

زمین‌شناسی، ساخت و بافت، میان‌بارهای سیال و الگوی تشکیل کانه‌زایی مس طبیعی تپ میشیگان در کانسار سه‌بندون، شمال شرق ایران

بهزاد حمامی پور بارنجی^۱، حسینعلی تاج‌الدین^(۲) و مهدی موحدنیا^۳

۱. کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲. استادیار گروه زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۲

چکیده

کانه‌زایی مس سه‌بندون در بخش شمال شرقی زیرپهنه سبزوار واقع شده است. سنگ‌های دارای رخنمون در پهنه سه‌بندون، مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی بخش فوقانی سری افیولیتی با سن کرتاسه بالایی شامل تراکیت، تراکی‌آندزیت، بازالت، اسپلیت، شیل، داسیت و ماسه‌سنگ هستند. کانه‌زایی مس طبیعی در کانسار سه‌بندون به شکل چینه‌کران و محدود به واحد سنگی بازالت اسپلیتی رخ داده و به صورت دانه پراکنده، رگچه‌ای، پرکننده فضاهای خالی و جانشینی قابل مشاهده می‌باشد. کانی‌شناسی ماده معدنی شامل مس طبیعی، کوپریت و ملاکیت بوده و کانی‌های باطله بیشتر شامل زئولیت، کلسیت، کوارتز، کلریت و اپیدوت است. مطالعات میان‌بارهای سیال بر روی زئولیت‌های کانسنگ مس‌دار، نشانگر آن است که میان‌بارهای اولیه بیش‌تر از نوع دو فازی غنی از مایع هستند. دمای همگن‌شدگی سیالات کانه‌ساز در بازه ۲۲۸ تا ۳۴۰ درجه سانتی‌گراد و شوری آنها از ۰/۶ تا ۵/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام اندازه‌گیری شده است. با توجه به ویژگی‌های اساسی کانه‌زایی مس در منطقه سه‌بندون، از جمله سنگ میزبان، کانی‌شناسی، دگرسانی، سیالات درگیر و محیط ژئودینامیکی، این کانسار را می‌توان در رده کانسارهای مس تپ میشیگان طبقه‌بندی کرد که در طی دگرگونی تدفینی مس از سنگ‌های بازالتی شسته و با صعود به بخش‌های فوقانی، در اثر کاهش فشار و اختلاط با سیالات جوی، به دلیل کمبود گوگرد در محیط، مس به صورت طبیعی ته‌نشست یافته است.

واژه‌های کلیدی: تپ میشیگان، سه‌بندون، زیرپهنه سبزوار، مس طبیعی، میان‌بارهای سیال.

مقدمه

Shafaii Moghadam and Stern, 2015; Shafaii Moghadam and Stern, 2014; Shafaii Moghadam et al., 2014; Shojaat et al., 2003; از لحاظ توان معدنی و رخداد تپ‌های مختلف کانساری بسیار قابل توجه است؛ به‌گونه‌ای که انواع کانسارهای: سولفید

کانسار مس سه‌بندون در ۴۰ کیلومتری شمال شهر است بردسکن و در بخش شمال شرقی زیرپهنه سبزوار قرار دارد (شکل ۱). این زیرپهنه، بخشی از خرد قاره ایران مرکزی می‌باشد. زیرپهنه سبزوار به‌عنوان بخشی از کمربند نئوتتیس

* نویسنده مرتبط: h.tajeddin@modares.ac.ir

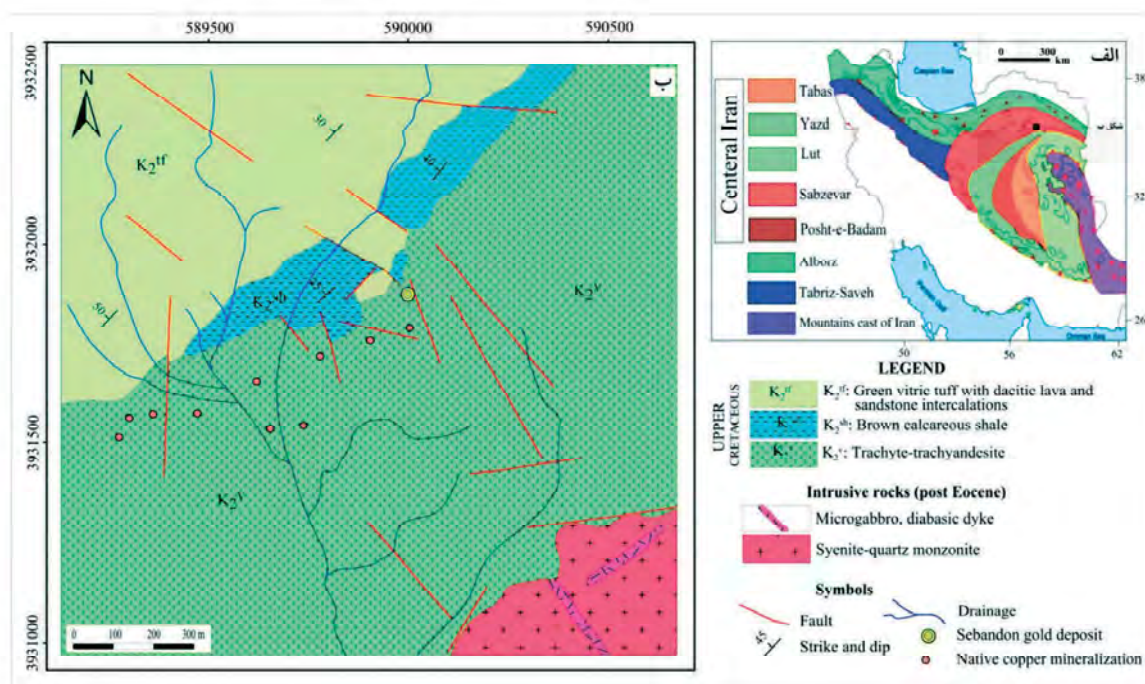
روش مطالعه

این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی است. مطالعات صحرایی شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰، مطالعات سنگ‌شناسی و پتروگرافی، ساخت و بافت کانسنگ‌ها می‌باشد. در این مرحله بالغ بر ۴۰ نمونه سنگی از رخنمون‌ها برداشت و به آزمایشگاه‌های مربوطه ارسال شد. در مرحله مطالعات آزمایشگاهی، پس از بررسی‌های مقدماتی، از میان نمونه‌های برداشت شده تعداد ۲۰ مقطع نازک، هشت مقطع نازک-صیقلی و دو مقطع دو بر صیقل تهیه و به‌منظور مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری، ساخت، بافت و ترسیم توالی پاراژنزی کانه‌ها و میان‌بارهای سیال بررسی شدند. مطالعات میان‌بارهای سیال بر روی چهار نمونه کانسنگ مس (کانی‌های کلسیت و زئولیت) انجام شده است. اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی با استفاده از دستگاه میان‌بار سیال مدل Linkam THMSG600 متصل به میکروسکوپ ZEISS و سردکننده LNP در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شده است. دامنه حرارتی دستگاه، ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. کالیبراسیون دستگاه در مرحله گرمایش با دقت $\pm 0/6$ درجه است که با نیتراک سزیم با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد و در مرحله سرمایش با دقت $\pm 0/2$ درجه سانتی‌گراد و با ماده استاندارد ان هگزان (n-Hexane) با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتی‌گراد انجام شد. میزان شوری به‌صورت معادل درصد وزنی نمک طعام (wt. % NaCl) و از طریق دمای ذوب آخرین قطعه یخ (Tm-ice) با استفاده از فرمول ارائه‌شده توسط هال و همکاران (Hall et al., 1988) و مقایسه با روش Sterner et al., (1988) محاسبه شده است.

زمین‌شناسی

کانسار مس سه‌بندون، در بخش شمالی زون ایران مرکزی و زیر پهنه سبزواری (Alavi, 1994) قرار دارد (شکل ۱-الف). بر اساس نقشه زمین‌شناسی یکصد هزارم ورقه شامکان (نادری‌میقان، ۱۳۷۷)، این گستره، بخشی از

توده‌ای آتشفشان‌زاد تیپ بشی (کانسارهای نوده، چون و لالا (مغفوری، ۱۳۹۱))، سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد تیپ قبرسی (کانسارهای گودایثاق، سوزنده و اولنگ (روزبه‌کارگر و قمیان، ۱۳۷۷؛ عشق‌آبادی، ۱۳۷۷))، تیپ پورفیری (کانسارهای هلاک‌آباد (پناهی شهری و همکاران، ۱۳۸۹) و دهن‌قلعه (روحبخش و همکاران، ۱۳۸۹))، طلای ای‌ترمال (کانسار سه‌بندون (حمامی‌پور بارنجی و همکاران، ۱۳۹۷))، مس رسوبی (کانسارهای رودخانه، کدکن، اسفیز (سپهری‌راد، ۱۳۸۸))، کانسارهای منگنز تیپ کوبا (کانسارهای نوده، گف و بنسبرد (مغفوری، ۱۳۹۱)) و کرومیت تیپ پادیفرم (کانسارهای گودایثاق، تندک و اولنگ (روزبه‌کارگر و قمیان، ۱۳۷۷؛ عشق‌آبادی، ۱۳۷۷))، در این گستره گزارش شده‌اند. مطالعات صورت گرفته در زیرپهنه سبزواری، توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و شرکت چینی جیانگزی (Jiangxi Exploration Co., 1994) منجر به شناسایی و معرفی تعدادی گستره ناهنجاری برای عناصر مختلف شد. گستره معدنی سه‌بندون به‌عنوان یکی از مناطق ناهنجاری طلا معرفی و در پی آن به لحاظ کانه‌زایی احتمالی طلا مورد توجه قرار گرفت. زمین‌شناسی، ژئوشیمی و الگوی تشکیل کانه‌زایی طلا توسط حمامی‌پور بارنجی و همکاران (۱۳۹۷) و حمامی‌پور بارنجی (۱۳۹۴) مورد بررسی قرار گرفت و این محدوده به‌عنوان یک کانسار طلای ای‌ترمال تیپ سولفیداسیون متوسط مورد توجه می‌باشد و تاکنون مطالعه‌ای در ارتباط با کانه‌زایی مس در آن انجام نشده است. در مطالعات اخیر مشخص شد که در بخش جنوبی گستره معدنی سه‌بندون، کانه‌زایی مس طبیعی در بازالت‌های اسپلیتی کرتاسه فوقانی رخ داده که در این پژوهش ضمن بیان ویژگی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، ساخت، بافت و پاراژنزی کانی‌ها، میان‌بارهای سیال نیز مطالعه شده و با توجه به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌زا، چگونگی نهشت کانسنگ و تیپ کانه‌زایی مس طبیعی انجام شده است.



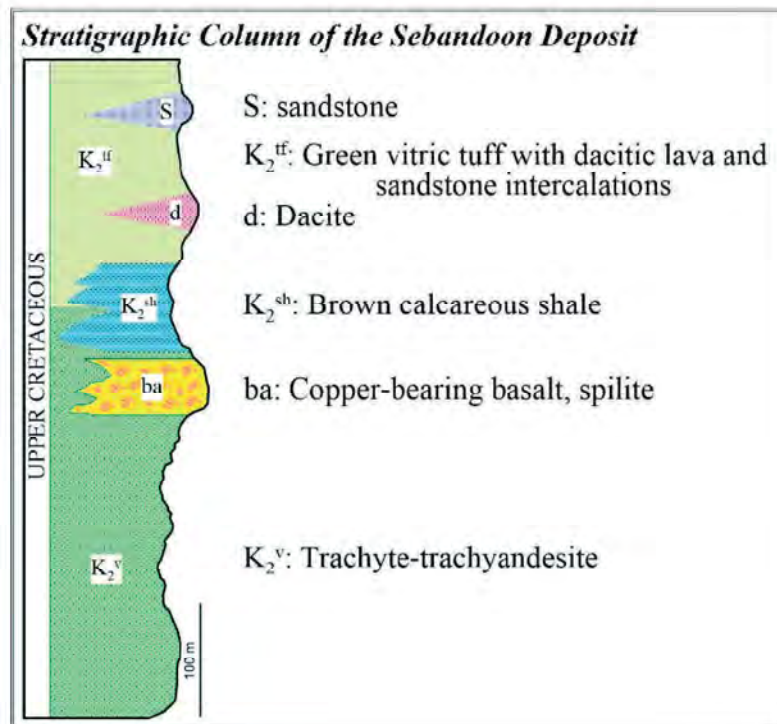
شکل ۱. الف) نقشه پهنه‌های رسوبی-ساختاری ایران (آقناباتی، ۱۳۸۳ و Alavi, 1994) و موقعیت گستره مورد مطالعه در زیرپهنه سبزوار، که با چهارگوش سیاه رنگ نشان داده شده است، ب) نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ گستره معدنی سه‌بندون (حمامی پور بارنجی، ۱۳۹۴)

می‌شوند و بر اساس مطالعات صحرایی، از قدیم به جدید شامل مجموعه‌ای از گدازه‌های با ترکیب غالب تراکیت تا تراکی‌آندزیت، شیل‌های کربناتی و نهشته‌های آذرآواری از جنس ویتریک کریستال توف همراه با میان لایه‌هایی از گدازه‌های ریولیتی تا داسیتی هستند (شکل ۲ و شکل ۳-الف). فعالیت‌های ماگمایی پس از ائوسن با نفوذ توده‌های نیمه‌عمیق با ترکیب سینیت تا کوارتز مونزونیت در سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی کرتاسه بالایی مشخص می‌شود. به‌طور خلاصه زمین‌شناسی واحدهای سنگی در گستره کانسار مورد مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

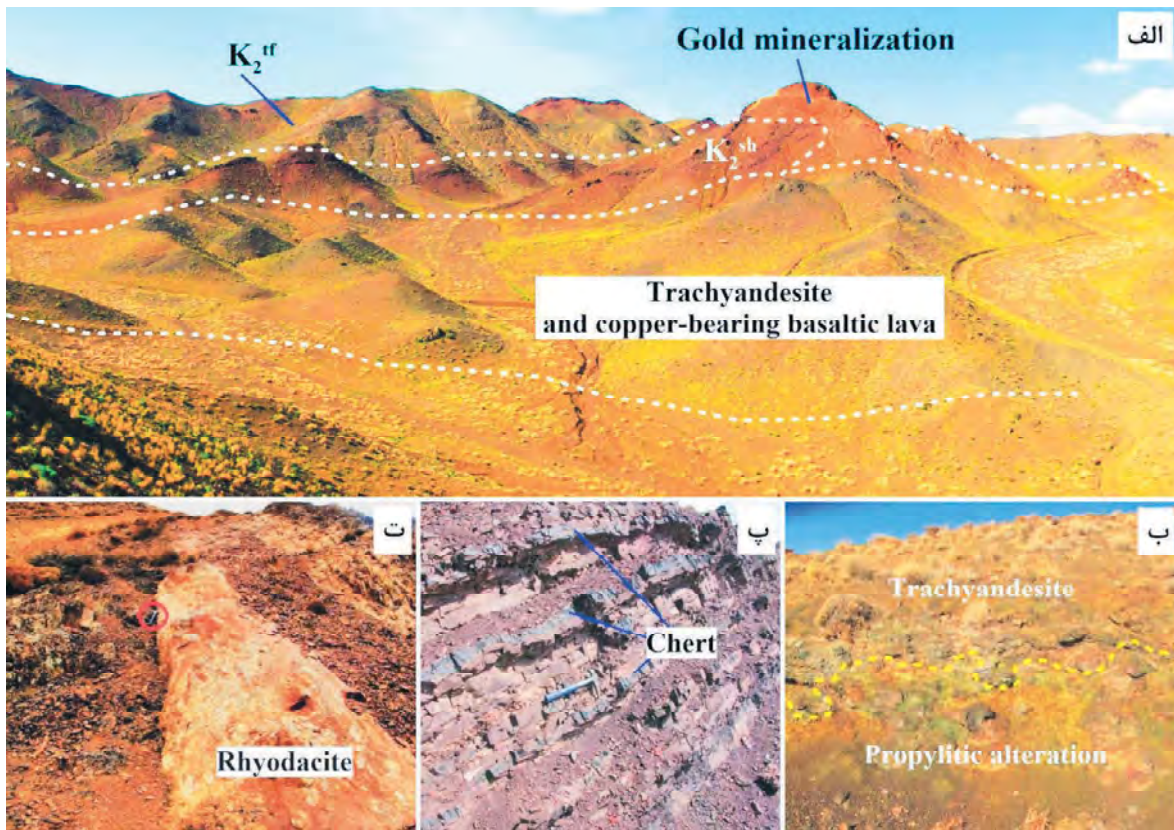
واحد K₂^v: این واحد بیشتر از گدازه‌های با ترکیب تراکیت، تراکی‌آندزیت و آندزیت بازالیت با رنگ رخنمون سبز تا سیاه تشکیل شده است (شکل ۳-ب). بافت گدازه‌ها پیلوتاکسیتیک (تراکیتی)، میکروولیت-پورفیری و گلوپورپورفیری می‌باشد (شکل ۴-الف، ب). پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپارها کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها بوده و همراه با آن‌ها مقادیر فرعی آمفیبول و پیروکسن نیز دیده می‌شود (شکل ۴-الف، ب).

افیولیت‌های سبزوار می‌باشد. افیولیت‌های سبزوار، مجموعه افیولیتی به‌شدت هوازده شده و سرپانتینیزه شده‌ای هستند که در امتداد حاشیه شمالی خرد قاره ایران مرکزی گسترش داشته و جزء افیولیت‌ها و آمیزه‌های رنگین کمر بند داخلی به حساب می‌آید. سنگ‌های آذرین این مجموعه شامل پریدوتیت، سرپانتینیت، مقدار کمی پیروکسنیت و گابرو می‌باشند (Shafaii Moghadam et al., 2014). همچنین این مجموعه شامل یک توالی آتشفشانی-رسوبی است و سنگ‌های آتشفشانی آن دارای ترکیبات متنوعی از بازالیت، آندزیت بازالیت تا ریوداسیت-داسیت، ریولیت و بازالیت هستند. سنگ‌های رسوبی موجود در این توالی نیز گستره‌ای از سنگ‌های دریایی کم‌عمق تا عمیق را شامل می‌شوند و با توجه به سنگواره‌های موجود در آهک‌های گلوبوترونکانادار سن آن‌ها کرتاسه بالایی تعیین شده است (شکل ۲).

سنگ‌های رخنمون یافته در گستره معدنی سه‌بندون، سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی بخش فوقانی سری افیولیتی با سن کرتاسه بالایی (واحد K₂^v) و با ماهیت آلکالن تا کالک‌آلکالن (Baronz and Macaudiere, 1984) را شامل



شکل ۲. ستون چینه‌شناسی مجموعه آتش‌فشانی-رسوبی کرتاسه بالایی در محدوده کانسار سه‌بندون



شکل ۳. الف) نمایی از واحدهای سنگی و موقعیت کاننه‌زایی مس و طلا در محدوده معدنی سه‌بندون؛ دید به سوی شمال شرق، ب) نمایی نزدیک از رخنمون گذاره تراکی آندزیتی (K_2^v واحد)، که تحت تأثیر دگرسانی پروپیلیتی شده است، پ) نمایی از واحد شیل کریستالی (K_2^{sh} واحد)، که با نوارهای چرتی همراه است، ت) رخنمونی از میان لایه‌های گدازه‌های ریوداسیتی در داخل توفیت‌ها (K_2^{tf} واحد)

عمیق و دایک‌ها در سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی کرتاسه مشخص می‌شود. در جنوب گستره مورد مطالعه، توده‌ای با ترکیب سینیت و کوارتز مونزونیت برونزد دارد و به لحاظ سنگ‌شناسی، بافت پورفیروئیدی تا گرانولار داشته و فلدسپات (آرتوکلاز)، کوارتز و پلاژیوکلاز کانی‌های اصلی آن را تشکیل می‌دهند (شکل ۴-چ). توده ذکر شده توسط دایک‌های دیابازی قطع شده‌اند. در مقاطع میکروسکوپی بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول و پیروکسن با بافت اینترسرتال کانی‌های اصلی می‌باشند و در زمینه‌ای فانریتیک پراکنده‌اند (شکل ۴-ح).

بحث

کانه‌زایی، ساخت و بافت و توالی پاراژنتیکی

کانه‌زایی مس طبیعی در کانسار سه‌بندون به شکل چینه‌کران و محدود به واحد سنگی بازالت اسپلیتی رخ داده و مس طبیعی، در اندازه‌های چند ده میکرون تا سه میلی‌متر، به صورت دانه پراکنده، رگچه‌ای، پرکننده فضاهای خالی و جانشینی قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۵). ضخامت کمربندهای کانهدار در بخش‌های مختلف متفاوت و بین ۲۰ سانتی‌متر تا ۱/۵ متر می‌باشد و عیار مس در آنها از ۰/۱ تا دو درصد در تغییر است. ماده معدنی مس دانه‌پراکنده به صورت تقریباً یکنواخت در تمام بخش‌های واحد بازالت اسپلیتی رخ داده است (شکل ۵-الف). چنان که گفته شد توده‌های نفوذی در جنوب شرق پهنه مورد مطالعه وجود دارند (حمامی پور بارنجی و همکاران، ۱۳۹۷) که با توجه به بررسی‌های انجام شده، می‌توان اظهار داشت، این توده‌ها در کانه‌زایی مس پهنه سه‌بندون نقشی نداشته‌اند.

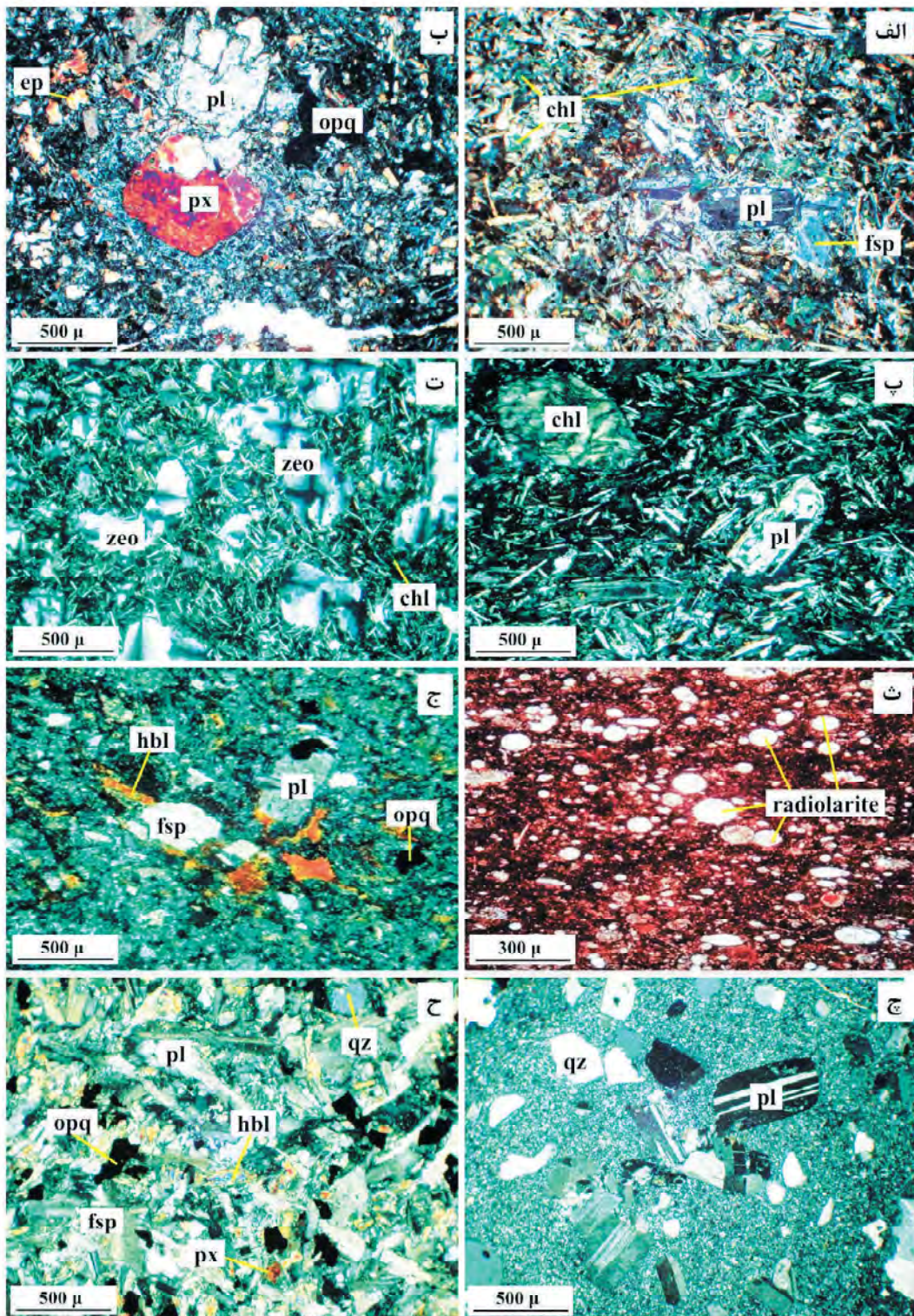
کانی‌شناسی ماده معدنی در رخداد مس سه‌بندون بسیار ساده است و شامل مس طبیعی، کوپریت و مالاکیت می‌باشد. کانی‌های باطله بیشتر شامل زئولیت، کلسیت، کوارتز، کلریت و اپیدوت است. بافت رایج ماده معدنی در کانسار مس طبیعی سه‌بندون، پرکننده حفرات می‌باشد و ماده معدنی مس طبیعی به صورت اولیه همراه با زئولیت و کلسیت (شکل ۶-الف، ب، پ، ت) تشکیل شده است؛ بافت رگه-رگچه‌ای شامل رگچه‌هایی با ضخامت کمتر از یک

بخش فوقانی واحد K_2^V ، که میزبان اصلی کانه‌زایی مس در کانسار سه‌بندون است، از سنگ‌های بازالت اسپلیت تا آندزیت بازالتی برونزد دارند که به صورت ناپیوسته و در راستای شمال شرقی-جنوب غربی گسترش دارند (شکل ۳-الف). ضخامت این میان لایه، در بخش‌های مختلف متفاوت می‌باشد و از ۰/۵ تا شش متر در تغییر است. بر اساس مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک مطالعه شده از این میان لایه، زمینه سنگ شیشه‌ای تا بسیار دانه‌ریز با بافت ویتروفیریک بوده و فنوکریست‌ها و میکرولیت‌ها در زمینه‌ای از شیشه قرار دارند، در بخش‌هایی بافت هیالوپلیتیک از خود نشان می‌دهد. کانی‌های اصلی تشکیل دهنده شامل فلدسپات و پیروکسن می‌باشند و با اندازه‌های ۸۰ تا ۵۰۰ میکرون حدود ۱۰ درصد از سطح مقطع را تشکیل داده‌اند (شکل ۴-الف، ب). فنوکریست‌های ذکر شده تحت تأثیر سیالات دگرسان کننده به کانی‌های ثانویه مانند کلسیت، زئولیت و کلریت تبدیل شده‌اند (شکل ۴-پ، ت).

واحد K_2^{sh} : این واحد که از لایه‌های شیل کربناتی قرمز رنگ با میان لایه‌های چرتی تشکیل شده است. واحد K_2^{sh} گسترش محدودی داشته و به صورت هم‌شیب بر روی واحد K_2^V قرار دارد (شکل ۳-پ). شیل‌های مذکور از بلورهای کوچک و شکسته کوارتز و فلدسپات تشکیل شده‌اند و در زمینه بسیار ریز از رس آهن‌دار قرار دارند. علاوه بر کانی‌های ذکر شده آثار فسیل‌های کروی شکل رادیولاریت در زمینه سنگ قابل مشاهده است (شکل ۴-ث).

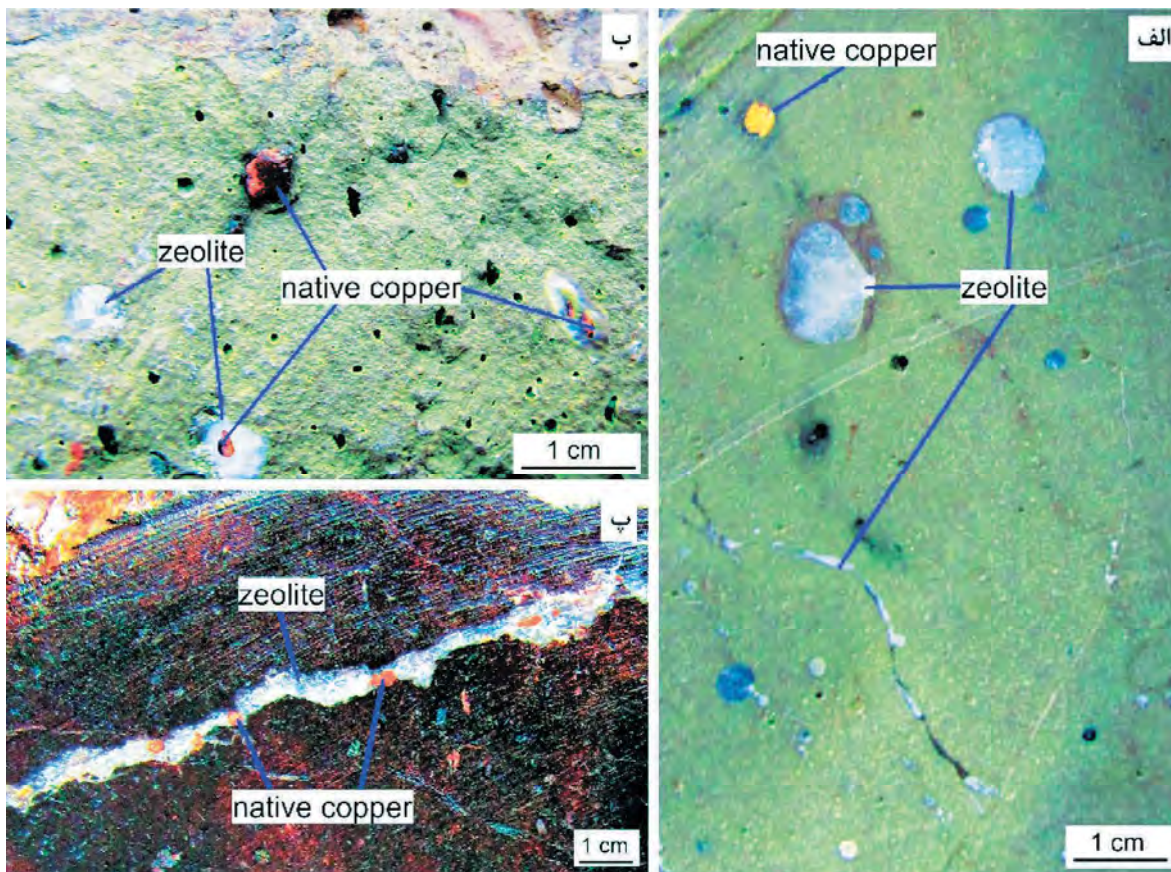
واحد K_2^{tf} : این واحد سبز رنگ که از ویتریک کریستال توف همراه با میان لایه‌هایی از گدازه اسیدی (ریولیت تا داسیت) و سیلت تشکیل یافته، به صورت هم‌شیب بر روی شیل‌های کربناتی قرار گرفته و گسترش قابل توجهی در بخش شمالی گستره معدنی سه‌بندون دارد (شکل ۳-ت). بخش غالب ویتریک کریستال توف‌های مورد مطالعه را زمینه بسیار دانه ریز و شیشه‌ای تشکیل داده است، بلورهای شکسته و ریز کوارتز و فلدسپار به صورت دانه پراکنده در آن قرار دارند (شکل ۴-ج).

توده‌های نفوذی: فعالیت‌های ماگمایی پس از ائوسن در گستره معدنی سه‌بندون، با نفوذ توده‌های نیمه



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از واحدهای سنگی محدوده سه‌بندون. الف) تراکیت، ب) آندزی بازالت مربوط به واحد K_2^V . فنوکریست‌ها شامل پلاژیوکلاز و پیروکسن می‌باشند، پ) هورنبلند به‌طور کامل و زمینه سنگ تا حد زیادی به کلریت دگرسان شده‌اند، ت) گدازه تراکیتی زئولیتی و کلریتی شده، ث) شیل کربناتی (واحد K_2^{sh})، حاوی فسیل‌های رادیولاریت و خردسنگ در زمینه‌ای از رس غنی از اکسیدهای آهن، ج) ویتریک کریستال توف (واحد K_2^V)، خردکانی‌های کوارتز، فلدسپار، پلاژیوکلاز و هورنبلند در زمینه‌ای از خاکستر، چ) کوارتز مونوزونیت شامل پورفیرهای کوارتز و پلاژیوکلاز در زمینه‌ای میکروگرانولار، ح) دایک‌های دیابازی حاوی پورفیرهای پیروکسن و پلاژیوکلاز. حروف اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. chl: کلریت، ep: اپیدوت، fsp: فلدسپار، hbl: هورنبلند، opq: کانی کدر، pl: پلاژیوکلاز، px: پیروکسن و qz: کوارتز، zeo: زئولیت

سانتی متر بوده و دربرگیرنده مس طبیعی، زئولیت و کلسیت می باشد (شکل ۵-پ و شکل ۶-ث، ح). کانی های ثانویه مس دار شامل کوپریت و مالاکیت هستند که کوپریت بیشتر در اطراف ماده معدنی اولیه (شکل ۶-پ، ت) و مالاکیت به صورت مجتمع در شکستگی ها، قطع کننده زئولیت و مس طبیعی (شکل ۸-پ، ت) شکل می گیرد.



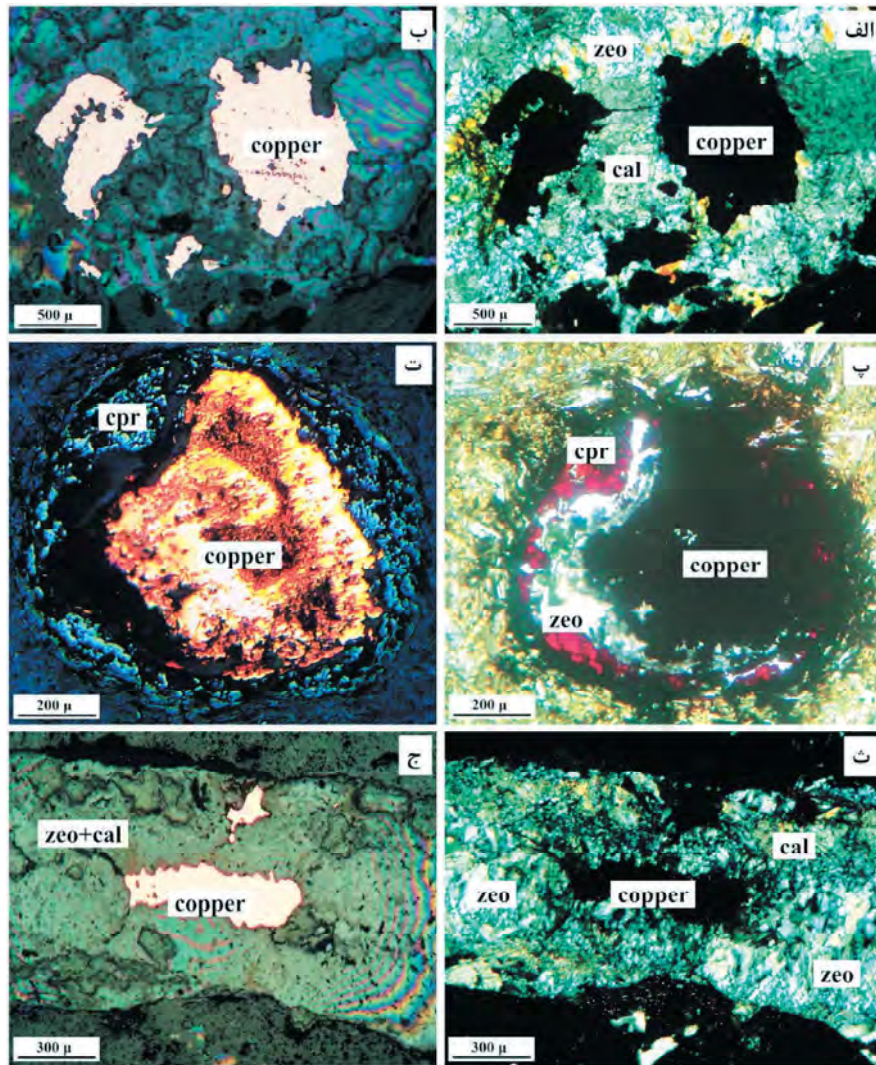
شکل ۵. الف، ب و پ) تصاویر نمونه دستی از گدازه تراکی آندزیت، که فضاهای حفرات و شکستگی های موجود در آن با زئولیت، کلسیت و مس طبیعی پر شده است. در شکل پ موقعیت کانه های مس طبیعی با نقطه چین سفید رنگ مشخص شده است

که کانی های ثانویه از جمله کوپریت و مالاکیت با بافت های جاننشینی و رگچه ای در این مرحله تشکیل شده اند.

دگرسانی

دگرسانی در پهنه سه بندون به دو گروه قابل تقسیم می باشد؛ گروه اول در ارتباط با کانه زایی طلای تپ ایی ترمال سولفیداسیون متوسط است (حمامی پور بارنجی و همکاران، ۱۳۹۷) و دگرسانی هیدروترمال در پهنه طلا دار با وسعت قابل توجهی رخ داده است. دگرسانی های گرمابی در این کانسار در گستره ای با وسعت حدود دو کیلومتر مربع گسترش داشته و به واسطه رنگ ظاهری قهوه ای روشن تا آجری، به راحتی از سنگ های آتشفشانی میزبان قابل تمایزند

توالی پاراژنتیکی پهنه مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است؛ بر اساس بررسی های صحرایی، نمونه های دستی و میکروسکوپی، توالی پاراژنتیکی کانی های موجود در گستره معدنی سه بندون را می توان به دو مرحله دگرگونی دفنی و سوپرژن تقسیم کرد (شکل ۷). در اواخر مرحله دیاژنز تأخیری، دگرگونی تدفینی در پهنه آغاز شده است. مشخصه اصلی این مرحله، تشکیل کانی زئولیت در سنگ های بازالتی پهنه می باشد. کانه زایی مس در این مرحله رخ داده و مس به صورت رگه-رگچه ای و دانه پراکنده در متن سنگ میزبان دیده می شود. در ضمن زئولیت، کلسیت و به مقدار کمتر کلریت و اپیدوت نیز در این مرحله تشکیل شده اند. مرحله دوم کانه زایی مربوط به فرایندهای سوپرژن و هوازدگی است



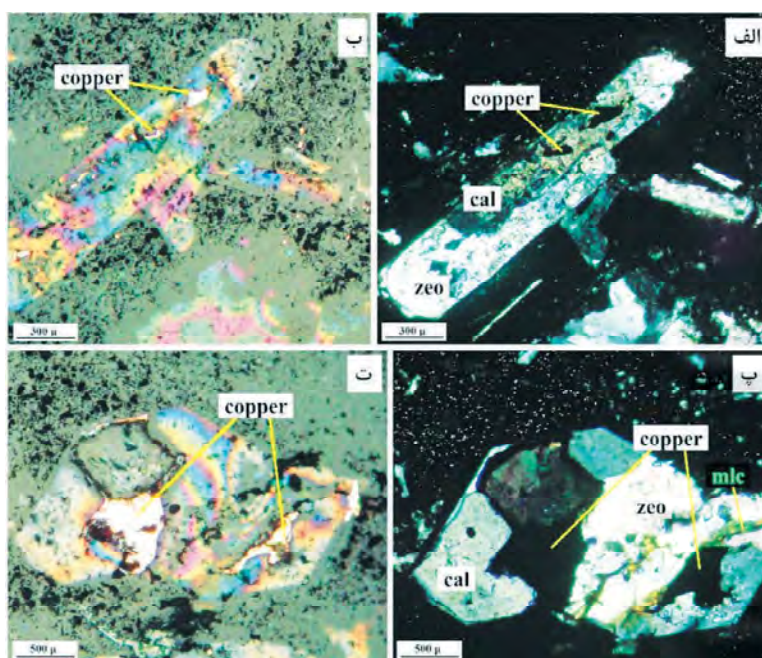
شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی از کانی‌شناسی و روابط بافتی کانه‌های مس در کانسنگ‌های مس‌دار سه‌بندون. الف) هم‌رشدی کانه‌های مس طبیعی با زئولیت و کلسیت؛ نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL)، ب) تصویر «الف» در نور انعکاسی، پ) هم‌رشدی مس طبیعی و زئولیت در فضای خالی (حفره)، ت) تصویر «پ» در نور انعکاسی، ث) تصویر دیگری از هم‌رشدی مس طبیعی با زئولیت و کلسیت در فضای رگچه، ج) تصویر «ث» در نور انعکاسی. حروف اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. cal: کلسیت، cpr: کوپریت و zeo: زئولیت

Stages	Metamorphism	Supergen (weathering)
Quartz	██████████	
Zeolite	██████████	
Calcite	██████████	██████████
Chlorite	██████████	
Epidote	██████████	
Copper (Native)	██████████	
Cuprite		██████████
Malachite		██████████

شکل ۷. نمودار توالی پاراژنزی در کانسنگ‌های مس‌دار محدوده سه‌بندون

در دما و فشار پایین می‌باشد؛ ظهور رخساره دگرگونی زئولیتی معرف پایان دیاژنز و آغاز دگرگونی است و حاکی از دمای ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار هیدرواستاتیک ۲/۵ تا هشت کیلو بار می‌باشد (Coombs et al., 1959). جانشیننی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و هورنبلند توسط کلسیت، زئولیت و مس طبیعی در برخی از مقاطع نازک-صیقلی مشهود است (شکل ۸). روابط ساخت و بافتی ماده معدنی مس طبیعی با زئولیت و کلسیت، حاکی از ارتباط مستقیم و هم‌زمانی تشکیل آن‌ها است.

(شکل ۳-الف). دگرسانی‌ها بیشتر در واحد گدازه تراکیت-تراکی آندزیت (واحد K_2^V) و به‌طور محدود در واحد شیل کربناتی (K_2^{sh}) رخ داده‌اند. شدت و نوع دگرسانی‌ها، با توجه به جنس سنگ میزبان و فاصله از مرکز دگرسانی متفاوت بوده و شامل انواع سیلیسی، سولفیدی و پروپیلیتیک است. اما گروه دیگر دگرسانی شامل دگرسانی‌های زئولیتی، کلریتی و تشکیل کلسیت می‌باشد و با توجه به محدود بودن آن به واحد چینه‌ای خاص و روابط بافتی، به‌نظر می‌رسد در ارتباط با فعالیت‌های آتش‌فشانی زیردریایی در زمان کرتاسه بالایی می‌باشد و همچنین مراحل تدفین و دگرگونی خفیف



شکل ۸. الف) جانشیننی مس طبیعی، زئولیت و کلسیت به‌جای پلاژیوکلاز؛ نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL)، ب) تصویر «الف» در نور انعکاسی، پ) مس طبیعی با زئولیت و کلسیت هم‌رشد بوده و جانشین کانی هورنبلند شده‌اند، ت) تصویر «پ» در نور انعکاسی. حروف اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. cal: کلسیت، mlc: مالاکیت و zeo: زئولیت

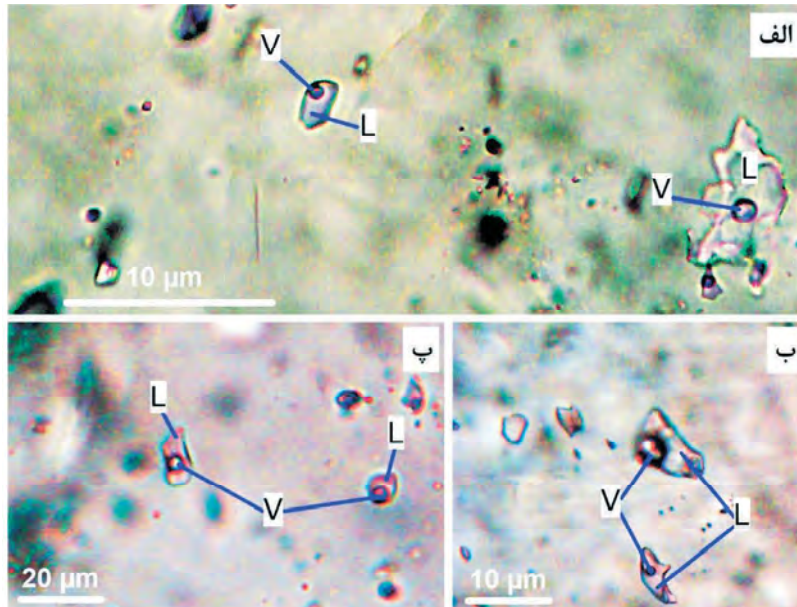
مطالعات میان‌بارهای سیال

به شکل‌های نامنظم، کروی و کشیده تقسیم‌بندی کرد. میان‌بارهای سیال مطالعه شده، از نوع اولیه و دو فازی غنی از مایع (L+V) هستند. هیچ‌گونه شاهدهی از حضور فاز نوزاد (S) یا CO_2 مایع در میان‌بارها مشاهده نشده است. میان‌بارهای سیال دو فازی مورد مطالعه، ریز تا بسیار ریز بوده و اندازه آن‌ها از پنج تا ۱۲ میکرون متغیر است. در این نوع از میان‌بارها، فاز مایع ۶۰ تا ۸۰ درصد و فاز بخار ۲۰ تا ۴۰ درصد حجم کل سیال را تشکیل داده است. این نوع از

در این مطالعه، خصوصیات ۴۰ سیال درگیر اولیه موجود در کانی‌های کلسیت و زئولیت که به‌صورت هم‌زمان با مس طبیعی تشکیل شده، مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه‌ای از خصوصیات سیالات درگیر مورد مطالعه در جدول ۱ ذکر شده است. از لحاظ شکل ظاهری و با توجه به پارامترهای (1984) Roedder و (1985) Shepherd et al. میان‌بارهای سیال در نمونه‌های مورد مطالعه را می‌توان به‌ترتیب فراوانی

یخ (Te) در نمونه‌های ژئولیتی، ۲۱- تا ۳۰- درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. محدوده آخرین نقطه ذوب یخ (Tmice) در نمونه‌های ذکر شده، از ۰/۵- تا ۳/۴- درجه سانتی‌گراد ثبت شد که به ترتیب معادل شوری‌های ۰/۶ تا ۵/۷ معادل درصد وزنی NaCl (با میانگین ۳/۲۸ معادل درصد وزنی نمک طعام) می‌باشند (جدول ۱ و شکل ۱۰).

میان‌بارها اغلب با شکل‌های نامنظم و کم‌تر کروی در ژئولیت میزبان پراکنده‌اند (شکل ۹). محدوده دمای همگن شدن برای میان‌بارهای سیال اولیه دو فازي مورد مطالعه از ۲۲۸ تا ۳۴۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۲۷۲/۹) اندازه‌گیری شده است (جدول ۱ و شکل ۱۰). در تمامی نمونه‌ها همگن شدن به فاز مایع صورت گرفته است. محدوده اولین نقطه ذوب

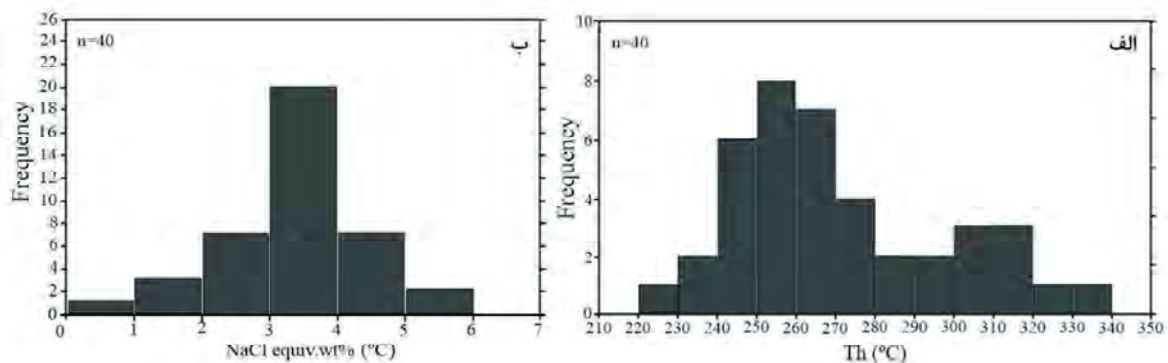


شکل ۹. تصاویر میکروسکوپی (دمای اتاق و نور عبوری صفحه‌ای) از میان‌بارهای سیال اولیه دو فازي غنی از مایع (LV) موجود در ژئولیت‌های همراه با کانسنگ‌های مس در محدوده سه‌بندون، V=Vapor، L=Liquid

جدول ۱. خلاصه داده‌های مطالعات ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال اولیه دو فازي (L+V) در کانی ژئولیت موجود در کانسنگ مس

Incl. type	Size (μm)	T _e (°C)	T _{m-ice} (°C)	T _h (°C)	Salinity (wt. % NaCl equiv.)	ρ (g/cm ³)
LV (n=۴۰)	۵-۱۲	-۲۱ تا -۳۰	-۳/۴ تا -۰/۵	(۲۷۲/۹۳) ۳۴۰ تا ۲۲۸	(۳/۲۸) ۵/۷-۰/۶	۰/۸۴-۰/۹۵

اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده میانگین داده‌ها است. (Te = دمای اولین نقطه ذوب یخ، T_{m-ice} = دمای ذوب آخرین قطعه یخ، T_h = دمای همگن شدن)



شکل ۱۰. الف) نمودار ستونی دماهای همگن شدن به فراوانی میان‌بارهای سیال، ب) نمودار درجه شوری به فراوانی میان‌بارهای سیال در کانی ژئولیت همراه با کانسنگ مس طبیعی

تیپ کان‌زایی

محمدی و همکاران، ۱۳۹۸) گزارش شده‌اند. طی کرتاسه پایانی، فرورانش درون اقیانوسی در داخل نئوتتیس توسعه پیدا نموده و باعث تشکیل حوضه‌های کششی پشت قوسی سبزوار-نائین در صفحه بالای فرورانش شده (Agard et al., 2005; Ghasemi and Talbot, 2009; Shafaii Moghadam, 2006) و سنگ میزبان بازالتی کان‌زایی مس طبیعی در کانسار سه‌بندون در این حوضه کششی پشت قوسی تشکیل شده است. کان‌زایی مس در کانسارهای میشیگان در سنگ‌هایی با ترکیب بازالت تولیتی حفره‌دار و کنگلومرا رخ داده است (Guilbert and Park, 1986, 2007). در کانسار مس سه‌بندون نیز میزبان کان‌زایی شامل بازالت و اسپلیت بازالت می‌باشد. ماده معدنی مس طبیعی در کانسارهای تیپ میشیگان، به صورت چینه‌کران و محدود به واحد بازالتی و با بافت‌های دانه‌پراکنده و رگه-رگچه‌ای تشکیل شده و کانی‌شناسی ماده معدنی بیشتر ساده و شامل مس طبیعی، کوپریت، مالاکیت، کریزوکولا، نقره طبیعی و به مقدار کمتر، کالکوسیت است؛ کانی‌شناسی ماده معدنی کانسار سه‌بندون نیز مشابه کانسارهای تیپ میشیگان می‌باشد. کانسارهای مس تیپ میشیگان دارای تجمعات کانیایی رخساره دگرگونی پره‌نیت-پومپیلیت (Phillipotts, 1986) شامل کوارتز، آل‌بیت، پره‌نیت، پومپیلیت، اپیدوت، کلریت و رخساره زئولیت (کوارتز، آنالیم و لومونتیت) هستند؛ در

با توجه به ویژگی‌های بیان شده از کان‌زایی مس در پهنه سه‌بندون، ویژگی‌های اصلی کان‌زایی در پهنه سه‌بندون با انواع کانسارهای مس با سنگ میزبان سنگ‌های آتش‌فشانی در جهان مورد مقایسه قرار گرفت. خصوصیات این کانسار با کانسارهای مس نوع مانتو و میشیگان در جدول ۲ مقایسه شده است. کانسار سه‌بندون، از لحاظ موقعیت ژئودینامیکی، سنگ میزبان، کانی‌شناسی ماده معدنی، ساخت و بافت ماده معدنی و دگرسانی، دارای اختلافات زیادی با کانسارهای مس تیپ مانتو می‌باشد (Campus, 1980; Wilson and Zentilli, 1999; Kojima et al., 2009). شواهد موجود در کانسار مس طبیعی سه‌بندون، همانند سنگ میزبان، ساخت و بافت ماده معدنی، کانی‌شناسی ماده معدنی و باطله‌ها، دگرسانی، محیط‌زمین‌ساختی و ژئومتری چینه‌کران ماده معدنی، نشانگر شباهت این کانسار با ذخائر مس تیپ میشیگان است. معروف‌ترین کان‌زایی‌های مس طبیعی در سنگ‌های بازالتی، در منطقه مس‌دار میشیگان (کوبیناوی) در بازالت‌های پروتروزوئیک میانی واقع شده و در ارتباط با سیستم شکاف میان قاره‌های آمریکای شمالی رخ داده‌اند (Sims, 1976; Grant et al., 1988). ذخائر مس طبیعی مشابهی نیز در کانادا و ایالات متحده آمریکا (Kirkham, 1996)، شیلی (Ruiz et al., 1971)، چین (Zhu and Zhang, 2003)، روسیه (D'ujykov et al., 1977) و ایران (نظافتی، ۱۳۷۹؛ مرادی، ۱۳۹۰؛ طاشی و همکاران، ۱۳۹۵؛

جدول ۲. مقایسه ویژگی‌های اصلی کانسار مس سه‌بندون با کانسارهای تیپ مانتو و تیپ میشیگان

تیپ مانتو	تیپ میشیگان	کانسار سه‌بندون
موقعیت ژئودینامیکی	ریف‌های قاره‌ای	حوضه ریفتی پشت قوس
سنگ میزبان	بازالت آمیگدوئیدال و کنگلومرا	بازالت
کانی‌شناسی	کالکوسیت، بورنیت، کالکوپریت، مس طبیعی، مالاکیت	مس طبیعی، کوپریت، مالاکیت
ساخت و بافت	رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی	دانه‌پراکنده، رگه-رگچه‌ای
کانی‌های دگرسانی	کلریت، آل‌بیت، کوارتز، زئولیت، کلسیت، اپیدوت	کلریت، زئولیت
سن کان‌زایی	ژوراسیک-کرتاسه	کرتاسه فوقانی
منبع	Campus, 1980; Wilson and Zentilli, 1999; Kojima et al., 2009	White, 1968; Bornhorst et al., 1988; Bornhorst and Mathur, 2017

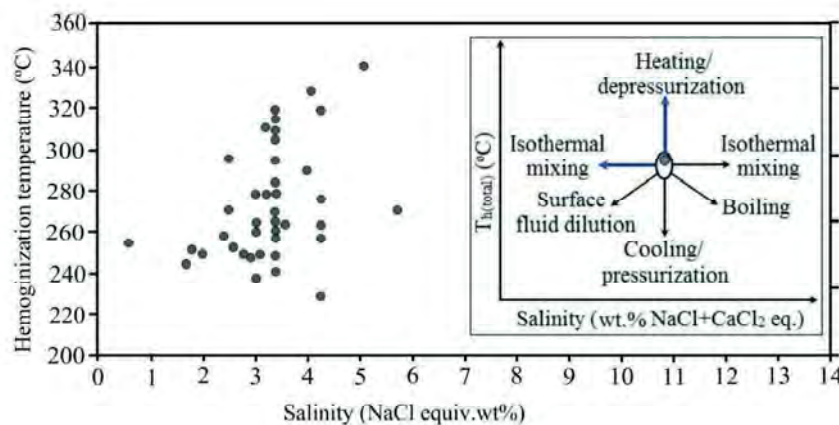
کنسارهای تپ می‌شیگان بوده‌اند؛ داده‌های سن‌سنجی ایزوتوپی سنگ‌های ماگمایی و کانه‌زایی مس، حاکی از اختلاف زمانی بیش از ۱۰ میلیون ساله بین کانه‌زایی و پایان ماگماتیسم می‌باشد (Bornhorst et al., 1988). مدل‌های بازسازی شده دمایی برای کنسارهای تپ می‌شیگان، نشان می‌دهند که اوج دگرگونی در عمق واحدهای آتش‌فشانی-رسوبی پرکننده ریفت، میلیون‌ها سال پس از پایان فعالیت ماگمایی مرتبط با ریفت‌زایی صورت گرفته است؛ همچنین بررسی فراوانی مس در بازالت‌ها و پارامترهای شستشوی مس از آن‌ها، نشان می‌دهد که بازالت یک سنگ مناسب می‌باشد (White, 1968; Jolly, 1974). Brown (2008) نوع دیگری از مدل ژنتیکی دگرگون‌زاد، که در آن کانه‌زایی مس طبیعی تحت تأثیر ترکیبی از سیالات جوی و دگرگونی شکل گرفته است، را پیشنهاد کرد.

پس از ته‌نشست سنگ‌های آتش‌فشانی-رسوبی کراتاسه فوقانی در منطقه سه‌بندون (شکل ۱۲-الف)، با افزایش ضخامت رسوبات، رخداد دپازن‌ت تأخیری و دگرگونی تدفینی رخ داده است. بر اساس مدل‌سازی حرارتی وردروف و همکاران (Woodruff et al., 1995) برای کنسارهای مس می‌شیگان، دمای شکل‌گیری سیالات کانه‌زا در ناحیه منشاء، بیش از ۳۰۰ و کمتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده و مس در سیالات گرمایی با pH اندکی قلیایی به‌صورت کمپلکس کلریدی (Cu^{1+}) (CuCl_2^-) حمل شده است. سیالات هیدروترمال دگرگون‌زاد از سنگ‌های منشاء در

منطقه مورد مطالعه، همانند کنسارهای تپ می‌شیگان، دگرسانی‌های ژئولیتی دارای بیشترین گسترش است و دگرسانی کربناتی (کلسیت) نیز به‌همراه کانه‌زایی مس در این منطقه مشاهده می‌شود.

الگوی تشکیل

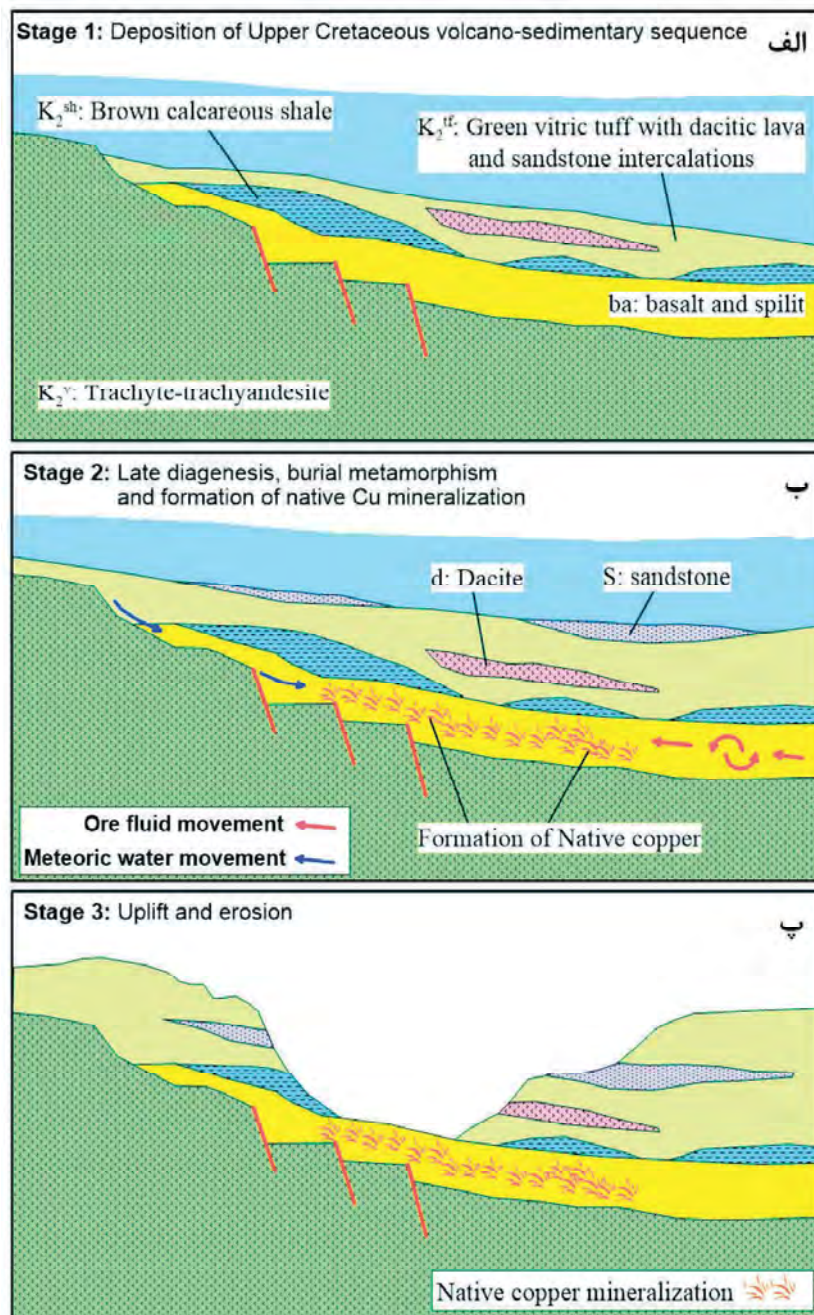
بر اساس مطالعات صورت گرفته در این تحقیق و مقایسه آن با سایر کنسارهای تپ می‌شیگان در جهان، مدل شماتیک تشکیل کنسار مس سه‌بندون در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مدل‌ها و فرضیه‌های مختلفی برای تشکیل کنسارهای مس طبیعی تپ می‌شیگان توسط پژوهشگران ارائه شده است (Butler and Burbank, 1929; Weege and Pollock, 1971; Cornwall, 1956; White, 1968; Cannon, 1992; Davis and Paces, 1990; Heaman et al., 2007; Bornhorst et al., 1988; Bornhorst and Mathur, 2017). White (1968) دو منبع احتمالی مس از سنگ‌های کم‌ریزین ماده معدنی، در این تپ کنسارها را مورد بحث قرار داده که شامل شستشوی مس از سنگ‌های بازالتی پرکننده ریفت به‌وسیله سیالات هیدروترمال دگرگون‌زاد یا توسط سیالات هیدروترمال مشتق شده از ماگما (توده‌های نفوذی پنهان) است. طبق چندین استدلال، وایت (White, 1968) نتیجه گرفت که سیالات هیدروترمال منشاء گرفته از ماگما، به احتمال کمتر عامل کانه‌زایی در



شکل ۱۱. نمودار دوتایی دمایی همگن شدن نهایی در مقابل شوری برای داده‌های میان‌بارهای سیال در کنسارهای مس محدود سه‌بندون. نمودار شماتیک داخلی بیانگر روندهای معمول میان‌بارهای سیال در فضای شوری-دمایی همگن شدن ناشی از فرآیندهای مختلف تحول سیال می‌باشد (Wilkinson, 2001)

سیالات کانه‌زا و شورابه‌های داغ (۲۲۸-۳۴۰ درجه سانتی‌گراد) شکل گرفته و طی چرخش آن‌ها، مس از ساختمان کانی‌های سیلیکاته سنگ میزبان شسته شده و به بخش‌های فوقانی صعود کرده است (شکل ۱۲-ب).

امتداد لایه‌بندی به سمت بالا صعود کرده و این بار سنگ‌های بازالتی، به عنوان سنگ میزبان عمل کرده و مس در آن‌ها ته‌نشست می‌یابد. بر اساس مطالعه پهنه‌های دگرسانی و کانی‌های باطله (زئولیت و کلسیت) در کانسار سه‌بندون، به نظر می‌رسد طی مراحل پایانی دیاژنز و دگرگونی تدفینی،



شکل ۱۲. مدل شماتیک مراحل تشکیل کانه‌زایی مس طبیعی در کانسار سه‌بندون. الف) ته‌نشست واحدهای سنگی آتش‌فشانی-رسوبی کرتاسه فوقانی، ب) افزایش ضخامت رسوبات، دیاژنز تأخیری و رخداد دگرگونی تدفینی که موجب آزاد شدن شورابه‌ها و شستشوی مس از ساختمان سیلیکات‌ها شده و سیال غنی از مس با حرکت به بخش‌های کم فشار در اثر افت فشار و اختلاط با سیالات جوی، عنصر مس به صورت طبیعی در فضاهای خالی و شکستگی‌ها، ته‌نشست می‌یابد، پ) پس از تشکیل کانسنگ مس طبیعی، در اثر عوامل تکتونیکی و بالآمدگی و فرسایش، کانی‌های ثانویه همانند مالاکیت و کوپریت تشکیل شده‌اند.

Jolly, 1974; Bornhorst et al., 1988; Bornhorst and Woodruff, 1997; Püeschner, 2001; Brown, 2006).

باتوجه به مطالب بیان شده، کانی‌های ثانویه مس همچون کوپریت و مالاکیت نیز در کانسار سه‌بندون مشاهده می‌شود که تشکیل آن‌ها در ارتباط با مراحل ثانویه و بالآمدگی و نفوذ سیالات جوی می‌باشد (شکل ۱۲-پ).

نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات و بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده و بررسی ویژگی‌های کانسار مس سه‌بندون از جمله کانی‌شناسی، ساخت و بافت، دگرسانی، سنگ‌میزبان، محیط زمین‌ساختی و مقایسه این کانسار با کانسارهای مس مانتو و میشیگان در جهان، می‌توان اظهار داشت که این کانسار بیشترین شباهت را با کانسارهای مس میشیگان دارد؛ البته بررسی‌های بیشتر ژئوشیمی سنگ‌میزبان و ژئوشیمی ایزوتوبی کانی‌های باطله (کلسیت و زئولیت) در تعیین دقیق‌تر تیپ کانه‌زایی می‌تواند مثمر‌تر باشد. کانه‌زایی در پهنه سه‌بندون به صورت چینه‌کران و محدود به واحد سنگی بازالت اسپلیتی است و اغلب به صورت دانه‌پراکنده، پرکننده حفرات و رگه-رگچه‌ای در داخل سنگ‌میزبان رخ داده است. کانی‌شناسی ماده معدنی در کانسار مورد مطالعه ساده است و شامل مس طبیعی، کوپریت و مالاکیت می‌باشد. عمده‌ترین دگرسانی‌های رخ داده شامل کلسیتی، زئولیتی، کلریتی و به مقدار کمتر اپیدوتی است که به صورت هم‌زمان با کانه‌زایی مس رخ داده است. بر اساس مطالعه سیالات درگیر کانی زئولیت، که هم‌زمان با کانسنگ مس تشکیل شده، گستره دمای هم‌گن شدن برای میان‌بارهای سیال اولیه، به‌طور میانگین ۲۷۲/۹ درجه سانتی‌گراد است و شوری آن‌ها به‌طور میانگین ۳/۲۸ درصد وزنی نمک طعام می‌باشد. بر اساس بررسی‌های صورت یافته، در طی مراحل دیاژنز تأخیری و دگرگونی تدفینی، سیالات کانه‌زایی و شورابه‌های داغ حاصل از دگرگونی، مس را از ساختمان کانی‌های سیلیکاته شسته و با صعود به بخش‌های کم‌عمق و اختلاط با سیالات جوی، مس طبیعی و کانی‌های باطله

فرآیندهای احتمالی برای تنش‌ست کانسنگ در کانسارهای تیپ میشیگان شامل سه فرآیند: الف) اختلاط سیالات کانه دار با سیالات ساکن سرد، اکسیدی و بسیار رقیق؛ ب) واکنش سیالات کانه‌دار با سنگ‌های دربرگیرنده و پ) کاهش فشار و دما (سرد شدن سیالات کانه‌دار) است (Brown, 2006; Bornhorst and woodruff, 1997; Jolly, 1974; White, 1968). مطالعات سیالات درگیر کانسار سه‌بندون و بررسی نمودار شوری-دمای هم‌گن شدن و روند تحول سیال کانه‌ساز در کانسار مس سه‌بندون (شکل ۱۱)، حاکی از رقیق‌شدگی سیال کانه‌دار، کاهش فشار و اختلاط یک سیال با شوری و دمای بالاتر با سیالی با دما و شوری پایین‌تر، است (Hedenquist et al., 1996; Wilkinson., 2001). سیال رقیق‌کننده می‌تواند آب‌های با منشأ جوی بوده باشد؛ بر اساس این نتایج، سیالات دگرگونی با دما و شوری بالا و حاوی مس در امتداد لایه‌بندی به سمت بالا حرکت کرده و در اثر کاهش فشار و اختلاط با سیالات جوی، مس در سنگ‌میزبان بازالتی تنش‌ست یافته است (شکل ۱۲-ب).

مس طبیعی به‌عنوان تنها ماده معدنی مس در کانسار سه‌بندون، نشانگری بسیار واضح بر کمبود گوگرد بوده است. در نتیجه کمبود گوگرد در سنگ‌های منشأ، مسیر صعود سیال و در سنگ‌میزبان بازالتی وجود دارد. فقدان گوگرد در این مجموعه‌های بازالتی را می‌توان با کمبود گوگرد در ماگمای مادر قبل از فوران و یا جدایش گوگرد به فاز گازی در حین تشکیل گدازه‌های زیردریایی توجیه کرد (White, 1968; Jolly, 1974; Brown, 2006). کاهش یون Cu^{+1} از سیالات دگرگون‌زاد کانه‌زا، منجر به رسوب مس طبیعی به صورت Cu_0 می‌شود. مطالعه ژئوشیمی ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن در کانی‌های مرتبط با تنش‌ست مس طبیعی در کانسارهای تیپ میشیگان (Püeschner, 2001)، نشان‌دهنده اختلاط سیالات هیدروترمال دگرگون‌زاد با سیالات جوی حین تنش‌ست مس بوده و آب دریا در شکل‌گیری کانه‌زایی نقشی ندارد. در این کانسارها شاید واکنش‌های مابین سنگ و سیال و اختلاط سیالات، تنش‌ست مس طبیعی را تسهیل می‌کند

کانی‌سازی و ژئوشیمی در گستره پی‌جویی دهن قلعه، شمال غربی بردسکن؛ مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۴، ۵۸۱-۶۰۰.

- روزبه کارگر، س. و قمیان، ی.، ۱۳۷۷. طرح اکتشاف مواد معدنی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و ژئوفیزیک هوایی (پروژه سبزواری)، گزارش اکتشافات چکشی ورقه یکصد هزارم باشتین؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- سپهری‌راد، ر.، ۱۳۸۸. گزارش پی‌جویی مس رسوبی در محور کدکن-ششتمد (شمال تربت حیدریه)؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- طاشی، م.، موسیوند، ف. و قاسمی، ح.، ۱۳۹۵. الگوی رخداد کانه‌زایی مس طبیعی در سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانسار سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد مس-نقره گرماب پایین، جنوب شرق شاهرود؛ فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۰، ۴۰، ۸۹-۱۰۵.

- عشق‌آبادی، م.، ۱۳۷۷. طرح اکتشاف مواد معدنی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و ژئوفیزیک هوایی (پروژه سبزواری)، گزارش اکتشافات چکشی ورقه یک صد هزارم سلطان‌آباد؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- محمدی، م.، نباتیان، ق.، هنرمند، م. و ابراهیمی، م.، ۱۳۹۸. زمین‌شناسی و خاستگاه کانه‌زایی مس در کانسار دهنه، شمال خاور زنجان؛ فصلنامه زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۱، ۳، ۵۲۴-۴۹۷.

- مرادی، م.، ۱۳۹۰. ژنز کانی‌زایی مس و سرب در کانسار عباس‌آباد، طارم سفلی، استان قزوین؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

- مغفوری، س.، ۱۳۹۱. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانه‌زایی مس در توالی آتش‌فشان‌ی-رسوبی کرتاسه پسین در جنوب غرب سبزواری، با تأکید بر کانسار نوده؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

- نادری میقان، ن.، ۱۳۷۷. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه شامکان؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- نظافتی، ن.، ۱۳۷۹. زمین‌شناسی اقتصادی پتانسیل‌های فلزی منطقه نطنز؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

ژئولیت و کلسیت در حفرات و شکستگی‌های سنگ میزبان تشکیل شده است. علت تشکیل نشدن کانی‌های سولفیدی را می‌توان به پایین بودن فشار بخشی گوگرد در سنگ میزبان نسبت داد. در مراحل پایانی و طی بالآمدگی و تأثیر فرآیندهای هوازدگی، کانی‌های ثانویه مس از جمله کوپریت و مالاکیت تشکیل شده‌اند.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از دانشگاه تربیت مدرس به خاطر حمایت‌های مالی، از مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران برای انجام مطالعات میان‌باره‌ای سیال و همچنین از جناب آقای دکتر عقیل اجاقی (مدیر عامل محترم شرکت پارس آسیا پی‌جو) و سرکار خانم دکتر لیلا برهمند، که در طول انجام این تحقیق همکاری صمیمانه‌ای داشته‌اند، تشکر نمایند. همچنین از سردبیر، دست‌اندرکاران و داوران محترم فصلنامه زمین‌شناسی ایران، به خاطر راهنمایی‌های ارزنده علمی که منجر به غنای بیشتر مقاله حاضر شده است، تشکر و قدردانی می‌نماییم.

منابع

- آقاناتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران؛ وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات مواد معدنی کشور، ۵۸۶.

- پناهی‌شهری، م.، کریم‌پور، م.ح. و شبانی، ف.، ۱۳۸۹. کانی‌سازی و اکتشافات ژئوشیمیایی در کمربند ولکانیکی-پلوتونیک هلاک‌آباد (جنوب سبزواری) با نگرشی بر اکتشافات مس پورفیری؛ مجله زمین‌شناسی اقتصادی، ۱، ۲، ۳۸-۲۱.

- حمامی پور بارنجی، ب.، ۱۳۹۴. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و زایش کانسار طلای سه بندون، شمال بردسکن؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۲۵.

- حمامی پور بارنجی، ب.، تاج‌الدین، ح.ع. و برهمند، ل.، ۱۳۹۷. زمین‌شناسی و کانه‌زایی کانسار طلای ای‌ترمال سه‌بندون، شمال بردسکن، خراسان رضوی؛ فصلنامه علوم زمین، ۲۷، ۱۰۸، ۱۶۸-۱۵۵.

- روحبخش، پ.، ابراهیمی، خ.، همام، م. و عباس‌نیا، ح.، ۱۳۸۹. بررسی زمین‌شناسی، دگرسانی،

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences*, 94, 401-419.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations. *Tectonophysics*, 229, 211-238.
- Baronz, F. and Macaudiere, J., 1984. La serie volcanosedimentaire du chainon ophiolitique de Sabzevar (Iran). *Ofioliti*, 9, 3-26.
- Bornhorst, T.J. and Mathur, R., 2017. Copper Isotope Constraints on the Genesis of the Keweenaw Peninsula Native Copper District, Michigan, USA. *Minerals*, 7,10, 185.
- Bornhorst, T.J. and Woodruff, L.G., 1997. Native copper precipitation by fluid-mixing Keweenaw Peninsula, Michigan. *Institute on Lake Superior Geology Proceedings and Abstracts*, 43, 1, 9-10.
- Bornhorst, T.J., Paces, J.B., Grant, N.K., Obradovich, J.D. and Huber, N.K., 1988. Age of native copper mineralization, Keweenaw Peninsula, Michigan. *Economic Geology*, 83, 619-625.
- Brown, A.C., 2006. Genesis of native copper lodes in the Keweenaw Peninsula, Northern Michigan: A hybrid evolved meteoric and metamorphogenic model. *Economic Geology*, 101, 1437-1444.
- Butler, B.S. and Burbank, W.S., 1929. The copper deposits of Michigan. U.S. Geological Survey of Professional Paper, 144, 1-238.
- Campus, F., 1980. Distroto Minero Punta del cobre, modelo interpretative. *Revista Geológica de Chile*, 11, 51-76.
- Cannon, W.F., 1992. The Midcontinent Rift in the Lake Superior region with emphasis on its geodynamic evolution; *Tectonophysics*, 213, 41-48.
- Cho, M., Maruyama, S. and Liou, J.G., 1985. Phase equilibria and mineral parageneses of metabasites in low-grade metamorphism. *Mineralogical Magazine*, 49,3, 321-333.
- Coombs, D.S., Ellis, A.D., Fyfe, W.S. and Taylor, A.M., 1959. The zeolite facies with comments on the interpretation of hydrothermal syntheses. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 17,1-2, 53-107.
- Cornwall, H.R., 1956. A summary of ideas on the origin of native copper deposits. *Economic Geology*, 51, 615-631.
- D'ujykov, O. A., Distler, V. V., Arhipova, A. I., Natorhin, I. A. and Fedorenko, V. A., 1977. Structure and forming conditions of the Cu-bearing horizons of the tuff-lava strata (Siberian platform). *Doklady ANSSSR, Seriya geologicheskaya*, 5, 105-120 (in Russian).
- Davis, D.W. and Paces, J.B. 1990. Time resolution of geologic events on the Keweenaw Peninsula and implications for development of the Midcontinent rift system. *Earth and Planetary Science Letters*, 97, 54-64.
- Ghasemi, A. and Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Science*, 26, 683-693.
- Grant, N. K., Obradovich, J. D. and King Huber, N., 1988. Age of native copper mineralization, Keweenaw Peninsula, Michigan. *Economic Geology*, 71, 619-625.
- Guilbert, J.M. and Park, C.F., 2007. *The Geology of Ore Deposits*. Waveland Press, Long Grove, United State of America, 985.
- Guilbert, J.M. and Park, J.C.F., 1986. *The Geology of Ore Deposits*. Freeman, New york, 985.
- Hall, D.L., Sterner, S.M. and Bodnar, R.J., 1988. Freezing point depression of NaCl-KClH₂O solutions. *Economic Geology*. 83, 197-20.
- Heaman, L.M., Easton, R.M., Hart, T.M., MacDonald, C.A., Hollings, P. and Smyk, M.,

2007. Further refinement to the timing of Mesoproterozoic magmatism, Lake Nipigon region, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 44, 1055-1086.
- Hedenquist, J.W., Izawa, E., Arribas, A. and White, N.C., 1996. Hydrothermal system in volcanic arcs, origin of the exploration for epithermal gold deposits: a short course at Mineral Resource Department. Geological Survey of Japan, Higashi 1-1-3, Tsukuba 305, Japan, 139 p.
 - Jiangxi Exploration Co. China, 1994. Explanatory text of geochemical map of Shamkan (7760), Stream sediment survey 1:100000. No 22.
 - Jolly, W.T., 1974. Behavior of Cu, Zn, and Ni during prehnite-pumpellyite rank metamorphism of the Keweenaw basalts, northern Michigan. *Economic Geology*, 69, 1118-1125.
 - Kirkham, R. V., 1996. Volcanic redbed copper. In: *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*, Ed: O.R., Eskstrand, O.R., Sinclair, W.D. and Thorpe, R.I. Geological Survey of Canada, 8, 241-252.
 - Kojima, S., Trista, D., Guilera, A. and Ken-ichiro ayashi, H., 2009. Genetic aspects of the mantotype copper deposits based on geochemical studies of north Chilean deposits. *Resource Geology*, 59, 1, 87-98.
 - Phillipotts, A. R., 1986. Facies classification of metamorphic rocks. In: *Principles of igneous and metamorphic petrology*. Publishing [Co.] Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 326-328.
 - Püeschner, U.R., 2001. Very low-grade metamorphism in the Portage Lake Volcanics on the Keweenaw Peninsula, Michigan, USA. Ph.D. Dissertation, University of Basel, Basel, Switzerland, 1-81.
 - Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*, 12, 664 p.
 - Ruiz, C., Aguilar, A., Egert, E., Espinosa, W., Peebles, F., Quezada, R. and Serrano, M., 1971. Stratabound copper sulphide deposits of Chile. *The Society of Mining Geologists of Japan*, 3, 252-260.
 - Shafaii Moghadam, H., 2009. The Nain-Baft Ophiolites (Central Iran): Age, Structure and Origin. Ph.D. thesis Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 532 p.
 - Shafaii Moghadam, H., Stern, R.J Corfu, F., Chiaradia, M. and Ghorbani, G., 2014. Sabzevar Ophiolite, NE Iran: Progress from embryonic oceanic lithosphere into magmatic arc constrained by new isotopic and geochemical data. *Lithos*, 224-241.
 - Shafaii Moghadam, H. and Stern, R.J., 2014. Ophiolites of Iran: keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia: (I) Paleozoic ophiolites. *Journal of Asian Earth Science*, 91, 19-38.
 - Shafaii Moghadam, H. and Stern, R.J., 2015. Ophiolites of Iran: Keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia: (II) Mesozoic ophiolites. *Journal of Asian Earth Science*, 100, 31-59.
 - Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. *A practical guide to fluid inclusion studies*. Blackie, Glasgow, 223.
 - Shojaat, B., Hassanipak, A.A., Mobasher, K. and Ghazi, A.M., 2003. Petrology, geochemistry and tectonics of the Sabzevar ophiolite, north central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21, 1053-1067.
 - Sims, P. K., 1976. Precambrian tectonics and mineral deposits, Lake Superior region. *Economic Geology*, 71, 1092-1127.
 - Sterner, S.M., Hall, D.L. and Bodnar, R.J., 1988. Synthetic fluid inclusions V: solubility relations in the system NaCl-KCl-H₂O under vaporsaturated conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol: 52(5), p: 989-1005.
 - Weege, R.J. and Pollock, J.P., 1971. *The Calumet Division Geological Staff. The geology*

- of two new mines in the native copper district. *Economic Geology*, 67, 622-633.
- White, W.S., 1968. The native-copper deposits of northern Michigan; In *Ore Deposits of the United States, 1933-1967* (Graton Sales Volume); Ridge, J.D., Ed. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers: New York, NY, USA, 303-325.
 - Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185-187.
 - Wilkinson, J.J., 2001. Fluid Inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55, 229-279.
 - Wilson, N.S.F. and Zentilli, M., 1999. The role of organic matter in the genesis of the El Soldado volcanic-hosted manto-type Cu deposit, Chile. *Economic Geology*, 94, 1115-1136.
 - Woodruff, L.G., Daines, M.J., Cannon, W.F. and Nicholson, S.W., 1995. The Thermal History of the Midcontinent Rift in the Lake Superior Region: Implications for Mineralization and Partial Melting. In *Proceedings of the International Geological Correlation Program Field Conference and Symposium on the Petrology and Metallogeny of Volcanic and Intrusive Rocks of the Midcontinent Rift System*, Duluth, MN, USA, 19 August-1 September. Volume 336, 213-214.
 - Zhu, B. and Zhang, Z., 2003. Discovery of the copper deposits with features of the Keweenawan type in the border area of Yunnan and Guizhou provinces. *Science in China, D*, 46, 60-72.