

زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و مطالعه میانبارهای سیال در کانسار اکسید آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد، شمال شرق زنجان

داریوش عرب زوزنی^۱، حسینعلی تاج‌الدین^{۲*} و مجید قادری^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲. استادیار، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳. استاد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

چکیده

کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد در ۱۳ کیلومتری شمال‌شرق زنجان و در زیرپهنه طارم از پهنه البرز-آذربایجان قرار دارد. واحدهای سنگی رخنمون یافته در گستره کانسار شامل یک توالی از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن متشکل از توف و گدازه‌های با ترکیب حدواسط (آندزیت تا تراکی‌آندزیت) می‌باشند و توسط توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق مونزودیوریت-مونزوکابروبی با سن ائوسن پایانی-الیگوسن قطع شده‌اند. توده‌های نفوذی میزبان کانسنگ‌های آهن-آپاتیت در کانسار غرب گلستان‌آباد دارای سرشت کالک‌آکالن هستند و از نوع توده‌های متالومین-پرالومین و تیپ I می‌باشند و در محیط نکتونوماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای تا پس از برخورد تشکیل شده‌اند. کانی‌سازی در کانسار غرب گلستان‌آباد به صورت کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت و با ساخت و بافت‌های رگه-رگچه‌ای، برشی، توده‌ای و دانه‌پراکنده در توده مونزودیوریت-مونزوکابروبی رخ داده است. کانسنگ از کانی‌های فلزی مگنتیت، هماتیت، پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت، کولیت و ترکیبات هیدروکسیدی آهن و کانی‌های غیرفلزی آپاتیت، اکتینولیت، ترمولیت، کوارتز، اپیدوت، کلریت و سریسیت تشکیل یافته است. دگرسانی‌های گرمابی همراه با کانسنگ‌های آهن-آپاتیت از انواع اکتینولیتی شدن، سیلیسی شدن، سریسیتی شدن، پروپیلیتی شدن و سولفیدی شدن هستند. الگوهای فراوانی و تغییرات عناصر نادر خاکی در کانی‌های مگنتیت، آپاتیت و سنگ میزبان کانی‌سازی به نسبت مشابه می‌باشد و یک ارتباط زایشی میان کانسنگ‌های آهن-آپاتیت با توده نفوذی مونزودیوریت-مونزوکابروبی را نشان می‌دهند. مطالعه ریزدماسنجی بر روی میانبارهای دوفازی غنی از مایع به دام افتاده در بلورهای آپاتیت، بیانگر دمایی همگن‌شدگی سیالات کانه‌ساز در بازه ۳۴۷ تا ۵۴۷ درجه سانتی‌گراد و شوری ۵/۸۶ تا ۲۱/۶۸ درصد وزنی معادل نمک طعام است. این کانسار از نظر ویژگی‌های زمین‌شناختی و کانی‌سازی، بیشترین شباهت را با ذخایر تیپ اکسید آهن-آپاتیت (IOA) نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: زنجان، ژئوشیمی، غرب گلستان‌آباد، کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت، میانبارهای سیال.

مقدمه

و تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند. فعالیت‌های اکتشافی در گستره کانسار غرب گلستان‌آباد، که در سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ توسط شرکت خدمات اکتشافی کشور انجام شده، شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی-معدنی با مقیاس‌های ۱:۵۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰، مطالعات ژئوفیزیکی (مغناطیس‌سنجی)، حفر ترانشه، گمانه‌های مغزه‌گیری و آنالیز شیمیایی نمونه‌های کانسنگی می‌باشد. در پژوهش حاضر، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و میانبارهای سیال در کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد مورد مطالعه قرار گرفت و با توجه به ویژگی‌های مذکور، تیپ کانی‌سازی و چگونگی نهشت کانسنگ تعیین شده است. بدیهی است نتایج مطالعه این کانسار می‌تواند برای اکتشاف این تیپ از ذخایر، در بخش‌هایی از زیرپهنه طارم که شرایط زمین‌شناسی مشابهی دارند، مورد استفاده قرار گیرد.

روش مطالعه

این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی است. مطالعات صحرایی، تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰، مطالعه پهنه‌های کانی‌سازی و ساخت و بافت کانسنگ‌ها را شامل می‌شود. در این مرحله، هم‌زمان با تهیه نقشه زمین‌شناسی، بالغ بر ۵۰ نمونه سنگی از رخنمون‌ها، ترانشه‌ها و مغزه‌های حفاری برداشت و به آزمایشگاه‌های مربوطه ارسال شد. در مرحله مطالعات آزمایشگاهی، پس از بررسی‌های مقدماتی، از میان نمونه‌های برداشت شده، تعداد ۱۲ مقطع نازک، ۲۵ مقطع نازک-صیقلی و سه مقطع دوبرصیقلی تهیه و به منظور مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری، ساخت، بافت و میانبارهای سیال مطالعه شدند. پس از مطالعه نمونه‌ها در مقیاس‌های نمونه دستی و زیر میکروسکوپ، ۱۲ نمونه معرف، به منظور تعیین فراوانی اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی و کمیاب با روش‌های XRF و ICP-MS انتخاب و آماده‌سازی شدند. نمونه‌ها از توده مونزودیوریت-مونزوگابروبی میزبان کانه‌زایی (چهار نمونه)، کانی‌های مگنتیت (سه نمونه) و آپاتیت (پنج نمونه) انتخاب شدند. برای آماده‌سازی، تمامی نمونه‌ها توسط سنگ‌شکن فکی در اندازه‌های کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر

عمده کانسارهای آهن-آپاتیت شناسایی شده ایران، در دو ناحیه بافق (Mücke and Yousefi, 1994; Majidi et al., 2021; Rahimi et al., 2016) در ایران مرکزی و طارم (Nabatian et al., 2013; Mokhtari et al., 2017) در شمال غرب کشور رخداد دارند و به‌عنوان مهم‌ترین ذخایر تیپ IOA مطالعه و معرفی شده‌اند (Nabatian et al., 2015). البته در چند سال اخیر تعدادی ذخیره IOA در ارتباط با ماگماتیسیم کمان ماگمایی ارومیه-دختر نیز شناسایی و معرفی شده‌اند. رخداد کانسنگ‌های آهن-آپاتیت در سنگ‌های آتشفشانی-ماگمایی گستره یولاق (شمال غرب ساوه) مهم‌ترین نمونه آن است (گروه معدنی و بازرگانی زرمش، www.Zarmesh.com/nproject/).

ایالت فلززایی طارم که در پهنه البرز غربی-آذربایجان قرار دارد (شکل ۱-الف)، میزبان مجموعه‌ای از ذخایر اکسید آهن-آپاتیت در شرق شهر زنجان می‌باشد (نباتیان، ۱۳۹۱). از مهم‌ترین نمونه‌های این تیپ از ذخایر می‌توان به کانسارهای سرخه‌دیزج (نباتیان، ۱۳۸۷؛ سالاروند، ۱۳۹۸؛ Nabatian and Ghaderi, 2013)، زرنان (گراوندی، ۱۴۰۰)، گلستان‌آباد (عرب زوزنی، ۱۳۹۹؛ کردیان، ۱۳۹۹؛ صحتی، ۱۴۰۲)، ذاکر (خان‌محمدی، ۱۳۸۷؛ واقفی، ۱۴۰۲)، اسکند (واقفی، ۱۴۰۲)، آراسو (داودی، ۱۳۹۸)، علی‌آباد-مروارید (مظهری، ۱۳۸۹) اشاره کرد (شکل ۱-ب). کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد در فاصله ۱۰ کیلومتری شمال شرق زنجان و ۲/۵ کیلومتری شمال شرق روستای زرنان واقع شده است. لازم به ذکر است در فاصله شش کیلومتری شرق روستای زرنان، کانسار دیگری با نام «معدن آهن گلستان‌آباد» مشغول به فعالیت و استخراج کانسنگ آهن است و در سال‌های اخیر توسط کردیان (۱۳۹۹) و صحتی (۱۴۰۲) مورد مطالعه قرار گرفتند. لازم به ذکر است کانسار موضوع پژوهش حاضر، که با نام «کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد» مورد مطالعه قرار دارد، در فاصله هوایی چهار کیلومتری شمال غرب معدن (کانسار) گلستان‌آباد (کردیان، ۱۳۹۹؛ صحتی، ۱۴۰۲) واقع شده و به لحاظ ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانی‌سازی، شباهت‌ها

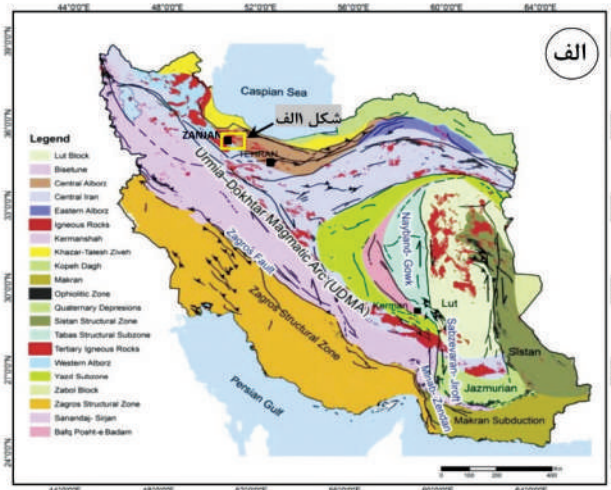
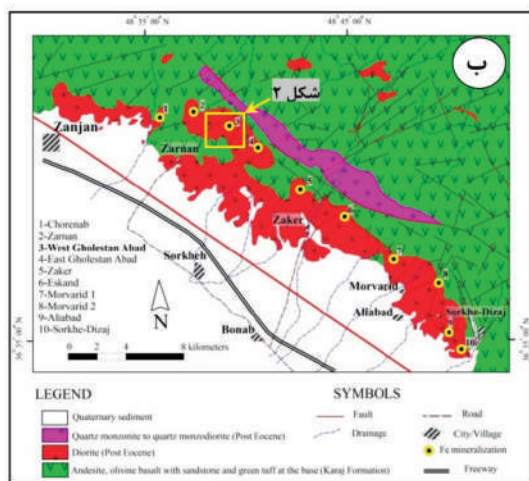
قطعه یخ^۲ با استفاده از فرمول ارائه شده توسط هال و همکاران (Hall et al., 1988) و مقایسه با روش استرنز و همکاران (Sterner et al., 1988) محاسبه شده است.

زمین‌شناسی

کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان آباد در پهنه البرز غربی-آذربایجان (آقنابتی، ۱۳۸۳) و در زیرپهنه طارم (Nabatian and Ghaderi, 2013) واقع شده است (شکل ۱-الف). این گستره در نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰/۰۰۰ چهارگوش زنجان (Stöcklin and Eftekhmezhad, 1969) و ۱:۱۰۰/۰۰۰ ورقه طارم (امینی و امینی چهرق، ۱۳۷۹) قرار دارد. براساس نقشه و گزارش زمین‌شناسی ۱:۱۰۰/۰۰۰ ورقه طارم، روند عمومی ساختارهای زمین‌شناسی، همسان با دیگر مناطق البرز غربی، شمال‌غرب-جنوب‌شرق می‌باشد. پی‌سنگ قدیمی این ناحیه از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی دگرگون شده منسوب به پرکامبرین تشکیل شده است. در ائوسن بر اثر فازهای کششی، حجم زیادی از گدازه‌های آتشفشانی و مواد آذرآواری به‌همراه نهشته‌های رسوبی نهشته شده است. بیشتر سنگ‌های گدازه‌ای و پیروکلاستیکی در این زیرپهنه، که از آندزیت، ایوبین بازالت، ماسه‌سنگ و توف تشکیل شده‌اند،

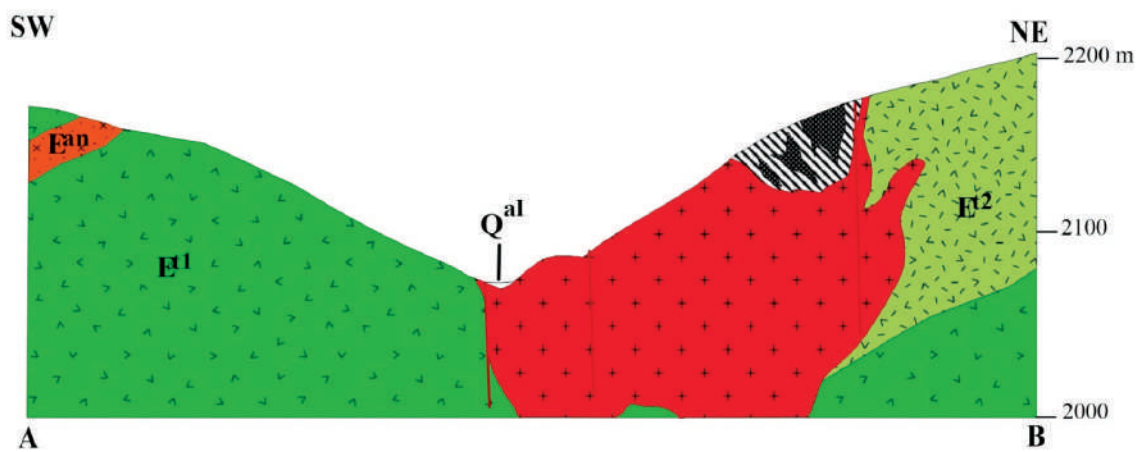
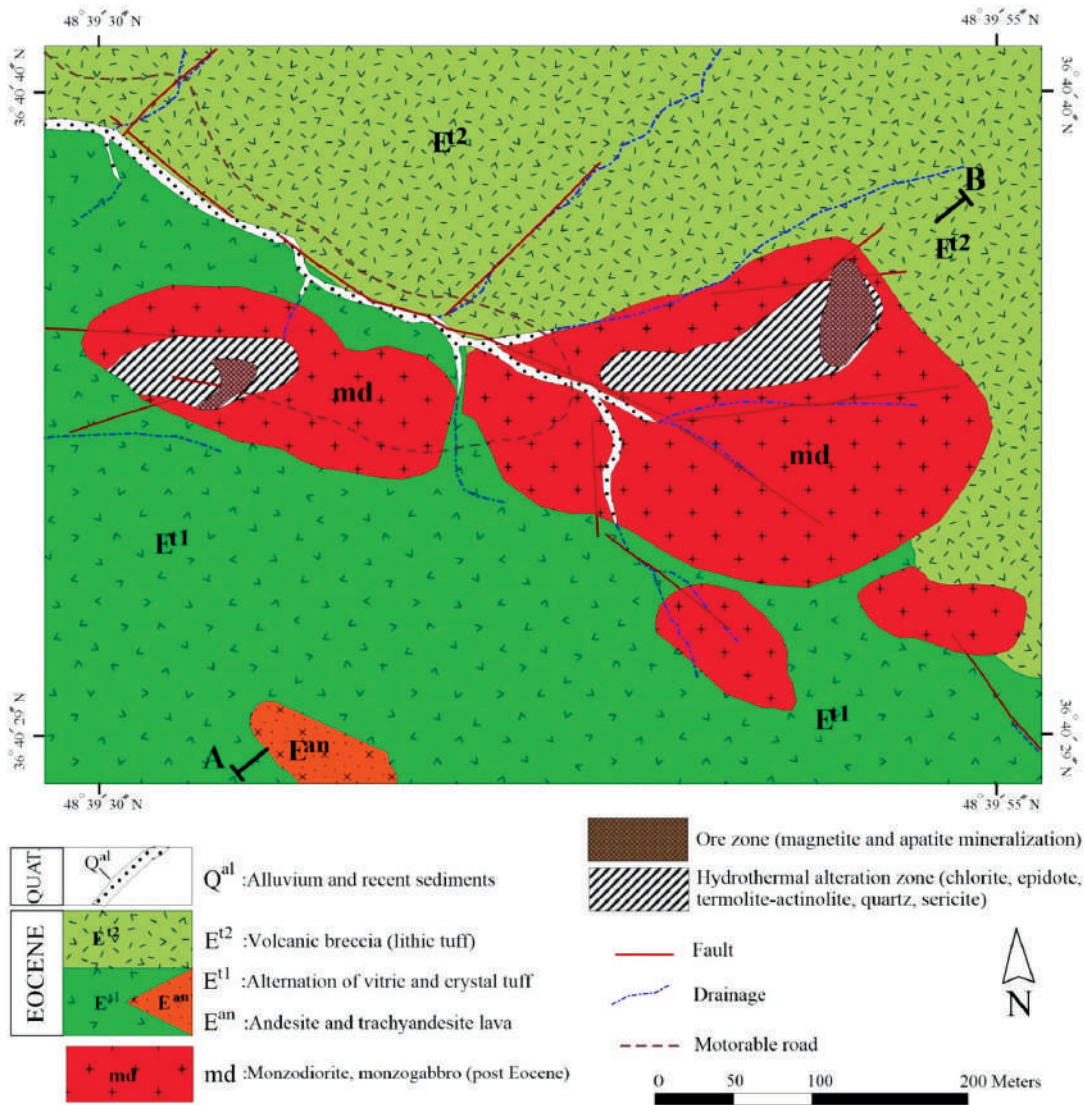
خرد و سپس به آزمایشگاه‌های مربوطه ارسال شدند. آنالیز اکسیدهای اصلی به روش XRF در آزمایشگاه بخش زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس و آنالیز عناصر فرعی و کمیاب به روش ICP-MS در آزمایشگاه شرکت مطالعات مواد معدنی زرآما به انجام رسید. برای پردازش و تحلیل داده‌های حاصل از آنالیز ژئوشیمیایی اکسیدهای اصلی، عناصر اصلی، فرعی و کمیاب و رسم نمودارها، از نرم‌افزارهای Excel، Minpet و GCDkit استفاده شده است.

مطالعات میانبارهای سیال بر روی پنج نمونه از کانی‌های آپاتیت انجام شد. اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی با استفاده از دستگاه میانبار سیال مدل Linkam THMSG600 متصل به میکروسکوپ Zeiss و مجهز به کنترل‌کننده حرارتی TMS94 و سردکننده LNP در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شده است. دامنه حرارتی دستگاه، ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است. کالیبراسیون دستگاه در مرحله گرمایش با دقت ± 0.6 درجه صورت گرفت و با نیترات سزیم با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد و در مرحله سرمایش با دقت ± 0.2 درجه سانتی‌گراد و با ماده استاندارد ان-هگزان^۱ با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتی‌گراد انجام شد. میزان شوری به‌صورت معادل درصد وزنی نمک طعام^۲ و از طریق دمای ذوب آخرین



شکل ۱. الف) نقشه پهنه‌های رسوبی-ساختاری ایران (آقنابتی، ۱۳۸۳)، ب) نقشه زمین‌شناسی ساده شده ذخایر آهن زنجان، با کمی تغییرات از نباتیان و قادری (Nabatian and Ghaderi, 2013)، موقعیت کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان آباد با چهارگوش سیاه رنگ بر روی نقشه مشخص شده است

1. n-Hexane
2. wt.% NaCl equiv.
3. Tm-ice



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ گستره اکتشافی غرب گلستان‌آباد

شده‌اند (شکل ۳-الف). کانی‌های مذکور پنج تا ۲۰ درصد از سطح مقطع را تشکیل داده و در خمیره‌ای از شیشه، که کم‌وبیش دچار شیشه‌زدایی (دویتریفیکاسیون) شده‌اند، پراکنده هستند. این واحد گاه واجد ساخت و بافت‌های نواری-جریانی (ایگنمبریتی) هستند و از نوارهای جریانی ناپیوسته با ضخامت‌های کمتر از یک سانتی‌متر تشکیل شده است. ترکیب سنگ‌شناسی این میان‌لایه‌ها ریولیتی می‌باشد و از بلورهای کوارتز، پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپار در خمیره‌ای از خاکستر (شیشه) تشکیل شده است. خمیره، کم و بیش متحمل دگرسانی و شیشه‌زدایی (دویتریفیکاسیون) شده است.

واحد E^{an}: این واحد با رنگ رخنمون قهوه‌ای تیره تا سیاه (جلای ورنی) و رنگ سطح شکسته سبز تا خاکستری تیره، رخنمون کوچکی در جنوب‌غرب گستره را دارا است. براساس مطالعات میکروسکوپی، نمونه‌های برداشت شده از واحد E^{an} متعلق به یک واحد‌گدازه‌ای با ترکیب آندزیت-تراکی آندزیتی است و واجد بافت پورفیری با خمیره‌ای شیشه‌ای می‌باشند و در آن پورفیروبلاست‌ها متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و مقادیر فرعی آلکالی‌فلدسپار، کانی‌های مافیک، کوارتز و کانی‌های کدر هستند (شکل‌های ۳-ب و ج). در بخش‌هایی از مقطع، به‌واسطه هم‌رشدی کانی‌های فنوکریست، بافت گلومروپورفیریک قابل مشاهده است. بلورهای پلاژیوکلاز که گاه دارای بافت غربالی هستند، به‌صورت کانی‌های نیمه‌شکل‌دار تا خودشکل و در اندازه‌های ۰/۳ تا سه میلی‌متر فراوان‌ترین می‌باشند و اغلب مقادیر جزئی توسط کلسیت و سریسیت جانشین شده‌اند. شدت دگرسانی در مرکز بلورها بیشتر از حاشیه آنها می‌باشد و نشانه کلسیک‌تر بودن مرکز بلورها و منطقه‌بندی عادی در پلاژیوکلازها است. وجود هسته کلسیک در پلاژیوکلازها، نشانه تبلور زود هنگام این کانی‌ها از مذاب اولیه می‌باشد. کانی‌های مافیک، که پنج تا ۱۰ درصد از سطح مقطع را تشکیل داده‌اند، اغلب به‌طور کامل توسط کلریت، اپیدوت، کلسیت و اکسیدهای آهن جانشین شده‌اند. خمیره شیشه‌ای سنگ، کم‌وبیش دچار شیشه‌زدایی (دویتریفیکاسیون) شده است.

واحد E^{t2}: این واحد که با رنگ خاکستری روشن، گستره

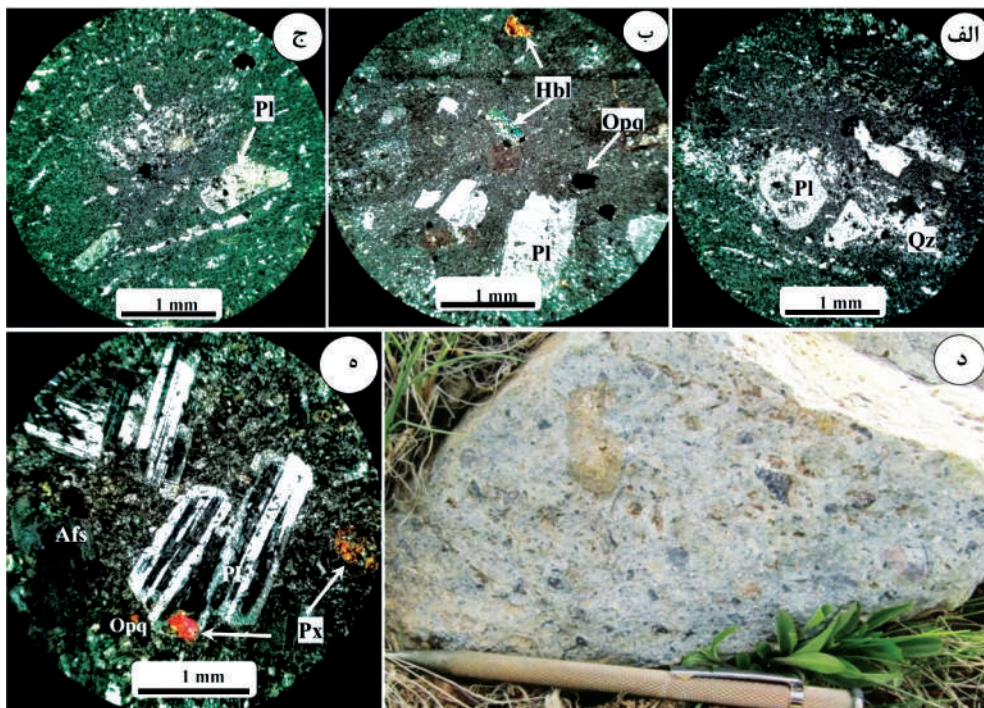
متعلق به سازند کرج هستند (Hirayama et al., 1966) و پس از این در اثر تزریق سنگ‌های نفوذی بعد از ائوسن قرار دارند. این سازند در البرز غربی و مرکزی، بخشی از مجموعه ماگمایی البرز به سن ائوسن است که در محیط تکتونیکی کمان و پشت‌کمانی و رژیم کششی بعد از برخورد نهشته شده است (Berberian and King, 1981; Hassanzadeh et al., 2008; Mirnejad et al., 2010; Asiabanha and Foden, 2012).

واحدهای سنگی رخنمون یافته در نقشه زمین‌شناسی گستره کانسار غرب گلستان‌آباد با مقیاس ۱:۱۰۰۰، شامل یک توالی از سنگ‌های آتشفشانی متعلق به سازند کرج (ائوسن) متشکل از توف و گدازه‌های با ترکیب حدواسط (آندزیت تا تراکی آندزیت) می‌باشد و توسط توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق مونزوادیوریت-مونزوگابروبی با سن ائوسن پایانی-الیگوسن قطع شده است (شکل ۲). به‌طور خلاصه، زمین‌شناسی واحدهای سنگی در گستره کانسار غرب گلستان‌آباد به شرح زیر است:

واحد E^{t1}: این واحد با رنگ رخنمون خاکستری روشن نزدیک به نیمی از گستره را پوشش داده و بلندترین ارتفاعات گستره را شامل شده است. واحد E^{t1} از تناوب ویتریک‌توف و کریستال‌توف همراه با میان‌لایه‌هایی از ایگنمبریت تشکیل شده است. براساس مطالعات میکروسکوپی، توف‌های بلورین (کریستال‌توف) دارای بافت پورفیروکلاستیک هستند و متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و مقادیر فرعی کوارتز، آلکالی‌فلدسپار، کانی‌های مافیک و کانی‌های کدر هستند. بلورهای پلاژیوکلاز به‌صورت کانی‌های نیمه‌شکل‌دار تا خودشکل و در اندازه‌های ۰/۳ تا دو میلی‌متر فراوان‌ترین می‌باشند و اغلب به‌طور جزئی توسط سریسیت، کلسیت و کانی‌های رسی جانشین شده‌اند. کانی‌های مافیک، که به‌طور معمول کمتر از ۱۰ درصد از سطح مقطع را تشکیل داده‌اند، اغلب به‌طور کامل توسط کلریت، کلسیت، سریسیت و اکسیدهای آهن جانشین شده‌اند. توف‌های شیشه‌ای (ویتریک‌توف) دارای بافت ویتروکلاستیک هستند و بیشتر از خاکستر (شیشه) همراه با بلورهای پراکنده پلاژیوکلاز، کوارتز، آلکالی‌فلدسپار و کانی‌های کدر تشکیل

مافیک (بیشتر هورنبلند و گاه بیوتیت) را شامل می‌شوند. پلاژیوکلازها کم‌وبیش به سریسیت و کلسیت دگرسان شده‌اند. کانی‌های مافیک نیز اغلب به‌طور کامل توسط کلریت، اپیدوت، کلسیت، کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن جانشین شده‌اند. با توجه به شکل کانی دگرسان شده و نوع محصولات جانشینی، شاید کانی‌های مافیک از نوع بیوتیت و آمفیبول باشند. خمیره سنگ، کریپتوکریستالین تا شیشه‌ای هستند و از شیشه آتشفشانی دگرسان شده، میکروولیت‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، کانی‌های کدر و کانی‌های دگرسانی تشکیل شده است.

قابل توجهی در شمال و غرب گستره را پوشش داده است، از قطعات سنگی با ابعاد یک میلی‌متر تا پنج سانتی‌متر (و به‌ندرت تا ۱۰ سانتی‌متر) و اجزای بلورین در خمیره‌ای از خاکستر آتشفشانی تشکیل شده است. قطعات سنگی اغلب از جنس گدازه آندزیتی تا تراکی آندزیتی با بافت پورفیری هستند و اغلب با اشکال گوشه‌دار مشاهده می‌شوند (شکل ۳-۵). فنوکریست‌های موجود در قطعات سنگی اغلب شامل درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کمتر کانی‌های مافیک دگرسان شده (به کلریت، کلسیت، اپیدوت و اکسیدهای آهن) هستند. اجزای بلورین قابل تشخیص در سنگ، بیشتر پلاژیوکلازها در همراهی با مقادیر فرعی کانی‌های



شکل ۳. الف) تصویر میکروسکوپی از سنگ‌های ویتریک‌توف در همراهی با واحد E^1 ، ب و ج) تصاویر میکروسکوپی از واحد گدازه آندزیت و تراکی آندزیتی (E^{an})، د) تصویر واحد لیتیک‌توف (E^{l2})، ه) تصویر میکروسکوپی از توده مونزودیوریتی (md) در محدوده غرب گلستان‌آباد. تصاویر میکروسکوپی در نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL) برداشت شدند. Afs: آلکالی‌فلدسپار، Hbl: هورنبلند، Opq: کانی کدر، Pl: پلاژیوکلاز، Px: پیروکسن. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده‌اند

مونزودیوریت-مونزوگابرو (md)

و E^{l2} تزریق شده‌اند (شکل‌های ۲ و ۴). براساس مطالعات میکروسکوپی، توده‌های مونزودیوریت-مونزوگابرویی واجد بافت پورفیروئیدی می‌باشند و از پورفیروبلاست‌های پلاژیوکلاز، پیروکسن و آلکالی‌فلدسپار همراه با کانی‌های فرعی کوارتز، آپاتیت، کانی‌های کدر و زیرکن در خمیره‌ای

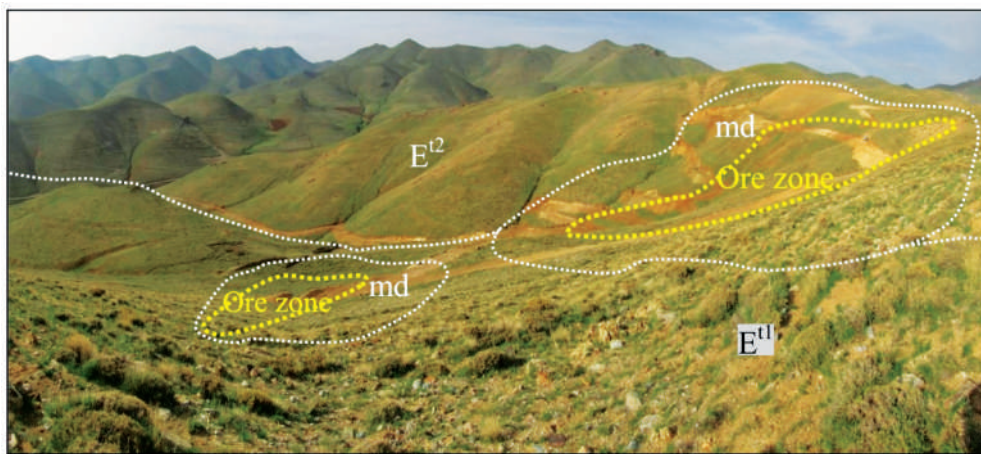
توده‌های نیمه‌عمیق با ترکیب مونزودیوریت-مونزوگابرویی و با رنگ رخنمون خاکستری تا سبز تیره سطح قابل توجهی از بخش‌های میانی گستره را پوشش داده است. توده‌های مذکور میزبان اصلی کانسنگ‌های آهن-آپاتیت هستند و حجم قابل توجهی از آنها در همبری واحدهای آتشفشانی E^1

ساخت، بافت و کانی‌شناسی کانسنگ

کانی‌سازی اکسید آهن-آپاتیت در کانسار غرب گلستان‌آباد، در دو سینه‌کار استخراجی شرقی و غربی، که حدود ۳۰۰ متر از هم فاصله دارند، برنزد دارند (شکل ۴). کانسنگ‌های معدنی در هر دو موقعیت با ساخت و بافت‌های رگه-رگچه‌ای، توده‌ای و دانه‌پراکنده در توده مونزودیوریت-مونزوگابروبی مشاهده می‌شوند (شکل ۵). کانی‌سازی اغلب به صورت رگه‌های مگنتیت-آپاتیت (و اکتینولیت) در راستای عمومی شرقی-غربی تا شمال شرق-جنوب غربی با طول‌های پنج تا چند ده متر و ضخامت‌های ۰/۱ تا دو متر برنزد دارند. ضخامت رگه‌ها در داخل ترانشه‌ها گاه به پنج متر نیز بالغ می‌شود.

کانه اصلی در کانسنگ‌ها مگنتیت است و با مقادیر فرعی از کانی‌های آپاتیت، اکتینولیت و کانی‌های سولفیدی (پیریت±کالکوپیریت) همراهی می‌شود. بیشینه فراوانی اکسیدهای آهن ($Fe_2O_3 + FeO$) و اکسید فسفر (P_2O_5) در کانسنگ‌های معدنی به ترتیب ۷۰/۳ و ۱۶/۹ درصد اندازه‌گیری شده است (شرکت خدمات اکتشافی کشور، ۱۳۹۶).

ریزبلور (میکروگرانولار) تشکیل شده‌اند (شکل ۳-۵). پلاژیوکلازها به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا خودشکل و در اندازه‌های ۲۰۰ میکرون تا سه میلی‌متر، حدود ۴۰ درصد از سطح مقطع را تشکیل داده‌اند. پلاژیوکلازها اغلب به‌طور جزئی توسط سریسیت و کمتر توسط کلسیت جانشین شده‌اند. پیروکسن‌ها در اندازه‌های کوچک‌تر از ۱/۵ میلی‌متر، پنج تا ۱۰ درصد از سطح مقطع را پوشش داده‌اند. پیروکسن‌ها به‌طور جزئی تا قابل توجه توسط کلریت و کمتر توسط کانی‌های کربنات (کلسیت)، اپیدوت و اکسیدهای آهن جانشین شده‌اند. آلکالی‌فلدسپارها به صورت بلورهای بی‌شکل در اندازه‌های ۰/۴ تا دو میلی‌متر، پنج تا ۱۰ درصد از سطح مقطع را تشکیل داده‌اند. کانی‌های مذکور اغلب به‌طور جزئی توسط کلسیت و سریسیت جانشین شده‌اند. در یکی از مقاطع مطالعه شده، تعداد انگشت‌شماری از فنوکریست‌های نیمه‌شکل‌دار کوارتز با اندازه‌های ۰/۳ تا ۱/۵ میلی‌متر مشاهده شده است. کانی‌های نیمه‌شکل‌دار تا خودشکل کدر (اغلب مگنتیت) در اندازه‌های ۵۰ تا ۶۰۰ میکرون و با فراوانی سه تا پنج درصد در سطح مقاطع مورد مطالعه پراکنده‌اند.



شکل ۴. تصویری از گسترش زون‌های کانی‌سازی در سنگ میزبان مونزودیوریت-مونزوگابرو (md) که در واحدهای آتشفشانی ائوسن (واحدهای E^1 و E^2) تزریق شده‌اند، دید به‌سوی شمال

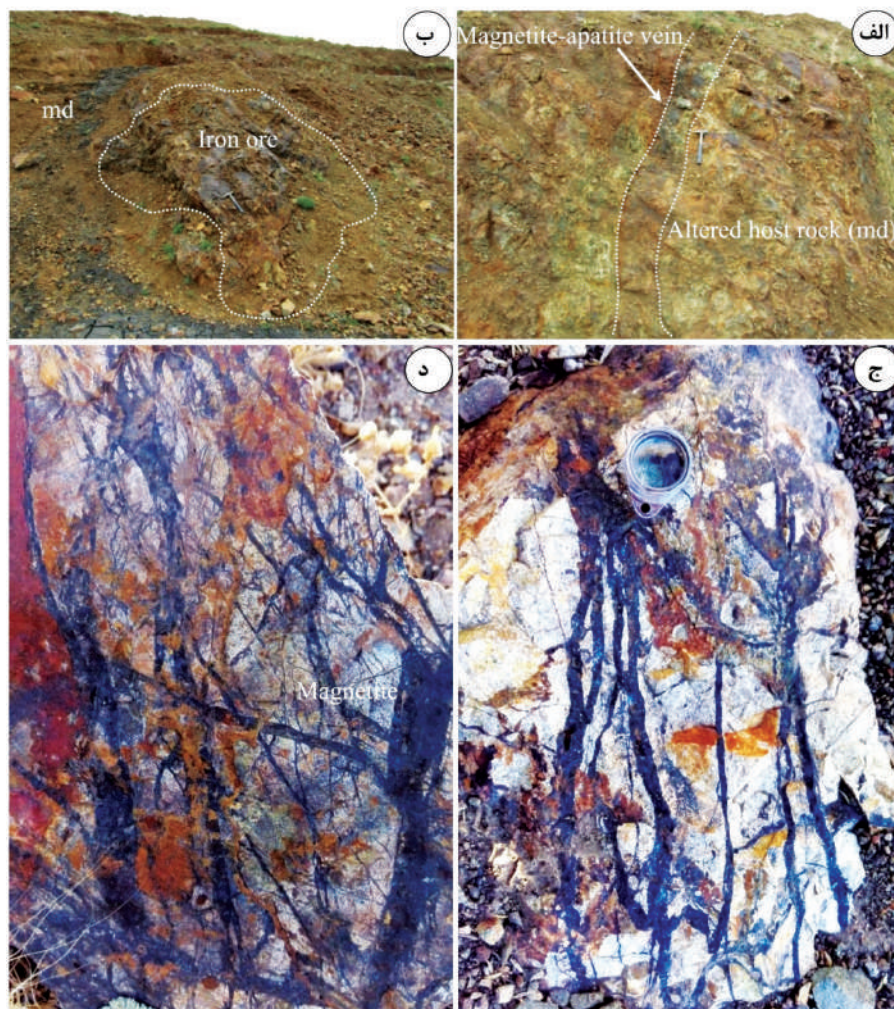
در گستره شامل اکتینولیتی شدن، سیلیسی شدن، سریسیتی شدن، پروپیلیتی شدن و سولفیدی شدن هستند. دگرسانی اکتینولیتی (\pm ترمولیت)، پروپیلیتی و سولفیدی اغلب در همراهی و نیز در اطراف کانسنگ‌های آهن-آپاتیت قابل مشاهده هستند.

جایگیری توده مونزودیوریت-مونزوگابروبی (md) در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن (واحدهای E^1 و E^2) و متعاقب آن، صعود سیالات گرمایی نشأت گرفته از توده مذکور، به رخداد دگرسانی و کانی‌سازی در توده نفوذی میزبان کانسار منجر شده است. مهم‌ترین دگرسانی‌های گرمایی رخ داده

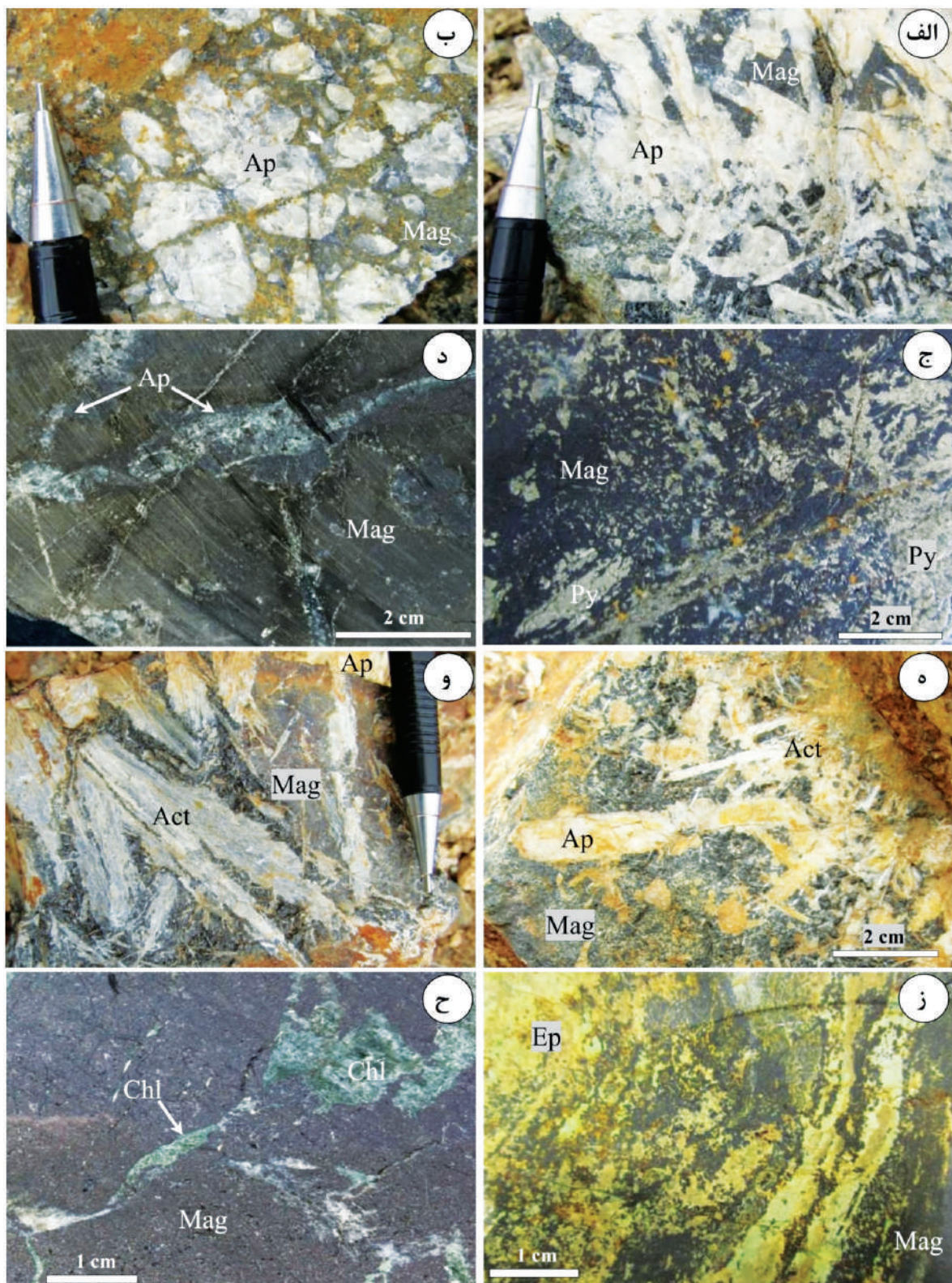
توده‌ای، رگچه‌ای و دانه‌پراکنده هستند، ولی در قسمت‌هایی از کانسنگ ممکن است توسط کانی‌های دگرسانی تأخیری قطع شده و بافت خرد و برشی شده (کاتاکلاستیک) نشان دهند. در مقیاس‌های نمونه دستی و میکروسکوپی، مگنتیت‌ها در دو نسل رخداد داشته‌اند: الف) مگنتیت‌های نسل اول که فراوان‌ترین نوع مگنتیت‌ها را شامل می‌شوند، اغلب به صورت هم‌رشد با بلورهای آپاتیت و اکتینولیت (\pm ترمولیت) مشاهده می‌شوند و ب) مگنتیت‌های نسل دوم، که به صورت رگچه‌های تأخیری مجموعه مگنتیت-آپاتیت-ترمولیت‌های نسل اول را قطع کرده‌اند. برخی بلورهای مگنتیت از حاشیه‌ها و مرز شکستگی‌ها، مارتنیتی شده و به هماتیت تبدیل شده‌اند.

در مقیاس‌های رخنمون و نمونه دستی، کانسنگ‌ها اغلب به صورت رگه-رگچه‌ای، برشی و کمتر توده‌ای و دانه‌پراکنده مشاهده می‌شوند. براساس مطالعه و بررسی میکروسکوپی مقاطع نازک-صیقلی، کانسنگ‌ها از کانی‌های فلزی مگنتیت، هماتیت، پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت، کولیت و ترکیبات هیدروکسیدی آهن و کانی‌های غیرفلزی اکتینولیت، ترمولیت، آپاتیت، کوارتز، کلریت، اپیدوت و سریسیت تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۶ و ۷).

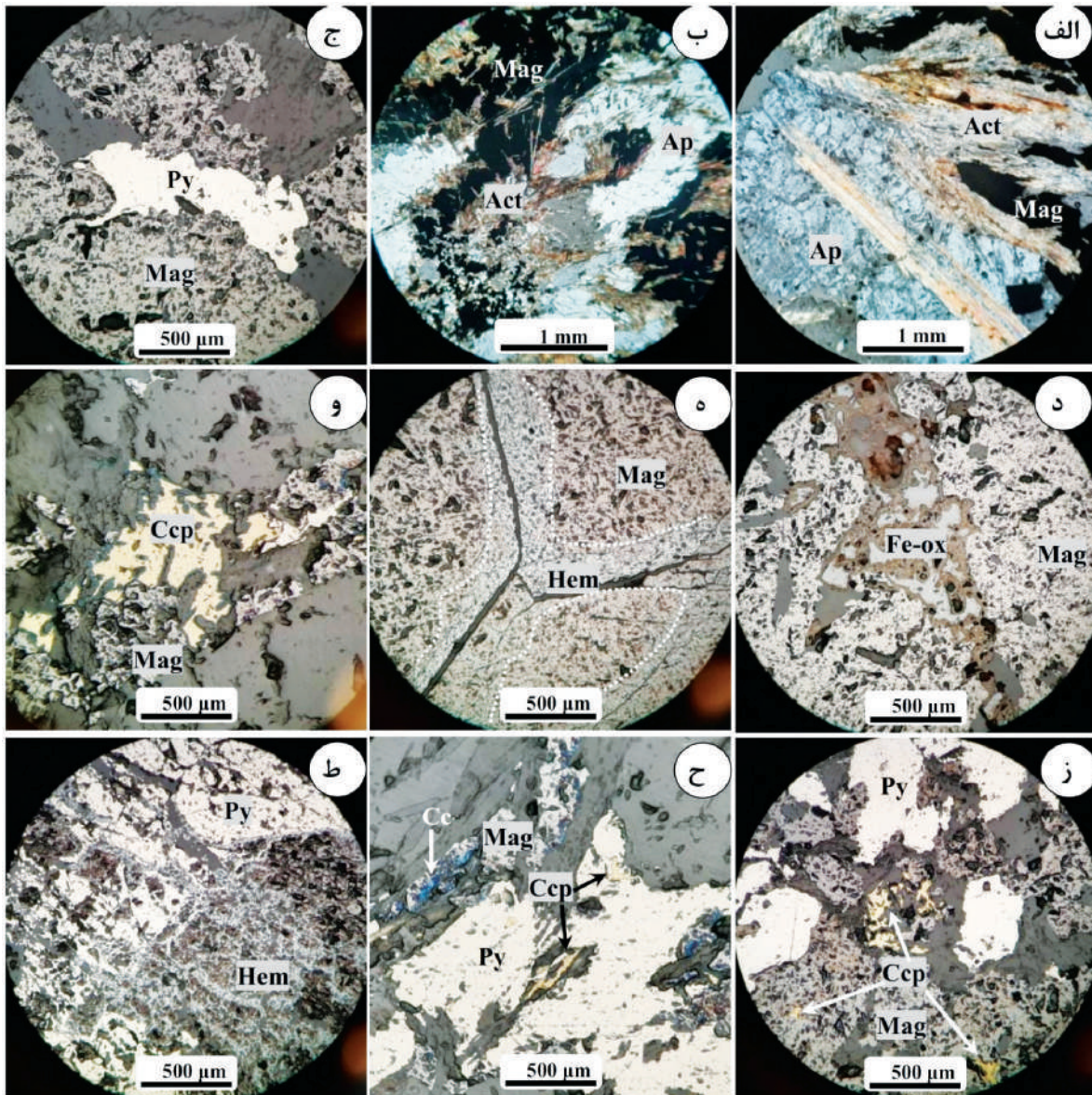
مگنتیت به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار و گاه خودشکل در اندازه‌های ۱۰۰ میکرون تا پنج میلی‌متر، به طور معمول ۲۰ تا ۹۰ درصد از حجم کانسنگ را تشکیل داده است. مگنتیت‌ها به طور معمول واجد بافت‌های



شکل ۵. الف) تصویری از رخنمون کانسنگ آهن (مگنتیت) و آپاتیت با ساخت رگه‌ای در توده مونزودیوریت-مونزوگابرو (md) که در اطراف با دگرسانی‌های گرمایی همراه است، ب) تصویر دیگری از رخنمون کانسنگ آهن با ساخت توده‌ای، ج و د) کانی‌سازی آهن (مگنتیت) با ساخت رگه-رگچه‌ای (استوک‌ورک) در توده مونزودیوریت-مونزوگابرو، در قسمت‌هایی از تصویر "د" ساخت برشی نیز مشهود است



شکل ۶. تصاویری از ساخت، بافت و کانی‌شناسی کانسنگ‌های آهن و آپاتیت در کانسار غرب گلستان آباد در مقیاس نمونه دستی، الف و ب) هم‌رشدی مگنتیت و آپاتیت‌های شکل‌دار، ج) رخداد پیریت در همراهی با مگنتیت، د) رگچه‌های آپاتیت، کانسنگ مگنتیتی را قطع کرده‌اند، ه و و) هم‌رشدی آپاتیت، مگنتیت و اکتینولیت، ز) دگرسانی اپیدوت که بر روی کانسنگ مگنتیتی رونقش شده است، ح) رگچه‌های انباشته از کلریت، کانسنگ مگنتیتی را قطع کرده‌اند. Act: اکتینولیت، Ap: آپاتیت، Chl: کلریت، Ep: اپیدوت، Mag: مگنتیت. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده‌اند



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی، (الف و ب در نور عبوری با نیکول‌های متقاطع، XPL، بقیه تصاویر در نور انعکاسی) از کانی‌های فلزی و روابط بافتی در کانسنگ‌های آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد، الف و ب) هم‌رشدی آپاتیت، مگنتیت و اکتینولیت، ج) رگچه پیریت، مگنتیت‌ها را قطع کرده است، د) رگچه انباشته از ترکیبات هیدروکسیدی آهن، که احتمالاً از اکسایش کانه‌های سولفیدی حاصل شده‌اند، بلورهای مگنتیت را قطع کرده است، ه) بلورهای مگنتیت از حاشیه توسط هماتیت جانشین شده‌اند، و) هم‌رشدی مگنتیت و کالکوپیریت، ز) هم‌رشدی پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت، ح) رگچه کالکوپیریت، بلورهای پیریت و مگنتیت را قطع کرده و کالکوپیریت نیز به صورت بخشی توسط کالکوسیت جانشین شده است، ط) هم‌رشدی پیریت و هماتیت، Act: اکتینولیت، Apt: آپاتیت، Cc: کالکوسیت، Ccp: کالکوپیریت، Fe-ox: ترکیبات هیدروکسیدی آهن، Hem: هماتیت و Py: پیریت. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است

پیریت‌ها به صورت بلورهای بی‌شکل تا خودشکل و در اندازه‌های ۵۰ میکرون تا ۱/۵ میلی‌متر، به طور معمول کمتر از یک درصد سطح مقطع را پوشش داده‌اند. پیریت به عنوان فراوان‌ترین کانه سولفیدی، در همراهی با مجموعه‌های مگنتیت-آپاتیت و اکتینولیت‌های نسل‌های اول و دوم قابل مشاهده است. در نمونه‌های سطحی، پیریت‌ها کم‌وبیش پیریت‌ها به صورت بلورهای بی‌شکل تا خودشکل و در اندازه‌های ۵۰ میکرون تا ۱/۵ میلی‌متر، به طور معمول کمتر از یک درصد سطح مقطع را پوشش داده‌اند. پیریت به عنوان فراوان‌ترین کانه سولفیدی، در همراهی با مجموعه‌های مگنتیت-آپاتیت و اکتینولیت‌های نسل‌های اول و دوم قابل مشاهده است. در نمونه‌های سطحی، پیریت‌ها کم‌وبیش

اکسایش یافته و توسط ترکیبات هیدروکسیدی آهن جانشین شده‌اند.

کالکوپیریت‌ها به صورت بلورهای بی‌شکل در اندازه‌های کوچکتر از یک میلی‌متر و با فراوانی ناچیز در سطح مقطع پراکنده‌اند. کالکوپیریت‌ها نیز در همراهی با هر دو نسل از مجموعه‌های کانیایی مگنتیت-آپاتیت و اکتینولیت مشاهده

(نسل اول) و ب) مگنتیت-آپاتیت-اکتینولیت (نسل دوم) مشاهده می‌شوند. تیغه‌های اکتینولیت گاه به صورت میانبار در داخل آپاتیت‌های نسل اول دیده شده است. اندازه بلورهای اکتینولیت به‌طور معمول از یک میلی‌متر تا دو سانتی‌متر در تغییر است و به‌طور معمول در مقادیر جزئی تا قابل توجه توسط کربنات (کلسیت) جانشین شده‌اند.

اپیدوت و با فراوانی کمتر کلریت از دیگر کانی‌های دگرسانی مشاهده شده در نمونه‌های کانسنگ هستند که به‌طور معمول در مرحله پایانی تکامل کانسنگ تشکیل شده و مجموعه کانی‌های مگنتیت-آپاتیت و اکتینولیت (نسل اول) را قطع کرده‌اند.

با توجه به روابط بافتی و کانی‌شناسی نمونه‌های کانسنگ مطالعه شده در مقیاس‌های نمونه دستی و میکروسکوپی، توالی پاراژنزی کانی‌ها در کانسار اکسید آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد در شکل ۸ رسم شده است.

شده‌اند. کالکوپیریت‌ها گاه از حاشیه بلور و مرز شکستگی‌ها توسط کالکوسیت، کولیت و ترکیبات هیدروکسیدی آهن جانشین شده‌اند.

آپاتیت به عنوان شاخص‌ترین کانی همراه با مگنتیت‌ها و به‌صورت بلورهای متوسط تا درشت‌بلور در اندازه‌های ۰/۱ تا پنج سانتی‌متر در بیشتر کانسنگ‌ها قابل مشاهده است. در نمونه‌های دستی اغلب، بلورهای آپاتیت به رنگ‌های سفید تا خاکستری روشن و گاه صورتی دیده می‌شوند. در مقیاس‌های نمونه دستی و میکروسکوپی، آپاتیت‌ها در همراهی با مگنتیت و اکتینولیت در دو نسل تشکیل شده‌اند، فراوان‌ترین رخداد آپاتیت‌ها در همراهی با مگنتیت و اکتینولیت‌های نسل اول قابل مشاهده است.

اکتینولیت، دیگر کانی شاخص همراه با کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت در این کانسار است و به‌صورت بلورهای کشیده منشوری و سوزنی‌شکل در دو نسل و به‌صورت مجموعه کانیایی الف) مگنتیت-آپاتیت-اکتینولیت

Minerals		Mineralization	Supergen (weathering)
Magnetite		████████████████████	
Pyrite		████████████████████	
Chalcopyrite		████████████████████	
Hematite		████████████████████	
chalcocite-covelite		████████████████████	
Fe-hydroxides		████████████████████	
Apatite		████████████████████	
Quartz		████████████████████	
Actinolite-termolite		████████████████████	
Chlorite		████████████████████	
Epidote		████████████████████	
structures and textures	Disseminated	████████████████████	
	Stockwork	████████████████████	
	Massive	████████████████████	

شکل ۸. نمودار توالی پاراژنزی در کانسنگ‌های آهن-آپاتیت کانسار غرب گلستان‌آباد

رده‌بندی شیمیایی، سری ماگمایی و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های میزبان کانی‌سازی

نمودارهای متعددی برای نامگذاری سنگ‌های آتشفشانی براساس ترکیب شیمیایی آنها ارائه شده است. از مهمترین آنها می‌توان به نمودارهای کاکس و همکاران (Cox et al., 1979) و میدل‌موست (Middlemost, 1994) اشاره کرد. بر طبق این دو نمودار، که براساس تغییرات میزان سیلیس (SiO_2) در مقابل مجموعه آلکالی ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) رسم می‌شوند، سنگ‌های نفوذی گستره غرب گلستان‌آباد در قلمرو مونزودیوریت و مونزوگابرو قرار می‌گیرند (شکل ۹).

به‌منظور تعیین فراوانی اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و کمیاب، چهار نمونه از توده مونزودیوریت-مونزوگابروی میزبان کانی‌سازی در کانسار غرب گلستان‌آباد برداشت و با استفاده از روش‌های XRF و ICP-MS به‌ترتیب در آزمایشگاه‌های بخش زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس و شرکت مطالعات مواد معدنی زرآما آنالیز شدند (جدول ۱).

جدول ۱. داده‌های تجزیه شیمیایی عنصرهای اصلی (بر پایه درصد وزنی یا wt.%) و عنصرهای کمیاب (بر پایه گرم در تن یا ppm)، الف) سنگ میزبان نفوذی با ترکیب مونزودیوریت-مونزوگابرو (md)، ب) بلورهای مگنتیت (Mag)، ج) بلورهای آپاتیت (Ap) در گستره کانسار آهن غرب گلستان‌آباد

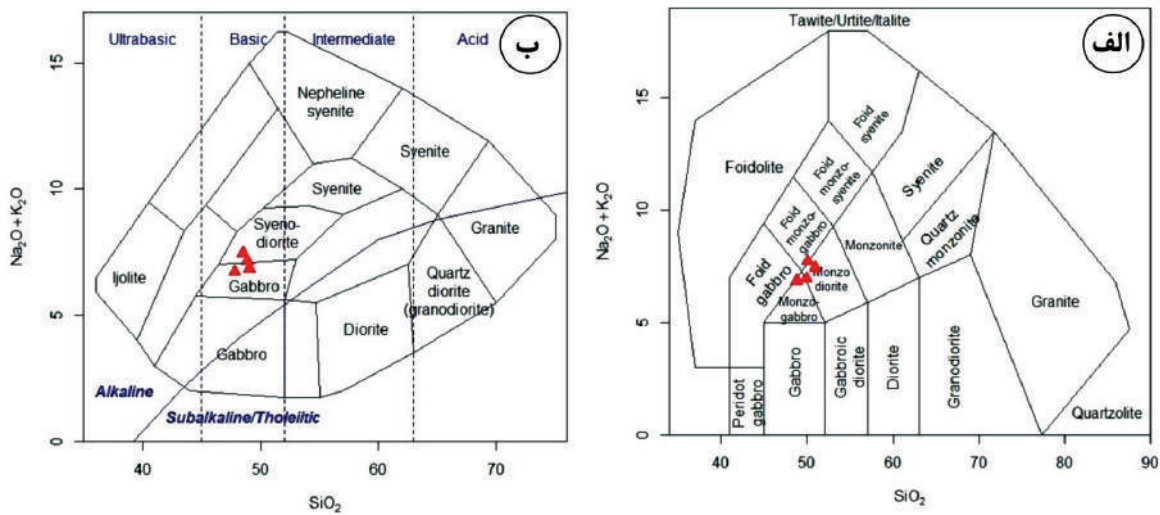
Sample Type	G-1 Ap	G-33 Ap	G-18 Ap	G-41 Ap	G-65 Ap	G-28 Mag	G-31A Mag	G-31B Mag	G-27 md	G-49 md	G-50 md	G-3 Md
Al_2O_3	۰/۱۲۴	۰/۰۸۴	۰/۱۸	۰/۰۲۷	۰/۱۰۲	۰/۵۷	۱/۰۶	۱/۰۳	۱۴/۷۵	۱۶/۴۶	۱۶/۷۴	۱۴/۵۵
CaO	۴۹/۸۲	۴۸/۲۳۲	۴۶/۱۸۸	۴۹/۹۹	۰/۵۳۹	۰/۴۶	۳/۰۲	۲/۶۷	۲/۲۵	۱/۳۵	۲/۹۴	۰/۰۴
Fe_2O_3	۰/۸۵۴	۲/۴۴۷	۲/۲۴۸	۱/۱۲۳	۳/۵۲۲	۸۳/۲۲	۷۶/۰۹	۷۸/۰۱	۱۵/۵۸	۱۲/۹۷	۱۳/۱۴	۱۵/۰۸
K_2O	۰/۱۰	۰/۰۰۵	۰/۰۱۸	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۸	۴/۰۴	۴/۸۶	۳/۶۴	۳/۹۱
MgO	۰/۶۳	۰/۷۴۵	۰/۱۵۲	۰/۹۰۷	۱/۳۸۹	۰/۹۰	۱/۳۴	۱/۶۶	۹/۴	۸/۴۳	۸/۲۹	۹/۱۲
MnO	۰/۰۶۸	۰/۰۹۲	۰/۰۹	۰/۱۰۵	۰/۰۶۱	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۷
Na_2O	۰/۰۷۳	۰/۰۱۲	۰/۱۱۶	۰/۰۵۲	۳/۴۷	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۳۴	۲/۸۰	۲/۶۰	۳/۱۸	۴/۰۴
P_2O_5	۴۲/۱۷	۴۰/۳۳	۳۹/۶۰	۴۱/۷۷	۴۰/۳۶۶	۰/۵۰	۳/۴۵	۳/۰۴	۰/۴۸	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۲۴
SiO_2	۲/۹۵	۴/۷۷۲	۷/۹۴۳	۲/۲۲	۳/۲۶۸	۱۲/۴۲	۱۳/۰۳	۱۱/۴۴	۴۷/۸۲	۴۸/۵۰	۴۹/۰۷	۴۸/۹۰
SO3	۰/۰۵۹	۰/۰۵۶	۰/۰۴۹	۰/۱۸۷	۰/۰۵۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
TiO_2	۰/۰۲۴	۰/۰۶	۰/۰۳۸	۰/۰۱۷	۰/۰۰۸	۱/۱۳	۱/۲۵	۱/۲۸	۰/۹۴	۱/۲۵	۰/۸۷	۰/۸۹
LOI	۳/۱۰	۲/۹۷	۳/۲۴	۴/۰۹	۲/۷۴	۰/۳۲	۰/۱۷	۰/۴۷	۱/۸۵	۳/۴۵	۱/۶۷	۲/۸۵
Total	۹۹/۹۰	۹۹/۸۷	۹۹/۸۶	۹۹/۹۴	۱۰۰/۱۴	۱۰۰/۰۴	۹۹/۹۶	۱۰۰/۰۷	۹۹/۸۶	۱۰۰/۲۷	۹۹/۹۷	۹۹/۸۱
Ag	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
As	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۰/۸	۱۱/۹	۹/۱	۴/۳	۴/۸	۴	۴/۸
Ba	۵	۶	۵	۸	۴	۸	۹	۹	۱۹۶	۵۷۵	۳۳۴	۲۱۳
Be	۰/۴	۰/۴	۰/۵	۰/۴	۰/۴	۰/۷	۱/۳	۱/۱	۱/۳	۱/۸	۲/۳	۱/۴
Bi	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Cd	۱/۶	۱/۷	۱/۶	۱/۵	۲/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۲
Co	۱	۱	۱/۵	۱	۲/۶	۱۱/۹	۲۸/۴	۳۰/۸	۱۶/۹	۱۵/۸	۱۵/۴	۱۸/۱
Cr	۸	۸	۷	۸	۷	۱۵	۱۱۹	۹۷	۷۶	۵۶	۸۴	۷۳
Cs	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۴	۵	۴/۱	۴/۳
Cu	۰/۷۵	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۵۰	۷	۷	۱۱
Hf	۰/۹۹	۰/۹	۰/۷۸	۱/۱۲	۰/۹۴	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۰/۵	۰/۸۳	۰/۵۹
In	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
Li	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲۷	۲۶	۱۲	۲۷
Mo	۰/۵	۰/۵	۰/۲	۰/۶	۱/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱

ادامه جدول ۱.

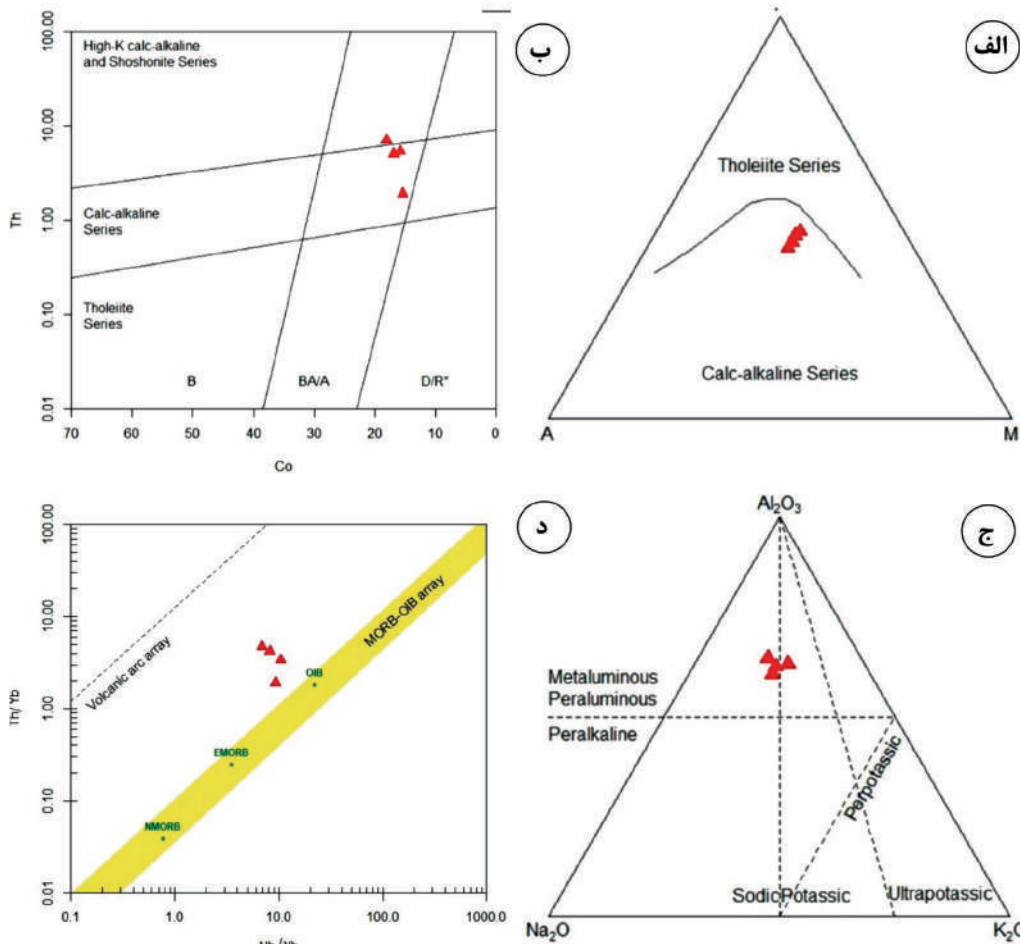
Sample Type	G-1 Ap	G-33 Ap	G-18 Ap	G-41 Ap	G-65 Ap	G-28 Mag	G-31A Mag	G-31B Mag	G-27 md	G-49 md	G-50 md	G-3 Md
Nb	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹/۸	۱۶/۷	۹/۳	۱۰/۳
Ni	۳	۳	۸	۳	۶	۴۷	۴۰	۴۱	۲۶	۱۳	۱۷	۱۷
Pb	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۴	۶	۲۰	۵۴	۱۳
Rb	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۶۹	۱۸۷	۱۷۷	۱۴۵
Sb	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
Sc	۰/۹	۰/۹	۲	۱/۱	۲/۱	۱/۵	۲۳	۲/۳	۲۷/۶	۳۱/۶	۲۶	۳۰/۲
Se	۴۶/۸۹	۴۹/۱۵	۴۲/۶۳	۵۷/۷	۴۹/۴۲	۰/۵	۱/۸۶	۱/۵۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
Sn	۰/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۳	۰/۴	۲/۴	۲/۵	۲/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۲	۱/۴
Sr	۱۲۳	۱۲۷	۱۱۴	۱۴۲	۱۳۸	۳/۷	۸/۳	۷/۱	۱۸۵	۱۷۲	۲۰/۷	۱۸۷
Ta	۰/۳۷	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۲۲	۰/۲	۰/۲۳	۰/۵۹	۰/۷۷	۰/۵۹	۰/۶۸
Te	۰/۲۹	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Th	۳۲/۲۳	۳۸/۹۵	۳۲/۳۹	۴۳/۱۷	۵۳/۹۳	۸/۲۵	۱۴/۰۶	۱۱/۸	۴/۹۹	۵/۳۸	۱/۹۱	۷/۰۵
Tl	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۳۳	۰/۵۴	۰/۵۱	۰/۳۳
U	۵/۳	۵/۹	۳/۸	۶/۷	۱۴/۵۹	۱/۸	۳	۲/۸۱	۱/۵	۱/۷	۱/۱	۱/۷
V	۵۱	۱۰۰	۱۰۳	۶۱	۱۲۰	۲۷۹۶	۲۱۹۷	۲۳۱۵	۴۳۰	۳۷۲	۳۳۷	۳۸۵
W	۱۲/۱	۵/۱	۳/۸	۱/۸	۱/۶	۲/۲	۱/۹	۲/۱	۲/۸	۱/۶	۱/۳	۷/۹
Y	۱۱۲۴	۱۰۵۹	۹۷۷	۱۲۱۱	۱۱۰۰	۳۲/۳	۹۳/۱	۸۲/۶	۱۳/۲	۲۱/۹	۸/۷	۱۵/۴
Zn	۱	۱	۱	۱	۱	۳۱	۲۹	۳۵	۱۷	۳۱	۶۷	۲۴
Zr	۵	۵	۵	۵	۵	۱۸	۱۶	۱۷	۳۴	۳۹	۴۳	۴۱
Ce	۱۶۸۷	۱۶۳۲	۱۴۰۹	۲۵۲۱	۲۱۳۵	۶۸	۱۷۷	۱۴۴	۲۶	۲۶	۴۱	۲۲
Dy	۲۱۳	۱۹۷	۱۸۴	۲۴۰	۲۱۰	۷/۸	۱۸/۷۸	۱۶/۷۶	۳/۰۸	۴/۱۳	۲/۴۶	۳/۴۶
Er	۱۱۳	۱۰۶	۹۶/۲۷	۱۲۵	۱۱۳	۳/۶	۱۰/۰۸	۸/۸۸	۱/۷	۲/۲۶	۱/۳۱	۱/۹۱
Eu	۱۳/۵۸	۱۲/۷۴	۱۱/۳۱	۱۷/۳۶	۱۵/۸۳	۰/۶	۱/۳۲	۱/۱۱	۰/۷۳	۰/۷۵	۰/۷۷	۰/۶۹
Gd	۲۸۱	۲۵۸	۲۴۳	۳۳۰	۲۸۹	۹/۴۹	۲۲/۳۸	۲۰/۳۶	۳/۴۳	۴/۱۸	۲/۷۷	۳/۸۸
La	۶۰۱	۵۴۶	۴۹۴	۹۳۴	۸۲۱	۳۵	۷۶	۶۱	۱۸	۱۵	۲۵	۱۶
Lu	۱۰/۷	۱۰/۰۳	۹/۰۳	۱۱/۸۷	۱۰/۹۱	۰/۳۷	۱/۰۱	۰/۸۷	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۲۴
Nd	۱۱۵۹	۱۱۰۶	۱۰۱۲	۱۵۸۰	۱۳۶۱	۴۹/۱	۱۰/۸	۹۱/۷	۱۷/۷	۱۹/۷	۱۹/۸	۸/۹
Pr	۲۶۱	۲۴۴	۲۲۶	۳۷۰	۳۱۷	۱۱	۲۵/۰۹	۲۰/۳۶	۴/۳۷	۴/۴۷	۵/۰۹	۴/۵۴
Sm	۲۶۴	۲۴۶	۲۲۹	۳۲۵	۲۸۴	۱۰/۱۲	۲۲/۸۳	۲۰/۲۲	۳/۷۳	۴/۱۴	۳/۳۹	۴/۱۳
Tb	۳۳/۳۹	۳۰/۷۶	۲۸/۸۸	۳۸/۲۵	۳۳/۴۶	۱/۲	۲/۸	۲/۶	۰/۵۱	۰/۶۴	۰/۴۲	۰/۵۷
Tm	۱۳/۰۴	۱۲/۳۲	۱۱/۱	۱۴/۳۷	۱۳/۱۴	۰/۵۳	۱/۳۱	۱/۱۵	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۲۳	۰/۳۱
Yb	۷۴/۹	۷۰/۶	۶۳/۵	۸۴/۶	۷۷/۳	۲/۷	۷/۳	۶/۵	۱/۲	۱/۶	۱	۱/۵
ΣREE	۴۵۷۹	۴۳۳۵	۹۷۹۷	۶۴۲۵	۵۵۳۰	۱۱۴	۳۶۱	۲۰۵	۴۲	۴۱	۶۷	۳۸

از نمودار سه‌تایی $Al_2O_3-Na_2O-K_2O$ که براساس نسبت مولکولی اکسیدهای مذکور بیان شده و برای تعیین میزان آلومین کاربرد دارد، نمونه‌های مورد بررسی در محدوده‌های متآلومین و پراآلومین قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-ج).
 بر پایه نمودار Th/Yb در مقابل Nb/Yb (Pearce, 2008) که برای تعیین ویژگی‌های منشأ ماگما طراحی شده

برای تعیین سری‌های ماگمایی توده میزبان کانی‌سازی در کانسار غرب گلستان‌آباد، از دو نمودار AFM (Irvine and Baragar, 1971) و Th در مقابل Co (Hastie et al., 2007) استفاده شده است. براساس نمودارهای ذکر شده، تمامی نمونه‌ها در قلمرو سری کالک‌آلکان قرار می‌گیرند (شکل‌های ۱۰-الف و ب). همچنین با استفاده



شکل ۹. طبقه‌بندی ژئوشیمیایی و نامگذاری توده نفوذی نیمه‌عمیق در محدوده غرب گلستان‌آباد با استفاده از، الف) نمودار SiO_2 در مقابل Na_2O+K_2O (Cox et al., 1979) ب) نمودار Na_2O+K_2O در مقابل SiO_2 (Middlemost, 1994)



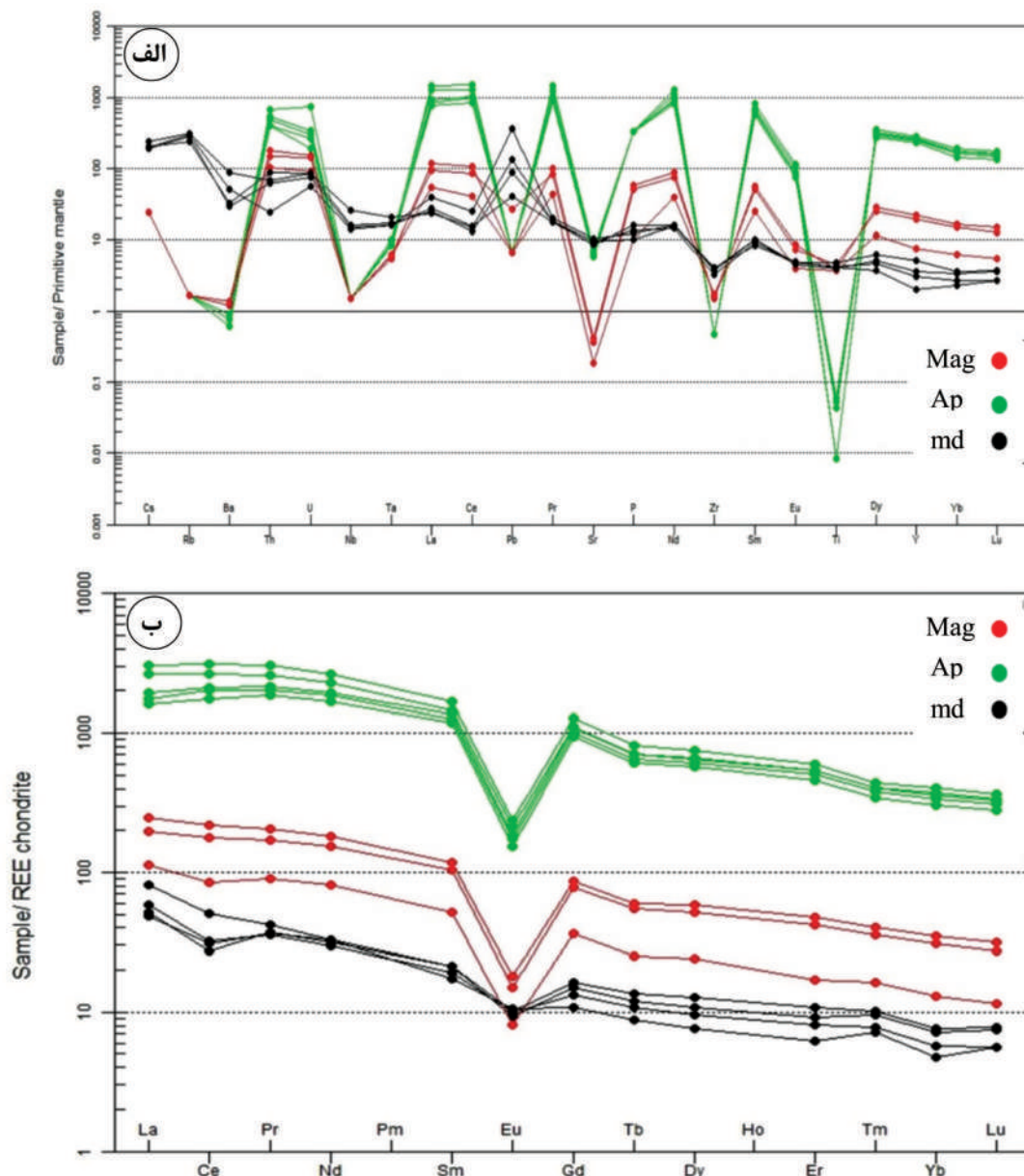
شکل ۱۰. الف) تعیین سری ماگمایی سنگ‌های نفوذی میزبان کانی‌سازی گستره غرب گلستان‌آباد براساس نمودار AFM (Irvine and Baragar, 1971)، ب) تعیین سری ماگمایی سنگ‌های نفوذی براساس نمودار Co در مقابل Th (Hastie et al., 2007)، ج) تعیین سری ماگمایی سنگ‌های نفوذی با استفاده از نمودار سه‌تایی $Al_2O_3-Na_2O-K_2O$ (د) جایگاه تکتونیکی سنگ‌های نفوذی میزبان کانی‌سازی با استفاده از نمودار پیرس (Pearce, 2008)

نفوذی میزبان کانی‌سازی (چهار نمونه)، کانستگ مگنتیتی (سه نمونه) و بلورهای آپاتیت (پنج نمونه) استفاده شده است (جدول ۱). در شکل ۱۱-الف، الگوی عناصر نادر خاکی (REE) و عناصر کمیاب نسبت به گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995) و در شکل ۱۱-ب الگوی رفتاری عناصر نادر خاکی (REE) نسبت به کندریت (Boynnton, 1984) به‌هنجار شده‌اند.

است، نمونه‌های مورد مطالعه دارای نسبت بالایی از Th/Yb می‌باشند و در قلمرو محیط‌های مرتبط با فرورانش در حاشیه فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-د).

زمین‌شیمی عناصر نادر خاکی

به‌منظور مطالعه و بررسی روند و الگوی فراوانی عناصر کمیاب و نادر خاکی (REE) در کانسار غرب گلستان‌آباد، از نتایج آنالیز ژئوشیمیایی ۱۲ نمونه برداشت شده از توده‌های



شکل ۱۱. الف) نمودار عناصر کمیاب به‌هنجار شده نسبت به گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995)، ب) نمودار فراوانی عناصر کمیاب خاکی به‌هنجار شده نسبت به کندریت (McDonough and Sun, 1995) برای نمونه‌های مگنتیت (Mag)، آپاتیت (Ap) و توده نفوذی میزبان کانی‌سازی (md) در کانسار غرب گلستان‌آباد

فراوانی و تغییرات عناصر نادر خاکی در سنگ میزبان کانی‌سازی (توده مونزودیوریت-مونزوگابرو) و نمونه‌های مگنتیت و آپاتیت استخراج شده از کانسنگ‌ها، به نسبت مشابه هستند؛ با این تفاوت که مقادیر REE در توده مونزودیوریت-مونزوگابرویی به مراتب کمتر از فراوانی عناصر مورد اشاره در کانی‌های مگنتیت و آپاتیت هستند. به نظر فریتش و پردال (Frietsch and Perdahl, 1995) شباهت قابل توجه میان الگوی عناصر نادر خاکی موجود در مگنتیت با سنگ‌های دربرگیرنده آنها بیانگر منشأ مشترک آنها است. به طوری که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مجموع فراوانی عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های آنالیز شده از کانی‌های آپاتیت بالا است و در محدوده ۰/۳۸ تا ۰/۶۴ درصد اندازه‌گیری شده است. فراوانی عناصر بیان شده در نمونه‌های مگنتیتی نیز در گستره ۱۱۴ تا ۳۶۱ گرم در تن اندازه‌گیری شده است، که دو تا پنج برابر بالاتر از مجموع عناصر نادر خاکی در توده نفوذی میزبان می‌باشد.

لازم به ذکر است الگوی عناصر کمیاب خاکی کانسار غرب گلستان‌آباد و دیگر کانسارهای منطقه زنجان، مشابه الگوی عناصر کمیاب خاکی کانسارهای آهن ایران مرکزی است؛ از طرف دیگر، مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت منطقه زنجان (کردیان، ۱۳۹۹؛ Mokhtari et al., 2017؛ Nabatian et al., 2012) و غرب گلستان‌آباد با الگوی کانسارهای آهن نوع کایرونا در دیگر نقاط جهان نظیر کانسارهای کایرونا، رکتورن و هنری (Frietsch and Perdahl, 1995) شباهت بین آنها را نشان می‌دهد.

میانبارهای سیال

نوع و ویژگی میانبارهای سیال

به منظور شناخت ماهیت فیزیکوشیمیایی و روند تحول سیال (سیالات) کانه‌ساز، از کانسنگ‌های آپاتیت‌دار کانسار غرب گلستان‌آباد، سه مقطع دوبرصیقلی تهیه و مطالعه شدند. مطالعات میانبارهای سیال بر روی کانی‌های آپاتیت، که به لحاظ روابط بافتی در هم‌رشدی و هم‌زمان با کانه‌های مگنتیت و اکتینولیت تشکیل شده‌اند، انجام

تهی شدگی Ti و Nb (شکل ۱۱-الف) از ویژگی‌های ماگماهای کالک‌آلکالن مرتبط با کمان‌های آتشفشانی در مقایسه با ماگماهای داخل صفحات لیتوسفری می‌باشد. آنومالی منفی Nb در بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود و نشان‌دهنده ماگماهای مرتبط به محیط‌های حاشیه فعال قاره‌ای است و نیز می‌تواند نشان‌دهنده آلودگی پوسته و سیالات آزاد شده از لیتوسفر فرورونده باشد (Aldanmaz et al., 2000). آنومالی مثبت Pb در نمونه‌های مورد مطالعه می‌تواند به متاسوماتیسم گوه‌گوشته‌ای توسط سیالات ناشی از پوسته اقیانوسی فرورونده و یا آلیش ماگما با سنگ‌های پوسته قاره‌ای مرتبط باشد (Kamber et al., 2002). همراه بودن آنومالی مثبت Pb و آنومالی منفی Nb، نشانه ماگماهای کمان‌های حاشیه قاره‌ای و ماگماهای متأثر از پوسته قاره‌ای است (Hofmann, 1986). بررسی الگوی به‌هنگار شده عناصر نادر خاکی نشان می‌دهد همه نمونه‌ها به‌طور نسبی از عناصر نادر خاکی سبک (LREE) غنی و از عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) تهی شده‌اند. یکی از ویژگی‌های مهم نمونه‌های مورد مطالعه، روند تدریجی تهی‌شدگی از سمت عناصر کمیاب خاکی سبک به انواع سنگین و نبود تغییرات ناگهانی در شیب نمودارها است و از ویژگی شاخص ماگماهای مرزهای صفحات همگرا (Guo et al., 2006) و سنگ‌های کالک‌آلکالن کمان حاشیه قاره‌ها است. یوروپیم (Eu) مهمترین عنصر در گروه عناصر نادر خاکی است و بیشترین تغییرات را در این گروه نشان می‌دهد. این تغییر در فراوانی عنصر به دلیل شباهت و نزدیکی ظرفیت و شعاع یونی این عنصر به کلسیم است و جانشینی Eu به جای Ca را تسهیل می‌کند (Rollinson, 1993). به نظر فریتش و پردال (Frietsch and Perdahl, 1995)، تهی‌شدگی Eu در کانسارهای تیپ کایرونا در اثر اکسید شدن محیط (به دلیل وجود مگنتیت و هماتیت) و یا جانشینی Eu به جای Ca و Sr به دلیل تشابه شعاع یونی می‌باشد. همچنین کاهش یوروپیم می‌تواند نشانگر تغییر ترکیب کانی‌شناسی از پلاژیوکلاز به سمت کانی‌های دگرسان شده‌ای همچون سرپسیت باشد (Rollinson, 1993).

همان‌گونه که در شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود، الگوی

همگن‌شدگی در برابر شوری آمده است. نتایج حاصل از مطالعات میانبارهای سیال در کانسار غرب گلستان‌آباد، نشان می‌دهد مگنتیت و آپاتیت از نهشت سیالات کم‌شور تا شوری متوسط (۵/۸۶ تا ۲۱/۶۸ درصد وزنی معادل نمک طعام) با دمای ۳۴۷ تا ۵۴۷ درجه سانتی‌گراد ناشی شده‌اند. نمودار شوری در مقابل درجه همگن‌شدگی (شکل ۱۴) نشان می‌دهد کانی‌سازی از نهشت یک سیال گرمایی با دمای ۵۴۷ درجه سانتی‌گراد، که بتدریج سرد شده، حاصل شده است. این نمودار روندی از اختلاط یک سیال گرمایی (با منشأ ماگمایی) را با سیال دیگر با شوری و دمای پائین‌تر نشان می‌دهد و می‌تواند با ترکیبی از فرآیندهای رقیق‌شدگی و اختلاط سازگار باشد (Wilkinson, 2001). با مقایسه نتایج حاصل از مطالعه میانبارهای سیال در کانسار غرب گلستان‌آباد با انواع ذخایر معدنی، ویژگی‌های دمایی و شوری سیالات کانه‌ساز در این رخداد بیشترین شباهت را با سیالات مسئول کانی‌سازی در کانسارهای آهن-آپاتیت تیپ IOA (مشابه با کانسار کایرونا) نشان می‌دهند.

جمی و همکاران (Jami et al., 2007)، دلیران و همکاران (Daliran et al., 2010) و بنیادی و همکاران (Bonyadi et al., 2011) ذخایر اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق را گرمایی معرفی کرده‌اند. جمی و همکاران (Jami et al., 2007)، با مطالعه میانبارهای سیال در انواع مختلف آپاتیت و نیز کوارتز در کانسار اسفوردی، مقدار دمای محلول را در مراحل اولیه بین ۳۷۵ تا ۴۲۵ درجه سانتی‌گراد با شوری ۱۴ تا ۱۸ درصد به‌دست آوردند و به دمای ۱۴۵ تا ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد و شوری کمتر از ۱۳ درصد در فازهای نهایی و تأخیری کاهش یافت. همچنین عزیززی و همکاران (Azizi et al., 2009) دمای محلول کانی‌ساز در ذخایر اکسید آهن-آپاتیت تشکیل شده در زون آذربایجان-البرز را بین ۲۰۰ تا ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد با شوری کمتر از ۲۰ درصد تعیین کردند. براساس نباتیان و قادری (Nabatian and Ghaderi, 2013)، در کانسار سرخه‌دیزج نیز کانسنگ‌های اکسید آهن-آپاتیت از نهشت محلول‌های ماگمایی-گرمایی با دمای ۲۹۰ تا ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد و شوری کمتر از ۲۲ درصد تشکیل شده‌اند.

پذیرفت. از لحاظ شکل ظاهری و با توجه به پارامترهای رودر (Roedder, 1984) و شپرد و همکاران (Shepherd et al., 1985)، میانبارهای سیال در نمونه‌های مورد مطالعه را می‌توان به‌ترتیب فراوانی به اشکال نامنظم، کروی و کشیده تقسیم‌بندی کرد. میانبارهای سیال در انواع دوفازی غنی از مایع (LV)، دوفازی غنی از گاز (VL)، تک‌فازی مایع (L) و تک‌فازی بخار (V) مشاهده شدند (شکل ۱۲). همچنین دو میانبار چهارفازی در اندازه‌های شش و هفت میکرون، متشکل از حباب بخار+ مایع آبگین+ هالیت+ فاز جامد کدر (V+L+Ha+S) مشاهده شدند. فاز جامد تیره‌رنگ شناسایی شده در این میانبارها، شاید مگنتیت می‌باشد. در این مطالعه، تنها میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (LV)، به لحاظ اولیه و درشت‌تر بودن مطالعه شدند. میانبارهای سیال دوفازی مورد مطالعه، ریز تا متوسط است و در اندازه‌های چهار تا ۳۵ میکرون مشاهده شدند. در این نوع از میانبارها، فاز مایع ۶۰ تا ۹۰ درصد و فاز بخار ۱۰ تا ۴۰ درصد حجم کل سیال را تشکیل داده است. این نوع میانبارها، اغلب با اشکال نامنظم و کمتر کروی‌شکل و کشیده در آپاتیت‌های میزبان پراکنده‌اند (شکل ۱۲).

ریزدماسنجی میانبارهای سیال

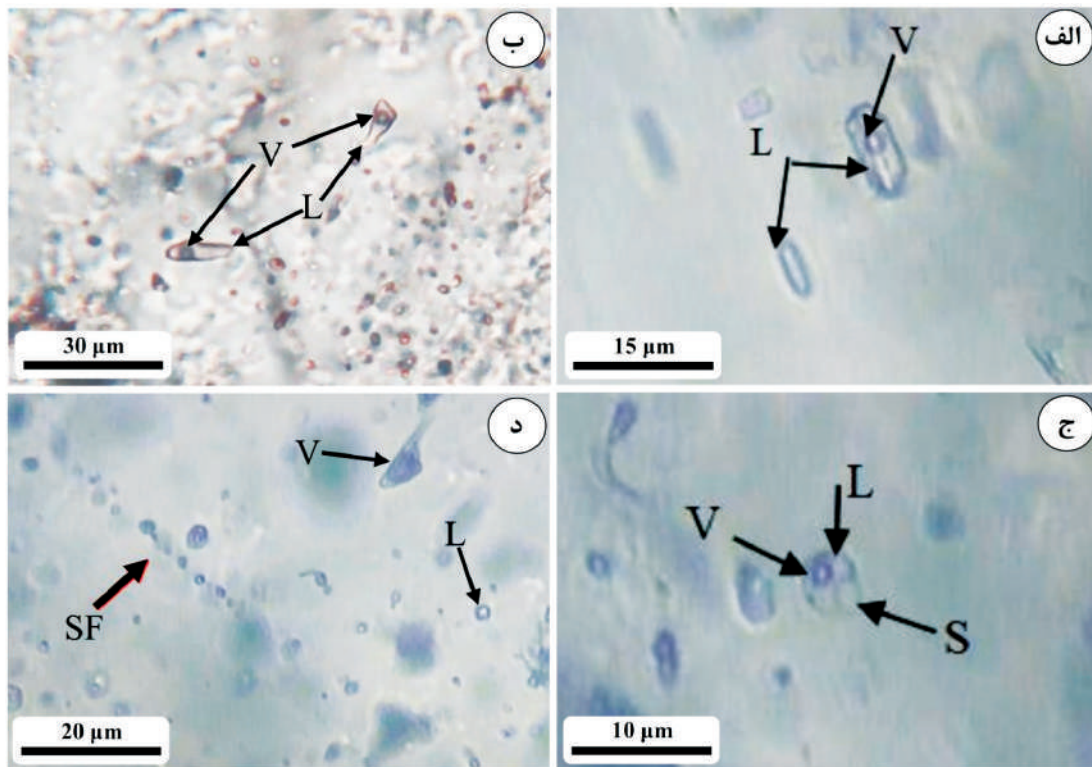
گستره دمای همگن‌شدگی برای میانبارهای سیال اولیه دوفازی مورد مطالعه از ۳۴۷ تا ۵۴۷ (میانگین ۴۲۵) درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است (جدول ۲). در تمامی نمونه‌ها، همگن‌شدگی به فاز مایع صورت گرفت. گستره اولین نقطه ذوب یخ یا اوتکتیک (T_p) در نمونه‌های دوفازی در محدوده منفی چهار تا ۳۰- درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد که نشان می‌دهد سیال کانه‌ساز، به‌صورت یک شورا به ساده تشکیل شده از NaCl نبوده، بلکه ممکن است علاوه بر سدیم، حاوی نمک‌های منیزیم، پتاسیم، کلسیم، آهن و منگنز نیز باشد. محدوده آخرین نقطه ذوب یخ (Tmice) در نمونه‌های مذکور، از ۳/۶- تا ۱۹- درجه سانتی‌گراد ثبت شد و به‌ترتیب معادل شوری‌های ۵/۸۶ تا ۲۱/۶۸ معادل درصد وزنی NaCl هستند (جدول ۲ و شکل ۱۳).

در شکل ۱۴ روند تحول سیال کانه‌ساز در کانسار اکسید آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد براساس نمودار تغییرات دمای

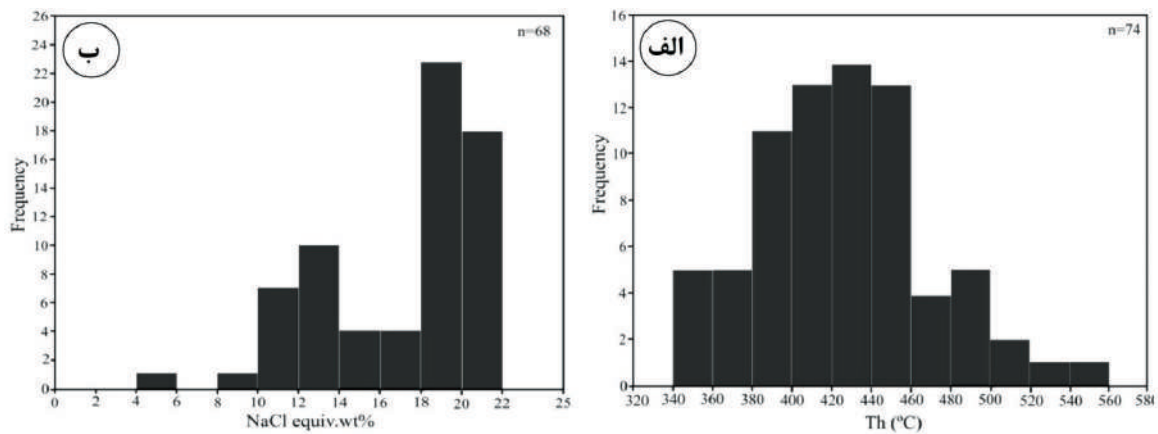
جدول ۲. خلاصه داده‌های مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال اولیه دوفازی (L+V) و سه‌فازی (L+V+S) در کانی آپاتیت (در غرب گلستان‌آباد)

Incl. type	Size (μm)	T _e (°C)	T _{m-ice} (°C)	T _h (°C)	Salinity (wt.%. NaCl equiv.)	Mineral
L+V (n=۷۲)	۳۵ تا ۴	-۶۲۰ تا -۲۱	-۶/۳ تا -۱۹-۳	۵۴۷ تا ۳۴۷	۸۶/۵-۶۸/۲۱	Apatite
L+V+S (n=۲)	۷ و ۶	-۵/۶۷ و -۰/۵۸	-۵/۳۰ و -۲۸	۴۰۵ و ۳۷۲	۴۷/۳۸ و ۴۲/۳۲	Apatite

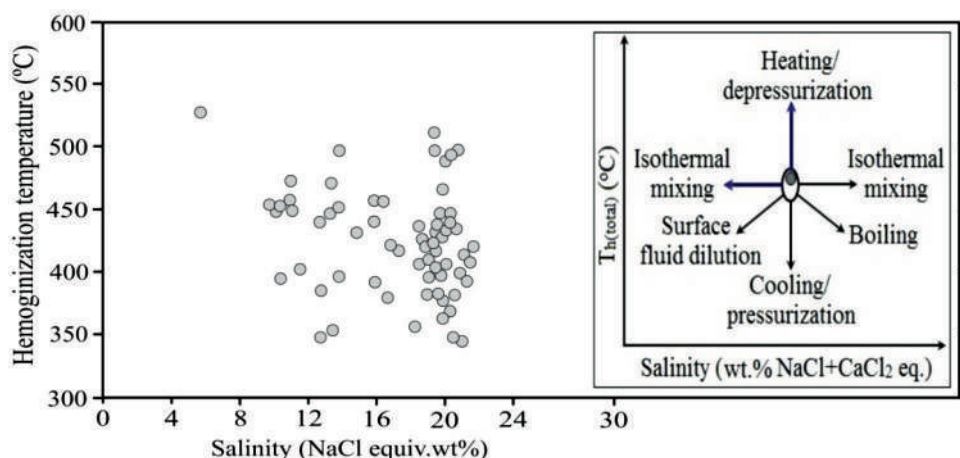
اعداد داخل پرانتز مبین بیشترین فراوانی است. T_e = دمای اولین نقطه ذوب یخ، T_{m-ice} = دمای ذوب آخرین قطعه یخ و T_h = دمای همگن‌شدگی



شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپی (در دمای اتاق و نور عبوری با نیکول‌های موازی) از میانبارهای سیال مشاهده شده در بلورهای آپاتیت، الف، ب، ج) میانبارهای سیال اولیه دوفازی غنی از مایع (LV)، در تصاویر بیان شده، علاوه بر میانبارهای دوفازی، میانبارهای تک‌فازی مایع (L) و بخار (V) نیز قابل مشاهده هستند و د) رخداد میانبارهای تک‌فازی مایع (L) و غنی از بخار (V) و نیز میانبارهای ثانویه غنی از مایع (SF) در بلورهای آپاتیت



شکل ۱۳. نمودار دماهای همگن‌شدگی به فراوانی میانبارهای سیال، ب) نمودار درجه شوری به فراوانی میانبارهای سیال در کانی آپاتیت موجود در کانسار غرب گلستان‌آباد



شکل ۱۴. نمودار دوتایی دمای همگن‌شدگی نهایی در مقابل شوری برای داده‌های میانبرهای سیال در کانسار غرب گلستان‌آباد، روندها نشان‌دهنده فرآیند سردشدگی و اختلاط با آبهای سطحی است. نمودار شماتیک داخلی، بیانگر روندهای معمول میانبرهای سیال در فضای شوری-دمای همگن‌شدگی ناشی از فرآیندهای مختلف تحول سیال (Wilkinson, 2001) می‌باشد

بحث

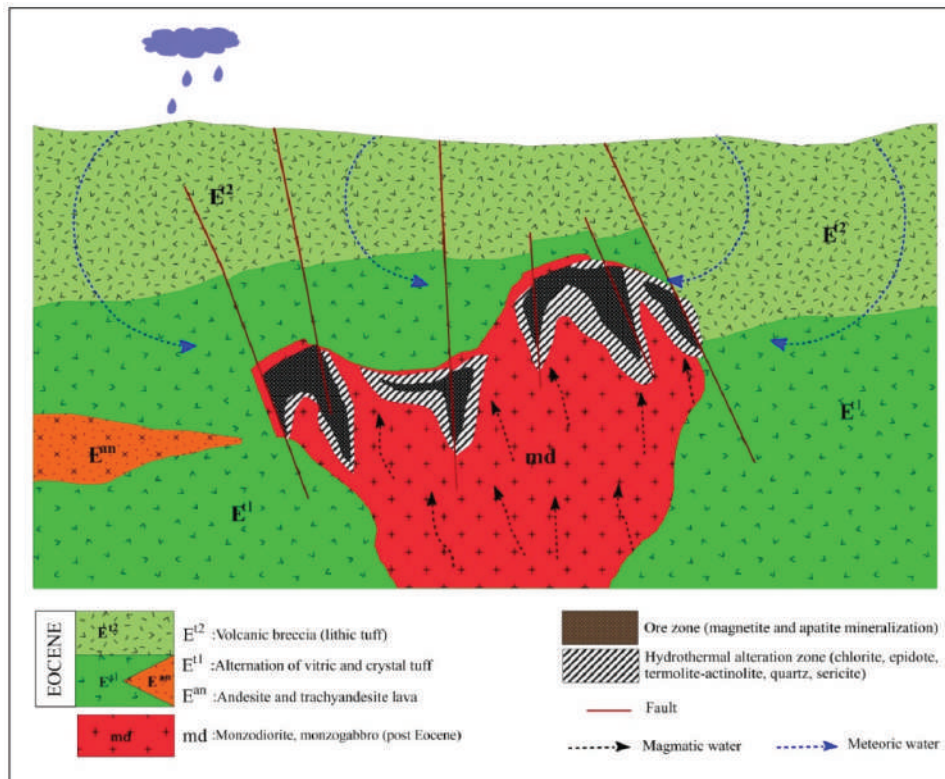
سیالات قابل حمل خواهد بود. هنگامی که سیالات کانه‌دار وارد محیط مناسب شوند، ترکیبات حمل‌شده را نهشت داده و کانسنگ‌ها را تشکیل می‌دهند (Gandhi and Bell, 1996). انتقال سیالات غنی از آهن به سطوح بالاتر در این تیپ از کانسارها، همزمان با تبلور توده نفوذی نیمه‌عمیق صورت گرفت.

در مورد ژنز کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد می‌توان اینگونه بیان کرد که توده نفوذی نیمه‌عمیق غنی از آهن، فسفر و عناصر نادر خاکی از طریق سامانه‌های گسلی موجود در گستره در بخش‌های نزدیک به سطح زمین، در اعماق کم جایگزین می‌شود. با تبلور کانی‌های سنگ‌ساز توده، ماگمای گرانیتوئیدی باقی‌مانده غنی از سیالات و مواد فرار حاوی آهن و فسفر می‌شود، سیالات غنی از آپاتیت و مگنتیت به علت مقادیر بالای مواد فرار، فوگاسیته بالای اکسیژن و مقادیر بالای P_2O_5 به سمت مناطق کم‌فشار حرکت کرده و در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق، با فراهم آمدن شرایط ته‌نشین می‌شوند. این فرآیند به صورت کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت و با ساخت و بافت‌های رگه-رگچه‌ای، توده‌ای و دانه‌پراکنده در توده مونوزودیوریت-مونزوگابروبی غرب گلستان‌آباد رخ داده است. عملکرد سیالات کانه‌ساز باعث دگرسانی کانی‌های تشکیل

مقایسه مهمترین ویژگی‌های کانسار اکسید آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد (از جمله محیط تکتونیکی، ماهیت سنگ میزبان، دگرسانی‌های گرمایی، ژئوشیمی کانسنگ، کانی‌شناسی و میانبرهای سیال) با ویژگی‌های شاخص انواع تیپ‌های کانی‌سازی آهن در دنیا، حاکی از آن است، کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان‌آباد، بیشترین مشابهت را با کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت دار تیپ کاپرونا نشان می‌دهد و براساس رده‌بندی ویلیامز (Williams et al., 2005) در رده کانسارهای مگنتیت غنی از آپاتیت (IOA) قرار می‌گیرد. فرآیند تشکیل این گروه از ذخایر براساس تفریق ماگمایی و فعالیت‌های گرمایی و مشارکت سیالات جوی در مراحل پایانی تشکیل کانسار است (Gandhi and Bell, 1996). کانی‌سازی در این تیپ کانسار، درون سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی روی می‌دهد و اغلب فلزات موجود در این کانسارها منشأ ماگمایی دارند و سیالات غنی از مگنتیت نیز از سیالات ماگمایی غنی از اکسید آهن و آپاتیت با دمای بالا و در محیط‌های نیمه‌عمیق تشکیل می‌شوند (Gandhi and Bell, 1996). آپاتیت و اکتینولیت در این نوع از کانسارها از جمله کانی‌های همراه با مگنتیت هستند. فسفر در این کانسارها باعث پائین آمدن دمای انجماد مگنتیت در ماگما می‌شود و در این صورت، آهن در دمای پائین نیز توسط

مرحله آخر مربوط به پدیده سوپرژن است. در این مرحله، سولفیدهای اولیه اکسید شده‌اند و اثر چندانی از آنها باقی نمانده است. پدیده سوپرژن با تشکیل کالکوسیت، گوتیت و لیمونیت همراه است. در نهایت از مراحل مختلف تشکیل کانسار یک مدل شماتیک ارائه شده است (شکل ۱۵).

شده در مرحله قبل شده و بخشی از پیروکسن‌ها تبدیل به اکتینولیت شده‌اند. در مقاطع میکروسکوپی مطالعه شده، همراهی مگنتیت، آپاتیت و پیروکسن اکتینولیتی شده مشاهده شده است. با افزایش مقدار سولفور طی فاز تأخیری، کانه‌زایی سولفیدی صورت می‌گیرد و رگه-رگچه‌های پیریت و مقدار جزئی کالکوپیریت در این مرحله تشکیل شده‌اند.



شکل ۱۵. مدل شماتیک از نحوه تشکیل کانسار غرب گلستان آباد

نتیجه‌گیری

نزدیک به سطح زمین و در اعماق کم جایگزین می‌شود. با تبلور کانی‌های سنگ‌ساز توده، ماگمای باقی‌مانده، غنی از سیالات و مواد فرار حاوی آهن و فسفر می‌شود. سیالات غنی از آپاتیت و مگنتیت به علت مقادیر بالای مواد فرار، فوگاسیته بالای اکسیژن و مقادیر بالای P_2O_5 به سمت مناطق کم‌فشار حرکت کرده و در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق، با فراهم آمدن شرایط ته‌نشین می‌شوند. در این مرحله، کانی‌سازی آهن-آپاتیت و اکتینولیت با ساخت و بافت‌های رگه‌ای-رگچه‌ای، برشی، توده‌ای و دانه‌پراکنده تشکیل می‌شود. عملکرد

با توجه به مطالعات صحرایی، سنگ‌شناسی، سنگ‌نگاری، کانه‌نگاری و شواهد ژئوشیمیایی، کانسار آهن-آپاتیت غرب گلستان آباد، شباهت نزدیکی با کانسارهای مگنتیت غنی از آپاتیت (IOA) دارد. سیالات غنی از مگنتیت، از سیالات ماگمایی غنی از اکسید آهن آپاتیت‌دار (تیپ کایرونا) با دمای بالا و در محیط‌های نیمه‌عمیق تشکیل می‌شوند. آپاتیت و اکتینولیت در این نوع از کانسارها از جمله کانی‌هایی هستند که همراه مگنتیت می‌باشند. در کانسار آهن-آپاتیت گلستان آباد، توده مونزودیوریت-مونزوگابرویی غنی از آهن، فسفر و عناصر نادر خاکی، در بخش‌های

- دانشگاه تربیت مدرس، ۱۸۵.
- کردیان، ش.، ۱۳۹۹. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، زمین‌شیمی و منشأ کانسار اکسید آهن-آپاتیت گلستان‌آباد (خاور زنجان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، ۱۲۲.
- گراوندی، ا.، ۱۴۰۰. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار اکسید آهن زرنان-شمال شرق زنجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۲۲۱.
- مظهری، م.، ۱۳۹۸. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار آهن-آپاتیت‌دار علی‌آباد-مروارید، جنوب شرق زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۸۳.
- نباتیان، ق.، ۱۳۸۷. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار اکسید آهن آپاتیت‌دار سرخه‌دیزج، جنوب شرق زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۰۷.
- نباتیان، ق.، ۱۳۹۱. زمین‌شناسی، ژئوشیمی و تکامل کانسارهای اکسید آهن آپاتیت‌دار در کمربند آتشفشانی-نفوذی طارم، البرز باختری، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۳۲۶.
- واقفی، س.ز.، ۱۴۰۲. ارتباط رخساره‌های دگرسانی با کانه‌زایی در کانسارهای آهن ذاکر و اسکند، شرق زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۹۶.
- Aldanmaz, E., Pearce, J.A., Thirlwall, M. and Mitchell, J.G., 2000. Petrogenetic evolution late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102, 67-95.
- Asiabanha, A. and Foden, J., 2012. Post-collisional transition from an extensional volcano-sedimentary basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. *Lithos*, 148, 98-111.
- Azizi, H., Mehrabi, B., Akbarpour, A., 2009. Genesis of tertiary magnetite-apatite deposits, southeast of Zanjan, Iran. *Resource Geology* 59(4), 330-341.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2), 210-265.
- Bonyadi, Z., Davidson, G.J., Mehrabi,

سیالات گرمایی باعث دگرسانی کانی‌های تشکیل شده در مرحله قبل شده و بخشی از پیروکسن‌ها تبدیل به اکتینولیت شده‌اند. براساس مطالعات میانبارهای سیال، دمای همگن‌شدگی سیالات مطالعه شده که به‌طور عمده از نوع دوفازی غنی از مایع است، در محدوده ۳۴۷ تا ۵۴۷ (با میانگین ۴۲۵) درجه سانتی‌گراد و شوری در محدوده ۵/۸۶ تا ۲۱/۶۸ معادل درصد وزنی NaCl اندازه‌گیری شده است. در مقاطع میکروسکوپی مطالعه شده، همراهی مگنتیت، آپاتیت و پیروکسن اکتینولیتی‌شده مشاهده شده است. با افزایش مقدار سولفور، طی فاز تأخیری، کانه‌زایی سولفیدی صورت می‌گیرد و رگه-رگچه‌های پیریت و مقدار جزئی کالکوپیریت در این مرحله تشکیل شده‌اند. پدیده سوپرژن با تشکیل کالکوسیت، گوتیت و لیمونیت همراه است.

منابع

- آقانباتی، س.ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶.
- امینی، ب. و امینی چهرق، م.ر.، ۱۳۷۹. نقشه زمین‌شناسی طارم با مقیاس ۱:۱۰۰/۰۰۰، بازنگری و استاندارد از نقشه هیرایاما و همکاران، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- خان‌محمدی، ن.، ۱۳۸۷. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار ذاکر (شمال شرق زنجان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۲۴۴.
- داودی، ت.، ۱۳۹۸. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار آهن آراسو، شمال غرب قزوین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۱۱.
- سالاروند، م.، ۱۳۹۸. مطالعات ایزوتوپهای پایدار گوگرد و میانبارهای سیال آپاتیت به‌منظور تعیین نحوه تشکیل کانسار آهن-آپاتیت سرخه‌دیزج، جنوب‌خاوری زنجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۹۲.
- شرکت خدمات اکتشافی کشور، ۱۳۹۶. گزارش اکتشاف تفصیلی محدوده آهن گلستان‌آباد، ۷۶.
- صحتی قرامکی، س.، ۱۴۰۲. ژئوشیمی، دگرسانی و میانبارهای سیال در کانسار آهن گلستان‌آباد، شرق زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۱۸.
- عرب زوزنی، د.، ۱۳۹۹. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار آهن گلستان‌آباد، شمال شرق زنجان،

- B., Meffre, S. and Ghazban, F., 2011. Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se-Chahun iron oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights from paragenesis and geochemistry. *Chemical Geology*, 281(3-4), 253-269.
- Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., Ed., *Rare Earth Element Geochemistry*, Elsevier, New York, 63-114.
 - Cox, K., Bell, J. and Pankhurst, R., 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*, George Allen and Unwin. London.
 - Daliran, F., Stosch, H.-G. and Williams, P., 2010. Lower Cambrian iron oxide apatite-REE (U) deposits of the Bafq district, east-central Iran, in Corriveau, L., Mumin, A.H., eds., *Exploring for iron oxide-copper-gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division Short Course Volume X*, 143-155.
 - Frietsch, R. and Perdahl, J.A., 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types. *Ore Geology Reviews* 9, 489-510.
 - Gandhi, S.S. and Bell, R.T., 1996. Kiruna/Olympic Dam-type iron, copper, uranium, gold, silver; in geology of Canadian mineral deposit types, (ed.) O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair, and R.I. Thorpe; *Geological Survey of Canada, Geology of Canada*, no. 8, p. 513-522 (also *Geological Survey of America, The Geology of North America*, v. 1).
 - Guo, F., Fan, W. and Li, C., 2006. Geochemistry of late Mesozoic adakites from the Sulu belt, eastern China: Magma genesis and implications for crustal recycling beneath continental collisional orogens. *Geological Magazine* 143, 1-13.
 - Hall, D.L., Sterner, S.M. and Bodnar, R.J., 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions. *Economic Geology* 83, 197-202.
 - Hassanzadeh, J., Stockli, D.F., Horton, B.K., Axen, G.J., Stockli, L.D., Grove, M., Schmitt, A.K. and Walker, J.D., 2008. U-Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran: Implications for paleogeography, magmatism, and exhumation history of Iranian basement. *Tectonophysics* 451(1), 71-96.
 - Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A. and Mitchell, S.F., 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: Development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology* 48, 2341-2357.
 - Hirayama, K., Samimi, M., Zahedi, M. and Hushmandzadeh, A., 1966. *Geology of the Tarom district, western part (Zanjan area, northwest Iran), with 1:100,000 map*. Geological Survey of Iran, Tehran.
 - Hofmann, A.W., Jochum, K.P., Seufert, M. and White, W.M., 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution. *Earth and Planetary Science Letters* 79, 33-45.
 - Irvine, T. and Baragar, W., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8(5), 523-548.
 - Jami, M., Dunlop, A.C. and Cohen, D.R., 2007. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran. *Economic Geology* 102, 1111-1128.
 - Kamber, B.S., Ewart, A., Collerson, K.D., Bruce, M.C. and McDonald, G.D., 2002. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 144, 38-56.
 - Majidi, S.A., Omrani, J., Troll, V.R., Weis, F.A., Houshmandzadeh, A., Ashouri, E., Nezafati, N. and Chung, S.-L., 2021. Employing geochemistry and geochronology to unravel

- genesis and tectonic setting of iron oxide-apatite deposits of the Bafq-Saghand metallogenic belt, Central Iran. *International Journal of Earth Sciences* 110, 127-164.
- McDonough, W.F. and Sun, S.S., 1995. Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120, 223-253.
 - Middlemost, E.A., 1994. *Magma and Magmatic Rocks: An Introduction to Igneous Petrology*. Longman, London.
 - Mirnejad, H., Hassanzadeh, J., Cousens, B. and Taylor, B., 2010. Geochemical evidence for deep mantle melting and lithospheric delamination as the origin of the inland Damavand volcanic rocks of northern Iran. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 198(3), 288-296.
 - Mokhtari, M.A.A., Sadeghi, M. and Nabatian, G., 2017. Geochemistry and potential resource of rare earth element in the IOA deposits of Tarom area, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 92, 529-541.
 - Mücke, A. and Younessi, R., 1994. Magnetite-apatite deposits (Kiruna-type) along the Sanandaj-Sirjan zone and in the Bafq area, Iran, associated with ultramafic and calc-alkaline rocks and carbonatites. *Mineralogy and Petrology* 50(4), 219-244.
 - Nabatian, G. and Ghaderi, M., 2013. Oxygen isotope and fluid inclusion study of the Sorkhe-Dizaj iron oxide-apatite deposit, NW Iran. *International Geology Review* 55(4), 397-410.
 - Nabatian, G., Ghaderi, M., Daliran, F. and Rashidnejad Omran, N., 2012. Sorkhe-Dizaj iron oxide-apatite ore deposit in the Cenozoic Alborz-Azarbaijan magmatic belt, NW Iran. *Resource Geology* 63(1), 42-56.
 - Nabatian, G., Rastad, E., Neubauer, F., Honarmand, M. and Ghaderi, M., 2015. Iron and Fe-Mn mineralisation in Iran: Implications for Tethyan metallogeny. *Australian Journal of Earth Sciences* 62(2), 211-241.
 - Pearce, J.A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos* 100, 14-48.
 - Rahimi, E., Maghsoudi, A. and Hezarkhani, A., 2016. Geochemical investigation and statistical analysis on rare earth elements in Lakehsiyah deposit, Bafq district. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 139-150
 - Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy* 12, 644 .
 - Rollinson, H.R., 1993. *Using geochemical data, evaluation, presentation, interpretation"* Longman Scientific and Technical, 352 .
 - Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie, Glasgow, 239 .
 - Sterner, S.M., Hall, D.L. and Bodnar, R.J., 1988. Synthetic fluid inclusions V: solubility relations in the system NaCl-KCl-H₂O under vaporsaturated conditions. *Geochemica et Cosmochimica Acta* 52(5), 989-1005.
 - Stöcklin, J. and Eftekhreznhad, J., 1969. Geological map of Zanjan, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
 - Thompson, R.N., 1982. Magmatism of the British Tertiary volcanic province. *Scottish Journal of Geology* 18(1), 49-107.
 - Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95(1), 185-187.
 - Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55, 229-272.
 - Williams, P. J., Barton, M. D., Johnson, D. A., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., Oliver N, H. S. and Marschik, R., 2005. Iron oxide coppergold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin. *Economic Geology*, 371-405.