

مراحل و شرایط کانی‌سازی اسکارن آهن در دوی بر اساس شواهد کانی‌شناسی و میانبارهای سیال، منطقه سنگان (خراسان رضوی)

ابراهیم طالع فاضل^۱، بهزاد مهربانی^۱، احمد خاکزاد^۲ و رضا کیانپور^۲

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت معلم تهران، تهران، ایران
^۲ گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۸/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۷/۰۶

چکیده

کانسار سنگ آهن سنگان در فاصله ۳۰۸ کیلومتری جنوب خاوری مشهد در زون ساختمانی خاور ایران قرار دارد. این کانسار به دلیل داشتن عیار و ذخیره بالای آهن و پایین بودن مقادیر فسفر و گوگرد از مهم‌ترین ذخایر آهن ایران به‌شمار می‌رود. مهم‌ترین بی‌هنجاری‌های سنگان شامل بی‌هنجاری‌های باختری، مرکزی و خاوری است که کانسار در دوی، نمونه‌ای شاخص از اسکارن‌های غنی از مگنتیت بوده و در محل همبری توده نفوذی گرانیت سرنوسر (با ویژگی گرانیت‌های تیپ I به سن الیگومیوسن) و سنگ‌های کربناتی پرمینیم (به سن کرتاسه پسین) در بی‌هنجاری مرکزی تشکیل شده است. زون‌های اسکارن در کانسار آهن در دوی متشکل از سه زیرپهنه برون‌اسکارن، درون‌اسکارن و کانسنگ آهن است که زیرپهنه درون‌اسکارن به صورت محدود و برون‌اسکارن بیشترین گسترش را دارد. بخش برون‌اسکارن متشکل از زیرپهنه گارنت اسکارن، گارنت-پیروکسن اسکارن و پیروکسن اسکارن است که در فاصله دورتر به اپیدوت اسکارن تبدیل می‌شود. شواهد صحرایی، کانی‌شناسی و میکروترمومتری (دماسنجی میکروسکوپی) میانبارهای سیال، حاکی از دو مرحله اسکارن‌زایی شامل: (۱) نفوذ توده گرانیتی در دمای ۳۲۰ تا ۵۲۰°C و فشار تقریبی ۱ کیلو بار و (۲) تشکیل زون اسکارنی پیش‌رونده با دمای ۳۱۰ تا ۴۹۰°C و شوری میانگین ۳۳/۶ (wt.% NaCl) به همراه تشکیل کانی‌های متاسوماتیک بدون آب و زون اسکارن پسرورنده با دمای تقریبی ۱۹۰ تا ۳۱۰°C و میانگین شوری ۱۳/۳ (wt.% NaCl) به همراه کانه مگنتیت و کانی‌های سولفیدی پیریت توده‌ای، مارکاسیت و کالکوپریت است. به دنبال آن فعالیت‌های تأخیری، موجب تشکیل رگه‌های کوارتز-کانه‌دار و عقیم متشکل از پیریت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل، کالکوپریت و فلوکوپریت در منطقه شده که طی دو مرحله یکی با دمای ۳۶۰ تا ۴۴۰°C و میانگین شوری ۳۳/۴ (wt.% NaCl) و دیگری با دمای ۲۳۵ تا ۳۲۰°C و شوری میانگین ۱۴/۶ (wt.% NaCl) در سنگ میزبان اسکارن و توده نفوذی، تشکیل شده‌اند. بر اساس مطالعات، می‌توان گفت فرایندهای آمیختگی و رقیق‌شدگی سیال کانه‌ساز توسط آب‌های جوی با شوری و دمای پایین و نیز تغییرات شیمیایی ناشی از واکنش سیال کانه‌ساز با سنگ میزبان، از عوامل مؤثر در نهشت آهن در زون‌های اسکارنی به صورت مگنتیت و تشکیل کانه‌های سولفیدی در رگه و رگچه‌های کوارتز گرمایی در مراحل پایانی کانی‌سازی در منطقه است.

کلیدواژه‌ها: کانی‌سازی اسکارن، میانبارهای سیال، آهن، گرانیت سرنوسر، سنگان، در دوی

* نویسنده مسئول: ابراهیم طالع فاضل

E-mail: fazel_tale@yahoo.com

۱- مقدمه

در ارتباط با موقعیت معادن سنگان نظریات مختلفی ارائه شده است که از آن جمله، براساس تقسیم بندی (Stöcklin, 1968)، این معادن در بخش شمال‌خاوری بلوک طبس قرار می‌گیرد، بنابراین سرگذشت و موقعیت زمین‌ساختی این منطقه مانند ایران مرکزی و بلوک طبس است. براساس گزارش شرکت ملی فولاد ایران (۱۳۶۹) و مهندسین مشاور معدنکاو (۱۳۸۵) کانسار آهن در دوی، در حدود ۸۸ میلیون تن ذخیره دارد که حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد شامل آهن نوع متوسط تا پرعیار (بین ۲۰ تا ۶۰ درصد عیار) و حدود ۱۱ درصد شامل آهن نوع کم عیار (کمتر از ۲۰ درصد عیار) است. هدف از این پژوهش، بررسی نحوه کانی‌سازی، مراحل تکامل و کانی‌شناسی دقیق زون‌های اسکارن در منطقه بوده که بر مبنای شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، متاسوماتیسم و میانبارهای سیال انجام شده است.

۲- روش مطالعه

به منظور مطالعه نحوه کانی‌سازی، ذخیره در مقیاس ۱:۵۰۰۰ به وسعتی حدود ۳/۵ کیلومتر مربع بررسی شده است که طی آن، پس از جمع‌آوری اطلاعات پیشین و عملیات نمونه‌برداری از بخش‌های مختلف کانسار، شامل سنگ میزبان، زون‌های اسکارنی، سنگ آهن و رگه‌های تأخیری کانه‌دار کوارتز، در مجموع ۸۰ مقطع نازک، صیقلی و نازک-صیقلی به منظور مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی تهیه و مطالعه شد. همچنین برای تکمیل آزمایش‌ها، ۲۰ نمونه پودر سنگ از مناطق دگرسان‌شده به همراه توده نفوذی، برای مطالعات XRD تهیه و ۸۰ نمونه سنگی از بخش‌های مختلف کانسار برداشت و به روش XRF در آزمایشگاه Amdel استرالیا

مجموعه معادن سنگان در استان خراسان رضوی، در فاصله ۳۰۸ کیلومتری جنوب‌خاوری مشهد و ۱۸ کیلومتری شمال‌خاوری سنگان از توابع شهرستان خواف، میان طول‌جغرافیایی ۲۴' ۶۰° تا ۴۵' ۶۰° و عرض جغرافیایی ۲۶' ۳۴° تا ۳۳' ۳۴° قرار گرفته است. شهر خواف، نزدیک‌ترین شهر به منطقه معدنی است که در فاصله ۴۰ کیلومتری از محل کانسار قرار دارد (شکل ۱). این کانسار در محدوده‌ای به طول تقریبی ۲۶ کیلومتر و عرض تقریبی ۸ کیلومتر در نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ تایید قرار می‌گیرد. مهم‌ترین بی‌هنجاری‌های سنگان، شامل بی‌هنجاری‌های باختری (A، B)، مرکزی (C جنوبی، C شمالی، در دوی و باغک) و خاوری (فرزنده، سنجده و بقل بید) است که بی‌هنجاری سنگ آهن در دوی در منطقه مورد مطالعه، به وسعت ۲/۱ × ۸/۱ کیلومتر مربع در محدوده بی‌هنجاری‌های مرکزی قرار می‌گیرد (شکل ۱). منطقه سنگان در محدوده خاوری رشته کوه ولایت قرار گرفته که این رشته کوه به صورت کمانی از منطقه بردسکن شروع شده و پس از عبور از شهرهای کاشمر، تربت حیدریه و خواف، مرز افغانستان را قطع کرده و به طرف داخل این کشور ادامه یافته است.

به طور کلی، این معادن در گستره‌ای به طول تقریبی ۳۰ کیلومتر و عرض ۲ کیلومتر از باختر ایران تا مرز افغانستان گسترش دارند. قلمروی کانسار سنگان جزئی از کمربند آتشفشانی-پلوتونیک خواف-کاشمر-بردسکن است که با روند خاوری-باختری در شمال گسل درونه قرار دارد. کریم‌پور و همکاران (۱۳۸۱) این کمربند را به عنوان کمربند کانی‌سازی تیپ اکسید آهن مس و طلا (IOCG, Iron-Oxide Copper Gold) در ایران معرفی کرده‌اند که کانسار اسکارن مگنتیت سنگان در شمال آن قرار دارد (شکل ۲).

در مرز گرانیته سرنوسر با سنگ‌های پرکامبرین، دگرگونی همبری از نوع اسکارن و سیلیکات کلسیمی هورنفلس (اسکارنویید) همراه با کانی‌های گارنت، فلدسپارپتاسیم، پلاژیوکلاز، کوارتز، کلسیت، اپیدوت، آمفیبول (عمدتاً ترمولیت-اکتینولیت)، زیرکن و آپاتیت مشاهده می‌شود. سنگ‌های کربناتی در منطقه بیشتر با اسکارن و مرمر دگرگون شده و متعلق به ژوراسیک پسین-کرتاسه پیشین است (کریم‌پور و شفارودی، ۱۳۸۶).

کانی‌سازی آهن بیشتر در این سنگ‌ها رخ داده است و به صورت عدسی‌های میان‌لایه‌ای و نواری بین واحد سنگ‌آهک بلوری و بیشتر در زمینه اسکارن دیده می‌شود و چنین به نظر می‌رسد که در اثر جایگیری توده نفوذی سرنوسر در منطقه، دچار دگرگونی همبری و متاسوماتیسم شده‌اند (شکل ۱). تأثیرات دمایی و متاسوماتیک حاصل از این نفوذ و به دنبال آن ورود سیالات گرمایی در سنگ‌های کربناتی میزبان سبب تبلور دوباره سنگ‌های کربناتی و تشکیل کانی‌های اسکارنی و کانسار آهن با غنای بیشتر به صورت دیرزاد (اپی‌ژنتیک) شده است.

ساختار اصلی منطقه توسط چین‌خوردگی‌ها و شکستگی‌ها کنترل می‌شود که موجب شکل‌گیری و جایگزینی توده‌های بزرگ گرانیته‌ی سرنوسر و برمانی (به ترتیب در شمال و جنوب منطقه) شده است. این شکستگی‌ها مناسب‌ترین گذرگاه برای مهاجرت محلول‌های کانه‌دار از ژرفا به سطح بوده و از مهم‌ترین کنترل‌کننده‌های کانی‌سازی در منطقه به‌شمار می‌روند (Boomery, 1998a). به عقیده (Förster & Jafarzadeh, 1994)، مانند دیگر حوضه‌های پشت‌کمانی، گوشه بالایی ضمن حرکت به سمت بالا و تولید مذاب بازالتی، باعث ذوب‌بخشی گسترده پسته در این ناحیه شده که به‌موجب آن کمر بند آتشفشانی با ساختار کالدراپی به‌موازات گسل‌ها و شکستگی‌های اصلی منطقه تشکیل شده است.

۴- توده نفوذی سرنوسر

توده نفوذی سرنوسر با سن تقریبی الیگومیوسن، نقش مهمی در تشکیل اسکارن در دودی داشته، به‌گونه‌ای که بزرگ‌ترین توده نفوذی منطقه بوده و در شمال منطقه نفوذ کرده است (شکل ۲). این توده با ترکیب گرانیته قلیایی، گرانودیوریت تا گرانیته-پگماتیت در جهت خاوری-باختری گسترش داشته و موجب تشکیل هاله همبری با جنس مرمر، هورنفلس و سیلیکات قلیایی هورنفلس (اسکارنویید) در سنگ‌های آهکی و شیلی منطقه شده است (Boomery, 1998b). کوارتز، ارتوکلاز، پلاژیوکلاز (الیگوکلاز-آلیت)، بیوتیت و هورنبلند، به‌عنوان کانی‌های اصلی و زیرکن، آپاتیت و اسفن به‌عنوان کانی‌های فرعی، از اجزای سازنده گرانیته سرنوسر بوده که بیشتر دارای بافت گرانولار هستند. عملکرد سیال‌های گرمایی موجب دگرسانی ارتوکلاز به کائولینیت، پلاژیوکلاز به سیرسیت و تبدیل آمفیبول به بیوتیت، کلریت و مگنتیت شده است که در بیشتر بخش‌های منطقه، قابل شناسایی است.

دگرسانی‌های آرژیلیک، سیرسیتی و پروپلیتی (حضور اپیدوت و کلسیت) مهم‌ترین دگرسانی‌های توده نفوذی سرنوسر در منطقه هستند (کیانپور، ۱۳۸۷). داشتن ویژگی‌های مربوط به گرانیته‌ی تپ I، از جمله فراوانی کانی‌های هورنبلند، مگنتیت، بیوتیت و اسفن و نبود مسکوویت اولیه، گارنت، آندالوزیت، سیلیمانیت و کیانیت و نیز فراوانی کمپلکس‌ها و دایک‌های متعدد با ماهیت نیمه‌قلیایی تا قلیایی در منطقه و در نهایت نبود کربنات در نورم نمونه‌ها از ویژگی‌های بارز گرانیته سرنوسر است. همچنین ماهیت کلسیمی-قلیایی، پر پتاسیم و متاآلوئین تا کمی پرآلوئین بودن گرانیته سرنوسر حاکی از ارتباط این توده با محیط فرورانش و فرار گرفتن آن در موقعیت کمان آتشفشانی است (جدول ۱ و شکل ۳).

۵- کانی‌شناسی زون‌های اسکارن

از مهم‌ترین پدیده‌های کانی‌زایی در کانسار در دودی، تشکیل آهن با کانه اصلی

مورد آزمایش قرار گرفتند. مطالعات سنگ‌نگاری و میکروترموتری میان‌بارهای سیال نیز با استفاده از میکروسکوپ تحقیقاتی Ziess و دستگاه Linkam THM600 با کنترل‌کننده حرارتی TMS-94 و سردکننده LNP، در دانشگاه تربیت معلم تهران انجام گرفت. برای انجام این مطالعات، از ۱۳ محل مختلف شامل توده نفوذی (گرانیته سرنوسر)، زون‌های اسکارن، رگه کوارتز-کانه‌دار و عقیق، طی ۵ مسیر برداشت، نمونه‌برداری سیستماتیک انجام شده و در مجموع ۱۷ مقطع دوبرصیق، با قطر متوسط ۵۰ تا ۱۵۰ میکرون با استفاده از روش (Crosbie 1981) تهیه شده است.

۳- زمین‌شناسی منطقه

همان‌طور که گفته شد، براساس مطالعات (Stöcklin 1968)، مجموعه معادن سنگان در بخش شمال‌خاوری بلوک طبرس قرار گرفته که دارای موقعیت زمین‌ساختی مشابه با زون ایران مرکزی است. همچنین براساس تقسیم‌بندی افتخارنژاد (۱۳۵۹) این کانسار در زون ساختاری خاور ایران قرار می‌گیرد. مطالعات کریم‌پور و همکاران (۱۳۸۱) نشان می‌دهد که قلمروی کانسار آهن سنگان جزئی از کمر بند آتشفشانی-پلوتونیک خواف-کاشمر-بردسکن بوده که با روند خاوری-باختری در شمال گسل درونه (گسل بزرگ کویر) قرار گرفته است.

این کمر بند به‌طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط و گاه مافیک تشکیل شده که در مجموع شامل داسیت، ریوداسیت، آندزیت، پیروکسن آندزیت، لایت، تراکی آندزیت، توف، آگلومرا و بیشتر مربوط به فعالیت‌های آتشفشانی با سن کرتاسه پسین-الیگوسن هستند که توده‌های نفوذی گرانیته‌ی قلیایی نیز با ترکیبی از گرانیته فلدسپارقلیایی، گرانودیوریت و دیوریت در آنها نفوذ کرده است. توده گرانیته سرنوسر با طول بیش از ۱۵ کیلومتر به‌شکل باتولیت و ترکیب قلیایی-کلسیمی قلیایی تا پتاسیمی در جهت خاوری-باختری، متعلق به این فعالیت‌ها (الیگومیوسن) است که نقش مهمی در کانه‌سازی اسکارن آهن در منطقه سنگان و بویره کانسار آهن در دودی داشته است.

قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه نیز به‌طور عمده شامل سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی و رسوبی (همچون توف، آگلومرا، ریولیت، چرت، شیل‌های سیلیسی و آهک) متعلق به پرکامبرین (پروتروزوییک پسین) است که دگرگونی ناحیه‌ای درجه کم، از نوع شیست سبز را تحمل کرده‌اند (افتخارنژاد، ۱۳۵۹ و کیانپور، ۱۳۸۷). بر اساس شرح نقشه ۱:۲۵۰,۰۰۰ تایید (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۶۹) سنگ‌های وابسته به پالئوزوییک در منطقه شامل دو ردیف یکی متعلق به پالئوزوییک زیرین متشکل از متاپلیت، آهک، دولومیت، ماسه‌سنگ، کوارتزیت و کنگلومرا به‌همراه مقادیر محدودی سنگ‌های آتشفشانی بازیگ و سیل، و دیگری ردیف بالایی که شامل سازندهای بهرام، سردر و جمال متشکل از شیست‌های تیره‌رنگ، کوارتزیت، آهک بلورین، توف‌های دگرگونی و کنگلومرا است که ستبرایی حدود ۴۰۰ تا ۵۵۰ متر دارند. پس از آن لایه‌های ژوراسیک در چارگوش تایید از قدیم به جدید به سه بخش ژوراسیک زیرین (سازند شمشک)، میانی (سازند دلیچای) و بالایی (سازند لار) تقسیم می‌شوند که در منطقه مورد مطالعه، سازند ژوراسیک زیرین و بالایی رخنمون دارند. سازند ژوراسیک با ستبرای تقریبی ۱۰۰ متر، متشکل از رسوبات ماسه‌سنگی تیره، مارن و شیل که در برخی نقاط به‌طور ناپیوسته توسط سنگ‌های کربناتی کرتاسه پوشیده شده و سازند لار با روند شمال‌باختر-جنوب‌خاور با ستبرای تقریبی ۴۹۰ متر شامل دو بخش متشکل از آهک دولومیتی چرت‌دار نازک تا ستبرایه (بخش زیرین)، آهک آلیتی و دولومیت (بخش بالایی) است. همچنین نهشته‌های کرتاسه در منطقه، متشکل از دو بخش کرتاسه زیرین و بالایی بوده که در مجموع با ستبرای تقریبی ۴۰۰ متر، شامل کنگلومرای قاعده‌ای، آهک‌زیستی-آواری، آهک مارنی و آهک ستبرایه است که در بعضی مناطق به‌طور محلی توسط واحدهای توف و ایگنمبریت قطع شده‌اند (شکل ۸-الف).

میانگین ۰/۲ تا ۱ سانتی متر، پراکنده در کانسنگ مگنتیت به همراه کالکوپیریت و مارکاسیت (شکل های ۵-ب و ۶-الف) و نسل سوم، پیریت های همراه با رگه کوارتز تأخیری (شکل ۶-الف) دیده می شود. در مجموع بر اساس شواهد صحرایی و پاراژنری، تشکیل اسکارن در دوی طی پنج مرحله شامل، نفوذ توده گرانیتوید، دایک های پگماتی و آپلیتی (مرحله اول)، نهشت کانی های سیلیکات کلسیم بدون آب مانند آندرادیت و پیروکسن (مرحله دوم)، تشکیل کانسنگ مگنتیت (مرحله سوم)، شکل گیری کانی های سولفیدی از جمله کالکوپیریت، مارکاسیت، پیریت توده ای و شکل دار و پیرویت (مرحله چهارم) و به دنبال آن تشکیل رگه های کوارتز-فلوگوپیت و پیریت، توسط سیال های گرمایی به عنوان آخرین فاز کانی سازی و مرحله پنجم تغییرات سوپرژن انجام شده که مراحل اصلی کانی سازی در شکل ۷ نشان داده شده است.

از دگرسانی های رایج در منطقه نیز می توان به دگرسانی پتاسیمی (فلدسپار پتاسیم)، سریستی، آرژلیک حد واسط و پروپیلیت اشاره کرد که بیشتر در مجاورت توده گرانیتوید سرنوسر و پیرامون زون های اسکارنی قابل مشاهده هستند. همچنین با توجه به مطالعات انجام شده و مقایسه اسکارن در دوی با اسکارن های کلسیمی و منیزی می توسط Einaudi (1982). اسکارن آهن در دوی در محدوده اسکارن های کلسیمی-منیزی با گرایش به اسکارن های منیزی قرار می گیرد (جدول ۲).

۶- میانبارهای سیال

مطالعه میانبارهای سیال با هدف بررسی نحوه کانی سازی و بازسازی شرایط فیزیکوشیمیایی سیال کانه ساز در منطقه، و نیز پی بردن به سنگ منشأ کانی سازی در دو بخش، شامل سنگ نگاری و میکروترموتری (دماسنجی میکروسکوپی) میانبارهای سیال انجام شده است که در ادامه به بررسی هر یک پرداخته می شود.

۶-۱. سنگ نگاری میانبارهای سیال

برای مطالعات زمین دماسنجی (ژئوترموتری) نمونه برداری از کوارتزهای نسل اول، نسل دوم و نسل سوم به ترتیب شامل بخش های توده نفوذی، زون های اسکارن، رگه های کوارتز-کانه دار و عقیم انجام شده است (شکل ۸-ب). از نظر سنگ نگاری، مطالعات بر روی میانبارهای سیال اولیه (P) و ثانویه کاذب (PS) به اشکال استوانه ای، دوکی شکل و بی شکل با اندازه متوسط ۵ تا ۳۰ میکرون انجام شده است که بر اساس تقسیم بندی های انجام شده توسط Shepherd et al. (1985)، شامل چهار نوع به شرح زیر است (شکل ۹ و جدول ۳):

نوع اول (Type I): سه فازی مایع+گاز+جامد (هالیت) با اندازه متوسط ۱۰ تا ۲۰ میکرون

نوع دوم (Type II): سه فازی مایع+گاز+جامد (هالیت+سیلیت) با اندازه متوسط ۱۰ تا ۳۰ میکرون

نوع سوم (Type III): دو فازی مایع+گاز (غنی از مایع) و گاز+مایع (غنی از بخار) با اندازه متوسط ۱۵ میکرون

نوع چهارم (Type IV): تک فازی گاز (بیش از ۹۰ درصد حجمی) با اندازه متوسط بین ۵ تا ۱۵ میکرون

۶-۲. میکروترموتری (دماسنجی میکروسکوپی)

بررسی میکروترموتری بر روی همه میانبارهای سیال انجام و نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. بر اساس این بررسی ها، دمای ذوب نهایی یخ (T_{ice}) در میانبارهای دو فازی (L+V) و تک فازی (V) به ترتیب نوع سوم و چهارم حدود ۳/۱ تا ۲۰/۳°C - با بیشترین فراوانی ۱۶°C - (شکل ۱۰-د) و دمای یوتکتیک (T_e) آنها بین ۲۰/۱ تا ۲۳/۲°C - به دست آمد که نشان دهنده سیستم NaCl-KCl-H₂O است (Roedder, 1984; Crawford, 1981).

وجود کانی های کدر بویژه هماتیت در برخی میانبارهای مشاهده شده، نشان دهنده

مگنتیت است که بر مبنای مشاهدات صحرایی، غالباً به شکل عدسی های میان لایه ای و نواری میان واحد سنگی آهک بلوری و عمدتاً در زمینه اسکارن دیده می شود. در اثر نفوذ توده گرانیتی سرنوسر در منطقه، محلول های گرمایی آهن دار در درون سنگ های آهکی نفوذ پذیر ترزریق شده و در شرایط مناسب پتروفابریکی و سنگ شناختی، جاننشینی محلول های آهن دار و تغییر ترکیب کانی شناسی رخ داده است (شکل ۴).

انواع مختلفی از کانی های سیلیکات کلسیم بدون آب از جمله گارنت و پیروکسن، سیلیکات کلسیم آب دار از جمله اپیدوت، فلوگوپیت، اسکاپولیت، هورنبلند و ترمولیت-اکتینولیت، کانی های سولفیدی پیریت، مارکاسیت و کالکوپیریت و کانی های کربناتی از جمله کلسیت و دولومیت و محصولات دگرسانی هر یک از کانی های نامبرده، مانند کلریت، سریست، کائولینیت، مونت موریلونیت، لیمونیت و گوتیت حجم گسترده ای از کانی های منطقه را به خود اختصاص داده است (شکل های ۴ و ۵).

بر اساس ویژگی های سنگ شناختی و کانی شناسی، اسکارن در دوی متشکل از گرانیت سرنوسر به عنوان منشأ کانی سازی، زون اسکارنی (متشکل از دو زیرپهنه درون اسکارن و برون اسکارن)، کانسنگ آهن (به طور عمده متشکل از مگنتیت)، رگه های کوارتز تأخیری کانه دار (فلوگوپیت + پیریت ± کالکوپیریت) و عقیم و سنگ های سیلیکات کلسیم هورنفلس (اسکارنوید) میزبان است. کانی سازی در زون های اسکارن و کانسنگ آهن به شرح زیر دیده می شود.

۵-۱. برون اسکارن

در منطقه در دوی این زون به عنوان وسیع ترین زون، میان بخش درون اسکارن و آهک های متبلور در حاشیه همبری توده نفوذی قرار دارد و متشکل از سه زیرپهنه گارنت اسکارن، گارنت-پیروکسن اسکارن و پیروکسن اسکارن است که در فاصله دورتر به اپیدوت اسکارن تبدیل می شود.

۵-۲. زون اسکارنی (کانسنگ آهن)

پس از برون اسکارن به سمت توده نفوذی، زون اسکارن به عنوان مهم ترین زون کانه دار، به ترتیب متشکل از مگنتیت (بیش از ۸۵٪ حجمی)، گارنت (آندرادیت-گراسولار)، پیریت نیمه شکل دار تا بی شکل و توده ای، پیرویت، کالکوپیریت، مارکاسیت و اپیدوت است که توسط هاله های گسترده لیمونیتی و گوتیتی در اطراف فرا گرفته شده است (شکل ۴-ب).

۵-۳. درون اسکارن

درون اسکارن به صورت نواری تیره با ستبرای متغیر از کمتر از یک متر تا حدود ۸ متر در درون و همبری توده نفوذی سرنوسر با سنگ های کربناتی مجاور تشکیل شده و متشکل از کانی های مگنتیت، گارنت، پلاژیوکلاز، کوارتز، ترمولیت-اکتینولیت، اسکاپولیت، اپیدوت، کلریت و کلسیت است (شکل ۴-ج). به نظر می رسد تشکیل ترمولیت-اکتینولیت (شکل ۶-ه) در این مرحله در نتیجه دگرسانی کلینوپروکسن ها رخ داده باشد (Deer et al., 1992).

مهم ترین بافت های کانسنگ مگنتیت در اسکارن در دوی، شامل بافت توده ای، نواری، شکافه برکن، موزاییکی و کاتا کلاستیک است (شکل های ۵ و ۶). با توجه به شواهد بافتی، میکروسکوپی و پاراژنری کانی ها، می توان دست کم سه نسل کوارتز شامل کوارتزهای نسل اول در گرانیت ها، کوارتز نسل دوم همراه مگنتیت، (ناشی از تبدیل گارنت، پیروکسن و اپیدوت) و کوارتزهای نسل سوم تأخیری، که توسط سیال های گرمایی ثانویه در شکستگی های اسکارن نفوذ کرده و موجب تشکیل رگه های کوارتز-کانه دار (شکل های ۵-د، و ۶-الف) و عقیم (شکل ۶-ب) شده اند، اشاره کرد. افزون بر این کانی سازی پیریت نیز دست کم در سه نسل شامل نسل اول، پیریت توده ای به همراه پیرویت و کالکوپیریت در کانسنگ مگنتیت (شکل های ۵-د و ۶-ج)، نسل دوم، پیریت های نیمه شکل دار تا بی شکل با اندازه

به نقش عوامل نامبرده در تشکیل کانسار آهن در دودی پی‌برد. بر این اساس با توجه به نمودار Th-Salinity رسم شده در شکل ۱۲، می‌توان گفت توده نفوذی سرنوسر به‌عنوان یک عامل مهم در پیدایش محلول‌های گرمایی و تشکیل زون‌اسکارن دما بالا و دما پایین و به‌دنبال آن شکل‌گیری رگه‌های گرمایی کوارتز-کانهدار و عقیم در شکستگی‌های حاصل از نفوذ توده، شناخته می‌شود. با توجه به مشاهده دست کم، دو بازه شوری متفاوت (میان‌بازهای سیال نوع اول و دوم با شوری میان ۲۵ تا ۶۰ wt.% NaCl) و میان‌بازهای سیال نوع سوم و چهارم با شوری میان ۸ تا ۲۱ wt.% NaCl) و تغییرات وسیع دمای همگن شدن (۳۱۰ تا ۵۱۵°C در میان‌بازهای سیال نوع اول و دوم و ۱۸۵ تا ۳۴۰°C در میان‌بازهای سیال نوع سوم و چهارم)، عدم مشاهده بافت‌های خاص پدیده جوشش همچون بافت استوک‌ورک، نواری، کوکاد و غیره در کوارتزهای منطقه و ژرفای بالای تشکیل توده گرانیته (۱ kb تقریباً معادل ۳ کیلومتر)، چنین به نظر می‌رسد که فرایندهای آمیختگی و رقیق‌شدگی سیال‌های (شکل ۱۲) از عوامل مهم در همزمانی نهشت کمپلکس‌های کلریدی آهن و مس در زون‌های اسکارنی و به‌دنبال آن تشکیل فازهای سولفیدی پیریت، کالکوپیریت و فلوگوپیت در رگه و رگچه‌های کوارتز گرمایی در مراحل پایانی کانی‌سازی بوده که در نتیجه کاهش ناگهانی فشار در شکستگی‌ها و گسل‌های فرعی منطقه بیشتر با روند N15E, N30W و E-W تشکیل شده‌اند. به باور Drummond & Ohmoto (1985) پدیده آمیختگی موجب کاهش دمای سیستم، کاهش دمای انحلال سیال و کاهش انحلال‌پذیری عناصر کانه‌ساز و نهشت ماده معدنی می‌شود. داده‌های میان‌بازهای سیال حاکی از رخداد فرایند آمیختگی سیالات با شوری و دمای بالا (احتمالاً ماگمایی) و شوری و دمای متوسط تا پایین (احتمالاً جوی) و به‌دنبال آن کانی‌سازی آهن به‌همراه عناصر سولفیدی در رگه‌هاست که اطلاعات دقیق‌تر در این زمینه نیاز به انجام آزمایش‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن دارد.

۷-۲. اسکارن زایی و مراحل تکامل اسکارن در دودی

با توجه به مطالعات کانی‌شناسی و میان‌بازهای سیال چنین به نظر می‌رسد که تشکیل اسکارن آهن در دودی طی مراحل زیر شکل گرفته است:

۱) نفوذ توده گرانیته سرنوسر در سنگ میزبان کربناتی و شیلی با دمای ۳۲۰ تا ۵۲۰°C و فشار تقریبی ۱ کیلوپار و ایجاد هاله دگرگونی مجاورتی در سنگ‌های اطراف که تأثیر گرمایی ناشی از آن سبب دگرگونی ایزوشیمیایی و دگرسانی بای‌متاسوماتیک در سنگ میزبان و در نهایت سبب تشکیل مرمرهای کلسیتی و اسکارن‌نویید هورنفلسی شده است. طی این مرحله کانی‌های سیلیکات کلسیم بدون آب (گارنت و پیروکسن) تشکیل شده است، ۲) تشکیل زون اسکارنی طی دو مرحله شامل، الف) مرحله پیش‌رونده با دمای ۳۱۰ تا ۴۹۰°C و شوری (wt.% NaCl) ۲۵ تا ۴۸، همزمان با تبلور تدریجی گرانیته سرنوسر و جدایش سیال گرمایی داغ (>۴۵۰°C) و نفوذ آن درون شکستگی‌ها و زون‌های خردشده سنگ‌های کربناتی اطراف و آزاد شدن حجم زیادی از SiO_2 ، Fe و Mg به درون سیستم کربناتی و تشکیل کانی‌های متاسوماتیک بدون آب از جمله آندرادیت و کلینوپیروکسن از اثر افزایش حجم محلول‌های گرمایی دارای NaCl و CaCl_2 (؟) که در این مرحله فرایند کربن‌زدایی که در مرحله پیش آغاز شده بود، سبب ایجاد شکستگی‌ها و حفره‌های بی‌شمار و در نهایت افزایش نفوذپذیری مجموعه سنگ‌های اسکارنی شده است.

عدم تشکیل ولاستونیت در این مرحله، احتمالاً گویای دمای کمتر از ۵۵۰°C طی تشکیل آندرادیت در منطقه است (سیاه‌چشم و همکاران، ۱۳۸۵) و ب) مرحله پس‌رونده با دمای تقریبی ۱۹۰ تا ۳۱۰°C و شوری متوسط (wt.% NaCl) ۱۲/۷ تا ۱۹/۵ همزمان با کاهش تدریجی دمای سیستم در نتیجه آمیختگی آب‌های جوی و ماگمایی موجب دگرسانی پس‌رونده در مجموعه کانی‌های سیلیکات کلسیم بدون آب در دمای ۲۵۰°C و به‌دنبال آن تشکیل کانی‌های سیلیکات کلسیم آب‌دار (اپیدوت+ترمولیت-کتینولیت)، اکسیدی (مگنتیت)،

حضور آهن به‌عنوان عنصر اصلی کانه‌ساز همراه با سدیم و پتاسیم بوده که در کانسارهای آهن رایج است (Wilkinson, 2001). همچنین مقادیر شوری به‌دست آمده از میان‌بازهای نوع اول و دوم از طریق انحلال فاز جامد هالیت (NaCl) طی حرارت دادن و استفاده از نمودار و روابط (Bodnar (1993) و Hall et al. (1988) به‌دست آمد (جدول ۳).

بر اساس این مطالعات، در میان‌بازهای نوع اول و دوم، دمای انحلال فازهای جامد هالیت و سیلوت به‌ترتیب بین ۱۴۰ تا ۴۷۰°C و ۱۵۰ تا ۲۳۲°C به‌دست آمد که در مجموع دمای همگن شدن میان‌بازهای درگیر نوع اول و دوم، بیش از دمای انحلال فاز NaCl در میان‌بازهای مورد مشاهده بود ($Th_{total} > Tm_{NaCl}$) و تنها در رگه کوارتز-کانهدار دمای همگن شدن سیال با دمای انحلال فاز NaCl برابر است ($Th_{total} = Tm_{NaCl}$). بر اساس (Zaw & Singoyi (2001) و Mollai et al. (2009) این فرایند احتمالاً نشان‌دهنده منشأ متفاوت سیال کانه‌ساز رگه کوارتز-کانهدار و سیال کانه‌ساز زون‌های اسکارنی است.

با استفاده از سیستم NaCl-KCl-H₂O، توسط (Bodnar & Beane (1980) می‌توان روند شوری میان‌بازهای سیال سه فازی (L+V+S) نوع دوم را در کانسار در دودی به خوبی نمایش داد (شکل ۱۱). در مجموع هیستوگرام دمای همگن شدن میان‌بازهای سیال در توده گرانیته، زون اسکارنی و رگه و رگچه‌های کوارتز-کانهدار و عقیم به‌دست آمده از مطالعه میکروترموتری کانسار در دودی، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۷- بحث

۷-۱. تحول سیال کانه‌ساز و تشکیل ذخیره

چهار عامل اصلی، تغییر دما (سرد شدن سیال کانه‌ساز)، تغییر فشار، تغییرات شیمیایی ناشی از واکنش سیال کانه‌ساز با سنگ میزبان (water-rock interaction) و تغییرات شیمیایی ناشی از پدیده آمیختگی (mixing) و جوشش (boiling)، در شکل‌گیری ذخایر معدنی و نهشت کانه‌ها، از اهمیت بالایی برخوردارند (Barnes, 1997). بر اساس مطالعات (Lentz (2000)، Niiranen et al. (2005) و Vallance et al. (2009)، تغییرات شیمیایی ناشی از واکنش سیال کانه‌ساز با سنگ میزبان (water-rock interaction) در سیستم‌های اسکارنی، در نتیجه عدم تعادل دمایی میان سیالات ماگمایی دما بالا با آهنگ سردشدگی پایین و سنگ‌های دربرگیرنده ایجاد می‌شود که این پدیده موجب اختلاف در ترکیب شیمیایی سیال‌ها و نهشته شدن آهن و فلزهای همراه و تشکیل یون H^+ می‌شود.

این فرایند اغلب با شسته شدن (leaching) کانی‌های سیلیکات کلسیمی قلیایی و دیگر کاتیون‌ها همراه است که به ترکیب سنگ میزبان وابسته است. در کانسار در دودی با توجه به مقادیر بالای سنگ‌های کربناتی (آهک و دولومیت) به‌عنوان سنگ میزبان کانی‌سازی بویژه در بخش بیرون‌اسکارن، چنین به نظر می‌رسد که واکنش سیال گرمایی با دمای بالا (>۴۰۰°C) طی مرحله پیش‌رونده، موجب تجزیه سنگ‌آهک و تزریق مقادیر زیادی CO_2 به سیستم شده است که باعث اکسایش محیط و تبدیل آهن دو ظرفیتی (FeO) به آهن سه ظرفیتی (Fe_3O_4) و در نتیجه نهشته شدن آهن به صورت مگنتیت شده است.

بر اساس مطالعات (Park & Mac Diarmid (1975) هنگام کاهش دمای سیستم، واکنش به‌صورت عکس عمل کرده و منجر به تشکیل ترکیبات آهن دو ظرفیتی (سولفیدی، کربناتی و سیلیکات‌های آهن‌دار) طی مراحل بعدی می‌شود که این فرایند در کانسار در دودی طی کانی‌سازی مرحله پس‌رونده با دمای <۳۰۰°C و تشکیل کانی‌های پیریت نسل دوم، مارکاسیت، اپیدوت و فلوگوپیت تا حدی قابل مشاهده است. همچنین با توجه به داده‌های حاصل از میان‌بازهای سیال و تغییرات وسیع دمای همگن شدن (۱۹۰ تا ۵۳۰°C) و شوری (wt.% NaCl) ۸/۳ تا ۶۰/۲ تا حدودی می‌توان

درون اسکارن و برون اسکارن، کانسنگ آهن (متشکل از مگنتیت)، رگه‌های کوارتز تأخیری کانه‌دار (فلوگوپیت+پیریت ± کالکوپیریت) و سنگ‌های سیلیکات کلسیم هورنفلس میزبان است. با توجه به مطالعات میکروترمومتری میانبراهای سیال کانسار دردوی، می‌توان گفت فرایندهای آمیختگی و رقیق‌شدگی سیال کانه‌ساز طی آمیختگی آب‌های ماگمایی-گرمابی و آب‌های جوی و نیز تغییرات شیمیایی ناشی از واکنش سیال کانه‌ساز با سنگ میزبان، از عوامل مؤثر در نهشت آهن در زون‌های اسکارنی و تشکیل کانی‌های سولفیدی پیریت، کالکوپیریت و سیلیکاتی فلوگوپیت در رگه و رگچه‌های کوارتز گرمابی در مراحل پایانی کانی‌سازی است.

براساس مطالعات حاضر، به‌نظر می‌رسد توده نفوذی سرنوسر به‌عنوان یک عامل مهم در تشکیل محلول‌های گرمابی، پس از جایگیری در سنگ میزبان منطقه و تشکیل زون‌اسکارن دما بالا و دما پایین و به‌دنبال آن تشکیل رگه‌های گرمابی کوارتز-کانه‌دار و عقیم در شکستگی‌های حاصل از نفوذ توده، در منطقه باشد.

سیاسگزاری

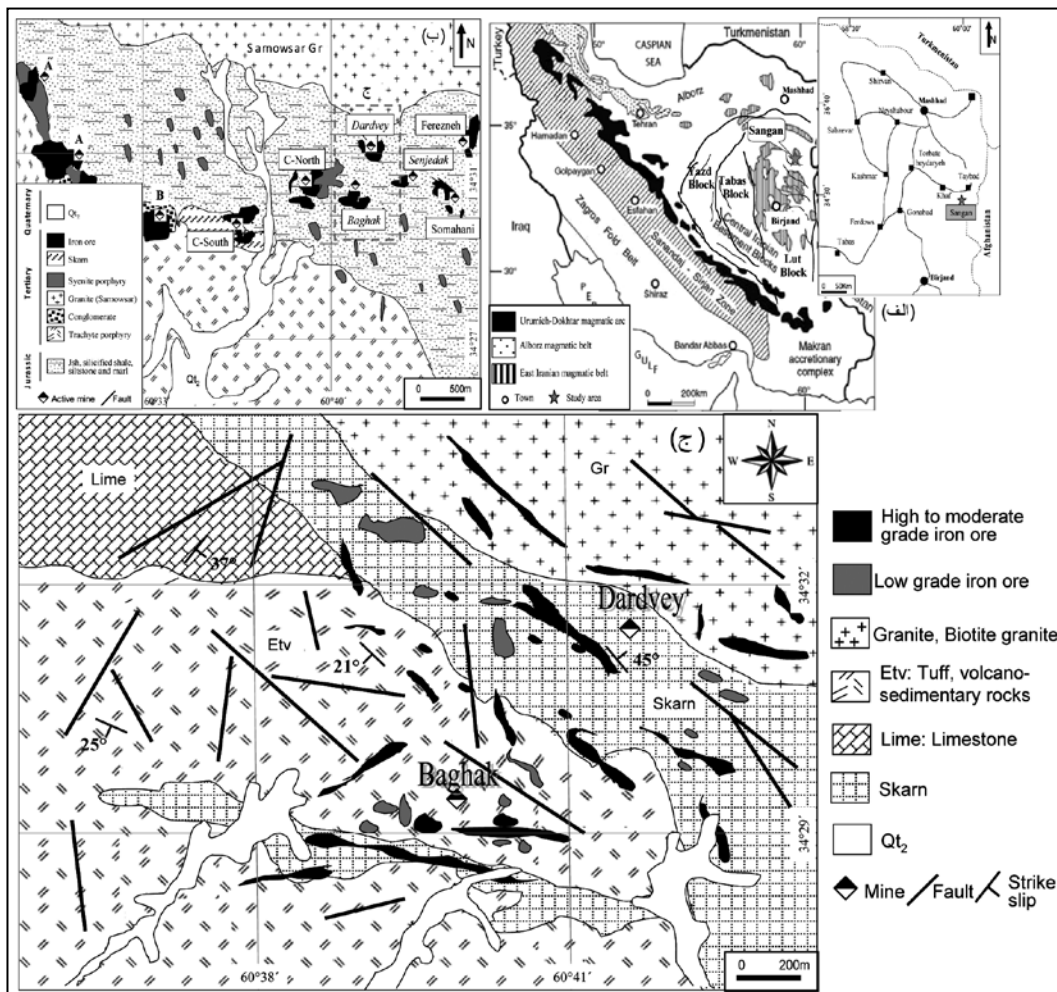
این پژوهش از طرف شرکت مهندسی مشاور معدنکاو حمایت مالی شده است که لازم است، از این حمایت تشکر و قدردانی شود. بدین وسیله از مسئولان و کارمندان محترم سایت معدن سنگان برای همکاری‌های صمیمانه سیاسگزاریم و نیز نگارندگان از نقطه نظرات سازنده داوران محترم فصلنامه علوم زمین برای بیشتر شدن غنای علمی این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

سولفیدی (پیریت+مارکاسیت±کالکوپیریت ±پیروتیت) و کربناتی (کلسیت) شده است و ۳) مرحله تشکیل رگه‌های کانه‌دار و عقیم متشکل از رگه و رگچه‌های کوارتز دارای پیریت خودشکل، کالکوپیریت و فلوگوپیت که طی دو مرحله یکی با دمای ۳۶۰ تا ۴۴۰ °C و شوری میانگین ۳۳/۴ (wt.% NaCl) و دیگری با دمای ۲۳۵ تا ۳۲۰ °C و شوری تقریبی ۱۴/۶ (wt.% NaCl) در سنگ میزبان اسکارن و توده نفوذی تشکیل شده‌اند. طی مراحل پایانی کانی‌سازی، کانی‌های سیلیکات کلسیم آب‌دار و بدون آب، توسط محلول‌های اکسیژن‌دار سطحی دگرسان‌شده و منجر به تشکیل مجموعه کانی‌های سرسیت، کلریت، اسکاپولیت، همایت ثانویه و لیمونیت در امتداد شکستگی‌ها شده است (شکل ۱۳).

۸- نتیجه‌گیری

بر مبنای کلیه شواهد صحرایی، مطالعات کانی‌شناسی و میکروترمومتری میانبراهای سیال، می‌توان گفت، اسکارن آهن دردوی از نوع اسکارن‌های کلسیمی-منیزیمی بوده و ساختار اصلی منطقه، تحت کنترل چین‌خوردگی‌ها و شکستگی‌های تشکیل شده تحت تأثیر تحولات ناشی از نفوذ توده‌های بزرگ گرانیتویدی سرنوسر و برمانی به‌ترتیب در شمال و جنوب منطقه است، که با فشارهای حاصل از نفوذ، باعث ایجاد ساختارهای مهم زمین‌ساختی در منطقه شده است.

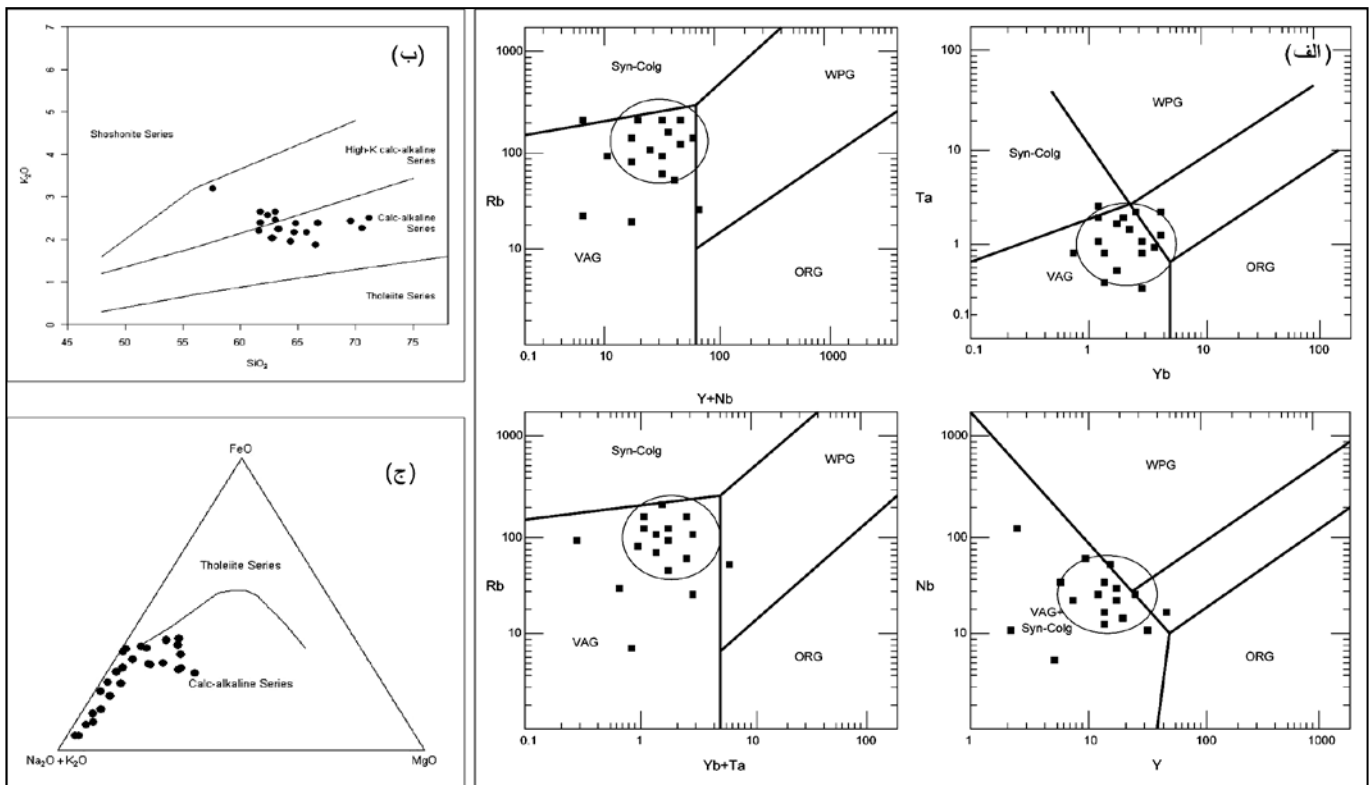
بر اساس ویژگی‌های سنگ‌شناختی و کانی‌شناسی، اسکارن دردوی متشکل از گرانیت سرنوسر به‌عنوان منشأ کانی‌سازی، زون‌اسکارن (متشکل از دو زیرپهنه



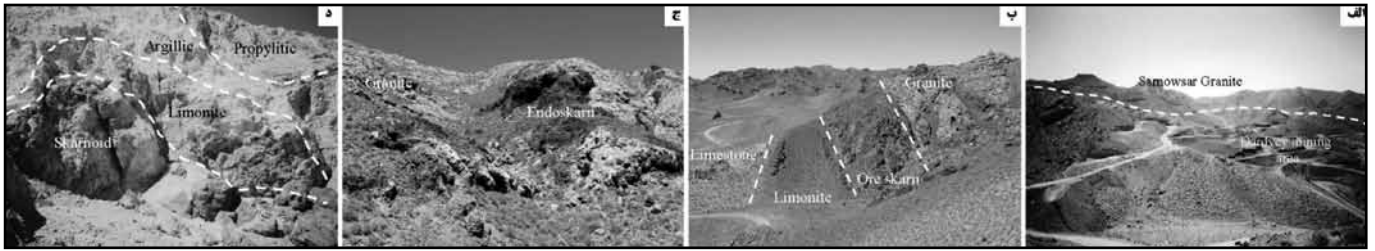
شکل ۱- الف) موقعیت منطقه معدنی سنگان در نقشه ساختاری ایران (Alavi, 1991) و راه‌های دسترسی به منطقه، ب) نقشه زمین‌شناسی منطقه و موقعیت قرارگیری مجموعه معادن سنگان (با تغییرات از عابدی، ۱۳۶۸) و ج) نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده محدوده کانسار دردوی و باغک (با تغییرات از مهندسی مشاور معدنکاو، ۱۳۸۵).



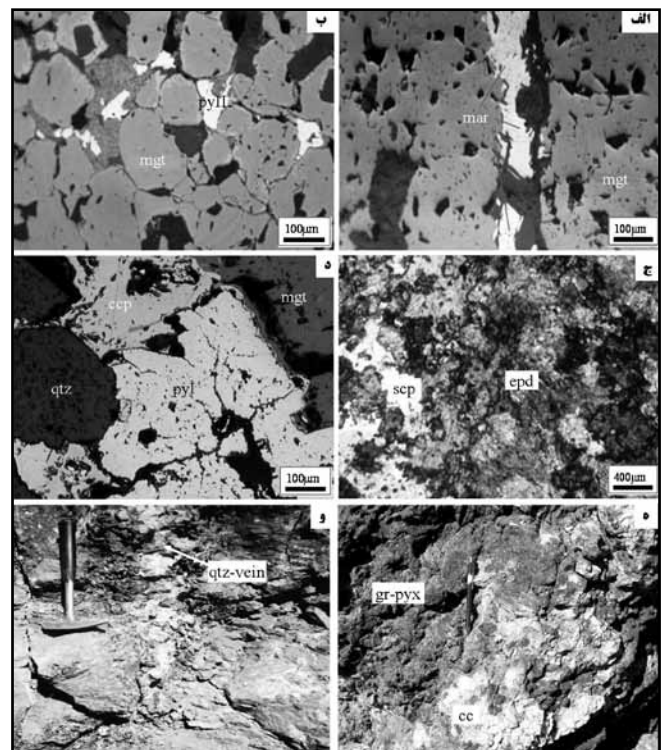
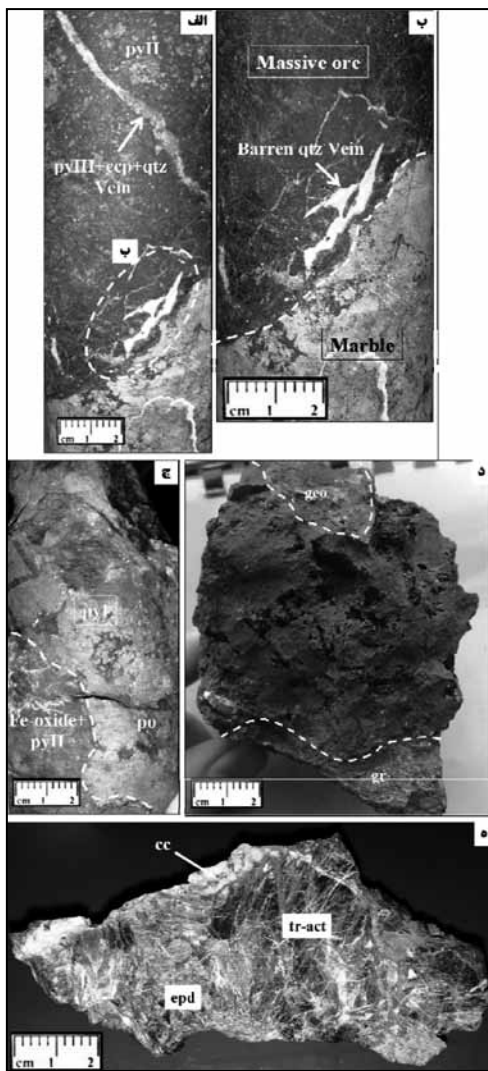
شکل ۲- تصویر ماهواره‌ای (Landsat TM) از موقعیت کانن سارنگان در شمال کمان ولکانو-پلوتونیک خواف-کاشمر-بردسکن (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۱) که در آن موقعیت تقریبی توده‌های نفوذی سرنوسر در شمال و برمانی در جنوب منطقه قابل مشاهده است.



شکل ۳- الف) نمودار تفکیک محیط‌های زمین‌ساختی گرانیتوئیدها (Pearce et al., 1984) که در آن اغلب نمونه‌های تهیه شده از گرانیت سرنوسر در محدوده کمان آتشفشانی (VAG) قرار می‌گیرند. سایر محیط‌ها عبارتند از، گرانیتوئیدهای همزمان با برخورد (Syn-Colg)، گرانیتوئیدهای درون‌صفحه‌ای (WPG) و گرانیتوئیدهای پشته میان‌اقیانوسی (ORG). ب) نمودار K_2O-SiO_2 و قرارگیری نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده سنگ‌های پریتاسیم و سری کلسیمی-قلیایی. ج) نمودار AFM سنگ‌های مورد مطالعه که با روند خطی، نشان‌دهنده تشکیل آنها در محدوده سنگ‌های کلسیمی-قلیایی مناطق کوهزایی است (Irvine and Baragar, 1971).

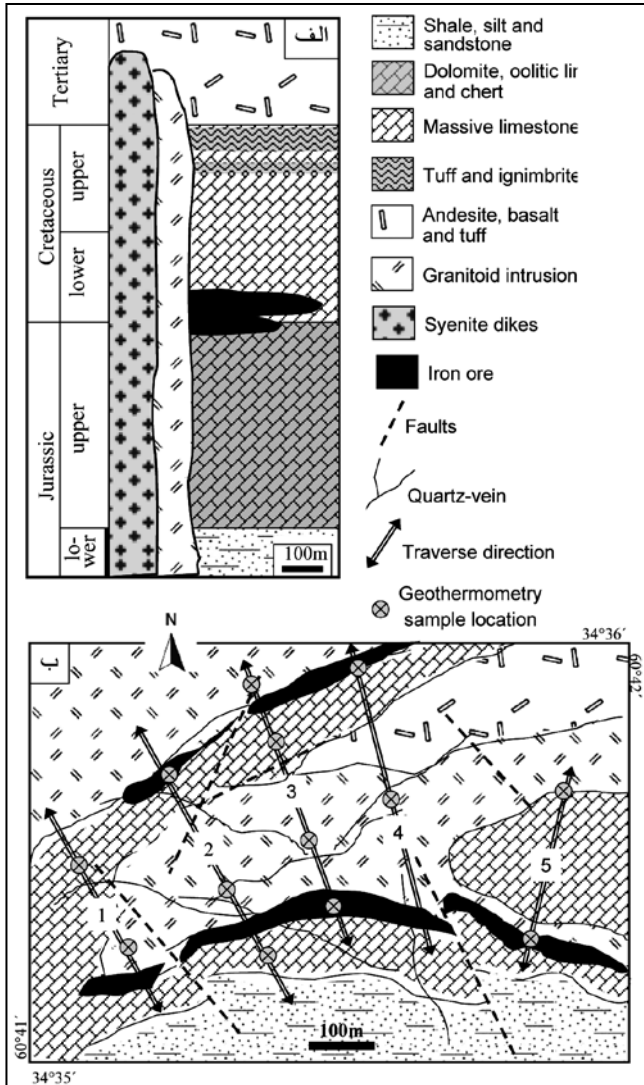


شکل ۴- الف) نمایی کلی از محدوده معدن آهن دردوی و موقعیت گرانیت سرنوسر (دید به سمت شمال)، ب) نمایش بخش‌های مختلف اسکارن دردوی، به ترتیب شامل واحد آهکی، هاله لیمونیتی، زون‌های اسکارنی کانه‌دار و گرانیت سرنوسر (دید به سمت باختر)، ج) نمایی از جانشینی آهن در واحد گرانیتی و تشکیل زون درون‌اسکارن و د) رخنمون واحدهای دگرسانی رایج در منطقه و تفکیک آنها، شامل دگرسانی پروپلیتی (با کمترین نسبت آب/سنگ یا W/R) در حاشیه توده اسکارنوبید هورنفلس و دگرسانی آرزلیک حدود وسط و هاله ثانویه لیمونیتی با مقادیر بالای نسبت W/R نزدیک به توده.



شکل ۵- الف) تصویر BSE از مگنتیت (mgt) با بافت توده‌ای و رگه مارکاسیت (mar) در میان آن، ب) تصویر BSE از کانسنک مگنتیت با بافت موزاییکی به همراه دانه‌های پیریت-نسل دوم (pyII) به صورت پرکننده فضای خالی، ج) مقطع میکروسکوپی از کانی‌سازی اپیدوت (epd) و اسکاپولیت (scp) ناشی از دگرسانی پسرونده کانی‌های سیلیکات کلسیم‌قلیایی بدون آب، د) تصویر میکروسکوپی از زون کانه‌دار اسکارنی متشکل از پیریت توده‌ای-نسل اول (pyI)، کالکوپیریت (ccp) و مگنتیت همراه با باطله کوارتز (qtz)، ه) رخنمون سنگی از زون گارنت-پیروکسن اسکارن (gr-pyx) در بخش برون‌اسکارن، همراه با بلورهای درشت کلسیت (cc) در سطح، و) رگه تأخیری کوارتز-کانه‌دار در کانسنک مگنتیتی، در امتداد شکستگی‌ها.

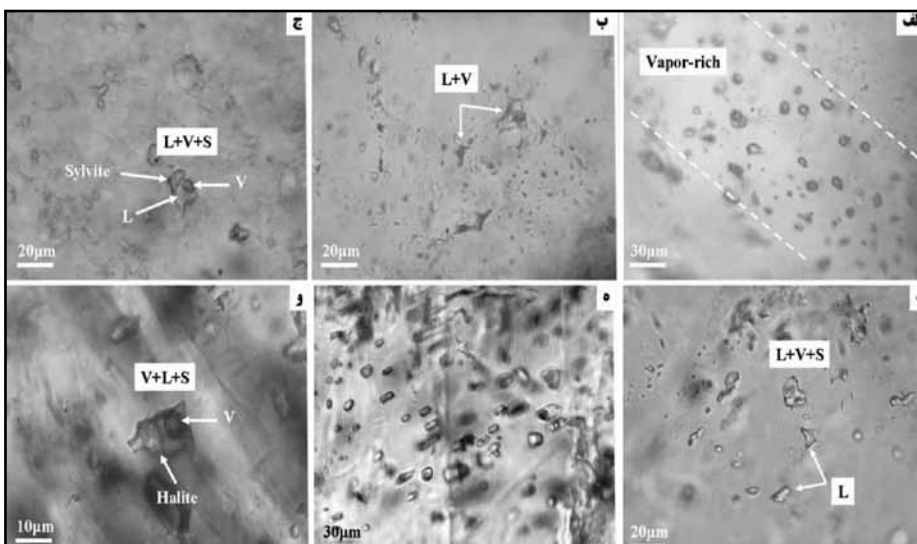
شکل ۶- تصاویر نمونه دستی از بخش‌های مختلف کانسار دردوی، شامل الف) نمونه مغزه دارای کانی‌سازی رگه‌ای پیریت در دو نسل، شامل پیریت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل-نسل دوم (pyII) به صورت پراکنده در زمینه کانسنک و پیریت رگه‌ای-نسل سوم (pyIII) همراه با کالکوپیریت در رگه کوارتز-کانه‌دار تأخیری (ژرفای ۱۳۵ متر)، ب) همان مغزه، متشکل از دو بخش آهک بلورین (مرمر) و کانسنک مگنتیت، که توسط رگه و رگچه‌های کوارتز عقیم قطع شده است، ج) مغزه حفاری، شامل کانی‌سازی پیریت توده‌ای-نسل اول (pyI) و پیروتیت (po) در کانسنک مگنتیتی (ژرفای ۱۷۰ متر)، د) نمونه دستی از بخش کلاهیگ آهنی کانسار، متشکل از گوتیت (geo)، مگنتیت فروشسته (مرکز)، گارنت (gr) به همراه ذرات ریز پیریت و ه) نمونه دستی از مجموعه کانی‌های سیلیکات کلسیم آبدار تر-مسولیت-کتینولیت (tr-act) و اپیدوت (epd) به همراه کلسیت در حاشیه (cc) از زون درون‌اسکارن.



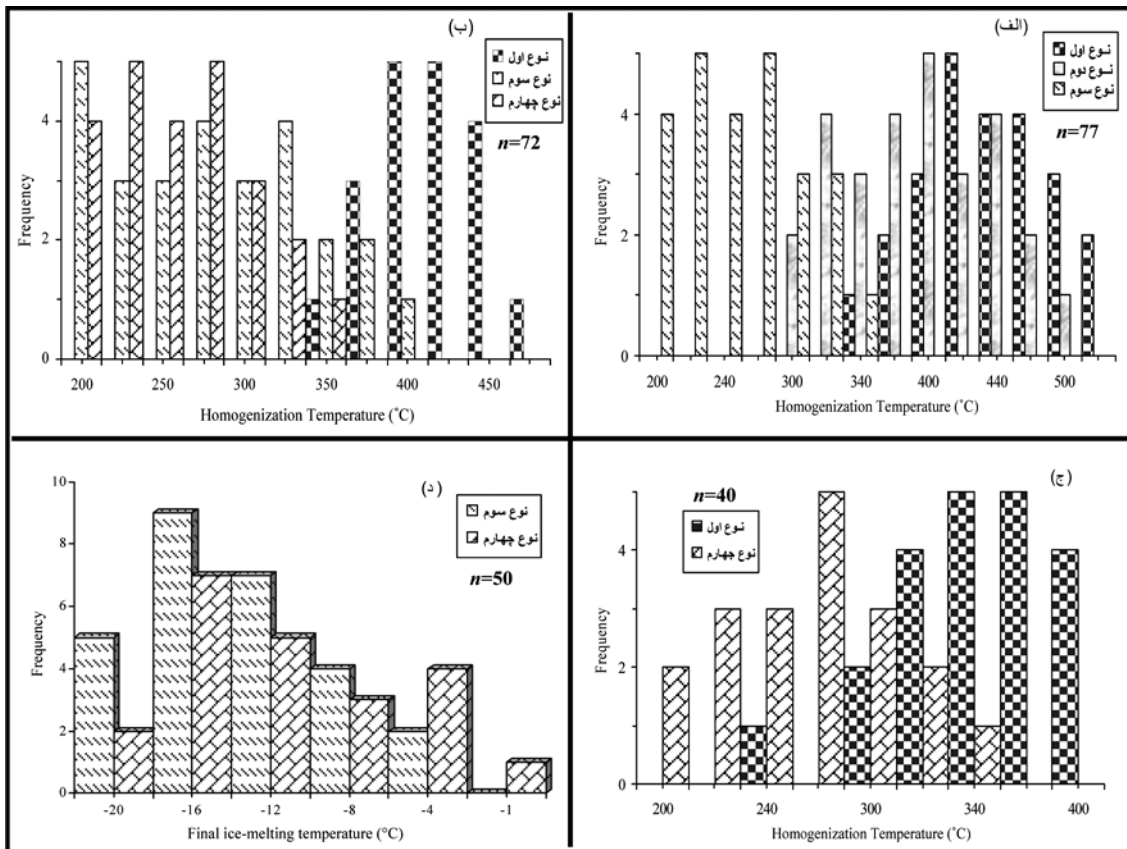
Minerals	Metasomatism stage			Supergene/ weathering
	Progressive	Retrograde	Veins	
Quartz	—	—	—	—
Chlorite	—	—	—	—
Clinopyroxene	—	—	—	—
Garnet	—	—	—	—
Epidote	—	—	—	—
Calcite	—	—	—	—
Magnetite	—	—	—	—
Scapolite	—	—	—	—
Phlogopite	—	—	—	—
Pyrite	—	—	—	—
Pyrrhotite	—	—	—	—
Chalcopyrite	—	—	—	—
Marcasite	—	—	—	—
Amphibole	—	—	—	—
Geothite/limonite	—	—	—	—
Sericite-muscovite	—	—	—	—

شکل ۷- توالی پاراژنزی کانسار در دودی

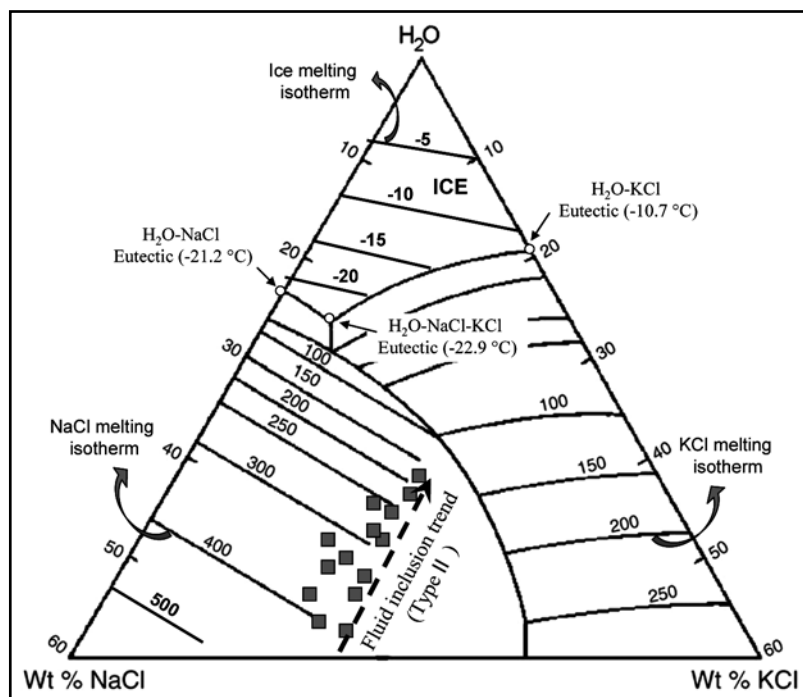
شکل ۸- الف) نیم‌رخ زمین‌شناسی مهم‌ترین واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه و موقعیت کانی‌سازی آهن در آن و ب) موقعیت محل نمونه‌برداری به منظور مطالعات میانبارهای سیال از بخش‌های مختلف کانسار بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه.



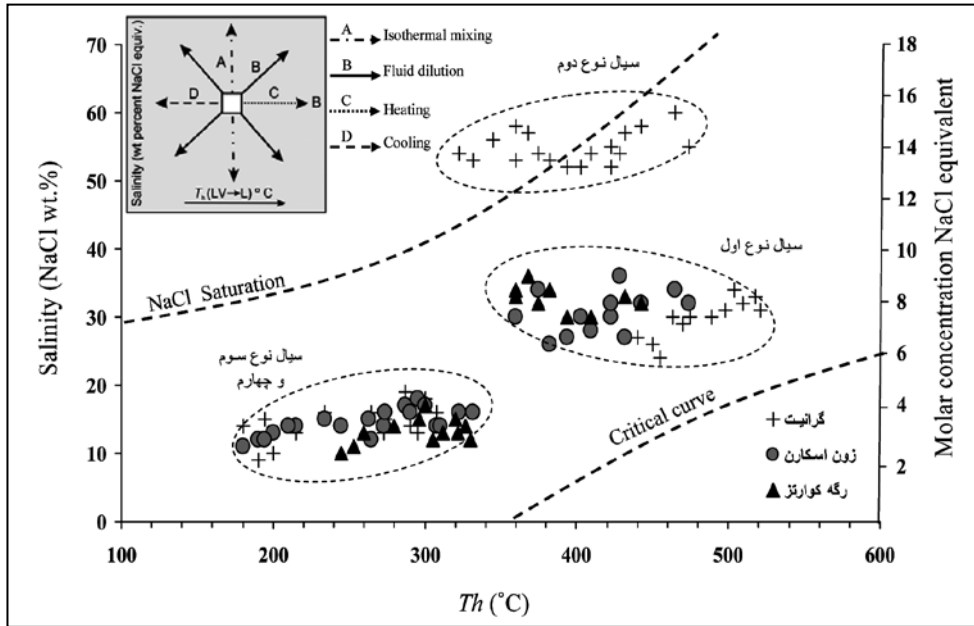
شکل ۹- سنگ نگاری میانبارهای سیال، شامل الف) میانبارهای سیال تک فاز غنی از فاز بخار (نوع چهارم)، ب) میانبارهای سیال دو فاز نوع سوم متشکل از فاز مایع (L) و بخار (V)، ج) سیال سه فاز نوع دوم متشکل از فاز مایع (L)، بخار (V) و جامد (Sylvite)، د) میانبار سیال سه فاز (L+V+S) به همراه میانبارهای تک فاز غنی از مایع، ه) رشد میانبارهای سیال اولیه (P) استوانه‌ای شکل، موازی با خطوط رشد کوارتز، و) سیال سه فاز نوع اول متشکل از فازهای مایع (L)، بخار (V) و جامد (Halite).



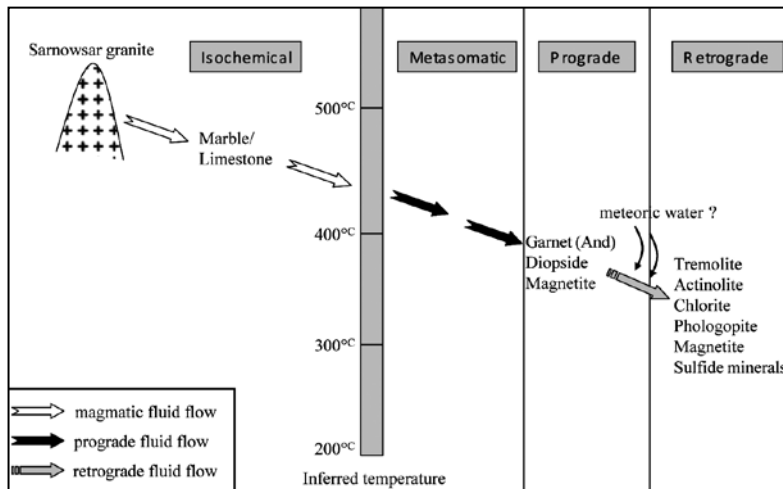
شکل ۱۰- هیستوگرام میان‌بازه‌های سیال اندازه‌گیری شده، شامل الف) گرانیت، ب) زون‌اسکارن، ج) رگه کوارتز و د) دمای ذوب نهایی یخ ($T_{m_{ice}}$) میان‌بازه‌های سیال دو فاز (L+V) و تک‌فازی (V) نوع سوم و چهارم.



شکل ۱۱- نمودار سه‌فازی NaCl-KCl-H₂O (Bodnar and Beane, 1980)، نشان‌دهنده روند ترکیب میان‌بازه‌های سیال سه‌فازی (L+V+S) نوع دوم (جهت پیکان)، بر اساس دمای انحلال فازهای جامد‌هالیت و سیلیت.



شکل ۱۲- نمودار Th-Salinity میان‌بهارهای سیال مورد آزمایش در گرانیته، زون اسکارن و رگه و رگچه‌های کوارتز کانه‌دار. بر اساس این نمودار، بالاترین مقدار شوری و دمای همگن شدن متعلق به میان‌بهارهای سیال توده گرانیته و کمترین مقدار آن متعلق به رگه و رگچه‌های کوارتز و زون اسکارن است. بر اساس نمودار، به نظر می‌رسد فرایندهای آمیختگی هم‌دمای (ایزوترمیک) و رقیق‌شدگی از عوامل مؤثر در تشکیل ذخیره هستند.



شکل ۱۳- تصویر نمادین از مراحل اسکارن‌زایی کانسار در دودی، با در نظر گرفتن مراحل کانی‌سازی، پاراژنز کانی‌ها، دمای تشکیل و نقش سیالات کانه‌ساز در هر مرحله (با تغییرات از Kamvong and Zaw, 2009).

جدول ۱- نتایج تجزیه XRF از نمونه‌های گرانیته سرنوسر (برحسب درصد).

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	L.O.I	Total
Sa-4	69.63	13.21	1.44	2.52	4.6	6.34	0.37	0.56	0.08	0.14	2.27	101.75
Sa-5	69.01	14.60	2.53	2.92	3.53	6.46	0.42	0.44	0.07	0.08	1.34	101.40
Sa-6	71.72	12.16	1.70	2.64	3.53	7.66	0.30	0.44	0.06	0.18	0.37	100.76
Sa-7	71.71	14.95	1.54	1.49	3.94	6.39	0.63	0.44	0.06	0.08	0.14	101.37
Sa-8	71.18	15.35	1.43	1.97	0.48	5.51	0.15	0.23	0.00	0.08	3.08	99.46
Sa-9	72.93	13.35	2.79	1.03	2.90	1.76	0.10	0.35	0.02	0.12	4.18	99.53
Sa-10	69.71	14.85	2.08	2.28	4.54	6.18	0.02	0.36	0.06	0.16	0.22	100.46
Sa-11	68.64	13.42	1.01	3.57	3.42	6.17	0.92	0.37	0.05	0.16	1.85	99.58
Sa-12	75.94	13.29	0.88	0.81	0.36	4.50	0.30	0.08	0.00	0.02	3.48	99.66
Sa-13	70.56	13.50	1.49	4.36	2.98	2.27	0.14	0.29	0.03	0.11	3.78	99.51
Sa-14	62.35	14.54	3.96	5.34	2.77	2.57	0.80	0.48	0.01	0.13	6.31	99.26
Sa-17	74.68	14.14	0.57	1.40	0.19	4.23	0.25	0.43	0.00	0.03	4.97	99.49
Sa-18	62.01	15.43	4.17	4.12	3.96	2.63	2.96	0.50	0.07	0.18	4.53	100.56
Sa-20	70.53	14.70	1.56	1.47	0.18	4.63	0.86	0.27	0.07	0.09	4.04	98.40

جدول ۲- مقایسه کانسار دردوی با کانسارهای اسکارن آهن کلسیمی و منیزی (Einaudi, 1982).

کانسار دردوی	اسکارن آهن منیزی	اسکارن آهن کلسیمی	کانسار ویژگی‌های
حاشیه قاره و زون فرورانش	حاشیه قاره‌ها	جزایر کمانی، حاشیه قاره‌ها	موقعیت زمین ساختی
گرانودیوریت تا گرانیت	گرانودیوریت تا گرانیت	گابرو تا سینیت، عمدتاً دیوریت	ترکیب توده نفوذی
۸۸ میلیون تن با عیار متوسط ۴۰٪ آهن	۵ تا ۱۰۰ میلیون تن با عیار ۴۰٪ آهن	۵ تا ۲۰۰ میلیون تن با عیار ۴۰٪ آهن	تناژ و عیار
Fe (Cu)	Fe (Cu±Zn)	Fe (Cu±Co±Au)	فلزهای اصلی و همراه
کلریت، آمفیبول، فلوگویت، اپیدوت، دیوپسید	فورستریت، کلسیت، دیوپسید، آمفیبول، فلوگویت	گرانیت، سالت، فروسالت، اپیدوت	کانی‌شناسی دگرسانی‌های پیش‌رونده و پس‌رونده
مگنتیت (پیریت+کالکوپیریت+پیروتیت)	مگنتیت (پیریت±کالکوپیریت±سفالریت±پیروتیت)	مگنتیت (کالکوپیریت±کبالتیت±پیروتیت)	کانی‌های فلزی
سریستی و پروپیلیتی	به‌طور فرعی پروپیلیتی	اغلب سیلیکات‌های سدیم‌دار	دگرسانی توده نفوذی
استوک بزرگ، باتولیت	استوک کوچک	استوک بزرگ تا کوچک	ریخت شناسی توده‌نفوذی

جدول ۳- داده‌های میکروتومتری میان‌بارهای سیال. V% : درصد بخار، n : تعداد نمونه‌ها، Tm_{ice} : دمای ذوب نهایی یخ، Th : دمای همگن شدن سیال، P : سیال‌های اولیه، Ps : سیال‌های ثانویه کاذب، S : سیال‌های ثانویه.

Type	Feature	V%	Occurrence	n	Origin	Th _{Sylvite} (°C)	Th _{Halite} (°C)	Th _{total} (°C)	Tm _{ice} (°C)	Salinity NaCl eq.%
I	L+V+S	10-30	Skarn Zone	23	P PS	-----	140-260	380-470	-----	25-33.4
			Granite	32			190-310	430-515		28.3-32.6
			Qtz-vein	25			210-320	355-435		28.7-35.1
II	L+V+S ₁ +S ₂	20-40	Granite	25	P	150-210	250-315	310-475	-----	51.3-60.2
III	L+V, V+L	30-70	Skarn zone	34	P PS S	-----	-----	190-340	-7.3 to -14.2	13.3-17.5
			Granite	22				200-310	-3.1 to -18.7	8.3-19.2
			Qtz-vein	19				185-290	-6.7 to -19.3	12.3-20.8
IV	V	>90%	Skarn zone	21	P S	-----	-----	185-290	-6.7 to -19.3	12.3-20.8
			Qtz-vein	19				235-320	-4.8 to -13.1	10.1-17.4

کتابنگاری

افتخارنژاد، ج.، ۱۳۵۹- تفکیک بخش‌های مختلف ایران از نظر وضع ساختمانی در ارتباط با حوضه‌های رسوبی، نشریه انجمن نفت.

سیاه‌چشم، ک.، کلاگری، ا.، عابدینی، ع.، ۱۳۸۵- ویژگی‌های کانی‌شناسی، دگرسانی متاسوماتیکی و شرایط تشکیل اسکارن آهن پهناور، خاور سپه رود، آذربایجان شرقی، فصلنامه علوم زمین، ۱۰۹-۹۸.

عابدی، ع. ر.، ۱۳۶۸- ژنز کانسار آهن سنگان خراسان، پایان‌نامه دوره کارشناسی دانشگاه فردوسی مشهد، ۹۶ صفحه.

کریم‌پور، م. ح.، سعادت، س.، و ملک‌زاده سفارودی، آ.، ۱۳۸۱- شناسایی و معرفی کانی‌سازی نوع Fe-Oxide Cu-Au و مگنتیت مرتبط با کمر بند ولکانیکی-پلوتونیک خواف-کاشمر-بردسکن، بیست و یکمین گردهمایی علوم زمین.

کریم‌پور، م. ح.، و ملک‌زاده سفارودی، آ.، ۱۳۸۶- ژئوشیمی و کانی‌شناسی زون‌های اسکارنی و سنگ‌شناسی سنگ منشأ کانسار آهن سنگان خراسان رضوی، فصلنامه علوم زمین، ۱۲۵-۱۰۸.

کیانپور، ر.، ۱۳۸۷- بررسی کانی‌شناسی، ژئوشیمی، دگرسانی و ژنز کانسار آهن سنگان در ناحیه دردوی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، ۲۵۰ صفحه.

گزارش اکتشافات مقدماتی آنومالی‌های غربی سنگ آهن سنگان، ۱۳۶۹- شرکت ملی فولاد ایران، ۱۳۰ صفحه.

گزارش اکتشافات تفصیلی، ژئوفیزیک و حفاری آنومالی‌های آهن دردوی و باغک (معادن سنگان)، ۱۳۸۵- شرکت مهندسی مشاور معدنکاو، ۲۳۰ صفحه.

شرح نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ تایید، ۱۳۶۹- سازمان زمین‌شناسی کشور.

References

Alavi, M., 1991- Tectonic map of the Middle East: Tehran, Geological Survey of Iran, Scale 1:5,000,000.

Barnes, H.L., 1997- Geochemistry of hydrothermal ore deposits, John Wiley and sons, 780p.

- Bodnar, J., 1983- A method of calculated fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameter and P-V-T-X properties on inclusion fluid, *Economic Geology*, 78, 535-542.
- Bodnar, R.J. and Beane, R.E., 1980- Temporal and spatial variation in hydrothermal fluid characteristics during vein filling in pre ore cover overlying deeply buried porphyry copper-type mineralization at Red Mountain, Arizona. *Economic Geology*, 75, 876-893.
- Boomeri, M., 1998a- Petrography and geochemistry of the Sangam iron skarn deposit and related igneous rocks, northeastern Iran, Ph. D thesis, Akita Univ, Japan, 226 p.
- Boomeri, M., 1998b- Geochemical characteristics of halogen-bearing hastingsite, scapolite and phlogopite from the Sangam iron skarn deposits, northeastern Iran, *Journal. Min. Petr. Economic Geology*, 92, 481-501.
- Brown, P.E., 1989- FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *Amer. Mineral*, 74, 1390-1393.
- Crawford, M.L., 1981- Phase equilibrium in aqueous fluid inclusions. In: Hollister, L.S., Crawford, M.L. (eds.), *Short course in Fluid Inclusions: Application to Petrology*. Mineralogical Association of Canada, 6, 157-181.
- Crosbie, T.R., 1981- Polished wafer preparation for fluid inclusion and other studies. *Trans. Instn Min. Metall*, 90, B82-83.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1992- An introduction to the rock forming minerals. Second edition, Longman Scientific and Technical, 696 p.
- Drummond, S.E. and Ohmoto, H., 1985- Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology*, 80, 126-147.
- Einaudi, M.T., 1982- General features and origin of skarn associated with porphyry copper plutons. *Adv. Geol. Porphyry Copper Deposits: Southwest. North Am.*, 185-210.
- Einaudi, M.T., Meinert, L.D. and Newberry, R.J., 1981- Skarn deposits. *Economic Geology*, 75th Anniversary volume, 317-91.
- Förster, H. and Jafarzadeh, A., 1994- The Bafq Mining District in Central Iran-a Highly Mineralized Infracambrian Volcanic Field, *Economic Geology*, 89, 1697-1721.
- Gill, J.B., 1981- *Orogenic andesite and plate tectonics*, Springer Verlag, New York, 390p.
- Hall, D.L., Sternert, S.M. and Bodnar, R.J., 1988- Freezing point depression of NaCl-KCl- H₂O, *Economic Geology*, 65, 123-140.
- Hass, J.L., 1971- The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure, *Economic Geology*, 66, 940-946.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971- A guide to the Chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 523-548.
- Lentz, D.R., 2000- Mass-balance consideration in mineralized skarn systems: implication for permeability evolution and carbonate mobility. Available on <http://www.cseg.ca/conferences/2000/1037.PDF>
- Kamvong, T. and Zaw, Kh., 2009- The origin and evolution of skarn-forming fluids from the Phu Lon deposit, northern Loei Fold Belt, Thailand: Evidence from fluid inclusion and sulfur isotope studies. *Journal of Asian Earth Sciences* 34, 624-633.
- Kermani, A. and Förster, H., 1991- Petrographic, mineralogical and geochemical investigations of the Sangam ore deposit, Northeastern Iran: Third mining symposium Iran.
- Mollai, H., Sharma, R. and Pe-Piper, G., 2009- Copper mineralization around the Ahar batholith, north of Ahar (NW Iran): Evidence for fluid evolution and the origin of the skarn ore deposit. *Ore Geology Review* 35, 401-414.
- Niiranen, T., Manttari, I., Poutiainen, M., Nicholas, H.S. and Jodie, A., 2005- Genesis of Palaeoproterozoic iron skarns in the Misi region, northern Finland. *Mineralium Deposita* 40, 192-217.
- Park, Jr.C.F. and Mac Diarmid, R.A., 1975- *Ore deposits*, 3rd ed., W.H. Freeman and Co. 522p.
- Pearce, J.A. and Can, J.R., 1984- Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using elements analysis, *Earth Planet*, 290-300.
- Roedder, E., 1984- Fluid Inclusions, *Reviews in Mineralogy* 12, Mineralogical Society of American, 646p.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H., 1985- *A practical guide to fluid inclusion studies* Glasgow, Blackie and Sons, 239p.
- Singoyi, B. and Zaw, Kh., 2001- A petrological and fluid inclusion study of magnetite-scheelite skarn mineralization at Kara, Northwestern Tasmania: Implications for ore genesis. *Chemical Geology*, 173, 239-253.
- Stewart, D.B. and Potter, R.W., 1979- Application of physical chemistry of fluids in the rock salt at elevated temperature and pressure to repositories for radio active waste. In: Mc Carthy, G.J. (eds), *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*, V. 1. Plenum, New York, 297-311.
- Stöcklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran. A review, *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 52, 1229-1258.
- Vallance, J., Fontboté, L., Chiaradia, M., Markowski, A., Schmidt, S. and Vennemann, T., 2009- Magmatic-dominated fluid evolution in the Jurassic Nambija gold skarn deposits (southeastern Ecuador). *Mineralium Deposita* 44, 389-413.
- Wilkinson, J.J., 2001- Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits, *Lithos*, 55, 229-272.