



مقاله پژوهشی

میان‌بارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد در کانسار آهن سراب ۳ (مجموعه معدنی آهن شهرک - شمال بیجار)

محمد معانی جو* و مهرداد فردوسی راشد

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، کد پستی ۳۳۳۹۱-۶۵۱۷۴، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۱

چکیده

مجموعه معدنی آهن شهرک در مرز پهنه ایران مرکزی و سنندج-سیرجان قرار دارد. این مجموعه معادن شامل ۹ کانسار سنگ آهن است که کانسار سراب ۳، یکی از آنهاست. در منطقه شهرک، سنگ‌های آتشفشانی شامل داسیت، آندزیت، ریولیت و آندزیت بازالت با سن ائوسن و واحدهای آهنی-دولومیتی سازند قم دیده می‌شود. سنگ‌های آذرین درونی منطقه مورد بررسی شامل گرانودیوریت، دیوریت و گرانیت است. فاز کانی‌سازی آهن در تماس با سنگ‌های دولومیت و آهنک منطقه، به صورت اسکارنی رخ داده است. کانسنگ اصلی تشکیل دهنده معدن آهن سراب ۳ مگنتیت است که در بخش‌های سطحی تبدیل به هماتیت، لیمونیت و گوتیت شده است و در بخش‌های عمیق‌تر، کانی‌های پیریت، پروتیت و کالکوپیریت نیز دیده می‌شود. شکل ذخیره توده‌ای و عدسی‌مانند است. بررسی میان‌بارهای سیال بر روی رگه-رگچه‌های کلسیتی که به عنوان باطله در کانسنگ مگنتیتی سراب ۳ وجود دارند، مشخص کرد که دما، شوری و چگالی به ترتیب ۱۱۵-۳۲۴ درجه سانتی‌گراد، ۰/۴-۳۵ درصد وزنی نمک طعام و ۰/۹-۱/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. بر اساس بررسی ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد انجام شده بر روی پیریت‌های مرحله پس‌رونده، مقدار $\delta^{34}\text{S}$ در دامنه ۳ تا ۳/۶ در هزار قرار دارد و منشأ گوگرد در کانسار آهن سراب ۳ ماگمایی است.

واژه‌های کلیدی: میان‌بارهای سیال، ایزوتوپ پایدار گوگرد، کانسار آهن سراب ۳، معادن شهرک، بیجار، سنندج-سیرجان

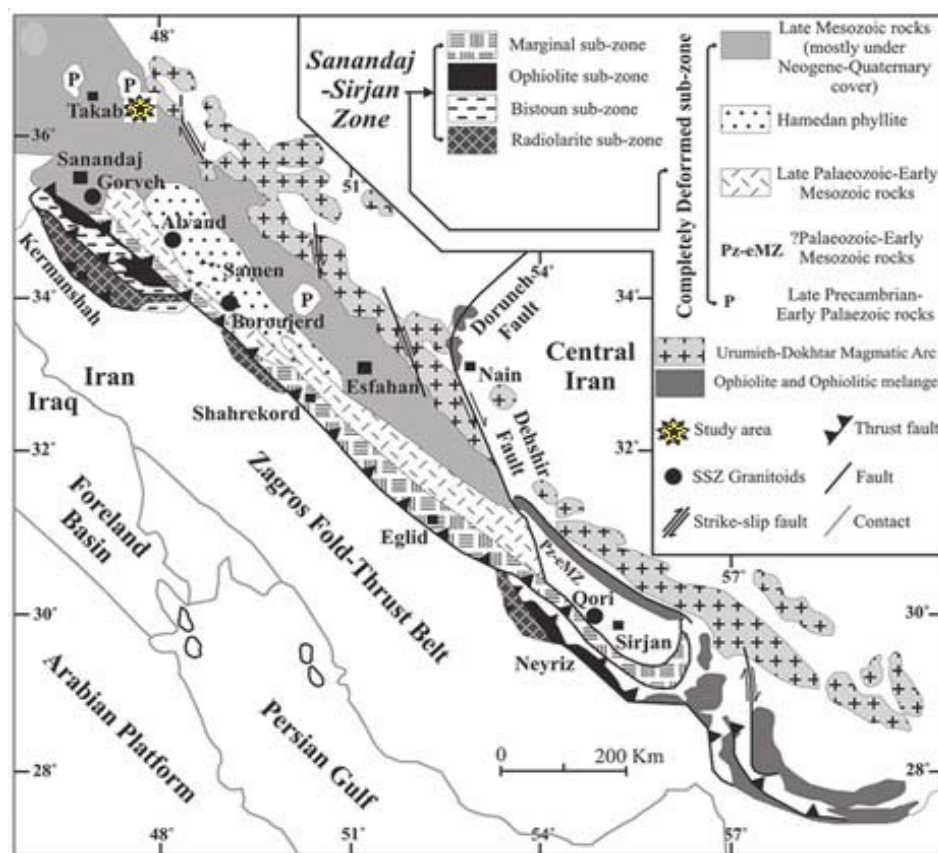
مقدمه

شامل می‌شوند. مجموعه معادن آهن شهرک با بیش از ۱۰۰ میلیون تن کانسنگ مگنتیتی با عیار میانگین بالای ۵۰ درصد، در ۵۰ کیلومتری شمال شهر بیجار (شمال شرق استان کردستان) از جمله این ذخایر است. این مجموعه معدنی از جنوب به سمت شمال شامل توده‌های آهن سراب ۳، سراب ۲، سراب ۱،

ماگماتیسیم مربوط به سنوزوئیک در ایران مرکزی موجب تشکیل سنگ‌های دگرگونی مجاورتی به خصوص اسکارن‌های مختلف شده است (Karimzadeh Somarain and Moayyed, 2002; Calagari and Hosseinzadeh, 2006). این اسکارن‌ها از نظر اقتصادی، ذخایر ارزشمندی را

در قالب پژوهش‌های دانشگاهی در مجموعه معدنی آهن شهرک مطالعه داشته‌اند؛ اما تاکنون برای درک بهتر منشأ سیالات کانی‌ساز، بررسی میان‌بارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد در کانسار آهن سراب ۳ انجام نشده که در این پژوهش به آن پرداخته شده است. با انجام این بررسی‌ها می‌توان مراحل مختلف کانی‌سازی در کانسار سراب ۳ را بررسی کرد و تغییرات محلول‌های کانه‌ساز در گام‌های متفاوت مشخص می‌شود. در نهایت نتایج این پژوهش در تکمیل مطالعات خاستگاه کانسار سراب ۳ اهمیت خواهد داشت. بدیهی است از نتایج این پژوهش می‌توان در مطالعه تعیین خاستگاه سیستم‌های کانی‌سازی مشابه در منطقه مورد بررسی و نیز سایر مناطق استفاده کرد.

کورکورا ۱، کورکورا ۲، گل‌زر، شهرک ۲ و ۳ و شهرک ۱ است (Maanijou and Salemi, 2015). کانسار آهن سراب ۳، جنوبی‌ترین توده کانسنگی این مجموعه معادن بوده و در موقعیت جغرافیایی $36^{\circ} 15.42'$ عرض شمالی قرار دارد. از دیدگاه ساختاری، طبق تقسیم‌بندی نبوی (Nabavi, 1976)، این منطقه در پهنه البرز-آذربایجان و طبق تقسیم‌بندی بریریان و کینگ (Berberian and King, 1981) در زون‌های سنندج-سیرجان و ایران مرکزی قرار گرفته است (شکل ۱). افراد مختلفی مانند عزیزی (Azizi, 1992)، شیخی (Shaikhi, 1995)، عزیزی شترخفت (Azizi Shotour Khoft, 2003)، براتی (Barati, 2008)، زارعی (Zarei, 2014)، خرم‌رودی (Khorram Rudi, 2014)، خدایی (Khodaei, 2015) و سالمی (Salemi, 2014)



شکل ۱. نقشه زمین‌ساختی ساده‌شده زون سنندج-سیرجان و موقعیت کانسار آهن سراب ۳ (Mohajel et al., 2003)

Fig. 1. Simplified tectonic map of the Sanandaj-Sirjan zone and location of the Sarab 3 iron ore deposit (Mohajel et al., 2003)

روش مطالعه و آماده‌سازی نمونه‌ها

از آنجایی که کانسار آهن سراب ۳ مراحل اکتشاف تفصیلی را گذرانده است و در حال حاضر نیز مورد بهره‌برداری قرار دارد، با در دست بودن گمانه‌های اکتشافی و بررسی مغزه‌های حفاری، وضعیت عمقی کانی‌سازی و نیز ارتباط آنها با سنگ‌های دربرگیرنده بررسی شد. علاوه بر بررسی مجدد مغزه‌های حفاری، تعداد ۷۰ نمونه از آنها و دیواره‌های معدن برای بررسی‌های مقطع نازک، نازک صیقلی، میان‌بارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد برداشت‌شد. در نهایت تعداد ۲۰ مقطع میکروسکوپی از این نمونه‌ها در دانشگاه بوعلی سینا همدان تهیه شد و مورد بررسی قرار گرفت. بررسی میان‌بارهای سیال بر روی ۶ نمونه دوبرصیقل^۱ انجام شد. این نمونه‌ها از کلسیت‌های موجود در میزبان‌های مگنتیتی برداشت شدند. اندازه‌گیری مؤلفه‌های دمایی در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران به کمک Stage:THMS600 با مدل Linkam که بر روی میکروسکوپ ZEISS نصب است، صورت گرفت. دامنه حرارتی دستگاه بین ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است. این دستگاه مجهز به دو کنترل‌گر، گرمایش (TP94) و سرمایش (LNP)، مخزن ازت (جهت پمپ نیتروژن برای انجماد) و مخزن آب (برای خنک کردن دستگاه در دمای بالا) است. کالیبراسیون Stage در گرمایش با دقت ± 0.6 درجه بوده که با نیترات سزیم^۲ با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد انجام شد و در انجماد با دقت ± 0.2 درجه و با ماده استاندارد ان-هگزان^۳ با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتی‌گراد انجام شد. تعداد پنج نمونه سولفیدی (پیریت) از پیت استخراجی معدن آهن سراب ۳، انتخاب و نسبت ایزوتوپی گوگرد آنها در آزمایشگاه ایزوتوپی دانشگاه کوئینز^۴ کانادا اندازه‌گیری شد. ابتدا بررسی‌های کانه‌نگاری بر روی کانسنگ مگنتیتی حاوی سولفید انجام شد و پس از تشخیص انواع سولفیدها و نسل‌بندی پیریت‌ها (به‌عنوان فراون‌ترین سولفید در سراب ۳)، جداسازی نمونه‌های موردنظر انجام شد. برای جدا کردن پیریت‌های مورد آنالیز، پس

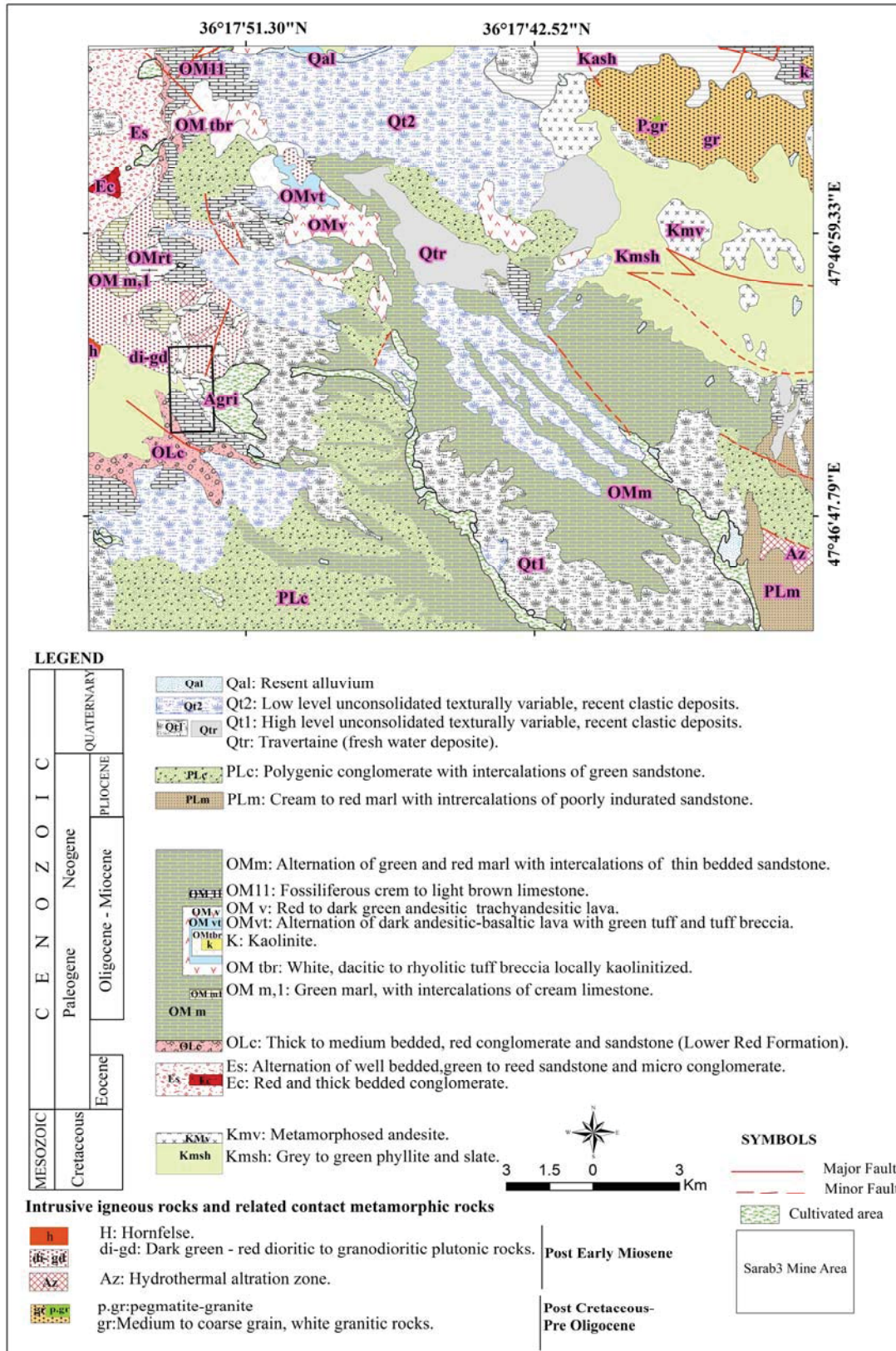
از انتخاب بخش‌هایی از کانسنگ با تراکم بالای پیریت و نسل مشخص آن، در هاون چینی خرد شدند و با الک کردن، قطعات درشت جدا شد و با روش دست‌چینی با پنس زیر میکروسکوپ بیناکولار، نمونه‌های خالص جداسازی شد. در نهایت تعداد پنج نمونه پیریت به آزمایشگاه ایزوتوپی دانشگاه کوئینز کانادا ارسال شد. در این آزمایشگاه نمونه‌های سولفیدی موردنظر در کپسول‌های قلع با مقادیر مساوی اکسید تنگستن (WO_3) توزین شدند. استانداردهای کالیبره داخلی برای نمونه‌ها جهت بهنجار کردن داده‌ها تهیه می‌شوند. کپسول آمده شده داخل کاروسل آنالیزور عنصری واریو ای ال قرار داده می‌شوند. یک نمونه به طرف بخش بالایی یک ستون از مواد شیمیایی جامد در ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد رها می‌شود و با افزودن اکسیژن در دمای ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور ناگهانی سوزانده می‌شود. هلیوم کاملاً خالص برای حمل گازهای منتج در ستون‌های مواد شیمیایی اکسیدکننده/احیاکننده به کار می‌رود تا گازهای H_2O, CO_2, N_2 و SO_2 به‌دست آید. آب با استفاده از پرکلرات منیزیم از سیستم پاک می‌شود. گاز SO_2 توسط واریو ای ال ۳ جدا می‌شود و سپس توسط هلیوم به طرف طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی ترموفینگان دلتا پلاس حمل می‌شود تا اندازه‌گیری شود و دقت اندازه‌گیری ۰/۲ در هزار است.

زمین‌شناسی منطقه‌ای

قدیمی‌ترین واحدهای لیتولوژیکی منطقه معدنی شهرک شامل آندزیت دگرگون‌شده، فیلیت و اسلیت و اکتینولیت شایست به سن کرتاسه هستند (Fenodi and Sayareh, 2000). واحدهای ائوسن از جنس کنگلومرا و ماسه‌سنگ هستند. آهک-دولومیت‌های الیگومیوسن مربوط به سازند قم بخش وسیعی از منطقه را در بر گرفته‌اند. همچنین سنگ‌های آتشفشانی داسیت تا ریولیتی و آندزیت بازالتی الیگومیوسن در منطقه رخنمون دارند (شکل ۲).

1. Doubly Polished Thin Sections
2. Cesium Nitrate

3. n-Hexane
4. Queens University



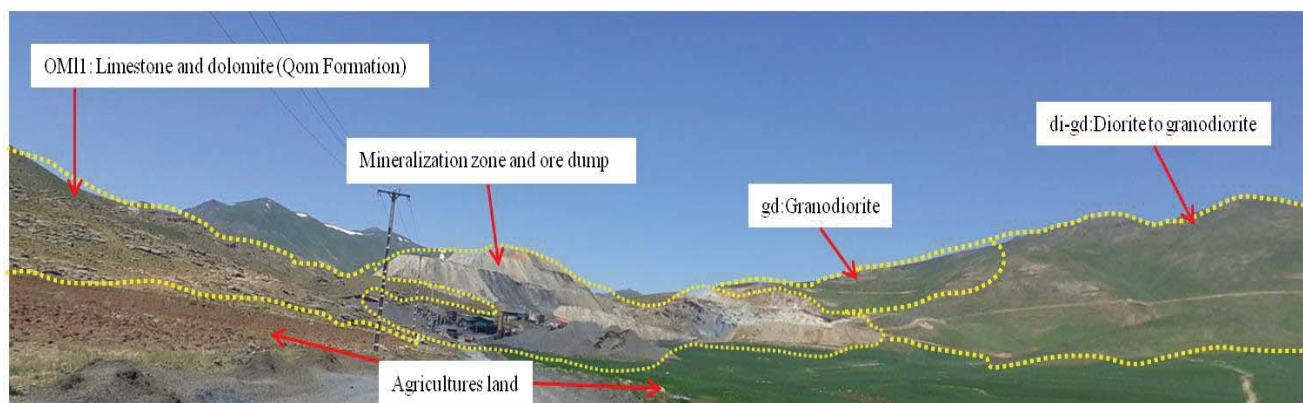
شکل ۲. بخشی از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ یاسوکند (Fenodi and Sayareh, 2000) و موقعیت محدوده مورد بررسی

Fig. 2. Part of the geological map 1:100000 Yasukond (Fenodi and Sayareh, 2000) and the location of the study area

زمین‌شناسی کانسار آهن سراب ۳

از دیدگاه معدنی مهم‌ترین واحدهای زمین‌شناسی در کانسار آهن سراب ۳، توده‌های نفوذی با ترکیب گرانودیوریت (gd)، دیوریت (di) و گرانیت (gf) به سن پس از میوسن آغازین^۱ (Fenodi and Sayareh, 2000) هستند (شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶) که با جای‌گیری در واحدهای لیتولوژیکی قبلی، به‌خصوص آهک و دولومیت‌های الیگومیوسن سازند قم (OMI1 و OMd1)، موجب رخداد کانی‌سازی آهن شده‌اند. آهک و دولومیت‌های سازند قم به رنگ کرم تا قهوه‌ای روشن و صخره‌ساز در محدود معدن رخنمون دارند. در بخش‌های شمال‌غربی محدوده کانسار سراب ۳، توف‌های ریولیتی

دگرگون‌شده (OMrt) به سن الیگومیوسن رخنمون دارد که در اثر تزریق توده‌های نفوذی تا حدودی هورنفلسی و در برخی قسمت‌ها دچار دگرسانی پروپلیتیک و آرژیلیک شده است. گسسه‌شدن در واحدهای سنگی کاملاً مشهود است و به‌نظر می‌رسد مسیر مناسبی برای جای‌گیری توده‌های نیمه‌عمیق و عمیق سراب ۳، فراهم کرده‌اند. چنان‌که در شکل ۳ دیده می‌شود، توده‌های نفوذی در آهک و دولومیت‌های سازند قم تزریق شده‌اند و زون کانی‌سازی در مرز مشترک این واحدها رخ داده است.



شکل ۳. ارتباط واحدهای سنگی با یکدیگر و زون کانی‌سازی در معدن سراب ۳ (دید به سمت شمال‌غرب)

Fig. 3. Relation of rock units with each other and mineralization zone in Sarab 3 mine (northwest view)

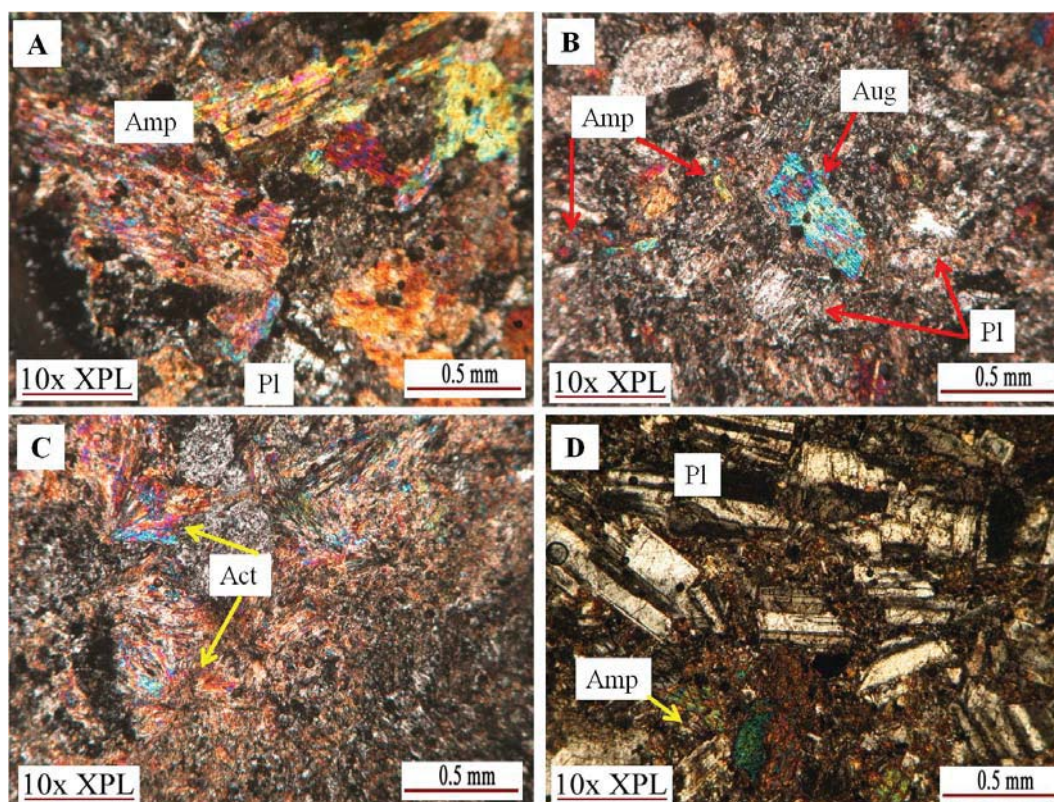
توده‌های نفوذی معدن آهن سراب ۳

توده‌های نفوذی متعددی با ترکیب گرانودیوریت، دیوریت و گرانیت، واحدهای سنگی منطقه سراب ۳ را در نقاط مختلف قطع کرده‌اند. این توده‌ها به‌عنوان مولد کانی‌سازی دارای اهمیت هستند. توده‌های یادشده اغلب حالت نیمه‌عمیق با بافت پورفیری دارای خمیره میکروگرانولار و در مواردی بافت کاملاً گرانولار دارند. نقش ساختارهای زمین‌ساختی در جای‌گیری توده‌های کانسنگ‌ساز منطقه غیر قابل انکار است و اغلب گسسه‌ها و شکستگی‌های اصلی کنترل‌کننده مسیر حرکت توده‌های مولد کانی‌سازی هستند.

توده نفوذی دیوریتی - گرانودیوریتی (di-gd): این توده نفوذی در آهک‌ها و دولومیت‌های سازند قم (واحد OMI1 و OMd1) و متاریولیت توف الیگومیوسن (OMrt) تزریق‌شده است (شکل ۶). با توجه به بررسی‌های صحرائی، احتمال ارتباط این توده و نیز توده گرانودیوریتی با کانی‌سازی مگنتیت بیشتر از سایر توده‌های نفوذی است و می‌توان این توده‌ها را مولد کانی‌سازی در سراب ۳ در نظر گرفت. بر اساس بررسی‌های پتروگرافی انجام‌شده، اپیدوتی و کلریتی‌شدن در این توده اتفاق افتاده است. در توده دیوریتی بیشتر بافت سنگ میکروگرانولار، گرانولار، اینترسرتال و بافت پورفیری با خمیره

می‌رسد (شکل ۴-۱). بیشتر آمفیبول‌ها از نوع اکتینولیت هستند (شکل ۴-۲). در برخی مقاطع نیز به مقدار حدود ۵ درصد بلورهای فلدسپات پتاسیم به خوبی دیده می‌شوند. کوارتز با فراوانی کمتر از ۲ درصد در سنگ حضور دارد. از کانی‌های فرعی دیوریت‌های مورد بررسی می‌توان به اسفن همراه با آپاتیت، اکسیدهای آهن و بیوتیت اشاره کرد. کلریت، اپیدوت، کلسیت، کانی‌های رسی و مقادیر کمی سرپانتین و تالک از کانی‌های ثانویه دیوریت‌های سراب ۳ هستند.

میکروگرانولار است. فراوان‌ترین کانی در این سنگ پلاژیوکلاز است که حدود ۷۰ درصد آن را در بر می‌گیرد (شکل ۴-۳). پلاژیوکلازها در بیشتر بخش‌ها ماکل پلی‌سننتیک مشخصی دارند و برخی از آنها نیز دارای منطقه‌بندی هستند (شکل ۴-۴). در مقاطع نازک از این واحد کانی‌های پلاژیوکلاز، آمفیبول و پیروکسن نوع اوژیت دیده می‌شود (شکل ۴-۵). فراوانی پیروکسن در این سنگ کمتر از ۱۰ درصد است. آمفیبول‌ها بیشتر اولیه بوده؛ اما در برخی از قسمت‌ها از تبدیل شدن پیروکسن‌ها حاصل شده‌اند و فراوانی آنها به ۲۰ درصد در سنگ

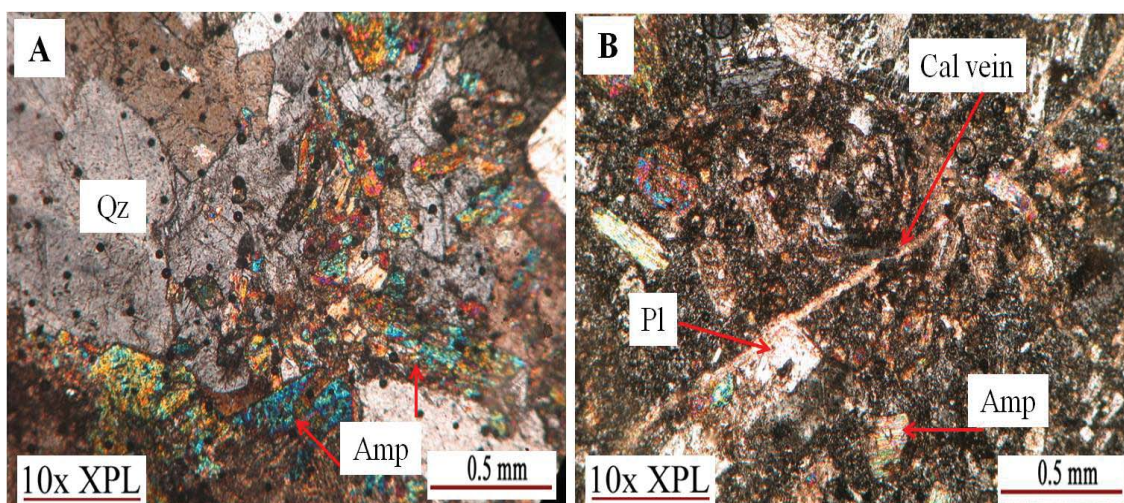


شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از دیوریت‌های کانسار سراب ۳، A و B: نمونه Sb-92-DDH2(80.30m)، سنگ دیوریتی با بلورهای پلاژیوکلاز، اوژیت و آمفیبول در زمینه‌ای از میکرولیت‌ها (اغلب از جنس فلدسپات) همراه با کانی‌های کدر مگنتیتی، C: نمونه Sb-92-DM5(45.6m)؛ سنگ دیوریتی حاوی بلورهای پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سننتیک و اکتینولیت‌ها در زمینه سنگ به فراوانی دیده می‌شوند و D: نمونه Sb-92-17b، سنگ دیوریتی حاوی بلورهای پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سننتیک و اکتینولیت‌ها در زمینه سنگ به فراوانی دیده می‌شوند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Amp: آمفیبول، Aug: اوژیت، Pl: پلاژیوکلاز، Act: اکتینولیت).

Fig. 4. Photomicrographs of the diorites of Sarab 3 iron ore deposit, A and B: Sample (Sb-92-DDH2 (80.30m), diorite rock with plagioclase crystals, augite and amphibole in the background of microliths (often feldspar) together with magnetite opaque minerals, C: Sample Sb-92-DM5(45.6m), Actinolites are found in abundance at background of rock, and D: Sample Sb-92-17b, Diorite rock containing plagioclase crystals with polysynthetic macles and actinolite amphiboles with pleochroism blue, green, red and orange. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Act: actinolite; Amp: amphibole; Pl: Plagioclase Aug: augite).

دارند (شکل ۵-۵A). کانی‌های فرعی این سنگ شامل آپاتیت، اسفن، زیرکن و کانی‌های کدر است. کانی‌های اصلی سنگ به اپیدوت، کلریت، کانی‌های رسی، کلسیت و سریسیت است. گرانودیوریت‌های سراب ۳، نقشی مهم در کانی‌سازی مگنتیت داشته‌اند.

گرانودیوریت (gd): گرانودیوریت‌های سراب ۳ نیز مانند دیوریت‌ها به رنگ روشن هستند. بافت این سنگ اغلب گرانولار و در مناطقی پورفیری با خمیره میکروگرانولار است (شکل ۵-۵B). پلاژیوکلازها به‌عنوان فراوان‌ترین کانی در این سنگ، فراوانی بیش از ۵۰ درصد دارند. فلدسپات‌های آلکالن فراوانی ۲۰ درصد، کوارتز ۱۵ درصد و هورنبلند ۱۰ درصد



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی از گرانودیوریت‌های کانسار سراب ۳، A و B: نمونه Sb-92-DN1 (89.5m)، سنگ گرانودیوریتی با بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول و کوارتز در زمینه‌ای از میکروولیت‌ها (اغلب از جنس فلدسپات). رگه کلسیتی تمامی کانی‌ها را قطع کرده است. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Amp: آمفیبول، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Cal: کلسیت).

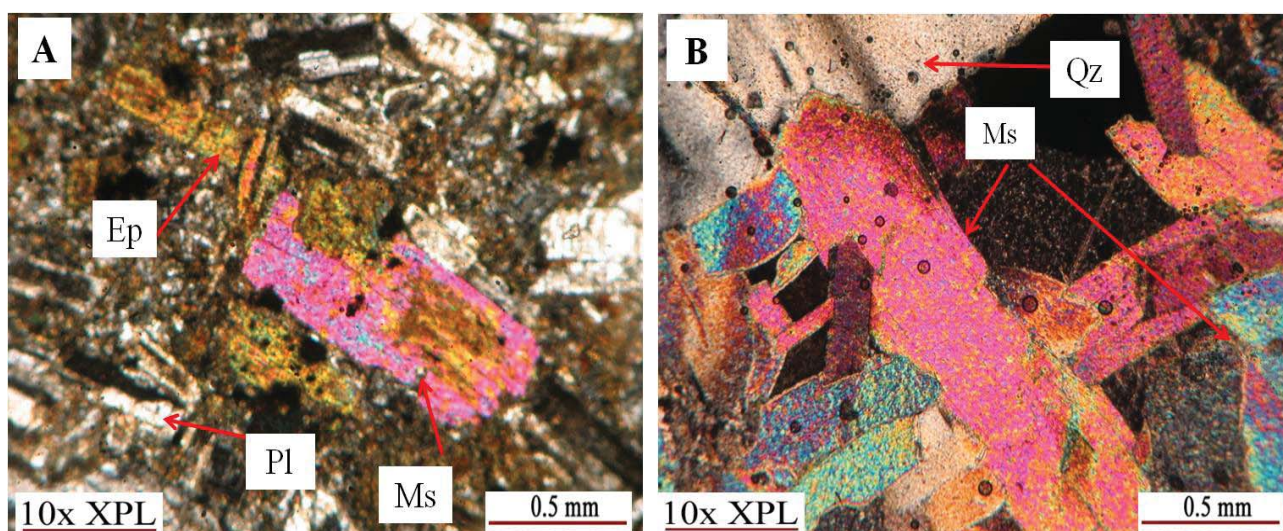
Fig. 5. Photomicrographs of the granodiorites of Sarab 3 iron ore deposit, A and B: Sample Sb-92-DN1 (89.5m), granodiorite rock with plagioclase crystals, amphibole and quartz in the background of microliths (often feldspar). The calcite vein interrupts all the minerals. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Amp: amphibole; Pl: Plagioclase, Qz: Quartz, Cal: Calcite).

در اکتشافات ژئوفیزیکی (ژئوفیزیک هوابرد و مگنتومتري زمینی) و زمین‌شناسی جدید که در سال ۱۳۹۸ توسط شرکت توسعه معادن و صنایع معدنی کردستان انجام شد، در این مناطق اثری از کانی‌سازی مگنتیت در ارتباط با توده گرانیتی (gr) دیده نمی‌شود. رنگ این توده روشن و در بخش‌هایی هوازگی بر آن تأثیر گذاشته است. این واحد با حضور مسکویت فراوان در ترکیب و نیز کوارتز در کنار مقادیری پلاژیوکلاز قابل تشخیص است (شکل ۶-۵A و B). کوارتز با فراوانی حدود ۴۰ درصد حجمی به‌صورت بی‌شکل با لبه‌های خرد شده و خاموشی

گرانیت (gr): در بخش‌های شمال‌غربی محدوده، توده نفوذی با ترکیب گرانیتی رخنمون دارد (شکل ۷). بر اساس روابط صحرائی (قطع‌شدگی توده di-gd توسط gr و نیز پختگی مرز این دو واحد و در حاشیه توده di-gd) احتمالاً توده گرانیتی سراب ۳ جوان‌تر از سایر توده‌های نفوذی منطقه است. وضعیت کانی‌شناسی آن نیز متفاوت از سایر توده‌های نفوذی و نیمه‌عمیق است. رخداد کانی‌سازی اصلی مگنتیت در سراب ۳ را نمی‌توان به این توده ارتباط داد. گسترش واحد گرانیتی در مناطق شمال‌غربی معدن سراب ۳ و نیز مناطق مجاور آن وجود دارد و

از قسمت‌ها به اپیدوت تبدیل شده‌اند (دگرسانی پروپلیتیک). کانی‌های فرعی این سنگ شامل زیرکن، آپاتیت، اسفن و مگنتیت است. بافت سنگ گرانولار است.

موجی، فلدسپات آلکالن با فروانی حدود ۲۰ درصد، پلاژیوکلاز (الیگوکلاز - آلپیت) با فروانی حدود ۱۰ درصد، مسکویت با فروانی حدود ۲۰ درصد، بیوتیت و هورنبلند با فروانی حدود ۱۰ درصد در این سنگ وجود دارند. بلورهای پلاژیوکلاز در برخی



شکل ۶. A و B: تصاویر میکروسکوپی از گرانیت کانسار سراب ۳، نمونه Sb-92-21. مسکویت به رنگ صورتی تا سبز و کوارتز به رنگ خاکستری روشن. پلاژیوکلازها دارای منطقه‌بندی و به شدت خرد شده هستند. مسکویت‌ها به اپیدوت تبدیل شده‌اند (دگرسانی پروپلیتیک). علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوایز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ms: مسکویت، Ep: اپیدوت، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز).

Fig. 6. A and B: Photomicrographs of the granite of Sarab 3 iron ore deposit, Sample Sb-92-21. Muscovite pink to green and light gray in quartz. Plagioclase are zoned and are highly crushed. Muscovites altered to epidote (Propylitic alteration). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ms: Muscovite, Ep: Epidote, Pl: Plagioclase, Qz: Quartz)

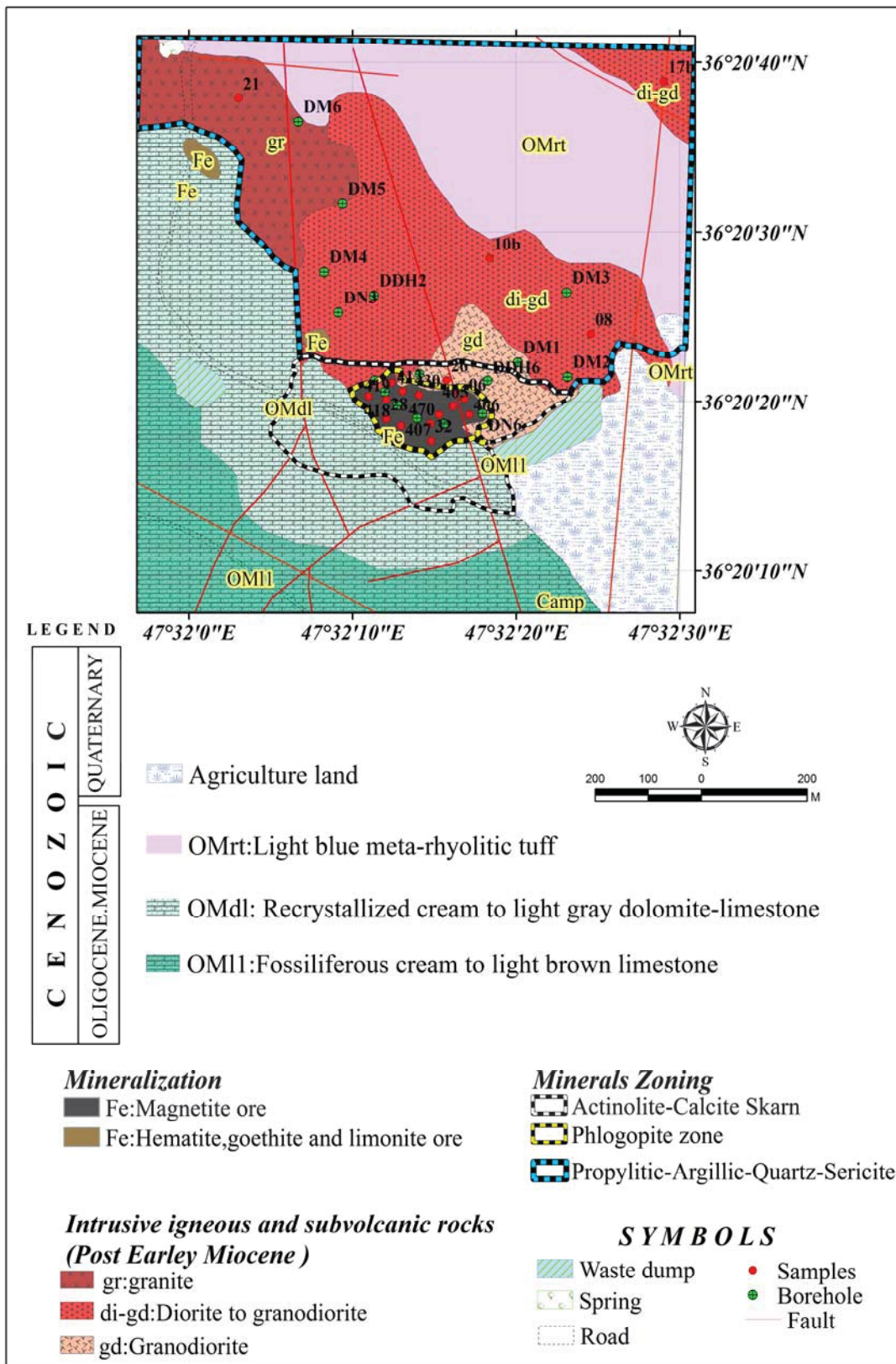
(۱۰).

زمین‌شیمی

بررسی‌های زمین‌شیمیایی توده‌های نفوذی سراب ۳ توسط معانی جو و خدایی (Maanijou and Khodaei, 2016) انجام شده است. بر اساس نمودار میدلموست (Middlemost, 1994)، توده‌های نفوذی سراب ۳ در محدوده سنگ‌های مونزونیت، کوارتز مونزونیت، کوارتز مونزودیوریت، کوارتز دیوریت، گرانودیوریت و گرانیت جای گرفته‌اند (شکل ۸). بر پایه نمودار میاشیرو (Miyashiro, 1974) توده‌های نفوذی سراب ۳ در محدوده سری‌های کالک‌آلکالن جای گرفته‌اند (شکل ۹). بر اساس نمودار شناسایی ماگما از دیدگاه اشباع‌شدگی از آلومین (Shand, 1943)، سنگ‌های نفوذی معدن سراب ۳ دارای سرشت متآلومینوس هستند (شکل

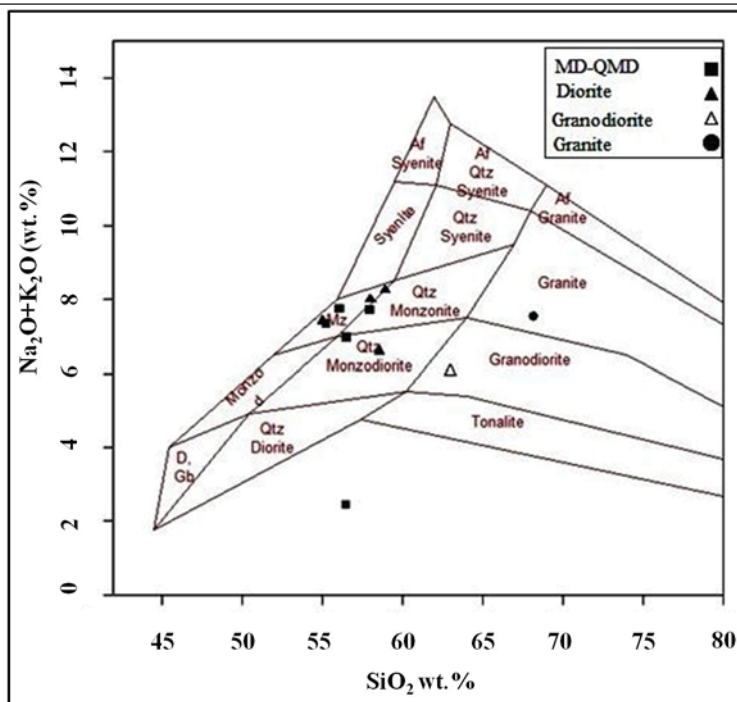
کانی‌سازی

پژوهش معانی جو و خدایی (Maanijou and Khodaei, 2018) در سراب ۳ نشان داد که نوع کانی‌سازی در این کانسار، اسکارنی است. در این پژوهش ۲۳ نقطه از کانی‌های مگنتیت و هماتیت در ۶ مقطع صیقلی مورد آنالیز الکترون مایکروپروپ قرار گرفتند. نتایج این آنالیزها در نمودارهای ارائه‌شده توسط دپوس و بودین (Dupuis and Beaudoin, 2011)، با سایر انواع کانی‌سازی آهن مورد مقایسه قرار گرفت که در نتیجه خاستگاه اسکارنی را برای سراب ۳ مشخص کرد (شکل ۱۱).



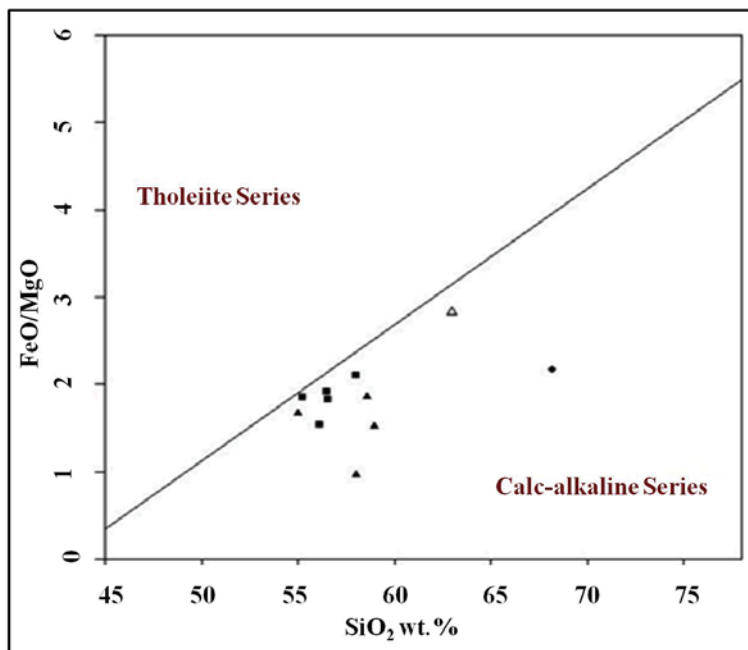
شکل ۷. نقشه زمین‌شناسی کانسار آهن سراب ۳ با مقیاس ۱:۵۰۰۰

Fig. 7. Geological map of Sarab 3 iron ore deposit in scale 1: 5000



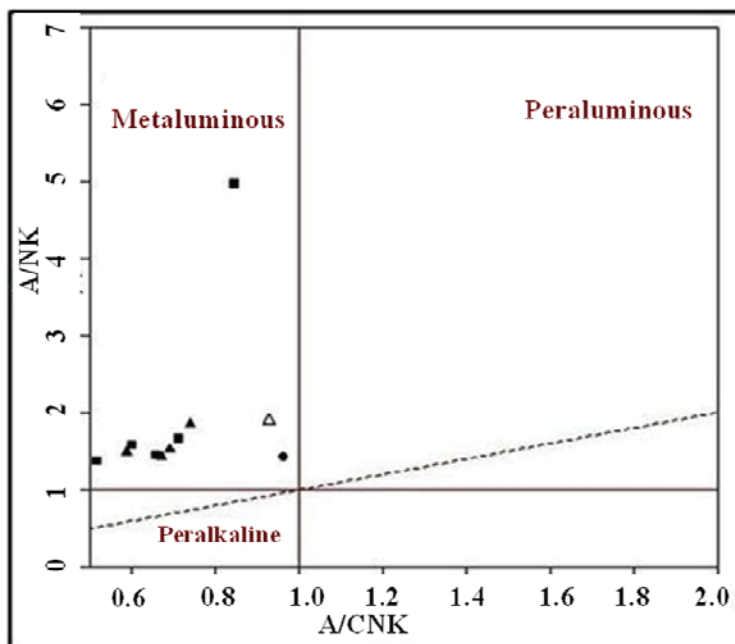
شکل ۸. رده‌بندی سنگ‌های نفوذی سراب ۳ بر پایه رده‌بندی میدلموست (Middlemost, 1994) (MD: مونزودیوریت، QMD: کوآرتز مونزودیوریت) (Maanijou and Khodaei, 2016)

Fig. 8. Sarab 3 intrusive rocks classification based on Middlemost, 1994 (MD: monzodiorite, QMD: quartz monzodiorite) (Maanijou and Khodaei, 2016)



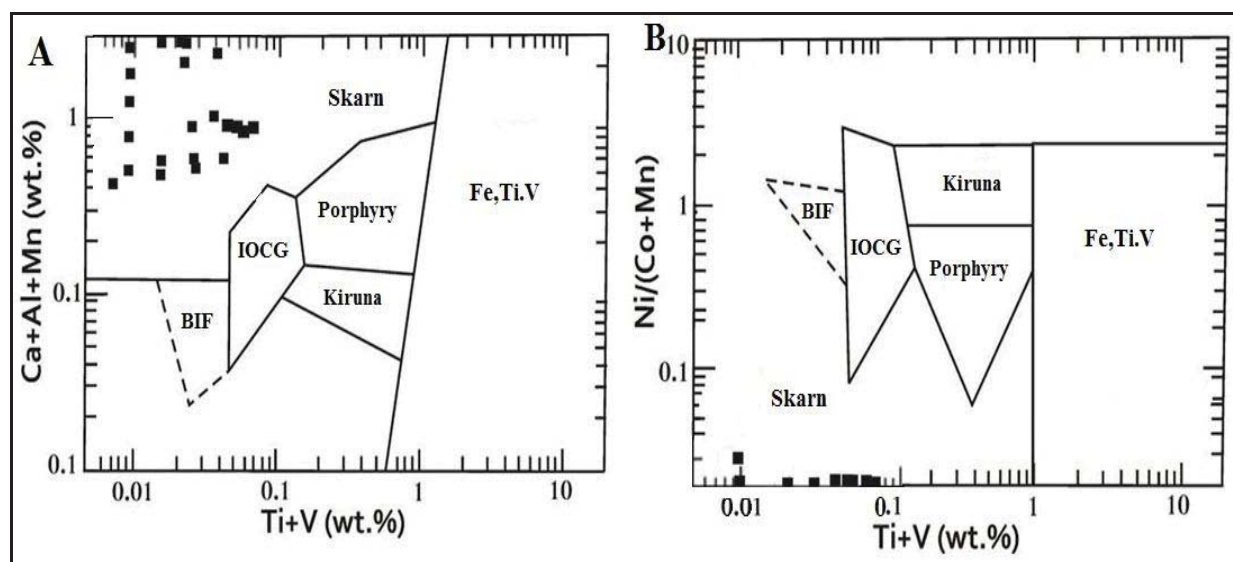
شکل ۹. بر پایه نمودار میاشیرو (Miyashiro, 1974) توده‌های نفوذی سراب ۳ در محدوده سری‌های کالک‌آلکالن جای گرفته‌اند (Maanijou and Khodaei, 2016) (نمادها مانند شکل ۸ هستند).

Fig. 9. Based on the Miyashiro, 1974 diagram the Sarab 3 intrusive body are located within the calc-alkaline series (Maanijou and Khodaei, 2016) (The symbols are as in Figure 8).



شکل ۱۰. نمودار شناسایی ماگما از دیدگاه اشباع‌شدگی از آلومین شاند (Shand, 1943) برای سنگ‌های نفوذی معدن سراب ۳ در نمودار $(A/CNK=Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O)$ در برابر $(A/NK=Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O)$ (Maanijou and Khodaei, 2016) (نمادها مانند شکل ۸ هستند).

Fig. 10. Diagram of magma identification from the perspective of saturation of alumina (Shand, 1943) for intrusive rocks of Sarab 3 mine in diagram $(A/CNK=Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O)$ versus $(A/NK=Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O)$ (Maanijou and Khodaei, 2016) (The symbols are as in Figure 8).

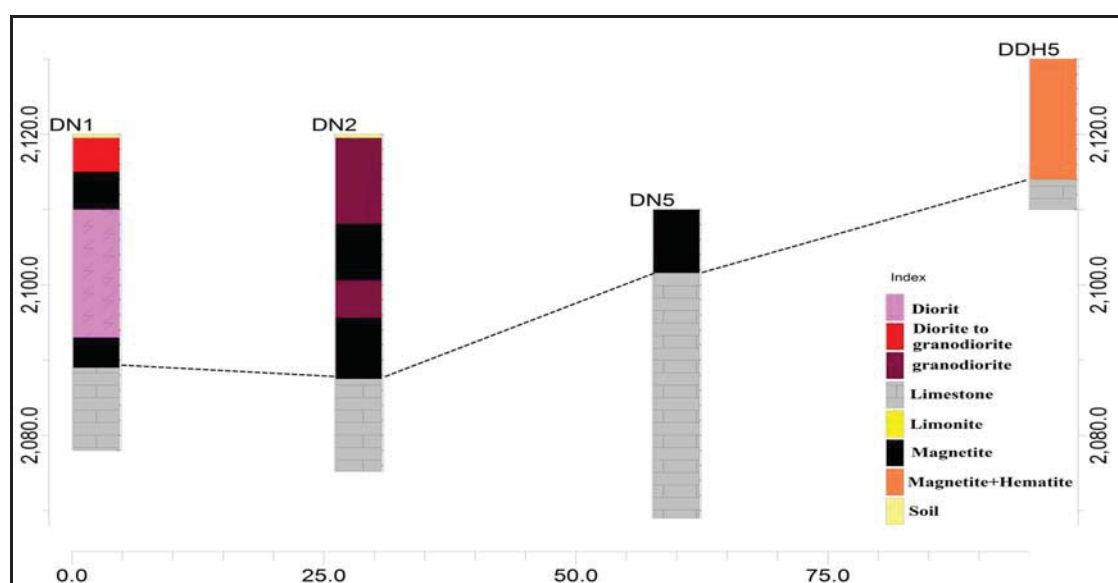


شکل ۱۱. A و B: نمودار تفکیک‌کننده منشأ انواع کانسارهای آهن‌زاد از دیپوس و بودین (Dupuis and Beaudoin, 2011)، بر حسب آنالیز EPMA کانی‌های اکسیدی آهن (مگنتیت و هماتیت). طبق این نمودارها، نمونه‌های کانسار آهن سراب ۳ در محدوده اسکارن قرار می‌گیرند.

Fig. 11. A and B: Discrimination diagrams for origin of iron deposits of Dupuis and Beaudoin (2011), on the basis of EPMA analysis of iron oxides (hematite and magnetite). According to these diagrams, samples of Sarab-3- iron plot within the skarn.

قجور (Fenodi and Sayareh, 2000) پس از میوسن آغازین است. بررسی رخنمون‌های سطحی و مغزه‌های حفاری کانسار آهن سراب ۳، ارتباط واحد دیوریت-گرانودیوریتی را با کانسنگ و سنگ دربرگیرنده مشخص می‌کند که در شکل ۱۲ این ارتباط نشان داده شده است.

در واقع کانی‌سازی در سراب ۳ در اثر جای‌گیری توده‌های نفوذی و نیمه‌عمیق با ترکیب دیوریت و گرانودیوریت در آهک و دولومیت‌های سازند قم با سن الیگومیوسن رخ داده است و ذخیره آهن مگنتیتی با تناژ حدود ۸ میلیون تن و میانگین عیار آهن کل ۵۳ درصد در این کانسار تشکیل شده است. سن توده‌های آذرین یادشده بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰



شکل ۱۲. واحدهای سنگی موجود در چهار گمانه و محل تماس میان سنگ‌های آذرین، کانسنگ مگنتیتی و سنگ میزبان کربناته در کانسار آهن سراب ۳

Fig. 12. The rock units in the four boreholes and the contact between igneous rocks, magnetite ore and carbonate host rock in the Sarab 3 iron ore deposit

ماینرت (Meinert, 1992) ذخایر اسکارن به‌طور معمولی در نتیجه سه فرایند متوالی شامل: دگرگونی مجاورتی ایزوشیمیایی در مراحل ابتدایی جای‌گیری و تبلور توده نفوذی، سپس متاسوماتیسم سامانه باز و دگرسانی طی اشباع‌شدگی سیال ماگمایی و در نهایت افت دما و آمیختگی با سیال‌های جوی طی سرد شدن توده نفوذی تشکیل می‌شوند.

در نتیجه جای‌گیری توده‌های یادشده، سنگ‌های دولومیتی میزبان به سنگ اسکارن تبدیل شده و کانی‌های اپیدوت، اوژیت، آمفیبول و غیره در متن سنگ دولومیت تشکیل شده است. حاصل این رویدادها، رخداد کانی‌سازی آهن اسکارنی در سراب ۳ بوده است که در ادامه فرایندهای مربوط به این سیستم شرح داده شده است.

مرحله پیش‌رونده-دگرگونی مجاورتی ایزوشیمیایی^۱
در سراب ۳ در اثر جای‌گیری توده‌های نفوذی در میزبان‌های کربناته مرمری شدن رخ داده است. این حالت در بخش‌های

شرایط فیزیکوشیمیایی کانسنگ و توالی همیافتی
بر اساس اینودی و همکاران (Einaudi et al., 1981) و

1. Prograde- isochemical contact metamorphism

کانی‌های اپیدوت، کلریت، کلسیت و فلوگوپیت (احتمالاً به‌جای گارنت‌ها؟)، ترمولیت، اکتینولیت و تالک (به‌جای پیروکسن‌ها) و سرپانتین مشخص می‌شود. همچنین در این مرحله در سراب ۳، علاوه بر مگنتیت و هماتیت، کانی‌های سولفیدی شامل پیریت، پیروتیت و کالکوپیریت نیز به‌صورت افشان و رگچه‌ای مجموعه پیش‌رونده را قطع کرده‌اند. آمیختگی سیال کانه‌دار ماگمایی با اجزای سازنده جوی پسین و ته‌نشینی فلز از آن در اثر کاهش دما، خشی شدن سیال در اثر واکنش با واحدهای سنگ‌شناختی کربناته و واکنش‌های اکسایش-کاهش مربوطه در سیال از عوامل کنترل‌کننده تشکیل کانسنگ در کانسار سراب ۳ بوده است.

منطقه‌بندی کانیاپی، زیر پهنه‌های اسکارنی و

دگرسانی‌ها در سراب ۳

در غالب سامانه‌های زمین‌شناسی به‌خصوص کانسارها، نظم و قاعده منحصر به فردی در پراکندگی عناصر، زون‌های دگرسانی و کانی‌سازی وجود دارد. اسکارن‌ها نیز از این قاعده مستثنا نیستند؛ اما باید توجه داشت که منطقه‌بندی در تمامی کانسارها به‌طور کامل رخ نمی‌دهد و بسته به شرایط زمین‌شناسی محیط، جنس سنگ میزبان، توده مولد کانی‌سازی، شرایط ژئوشیمیایی، ترمودینامیکی و نظایر آن این منطقه‌بندی‌ها به‌طور نسبتاً کامل و یا ناقص نمود پیدا می‌کنند (Mansouri et al., 2015). این مسئله از دلایل پیچیدگی بررسی‌های اکتشافی ذخایر معدنی است. در سراب ۳، زون‌بندی کامل و مشخص معمول اسکارن‌ها ملاحظه نمی‌شود و حتی برخی از کانی‌های اسکارنی مهم مانند گارنت‌ها تشکیل نشده و یا از بین رفته‌اند. به‌رحال زون‌بندی کانیاپی-دگرسانی که در سراب ۳ رخ داده، دارای اهمیت است (شکل ۱۳). فلوگوپیت‌ها به‌طور پراکنده در داخل کانسنگ مگنتیتی و نیز سنگ میزبان رخ داده‌اند و در مرکزی‌ترین بخش سیستم کانی‌سازی سراب ۳ قرار دارند. مهم‌ترین پهنه اسکارنی قابل ملاحظه در سراب ۳، زون کلسیت-اکتینولیت اسکارن است

مختلف منطقه قابل مشاهده است. به‌گونه‌ای که در جنوب‌غربی معدن از سنگ دولومیت‌های ریکریستالیزه به‌عنوان سنگ نما استخراج شده است. دگرگونی مجاورتی هرچند بیشتر تأثیر گرمایی دارد؛ اما احتمال گردش سیال‌ها که اغلب محصولی از واکنش‌های دگرگونی پیش‌رونده بوده و بنابراین اغلب از H_2O و CO_2 بوده است، وجود دارد. تشکیل بخشی از تالک، فلوگوپیت و ترمولیت‌های کانسار سراب ۳ در این مرحله اتفاق افتاده است. این مرحله با هیچ‌گونه کانه‌زایی همراه نیست. تشکیل تالک و فلوگوپیت وجود اسکارن منیزیمی غنی از پتاسیم را در سراب ۳ به اثبات می‌کند.

مرحله پیش‌رونده-متاسوماتیسم و جانشینی^۱

در این مرحله اشباع‌شدگی ماگمای نفوذی از سیال H_2O و بخار (در نتیجه جوشش اولیه و ثانویه و یا هر دو) و ورود فاز سیال به درون هاله دگرگونی مجاورتی احاطه‌کننده اتفاق می‌افتد. مجموعه کانیاپی متاسوماتیکی شبیه به مجموعه تشکیل شده طی دگرگونی مجاورتی است؛ اما دگرسانی متاسوماتیکی، فراگیرتر و دانه درشت‌تر بوده و جانشین مجموعه‌هایی می‌شود که پیش‌تر تشکیل شده‌اند. گارنت‌ها نیز در این مرحله تشکیل می‌شوند؛ اما در سراب ۳ اثری از این کانی دیده نمی‌شود. پیروکسن‌های نوع اوژیت در سراب ۳ می‌توانند حاصل فرایندهای جانشینی این مرحله باشند. در این مرحله کانی‌سازی سولفیدی رخ نمی‌دهد؛ گرچه مگنتیت در مراحل پایانی دگرگونی پیش‌رونده ته‌نشین می‌شود.

مرحله پس‌رونده-هجوم سیال جوی و مرحله اصلی

ته‌نشینی فلز^۲

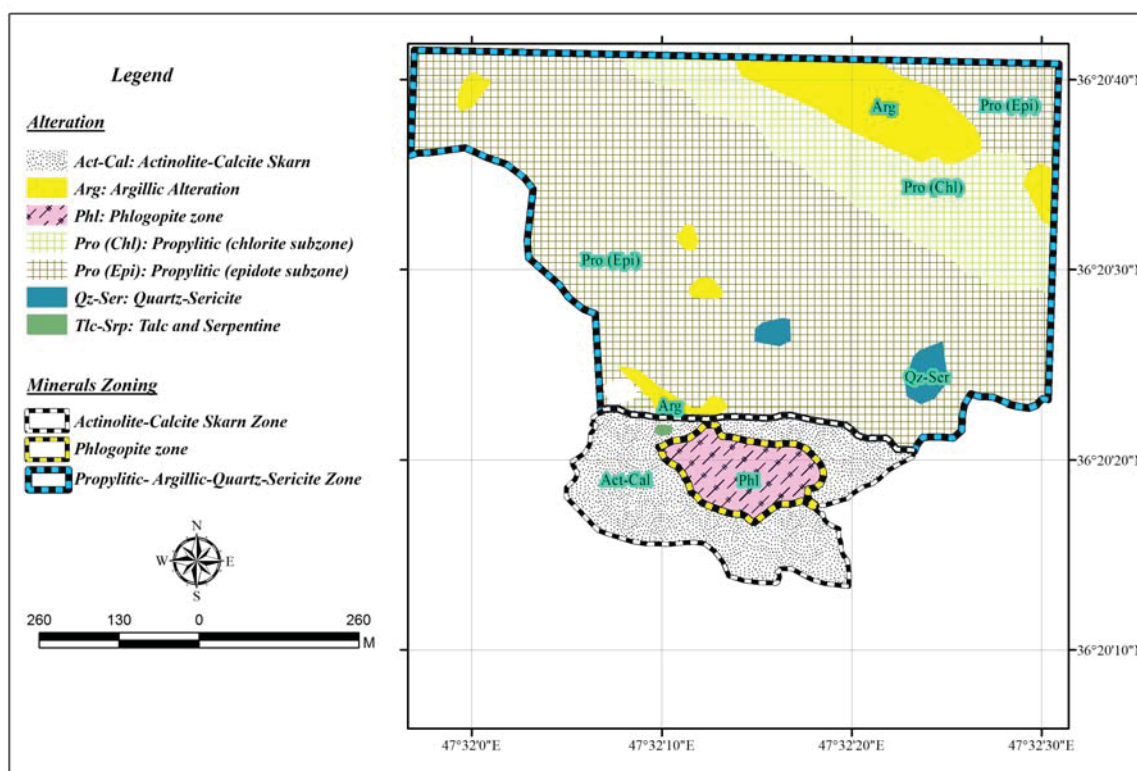
در این مرحله که شامل یک گروه واکنش‌های پس‌رونده پیچیده است، مجموعه دگرسانی پس‌رونده، روی کانی‌های دگرگونی و متاسوماتیکی پیشین تحمیل می‌شود. این مرحله که با تشکیل توالی همیافتی تأخیری نمود می‌یابد، در سراب ۳ شامل

1. Prograde – metasomatism and replacement

2. Retrograde – meteoric fluid influx and main metal precipitation

دارد که می‌تواند نشان‌دهنده رخداد اسکارن منیزیمی در آن باشد. زون دگرسانی پروپلیتیک، آرژیلیک و کوارتز-سریسیت در خارجی‌ترین منطقه سیستم دیده می‌شود (شکل ۱۳).

که چسبیده به ستون پریکار کانسنگ^۱ مگنتیتی معدن است و می‌توان آنرا زون میانی در نظر گرفت (شکل ۱۳). تالک-سرپانتینی شدن در این کانسار به صورت بسیار محدود حضور



شکل ۱۳. نقشه دگرسانی و زون‌بندی کانیایی کانسار آهن سراب ۳ با مقیاس ۱:۵۰۰۰

Fig. 13. Alteration map and mineral zoning of Sarab 3 iron ore deposit in scale 1: 5000

در کانسار سراب ۳، دگرسانی آرژیلیک به صورت انتخابی (شکل ۱۵-D) و فراگیر در فاصله دورتری از ماده معدنی قرار دارد که این فاصله در نقاط مختلف کانسار متغیر است و در نزدیک‌ترین بخش فاصله بین دگرسانی آرژیلیک و کانسنگ آهن حدود ۵۰ متر است. رنگ این زون سفید، البته در برخی بخش‌ها به علت حضور اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن به صورت آغستگی^۲ رنگ آن تغییر پیدا کرده است. کانی‌سازی خاصی در ارتباط با این زون مشاهده نمی‌شود. پلاژیوکلازها در واحد گرانودیوریتی به صورت انتخابی به سریسیت تبدیل

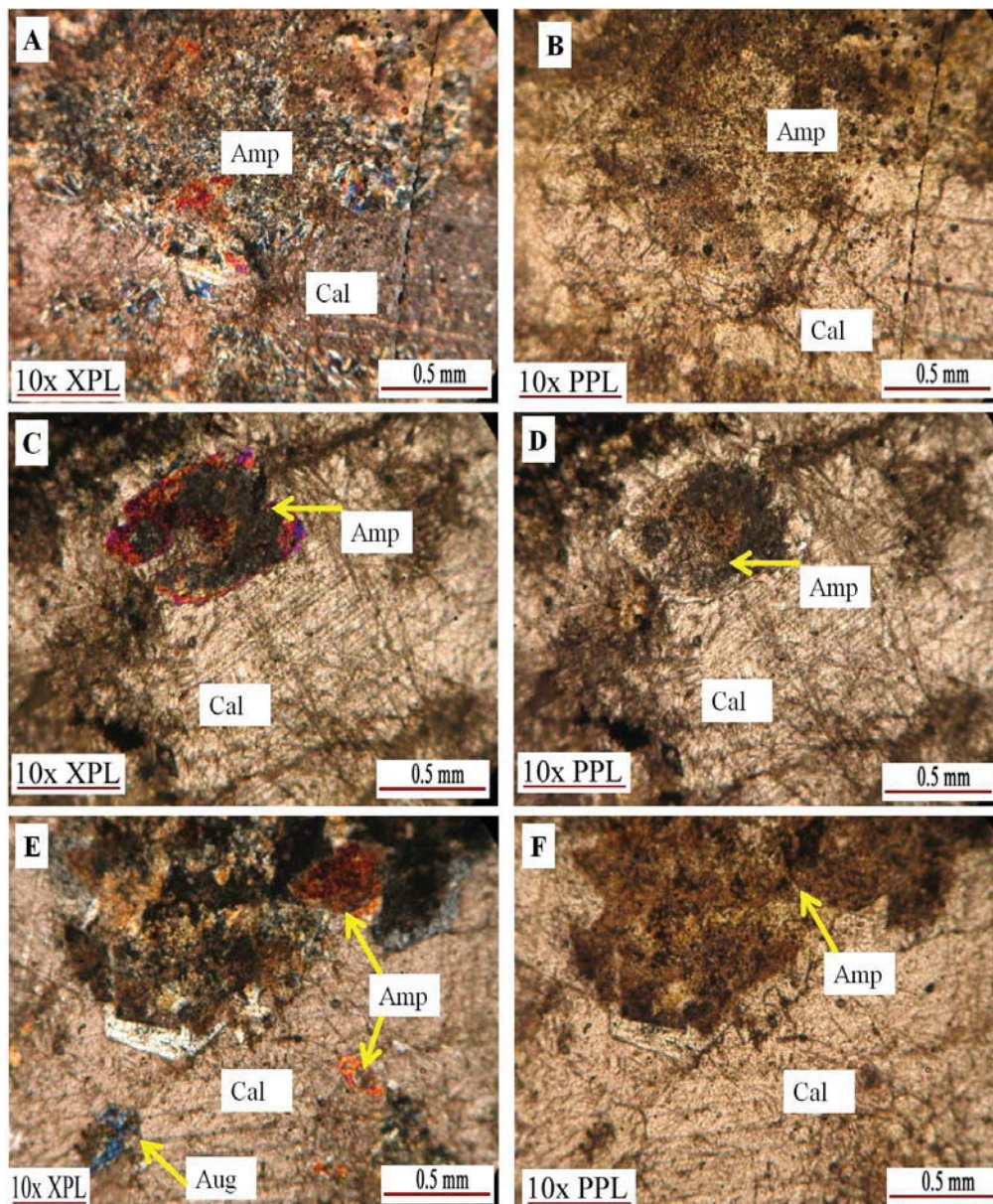
نتایج بررسی مقاطع نازک برداشت شده از بخش‌های سطحی و مغزه‌های حفاری مرتبط با کانسنگ مگنتیتی، بیانگر تشکیل زون‌های اسکارنی در سیستم کانی‌سازی سراب ۳ است. در اثر هجوم سیالات گرمایی به سنگ میزبان کربناته در این کانسار، رخداد زون اسکارنی دیده می‌شود. در واقع این زون با مشاهده کانی‌های سیلیکاته مانند آمفیبول‌ها (نوع اکتینولیت) در کنار کلسیت (شکل ۱۴-A, B, C, D, F) و پیروکسن‌ها (نوع اوژیت) در کنار کلسیت (شکل ۱۴-E)، با بررسی مقاطع نازک، مشخص شد.

1. Ore shoot

2. Staining

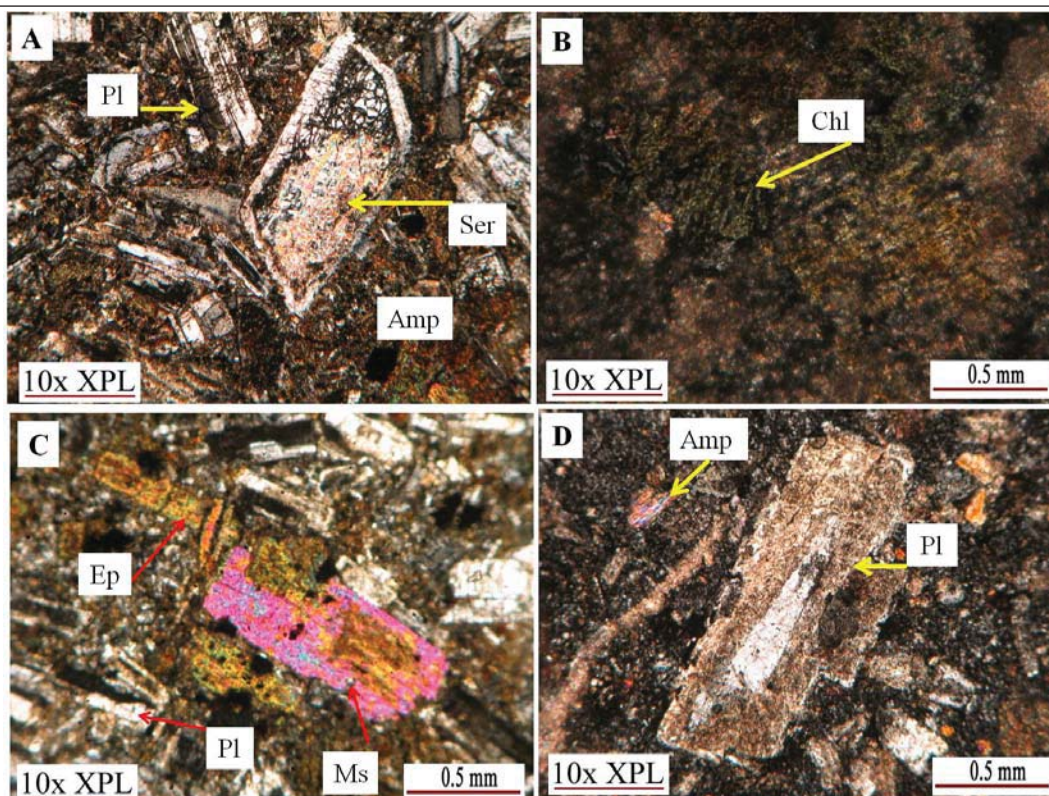
مقاطع نازک، بیشترین کانی‌های مربوط به این نوع دگرسانی شامل کلریت (شکل B-۱۵) و اپیدوت (شکل C-۱۵) هستند (شکل ۱۵).

شده‌اند (شکل A-۱۵)؛ ولی به‌طور کلی این دگرسانی گسترش چندانی در منطقه ندارد. دگرسانی پروپیلیتیک در سراب ۳، گسترده‌ترین زون دگرسانی محسوب می‌شود. بر اساس بررسی



شکل ۱۴. اسکارنی شدن در بخش‌های مختلف کانسار سراب ۳. A و B: نمونه Sb-92-DDH7 (50m)، C و D: نمونه Sb-92-27، E و F: نمونه Sb-92-DDH4 (60m). کانی‌های کالک سیلیکاته (آمفیبول و اوژیت) در کنار کلسیت تشکیل شده‌اند. علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Amp: آمفیبول، Cal: کلسیت، Aug: اوژیت).

Fig. 14. Skarnization in Sarab 3. A and B: Sample Sb-92-DDH7 (50m), C and D: Sample Sb-92-27, E and F: Sample Sb-92-DDH4 (60m). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Amp: Amphibole, Cal: Calcite, Aug: Augite).



شکل ۱۵. انواع دگرسانی در سراب ۳. A: دگرسانی سریستی، B و C: دگرسانی پروپلیتیک و D: دگرسانی آرژیلیک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) (Pl: پلاژیوکلاز، Chl: کلریت، Ser: سریسیت، Amp: آمفیبول).

Fig. 15. Types of alteration in Sarab 3. A: Sericitic alteration, B and C: Propylitic alteration, and D: Argillic alteration. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Pl: Plagioclase, Ms: Muscovite, Ep: Epidote, Chl: Chlorite, Ser: Sericite, Amp: Amphibole).

کانه‌نگاری

مگنتیت: این کانی سازنده اصلی کانسنگ در کانسار آهن سراب ۳ و به‌طور کلی مجموعه معادن شهرک است. مگنتیت در سراب ۳ به‌صورت بلورهای بی‌شکل و بافت توده‌ای، دانه پراکنده، رگه‌ای و شکافه پرکن تشکیل شده است (شکل ۱۶-E).

هماتیت: تشکیل هماتیت در سراب ۳ در دو نسل اتفاق افتاده است. هماتیت نسل اول در مرحله درون‌زاد و با بافت صفحه‌ای همراه با مگنتیت تشکیل شده است. پس از تشکیل کانسنگ مگنتیتی در اثر تأثیر فرایندهای برون‌زاد، بخشی از مگنتیت‌های کم‌عمق به هماتیت تبدیل شده‌اند.

پیروتیت: پیروتیت به‌عنوان یک کانی فرعی در سراب ۳ مطرح است که به مقدار بسیار کم به همراه کانسنگ مگنتیتی و در مرحله پس‌رونده تشکیل شده است. در سراب ۳، پیروتیت اغلب به‌صورت افشان در متن کانسنگ مگنتیتی قرار دارد و در بخش‌هایی مگنتیت به‌صورت رگچه‌ای پیروتیت را قطع کرده است (شکل E-۱۶).

پیریت: بر اساس نتایج بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی در سراب ۳ است. تمامی پیریت‌های سراب ۳ در مرحله پس‌رونده اسکارن تشکیل شده‌اند؛ اما می‌توان آنها را در پنج نسل مختلف دسته‌بندی کرد. پیریت‌های نسل اول به‌صورت هم‌زمان با مگنتیت‌ها تشکیل

مناسبی برای بررسی میان‌بارهای سیال موجود نیست. این کانی مانند مگنتیت‌ها در مرحله پس‌رونده اسکارن تشکیل شده است. بدیهی است مرحله پس‌رونده در یک زمان کوتاه شکل نگرفته است و کلسیت‌ها در زمانی بعد از مگنتیت تشکیل شده است.

با توجه به بررسی‌های صحرایی و نیز مقاطع میکروسکوپی، این کلسیت‌ها از نظر زمانی بعد از تشکیل کانسنگ مگنتیتی سراب ۳ بر محیط تحمیل شده‌اند^۱ و فضاها ریز و میکروشکستگی‌های کانسنگ مگنتیتی، سنگ اسکارن و حتی واحدهای سنگی میزبان را نیز پر کرده است. دماهای به‌دست آمده نیز تا حد زیادی بیانگر این مطلب است. در نمونه‌های مورد بررسی، مشخص شد که در بخش‌هایی مگنتیت به‌صورت ادخال‌هایی در داخل کلسیت به‌دام افتاده است. بررسی میان‌بارهای سیال موجود در کلسیت‌های سراب ۳، نشان از اهمیت این مرحله از کانه‌زایی در اسکارن‌ها دارد. در واقع شناخت ماهیت محلول‌های باقی‌مانده در این مرحله می‌تواند در تشخیص زمین‌شناسی کانسارها و گام‌های مختلف کانی‌سازی کاربرد داشته باشد.

بررسی میان‌بارهای سیال بر روی ۶ نمونه دوبرصیقل^۲ با کانی میزبان کلسیت انجام شد که در یک نمونه به‌علت ریز بودن میان‌بارهای سیال، برای بررسی، مناسب تشخیص داده نشد. به‌طور کلی از لحاظ شکل ظاهری، میان‌بارهای سیال در نمونه‌ها به ترتیب فراوانی شامل: الف) بلور منفی به پیروی از بلور کلسیت و ب) میان‌بارهای سیال با شکل‌های کشیده هستند.

میان‌بارهای سیال مورد بررسی در سراب ۳، بر طبق معیارهای رودر (Roedder, 1984) و شفرد و همکاران (Shepherd et al., 1985) به اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب طبقه‌بندی شده‌اند. این میان‌بارها شامل انواع ۱) دو فازی غنی از مایع، ۲) سه فازی متشکل از مایع آبگین+حباب بخار+هالیت، ۳) تک‌فاز مایع و ۴) تک‌فاز گاز هستند (شکل ۱۹). مؤلفه‌های دمایی بر روی میان‌بارهای سیال نوع ۱ و ۲ انجام شد.

شده‌اند (شکل‌های A-۱۶ و B، C و E). پیریت‌های نسل دوم به‌صورت ملنکویتی و بافت کلوفرم رخ داده‌اند (شکل B-۱۶). پیریت‌های نسل سوم به‌صورت رگه-رگچه‌ای مگنتیت-ها را قطع کرده است و در برخی جاها به‌دلیل تأثیر فرایندهای زمین‌ساختی خرد شده‌اند (شکل C-۱۶). پیریت‌های نسل چهارم به‌صورت ادخال‌هایی با برجستگی بالا در داخل پیروتیت دیده می‌شوند. پیریت‌های نسل پنجم همراه کلسیت به‌صورت رگه-رگچه‌ای در محیط کانسنگی و میزبان تزریق شده است (شکل‌های D-۱۶ و D-۱۷ و F). رخداد پیریت‌ها در سراب ۳ اغلب در ارتباط با کانسنگ مگنتیتی است و به‌دلیل در حال استخراج بودن معدن و به‌هم ریختگی شدید آن نمی‌توان پراکندگی آنها را کاملاً پی‌گیری و مشخص کرد.

کالکوپیریت: کالکوپیریت نیز مانند سایر سولفیدها در مرحله پس‌رونده اسکارن سراب ۳ تشکیل شده است. این کانی به مقدار بسیار کم به همراه کانسنگ مگنتیتی دیده می‌شود (شکل ۱۶-F). این کانی فضاها خالی پیریت، پیروتیت و مگنتیت را پر کرده است.

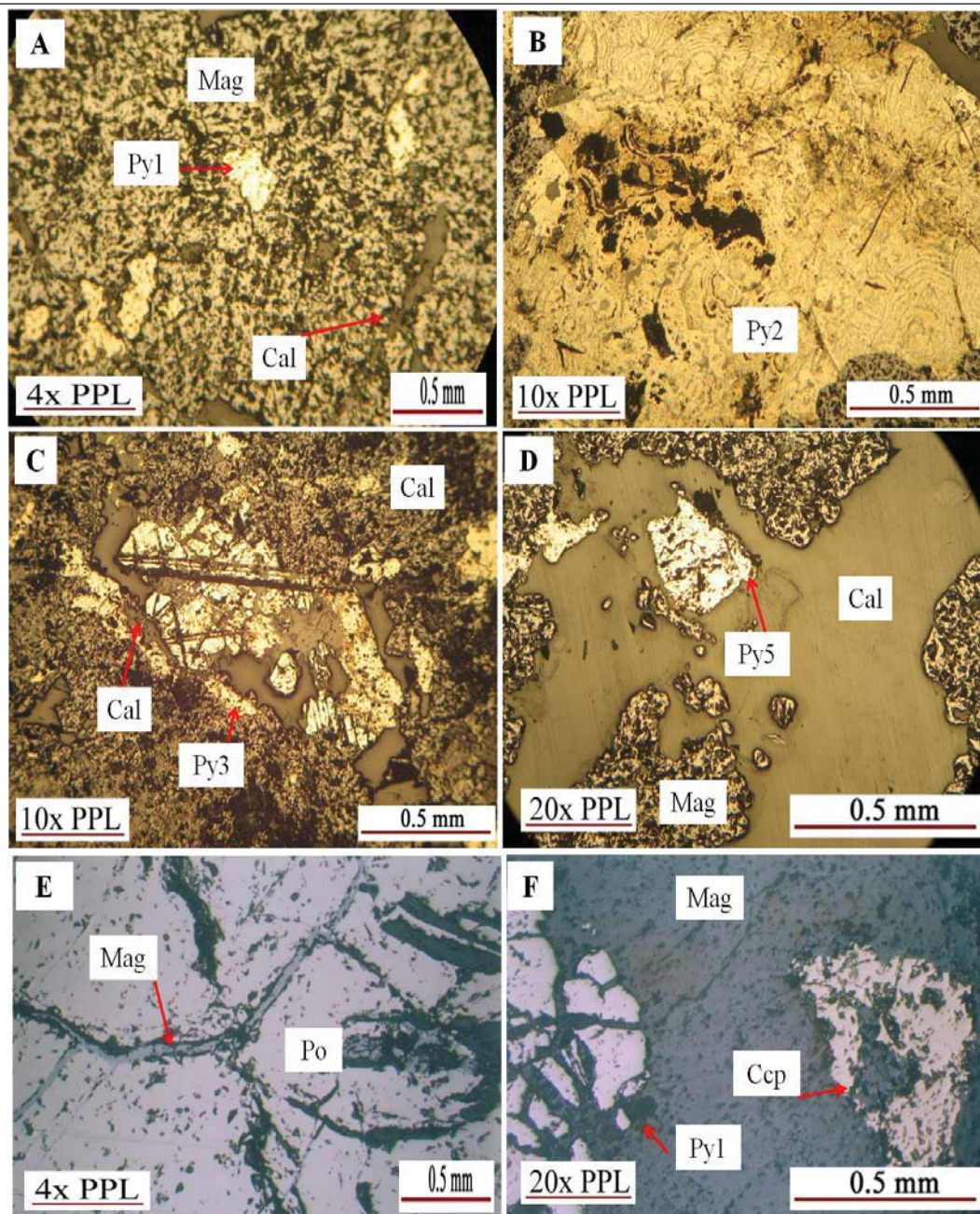
پس از تشکیل سیستم کانی‌سازی در سراب ۳ در اثر تأثیر فرایندهای سوپرژن تبدیل برخی سولفیدها (پیریت و پیروتیت) و کانسنگ‌های آهن به اکسید (هماتیت) و هیدروکسید (گوتیت و لیمونیت) صورت گرفته است. در شکل ۱۸، توالی همیافنی کانیایی در سراب ۳ نمایش داده شده است.

میان‌بارهای سیال

در فهم زمین‌شناسی و منشأ کانسارها، بررسی میان‌بارهای سیال نقش غیرقابل انکاری دارند؛ اما در صورتی می‌توان به نتایج بررسی‌ها متکی بود و نتایج ریزدماسنجی، سن سنجی و... حاصل از آن را به فرایندهای کانسنگ‌ساز تعمیم داد که ارتباط زایشی بین کانی میزبان میان‌بارهای سیال و کانسنگ اثبات شود. در کانسار آهن سراب ۳ به جز رگه-رگچه‌های کلسیتی، میزبان

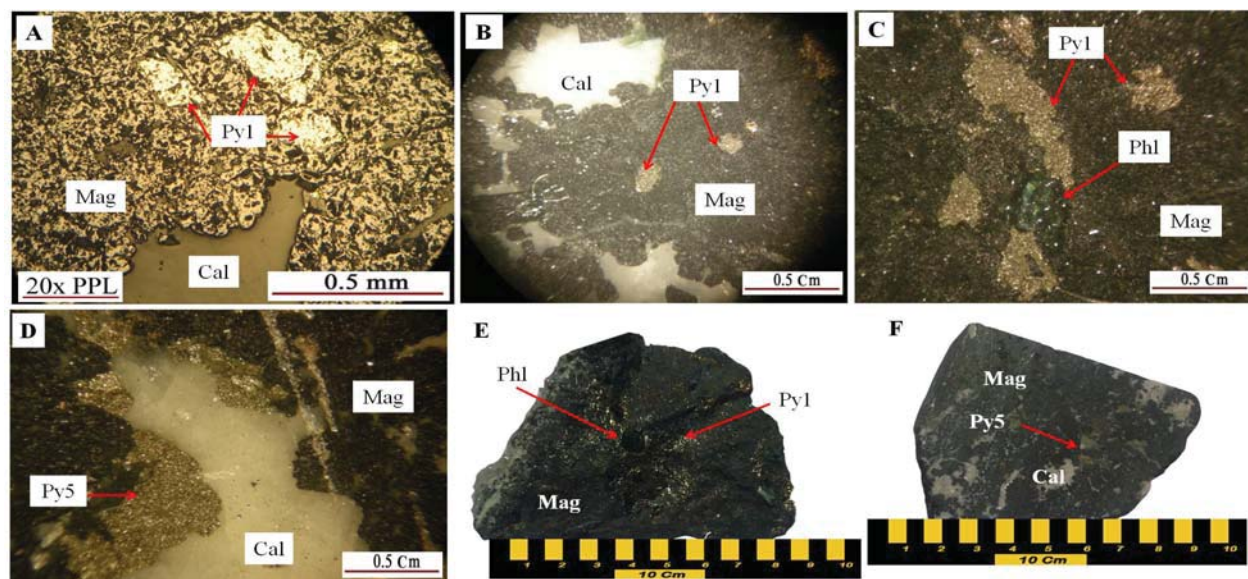
1. Overprinte

2. Doubly Polished Thin Sections



شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپی کانه‌های کانسار آهن سراب ۳. A: پیریت‌های نسل اول (Py1) در کنار مگنتیت، B: پیریت‌های ملنکویتی نسل دوم (Py2) با بافت کلوفرمی، C: پیریت‌های نسل سوم (Py3) که به دلیل تأثیر فرایندهای زمین‌ساختی خرد شده است، D: پیریت‌های نسل پنجم به همراه رگه کلسیتی، E: رگچه‌های مگنتیتی و F: کالکوپیریت و پیریت‌های نسل اول در کنار مگنتیت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Mag: مگنتیت، Cal: کلسیت، Py: پیریت، Po: پیروتیت، Ccp: کالکوپیریت).

Fig. 16. Photomicrographs of the ore minerals of Sarab 3 iron ore deposit. A: First generation pyrite (Py1) along with magnetite, B: Melnikovite pyrites of second generation (Py2) with the colloform texture, C: Third generation pyrites (Py3) that have been crushed due to the effect of tectonic processes, D: Fifth generation pyrites with calcite veins, E: Veinlets of magnetites, and F: Chalcopyrite and first-generation pyrites along with magnetite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Mag: Magnetite, Cal: Calcite, Py: Pyrite, Po: Pyrrhotite, Ccp: Chalcopyrite).



شکل ۱۷. A: تصویر میکروسکوپی از نمونه 92-Sb-407، پیریت‌های نسل اول در زمینه مگنتیتی و کلسیت‌ها به صورت رگچه‌ای در سنگ، B و C: تصویر میکروسکوپ بیناکولار از نمونه 92-Sb-406، پیریت‌های نسل اول به طور هم‌زمان با مگنتیت و فلوگوپیت، D: تصویر میکروسکوپ بیناکولار از نمونه 92-Sb-30، پیریت‌های نسل پنجم به همراه کلسیت در زمینه مگنتیتی، E: نمونه دستی از مگنتیت به همراه کلسیت و پیریت‌های نسل اول و F: نمونه دستی از مگنتیت به همراه کلسیت و پیریت‌های نسل پنجم. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Mag: مگنتیت، Py: پیریت، Phl: فلوگوپیت).

Fig. 17. A: Photomicrographs of 92-Sb-407 sample, first generation pyrites in the background of magnetite and calcite veinlet in the rock, B and C: Binocular photomicrographs of 92-Sb-406 sample, first generation pyrites coexist with magnetite and phlogopite, D: Binocular photomicrographs of 92-Sb-30 sample, 5th generation pyrites with calcite in the magnetite background, E: hand specimen of magnetite with phlogopite and first generation pyrites, and F: hand specimen of magnetite with calcite and 5th generation pyrites. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Mag: magnetite, Py: pyrite, Phl: phlogopite).

بخار+هالیت است (شکل ۱۹-A و B). مایع آبگین بیشتر حجم میان‌بار را تشکیل داده است (در حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد). در بیشتر موارد حباب بخار بزرگ‌تر از بلور نمک بوده و حجمی در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد از میان‌بارهای سیال را تشکیل داده است. میزان شوری هالیت از ۲۸ تا ۳۳ درصد وزنی NaCl در تغییر است. این نوع از میان‌بارهای سیال در نمونه Sb-92-26 مشاهده می‌شود. در میان‌بارهای سیال این نمونه (که دارای بیشترین میزان شوری در میان سایر نمونه است) فاز جامد هالیت مشاهده می‌شود که می‌توان دلایل زیر را برای این امر بیان داشت:

الف) این میان‌بارهای سیال مربوط به مرحله‌ای از کانه‌زایی بوده اند و در شرایط زمانی و عمقی محبوس شده‌اند که هنوز اختلاط

میان‌بارهای سیال نوع ۱ به صورت دو فاز غنی از مایع بوده یا به عبارت دیگر، متشکل از مایع آبگین و حباب بخار هستند (شکل ۱۹-A، B، C و D)، حباب بخار حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد حجم میان‌بار را اشغال کرده است در واقع درجه پرشدگی این نوع از میان‌بارها در حدود ۷۰ تا ۸۵ درصد است. میان‌بارهای غنی از مایع بیشتر به شکل‌های بلور منفی (به پیروی از کانی‌میزبان) و کشیده مشاهده می‌شوند. در میان‌بارهای سیال دوفازی هیدروهالیت نیز مشاهده شد. در میان‌بارهای سیال مورد بررسی، همگن شدن فاز بخار به فاز مایع رخ داد (V+L-L)، و هیچ‌گونه همگن شدن به فاز بخار در نمونه‌ها مشاهده نشد. میان‌بارهای سیال نوع ۲ و یا چند فاز متشکل از مایع آبگین+حباب

سیستماتیک و نظام‌مند نسبت‌های $KCl:CaCl_2$ را بررسی کرده‌اند. آنها تغییرات یادشده را بازتابی از منابع گوناگون سیال و میزان اختلاط ماگمایی با آب‌های فسیلی^۱ و جوی^۲ می‌دانند. به‌طور کلی آب‌های ماگمایی^۳ میزان KCl بالاتری دارند و سیالاتی هم که $CaCl_2$ زیاد دارند، بیشتر از سنگ‌های رسوبی دیواره تأثیر پذیرفته‌اند (Haynes and Kesler, 1988). آنجایی که در کانسار سراب^۳ میزان کانه زایی، سنگ آهک الیگوسن است و با توجه به میزان بالای $CaCl_2$ در این نمونه، می‌توان چنین فرایندی را برای آن در نظر گرفت.

با آب‌های جوی صورت‌نگرفته است، ب) فرایند جوشش موجب به‌دام افتادن مایعی با شوری بالا در این میان‌بارهای سیال شده است؛ زیرا اصولاً فرایند جوشش یک مایع با شوری متوسط را به دو فاز یکی بخار و دیگری مایع با شوری بالا تبدیل می‌کند (Roedder and Bodnar, 1980) و ج) احتمالاً این نوع از میان‌بارهای سیال در سایر نمونه‌ها نیز حضور داشته است؛ اما به دلیل ریز بودن و یا فراوانی کم آنها مشاهده نشده‌اند. هاینس و کسلر (Haynes and Kesler, 1988) در میان‌بارهای سیال اسکارن‌های گوناگون نوسانات و تغییرات

	Minerals	Prograde – isochemical contact metamorphism	Prograde – metasomatism and replacement	Retrograde – meteoric fluid influx and main metal precipitation	Supergene/ Weathering
Ore	Magnetite			██████████	
	Hematite			██████████	
	Pyrite			██████████	
	Chalcopyrite			██████████	
	Pyrrhotite			██████████	
	Phologopite		██████████		
Gangue	Amphibole		██████████		
	Clinopyroxene		██████████		
	Chlorite			██████████	
	Epidote			██████████	
	Talc		██████████		
	Serpentine			██████████	
	Calcite			██████████	
	Actinolite-Tremolite		██████████		
	Fe Hydroxide				██████████

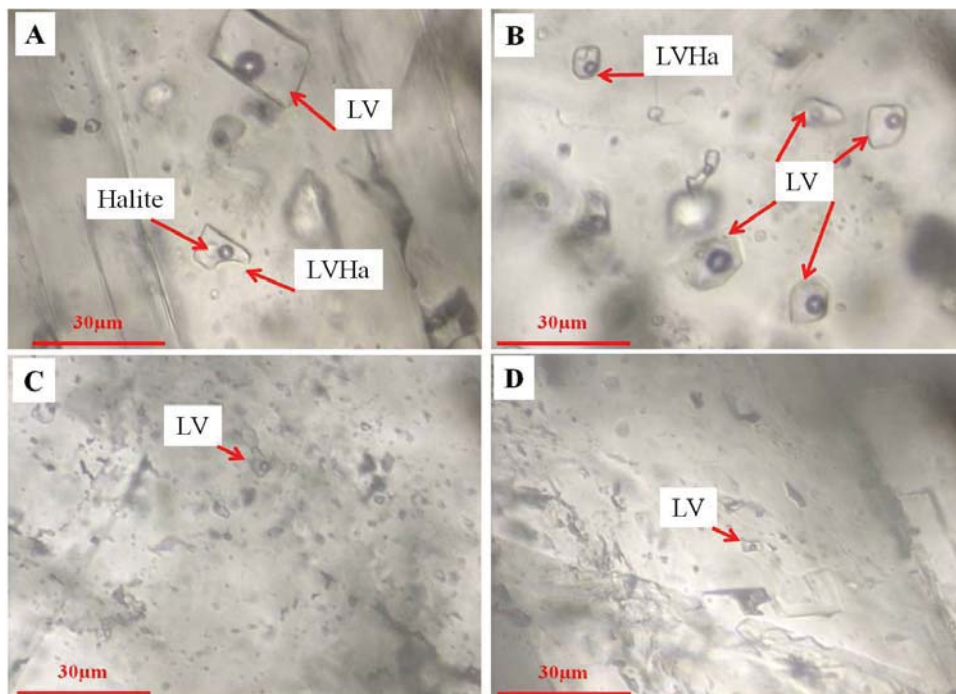
شکل ۱۸. توالی همیافتی کانی‌ها در کانسار سراب^۳

Fig. 18. Mineral paragenetic sequence for the Sarab 3 ore deposit

یک سیال درگیر دیده شده‌اند (جدول‌های ۱ و ۲). در جدول‌های ۱ و ۲، اطلاعات ریز دماسنجی میان‌بارهای سیال مورد بررسی در کانسار آهن سراب^۳ آمده است. در نمونه‌های مورد بررسی، درصد شوری (شکل ۲۱) بر اساس جدول‌ها و فرمول‌های ارائه‌شده توسط بودنار و ویتک (Bodnar and Vityk, 1994) محاسبه شده است.

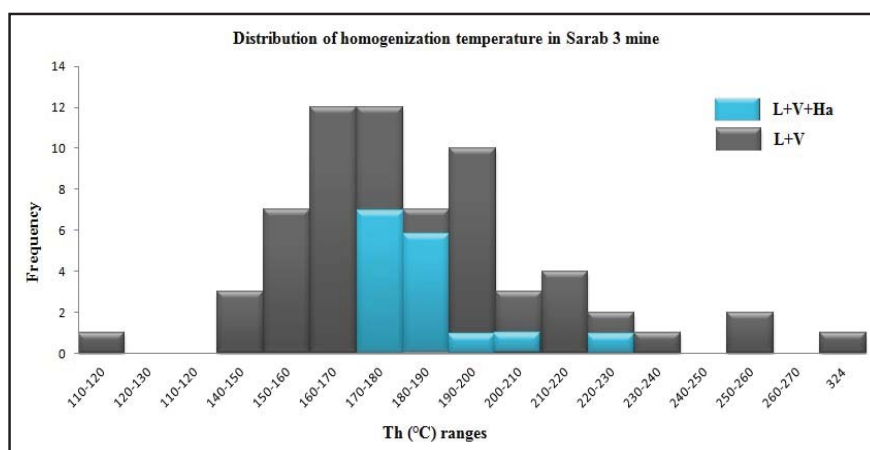
بیشترین میزان فراوانی دمای همگن‌شدن مربوط به دامنه دمایی ۱۵۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد است که به‌صورت یک قله در نمودار مشخص است (شکل ۲۰). اما باید توجه داشت که گستره اصلی دمای همگن‌شدن در فاصله دمایی ۱۴۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. با توجه به داده‌های دمای همگن‌شدن، حداقل و حداکثر دمای همگن‌شدن محاسبه‌شده در نمونه‌ها به ترتیب ۱۱۵ و ۳۲۴ درجه سانتی‌گراد است که هرکدام فقط در

1. Connate water
2. Meteoric water
3. Magmatic water



شکل ۱۹. تصاویر میان‌بارهای سیال موجود در کانی کلسیت کانسار آهن سراب ۳، A: میان‌بار سیال غنی از مایع (LV) و میان‌بار سیال سه فازی (LVHa) متشکل از فاز مایع (L)، فاز گاز (V) و هالیت (Ha)، نمونه شماره Sb-92-26، B: میان‌بارهای سیال غنی از مایع و چند فازی، نمونه شماره Sb-92-26، C: میان‌بار سیال دو فازی (LV) متشکل از فاز گاز (V) و فاز مایع (L)، نمونه شماره Sb-92-411 و D: میان‌بار سیال دوفازی غنی از مایع (LV)، نمونه شماره Sb-92-418

Fig. 19. Photographs of fluid inclusions in calcite mineral at Sarab 3 iron ore deposit, A: Liquid rich fluid inclusion (LV) and the three phase fluid inclusion (LVHa) involving liquid phase (L), gas phase (V) and halite (Ha), sample No. Sb-92-26, B: Rich of liquid and multiphase fluid inclusion, Sample No. Sb-92-26, C: Two phase fluid inclusion (LV) consisting of a gas phase (V) and liquid phase (L), sample No. Sb-92-411, and D: Two phase fluid inclusion rich of liquid (LV), sample No. Sb-92-418



شکل ۲۰. نمودار فراوانی دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال در کانسار آهن سراب ۳

Fig. 20. Homogenization temperature frequency diagram of the fluid inclusions at Sarab 3 iron ore deposit

جدول ۱. اطلاعات ریز دماسنجی میان بارهای سیال موجود در کانی کلسیت در کانسار آهن سراب ۳. علائم اختصاری: L: مایع آبگین، V: حباب گاز، nv: غیر قابل مشاهده، Te: نقطه یوتکتیک (اولین نقطه ذوب یخ)، Tmice: آخرین نقطه ذوب یخ، Thv-l: همگن شدن نهایی به فاز مایع

Table 1. Microthermometric data of fluid inclusions in calcite mineral at Sarab 3 iron ore deposit (L=Liquid, V=Vapour, nv=not visible, Te=T eutectic, Tmice=T melting (final) of ice, Thv-l=Temperature of homogenization to liquid)

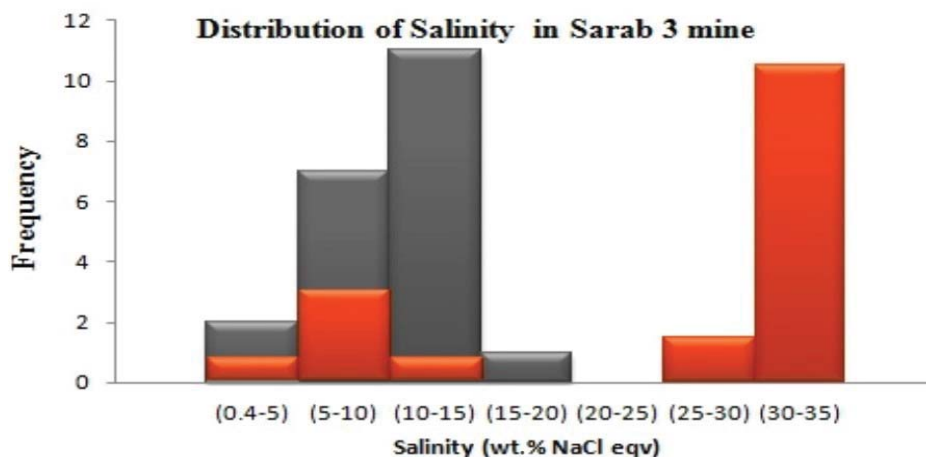
Sample	Size(μm)	Type	Te (°C)	Tmice (°C)	wt.% NaCl	Thv-l (°C)	Sample	Size(μm)	Type	Te (°C)	Tmice (°C)	wt.% NaCl	Thv-l (°C)
Sb-92-418	6	L+V	nv	-9.8	13.79	260	Sb-92-416	6	L+V	nv	nv	-	170
	6	L+V	nv	-6.5	10.05	260		5	L+V	nv	nv	-	164
	5	L+V	nv	nv	-	324		6	L+V	nv	nv	-	191
	6	L+V	nv	nv	-	151		5	L+V	nv	-2.4	4.07	162
	6	L+V	nv	nv	-	160		5	L+V	nv	nv	-	169
	5	L+V	nv	nv	-	160		10	L+V	nv	nv	-	170
	8	L+V	nv	nv	-	192		12	L+V	nv	nv	-	160
	7	L+V	nv	nv	-	200		20	L+V	nv	nv	-	191
	6	L+V	nv	-10.8	14.79	190		10	L+V	nv	nv	-	212
	7	L+V	nv	-10.8	14.79	172		7	L+V	nv	nv	-	224
	9	L+V	nv	-10.5	14.49	175		10	L+V	nv	nv	-	180
Sb-92-411	7	L+V	nv	nv	-	190	12	L+V	nv	nv	-	196	
	6	L+V	nv	nv	-	170	14	L+V	nv	nv	-	200	
	5	L+V	nv	nv	-	173	15	L+V	nv	nv	-	184	
	5	L+V	nv	-0.4	0.4	168	10	L+V	nv	nv	-	180	
	5	L+V	nv	nv	-	180	12	L+V	nv	nv	-	172	
	6	L+V	nv	nv	-	155	15	L+V	nv	nv	-	174	
Sb-92-419	6	L+V	nv	nv	-	162	Sb-92-26	14	L+V	nv	-7.1	10.79	203
	10	L+V	nv	nv	-	198		8	L+V	nv	-9	12.95	194
	5	L+V	nv	nv	-	161		16	L+V	nv	-5	8.07	194
	5	L+V	nv	nv	-	164		8	L+V	nv	-7	10.67	203
Sb-92-412	7	L+V	nv	nv	-	115	8	L+V	nv	-7	10.67	208	
	7	L+V	nv	nv	-	170	8	L+V	nv	-5.5	8.75	178	
	7	L+V	nv	-13	16.82	156	12	L+V	nv	-5	8.07	199	
	7	L+V	nv	nv	-	187	10	L+V	nv	-5.2	8.35	193	
	12	L+V	nv	nv	-	178	8	L+V	nv	-6.5	10.05	190	
	6	L+V	nv	nv	-	150	17	L+V	nv	-5	8.07	190	
	7	L+V	nv	nv	-	165	14	L+V	nv	-7	10.67	211	
						12	L+V	nv	-5.5	8.75	219		
						20	L+V	nv	-5.5	8.75	220		

جدول ۲. اطلاعات ریز دماسنجی میان‌بارهای سیال در کانی کلسیت در نمونه شماره Sb-92-26. علائم اختصاری: L: مایع آبگین، V: حباب گاز، nv: غیرقابل مشاهده، Ha: هالیت، Te: نقطه یوتکتیک (اولین نقطه ذوب یخ)، Tmice: آخرین نقطه ذوب یخ، Thv-l: همگن شدن نهایی به فاز مایع، Tmhh: دمای انحلال هیدروهالیت

Table 2. Microthermometric data of fluid inclusions in calcite mineral in sample No. Sb-92-26 (L=Liquid, V=Vapour, Ha=Halite, nv=not visible, Tmhh=Temperature of homogenization of hydro-halite, Te=T eutectic, Tmice=T melting (final) of ice, Thv-l=Temperature of homogenization to liquid)

Size(μm)	Type	Te ($^{\circ}\text{C}$)	wt.% NaCl	Thv-l ($^{\circ}\text{C}$)	Tmhh ($^{\circ}\text{C}$)	Tmice ($^{\circ}\text{C}$)	wt.% CaCl ₂	wt.% NaCl/(NaCl+CaCl ₂)	wt.% NaCl+CaCl ₂
12	L+V	-68	7.1	155	-29.4	-21.2	14.7	0.3	21.8
12	L+V	-52	7.4	140	-29	-20.8	14.2	0.3	21.6
20	L+V	-52	7.7	176	-29	-20.2	14.8	0.3	22.4
20	L+V	-52	6.8	177	-27.8	-13.6	10.3	0.4	17.0
26	L+V	-45	1.8	233	-28.7	-2.7	3.3	0.4	5.0

Size(μm)	Type	Th Halite	wt.% NaCl	Thv-l ($^{\circ}\text{C}$)	Size(μm)	Type	Th Halite	wt.% NaCl	Thv-l ($^{\circ}\text{C}$)
10	L+V+Ha	170	30.5	185	15	L+V+Ha	130	29.37	182
12	L+V+Ha	157	30.1	181	15	L+V+Ha	173	30.6	199
8	L+V+Ha	83	28.26	176	20	L+V+Ha	210	31.98	208
10	L+V+Ha	156	30.07	188	12	L+V+Ha	208	31.89	175
12	L+V+Ha	165	30.34	185	16	L+V+Ha	240	33.39	229
10	L+V+Ha	171	30.53	182	16	L+V+Ha	230	32.89	175
8	L+V+Ha	165	30.34	174	12	L+V+Ha	228	32.79	180
7	L+V+Ha	155	30.04	172	36	L+V+Ha	235	33.14	179



شکل ۲۱. هیستوگرام شوری میان‌بارهای سیال در کانسار آهن سراب ۳

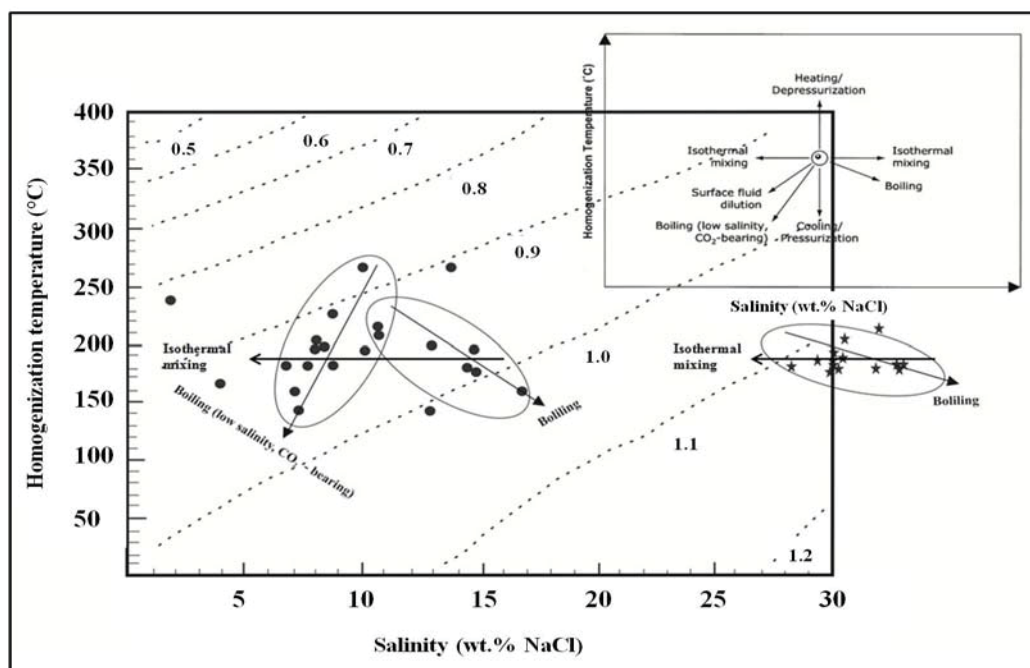
Fig. 21. Salinity histogram of fluid inclusion at Sarab 3 iron ore deposit

تفسیر داده‌های میان‌بارهای سیال

شواهد صحرایی و سایر بررسی‌های زمین‌شناسی در کانسار آهن سراب ۳ (کانی‌شناسی، دگرسانی‌ها، بررسی‌های ایزوتوپ‌های گوگرد) نشان‌دهنده کانی‌سازی به صورت اسکارن است؛ اما چنان‌که در نمودار بالا مشخص است، بیشتر میان‌بارهای سیال دامنه پایینی از دما را نشان می‌دهند (شکل ۲۰). اما باید بیان داشت که در سراب ۳، سیالات ماگمایی و جوی در کانی‌سازی نقش داشته‌اند و در مرحله پس‌رونده که اختلاط این دو سیال صورت گرفته، ته‌نشینی کانسنک مگنتیتی و هماتیتی صورت گرفته است. کاهش دمای سیال ماگمایی اولیه در اثر اختلاط با سیالات جوی از عوامل ته‌نشینی کانسنک در سراب ۳ بوده است که نمود این کاهش دما در بررسی میان‌بارهای سیال مشخص است.

تغییرات چگالی به‌ویژه با توجه به سازوکارهای جریان سیال و تکامل تغییرات در چگالی سیال به‌خصوص در سیستم‌هایی که می‌توانند وقفه‌هایی در فرایند جریان سیال ایجاد کنند، مهم است.

نمودار مفید برای این کار، نمودار دوتایی دمای همگن شدن-شوری است که در آن خطوط کنتوری با چگالی ثابت رسم شده و توسط ویلکینسون (Wilkinson, 2001) ارائه شده است (شکل ۲۲). بر این اساس چگالی سیال کانه‌ساز تحول یافته در کانسار سراب ۳، در دو دامنه متفاوت قرار می‌گیرد که غالب نمونه‌ها دارای چگالی ۰/۹ تا 1 gr/cm^3 هستند و می‌توان آن را معادل چگالی آب در نظر گرفت. میان‌بارهای سیال مربوط به نمونه شماره 92-Sb-026 که دارای چگالی بیشتر از سایر نمونه‌هاست ($> 1/1 \text{ g/cm}^3$) از بقیه نمونه‌ها اندکی بیشتر است. چنان‌که در نمودار شکل ۲۲ مشخص است، سه دسته سیال با شوری متفاوت در کانسار سراب ۳ نقش داشته‌اند. دو دسته از آنها از نظر شوری به هم نزدیک‌ترند و دارای شوری کم تا متوسط هستند (0.4-20 wt.% NaCl equiv) و در سمت چپ نمودار بالا دیده می‌شوند و دسته دیگر دارای شوری بالاتری (25-35 wt.% NaCl equiv) هستند.



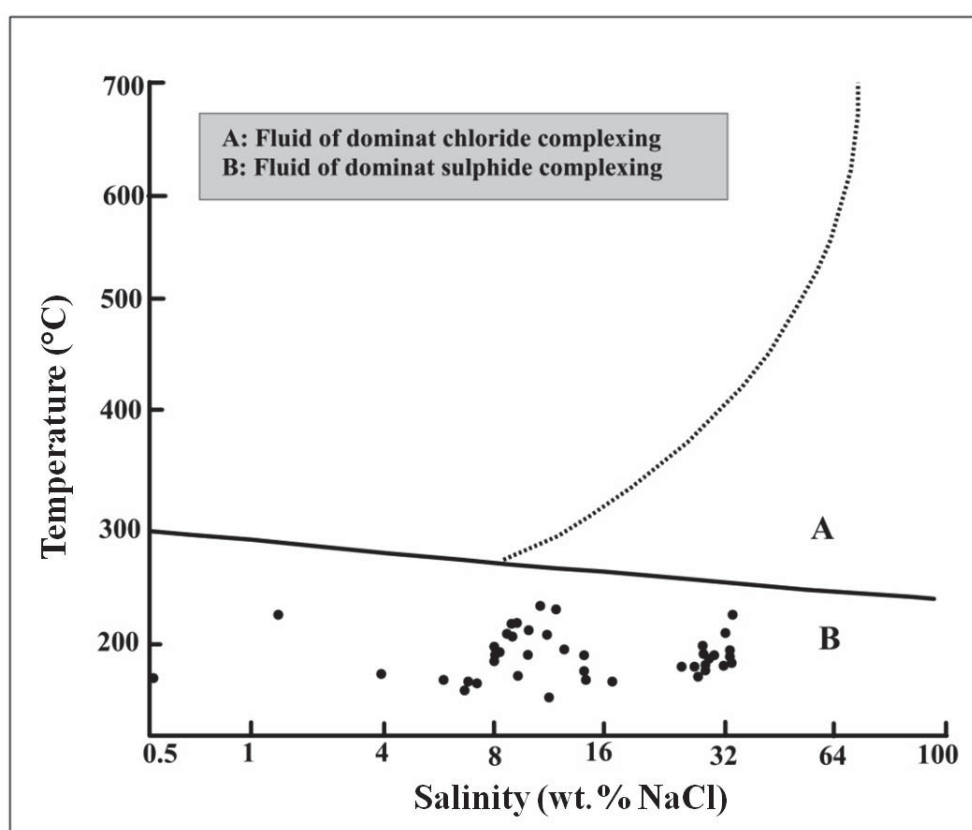
شکل ۲۲. نمودار شوری-دمای همگن شدن به منظور محاسبه چگالی (Wilkinson, 2001) در معدن آهن سراب ۳. همگی میان‌بارهای سیال در این نمودار در میزان کلسیتی بوده و دارای روند جوش هستند.

Fig. 22. Diagram of salinity-homogenization temperature to determine the density (Wilkinson, 2001) in Sarab 3 iron mine. All of the fluid inclusions in this diagram are in calcite host and have boiling process.

دمای همگن شدن در مقابل شوری متوسط که توسط پیراینو (Pirajno, 2009) ارائه شده است، استفاده شد (شکل ۲۳). اطلاعات کانسار آهن سراب ۳، بر اساس این نمودار در محدوده مربوط به کمپلکس بی سولفیدی قرار می‌گیرد و می‌توان نتیجه گرفت که آنیون غالب در این کانسار SO_4^{2-} یا HS^- بوده است. وجود کانی‌های سولفیدی مانند پیریت، پیروتیت و کالکوپیریت در این کانسار شاهی بر این ادعاست.

در روند‌های مشخص شده بر روی نمودار، فرایند جوشش را برای سیالات در کانسار سراب ۳ ثابت می‌کنند. پدیده جوشش موجب به‌دام افتادن میان‌بارهای سیال با نسبت‌های فازی مختلف می‌شود (Kerkhof and Hein, 2001). از شواهد جوشش در سراب ۳، وجود کلسیت‌های تیغه‌ای و وجود فاز مایع و بخار در کنار هم در میان‌بارهای سیال است.

برای شناسایی کمپلکس‌های غالب در حمل فلزات از نمودار



شکل ۲۳. نمودار دمای همگن شدن-شوری برای تعیین کمپلکس فلزی (Pirajno, 2009) در معدن آهن سراب ۳

Fig. 23. Homogenization temperature- salinity diagram to determine metal complex (Pirajno, 2009) in Sarab 3 iron mine

شد که فراوان‌ترین کانی سولفیدی موجود، پیریت است و آنالیز ایزوتوپی گوگرد نیز بر روی آنها انجام شد. بعد از پیریت، پیروتیت فراوان‌ترین کانی سولفیدی است. همچنین مقادیر اندکی از سایر کانی‌های سولفیدی مانند کالکوپیریت نیز در

بررسی ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد

تعداد پنج نمونه سولفیدی از پیت استخراجی معدن آهن سراب ۳، انتخاب شد. نوع و نسل‌های مختلف سولفیدها مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی سولفیدهای کانسار سراب ۳، مشخص

شده‌اند و یا احتمالاً طی واکنش‌های اکسیداسیون-احیا محلی و یا خنثی شدن محلول‌های گرمایی در همبندی با مرمر رسوب سولفیدها (پیریت‌های نسل پنجم) رخ داده است. نسبت ایزوتوپی گوگرد پنج نمونه برداشت‌شده، در آزمایشگاه ایزوتوپی دانشگاه کوئینز کانادا اندازه‌گیری شد. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ این نمونه‌ها نسبت به استاندارد CDT در جدول ۳ نشان داده شده است. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ سیالات کانی‌ساز از عامل تفکیک Pyrite- H_2S (Ohmoto and Rey, 1979) محاسبه شده است، با این فرض که H_2S مهم‌ترین ترکیب گوگرد در سیال کانی‌سازی است.

سراب ۳ مشاهده می‌شود. هنگام آماده‌سازی نمونه‌ها فقط پیریت جداسازی شد و مورد تجزیه ایزوتوپی قرار گرفت. پیریت‌زایی کانسار آهن سراب ۳، شامل پنج مرحله است؛ اما بر اساس نتایج این پژوهش تمامی نسل‌های یادشده قابل تشخیص، تفکیک و جداسازی نیستند. لذا در این پژوهش فقط از پیریت‌های نسل اول و پنجم (آخرین نسل پیریت) آنالیز ایزوتوپی انجام شد. درباره تشکیل پیریت‌های نسل پنجم، این گونه می‌توان بیان داشت که در اثر فازهای پس‌رونده اسکارنی که در پی آن فوگاسیته گوگرد افزایش یافته است، این نسل از پیریت‌ها تشکیل

جدول ۳. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ (نسبت به CDT) در پیریت‌های موجود در کانسنگ مگنتیتی کانسار آهن سراب ۳

Table 3. The values of $\delta^{34}\text{S}$ (relative to CDT) in pyrites contained in magnetite ore of Sarab 3 iron ore deposit

Sample ID	Mineral	$\delta^{34}\text{S}$ ‰ VCDT	Th($^{\circ}\text{C}$) Fluid inclusion	$\delta^{34}\text{S}$ $\text{H}_2\text{S}\%$
Sb-92-405	Pyrite (Stage I+ Stage V)	3.6	162-191	1.5-1.7
Sb-92-406	Pyrite (Stage I)	3	151-324	0.8-1.9
Sb-92-407	Pyrite (Stage I)	3	151-324	0.8-1.9
Sb-92-30	Pyrite (Stage V)	3.2	155-180	1-1.3
Sb-92-412	Pyrite (Stage V)	3.4	150-187	1.2-1.5

با آن دسته از توده‌های نفوذی دارند که در عمق کمی از سطح زمین جایگزین شده‌اند (Maanijou, 2007). این کانسارها در سامانه‌های گرمایی حاصل از سرد شدن و پیشرفت تبلور ماگما تحول یافته‌اند (Hoefs, 2004).

به‌طور تجربی ثابت شده است که سولفیدهای درون‌زادی که در هشته‌های گرمایی ماگمایی شکل گرفته‌اند و یا حتی سولفیدهای موجود در یک ناحیه معدنی به‌ندرت تغییر ترکیبی بیشتر از ± 5 در هزار را نشان می‌دهند و در بیشتر موارد این تغییرات کمتر از مقدار ذکر شده است (Barnes, 1997). با توجه به آنکه $\delta^{34}\text{S}$ سولفیدهای حاصل از کانسار سراب ۳ دارای تغییر ترکیبی کمتر از ± 5 در هزار است (شکل ۲۴)؛ بنابراین شاید مناسب باشد که همه آنها را به هیدروترمال با منشأ ماگمایی نسبت داد. همچنین فاور و منسینگ (Faure and

تفسیر داده‌های ایزوتوپ پایدار گوگرد

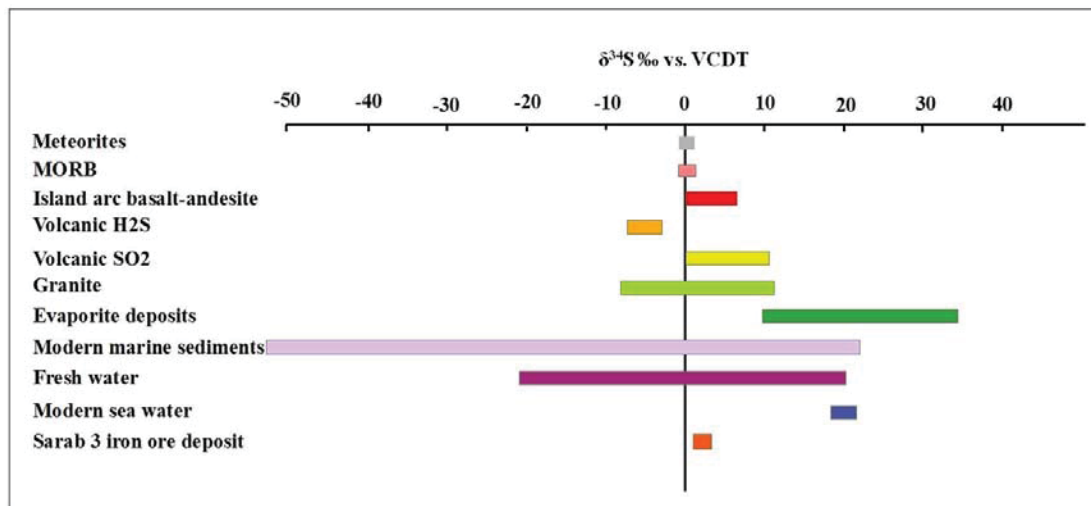
دو عامل مهم تغییرات مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ ، شامل تأثیر مقادیر ایزوتوپی گوگرد منبع و دیگری تأثیر فرایندهای ایجادکننده تفکیک ایزوتوپی است. گیلن و همکاران (Gehlen et al., 1983) نشان دادند که مقادیر ایزوتوپی اولیه در کانی‌هایی که تحت شرایط دگرگونی دمای 670°C درجه سانتی‌گراد و 5kb فشار قرار گرفته‌اند، باقی می‌ماند. همچنین بررسی رفتار ایزوتوپ‌های گوگرد در حین دگرگونی ناحیه‌ای نشان می‌دهد که توزیع مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در تمام انواع سنگ‌های دگرگونی، تحت تأثیر علائم ایزوتوپی سنگ مادر آنها قرار گرفته است. بنابراین حفظ و نگهداری الگوی تفکیک ایزوتوپی اولیه قانون غالب است. کانسارهای ماگمایی گرمایی (برای مثال کانسارهای نوع پورفیری و اسکارن‌ها) از نظر زمانی و مکانی، همبستگی نزدیک

الیگومیوسن نفوذ کرده است که خود این موضوع می‌تواند انحراف اندک مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ از صفر را برای کانسار سراب ۳ توضیح دهد.

در فاز نمودار پیریت-پیرویت-مگنتیت (Kishima, 1989)، بر اساس تغییرات $f\text{O}_2$ و $f\text{S}_2$ ، محدوده تشکیل این کانی‌ها مشخص بوده و بنابراین می‌توان در اثر تغییرات $f\text{O}_2$ و $f\text{S}_2$ در اسکارن پیریت و مگنتیت را در کنار هم دید.

درخصوص نمونه‌های دارای پیریت نسل آخر (پنجم) می‌توان بیان داشت که این پیریت‌ها هم‌زمان با مرحله پس‌رو اسکارن و نیز همراه با کلسیت تشکیل شده‌اند؛ اما اندازه‌گیری‌های ایزوتوپی نشان‌دهنده این است که هر دو نسل پیریت موجود در کانسنگ مگنتیتی دارای مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ بسیار نزدیک به هم هستند و بر این دلالت دارد که در طول تحول سیال کانه‌ساز مگنتیتی، تفکیک ایزوتوپی در آن صورت نگرفته است و یا مقادیر تفکیک بسیار اندک بوده است.

(Mensing, 2005) چنین بیان می‌کنند که ترکیب ایزوتوپی نزدیک به صفر و یا تغییرات اندک نسبت به این مقدار در برخی کانسارها نشان‌دهنده گوگرد با منشأ ماگمایی است. با توجه به این نظریه می‌توان گفت که مقادیر نزدیک به صفر در سراب ۳ بیانگر آن است که گوگرد، منشأ ماگمایی دارد و سیال هیدروترمال گوگرد خود را از سنگ‌های ماگمایی تأمین کرده است و به این ترتیب بخشی از خود سیال نیز منشأ ماگمایی دارد. در خصوص انحراف $\delta^{34}\text{S}$ کانسارهای ماگمایی از ترکیب ایزوتوپی گوگرد مذاب‌های گوشته‌ای که انتظار می‌رود نزدیک به صفر باشد، این پدیده را اغلب به جذب یا هضم گوگرد از سنگ‌های دیواره نسبت داده‌اند که ممکن است به صورت سولفید یا سولفات وجود داشته باشند (Hoefs, 2004). در سراب ۳ نیز توده‌های دیوریتی-گرانودیوریتی و گرانیتی مربوط به میوسن بالایی در داخل سنگ‌های مربوط به کرتاسه (واحد‌های KMv, KmsH) و آهک و دولومیت‌های



شکل ۲۴. موقعیت ترکیب ایزوتوپی $\delta^{34}\text{S}$ کانسار سراب ۳ نسبت به محدوده‌های ایزوتوپی گوگرد در سیستم‌های زمین‌شناسی (Rollinson, 1995) در معدن آهن سراب ۳

Fig. 24. Range of $\delta^{34}\text{S}$ isotopic composition of the Sarab 3 ore deposit relative to the sulfur isotopic ranges in geological systems (Rollinson, 1995) in Sarab 3 iron mine

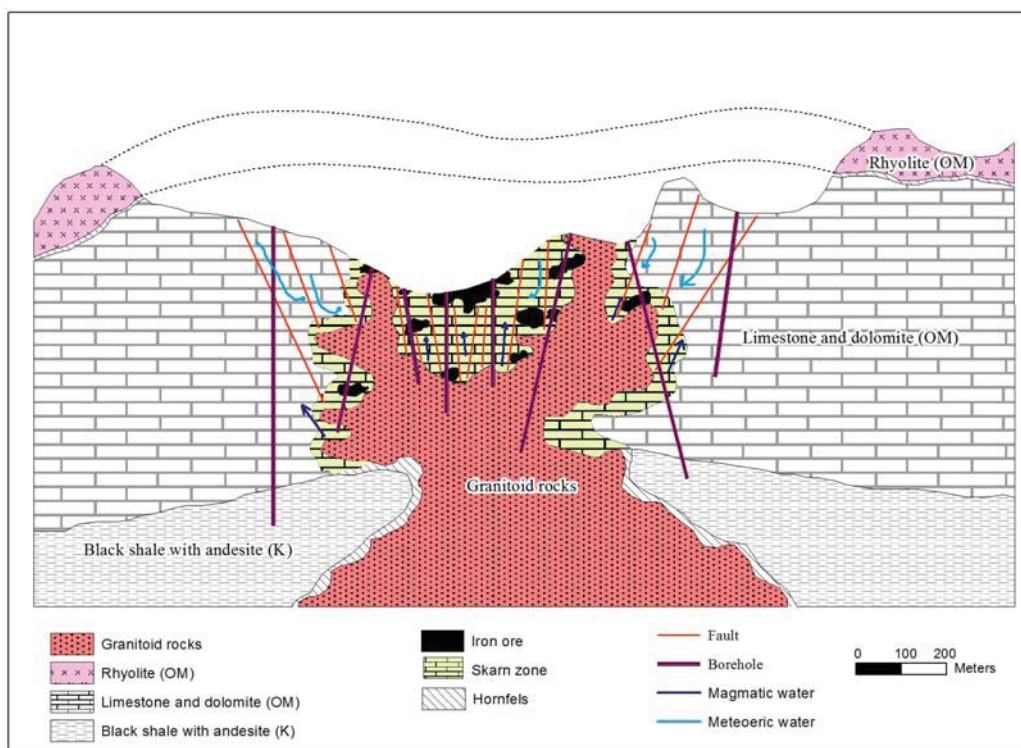
سیستم کانی‌سازی سراب ۳ ترسیم شد که در شکل ۲۵ ارائه شده است. این مدل کاملاً شماتیک است. در سراب ۳، قدیمی‌ترین

مدل کانی‌سازی در سراب ۳

با توجه به تمامی موارد بحث‌شده بالا، یک مدل شماتیک از

هورنفلسی شدن رخ داده است. تأثیر سیالات جوی و ماگمایی در هشته شدن کانسنگ آهن در این شکل نمایش داده شده است. ساختارها مسیری مناسب برای حرکت سیالات یادشده فراهم کرده‌اند.

واحد زمین‌شناسی، واحد شیلی و آندزیت‌های کرتاسه است. واحد آتشفشانی ریولیتی الیگوسن بر روی آهک‌های سازند قم قرار گرفته‌اند. در اثر جای‌گیری توده‌های نفوذی در آهک و دولومیت‌های سازند قم، کانی‌سازی آهن اسکارنی رخ داده است. در حاشیه توده‌های نفوذی، اسکارنی‌شدن و نیز



شکل ۲۵. مدل شماتیکی تشکیل کانسار آهن سراب ۳

Fig. 25. Schematic model for generation of the Sarab 3 iron ore deposit

رگچه‌ای موجود در کانسار سراب ۳ نیز محصول مرحله پس‌رونده است. طی مرحله دگرسانی پس‌رونده تأثیر سیال باقی‌مانده از سیال کانه‌ساز بر روی سنگ‌های اسکارنی و هورنفلس‌های مجاور، موجب آزاد شدن کلسیم از سنگ اسکارنی و انتقال مواد فرار به آن شده است. در این مرحله سیال یادشده عقیم بوده و درجه حرارت و شوری پایین‌تری از حالت اولیه خود داشته است. در نتیجه واکنش‌های پس‌رونده، جای‌گزینی کانی‌های کالک سیلیکاته پر کلسیم با مجموعه‌ای از

نتیجه‌گیری

جای‌گیری توده‌های نفوذی دیوریتی-گرانودیوریتی و گرانیتی در آهک‌های الیگوسن سازند قم موجب ایجاد کانی‌سازی آهن اسکارنی سراب ۳ شده است. در این کانسار تشکیل کانسنگ مگنتیتی-هماتیتی در مرحله پس‌رونده و هم‌زمان با اختلاط آب‌های ماگمایی و جوی صورت گرفته است. در این مرحله سولفیدزایی نیز به شکل افشان و رگچه‌ای شامل کانی‌های پیریت، پیرویت و کالکوپیریت اتفاق افتاده است. کلسیت‌های

ایجاد شده است. همچنین مقدار $\delta^{34}\text{S}$ سیالی که در تعادل با سولفیدهای سراب ۳ بوده است، مقدار نزدیک به صفر دارد (۸/۹-۰/۱ در هزار). لذا می‌توان استنباط کرد که سیالی که موجب کانه‌زایی در سراب ۳ شده است، سیالی در ارتباط با ماگما و یا فرایندهای ماگمایی بوده است.

قدردانی

نویسندگان از شرکت کیمیا معادن سپاهان به‌خاطر همکاری در این پژوهش، از خانم آقاجانی به‌خاطر بررسی دقیق میان‌بارهای سیال و از آقای دکتر کورت کایزر از دانشگاه کوئینز کانادا به‌خاطر اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد قدردانی می‌کنند.

کانی‌های با کلسیم پایین تر رخ می‌دهد. همچنین مقادیری از کلسیم‌های حل شده با یون کربنات موجود در سیال ترکیب شده و به‌صورت کلسیت در داخل گسله‌ها و میکروشکستگی‌ها رخ داده است. میان‌بارهای سیال با ارائه تغییرات دما و شوری در سیستم‌های اسکارنی، شواهد مستقیمی از رخدادهای پیش‌رو و پس‌رو آشکار می‌کنند. بررسی میان‌بارهای سیال در سراب ۳ نشان داد که سیال سازنده آنها مربوط به بخش‌های انتهایی مرحله پس‌رونده بوده و دارای شوری و دمای پایین تری هستند. بررسی ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد در سراب ۳ نشان داد که مقدار $\delta^{34}\text{S}$ کانی‌های سولفیدی در این ذخیره دارای دامنه ۳ تا ۳/۶ در هزار است و گوگرد ممکن است از یکی از این دو منبع حاصل شده باشد: یا به‌طور مستقیم از تفریق بخشی سیال ماگمایی و یا به‌واسطه انحلال و آب‌شویی منابع آذرین سولفیددار پیشین

References

- Azizi, H., 1992. Petrography and petrogenesis of Shahrak iron ore deposit (Takab). M.Sc. Thesis, Isfahan University, Isfahan, Iran, 148 pp. (in Persian with English abstract)
- Azizi Shotur Khoft, H., 2003. Petrogenesis of contact metamorphic rocks and associated iron skarn in Shahrak area, east of Takab. M.Sc. Thesis, Tehran University, Tehran, Iran, 134 pp. (in Persian with English abstract)
- Barati, M., 2008. Comparative study how to form iron in parts of Hamedan-Kermanshah-Kurdistan provinces. Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 147 pp. (in Persian with English abstract)
- Barnes, H.L., 1997. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. Wiley, New York, 797 pp.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian Journal of Earth Sciences, 18(11): 210-265.
- Bodnar, R.J. and Vityk, M.O., 1994. Interpretation of micro thermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. In: B. De Vivo and M.I. Frezzotti, (Editors), Fluid inclusions in Minerals, Methods and Applications. Virginia Polytechnic Institute and State University Press, Blacksburg, Virginia, pp.117-130.
- Calagari, A.A. and Hosseinzadeh, G., 2006. The Mineralogy of copper-bearing skarn to the east of the SungunChayriver, East-Azarbaigan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 28(4-6): 423-438.
- Dupuis, C. and Beaudoin, G., 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. Mineralium Deposita, 46(4): 319-335.
- Einaudi, M., Meinert, L.D. and Newberry, R.J., 1981. Skarn deposits. In: B.J. Skinner (Editor) Economic Geology 75th Anniversary Volume. Society of Economic Geology, Pennsylvania, pp. 317-391.
- Faure, G. and Mensing, A., 2005. Principles of isotope geology. John Wiley & Sons, New York, 460 pp.
- Fenodi, M. and Sayareh, A.R., 2000. Geological

- map of HasanabaYasoukand, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Gehlen, K.V., Nielsen, H., Chunnett, I., Rozendaal, A., 1983. Sulphur isotopes in metamorphosed Precambrian Fe-Pb-Zn-Cu sulphides and barite at Aggeneys and Gamsberg, South Africa. *Mineralogical Magazine*, 47(345): 481–486.
- Hoefs, J., 2004. *Stable isotope geochemistry*. Springer verlag, Berlin Heidelberg, New York, 244 pp.
- Haynes, F.M. and Kesler, S.E., 1988. Compositions and sources of mineralization fluid for chimney and manto limestone-replacement ores in Mexico. *Economic Geology*, 83(8): 1985–1992.
- Karimzadeh Somarain, A. and Moayyed, M., 2002. Granite and gabbrodirite-associated skarn deposits of NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 20(3): 127–138.
- Kerkhof, A.M.V., Hein, U.F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1–4): 27–47.
- Khodaei, L., 2015. Mineralogy and geochemistry of Sarab-3 Fe deposit (Shahrak, east Takab). M.Sc. Thesis, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, 164 pp. (in Persian with English abstract)
- Khorrām Rudi, A., 2014. Mineralogy and Geochemistry of Shahrak-1 iron ore deposit, deposit (Shahrak, east Takab). M.Sc. Thesis, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, 133 pp. (in Persian with English abstract)
- Klshima, N., 1989. A thermodynamic study on the pyrite-pyrrhotite-magnetite-water system at 300–500° C with relevance to the fugacity/concentration quotient of aqueous H₂S. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(9): 2143–2155.
- Maanijou, M., 2007. Geochemistry, origin of ore fluids, and formation of Chehelkureh copper deposit (NW of Zahedan). Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 236pp. (in Persian with English abstract)
- Maanijou, M. and Khodaei, L., 2016. Petrology and geochemistry of intrusive body of iron deposit of Sarab-3, east of Takab-north west of Iran. *Petrology*, 7(27): 171–190.
- Maanijou, M. and Khodaei, L., 2018. Mineralogy and magnetite electron microprobe study in Sarab 3 iron ore deposit, Southwest Shahrak mines district (East of Takab). *Journal of Economic Geology*, 10(1): 267–293. (in Persian with English abstract)
- Maanijou, M. and Salemi, R., 2015. Mineralogy, chemistry of magnetite and genesis of Korkora-1 iron deposit (East of Takab). *Journal of Economic Geology*, 6(2): 355–376. (in Persian with English abstract)
- Mansouri, S., Aliani, F., Maanijou, M., Sepahi, A., Mostghimi, M., 2015. Mineralogy and geochemistry of granitoids and associated iron skarn of Takht (north of Kaboodar Ahang). *Petrology*, 6(21): 157–176.
- Meinert, L.D., 1992. Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, 19(4): 145–62.
- Middlemost, E.A.K., 1994. Naming materials in the magma, igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215–224.
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274(4): 321–355.
- Mohajel, M., Fergusson, C.L. and Sahandi, M.R., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(4): 397–412.
- Nabavi, M.A., 1976. A Preface to the Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 109 pp.
- Ohmoto, H. and Rye, R.O., 1979. Isotope of sulfur and carbon. In: H.L. Barnes (Editor), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley and Sons, New York, pp. 509–567.
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal processes and mineral system*. Springer Science, New York, 1273 pp.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. In: P.H. Ribbe (Edditor), *Reviews in Mineralogy*. Volume 12, Mineralogical Society of America, Virginia, 644 pp.
- Roedder, E. and Bodnar, R.J. 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 8(1): 263–301.
- Rollinson, H.R., 1995. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation and Interpretation*. Longman Group, UK, 344 pp.
- Salemi, R., 2013. The study of fluid inclusion and geochemistry of Korkora-1 iron deposit (Shahrak, east Takab). M.Sc. Thesis, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, 186 pp. (in

- Persian with English abstract)
- Shand, S.J., 1943. Eruptive rocks, their genesis, composition, classification and their relation to ore deposits. John Wiley & Sons, New York. 488 pp.
- Shaikhi, R., 1995. Economic geology study of Shahrak Fe deposit, east of Takab. M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 161 pp. (in Persian with English abstract)
- Shepherd, T.J., Rankin, A.h. and Anderson, D.H., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie and Son, Glasgow, 239 pp.
- 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(1–4): 229–272.
- Zarei, S., 2014. Study of Mineralogy and Sulfur Isotopes in the Korkora-2 iron ore deposit. M.Sc. Thesis, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, 99 pp. (in Persian with English abstract)



Fluid inclusions and sulfur stable isotopes of the Sarab 3 iron ore deposit (the Shahrak mining area - north Bijar)

Mohammad Maanijou* and Mehrdad Ferdowsi Rashed

Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, 65174-33391, Iran

Submitted: Jan. 10, 2019

Accepted: Mar. 01, 2020

Keywords: *Fluid inclusions, sulfur stable isotopes, Sarab 3 iron ore deposit, Shahrak mines, Bijar, Sanandaj-Sirjan*

Introduction

Cenozoic magmatism in Central Iran has caused formation of contact metamorphosed rocks especially skarns (Calagari and Hosseinzadeh, 2006, Karimzadeh Somarain and Moayyed, 2002). The skarns consist of valuable ore deposits. The Shahrak mining area is located on the border of Central Iran and Sanandaj-Sirjan zone (SSZ). This mining area includes 9 iron ore deposits. The Sarab 3 iron ore deposit is located to the south of them. The volcanic rocks of the study area include dacite, andesite, rhyolite and andesitic basalt has occurred during the Eocene period. The intrusive rocks of the study area include post early Miocene diorite-granodiorite, diorite and granite. The iron mineralization stage has formed in limestone-dolomite contact with intrusive igneous rocks (diorite-granodiorite and diorite) as a skarn deposit. The main ore of the Sarab 3 iron ore deposit is the magnetite and hematite. Limonite and goethite, pyrite, pyrrhotite and chalcopyrite can also be seen. The ore deposit geometry is characterized by massive to lens-like shape.

Materials and methods

In addition to study of drilling cores, 70 samples were taken from them and the mine pit of the Sarab 3 iron ore deposit in order to study thin sections, thin-polish section, fluids inclusion and sulfur stable isotope. Finally, 20 samples were selected and studied at the Bu Ali Sina University of Hamedan. Fluid inclusion studies were performed on six doubly polished thin sections. These samples

were taken from calcite in magnetite hosts. Measuring the temperature parameters was carried out at the mineralogical laboratory of Iran Mineral Processing Research Center to assist the Stage: THMS600 with Linkam model on ZEISS microscope. The temperature range is -196 to +600°C. The machine also has two controllers, heating (TP94) and cooling (LNP), a nitrogen tank (for the nitrogen pump for freezing) and a water tank (for cooling the device in high temperature). Calibration of Stage in heating has a precision of $\pm 0.6^\circ\text{C}$ which was carried out with cesium nitrate with a melting point of 414 °C and freezing was carried out at a precision of $\pm 0.2^\circ$ with a standard N-hexane material with a melting point of -94.3°C. Five sulfide samples were selected from an open pit of the Sarab 3 iron ore deposit and the isotopic ratio of their sulfur was measured at the Isotope Lab of the University of Queens, Canada.

Results

During the retrograde mineralization stage in the Sarab 3 iron ore deposit, the effects of the remaining fluid on the skarn rocks and adjacent hornfels result in release of calcium from the skarn and then transport of volatile matter into it. At this stage, the fluid is barren and it has a lower temperature and salinity than its original state. As a result of retrograde reactions, the replacement of high calcium calc-silicate minerals with a series of lower calcium minerals occurs. Also, some amounts of dissolved calcium are combined with carbonate ions in the fluid and thus calcite is formed in the faults and microfractures. Study of the fluid inclusions in the Sarab 3 iron ore deposit shows that the manufacturer fluids have been related to the retrograde phase and have lower

*Corresponding author Email: mohammad@basu.ac.ir

salinity and temperature. The study of sulfur stable isotopes in the Sarab 3 iron ore deposit shows that sulfur may have been derived from one of these two sources: It has been created directly from the magmatic differentiation fluid or by the dissolution of previously sulfide igneous sources. The values of $\delta^{34}\text{S}$ of mineralization fluids have been calculated from the Pyrite- H_2S separation factor (Ohmoto and Rey, 1979), assuming that H_2S is the most important sulfur compound in the mineralization fluid. Considering the amount of $\delta^{34}\text{S}$ in the Sarab 3 iron ore deposit (3 to 3.6 permil) it can be stated that all of them can be attributed to hydrothermal fluids with magmatic sources. Also the amount of $\delta^{34}\text{S}$ of H_2S in the fluid equilibrated with sulfides of the Sarab 3 iron ore deposit was close to zero (0.8-1.9‰).

Discussion and conclusion

Due to the emplacement of intrusive bodies in the limestone-dolomite of the Qom formation with Oligo-Miocene age, the skarn mineralization has occurred in the Sarab 3 Iron ore deposit. The study of sulfur stable isotopes on pyrite in magnetite ore, has shown the source of mineralization fluids to be derived from magma. Skarns have been formed in several stages the last of which is the retrograde stage. Retrograde fluids have been overprinted on ore and affected it. Calcite veins and sulfides have been formed in the retrograde stage in the Sarab 3 iron ore deposit. In this study it was found that the temperature of fluid in the Sarab 3 iron

ore deposit was about 115-324°C and the salinity was about 0.4-35 wt.% NaCl.

Acknowledgments

Thanks to the Kimia Ma'aden Sepahan Company for collaborating in this research. Thanks to Ms. Aghajani for the accurate study of the fluids inclusion. We appreciate the help of Kurt Kyser from Queens University for measuring the stable isotopes of sulfur.

References

- Calagari, A.A. and Hosseinzadeh, G., 2006. The Mineralogy of copper-bearing skarn to the east of the SungunChayriver, East-Azarbaigan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(4-6): 423-438.
- Karimzadeh Somarain, A. and Moayyed, M., 2002. Granite and gabbrodirite-associated skarn deposits of NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 20(3): 127-138.
- Ohmoto, H. and Rye, R.O., 1979. Isotope of sulfur and carbon. In: H.L. Barnes (Editor), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley and Sons, New York, pp. 509-567.