



کانه‌زایی، ساخت، بافت و خاستگاه کانسار سرب-روی و مس با میزبان رسوبی چهرآباد، شمال‌باختر زنجان

علی رجب‌زاده، حسین کوهستانی*، میرعلی اصغر مختاری و افشین زهدی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶

چکیده

کانسار چهرآباد در پهنه ایران مرکزی و در فاصله ۷۵ کیلومتری شمال‌باختر زنجان قرار دارد. سنگ میزبان کان‌زایی در این کانسار، واحدهای ماسه‌سنگی خاکستری‌رنگ دارای مواد آلی متعلق به سازند قرمز بالایی است. کان‌زایی سرب-روی و مس در کانسار چهرآباد در دو افق ماسه‌سنگی مجزا به صورت لامینه‌ای و عدسی شکل هم‌روند با لایه‌بندی سنگ میزبان رخ داده و دارای بافت‌های دانه‌پراکنده، سیمان بین‌دانه‌ای، عدسی، شبه لامینه‌ای، جانشینی، رگچه‌ای و فرامبوئیدال است. در هریک از افق‌های کان‌دار، سه پهنه قرمز اکسیدان، شسته‌شده و احیایی کان‌دار تشکیل شده است. گالن، اسفالریت، کالکوسیت، پیریت و کالکوپیریت، کانی‌شناسی اصلی ماده معدنی را در کانسار چهرآباد تشکیل می‌دهند که با اندکی کانی‌های نقره‌دار (مکینستریت و استرامیرایت) همراهی می‌شوند. سروزیت، مالاکیت، آزوریت، کوولیت، آتاکامیت، وانادینیت و گوتیت طی فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. با توجه به ویژگی‌هایی مانند محیط زمین‌ساختی، سنگ‌شناسی، چینه‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت و عوامل کنترل‌کننده کان‌زایی (وجود آثار و بقایای گیاهی، وجود گنبد‌های نمکی، تخلخل و نفوذپذیری مناسب سنگ میزبان، گسل‌ها و شکستگی‌ها)، کانسار چهرآباد در دسته کانسارهای مس رسوبی نوع Redbed قرار گرفته و از این نظر قابل مقایسه با دیگر کانسارهای مس رسوبی نوع Redbed در منطقه ماه‌نشان مانند چرلانقوش، اورتاسو، حلب و حمزه‌لو است. این کانسارها، ارتباط فضایی نزدیکی با واحدهای تبخیری و گنبد‌های نمکی موجود در سازند قرمز بالایی دارند که باید در بررسی‌های اکتشافی مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: کان‌زایی مس با میزبان رسوبی، نوع Redbed، سازند قرمز بالایی، چهرآباد، زنجان

مقدمه

لایه‌های رسوبی گسترده‌شده است و علاوه بر مس، منبعی مهم برای عناصر کبالت و نقره نیز هستند (Hayes et al., 2015). این کانسارها با عنوان‌هایی مانند کانسارهای مس با میزبان

کانسارهای مس (سرب-روی) با میزبان رسوبی، کانسارهایی هستند که به صورت سیمان و گاهی رگچه‌های چینه‌کران در

استان یکی از مناطقی است که سازند قرمز بالایی به‌خوبی در آن گسترش دارد. بررسی‌های اکتشافی اخیر در این سازند در منطقه ماه‌نشان نشان‌دهنده وجود کانسارها و اندیس‌های متعددی از مس و سرب-روی با میزبان رسوبی است که ارتباط فضایی نزدیکی با واحدهای تبخیری و گنبد‌های نمکی موجود در سازند قرمز بالایی دارند (شکل ۱-B). این امر باید در اکتشاف این نوع از کانه‌زایی‌ها مورد توجه قرار گیرد.

کانسار سرب-روی و مس چهارآباد در فاصله ۷۵ کیلومتری شمال‌باختر زنجان و ۴۵ کیلومتری شمال‌خاور ماه‌نشان قرار دارد. بررسی‌های قبلی انجام‌شده در این منطقه شامل تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش تکاب (Alavi and Omid, 1976) و ۱:۱۰۰۰۰۰ (Lotfi, 2001) و همچنین فعالیت‌های اکتشافی موضوعی در رابطه با اکتشاف سرب-روی و مس (Karimi, 2012) بوده است. در این پژوهش‌ها، به نوع کانه‌زایی و سازوکار تشکیل آن چندان توجهی نشده است. در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی و ساخت و بافت کانسار چهارآباد مورد بررسی قرار گرفته و نوع کانه‌زایی و خاستگاه آن تعیین شده است. بررسی 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.

روش مطالعه

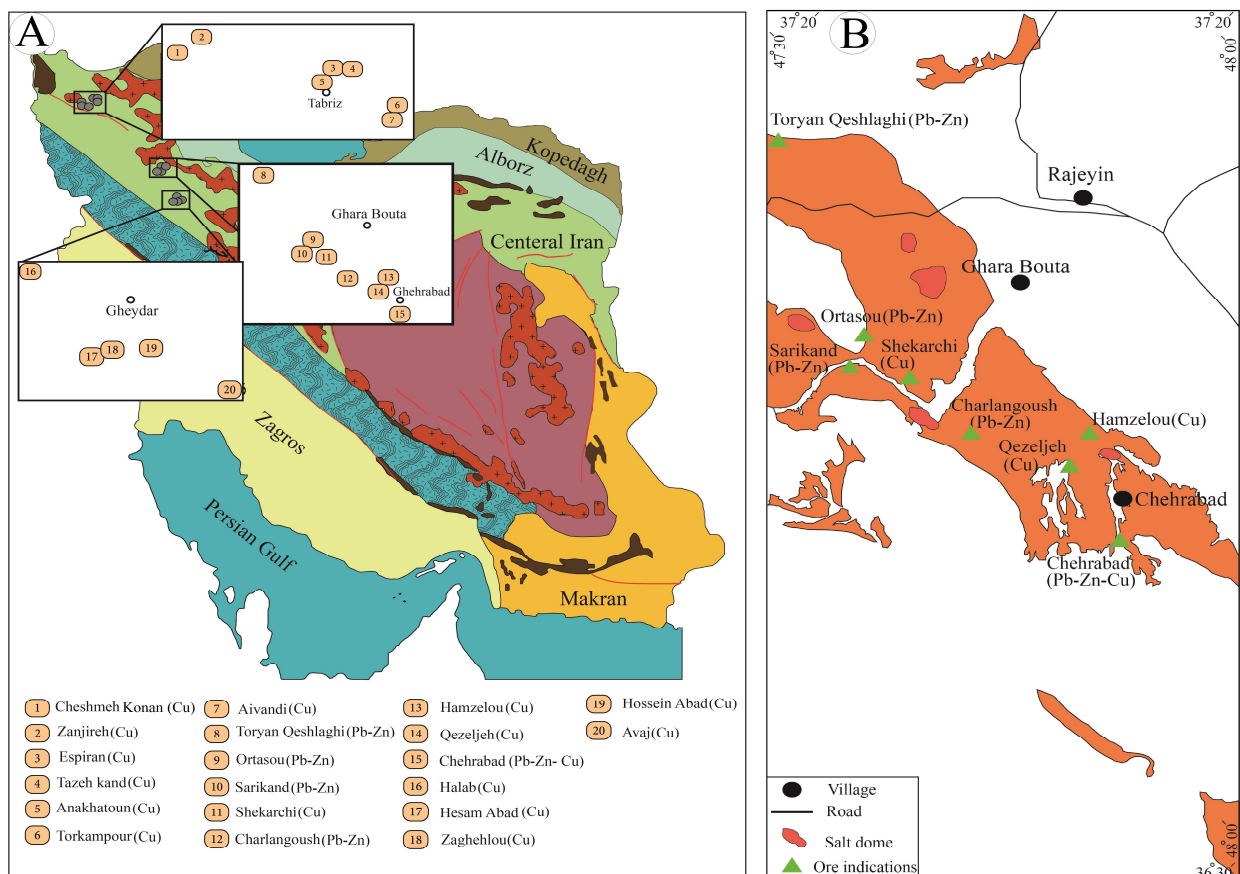
این پژوهش شامل دو بخش بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی است. در بررسی‌های صحرایی، نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰ منطقه تهیه شد. طی برداشت‌های صحرایی، امتداد، شیب و ضخامت لایه‌های ماسه‌سنگی و مارینی اندازه‌گیری و بود و یا نبود آثار گیاهی و ساخت‌های رسوبی در آنها بررسی شد. علاوه بر آن، ستون سنگ‌چینه‌ای منطقه ترسیم و جایگاه ماده معدنی بر روی آن مشخص شد. در این راستا، ۶۰ نمونه از واحدهای سنگی و رخنمون‌های کانه‌زایی برای

رسوبی و کانسارهای مس در همراهی با طبقات قرمز شناخته‌شده و توسط پژوهشگران مختلفی مانند کیرکهام (Kirkham, 1989)، کاکس و همکاران (Cox et al., 2003, 2007) و هیتزمن و همکاران (Hitzman et al., 2005, 2010)، طبقه‌بندی شده‌اند. کانسارهای مس رسوبی در محیط‌هایی نظیر محیط‌های ساحلی، دریاچه‌ای و یا دریایی کم‌عمق و حوضه‌های تبخیری مرتبط با آنها تشکیل می‌شوند (Cox et al., 2007). کانسارهای مس با میزبان رسوبی به سن آرکئن شناخته‌نشده و از پروتروزوئیک تا اوایل ترشیری گسترش دارند؛ اما فراوانی آنها در پروتروزوئیک بیشتر است (Cox et al., 2007). از دیگر ویژگی‌های این کانسارها، منطقه‌بندی کانایی و فلزی است که علاوه بر مس، سرب و روی نیز در آنها (مانند کانسار کوپرشیر در آلمان) مشاهده شده است (Guilbert and Park, 1997).

در بخش شمال‌باختری پهنه ایران مرکزی در محور آوج-زنجان-تبریز-خوی، کانسارها و نشانه‌های متعددی از کانه‌زایی‌های مس و سرب-روی با میزبان رسوبی قابل مشاهده است (شکل ۱-A). از مهم‌ترین این کانه‌زایی‌ها که درون واحدهای ماسه‌سنگی سازند قرمز بالایی رخ داده‌اند، می‌توان به کانسار تازه‌کند (Enayati Kolaie et al., 2016)، نهند-یوند (Sadati, 2016; Sadati et al., 2016)، تسوج (Rajabpour et al., 2017)، اورتاسو (Haghighi et al., 2019)، چهارآباد (Rajabzadeh et al., 2016; Azizi et al., 2018)، چرلانقوش و قزلجه (Rajabzadeh, 2018)، حلب (Maleki Kahangi, 2016)، زاغ‌لو و آوج (Sephri Rad and Fathjo, 2010) اشاره کرد (شکل ۱-A و B). این امر نشان‌دهنده توانایی بالای سازند قرمز بالایی برای این نوع از کانه‌زایی‌های مس، سرب و روی است. استان زنجان یکی از استان‌های معدنی کشور است که دارای معادن مهمی از آهن (Nabatian et al., 2010; Ebrahimi et al., 2015; Salehi et al., 2016) و سرب و روی (Karami et al., 2013; Daliran et al., 2011) است. منطقه ماه‌نشان در این

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 شد. برای تعیین میزان فلزات پایه، به صورت جداگانه حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه در تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه سانتی‌گراد) حل شد. حد پایین دقت اندازه‌گیری برای عناصر مختلف در جدول ۱ آمده است.

بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری برداشت شد. سپس، تعداد ۸ مقطع نازک و ۱۵ مقطع نازک-صیقلی برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت، تهیه و مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای انجام بررسی‌های زمین‌شیمیایی، تعداد ۲ نمونه از ماسه‌سنگ‌های قرمز و خاکستری بدون کانه‌زایی و ۶ نمونه از بخش‌های کانهدار انتخاب شد. بدین منظور، ابتدا نمونه‌ها توسط خردکننده فولادی تا اندازه حدود ۵ مش (۴ میلی‌متر) خرد شده و سپس با استفاده از آگات به مدت ۲ دقیقه تا اندازه حدود ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر شدند. پس از آماده‌سازی، میزان ۲۰ گرم از



شکل ۱. A: موقعیت کانسارها و نشانه‌های مس و سرب-روی با میزان رسوبی در بخش شمال‌باختری پهنه ایران مرکزی با تغییرات از علوی (Alavi, 1991). نوع ماده معدنی در داخل پراتنز مشخص شده است و B: گسترش سازند قرمز بالایی در منطقه ماه‌نشان و موقعیت کانه‌زایی‌های مس و سرب-روی با میزان رسوبی با تغییرات از لطفی (Lotfi, 2001) و خدابنده و همکاران (Khodabandeh et al., 1998). به ارتباط نزدیک گنبد‌های نمکی و کانه‌زایی‌های مزبور در این سازند توجه‌شود.

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), and 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 these mineralization.

زمین‌شناسی و چینه‌نگاری منطقه چهرآباد

با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه ماه‌نشان (Lotfi, 2001) و بر اساس بررسی‌های صحرایی انجام‌شده در قالب تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ منطقه چهرآباد (شکل ۲)، واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در منطقه به سازند قرمز بالایی تعلق دارند که توسط واحدهای کنگلومرایی پلیوسن و رسوبات آبرفتی کواترنری پوشیده شده‌اند.

سازند قرمز بالایی در منطقه چهرآباد از چهار واحد $M^{s,m}$ ، M^{gy} ، $M^{m,s}$ و M^m تشکیل شده است که به صورت هم‌شیب بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. واحد M^{gy} شامل تناوب لایه‌های نازک مارن‌های سبز ژپیس‌دار و لایه‌های متوسط تا ستبر لایه گچی است که در بعضی مناطق دارای لایه‌های نمک است. این واحد قدیمی‌ترین واحد سنگی سازند قرمز بالایی در منطقه چهرآباد بوده و تنها در بخش جنوب‌باختری منطقه گسترش دارد (شکل ۲). امتداد لایه‌های این واحد، شمال‌باختری-جنوب‌خاوری با شیب ۵۵ درجه به سمت شمال‌خاوری است. واحد $M^{s,m}$ شامل تناوب مارن‌های قرمز-قهوه‌ای و لایه‌های ماسه‌سنگی خاکستری و قرمز رنگ است (شکل ۳-A). ماسه‌سنگ‌ها اغلب متوسط تا ستبر لایه هستند. این واحد بیشتر در قسمت‌های جنوب‌باختری و شمال‌خاوری منطقه رخنمون دارد. به دلیل فرایندهای چین‌خوردگی و گسلش، شیب و امتداد این واحد در قسمت‌های مختلف منطقه متفاوت است؛ به طوری که در بخش جنوبی دارای امتداد شمال‌باختری-جنوب‌خاوری، با شیب ۵۵ درجه به سمت شمال‌خاوری است. اما در بخش شمال‌خاوری منطقه، امتداد آن شمال‌خاوری-جنوب‌باختری با شیب ۷۰ درجه به سمت شمال‌باختری است (شکل ۲).

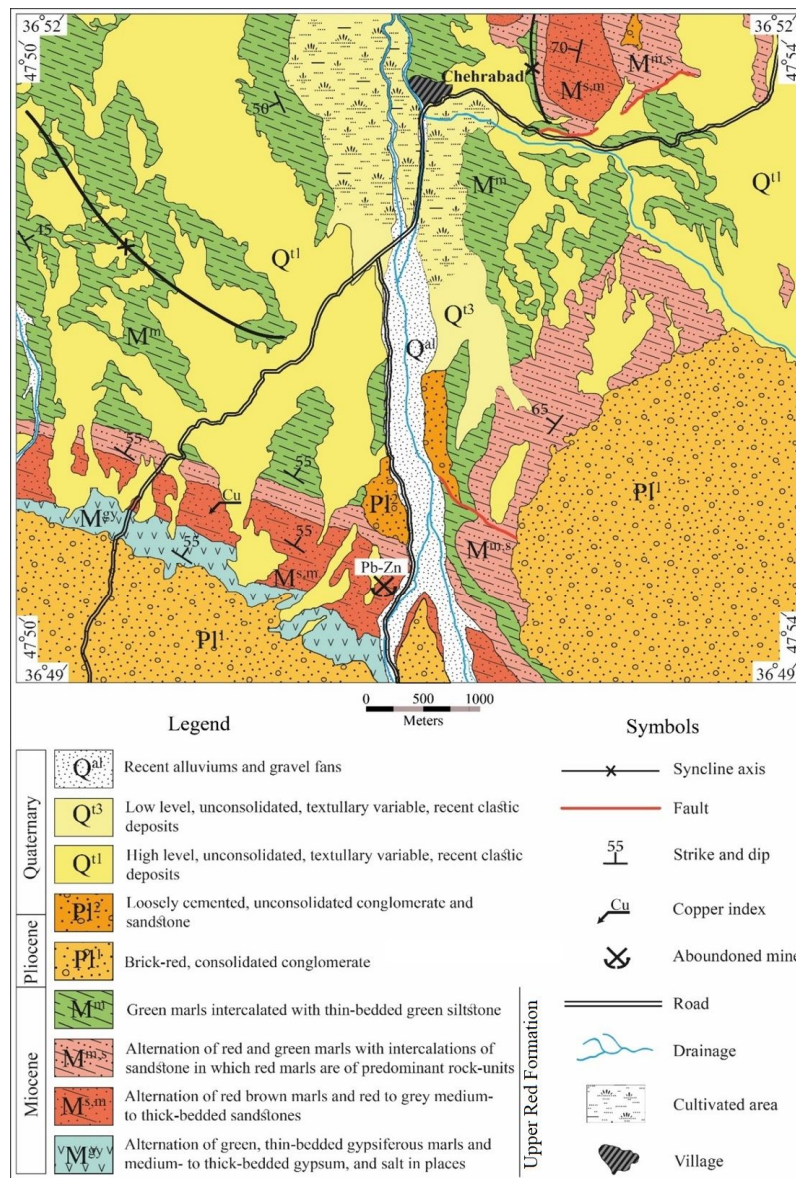
واحد $M^{m,s}$ شامل تناوب مارن‌های قرمز و سبز همراه با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی است که در آن مارن‌های قرمز واحد سنگی غالب آن است (شکل ۳-B). این واحد بیشتر در بخش‌های جنوب تا جنوب‌باختری و خاور منطقه گسترش دارد. امتداد و شیب واحد $M^{m,s}$ تحت تأثیر چین‌خوردگی‌ها و گسلش‌های موجود در منطقه متغیر است. این واحد در

بخش‌های مختلف منطقه دارای امتدادهای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری و شمال‌خاوری-جنوب‌باختری به ترتیب با شیب‌های ۵۵ درجه به سمت شمال‌خاور و ۶۵ درجه به سمت شمال‌باختری است. واحد M^m جوان‌ترین واحد سنگی سازند قرمز بالایی در منطقه چهرآباد است که از گسترش زیادی در بخش‌های خاوری، مرکزی و باختری منطقه برخوردار است. این واحد از مارن‌های سبز با میان‌لایه‌های نازک سیلت‌سنگی سبزرنگ تشکیل شده است (شکل ۲). واحدهای سنگی پلیوسن بیشتر در بخش‌های جنوب، جنوب‌خاور و جنوب‌باختری منطقه چهرآباد گسترش دارند (شکل ۲). این واحدها از کنگلومرای سخت‌شده به رنگ قرمز آجری (PI^1) و کنگلومرای سخت‌نشده با سیمان ضعیف و گاهی ماسه‌سنگ (PI^2) تشکیل شده‌اند. این واحدها به‌طور ناپیوسته واحدهای سازند قرمز بالایی را می‌پوشانند (شکل ۳-C). واحدهای کواترنری (Q^{I3} ، Q^{I1} و Q^{al}) شامل رسوبات آواری سخت‌نشده با بافت به هم ریخته و پادگانه‌های آبرفتی و مخروط افکنه‌های عهد حاضر هستند (شکل ۳-C) که از گسترش زیادی در منطقه چهرآباد برخوردارند.

با توجه به ستون سنگ‌چینه‌ای تهیه‌شده، سازند قرمز بالایی در منطقه چهرآباد ۹۸۰ متر ضخامت داشته و به چهار بخش قابل تفکیک است (شکل ۴-A). این بخش‌ها به ترتیب شامل: ۱- تناوب مارن‌های سبز ژپیس‌دار و لایه‌های ژپیس و گاهی نمک با ضخامت ۲۳۵ متر، ۲- تناوب مارن‌های قرمز و ماسه‌سنگ‌های خاکستری و قرمز رنگ با ضخامت ۴۴۵ متر، ۳- تناوب مارن‌های قرمز و سبز با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی با ضخامت ۱۴۵ متر و ۴- تناوب مارن‌های سبز با میان‌لایه‌های سیلت‌سنگ سبزرنگ با ضخامت ۱۵۵ متر است. بخش دوم دارای شش لایه ماسه‌سنگی خاکستری و قرمز رنگ است که به صورت متناوب با لایه‌های مارنی قرمز رنگ قرار گرفته‌اند (شکل ۴-B). لایه‌های ماسه‌سنگی به‌طور میانگین ۴ تا ۶ متر ضخامت داشته و در آنها ساخت‌های رسوبی مانند ریپل مارک، چینه‌بندی متقاطع، قالب‌های وزنی و آثار موجودات حفار مشاهده می‌شود. بر

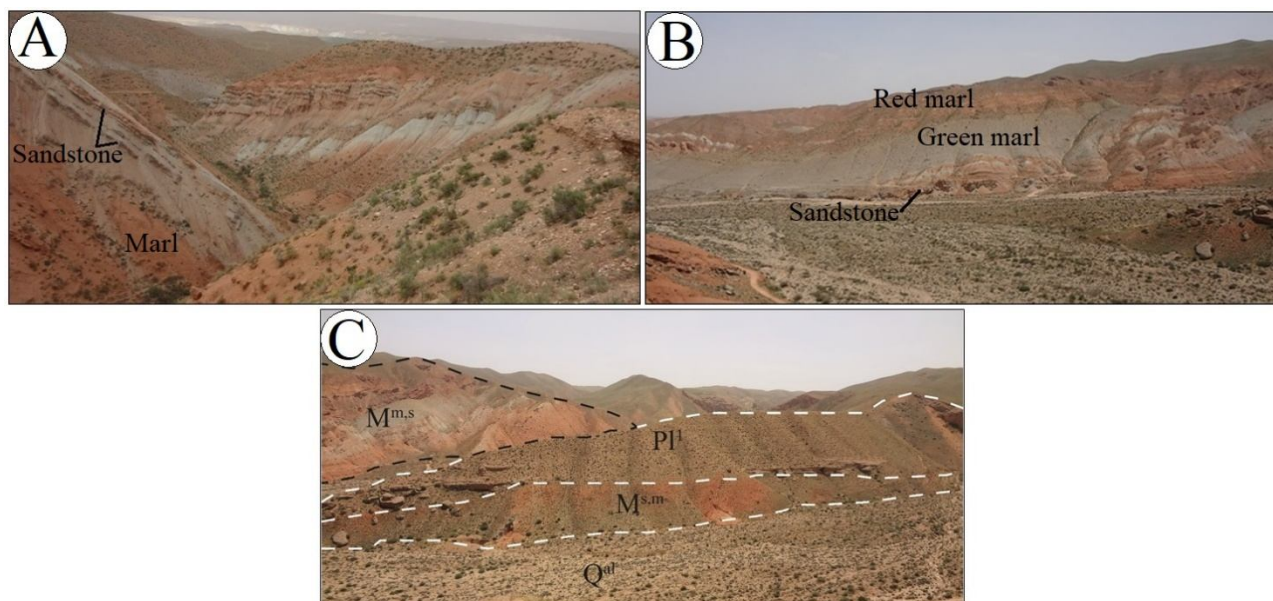
فلدسپاتیک لیت آرنایت و لیت آرنایت (اغلب چرت آرنایت) هستند. جایگاه زمین‌ساختی این ماسه‌سنگ‌ها، حاشیه‌های فعال قاره‌ای و حوضه‌های فورلندی بوده و دارای سنگ منشأ حدواسط تا فلسیک هستند که تحت تأثیر آب و هوای نیمه مرطوب تا نیمه خشک و هوازدگی شیمیایی کم قرار داشته‌اند (Rajabzadeh et al., 2020).

اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، این ماسه‌سنگ‌ها اغلب از ذرات آواری دانه‌ریز تا متوسط تشکیل شده و حاوی انواع خرده‌سنگ‌های رسوبی و دگرگونی (۴۵ درصد)، کوارتز (۳۸ درصد) و فلدسپات (۱۷ درصد) هستند (Rajabzadeh et al., 2020). با توجه به درصد فراوانی اجزای تشکیل‌دهنده و بر اساس تقسیم‌بندی ماسه‌سنگ‌ها به روش فولک (Folk, 1980)، ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی در منطقه چهارآباد از نوع



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی کانسار چهارآباد

Fig. 2. Geological map of Chaharabad deposit



شکل ۳. A: تناوب واحدهای مارنی و ماسه‌سنگی واحد $M^{s.m}$ (دید به سمت شمال‌باختر)، B: تناوب مارن‌های قرمز و سبز با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی در واحد $M^{m.s}$ (دید به سمت شمال‌خاور) و C: واحدهای سنگی PI^1 و Q^{al} در منطقه چهرآباد (دید به سمت خاور)

Fig. 3. A: Alternation of marl and sandstone layers of $M^{s.m}$ unit (looking northwest), B: Alternation of red and green marls with sandstone intercalations at $M^{m.s}$ unit (looking northeast), and C: PI^1 and Q^{al} units at Cherabad area (looking to the east)

کانه‌زایی

کانه‌زایی سرب‌روی و مس در کانسار چهرآباد به صورت سولفیدهای جانشینی، شبه لامینه‌ای و عدسی‌شکل درون واحدهای ماسه‌سنگی خاکستری تا سبزرنگ سازند قرمز بالایی رخ داده است. بر اساس بررسی‌های صحرائی، این کانه‌زایی در دو افق ماسه‌سنگی مجزا (افق‌های H-A و H-B) با فاصله حدود ۲۰ متر از یکدیگر رخ داده است (شکل ۵-A). این افق‌ها دارای امتداد شمال‌باختری-جنوب‌خاوری و شیب حدود ۴۵ درجه به سمت شمال‌خاور هستند. افق H-A دارای کانه‌زایی سرب و روی بوده و حدود ۴ متر ضخامت و ۲۰۰ متر درازا دارد. سنگ میزبان این افق، ماسه‌سنگ‌های لیت‌آرنایتی تا فلدسپاتیک-لیت‌آرنایتی خاکستری‌رنگ است. این ماسه‌سنگ‌ها دارای کانی‌های کوارتز، فلدسپات آلکان، پلاژیوکلاز، بیوتیت و خرده‌سنگ‌های رسوبی و دگرگونی و قطعات فسیلی با سیمان کربناته هستند. کانه‌زایی در افق H-A بیشتر شامل گالن و اسفالریت با بافت سیمان بین دانه‌ای، شبه لامینه‌ای، رگچه‌ای و

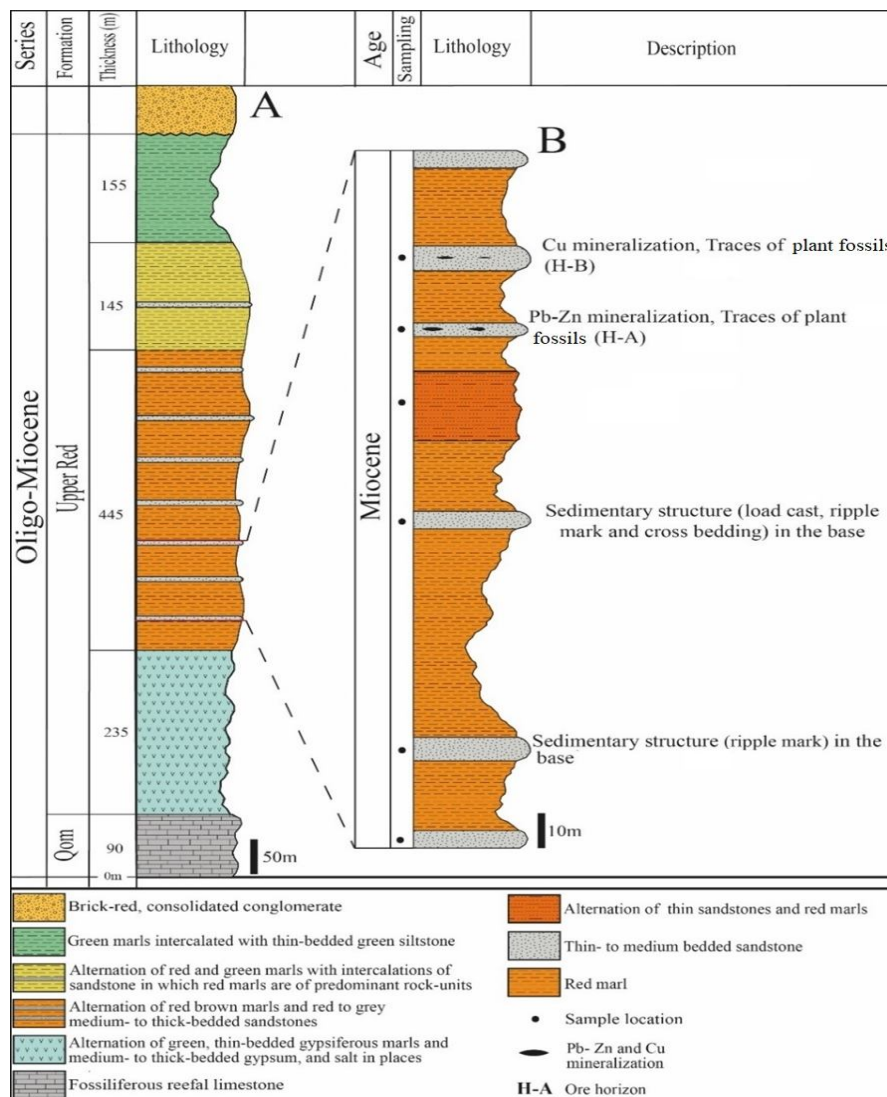
عدسی‌شکل است (شکل ۵-B و C). افق H-B با ضخامت ۶ متر و گسترش طولی تا ۱ کیلومتر، دارای کانه‌زایی مس است. مشخصات سنگ‌شناسی و سنگ‌نگاری ماسه‌سنگ‌های میزبان این افق کانهدار مشابه با ماسه‌سنگ‌های میزبان افق H-A است، با این تفاوت که اندازه ذرات آن درشت‌تر و جورشدگی آن نیز بهتر است. قطعات فسیل گیاهی در ماسه‌سنگ‌های افق کانهدار H-B نسبت به افق H-A بیشتر بوده و کانه‌زایی اغلب به صورت بافت جانشینی در اطراف و درون این قطعات رخ داده است. کانه‌زایی مس در این افق به شکل کالکوسیت است که به صورت شبه لامینه‌ای و جانشین بافت‌های قطعات فسیلی گیاهی قابل مشاهده است (شکل ۵-D و E). کالکوسیت تحت تأثیر فرایندهای برون‌زاد اغلب به مالاکیت تبدیل شده است.

پهنه‌بندی دگرسانی در افق‌های کانهدار

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، در افق‌های ماسه‌سنگی میزبان کانه‌زایی در کانسار چهرآباد، سه پهنه شامل پهنه قرمز اکسیدان،

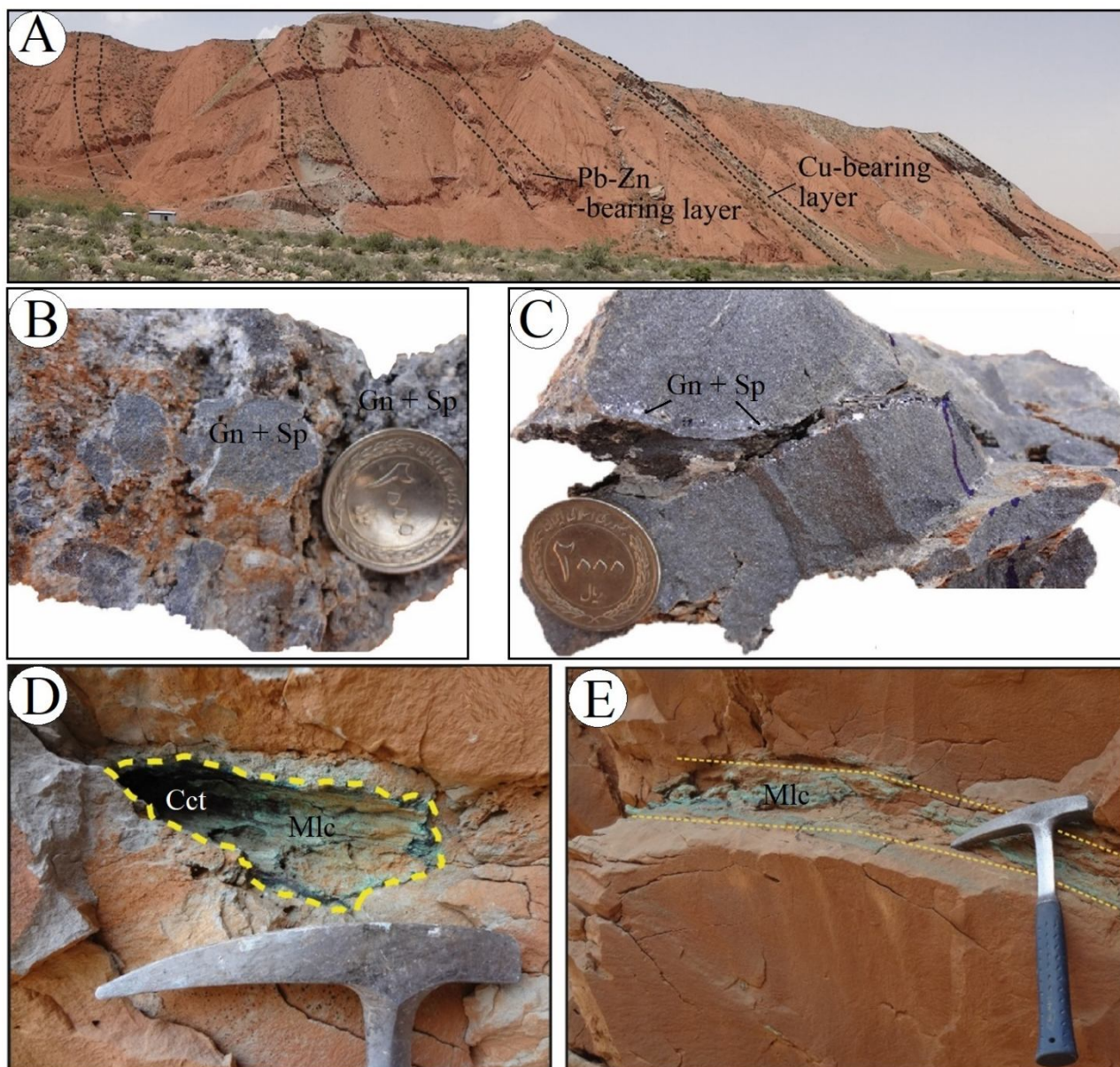
آنها دارای جورشدگی خوب، نیمه گرد شده با جهت یافتگی کم هستند. این ماسه‌سنگ‌ها، دارای خرده‌سنگ‌های دگرگونی، مسکویت و کلریت بیشتری نسبت به ماسه‌سنگ‌های خاکستری‌رنگ هستند. پهنه قرمز اکسیدان حاوی مقادیر بالایی از اکسید آهن است که به صورت سیمان و پوشاننده ذرات آواری تشکیل دهنده رسوبات سیلیسی-آواری دیده می‌شود. پهنه قرمز اکسیدان بدون هرگونه کانه‌زایی سولفیدی است.

پهنه شسته‌شده و پهنه احیایی کانهدار قابل تشخیص است (شکل ۴). پهنه قرمز اکسیدان در بخش‌های بالا و پایین پهنه شسته‌شده قرار دارد (شکل ۶-A و B). این پهنه به صورت مارن قرمز و در بعضی از قسمت‌ها به صورت ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز قرمز رنگ است که اطراف ماسه‌سنگ‌های شسته‌شده را فرا گرفته است. در کانسار چهارآباد، ضخامت این پهنه بین ۱۰ تا ۶۰ متر متغیر است. بخش‌های ماسه‌سنگی این پهنه از نظر ترکیب سنگ‌شناسی از نوع فلدسپاتیک‌لیت آرنایت دانه‌ریز بوده و ذرات تشکیل دهنده



شکل ۴. A: ستون سنگ‌چینه‌ای سازند قرمز بالایی در کانسار چهارآباد و B: موقعیت افق‌های کانهدار در بخش دوم سازند قرمز بالایی در کانسار چهارآباد

Fig. 4. A: Stratigraphic column of Upper Red Formation in the Chaharabad deposit, and B: Location of mineralized horizons at second part of Upper Red Formation in the Chehrabad deposit



شکل ۵. A: نمایی از لایه‌های ماسه‌سنگی سرب-روی و مس‌دار در کانسار چهارآباد (دید به سوی شمال‌باختر)، B و C: تصاویر نمونه دستی از ماسه‌سنگ‌های خاکستری‌رنگ دارای گالن و اسفالریت با بافت‌های دانه‌پراکنده و سیمان بین دانه‌ای (B) و رگچه‌ای (C) در افق کانه‌زایی H-A و D و E: نماهایی نزدیک از کانه‌زایی مس در افق کانه‌زایی H-B با بافت‌های جانشینی (D) و شبه لامینه‌ای (E). علایم اختصاری کنی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cct: کالکوسیت، Gn: گالن، Mlc: مالاکیت، Sp: اسفالریت).

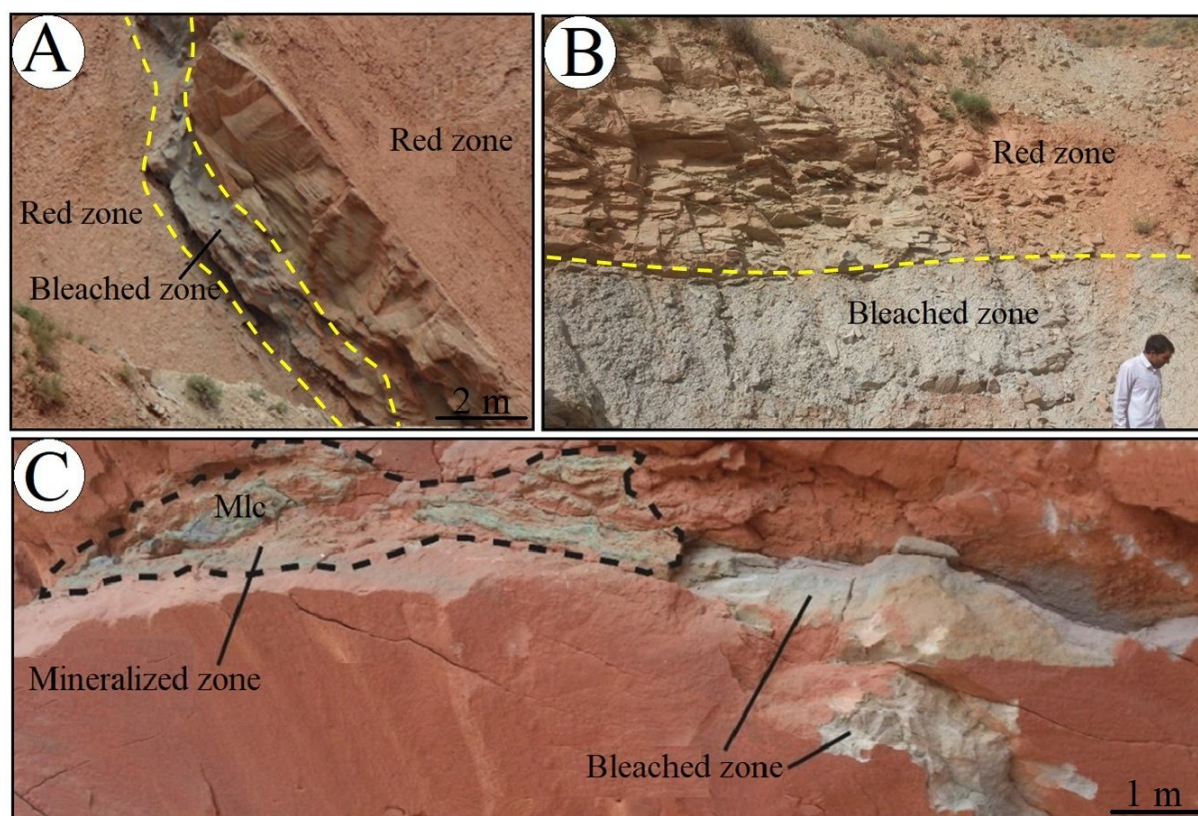
Fig. 5. A: View of Pb-Zn and Cu-bearing sandstone layers in the Chaharabad deposit (looking northwest), B and C: Hand specimen photos of galena and sphalerite-bearing grey sandstone with disseminated and cemented (B) and veinlet (C) textures at H-A ore horizon, D and E: Close views of copper mineralization at H-B ore horizon with replacement (D) and solution seams (E) textures. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cct: chalcocite, Gn: galena, Mlc: malachite, Sp: sphalerite).

محصور شده است (شکل ۶-A و B). ماسه‌سنگ‌های این پهنه از نظر ترکیب سنگ‌شناسی اغلب لیت‌آرنایت تا فلدسپاتیک

پهنه شسته‌شده در بخش مرکزی پهنه‌بندی دگرسانی در افق‌های کانه‌دار قرار گرفته و از دو طرف توسط پهنه قرمز اکسیدان

در بخش زیرین آن قرار دارد (شکل ۶- C). ماسه‌سنگ‌های این پهنه در قسمت پوینت‌بار کانال‌های رودخانه‌های مئاندری تشکیل شده و معمولاً دارای ذرات درشت‌تر و قطعات فسیل گیاهی هستند (Rajabzadeh et al., 2020). کانه‌زایی سرب-روی و مس در کانسار چهرآباد رابطه نزدیکی با تجمعات قطعات فسیل‌های گیاهی دارد.

لیت‌آرنایت هستند. در بین و اطراف ذرات تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌های پهنه شسته‌شده، اکسید آهن وجود ندارد. در کانسار چهرآباد، دگرسانی در پهنه شسته‌شده محدود به چند افق با ضخامت ۴ تا ۶ متر با گسترش طولی زیاد است. پهنه احیایی کانسار بخشی از پهنه شسته‌شده است که کانه‌زایی در آن رخ داده است. این پهنه به شکل عدسی درون پهنه شسته‌شده و



شکل ۶. A و B: نماهایی نزدیک از موقعیت پهنه قرمز اکسیدان و پهنه شسته‌شده در کانسار چهرآباد و C: موقعیت پهنه احیایی کانسار درون بخش‌های پایینی پهنه شسته‌شده در کانسار چهرآباد. علامت اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Mlc: مالاکیت).

Fig. 6. A and B: Close views of red zone and bleached zone at Chehrabad deposit, and C: Location of mineralized reduce zone at the bottom parts of the bleached zone at Chehrabad deposit. Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (Mlc: malachite).

می‌دهند. سروزیت، مالاکیت، آزوریت، کولیت و گوتیت طی فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. در بررسی‌های EPMA انجام شده توسط رجب‌زاده (Rajabzadeh, 2018)، کانی‌های مکیستراتیت ((Ag,Cu)₂S)، استرامیرایت (AgCuS)،

بحث و بررسی

کانی‌شناسی و ساخت و بافت مواد معدنی

گالن، اسفالریت، کالکوسیت، پیریت و کالکوپیریت، کانی‌شناسی اصلی ماده معدنی را در کانسار چهرآباد تشکیل

دارد. گالن نسل دوم (Gn_2) بافت رگه-رگچه‌ای داشته و گالن نسل اول و لایه‌بندی ماسه‌سنگ‌ها را قطع کرده است (شکل ۷-۷). این رگچه‌ها چینه‌کران بوده و تنها به لایه ماسنگی دارای کانه‌زایی محدود می‌شوند. معمولاً تشکیل این بافت را هم‌زمان با دیاژنز تأخیری تا سنگ‌شدگی در نظر می‌گیرند؛ زیرا در این مراحل به علت افزایش فشار (تدفین)، درزه و شکاف‌های مناسب برای ورود سیال و ته‌نشست مواد فلزی همراه آن به وجود می‌آید (Rajabpour et al., 2017).

اسفالریت یکی دیگر از کانی‌های سولفیدی موجود در افق ماسه‌سنگی سرب و روی دار (افق H-A) کانسار چهارآباد است که به همراه گالن و پیریت دیده می‌شود. این کانی، بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار بوده و اندازه‌ای کمتر از ۱ میلی‌متر دارد. اسفالریت نسبت به گالن فراوانی کمتری داشته و بافت غالب آن، سیمان بین‌دانه‌ای و دانه‌پراکنده است (شکل ۷-D). بافت دانه‌پراکنده طی مرحله دیاژنز تأخیری 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). در این بافت، سولفیدها به صورت پراکنده در فضاهای خالی بین دانه‌های آواری سنگ میزبان تشکیل می‌شوند. اسفالریت اغلب به صورت هم‌رشد با گالن نسل اول قابل مشاهده است.

پیریت به میزان کم و به صورت بلورهای ریز با بافت دانه‌پراکنده در همراهی با دیگر سولفیدها در هر دو افق کانه‌دار کانسار چهارآباد حضور دارد. بیشتر این بلورها در اثر فرایندهای برون‌زاد به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن دگرسان شده‌اند. بر اساس بررسی‌های بافتی، پیریت‌های موجود در کانسار چهارآباد را می‌توان به دو نسل تفکیک کرد. پیریت نسل اول (Py_1) به صورت پیریت فرامبوئیدال قابل مشاهده است. این نوع از پیریت در مراحل اولیه دیاژنز و کمی پس از ته‌نشست رسوبات از ژل سولفیدی متبلور می‌شود (Durieux and Brown, 2007). این بافت نشان‌دهنده ته‌نشست هم‌زمان با رسوب‌گذاری تا ابتدای مرحله دیاژنز با درجه حرارت ۲۰ تا ۶۰ درجه

آتاکامیت ($Cu_2Cl(OH)_3$) و وانادینیت ($Pb_5(VO_4)_3Cl$) نیز در کانسار چهارآباد تشخیص داده شده است. بافت مواد معدنی از نوع دانه‌پراکنده، سیمان بین‌دانه‌ای، عدسی، شبه لامینه‌ای، جانشینی، رگچه‌ای و پیریت فرامبوئیدال است.

گالن اصلی‌ترین کانی سولفیدی موجود در افق کانه‌زایی H-A در کانسار چهارآباد است. گالن معمولاً به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار بوده و به دو نسل قابل تفکیک است. نسل اول گالن (Gn_1) به صورت بلورهای با بافت دانه‌پراکنده، سیمان بین‌دانه‌ای، عدسی‌شکل و شبه لامینه‌ای دیده می‌شود (شکل ۷-A, B, C و D). شاخص‌ترین بافت گالن نسل اول در کانسار چهارآباد، بافت سیمان بین‌دانه‌ای است که در آن گالن به صورت سیمان، فضای بین ذرات آواری سنگ میزبان را پر کرده است (شکل ۷-D). تشکیل این بافت می‌تواند محصول جانشینی گالن به جای سیمان کربناتی موجود در اطراف کانی‌های کوارتز و فلدسپات (MacIntyre, 2005) و یا ته‌نشست گالن در خلل و فرج موجود در بافت سنگ در اثر ورود سیال کانه‌دار (Kirkham, 1996) باشد. در بافت شبه لامینه‌ای، گالن به صورت نواری، درزه‌های موجود در بین لایه‌بندی سنگ میزبان را پر کرده است. این نوارها هم‌رشد با لایه‌بندی سنگ میزبان هستند. این بافت 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 به صورت شیمیایی انحلال پیدا می‌کنند و درزه‌های انحلالی را به وجود می‌آورند که کانی‌های سولفیدی و مواد غیرآلی غیرقابل انحلال در درون این درزه‌ها باقی‌مانده و بافت شبه لامینه‌ای را به وجود می‌آورند (Durieux and Brown, 2007). بافت عدسی‌شکل محصول جانشینی گالن به جای قطعات فسیل گیاهی و مواد آلی است. قطعات فسیلی و مواد آلی باعث احیایی شدن محیط و ایجاد شرایط مناسب برای ته‌نشینی مواد فلزی به صورت عدسی‌شکل می‌شوند. در این بافت، گالن به صورت عدسی‌های تیره‌رنگ در ماسه‌سنگ‌های میزبان حضور

(شکل ۷-H). کالکوپیریت نسل دوم (Ccp_2) بافت رگچه‌ای داشته و با گالن‌های نسل دوم دیده می‌شود (شکل ۷-I). این نسل، لایه‌بندی ماسه‌سنگ‌ها و بافت‌های اولیه را قطع کرده است. کالکوسیت کانی سولفیدی اصلی درون پهنه احیایی کانه‌دار در افق H-B است. این کانی بیشتر به صورت بلورهای ریز و دانه پراکنده در فضای خالی ماسه‌سنگ‌ها و یا به صورت بافت جانشینی در قالب فسیل‌های گیاهی دیده می‌شود که در این بین، کالکوسیت با بافت جانشینی از فراوانی بیشتری برخوردار است (شکل ۷-J). در این بافت، کالکوسیت درون بافت و سلول‌های گیاهی جانشین شده است (Subias et al., 2003). این جانشینی به دو صورت جانشینی سلولار (کالکوسیت جانشین تمام و یا بخشی از ساختمان سلولی می‌شود) و جانشینی در بافت و آوند گیاهی رخ داده است. کالکوسیت معمولاً از حاشیه‌ها به کولیت و گوتیت دگرسان شده است (شکل ۷-K).

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده، کولیت، مالاکیت، آزوریت، سرروزیت، هماتیت و گوتیت مهم‌ترین کانی‌های ثانویه موجود در افق‌های کانه‌دار کانسار چهرآباد هستند که از دگرسانی کانی‌های سولفیدی اولیه در اثر فرایندهای برون‌زاد ایجاد شده‌اند. فرایندهای برون‌زاد به طور چشم‌گیری موجب تغییرات کانی‌شناسی بعد از حوادث اصلی کانی‌سازی می‌شود. این فرایندها در امتداد لایه‌بندی و یا شکستگی‌های سنگ میزبان رخ داده و بیشتر محدود به نقاط غنی از مواد آلی در ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی هستند.

داده‌های زمین‌شیمیایی

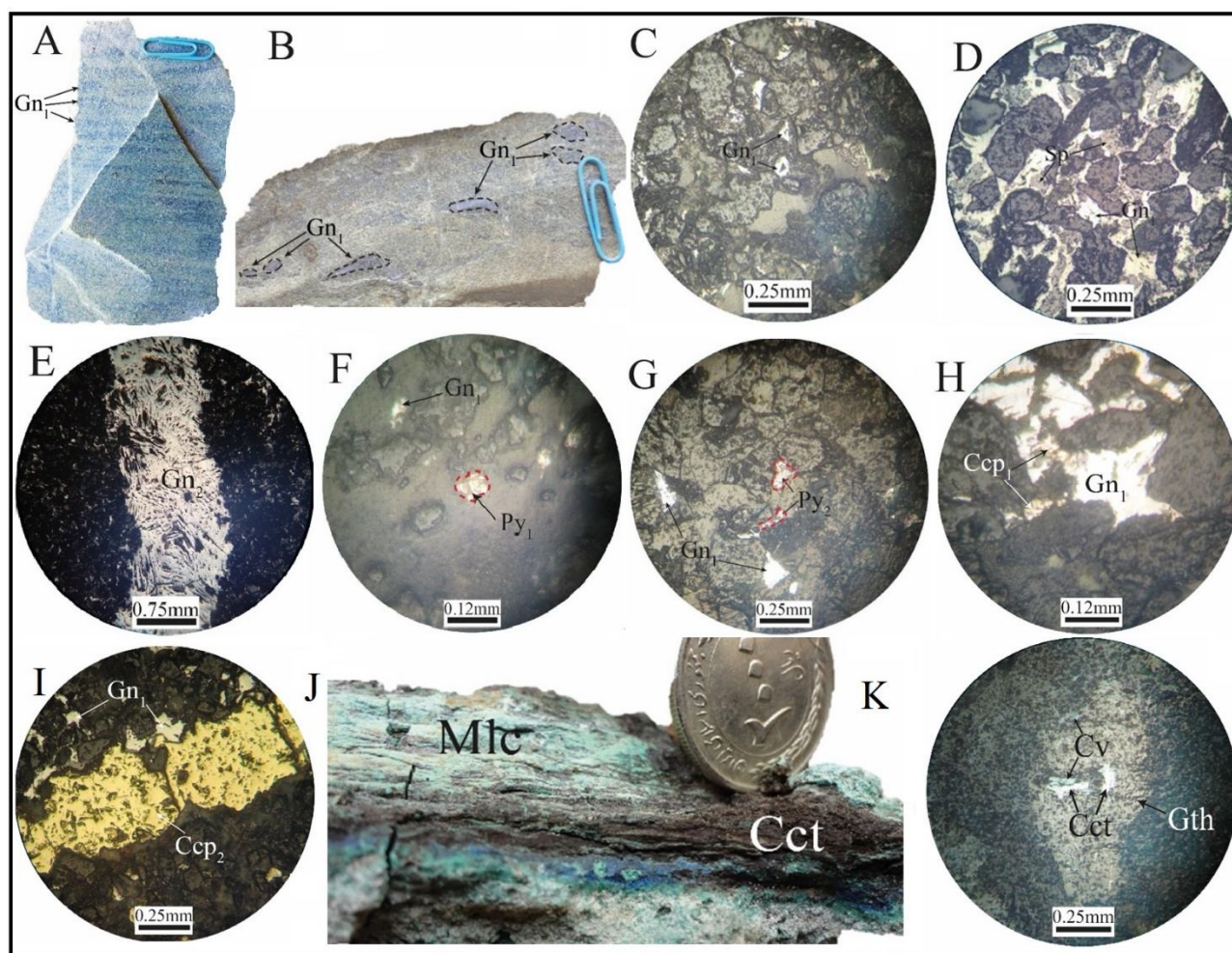
نتایج تجزیه‌های شیمیایی به‌دست آمده از نمونه‌های کانسار چهرآباد در جدول ۱ آمده است. الگوی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار و ماسه‌سنگ‌های قرمز (پهنه قرمز اکسیدان) و خاکستری (پهنه شسته‌شده) بدون کانه‌زایی در کانسار چهرآباد که نسبت به کندریت (Thompson, 1982; Sun and McDonough, 1989) و شیل استرالیا (Taylor and McLennan, 1985) بهنجار شده‌اند، در شکل ۸

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 مراحل بعدی و طی کانه‌زایی توسط دیگر سولفیدها جایگزین شده (Durieux and Brown, 2007) و یا در اثر فرایندهای برون‌زاد، اکسیده می‌شوند. پیریت‌های فرامبوئیدال در کانسار چهرآباد به صورت بلورهای ریز کروی شکل در اندازه حدود ۴۰ میکرون حضور داشته و در بیشتر موارد به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن تبدیل شده است (شکل ۷-F). پیریت نسل دوم (Py_2) طی دگرسانی شسته‌شدن و احیایی شدن محیط تشکیل می‌شود (Mahdavi et al., 2011). این نسل از پیریت در مرحله دیاژنز و طی دگرسانی شسته‌شدن، جانشین مواد آلی و فسیل‌های گیاهی شده و در مرحله کانه‌زایی به وسیله دیگر سولفیدها جانشین می‌شود. با این وجود، در بیشتر موارد پیریت شکل ابتدایی خود را حفظ می‌کند. پیریت نسل دوم در کانسار چهرآباد منحصراً در پهنه احیایی کانه‌دار و به صورت بلورهای دانه‌ریز، نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با بافت دانه‌پراکنده در همراهی با دیگر سولفیدها مشاهده می‌شود (شکل ۷-G). این نسل از پیریت نیز اغلب به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن دگرسان شده است.

کالکوپیریت از کانی‌های اولیه کانسارهای مس با میزبان رسوبی است که طی مرحله اولیه کانه‌زایی تشکیل می‌شود (Kirkham, 1996; Cox et al., 2007). کالکوپیریت اغلب بر اثر عبور سیال غنی از مس از بخش‌های دارای مواد آلی و فسیل‌های گیاهی تشکیل شده و معمولاً جانشین سلول‌های گیاهی می‌شود. کالکوپیریت در کانسار چهرآباد به صورت بلورهای بسیار ریز بی‌شکل در افق کانه‌دار H-B و به میزان کمتر در افق H-A حضور دارد. بر اساس روابط بافتی، کالکوپیریت‌های موجود را می‌توان به دو نسل تفکیک کرد. نسل اول کالکوپیریت (Ccp_1) به صورت هم‌رشد با گالن‌های نسل اول، اسفالریت و پیریت نسل دوم دیده شده و بافت جانشینی و سیمان بین‌دانه‌ای نشان می‌دهد

به ماسه‌سنگ‌های بدون کانه‌زایی، تمرکزهای به نسبت پایین‌تری از عناصر کمیاب و کمیاب خاکی دارند.

نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل دیده می‌شود، الگوی این عناصر برای نمونه‌های کانه‌دار و ماسه‌سنگ‌های بدون کانه‌زایی مشابه است؛ با این تفاوت که نمونه‌های کانه‌دار نسبت



شکل ۷. کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانه‌ها در کانسار چهرآباد. A, B, C و D: گالن نسل اول با بافت‌های شبه لامینه‌ای (A)، عدسی‌شکل (B)، دانه‌پراکنده (C) و سیمان بین‌دانه‌ای (D)، E: گالن نسل دوم با بافت رگچه‌ای، F: پیریت نسل اول با بافت فرامبوئیدال، G: پیریت‌های دانه‌پراکنده و بی‌شکل نسل دوم در کنار گالن‌های نسل اول، H: کالکوپیریت‌های نسل اول به‌صورت هم‌رشد با گالن‌های نسل اول، I: کالکوپیریت نسل دوم با بافت رگچه‌ای، J: کالکوسیت جانشین‌شده در قالب قطعات فسیل گیاهی و K: کالکوسیت با بافت بازماندی که از حاشیه‌ها به کوولیت و گوتیت دگرسان شده است. تصویرهای میکروسکوپی در نور بازتابی تهیه شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ccp: کالکوپیریت، Cct: کالکوسیت، Gn: گالن، Gth: گوتیت، Mlc: مالاکیت، Py: پیریت، Sp: اسفالریت).

Fig. 7. Mineralogy and structure and texture of ore minerals at Chehrabad deposit. A, B, C and D: The first generation of galena with solution seams (A), lens-shaped (B), disseminated (C) and cemented (D) textures, E: Second generation of galena with veinlet texture, F: The first generation of pyrite with framboidal texture, G: Disseminated and anhedral grains of Py_2 along with Gn_1 , H: The first generation of chalcopyrite intergrown with Gn_1 , I: Second generation of chalcopyrite with veinlet texture, J: Chalcocite replaced plant fossils, and K: Chalcocite with relict texture, altered to covellite and goethite along boundaries. All photomicrographs are taken in reflected light. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ccp: chalcopyrite, Cct: Chalcocite, Gn: galena, Gth: goethite, Mlc: Malachite, Py: pyrite, Sp: sphalerite).

جدول ۱. نتایج تجزیه‌های شیمیایی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای نمونه‌های ماسه‌سنگی و کانه‌دار در کانسار چهرآباد. تمامی داده‌ها برحسب گرم در تن هستند.

Table 1. Geochemical data of trace and rare earth elements for sandstone and mineralized samples from the Chehrabad 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
CH-15a	<1	14	0.8	879	1.43	0.63	0.15	0.67	<0.5	6259
CH-15b	40	8	0.6	499	0.82	0.28	<0.1	<0.05	<0.5	3186
CH-18	286	36	4.4	19	3.6	1.93	0.92	3.27	1.76	17137
CH-20	384	30	1.7	184	3.19	1.71	0.86	2.79	1.15	12015
CH-28	85	21	1.5	688	2.24	1.15	0.42	1.63	0.88	9759
CH-40	103	22	1.4	213	2.15	1.08	0.41	1.6	0.9	9805
CH-41	722	18	1.4	>5%	2.07	1.05	0.59	1.42	0.84	10462
CH-41a	259	13	0.9	>5%	1.53	0.81	0.21	0.59	0.56	4155
	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
CH-15a	8	<0.1	2	4.4	199	>3%	1.13	12	>3%	0.96
CH-15b	3	<0.1	1	<0.5	114	>3%	0.07	3	>3%	0.11
CH-18	22	0.25	8	18.3	637	101	4.72	68	610	3.82
CH-20	18	0.21	4.9	15.2	376	48	3.92	36	303	3.32
CH-28	12	0.14	3.7	9.1	313	>3%	2.35	28	>3%	1.98
CH-40	14	0.13	3.5	9.2	322	>3%	2.43	25	>3%	1.96
CH-41	10	0.12	4.1	7.7	1971	309	1.97	35	1895	2.07
CH-41a	7	<0.1	2.7	4	3417	413	1.03	11	20749	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
CH-15a	403.5	0.19	0.24	0.92	1265	<0.1	8.3	0.5	20644	19
CH-15b	195.9	0.17	0.14	0.15	592	<0.1	5.4	0.3	12896	11
CH-18	230.5	2.26	0.55	5.8	3714	0.28	16.5	1.7	99	64
CH-20	215.4	0.3	0.5	3.48	2917	0.23	15.1	1.3	43	41
CH-28	190.9	0.41	0.36	2.61	2315	0.17	11.4	1	20306	35
CH-40	287.2	1.31	0.36	2.38	2213	0.16	11.6	0.9	3073	35
CH-41	123.6	0.17	0.34	2.39	2153	0.16	10.7	0.9	1840	37
CH-41a	481.5	0.22	0.24	1.16	1661	0.12	7.9	0.7	553	27

Ch-15a: Grey sandstone with stage-1 galena cement, Ch-15b: Stage-2 galena; Ch-18: Barren red sandstone, Ch-20: Barren grey sandstone; Ch-28: Grey sandstone with stage-1 galena and sphalerite cement; Ch-40: Stage-1 galena, Ch-41: Grey sandstone with malachite cement, Ch-41a: Plant fossil totally replaced by chalcocite

رگچه‌های گالن نسل دوم در مقایسه با مرحله اصلی کانه‌زایی باشد.

توالی پاراژنتیک و مراحل تشکیل و تحول کانه‌ها

با توجه به تأثیر فرایندهای برون‌زاد، بسیاری از کانی‌های اولیه و بافت آنها در کانسار چهرآباد از بین رفته است. از این‌رو، ارائه توالی همیافتی دقیقی برای این کانسار تا حدودی مشکل است. عدم دسترسی به نمونه‌های عمقی نیز به این مسأله 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 چهرآباد را می‌توان به سه مرحله قبل از کانه‌زایی، کانه‌زایی و پس از کانه‌زایی تفکیک کرد (شکل ۹).

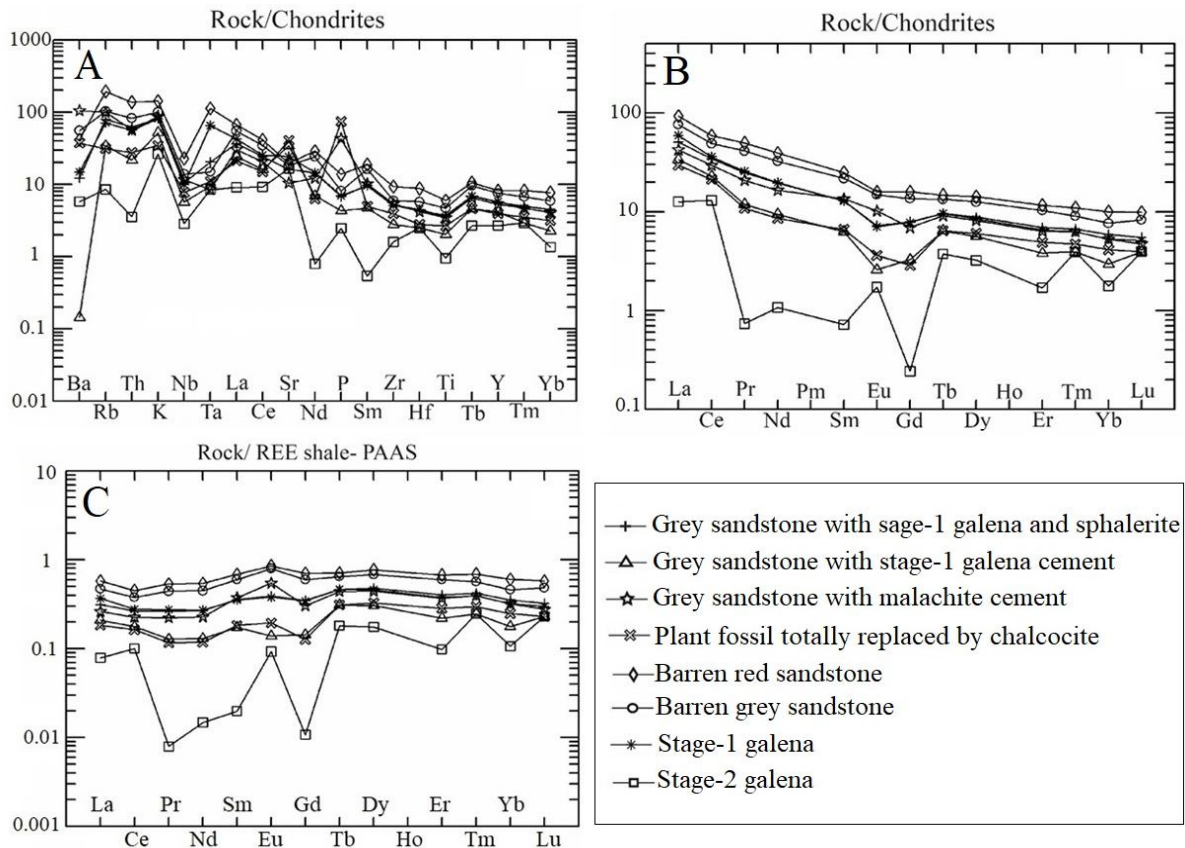
مرحله قبل از کانه‌زایی شامل مراحل هم‌زمان با دیاژنز و دیاژنز اولیه در فرایند تشکیل ماسه‌سنگ‌های میزبان کانه‌زایی است. کمی پس از ته‌نشست رسوبات، در مراحل اولیه دیاژنز، ژل‌های سولفیدی همراه با ذرات آواری ته‌نشست می‌شوند (Durieux and Brown, 2007). این ژل‌های سولفیدی اندکی بعد متبلور شده و پیریت‌های فرامبوئیدال 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 می‌کند (Walker, 1989; Azizi et al., 2018). هماتیت به صورت نواری باریک اطراف قطعات آواری به‌ویژه ذرات کوارتز را احاطه کرده و باعث قرمز شدن رسوبات می‌شود (Walker, 1989). فرایند قرمز شدن تا اواخر مرحله دیاژنز اولیه ادامه دارد. این فرایند نسبتاً طولانی با گذر زمان باعث تیره‌تر شدن رسوبات قرمز رنگ می‌شود (Walker, 1989). کربنات کلسیم موجود در آب‌های درون حفره‌ای با ادامه روند 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

غلظت عناصر کمیاب از ماسه‌سنگ قرمز به سمت ماسه‌سنگ خاکستری و نمونه‌های کانه‌دار کمتر شده است (شکل ۸-A) 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 ۸-B). نمونه گالن نسل دوم تهی‌شدگی بیشتری در عناصر کمیاب خاکی و الگوی متفاوتی را نشان می‌دهد. آنومالی منفی Eu در نمونه‌های کانه‌دار (تنها در نمونه گالن نسل دوم آنومالی مثبت دیده می‌شود) می‌تواند در ارتباط با شرایط احیایی سیال کانه‌ساز و محیط نهشت کانه‌ها باشد (Dokuz et al., 2005; Wang et al., 2006; Alderton et al., 1980)، 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 آزاد شده 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 چهرآباد، کانی‌شناسی کانی‌های ثانویه تشکیل شده طی دگرسانی و ماهیت احیایی 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 چهرآباد که نسبت به شیل استرالیا (Taylor and McLennan, 1985) بهنجار شده‌اند، در شکل ۸-C نشان داده شده است. بر اساس این شکل نیز نمونه‌های کانه‌دار در مقایسه با نمونه‌های ماسه‌سنگی، تهی‌شدگی مشخصی در غلظت عناصر کمیاب خاکی نشان می‌دهند. در مقایسه با سایر نمونه‌های کانه‌دار، نمونه گالن نسل دوم تهی‌شدگی بیشتری در عناصر کمیاب خاکی و الگوی متفاوت‌تری دارد. الگوی متفاوت این نمونه می‌تواند نشان‌دهنده شرایط متفاوت تشکیل رگه-

بین آنها و ایجاد تخلخل و نفوذپذیری می‌شود (Walker, 1989). اسیدی شدن محیط در اثر تخریب قطعات آواری گیاهی موجود در توالی رسوبی و اکسیداسیون آنهاست (Flint, 1989)

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 دانه و سیمان



شکل ۸. A: الگوی چند عنصری بهنجار شده نسبت به کندریت (Thompson, 1982) برای نمونه‌های کانهدار و ماسه‌سنگ‌های قرمز و خاکستری بدون کانسار چهرآباد، B: الگوهای عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (Sun and McDonough, 1989) برای نمونه‌های کانهدار و ماسه‌سنگ‌های قرمز و خاکستری بدون کانسار چهرآباد و C: الگوهای عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده نسبت به شیل استرالیا (Taylor and McLennan, 1985) برای نمونه‌های کانهدار و ماسه‌سنگ‌های قرمز و خاکستری بدون کانسار چهرآباد

Fig. 8. A: Chondrite-normalized multielement patterns (Thompson, 1982) for the mineralized and barren red and grey sandstone samples in the Chehrabad deposit, B: Chondrite-normalized REE patterns (Sun and McDonough, 1989) for the mineralized and barren red and grey sandstone samples in the Chehrabad deposit, and 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 Chehrabad deposit

تبخیری (لایه‌های گچ و نمک موجود در توالی سنگی سازند قرمز بالایی و گنبد نمکی چهرآباد) منشأ گرفته‌اند، از طریق گسل‌های هم‌زمان با رسوب‌گذاری و تخلخل و نفوذپذیری

مرحله کانه‌زایی مربوط به مرحله قبل از تدفین عمیق در مرحله دیاژنز میانی است. در این مرحله از فرایند دیاژنز، سیالات درون سازندی اکسیدان و گرم با شوری بالا و کلر که از واحدهای

سنگ‌های میزبان درون رسوبات به چرخش در می‌آیند. این سیالات هنگام عبور از بین رسوبات قرمز، 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، به صورت کمپلکس‌های کلریدی است (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 (Parry et al., 2004; Thorson, 2004; MacIntyre et al.,

2005; Chan et al., 2004) و در نتیجه دگرسانی شسته شدن (رنگ خاکستری یا سبز) سنگ میزبان می‌شوند (MacIntyre, 2005; Mahdavi et al., 2011; Azizi et al., 2018). فعالیت‌های باکتریایی باعث تولید اسید و کاهش pH محیط شده؛ 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 H_2S ، پیریت دیاژنتیکی ریز و خودشکل (پیریت نسل دوم) دانه‌پراکنده را به وجود می‌آورد.

	Pere-Mineralization		Mineralization		Post-Mineralization	
	Syn-diagenesis	Early diagenesis	Diagenesis		Tectonic Processes (uplift)	Supergene
			Middle diagenesis	Late diagenesis		
Redding	-----	-----				
Calcite cement		-----				
Organic destruction and acidic solution		-----	-----			
Porosity generation		-----	-----			
Bleaching			-----			
Compaction		-----		-----		
Fracture					-----	
Pyrite-I	-----					
Pyrite-II			-----			
Chalcopyrite-I			-----			
Chalcopyrite-II			-----			
Chalcocite			-----			
Mckinstryite			-----			
Stromeyerite			-----			
Galena-I			-----			
Galena-II			-----			
Sphalerite			-----			
Cerussite						-----
Vanadinite						-----
Massicot						-----
Covellite						-----
Malachite						-----
Azurite						-----
Atacamite						-----
Goethite						-----
Hematite						-----
Textures	Replacement		-----			
	Solution seams		-----			
	Vein-veinlet			-----		
	Grain cement			-----		
	Impregnation			-----		
	Disseminated			-----		

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

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

انجام شده در منطقه و با توجه به تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آنالیزهای مودال و زمین‌شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب (Rajabzadeh, 2018; Rajabzadeh et al., 2020) و حضور مقدار بالای خرده‌سنگ (به‌ویژه خرده‌سنگ رسوبی) و کوارتزهای چندبلوری می‌توان اظهار داشت که ماسه‌سنگ‌های میزبان کانه‌زایی در کانسار چهارآباد، در یک حوضه فورلندی حاشیه فعال قاره‌ای تنه‌نشست پیدا کرده‌اند. بالانو و همکاران (Ballato et al., 2016) نیز محیط زمین‌ساختی فورلندی حاشیه فعال قاره‌ای را برای ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی در شمال‌باختر ایران پیشنهاد کرده‌اند.

به‌طور معمول، کانسارهای مس 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). ویژگی‌هایی مانند حضور قابل‌ملاحظه مارن‌های قرمزرنگ، ماسه‌سنگ‌های ناپایدار و نابالغ خاکستری و قرمز، چینه‌بندی متقاطع، توالی‌های ریزشونده به سمت بالا و حضور آثار گیاهی در منطقه چهارآباد، محیط تشکیل سنگ میزبان این کانسار را می‌توان محیط‌های رودخانه‌ای مئاندری ماسه‌ای دارای پیچش زیاد و مؤلفه‌های سدی کم که تحت تأثیر محیط‌های جزر و مدی هستند، در نظر گرفت (Rajabzadeh, 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 نوع Redbed معمولاً کنگومرا و ماسه‌سنگ‌ها (به‌ویژه لیتیک آرکوز و آرکوز) هستند (Hayes et al., 2015). این دسته از کانسارها در فصل مشترک ماسه‌سنگ و کنگلومرای قرمز اکسیدان و خاکستری احیایی تشکیل می‌شوند (Hitzman et al., 2005). کانه‌زایی سرب-روی و مس در کانسار چهارآباد درون ماسه‌سنگ‌های خاکستری احیایی سازند قرمز بالایی رخ داده است. این ماسه‌سنگ‌ها از نوع فلدسپاتیک لیت آرنایت و لیت آرنایت (اغلب چرت آرنایت) هستند (Rajabzadeh, 2018).

در مرحله کانه‌زایی، شرایط مناسب برای کانه‌زایی فراهم می‌شود. حضور قطعات فسیل گیاهی و مواد آلی باعث احیای محیط در ماسه‌سنگ‌های موجود در کانال‌های دیرین (Jowett, 1989) و تنه‌نشست سولفیدهایی نظیر گالن (نسل اول)، اسفالریت، کالکوپیریت (نسل اول)، 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، رگچه‌ای، جانشینی و سیمان بین‌دانه‌ای درون ماسه‌سنگ‌هاست.

مرحله پس از کانه‌زایی شامل مرحله دیاژنز تأخیری و در ادامه بالاآمدگی و هوازدگی است. طی دیاژنز تأخیری، رگچه‌های گالن و کالکوپیریت نسل دوم تشکیل می‌شوند. درزه و شکستگی‌های ثانویه به‌وجود آمده باعث تسریع حرکت آب‌های جوی و افزایش اثر فرایندهای برون‌زاد می‌شود. در مرحله برون‌زاد، کانی‌های تشکیل شده در مراحل قبلی به کانی‌های ثانویه اکسیدی و کربناتی تبدیل می‌شوند.

نوع کانه‌زایی

در جدول ۲، ویژگی‌های کانسار چهارآباد با انواع مختلف کانسارهای مس رسوبی مقایسه شده است. با توجه به داده‌های این جدول می‌توان اظهار داشت، ویژگی‌های کانسار چهارآباد تشابه زیادی با کانسارهای مس رسوبی نوع Redbed از جمله موقعیت زمین‌ساختی، محیط تنه‌نشست، سنگ میزبان، سن، ژئومتری، ساخت و بافت، کانی‌شناسی، دگرسانی و عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی دارد.

کانسارهای مس رسوبی نوع 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. بر اساس بررسی‌های

جدول ۲. مقایسه ویژگی‌های کانسار چهرآباد با نوع‌های مختلف کانسارهای مس با میزبان رسوبی

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

	Sediment- hosted stratiform copper deposit			Chehrabad 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, covellite, digestion, bornite, pyrite, natural copper and silver, galena, sphalerite	Chalcocite, bornite, chalcopyrite, natural silver, galena and sphalerite	Chalcocite, bornite, covellite, galena, chalcopyrite, pyrite, digestion, natural copper, sphalerite	Chalcocite, covellite, galena, sphalerite, chalcopyrite, 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	Dzhezhazgan, Spar Lake	Kupferschiefer, Zambia, Kamoto	—
Reference	Woodward et al. (1974); Thorson (2004); Avila-Santos (1990); Hayes et al. (2015)	Cox et al. (2007); Gablina (1981); Adkins (1993)	Hayes et al. (2015); Cox et al. (2007); Hitzman et al. (2005); Annels (1989); Oszczepalski (1999)	Rajabzadeh, 2018

و چهارآباد (Rajabzadeh et al., 2016; Rajabzadeh, 2018)، پهنه‌بندی‌های شیمیایی از مس تا سرب و روی قابل مشاهده است. اما در برخی دیگر از آنها مانند حلب (Ghasemlou et al., 2016) و حمزه‌لو (Maleki Kahangi, 2016)، فقط کانه‌زایی مس مشاهده می‌شود. در کانسارهایی مانند اورتاسو (Haghighi et al., 2016, 2019) و ساری کند (Shakouri et al., 2016) نیز فقط افق‌های سرب و روی دیده می‌شود. نبود همه افق‌های کانه‌زایی در برخی از این کانسارها را می‌توان به فرایندهای زمین‌ساختی مرتبط دانست.

مدل تشکیل کانسار چهارآباد

با توجه به ویژگی‌های بیان‌شده و مدل‌های ارائه‌شده توسط هیتزمن و همکاران (Hitzman et al., 2005)، کاکس و همکاران (Cox et al., 2007) و هایس و همکاران (Hayes et al., 2015) برای تشکیل کانسارهای مس رسوبی نوع Redbed و تشابه کانی‌شناسی، سنگ میزبان و عامل احیا در کانسار چهارآباد با این نوع از کانسارها، مدل تشکیل این کانسار را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

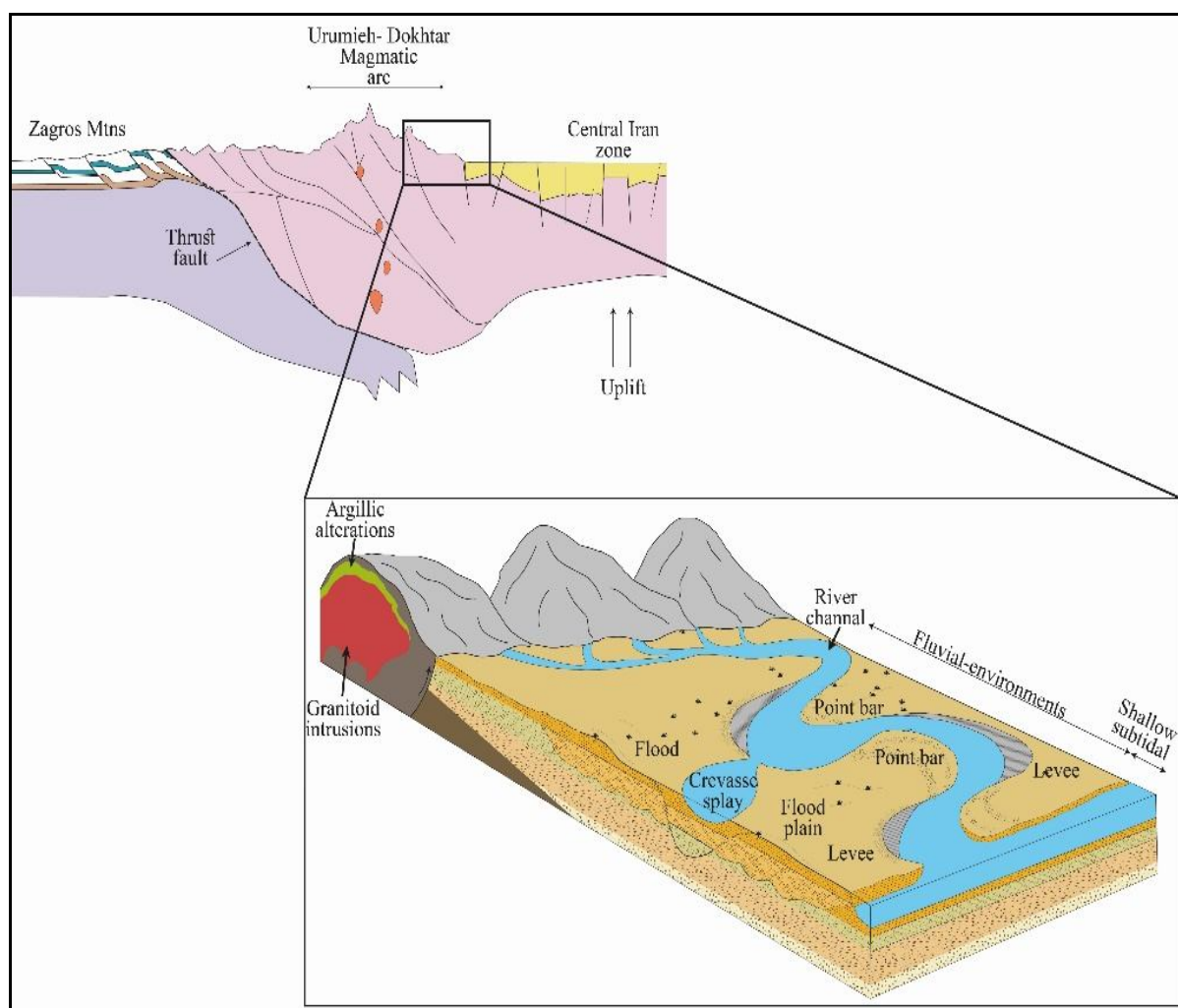
مرحله قبل از کانه‌زایی: طی میوسن با ادامه روند بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس در ایران، حوضه‌های برخوردی، کوه‌زایی و کمان ماگمایی تشکیل شده است. با ادامه روند کوه‌زایی و شکل‌گیری کمان ماگمایی ارومیه-دختر، ارتفاعات بلند و حوضه‌های کششی پشت کمان ماگمایی به وجود آمده است (Aghanabati, 2004; Ballato et al., 2016). در اثر فرایندهای هوازگی 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 شده‌اند. 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 موجود

در بیشتر کانسارهای مس رسوبی، ماده معدنی به صورت سیمان بین‌دانه‌ای، 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 (Cox et al., 2003; Hayes et al., Brown., 2015). کانه‌زایی در کانسار چهارآباد نیز به صورت شبه لامینه‌ای و عدسی‌شکل هم‌روند با لایه‌بندی ماسه‌سنگ‌های میزبان رخ داده است. بر این اساس می‌توان گفت که کانسار سرب-روی و مس چهارآباد در دسته کانسارهای مس رسوبی نوع Redbed قرار گرفته و از این نظر شباهت زیادی با دیگر کانسارهای مس رسوبی نوع Redbed ایران مانند چهارگان، چرلانقوش، اورتاسو و مارکشه دارد.

از ویژگی‌های مهم کانسارهای مس رسوبی نوع Redbed منطقه‌بندی فلزی شامل: ۱- بدون سولفید (اغلب هماتیت)، ۲- لایه‌های مس‌دار، ۳- لایه‌های غنی از سرب و روی و ۴- لایه‌های پیریت‌دار است (Brown, 1984; Jowett et al., 1987). کانسار کوپرشیفر در اروپا (Oszczepalski, 1999)، کمربند مس زامبیا در آفریقای مرکزی (Garlick, 1989) و کانسار ژورانتو در آرژانتین (Durieux and Brown, 2007)، از جمله کانسارهایی هستند که در آنها منطقه‌بندی فلزی دیده می‌شود. در کانسار کوپرشیفر، لایه‌های غنی از سرب و روی، لایه‌های مس‌دار را پوشانده‌اند (Hayes et al., 2015). در کانسار چهارآباد نیز کانه‌زایی شامل افق‌های سرب و روی و مس‌دار است؛ با این تفاوت که افق سرب و روی در بخش زیرین افق مس‌دار قرار دارد که این امر می‌تواند به رخدادهای شدید زمین‌ساختی مرتبط باشد که سبب ایجاد چین‌خوردگی‌ها و گسلش‌های فراوان در سازند قرمز بالایی در این ناحیه شده است. کانسارها و نشانه‌های متعددی از کانه‌زایی‌های مس و سرب-روی با میزبان رسوبی درون ماسه‌سنگ‌های خاکستری سازند قرمز بالایی در منطقه ماه‌نشان وجود دارد. در برخی از این کانسارها مانند چرلانقوش (Jamalipour, 2015; Azizi et al., 2018)، قزلجه (Rahimi, 2016; Azizi et al., 2018)

از آنجایی که 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 هیدرواکسیدهای آهن و اسمکتیت موجود در رسوبات جذب می‌شود. وجود بافت‌های جان‌شینی و رگچه‌ای بیانگر این است که کانه‌زایی در مرحله دیاژنز اولیه رخ نداده است.

در این رسوبات نظیر بیوتیت 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 است و این اسید باعث انحلال و تبدیل ذرات آواری فلدسپات و دیگر سیلیکات‌ها به کانی‌های رسی می‌شود.



شکل ۱۰. تصویر شماتیک از موقعیت زمین‌ساختی و محیط رسوبی سازند قرمز بالایی در منطقه چهرآباد در مرحله قبل از کانه‌زایی (Rajabzadeh, 2018).

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

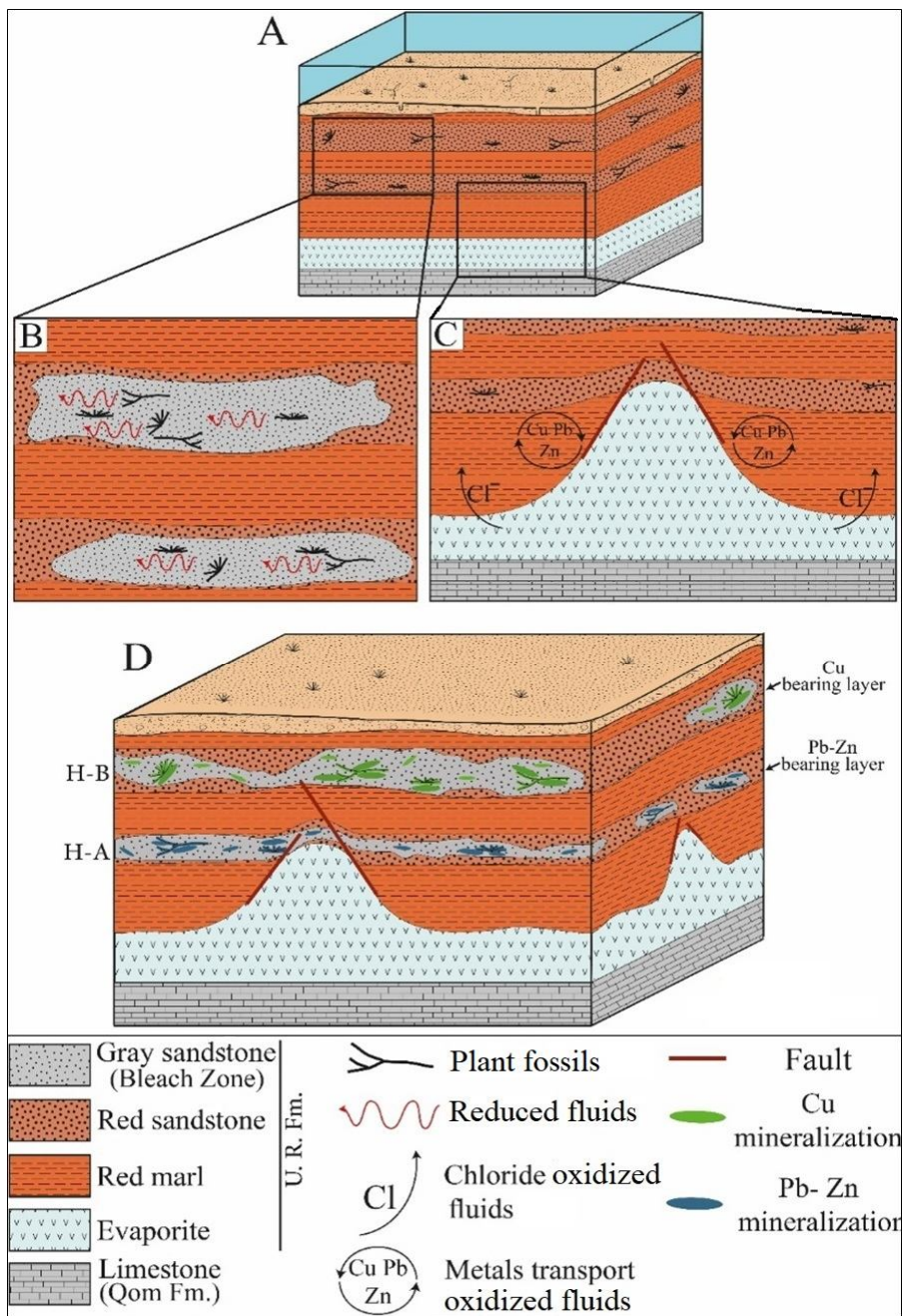
برخورد شورابه‌های سرب، روی و مس‌دار با محیط احیایی با Eh پایین است (Rose, 1976; Brown, 1997). به‌علت شرایط احیایی ایجادشده توسط بقایایی گیاهی در مرحله شسته‌شدن، سولفیدهای فلزی جایگزین بافت‌ها و سلول‌های گیاهی می‌شوند. حفظ‌شدگی ساختمان بافت‌ها و سلول‌های گیاهی جانشین‌شده توسط سولفیدهای فلزی نشان‌دهنده این است که کانه‌زایی قبل از تدفین عمیق و بالاآمدگی ایجادشده است؛ زیرا تدفین عمقی باعث از بین رفتن شبکه سلولی در فسیل گیاهی بدون کانه‌زایی می‌شود (Woodward et al., 1974). در مرحله بعد از کانه‌زایی، تدفین عمقی صورت گرفته است و در اثر بالاآمدگی، واحدهای سنگی تشکیل‌شده در سطح زمین برون‌زد می‌یابد. این برون‌زدها در معرض فرسایش و هوازدگی قرار می‌گیرند و باعث تشکیل کانی‌های برون‌زاد و اکسیدی می‌شوند. مدل تشکیل کانسار چهارآباد در شکل ۱۱-A، B، C و D نشان‌داده شده است.

نتیجه‌گیری

کانسار چهارآباد از نظر محیط زمین‌ساختی، محیط تشکیل، سنگ میزبان، ژئومتری، ساخت و بافت و کانی‌شناسی، شباهت فراوانی با کانسارهای مس رسوبی نوع Redbed دارد. کانسارها و نشانه‌های متعددی از کانه‌زایی‌های مس و سرب-روی با میزبان رسوبی درون ماسه‌سنگ‌های خاکستری سازند قرمز بالایی در منطقه ماه‌نشان وجود دارد. در برخی از این کانسارها مانند چرلانقوش، قزلجه و چهارآباد، پهنه‌بندی‌های شیمیایی از مس تا سرب و روی قابل مشاهده است؛ اما در برخی دیگر از این کانسارها مانند حلب و حمزه‌لو، فقط کانه‌زایی مس مشاهده می‌شود. در کانسارهایی مانند اورتاسو و ساری‌کند نیز فقط افق‌های سرب و روی دیده می‌شود. تمامی این کانسارها، ارتباط فضایی نزدیکی با واحدهای تبخیری و گنبد‌های نمکی موجود در سازند قرمز بالایی در این منطقه دارند. این امر در اکتشاف این نوع از کانه‌زایی‌ها حائز اهمیت بوده و باید در بررسی‌های اکتشافی مورد توجه قرار گیرد.

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). طی مراحل بعدی دیاژنز، اکسیدهای آهن آمورف به هماتیت تبدیل شده و اسمکتیت نیز با گذشت زمان و افزایش دما به ایلیت تبدیل می‌شود. این عمل سبب آزادسازی مجدد مس و سایر فلزات می‌شود (Brown, 1984, 1997). این عناصر توسط سیال اکسیدان کانه‌ساز حمل می‌شوند. این سیال در اثر آب‌زدایی و انحلال کانی‌های تبخیری و فشار لایه‌های بالایی حاصل‌شده است. سیال اکسیدان کانه‌ساز، غنی از کمپلکس‌های کلریدی و شوری متوسط تا بالا بوده و در اثر گرادیان حرارتی ایجادشده توسط دی‌پیرسم منطقه (مانند گنبد نمکی چهارآباد)، 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 سبب احیایی شدن این سیال می‌شود. باکتری‌های بی‌هوازی، سولفات موجود در آب سازندی را به H_2S احیا کرده و باعث دگرسانی شسته‌شدن در افق‌های غنی از فسیل گیاهی شده است و گوگرد تولید می‌شود. همچنین، نهشته‌های دانه‌ریز با ایجاد لایه پوششی مانع تبادل اکسیژن شده‌اند و شرایط را برای احیایی کردن محیط فراهم می‌کنند. این دگرسانی موجب می‌شود که اکسیدهای آهن از سنگ شسته‌شده یا به‌صورت پیریت دیاژنتیکی ته‌نشست یابند.

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 می‌شوند. ته‌نشست کانی‌های سولفیدی در اثر



شکل ۱۱. مدل شماتیکی از مراحل تکامل کانه‌زایی در کانسار چهارآباد. A: ته‌نشست رسوبات تبخیری و آواری سازند قرمز بالایی همراه با قطعات گیاهی، B: ادامه فرایند دیازنز و تدفین عمقی و خروج آب‌های سازندی. این سیالات در مجاورت قطعات فسیل گیاهی، احیایی شده است و باعث دگرسانی شسته‌شدن در لایه‌ها می‌شود، C: دیاپیرسم واحدهای تبخیری و تشکیل سیالات اکسیدان حاوی کمپلکس‌های کلریدی. این سیالات سبب شسته‌شدن مس، سرب و روی از رسوبات قرمز رنگ می‌شوند و D: اختلاط سیالات اکسیدان و احیایی و ته‌نشست سولفیدها در لایه‌های شسته‌شده

Fig. 11. Schematic representation of mineralization evolution stages at the Cheharabad 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 basal brines. These fluids were reduced in vicinity of the fossil plant, and caused bleached alteration zones, C: Diapirism of evaporate units and formation of oxidizing fluids containing chloride complexes. These fluids leached copper, lead and zinc from red sediments, and D: Mixing of reduced and oxidized fluids and deposition of sulfides in bleached layers

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش و از سردبیر و داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی

به خاطر راهنمایی‌های علمی که به غنای بیشتر این مقاله منجر شده است، تشکر می‌نمایند.

References

- 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, 606 pp. (in Persian)
- Alavi, M. and Omid, M., 1976. Geological map of Takab, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Alderton, D.H.M., Pearce, J.A. and 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: R.W. Boyle, A.C. Brown, C.W. Jefferson, E.C. Jowett and R.V. Kirkham (Editors), *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: L. Fontbote, G.C. Amstutz, M. Cardozo, E. Cedillo and J. Frutos (Editors), *Stratabound Ore Deposits of the Andes*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 659–670.
- Azaraien, H., Shahabpour, J. and 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. and 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., Balling, P., Sudo, M., Zeilinger, G., Schmitt, A., Mattei, M. and 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., 1984. Alternative sources of metals for stratiform copper deposits. *Precambrian Research*, 25(1–3): 61–74.
- Brown, A.C., 1997. World-class sediment-hosted stratiform copper deposits: characteristics, genetic concepts and metallotects. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3):317–328.
- Brown, A.C., 2003. Redbeds: Source of metals for sediment-hosted stratiform copper, sandstone copper, sandstone lead, sandstone uranium vanadium deposits. In: D.R. Lentz (Editor), *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. and 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. and 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, 50 pp.
- Cox, D.P., Lindsey, D.A., Singer, D.A., Moring, B.C. and 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, 53 pp.
- Daliran, F., Pride, K., Walther, W., Berner, Z.A. and Bakker, R.J., 2013. The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: evidence for a two stage,

- hypogene zinc sulfide-zinc carbonate mineralization. *Ore Geology Reviews*, 53: 373–402.
- Dokuz, A., Tanyolu, E. and 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. and 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.
- Ebrahimi, M., Kouhestani, H. and Shahidi, E., 2015. Investigation of type and origin of iron in the Mesgar occurrence, south of Zanjan, using by petrology, mineralogy and geochemistry data. *Journal of Economic Geology*, 7(1): 111–127. (in Persian with English abstract)
- Enayati Kolaie, S., Yazdi, M. and 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: R.W. Boyle, A.C. Brown, C.W. Jefferson, E.C. Jowett and R.V. Kirkham (Editors), *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, 159 pp.
- Gablina, I.F., 1981. New data on formation conditions of the Dzhezkazgan copper deposit. *International Geology Review*, 23(11): 1303–1311.
- Garlick, W.S., 1989. Mineralization controls and source of metal in the Lufillian fold belt, Shaba (Zaire), Zambia and Angola: A discussion. *Economic Geology*, 84(4): 966–968.
- Ghasemlou, A., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A. and Zohdi, A., 2016. Geological characteristic and mineralization of Hamzelou copper ore deposit, Northwest of Zanjan. 35th Symposium of Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
- Ghasemlou, A., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A. and Zohdi, A., 2017. Stratigraphy and petrographical composition of the Upper Red Formation sandstone in Hamzelou Cu deposit, Northwest of Zanjan. 3th Congress Sedimentology of Iran, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
- Guilbert, J. and Park, Ch., 1997. *The Geology of Ore deposits*, W.H. Freeman and Company Publication, New York, 985 pp.
- Haghighi, A., Nabatian, Gh., Kouhestani, H., Azimzadeh, A.M. and Zohdi, A., 2016. Geochemistry of the main oxides hosted Ortasu Pb-Zn deposit, northwest Zanjan. 8th Congress of Economic Geology of Iran, University of Zanjan, Zanjan, Iran. (in Persian with English abstract)
- Haghighi, A., Nabatian, Gh., Kouhestani, H., Azimzadeh, A.M. and Zohdi, A., 2019. Mineralization, mineralogy, structure, texture and genesis of Ortasu Pb-Zn deposit, NW Zanjan. *Journal of Economic Geology*, 11(3): 359–386. (in Persian with English abstract)
- Hayes, T.S., Cox, D.P., Piatak, N.M. and Seal, R.R., 2015. Sediment-hosted stratabound copper deposit model. U.S. Geological Survey, Virginia, 147 pp.
- Hitzman, M., Kirkham, R., Broughton, D., Thorson, J. and Selley, D., 2005. The sediment-hosted stratiform copper ore system. In: J.W. Hedenquist, J.F.M. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), *One Hundred Anniversary volume*. *Economic Geology*, Littleton, pp. 609–612.
- Hitzman, M.W., Selley, D. and Bull, S., 2010. Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through earth history. *Economic Geology*, 105(3): 627–639.
- Jamalipour, S., 2015. Mineralogy and geochemistry of host rock and Pb ore in the Chaerlanghoosh deposit. M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 125 pp. (in Persian with extended English abstract)
- Jowett, E.C., 1989. Effects of continental rifting on location and genesis of stratiform copper-silver deposits. In: R.W. Boyle, A.C. Brown, C.W. Jefferson, E.C. Jowett and R.V. Kirkham (Editors), *Sediment-hosted stratiform copper*

- deposits. Geological Association of Canada, Special Paper 36, Canada, pp. 53–66.
- Jowett, E.C., Rydzewski, A. and Jowett, R.J., 1987. The Kupferschiefer Cu-Ag ore deposits in Poland: A reappraisal of the evidence of their origin and presentation of a new genetic model. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 24(10): 2016–2037.
- Karami, M., Ebrahmi, M. and Kouhestani, H., 2016. Loulak-Abad occurrence, NW Zanjan: metamorphosed and deformed type of volcano-sedimentary deposit in the Central Iranian Zone. *Journal of Economic Geology*, 8(1): 93–115. (in Persian with English abstract)
- Karimi, M., 2012. Final Exploration Report of Cu-Pb in Chehrabad area. Industry, Mine and Trade Organization of Zanjan, Zanjan, 178 pp. (in Persian)
- Khodabandeh, A.A., Faridi, M. and 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: R.W. Boyle, A.C. Brown, C.W. Jefferson, E.C. Jowett and R.V. Kirkham (Editors), *Sediment-hosted stratiform copper deposits*. Geological Association of Canada, Special Paper 36, Canada, pp. 3–38.
- Kirkham, R.V., 1996. Sediment-hosted copper. In: O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair and R.I. Thorpe (Editors), *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*. Geological Association of Canada, Canada, pp. 223–240.
- Lotfi, M., 2001. Geologic map of Mahnesan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Iran.
- Love, L.G. and 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. Unpublished M.Sc. Thesis, Colorado School of Mines, Colorado, United State, 360 pp.
- MacIntyre, T.J., Thorson, J.P. and 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., Rastad, A. and 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. Unpublished M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 156 pp. (in Persian with English abstract)
- Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Rashid-Nejad Omran, N. and Daliran, F., 2010. Geochemistry and origin of Sorkheh-Dizaj iron oxide-apatite deposit, SE Zanjan. *Journal of Economic Geology*, 1(1): 19–46. (in Persian with English abstract).
- Oszczepalski, S., 1999. Origin of the Kupferschiefer polymetallic mineralization in Poland. *Mineralium Deposita*, 34(5-6): 599–613.
- Parry, W.T., Chan, M.A. and Beitler, B., 2004. Chemical bleaching indicates fluid flow in sandstone deformation bands. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 88(2): 175–191.
- Rahimi, R., 2016. Mineralogy and formation of copper in Ghezeljeh region. Unpublished M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 196 pp. (in Persian English abstract)
- 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 Mahnesan). Unpublished M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran. 162 pp. (in Persian with English abstract)
- Rajabzadeh, A., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A. and Zohdi, A., 2016. Mineralization, structure and textures and mineralography 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. and Zohdi, A., 2020. Petrography and geochemistry of major and trace elements of the Upper Red Formation at Chehrabad Pb-Zn deposit, northwest of Zanjan, implication for provenance and tectonic setting. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*. (in Persian with 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. Unpublished Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 170 pp. (in Persian with English abstract)
- Sadati, S.N., Yazdi, M., Mao, J., Behzadi, M., Adabi, M.H., Lingang, X., Zhenyu, C. and 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.
- Salehi, T., Ghaderi, M. and Rashid-Nejad Omran, N., 2011. Mineralogy and geochemistry of Rear Earth Elements in the Gomish-Tappeh Zn-Pb-Cu (Ag) deposit, SW Zanjan. *Journal of Economic Geology*, 2(2): 235-254. (in Persian with English abstract)
- Sephri Rad, R. and Fathjo, D., 2010. Exploration report of sedimentary copper mineralization in south Zanjan. Geological Survey of Iran, Tehran, 150 pp. (in Persian)
- Shakouri, N., Nabatian, Gh., Kouhestani, H. and Zohdi, A., 2016. Mineralization, structure and textures and mineralography of Sari Kand Pb-Zn deposit, Northwest of Zanjan. 35th Symposium of Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
- Subias, I., Fanlo, I. and 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. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders and M.J. Norry (Editors), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publication 42, London, pp. 313–345.
- Taylor, S. and McLennan, S., 1985. *The continental crust: Its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, 312 pp.
- 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: R.W. Boyle, A.C. Brown, W. Jefferson, E.C. Jowett and R.V. Kirkham (Editors), *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. and 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. and 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. and Talbott, L.W., 1974. Stratabound copper deposits in Triassic sandstone of Sierra Nacimiento, New Mexico. *Economic Geology*, 69(1): 108–120.