترش شرایط احیایی، شسته شدن اکسیدهای آهن موجود در بخش اکسیدان (Chan et al., 2005; Parry et al., 2004; Thorson, 2004; MacIntyre et al., 2005; 2004) و در نتیجه دگرسانی شسته شدن (رنگ خاکستری یا سبز) سنگ می‌گردند (Azizi et al., 2011; Mahdavi et al., 2005; Parry et al., 2004; Thorson, 2004; MacIntyre et al., 2005; 2004). فعالیت‌های باکتریایی باعث تولید اسید و کاهش pH محیط گشته، در نتیجه سیمان کلسیتی و حتی کانی‌ها تجزیه می‌شوند و تخلخل در رسوبات افزایش می‌یابد. این سیال احیایی که دارای کمپلکس‌های بی‌سولفیدی H_2S و HS^- است، اکسیدهای آهن موجود در اطراف ذرات را شسته و در مجاورت با H_2S ، پیریت دیاژنتیکی ریز و خودشکل (پیریت نسل دوم) دانه‌پراکنده را به وجود می‌آورد.

در مرحله کانه‌زایی، شرایط مناسب جهت کانه‌زایی فراهم می‌شود. حضور قطعات فسیل گیاهی و مواد آلی باعث احیای محیط در ماسه‌سنگ‌های موجود در کانال‌های دیرین (Jowett, 1989) و تنشست سولفیدهایی نظیر کالکوسیت و پیریت (نسل دوم) می‌شود. این کانی‌ها جانشین ساختارهای سلولی و آوندهای قطعات فسیل گیاهی و پیریت‌های فرامبوئیدال می‌شوند. عامل اصلی کانه‌زایی در این مرحله ورود سیال اکسیدان دارای کمپلکس‌های کلریدی به محیط احیایی است. بافت‌های تشکیل شده در این مرحله شامل بافت دانه‌پراکنده، شبه لامینه‌ای، عدسی‌شکل، جانشینی و سیمان بین‌دانه‌ای درون میکروکنگلومرها و ماسه‌سنگ‌ها می‌باشد.

مرحله قبل از کانه‌زایی شامل مراحل هم‌زمان با دیاژنز و دیاژنز اولیه در حین تشکیل ماسه‌سنگ‌ها و میکروکنگلومری میزبان کانه‌زایی می‌باشد. کمی پس از تنشست رسوبات، در مراحل اولیه دیاژنز، ژل‌های سولفیدی همراه با ذرات آواری تنشست می‌یابند (Durieux and Brown, 2007). این ژل‌های سولفیدی اندکی بعد متبلور شده و پیریت‌های فرامبوئیدال نسل اول را به وجود می‌آورند. در مراحل ابتدایی تدفین رسوبات، کانی‌های آهن‌دار موجود در رسوبات سازند قرمز بالایی (مانند بیوتیت) هیدرولیز می‌شوند و آهن موجود در ساختار شبکه‌ای آنها به صورت اکسید آهن اولیه خارج شده و ماده اولیه تشکیل هماتیت را فراهم می‌سازد (Walker, 1989; Azizi et al., 2018). هماتیت به صورت نواری باریک اطراف قطعات آواری به ویژه ذرات کوارتز را احاطه کرده و باعث قرمز شدن رسوبات می‌گردد (Walker, 1989). فرایند قرمزشدگی تا اواخر مرحله دیاژنز اولیه ادامه دارد. این فرایند نسبتاً طولانی با گذر زمان باعث تیره تر شدن رسوبات قرمز رنگ می‌شود (Walker, 1989). کربنات کلسیم موجود در آب‌های درون حفره‌ای با ادامه فرایند دیاژنز در مرحله دیاژنز اولیه باعث تشکیل سیمان کلسیتی، سیمانی شدن رسوبات و رشد مجدد کوارتز خواهد شد (Flint, 1989; Durieux and Brown, 2007). منشأ دیگر کلسیم برای تشکیل سیمان کلسیتی می‌تواند کلسیم حاصل از تخریب فلدسپات‌ها باشد (Flint, 1989). در اواخر مرحله دیاژنز اولیه، pH محیط کاهش پیدا کرده و باعث انحلال اسیدی سیمان بین دانه‌ها و ایجاد تخلخل و نفوذپذیری می‌شود (Walker, 1989). اسیدی شدن محیط در اثر تخریب قطعات آواری گیاهی موجود در توالی رسوبی و اکسیداسیون آنها می‌باشد (Flint, 1989).

مرحله کانه‌زایی مرتبط با مرحله قبل از تدفین عمیق در دیاژنز میانی می‌باشد. در این مرحله از فرایند دیاژنز، سیالات درون سازندی اکسیدان و گرم با شوری بالا و کلردار که از واحدهای تبخیری (لایه‌های گچ و نمک موجود در توالی سنگی سازند قرمز بالایی و گنبد نمکی چهرآباد) منشأ گرفته‌اند، از

از نظر محیط تکتونیکی، کانسارهای مس رسوبی تیب Redbed در نواحی مختلفی مانند ریفت‌ها، حوضه‌های کششی و حوضه‌های فورلندی (Cox et al., 2007) و حوضه‌های مولاسی قبل و بعد از کوه‌زایی (Hayes et al., 2015) تشکیل می‌شوند. براساس مطالعات انجام‌شده در منطقه و با توجه به تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آنالیزهای مودال و زمین‌شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب (Ghasemlou, 2018)، وجود کوارتزهای چندبلوری و مقادیر بالای خردسنگ می‌توان گفت که ماسه‌سنگ‌های میزبان کانه‌زایی در کانسار حمزه‌لو، در یک حوضه فورلندی حاشیه فعال قاره‌ای تهنشست پیدا کرده‌اند. Ballato و همکاران (۲۰۱۶) نیز محیط تکتونیکی فورلندی حاشیه فعال قاره-ای را برای ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی در شمال‌باختر ایران پیشنهاد کرده‌اند.

به‌طور معمول، کانسارهای مس با میزبان رسوبی در محیط‌هایی نظیر محیط‌های رودخانه‌ای، دلتایی، ساحلی، دریاچه‌ای و یا دریایی کم‌عمق و حوضه‌های تبخیری مرتبط با آنها تشکیل می‌شوند (Cox et al., 2007; Hayes et al., 2015).

مرحله پس از کانه‌زایی شامل مرحله دیانز تاخیری و در ادامه بالآمدگی و هوازدگی است. طی دیانز تاخیری، در اثر فرایند تدفین عمیق، رسوبات فشرده شده و تخلخل آنها کاهش می‌یابد. درزه و شکستگی‌های ثانویه هم‌رند با سیستم‌های گسلی منطقه طی فرایندهای تکتونیکی (بالآمدگی) ایجاد می‌شوند. وجود این درزه و شکستگی‌ها باعث تسریع حرکت آب‌های جوی و افزایش اثر فرایندهای برون‌زاد می‌شود. در مرحله برون‌زاد، کانی‌های تشکیل‌شده در مراحل قبلی به کانی‌های ثانویه مانند مالاکیت، آزوریت، کولیت، آتاکامیت، همتیت و گوتیت تبدیل می‌شوند.

تیپ کانه‌زایی

در جدول ۲، ویژگی‌های کانسار حمزه‌لو با انواع مختلف کانسارهای مس با میزبان رسوبی مقایسه شده است. با توجه به داده‌های این جدول می‌توان نتیجه گرفت ویژگی‌های کانسار حمزه‌لو شباهت زیادی با کانسارهای مس رسوبی تیب Redbed از جمله موقعیت تکتونیکی، محیط تهنشست، سنگ میزبان، سن، ژئومتری، ساخت و بافت، کانی‌شناسی، دگرسانی و عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی دارد.

جدول ۲- مقایسه ویژگی‌های کانسار حمزه‌لو با تیپ‌های مختلف کانسارهای مس با میزبان رسوبی.

Table 2. Comparison of main characteristics of Hamzelou deposit with different types of sediment-hosted copper deposit.

	Sediment- hosted stratiform copper deposit			Hamzelou deposit
	Redbed	Sandstone deposits (Revelt)	Reduced-facies	
Age	Neoproterozoic- Late Mesozoic- Early Cenozoic		Late- middle Neoproterozoic	Miocene
Tectonic setting	Rift and post-orogenic molass basins	Rift	Aulacogens and continental rift	Foreland basins and active continental margins
Deposition setting	Coastal environment, delta, shallow rivers environment	Delta, basin playa, coastal environment	Tidal	Meander rivers near the coastal and tidal environments
Host rock	Redbed clastic sequence contains conglomerate, sandstone and marl	Thickly bedded sandstones, lesser extent siltstone and shale	Dark to gray shale, siltstone, claystone, carbonaceous dolomite	Terrigenous clastic sequence contains alternation of sandstone and marl
Geometry	Stratabound with bedding of lenzoid horizon	Plate to lenzoid concordant with bedding	Sheet bed and lenzoid	Stratabound with bedding of lenzoid horizon
Texture and structure	Disseminated, replacement, pseudo-luminal, cemented	Disseminated, replacement	Disseminated, replacement, pseudo-luminal, colloform, cemented	Replacement, disseminated, pseudo-luminal, cemented
Mineralogy	Chalcocite, bornite, pyrite, natural copper and silver, galena, sphalerite	Chalcocite, bornite, chalcopyrite, natural silver, galena and sphalerite	Chalcocite, bornite, galena, chalcopyrite, pyrite, natural copper, sphalerite	Chalcocite, pyrite
Dominant alteration	Bleaching	Bleaching	Bleaching and dolomitization	Bleaching
Copper source	Redbed sequence	Redbed sequence	Redbed sequence	Redbed sequence
Accompanying elements	Ag-Pb-Zn-U±Co	Ag-Pb-Zn±(Mo-V-Re)	Co-Ag-Pb-Zn-Ge+Au	Ag-Co-Cd
Example	Nacimiento, Corocoro	Dzhezhasgan, Spar Lake	Kupferschiefer, Zambia, Kamoto	—
Reference	Woodward et al. (1974) Avila-Santos (1990) Hayes et al. (2015)	Gablina (1981) Adkins (1993) Cox et al. (2007)	Annels (1989) Oszczepalski (1999) Cox et al. (2007) Hitzman et al. (2005) Hayes et al. (2015)	Ghasemlou (2018); This study

آمده است (Aghanabati, 2004; Ballato et al., 2016). در اثر فرایندهای هوازدگی و فرسایش، رسوبات آواری فراوانی از این ارتفاعات جدا شده و در حوضه‌های رسوبی پشت کمان ماگمایی به صورت واحدهای تخریبی و تبخیری سازند قرمز بالایی ته‌نشست یافته‌اند. این رسوبات در محیط‌های رودخانه‌ای و جزر و مدی به صورت توالی‌های ریزشونده همراه با قطعات آواری چوبی و گیاهی تشکیل شده است (شکل ۱۰). با آغاز دیاژنز اولیه، آهن موجود در شبکه کانی‌های ناپایدار سیلیکاته (مانند بیوتیت) موجود در این رسوبات در اثر فرایند هیدرولیز به صورت هیدروکسید آهن فریک آزاد می‌شود. هیدروکسیدهای آهن در پیرامون ذرات آواری تجمع پیدا کرده و موجب قرمز شدن رسوبات در مراحل اولیه دیاژنز می‌شود. همچنین، بافت قطعات آواری گیاهی حاوی مقدار قابل توجهی H_2O ، C و S است (Azaraien et al., 2017). در اثر تجزیه این قطعات، اسید هومیک تولید شده و این اسید باعث انحلال و تبدیل ذرات آواری فلدسپات و دیگر سیلیکات‌ها به کانی‌های رسی می‌شود. از آنجاییکه این کانی‌های سیلیکاته در ساختار خود دارای مقادیری مس و سایر فلزات هستند (Walker, 1989)، این فرایند موجب خروج این عناصر از شبکه این کانی‌ها می‌شود. مس و دیگر فلزات توسط هیدروکسیدهای آهن و اسمکتیت موجود در رسوبات جذب می‌گردد (Mahdavi et al., 2011). وجود بافت جانیشینی بیانگر این است که کانه‌زایی در مرحله دیاژنز اولیه رخ نداده است.

مرحله کانه‌زایی: با افزایش دیاژنز و تدفین رسوبات، قطعات آواری گیاهی موجود در رسوبات باعث احیایی شدن محیط (Azaraien et al., 2017) و افزایش تخلخل و نفوذپذیری ماسه‌سنگ‌ها می‌شود (Thorson, 2004). در مراحل بعدی دیاژنز، اکسیدهای آهن آمورف به هماتیت تبدیل شده و اسمکتیت نیز با گذشت زمان و افزایش درجه حرارت به ایلیت تبدیل می‌شود. این عمل سبب آزادسازی مجدد مس و سایر فلزات می‌شود (Brown, 2003). این عناصر توسط سیال اکسیدان کانه‌ساز حمل می‌گردند. این سیال در اثر آب-زدایی و انحلال کانی‌های تبخیری و فشار لایه‌های فوقانی حاصل شده است. سیال اکسیدان کانه‌ساز، غنی از کمپلکس‌های کلریدی و شوری متوسط تا بالا بوده و در اثر گرادیان حرارتی ایجاد شده توسط دیاپیرسیم گنبدی نمکی منطقه (مانند گنبد نمکی چهرآباد)، از طریق گسل‌های هم‌زمان با رسوب‌گذاری و تخلخل و نفوذپذیری سنگ‌های میزبان در رسوبات سازند قرمز به چرخش در می‌آیند (Azizi et al., 2018). وجود کمپلکس‌های کلریدی کمک شایانی به حمل و جابه‌جایی مس و دیگر فلزات توسط این سیال می‌کند. در اثر فشار لایه‌های بالایی، آب درون سازندی خارج شده و تمرکز بالای مواد آلی باعث احیایی شدن این سیال می‌شود. باکتری‌های بی‌هوازی، سولفات موجود در آب درون سازندی را به H_2S احیاء کرده و باعث دگرسانی شسته‌شدن در افق‌های غنی از فسیل گیاهی شده و گوگرد تولید می‌شود. همچنین، نهشته‌های دانه‌ریز با ایجاد لایه پوششی مانع تبادل اکسیژن شده و شرایط را برای احیایی کردن محیط فراهم می‌کنند. این دگرسانی موجب می‌گردد که اکسیدهای آهن از سنگ شسته شده و یا به صورت پیریت دیاژنتیکی ته‌نشست پیدا کنند.

در مرحله دیاژنز میانی و کمی پس از شروع فرایند شسته‌شدن، سیال اکسیدان کانه‌ساز وارد افق‌های احیایی غنی از مواد آلی و فسیل گیاهی شده و در اثر برخورد با سیال احیایی این بخش، کمپلکس‌های کلریدی حامل فلزات آن ناپایدار و سولفیدهای فلزی ته‌نشست می‌یابند. ته‌نشست کانی‌های سولفیدی مس در اثر برخورد شورابه‌های مس‌دار با محیط احیایی با Eh پایین می‌باشد (Rose, 1976; Brown, 2003). به علت شرایط احیایی ایجاد شده توسط بقایای گیاهی در مرحله شسته‌شدن، سولفیدهای فلزی جایگزین بافت‌ها و

ویژگی‌هایی مانند وجود رخساره‌های ماسه‌سنگی-گل‌سنگی، حضور قابل ملاحظه مارن‌های قرمز رنگ، ماسه‌سنگ‌های ناپایدار و نابالغ خاکستری و قرمز، چینه‌بندی متقاطع، توالی‌های ریزشونده به سمت بالا و حضور آثار گیاهی در منطقه حمزه‌لو، می‌توان محیط تشکیل سنگ میزبان این کانسار را محیط‌های نزدیک به منشاء تشکیل مانند رودخانه‌های ماندندی دارای پیچش زیاد تا محیط‌های جزر و مدی در نظر گرفت (Ghasemlou, 2018). کانه‌زایی در این کانسار، در قسمت زیرین کانال‌های قدیمی رودخانه‌ای، در قسمت‌هایی که مواد آلی وجود دارد، رخ داده است. سنگ میزبان کانسارهای مس رسوبی تیپ Redbed معمولاً کنگلومرا و ماسه‌سنگ‌ها (به‌ویژه لیتیک‌آرکوز و آرکوز) هستند (Hayes et al., 2015). این دسته از کانسارها در فصل مشترک ماسه‌سنگ و کنگلومرای قرمز اکسیدان و خاکستری احیایی تشکیل می‌گردند (Hitzman et al., 2005, 2010). کانه‌زایی مس در کانسار حمزه‌لو درون میکروکنگلومرا و ماسه‌سنگ‌های خاکستری احیایی سازند قرمز بالایی رخ داده است. ماسه‌سنگ‌ها از نوع فلدسپاتیک لیت‌آرنایت و لیت‌آرنایت (عمدتاً چرت‌آرنایت) هستند (Ghasemlou, 2018). در بیشتر کانسارهای مس با میزبان رسوبی، ماده معدنی به صورت سیمان بین دانه‌ای، شبه لامینه‌ای و عدسی‌های چینه‌کران هم‌روند با لایه‌بندی سنگ‌های میزبان در اطراف بقایای گیاهی متمرکز شده و معمولاً جانشین قطعات تنه گیاه یا سلول‌های گیاهی می‌شوند (Brown, 2003; Cox et al., 2003; Hayes et al., 2015). کانه‌زایی در کانسار حمزه‌لو نیز به صورت شبه لامینه‌ای و عدسی‌شکل هم‌روند با لایه‌بندی میکروکنگلومرا و ماسه‌سنگ‌های میزبان رخ داده است.

در کانسارهای مس با میزبان رسوبی، حرکت سیالات کانه‌ساز عامل اصلی دگرسانی در این کانسارها می‌باشد (Hayes et al., 2015). دگرسانی اصلی مشاهده شده در بیشتر این کانسارها، دگرسانی شسته‌شدن سنگ میزبان می‌باشد که به صورت سبز، سفید و یا خاکستری رنگ مشاهده می‌شود (Hitzman et al., 2005; Cox et al., 2007). در کانسار حمزه‌لو نیز پهنه دگرسانی شسته‌شده در میکروکنگلومرا و ماسه‌سنگ‌های میزبان کانه‌زایی رخ داده است. این پهنه با ستبرای ۵ تا ۱۰ متر و گسترش طولی زیاد، به وسیله لایه‌های قرمز رنگ پهنه اکسیدان احاطه شده است.

براین اساس می‌توان گفت که کانسار مس حمزه‌لو در دسته کانسارهای مس رسوبی تیپ Redbed قرار گرفته و از این نظر شباهت زیادی با دیگر کانسارهای مس رسوبی تیپ Redbed ایران مانند چهرگان، تازه‌کند، نهند-ایوند، تسوج، اورتاسو، چهرآباد، چرلاتقوش و قزلجه، زاغ‌لو، آوج و مارکشه دارد (Sephri Rad and Fathjo, 2010; Mahdavi et al., 2011; Enayati Kolaie et al., 2016; Sadati et al., 2016; Rajabpour et al., 2017; Azizi et al., 2018; Haghghi et al., in press; Rajabzadeh et al., in press).

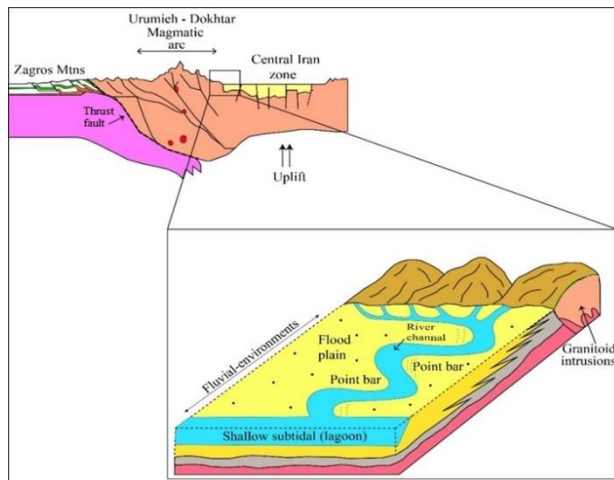
مدل تشکیل کانسار حمزه‌لو

با توجه به ویژگی‌های بیان شده و مدل‌های ارائه شده توسط Hitzman و همکاران (۲۰۰۵)، Cox و همکاران (۲۰۰۷) و Hayes و همکاران (۲۰۱۵) برای تشکیل کانسارهای مس رسوبی تیپ Redbed و تشابه کانی‌شناسی، سنگ میزبان و عامل احیاء در کانسار حمزه‌لو با این تیپ از کانسارها، مدل تشکیل این کانسار را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

مرحله قبل از کانه‌زایی: طی میوسن با ادامه روند بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس در ایران، حوضه‌های برخوردی و کمان‌های ماگمایی تشکیل شده - است. در این زمان، هم‌زمان با ادامه روند کوه‌زایی و شکل‌گیری کمان ماگمایی ارومیه-دختر، ارتفاعات بلند و حوضه‌های کششی پشت کمان ماگمایی به وجود

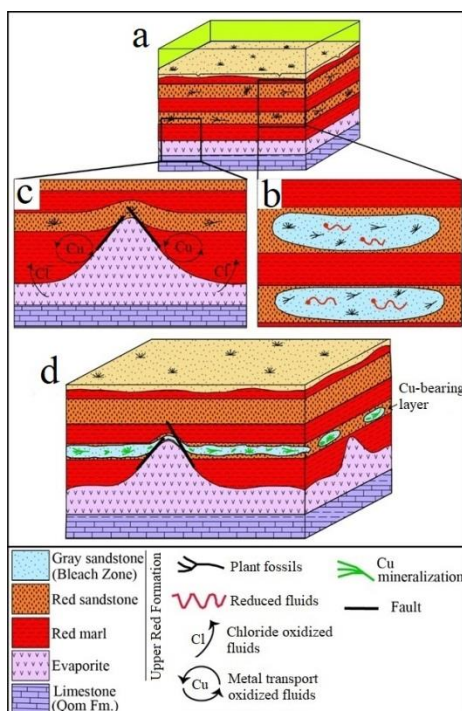
صورت گرفته و در اثر بالآمدگی، واحدهای سنگی در سطح زمین برون زد می- یابند. این برون زدها در معرض فرسایش و هوازدگی قرار می گیرند و باعث تشکیل کانی های برون زاد و اکسیدی می گردند. مدل تشکیل کانسار حمزه لو در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

سلول های گیاهی می شوند. حفظ شدگی ساختمان بافتها و سلول های گیاهی جانشین شده توسط سولفیدهای فلزی بیانگر این است که کانه زایی قبل از تدفین عمقی و بالآمدگی رسوبات ایجاد شده است زیرا تدفین عمقی باعث از بین رفتن شبکه سلولی در فسیل گیاهی بدون کانه زایی می شود (Woodward et al., 1974). در مرحله بعد از کانه زایی، تدفین عمقی



شکل ۱۰- تصویر شماتیک از موقعیت تکتونیکی و محیط رسوبی سازند قرمز بالایی در منطقه حمزه لو در مرحله قبل از کانه زایی (Ghasemlou, 2018).

Fig. 10. Schematic diagram showing tectonic setting and sedimentary environment of the Upper Red Formation in the Hamzelou area at Pre-mineralization stage (Ghasemlou, 2018).



شکل ۱۱- مدل شماتیکی از مراحل تکامل کانه زایی در کانسار حمزه لو، (a) ته نشست رسوبات تبخیری و آواری سازند قرمز بالایی همراه با قطعات گیاهی، (b) ادامه فرایند دیازنز و تدفین عمقی و خروج آب های درون سازندی. این سیالات در مجاورت قطعات فسیل گیاهی، احیایی شده و باعث دگرسانی شسته شدن در لایه ها می گردند، (c) دیاپیریسم واحدهای تبخیری و تشکیل سیالات اکسیدان حاوی کمپلکس های کلریدی. این سیالات سبب شسته شدن مس از رسوبات قرمز رنگ می شوند و (d) اختلاط سیالات اکسیدان و احیایی و ته نشست سولفیدها در لایه های شسته شده.

Fig. 11. Schematic representation of mineralization evolution stages at the Hamzelou deposit, (a) deposition of evaporate and terrigenous sediments of Upper Red Formation along with plant fragments, (b) diagenesis and deep burial processes let to extraction of basinal brines. These fluids were reduced in vicinity of the plant fossils, and caused bleached alteration zones. (c) Diapirism of evaporate units and formation of oxidizing fluids containing chloride complexes. These fluids leached copper from red sediments. (d) Mixing of reduced and oxidized fluids and deposition of sulfides in bleached layers.

نتیجه گیری

شواهدی از قبیل محیط تکتونیکی، محیط تشکیل، سنگ میزبان، ژئومتری، ساخت و بافت، کانی شناسی و الگوی دگرسانی‌ها در کانسار حمزه‌لو نشان می‌دهد که این کانسار را می‌توان در دسته کانسارهای مس با میزبان رسوبی تیپ Redbed تقسیم‌بندی کرد. کانه‌زایی مس در این کانسار به شکل سولفیدهای جانشین، شبه لامینه‌ای و عدسی‌شکل درون واحدهای میکروکنگلومرایی و ماسه‌سنگی خاکستری‌رنگ رخ داده و توسط نفوذپذیری سنگ میزبان و وجود بقایای فسیل گیاهی کنترل شده است. مطالعات انجام شده طی سال‌های اخیر در منطقه ماه‌نشان منجر به شناسایی کانسارها و نشانه‌های متعددی از کانه‌زایی‌های مس (سرب- روی) با سنگ میزبان رسوبی

درون ماسه‌سنگ‌های خاکستری سازند قرمز بالایی در این منطقه از ایران شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به کانسارهای اورتاسو، چهارآباد، چرلانقوش، قزلجه، حلب و حمزه‌لو اشاره کرد. این کانه‌زایی‌ها، ارتباط فضایی نزدیکی با واحدهای تبخیری و گنبدی‌های نمکی موجود در سازند قرمز بالایی در این منطقه دارند که می‌بایست در مطالعات اکتشافی مورد توجه قرار گیرد.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش و از سردبیر و داوران محترم مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته به‌خاطر راهنمایی‌های علمی که منجر به غنای بیشتر مقاله حاضر گردیده است، تشکر می‌نمایند.

منابع

- Adkins, A.R., 1993. Geology of the Montanore stratabound Cu-Ag deposit, Lincoln and Sanders Counties, Montana. Belt Symposium III, Program and Abstracts, Whitefish, Montana, USA.
- Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, p. 606 (in Persian).
- Alavi, M., Omid, M., 1976. Geological map of Takab, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Alderton, D.H.M., Pearce, J.A., Potts, P.J., 1980. Rare earth element mobility during granite alteration: evidence from south-east England. *Earth and Planetary Science Letters* 49(1), 149–165.
- Annels, A.E., 1989. Ore genesis in the Zambian Copper belt, with particular reference to the northern sector of the Chambishi basin. In: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett E.C., Kirkham R.V. (Ed.), *Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits*. Geological Association of Canada, Special Paper 36, Canada, pp. 427–452.
- Avila-Santos, W., 1990. Origin of the copper at Corocoro, Bolivia. In: Fontbote, L., Amstutz, G.C., Cardozo, M., Cedillo, E., Frutos J. (Ed.), *Stratabound Ore Deposits of the Andes*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 659–670.
- Azaraien, H., Shahabpour, J., Aminzadeh, B., 2017. Metallogenesis of the sediment-hosted stratiform Cu deposits of the Ravar Copper Belt (RCB), Central Iran. *Ore Geology Reviews* 81(1), 369–395.
- Azizi, H., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M., Siahcheshm, K., 2018. Geology and geochemistry of the sediment-hosted stratabound red bed-type Cu-Pb (Zn-Ag) mineralization in the Dozkand-Moshampa area, NW Zanjan, Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry)* 195(2), 123–143.
- Ballato, P., Cifelli, F., Heidarzadeh, G., Ghassemi, M.R., Wickert, A., Hassanzadeh, J., Dupont-Nivet, G., Baling, P., Sudo, M., Zeilinger, G., Schmitt, A., Mattei, M., Strecker, M., 2016. Tectono-sedimentary evolution of the northern Iranian Plateau: insights from middle-late Miocene foreland basin deposits. *Basin Research* 29(12), 417–446.
- Brown, A.C., 2003. Redbeds: Source of metals for sediment-hosted stratiform copper, sandstone copper, sandstone lead, sandstone uranium vanadium deposits. In: Lentz, D.R. (Ed.), *Geochemistry of sediments and sedimentary rocks: evolutionary considerations to mineral deposit forming environments*. Geological Association of Canada, GeoText, Canada, pp. 121–133.
- Chan, M.A., Bowen, B.B., Parry, W.T., Ormö, J., Komatsu, G., 2005. Red rock and red planet diagenesis: Comparisons of Earth and Mars concretions. *GSA Today* 15(8), 4–10.
- Cox, D.P., Lindsey, D.A., Singer, D.A., Diggles, M.F., 2007. Sediment-hosted copper deposits of the world-deposit models and database. U.S. Geological Survey, Canada, Open-file report 03-107, p. 50.
- Cox, D.P., Lindsey, D.A., Singer, D.A., Moring, B.C., Diggles, M.F., 2003. Sediment-hosted copper deposits of the world-deposit models and database. U.S. Geological Survey, Canada, open-file report 03-107, p. 53.
- Dokuz, A., Tanyolu, E., Genc, S., 2005. A mantle and a lower crust derived bimodal suite in the Yusufeli Artvin area, NE Turkey: Trace element and REE evidence for subduction-related rift origin of Early Jurassic Demirkent intrusive complex. *International Journal of Earth Sciences* 95(3), 370–394.
- Durieux, C.G., Brown, A.C., 2007. Geological context, mineralization, and timing of the Juramento sediment-hosted stratiform copper-silver deposit, Salta district, northwestern Argentina. *Mineralium Deposita* 42(8), 879–899.
- Enayati Kolaie, S., Yazdi, M., Mokhtari, M.A.A., 2016. Geology, mineralogy and genesis of stratiform Cu mineralization in the Tazeh-Kand area, Northeast of Tabriz. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 25(99), 195–208 (in Persian with English abstract).
- Flint, S.S., 1989. Sediment-hosted stratabound copper deposits of the Central Andes. In: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C., Kirkham, R.V. (Ed.), *Sediment-hosted stratiform copper deposits*. Geological Association of Canada, Special Paper 36, Canada, pp. 371–400.
- Folk, R.L., 1980. *Petrology of sedimentary Rocks*. Austin, Texas, Hemphill, p. 159.
- Gablina, I.F., 1981. New data on formation conditions of the Dzhezkazgan copper deposit. *International Geology Review* 23(11), 1303–1311.
- Ghasemlou, A., 2018. Geology, geochemistry and genesis of sediment-hosted Hamzelou Cu mineralization (NE Mahneshan). M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

- Ghorbani, M., 2013. The Economic Geology of Iran: Mineral Deposits and Natural Resources. Springer, London, p. 569.
- Haghighi, A., Nabatian, Gh., Kouhestani, H., Azimzadeh, A.M., Zohdi, A., in press. Mineralization, mineralogy, structure, texture and genesis of Ortasu Pb-Zn deposit, NW Zanjan. *Journal of Economic Geology* (In Persian with English abstract).
- Hassasi, E., 2015. Final Exploration Report of Cu in Mehrabad Area. Industry, Mine and Trade Organization of Zanjan, Zanjan, p. 85 (in Persian).
- Hayes, T.S., Cox, D.P., Piatak, N.M., Seal, R.R., 2015. Sediment-hosted stratabound copper deposit model. U.S. Geological Survey, Virginia, p. 147.
- Hitzman, M., Kirkham, R., Broughton, D., Thorson, J., Selley, D., 2005. The sediment-hosted stratiform copper ore system. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.M., R.J., Goldfarb, Richards, J.P., (Ed.), One Hundred Anniversary volume. *Economic Geology*, Littleton, pp. 609–612
- Hitzman, M.W., Selley, D., Bull, S., 2010. Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through earth history. *Economic Geology* 105(3), 627–639.
- Jowett, E.C., 1989. Effects of continental rifting on location and genesis of stratiform copper–silver deposits. In: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C., Kirkham, R.V. (Ed.), Sediment-hosted stratiform copper deposits. Geological Association of Canada, Special Paper 36, Canada, pp. 53–66.
- Khodabandeh, A.A., Faridi, M., Amini Azar, R., 1998. Geologic map of Miyaneh, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Iran.
- Kirkham, R.V., 1989. Distribution, setting and genesis of sediment-hosted stratiform copper deposits. In: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C., Kirkham, R.V. (Ed.), Sediment-hosted stratiform copper deposits. Geological Association of Canada, Special Paper 36, Canada, pp. 3–38.
- Kirkham, R.V., 1996. Sediment-hosted copper. In: Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I. (Ed.), *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*. Geological Association of Canada, Canada, pp. 223–240.
- Lotfi, M., 2001. Geologic map of Mahneshan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Iran.
- Love, L.G., Brockley, H., 1973. Peripheral radial texture in framboids of poly-framboidal pyrite. *Fortschritte der Mineralogie* 50(3), 264–269.
- MacIntyre, T.J., 2005. Fault-controlled hydrocarbon-related bleaching and sediment-hosted copper mineralization of the Jurassic Wingate sandstone at the Cashin Mine, Montrose County, Colorado. M.Sc. Thesis, Colorado School of Mines, Colorado, United State.
- MacIntyre, T.J., Thorson, J.P., Hitzman, M.W., 2004. Setting the stage for sediment-hosted copper: Fault-related hydrocarbon bleaching and copper ore at the Cashin mine, Montrose County, Colorado. 36th Denver Annual Meeting, Geological Society of America, Denver, USA.
- Mahdavi, A., 2008. Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of Markasheh Cu deposit, northwest of Ravar (Kerman province). Unpublished M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, p. 188 (In Persian with English abstract).
- Mahdavi, A., Rastad, A., Hosseini Barzy, M., 2011. Mineralogy, structure and texture and genesis of sedimentary diagenetic Cu Markeshe, Redbed type, in the Garedu Red Formation, Jurassic, south of Central Iran. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 21(81), 81–92 (in Persian with English abstract).
- Maleki Kahangi, M., 2016. Mineralogy, geochemistry and mineralization of sedimentary copper deposit in Halab area, Zanjan. M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
- Oszczepalski, S., 1999. Origin of the Kupferschiefer polymetallic mineralization in Poland. *Mineralium Deposita* 34(5-6), 599–613.
- Parry, W.T., Chan, M.A., Beitler, B., 2004. Chemical bleaching indicates fluid flow in sandstone deformation bands. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 88(2), 175–191.
- Rajabpour, S., Abedini, A., Alipour, S., Lehmann, B., Jiang, S.Y., 2017. Geology and geochemistry of the sediment-hosted Cheshmeh-Konan Redbed-type copper deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 86, 154–171.
- Rajabzadeh, A., 2018. Geology, geochemistry and genesis of sediment-hosted Chehrabad Pb-Zn mineralization (NE Mahneshan). M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
- Rajabzadeh, A., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Zohdi, A., 2016. Mineralization, structure and textures and mineralograpy of Chehrabad Cu-Pb-Zn deposit, northwest of Zanjan. 35th Symposium of Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian with English abstract).
- Rajabzadeh, A., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Zohdi, A., in press. Mineralization, structure and texture and genesis of sediment-hosted Chehrabad Pb–Zn–Cu deposit, NW Zanjan. *Journal of Economic Geology* (in Persian with extended English abstract).
- Rose, A.W., 1976. The effect of cuprous chloride complexes in the origin of red-bed copper and related deposits. *Economic Geology* 71(6), 1036–1048.
- Sadati, S.N., 2016. Mineralogy, geochemistry and genesis of Cu deposit in sedimentary rocks in the north of Tabriz, (East Azarbayjan province), NW Iran. Ph.D Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
- Sadati, S.N., Yazdi, M., Mao, J., Behzadi, M., Adabi, M.H., Lingang, X., Zhenyu, C., Mokhtari, M.A.A., 2016. Sulfide mineral chemistry investigation of sediment-hosted stratiform copper deposits, Nahand-Ivand area, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 72(1), 760–776.

- Sephri Rad, R., Fathjo, D., 2010. Exploration report of sedimentary copper mineralization in south Zanjan. Geological Survey of Iran, Tehran, p. 150 (in Persian).
- Subias, I., Fanlo, I., Mateo, J., 2003. A model for the diagenetic formation of sandstone-hosted copper deposits in Tertiary sedimentary rocks, Aragón, NE Spain: S/C ratios and sulfur isotope systematic. *Ore Geology Reviews* 23(1-2), 55–70.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Ed.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publication 42, London, pp. 313–345.
- Taylor, S., McLennan, S., 1985. *The continental crust: Its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, p. 312.
- Thompson, R.N., 1982. Magmatism of the British Tertiary province. *Scottish Journal of Geology* 18(1), 49–107.
- Thorson, J.P., 2004. Paradox Basin sandstone-hosted copper deposits generated by two episodes of basinal fluid expulsion. 36th Denver Annual Meeting, Geological Society of America, Denver, USA.
- Walker, T.R., 1989. Application of diagenetic alterations in red beds to the origin of copper in stratiform copper deposits. In: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, W., Jowett, E.C., Kirkham, R.V. (Ed.), *Sediment-hosted stratiform copper deposits*. Geological Association of Canada, Special Paper 36, Canada, pp. 85–96.
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J.F., Zhao, Z.H., Jian, P., Xiong, X.L., Bao, Z.W., Li, C.F., Bai, Z.H., 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui province (Eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos* 89(3–4), 424–446.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95(1), 185–187.
- Woodward, K.H., Kaufman, W.H., Schumacher, O.L., Talbott, L.W., 1974. Stratabound copper deposits in Triassic sandstone of Sierra Nacimiento, New Mexico. *Economic Geology* 69(1), 108–120.