

کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و سیال‌های درگیر در کانسار آهن اسکارن کرات، سنگان، شمال شرق ایران

هانیه رحیمی*، محمد یزدی، کاظم قلی زاده

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۵/۳۱، نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۸/۲۱)

چکیده: کانسار آهن کرات در کنار مجموعه معادن سنگان در شمال شرق ایران قرار دارد. واحدهای سنگی رخنمون یافته در این منطقه شامل هورنفلس، سنگ‌آهک دگرگونه تا مرمیت، ماسه‌سنگ، لای سنگ و شیل با میان‌لایه‌های مارن، شیل و مارن، کنگلومرای قرمز رنگ ضخیم‌لایه، گرانیات و نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر هستند. نفوذ توده گرانیات در واحدهای رسوبی منجر به تشکیل کانسارهای آهن در لبه توده شده است. کانه‌های فلزی شامل مگنتیت، هماتیت، گوتیت، لیمونیت و به مقدار کم کانی‌های سولفیدی چون پیریت و کالکوپیریت هستند. بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که همبستگی زمین‌شیمیایی قوی بین عناصر نیکل، منیزیم و وانادیم با کانی‌سازی آهن وجود دارد که بیانگر خاستگاه ماگمایی کانسار آهن کرات است. به‌منظور تعیین ویژگی‌های سیال کانه‌ساز کانسار آهن اسکارن کرات، سیال‌های درگیر در رگه‌های کوارتز بررسی شدند. بر پایه ریزدماسنجی انجام شده نیز مشخص شد که سیال‌های درگیر بیشتر از نوع دوفازی غنی از مایع (L+V) با شوری کم تا متوسط (۴/۴۸ تا ۱۶/۴۲ درصد وزنی نمک) و گستره دمای همگن‌شدگی ۲۰۰ تا ۳۹۰ درجه سانتیگراد هستند. براساس داده‌های صحرایی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و سیال‌های درگیر در کانسار کرات، خاستگاه سیال‌های ماگمایی-جوی و دگرگونی بوده و عامل اصلی نهشت کانه‌ها در این کانسار، آمیختگی هم‌دما و رقیق-شدگی سیال‌های ماگمایی-دگرگونی در اثر آمیختگی با آب‌های سطحی است. به احتمال بسیار فاز اصلی کانی‌سازی در مرحله اسکارن پسروده رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شیمی؛ سیال‌های درگیر؛ اسکارن؛ کرات؛ سنگان؛ شمال شرق ایران.

مقدمه

بررسی‌های بسیاری در قالب طرح‌های زمین‌شناسی و اکتشافی و پایان‌نامه‌های دانشجویی انجام شده است [۲-۱۹]. در این پژوهش، کانی‌شناسی، زمین‌شیمیایی، ریزدماسنجی سیال‌های درگیر و سرانجام خاستگاه کانسار کرات بررسی شده است.

روش بررسی

برای انجام این پژوهش، طی عملیات صحرایی تعداد ۷۱ نمونه سنگی از واحدهای رخنمون یافته به منظور بررسی‌های سنگ-شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی برداشت شد و تعداد ۳۰ مقطع نازک، ۱۶ مقطع نازک-صیقلی و ۶ مقطع صیقلی از آنها تهیه شد. به منظور تجزیه عناصر اصلی، فرعی و کمیاب

کانسار آهن کرات در جنوب شرقی شهر مشهد و ۲۸ کیلومتری شمال شرقی معدن سنگان در گستره طول‌های شرقی $60^{\circ}31'$ تا $3.53'34^{\circ}33'$ و عرض‌های شمالی $34^{\circ}31'11.18'$ تا $9.78'34^{\circ}32'$ در نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ تایید واقع است. منطقه مورد بررسی با توجه به تقسیم‌بندی پهنه‌های رسوبی-ساختاری عمده ایران، در شمال شرق خرده قاره ایران مرکزی قرار دارد. تاکنون بررسی جامع اکتشافی در کانسار سنگ آهن کرات انجام نشده و اطلاعات بیشتر محدود به تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ تایید است [۱]. البته در مناطق معدنی کنار کانسار کرات از جمله معدن معروف سنگ آهن سنگان

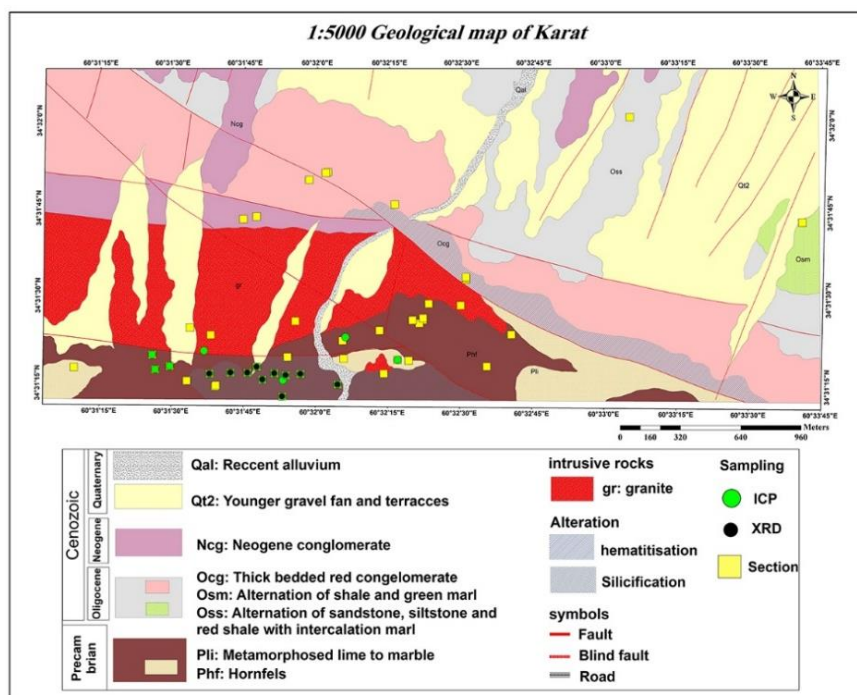
واحدهای سنگی در نقشه ۱:۵۰۰۰ از قدیم به جدید عبارتند از واحد هورنفلس (Phf)، واحد سنگ آهک دگرگونه تا مرمریت (Pli)، واحد ماسه سنگ، لای سنگ و شیل قرمز رنگ با میان لایه‌های مارن (Oss)، واحد شیل و مارن سبز رنگ (Osm)، واحد کنگلومرای قرمز رنگ ضخیم لایه (Ocg)، واحد کنگلومرا (Ncg)، واحد گرانیت (gr) و نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر (Qt2) در ادامه واحدهای سنگی رخنمون یافته در کانسار آهن کرات به ترتیب سنی از قدیم به جدید توصیف می‌شوند (شکل ۱).

واحد هورنفلس (Phf): این واحد سنگی شامل سنگ‌های آواری در حد ماسه‌سنگ، لای سنگ، شیل و مارن است که در اثر گرمای ناشی از توده‌های نفوذی در حد ضعیف تا متوسط دچار دگرگونی از نوع کناری شده است. سن این واحد سنگی پروتروزوئیک پسین در نظر گرفته می‌شود. ماهیت کربناتی سنگ‌های سازنده این واحد و هجوم سیال‌های ناشی از تبلور توده گرانیتی موجب کانی سازی اسکارن در بخش‌هایی از این واحد شده است (شکل ۲ الف).

برای تعیین غلظت عناصر کانه‌ساز، تعداد ۱۷ نمونه به روش طیف‌سنجی نشر نوری پلاسما جفت شده القایی (ICP-OES) در آزمایشگاه کانساران بینالود تجزیه شدند. همچنین به منظور بررسی سیال‌های درگیر از نمونه‌های برداشت شده از رگه‌های کوارتزی همراه بخش کانی‌سازی در کانسار آهن کرات، تعداد سه مقطع دوبر صیقل مناسب تهیه شد. همه مقاطع در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس تهران سنگ‌نگاری شدند. پس از آن، بررسی‌های کامل ریزدماسنجی با میکروسکوپ Leitz با صفحه گرم کننده و سرد کننده لینکام مدل THMCG 600 با گستره‌ی دمایی ۱۹۶- تا ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد.

سنگ شناسی

کانسار کرات بخشی از چارگوش ۱:۲۵۰،۰۰۰ زمین شناسی تایباد است. به‌منظور انجام بررسی‌های اکتشافی، نقشه ۱:۵۰۰۰ زمین‌شناسی کانسار آهن کرات با همکاری شرکت گیتی فراز اطلس که بخشی از مجموعه معدنی کاپر استار است، تهیه شد. براساس پیمایش‌های صورت گرفته و نقشه تهیه شده،



شکل ۱ نقشه زمین شناسی ۱:۵۰۰۰ تهیه شده از منطقه کرات.



شکل ۲ الف) نمایی از واحد هورنفلس (دید به سمت شرق)؛ ب) نمایی نزدیک از همسایگی واحد آهک دگرگونه شده با واحد هورنفلس (دید به سمت شمال)؛ پ) همبری واحد Oss با واحد گرانیت به صورت گسله (دید به سمت شمال)؛ ت) رخنمون واحد Osm (دید به سمت شمال)؛ ث) همبری واحد آهک با واحد کنگلومرا به صورت گسله (دید به سمت شمال)؛ ج) واحد گرانیت در همبری با کانسار آهن (دید به سمت شمال شرق)

کلسیت) و کوارتز تشکیل می‌دهند و بافت غالب سنگ بلورین هم اندازه است (شکل ۳ ب).

واحد ماسه سنگ، لای سنگ و شیل قرمز رنگ با میان لایه‌های مارن (Oss): این واحد سنگی شامل سنگ‌های رسوبی آواری بوده که اندازه ذرات تشکیل‌دهنده آن‌ها از رس تا ماسه و درشت‌تر در تغییر است. این واحد را بر اساس شواهد موجود می‌توان سازند قرمز پایینی و سن آن را اولیگوسن پسین در نظر گرفت (شکل ۲ پ). در مقطع میکروسکوپی این واحد، اجزای اصلی سازنده سنگ را خرده‌سنگ‌ها، کوارتزهای تک بلور، بسبلور، خرده‌های فسیلی و پلاژیوکلاز تشکیل می‌دهند؛ برخی از خرده سنگ‌ها

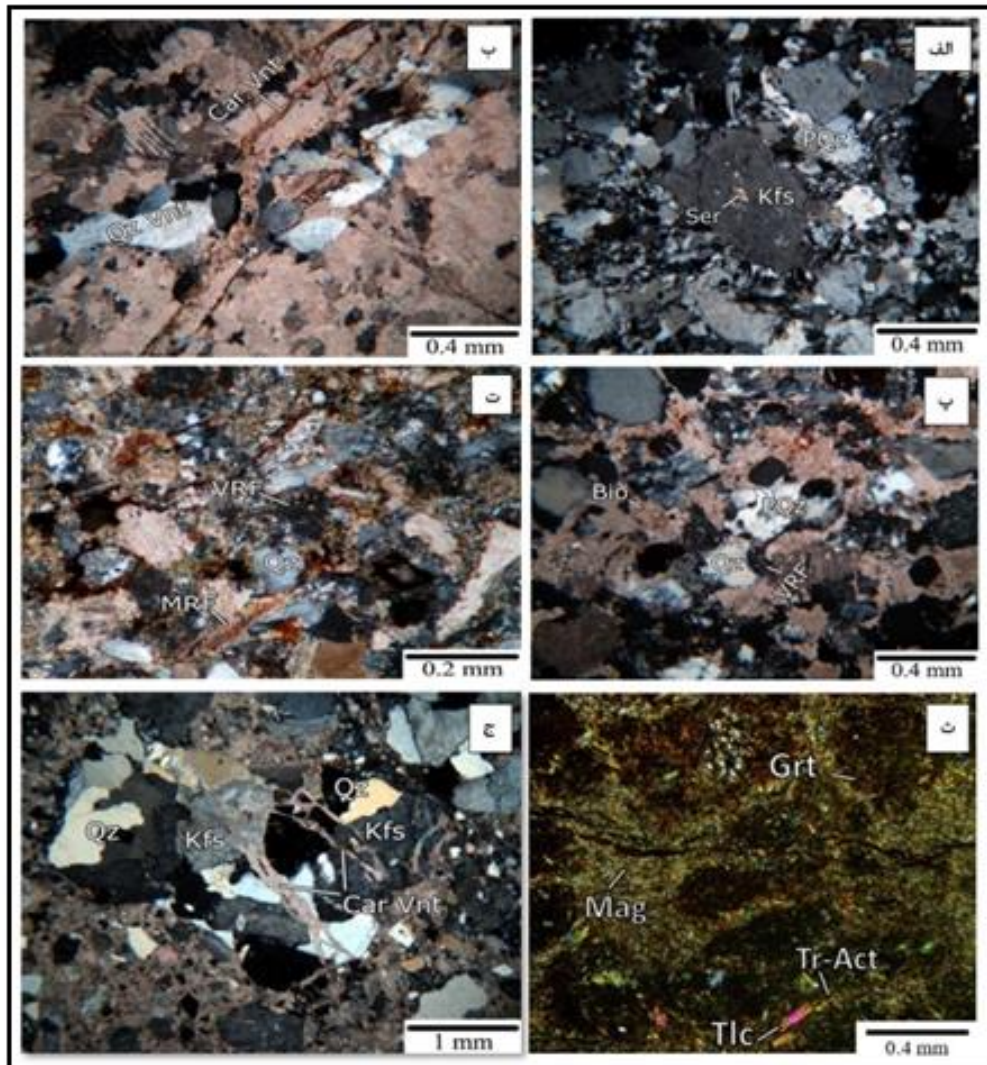
در مقطع میکروسکوپی این واحد، درشت بلورهای کوارتز و فلدسپار در زمینه بلوری دیده می‌شوند که سبب شکل‌گیری بافت پورفیری در سنگ ریولیت شده‌اند و بلورهای فلدسپار با دگرسانی‌های بسیار ضعیف رسی و سریسیتی دیده می‌شوند (شکل ۳ الف).

واحد سنگ آهک تا مرمریت (Pli): این واحد سنگی شامل سنگ‌های کربناتی کلسیتی و دولومیتی است که در اثر عوامل ثانویه و دگرگونه ساز دچار باز تبلور شده‌اند. واحد Pli میان- لایه‌های قابل تفکیک موجود در واحد Phf بوده و از نظر سنی با آن‌ها هم‌رده است (شکل ۲ ب). در مقطع میکروسکوپی این واحد، کانی‌های اصلی سازنده سنگ را بلورهای کربنات

نظر سنی این واحد را با توجه به شواهد موجود می‌توان بخش زیرین سازند قرمز پایینی با سن اولیگوسن پسین در نظر گرفت (شکل ۲ ت). در مقطع میکروسکوپی این واحد، اجزای اصلی سازنده سنگ را خرده‌سنگ‌ها، کوارتز، پلاژیوکلاز و فلدسپار قلیایی تشکیل داده و برخی از خرده سنگ‌ها درجه شدید دگرسانی کربناتی را نشان می‌دهند (شکل ۳ ت).

دگرسانی کلریتی با درجه ضعیف تا متوسط نشان می‌دهند (شکل ۳ پ).

واحد شیل و مارن سبزرنگ (Osm): این واحد سنگی شامل سنگ‌های آواری دانه‌ریز و نازک‌لایه با ترکیب شیل و مارن است که دارای رنگ سبز هستند. بخش عمده این واحد با رسوب‌های گسسته و کنگلومرای نفوژن پوشیده شده است. از



شکل ۳ الف) فلدسپار قلیایی سرسیتی در کنار پچ کوارتز ثانویه (ریولیت، واحد Phf)؛ ب) رگچه‌های کربنات اسپارایتی که رگچه کوارتز را قطع کرده‌اند. (سنگ دولوستون، واحد Pli)؛ پ) نمایی از دانه کوارتز بسلبور، تک بلور، خرده فسیلی و خرده سنگ دگرگونی. (ماسه سنگ، واحد Oss)؛ ت) نمایی از خرده سنگ آتشفشانی، خرده سنگ دگرگونی در حال کربناتی شدن و کوارتز تک بلور. (ماسه سنگ - خرده سنگی تا نیمه خرده سنگی - واحد Osm)؛ ث) بلورهای گارنت گراسولار در حال رشد کنار بلورهای ترمولیت و تالک (گارنت هورنفلس، واحد Ncg)؛ ج) رگچه کربنات که بلورهای کوارتز و فلدسپار قلیایی را قطع کرده است (گرانیت، واحد gr). (Grt: گارنت، Fe-Oxide: اکسیدهای آهن، Tlc: تالک، Tr: ترمولیت، Act: اکتینولیت، Car: کربنات، Qz: کوارتز، Vnt: رگه، PQz: کوارتز بسلبور، VRF: خرده سنگ دگرگونی، MRF: خرده سنگ آتشفشانی، Bio: خرده فسیل، Kfs: فلدسپار قلیایی، Pl: پلاژیوکلاز [۲۰]).

کانه‌زایی

در کانسار کرات بیشتر کانه‌زایی فلزی به شکل اسکارن پسروده و به طور کلی همراه با دگرسانی‌های سیلیسی، هماتی، سریسیتی و کلریتی به شکل عدسی‌ها و رگه-رگچه‌ها در واحد هورنفلس رخ داده است (شکل ۲ الف). ترکیب کانی‌شناسی فلزی شامل مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت است و نیز کانی‌های فاز برونزاد هماتیت (اسپیکولاریت)، گوتیت و لیمونیت هستند. بخش عمده کانه‌زایی شامل مگنتیت، هماتیت، پیریت و کالکوپیریت در مرحله دگرنهادی پسروده تشکیل شده‌اند.

کانی‌های گارنت، فلدسپار، کلسیت و کوارتز در مرحله پیش از کانی‌سازی مگنتیت و در سنگ میزبان دیده می‌شوند. بخش عمده کانی‌های دگرسانی شامل ترمولیت، اکتینولیت، کلریت و سریسیت مربوط به مرحله نخست کانی‌سازی هستند. مگنتیت نیز در مرحله نخست کانی‌سازی شکل گرفته است، که در بخش درونی کانسار به صورت بافت‌های نیمه توده‌ای-دانه‌ای و موضعی-برشی دیده شده و به صورت جایگزینی با هماتیت و نیز گاهی دگرسان و جایگزین با گوتیت یافت می‌شوند (شکل ۴ الف). در ادامه با ورود محلول‌های کانساز به درون سنگ میزبان، مگنتیت به همراه هماتیت در دمای پایین‌تر در قالب رگه-رگچه و نیز به صورت پراکنده در زمینه سنگ شکل گرفته است. بلورهای هماتیت به نوع میکایی (اسپیکولاریت) و به صورت رگه-رگچه‌ای، پراکنده ریزشکستگی‌های درون بلوری (بلورهای غیرفلزی) و بین بلوری و فضاهای خالی وجود دارند. (شکل ۴ ب). تشکیل هماتیت در اثر تجزیه مگنتیت و سولفیدها نیازمند افزایش گریزندگی اکسیژن است و این اکسیژن از چرخش آب‌های جوی و یا ماگمایی در پهنه‌های شکسته و خردشده در فاز دگرنهادی پسروده تامین می‌شود که دلیل ایجاد شکستگی و خردشدگی در سنگ‌ها نیز به احتمال بسیار صعود ماگماست [۲۲، ۲۱]. گوتیت نیز به شکل بلورهای دروغین مجزا، آغشتگی و نیز پراکنده ریزشکستگی‌ها و فضاهای بین بلوری، به صورت رگه-رگچه‌ای و لبه بلورهای مگنتیت وجود دارد. در همراهی بلورهای گوتیت، گاهی بلورهای لیمونیت نیز به صورت آغشتگی و نیز رگه-رگچه‌ای و بلوری وجود دارند (شکل ۴ پ). کانی‌های گوتیت و لیمونیت نیز مربوط به مرحله برونزادی هستند. از کانی‌های سولفیدی دیده شده در مقاطع نیز می‌توان به ذرات پیریت با مقادیر کم و کالکوپیریت با مقادیر صدم تا دهم درصد (شکل ۴ ت) اشاره کرد که به‌ندرت و طی مرحله تاخیری به صورت درگیر با

واحد کنگلومرای قرمز رنگ ضخیم لایه (Ocg): این واحد سنگی شامل کنگلومرا با قلوه‌های درشت و گرد شده بوده که به علت انباشت اکسید و هیدروکسیدهای آهن در خمیره به رنگ قرمز درآمده است.

واحد کنگلومرا (Ncg): این واحد سنگی شامل کنگلومرای جوان بوده که به‌صورت ناپیوسته و دگرشیب روی سایر واحدهای سنگی تشکیل شده است. شواهد موجود نشان می‌دهد که بخش زیادی از حجم این کنگلومرا در اثر فرسایش سطحی از بین رفته و مواد برآمده از فرسایش آن به‌صورت پادگانه‌های برجا در بخش‌های مسطح باقی‌مانده است. این قطعه‌ها شامل سنگ‌های کربناتی، سنگ‌های آواری و سنگ‌های آذرین هستند و نکته جالب توجه وجود قطعه‌هایی از جنس مگنتیت با خاستگاه اسکارن است. قطعه‌های مگنتیتی اندازه متفاوتی دارند و فراوانی آن‌ها در زمینه کنگلومرا کمتر از ۵ درصد است (شکل ۲ ث). در مقطع میکروسکوپی این واحد، گارنت‌های کلسیم‌دار (گراسولار) که از جمله کانی‌های شاخص نوع اسکارن هستند در همراهی با بلورهای تالک و ترمولیت-اکتینولیت دیده گردید (شکل ۳ ث).

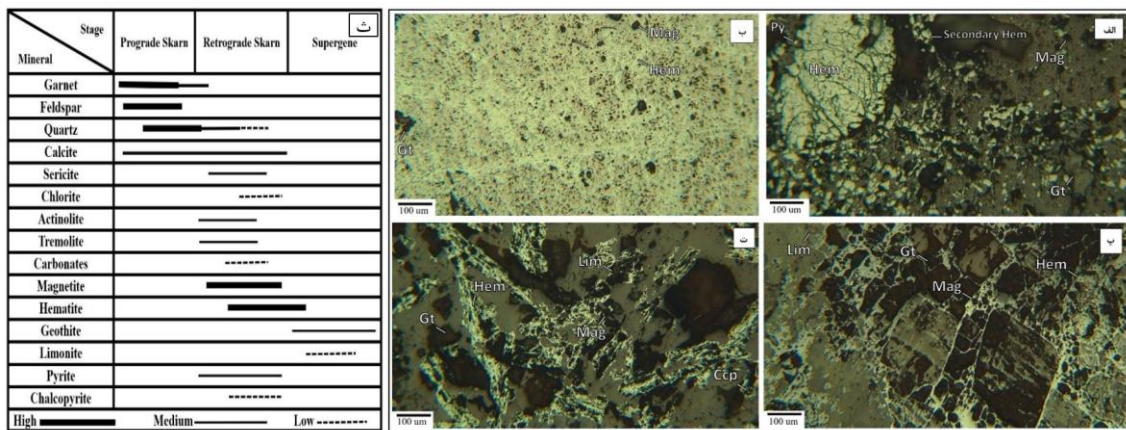
واحد گرانیت (gr): این واحد توده آذرینی با ترکیب اسیدی در حد گرانیت تا کوارتز مونزونیت است. این واحد در سنگ‌های دگرگونه‌شده وابسته به پروتوزوئیک جای‌گیر شده اما بخش عمده برخوردگاه‌های آن در شمال و جنوب رخنمون از نوع گسله است. از آنجا که در برخوردگاه جنوبی، سیال‌های ناشی از تبلور توده باعث کانی‌سازی اسکارن در سنگ میزبان شده‌اند، گسل‌های موجود عامل صعود و استقرار توده بوده‌اند (شکل ۲ ج). در مقطع میکروسکوپی این واحد، کانی‌های اصلی سازنده سنگ را بلورهای فلدسپار قلیایی، کوارتز و پلاژیوکلاز تشکیل می‌دهند و بافت اصلی سنگ دانه‌ای بوده اما هم‌رشدی کوارتز و فلدسپار قلیایی سبب شکل‌گیری بافت فرعی گرانوفیریک شده است. بلورهای فلدسپار با درجه ضعیف تا متوسط توسط سریسیت-کانی‌رسی و با درجه ضعیف توسط کربنات‌جانشین شده‌اند (شکل ۳ ج).

نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر (Qt2): پادگانه‌های آبرفتی گستره وسیعی از سطح منطقه را پوشانده‌اند. در بخش‌های مسطح و دشت گون منطقه، ضخامت زیادی از رسوب‌های گسسته تشکیل شده که بخش عمده آن بر واحد کنگلومرای نئوزن شکل گرفته است. در این رسوب‌ها، قطعه‌های مگنتیت که در اثر هوازدگی از کنگلومرا آزاد شده‌اند نیز وجود دارند.

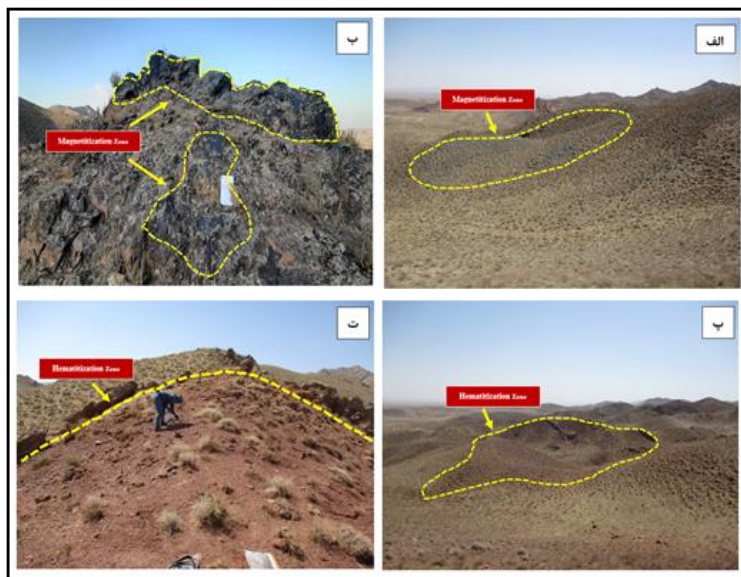
اصلی این کانی سازی در واحدهای رسوبی دگرگونه شده آهکی و نیمه عمیق آتشفشانی حدواسط و در سنگ‌های پروتروزوئیک پسین بوده که اغلب از نوع مگنتیتی است. این مجموعه بر نقشه زمین شناسی ۱:۵۰,۰۰۰ منطقه با عنوان واحد Phf آمده است. همچنین در راستای گسل اصلی موجود در جنوب منطقه با روند شمال غرب - جنوب شرق، دگرسانی‌های هماتی و گاهی گوتیتی در گستره وسیعی دیده می‌شوند (شکل ۵).

کانی‌های اکسیدی آهن‌دار و پراکنده در زمینه یافت می‌شوند (شکل ۴).

کانی سازی آهن در کانسار کرات را از نظر چگونگی و موقعیت مکانی می‌توان به دو بخش تقسیم نمود. این تقسیم‌بندی شامل کانی سازی آهن به صورت مگنتیتی و هماتی شدن است. نفوذ توده گرانیته در کانسار آهن کرات منجر به تشکیل کانسارهای آهن در لبه توده شده است. بخش



شکل ۴ الف) همبری بلورهای مگنتیت به عنوان کانه اصلی به همراه هماتیت و گوتیت؛ ب) پراکندگی بلورهای هماتیت که بخش عمده‌ای از مقطع را دربر گرفته اند به همراه مگنتیت با بافت ریزدانه و کمی بلورهای گوتیت؛ پ) قرارگیری بلورهای مگنتیت که اکسید آهن اولیه نمونه بوده و به صورت شبکه‌ای هماتی و گوتیتی شده است در همراهی بلورهای لیمونیت؛ ت) انباشت بلورهای هماتیت از نوع میکایی (اسپکیولاریت)، مگنتیت، گوتیت و لیمونیت به همراه بلورهای بسیار ریز پیریت (Mag: مگنتیت، Hem: هماتیت، Gt: گوتیت، Lim: لیمونیت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت [۲۰]). ث) دنباله کانه‌زایی کانه‌ها و کانی‌های کانسار آهن کرات.



شکل ۵ الف) نمای دور از پهنه مگنتیتی (دید به سمت شمال)؛ ب) نمای نزدیک از پهنه مگنتیتی (دید به سمت شرق)؛ پ) نمای دور از پهنه هماتیته (دید به سمت جنوب)؛ ت) نمای نزدیک از پهنه هماتیته (دید به سمت جنوب).

بررسی‌های زمین‌شیمیایی

برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی، تعداد ۱۷ نمونه از منطقه برداشت شد که به منظور تجزیه ICP-OES برای ۳۳ عنصر ارسال شدند. پس از انجام پیش‌پردازش‌ها، داده‌ها برای پردازش‌های آماری آماده شدند. در این پژوهش، به‌منظور تحلیل داده‌های زمین‌شیمیایی، از بررسی‌های آماری تک-متغیره (تحلیل پارامترهای آماری توصیفی و تعیین مقدار زمینه، حد آستانه‌ای و ناهنجاری)، تحلیل‌های آماری دومتغیره (روش تحلیل ضرایب همبستگی) و تحلیل‌های آماری چندمتغیره (تجزیه خوشه‌ای) استفاده شد.

برپایه داده‌های به دست آمده از تجزیه ICP-OES، عیار آهن تا مقادیر ۵ درصد به دست آمد، اما به دلیل ناتوانی دستگاه، مقادیر بالاتر از آن محاسبه نشدند. مقدار فسفر برابر با ۰.۰۰۳ تا ۰.۰۶۱ درصد بوده و برای کانسار آهن مطلوب است و کانی فسفات‌داری چون آپاتیت نیز در مقاطع بررسی شده دیده نشد. این در حالی است که مقدار گوگرد در نمونه‌ها از ۰.۲۳ تا حدود ۱ درصد است که این مقدار پیامد همراهی پیریت با

مگنتیت و هماتیت است. مقدار مس در همه نمونه‌ها کمتر از ۰.۰۲ درصد است و ویژگی‌های کانی‌شناسی نیز نشان می‌دهند که هیچ کانی نخستین یا ثانویه مس‌داری در منطقه پدید نیامده است. فراوانی طلا نیز در همه نمونه‌ها نیز بسیار ناچیز و کمتر از حد تشخیص دستگاه (5ppm) است. همچنین مقادیر نقره، آرسنیک، سرب، آنتیمون و روی کمتر از ۰.۰۱ درصد بوده که نشان دهنده کم بودن فراوانی همه عنصرهای معدنی در کانسار است (جدول ۱). بر پایه بررسی‌های آماری دو متغیره و محاسبه ضریب همبستگی پیرسون برای داده‌هایی که با تابع لگاریتم به حالت بهنجار تبدیل شده‌اند، ۴ عنصر وانادیم، نیکل، منیزیم و منگنز ضریب همبستگی مثبت بالاتری نسبت به عناصر دیگر با عنصر آهن در این منطقه دارند ($r_{Fe-Ni}=0.710$, $r_{Fe-Mg}=0.707$, $r_{Fe-Mn}=0.599$)؛ این می‌تواند نشان‌دهنده ارتباط همبرزایی قوی این عناصر با آهن و بیانگر خاستگاه ماگمایی کانسار آهن در منطقه کرات باشد، اما برای اطمینان بیشتر انجام تجزیه‌های ریزپردازش الکترونی و ایزوتوپی بر داده‌ها ضروری است (جدول ۲).

جدول ۱ نتایج تجزیه ICP-OES همراه با جایگزینی داده‌های خارج از ردیف و ناهنجار در کانسار آهن کرات.

شماره نمونه	kr-36	kr-39	kr-42	kr-45	kr-46	kr-48	kr-50	kr-52	kr-54	kr-56	kr-58	kr-60	kr-62	kr-63	kr-65	kr-67	kr-69
عنصر	۰.۹	۰.۳	۰.۲	۰.۷	۰.۲	۰.۸	۰.۲	۰.۵	۰.۷	۰.۵	۰.۳	۰.۴	۰.۶	۰.۲	۰.۲	۰.۴	۰.۹
Ag (ppm)	۱۷.۲۵	۱۷.۲۵	۹	۳	۴	۷	۸	۴	۱۱	۹	۱۱	۷	۹	۸	۵	۱۰	۵
As (ppm)	۳۰.۵۵	۱۳۸.۲	۴۴۱.۲	۴۰.۲	۲۳۰.۳	۹۱.۳	۶۵۴.۸	۶۲۱.۲	۲۳۴.۵	۱۰۸.۸	۲۲۹.۷	۱۰۲۷.۳۵	۱۶۹.۷	۵۵۰	۷۲۹.۹	۲۴۰.۱	۱۸۶.۳
Ba (ppm)	۱.۴	۰.۹	۲.۰	۰.۵	۱.۶	۱.۰	۱.۷	۱.۲	۱.۵	۱.۸	۲.۳	۱.۵	۰.۶	۲.۲	۱.۶	۰.۵	۰.۴
Be (ppm)	۸۲۷.۵	۲۶۵۵	۲۲۴۸۲	۷۵۰.۹	۲۳۳۷۱	۴۰۲۹۱	۵۸۹۱	۳۶۵۱	۷۰۹۴	۱۳۰۹۷	۲۰۷۷	۶۹۸	۹۶۹۲	۱۹۷۸۹	۵۱۸۰	۵۵۶۹۲.۵	۵۵۶۹۲.۵
Ca (%)	۲.۶	۰.۶	۰.۳	۱.۴	۰.۴	۱.۵	۰.۹	۰.۲	۱.۴	۲.۴	۰.۵	۰.۸	۱.۷	۰.۳	۰.۲	۳.۴۷۵	۰.۷
Cd (%)	۱۲۷.۵	۲۴.۱	۱۲۷.۵	۲۶.۷	۳۶.۶	۳۱.۶	۲۲.۵	۲۲.۵	۴۸.۱	۳۹.۰	۴۲.۶	۳۰.۵	۲۱.۳	۱۲۷.۵	۴۶.۴	۱۱.۸	۲۹.۸
Ce (%)	۰.۹	۰.۴	۰.۱۵	۰.۵	۰.۹	۰.۱۵	۰.۴	۰.۲	۰.۵	۰.۸	۰.۴	۰.۹	۰.۸	۰.۹	۰.۸	۰.۷	۰.۲
Co (ppm)	۴۲	۱۳	۱۴	۸۱	۱۹	۱۰۲	۱۳	۶	۷۰	۱۲۵	۱۳	۱۰	۹۱	۱۳	۱۹	۱۶	۲۳
Cr (ppm)	۱۷	۱۵	۱۱	۲۴.۵	۱۹	۱۲	۱۰	۱۱	۱۳	۱۸	۱۳	۱۲	۱۴	۱۷	۱۵	۱۴	۱۶
Cu (ppm)	۶۶۰۰۰	۱۸۸۶۲	۲۸۶۴۲	۶۶۰۰۰	۱۳۹۰۳	۶۶۰۰۰	۲۶۹۹۷	۶۲۰۳	۶۶۰۰۰	۶۶۰۰۰	۶۶۰۰۰	۱۵۴۵۱	۶۶۰۰۰	۲۴۰۳۳	۱۸۳۷۴	۶۶۰۰۰	۱۷۵۸۸
Fe (%)	۹۸۳۵	۸۸۴۲	۱۷۱۲۴	۲۷۲۶	۱۲۶۱۱	۱۳۳۹۸	۲۷۷۷۱	۱۹۲۵۹	۲۸۵۳۶	۷۲۸۶	۲۰۷۴۰	۲۹۷۱۴	۸۸۲۰	۲۳۶۳۱	۲۵۵۴۷	۳۲۶۷	۶۴۲۸
K (%)	۶۳.۲۵	۱۳.۵	۶۳.۲۵	۹.۴	۱۸.۷	۱۲.۰	۶۳.۲۵	۱۶.۴	۱۷.۰	۱۵.۲	۱۸.۷	۱۴.۳	۹.۱	۶۳.۲۵	۲۲.۴	۷.۸	۲۰.۴
La (ppm)	۱.۶	۴	۴	۲.۱	۴	۳	۳	۳	۳.۸	۲.۷	۵	۶	۲.۵	۹	۳.۰	۳	۱.۱
Li (ppm)	۳۵۵۴	۴۶۷	۴۹۲۵	۹۰۸۴۱.۵	۴۲۱۵	۳۸۱۱۰	۲۴۳۱	۱۱۶۵۰	۳۹۱۲۲	۹۰۸۴۱.۵	۵۲۸۸	۲۸۵۸	۴۳۷۳۸	۴۰۴۴	۹۵۲۶	۱۱۹۳۳	۶۸۴۸
Mg (ppm)	۲۵۲	۷۱	۲۲۶	۴۸۶	۲۴۵	۴۱۳	۶۷	۶۷	۱۰۱	۳۷۷	۴۰	۹۳	۴۰	۵۶۴	۱۵۳	۹۷۸۳۵	۵۰۸
Mn (ppm)	۶۰.۲۵	۲.۳	۳.۱	۱.۱	۲.۵	۱.۲	۰.۵	۰.۴	۰.۳	۵.۲	۰.۵	۱.۹	۰.۸	۰.۹	۶.۰۲۵	۱.۳	۱.۴
Mo (ppm)	۲۹۷۳۹	۲۷۹۳۸	۱۹۱۴۵	۱۲۴۴۲	۲۰۵۲۸	۱۱۳۷۴	۲۰۳۲۵	۱۴۲۴۰	۱۴۵۲۰	۱۵۷۳۲	۱۱۶۳۴	۴۶۲۸	۹۴۷۹	۱۷۹۵۸	۳۲۹۴	۲۷۷۲	۳۱۲
Na (%)	۲۸	۱۵	۱۴	۲۶	۱۱	۲۶	۱۶	۱۰	۲۰	۳۴	۱۳	۱۳	۲۱	۱۷	۱۹	۴۴	۱۹
Ni (ppm)	۶۱۱	۵۱	۱۴۱۰.۵	۵۴۱	۱۸۷	۵۹۶	۴۸	۲۴۴	۵۴۲	۷۰۷	۸۰	۳۰	۵۴۷	۸۷۹	۱۷۱	۳۹	۲۷۷
P (ppm)	۹	۸	۱۰	۱۳	۷	۱۰	۶	۶	۶	۸	۹	۱۲	۱۰	۹	۷	۷	۱۶.۲۵
Pb (ppm)	۱۶۸۳.۷۵	۱۶۸۳.۷۵	۱۲۸	۳۹۴	۴۹۷	۵۲۹	۲۴۹	۲۴۹	۴۳۲	۷۵۰	۶۴۸	۹۰۹	۵۹۱	۳۷۳	۲۵۹	۸۷۳	۱۱۵۹
S (ppm)	۷.۳	۱.۱	۷.۰	۳۳.۱	۱۰.۷	۳۷.۰	۲.۴	۲.۴	۸.۵	۲۹.۶	۴۳.۲	۳.۵	۲.۶	۳۴.۴	۵.۸	۱۱.۴	۳.۴
Sc (ppm)	۹۴.۸	۷۳.۱	۷۴.۳	۴۴.۳	۱۲۷.۲	۸۵.۴	۹۴.۲	۶۸.۸	۹۵.۰	۷۹.۹	۶۰.۲	۳۶.۸	۴۰.۵	۲۰.۳	۳۳.۳	۲۰.۳	۲۰.۳
Sc (ppm)	۲۵	۷	۸	۱۳	۴	۱۳	۴	۶	۱۵	۱۵	۶	۵	۱۶	۵	۳۰	۳	۳
Th (ppm)	۲۹۹۱	۲۶۵	۳۹۷۹	۴۴۵۳	۱۱۸۲	۵۱۷۷	۳۹۹	۱۲۴۳	۴۱۵۹	۵۷۵۸	۶۵۹	۴۷۲	۴۶۹۹	۳۹۱۲	۹۲۵	۸۵	۱۴۳۵
Ti (ppm)	۸۹	۸	۳۴	۲۲۴	۳۰	۲۷۴	۷	۳۶	۲۰.۲	۳۰.۸	۱۳	۹	۲۵۳	۶۱	۱۲	۲۳	۲۴
V (ppm)	۱۴.۴	۴.۱	۱۳.۲	۸.۲	۷.۹	۷.۳	۵.۶	۵.۳	۶.۷	۸.۱	۳.۹	۳.۹	۵.۰	۱۵.۳	۱۲.۴	۲۴.۵۶	۱۲.۷
Y (ppm)	۱۴	۱۱	۴۷	۱۰	۱۹	۳۰	۱۳	۷۶	۱۷	۴۹	۹	۱۴	۲۳	۱۵	۲۳	۷۶	۷۶
Zn (ppm)	۱۹	۱۱	۳۵	۱۳	۵۲	۸	۱۸	۱۹	۳۰	۱۰	۲۸	۲۳	۶	۸	۴۰	۱۶	۱۸
Zr (ppm)																	

جدول ۲ ضرایب همبستگی عناصر به دست آمده به روش پیرسون.

Ag	۱																	
As	۰.۲۷	۱																
Ca	۰.۱۸۷	-۰.۱۷۸	۱															
Cd	۰.۶۱۸	۰.۳۷۹	۰.۱۹۴	۱														
Co	-۰.۱۷۰	۰.۱۴۲	-۰.۲۵۵	۰.۲۵۳	۱													
Cr	۰.۶۰۰	۰.۰۴۶	۰.۲۹۸	۰.۶۶۴	۰.۱۱۷	۱												
Cu	۰.۲۰۶	-۰.۲۵۹	۰.۲۳۵	۰.۲۱۴	۰.۴۷۵	۰.۴۲۳	۱											
Fe	۰.۶۶۳	۰.۱۶۰	۰.۳۷۹	۰.۶۳۴	۰.۰۷۱	۰.۷۲۸	۰.۳۳۰	۱										
Mg	۰.۵۱۷	-۰.۳۶۸	۰.۳۲۰	۰.۴۱۷	-۰.۰۰۷	۰.۷۶۴	۰.۲۸۲	۰.۷۰۷	۱									
Mn	۰.۳۲۹	-۰.۲۲۰	۰.۸۱۳	۰.۴۱۴	۰.۱۱۱	۰.۴۵۶	۰.۴۹۶	۰.۵۹۹	۰.۴۸۶	۱								
Mo	-۰.۱۰۸	۰.۱۱۶	۰.۱۲۱	۰.۰۵۴	۰.۲۹۳	۰.۱۳۴	۰.۳۸۶	۰.۰۹۴	-۰.۱۴۲	۰.۲۴۵	۱							
Ni	۰.۴۶۹	۰.۲۴۱	۰.۴۳۹	۰.۸۱۴	۰.۲۲۹	۰.۶۶۹	۰.۳۵۰	۰.۷۱۰	۰.۵۱۶	۰.۶۷۲	۰.۲۷۲	۱						
Pb	۰.۵۳۹	-۰.۱۲۷	۰.۰۵۱	۰.۱۷۱	-۰.۱۵۴	۰.۳۹۷	۰.۲۶۹	۰.۲۵۵	۰.۲۸۵	۰.۲۲۷	۰.۰۵۰	۰.۱۵۱	۱					
S	۰.۵۱۴	۰.۴۵۴	-۰.۰۵۵	۰.۴۳۸	۰.۱۷۲	۰.۰۹۱	۰.۲۷۹	۰.۱۸۸	-۰.۲۱۱	-۰.۰۳۱	۰.۰۶۹	۰.۲۵۵	۰.۱۵۰	۱				
Zn	۰.۵۶۵	-۰.۵۹۴	۰.۴۲۵	۰.۱۲۴	-۰.۲۴۸	۰.۲۷۸	۰.۲۹۶	۰.۳۲۲	۰.۵۶۵	۰.۴۸۸	-۰.۱۲۲	۰.۲۲۲	۰.۱۷۶	۰.۰۸۱	۱			
V	۰.۶۰۶	-۰.۰۷۱	۰.۴۰۹	۰.۴۹۰	۰.۰۱۹	۰.۸۶۰	۰.۳۷۸	۰.۸۴۳	۰.۸۲۹	۰.۵۵۷	-۰.۰۳۸	۰.۵۰۵	۰.۲۷۳	-۰.۰۲۹	۰.۴۳۹	۱		
Ag	As	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Ni	Pb	S	Zn	V			

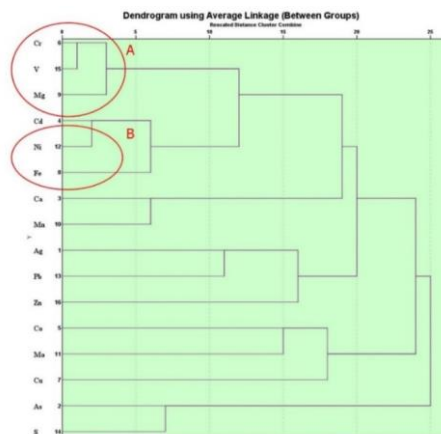
چون قرارگیری در پهنه‌های رشد بلور، توزیع تصادفی در سه بعد، مجزا بودن از سیال‌های درگیر کناری و اندازه قابل توجهی نسبت به کانی میزبان تشخیص داده می‌شوند (شکل ۷ پ). سیال‌های درگیر ثانویه که بیشتر در ترک‌ها و شکستگی‌های کوچک درون بلورها گسترش یافته‌اند، به صورت تک ردیفی و چند ردیفی در کنار هم مشخص هستند (شکل ۷ ت). شکل سیال‌های درگیر گاهی با ویژگی‌های بلورشناسی کانی میزبان کنترل می‌شود [۲۳]. برای بررسی‌های زمین‌دماسنجی از سیال‌های درگیر اولیه استفاده شد، زیرا سیال‌های ثانویه هیچ دانشی از ماهیت سیال در زمان تشکیل سیال ندارند [۲۴]. برای رده‌بندی سیال‌های درگیر بر اساس نسبت‌های مختلف فازهای جامد، مایع و گاز از روش رایج نش [۲۵] استفاده شد. بر اساس سنگ‌نگاری انجام شده برای سه نمونه، سه نوع سیال درگیر تشخیص داده شد که در ادامه بیان می‌شوند.

همچنین در تجزیه خوشه‌ای که بر اساس داده‌های بهنجار انجام شد، در شاخه A، عناصر کروم، وانادیم و منیزیم کنار هم و در خوشه B نیز عناصر نیکل و آهن کنار هم قرار دارند. با قرارگیری این دو مجموعه در کنار هم (A و B) در یک شاخه اصلی و با توجه به بررسی‌های دو متغیره انجام شده بر نتایج به دست آمده از تجزیه نمونه‌های برداشت شده از این منطقه، همبستگی زمین شیمیایی مناسبی بین عناصر نیکل، منیزیم و وانادیم با کانی سازی آهن وجود دارد که می‌تواند ناشی از آهن دوست بودن عناصر نیکل و منیزیم و خاستگاه ماگمایی کانسار آهن کرات باشد (شکل ۶).

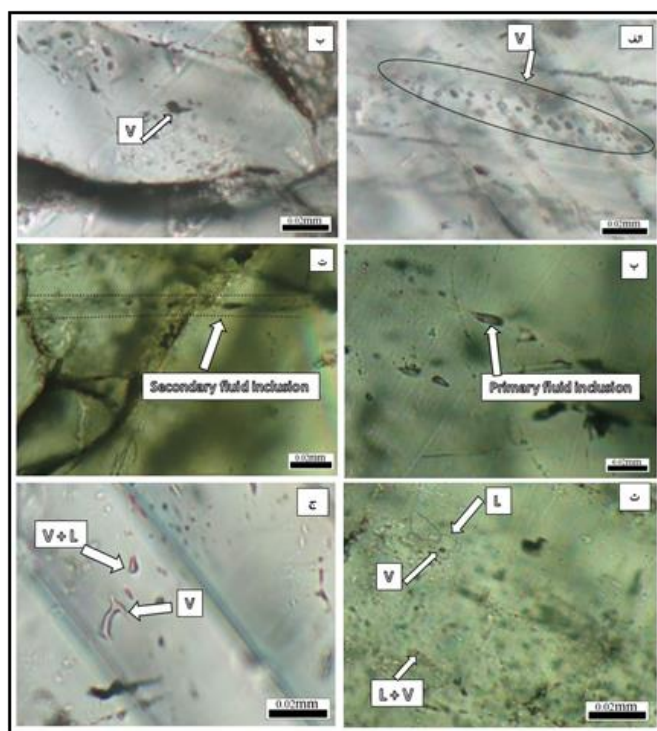
بررسی‌های سیال‌های درگیر

سنگ‌نگاری سیال‌های درگیر

رایج‌ترین شکل سیال‌های درگیر در نمونه‌ها، انفرادی و دنباله‌ای است (شکل‌های ۷ الف و ب). سیال‌های درگیر اولیه با شواهدی



شکل ۶ نمودار تحلیل خوشه‌ای عناصر برآمده از داده‌های بهنجار در رگه‌های کانه‌دار کانسار آهن کرات



شکل ۷ الف) سیال‌های درگیر تک‌فازی گازی به صورت دنباله‌ای؛ ب) سیال‌های درگیر تک‌فازی گازی به صورت انفرادی؛ پ) نمایی از سیال‌های درگیر دوفازی غنی از مایع (L+V) که به صورت اولیه تشکیل شده‌اند؛ ت) نمایی از سیال‌های درگیر دوفازی غنی از مایع (L+V) که به صورت ثانویه و در شکستگی‌های بین بلوری تشکیل شده‌اند؛ ث) نمایی از سیال‌های درگیر دوفازی (L+V؛ ج) نمایی از سیال‌های درگیر دوفازی V+L.

درصد حجم سیال را حباب گاز فراگرفته است. همگن‌شدگی در این نوع از سیال‌های درگیر با تشکیل بخار همراه است. فراوانی این نوع از سیال‌های درگیر و همراهی آن‌ها با نوع دوفازی غنی از مایع نشان‌دهنده فرایند جوشش است [۲۶]. این نمونه سیال‌های درگیر دوفازی غنی از گاز از ۵ تا ۱۵ میکرون با فراوانی کم نسبت به دو نسل دیگر پراکنده هستند.

نتایج و تفسیر بررسی‌های سیال‌های درگیر

در سال‌های اخیر، بررسی سیال‌های درگیر بیش از هر روش دیگری در تعیین دمای نهشت کانه‌ها مورد توجه بوده است [۲۷]. دمای همگن‌شدگی می‌تواند برآوردی از دمای سیال طی به دام افتادن در کانی میزبان بوده و گستره دمایی مربوط به فعالیت فازهای گرمایی و دمای تشکیل کانسار باشد [۲۸]. براساس نتایج ریزدماسنجی ۳ نمونه سنگ و ۵۷ سیال درگیر (جدول ۳)، دمای همگن‌شدگی در کانسار آهن کرات ۲۰۰-۳۹۰ درجه سانتی‌گراد بدست آمد که در دو گستره ۲۰۰-۲۲۰ و ۲۶۰-۲۸۰^oC قله‌های مشخصی را نشان می‌دهد (شکل ۸ الف). مقدار شوری سیال‌های درگیر را می‌توان با استفاده از

تک‌فازی گازی: در این نوع از سیال‌های درگیر، حباب تنها فاز تشکیل‌دهنده است. از این رو از این نوع از سیال‌ها نمی‌توان برای ریزدماسنجی استفاده نمود. این سیال‌های درگیر فراوانی زیادی در نمونه دارند و بیشتر به شکل نامنظم و به رنگ تیره دیده می‌شود. اندازه آن‌ها از ۲ تا ۱۵ میکرون است. این سیال‌های درگیر به‌صورت همزیست با سیال‌های درگیر دوفازی دیده می‌شوند که نشان‌دهنده جوشش در محیط است.

دو فازی غنی از مایع (L+V): در این نوع سیال‌های درگیر، فاز مایع همراه با فاز حباب گاز وجود دارد. بیشترین حجم سیال‌های درگیر را فاز مایع در برمی‌گیرد و فاز گازی تنها ۱۰ تا ۳۰٪ حجم سیال‌های درگیر بررسی شده را شامل می‌شود. سیال‌های درگیر بررسی شده در نمونه‌ها بیشتر از این نوع هستند. این سیال‌های درگیر فراوانی به نسبت خوبی در نمونه دارند و بیشتر سیال‌های درگیر برای ریزدماسنجی از این گروه هستند. این سیال‌های درگیر بیشتر به شکل نامنظم دیده می‌شوند و اندازه آن‌ها ۲ تا ۱۰ میکرون است.

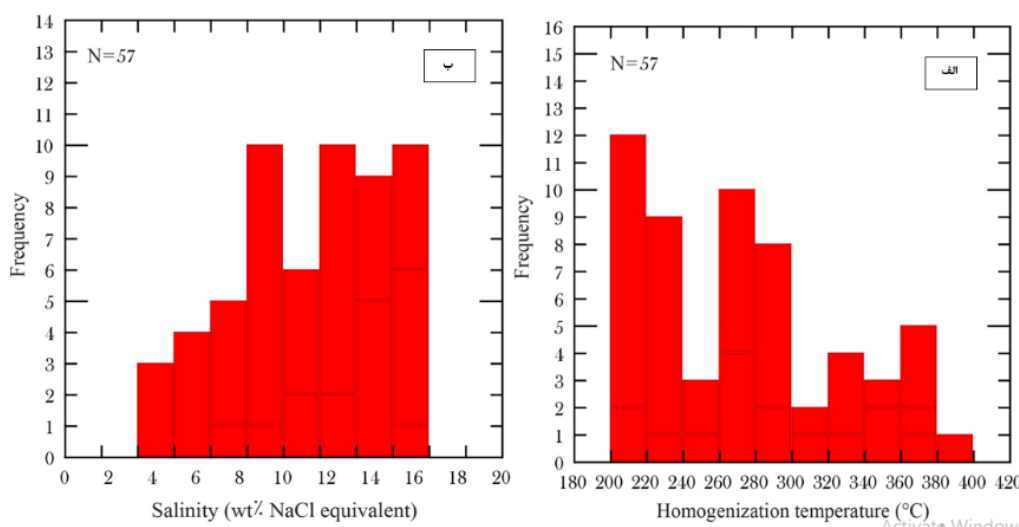
دو فازی غنی از گاز (L+V): در این نوع از سیال‌ها، حباب گاز بیشترین حجم سیال را در بر گرفته است. گاهی بیش از ۷۰

سردشدگی هستند، که باتوجه به فراوانی کم میانبرهای نوع غنی از گاز و نبود شواهد کافی پدیده‌های جوشش و سردشدگی در شکل‌گیری کانسار سهیم نبوده‌اند (شکل ۹ الف) تغییرات شوری در منطقه گسترده وسیعی دارد. تغییرات گسترده شوری سیال‌های درگیر می‌تواند نتیجه آمیختگی سیال‌های با شوری مختلف [۳۴] یا به دام افتادن سیال‌های درگیر در مراحل مختلف کانی‌زایی، یا در اثر حذف انتخابی آب پس از به دام افتادن با سازوکار جدایش باشد [۳۳]. باتوجه به نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی سیال‌های درگیر [۳۲]، همه سیال‌های درگیر در گستره کانه‌زایی اسکارن قرار دارند (شکل ۹ ب). با استفاده از نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی، می‌توان خاستگاه سیال کانسار ساز را پیش بینی کرد. براساس نتایج به دست آمده از ریزدماسنجی، سیال‌های درگیر از خاستگاه سیال‌های دگرگونی و سیال‌های ترکیبی ماگمایی-جوی هستند (شکل ۱۰).

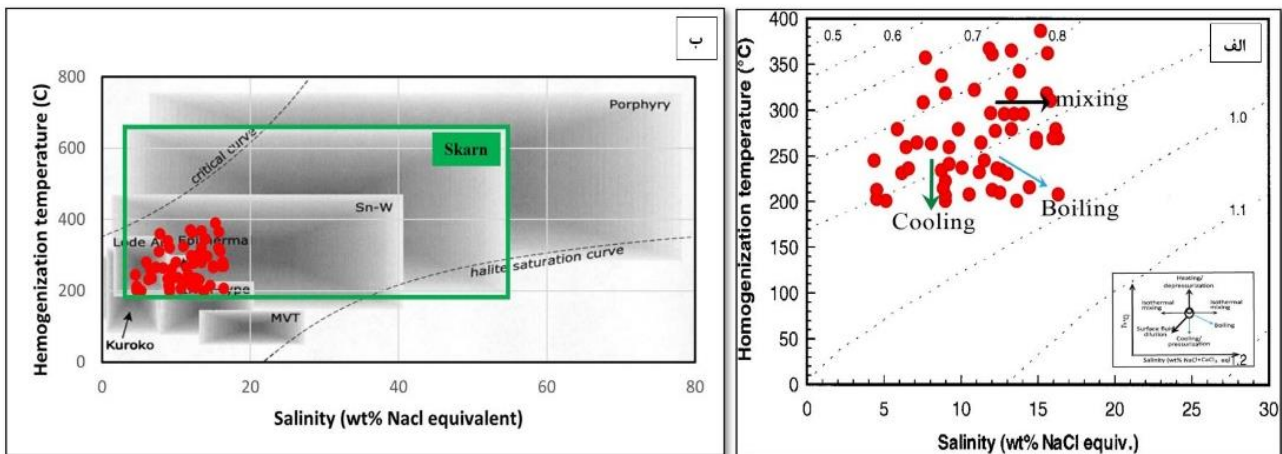
مقادیر دمای هم‌گذاری در سیال‌ها، نمودارها و روابط مختلف محاسبه نمود [۲۸-۳۰]. دمای ذوب آخرین قطعه یخ سیال‌های درگیر ($T_{m(ice)}$) برابر با $-۱۴/۳$ تا $-۲/۷$ درجه سانتی‌گراد است، از آنجا که دمای ذوب نخستین بلور یخ در سامانه $NaCl+H_2O$ حدود $۲۰/۸$ °C است، احتمال حضور نمک‌های دیگر افزون بر $NaCl$ در نمونه‌های بررسی شده وجود ندارد و سامانه سیال $NaCl+H_2O$ است [۳۲، ۳۱] و شوری محاسبه شده از $۴/۴۸$ تا $۱۶/۴۲$ درصد وزنی معادل نمک طعام تغییر می‌کند (شکل ۸ ب). با همگن کردن فازهای درون سیال‌های درگیر به فاز مایع یا گاز و تعیین دمای همگن‌شدگی، کمینه دمای تشکیل کانسار محاسبه گردید که بر این اساس، سیال‌های درگیر نوع $L+V$ با میزبانی کانی کوارتز در گستره ۲۰۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد همگن شده‌اند همچنین براساس نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی [۳۳]، چگالی سیال‌های درگیر برای نوع $L+V$ موجود در کانی کوارتز $۰/۷$ تا $۱/۰$ g/cm^3 به دست آمد و روندهای فیزیکی اصلی منطقه نیز شامل آمیختگی، جوشش و

جدول ۳ چکیده نتایج بررسی سیال‌های درگیر اولیه کانسار کرات. (T_h : دمای همگن‌شدگی، $T_{m(ice)}$: دمای ذوب آخرین قطعه یخ)

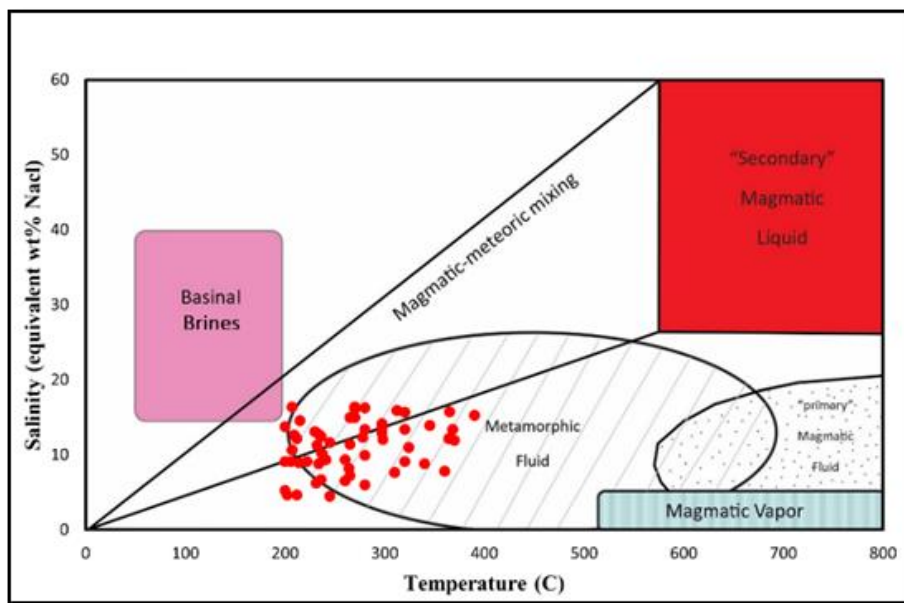
نمونه	نمونه میانبار سیال	کانی	تعداد اندازه گیری ها	T_h (°C)	$T_{m(ice)}$ (°C)	شوری (wt.% NaCl eq.)
KR1FT	L+V	Quartz	20	200 to 370	-3.2 to -14	5.24 to 16.26
KR2FT	L+V	Quartz	17	200 to 260	-2.7 to -10.4	4.48 to 13.73
KR3FT	L+V	Quartz	21	207 to 390	-5.8 to -14.3	8.84 to 16.42



شکل ۸ الف) نمودار فراوانی دمای همگن‌شدگی سیال‌های درگیر برای کانسارکرات؛ ب) نمودار فراوانی مقدار شوری (برحسب درصد وزنی معادل $NaCl$) برای کانسار کرات.



شکل ۹ الف) نمودار دمای همگن‌شدگی و شوری برای سیال‌های درگیر کانسار کرات و نمودار تعیین‌کننده جهت‌های اصلی دمای همگن‌شدگی - شوری طی فرایندهای مختلف تکامل سیال‌های درگیر [۳۳]. ب) نمودار شوری - دمای همگن‌شدگی شاخص انواع مختلف کانسارها [۳۳] که نشان می‌دهد که کانسار کرات در گستره کانسارهای اسکارن قرار دارد.



شکل ۱۰ تعیین خاستگاه سیال کانسار ساز براساس مقدار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی [۳۳] که براساس آن، بیشترین تمرکز سیال‌های درگیر در منطقه در گستره آب‌های با خاستگاه دگرگونی و جوی است

برداشت

اسکارن پسرونده شده است. از آن جا که دلیلی بر پدیده جوشش در مرحله اسکارن پسرونده در بررسی سیال‌های درگیر و سنگ‌نگاری دیده نشد و باتوجه به دما و شوری پایین تا متوسط سیال‌های مسؤول کانی‌سازی و بررسی‌های انجام شده، خاستگاه آن‌ها ترکیبی از سیال‌های ماگمایی-جوی و دگرگونی است همچنین باتوجه به روند تشکیل سیال‌های درگیر،

کانسار آهن کرات کنار مجموعه معادن سنگان قرار دارد. این منطقه در پهنه زمین‌شناسی ایران مرکزی واقع بوده و بخش کوچکی از کمربند فلززایی سنگان-تربت‌حیدریه است. نفوذ توده گرانیتی در واحدهای رسوبی کانسار آهن کرات منجر به تشکیل کانسارهای اسکارن آهن در لبه توده و به صورت

- [4] Golmohammadi A., Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., Mazaheri S.A., "Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran", *Ore Geology Reviews* 65(2) (2015) 545-563. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.005>
- [5] Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., "Geochemistry and mineralogy of skarn zones and petrology of source rock Sangan iron mine, Khorasan Razavi, Iran", *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 65 (2007) 108-125.
- [6] Malekzadeh Shafaroudi A., Mazhari N., Ghaderi M., "Geology, mineralogy, and chemistry of skarn zones and orebody in Ma'danjoo iron skarn prospect area, east of Sangan mine, Khaf, NE Iran", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 24 (1) (2016) 83-98.
- [7] Karimpour M.H., "Geochemisry and mineralogy of the Khorasan Sangan iron ore deposits", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 2 (2) (1994) 145-156. <http://dx.doi.org/10.29252/ijcm.26.4.871>
- [8] Kaheni Sh., Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., "The geochemistry and mineralogy of North C ore body and Baghak anomaly and determination of two Pyrrhotite generations which are different in composition in Sangan mine, eastern Iran", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 16 (2) (2008) 313-326. <http://dx.doi.org/10.29252/ijcm.26.4.871>
- [9] Mazaheri S.A., "Classification of amphiboles from Iron ore deposits, Sangan area, Khaf", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 10 (1) (2002) 67-80.
- [10] Mazaheri N., Malekzadeh Shafaroudi A., Ghaderi M., "Geology, mineralogy and geochemistry of Ferezneh ferromanganese anomaly, east of Sangan mines complex, NE Iran", *Iranian Journal of Economic Geology* 7 (1) (2015) 23-37. <https://doi.org/10.22067/econg.v7i1.44694>
- [11] Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M. H., Golmohammadi A., "Zircon U-Pb geochronology and petrology of intrusive rocks in the C-north and Baghak districts, Sangan iron mine, NE Iran",

می‌توان نتیجه گرفت که عامل اصلی نهشت کانه‌ها در این کانسار، آمیختگی هم‌دما و رقیق‌شدگی سیال‌های ماگمایی-دگرگونی در اثر آمیختگی با آب‌های سطحی بوده است. وجود مقادیر بالای هماتیت در این کانسار در نتیجه تجزیه سولفیدها و مگنتیت‌های اولیه به دلیل افزایش گریزندگی اکسیژن در محیط و نیز ایجاد دگرسانی‌های سیلیسی و سریسیتی شدن همراه با کانه‌زایی در پهنه اسکارنی، نشان دهنده عملکرد چرخش آب‌های جوی در پهنه‌های خرد شده ناشی از صعود ماگما و آمیختگی این سیال‌ها با سیال‌هایی با خاستگاه ماگمایی-دگرگونی در مرحله دگرگونی برگشتی اسکارن و تایید کننده نتایج بررسی سیال‌های درگیر در این مورد است، همچنین براساس بررسی‌های زمین‌شیمیایی، همبستگی مناسبی بین عناصر نیکل، منیزیم و وانادیم با کانی‌سازی آهن دیده می‌شود، که می‌تواند ناشی از ماگمایی بودن خاستگاه کانسار آهن کرات باشد. البته برای اطمینان از این امر و تعیین دقیق خاستگاه سیال انجام تجزیه‌های ریزپردازش الکترونی و ایزوتوبی بر داده‌ها ضروری است.

قدردانی

نویسندگان صمیمانه از مجموعه شرکت گیتی فراز اطلس تشکر می‌کنند که با ایجاد شرایط خوب توانستند بستر مناسبی برای همکاری بخش دانشگاهی در راستای تحقق شعار ارتباط بین صنعت و دانشگاه فراهم نمایند؛ نتایج این پژوهش در اختیار شرکت نام برده برای بررسی‌های اکتشافی آن منطقه معدنی قرار می‌گیرد.

مراجع

- [1] Geological Survey of Iran, "Geological map of Iran at the scale 1/1000000", (2002).
- [2] Geological Survey of Iran, "Report of Taybad geological map at the scale 1/250000", (1990) 150p.
- [3] Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., Mazaheri S. A., "Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran", *Ore Geology Reviews* 65 (2015) 545-563. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.005>.

- [20] Beane R.E., "The Magmatic-meteorite Transition", Geothermal Resources Council, Special Report 13, (1983) 245-253.
- [21] Van den Kerkhof, A. M. and Hein, U. F., "Fluid inclusion petrography. *Lithos*", 55: 27-47. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00037-2) (2001).
- [22] Durieux C.G, Brown A.C., "Geological context, mineralization, and timing of the Juramento sediment-hosted stratiform copper-silver deposit, Salta district northwestern Argentina", *Miner Deposita* 42) 2007 (879-899.)
- [23] Nash J. T., "Fluid inclusion petrology-data from porphyry copper deposits and applications to exploration", US Geol. Survey. Prof. Paper 907 D16 p (1976).
- [24] Simmons S. F., "Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits", 100th anniversary volume, 485-522.
- [25] Guilbert J.M., Park C.F., "The Geology of Ore Deposits. WH Freeman and Company", 985p. (1997).
- [26] Roedder E., "Fluid inclusions" *Reviews in Mineralogy 12*", Mineralogical Society of America (1984) 646p.
- [27] Potter R. W., Clynne M. A., Brown D. L., "Freezing Point Depression of Aqueous Sodium Chloride Solution", *Economic Geology*, 73: 284-285. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.73.2.284> (1978).
- [28] Shepherd T., Rankin A. H., Alderton D. H. M., "A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies, Blackie, London", 239p (1985).
- [29] Hall D.L., Sterner S.M., Bodnar R.J., "Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions", *Economic Geology* 93 (1988) 197-202. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.1.197>.
- [30] Viti C., Frezzoti M. L., "Transmission electron microscopy applied to fluid inclusion investigations", *Lithos* 55 (2001) 125-138. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00042-6).
- [31] Wilkinson J. J., "Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*", 55 (2001) 229-272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5).
- [32] Borisenko A.S., "Studies of salinity of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric Journal of Asian Earth Sciences 64 (2013) 256-271. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.028>
- [12] Mazaheri S. A., "Petrological studies of skarns from Marulan South, New South Wales Australia and Sangan, Khorasan, Iran", Ph. D. thesis, University of Wollongong, New South Wales Australia (1995).
- [13] Mazhari N., Malekzadeh Shafaroudi A., Ghaderi M., Star Lackey J., Lang Farmer G., Karimpour M.H., "Geochronological and Geochemical Characteristics of Fractionated I-type Granites Associated with the Skarn Mineralization in the Sangan Mining Region, NE Iran", *Ore Geology Reviews* 84 (2017) 116-133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.003>
- [14] Ghasemi Siani M., Mehrabi B., "Mineralogy and mineral chemistry of silicate mineral of Dardvay Fe skarn ore deposit (Sangan mining area, NE Iran)", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 26 (4) (2019) 871-884. <http://dx.doi.org/10.29252/ijcm.26.4.871>
- [15] Tale Fazel E., Mehrabi B., Khakzad A., Kianpour R., "Stages and Mineralization Conditions of Dardvey Iron Skarn Based on Mineralogy and Fluid Inclusion Evidences, Sangan Area (Khorasan Razavi)", *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 81 (2011) 349-360.
- [16] Boomeri M., "Petrography and geochemistry of the Sangan iron skarn deposit and related igneous rocks, northeastern Iran", Ph. D thesis, Akita Univ, Japan, (1998a) 226 p.
- [17] Boomeri M., "Geochemical characteristics of halogen-bearing hastingsite, scapolite and phlogopite from the Sangan iron skarn deposits, northeastern Iran", *Journal of Mineralogy and Petrology* 92 (1998b) 481-501.
- [18] Haynes D.W., Cross K.C., Bills R.T., Reed M.H., "Olympic Dam ore genesis: a fluid mixing model", *Econ. Geol.* 90(1995) 281-307. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.90.2.281>
- [19] Moore M., Deymar S., Taghipour B., "Geochemistry of Rare Earth Elements and mineral chemistry of garnet in Darreh Zerreshk skarns (Southwest of Yazd) ", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 3(2013) 431-444.

application to Petrology", Mineralogical Association of Canada 6 (1981) 75-100.

[34] Kesler S. E., "*Fluids in planetary systems: Ore-forming fluids. Elements*" 1 (2005) 13-18.

method", Soviet Geology and Geophysics 18 (1977) 11-19.

[33] Crawford M.L., "*Phase equilibrium in aqueous fluid inclusions. In: Short course in Fluid Inclusions (Eds. Hollister L.S. and Crawford M.L.)*