

بررسی‌های زمین‌شناسی و ایزوتوپی در ارتباط با کانی‌زایی مس در منطقه درخت سنجد، استان خراسان رضوی

اعظم انتظاری هرسینی^{۱*}، رحیم معصومی^۲، توحید نوری^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۳/۵، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۵/۱۰)

چکیده: منطقه درخت سنجد در فاصله حدود ۱۶۰ کیلومتری جنوب‌غرب مشهد و در ۴۰ کیلومتری جنوب نیشابور واقع است. سنگ میزبان کانی‌زایی منطقه واحدهای آتشفشانی بویژه واحد آندزیت پورفیری با سن ائوسن است و دگرسانی‌های عمده موجود در منطقه شامل کربناتی‌شدن از درجه‌های ضعیف تا قوی، پروپیلیتی و سیلیسی شدن هستند. کانی‌زایی مس در این منطقه بیشتر به‌صورت مالاکیت، آزوریت، کالکوپیریت، بورنیت، دیجنیت، کالکوسیت، کوولیت و آتاکامیت بوده است و ساخت و بافت عمده موجود در واحدهای دارای کانسنگ به صورت رگه-رگچه‌ای، پرکننده حفره‌ها، جانشینی و بافت پراکنده دیده می‌شود. بررسی‌های ایزوتوپی گوگرد انجام شده بر نمونه‌های کالکوسیت در این منطقه مقادیر ۷- تا ۹۱- در هزار را نشان می‌دهد. کانی‌زایی در منطقه درخت سنجد بیشترین شباهت را به کانسارهای نوع مانتوی شیلی دارد، ولی کانی‌زایی درخت سنجد را بر اساس شواهد روزادی بودن آن و همچنین داشتن کانی‌های سولفیدی اصلی اولیه که به‌طور عمده کالکوسیت است و نیز نبود پیریت و کانی‌های دارای آهن، وجود دگرسانی کربناتی و تشکیل آن در اعماق کم، می‌توان یک کانسار گرمابی با سولفیدشدگی و آهن پایین در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: کانی‌زایی مس؛ درخت سنجد؛ ایزوتوپ گوگرد؛ مس آندزیتی؛ نوع مانتو.

مقدمه

منطقه به سال‌ها پیش برمی‌گردد و پیشینیان برای استخراج و ذوب کانسنگ مس کارهای گسترده‌ای را در این منطقه انجام داده‌اند. از این رو، بررسی این منطقه به علت غنای آن از نظر کانی‌زایی مس لازم و ضروری است. کانی‌سازی در کمربند کویر- سبزوار توسط بسیاری از زمین‌شناسان به‌عنوان پهنه سبزوار معرفی شده است که از شرق نیشابور تا سرکویر سمنان گسترش دارد و مناطقی چون نیشابور، سبزوار، عباس‌آباد، میامی، سرکویر (منطقه‌ی معلم) و جنوب دامغان را در بر می‌گیرد. کمربند فلزایی کویر-سبزوار در شمال با گسل‌های میامی و نیشابور-ترت جام، گسل ریوش در جنوب‌شرق و گسل

توجه به ذخایر معدنی هر منطقه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی برای هر برنامه‌ریزی درازمدت صنعتی و اقتصادی امری اجتناب‌ناپذیر است. شناسایی استعدادهای معدنی و آگاهی از کاربرد این مواد، بی‌شک در رشد و شکوفایی کشور نقش بسزایی دارد. منطقه درخت سنجد در فاصله حدود ۱۶۰ کیلومتری جنوب‌غرب مشهد و در ۴۰ کیلومتری جنوب نیشابور واقع است. در این منطقه معدنی، تعدادی پژوهش اکتشافی و معدنی انجام شده است (برای مثال، [۱-۵]).
بر پایه شواهد صحرایی، سابقه عملیات معدنکاری در این

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۸۸۵۹۰۹۸۰، پست الکترونیکی: a.entezariharsini@pnu.ac.ir



ایزوتوپی به آزمایشگاه دانشگاه اتاوا در کانادا فرستاده شدند.

بحث و بررسی

زمین‌شناسی

گستره مورد بررسی در مرز بین سبزوار- تربت‌حیدریه زانده‌ای باریک از منطقه‌ی ساختاری ایران مرکزی است (شکل ۱). پهنه ساختاری سبزوار دارای کشیدگی شرقی- غربی به طول ۴۰۰ کیلومتر است که در شمال با گسل راستالغز راست‌گرد سنگ بست شاندیز از پهنه کپه داغ و در جنوب با گسل راستالغز چپ‌گرد درونه از قطعه لوت جدا می‌شود [۸]. پهنه ساختاری سبزوار شامل زمین‌درز کوهزایی بوده که در منطقه‌ی پشت قوس فرورانش نئوتتیس به وجود آمده است [۹-۱۲]. مجموعه رورانه به‌صورت ناپیوسته با سنگ‌آهک‌های نومولیت‌دار به سن لوتسین پوشیده شده است؛ این نشان می‌دهد که بالا آمدن منطقه‌ی در زمان ائوسن میانی کامل شده است [۱۳]. برای مجموعه‌ی آتشفشانی سبزوار، سن‌سنجی دقیقی انجام نشده است. با این وجود، این سنگ‌ها با سنگ‌های آداکیتی قوچان به سن پلیوسن در منطقه‌ی کپه داغ در ارتباط هستند و از ذوب بخشی صفحه فرورونده‌ی اکلوتیتی پس از توقف فرورانش روبه شمال پوسته‌ی اقیانوسی سبزوار به زیر صفحه توران به وجود می‌آیند [۱۴-۱۷].

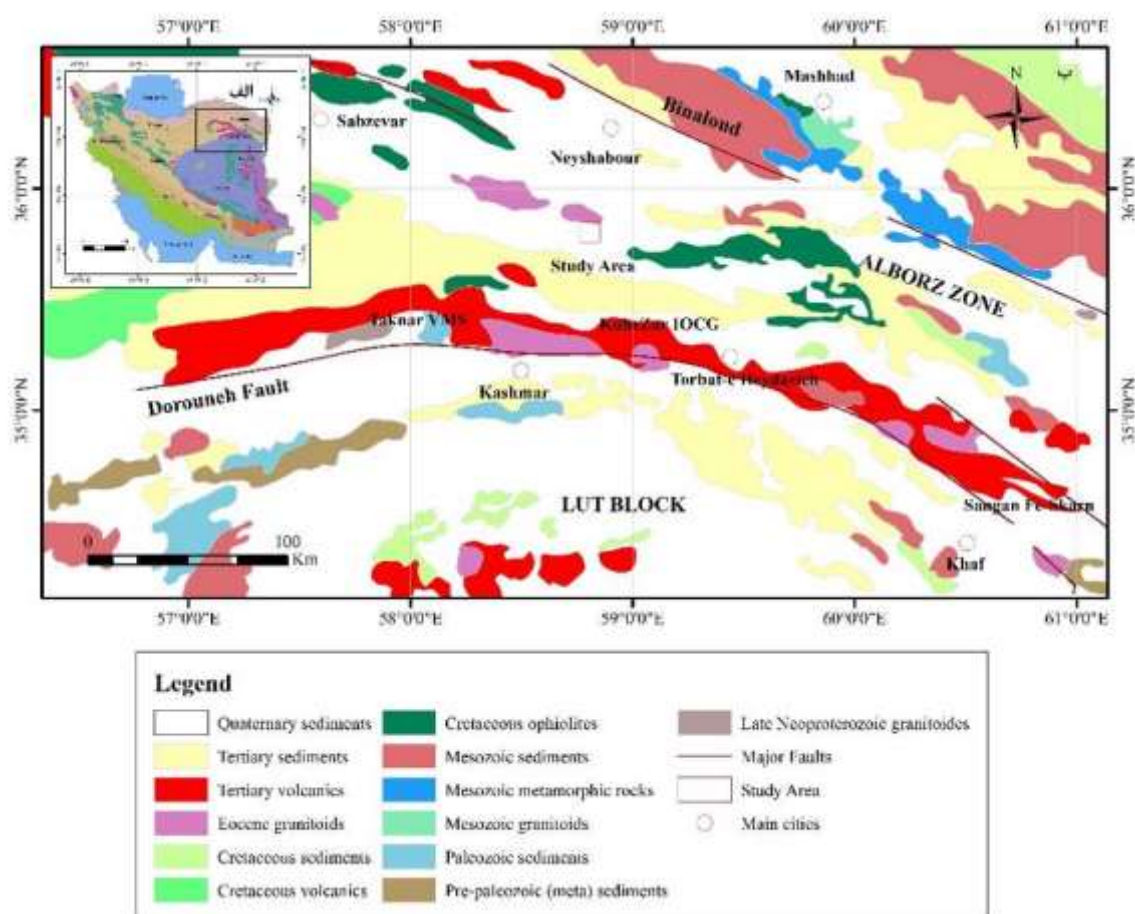
کمبرند فلززایی تکنار و کویر سبزوار درواقع به حالت یک قطعه دوزنقه‌ای شکل است که بین قطعه لوت، بینالود و پهنه البرز قرار دارد و شهرهای تربت‌جام، نیشابور، بردسکن، کاشمر، سبزوار و شاهرود را در برمی‌گیرد، همچنین تا جنوب دامغان و سمنان نیز گسترش دارد [۱۸]. از نظر بسیاری از زمین‌شناسان، این ایالت را می‌توان به دو کمبرند فلززایی تکنار و کویر سبزوار تقسیم کرد. گسل میامی سبزوار را از پهنه البرز شرقی جدا می‌کند. این گسل موازی با گسل درونه است که دارای روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی است که تبدیل به گسل نیشابور- تربت جام با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی می‌شود که پهنه البرز را از بینالود جدا می‌کند. در واقع دوگسل میامی و نیشابور- تربت‌جام می‌تواند تبدیل به یک گسل به نام میامی- تربت‌جام شوند [۱۶، ۱۹]. پژوهشگران زیادی ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه سبزوار را از جنبه‌های مختلف شامل ویژگی‌های سنگ- شناسی و پتانسیل‌های کانی‌زایی کانسارهای مختلف بررسی کرده‌اند [۲۰-۲۴].

درونه در جنوب‌غرب در برگرفته شده است. این کمبرند فلززایی و کانی‌زایی به دو بخش اصلی تقسیم‌بندی می‌شود: (۱) بخش افیولیتی به‌صورت نوار از شرق نیشابور تا غرب فرومد گسترش دارد. این نوار توسط دشت نیشابور به دو بخش نامساوی تقسیم می‌گردد. کانی‌زایی گسترده کرومیت در توده‌ی افیولیتی این نوار دارای کرومیت نوع عیار بالا در ایران است که برای مثال می‌توان کانسار فرومد و کانسار گشت را نام برد [۶]. (۲) سنگ- های آتشفشانی در رشته کوه‌های بین سبزوار و قوچان در توده‌ی افیولیتی و منطقه‌ی عباس‌آباد- سرکوب دیده می‌شوند. این سنگ‌ها نسبت به توده‌ی افیولیتی جوانتر هستند (ائوسن- پلیوسن) و در کنار کمبرند افیولیتی یافت می‌شوند. این سنگ- ها دارای آندزیت به سن ائوسن، توده‌های نفوذی داسیتی به سن زمان الیگوسن- پلیوسن، بازالت قلیایی و شوشونیت به سن میوسن- پلیوسن هستند [۷].

روش بررسی

برای بررسی‌های گسترده، عملیات صحرایی به مدت بیست روز به‌منظور برداشت نمونه از واحدهای سنگی، واحدهای دگرسانی، و کانی‌سازی شده در منطقه درخت سجد انجام گردید و طی آن ۲۵۰ نمونه سنگی و ۶۰ نمونه کانسنگ برداشت گردید. به‌منظور بررسی دقیق زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی تعداد ۱۸۴ نمونه برای تهیه مقطع نازک، ۳۰ نمونه برای تهیه مقطع صیقلی و ۲۰ نمونه برای تهیه مقطع نازک صیقلی انتخاب شد. پس از بررسی سنگ‌نگاری مقاطع نازک، ۲۴ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌عمیق منطقه با کمترین دگرسانی یا بدون دگرسانی برای تجزیه اکسیدهای اصلی و اندازه‌گیری مواد فرار (LOI) به روش طیف‌سنجی فلئورسانس پرتوی x (XRF) به شرکت کانساران بینالود در تهران فرستاده شدند. پس از بررسی نتایج اکسیدهای اصلی، ۲۰ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی و دو نمونه از سنگ نیمه‌عمیق منطقه برای تجزیه عناصر فرعی و عناصر خاکی‌نادر به روش طیف- سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) و بر اساس ذوب قلیایی به ارسال شدند.

بررسی ایزوتوپ‌های پایدار که بخش مهمی از بررسی کانسارهاست نیز در این پژوهش انجام شده به‌منظور بررسی و تعیین خاستگاه و شرایط کانی‌سازی، تعداد ۵ نمونه دارای کالکوسیت انتخاب و کالکوسیت‌های جدا شده برای تجزیه



شکل ۱ موقعیت منطقه مورد بررسی بر الف) نقشه ایران [۱۵] و ب) بخشی از نقشه زمین‌شناسی شمال شرق ایران (برگرفته از مراجع [۱، ۱۶، ۱۷]).

هورنبلند آندزیت بازالتی، آندزیت، هورنبلند پیروکسن تراکی آندزیت، هورنبلند آندزیت، هورنبلند تراکی آندزیت، تراکی آندزیت، پیروکسن هورنبلند تراکی آندزیت، و سنگ نیمه‌عمیق پیروکسن هورنبلند مونزودیوریت پورفیری هستند. در منطقه افزون بر سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌عمیق بیان شده، رخنمون توف و سنگ آهک نیز دیده می‌شود (شکل ۲).

واحد آندزیت بازالت پورفیری (الیوین هورنبلند آندزیت بازالتی): گستردگی این واحد در بخش جنوبی و نزدیک به مرکز منطقه دیده می‌شود و دارای روند شمال غربی-جنوب شرقی (NW-SE) است (شکل‌های ۲ و ۳ الف). این واحد دارای بافت مگاپورفیری و پورفیری با زمینه ریزبلور تا متوسط است. درشت بلورهای پلاژیوکلاز شکل‌دار با ماکل چندریختی، هورنبلند (سوخته و سالم) نیمه شکل‌دار و الیوین نیمه شکل‌دار و به مقدار کم کلینوپروکسن شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار در این واحد دیده می‌شود. ایدینگزیتی شدن الیوین‌ها نمایان است. کانی

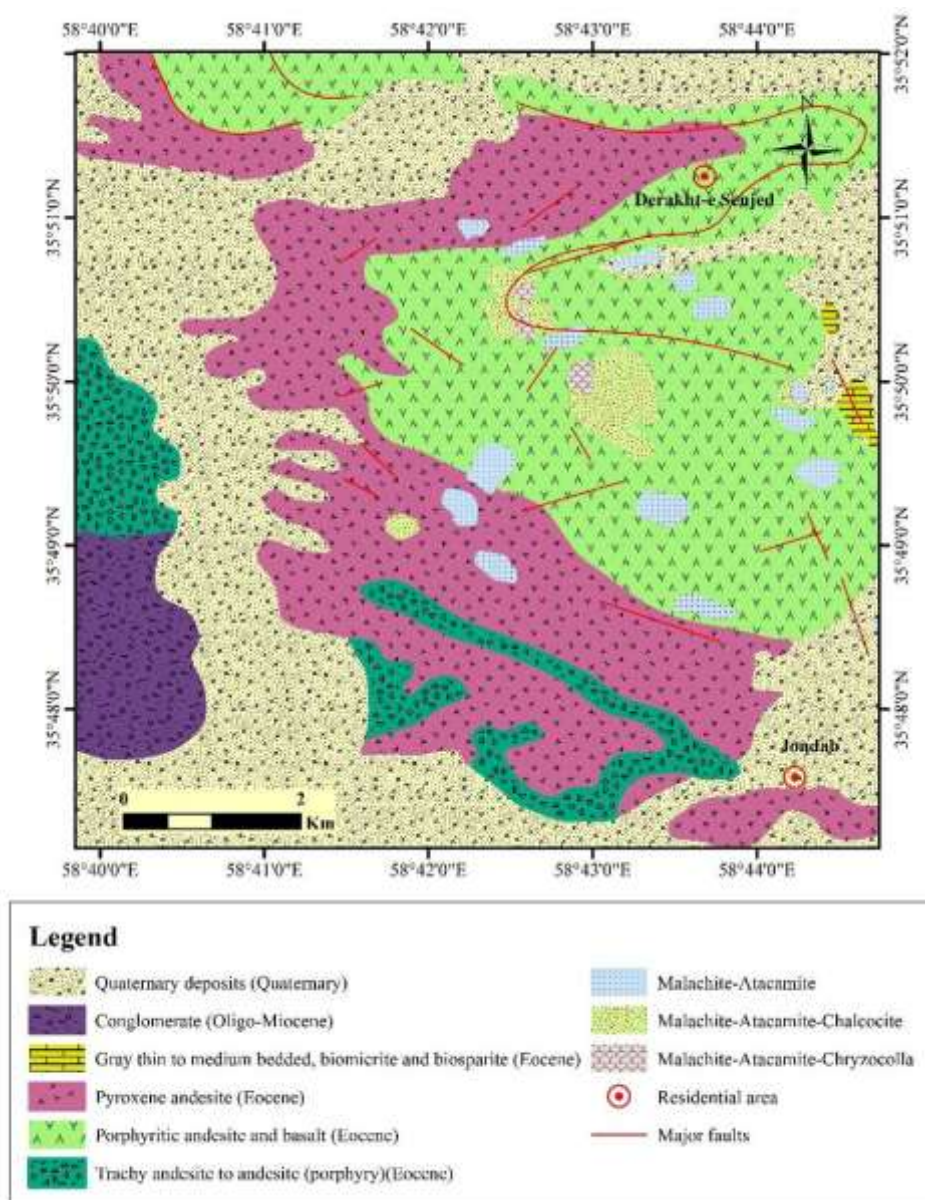
منطقه درخت سنجدر برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ کدکن قرار دارد [۲] و از سویی دیگر، در شمال گسل درونه و پهنه ساختاری سبزوار که زیر پهنه ایران مرکزی است واقع است. سنگ‌های آذرین سری آهکی قلیایی در قطعه لوت، پیرامون گسل درونه، خط درز پهنه سبزوار و سیستان جایی که فروانش نئوتتیس رخ داده است به‌خوبی قابل پیجویی هستند. کمربند ماگمایی سبزوار در شمال شرق ایران دربردارنده سنگ-های ماگمایی گسترده سنوزوئیک است که بیشتر در شمال افیولیت‌های کرتاسه پسین سبزوار- تربت‌حیدریه توزیع شده و همچنین واحدهای افیولیتی را در بخش جنوبی قطع نموده‌اند. این سنگ‌ها اغلب نفوذی‌ها و آتشفشانی‌های بزرگ حدواسط تا اسیدی هستند [۷، ۱۴].

براساس بررسی‌های انجام شده در منطقه، واحدهای رخنمون یافته بیشتر واحدهای سنگ آذرین شامل واحدهای آتشفشانی هورنبلند پیروکسن الیوین آندزیت بازالتی، الیوین

قسمت‌ها، زمینه حالت ریزسنگی نیز نشان می‌دهد. در بیشتر بخش‌ها افزون بر بافت پورفیری، بافت بادامکی نیز دیده می‌شود که حفره‌های آن با کربنات و کمتر با کلریت و اپیدوت پر شده‌اند. بافت فرعی گلومروپورفیری نیز در این واحد وجود دارد. درشت بلور موجود در این سنگ‌ها پلاژیوکلاز شکل‌دار است که در بعضی مقاطع دارای ماکل چندریختی است، کانی-های پیروکسن و هورنبلند نیز در این واحد به مقدار کمتر از ۳ درصد دیده می‌شوند که تبدیل شدن به اکسید آهن را نشان می‌دهند.

های کدر مگنتیت هم به صورت درشت بلور و هم در زمینه سنگ دیده می‌شوند که از لبه‌ها کمی به اکسید آهن تبدیل شده‌اند. در زمینه، بلورهای پلاژیوکلاز دیده می‌شوند. در برخی مقاطع، زمینه و هورنبلند با لبه سوخته تبدیل‌شدگی به کلریت و کربنات را نشان می‌دهند.

واحد آندزیتی (پیروکسن آندزیت): این واحد بیشتر در بخش مرکزی و شمال منطقه گسترده‌تری در سطح نشان می‌دهد (شکل‌های ۲ و ۳ الف). روند این واحد در مرکز منطقه NW-SE و در شمال منطقه دارای روند NE-SW است. بافت این واحد پورفیری با زمینه ریزدانه و شیشه‌ای است که در بعضی



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی نشانگر موقعیت جغرافیایی و نیز واحدهای سنگ‌شناسی، کانی‌زایی‌ها و عوارض زمین‌شناسی موجود.



شکل ۳ تصاویر صحرایی از منطقه مورد بررسی: الف) واحد آندزیتی دربردارنده کانی‌زایی مس و ب) واحد آهکی رخنمونی.

شیل و مارن نیز در این آهک‌ها دیده می‌شود. آهک‌ها دارای روند NW-SE و شیب ۲۵NE درجه به سمت شرق هستند. باتوجه به نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ کدکن و بررسی‌های صحرایی در منطقه، این واحد با گسل روراندگی در کنار سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌عمیق منطقه قرار دارد. این آهک‌ها زیست-میکریت سفید تا خاکستری روشن با سطوح خشن و لایه ضخیم هستند (شکل ۳ ب).

دگرسانی‌های موجود

شناسایی پهنه‌های دگرسانی از مباحث مهم در زمین‌شناسی اقتصادی است. از این‌رو، شناسایی پهنه‌های دگرسانی که ممکن است از نظر زایشی در ارتباط با ذخایر معدنی باشند، گامی مهم برای پی‌جویی ذخایر است و همچنین محیط تشکیل کانسار را می‌توان از روی مجموعه کانی‌های ناشی از دگرسانی بررسی کرد.

نخستین اقدام پیش از ورود به منطقه مورد بررسی، پردازش تصاویر ماهواره‌ای استر بود که این تصاویر تهیه و تصحیح شده بودند. در این پژوهش به منظور تفکیک پهنه‌های دگرسانی، از روش نقشه برداری زاویه طیفی (SAM) استفاده شد. این روش از جمله روش‌های مرسوم رده‌بندی نظارت شده است که با کمترین اختلاف زاویه طیفی پیکسل‌ها، موقعیت کانی‌های پهنه‌های دگرسانی را در تصاویر مشخص می‌کند. در منطقه مورد بررسی، طیف‌های موجود در پیکسل‌های تصویر استر با کتابخانه طیفی دیجیتالی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) موجود در نرم افزار ENVI 4.1 مقایسه شدند. در این بررسی، روش SAM برای کانی‌های چون کائولینیت و مونت‌موریلونیت به‌عنوان شاخص دگرسانی آرژیلیکی، اپیدوت و کلریت برای دگرسانی پروپیلیتی، سرسیت برای دگرسانی

واحد تراکی آندزیت پورفیری (هورنبلند پیروکسن تراکی آندزیت): رخنمون این واحد را در مرکز و شمال منطقه بیشتر می‌توان دید (شکل ۲). روند آن در بخش مرکزی منطقه NW-SE و در سمت شمال NE-SW است. این واحد دارای بافت اصلی مگاپورفیری و پورفیری با زمینه ریزدانه تا متوسط بلور جریانی است و در بعضی بخش‌های زمینه، حالت ریزسنگی و شیشه‌ای نیز دیده می‌شود. در بعضی قسمت‌ها بافت بادامکی که حفره‌ها با کربنات پر شده‌اند و بافت گلومروپورفیری و خال خال نیز در این واحد وجود دارد و دارای درشت بلورهای پلاژیوکلاز شکل‌دار با ماکل چندریختی، سانیدین شکل‌دار با ماکل کالسباد، پیروکسن نیمه شکل‌دار و هورنبلند سوخته شکل‌دار تا نیمه‌شکل است. کانی‌های کدر مگنتیت در زمینه حضور دارند. رگچه سیلیسی با قطر ۰/۱ میلی‌متر در این سنگ دیده می‌گردد.

پیروکسن هورنبلند مونزودیوریت پورفیری: گسترش توده نیمه عمیق پیروکسن هورنبلند مونزودیوریت پورفیری را در بخش شرقی منطقه می‌توان به خوبی دیده نمود (شکل ۲). رگه‌های سیلیسی در این واحد به خوبی دیده می‌شوند. این واحد سنگی دارای بافت مگاپورفیری با زمینه متوسط تا درشت بلور است و در بعضی مقاطع، بافت گلومروپورفیری نیز دیده می‌شود. در زمینه، بلورهای پلاژیوکلاز و به مقدار کمتر فلدسپات قلیایی وجود دارد. درشت بلورهای پلاژیوکلاز شکل‌دار با ماکل چندریختی، فلدسپات قلیایی، هورنبلند شکل‌دار تا نیمه شکل، کلینوپروکسن نیمه‌شکل‌دار، کانی‌های کدر مگنتیت هم به صورت درشت بلور هم در زمینه دیده می‌شوند.

واحد آهکی: سنگ آهک‌های منطقه درخت سنجد در بخش شرقی، و جنوب‌غربی وجود دارند (شکل ۲). میان لایه‌هایی از

دگرسانی کربناتی ضعیف: این دگرسانی بر واحدهای سنگی هورنبلند تراکی آندزیت و تراکی آندزیت منطقه درخت سنجد را در بخش مرکزی اثر داشته است. به طور کلی، حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد بلورهای هورنبلند و به مقدار کمتر پلاژیوکلاز در واحدهای هورنبلند تراکی آندزیت و تراکی آندزیت در بخش مرکزی منطقه به کربنات تجزیه شده اند.

دگرسانی کربناتی ضعیف-پروپیلیتی ضعیف: این دگرسانی در بخش جنوب شرقی منطقه بر واحد الیوین هورنبلند آندزیت بازالت، در شمال غرب بر واحد هورنبلند پیروکسن الیوین آندزیت بازالتی و در بخش شرقی منطقه بر واحد هورنبلند تراکی آندزیت اثر داشته است. پلاژیوکلاز و زمینه حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد به کربنات و حدود ۵ درصد به کانی اپیدوت تجزیه شده‌اند. افزون بر این، درشت بلورهای هورنبلند نیز حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد به کلریت و کربنات تبدیل شده‌اند.

رگه-رگچه‌های سیلیسی: بر اساس بازدیدهای صحرایی، بسیاری از رگه-رگچه‌های سیلیسی با روند شمال شرق-جنوب غرب و شیب تقریبی ۹۰ درجه واحدهای آندزیتی منطقه را قطع کرده‌اند. در بعضی مناطق، این رگه‌ها طولی بیشتر از ۵۰ متر و ضخامت بیشتر از ۳۰ سانتیمتر دارند، اما در بیشتر قسمت‌ها این رگه-رگچه‌ها دارای ضخامتی بین ۱ تا ۲۰ سانتیمتر و طولی بین ۱ تا ۵ متر هستند. این رگه-رگچه‌های سیلیسی بیشتر به رنگ‌های شیری، آبی، صورتی، قرمز و سبز هستند که اغلب به صورت واریزه‌های آگات و ژئود ژاسپروئید که در بعضی نقاط ساخت دندان‌های و شانه مانند دارند دیده می‌شوند. در بعضی بخش‌ها، بافت گل کلمی و حفره‌های پر شده با سیلیس نیز وجود دارند. این رگه-رگچه‌های سیلیسی در واحد پیروکسن هورنبلند مونزودیوریت پورفیری در شرق منطقه و واحدهای هورنبلند پیروکسن الیوین آندزیت بازالتی، تراکی آندزیت و الیوین هورنبلند آندزیت بازالتی و توفها در جنوب و جنوب غرب منطقه فراوانی بیشتری دارند و واریزه‌های بسیاری از سیلیس و کوارتز در این واحدها دیده می‌شود.

آثار و شواهد کانی‌سازی مس در منطقه

آثار فعالیت‌های معدنی قدیمی: شواهد کانی‌سازی مس در منطقه درخت سنجد را می‌توان نخست به صورت آثار شدادی و فعالیت‌های معدنی قدیمی در بخش‌های بسیاری از منطقه دیده کرد. فعالیت‌های دیرین و قدیمی به صورت حفر تونل و چاه در همه منطقه مورد بررسی پراکندگی دارند (شکل ۴). به بیان دیگر، پیشینیان برای پی‌جویی و شناسایی کافی مناطق مستعد

فلیک، کوارتز و کلسیت به عنوان شاخص دگرسانی‌های سیلیسی و کربناتی و کانی‌های هماتیت و گوتیت برای شناسایی کانی‌های اکسید و هیدروکسید آهن در منطقه استفاده شده‌اند. با این پردازش‌ها فقط دگرسانی‌های سیلیسی و کربناتی شناسایی گردیدند که بعد با بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی مشخص شد که دگرسانی سیلیسی به دلیل حضور رگه-رگچه‌های متعدد سیلیس در منطقه مورد بررسی بوده و دگرسانی کربناتی نیز شاخص‌ترین و گسترده‌ترین دگرسانی موجود در منطقه است. دگرسانی‌های کربناتی و سیلیسی در تصویر پردازش شده از بخش‌های مرکزی، شمال غرب و جنوب شرقی منطقه گسترش بیشتری را نشان می‌دهند. مقدار زاویه طیفی به دست آمده برای کلسیت ۰/۷۰۵ و برای کوارتز ۰/۸۰۲ است.

کربناتی شدن: کربناتی‌شدن واحدهای سنگی اصلی‌ترین و مهم‌ترین دگرسانی موجود در منطقه معدنی درخت سنجد است که بسیاری از واحدهای سنگی منطقه دچار آن شده‌اند. بر اساس شواهد صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی، این دگرسانی در بخش‌های مختلف دارای شدت‌های متفاوتی است که بر این اساس، به سه نوع کربناتی شدید، متوسط و ضعیف تقسیم می‌شود که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

دگرسانی کربناتی شدید: این دگرسانی گسترش کمی در منطقه مورد بررسی داشته و بیشتر در بخش‌های مرکزی تا شمال غربی رخمون دارد و به طور گسترده بلورهای پلاژیوکلاز، فلدسپات قلیایی، هورنبلند و زمینه را در واحد آندزیتی، هورنبلند تراکی آندزیت و تراکی آندزیت در شمال و مرکز منطقه تجزیه کرده است. در این واحدها می‌توان تبدیل بلورهای پلاژیوکلاز، هورنبلند و زمینه به کربنات را تا حدود ۵۰ درصد دیده نمود؛ حتی گاهی برخی از بلورهای پلاژیوکلاز به طور کامل تجزیه شده‌اند.

دگرسانی کربناتی متوسط: این دگرسانی در بخش‌های مرکزی، شرقی و جنوب شرقی منطقه گسترش قابل ملاحظه‌ای دارد و به طور عمده بر واحدهای هورنبلند پیروکسن تراکی آندزیت، الیوین هورنبلند آندزیت بازالتی، تراکی آندزیت و پیروکسن هورنبلند مونزودیوریت پورفیری اثر داشته است. در این واحدها، حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد بلورهای پلاژیوکلاز، هورنبلند و زمینه به کربنات تبدیل شده‌اند. در این واحدها مانند دگرسانی شدید کربناتی، حفره‌ها و رگچه‌های کلسیتی متعددی حضور دارند.

شده در منطقه آثار فراوانی از کالکوسیت به خوبی نمایان می‌شود.

کانی‌نگاری بر اساس آثار و شواهد صحرایی، نتایج پراش پرتوی X (XRD) و بررسی‌های میکروسکوپی (برای ۳۰ قطعه صیقلی و ۲۰ مقطع نازک صیقلی تهیه شده از سطح و ترانشه-ها)، کانه‌های موجود در منطقه درخت سنجد شناسایی شدند که در ادامه بیان می‌شوند:

مالاکیت $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$: این کانی در بیشتر واحدهای منطقه حضور گسترده‌ای دارد و بخش زیادی از کانی‌سازی ثانویه منطقه درخت سنجد را شامل می‌شود. مالاکیت در منطقه مورد بررسی به صورت رگه - رگچه‌ای، پرکننده‌ی حفره‌ها و جانشین شده در پلاژیوکلاز دیده می‌شود. این کانه ثانویه مس از تبدیل کالکوسیت شکل گرفته و نشان‌دهنده‌ی پهنه برونزاد و شرایط اکسایشی در منطقه است (شکل ۵ الف) و در شرایط اکسایشی و aCO_2 بالا پایدار است.

آزوریت $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$: این کانی کربناتی مس در مقادیر بسیار کم در بعضی واحدهای سنگی منطقه بیشتر به صورت پراکنده و پرکننده حفره‌ها دیده می‌شود (شکل ۵ الف).

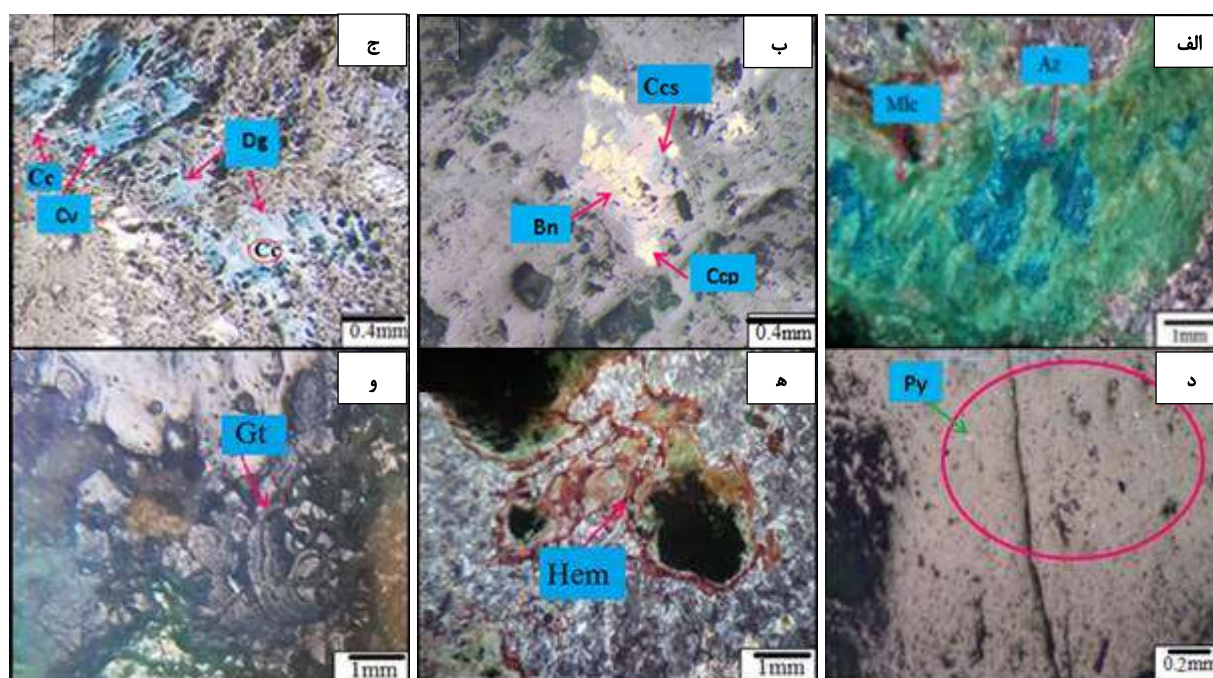
کالکوپیریت CuFeS_2 : کالکوپیریت را می‌توان فقط در تعداد کمی از مقاطع تهیه شده به مقدار کم دید که بیشتر به صورت لکه‌ای و بی شکل به صورت جانشینی و گاهی با بافت اسکلتی همراه با بورنیت و کالکوسیت ثانویه است (شکل ۵ ب). اندازه دانه‌های آن از ۰/۵ تا ۱ میلیمتر متغیر است. این کانه سولفیدی مس در مرحله درونزاد در اثر سیال‌های احیایی تشکیل شده و در مرحله پس از کانی‌سازی، در اثر فرآیندهای برونزایی در حال تبدیل به کانه‌های ثانویه چون کالکوسیت، کوولیت و دیجنیت است (شکل ۵ پ)، که در بعضی نقاط نوعی هم‌رشدی بین این کانه و بورنیت نیز دیده می‌شود.

و دارای کانی‌سازی، اقدام به حفاری با تمرکز بالا (کنارهم) نموده‌اند. تونل‌های موجود در منطقه از نظر گسترش، طول، عرض و شیب متفاوت بوده و اغلب آنها کوچک هستند و برخی نیز گسترش قابل توجهی دارند. براساس گزارش‌های محلی، کوره‌های قدیمی ذوب مس نیز در منطقه و نزدیکی روستای جنداب وجود داشته‌اند که برای استفاده از اراضی تخریب گردیده‌اند [۳]. البته، بر اساس شواهد و بررسی‌های صحرایی می‌توان آثار استفاده از اکسیدهای مس را در بسیاری از تونل‌های حفر شده دیده کرد و وجود سرباره‌های باقیمانده از ذوب نشان‌دهنده‌ی قدمت فعالیت‌های معدن‌کاری قدیمی برای برداشت فلز مس از منطقه است.

آثار و شواهد صحرایی: کانی‌سازی مس دیده شده در منطقه معدنی درخت سنجد گسترده است به طوری که بر بیشتر واحدهای سنگی منطقه اثر داشته است. کانه‌های ثانویه مس شامل مالاکیت، آتاکامیت و به مقدار کمتر آزوریت و همچنین کانی اولیه مس کالکوسیت به صورت پرکننده فضاهای خالی و رگچه‌های کم ضخامت و گاهی آغشتگی، جانشینی و پراکنده، در بیشتر واحدهای سنگی آذرین منطقه دیده می‌شوند. ضخامت این رگچه‌ها در مقیاس صحرایی از حدود کمتر از ۱ میلیمتر تا کمتر از ۱۰ سانتیمتر متغیر است. حفره‌ها، خلل و فرج، درزه و شکاف‌های موجود که سنگ میزبان را در راستاهای مختلف قطع کرده اند به صورت شبکه‌های متراکم نامنظم، فضای مناسب برای نفوذ و ورود محلول‌های دارای مس را فراهم نموده اند. کانی‌سازی در سطح منطقه به‌طور عمده شامل کانی-های مرحله برونزایی است که به صورت کانه‌های کربناتی مالاکیت، آزوریت و هیدروکلر آتاکامیت و کانه‌های سیلیکاتی کریزوکلا در سنگ میزبان دیده می‌شوند، اما در ترانشه‌های زده



شکل ۴ کانی‌زایی مس در منطقه مورد بررسی؛ الف) نمایی از رخنمون کانی‌زایی اکسیدی مس در کنار تونل زیرزمینی معدن‌کاری دیرینه و ب) نمایی دیگر از رخنمون کانی‌زایی اکسیدی مس.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی (در نور بازتابی) از نمونه‌های مربوط به کانی‌زایی مس در منطقه مورد بررسی؛ الف) مالاکیت (Mlc) و آزوریت (Az)، ب) کالکوپیریت (Ccp)، بورنیت (Bn) و کالکوسیت (Cc)، پ) دیژنیت (Dg)، کالکوسیت (Cc) و کوئیت (Cv)، ت) پیریت (Py)، ث) هماتیت (Hem)، ج) گوتیت (Gt).

کالکوسیت موجود در منطقه از نوع اولیه است. این نوع از کالکوسیت در رگه - رگچه‌ها و به صورت پراکنده و به مقدار کمتر به شکل پرکننده‌ی حفره‌ها در سنگ میزبان حضور دارد (شکل‌های ۵ ب و پ). نوع دوم کالکوسیت در منطقه درخت سنجد که در مقادیر جزئی فقط در برخی مقاطع دیده می‌شود، به صورت ثانویه در اثر فرآیندهای برونزایی از کانه‌های سولفیدی اولیه چون بورنیت و کالکوپیریت به صورت جانشینی در آنها ایجاد شده است (شکل‌های ۵ ب و پ).

کاوولیت Cu_2S : این کانه سولفیدی مس بیشتر به رنگ آبی به صورت لکه‌ای و پراکنده در مقاطع دیده می‌شود. کاوولیت از کانی‌های غنی‌شده ثانویه سولفیدی مس در منطقه است. کاوولیت به صورت ثانویه طی مرحله برونزایی بیشتر به صورت جانشینی و بی‌شکل در زمینه سنگ میزبان ایجاد شده است. این کانه جانشین کانی‌های سولفیدی اولیه چون کالکوپیریت، بورنیت و کالکوسیت شده است و در بعضی از مقاطع با رنگ آبی و ناهمسانگردی مسی در همراهی با کالکوسیت دیده می‌شود (شکل ۵ پ).

دیجینیت: این کانه مس با رنگ آبی خاکستری بیشتر کنار کاوولیت‌ها به مقدار بسیار جزئی وجود دارد. این کانه سولفیدی

بورنیت Cu_5FeS_4 : بورنیت یکی دیگر از کانه‌های سولفیدی اولیه در منطقه است که همراه با کالکوپیریت و کالکوسیت ثانویه با بافت عمده جانشینی و به صورت بی‌شکل و پراکنده در برخی مقاطع تهیه شده به مقدار جزئی دیده می‌شود. افزون بر این، این کانه در هم‌رشدی با کالکوپیریت نیز وجود دارد. براساس شواهد موجود، می‌توان بورنیت را یک کانه اولیه همزمان با فعالیت‌های درون‌زاد در نظر گرفت (شکل ۵ ب). این کانه در نتیجه فعالیت‌های برونزایی به کالکوسیت ثانویه، کاوولیت و دیجینیت تبدیل شده است.

کالکوسیت Cu_2S : کالکوسیت یکی از شاخص‌ترین کانه‌های مس و اصلی‌ترین و فراوان‌ترین کانه سولفیدی مس در منطقه درخت سنجد است و بخش اصلی کانی‌سازی سولفیدی را در منطقه تشکیل می‌دهد که هم در صحرا و نمونه دستی و هم در مقاطع به خوبی و فراوان دیده می‌شود. کالکوسیت می‌تواند هم به صورت یک کانه اولیه و هم به صورت ثانویه همراه با بورنیت، کالکوپیریت و پیریت تشکیل گردد. در منطقه درخت سنجد، این کانه همراه با دیگر کانه‌های موجود در رگه - رگچه‌ها، به صورت پراکنده و پرکننده‌ی حفره‌ها در سنگ میزبان دیده می‌شود. کالکوسیت به دو صورت تشکیل می‌شود؛ بخش عمده

آن شامل رگچه‌ها یی با ضخامت کمتر از ۵ سانتی‌متر است. بیشتر کانه‌های موجود در این رگه - رگچه‌ها شامل مالاکیت، آتاکامیت، کریزوکولا و کالکوسیت هستند (شکل ۶).

بافت پرکننده حفره‌ها: یکی از بافت‌های ماده معدنی در بخش کانه‌دار، پرشدن تخلخل و حفره‌ها با کانه مس‌دار است این حفره‌ها هنگام تشکیل سنگ میزبان در آن ایجاد شده‌اند. این فضاها مکان مناسبی برای تمرکز ماده معدنی شده‌اند که عمده‌ترین حالت آن شکل‌های بادامکی هستند. محلول‌های دارای کانه این فضاها را پر کرده‌اند. در این نوع بافت نیز حفره‌ها با کالکوسیت، مالاکیت، کریزوکولا، آزوریت و آتاکامیت پر شده‌اند (شکل ۶).

بافت جانیشینی: در این نوع بافت، سولفیدها و اکسیدهای ثانویه مس طی مرحله برونزایی جانشین سولفیدهای اولیه مس شده‌اند. در این بافت، بین کانه‌های سولفیدی موجود هم‌رشدی‌های زیادی وجود دارد. جانشین شدن کالکوپیریت با بورنیت و کالکوسیت و جانشین شدن بورنیت با کالکوسیت و کوولیت در بعضی مقطع‌ها دیده می‌شود. به طور کلی، کانه‌های سولفیدی ثانویه در مرحله برونزایی مانند کوولیت جانشین سولفیدهای اولیه چون کالکوپیریت، بورنیت و کالکوسیت شده‌اند. در بعضی نمونه‌های دستی و مقاطع، جانیشینی پلاژیوکلاز با مالاکیت به خوبی دیده می‌شود.

بافت پراکنده: این بافت در منطقه درخت سنجد گسترش زیادی ندارد. بعضی کالکوسیت‌های اولیه به صورت نیمه شکل-دار و بی شکل به شکل دانه پراکنده در زمینه سنگ میزبان دیده می‌شوند (شکل ۵ پ).

مس نیز مانند کوولیت طی مرحله برونزایی به صورت جانیشینی در کانه‌های سولفیدی اولیه به ویژه کالکوسیت به مقدار بسیار جزئی دیده می‌شود (شکل ۵ پ).

پیریت FeS_2 : پیریت به عنوان کانه سولفیدی اولیه در منطقه تشکیل شده و مقدار آن در واحدهای منطقه بسیار کم است و فقط در چند مقطع تهیه شده از رگه-رگچه‌ها آثاری جزئی از آن دیده می‌شود. این کانه سولفیدی در نقاط محدودی در زمینه سنگ میزبان آندزیتی بیشتر به شکل دانه پراکنده وجود دارد (شکل ۵ ت).

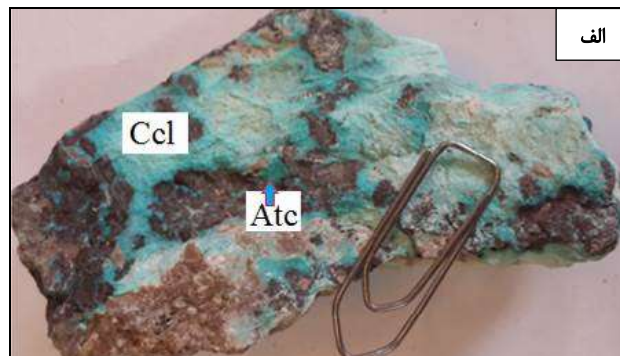
هماتیت Fe_2O_3 : هماتیت در منطقه در اثر فرایندهای ثانویه در بعضی از نمونه‌ها به مقدار کم دده می‌شود (شکل ۵ ث) گوتیت $FeO(OH)$: این کانه نیز به صورت ثانویه با بافت عمده گل‌کلی در بعضی نقاط همراه با کالکوسیت‌ها و هماتیت‌ها به مقدار کمی دیده می‌شود (شکل ۵ ج).

آتاکامیت $CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2$: کانی آتاکامیت نیز با رنگ سبز تیره، آبی و ساختار رشته‌ای به صورت دانه‌ای و توده‌ای در کنار کانی‌های مالاکیت، آزوریت و کریزوکولا در منطقه به چشم می‌خورد (شکل ۶ الف).

ساخت و بافت ماده معدنی

بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، انواع ساخت و بافت‌های در منطقه درخت سنجد شناسایی گردید که در پیشتر نیز به آنها اشاره شد و در ادامه به طور مفصل‌تر بحث می‌شود:

بافت رگه-رگچه‌ای: این بافت مهمترین بافت کانی‌سازی در منطقه و به طور غالب در برگیرنده‌ی ماده معدنی بوده و عمده



شکل ۶ کانی‌زایی مس در منطقه درخت سنجد: الف) کانی‌زایی آتاکامیت و کالکوسیت؛ ب) کانی‌زایی به صورت مس اکسیدی در راستای شکستگی‌ها.

توالی همبرزادی

براساس بررسی‌های انجام شده در مقیاس صحرایی، نمونه دستی و میکروسکوپی و بر پایه ارتباط ساخت و بافت کانه‌های موجود، کانی‌شناسی سنگ درونگیر، توالی همبرزادی کانه‌ها در معدن مس درخت سنجید رسم شد که در شکل ۷ ارائه شده است:

بیشترین کانه‌زایی در واحدهای آندزیتی و هورنبلند پیروکسن تراکی آندزیت رخ داده است. کانی‌سازی در منطقه به شکل چین‌کران است و ترکیب کانی‌شناسی ماده معدنی شامل کالکوسیت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا و آتاکامیت و به مقدار کم کالکوپیریت، بورنیت، کوولیت، دیجنیت است که به صورت رگه - رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی، جانشینی و پراکنده دیده می‌شوند. به طور کلی رخداد کانی‌سازی در منطقه مورد بررسی طی دو مرحله درونزایی (همزمان با کانی‌سازی) و برونزایی (پس از کانیزاسی) رخ داده است.

مرحله کانی‌سازی اولیه درونزایی: گسل‌ها و ساختارهای خطی محل مناسبی برای حمل و حرکت محلول‌های کانه ساز در منطقه بوده‌اند. در مناطق نزدیک به گسل‌ها و شکستگی‌ها و برخوردگاه دو واحد سنگی، مقدار قابل توجهی کانه‌زایی مس دیده می‌شود که با دور شدن از این محل‌ها، کانی‌زایی کم می‌-

شود. در این مرحله، سیال‌های گرمایی دارای کانه در مسیر خود به سمت بالا، در واحد سنگی مناسب که نفوذپذیری بالاتر و شکستگی‌های بیشتری دارد بیشترین کانی‌سازی را انجام داده‌اند. با توجه به ضخامت شکستگی‌ها، بافت، جنس و نفوذپذیری سنگ دیواره و همچنین حجم محلول، محلول کانه-زا در سنگ میزبان از کمتر از یک سانتی‌متر تا نزدیک به یک متر نفوذ کرده است. کانه‌زایی فقط مربوط به گسل‌ها نبوده و در بعضی واحدها، بخش عمده سنگ را آغشته نموده است.

مرحله کانی‌سازی برون‌زاد (پس از کانی‌سازی: در این مرحله و پس از فرآیندهای زمین‌ساختی در منطقه در اثر چین‌خوردگی و بالاآمدگی سنگ میزبان کانی‌سازی، فرآیندهای برونزایی سبب ایجاد تغییراتی در ترکیب کانه‌نگاری سنگ‌ها و تغییر و تبدیل کانه‌های سولفیدی اولیه کالکوسیت، کالکوپیریت، بورنیت به مقدار کم به کانه‌های ثانویه سولفیدی مس چون کالکوسیت ثانویه، کوولیت، دیجنیت و به مقدار بسیار به کانه‌های کربناتی مس (مالاکیت، آزوریت)، سیلیکاتی (کریزوکلا) و هیدروکلردار (آتاکامیت) شده است. کانه‌های اکسیدی و هیدروکسیدی چون همتایت، و گوتیت در شرایط کاملاً اکسایشی به مقدار بسیار کم در بررسی‌های انجام شده در منطقه دیده می‌شود (شکل ۷).

مرحله کانی‌زایی	I	II	III
پیریت			
کالکوپیریت			
بورنیت			
کالکوسیت	██████████	-----	
کوولیت		-----	
دیجنیت		-----	
مالاکیت			██████████
آزوریت			-----
کریزوکلا			-----
آتاکامیت			-----
همتایت			██████████
گوتیت			

شکل ۷ توالی همبرزادی نمایانگر تقدم و تأخیر شکل‌گیری کانسنگ‌های مس و کانی‌های همراه در منطقه مورد بررسی.

بررسی‌های ایزوتوپی

پس از بررسی‌های کانه‌نگاری و به‌منظور تجزیه ایزوتوپی گوگرد، ۵ نمونه دارای کالکوسیت اولیه به دلیل اینکه مهم‌ترین کانی اولیه سولفیدی در کانسار و معدن مورد بررسی است، انتخاب شدند. نمونه‌ها نخست خرد شدند و سپس با میکروسکوپ دوچشمی کالکوسیت‌ها جدا شدند و از هر نمونه حدود چند دهم گرم به دانشگاه اوتاوا فرستاده شد. این نمونه‌ها آنجا پودر و تجزیه ایزوتوپی شدند (جدول ۱). برای تجزیه، هر نمونه در کپسول‌های قلع همراه با کاتالیزور اکسید تنگستن برای گوگرد آلی و غیرآلی واکنش داده، سپس در معرض تجزیه‌کننده عنصری (Elementar، آلمان) قرار گرفته است. گازهای آزاد شده به همراه هلیوم به تجزیه‌کننده عنصری منتقل شدند، تا خالص و جدا شوند، سپس گاز SO_2 در طیف‌سنج جرمی نسبت‌های ایزوتوپی (Thermo Delta Pluse Finnigan، آلمان) تجزیه شده است. ایزوتوپ گوگرد نسبت به استاندارد CDT (ترویلیت کانیون دیابلو) سنجیده شده است و دقت تجزیه‌ها $\pm 0.2\%$ بود.

چنان که گفته شد، آزمایش ایزوتوپی گوگرد بر ۵ نمونه کالکوسیت از نمونه‌های دارای کالکوسیت معدن درخت سنجد به عنوان سولفید اصلی کانسار انجام شد که نتایج این تجزیه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. مقدار ایزوتوپی گوگرد اندازه‌گیری شده از -7.7 تا -9.1 در هزار تغییر می‌کند که تفاوت چندانی بین نمونه‌ها دیده نمی‌شود و گستره این تغییرات کم است. با توجه به گستره‌ی محدود مقدار $\delta^{34}S$ در این نمونه‌ها چنین به نظر می‌رسد که از نظر ایزوتوپی خاستگاه گوگرد کالکوسیت‌ها یکنواخت بوده است و تشکیل کالکوسیت‌های اولیه را می‌توان به یک رویداد نسبت داد و همچنین فرآیندهای تفکیکی بین اجزای گوگرد در سیال کانه‌دار طی کانی‌سازی یکسان بوده است [۲۶، ۲۵]. به دلیل نبود کانی‌هایی چون کوارتز و کلسیت در رگه -رگچه‌های کانی‌سازی و همراه نبودن این کانی‌ها به‌عنوان همبرزاد با کالکوسیت‌ها، امکان اندازه‌گیری دما بر پایه

بررسی سیال‌های درگیر ممکن نبود همچنین کانی سولفیدی دیگر که در تعادل ایزوتوپی با کالکوسیت‌ها باشد در نمونه‌های مورد بررسی وجود نداشت که بتوان براساس آن دمای تشکیل کالکوسیت را محاسبه نمود. البته، با مقایسه این کانسار با کانسارهای شبیه آن در ایران وجهان مانند کانسار مس ورزگ-قاین که دمای تشکیل آن را بر اساس سیال‌های درگیر، علی-زاده در سال ۱۳۹۱ حدود 130 تا 230 درجه سانتی‌گراد گزارش نمود (با میانگین 170 درجه سانتی‌گراد) و بوئنااسپرانزا در شیلی که دمای بدست آمده 112 تا 195 درجه سانتی‌گراد (با میانگین 150 درجه سانتی‌گراد) گزارش گردیده است [۲۷] و همچنین در نظر گرفتن این امر که کالکوسیت‌های اولیه نزدیک به سطح زمین تشکیل شده‌اند و دگرسانی شدت کمی دارد، دمای تشکیل حدود $150^\circ C$ درجه در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن شرایط تشکیل احیایی و دمای حدود 150 درجه برای تشکیل کالکوسیت‌ها، سهم اصلی گوگرد به‌صورت H_2S برای مرحله اصلی سیال در نظر گرفته می‌شود [۲۸]. آثار فیزیکوشیمیایی بر ترکیب ایزوتوپی متفاوت بوده و وابسته به نوع گوگرد غالب است، به‌طوری‌که در سیال‌هایی که گوگرد به‌صورت H_2S حمل می‌شود، این تغییرات اثر زیادی بر ترکیب ایزوتوپی گوگرد ندارد [۲۹].

برای تعیین نسبت ایزوتوپی گوگرد سیال کانه‌ساز در معدن مس درخت سنجد، چنانکه بیان شد دمای تقریبی 150 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. این دما برحسب کلوین (423 درجه کلوین) و مقدار $\delta^{34}S$ کانی کالکوسیت در روابط تفکیک ایزوتوپی [۲۸] قرار داده شد و نسبت ایزوتوپی سیال کانی‌ساز برآورد شد و در نتیجه مقدار $\delta^{34}S$ H_2S به‌صورت زیر محاسبه گردید:

$$1000 \ln \alpha_{Ch-H_2S} = -0.75 (10^6/T^2)$$

$$\Delta Ch-H_2S = \delta^{34}S_{Ch} - \delta^{34}S_{H_2S} \sim 1000 \ln \alpha_{Ch-H_2S}$$

$$\delta^{34}S_{H_2S} = -(\Delta Ch-H_2S - \delta^{34}S_{Ch})$$

جدول ۱ نتایج نسبت ایزوتوپی گوگرد ($\delta^{34}S$) کالکوسیت‌ها در منطقه درخت سنجد.

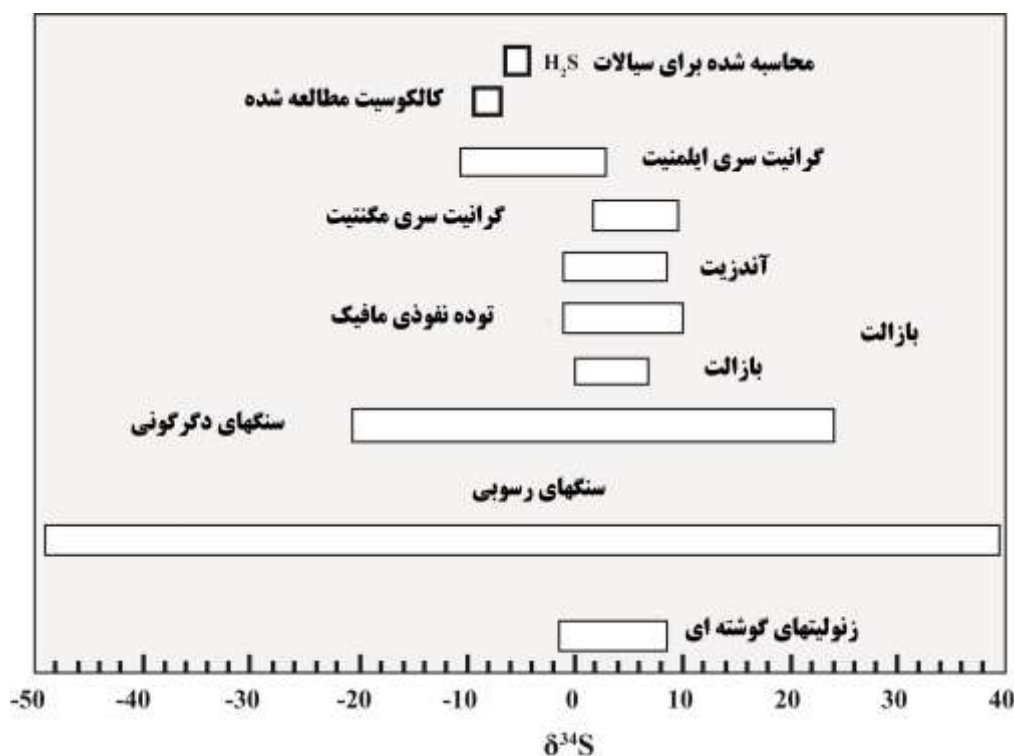
نمونه	$\delta^{34}S$ (%)	$\delta^{34}S_{H_2S}$ سیال (‰)
IS-1	-8.6	-4.4
IS-2	-8.2	-4.0
IS-3	-7.7	-3.5
IS-4	-9.1	-4.9
IS-5	-9.3	-5.2

با کانه‌زایی داشته باشد نیز در منطقه دیده نگردید. از این امر می‌توان نتیجه گرفت که سنگ خاستگاه گوگرد در عمق وجود دارد و ممکن است از سنگ‌های عمیق در پوسته قاره‌ای شکل گرفته باشد و یا محلول کانه ساز برآمده از منطقه دورتری باشد که به این ناحیه مهاجرت نموده است. شکل ۸ مقایسه مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ بدست آمده با سایر واحدهای سنگ‌شناسی را نشان می‌دهد.

ویژگی‌های کانی‌زایی معدن مس درخت سنجد

کانی‌زایی در منطقه معدنی مس درخت سنجد در گدازه‌های آندزیتی و توده نفوذی هم در سطح و هم درون ترانشه‌ها اغلب به صورت رگه-رگچه‌ای و به مقدار کمتر به صورت پرکننده حفره‌ها و پراکنده در سنگ دیده می‌گردد. گسل‌های موجود در منطقه عامل مهمی به عنوان کنترل کننده کانی‌سازی هستند. گسل‌ها برای جابجایی محلول‌های کانه‌زا از یک سو و نهشته شدن آن‌ها از سوی دیگر اثرگذار هستند. در بخش‌هایی از منطقه، شواهدی از حرکت محلول‌های مس‌دار توسط گسل‌ها و ساختارهای خطی کنترل شده وجود دارد که با توجه به ضخامت شکستگی، بافت، جنس و نفوذپذیری سنگ دیواره و همچنین حجم محلول، در سنگ میزبان کمتر از یک سانتی‌متر تا نزدیک به یک متر نفوذ کرده است.

در این روابط، علت نشان دهنده کالکوسیت است. بر این اساس، مقدار $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ از $-3/5$ تا $-5/1$ در هزار متغیر است. این گستره ایزوتوپی می‌تواند در اثر احیای باکتریایی سولفات به سولفید یا ناشی از منبع تشکیل دهنده گوگرد باشد که از آنجا شواهدی برای احیای باکتریایی سولفات به سولفید چون پیریت‌های فرامبوئید در سطح منطقه دیده نشد، به نظر می‌رسد که این گوگرد احیایی ناشی از ویژگی‌های گوگرد منبع باشد. با مقایسه مقدار $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ سیال کانی‌ساز و $\delta^{34}\text{S}$ کانی کالکوسیت منطقه مورد بررسی با مخازن گوگرد در زمین [۳۰] [۳۱]، مشخص می‌شود که خاستگاه گوگرد موجود سنگ‌های آندزیتی منطقه نیستند و در گستره سنگ‌های دگرگونی، رسوبی و یا گرانیتوئیدهای نوع احیایی قرار می‌گیرد. براساس بررسی‌های انجام شده، سنگ‌های گرانیتوئیدی نوع اکسایشی مقدار $\delta^{34}\text{S}$ مثبت و سنگ‌های گرانیتوئیدی احیایی مقادیر منفی از ۱ تا ۱۳- در هزار را نشان می‌دهند [۱۳]. باتوجه به بررسی‌های انجام شده، برای واحدهای نیمه عمیق منطقه نیز، بر اساس $\delta^{34}\text{S}$ محاسبه شده برای سیال کانه‌ساز، خاستگاه گوگرد سیال کانه‌ساز نیست. سنگ دگرگونی و هیچ نوع دگرگونی در سنگ‌های آندزیتی منطقه دیده نشد و همچنین واحد رسوبی که بتواند خاستگاه گوگرد موجود باشد و ارتباطی



شکل ۸ نمودار گوگرد ($\delta^{34}\text{S}$) برای نمونه‌های تجزیه شده در منطقه مورد بررسی و مقایسه این نسبت با سایر واحدهای سنگ‌شناسی.

بودن مقدار سولفید، به‌جای کانی کالکوسیت کانی‌هایی چون انارژیت و لوزونیت تشکیل می‌شدند). در این کانی‌سازی، سیال‌های نسبت خنثی تا قلیایی و با پتانسیل اکسایش-کاهش (Eh) پایین و فقیر از گوگرد و آهن در تشکیل کانی‌های اولیه نقش دارند (کالکوسیت شرایط احیایی و کربنات شرایط قلیایی را نشان می‌دهند) و با توجه به نبود دگرسانی بسیار گسترده در منطقه، نسبت سیال به سنگ پایین است. بر اساس داده‌های ایزوتوپی گوگرد و همچنین ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و شواهد صحرایی که پیشتر بیان گردید، سنگ‌های آندزیتی و سنگ نیمه عمیق منطقه نمی‌توانند خاستگاه کانی‌سازی باشند، از این رو، سیال‌های دارای مواد کانه‌دار با ویژگی‌هایی که اشاره شد می‌توانند از محل دیگری شکل گرفته و به این ناحیه مهاجرت کرده و در فضاهای مناسب ته‌نشین شده باشند.

برداشت

در این پژوهش، بر اساس بررسی‌های مختلف زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی گدازه‌های آتشفشانی و توده نیمه عمیق منطقه، دگرسانی، کانی‌زایی، زمین‌شیمی مناطق کانه‌زا، بررسی ایزوتوپ پایدار گوگرد کانی کالکوسیت و همچنین مقایسه این کانسار با بعضی مدل‌های کانی‌سازی مس، نتایج زیر به دست آمد:

- بر اساس بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی در منطقه درخت سنجد، سنگ آهک، توف، ماسه‌سنگ توفی و واحدهای بازالتی و آندزیتی دیده می‌شود که این واحدهای آندزیتی بر اساس نام‌گذاری به روش ترکیب کانی‌شناسی و مودال سنگ و به ترتیب زمان نسبی به واحدهای هورنبلند پیروکسن الیوین آندزیت بازالتی، الیوین هورنبلند آندزیت بازالتی، آندزیت، هورنبلند پیروکسن تراکی آندزیت، هورنبلند تراکی آندزیت، تراکی آندزیت، پیروکسن هورنبلند تراکی آندزیت تقسیم می‌شوند، همچنین بر اساس این بررسی‌ها در منطقه سنگ نیمه عمیق پیروکسن هورنبلند مونزودیوریت پورفیری شناسایی گردید. بافت غالب در سنگ‌های آتشفشانی و نیمه عمیق منطقه پورفیری و مگاپورفیری است. سنگ آهک‌ها توسط گسل روراندگی بر سنگ‌های آتشفشانی قرار گرفته‌اند.

- بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی مشخص نمود که اصلی‌ترین دگرسانی موجود در منطقه دگرسانی کربناتی واحدهای آتشفشانی و نیمه عمیق است که شدت‌های متفاوت دارد و به سه دگرسانی کربناتی شدید، متوسط و ضعیف تقسیم

در این مناطق در نزدیک گسل‌ها، شکستگی‌ها و برخوردگاه دو واحد، میزان قابل توجهی کانه‌زایی و دگرسانی کربناتی در واحد زیرین دیده می‌شود که با دور شدن از محل گسل و حرکت بر سطح واحد بالایی، مقدار آن کاهش می‌یابد. اگرچه گسل‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌ها مهم‌ترین عامل کانی‌زایی هستند، اما حضور کانی‌های مس‌دار محدود به لبه‌ها و پهنه‌های گسله نیست و در افق‌های معینی، بیشتر واحد آتشفشانی را آغشته کرده‌اند. عمده کانی‌زایی را رگچه‌هایی با عرض کمتر از ۵ سانتی‌متر تشکیل می‌دهند، اما در بعضی بخش‌ها، کانه‌زایی به‌صورت پراکنده حفره‌ها، پراکنده و جان‌شینی نیز وجود دارد. در واحدهای با درزه‌ها، شکستگی‌ها، تخلخل و نفوذپذیری بیشتر، این کانی‌زایی به مقدار بیشتر و اقتصادی‌تر دیده می‌شود (مانند واحد آندزیتی که بین کارگران معدن به گوشته قرمز معروف است و واحد هورنبلند پیروکسن تراکی آندزیت). کانی‌زایی در معدن درخت سنجد به‌صورت چینه‌کران بوده و در دو مرحله رخ داده است. در مرحله اول کانه‌زایی، کانی‌های درون‌زاد منطقه شامل کالکوسیت و به مقدار کم بورنیت، کالکوپیریت و به مقدار جزئی پیریت نزدیک سطح زمین و با فرایندهای گرمایی تشکیل شده‌اند. در مرحله بعد، کانی‌های غنی‌شده ثانویه ناشی از فرایندهای برون‌زایی چون کانی‌های مالاکیت، آتاکامیت، کریزوکولا، آزوریت، به مقدار کم گوتیت، هماتیت، کالکوسیت ثانویه، دیجنیت و کوولیت تشکیل شده‌اند. از دیگر ویژگی‌های معدن مس درخت سنجد وجود دگرسانی ناحیه‌ای و محلی بیشتر کربناتی و کمتر پروپیلیتی و رگه-رگچه‌های سیلیسی پس از کانه‌زایی است.

نوع و خاستگاه احتمالی کانی‌زایی

بر اساس آنچه در مورد کانی‌زایی مورد نظر بیان شد، این کانی‌زایی در منطقه درخت سنجد بیشترین شباهت را به کانسارهای نوع مانتو شیلی دارد، اما خاستگاهی را که برای کانسارهای نوع شیلی در نظر گرفته شده است را نمی‌توان به دلایلی که گفته شد به کانی‌زایی مس درخت سنجد تعمیم داد. کلمه مانتو نشان دهنده شکل کانی‌زایی است در نتیجه، کانه‌زایی معدن مس درخت سنجد را بر اساس روزادی بودن آن، داشتن کانی سولفیدی اصلی اولیه درون‌زاد که به‌طور عمده کالکوسیت است، نبود پیریت و کانی‌های دارای آهن و نیز وجود دگرسانی کربناتی و تشکیل آن در اعماق کم، می‌توان یک کانسار گرمایی با سولفیدشدگی و آهن پایین در نظر گرفت (در صورت بالا

می‌شود. بالاترین شدت دگرسانی در واحد آندزیتی دیده می‌شود. به مقدار کم دگرسانی پروپیلیتی نیز در منطقه وجود دارد.

- کانی‌زایی در منطقه درخت سنجد بیشتر به صورت رگه-رگچه‌ای است و در بعضی واحدها، به صورت پراکنده حفره‌های خالی، پراکنده و جانشینی مالاکیت در پلاژیوکلازها نیز دیده می‌شود. در بخش‌هایی از منطقه، شواهدی وجود دارد که محلول‌های که دارای مس از گسل‌ها، درزه‌ها، شکستگی‌ها و برخوردگاه دو واحد موجود در منطقه عبور نموده‌اند و بسته به ضخامت شکستگی، بافت، جنس و تخلخل سنگ دیواره و همچنین حجم محلول از کمتر از یک سانتی‌متر تا یک متر محلول نفوذ و کانی‌زایی نموده است. در این مناطق در نزدیک گسل‌ها و در واحد زیرین، میزان قابل توجهی کانی‌زایی و دگرسانی کربناتی دیده می‌شود. اگرچه گسل‌ها و ساختارهای خطی مهم‌ترین عامل‌های کانی‌زایی هستند، اما کانی‌زایی فقط مربوط به این‌ها نیست و کانی‌زایی در منطقه به صورت پراکنده، پراکنده حفره‌ها و جانشینی در واحدهای آذرین دیده می‌شود. عمده‌ترین بافت موجود کانی‌زایی، رگچه‌هایی با قطر کمتر از ۵ سانتی‌متر هستند.

- برخی واحدها چون واحد آندزیتی و واحد هورنبلند پیروکسن تراکی آندزیت دارای شکستگی، تخلخل و نفوذپذیری بیشتری هستند، کانی‌زایی در این واحدها بیشتر و اقتصادی‌تر است.

- کانی‌زایی در معدن مس درخت سنجد به شکل چینه‌کران و طی دو مرحله رخ داده است. در مرحله اول کانی‌های درون‌زاد منطقه شامل کالکوسیت، به مقدار کم بورنیت، کالکوپریت و مقدار جزئی پیریت توسط محلول‌های گرمابی در نزدیک سطح زمین تشکیل شده‌اند. در مرحله بعدی، کانی‌های ثانویه چون مالاکیت، آتاکامیت، کریزوکولا، آزوریت، مقدار کم گوتیت، کالکوسیت ثانویه، دیجنیت، مس طبیعی و کوولیت با فرایندهای سطحی و آب‌های جوی شکل گرفته‌اند.

- بر اساس بررسی‌های ایزوتوپی گوگرد، مقدار $\delta^{34}\text{S}$ کالکوسیت از ۷/۷- تا ۹/۳- در هزار و مقدار $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ سیال ۳/۵- تا ۵/۲- در هزار است که با مقایسه این مقادیر با مقدار $\delta^{34}\text{S}$ مخازن سنگی متفاوت گوگرد در زمین مشخص می‌شود که خاستگاه گوگرد از سنگ‌های آتشفشانی و نیمه عمیق منطقه نیست و در گستره سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و یا گرانیتوئیدهای نوع احیایی قرار می‌گیرد. با توجه به نبود

سنگ‌های رسوبی گوگرددار، سنگ‌های دگرگونی و همچنین گرانیتوئیدهای احیایی در منطقه مشخص می‌شود که گوگرد از محل دیگری به احتمال بسیار از سنگ‌های عمیق پوسته قاره-ای شکل گرفته و به این مکان توسط محلول‌های کانه‌دار حمل شده است.

- خاستگاه مس در منطقه درخت سنجد با توجه به بررسی‌های ایزوتوپی گوگرد و همچنین ویژگی‌های کانی‌زایی و سنگ-های آذرین منطقه در ارتباط با سنگ‌های آتشفشانی و نیمه-عمیق نیست و سیال‌های دارای مواد کانه‌دار می‌توانند از محل دیگری (به احتمال بسیار سنگ‌های عمیق‌تر پوسته قاره‌ای) شکل گرفته و به این ناحیه مهاجرت کرده و در فضاها مناسب ته‌نشین شده باشند.

- بررسی معدن مس درخت سنجد از این رو که در زیرپهنه سبزوار قرار دارد و در این زیرپهنه نهشته‌های معدنی متعدد مس وجود دارند، می‌تواند به‌عنوان یک الگوی اکتشافی جدید در این پهنه سبزوار معرفی گردد و در نتیجه به پی‌جویی کانسارهای مشابه منجر شود.

قدردانی

نویسندگان مراتب سپاسگزاری و قدردانی خود را از افرادی که در مراحل مختلف شامل عملیات صحرایی، کارهای آزمایشگاهی و تهیه مقاطع میکروسکوپی، بررسی و تفسیر مقاطع و تجزیه‌ها و نیز نگارش مقاله مشارکت نموده‌اند، به جای می‌آورند. همچنین از عوامل مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی و داوران محترم که نقدهای دقیق و سازنده آن‌ها سبب ارتقای کیفی این مقاله شده است، قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Vaezei Pour M.J., Alavi Tehrani M.J., Behrooz A., "The geological Map of Torbat-e Heidarieh (in 1:250000 scale)" The geological and exploration Organization of Iran, Tehran, 1992.
- [2] Naderi Mighan N., Tarshizian H., "The geological Map of Kadkan (in 1:100000 scale)", The geological and exploration Organization of Iran, Tehran, 1998.
- [3] Saadat S., "The final report of exploration in Golcheshmeh Cu mineralization", The organization of Industry, Mines and Trades of the Khorasan-e Razavi Province, (2012) 350.
- [4] Najmi F., "Geology, alteration, mineralization and geochemical studies in Golcheshmeh Cu mine,

Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 18 (2010) 347-370.

[15] Aghanabati S.A., "The Geology of Iran", Geological Survey of Iran. (2004) 600p.

[16] Tatavousian S.H., and Zohrehbakhsh, A., "The geological map of Sebzehvar (1:250000)", Geological survey and mineral exploration of Iran, Tehran (1993).

[17] Afsharharb A., Aghanabati A., "The geological map of Mashhad (1:250000)", Geological survey and mineral exploration of Iran, Tehran (1986).

[18] Ghorbani M., "Geology of Iran", ArianZamin Publication, Tehran, (2012b) 569.

[19] Lindenberg, H.G., Jacobshagen, V., "Post-Paleozoic geology of the Taknar Zone and adjacent areas (NE Iran, Khorasan). Report of Geodynamic Project (Geotraverse) in Iran", 51 (1983).

[20] Jamshidi K., Ghasemi H., Sadeghian M., "Petrology and geochemistry of the Sabzevar post-ophiolitic high silica adakitic rocks", Petrological Journal, 2014; 5(17): 51-68.

[21] Jamshidi Kh., Ghasemi H., Troll V.R., Sadeghian M., Dahren B., "Magma storage and plumbing of adakite-type post-ophiolite intrusions in the Sabzevar ophiolitic zone, NE Iran", Journal of Solid Earth 6: 49-72. doi:10.5194/se-6-49-2015.

[22] Mousivand F., Tashi M., Ghasemi H., "Nakhlak (Salamrud) manganese mineralization in the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence, southeast of Shahrood, Sabzevar subzone", Advanced Applied Geology, 2017; 7(4): 51-65. doi: 10.22055/aag.2018.20811.1654

[23] Ghasemi H., Kazemi Z., Mousivand F., Griffin W., "Whole-rock Geochemistry and Mineral Chemistry of the Late Cretaceous Dacites in SW Sabzevar: constrain on their origin and tectonic setting" Petrological Journal, 2018; 9(3): 79-100. doi: 10.22108/ijp.2018.105937.1049

[24] Ghasemi H., Hedayaty Kharagh S. N., Kazemi Hassanvand Z., "Mineral chemistry and physical conditions of crystallization in Filshour and Goft dioritic intrusions, Southwest of Sabzevar", www.ijcm.ir 2019; 27 (3) :667-682

[25] Carrillo-Rosúa J., Boyce A.J., Morales-Ruano S., Morata D., Roberts S., Munizaga F., Moreno-Rodríguez V., "Extremely negative and inhomogeneous sulfur isotope signatures in Cretaceous Chilean manto-type Cu-(Ag) deposits, Coastal Range of central Chile", Ore Geology Reviews 56 (2014) 13-24.

south of Neyshabour", M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, (2015) 128.

[5] Entezari Harsini A., Mazaheri S.A., Saadat S., "Petrography, mineralogy, alteration zones and geochemical exploration in Golcheshmeh Area, East of Iran", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 23 (4) (2016) 639-650.

[6] Ghorbani M., "The Economic Geology of Iran", Springer Publication (2012a) 567p.

[7] Spies O., Lensch G., Mihem A., "Geochemistry of the post-ophiolitic Tertiary volcanics between Sabzevar and Quchan (NE Iran)", Report Geology of Mining Survey Iran, 51 (1983) 247-266.

[8] Shafaii Moghadam H.S., Rossetti F., Lucci F., Chiaradia M., Gerdes A., Lopez Martinez M., Ghorbani G.H., Nasrabad M., "The calc-alkaline and adakitic volcanism of the Sabzevar structural zone (NE Iran): implications for the Eocene magmatic flare-up in Central Iran", Lithos, 248-251 (2016) 517-535.

[9] Sengör A.M.C., "Tectonics of the Tethysides: Orogenic collage development in a collisional setting", Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 15 (1987) 213-244.

[10] McCall G. J. H., "The geotectonic history of the Makran and adjacent area of Southern Iran", Journal of Asian Earth Science, 15 (1997) 517-531.

[11] Bagheri S., Stampfli G.M., "The Anarak, Jandaq and Posht-e- Badam metamorphic complexes in central Iran: new geological data, relationships and tectonic implications", Tectonophysics, 451 (2008) 123-155.

[12] Rossetti F., Nasrabad M., Vignaroli G., Theye T., Gerdes A., Razavi M.H., Vaziri H.M., "Early Cretaceous migmatitic mafic granulites from the Sabzevar range (NE Iran), implications for the closure of the Mesozoic peri-Tethyan oceans in central Iran", Terra Nova, 22 (2010) 26-34.

[13] Rossetti F., Nasrabad M., Theye T., Gerdes A., Monié P., Lucci F., Vignaroli G., "Adakite differentiation and emplacement in a subduction channel: The late Paleocene Sabzevar magmatism (NE Iran)", Geological Society of America Bulletin, 126 (2014) 317-343.

[14] Ghasemi H., Sadeghian M., Khan Alizadeh A.R., Tanha A., "Petrology, geochemistry and radiometric ages of high silica adakitic domes of Neogene continental arc, south of Quchan",

- [29] Ohmoto H., Goldhaber M.B., "Sulfur and carbon isotopes, In: Barnes H.L., eds., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*", John Wiley and Sons, (1997) 517-611.
- [30] Hoefs J., "Stable isotope geochemistry", 5th ed., Berlin: Springer-Verlag, (2009) 285.
- [31] Seal R., "Sulfur Isotope Geochemistry of Sulfide Minerals", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61 (2006) 633-677.
- [26] Rollinson H.R., "Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation", Pearson-Prentice Hall, London, (1993) 352.
- [27] Ruiz C., Aguilar F.A., Egert E., Seeano M., "Strata-bound copper sulphide deposits of Chile", *Society of Mining Geology of Japan, Special Issue*, 3 (1971) 252-260.
- [28] Ohmoto H., Rye, R.O., "Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes H.L., eds., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*", John Wiley and Sons, (1979) 509-567.