

کانی‌شناسی، زمین شیمی و شرایط تشکیل کانسار مس بندقیچی منطقه ترود، جنوب شاهرود

سمیه صالحی نسب، فرج الله فردوست*، افسانه سلطانی

دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(دریافت مقاله: ۹۷/۶/۶، نسخه نهایی: ۹۷/۹/۷)

چکیده: کانسار مس بندقیچی در کرانه شمالی پهنه ساختاری ایران مرکزی، ۱۲۰ کیلومتری جنوب شاهرود و ۷۰ کیلومتری جنوب شرق ترود واقع است. کانی‌سازی مس همراه با واحدهای سنگی از جمله ماسه‌سنگ، کنگلومرا و لای سنگ با سن الیگوسن رخنمون دارند. کانه‌زایی به صورت چینه‌کران (روزادی)، چینه‌سان (همزادی) و برونزادی (فرآیندهای سطحی) صورت گرفته است. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده کانسار شامل کانی‌های سولفیدی (کالکوسیت، کولیت، بورتیت، کالکوپیریت و پیریت) و کانی‌های کربناته (مالاکیت و آزوریت) هستند. کانی‌سازی اصلی در پهنه احیایی و در بخشی از سازندهای قرمز رنگ تشکیل می‌شود و توسط نفوذپذیری، مقدار مواد آلی و سولفیدها در سنگ میزبان کنترل می‌شود. براساس بررسی‌های زمین شیمیایی، ماسه‌سنگ‌های منطقه خاستگاه فلسیک تا حدواسط دارند. عنصر مس در بین فلزات پایه دارای بالاترین مقدار ضریب تولید بوده است (۴ تا ۸ درصد وزنی) و بیشترین همبستگی را با نقره نشان می‌دهد. با توجه به گسترش گدازه‌های آندزیتی ائوسن در منطقه مجاور کانسار و حضور قطعات آتشفشانی در بردارنده کانی‌های مس‌دار در واحدهای کنگلومرای میزبان می‌توان خاستگاه مس در منطقه را به واحدهای آتشفشانی نسبت داد. با توجه به ویژگی‌های اساسی کانسار مس بندقیچی از جمله سنگ میزبان، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، عناصر همراه، محیط ته‌نشست و عوامل مؤثر در کانه‌زایی می‌توان این کانسار را یک کانسار مس با میزبان رسوبی و از نوع لایه قرمز در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: مس؛ ماسه‌سنگ؛ الیگوسن؛ لایه قرمز؛ بندقیچی؛ ترود.

مقدمه

رسوب سولفیدهای مس می‌شوند [۴]. محل کانی‌سازی‌های مس در کانسارهای مس رسوبی توسط واکنش‌های بین رسوبات نفوذپذیر، جهت جریان سیال، نسبت اجزای احیایی از جمله مواد آلی و سولفیدهای در سنگ میزبان کنترل می‌شوند [۵]. به بیان هیتزمن و همکاران [۶]، کانسارهای مس رسوبی چینه-سان از اوایل پروتروزوئیک تا اواخر تریسیری توزیع شده‌اند و در سه دوره (۱) پروتروزوئیک اولیه، (۲) پروتروزوئیک پسین و (۳) پرمین رایج‌تر هستند. کانی‌زایی مس رسوبی در ایران در دوره-های مختلف زمین‌شناسی از جمله در پرکامبرین-کامبرین همراه با گنبد‌های نمکی در پهنه زاگرس، سازند نایبند در زمان

پس از کانسارهای مس پورفیری، کانسارهای مس با میزبان رسوبی دومین منبع این فلزات هستند و ۲۰ تا ۲۵ درصد از مس جهانی را تأمین می‌کنند [۱] و منبع قابل توجهی برای نقره، کبالت و به مقدار کمتر برای روی و سرب و اورانیوم هستند [۲]. این کانسارها به صورت چینه‌سان و چینه‌کران و یا میانزادی در دو گروه کوپرشیفر و لایه‌قرمز تقسیم بندی می‌شوند [۳]. نهشتگی فلزات در کانسارهای لایه‌قرمز توسط واکنش اکسایش-احیا کنترل می‌شوند که به حضور مواد آلی و احیا سولفات‌ها به سولفید وابسته هستند، و در نتیجه منجر به

*نویسنده مسئول، تلفن-نمبر: ۰۲۳۳۲۳۹۶۰۰۷، پست الکترونیکی: faraj_fardoost@yahoo.com

نمونه جهت تعیین مقادیر عناصر اصلی و فرعی به روش (XRF) و تعداد ۱۵ نمونه برای تجزیه و تحلیل عناصر اصلی و کمیاب به روش (ICP-OES) به آزمایشگاه زرآزما، کانساران بینالود و مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران ارسال شدند. نتایج به دست آمده در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی

منطقه مورد بررسی بر اساس پهنه‌بندی ساختاری-رسوبی ایران در کرانه شمالی پهنه زمین‌ساختی ایران مرکزی و بر نوار آتشفشانی تروند-چاه شیرین قرار دارد. فعالیت‌های ماگمایی بسیار گسترده در ترشیری سبب تشکیل نوار آتشفشانی تروند-چاه شیرین با ترکیبی از برش و گدازه‌های آتشفشانی و با روند شمال شرقی-جنوب غربی در کرانه شمالی کویر مرکزی ایران و در منطقه تروند شده است [۱۰]. نقشه محدوده معدنی بندقیچی با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ تروند [۱۱]، تصاویر ماهواره‌ای و بررسی‌های صحرائی تهیه شد (شکل ۱). ستون چینه‌شناسی واحدهای سنگی موجود در بخش مرکزی منطقه کانسار بندقیچی و جایگاه افق‌های احیایی کانه-دار تهیه و در شکل ۲ نشان داده شده است. سنگ میزبان اصلی در کانسار مورد بررسی ماسه سنگ، کنگلومرا و به مقدار کمتر لای سنگ هستند. مهم‌ترین واحدهای سنگی منطقه عبارتند از:

تریاس پسین، سازند گردو در زمان ژوراسیک پسین کرتاسه پیشین و سازند سرخ بالایی مربوط به زمان میوسن روی داده است [۷]. چندین پهنه کانی‌سازی مس در ایران از جمله تبریز-یاسوج، شمال غرب ایران، جنوب زاگرس در جنوب غرب ایران [۸]، ایران مرکزی و پهنه طبس در خرد قاره ایران مرکزی [۹] وجود دارند. کانسار مس بندقیچی با مختصات جغرافیایی ۲۲° ۵۵' تا ۳۲° ۵۵' طول شرقی و ۱۲° ۳۵' تا ۱۷° ۳۵' عرض شمالی، در فاصله ۷۰ کیلومتری جنوب شرق تروند و ۲۰۰ کیلومتری جنوب شاهرود در استان سمنان واقع است. در این پژوهش زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، زمین شیمی، خاستگاه و چگونگی تشکیل این منطقه براساس یافته‌های صحرائی و آزمایشگاهی بررسی می‌شود.

روش بررسی

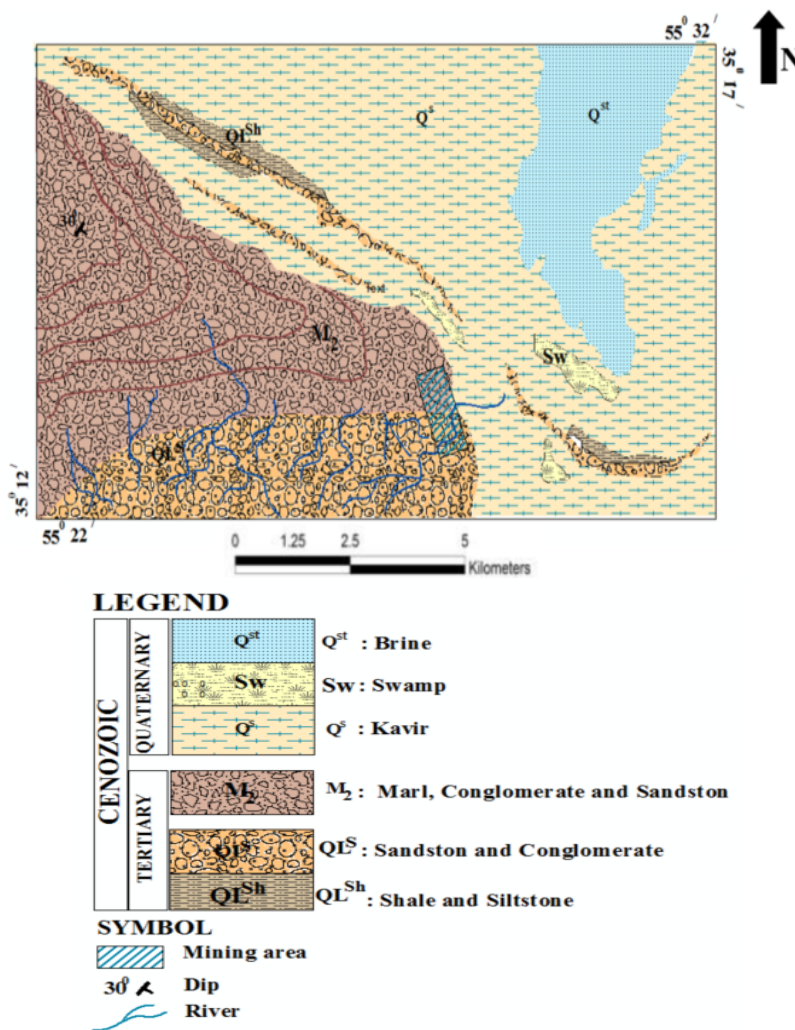
در این پژوهش، پس از تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و پیمایش‌های صحرائی و نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ تروند، تعداد ۶۵ نمونه از کانسنگ مس و سنگ‌های دربرگیرنده آن در پیمایش‌های عمود بر راستای ماده معدنی برداشت شد. در بررسی‌های آزمایشگاهی، تعداد ۴۲ نمونه جهت تشخیص کانی‌شناختی و سنگ‌شناسی، تعیین روابط بافتی و همبزرایی با روش‌های میکروسکوپی و ۵ نمونه جهت بررسی‌های کانی‌شناسی به روش (XRD)، تعداد ۱۶

جدول ۱ مقادیر اکسیدهای اصلی بر حسب درصد وزنی (به روش XRF)

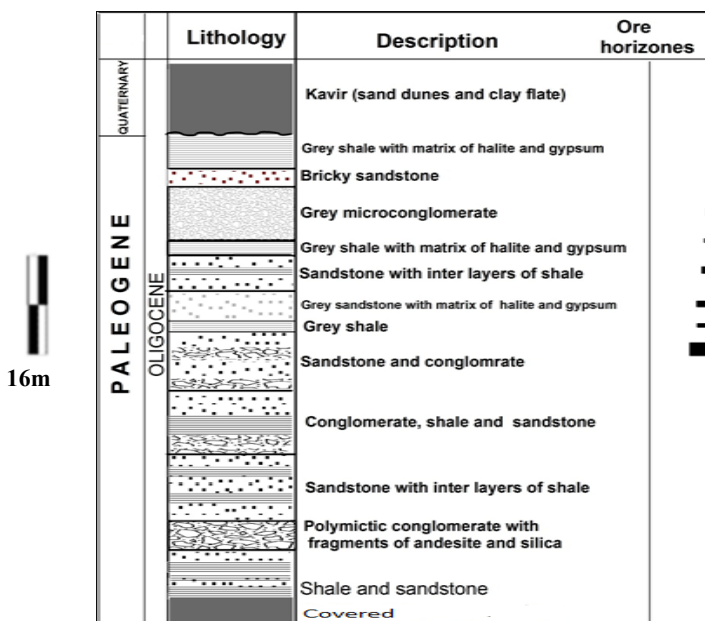
شماره	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Feot	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	MgO	CaO	TiO ₂	LOI	جمع کل
A-1	۷۴	۳۸۲	۱۹۵	۱۲۳۴	۰۳	۰۱۱	۰۳	۱۱	۱۰۴	۲۰۱۷	۱۸	۸۵۷۹
A-2	۸۰۴	۱۹۴	۰۷۵	۳۲۴۳	۰۳۸	۰۰۷	۰۰۳	۰۷	۲۰۱	۰۱	۸۷	۷۲۶۱
A-3	۱۹۲۶	۵۵	۵۶	۱۰۴	۴۷	۰۰۱	۰۰۳	۰۰۶	۱۸۴	۰۱	۵۵	۷۱۸۳
A-4	۱۹۰۱	۳۰۱	۳۲۹	۴۹۷	۰۶۶	۰۷۹	۰۸۳	۰۷۹	۲۹۷۱	۰۳۵	۱۶۵۸	۸۰۹۹
A-5	۱۶۱۸	۱۰۴۶	۵۵	۱۷۴	۱۵	۰۰۳	۰۰۵	۱۴	۹۲	۰۱	۸۳	۷۰۱۲
A-6	۲۱۳۹	۵۸۷	۵۹۶	۶۵	۱۸۱	۱۱۱	۰۰۵	۱۲	۹۳	۰۲۳	۹۲۰	۶۵۲۹
A-7	۲۲۳۷	۲۷	۱۹۹	۱۶۷	۰۵۶	۰۰۸	۰۰۵	۰۶	۹۳	۰۲	۶۲۴	۴۵۷۶
A-8	۲۲۴۱	۲۷۳	۳۶۷	۱۳	۰۹۴	۰۰۱	۰۰۸	۰۳	۷۷	۰۲	۱۹۷	۵۹۰۴
A-9	۲۲۶۸	۵۲۱	۵۲۳	۵۶۹	۰۸۲	۰۵۹	۰۰۷	۱۶	۵۷	۰۲	۱۶۳	۶۳۰۹
A-10	۲۶۹	۵۹	۵۴۶	۱۹۸	۱۲۵	۱۳۶	۰۱۱	۰۵	۱۲۶	۰۳	۲۲۸	۷۹۱۶
A-11	۲۸۹۱	۱۰۳	۱۸	۱۸	۰۹	۰۲	۰۲	۱۲	۱۵۸	۰۲	۱۳۳۰	۷۹۶۱
A-12	۳۰۷۹	۶۹۲	۸۶۹	۲۷۱	۱۲۱	۰۱	۰۰۸	۰۱	۱۵۳	۰۱	۲۰۲	۸۶۲
A-13	۳۶۸	۵۷	۲۵	۴۲	۱۴	۰۲	۰۱	۱۲	۲۲۷	۰۵	۷۳	۸۳۶
A-14	۳۶۵	۶۶	۱۹	۱۴	۱۴	۱۹	۰۱۱	۱۱	۱۱۵	۰۳۳	۱۹۱	۸۱۸۴
A-15	۳۹۵۵	۳۵۸	۶۸۲	۲۷۹	۰۷۷	۰۱	۰۰۷	۰۶	۵۸	۰۲	۱۷۸	۷۸۰۸
A-16	۴۷۱۴	۱۱۰۵	۳۸۶	۴۵۷	۱۷۲	۰۲۳	۰۱۵	۱۸	۱۱۹	۰۶	۸۲۶	۹۱۲۸

جدول ۲ مقادیر عناصر فرعی و کمیاب بر حسب ppm (به روش ICP-OES).

شماره نمونه	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	A-9	A-10	A-11	A-12
Ag	۳۰٫۲	۱٫۴	۰٫۲۶	۰٫۴۷	۱۳٫۶	۰٫۲۱	۰٫۲۱	۰٫۴۹	۱۶٫۳	۰٫۴۵	۱۱٫۵	۱۶٫۵
Al	۳۶۹۳۴	۵۲۹۸۱	۳۸۲۰۰	۳۵۹۲۸	۳۸۷۲۲	۲۵۴۳۹	۳۶۰۸۰	۴۲۵۶۱	۴۲۵۶۱	۴۱۰۱۰	۲۴۲۱	۳۳۷۶۱
As	۳۲	۷٫۲	۲٫۹	۲٫۸	۲٫۴	۱۴۱٫۹	۲٫۸	۳۰٫۹	۱۸	۶۰٫۳۴	۳٫۲	۱۶۳٫۸
Be	۰٫۹	۰٫۶	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۵	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۱	۰٫۵
Ca	۵۰۳۵۷	۶۳۵۵۴	۸۱۶۹۸	۶۹۷۰۲	۸۶۸۹۵	۴۵۶۹۶	۳۹۸۰	۹۸۱۳۱	۷۶۰۹۶	۵۰۲۳۷	۴۰۰۲	۶۸۱۷۵
Cd	۳۹۱٫۶	۱۶	۸٫۸	۱۴۹٫۲	۵۶٫۴	۵۶	۰٫۹	۱۴٫۱	۸	۲۲٫۷	۰٫۲۶	۷٫۹
Ce	۳۰	۲۲	۱۸	۲۱	۲۸	۱۴	۱۴	۳۶	۱۹	۱۹	۲	۱۲
Co	۳۲	۶	۸	۲۹	۱۲	۴	۵	۱۶	۷	۱۱	۱۰	۵
Cr	۳۷	۴۹	۶۴	۶۰	۱۳۰	۲۵	۴۶	۲۰	۲۱	۳۲	۳	۲۲
Cu	۴۱۶۸۸	۱۳۰۵۸	۳۴۱۹	۴۳۷	۴۷۴	۲۴۵	۱۲۴	۴۲۵۲	۱۵۲۵۲	۴۸۰۵	۸۵۶۰۲	۲۶۲
Fe	۳۵۱۳۳	۲۳۵۳۷	۵۰۵۹۵	۴۷۹۷۵	۱۹۱۷۲	۶۳۹۴۲	۵۱۸۷۹	۴۴۹۸۵	۱۹۴۶۱	۷۵۸۷۸	۱۳۸۲۹۳	۷۱۸۷۱
K	۹۸۸۸	۱۵۴۱۱	۱۰۸۱۰	۱۰۰۲۹	۹۸۶۶	۱۱۸۴۰	۸۱۳۱	۱۰۵۲۲	۱۲۹۸۰	۱۳۲۱۳	۷۰۹	۱۰۷۹۸
La	۱۲	۱۱	۱۰	۱۲	۱۳	۹	۷	۱۶	۱۰	۱۱	۰٫۵	۶
Li	۱۴	۱۲	۱۶	۱۰	۱۲	۳	۶	۹	۹	۱۲	۲	۸
Mg	۳۲۲۷	۵۵۲۴	۲۸۶۱	۴۰۴۴	۵۴۵۸	۴۵۰	۱۴۵۹	۲۵۱۲	۳۲۴۱	۳۰۸۵	۴۱۶	۱۱۸۰
Mn	۴۵۰۸	۵۳۳	۷۸۳	۱۲۳۷	۹۴۱	۸۳	۱۴۴	۱۲۶۸	۱۱۱۶	۷۶۶	۲۹۳	۱۳۵
Na	۱۴۵۴۵	۱۸۶۴۶	۱۹۴۹۹	۱۳۴۸۰	۱۱۲۳۵	۲۰۱۵۴	۲۶۲۰۲	۱۱۴۱۵	۳۴۳۵۷	۱۶۳۲۱	۳۴۴۹	۱۷۶۷۷
Ni	۵۷	۲۱	۱۵	۴۵	۳۶	۰٫۵	۵	۳۶	۲۱	۲۲	۲۱	۱۱
P	۴۹۰	۴۷۳	۲۹۴	۲۳۰	۲۶۷	۵۰۳	۱۸۲	۳۵۲	۴۴۳	۳۱۸	۴۶۹	۲۱۴
Pb	۷۴۹۰۳	۱۰۵۹	۹۹۲	۶۹۵۶۵	۴۶۸۵۹	۳۹۳۸	۳۳۸	۵۲۰۰	۱۵۹۶	۴۱۹	۱۸۶	۴۰۸
S	۴۴۴۲۱	۳۳۷۳۹	۶۰۵۷۲	۳۴۰۸۴	۴۳۲۱۷	۷۵۹۸	۸۶۹۴۵	۶۳۸۶۵	۳۰۸۲۷	۱۰۷۵۳۷	۲۰۵۵۷۲	۱۳۲۲۴۳
Sb	۰٫۹۳	۱	۰٫۹۹	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۳	۰٫۹۵	۱٫۰۱	۱	۱٫۰۱	۱٫۰۴	۱٫۰۴
Sc	۶٫۴	۸	۶٫۸	۶٫۳	۷	۳٫۷	۵٫۸	۶	۸٫۱	۵٫۷	۱٫۴	۳٫۹
Ti	۱۴۶۷	۲۲۰۰	۱۷۱۱	۱۶۷۶	۲۵۰۸	۲۲۰۷	۱۸۹۱	۱۴۸۲	۱۶۰۶	۱۴۴۴	۱۶۶	۹۹۵
V	۵۷	۹۴	۸۳	۶۷	۹۹	۴۶	۶۶	۶۶	۶۹	۵۴	۶	۳۸
Y	۲۶	۱۰	۸	۹	۹	۳	۳	۱۵	۱۰	۱۰	۱	۴
Zn	۱۳۴۶	۳۴۳	۴۱۹	۳۶۴۱۴	۱۸۲۲۸	۲۴۶	۳۱۰	۴۶۴۳	۵۸۱	۸۰	۴۳۰	۸۱
Ba	۱۴۵	۲۳۸	۱۵۸	۱۹۲	۷۲۴	۱۸۲	۱۳۴	۱۵۰	۲۱۲	۱۸۴	۲۰۴	۱۹۰
Sr	۵۸۸	۵۷۶	۴۸۵	۱۱۹۶	۹۸۸۷	۴۸۲	۸۷۵	۳۰۴	۱۱۳۵	۱۹۶۵	۷۷۰۸	۴۸۹۸
Th	۵٫۸	۷٫۸	۶٫۸	۶٫۵	۱۱٫۶	۶٫۸	۷٫۳	۶٫۷	۶٫۷	۷٫۵	۶٫۷	۷٫۹
U	۳٫۴	۳٫۹	۴٫۶	۴٫۱	۲٫۸	۴٫۷	۴٫۸	۴٫۲	۴٫۲	۵٫۱	۶٫۷	۴٫۹
Yb	۳٫۵	۱٫۴	۱٫۳	۱٫۲	۱٫۳	۰٫۸	۱	۱٫۷	۱٫۴	۱٫۴	۰٫۹	۱
Zr	۳۰	۴۵	۳۱	۳۰	۲۹	۴۱	۲۶	۲۹	۳۵	۳۸	۱۰	۲۹



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ منطقه معدنی بر پایه تصاویر ماهواره‌ای و پیمایش‌های صحرائی.



شکل ۲ ستون چین‌شناسی واحدهای سنگی موجود در بخش مرکزی منطقه کانسار بندقیچی و جایگاه افق‌های احیایی کانه‌دار.

کانی‌های رسی، فلدسپات و میکا هستند که توسط سیمان کلسیتی به یکدیگر متصل شده‌اند. واحد شیلی در نمونه دستی به رنگ خاکستری تا سیاه (به دلیل حضور مواد آلی) دیده می‌شود.

کانه‌زایی و دگرسانی در منطقه مورد بررسی

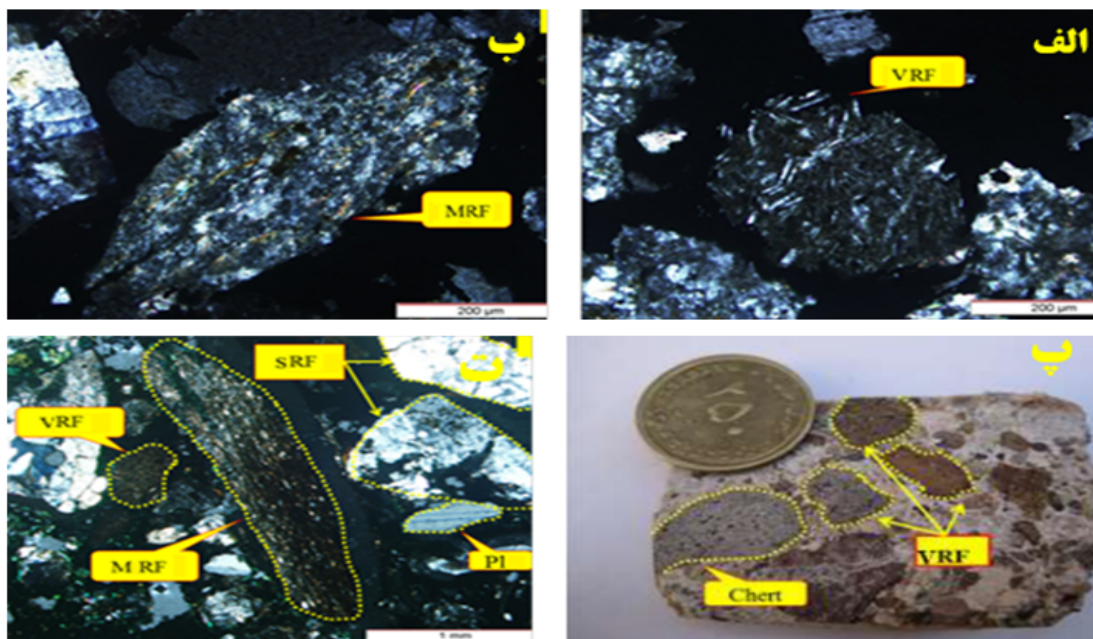
کانه‌زایی مس در منطقه معدنی بندقیچی درون توالی‌های رسوبی از جمله ماسه سنگ (لیت‌آرنایت، ماسه سنگ تیره)، کنگلومرا (دانه چیره چندآمیزه‌ای) و لای سنگ به مقدار کم صورت گرفته است. منطقه بندقیچی، کان‌زایی به صورت چینه‌کران (روزادی)، چینه‌سان (همزادی) و برونزادی (فرآیندهای سطحی) رخ داده است. کان‌زایی اغلب به شکل رگه‌ای است که نشان‌دهنده کان‌زایی از نوع چینه‌کران است.

پهنه‌های کان‌دار نیز به صورت عدسی‌ها و یا لایه‌هایی در شکل محلی به صورت هم شیب با لایه‌بندی رسوبات در برگیرنده دیده می‌شود که نشان‌دهنده چینه‌سان بودن کانسار است. ماده معدنی به دو صورت اولیه (دانه پراکنده) و ثانویه (به صورت سیمان و پرکننده فضای خالی) نیز در واحدهای سنگی میزبان شکل گرفته است. کانی‌سازی اصلی در پهنه‌های احیایی و در بخشی از سازندهای قرمز رنگ تشکیل می‌شود. توالی لایه قرمز شامل پهنه‌های سفید یا خاکستری شسته شده در ماسه‌سنگ و لایه‌های شیلی، احیایی سبز یا خاکستری و لای سنگ هستند.

واحد ماسه‌سنگ: واحد ماسه سنگی به عنوان یکی از گسترده‌ترین واحدهای سنگی تشکیل‌دهنده منطقه کانسار به رنگ خاکستری و گاهی به رنگ قرمز دیده می‌شود. ماسه‌سنگ‌های میزبان کان‌زایی در این منطقه شامل کانی‌های کوارتز، چرت، فلدسپات (پلاژیوکلاز، ارتوز و میکروکلین)، موسکویت، کانی‌های فرومنینزین و خرده‌سنگ (آذرین، رسوبی و دگرگونی) هستند (شکل‌های ۳ الف و ب). این اجزا در زمینه‌ای از رس، لای، نمک‌های فراوان (هالیت و سنگ گچ) و سلسیت قرار گرفته‌اند.

واحد ریزکنگلومرا و کنگلومرا: اجزای تشکیل‌دهنده کنگلومراها عبارتند از: قطعات آتشفشانی، قطعات سیلیسی (چرت)، خرده‌سنگ‌های رسوبی، قطعات آهنی و هم‌چنین کانی‌های فرومنینزین با دگرسانی شدید که در زمینه‌ای از لای، رس، هالیت، سنگ گچ و سلسیت قرار دارند (شکل‌های ۳ پ و ت). کنگلومراهای منطقه از نوع کنگلومرای دانه چیره و کنگلومرای چند آمیزه‌ای و دارای آثار کان‌زایی کمتری نسبت به واحد ماسه‌سنگی هستند.

واحد شیل، گلسنگ و لای‌سنگ: لای سنگ‌ها سنگ‌های رسوبی آواری سیلیسی دانه‌ریز هستند که در نمونه دستی به رنگ قرمز آجری (در اثر وجود اکسید آهن III و هماتیت) تا زردرنگ دیده می‌شوند. اجزای اصلی لای سنگ‌ها شامل کوارتز،

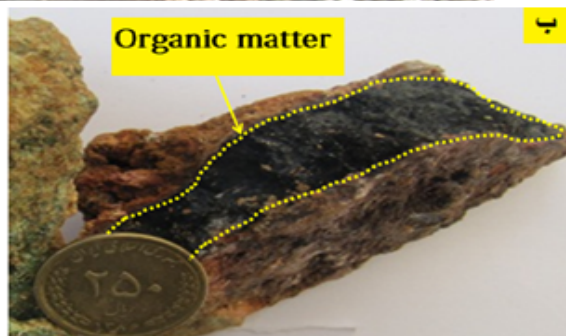
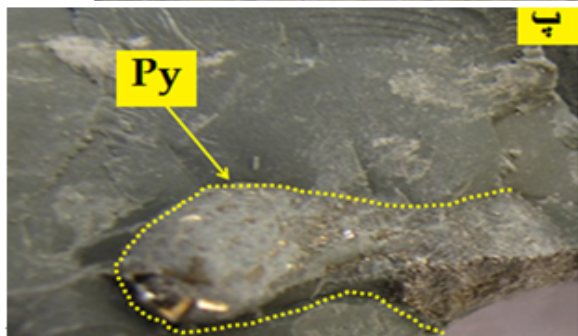
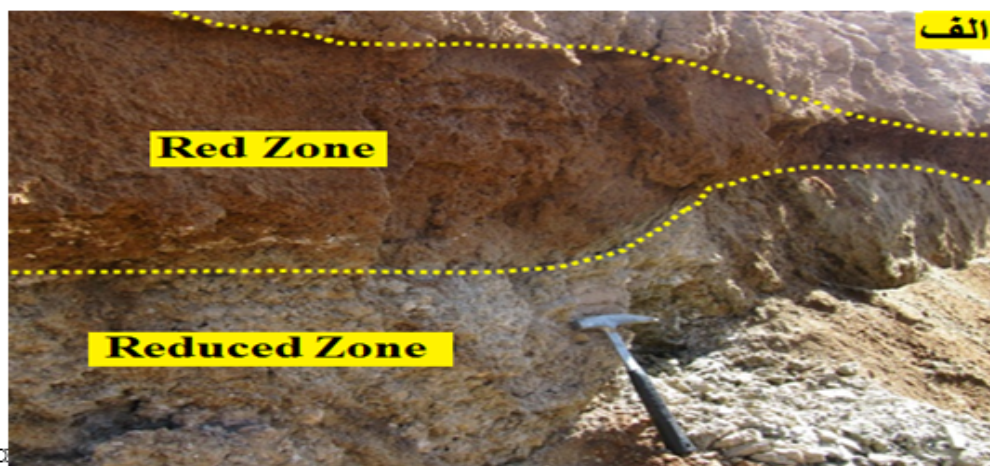


شکل ۳ الف) تصویر میکروسکوپی از خرده سنگ‌های آتشفشانی (VRF) در واحد ماسه سنگی، ب) تصویر میکروسکوپی از خرده سنگ‌های دگرگونی (MRF) در واحد ماسه سنگی. پ) نمونه دستی از واحد کنگلومرای همراه پیل‌های درشت چرت و خرده سنگ آتشفشانی (VRF) و ت) تصویر میکروسکوپی از اجزای تشکیل‌دهنده واحد کنگلومرای (پلاژیوکلاز (Pl) و خرده سنگ (RF)).

بسیار جزئی لای سنگ و شیل است. مهم‌ترین کانی‌هایی که در پهنه احیایی دیده می‌شوند عبارتند از کالکوسیت (به صورت اولیه و ثانویه)، کوولیت (به صورت ثانویه)، بورنیت، پیریت، کالکوپیریت (به صورت اولیه) و به مقدار بسیار کمتر مس طبیعی. پیریت موجود در لایه‌های احیایی به شکل مکعبی، دانه‌پراکنده و گرهک‌های پیریت دیده می‌شود. مهم‌ترین عوامل موثر در تشکیل این لایه‌های احیایی وجود پیریت، مواد آلی و نفوذپذیری سنگ میزبان است که به ایجاد شرایط احیایی در منطقه کمک نموده و باعث ته‌نشینی کانی‌های سولفیدی مس در لایه‌های احیایی شده است (شکل‌های ۴ ب و پ). حضور مواد آلی و کانی‌های رسی با پیریت در ماسه سنگ‌ها پیشنهاد می‌کند که فرآیندهای رسوبی شامل مواد آلی منجر به رسوب کانی‌های سولفیدی شده‌اند [۶]. مس می‌تواند به مقدار قابل توجهی در ساختارهای پیریت به صورت اجزای سولفیدی مس از جمله کالکوپیریت، بورنیت و کالکوسیت که در برخی موارد به درصد می‌رسد حضور داشته باشد [۱۳]. پیریت نقش قابل توجهی در مهار فلزات کمیاب در سیستم‌های گرمایی دارد و از این طریق در ترکیب سیال‌ها را در کنترل دارد [۱۳].

میزبان این کانسارها ماسه سنگ‌ها و کنگلومراهایی هستند که با توجه به حضور متفاوت هماتیت و حضور مواد آلی در رنگ‌های قرمز مایل به قهوه‌ای، خاکستری روشن و سبز مایل به خاکستری تا سفید تنوع دارند [۱۲]. در واقع، مواد معدنی مس منطقه در لایه‌های روشن ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومراهای قرمز رنگ به ویژه در مرز بین لایه‌های قرمز و لایه‌های خاکستری توزیع شده است. بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که از پهنه اکسایشی به سمت پهنه احیایی به تدریج فراوانی اکسیدهای آهن کاهش یافته و مقدار سولفید مس افزایش می‌یابد. به طور کلی، کانی‌سازی در پهنه احیایی، اکسیدی و برونزادی رخ می‌دهد که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

الف) پهنه احیایی: لایه‌های احیایی منطقه در طول ماهور بسیار محدود بوده و نسبت به پهنه اکسایشی از گستردگی و ضخامت بسیار کمتری برخوردار است. پهنه اکسایشی با گستره وسیع، دربرگیرنده لایه‌های احیایی است (شکل ۴ الف). سنگ‌شناسی لایه‌های احیایی در منطقه بیشتر شامل لیتارنایت و لیتارنایت فلدسپاتی و هم‌چنین کنگلومرای دانه چیره آمیزه‌ای و به مقدار



شکل ۴ الف) پهنه اکسیدی و احیایی در توالی رسوبی، ب) تصویری از حضور مواد آلی (بخش‌های تیره) در نمونه دستی، پ) تصویر نمونه دستی شیل به رنگ خاکستری همراه با بلورهای مکعبی پیریت (Py).

کانی‌های سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت، کوولیت و بونریت): کانی‌های سولفیدهای اولیه مس از جمله بلورهای نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار پیریت، کالکوپیریت و کالکوسیت اولیه به نوبه خود جایگزین مواد آلی شده‌اند و در زمینه ماسه سنگها دیده می‌شوند (شکل ۵ الف) در واقع می‌توان گفت که کانی-سازی طی میانزایی رخ داده است [۱۶]. دانه‌های پراکنده پیریت و کالکوپیریت تشکیل شده در مراحل اولیه میانزایی، توسط برخورد سیال‌های شامل مس در مرحله بعد، مس را جایگزین کرده و کانی‌های سولفیدی، بونریت و کالکوسیت را به صورت بافت جاننشینی تشکیل داده‌اند (شکل ۵ ب). **پیریت:** در بازدیدهای صحرایی، پیریت دارای ساخت لایه‌ای است، به طوری که لایه‌های غنی از پیریت به موازی با لایه‌بندی سنگ میزبان شکل گرفته‌اند. پیریت به صورت بی‌شکل تا شکل‌دار در اندازه‌های چند میکرون تا ۱ سانتی‌متر آشکارا دیده می‌شود. در تصاویر میکروسکوپی، پیریت همراه با دیگر کانی‌های سولفیدی مس به صورت بافت پرکننده فضای خالی در فضای بین قطعات آواری سنگ میزبان ماسه‌سنگی شکل گرفته‌اند (شکل ۵ ب). **کالکوپیریت:** کالکوپیریت مهمترین و فراوانترین کانی اولیه کانسنگ مس محسوب می‌شود که در حضور اکسیژن، آب و در محیط‌های پوسته‌ای کم‌عمق، جایی که اکسید می‌شود، ناپایدار است. می‌توان گفت که هوازدگی کالکوپیریت و حمل مس توسط کانی‌های فرور یکی از منابع اصلی تأمین کانی‌های ثانویه مس مانند مالاکیت، کولیت بوده است. در بعضی از مقاطع میکروسکوپی همراه با این کانی، مس طبیعی نیز دیده می‌شود. مس طبیعی در منطقه دارای فراوانی بسیار کمی است و در گذر از محیط‌های اکسایشی به احیایی شکل می‌گیرد. مس طبیعی در زیر میکروسکوپ به رنگ قرمز مایل به مسی دیده می‌شود و دارای بافت دانه پراکنده است (شکل ۶ پ). **کالکوسیت:** کالکوسیت کانی اصلی سولفیدی موجود در منطقه به دو صورت اولیه و ثانویه حضور دارد. کالکوسیت‌های ثانویه در نتیجه دگرسانی برونزادی کالکوپیریت ایجاد شده‌اند. در مقطع میکروسکوپی، این کانی همراه بونریت، کالکوپیریت و پیریت یافت می‌شود (شکل‌های ۵ ت و ث). در مقاطع، کالکوسیت اولیه به صورت جاننشینی (کالکوسیت‌های موجود در منطقه جانشین مواد آلی در بخش‌های احیایی شده‌اند) و دانه پراکنده دیده می‌شود. بافت غالب این کانی به صورت پرکننده فضای خالی، جاننشینی و دانه پراکنده است. **کوولیت:** کولیت کانی

(ب) **پهنه قرمز اکسیدی:** پهنه اکسایشی با گستره وسیع، از لیتارنایت تا لیتارنایت فلدسپاتی بسیار دانه‌ریز تا دانه متوسط و کنگلومرا و لای سنگ تشکیل شده است. مهم‌ترین اجزای تشکیل دهنده این بخش شامل کوارتز، فلدسپات، پلاژیوکلاز، خرده‌سنگ و کانی‌های رسی است. رنگ این بخش از قهوه‌ای کم‌رنگ تا قرمز تغییر می‌کند. رنگ قرمز این پهنه به دلیل وجود مقدار زیادی اکسید آهن از جمله هماتیت، لیمونیت و گوتیت است. اکسیدهای آهن توسط دگرسانی آهن از کانی‌های سیلیکاته از جمله بیوتیت، پلاژیوکلازها و هورنبلند طی میانزایی تشکیل شده‌اند که این خود منجر به رنگ قرمز لایه‌ها می‌شود. اکسیدهای آهن پاسخگوی جذب فلزات و آزاد سازی آنها هستند [۱۴]. همچنین حضور رنگدانه هماتیت در لایه‌های قرمز برای ارائه Fe^{2+} و در نتیجه افزایش حلالیت مس مؤثر است. انباشتگی اکسید و هیدروکسیدهای آهن پیرامون دانه-های آواری و دگرسانی هماتیت در ماسه‌سنگ‌ها نشان می‌دهد که رسوبات طی میانزایی اولیه قرمز شده‌اند [۱۵].

(پ) کانی‌سازی برونزادی: در منطقه بندقیچی وجود شواهدی از جمله حضور گسترده کانی‌های برونزادی سولفیدی (کالکوسیت ثانویه، کوولیت و مس طبیعی) و کانی‌های برونزادی اکسیدی (مالاکیت و آزوریت، هماتیت، گوتیت و لیمونیت)، نشانگر این است که منطقه دستخوش فرآیندهای سطحی و برونزادی شده است. از دیگر کانی‌هایی که در مرحله هوازدگی و برونزادی در منطقه تشکیل شده‌اند می‌توان به سلسیت، سنگ گچ و هالیت اشاره کرد.

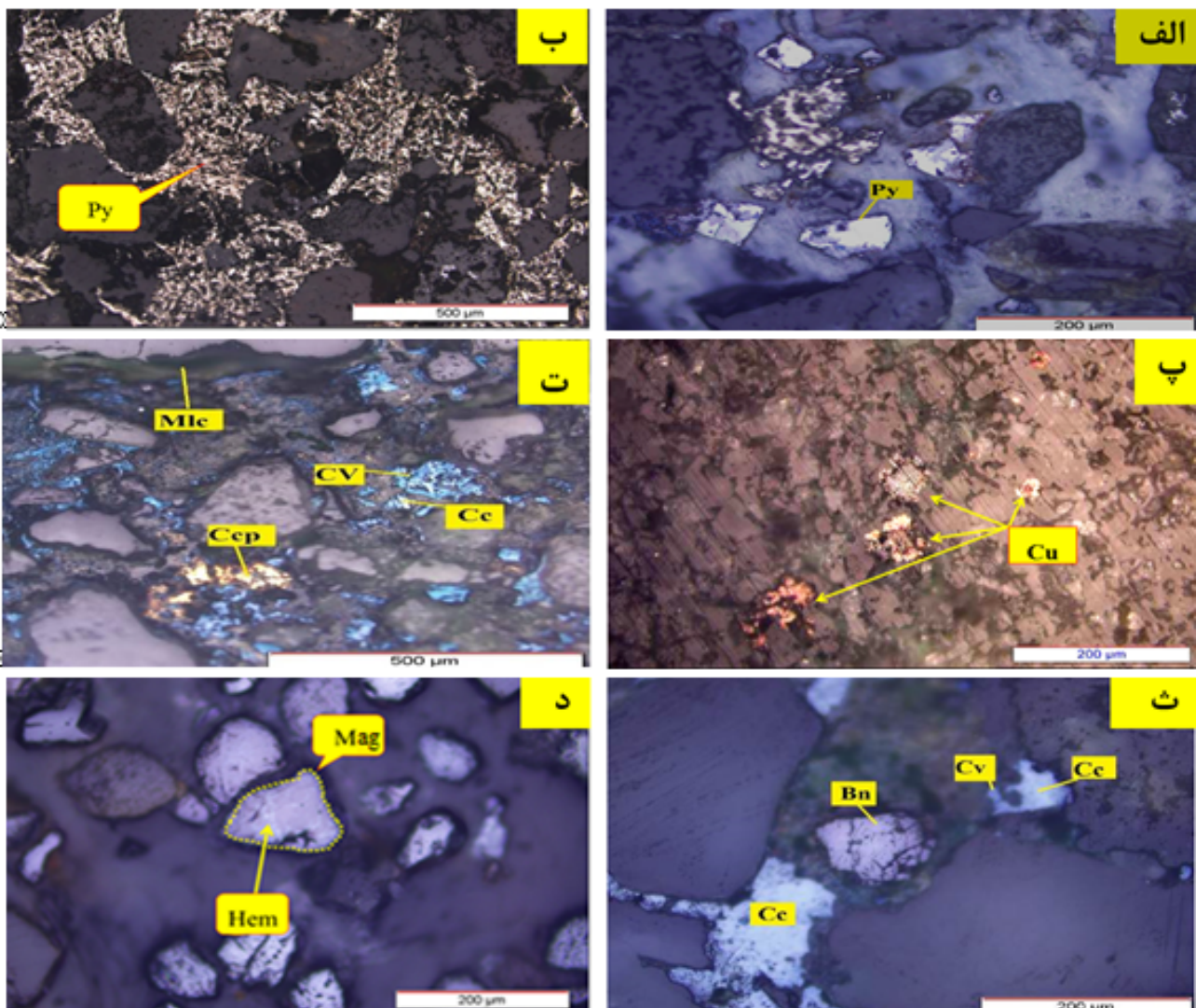
کانی‌شناسی، ساخت و بافت

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی و همچنین نتایج به دست آمده از پراش پرتوی ایکس، کانی‌های تشکیل‌دهنده کانسار به ۶ گروه اصلی شامل ۱- کانی‌های سولفیدی، ۲- کانی‌های کربناته، ۳- کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی، ۴- کانی‌های سولفات، ۵- کانی‌های کلریدی و ۶- کانی‌های باطله تقسیم که در ادامه توضیح داده می‌شوند. با توجه به بررسی‌ها، ساخت و بافت‌های کانی‌های تشکیل دهنده کانسار در منطقه، شامل ساخت لایه‌ای، ساخت رگه‌ای، بافت توده‌ای، بافت پرکننده فضاهای خالی، بافت سیمان میان دانه‌ای، بافت دانه پراکنده و بافت جاننشینی هستند.

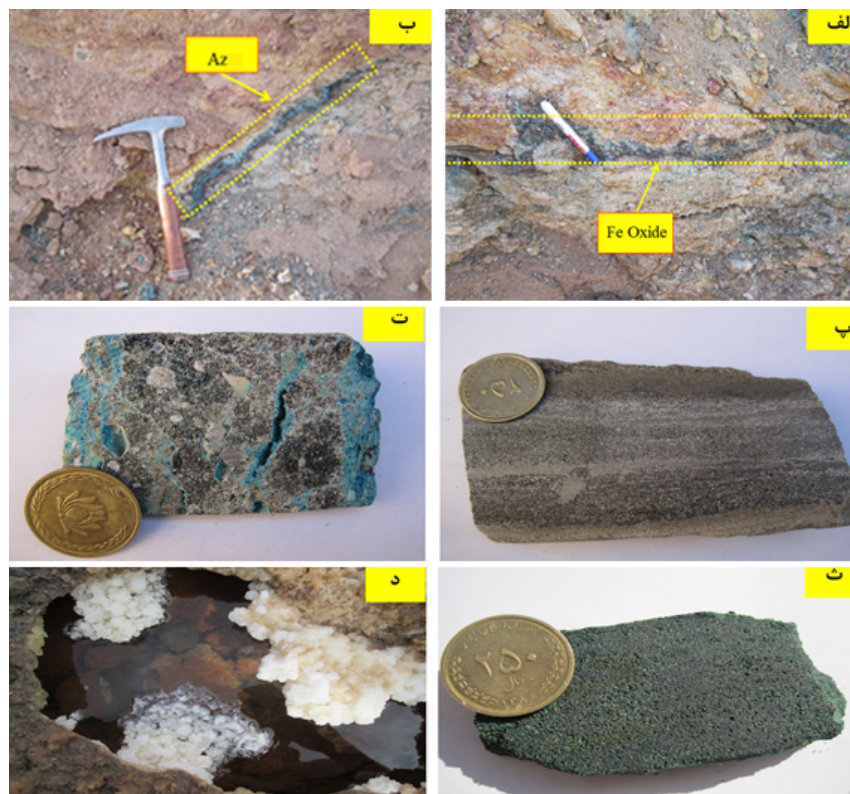
ثانویه برآمده از دگرسانی کانی‌های سولفیدی است و اغلب همراه با کانی‌های دیگر سولفیدی از جمله پیریت، کالوپیریت، کالکوسیت و بورنیت دیده می‌شود. کولیت با بافت دانه پراکنده و پرکننده فضای خالی در منطقه وجود دارد و اغلب پس از تشکیل کالکوسیت و در شرایط برونزادی ایجاد می‌شود (شکل-های ۵ ت و ۵ ث). بورنیت: بورنیت به عنوان کانی اولیه با رنگ قهوه‌ای تا قهوه‌ای مایل به صورتی، هم‌رشدی خوبی را با کالکوپیریت و کولیت نشان می‌دهد و اغلب به صورت دانه‌های پراکنده در فضاهای بین دانه‌های ماسه‌سنگ دیده می‌شود (شکل

۵ ث).

کانی‌های کربناته (مالاکیت و آزوریت): فرآیندهای برونزادی به طور گسترده سبب توزیع کانی‌هایی می‌شوند که پس از رویدادهای مهم کانی‌سازی رخ می‌دهد [۱۷]. این فرآیندها ترجیحاً در راستای ورقه‌ها یا شکستگی سنگ میزبان رخ می‌دهند. مالاکیت و آزوریت از جمله کانی‌های ثانویه منطقه هستند که در اثر اکسایش کانی‌های اولیه و سولفیدی مس با رنگ‌های سبز و آبی لاجوردی در بخش‌های سطحی کنسار به وفور دیده می‌شوند (شکل ۵ ت).



شکل ۵ تصویر میکروسکوپی الف) بلورهای نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار پیریت میانزادی در زمینه ماسه سنگ، ب) پیریت با بافت پرکننده فضای خالی در بین قطعات سازنده واحد ماسه‌سنگی میزبان، پ) مس خالص با بافت دانه پراکنده در مقیاس میکروسکوپی، ت) جانشینی کالکوسیت توسط کولیت و حضور کالک پیریت و مالاکیت به صورت پرکننده فضای خالی، ث) بورنیت همراه با کالکوسیت اولیه و کولیت در فضای بین دانه-ای واحد ماسه‌سنگی و د) مگنتیت مارتیتی شده در نور بازتابی (XPL). بورنیت (Bn)، کالکوسیت (Cc)، کالکوپیریت (Cpy)، کولیت (Cv)، پیریت (Py)، مس (Cu)، مالاکیت (Mal)، مگنتیت (Mag)، هماتیت (Hem) [۱۶].



شکل ۶ الف وب) تصاویر صحرایی از ساخت رگه- رگچه‌ای، رگه‌های معدنی (آزوریت (AZ) و اکسیدهای آهن)، پ) نمونه‌ای از ساخت لایه‌ای در سنگ میزبان کانه زایی (ماسه سنگ)، ت) بافت رگه - رگچه‌ای و حفره پرکن که نشانگر روزادی بودن کانه‌زایی است، ث) نمونه‌ای از بافت پر کننده فضای بین دانه‌ای و نشان دهنده کانه‌زایی روزادی و ث) نمونه صحرایی هالیت با بافت توده‌ای.

کانی‌های کلریدی (هالیت، آتاکامیت، پارالایوریونیت و لایوریونیت):

هالیت به صورت بلورهای مکعبی، توده‌ای و رشته‌ای در منطقه مورد بررسی شکل گرفته است (شکل ۶ ب). نتایج به دست آمده از پراش پرتوی ایکس نشان‌دهنده کانی‌های کلریدی مس از جمله آتاکامیت، لایوریونیت، پارالایوریونیت همراه با کوارتز، کلسیت، سنگ گچ و سلسیت است.

کانی‌های باطله (کوارتز و کلسیت): بلورهای بی‌شکل کوارتز هم در زمینه و هم به صورت درشت بلور دیده می‌شوند و ۲۰ درصد حجمی سنگ را اشغال کرده‌اند. کوارتز و کلسیت هم به عنوان یکی از اجزای آواری تشکیل‌دهنده واحدهای رسوبی میزبان و هم به عنوان سیمان در بین قطعات آواری انباشته شده‌اند که در مرحله رسوبی، آواری و هم‌چنین در مرحله میانزایی تشکیل شده‌اند.

ساخت و بافت

ساخت رگه‌ای: رگه‌هایی از مالاکیت و آزوریت و همچنین اکسیدهای آهن از جمله هماتیت و لیمونیت واحدهای رسوبی

کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی (گوئیت، هماتیت، لیمونیت و مگنتیت): اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن از جمله هماتیت، گوئیت و لیمونیت در نمونه‌های هوازده و اکسیده کانسار در نتیجه اکسایش و هوازدگی کانی‌های پیریت و کالکوپیریت شکل می‌گیرند. بافت غالب این کانی‌ها در منطقه به صورت سیمان میان‌دانه‌ای، رگه‌ای، لایه‌ای و جانیشینی است. مارتیتی شدن جانیشینی ویژه‌ای است که طی آن مگنتیت توسط هماتیت جانشین می‌شود (شکل ۵ د)، اکسیدهای آهن طی فرآیندهای ثانویه، برونزادی و اکسیدی در کانسار تشکیل شده‌اند.

کانی‌های سولفات (سلسیت و سنگ گچ): سلسیت در مرز شرقی منطقه به شکل‌های مختلف لایه‌ای (رسوبی اولیه)، بلوری، منشوری، دانه‌شکری (اولیه) و قلوهای (ثانویه) دیده می‌شود (شکل ۶ الف). بافت توده‌ای در کانی سلسیت به دو صورت دانه‌ریز و دانه‌درشت و همچنین در کانی‌های مالاکیت، هالیت و سنگ گچ مشاهده می‌شود.

کنگلومرها که نقش سیمان را ایفا می‌کند و ب) بافت پرکننده فضای خالی در راستای درزه‌ها و شکستگی‌های سنگ میزبان. کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت و کوولیت و کانی‌های کربناته از جمله مالاکیت و آزوریت در فضای خالی میان اجزای ماسه‌سنگ‌ها و در راستای شکستگی‌ها شکل گرفته‌اند (شکل ۶ ت). کانی‌های کربناته مس، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و هم‌چنین به مقدار بسیار کم، کلسیت و سیلیس، سیمان میان دانه‌ها را شکل داده‌اند (شکل ۶ ث).
بافت دانه پراکنده: بافت دانه پراکنده در بخش‌هایی از کانسنگ که فراوانی سولفیدها کم است دیده می‌شود. کانی‌های سولفیدی مس از جمله کالکوسیت و کوولیت کالکوپیریت، پیریت و کانی‌های مس طبیعی، مالاکیت و آزوریت به طور پراکنده در متن واحد سنگی میزبان وجود دارند.
بافت توده‌ای: در منطقه مورد بررسی، این بافت بیشتر در کانی‌های غیرسولفیدی دیده می‌شود. کانی‌های با این بافت ماهیت سخت و فشرده دارند و به طور عمده شامل مالاکیت، سلسیت، هالیت و سنگ گچ هستند (شکل ۶ د).
 بر اساس بررسی‌های کانه‌نگاری، ساخت و بافت و کانی‌شناسی، مراحل تشکیل و تمرکز کانه‌زایی در منطقه بندقیچی را می‌توان در ۳ مرحله آواری و رسوبی، میانزایی، هوازگی و برونزادی در نظر گرفت (جدول ۳).

میزبان از جمله ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومرها را به طور نامنظم در راستاهای مختلف قطع نموده‌اند. این ساخت کانی‌ها به صورت ثانویه در راستای درزه‌ها و شکستگی‌های سنگ میزبان شکل گرفته‌اند (شکل‌های ۶ الف و ب).

ساخت لایه‌بندی: ساخت لایه‌بندی از جمله ساختارهای رسوبی همزاد است که در سنگ‌های کانی‌سازی لایه قرمز نشان‌دهنده انرژی بالا محیط‌های غیردریایی برای کانسار است [۱۸] (شکل ۶ پ). این ساختارها در کانسارهای لایه قرمز رایج هستند [۱۹]. در کانسار مس بندقیچی، این لایه‌ها بیشتر از پیریت، کالکوپیریت و هم‌چنین کانی‌های اکسیدی آهن در واحد ماسه-سنگی تشکیل شده‌اند.

بافت جاننشینی: در همه کانی‌های سولفیدی و کانی‌های غیرسولفیدی مانند مالاکیت و آزوریت، بافت جاننشینی بافت اصلی در کانسار مس بندقیچی است. در این بافت، کانی‌های اولیه مانند پیریت و کالکوپیریت توسط کانی‌های ثانویه مانند گوتیت، لیمونیت، هماتیت و کوولیت جایگزین شده‌اند. بافت‌های جاننشینی و رگه‌ای (رگه - رگچه‌ای) در کانی‌های مس سولفیدی بیان‌کننده خاستگاه روزادی و کانی‌سازی چینه کران برای این کانی‌سازی است [۲۰].

بافت پرکننده فضای خالی: بافت پرکننده فضای خالی در منطقه بندقیچی به دو شکل متفاوت دیده می‌شود: الف) بافت پرکننده فضای خالی در میان اجزای سازنده ماسه‌سنگ‌ها و

جدول ۳ توالی همبزرایی کانی‌ها در کانسار مس بندقیچی.

Minerals		Stages	Detrital and Sedimentary	Diagenetic	Weathering and Supergene
Sulfuric Minerals	Pyrite			██████████	
	Calcopyrite			██████████	
	Chalcocite			██████████	
	Bornite			██████████	
	Covelite				
Carbonate Minerals	Malachite			██████████	██████████
	Azurite			██████████	██████████
	Atacamite				
Oxid Minerals	Magnetite		██████████	██████████	██████████
	Hematite				██████████
	Limonite				██████████
	Native Cu				██████████
Chloride Minerals	Halite				██████████
	Paralaurionite				██████████
	Laurionite				██████████
	Atacamite				██████████
Sulphate Minerals	Celestite			██████████	██████████
	Gypsum				
Gangue Minerals	Quartz		██████████	██████████	
	Feldspar		██████████		
	Calcite		██████████	██████████	

شیمی عناصر اصلی ماسه‌سنگ‌های منطقه بندقیچی بر نمودارهای هرون و پتی جان [۲۳، ۲۴] در گستره لیترنایت و ماسه سنگ تیره قرار می‌گیرند (شکل ۷ پ).

زمین‌شیمی کانسار معدنی

تراکم بالایی از فلزات (Ti, Bi, Se, As, Au, Mo, Hg) در کانسارهای مس رسوبی می‌تواند ناشی از هجوم محلول‌های معدنی مس‌دار و یا غنی‌شدن آنها در رسوبات شامل مواد آلی باشد [۱۴]. براساس ضرایب همبستگی پیرسون به دست آمده (جدول ۴)، مس با عناصر نقره، نیکل و کبالت دارای همبستگی مثبت است و با عناصر کروم، سرب، روی، مولیبدن، باریم و وانادیم همبستگی منفی نشان می‌دهد. عناصر مس و نقره ناهنجاری بالایی در کانسارهای مس با میزبان رسوبی نشان می‌دهند [۱۵]. ارتباط قوی مس با نقره در ارتباط با کانی‌سازی سولفیدهای مس برونزادی از جمله کولیت و کالکوسیت است [۵].

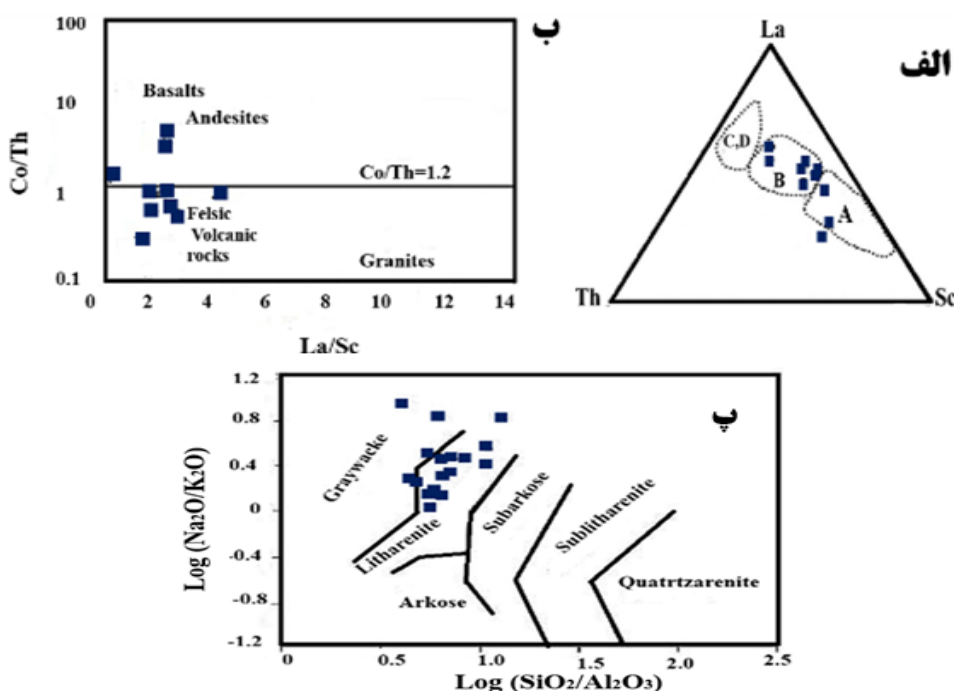
زمین‌شیمی منطقه مورد بررسی

محیط زمین‌ساختی

باتیا و کروک [۲۱]، عناصر La, Th, Zr, Nb, Y, Sc, Co و Ti را به عنوان مفیدترین عناصر برای تفکیک محیط‌های زمین‌ساختی ماسه سنگ‌های تیره مختلف شناسایی کردند. بر اساس نمودارهای سه‌تایی عناصر La-Th-Sc [۲۱]، جایگاه زمین‌ساختی خاستگاه ماسه‌سنگ‌های منطقه مورد بررسی جزایر قوسی قاره‌ای است (شکل ۷ الف).

سنگ خاستگاه

براساس داده‌های برآمده از تجزیه زمین‌شیمیایی، نمونه‌های ماسه‌سنگی بر نمودارهای دوتایی La/Sc - Co/Th [۲۲]، در گستره خاستگاه فلسی قرار می‌گیرند (شکل ۷ ب). در بررسی‌های سنگ‌شناسی، خرده‌سنگ‌های آتشفشانی موجود در ماسه‌سنگ‌های منطقه مورد بررسی بیشتر ترکیب فلسی تا حدواسط نشان داده‌اند که شاهدهی بر تأیید نتایج برآمده از بررسی‌های زمین‌شیمیایی است. بر اساس داده‌های زمین



شکل ۷ الف) نمودار تفکیک ماسه‌سنگ‌ها بر اساس La-Th-Sc، [۲۱]، داده‌های عناصر کمیاب نمونه‌های ماسه‌سنگی منطقه بندقیچی در گستره جزایر قوسی قاره‌ای (B) قرار می‌گیرند (گستره‌ها عبارتند از: A، جزایر قوسی اقیانوسی؛ B، جزایر قوسی قاره‌ای؛ C، کرانه‌های فعال قاره‌ای و D، کرانه‌های غیر فعال). (ب) نمودارهای دو تایی تعیین‌کننده سنگ خاستگاه ماسه‌سنگ‌ها Co/Th - La/Sc [۲۲] که نشان‌دهنده خاستگاه فلسی تا حدواسط نمونه‌های ماسه‌سنگی منطقه بندقیچی است. (پ) رده‌بندی چند متغیره ماسه‌سنگ‌های بندقیچی با استفاده از نمودار Log(Na₂O/K₂O) نسبت به Log(SiO₂/Al₂O₃) برگرفته از مرجع [۲۳] مرزها توسط هرون [۲۴] دوباره رسم شده‌اند؛ بر اساس این نمودار نمونه‌های ماسه‌سنگی منطقه بندقیچی در گستره لیت‌آرنایت و ماسه سنگ تیره قرار می‌گیرند.

جدول ۴ ضریب همبستگی پیرسون بین عناصر کمیاب در کانسار مس بند قیچی.

											۱	Ag
											۱	As
											۱	co
											۱	Cr
											۱	Cu
											۱	Mo
											۱	Ni
											۱	Pb
											۱	V
											۱	Zn
											۱	Ba
											۱	Sr
											۱	Sr
											۱	Ba
											۱	Zn
											۱	V
											۱	Pb
											۱	Ni
											۱	Mo
											۱	Cu
											۱	Cr
											۱	co
											۱	As
											۱	Ag

سرخ شدگی و تخریب کانی‌های سیلیکاتی، مقدار قابل توجهی مس و فلزات دیگر آزاد می‌شوند که می‌توانند خاستگاه مس برای تشکیل کانسار باشند [۱۴]. مواد آلی که دربردارنده مقدار قابل توجهی H_2O و C و S هستند، فشار خارجی بر رسوبات طی میانزایی اولیه تولید محلولهای اسیدی وارد می‌کند که سبب دگرسانی کانی‌های سیلیکاته از جمله فلدسپارها و میکاها به اسمکتیت و کلریت می‌شوند. این امر همچنین سبب افزایش تخلخل و نفوذپذیری رسوبات می‌گردد [۱۵]. در مراحل بعدی میانزایی، طی تبلور و بلوغ اکسیدهای آهن بی‌شکل و تبدیل آن‌ها به هماتیت و همچنین تبدیل اسمکتیت به ایلیت، سازای فلزی (مس، سرب، روی و نقره) درون این کانی‌ها آزاد و وارد سیال اکسایشی می‌شوند و می‌توانند توسط آن حمل شوند. لایه‌های قرمز در کانسارهای مس با میزبان رسوبی دو نقش عمده را بر عهده دارند: (۱) آنها به عنوان منبع فلزات سنگین هستند که در فازهای جامد محدود هستند. (۲) آنها با توجه به تخلخل و نفوذپذیری خود، به عنوان مجراهای جریان آب زیرزمینی طی تکامل حوضه عمل می‌کنند [۲۶]. نفوذپذیری و تخلخل نقش عمده‌ای در تعیین توزیع عمده ماده معدنی دارد و کنترل‌کننده مهم در مهاجرت سیال‌های کانی‌ساز هستند [۲۷]. در منطقه بندقیچی، قطعات آواری (آذرین، دگرگونی و رسوبی) در ترکیب سنگ‌های رسوبی تخریبی مانند کنگلومرا و ماسه‌سنگ قرار گرفته‌اند و می‌تواند به عنوان خاستگاه تأمین‌کننده فلزات کانه‌زایی در نظر گرفته شوند.

ضریب همبستگی عنصر مس با اکسیدهای اصلی (جدول ۵) نشان می‌دهد که مس بیشترین همبستگی را با Fe_2O_3 و MnO داشته است. Al_2O_3 با SiO_2 ، K_2O و P_2O_5 دارای بیشترین همبستگی و با Fe_2O_3 و Na_2O دارای کمترین همبستگی است. ارتباط مثبت بین Al_2O_3 و K_2O بیشتر توسط فلدسپاتها و به مقدار کمتر توسط کانی‌های رسی آلومینیوم‌دار کنترل می‌شود [۲]. از سوی دیگر، همبستگی منفی میان Si_2O و Al_2O_3 نشان‌دهنده این است که با افزایش فلدسپار، کوارتز کاهش می‌یابد [۲].

چگونگی تشکیل و مدل زایشی

با توجه به بررسی‌های انجام شده، خاستگاه مس و فلزات و چگونگی انتقال آنها، خاستگاه گوگرد، چگونگی ته‌نشست سولفیدها و خاستگاه و حرکت سیال را می‌توان در رابطه با کانسار مس رسوبی بندقیچی به صورت زیر توضیح داد:

منبع فلزات و گوگرد

منبع فلز: حوضه‌های تشکیل کانسارهای مس رسوبی چینه‌سان از آنجا که به طور معمول شامل یک یا چند توالی از لایه‌های قرمز هستند و ارتباط نزدیکی با این کانسارها دارند می‌توانند منبع اصلی مس و دیگر فلزات همراه باشند [۱۴]. در کانسارهای مس رسوبی و طی فرآیند میانزایی اولیه، آب‌کافت کانی‌های سیلیکاته مانند هورنبلند و بیوتیت موجب آزاد شدن آهن موجود در شبکه آن‌ها به صورت هیدروکسید آهن III می‌شود که با انباشت پیرامون دانه‌های آواری باعث سرخ شدن رسوبات در مرحله اولیه میانزایی می‌گردد [۲۵]. طی فرآیند

جدول ۵ ضریب همبستگی پیرسون بین عنصر مس با اکسیدهای اصلی در کانسار مس بند قیچی.

							۱	Cu
							۱	AL ₂ O ₃
						۱	۰٫۹۰	SiO ₂
					۱	-۰٫۰۳	-۰٫۰۶	Fe ₂ O ₃
				۱	-۰٫۰۹	۰٫۹۱	۰٫۹۸	K ₂ O
			۱	-۰٫۱۷	-۰٫۱۲	۰٫۰۲	-۰٫۰۶	Na ₂ O
		۱	-۰٫۳۹	۰٫۷۵	۰٫۰۸	۰٫۶۰	۰٫۷۱	P ₂ O ₅
	۱	۰٫۱۳	۰٫۰۹	۰٫۴۶	۰٫۰۹	۰٫۳۴	۰٫۵۲	MnO
MnO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Cu	

به H₂S احیا می‌کنند [۳۰]. طی میانزایی اولیه، انحلال سیمان اولیه و ذرات آواری تخلخل ماسه‌سنگ‌ها را تا ۲۴ درصد حجم کلی، آنها افزایش می‌دهد [۲۹]. به طور کلی مواد آلی در این مرحله نقش مؤثری به عنوان عامل احیایی، عامل فروشویی و شست و شو و همچنین عامل افزایش تخلخل و نفوذپذیری در ماسه سنگ‌ها ایفا می‌کنند [۳۱]. محلول احیایی شامل کمپلکس بی‌سولفیدی سبب آزادسازی Fe⁺² از آبخوان‌های لایه قرمز و موجب احیای Fe⁺² به صورت پیریت می‌شود (H₂S + Fe⁺² = Fe₂S + 2H⁺).

مرحله دوم) محلول‌های با شوری متوسط تا بالا، غنی از کلرید و اکسایشی: در این مرحله، محلول‌های با شوری متوسط تا بالا، غنی از کلرید و اکسایشی، مس و سایر فلزات غیرآهنی که در مرحله قرمزشدگی متحرک شده‌اند از زمینه آبخوان‌های لایه قرمز و پس از میانزایی اولیه شسته می‌شوند. تخلخل و نفوذپذیری در ماسه‌سنگ و کنگلومراهای خاکستری سبب مهاجرت تدریجی محلول‌های مس‌دار در افق‌های شسته شده می‌شود. خاستگاه این محلول‌ها تبخیری‌هایی هستند که به صورت بین-لایه‌ای همراه با لایه‌های قرمز قرار گرفته‌اند، که در اثر فشار همه جانبه بر لایه‌های قرمز، آب‌زدایی و انحلال کانی‌های تبخیری حاصل می‌شوند. این شوره‌ها در حرکت و مهاجرت مس و دیگر فلزات نقش عمده‌ای داشته‌اند. سیال‌های حمل‌کننده مس غنی از ترکیبات کلریدی با شوری متوسط هستند [۱۵]. کلریدها اغلب در کانسارهای مس چینه‌سان رسوبی از انحلال تبخیری‌ها عرضه می‌شوند [۱۴].

گارسیا آلونز و همکاران [۲] سه عامل اساسی (۱) چگالی بالای سیال‌ها ناشی از انحلال تبخیری‌ها، (۲) جریان دمایی بالا و (۳) حضور گسل‌ها را برای چرخه‌ی شوره‌های کانی‌ساز در نظر گرفته‌اند. در منطقه مورد بررسی، عامل حرکت سیال تراکم و

منبع گوگرد: در کانسارهای لایه‌قرمز، وجود لایه‌های ضخیم تشکیلات تبخیری و گنبد‌های نمکی در زیر لایه‌های قرمز می‌تواند نشان دهد که تبخیری‌ها می‌توانند منبع گوگرد برای کانسار باشند [۲۸]. حضور مواد آلی همزاد قابل توجه و پیریت میانزاد به عنوان یک منبع گوگرد و عامل احیا کننده برای سولفیدهای مس و سولفیدهای غیر مس و کاتالیزور برای انحلال سیمان در نظر گرفته می‌شوند [۲۹] در اواخر میانزایی، سیال‌های حمل‌کننده مس در سنگ‌های رسوبی سبب جایگزینی پیریت توسط سولفیدهای مس می‌شود بنابراین پیریت‌های اولیه جان‌نشین شده توسط کانی‌های سولفیدی می‌تواند نشان‌دهنده پیریت میانزادی به عنوان منبع احتمالی گوگرد باشد. به طور کلی، سه منبع احتمالی برای گوگرد شامل: (۱) توالی‌های تبخیری و حضور گسترده کانی‌های سولفات (سنگ گچ و سلسیت)، (۲) مواد آلی و (۳) پیریت‌های میانزادی هستند.

محلول‌های کانی‌ساز

یک مدل زایشی دومرحله‌ای به صورت زیر برای شکل‌گیری محلول‌های کانی‌سازی ارائه می‌شود:

مرحله اول) محلول با شوری پایین شامل کمپلکس H₂S: در این مرحله، محلول با شوری پایین و شامل کمپلکس H₂S از مواد آلی در مرحله میانزایی اولیه آزاد شده است. این محلول سبب شست و شو و عامل تشکیل پیریت طی میانزایی اولیه می‌شود و افزون بر آن، تخلخل و نفوذپذیری در لایه‌های خاکستری احیایی را افزایش می‌دهد. خاستگاه این محلول آب میان‌سازندی در بخشی از توالی‌های لایه قرمز است که در اثر مواد آلی احیا شود. در واقع، باکتری‌های بی‌هوازی با گرفتن انرژی خود از مواد آلی، سولفات موجود در آب میان‌سازندی را

طی میانزایی اولیه) و نفوذ بعدی سیال‌های احيایی (مسئول دگرسانی در سنگ‌های رسوبی) هستند [۳۰]. عملکرد محلول‌های کانی‌ساز و تکامل آنها طی تغذیه، شست و شو، حمل و نقل و رسوب مس توسط Eh-Ph کنترل شده است. در کانسار مس بندقیچی، وجود مواد آلی و هم‌چنین حضور سولفیدهای میانزادی از جمله پیریت نقش مهمی را در احيای محیط جهت ته‌نشست سولفیدها ایفا نموده‌اند.

مقایسه کانسار مس بند قیچی با دیگر کانسارهای مس با میزبان رسوبی

کانسار مس بندقیچی [۳۲]، با کانسارهای مس رسوبی لایه قرمز از جمله کانسار مس مارکشه در شمال غرب راور [۳۳]، کمر بند مس راور نزدیک شهر راور شمال کرمان [۱۵]، کمر بند مس زامبیا در جنوب آفریقا [۳۴] و کانسار ناسیمینتو در نیومکزیکو [۳۵] در جدول ۶ مقایسه شده است با توجه به بررسی‌های انجام شده، کانسارهایی که کانی‌های سولفیدی مس در آنها غالب است به نوع لایه قرمز وابسته‌اند و در دماهای پایین تشکیل شده‌اند [۱۴].

فشرده‌گی رسوبات، دما که سبب ایجاد چرخه گرمایی شده است، اختلاف پتانسیل سیال در بخش‌های مختلف و نفوذپذیری و تخلخل بالای ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومراهاست. در واقع، افزایش تخلخل در ماسه‌سنگ‌ها انحلال سیمان اولیه و کانی‌هایی که در میانزایی اولیه تشکیل شده‌اند را افزایش می‌دهد و باعث تخریب هماتیت می‌شود و رنگ ماسه سنگ و کنگلومراها از قرمز به خاکستری مایل به زرد تغییر می‌کند.

ته‌نشست مس و فلزات: به بیان رجب‌پور و همکاران [۴]، کنترل کننده اصلی کانی‌سازی شامل نفوذپذیری و مقدار مواد آلی، مقدار و درجه فلدسپاتهاست. رسوب فلزات بیشتر توسط واکنش‌های اکسایش-احیا کنترل می‌شود که به وسیله حضور مواد آلی و احيای سولفات‌ها به سولفیدها منجر به رسوب سولفیدهای مس می‌شوند. مکان کانی‌سازی مس توسط تأثیرهای متقابل نفوذپذیری رسوبات، راستای جریان سیال‌های نسبت اجزای احيایی از جمله مواد آلی و سولفیدها در سنگ میزبان کنترل می‌شود [۱۵]. به طور کلی می‌توان گفت که افق خاکستری نماینده تغییرات ناگهانی در شرایط Eh و PH بین محلول‌های اکسید کننده اولیه (مسئول تشکیل لایه‌های قرمز

جدول ۶ مقایسه کانسار مس بندقیچی با دیگر کانسارهای مس با میزبان رسوبی

کانسار	بند قیچی	مارکشه	کمر بند مس راور	کمر بند مس زامبیا	ناسیمینتو
موقعیت	جنوب شاهرود (ایران)	شمال غرب راور (ایران)	شمال کرمان (ایران)	جنوب آفریقا	نیومکزیکو-آمریکا
سن	الیگوسن	ژوراسیک	ژوراسیک پسین - کرتاسه پیشین	پروتروزئیک پسین	تریاس
عناصر معدنی	Cu	Cu(Ag)	Cu-Ag-U	Cu- Co-Ag-Au	Cu-Ag
زمین مری	رگه‌ای و لایه‌ای	عدسی، همروند یا لایه‌بندی	لایه‌بندی، موجنا	لایه‌بندی	عدسی، همروند یا لایه‌بندی
سنگ میزبان	ماسه سنگ و ریزکنگلومرا	ماسه سنگ و ریزکنگلومرا	ماسه سنگ، کنگلومرا، لای سنگ	ماسه سنگ، آرکوز، شیل و دولومیت	ماسه سنگ و کنگلومرا
کانی های اصلی	کالکوسیت، کولیت، بورنیت، مس طبیعی، مالاکیت و آزوریت	کالکوسیت، بورنیت، کولیت، کالکوپیریت، کالاکیت، کریزوکولا، آزوریت، تنوریت و نقره	کالکوسیت، بورنیت، پیریت، مارکازیت، کولیت، مالاکیت، آرزئیت و کوپریت	کالکوسیت، کالکوپیریت، بورنیت، پیریت، کارولیت، لینائیت، کوپریت، کانیه‌های ژرمانیم، مالاکیت و آزوریت	کالکوسیت، بورنیت، کولیت، کالکوپیریت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا و نقره
عامل احيای	وجود مواد آلی و پیریت میانزادی	فسیل گیاهی و پیریت میانزادی	فسیل‌های گیاهی، پیریت میانزادی	هیدروکربن‌ها و بیتومن	فسیل گیاهی و پیریت میانزادی
عوامل کانه‌زایی	وجود عامل احيای و نفوذپذیری سنگ میزبان	وجود عامل احيای و نفوذپذیری سنگ میزبان	وجود عامل احيای و نفوذپذیری سنگ میزبان	نفوذپذیری سنگ میزبان	وجود عامل و نفوذپذیری سنگ میزبان
محیط ته نشست	کم عمق	کم عمق	رودخانه ای و دلتا	کم عمق	کم عمق
تیپ کانه زایی	لایه قرمز	لایه قرمز	لایه قرمز	لایه قرمز	لایه قرمز
مرجع	[۳۲]	[۳۳]	[۱۵]	[۳۴]	[۳۵]

برداشت

کانی‌سازی مس در منطقه معدنی بندقیچی، به شکل کالکوپیریت، کالکوسیت، کوولیت و بورنیت و در رخنمون‌های سطحی به صورت آغشتگی‌های مالاکیت و آزوریت همراه با واحدهای سنگی از جمله ماسه‌سنگ، کنگلومرا و لای سنگ با سن الیگوسن رخ داده است. کانی‌سازی اصلی در پهنه احیایی و در بخشی از سازندهای قرمز رنگ تشکیل می‌شوند. مکان کانی‌سازی مس توسط تأثیرهای متقابل نفوذپذیری رسوبات، راستای جریان سیال‌ها، نسبت اجزای احیایی از جمله مواد آلی و سولفیدها در سنگ میزبان کنترل می‌شود. سه منبع احتمالی برای گوگرد شامل: (۱) توالی‌های تبخیری و حضور گسترده کانی‌های سولفات (سنگ گچ و سلسیت)، (۲) مواد آلی و (۳) پیریت‌های میانزادی است. در منطقه بندقیچی، قطعات آواری (آذرین، دگرگونی و رسوبی) در ترکیب سنگ‌های رسوبی تخریبی مانند کنگلومرا و ماسه‌سنگ قرار گرفته‌اند و می‌توانند به عنوان خاستگاه تأمین‌کننده فلزات کانه‌زایی در نظر گرفته شوند. با توجه به ویژگی‌های اساسی کانسار مس بندقیچی از جمله سنگ میزبان، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، زمین‌سنجی، عناصر همراه، محیط‌تشنست و عوامل موثر در کانه‌زایی می‌توان این کانسار را یک کانسار مس با میزبان رسوبی و از نوع لایه قرمز در نظر گرفت.

مراجع

- [5] Sadati S.N., Yazdi M., Mao J., Behzadi M., Adabi M.H., Lingang X., Zhenyu C., Mokhtari M.A.A., "Sulfide mineral chemistry investigation of sediment-hosted stratiform copper deposits, Nahand-Ivand area, NW Iran", *Ore Geology Reviews*, 72 (2016) 760-776.
- [6] Hitzman M.W., Selley D., Bull S., "Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through Earth history", *Economic Geology*, 105.3 (2010) 627-639.
- [7] Bikdeli Z., Ebrahimi M., Nabatian Gh., Mokhtari M. A. A., "Mineralogy, mineralogy, construction and texture of Chahar Abad sedimentary deposit, northwest of Zanjan", *Journal of Geosciences*, 96 (2010) 249-26.
- [8] Aghazade M., Badrzade Z., "Sediment Hosted Cu Mineralization Periods in Iran, Twenty-ninth Meeting of Geological Sciences", *Geological Survey of Iran*, (2010).
- [9] Hendi R., Hassani Pak A. A., "Identification of host rock source at sediment-hosted copper type mineralization in Tabas-Ravar basin based on geochemical and petrography studies", *Geological Survey of Iran*, (2014) 211-220.
- [10] Hushmandzadeh A., Alavi Naini M., Haghypour A., "The transformation of geological phenomena Torud area (from the Precambrian to Recent)", *the Geological and Mineral Research*, (1978) 138.
- [11] Alavi M., Haghypour A., "Geological Map of Torud, scale 1:250,000", *Geological of Iran*, (1976).
- [12] Durieux C.G., Brown A.C., "Geological context, mineralization, and timing of the Juramento sediment-hosted stratiform copper-silver deposit, Salta district, northwestern Argentina", *Mineralium Deposita*, 42.8 (2007) 879-899.
- [13] Reich M., Deditius A., Chryssoulis S., Li J.W., Ma C.Q., Parada M.A., Barra F., Mittermayr F., "Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 104 (2013) 42-62
- [14] Brown A.C., "Low-temperature sediment-hosted copper deposits", (2014) 251-271.
- [15] Azaraien H., Shahabpour J., Aminzadeh B., "Metallogenesis of the sediment-hosted stratiform Cu deposits of the Ravar Copper Belt (RCB), Central Iran", *Ore Geology Reviews*, 81 (2017) 369-395.
- [1] Kirkham R. V., "Distribution, settings, and genesis of sediment-hosted stratiform copper deposits", *Geological Association of Canada Special*, 36 (1989) 3-38.
- [2] García-Alonso D., Canet C., González-Partida E., Villanueva-Estrada R.E., Prol-Ledesma R.M., Alfonso P., Caballero-Martínez J.A., Lozano-Santa Cruz R., "The Cretaceous sediment-hosted copper deposits of San Marcos (Coahuila, Northeastern Mexico): An approach to ore-forming processes", *Journal of South American Earth Sciences*, 31.4 (2011) 432-443
- [3] Cabral A.R., Beaudoin G., Taylor B.E., "The Transfiguration continental red-bed Cu-Pb-Zn-Ag deposit, Quebec Appalachians, Canada", *Mineralium Deposita*, 44.3 (2009) 285
- [4] Rajabpour S., Abedini A., Alipour S., Lehmann B., Jiang S. Y., "Geology and geochemistry of the sediment-hosted Cheshmeh-Konan redbed-type copper deposit, NW Iran", *Ore Geology Reviews*, 86 (2017) 154-171.

- [27] El Desouky H.A., Muchez P., Tyler R., "The sandstone-hosted stratiform copper mineralization at Mwitapile and its relation to the mineralization at Lufukwe, Lufilian foreland, Democratic Republic of Congo", *Ore Geology Reviews*, 34.4 (2008) 561-579.
- [28] Hitzman M., Kirkham R., Broughton D., Thorson J., Selley D., "The sediment-hosted stratiform copper ore system", *Economic Geology*, 100 (2005).
- [29] Greenwood P.F., Brocks J.J., Grice K., Schwark L., Jaraula C.M.B., Dick J.M., Evans K.A., "Organic geochemistry and mineralogy. I. Characterisation of organic matter associated with metal deposits", *Ore Geology Reviews*, 50 (2013) 1-27.
- [30] Pons M.J., Franchini M., Giusiano A., Patrier P., Beaufort D., Impiccini A., Rainoldi A.L., Meinert L., "Alteration halos in the Tordillos sediment-hosted copper deposit of the Neuquén Basin, Argentina", *Ore Geology Reviews*, 80 (2017) 691-715.
- [31] Thorson J.P., "Paradox Basin sandstone-hosted copper deposits generated by two episodes of basinal fluid expulsion", *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 36 (2004) 5-517.
- [32] Salehinasab M., "Mineralogy, geochemistry and genesis of The Band-e-Ghichy Copper-Celestite deposit Torud area, South of Shahrood", Master thesis, Faculty of Geosciences, Shahrood University (2015).
- [33] Mahdavi A., Rastad A., Hosseini Barzi M., "Mineralogy and construction and texture of Of ore horizons of Sedimentary Copper Deposit (Redbed Type) in the Northwest of Ravar", *Twenty-sixth Earth Science Foru*, (2007).
- [34] Muchez P.H., Mayer A.S., El Desouky H.A., Reisberg L., "Diagenetic origin of the stratiform Cu-Co deposit at Kamoto in the Central African Copperbelt". *Mineralium Deposita*, 50 (2015) 437-447.
- [35] Woodward L. A., Kaufman W. H., Schumacher O. L., Talbott L. W., "strata-bound copper deposits in Triassic sandstone of Sierra Nacimiento, Mew Mexico", *Economic Geology*, 69 (1974) 108-120.
- [16] Siivola J., Schmid R., "Recommendations by the IUGS Subcommittee on the systematics of metamorphic rocks: list of mineral abbreviations", Web version, (2007), 1,07.
- [17] Fay I., Barton M.D., "Alteration and ore distribution in the Proterozoic Mines Series, Tenke-Fungurume Cu-Co district, Democratic Republic of Congo", *Mineralium Deposita*, 47.5 (2012) 501-519.
- [18] Zhang Z., Shen N., Peng J., Yang X., Feng G., Yu F., Zhou L., Li Y., Wu C., "Syndeposition and epigenetic modification of the strata-bound Pb-Zn-Cu deposits associated with carbonate rocks in western Kunlun, Xinjiang, China", *Ore Geology Reviews*, 62 (2014) 227-244.
- [19] Cox D.P., Lindsey D.A., Singer D.A., Diggles M.F., "Sediment-hosted copper deposits of the world: Deposit models and database", *BiblioGov*, (2013).
- [20] Brown A.C., "Refinements for footwall red-bed diagenesis in the sediment-hosted stratiform copper deposits model", *Economic Geology*, 100.4 (2005) 765-771.
- [21] Bhatia M.R., Crook K.A., "Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins", *Contributions to mineralogy and petrology*, 92.2 (1986) 181-193.
- [22] Gu X.X., Liu J.M., Zheng M.H., Tang J.X., Qi L., "Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: geochemical evidence", *Journal of sedimentary Research*, 72.3 (2002) 393-407.
- [23] Pettijohn F.J., Potter P. E., Silver R., "Sand and sandstone. Springer", New York, (1972) 618.
- [24] Herron M.M., "Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data", *Sedimentary Petrology*, 58 (1988)820-829.
- [25] Walker T. R., "Application of diagenetic alterations in redbeds to the origin of copper in stratiform copper deposits", *Geological Association of Canada*, 36 (1989) 85-96.
- [26] Metcalfe R., Rochelle C.A., Savage D., Higgs J.W., "Fluid-rock interactions during continental red bed diagenesis: implications for theoretical models of mineralization in sedimentary basins", *Geological Society, London, Special Publications*, 78.1 (1994) 301-324.