



مقاله پژوهشی

بررسی فرآیندهای کانی‌سازی زیست‌زادی و غیرزیست‌زادی در کانسارهای فلزی با میزبان رسوبی سازند قرمز بالایی، منطقه ماه‌نشان، شمال غرب ایران

سفورا شاکری^۱، محسن رنجبران^{۱*}، میرعلی اصغر مختاری^۲، سید محمد زمان زاده^۱

۱- دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران.

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

*مسئول مکاتبات: محسن رنجبران، m.ranjbarani@ut.ac.ir

چکیده

سازند قرمز بالایی در منطقه ماه‌نشان (استان زنجان، شمال‌باختر ایران) شامل توالی‌های آواری به سن میوسن است که به لحاظ رسوب‌شناسی، دیرینه‌شناسی و زمین‌شناسی اقتصادی مورد توجه است. بخش عمده کانه‌زایی‌های فلزی در لایه‌های آواری این سازند را کانه‌های مس‌دار تشکیل می‌دهند که اغلب با سه زون رنگی متمایز (قرمز- اکسیدان، سفید- شسته‌شده و سبز- احیایی) معرفی شده‌اند. همراهی لایه‌های کانه‌دار با بقایای گیاهی و اترفسیل‌های بی‌مهرگان یا مهره‌داران، فرضیه نقش فرآیندهای زیستی در این نوع کانه‌زایی را مطرح می‌سازد. در این پژوهش، بر اساس مشاهدات صحرایی، شواهد سنگ‌شناسی رسوبی و دیرینه‌شناسی، ارتباط احتمالی میان مواد آلی با کانه‌زایی‌های مس بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط احیایی موضعی، کربن آلی حاصل از بقایای گیاهی نقش بسیار مهمی را در جذب و تمرکز عناصر یادشده و تشکیل کانه‌زایی‌های مس داشته است که در زون‌های رسوبی به رنگ سبز احیایی مشاهده می‌شود. همچنین، با مشاهده اترفسیل‌های بی‌مهرگان همراه با تمرکز کانه‌های فلزی در رسوبات پرکننده حفاری‌ها، این فرضیه که فعالیت‌های زیستی در کانه‌زایی فلزی نقش داشته است، تقویت می‌شود. با وجود چنین شواهدی، اهمیت توجه به نشانه‌های زیستی در فرآیندهای کانه‌زایی این منطقه ضروری می‌نماید و بر لزوم پژوهش‌های آینده با رویکرد ژئوشیمیایی و ایزوتوپی تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی زیستی، سازند قرمز بالایی، کانسار مس رسوبی، فسیل گیاهی، اترفسیل.

ماخذنگاری: شاکری، ص، رنجبران م، مختاری م. و زمان زاده م. (۱۴۰۳). بررسی فرآیندهای کانی‌سازی زیست‌زادی و غیرزیست‌زادی در کانسارهای فلزی با میزبان رسوبی سازند قرمز بالایی، منطقه ماه‌نشان، شمال غرب ایران. دوفصلنامه چینه‌نگاری و دیرینه‌شناسی، (۱)، ۷۵-۸۸. ©حقوق معنوی مقاله برای دوفصلنامه چینه‌نگاری و دیرینه‌شناسی و نویسندگان محفوظ است.

doi: 10.30470/zpaleo.2024.732532



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License



(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Assessment of Biogenic and Abiogenic Mineralization Processes in Sediment-Hosted Metal Deposits of the Upper Red Formation, Mahneshan Region, NW Iran

Safoora Shakeri¹, Mohsen Ranjbaran^{1*}, Mir Ali Asghar Mokhtari², Seyyed Mohammad Zamanzadeh¹

1- School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Geology, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Corresponding author: Mohsen Ranjbaran: m.ranjbarani@ut.ac.ir

Abstract:

The Upper Red Formation in the Mahneshan region (Zanjan province, northwestern Iran) consists of Miocene detrital sequences that are of interest in terms of sedimentology, paleontology, and economic geology. Most of the metal mineralization in the detrital layers of this Formation consists of copper-bearing minerals, which are often represented by three distinct color zones (red-oxidizing, white-bleaching, and green-reducing). The association of ore-bearing layers with plant remains and vertebrate or invertebrate trace fossils, suggests the role of biogenic processes in this type of mineralization. In this study, based on field observations, sedimentary petrology, and paleontological evidences, the possible relationship between organic matter and copper mineralization was investigated. The results show that under local reduction conditions, organic carbon from plant remains played a very important role in the absorption and concentration of Cu minerals, which are observed in the green-reducing sedimentary zones of anoxic conditions. Also, the discovery of the invertebrate traces with the concentration of metal ores in the burrow sediments fills suggests the hypothesis that biological activities played a role in metal mineralization. Despite such evidence, it shows the importance of paying attention to biological signs in mineralization processes and emphasizes the need for future research with a geochemical and isotopic approach.

Keywords: Biomineralization, Upper Red Formation, Copper sedimentary ore, Plant fossils, Trace fossils

مقدمه

مطالعات نشان می‌دهد که این کانسارها عمدتاً از نوع مس با میزبان رسوبی (Copper deposit with sedimentary host rock) احتمالاً تحت تأثیر فرآیندهای دیاژنزی و زیستی تشکیل شده‌اند. به دلیل کانه‌زایی‌های کوچک مقیاس و محلی، عناصر فلزی در لایه‌های آواری تجمع پیدا کرده است که مورد توجه فعالان معدنی است و مورد اکتشاف یا بهره‌برداری منابع معدنی پلی‌متال می‌باشند.

در بیشتر نوشته‌ها و مقالات پیشین، درباره سنگ‌منشاء و جایگاه زمین‌ساختی ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی در منطقه ماه‌نشان (رجب زاده و همکاران، ۱۳۹۹؛ میرحسینی و همکاران، ۱۳۹۹)، یا خارج از این منطقه (مانند رضایی و همکاران، ۱۳۹۹ و Amini, 2001) بحث شده است؛ ولی کمتر به فرآیندهای دیاژنزی و چگونگی جانشینی عناصر فلزی و نقش فعالیت‌های زیستی و حتی بقایای آلی در این فرآیند، پرداخته شده است. این در حالی است که عزیزی و همکاران (Azizi et al., 2018) در مطالعه کانه‌زایی رسوبات آواری منطقه دوزکند- ماه‌نشان به نقش مواد آلی گیاهی اشاره نموده و تخریب مواد آلی و ایجاد سولفور در مراحل انتهایی سین‌دیاژنز و ابتدای دیاژنز را در کانه‌زایی موثر دانسته‌اند. هدف از ارائه مقاله حاضر، بررسی ویژه شواهد نقش مواد آلی گیاهی و فعالیت‌های زیست‌زادی در کانه‌زایی رسوبات آواری سازند قرمز بالایی در شمال‌باختر استان زنجان است.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه در شمال‌باختر استان زنجان واقع است (شکل ۱-الف). برای دسترسی به این منطقه می‌توان از مسیر جاده زنجان به تبریز استفاده نمود که پس از طی ۳۵ کیلومتر، از طریق جاده نیک‌پی به ماه‌نشان می‌توان به جاده مهرآباد-مشمپا دست یافت.

سازند قرمز بالایی (Upper Red Formation, URF) از سازندهای شناخته‌شده و گسترده به سن میوسن در پهنه ایران مرکزی است. دو سازند قرمز زیرین و قرمز بالایی شامل مجموعه رسوباتی با رخساره قاره‌ای هستند که به ترتیب در زیر و بالای سازند قم قرار داشته و بر اساس موقعیت چینه‌نگاری به این نام‌ها خوانده شده‌اند (NIOC, 1959; آقنابتی، ۱۳۸۳؛ رحیم‌زاده، ۱۳۷۴). سازندهای قرمز زیرین، قم و قرمز بالایی پس از رخداد کوهزایی پیرینه در انتهای ائوسن و در یک چرخه رسوبی قاره‌ای- دریایی و سپس مجدداً قاره‌ای شکل گرفته‌اند. علی‌رغم پرفسیل بودن سازند قم که سن آن را شاتین تا بوردیگالین (Chattian-Burdigalian) نشان می‌دهد، هر دو سازند قرمز زیرین و بالایی فقیر از فسیل بوده و بر پایه موقعیت چینه‌نگاری به ترتیب به الیگوسن و میوسن زیرین-پسین نسبت داده شده‌اند (Gansser, 1955; NIOC, 1959).

سازند قرمز بالایی در بخش‌های جنوبی و باختری استان زنجان برونزد گسترده‌ای دارد و به دلیل داشتن توالی رنگین از لایه‌های مارن و ماسه‌سنگ در مناطق باختری استان زنجان، به نام تپه‌های رنگین ماه‌نشان (آلاداغلار) معروف است. هر چند سازند قرمز بالایی در این ناحیه نیز فقیر از محتوای فسیل‌های پیکره‌ای است، ولی به طور پراکنده آثار و بقایای گیاهی در توالی رسوبی آن یافت می‌شود. از طرف دیگر، غنی از سنگواره‌های ردپای مهره‌داران خشکی‌زی است که نشان‌دهنده رسوبگذاری این سازند در شرایط قاره‌ای است (عباسی و شاکری، ۱۳۸۴).

در برخی از بخش‌های این سازند، کانی‌سازی مس و سرب- روی به صورت لایه‌ای، عدسی‌شکل یا رگه‌ای مشاهده می‌شود.

نتایج

جایگاه زمین‌شناسی

بخش اصلی و مرکزی حوضه رسوبی سازند قرمز بالایی احتمالاً در محل کویر بزرگ ایران مرکزی واقع بوده، زیرا ضخامت آن در این محل به بیش از ۶۰۰۰ متر می‌رسد. در بخش‌های مرکزی پهنه ایران مرکزی، مرز زیرین سازند قرمز بالایی عموماً بر روی سازند قم است که به واسطه یک واحد تبخیری، متعلق به سازند قم بر روی آن می‌نشیند. سازند قرمز بالایی بطرف رأس، دانه‌درشت‌تر شده و در نهایت تبدیل به کنگلومرا می‌گردد که احتمالاً متعلق به پلیوسن است. به عبارتی، مرز بالایی سازند قرمز بالایی با رسوبات پلیوسن پیوسته است ولی در مناطقی مانند کوه یزدان قم، این مرز بصورت ناپیوستگی دگرشیب می‌باشد (رنجبران و ستوهیان، ۱۴۰۴).

زمین‌شناسان شرکت ملی نفت ایران، سازند قرمز بالایی را در منطقه دشت قم به دو زیر واحد تقسیم کرده‌اند:

- زیرواحد تبخیری زیرین M1، به ضخامت ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر متشکل از نمک، انیدریت، لایه‌های ریگ‌دار و شیل‌های نازک‌لایه قیری و رس‌های نمک‌دار به رنگ قرمز تیره.

- زیرواحد فوقانی M2، به ضخامت ۴۰۰ تا ۵۰۰۰ متر متشکل از مارن‌های گچ‌دار و ماسه‌سنگ قرمز-قهوه ای تیره‌رنگ در قسمت تحتانی، مارن و ماسه‌سنگ‌های زرد-قهوه ای تا قرمز روشن در قسمت فوقانی.

دو بخش مزبور به وسیله یک لایه راهنما از مارن سبز رنگ از هم جدا می‌شوند. ضخامت سازند قرمز بالایی در گستره آن متغیر است. در منطقه زنجان و تکاب، حدود ۱۷۰۰ متر و در میانه ۱۴۰۰ متر ضخامت این سازند اندازه‌گیری شده است.

در این مناطق، سازند قرمز بالایی را به دو واحد سنگی M1 و M2 تقسیم نموده اند (لطفی، ۱۳۸۰؛ Stöcklin and Eftekhar-Nezhad, 1969, Ballato et al., 2016):

M1- شامل مارن‌های رنگین گچی است که به واسطه لایه‌های تبخیری قاعده‌ای (Gyp در شکل ۱) از سازند قم جدا می‌شود. لایه‌های M1، بر پایه چیرگی مارن‌های قهوه‌ای یا سبز به دو زیرواحد سنگی مارن‌های قهوه‌ای در زیر (M1b) و مارن‌های سبز در بالا (M1g) تقسیم می‌شود.

M2- شامل مارن‌های قهوه‌ای تیره با میان‌لایه‌های آواری است. مشابه M1 به دو زیر واحد سنگی M2b (بیشتر مارن‌های قهوه‌ای تیره) و M2g (بیشتر مارن‌های سبز) تقسیم می‌شود.

با توجه به رخساره و توالی واحدهای سنگی به نظر می‌رسد در این منطقه، سازند قرمز بالایی از دو سکانس رسوبی تشکیل شده است و ممکن است مرز میان M1 و M2 در برخی مناطق ناپیوسته باشد (Rafiei et al., 2011; Abbassi, 2022).

سن سازند قرمز بالایی عموماً به میوسن میانی تا پسین نسبت داده می‌شود. بر پایه داده‌های سن‌سنجی رادیومتری، سنی در حدود ۲۵ میلیون سال پیش ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) (انتهای الیگوسن تا ابتدای میوسن میانی) یا ۱۹/۸ میلیون سال پیش (U-Pb) (میانه میوسن پیشین تا میانه میوسن پسین) را برای این سازند در نظر می‌گیرند (Ballato et al., 2016).

بحث و نتیجه گیری

کانه‌زایی زیستی (Biomineralization) فرآیندی است که در طی آن زیست‌مندان (مانند باکتری‌ها و قارچ‌ها) با ترشح آنزیم‌ها یا تغییر شرایط شیمیایی محیط، باعث رسوب مواد معدنی شده‌اند (Boskey, 2003). این فرآیند به دو حالت تقسیم می‌شود: بیومینرالیزاسیون کنترل‌شده (Controlled) مانند

الف- تجمع مواد آلی گیاهی (فعالیت باکتری‌های احیاکننده سولفات)

در محیط‌های مردابی و کم‌اکسیژن محیط‌رسوبی سازند قرمز بالایی (مانند حوضچه‌های راکد و ماندآبها)، این باکتری‌ها با احیای سولفات به سولفید، شرایط را برای تشکیل کانی‌های سولفیدی مس (مانند کالکوسیت و کوولیت) فراهم کرده‌اند. همچنین، تأثیر میکروبی اکسیداسیون و احیای متناوب آهن و منگنز توسط میکروارگانیسم‌ها می‌توانسته باعث جذب و رسوب انتخابی مس در لایه‌های رسوبی شود. بقایای گیاهی و ریشه‌ها در برخی لایه‌های ماسه‌سنگی با زون‌های سبز مس‌دار هم‌مکانی دارند. این هم‌جواری نشان می‌دهد که لیگنین و سایر ترکیبات آلی گیاه می‌توانستند به‌عنوان مراکز رسوب‌گذاری یون‌های Cu^{2+} عمل کنند. زون‌بندی رنگی (قرمز-سفید-سبز) نشان‌دهنده تغییر شرایط اکسایش-کاهش است. حضور رنگ سبز اغلب با کانی‌های مس ثانویه (مثل مالاکیت، آتاکامیت یا کلریت‌های مس‌دار) و ارتباط مستقیم با مواد آلی مشاهده می‌شود. ساختارهای میکروسکوپی، مثل رسوبات ریزبلور اطراف سلول‌های گیاهی شکسته می‌توانند با میکروسکوپ الکترونی و آنالیز EDS تأیید شوند و نقش بیومینرالیزاسیون را از کانه‌زایی صرفاً غیرزیستی متمایز سازند (Li and He and Kirilak, 2014; et al., 2016). بنابراین، شواهد نشان می‌دهد که بیومینرالیزاسیون نه‌تنها در شروع رسوب‌گذاری مس نقش داشته، بلکه احتمالاً در بازتوزیع ثانویه فلز در محیط رسوبی هم اثرگذار بوده است. در سازند قرمز بالایی، شواهد زیستی و غیرزیستی معمولاً هم‌زمان دیده می‌شوند. یعنی بیومینرالیزاسیون به‌تنهایی عامل اصلی نیست، بلکه در کنار فرآیندهای غیرزیستی (مانند دیازنز و محلول‌های متاژنتیک) عمل می‌کند و باعث تمرکز موضعی مس می‌شود.

تشکیل پوسته‌های آهکی توسط نرم‌تنان. بیومینرالیزاسیون القا شده (Induced) که شامل ته‌نشست کاتیون‌های فلزی توسط باکتری‌ها می‌باشد (Brown, 1997).

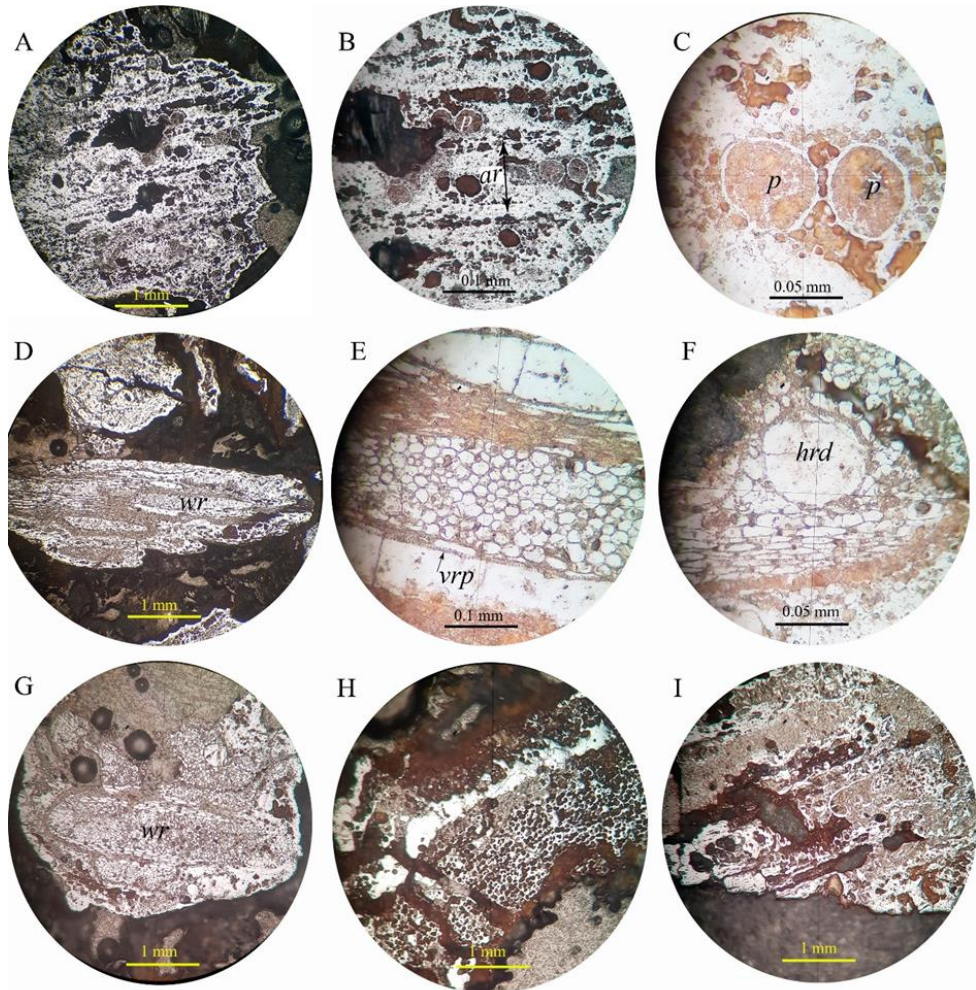
در کانسارهای مس رسوبی، بیومینرالیزاسیون عمدتاً از نوع القایی است و توسط میکروارگانیسم‌هایی انجام می‌شود که با تغییر pH و پتانسیل اکسیداسیون-احیا (Eh) محیط، باعث رسوب مس می‌شوند (Ehlich et al., Liu et al., 2021).

میکروارگانیسم‌های مختلفی در رسوب مس نقش دارند که مهم‌ترین آن‌ها باکتری‌های احیاکننده سولفات (SRB) و باکتری‌های اکسیدکننده آهن و گوگرد هستند.

در حالت نخست، باکتری‌ها با احیای سولفات (SO_4^{2-}) به سولفید (S^{2-})، شرایط را برای تشکیل سولفیدهای مس فراهم می‌کنند و در حالت دوم، میکروارگانیسم‌ها با اکسیدکردن سولفیدها و آهن، مس را در محیط آزاد کرده و شرایط را برای رسوب آن فراهم می‌کنند (Jalali and Baldwin, 2000). در این میان، برخی از قارچ‌ها با ترشح اسیدهای آلی و لیگاندهای کمپلکس‌ساز، باعث انحلال یا رسوب مس می‌شوند.

در کل این فرآیندها، عواملی چون شرایط شیمیایی محیط به صورت اسیدپته پایین و Eh احیایی برای تشکیل سولفیدهای مس مطلوب است. از طرف دیگر، یون‌های مس باید در محیط موجود باشند (مانند محلول‌های گرمابی یا آب‌های زیرزمینی) که امکان تجمع آن در رسوب فراهم گردد. تراکم و نوع میکروارگانیسم‌ها تأثیر مستقیم بر سرعت رسوب مس دارد (and Jaffé, 2019 Bilgin).

در میان نمونه‌های مورد مطالعه از سازند قرمز بالایی، نقش زیست‌کانه‌زایی در تشکیل مس را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی نمود:



شکل ۲- بافت‌های چوب در نمونه‌های مورد مطالعه A-C- نمونه ۱، در بزرگنمایی‌های مختلف که در آن خطوط رشد سالیانه (ar) و کانال‌های صمغی (p) قابل مشاهده است؛ D-F- نمونه شماره ۲، بافت سلول‌های پره‌چوب (wr) و کانال افقی رزین (hrd) و روزنه‌های میان سلول‌های پره و آوند (vrp) (پیکان)؛ G-I- نمونه شماره ۳- بافت‌های پره‌چوب (wr) یا پارانشیمی پرشده با اکسید آهن.

ب- فعالیت بی‌مهرگان

میزان فعالیت بی‌مهرگان در بسترهای رسوبی به عوامل مختلفی بستگی دارد. با مهیا بودن شرایط زیستی انتظار این می‌رود که تجمع زیست‌مندان در بسترهای رسوبی قابل توجه باشد. تاثیر فعالیت جانداران بر روی بسترهای رسوبی به صورت اثرفسیل‌هایی باقی می‌ماند. به نوعی می‌توان با بررسی نوع و فراوانی اثرفسیل‌ها به شرایط زیست‌محیطی نیز پی‌برد (Seilacher, 2007).

محیط رسوبی سازند قرمز بالایی اساساً یک محیط قاره‌ای بوده است. نوع اثرفسیل‌های این نوع محیط‌ها معمولاً به صورت اثررخساره اسکونینیا (*Scoyenia*) معرفی می‌شود. این اثررخساره از نوع اثرفسیلی اندک برخوردار است و با اثرهای شاخصی چون *Taenidium*، *Skolithos*، *Scoyenia* و ردپای مهره‌داران شناخته می‌شود (Hasiotis, 2002). در لایه‌های سازند قرمز بالایی به وفور اثرفسیل *Scoyenia* و ردپاهای مهره‌داران یافت می‌شود. در یکی از نمونه‌های دارای کانه فلزی، اثرفسیل *Scoyenia* به صورت اثر درون‌رسوبی (*endichnia*) یافت شد که به خوبی کانه‌زایی فلزی در بخش‌هایی از رسوبات زیست‌آشفته تجمع یافته است (شکل ۳). این نمونه، از نوع ماسه‌سنگ لیت‌آرنایت دانه‌متوسط می‌باشد (شکل ۴) که همراه با کانه‌زایی‌های فلزی مانند تهنشست گالن، اسفالریت، پیریت، کالکوسیت و گوتیت است (شکل ۵). برخی از فعالیت‌های زیستی با جورشدگی زیستی رسوبات و تغییرات بافتی همراه هستند (Bromley, 1996). در اینجا نیز می‌توان تجمع کانه‌زایی را به همراه رسوبات دانه‌درشت زیست‌آشفته در اسپریت‌های اسکونینیا مشاهده نمود (شکل ۴). در این زیست‌آشفته‌گی، ابتدا رسوبات به

صورت دانه‌ریز و دانه‌درشت، فابریک و جورشدگی زیستی یافته‌اند. این نوع جورشدگی امکان جابجایی سیالات را در بخش‌هایی از اثرفسیل فراهم نموده است.

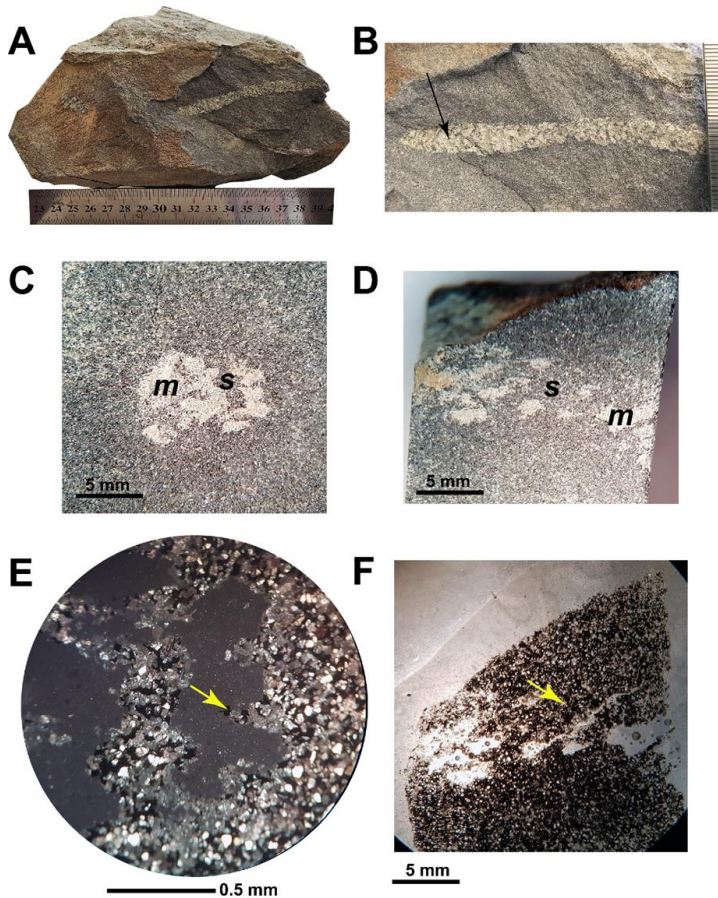
در مجموع، همان‌گونه که در جدول ۱ و جدول ۲ نشان داده شده است، بررسی دقیق ویژگی‌های سنگ‌شناسی، فسیل‌شناسی و ریزساختاری نمونه‌های سازند قرمز بالایی بیانگر نقش توأمان فرآیندهای زیستی و غیرزیستی در تمرکز و کانه‌زایی مس است. در بخش‌های مختلف این سازند، شواهد فراوانی از تاثیر زیست‌کانه‌زایی و فعالیت‌های زیستی به‌ویژه در ارتباط با بقایای گیاهی و اثرفسیل‌های بی‌مهرگان دیده می‌شود. حضور شاخه‌ها و ریشه‌های گیاهی در لایه‌های ماسه‌سنگی سبزرنگ، تشکیل هاله‌های معدنی اطراف مواد آلی، و تمرکز بلورهای ریز کانی‌های مس‌دار در مجاورت بافت‌های گیاهی، نشان‌دهنده‌ی عملکرد هم‌زمان فرآیندهای زیستی در رسوب‌گذاری و تمرکز یون‌های مس در مراحل اولیه و ثانویه‌ی رسوب‌گذاری است.

افزون بر این، مشاهده‌ی اثر فسیل‌های *Scoyenia* در لایه‌های دارای کانه‌زایی و ارتباط مستقیم میان مناطق زیست‌آشفته با تمرکز فلزات، بیانگر آن است که فعالیت بی‌مهرگان در بسترهای رسوبی سبب افزایش نفوذپذیری موضعی، تغییر در بافت و فابریک رسوبات و در نتیجه فراهم شدن مسیرهای مناسب برای جابه‌جایی محلول‌های فلزدار شده است. به این ترتیب، فرآیندهای زیستی نه‌تنها در مرحله‌ی اولیه‌ی رسوب‌گذاری مؤثر بوده‌اند، بلکه در بازتوزیع و تمرکز ثانویه‌ی فلز نیز نقش قابل توجهی ایفا کرده‌اند.

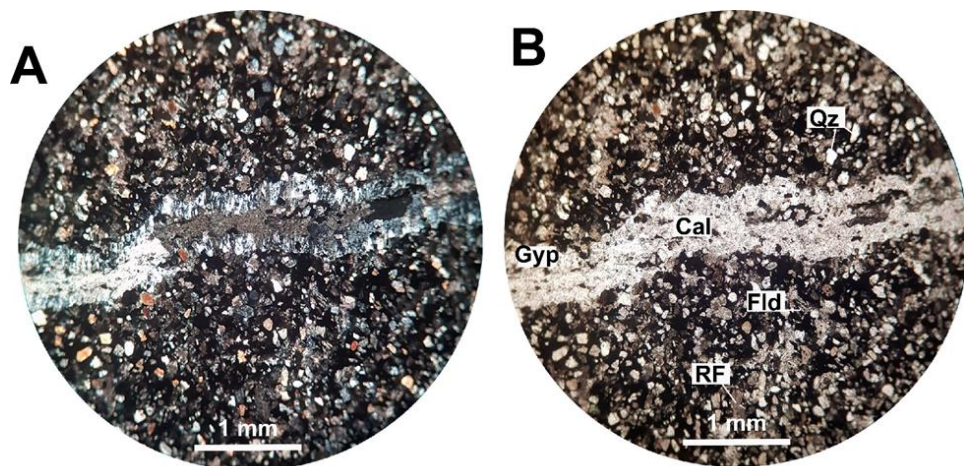
در مقابل، برخی ویژگی‌ها مانند زون‌بندی رنگی قرمز-سفید-سبز، جان‌شینی‌های ثانویه در شرایط احیایی، و رسوب‌گذاری فلز از محلول‌های گرمایی

محلول‌های متاژنتیک و واکنش‌های اکسایش-کاهش) بوده است. این هم‌زمانی و هم‌مکانی پدیده‌ها در نهایت موجب شکل‌گیری زون‌های موضعی غنی از مس در بخش‌هایی از توالی شده که می‌توان آن را به‌عنوان نمونه‌ای از کنه‌زایی ترکیبی زیستی-غیرزیستی در محیط‌های قاره‌ای میوسن تعبیر نمود.

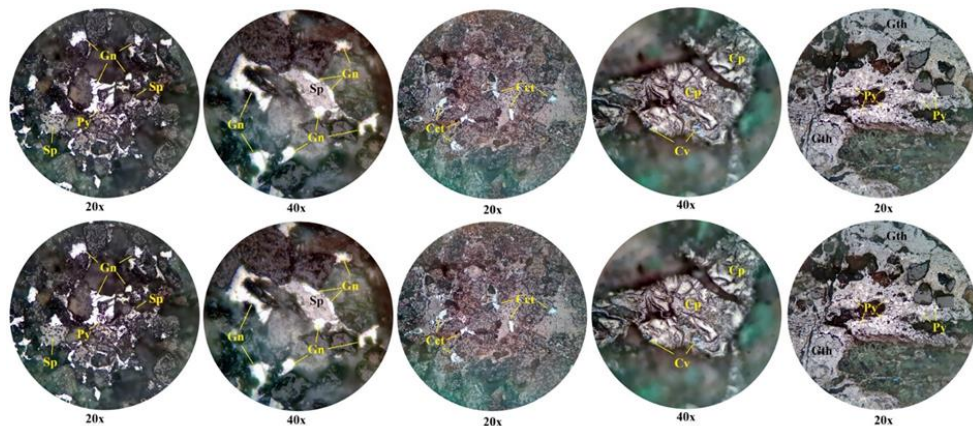
مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی، از نقش فرآیندهای غیرزیستی در این کنه‌زایی حکایت دارند. بنابراین، مجموعه شواهد موجود بیانگر آن است که تمرکز کنه‌های مس یا سایر کنه‌های فلزی در سازند قرمز بالایی، حاصل تعامل و هم‌افزایی عوامل زیستی (نظیر فعالیت میکروبی، بیومینرالیزاسیون و اترفسیل‌ها) با فرآیندهای غیرزیستی (دیاژنز،



شکل ۳- A- اترفسیل *Scoyenia* به صورت درون‌رسوبی در یک رسوب کنه‌دار فلزی، B- دید نزدیک از اترفسیل *Scoyenia* که آثار اسپریت (پیکان) تیره و روشن دارد. C و D- برش عرضی (C) و برش طولی (D) از اترفسیل که بر اثر فعالیت زیستی رسوب ریزدانه گلی (m) و دانه‌درشت ماسه‌ای (s) تفکیک شده‌اند. E- دید میکروسکوپی از محل رسوب گل و ماسه در برش عرضی با بزرگنمایی در میکروسکوپ پلاریزان در نور متقاطع، کنه‌زایی در اندازه رسوبی میکرایت ادامه داشته است. F- کنه‌زایی در محل رسوب ماسه‌ای بدون گسترش به رسوب گلی در برش طولی در بزرگنمایی بینوکولر.



شکل ۴- تصویر ماسه‌سنگ با کانه‌زایی و اثر فسیل *Scoyenia* A-B- یک ماسه‌سنگ لیت‌آرنایت شامل کوارتز (Qz)، فلدسپات (Fld) و خرده‌سنگ (RF) و با سیمان اپک، رگه پر شده با کلسیت (Cal) و ژیبس (Gyp) در A در نور متقاطع و B در نور عادی پلاریزان است.



شکل ۵- تصاویر کانه‌ها در مقاطع نازک مورد مطالعه در نور انعکاسی PL (بالا) و XPL (پایین) شامل کانه‌های گالن (Gn)، اسفالریت (Sp)، پیریت (Py)، کوولیت (Cv)، کالکوسیت (Cct)، گوتیت (Gth) است. این کانه‌ها به صورت میان‌ذره‌ای عملکرد سیمان را دارند.

جدول ۱. شواهد کانه‌زایی زیستی مس در سازند قرمز بالایی

نوع کانه زایی	شواهد	توضیحات
زیستی	هم‌جواری بقایای گیاهی با لایه‌های مس‌دار	حضور شاخه‌ها، ریشه‌ها یا بقایای گیاهی در ماسه‌سنگ‌های سبزرنگ که مراکز رسوب‌گذاری Cu^{2+} بوده‌اند
زیستی	تشکیل هاله‌های معدنی اطراف مواد آلی	بلورهای ریز مس (مانند مالاکیت یا کولیت) در اطراف سلول‌های گیاهی یا بقایای آلی مشاهده می‌شود
زیستی	الگوهای میکروسکوپی خاص	تشکیل رسوبات فلزی درون سلول یا بین سلول‌های گیاهی که با SEM-EDS و میکروسکوپ پلاریزان قابل مشاهده است
اترفسیلی-زیستی	وجود اثرخساره <i>Scoyenia</i> در لایه‌های دارای کانه فلزی	اترفسیل‌های <i>Scoyenia</i> به‌صورت درون‌رسوبی (<i>Endichnia</i>) در ماسه‌سنگ‌های لیت‌آرنایت دانه‌متوسط با کانه‌زایی گالن مشاهده می‌شوند.
اترفسیلی-زیستی	تجمع کانه‌زایی در بخش‌های زیست‌آشفته رسوبات	ارتباط مستقیم بین مناطق زیست‌آشفته و تمرکز کانه‌زایی فلزی، به‌ویژه در اسپریت‌های <i>Scoyenia</i> ، دیده می‌شود.
اترفسیلی-زیستی	جورشده‌گی زیستی و تغییرات بافتی رسوبات	فعالیت بی‌مهره‌گان سبب فابریک دانه‌ریز و دانه‌درشت و افزایش نفوذپذیری موضعی شده که امکان جابه‌جایی سیالات و تمرکز مس را فراهم کرده است.

جدول ۲. شواهد کانه‌زایی غیرزیستی مس در سازند قرمز بالایی

نوع کانه زایی	شواهد	توضیحات
غیرزیستی	زون‌بندی رنگی قرمز-سفید-سبز	ناشی از تغییرات دیاژنتیکی و شرایط اکسایش-کاهش بدون الزام به دخالت زیستی
غیرزیستی	رسوب‌گذاری مس از محلول‌های هیدروترمال	در مراحل آغازین یا پایانی سازند، همراه با فعالیت آتشفشانی
غیرزیستی	جان‌شینی ثانویه در شرایط احیایی	تبدیل کانی‌های اولیه به کانی‌های مس‌دار در محیط‌های بسته و کاهنده

نتیجه‌گیری

بیومینرالیزاسیون نقش کلیدی در تشکیل کانسارهای مس رسوبی دارد. باکتری‌های احیاکننده سولفات و اکسیدکننده گوگرد از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده این فرآیند هستند. درک بهتر این مکانیسم‌ها می‌تواند به توسعه روش‌های نوین استخراج مس و کاهش اثرات زیست‌محیطی معدن‌کاری کمک کند.

بررسی‌های صحرایی و داده‌های پتروگرافی از توالی‌های میوسن سازند قرمز بالایی در منطقه ماه‌نشان زنجان نشان می‌دهد که کانه‌زایی مس در این واحدها به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر فرآیندهای زیست‌کانه‌زایی الفاشده قرار داشته است. تمرکز مس در لایه‌های ماسه‌سنگی همراه با بقایای گیاهی، تغییرات رنگی زون‌های قرمز-سفید-سبز و شواهد دیاژنزی بیانگر نقش میکروارگانیسم‌ها (به‌ویژه باکتری‌های احیاکننده سولفات) در ایجاد شرایط احیایی و رسوب کانی‌های مس است. همچنین، فعالیت بی‌مهرگان در بسترهای رسوبی سازند قرمز بالایی موجب ایجاد اثرخساره‌ی Scoyenia با تنوع محدود اثرفسیلی شده است. در این محیط قاره‌ای، زیست‌آشفستگی رسوبات و جورشدگی زیستی حاصل از فعالیت جانداران، مسیر مناسبی برای جایابی سیالات و تمرکز کانه‌زایی فلزی فراهم کرده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ژنز کانسارهای مس در سازند قرمز بالایی تنها نتیجه فرآیندهای غیرزیستی نبوده، بلکه تعامل پیچیده‌ای از عوامل رسوبی، دیاژنزی و زیستی در تشکیل آن‌ها دخیل بوده است. با این حال، باید تأکید کرد که داده‌های موجود در این پژوهش محدود به مشاهدات صحرایی و مطالعات پتروگرافی است و فقدان داده‌های ژئوشیمیایی و بیومارکرهای آلی یک گپ پژوهشی مهم محسوب می‌شود. بنابراین، تکمیل این داده‌ها در مطالعات آینده

می‌تواند به درک عمیق‌تر از مکانیزم‌های بیومینرالیزاسیون و مدل‌سازی ژنز کانسارهای رسوبی مس در ایران کمک کند.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری نگارنده اول در دانشگاه تهران است. نویسنده بر خود لازم می‌داند از راهنمایی‌ها و حمایت‌های استاد راهنما و اساتید مشاور گرامی در تمامی مراحل پژوهش قدردانی نماید. نویسندگان از آقای دکتر نصراله عباسی که با همکاری نزدیک در انجام مطالعات صحرایی، تهیه مقاطع نازک و تصاویر در شرکت راستین‌زمین‌پژوهان از واحدهای فناوری مستقر در مرکز رشد دانشگاه زنجان، و همچنین شناسایی فسیل‌ها و بافت‌های گیاهی نمونه‌ها و مشاوره علمی، سهم ارزشمندی در پیشبرد این پژوهش داشته‌اند، قدردانی و تشکر صمیمانه به‌عمل می‌آورند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی یا انتشار این مقاله ندارند.

منابع

آقائباتی، س. ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶ ص.

رجب زاده، ع.، کوهستانی، ح.، مختاری، م. ع. ا.، زهدی، ا.، ۱۳۹۹. کانه‌زایی، ساخت، بافت و خاستگاه کانسار سرب- روی و مس با میزبان رسوبی چهارآباد، شمال باختر زنجان. مجله زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۲، شماره ۲. صص ۱۷۷-۲۰۲.

رحیم زاده، ف.، ۱۳۷۳. الیگوسن میوسن پلیوسن، طرح تدوین کتاب، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۳۱۱ ص.

رضایی، خ.، فروغی شادآباد، ش.، اسدی، ا.، ۱۳۹۴. پتروژنز و ژئوشیمی ماسه سنگ‌های سازند قرمز

Balling, P., Sudo, M., Zeilinger, G., Schmitt, A.K., Mattei, M. and Strecker, M. R., 2016. Tectono-sedimentary evolution of the northern Iranian Plateau: Insights from middle-late Miocene foreland-basin deposits, *Basin Research* 29: 417-476.

Bilgin, A. and Jaffé, P.R., 2019. Precipitation of Copper (II) in a Two-Stage Continuous Treatment System Using Sulfate Reducing Bacteria. *Waste Biomass Valor*, 10: 2907-2914.

Boskey, A. L., 2003. Biomineralization: An Overview. *Connective Tissue Research*, 44(1): 5-9.

Bromley, R.G., 1996. *Trace Fossils: Biology, Taxonomy and Applications*. Taylor & Francis, 280 p.

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.

Ehrlich, H., Bailey, E., Wysokowski, M. and Jesionowski, T. (2021). Forced Biomineralization: A Review. *Biomimetics*, 6(3), 46.

Gansser, A., 1955. *New Aspects of the Geology in Central Iran*. Proceedings of the Fourth World Petroleum Congress, Rome, Italy.

Hasiotis, S.T., 2002. Continental Trace Fossils, *SEPM*, 132p.

He, H. and Kirilak, Y, 2014. Application of SEM and EDX in studying biomineralization in plant tissues. *Methods in molecular biology* (Clifton, N.J.), 1117, 663-675.

Jalali, K. and Baldwin, S. A., 2000. The role of sulphate reducing bacteria in copper removal from aqueous sulphate solutions, *Water Research*, 34, 797-806.

Li, J., Margaret Oliver, I., Cam, N., Boudier, T., Blondeau, M., Leroy, E., Cosmidis, J., Skouri-Panet, F., Guigner, J.-M., Féraud, C., Poinot, M., Moreira, D., Lopez-Garcia, P., Cassier-Chauvat, C., Chauvat, F., & Benzerara, K., 2016. Biomineralization Patterns of Intracellular

بالایی در برش منطقه حسن آباد (جنوب غرب تهران). *رسوب شناسی کاربردی*، ش ۶، صص ۴۳-۵۶.

رنجبران، م.، ستوهیان، ف.، ۱۴۰۴. سنگ شناسی و کانی شناسی سازند قرمز بالایی در محدوده بزرگراه تهران - قم برای ساخت آجر، *رسوب شناسی کاربردی*، دوره ۱۳.

عباسی، ن. و شاگردی، ص.، ۱۳۸۴. آثار ردپای مهره داران میوسن در سازند سرخ بالایی، برش چینه شناسی مشمپا، استان زنجان، فصلنامه علمی علوم زمین، شماره ۱۴(۵۵)، صفحات ۷۶-۸۹.

لطفی، م.، ۱۳۸۰. نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ماهنشان. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

میرحسینی، ع.، نباتیان، ق.، زهدی، ا. و سلسانی، آ.، ۱۳۹۹. چینه نگاری سنگی، پتروگرافی و ژئوشیمی ماسه سنگ های بخش میانی سازند قرمز بالایی، منطقه قزلجه، شمال غرب زنجان، *مجله پژوهش های چینه نگاری و رسوب شناسی*، ۳۶، صص ۸۷-۱۰۸.

Abbassi, N., 2022. Miocene wildlife of Zanjan, Northwest Iran. *University of Zanjan pub.*, 320p.

Amini, A., 2001. Red colouring of the Upper Red Formation in central part of its basin, central zone, Iran. *Journal of Sciences Islamic Republic of Iran*, 12, 145-156.

Azizi, H., Hosseinzadeh, M. R., Moayyed, M. and Siahcheshm, K., 2018. Geology and geochemistry of the sediment-hosted stratabound redbed-type Cu-Pb (Zn-Ag) mineralization in the Dozkand-Moshampa Area, NW Zanjan, Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 195(2): 123-143.

Ballato, P., Cifell, F., Heidarzadeh, G., Ghassemi, M. R., Wickert, A. D., Hassanzadeh, J., Dupont-Nivet, G.,

National Iranian Oil Company publication, Tehran, 1959.

Rafiei, B., Ghomi, F. A., & Shahkaram, M., 2011. Depositional environments and sequence stratigraphy of the fluvial Upper Red Formation (Miocene) in the Avaj area, Qazvin Province, Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 259, 257-270.

Seilacher, A., 2007. *Trace Fossil Analysis*, Springer, 238pp.

Stöcklin, J., and Eftekhar-Nezhad, J., 1969. Explanatory Text of the Zanjan Quadrangle Map I: 250,000. Geological Survey of Iran, Report No. 1.

Carbonatogenesis in Cyanobacteria: Molecular Hypotheses. *Minerals*, 6(1), 1-21.

Liu, F., Shah, D. S., and Gadd, G. M., 2021. Role of Protein in Fungal Biomineralization of Copper Carbonate Nanoparticles. *Current biology*: 31(2), 358-368.

Lotfi, M., 2001. Geological survey and mineral reserves in Geological Map 1:100,000 Mahneshan quadrangle (west Zanjan province, northwest Iran), Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, sheet number 5563.

NIOC (National Iranian Oil Company), 1959. Geological map of Iran, 1:2500000,