

الگوی رخداد کانه‌زایی مس طبیعی در سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانسار سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد مس- نقره گرماب پایین، جنوب شرق شاهرود

مجید طاشی^۱، فردین موسیوند^{۲*} و حبیب‌الله قاسمی^۳

۱. کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. استادیار زمین‌شناسی اقتصادی، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شاهرود

۳. استاد پترولوژی، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۲۸

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۱/۳۰

چکیده

کانسار سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد مس-نقره گرماب پایین در ۲۹۰ کیلومتری جنوب شرق شاهرود واقع شده و در توالی آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پسین، در زیر پهنه سبزوار، شمال شرق ایران رخ داده است. کانه‌زایی مس طبیعی در واحدهای سنگی آندزی بازالت با بافت بادامکی، تراکی آندزیت و برش‌های آتشفشانی میزبان کانسار گرماب پایین با سن کرتاسه پسین و کنگلومراهای پالئوسن به صورت رگه-رگچه‌ای و دانه پراکنده دیده می‌شود. مطالعات ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که این سنگ‌های آتشفشانی دارای ترکیب بازالتی و ماهیت کالک‌آلکان بوده و در محیط پشت‌کمانی نهشته شده‌اند. دگرسانی عمده همراه کانه‌زایی از نوع کلریتی و به مقدار کمتر ژئولیتی است. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهند فرآیند دیاژنز، تدفین و بالآمدگی در توالی آتشفشانی-رسوبی میزبان کانه‌زایی سبب ایجاد و حرکت سیال‌های نسبتاً داغ شور شده که این سیال‌ها مس را از سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه پسین شسته و تحت شرایط احیایی به صورت مس طبیعی در واحدهای آندزی بازالتی و برش آتشفشانی و کنگلومراهای پالئوسن ته‌نشست داده است. با توجه به نوع سنگ‌های میزبان، کانی‌شناسی و دگرسانی، کانه‌زایی مس طبیعی در کانسار گرماب پایین بیشترین شباهت را با کانه‌زایی مس طبیعی مرتبط با سنگ‌های بازالتی (تیپ میشیگان) نشان می‌دهد. این رخداد بعد از تشکیل کانسار سولفید توده‌ای گرماب پایین و در طی دیاژنز، دگرگونی دفنی و بالآمدگی توالی سنگی دربرگیرنده، رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: گرماب پایین، سولفید توده‌ای، تیپ میشیگان، مس طبیعی، کانه‌زایی.

مقدمه

غیرمعمول است (Wang et al., 2006). این ذخایر تنها در برخی نقاط دنیا مانند ایران، بولیوی، چین، شیلی و دریاچه سوپریور در ایالات متحده آمریکا مشاهده شده‌اند (Guilbert and Park, 1986). ذخایر مس طبیعی شامل

ذخایر مس طبیعی بسیار کم و به ندرت تشکیل می‌شوند، زیرا وجود محلول‌های گرمابی فقیر از گوگرد

* نویسنده مرتبط: mousivand@shahroodut.ac.ir

کانسار و تعیین تیپ کانه‌زایی مس طبیعی در کانسار گرماب پایین براساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی می‌باشد.

روش مطالعه

مطالعات دقیق صورت گرفته بر روی پنج مغزه حفاری (در مجموع ۳۲۰ متر مغزه حفاری) در کانسار گرماب پایین نشان می‌دهد که در عمق‌های مشخصی کانه‌زایی مس طبیعی رخ داده است. در ادامه جهت پی بردن به چگونگی رخداد این کانه‌زایی، تعداد ۸۰ نمونه به صورت منظم از این مغزه‌ها برداشت شد، که از این تعداد، ۱۲ مقطع نازک-صیقلی و چهار مقطع صیقلی برای مطالعه تهیه شد. جهت مطالعات ژئوشیمیایی نیز اقدام به تجزیه دو نمونه به روش پراش اشعه ایکس^۵ (جدول ۱)، تجزیه چهار نمونه به روش فلورسانس اشعه ایکس^۶ (جدول ۲) و تجزیه چهار نمونه به روش طیف‌سنج نوری جفت پلاسمای القاشده^۷ (جدول ۳) با حمایت سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) در آزمایشگاه‌های مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران شد. همچنین در این مقاله از داده‌های ژئوشیمیایی شرکت زمین‌شناسی محکم‌کار، به تعداد شش نمونه به روش طیف‌سنج جرمی جفت پلاسمای القاشده^۸ (جدول ۴) در آزمایشگاه Acme کانادا انجام شده نیز استفاده گردیده است.

زمین‌شناسی

پهنه ساختاری سبزوار شامل گستره‌های محدود بین گسل میامی و درونه است که در یک روند تقریبی خاوری-باختری از سبزوار تا مرز افغانستان به صورت بلوک دوزنقه‌ای شکل ادامه دارد (شکل ۱). در این زیر پهنه سنگ‌های پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک برونزد دارند. برونزدهای سنگی عمده این زیر پهنه را می‌توان در سه گروه بزرگ دسته‌بندی کرد.

ذخایر، مس طبیعی موجود در گدازه‌های بازالتی شبه جزیره کویناوا (میشیگان)، ذخایر مس در توالی سرخ آتشفشانی^۲، ذخایر تیپ مانتو^۳، کانه‌زایی مس طبیعی در سنگ‌های رسوبی آواری، کانه‌زایی مس طبیعی ناشی از اکسیداسیون و مس طبیعی در باتلاق‌ها و مرداب‌های عهد حاضر می‌باشد (Cornwall, 1956; Kirkham, 1996). بیشتر کانه‌زایی مس طبیعی معمولاً در سنگ‌های مافیک قرار دارد، بهترین مثال این نوع کانه‌زایی در نواحی دریاچه سوپریور و شبه جزیره کویناوا در آمریکا می‌باشد (Kirkham, 1996). از این نوع کانه‌زایی در ایران می‌توان به کانسار عباس‌آباد شمال غرب قزوین و کانسار دارهند در ۴/۵ کیلومتری نطنز اشاره نمود (مرادی و همکاران، ۱۳۹۰; Nezafati et al., 2006). پژوهش‌های انجام شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و محققان دانشگاهی در زیر پهنه سبزوار منجر به شناسایی رخداد‌های مختلف کانه‌زایی‌های مس و منگنز در واحدهای آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پسین در این زیر پهنه ساختاری شده است (شکل ۱). از جمله این کانه‌زایی‌های مس و منگنز می‌توان به کانسارهای مس نوده (مغفوری و همکاران، ۱۳۹۰)، مس-نقره گرماب پایین (طاشی و همکاران، ۱۳۹۲)، منگنز چشمه فریزی، بنسبرد (مسعودی، ۱۳۸۸)، منگنز چشمه سفید و ذاکری (تقی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱) و منگنز نوده (نصراللهی و همکاران، ۱۳۹۱) اشاره کرد.

بررسی‌ها و مطالعات صورت گرفته در کانسار سولفیدتوده‌ای آتشفشان‌زاد^۴ مس-نقره گرماب پایین (طاشی و همکاران، ۱۳۹۲; Tashi et al., 2014) نشان‌دهنده کانه‌زایی مس به صورت سولفیدی و اکسیدی و کانه‌زایی مس طبیعی به شکل رگه-رگچه‌ای و دانه پراکنده در سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانه‌زایی سولفید توده‌ای می‌باشد. از نظر موقعیت جغرافیایی کانسار گرماب‌پایین در ۲۹۰ کیلومتری جنوب شرق شاهرود، در مجاورت روستای گرماب پایین، در پهنه ایران مرکزی و زیر پهنه سبزوار واقع شده است (شکل ۱). هدف از این پژوهش، بررسی سنگ‌شناختی، دگرسانی، ساخت و بافت کانه‌زایی، ژئوشیمی، محیط زمین ساختی

1. Keweenaw Peninsula

2. Volcanic red bed

3. Manto type

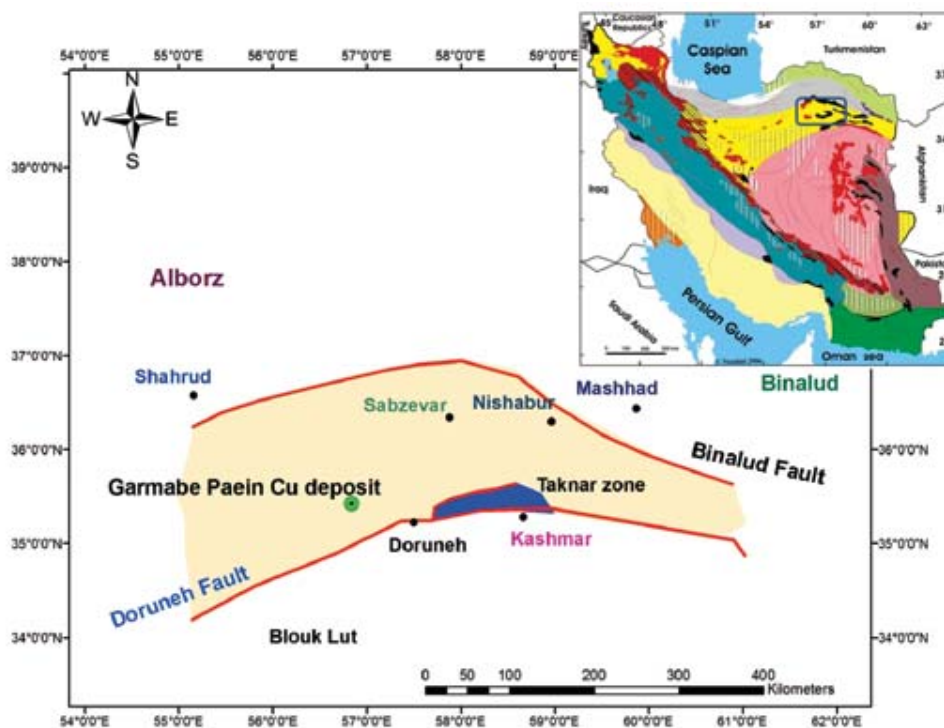
4. Volcanic massive sulfide

5. X-Ray diffraction

6. X-ray fluorescence

7. Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy

8. Inductively coupled plasma mass spectrometry



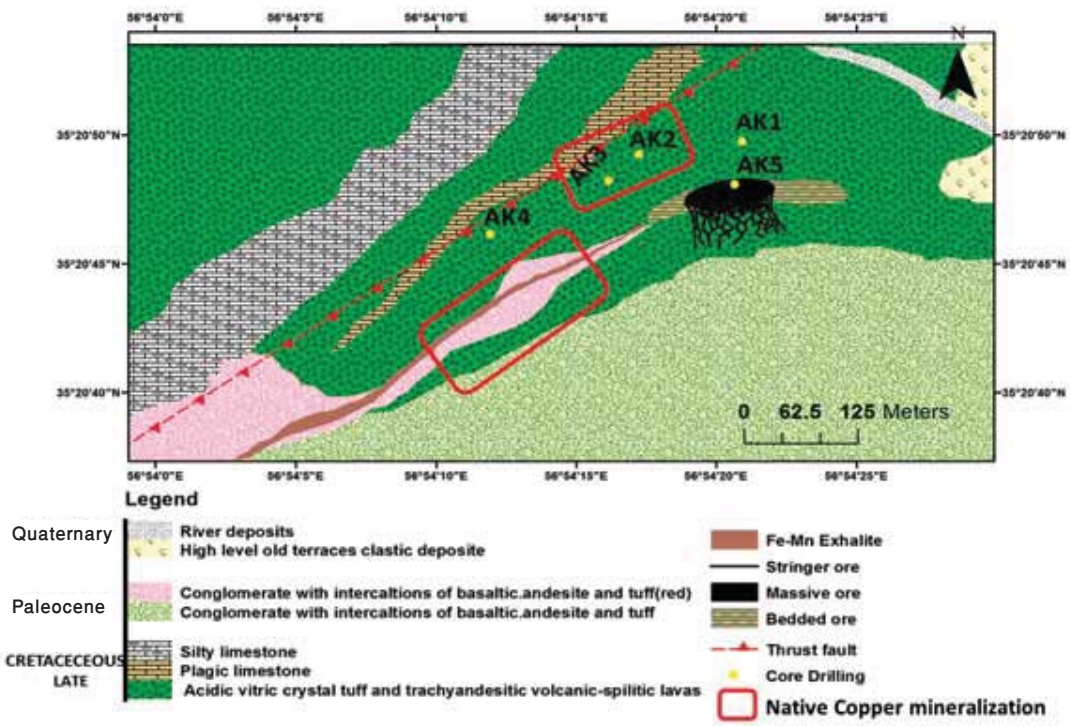
شکل ۱. موقعیت کانسار گرماب پایین در پهنه ساختاری سبزوآر در ایران مرکزی (با تغییرات از Lindenberg et al., 1983)

آهک‌های گلوبوترونکانادار و پلاژیک تقسیم کرد. گروه سوم نیز مربوط به توالی‌های رسوبی فلیش گونه هستند که تغییرات سنی آن‌ها از ائوسن تا زمان نئوژن است. بر اساس مطالعات صحرایی و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مری- اسبکشان (کهنسال، ۱۳۸۶)، عمده‌ترین واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه مورد مطالعه از قدیم به جدید شامل آهک توده‌ای اربیتولین‌دار کرتاسه زیرین، سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی- داسیتی به صورت گدازه و آذرآواری به همراه آهک کرم‌رنگ گلوبوترونکانادار به سن کرتاسه پسین، کنگلومرای چندزادی متشکل از قطعات آهکی و آتشفشانی (معادل کنگلومرای پالئوسن کرمان) و سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری به همراه ماسه‌سنگ، کنگلومرا و آهک نومولیت‌دار ائوسن میانی- بالایی است. مجموعه توالی آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پسین در کانسار سولفید توده‌ای گرماب پایین بیشتر شامل توف اسیدی سبز رنگ، گدازه تراکی آندزیتی، آهک گلوبوترونکانادار، آهک پلاژیک و رادیولاریت می‌باشد (شکل ۲).

گروه اول مربوط به مجموعه‌های افیولیتی سبزوآر و تربت‌حیدریه هستند که خاستگاه اقیانوسی دارند و اطراف ایران مرکزی را احاطه می‌کنند. بیشتر این سنگ‌ها اولترامافیک- مافیک (مثل دونیت، پریدوتیت و گابرو) هستند. سنگ‌های رسوبی همراه آن‌ها نیز نشانگر زمان کرتاسه پسین و محیط‌های نسبتاً ژرف‌اقیانوسی است، که در یک محیط کششی از نوع حوضه‌های پشت کمانی^۱ در طی عبور از زمان کرتاسه میانی به کرتاسه بالایی تشکیل شده‌اند. این کشش در اثر فرورانش ورقه اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی اتفاق افتاده است. این سنگ‌های افیولیتی میزبان ذخایر گوناگونی از نوع کرومیت، منیزیت، منگنز و مس می‌باشند (Agard et al., 2007; Rossetti et al., 2010; Gerdes and Zeh, 2009).

گروه دوم مربوط به سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی کرتاسه پسین می‌باشد که غیر افیولیتی است و ارتباط ژنتیکی با سنگ‌های افیولیتی ندارد (وطن‌پور و همکاران، ۱۳۸۸). توالی سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پسین را بر اساس نوع کانه‌زایی منگنز و مس می‌توان به دو بخش توفی و سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی و داسیتی به همراه

1. Back-arc



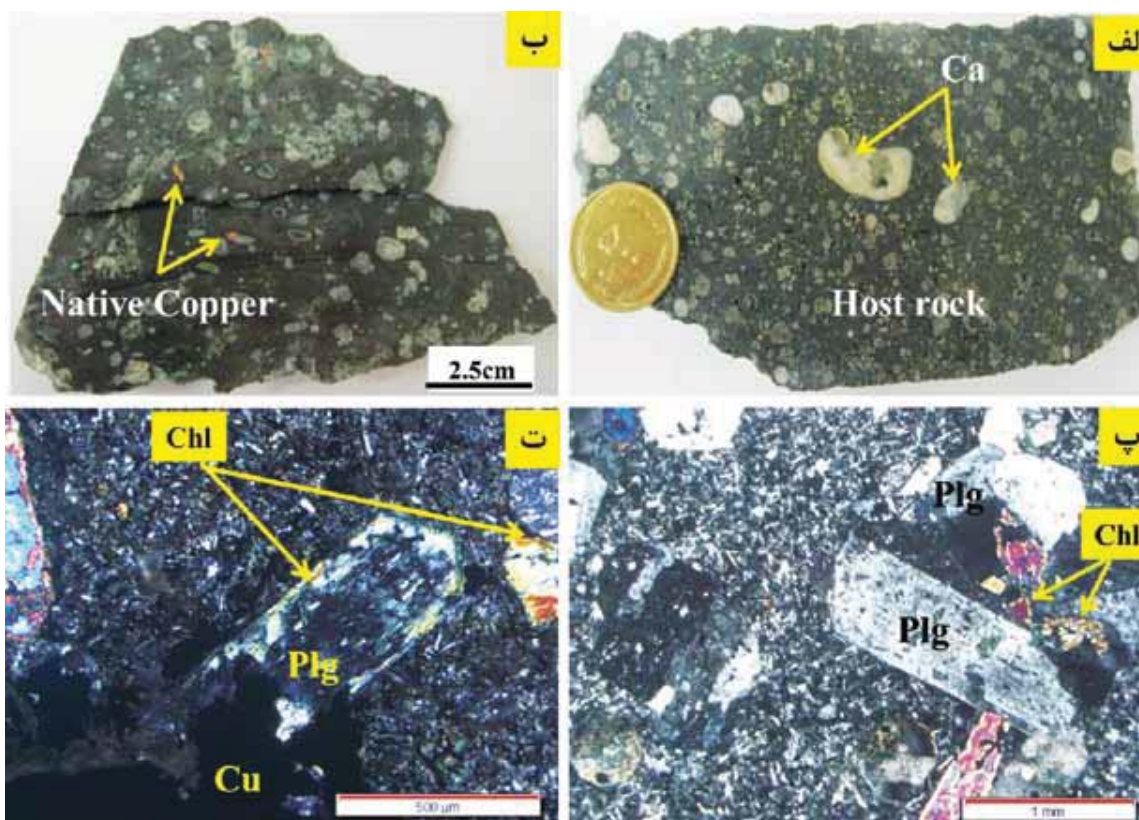
شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی بزرگ مقیاس کانسار مس- نقره گرماب پایین به همراه موقعیت چاه‌های حفاری

کانه‌زایی

کانه‌زایی‌های مس طبیعی، در کانسار گرماب پایین به شکل چین‌کران در دو واحد سنگ‌شناختی مختلف شامل واحد آتشفشانی آندزی بازالت، تراکی آندزیت و برش آتشفشانی کرتاسه پسین و واحد کنگلومرای پالئوسن رخ داده است. مطالعات کانی‌شناسی بر روی مقاطع نازک- صیقلی نمونه‌های معدنی مس گرماب پایین منجر به شناسایی کانی‌های مختلفی شده است که به صورت اولیه (هیپوژن) و یا به صورت ثانویه (سوپرژن)، در اثر فرایند هوازدگی تشکیل شده‌اند. این کانی‌ها عبارت از مس طبیعی، مگنتیت، هماتیت، کوپریت و مالاکیت می‌باشند. کانی‌های باطله در کانسار گرماب پایین عمدتاً شامل کلریت، کانی‌های رسی، کوارتز، ژپس، آلبیت، زئولیت و بیوتیت هستند. لازم به ذکر است، رخداد مس طبیعی جزء مهم‌ترین کانه‌زایی‌ها در کانسار گرماب پایین می‌باشد.

مطالعات نمونه دست‌ساز سنگ‌های حاوی کانه‌زایی مس طبیعی نشان می‌دهد، این سنگ‌های میزبان (تراکی آندزیت و آندزی بازالت) دارای بافت بادامکی^۱ هستند (شکل ۳-الف و ب) و این حفره‌ها و فضاهای خالی توسط کانی‌های مراحل تاخیری فاز ماگمایی و یا کانی‌های بعد فاز ماگمایی نظیر کلریت، کوارتز، کلسیت، زئولیت و مس طبیعی در سطح سنگ پر شده است (شکل ۳). بررسی‌های میکروسکوپی بر روی مقاطع نازک از این نمونه‌ها نشان می‌دهد که بافت غالب سنگ پورفیری و دارای فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن از نوع اوزریت و کانی‌های اپک است که در زمینه میکروکریستالین تا شیشه‌ای قرار گرفته است. فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، تحت تأثیر دگرسانی به کانی‌های کلریت، کانی‌های رسی، اپیدوت و کلسیت تبدیل شده‌اند (شکل ۳-پ و ت) که این، نشانگر دگرسانی نوع پروپلیتی است. زمینه دگرسان شده و شیشه‌زدایی شده سنگ از کوارتز، فلدسپار، بلورهای ریز پلاژیوکلاز با ترکیب سدیک، کلریت و بلورهای ریز اسفن تشکیل شده است.

1. Amygdaloidal texture



شکل ۳. الف) نمونه دستی از تراکی آندزیت با بافت بادامکی، ب) نمونه دستی تراکی آندزیت‌های میزبان کانی‌زایی مس طبیعی همراه با بافت بادامکی که به شدت کلریتی شده است. پ و ت) تصاویر میکروسکوپی از تراکی آندزیت میزبان کانه‌زایی مس، فنوکریست‌های پلاژیوکلاز که از اطراف کلریتی شده و در زمینه میکروولیتی قرار گرفته‌اند (نور عبوری XPL)

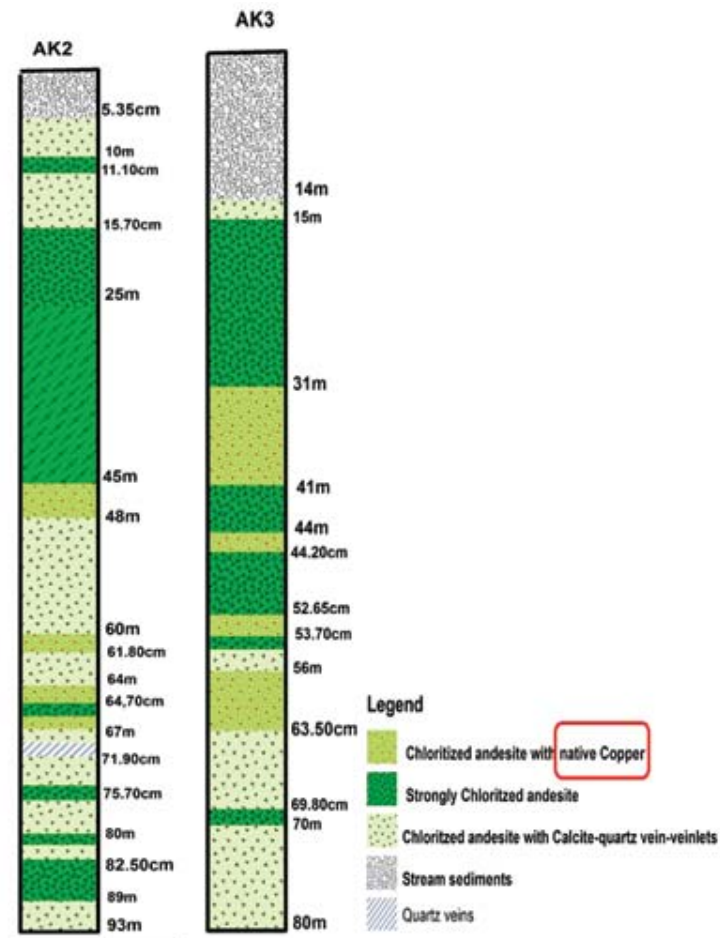
الف- کانه‌زایی در واحد آتشفشانی کرتاسه پسین

کانه‌زایی در این واحد آتشفشانی هم در برش‌های آتشفشانی و هم در سنگ‌های آتشفشانی تراکی آندزیت با سن کرتاسه پسین رخ داده است. کانه‌زایی در برش‌های آتشفشانی بیشتر شامل کوپریت و مالاکیت است، اما کانه‌زایی در واحد تراکی آندزیتی و آندزی بازالت تنها از نوع مس طبیعی می‌باشد.

مطالعات صورت گرفته بر روی مغزه‌های حفاری AK2 و AK3 در کانسار گرماب پایین به عمق‌های ۸۰ و ۹۳ متر که به طور عمود در داخل واحد آتشفشانی آندزیتی حفر شده است (شکل‌های ۲ و ۴)، نشان می‌دهند که بیشتر کانه‌زایی مس طبیعی در این دو مغزه حفاری به ترتیب در عمق‌های ۴۵ الی ۶۷ متری در مغزه حفاری AK2 و عمق‌های ۳۱ الی ۶۴ متری در مغزه حفاری AK3 دیده می‌شود (شکل ۴). کانه‌زایی مس طبیعی در واحد آتشفشانی دارای دو

نوع بافت است. بافت اول به صورت رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی می‌باشد (شکل ۵- الف و ب)، این نوع بافت گسترش فراوانی دارد و بخش عمده کانه‌زایی را شامل می‌شود. ضخامت این رگه-رگچه‌های مس از چند میلی‌متر تا سه سانتی‌متر است. بافت دوم که کم اهمیت‌تر می‌باشد مربوط به کانه‌زایی به صورت دانه پراکنده در متن سنگ‌های آتشفشانی آندزی بازالت و تراکی آندزیتی می‌باشد (شکل ۵- پ، ت و ث)، به نظر می‌رسد این نوع بافت در ارتباط با شکستگی‌های بسیار ریز است که موجب انتقال سیال مس‌دار و تمرکز آن در فضاهای خالی به صورت دانه پراکنده شده است.

لازم به ذکر است کانه‌زایی مس طبیعی در کانسار گرماب پایین از رخداد کانه‌زایی سولفید توده‌ای مجزا می‌باشد و از محل عدسی سولفید توده‌ای حدود ۹۳ متر فاصله دارد و در قسمت‌های کمر بالای کانسار قرار گرفته است (شکل ۲).



شکل ۴. نمایی از مغزه‌های حفاری AK2 و AK3 که بیشترین کانه‌زایی مس طبیعی در این دو مغزه و به ترتیب در عمق‌های ۴۵ تا ۶۷ متری در مغزه AK2 و عمق‌های ۳۱ تا ۶۴ متری در مغزه AK3 دیده می‌شود (محل نقاط حفاری در نقشه زمین‌شناسی شکل ۳ نشان داده شده است)

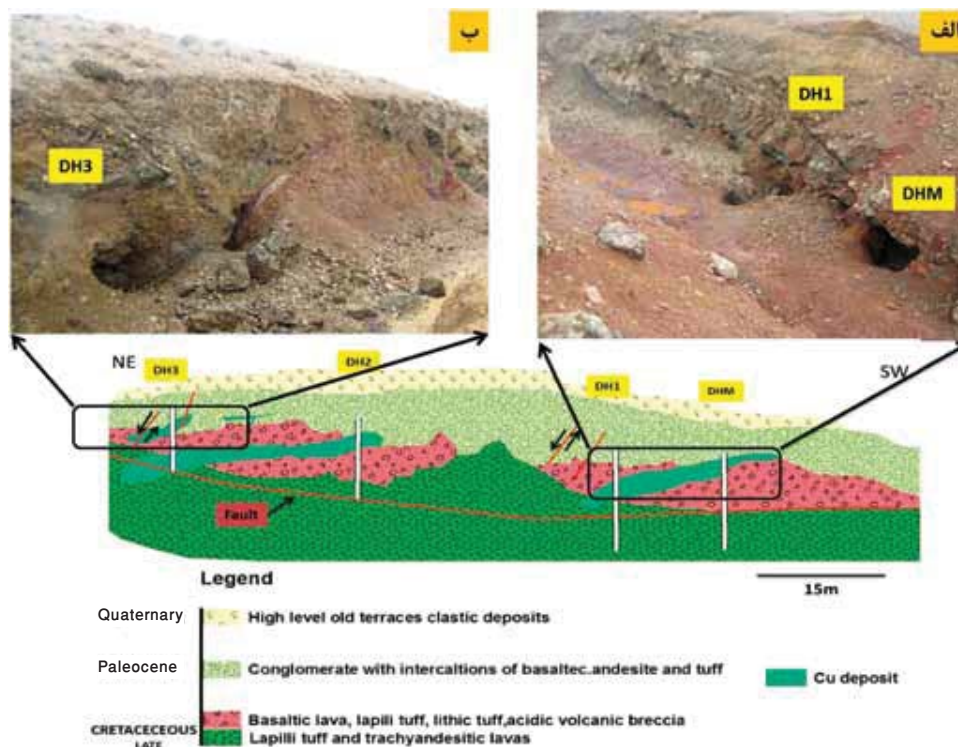


شکل ۵. کانه‌زایی مس طبیعی در سنگ میزبان آندزی بازالت دگرسان شده کانسار گرماب پایین. الف و ب) نمونه دستی از بافت رگه-رگچه‌ای مس طبیعی، پ و ت) نمونه دستی از بافت دانه پراکنده کانه‌زایی مس طبیعی، ث) تصویر میکروسکوپی از مس طبیعی (نور انعکاسی PPL). کلریت (Chl) و پلاژیوکلاز (Plg)

ب- کانه‌زایی در واحدهای کنگلومرای پالتوسن

افق معدنی و در جهت شیب کانی‌سازی می‌باشند. قطعات تشکیل‌دهنده این واحد سنگی شامل سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی کرتاسه، با اندازه ۲۰-۲ سانتی‌متر است که در زمینه ماسه‌ای و سیمان آهکی جای گرفته‌اند. گردشگری آن‌ها متوسط تا خوب و جور شدگی متوسط تا ضعیف است (شکل ۷).

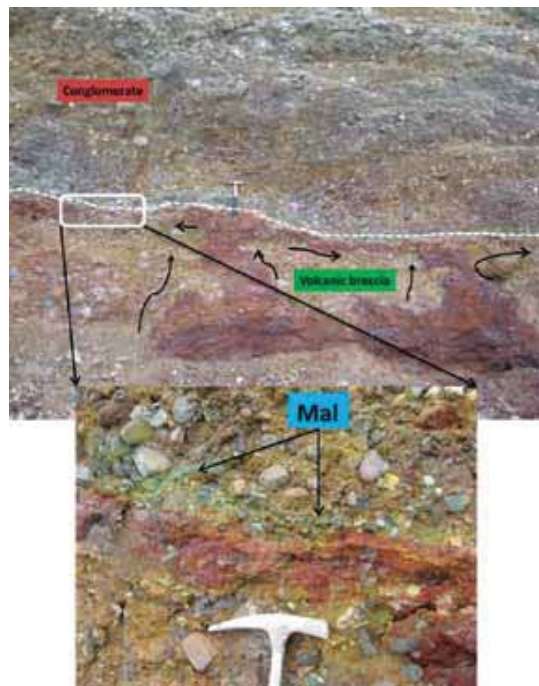
واحد بعدی که کانه‌زایی در آن رخ داده است مربوط به کنگلومرای پالتوسن می‌باشد که در بخش جنوبی کانسار گرماب پایین قرار گرفته‌اند. مرز زیرین این کنگلومراها نیز با سنگ‌ها و برش‌های آتشفشانی به سن کرتاسه پسین به‌طور هم‌شیب است (شکل ۶). همان‌طور که در شکل ۶ نیز دیده می‌شود، تونل‌های استخراجی قدیمی همگی در راستای



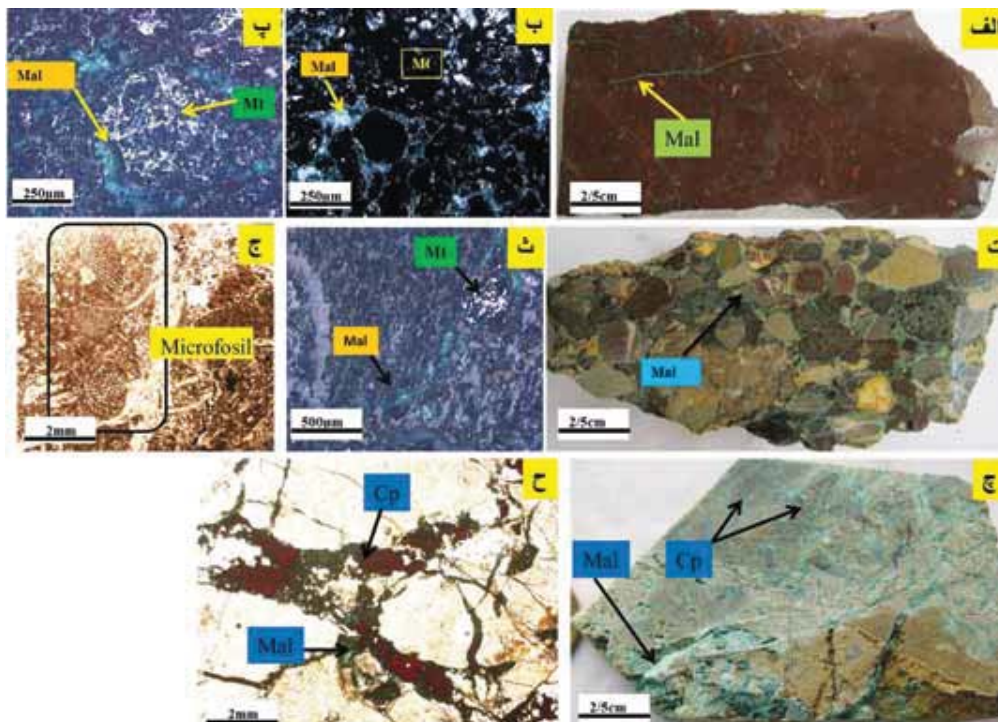
شکل ۶. نمایی از چاه‌ها و تونل‌های استخراجی قدیمی که در راستای افق معدنی و در جهت شیب کانی‌سازی حفر شده‌اند، الف) چاه‌های حفاری DHM و DH1 (دید به سمت جنوب)، ب) تونل حفاری DH3 (دید به سمت جنوب شرق)

کوپریت با فرمول شیمیایی Cu_2O ، از مجموعه کانی‌هایی است که بعد از مس طبیعی بالاترین میزان مس را در این واحد دارا می‌باشد. از نظر بافتی، کوپریت به‌صورت رگه-رگچه‌ای در برش‌های سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه پسین و کنگلومرای پالتوسن کانسار گرماب پایین دیده می‌شود و در بعضی از بخش‌ها نیز از اطراف در حال تبدیل شدن به مالاکیت می‌باشد (شکل ۸-ج). از نظر خاستگاه، پیدایش کوپریت در کانسار گرماب پایین، همان‌طور که در بخش قبل نیز گفته شد، احتمالاً ناشی از اکسید شدن مس‌های طبیعی می‌باشد. از دیگر ویژگی‌های کوپریت این است که در نور عبوری (ppl) به رنگ قرمز آتشین دیده می‌شود (شکل ۸-ح).

کانه‌زایی در این بخش از کانسار بیشتر شامل مالاکیت و کوپریت می‌باشد، مالاکیت به‌عنوان یک کانی غیر سولفیدی در برش‌های سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه پسین (شکل ۸-الف، ب و پ) و در کنگلومرای پالتوسن به‌صورت شکافه‌پرکن، رگچه‌ای و بافت جانشینی دیده می‌شود (شکل ۸-ت و ث). از لحاظ پتروگرافی کنگلومرای پالتوسن متشکل از آهک‌های فسیل‌دار و قطعات آندزیتی است. قطعات آهکی با سیمان کلسیتی به هم متصل شده و بین این قطعات کانی‌زایی ثانویه مالاکیت و کوپریت رخ داده است. در مقاطع میکروسکوپی این واحد سنگی، فسیل‌هایی چون اربیتولین به سن کرتاسه زیرین و جلبک‌ها و پلت‌ها نیز و بیش دیده می‌شوند (شکل ۸-ج).



شکل ۷. نمایی از کانه‌زایی مس (مالاکیت) در قسمت جنوبی کانسار، کانه‌زایی در داخل برش‌های آتشفشانی و کنگلومرا رخ داده است (دید به سمت جنوب شرق). مالاکیت (Mal)

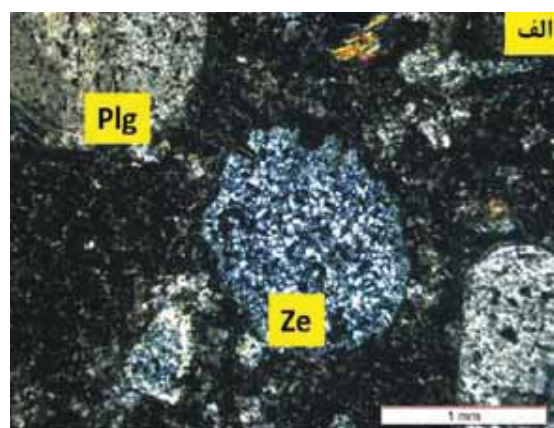
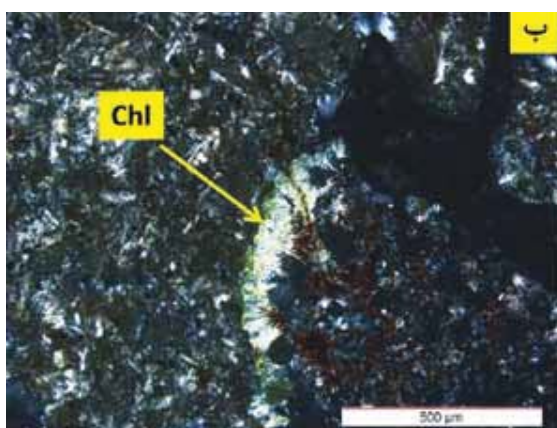


شکل ۸. الف) نمونه دستی از برش‌های آتشفشانی همراه با کانه‌زایی به صورت ثانویه (مالاکیت)، ب و پ) تصویر میکروسکوپی از مگنتیت‌هایی که از اطراف در حال تبدیل شدن به هماتیت هستند، به همراه مالاکیت در اطراف آن‌ها (تصویر میکروسکوپی شکل ب مربوط به نور عبوری PPL و شکل پ در نور عبوری XPL)، ت) نمونه دستی از کنگلومرا همراه با رخداد ثانویه مس (مالاکیت)، ث) کانه‌زایی مگنتیت به صورت اولیه و رخداد مالاکیت به صورت ثانویه و شکافه‌پرکن در بین قطعات کنگلومرای (نور عبوری XPL)، ج) تصویر میکروسکوپی از میکرو فسیل‌های اربیتولین مربوط به کرتاسه پیشین در داخل قطعات آهکی کنگلومرا (نور عبوری PPL)، چ) نمونه دستی از کنگلومرای همراه با کانه‌زایی کوپریت و مالاکیت و ح) تصویر میکروسکوپی از کوپریت‌های قرمز رنگ (نور عبوری PPL). مالاکیت (Mal)، مگنتیت (Mt) و کوپریت (Cp)

دگرسانی

نیز معروف است، اغلب به دلیل اضافه شدن سدیم از طریق محلول‌های ماگمایی یا گرمایی حاصل می‌شود. دگرسانی ژئولیتی نیز در دگرگونی‌های خفیف تدفینی (زیردریایی) در دما و فشار پایین می‌باشد، ظهور این رخساره معرف پایان دیاژنز و آغاز دگرگونی است و در دمایی در حدود ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشارهای بین ۲/۵ تا ۸ کیلو بار فشار آب به وجود می‌آید. براساس مطالعات صورت گرفته دگرسانی‌های گروه دوم (دگرسانی‌های آلبیتی و ژئولیتی) در ارتباط مستقیم با کانه‌زایی مس طبیعی می‌باشد و همزمان با این کانه‌زایی‌ها ایجاد شده است. این نوع دگرسانی‌ها در کانسارهای مس طبیعی موجود در گدازه‌های بازالتی شبه جزیره کویناو (میشیگان) به‌وضوح دیده می‌شود (Cornwall, 1956; Bornhorst and Barron, 2013; Brown, 2006).

دگرسانی به‌طور شاخص یک فرایند شستشوی پایه می‌باشد. به‌طور کلی، دگرسانی‌های رخ داده در کانسار گرماب پایین را می‌توان به دو گروه اصلی دسته‌بندی کرد: گروه اول، مطالعات صحرایی، میکروسکوپی و نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس بر روی تعدادی از نمونه‌های برداشت شده از کانسار گرماب پایین نشان می‌دهد که به‌طور عمده، بیشترین حجم دگرسانی‌ها مربوط به دگرسانی کلریتی است (جدول ۱ و شکل ۹) که در زمان فعالیت‌های آتشفشانی زیر دریایی (کرتاسه پسین) رخ داده است. شایان ذکر است که دگرسانی کلریتی معمولاً در اثر واکنش با آب دریا ایجاد شده است. گروه دوم، شامل دگرسانی‌های آلبیتی، ژئولیتی، کوارتز و کلسیت می‌باشد (شکل ۹- الف و ب). دگرسانی آلبیتی که به نوع سدیم متاسوماتیزم



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های ژئولیت، کلریت همراه با کانه‌زایی مس طبیعی (نور عبوری XPL)، ژئولیت (Ze) و کلریت (Chl)

جدول ۱. نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه‌های برداشته شده از مغزه‌های حفاری کانسار گرماب پایین

کانسار	شماره نمونه	نوع نمونه دستی	نتایج حاصل از آنالیز پراش اشعه ایکس	محل نمونه برداری
گرماب پایین	(G17)	آندزیت بازالت کلریتی شده	کوارتز- ورمیکولیت- آلبیت	مغزه حفاری Ak3- عمق ۷۴ متری
گرماب پایین	(G16)	آندزیت بازالت کلریتی شده	آلبیت- ورمیکولیت	مغزه حفاری Ak4- عمق ۶۴ متری

ژئوشیمی و موقعیت زمین ساختی

می‌باشد. همچنین میزان نقره نیز در سنگ‌های آتشفشانی کانسار بالای ۱ ppm است. در صورتی که میزان کلارک نقره در سنگ‌های آذرین بازیک ۰/۱۱ ppm و در سنگ‌های حد واسط ۰/۰۷ ppm است. با توجه به این داده‌ها می‌توان عنوان نمود منطقه گرماب پایین از پتانسیل کانه‌زایی مس و نقره بالایی برخوردار است.

مطالعات داده‌های ژئوشیمی نشان می‌دهد که میانگین مس در زمینه سنگ‌های آتشفشانی کانسار گرماب پایین (بخش بدون کانه‌زایی) حدود ۱۷۴ ppm می‌باشد، در صورتی که کلارک مس در سنگ‌های آذرین بازیک ۸۷ ppm و در سنگ‌های حدواسط ۴۰ ppm است که این نشان‌دهنده بالا بودن میزان مس در سنگ‌های آتشفشانی کانسار

جدول ۲. نتایج تجزیه فلوئورسانس اشعه ایکس مربوط به نمونه‌برداری سیستماتیک از مغزه حفاری AK2 (همه مقادیر برحسب درصد/ می‌باشد)

شماره نمونه	نوع نمونه دستی و محل نمونه‌برداری	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	SrO	SO ₃	CuO	L.O.I
G1	آندزیت بازالت، مغزه عمق ۱۳ متری حفاری AK2	۳۵/۲	۴۲/۱۴	۶۵/۸۱	۱۷/۰	۳۱/۲	۵۱/۲	۴۲/۰	۰	۷۹/۳	۸/۴	۰	۰	۰	۴۲/۳
G2	آندزیت بازالت، مغزه عمق ۲۵ متری حفاری AK2	۴۶/۳	۵۱/۱۵	۵۱/۶۵	۱۴/۰	۹۲/۲	۴۴/۱	۳۷/۰	۰	۰/۷/۴	۴۹/۴	۰	۰	۰	۱/۲
G3	آندزیت بازالت، مغزه عمق ۵۷ متری حفاری AK2	۱۳/۷	۲۹/۱۵	۶۱/۵۸	۱۳/۰	۵۲/۱	۶۴/۲	۶/۰	۲/۰	۴/۷	۹۸/۳	۰	۰	۰	۵۱/۲
G4	آندزیت بازالت، مغزه عمق ۸۶ متری حفاری AK2	۳۷/۳	۸۷/۱۴	۴۲/۶۲	۱۷/۰	۹۷/۰	۴۵/۴	۳۹/۰	۰	۸۸/۵	۷/۳	۰/۸/۰	۰	۰	۷۶/۳

جدول ۳. نتایج تجزیه ICP-AES مربوط به نمونه‌برداری سیستماتیک از مغزه حفاری AK2 (همه مقادیر برحسب ppm می‌باشد)

شماره نمونه	نوع نمونه دستی و محل نمونه‌برداری	Ag	As	Ce	Co	Cr	Cu	La	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Sc	Sr	Zn
G1	آندزیت بازالت، مغزه عمق ۱۳ متری حفاری AK2	<۱	<۱۰	۱۳	۱۲	۱۰>	۳۳۲	<۱۰	<۱۰	۷۱۷	<۱	<۱۰	<۱۰	<۱۰	۱۴	۱۱۱	۱۶۸
G2	آندزیت بازالت، مغزه عمق ۲۵ متری حفاری AK2	<۱	<۱۰	۱۱	۱۳	۱۰>	۱۳۹	<۱۰	<۱۰	۸۸۹	<۱	<۱۰	<۱۰	<۱۰	۱۳	۸۵	۲۱۳
G3	آندزیت بازالت، مغزه عمق ۵۷ متری حفاری AK2	<۱	<۱۰	۱۵	۲۵	۳۵	۸۴	<۱۰	<۱۰	۱۳۴۷	<۱	<۱۰	<۱۰	<۱۰	۱۷	۱۱۷	۱۳۹
G4	آندزیت بازالت، مغزه عمق ۸۶ متری حفاری AK2	<۱	<۱۰	۱۶	۲۰	۳۲	۱۴۱	۱۲	<۱۰	۵۶۸	<۱	<۱۰	<۱۰	<۱۰	۱۸	۵۵۰	۵۰

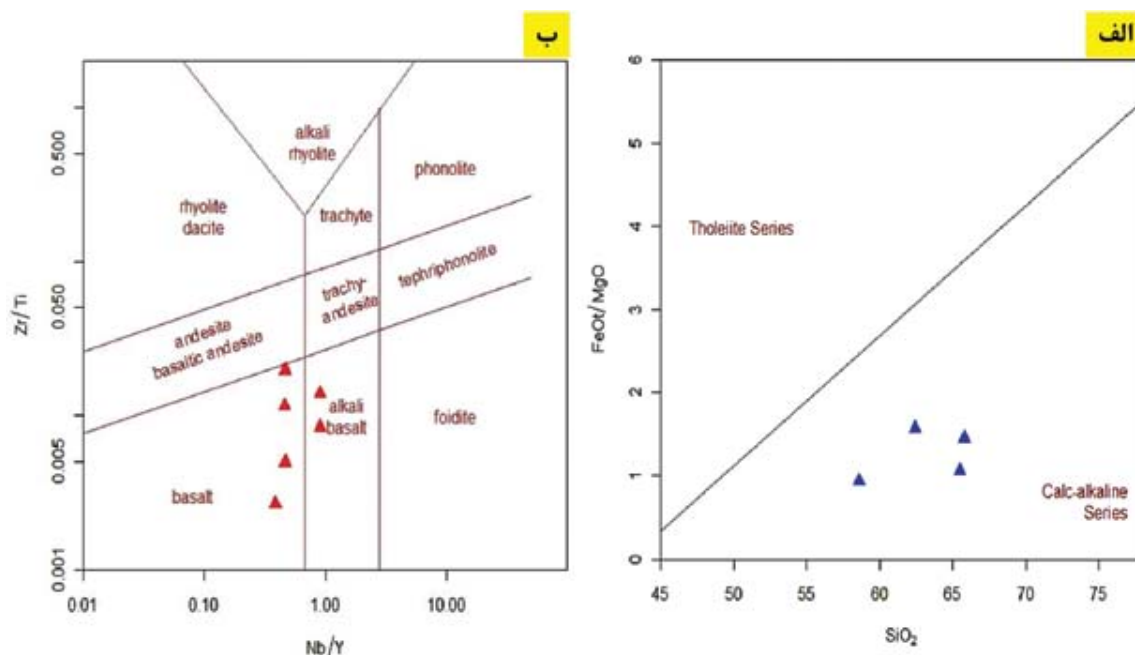
جدول ۴. نتایج تجزیه طیف‌سنج جرمی جفت پلاسمای القاشده مربوط به چاهک‌های حفاری

شماره نمونه	نوع نمونه و محل نمونه‌برداری	Au	Ag	Zn	Ce	Eu	Nb	Pb	Th	Ti	Y	Zr	Ti
CH10-T2A	آندزیت بازالت، چاهک حفاری در ولکانیک‌ها	۸۰	۳/۰	۱۵۰	۱۵	۱/۱	۱۸	۱۰۰	۱	۸/۴۴	۲۰	۶۱	۸/۴۴
CH10-T2B	آندزیت بازالت، چاهک حفاری در ولکانیک‌ها	۱/۴	۲/۰	۹۲	۱۳	۳/۱	۱۹	۵	۱	۴۹۱۶	۲۱	۴۱	۴۹۱۶
CH10-T2C	آندزیت بازالت، چاهک حفاری در ولکانیک‌ها	۳/۷	۶/۴	۹۰	۲۸	۹/۱	۳۰	۳۵	۱	۳۷۷۰	۷۸	۱۰	۳۷۷۰
DH13-D5-6	آندزیت بازالت، گمانه حفر شده در ولکانیک‌ها	۲/۴	۴/۰	۱۴۰	۱۹	۵/۱	۱۳	۸	۲	۴۲۴۷	۲۸	۲۱	۴۲۴۷
DH13-D7-8	آندزیت بازالت، گمانه حفر شده در ولکانیک‌ها	۴/۳	۶/۰	۱۰۰	۱۵	۲/۱	۱۱	۸	۱	۴۱۸۶	۲۴	۴۸	۴۱۸۶
DH6-D7-12	آندزیت بازالت، گمانه حفر شده در ولکانیک‌ها	۲/۲	۲/۰	۱۳۰	۱۵	۱/۱	۱۳	۵	۲	۲۷۶۲	۲۸	۵۴	۲۷۶۲

داده از شرکت زمین‌شناسی محکم کار، ۱۳۸۶ (مقادیر طلا برحسب ppb می‌باشد)

طبقه‌بندی سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری در داخل معدن بر اساس نمودار Nb/Y در برابر Zr/Ti (Pearce and Parkinson, 1996) نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌ها در محدوده بازالتی و تعداد کمتری در محدوده آکالی بازالت قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-ب).

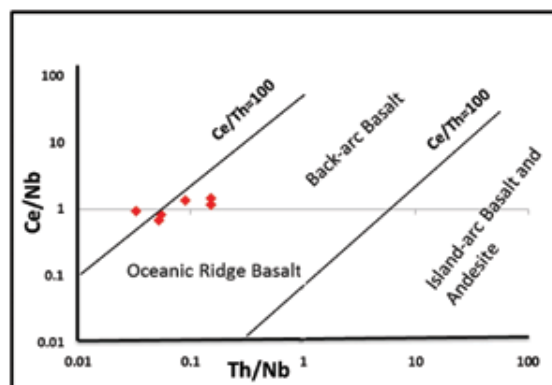
بر اساس نمودار SiO₂ در برابر FeO/MgO (Miyashiro, 1974) که برای تقسیم‌بندی سنگ‌ها به دو سری تولیتی و کالک آکالن بکار می‌رود، تمامی نمونه‌های سنگ‌های آتشفشانی توالی آتشفشانی - رسوبی گرماب پایین در محدوده کالک آکالن واقع شده‌اند (شکل ۱۰-الف).



شکل ۱۰. الف) موقعیت نمونه سنگ‌های آتشفشانی کانسار گرماب پایین در نمودار SiO₂ در برابر FeO/MgO در محدوده کالک آکالن (جدول ۲). ب) موقعیت نمونه سنگ‌های آتشفشانی کانسار گرماب پایین در نمودار Nb/Y در برابر Zr/Ti. همان‌طور که مشاهده می‌کنید بیشتر نمونه‌ها در محدوده بازالت و کمتر در محدوده آکالی بازالت قرار می‌گیرد (جدول ۳) (Saunders and Tarney, 1991).

در زیر پهنه سبزوار، ایجاد محیط کششی و تشکیل یک کافت پشت‌کمانی در طی کرتاسه پسین می‌باشد (Rossetti et al., 2010) که در این مطالعه نیز تأیید می‌شود.

از آنجا که ارتباط خاصی بین شیمی عناصر اصلی و نادر با محیط تکتونو ماگمایی سنگ‌ها وجود دارد، امروزه از نمودارهای ژئوشیمیایی برای تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ‌ها استفاده می‌شود. از طرفی حضور سنگ‌های آکالن در حوضه‌های اقیانوسی نشان‌دهنده مراحل اولیه کافت پشت‌کمانی است. لذا با توجه به ماهیت کالک آکالن بودن نمونه‌های آتشفشانی گرماب پایین و قرارگیری نمونه‌ها در محدوده حوضه کششی پشت‌کمانی در نمودار دوتایی Th/Nb در برابر Ce/Nb (Saunders and Tarney, 1991)، مشخص شده است که توالی آتشفشانی- رسوبی منطقه گرماب پایین در محدوده حوضه‌های کششی پشت‌کمانی تشکیل شده است (شکل ۱۱). لازم به ذکر است همان‌طور که قبلاً ذکر شد نظریه عمومی در مورد ماگماتیسیم و رسوب‌گذاری



شکل ۱۱. موقعیت نمونه‌های آتشفشانی گرماب پایین در نمودار دوتایی Th/Nb در برابر Ce/Nb. (جدول ۳) (Saunders and Taney, 1991).

الگوی تشکیل مس طبیعی در سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانسار گرماب پایین

بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، شکل هندسی، بافت و ساخت ماده معدنی، مطالعات دگرسانی و ژئوشیمیایی، مراحل کانه‌زایی و تحول آن در کانسار گرماب پایین به چهار مرحله جدا از هم تقسیم می‌شود.

مرحله اول: باززدگی حوضه آتشفشانی-رسوبی زیردریایی و تشکیل کانسار سولفید توده‌ای

مرحله اول به فروانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتیس به زیر ایران مرکزی، در زمان ژوراسیک- کرتاسه مربوط است که باعث ایجاد حرکات کششی در منطقه سبزوار و ایجاد یک کافت پشت‌کمانی شده است (Rossetti et al., 2010)، (شکل ۱۲- الف و ب). در ادامه بر اثر فعالیت‌های آتشفشانی زیردریایی در این حوضه پشت‌کمانی عمیق و عملکرد گسل‌های همزمان با ماگماتیسیم، سیالات کانه‌دار داغ ایجاد شده‌اند که همزمان با بالا آمدن و چرخش آن‌ها در توالی آتشفشانی- رسوبی و ورود آن‌ها به کف دریا، موجب نهشته شدن مواد معدنی به صورت سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد (شکل ۱۲ پ- ت) شده‌اند (Tashi et al., 2014). همچنین این رخداد کانه‌زایی موجب ایجاد دگرسانی گسترده کلریتی در سنگ‌های آتشفشانی کانسار شده است.

مرحله دوم: ادامه ولکانیسم و رسوب‌گذاری و تدفین

در این مرحله، با ادامه فعالیت‌های آتشفشانی زیر دریایی و ته‌نشینی بیشتر رسوبات، توالی آتشفشانی-رسوبی ضخیمی در این حوضه پشت‌کمانی ایجاد شده است، که در ادامه، تحت تدفین شدگی عمیق قرار می‌گیرد (شکل ۱۲- ث). نتیجه تدفین و عملکرد فرآیند دیاژنز، ایجاد سیالات نسبتاً داغ شور می‌باشد که قابلیت شستشوی عناصر از جمله مس را دارند.

مرحله سوم: کوهزایی لارامید و چین‌خوردگی منطقه و

تشکیل کنگلومراهای پالئوسن و کانه‌زایی مس طبیعی

در اواخر دوره کرتاسه و آغاز سنوزوئیک، جنبش کوهزایی لارامید، در چهره یک فاز فشارشی، سبب چین‌خوردگی و بیرون آمدن منطقه از آب شده است. فاز

فشارشی و چین‌خوردگی شدید پایان کرتاسه موجب پیشروی دریا در پالئوسن پیشین و ایجاد کنگلومرای واحد پالئوسن (کنگلومرای کرمان) شده است (شکل ۱۲- ج). در حین بالا آمدگی، سیالات داغ ایجاد شده در مرحله دیاژنز و تدفین به سمت بالا حرکت کرده و مس را از سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه پسین شسته و تحت شرایط احیایی و فشار پایین، گوگرد به صورت مس طبیعی در واحدهای آندزیت بازالت و تراکی آندزیت و کنگلومراهای پالئوسن ته‌نشست داده شده است (شکل ۱۲- ج).

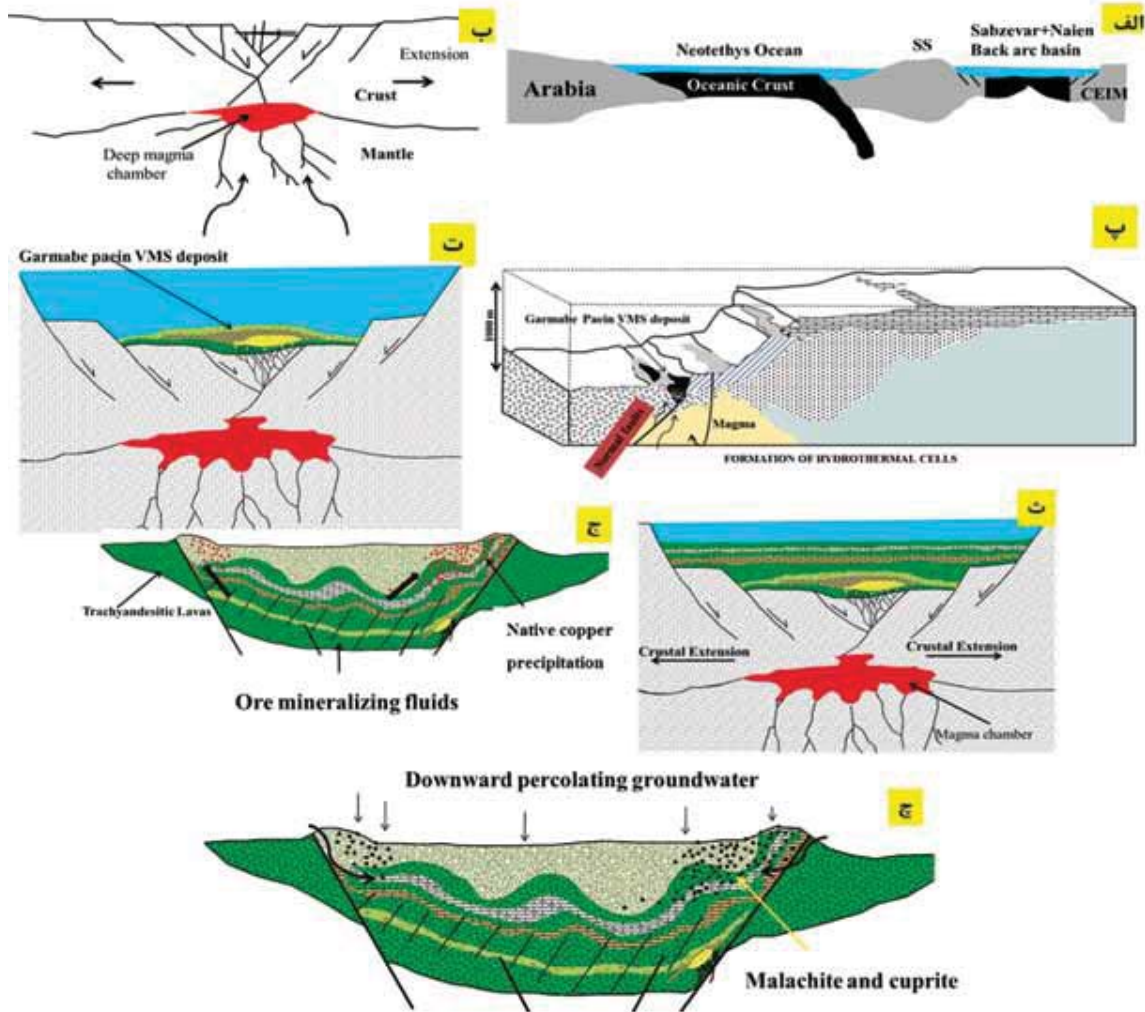
این مرحله کانه‌زایی در کانسار گرماب پایین از نظر زمانی جدای از کانه‌زایی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد می‌باشد. مطالعات صورت گرفته بر اساس نوع دگرسانی، ساخت و بافت و نوع کانه‌زایی نشان می‌دهد، این کانه‌زایی در اثر دیاژنز و تدفین یا دگرگونی خفیف دفنی (در حد رخساره ژئولیتی) بر روی توالی آتشفشانی-رسوبی منطقه معدنی تشکیل شده است. این چنین می‌توان استنباط کرد که دیاژنز خفیف در منطقه معدنی موجب ایجاد سیال شورابه‌ای حوضه‌ای نسبتاً داغ شده که به دنبال بالا آمدگی منطقه وارد شکستگی‌ها و سنگ‌ها شده است. واکنش این سیالات داغ با سنگ‌های آتشفشانی، موجب خارج شدن عنصر مس از درون شبکه سیلیکات‌ها و سپس حمل آن به صورت Cu^{2+} به بخش‌های بالایی (شامل سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه پسین، برش ولکانیکی و کنگلومرای پالئوسن) شده است. همان‌طور که پیشتر بیان شد رخداد کانه‌زایی سولفید توده‌ای در کانسار گرماب پایین موجب ایجاد دگرسانی شدید کلریتی در سنگ‌های آتشفشانی کانسار شده است. این دگرسانی کلریتی موجب آزاد شدن الکترون و ایجاد محیط احیایی شده و از طرفی پایین بودن فوگاسیته گوگرد در سنگ‌های دگرسان شده باعث تشکیل مس به صورت طبیعی (Cu^0) به همراه ژئولیت (دگرسانی ژئولیتی) شده است (شکل ۱۲- ج). همچنین همراه نبودن کانه‌های سولفیدی مس (همچون کالکوپیریت، بورنیت و کالکوسیت) در بخش‌هایی که کانه‌زایی مس طبیعی رخ داده، نشان از این است که میزان فوگاسیته گوگرد بسیار پایین بوده است. لازم به ذکر است این مکانیسم تشکیل مشابه کانه‌زایی مس طبیعی در

همان‌طور که در مرحله قبلی گفته شد، بالا آمدن سیالات مس‌دار موجب کانه‌زایی مس طبیعی در برش‌های آتشفشانی و گنگلومراهای پالئوسن شده است، که در ادامه تأثیر فرایند هوازدگی و سوپرژن سبب تبدیل مس طبیعی به کانی‌های اکسیدی مس‌دار همچون کوپریت و کانی کربناتی مس مانند ملاکیت شده است (شکل ۱۲-ج).

بازالت‌های با بافت بادامکی و واحدهای کنگلومرایی شبه جزیره کویانو (میشیگان) است (Bornhorst and Barron, 2013; Brown, 2006).

مرحله چهارم: سوپرژن

این مرحله از کانه‌زایی به تشکیل کوپریت و ملاکیت در برش‌های آتشفشانی و کنگلومراهای پالئوسن مربوط است.



شکل ۱۲. تصاویر نمادین از مراحل مختلف تشکیل کانسار گرماب پایین. الف و ب) باززدگی کافت پشت کمانی در منطقه سبزوار بر اثر فروانش نئوتتیس به زیر ایران مرکزی (Rossetti et al., 2010). پ و ت) عملکرد گسل‌های هم‌زمان با ولکانیسم که موجب گسترش سامانه‌های گرمایی زیر دریایی و ایجاد کانسار سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد در کرتاسه پسین در منطقه گرماب پایین شده است. ث) تدفین کانسار سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد در اثر فوارن مواد آتشفشانی و تشکیل لایه‌های ولکانیکی و رسوبی بعدی، دفن شدگی و فشار دیاژنزی توالی آتشفشانی-رسوبی موجب تشکیل سیال داغ شور شده است. ج) چین‌خوردگی لایه‌ها در اثر فاز کوهزایی لارامید در کرتاسه پسین و فرسایش سنگ‌های مختلف موجود در کنار حوضه و حمل این سنگ‌ها به درون حوضه کم‌عمق، موجب تشکیل کنگلومراهای پالئوسن و پوشیده شدن بیشتر فرورفتگی موجود در توالی چین‌خورده آتشفشان-رسوبی توسط این کنگلومراها شده است، در ادامه صعود سیالات داغ شور ایجاد شده در مرحله قبل و شستشوی مس از ولکانیک‌ها باعث کانه‌زایی مس طبیعی در توالی ولکانیکی کرتاسه پسین و کنگلومراهای پالئوسن شده است. چ) نفوذ سیالات جوی به داخل واحدهای کنگلومرایی آتشفشانی کانه‌دار (حاوی مس طبیعی)، موجب تشکیل کوپریت و ملاکیت در این سنگ‌ها به صورت رگه-رگچه‌ای شده است

نوع کانه زایی

اما در کانسارهای مس نوع آتشفشانی- لایه سرخ، سنگ میزبان شامل گدازه‌های مافیک و فلسیک، به‌ویژه گدازه‌های بادامکی، توف برشی و سنگ‌های رسوبی وابسته است (Guilbert and Park, 1986). شاخصه مهم بعدی که باعث تمایز این نوع کانه‌زایی با کانه‌زایی نوع مانتو و نوع آتشفشانی- لایه سرخ می‌شود، مربوطه به نوع کانه‌زایی در این تیپ کانسارها است. به‌صورتی که در کانسارهای نوع میشیگان کانی مس طبیعی به‌عنوان کانی اصلی در کانسار محسوب می‌شود، اما در کانسارهای نوع مانتو و آتشفشانی- لایه سرخ میزان کانی مس طبیعی بسیار پایین بوده و بیشترین حجم کانه‌زایی مربوط به کانی‌های کالکوسیت، کالکوپیریت، بورنیت و مالاکیت است. قابل ذکر است در کانسار گرماب پایین نیز کانی مس طبیعی به‌عنوان کانی اصلی و کانی‌های مالاکیت و کوپریت به‌عنوان کانی‌های فرعی محسوب می‌شوند (جدول ۵).

در جدول ۶ نیز ضمن بیان ویژگی‌های برخی از کانسارهای تیپ میشیگان در ایران، سعی در مقایسه کانه‌زایی مس طبیعی در کانسار گرماب پایین با کانسارهای تیپ میشیگان در ایران شده است. با توجه به این جدول شباهت‌های بسیار زیادی میان این نوع کانه‌زایی با کانسارهای تیپ میشیگان مشاهده می‌شود.

بر اساس آنچه که در مورد ویژگی‌های کانه‌زایی مس طبیعی در کانسار گرماب پایین در بخش قبلی گفته شد، اقدام به مقایسه انواع کانه‌زایی‌های مس طبیعی در سنگ‌های آتشفشانی در جهان و تعیین نوع کانه‌زایی شد. بدین منظور با توجه به شواهد بیان شده در مورد کانه‌زایی مس طبیعی در این کانسار می‌توان آن را با سه نوع کانسار با انواع مختلف مقایسه کرد:

الف- کانسارهای مس نوع میشیگان

ب- کانسارهای مس در توالی سرخ آتشفشانی

ج- کانسارهای مس نوع مانتو

مقایسه این سه نوع کانه‌زایی با رخداد مس طبیعی در کانسار گرماب پایین بر اساس شاخصه‌های مهم نشان می‌دهد، که کانه‌زایی در کانسار گرماب بیشترین شباهت را با کانسارهای نوع میشیگان دارد (جدول ۵).

از جمله این شاخصه‌های مهم می‌توان به نوع سنگ میزبان، نوع کانه‌زایی و نوع دگرسانی اشاره نمود. به‌صورتی که بر اساس نوع سنگ میزبان، کانه‌زایی در کانسارهای میشیگان در سنگ‌های بازالتی تولیتی حفره‌دار و کنگلومرا رخ داده است. در کانسار گرماب پایین نیز سنگ میزبان کانه‌زایی تراکی‌آندزیت، آندزی بازالت و کنگلومرا می‌باشد.

جدول ۵. مقایسه کانه‌زایی مس طبیعی در کانسار گرماب پایین با کانسارهای تیپ میشیگان، آتشفشانی لایه- سرخ و تیپ مانتو

ویژگی‌ها	کانسار کانه‌زایی مس طبیعی در کانسار گرماب پایین	کانسارهای مس نوع مانتو Manto type	کانسارهای مس نوع آتشفشانی- لایه سرخ (volcanic red-bed copper)	کانسارهای مس نوع میشیگان Michigan type
موقعیت	ایران- جنوب شرق شاهرود	شیلی (کانسار بوئناسیرانزا)	آمریکای شمالی	جزیره کویناوا، ایالت متحده
سنگ میزبان	تراکی آندزیت، آندزیت بازالت و کنگلومرا	گدازه‌های بازالتی و آندزیتی	سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی	بازالت امیگدالونیدال با میان لایه‌های کنگلومرای
سری ماگمایی	کالک آلکان	گدازه‌های مافیک و فلسیک	سری تولیتی (نیمه قلبایی)
جایگاه زمین ساختی	محیط پشت‌کمانی	آتشفشانی نیمه قاره‌ای	آتشفشانی قاره‌ای تا دریایی کم‌زرفا
پاراژنز کانیایی	مس طبیعی، کوپریت و مالاکیت	کالکوسیت، بورنیت، کالکوپیریت، مس طبیعی و مالاکیت	پیریت، کالکوسیت، بورنیت و مس طبیعی	مس طبیعی، کوپریت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا، نقره طبیعی و کالکوسیت
بافت ماده معدنی	رگه-رگچه‌ای و دانه پراکنده	رگه‌ای و پراکنده فضای خالی	رگه-رگچه‌ای، دانه پراکنده و هم‌شیب و غیرهم‌شیب	افشان و پراکنده فضای خالی
محصولات دگرسانی	کلریتی و زئولیتی	کلریت، آلبیت، کوارتز، اپیدوت	آلبیت، کوارتز، اپیدوت، کلریت و زئولیت	کلسیت، کلریت، اپیدوت، کوارتز، پامپلی ایت و زئولیت
سن کانه زایی	احتمالاً اواخر پالئوسن	زوراسیک	پالئوزوئیک
مراجع	این تحقیق	(Sillitoe, 1977; Ramírez et al., 2006)	(Kirkham, 1996; Cabral and Beaudoin, 2007)	(Cornwall, 1956; Brown, 2006)

جدول ۶. مقایسه کانه‌زایی مس طبیعی در کانسار گرماب پایین با کانسارهای مس نوع میشیگان در ایران

ویژگی‌ها	کانسار	کانسار گرماب پایین	اندیس معدنی دارهند	اندیس معدنی قبله بولاغ	کانسار مس عباس‌آباد
موقعیت	۲۹۰ کیلومتری جنوب شرق شاهرود	۴/۵ کیلومتری نطنز	جنوب خاور زنجان	شمال غرب قزوین. زون طارم	
سن کانه زایی	احتمالاً اواخر پالئوسن	پالئوسن میانی تا بالایی	پالئوسن	پالئوسن	
سنگ میزبان	تراکی آندزیت و آندزیت بازالت	بازالت آمیگدالوئیدال	بازالت آمیگدالوئیدال	آندزیت و بازالت	
ساخت و بافت ماده معدنی	رگه-رگچه ای و دانه پراکنده	رگه‌ای	افشان و پرکننده فضای خالی	رگه‌ای و پرکننده فضای خالی	
پاراژنز کانپایی	مس طبیعی، کوپریت و مالاکیت	مس طبیعی، کوپریت، تنوریت، مالاکیت و اندکی پیرت	مس طبیعی، تنوریت، مالاکیت، آزوریت و هماتیت	مس طبیعی، کوپریت و مالاکیت	
دگرسانی	کلریت و ژئولیت	ژئولیت، پرنهیت پومپله ایت	ژئولیت، کوارتز، کلسیت و کلریت	
مراجع	این تحقیق	(Nezafati et al., 2006)	(بهزادی، ۱۳۷۳)	(مرادی و همکاران، ۱۳۹۰)	

نتیجه‌گیری

دگرسان کلریتی، باعث احیا شدن و تشکیل مس طبیعی (Cu⁰) به همراه ژئولیت (دگرسانی ژئولیتی) شده است. همچنین لازم به ذکر است کانه‌زایی مس طبیعی، کوپریت و مالاکیت در واحد کنگلومرای کانسار با سن پالئوسن نیز دیده می‌شود. با توجه به نوع سنگ‌های میزبان، دگرسانی‌ها و نوع کانه‌زایی، رخداد مس طبیعی در کانسار گرماب پایین بیشترین شباهت را با کانه‌زایی مس طبیعی مرتبط با سنگ‌های بازالتی (نوع میشیگان) دارد. قابل ذکر است که تشکیل مس طبیعی در کانسارهای سولفید توده‌ای معمولاً ناشی از فرایند سوپرژن می‌باشد ولی در کانسار گرماب پایین در واقع همراهی مس طبیعی با ژئولیت، نشانه تشکیل آن در اثر شورابه‌های دیازنزی بوده و تشکیل آن در پهنه سوپرژن در اثر هوازدگی و فرایند سوپرژن را منتفی می‌سازد، که این ویژگی در کانسار گرماب پایین منحصربه‌فرد است.

منابع

- بهزادی، م.، ۱۳۷۳. بررسی زمین‌شناسی اقتصادی اندیس مس قبله بولاغ واقع در منطقه طارم سفلی- استان زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی.

- تقی‌زاده قورولی، س.، موسیوند، ف. و قاسمی، ح.، ۱۳۹۱. کانسار منگنز ذاکری، نمونه‌ای از کانه‌زایی منگنز نوع برونومی در جنوب غرب سبزواری. سی و یکمین گردهمایی

مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفته در این پژوهش نشان می‌دهند که کانه‌زایی مس طبیعی در کانسار گرماب پایین از نظر زمانی به‌صورت دیرزاد و جدا از کانه‌زایی سولفید توده‌ای بوده است. بر اساس مقایسه صورت گرفته با دیگر کانسارهای مشابه در جهان، شباهت زیادی با کانسار نوع میشیگان مشاهده می‌شود. از نظرکانی شناسی بیشترین سهم کانه‌زایی مربوط به تشکیل مس طبیعی، کوپریت و مالاکیت است. ساخت و بافت این رخداد کانه‌زایی به‌صورت رگه-رگچه‌ای و دانه پراکنده در توالی آتشفشانی کانسار گرماب پایین دیده می‌شود. سنگ میزبان این کانه‌زایی تراکی آندزیت و آندزیت بازالت با بافت بادامکی می‌باشد و عمده دگرسانی‌ها شامل انواع کلریتی، ژئولیتی و کلسیتی است. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد. دیازنز و تدفین یا دگرگونی خفیف دفنی (در حد رخساره ژئولیتی) بر روی توالی آتشفشانی-رسوبی منطقه معدنی موجب ایجاد سیال شورابه‌ای حوضه‌ای نسبتاً داغ گردیده که این سیال به دنبال بالا آمدگی وارد شکستگی‌ها و سنگ‌ها شده و با واکنش با سنگ‌های آتشفشانی موجب خارج شدن عنصر مس از درون شبکه سیلیکات‌ها و سپس حمل آن به‌صورت Cu²⁺ به بخش‌های بالایی (شامل سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه پسین، برش‌های ولکانیکی و کنگلومرای پالئوسن) شده است. در ادامه، پایین بودن فشار گوگرد در سنگ‌های

- Michigan: a hybrid evolved meteoric and metamorphogenic model. *Journal of Economic Geology*, 101, 1437-1444.
- Bornhorst, T.J. and Barron R.J., 2013. Geologic Overview of the Keweenaw Peninsula, Michigan :Institute on Lake Superior Geology Proceedings. 59th Annual Meeting Houghton, MI, 59, part 1, 2-4.
 - Cabral, A.R. and Beaudoin, G., 2007. Volcanic red-bed copper mineralisation related to submarine basalt alteration, Mont Alexandre, Quebec Appalachians, Canada. *Journal of Mineral Deposit Research*, 42, 901-912.
 - Cornwall, H. R., 1956. A summary of ideas on the origin of native copper deposit. *Journal of Economic Geology*, 59,615-631.
 - Gerdes, A. and Zeh, A., 2009. Zircon formation versus zircon alteration - New insights from combined U- Pb and Lu-Hf in- situ La-ICP- MS analyses of Archean zircons from the Limpopo Belt. *Journal of Chemical Geology*, 261, 230-243.
 - Guilbert, J.M. and Park, J.C.F., 1986. *The Geology of Ore Deposits*, W. H. Freeman, 985.
 - Kirkham, R.V., 1996. Volcanic red bed copper. *Geology Survey of Canada, Canadian mineral deposit types*, 8, 241- 252.
 - Lindenberg, H.G., Gorler, K. and Ib-beken, H., 1983. Stratigraphy, structur and orogenetic evolution of the Sabzevar zone the area of Oryan Khorasan, NE, Iran. *Geological Survey of Iran, Rep*, 51, 120-142.
 - Ramírez, L.E., Palacios, C., Townley, B., Parada, M.A., Sial, A.N., Fernandez- Turiel, J.L., Gimeno, D., Garcia- Valles, M. and Lehmann, B., 2006. The Mantos Blancos copper deposit: an upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the Coastal Range of Northern
- علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- شرکت زمین‌شناسی محکم کار، ۱۳۸۶. گزارش شرح عملیاتی مراحل پی‌جویی و اکتشاف کانسار مس گرماب پایین.
 - طاشی، م.، موسیوند، ف. و قاسمی، ح.، ۱۳۹۲. رخداد کانه‌زایی سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد مس گرماب پایین-جنوب شرق شاهرود. سی و دومین همایش علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 - کهنسال، ر.، ۱۳۸۶. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مری- اسبکشان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 - مرادی، م.، بومری، م.، جمشیدی، م.، عباس‌زاده، غ.، اسفرم، م. و پورچنگیز، ی.، ۱۳۹۰. بررسی کانه‌زایی مس خالص در عباس‌آباد، شمال-غرب قزوین. دومین همایش ملی انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه لرستان.
 - مغفوری، م.، راستاد، ا. و موسیوند، ف.، ۱۳۹۰. رخداد کانه‌زایی مس سولفید توده‌ای نوده در توالی آتشفشانی- رسوبی کرتاسه بالایی در جنوب غرب سبزوار. دومین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه لرستان.
 - مسعودی، م.، ۱۳۸۸. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار منگنز بنسبرد در جنوب باختر سبزوار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران.
 - وطن‌پور، ح.، خاکزاد، ا. و قادری، م.، ۱۳۸۸. کاربرد عناصر گروه پلاتین (PGE) در اکتشاف و ارزیابی اقتصادی در کانسارهای کرومیت کمربند افیولیتی سبزوار. فصلنامه علمی- پژوهشی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۷۱، ۹-۱۲.
 - نصراللهی، ع.، موسیوند، ف. و قاسمی، ح.، ۱۳۹۱. الگوی تشکیل کانسار منگنز نوده در توالی آتشفشانی-رسوبی کرتاسه بالایی، زیر پهنه سبزوار. سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 - Agard, P., Jolivet, L., Vrielynck, B., Burrov, E. and Monie, P., 2007. Plat acceleration: the obduction trigge. *Earth and Planetary Science Letters*, 258, 428-441.
 - Brown, A.C., 2006. Genesis of native copper lodes in the Keweenaw district, northern

- Chile. *Journal of Mineral Deposit Research*, 41, 246-258 .
- Miyashiro, A., 1974. Nature of alkalic volcanic series. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66, 91-110.
 - Nezafati, N., Momenzadeh, M. and Pernicka, E., 2006. Darhand copper occurrence: An example of Michigan-type native copper deposits in central Iran. *Journal of Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*, 165-167.
 - Pearce, J.A. and Parkinson, I.J., 1996. Trace element models for mantle melting: application to volcanic arc petrogenesis. In: Prichard, H.M., Albaster, T., Harris, N.B.W., Neary, C.R. (Editors.), *Magmatic Processes in Plate Tectonics*. Geological Society of London, Special Publication, 373-403.
 - Rossetti, F., Nasrabad, M., Vignaroli, G., Theye, T., Gerdes, A., Razavi, M. and Moin Vaziri, H., 2010. Early Cretaceous migmatitic mafic granulites from the Sabzevar range (NE Iran): implications for the closure of the Mesozoic peri-Tethyan oceans in central Iran. *Journal of Terra Nova*, 22, 26-34.
 - Saunders, A.D. and Tarney, J., 1991. Back arc basins. In: Floyd, P.A. (Editor), *Oceanic Basalts*. Blackie and Son Ltd, 219- 263.
 - Sillitoe, R.H., 1977. Metallic mineralization affiliated to sub-aerial volcanism. A review, Geological Society of London, Special Publication, 7, 99-116.
 - Tashi, M., Mousivand, F. and Ghasemi, H., 2014. Volcanogenic massive sulfide Cu-Ag mineralization in the Kharturan area, southeast of Shahrood. 1th International Workshop on Tethyan Orogenesis and Metallogeny in Asia and Silk Road Higher Education Cooperation Forum, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, China.
 - Wang, C.Y., Zhou, M.F., Qi, L., Hou, S., Gao, H., Zhang, Z. and Malpas, J., 2006. The Zhaotong native copper deposit associated with the Permian Emeishan flood basalts, Yunnan, southwest China. *International Geology Review*, 48, 742-753.