

۳-۶. داسیت (E^a)

این واحد جوان‌ترین واحد آتشفشانی در محدوده کانسار چشمه‌حافظ است و در ارتفاعات خاوری دره چشمه‌حافظ و نیز در حد فاصل تونل قربان تا تونل گاوی گسترش دارد که در مورد دوم میزبان رگه نیز است. رنگ چیره آن در سطح هوازده، خاکستری است و گاه به سبب هوازده‌گی و تشکیل اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن به رنگ اخزایی مایل به قهوه‌ای صورتی دیده می‌شود. این سنگ در حد فاصل تونل قربان تا تونل گاوی در اثر دگرسانی رسی به رنگ سفید مایل به کرم دیده می‌شود که با توجه به میزان گسترش می‌توان آن را به صورت یک واحد جدا از هم در نظر گرفت که در اینجا با عنوان داسیت دگرسان (E^{ad}) معرفی می‌شود (شکل ۲).

۴- زمین‌شناسی ساختمانی منطقه چشمه‌حافظ

در منطقه چشمه‌حافظ، سه دسته گسل قابل تشخیص است (شکل ۲).
 ۱) گسل‌های شمال خاوری- جنوب باختری، این دسته از گسل‌ها بیشترین فراوانی را نسبت به دیگر گسل‌ها دارد و برخی از رگه‌ها مانند رگه گردنه توتو، هم‌امتداد با این دسته از گسل‌هاست. ۲) گسل‌های شمالی- جنوبی، این دسته نسبت به گروه نخست فراوانی کمتر اما اهمیت بیشتری از نظر کانی‌سازی دارد. رگه چشمه‌حافظ، هم‌امتداد با این دسته از گسل‌هاست. ۳) گسل‌های خاوری- باختری. این دسته، فراوانی کمتری نسبت به گروه نخست دارد. بیشتر رگه‌های کلیستی منطقه چشمه‌حافظ، هم‌امتداد با این دسته از گسل‌هاست. این گسل‌ها سبب قطع شدن و جابه‌جایی رگه چشمه‌حافظ شده‌اند.

۵- کانه‌زایی

کانسار چشمه‌حافظ از دو رگه اصلی کوارتز - سولفید به نام‌های چشمه‌حافظ - چهارسنگ و گردنه توتو و تعدادی رگه فرعی کوارتز و نیز رگه کلیست تشکیل شده است که از این میان، رگه چشمه‌حافظ - چهارسنگ مهم‌ترین رگه کانه‌دار است که در این پژوهش به نام چشمه‌حافظ معرفی شده است (شکل ۳-۱). این رگه دارای طول ۱۸۰۰ متر و ستبرای ۰/۳ تا ۵ متر است و به طور ناپیوسته در سطح زمین نمایان است. امتداد و شیب رگه در طول آن تا حدی متغیر است به گونه‌ای که در شمالی‌ترین بخش (در محل تونل قربان) امتداد N5W و شیب 58SW دارد (شکل ۴-۱)؛ در بخش میانی (در موقعیت تونل گاوی) امتداد N15W و شیب 45SW دارد و در موقعیت تونل آبی دارای امتداد N20W و شیب حدود 55SW است. بیشترین حجم عملیات استخراجی کهن در تونل آبی انجام شده است. طولانی‌ترین رخنمون پیوسته رگه و همچنین بیشترین ستبرای آن در بخش‌هایی دیده می‌شود که سنگ میزبان آن آندزیت بازالتی است.

رگه چشمه‌حافظ از کوارتز دانه‌ریز تا دانه‌درشت و همین‌طور کالسدونی و ژاسپروید تشکیل شده است که در بخش‌هایی از آن بافت‌های شاخص کانسارهای اپی‌ترمال مانند بافت‌های نواربندی قشرگون متقارن و نامتقارن، کولو فورم، شانه‌ای و برشی دیده می‌شود (مقایسه شود با Hedenquist et al., 2000). بافت نواربندی قشرگون، شامل تناوبی از کالسدونی به رنگ خاکستری، ژاسپروید و کوارتز شیری‌رنگ است که در بخش مرکزی آن کوارتز دانه‌درشت‌تر دیده می‌شود (شکل‌های ۴ و ۵) و گاه با هماتیت (اسپیکولاریت)، کالکوسیت و مالاکیت همراهی می‌شود. در برخی بخش‌ها در امتداد رگه، قطعات کوارتز با بافت نواربندی قشرگون و دارای گالن، توسط کالسدونی دربرگرفته شده است که نشان از برشی شدن و نهشت دوباره سیلیس و تکرار تکاپوی سیال گرمایی دارد (شکل ۵-۱).

گالن، کانی فلزی اصلی تشکیل‌دهنده کانسنگ است و بیشتر با کالکوپیریت، بورنیت، اسفالریت، پیریت و تتراهدريت همراهی می‌شود (شکل‌های ۶-۱، A و B). کانی‌های سولفیدی عموماً بین ۰/۵ تا ۳ درصد از حجم رگه را تشکیل

دربرمی‌گیرد. مجموعه‌ای از توده‌های نفوذی نیمه‌ژرف تا ژرف شامل تونالیت تا کوارتزیدوریت پورفیری و گرانودیوریت، توالی‌های آتشفشانی را قطع کرده است. سنگ‌های آذرین رشته‌کوه تروود- چاه‌شیرین، کالک‌آلکان با پتاسیم بالا تا شوشونیتی هستند و در نمودار بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (McDonogh & Sun, 1995) با غنی‌شدگی عناصر LILE مانند Ba، Cs، Rb، Th و K، نسبت بالای LREE/HFSE و LILE/HFSE و تهی‌شدگی عناصر HFSE مانند Nb و Ta، Ti، Zr مشخص می‌شوند (حقیقی، ۱۳۸۹؛ Hassan Zadeh et al., 2002). Verdel, 2008; Shamanian et al., 2004) که نشان‌دهنده تشکیل آنها در کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای است (مقایسه شود با Pearce & Peate, 1995).

۳- زمین‌شناسی محلی کانسار چشمه‌حافظ

در محدوده کانسار چشمه‌حافظ و پیرامون آن، سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری گسترش دارند (شکل ۲). این سنگ‌ها به طور چیره شامل گدازه‌های تراکی آندزیت، آندزیت بازالتی، داسیت و مواد آذرآواری ائوسن هستند که در ادامه توصیف می‌شوند.

۳-۱- تراکی آندزیت (E^a)

این واحد با راستای عمومی N10-35E و شیب حدود ۳۰ تا ۵۰ درجه به سوی جنوب خاور، بیشترین گسترش را در پیرامون کانسار چشمه‌حافظ دارد. رخنمون‌هایی از این واحد در پیرامون دره چشمه‌حافظ، تونل قربان، تونل آبی و تونل چهارسنگ دیده می‌شود (شکل ۳-۱). واحد یادشده در سطح هوازده به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای تیره و در سطح تازه و ناهوازده به رنگ سبز تیره دیده می‌شود و دارای بافت‌های پورفیریتی و گلوپورفیریتی است که با درشت‌بلورهای پلاژیو کلاز و هورنبلند در زمینه‌ای از پلاژیو کلاز میکرولیتی و شیشه خودنمایی می‌کند.

۳-۲- آندزیت بازالتی (E^{ba})

این واحد نیز گسترش زیادی در محدوده چشمه‌حافظ دارد و در تونل چهارسنگ، تونل آبی و تونل قربان، کمرسنگ رگه را تشکیل می‌دهد. واحد یادشده کمابیش هم‌راستا و هم‌شیب با واحد تراکی آندزیت است. این واحد در رخنمون طبیعی، خاکستری تیره و در سطح تازه و هوازده، سبز تیره است. این واحد از دید کانی‌شناسی شامل درشت‌بلورهای پلاژیو کلاز و کلینوپیروکسن در زمینه میکرولیت و شیشه است.

۳-۳- توف همراه با گدازه تراکی آندزیت (E^t)

این واحد با رنگ سفید متمایل به خاکستری، به صورت پراکنده در ناحیه چشمه‌حافظ رخنمون دارد و بهترین برونزد آن در جنوب دره چشمه‌حافظ دیده می‌شود. واحد یادشده لابه‌بندی نازک تا متوسط دارد و میان‌لایه‌هایی از گدازه‌های تراکی آندزیتی خاکستری به همراه آن دیده می‌شود. واحد توفی قطعات سنگی ریزدانه‌ای دارد که در زمینه‌ای از ذرات در حد سیلت و کمی کلیست قرار گرفته‌اند.

۳-۴- واحد آذرآواری (E^p)

این واحد به رنگ قهوه‌ای تا خاکستری روشن، و شامل انواع برش آتشفشانی جوش‌خورده، آگلومرا، توف برشی و گاه لیتیک توف است. قطعات تشکیل‌دهنده برش آتشفشانی شامل آندزیت و آندزیت بازالتی با اندازه‌های متفاوت است که به هم‌دیگر جوش خورده‌اند. این واحد امتداد چیره شمال خاوری- جنوب باختری با شیبی به سوی جنوب خاور دارد.

۳-۵- تراکی آندزیت، آندزیت و توف (E^{ai})

این واحد در محدوده کارهای اکتشافی و استخراجی رخنمون ندارد، بلکه در خاور و جنوب منطقه چشمه‌حافظ دیده می‌شود و شامل تناوبی از تراکی آندزیت و توف با میان‌لایه‌هایی از گدازه‌های آندزیتی است (شکل ۲). این واحد به دلیل حضور توف، ریختار فرسایش‌پذیر و ملایم دارد.

رسی و سرسیست جایگزین درشت بلورها و به میزان کمتر زمینه سنگ شده است (شکل ۱۰- B). دست کم بخشی از کائولینیت در حاشیه رگه، ناشی از دگرسانی برونزاد در بالای سطح ایستایی است و بخش‌های کائولینیتی در برخی قسمت‌ها به علت حضور اکسیدهای آهن، به رنگ اخراپی تا زرد لیمویی دیده می‌شود.

۸- مطالعه میانبارهای سیال

مطالعه میانبارهای سیال، با تهیه مقاطع دوبرصیقلی با ستبرای ۱۰۰ میکرومتر روی نمونه‌های کوارتز رخنمون‌های سطحی انجام شد. نمونه‌ها از بخش‌هایی از رگه چشمه‌حافظ برداشته شد که گالن همراه با کمی کالکوپیریت دارد. در این نمونه‌ها، سیال‌های درگیر اولیه به صورت پراکنده و جدا از هم و نیز در امتداد زون‌های رشد دیده می‌شود. برخی از ریزشکستگی‌های جوش خورده، که زون‌های رشد را قطع می‌کنند، دارای سیال‌های درگیر شبه‌ثانویه هستند. سیال‌های درگیر ثانویه در امتداد شکستگی‌ها و در مرز بلورها مشاهده می‌شود.

اندازه میانبارهای سیال در نمونه‌ها از کمتر از ۵ میکرومتر تا ۵۰ میکرومتر متغیر است. ولی بیشتر آنها اندازه بین ۵ تا ۲۰ میکرومتر دارند (شکل ۱۱). بیشتر میانبارهای سیال، در دمای اتاق، دو فاز غنی از مایع (مایع + بخار) هستند، به گونه‌ای که حباب‌های بخار، ۵ تا ۳۰ درصد حجم میانبار (انکلوژیون) را فرا گرفته‌اند. تعداد کمی از میانبارهای سیال، غنی از فاز بخار هستند، به گونه‌ای که ۷۰ درصد حجم آنها را فاز بخار تشکیل می‌دهد و برخی تنها از مایع تشکیل شده‌اند. بیشتر میانبارهای سیال، بدون شکل هندسی منظم، گردشده و برخی میله‌ای شکل هستند.

اندازه‌گیری‌های میکروترمومتری با استفاده از سامانه سرمایش و گرمایش میانبار سیال لینکام در سازمان زمین‌شناسی کشور انجام شده است. این دستگاه، توانایی ثبت تغییرات دمای میان ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد را دارد. اندازه‌گیری‌ها روی مجموعه‌های میانبار سیال متمرکز شد. بر پایه Goldstein & Reynolds (1994) یک مجموعه میانبار سیال، بر پایه همراهی سنگ‌نگاری همه میانبارهایی تعریف می‌شود که در یک بازه زمانی خاص در یک زون رشدی یا یک شکستگی تشکیل شده‌اند. از این رو، این داده‌ها معتبرترین داده‌ها در مطالعه میانبارهای سیال هستند. دمای همگن شدن و آخرین دمای ذوب یخ روی ۴۰ میانبار سیال غنی از مایع اندازه‌گیری شد. دمای همگن شدن بی‌درنگ پس از اندازه‌گیری دمای ذوب یخ ثبت شد. در همه اندازه‌گیری‌های میکروترمومتری، میانبارهای سیال به فاز مایع همگن شدند.

دمای همگن شدن بین ۱۳۵ تا ۲۸۵ درجه سانتی‌گراد و دمای ذوب یخ بین ۰/۵- تا ۹/۶- درجه سانتی‌گراد متغیر است (جدول ۳). بر پایه معادله Bodnar (1993) کمترین و بیشترین دمای ذوب یخ، منطبق بر شوری میان ۰/۹ تا ۱۳/۵ درصد وزنی معادل NaCl است (جدول ۳). برای داده‌های شوری در کانسار چشمه‌حافظ، می‌توان الگوی پراکندگی دوگانه در نظر گرفت (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). گروه نخست، شوری بین ۰/۹ تا ۴/۶ درصد وزنی معادل NaCl، و گروه دوم شوری بین ۵/۷ تا ۱۳ درصد وزنی معادل NaCl دارند. الگوی پراکندگی شوری مشابهی توسط مهرابی و قاسمی (۱۳۸۸) گزارش شده است.

۹- ایزوتوپ گوگرد

برای تعیین منشأ گوگرد کانسنگ، ۴ نمونه دارای گالن و کالکوپیریت از بخش‌های مختلف رگه چشمه‌حافظ انتخاب شد. مطالعات کانه‌نگاری نشان می‌دهد که در این نمونه‌ها، گالن و کالکوپیریت مربوط به یک پاراژن و در تعادل بافتی هستند. تجزیه نمونه‌ها در آزمایشگاه G.G.Hatch در دپارتمان علوم زمین در دانشگاه اتاوا کانادا، با استفاده از طیف‌سنج جرمی Finnigan Delta Plus انجام شد. ترکیب ایزوتوپی گوگرد در کانی‌های گالن و کالکوپیریت، به ترتیب بین ۰/۲۵ تا ۱/۳۱- و ۰/۰۶ تا ۱/۳۵- در هزار تغییر می‌کند (جدول ۴). با توجه به نبود کانی‌های سولفاتی در رگه

می‌دهند. روابط بافتی میان این کانی‌ها نشانگر هم‌رشدی و تشکیل همزمان آنهاست. گاه نوارهایی از کوارتز- گالن- کالکوپیریت- بورنیت در رگه دیده می‌شوند. در این نوارها، بورنیت بافت هم‌رشدی با گالن دارد، اما کالکوپیریت توسط بورنیت در برگرفته شده است که نشان می‌دهد کالکوپیریت پیش از بورنیت تشکیل شده است. در بخش‌های سطحی و ژرفاهای کم، کانی‌های سولفیدی اولیه در اثر فرایندهای برونزاد (سوپرژن) به کانی‌های ثانویه تبدیل شده‌اند. برای نمونه می‌توان به تشکیل سروزیت در حاشیه گالن (شکل ۶- A)، کولیت در حاشیه بورنیت و کالکوپیریت (شکل ۶- C) و کولیت در حاشیه گالن اشاره کرد (شکل ۶- C). پدیده جانیشینی سرب توسط مس در گالن، مطابق با سری شرم‌ن است. بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که رنگ تیره نوارهای کالسدونی در بافت قشرگون و کلو فورم، ناشی از حضور هماتیت شعاعی (اسپکولاریت) است (شکل‌های ۶- E و F). توالی همبود (پاراژنز) کانی‌های تشکیل‌دهنده کانسنگ در چشمه‌حافظ، در شکل ۷ نشان داده شده است.

۶- شیمی کانسنگ

برای بررسی عیار فلزات پایه و طلا، نمونه برداری از رگه‌ها به صورت شیاری صورت گرفته است. وزن نمونه‌ها ۲ تا ۳ کیلوگرم است و همه نمونه‌ها برای طلا و فلزهای پایه تجزیه شده‌اند (بدخشان، ۱۳۸۶). این داده‌ها نشانگر کانی‌سازی سرب، روی، مس، نقره و طلا به ترتیب با میانگین عیار ۳ درصد، ۰/۷۶ درصد، ۰/۷ درصد، ۹ گرم در تن و ۴۰۰ میلی‌گرم در تن است (جدول ۱). تغییرات عیار طلا در برابر نقره، مس، سرب و روی در کانسار چشمه‌حافظ در شکل ۸ نشان داده شده است. بر پایه داده‌های موجود، همبستگی ضعیفی میان طلا با مس ($R=0.25$) و نقره ($R=0.22$) دیده می‌شود و همبستگی خاصی میان طلا با سرب ($R=0.06$) و روی ($R=0.04$) وجود ندارد. تجزیه ریز کاو الکترونی کانه‌ها نشان می‌دهد که گالن در کانسار چشمه‌حافظ همواره دارای مقداری نقره، میان ۰/۲۷ تا ۱/۲ درصد مولی است (جدول ۲). اسفالریت فقیر از آهن است (FeS میان ۰/۶ تا ۱/۲ درصد مولی) که این امر سازگار با رنگ زرد روشن آن است.

تجزیه ریز کاو الکترونی پیریت‌های وجه‌دار تا نیمه‌وجه‌دار (شکل ۶- A) نشان می‌دهد که این کانی فقیر از آرسنیک است (۰/۰۲ درصد وزنی آرسنیک)، اما میانگین مقدار نیکل و کبالت آن به ترتیب ۰/۵ و ۱ درصد وزنی است. وجود تتراهدريت نیز در این مطالعات مشخص شده است (شکل ۶- D). برخی از بلورهای گالن مقادیر چشمگیری مس در حاشیه خود دارند که می‌تواند نشانگر جانیشینی سرب توسط مس طی فرایندهای برونزاد باشد.

۷- دگرسانی

دگرسانی کلریتی- کربناتی که با چیرگی کلریت و کلسیت مشخص می‌شود، گسترده‌ترین دگرسانی در محدوده کانسار چشمه‌حافظ است، که می‌توان آن را معادل دگرسانی پروپیلیتی دما پایین (Hedenquist et al., 2000) در نظر گرفت. شدت دگرسانی به سمت رگه‌های کانه‌دار افزایش می‌یابد که این امر نشان‌دهنده ارتباط دگرسانی با کانی‌سازی است (شکل ۳- B). شدت دگرسانی در کمرسنگ‌ها متغیر است، به گونه‌ای که در سنگ‌های آندزیت بازالتی به دلیل فراوانی کانی‌های فرومنیزین شدت بیشتری دارد (شکل ۹). ستبرای هاله دگرسانی در کمرسنگ‌ها از کمتر از یک متر تا ۱۵ متر متغیر است. مطالعه مجموعه دگرسانی با استفاده از پراش پرتو ایکس، نشانگر حضور کانی‌های کوارتز، کلریت، کلسیت، کائولینیت و سرسیست (ایلیت) است. در درون برخی از رگه‌های کوارتز که بافت نواری و قشرگون دارند، نوارهایی از سرسیست به همراه کوارتز دیده می‌شود (شکل ۱۰- A). در بخش‌هایی از رگه که تراکی آندزیت کمرسنگ را تشکیل می‌دهد، کانی‌های

در اثر نفوذ دایک‌ها یا گسلش به بالا صعود کرده است. در صورتی که چنین سیالی تزریق نمی‌شد کانه‌زایی فلزهای پایه نیز صورت نمی‌گرفت.

سیال با شوری بالاتر می‌تواند معرف سیال بازماندی حاصل از جدایش فاز بخار در اثر فرایند جوشش باشد. اما با توجه به نبود شواهد اصلی جوشش (وجود آدولاریا، کلسیت تیغه‌ای، همبود میانبراهای سیال غنی از مایع و غنی از گاز)، نمی‌توان چنین سازوکاری را برای ایجاد سیالی با شوری بالاتر در نظر گرفت. سیال شورتر و داغ‌تر می‌تواند معرف سیالی باشد که همراه خود فلزهای پایه را حمل کرده است، در حالی که سیال با شوری پایین‌تر مسئول کانه‌زایی طلا بوده است (مقایسه شود با Hedenquist et al., 2000).

با توجه به محتوای فلز و کانی‌شناسی کانسنگ، هر دو نوع کمپلکس بی‌سولفیدی و کلریدی مسئول حمل فلزها در کانسار چشمه‌حافظ بوده‌اند. هر چند در کانسار چشمه‌حافظ مقدار طلا و کمپلکس‌های بی‌سولفیدی در سیال در حدی نبوده است که بتواند کانسنگ غنی از طلا ایجاد کند. در محیط‌های اپی‌ترمال و در شرایط احیایی و pH نزدیک به خنثی، طلا به وسیله کمپلکس‌های بی‌سولفیدی، و Zn + Pb و Cu به وسیله کمپلکس کلریدی انتقال می‌یابند؛ نقره می‌تواند به وسیله هر دو نوع کمپلکس انتقال یابد (Seward & Barnes, 1997). از این رو، انتقال طلا تابع شوری سیال نیست، در حالی که انتقال فلزهای پایه کاملاً تابع شوری سیال است و هر چقدر میزان شوری بیشتر باشد، ممکن است فلزهای پایه بیشتری انتقال یابد و می‌توان انتظار کانی‌سازی بیشتری را داشت. این رابطه را می‌توان به نوعی در اکتشاف این فلزها به کار گرفت.

نسبت ایزوتوپی گوگرد سیال کانه‌زا ($\delta^{34}\text{S} = +4/1\%$ تا $-1/6$) نشانگر منبع ماگمایی است. گوگرد ممکن است به طور مستقیم از ماگما، یا به طور غیرمستقیم از تجزیه کانی‌های سولفیدی در سنگ‌های آذرین محل، تأمین شده باشد. منبع ماگمایی گوگرد، شوری به نسبت بالا، و ارتباط مکانی کانه‌زایی با ماگماتیسیم سنوزوییک نشان می‌دهد که بخش مهمی از سیال گرمایی و فلزها از یک منبع ماگمایی تأمین شده است. بر اساس Simmons (1991) و Albinson et al. (2001) سیال‌های گرمایی با شوری بیش از ۵ درصد وزنی معادل NaCl در سامانه‌های زمین گرمایی امروزی دیده نشده است و مقادیر شوری بالاتر ممکن است در ارتباط با ورود یک سیال ماگمایی باشد. این سیال در چشمه‌حافظ با توجه به کانی‌شناسی دگرسانی و باطله و pH نزدیک به خنثی، ماهیت احیایی داشته است، هر چند که حضور هماتیت (اسپیکولاریت) در نواربندی قشرگون نشان‌دهنده افزایش فوگاسیته اکسیژن به صورت محلی است.

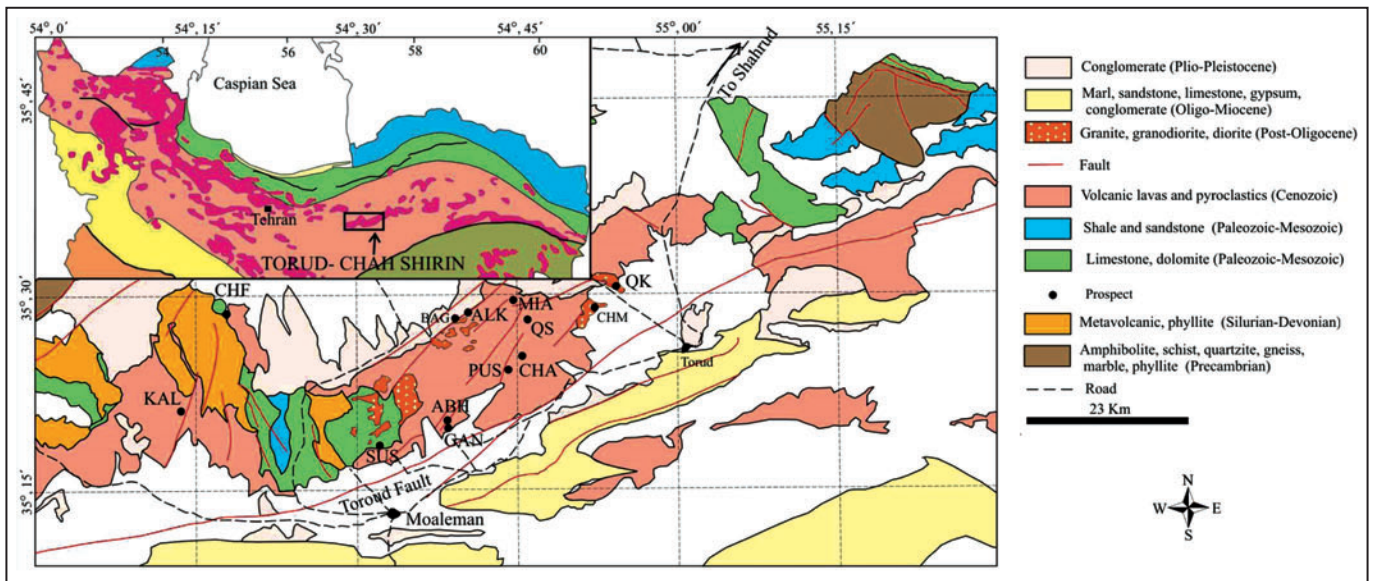
کانی‌شناسی کانسنگ (گالن-کالکوپیریت-بورنیت-اسفالریت-پیریت-تراهدریت)، محتوای فلز (Pb-Cu-Zn-Ag-Au)، نسبت Ag/Au میان ۱۶ تا ۲۵، حضور اسفالریت فقیر از آهن، کانی‌شناسی دگرسانی، بافت و ساخت کانسنگ (پرکننده فضاهای خالی، نوارهای قشرگون و بافت شانه‌ای در کوارتز) و دامنه دما و شوری میانبراهای سیال (به ترتیب، ۱۳۵ تا ۲۸۵ درجه سانتی‌گراد و ۰/۹ تا ۱۳ درصد وزنی معادل NaCl) نشانگر کانه‌زایی از نوع کانسارهای اپی‌ترمال تیپ سولفیدی شدن متوسط است (مقایسه شود با Hedenquist et al., 2000, John, 2001, Sillitoe & Hedenquist, 2003). کانسار چشمه‌حافظ از بسیاری جهات قابل مقایسه با کانسارهای گندی و ابوالحسنی (Shamanian et al., 2004) در ۱۵ کیلومتری جنوب باختر و باختر آن است. کانی‌شناسی دگرسانی در کانسار چشمه‌حافظ نشان‌دهنده طیفی از ذخایر سولفیدی شدن متوسط است که به سمت ذخایر سولفیدی شدن پایین گرایش دارند (مقایسه شود با Simmons et al., 2005) معمولاً این گونه از ذخایر سولفیدی شدن متوسط در مقایسه با ذخایر مرتبط با نوع سولفیدی شدن بالا میزان بیشتری از برهم‌کنش سیال-سنگ نشان می‌دهند و حجم کمتری از سیال ماگمایی در تشکیل آنها نقش داشته است (مقایسه شود با Simmons et al., 2005).

و در کمرسنگ‌های دگرسان‌شده، می‌توان فرض کرد که سیال کانه‌دار احیایی بوده است و کانی‌های سولفیدی در تعادل با سیال دارای H_2S نهشته شده‌اند. با استفاده از فاکتور تفکیک ایزوتوپی سولفید- H_2S (Li & Liu, 2006) و مقادیر بیشترین و کمترین دمای سیال درگیر، ترکیب ایزوتوپی گوگرد سیال گرمایی بین ۰/۸ تا ۴/۱ در هزار (برای H_2S در تعادل با گالن) و ۰/۲ تا ۱/۶- در هزار (برای H_2S در تعادل با کالکوپیریت) تعیین می‌شود (جدول ۴). ترکیب ایزوتوپی گوگرد این دو کانی، منطبق بر مقادیر ایزوتوپی پذیرفته‌شده برای گوگرد ماگمایی است (Ohmoto, 1986; Ohmoto & Goldhaber, 1997). دماهای داماسنجی ایزوتوپی با استفاده از جفت گالن-کالکوپیریت (حقیقی، ۱۳۸۹) بیش از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است که بسیار بالاتر از دماهای همگن شدن میانبراهای سیال است و با ویژگی‌های اصلی کانی‌سازی در چشمه‌حافظ هماهنگ نیست. این امر ناشی از نبود تعادل ایزوتوپی میان این دو کانی است، اگر چه کانی‌های یادشده در تعادل بافتی با یکدیگر هستند. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که تعادل بافتی همیشه به مفهوم تعادل ایزوتوپی نیست. برقراری تعادل ایزوتوپی، نیازمند سرد شدن آرام سیال کانه‌دار به هنگام تبلور کانی‌ها است (Ohmoto & Goldhaber, 1997)، فرایندی که در محیط‌های اپی‌ترمال کمتر ممکن است رخ دهد.

۱۰- بحث و نتیجه‌گیری

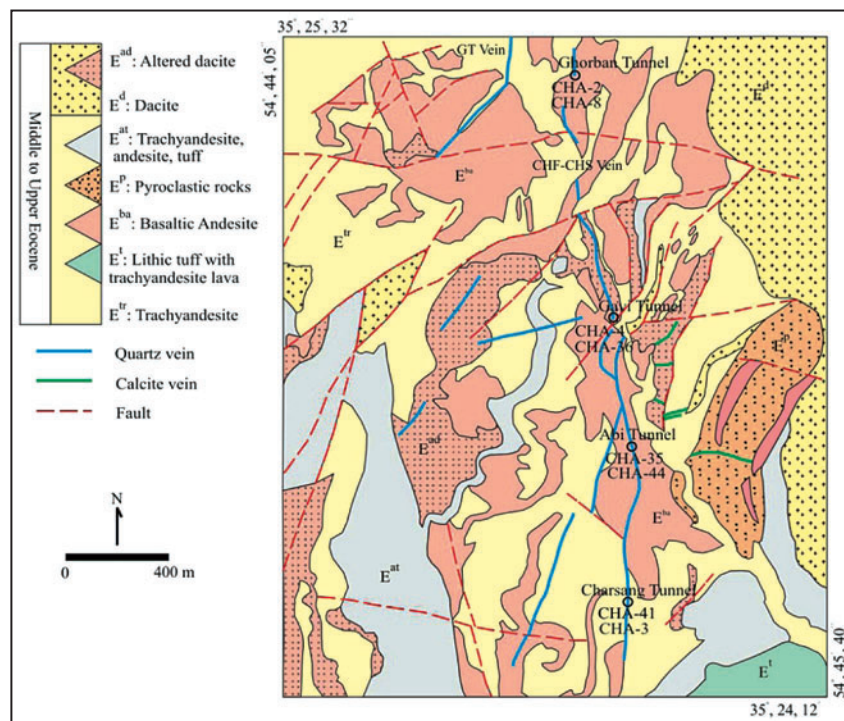
کانسار چشمه‌حافظ شامل کانی‌سازی رگه‌ای چندفلزی (Pb-Cu-Zn-Au-Ag) در سنگ میزبان آندزیت بازالتی و داسیت است. مهم‌ترین رگه کانه‌دار به نام چشمه‌حافظ، به طور ناپیوسته در حدود ۱۸۰۰ متر در راستای عمومی شمالی-جنوبی امتداد دارد. کانی‌سازی درون‌زاد شامل کالسدونی، کوارتز دانه‌ریز تا دانه‌درشت و ژاسپروید، همراه با گالن (به عنوان فاز چیره)، کالکوپیریت، بورنیت، اسفالریت، پیریت، تراهدریت، هماتیت (اسپیکولاریت) و سیدریت است. کانی‌های سولفیدی عموماً ۰/۵ تا ۳ درصد از حجم رگه را تشکیل می‌دهند و میانگین مجموع عبار فلزهای پایه حدود ۴ درصد است. فرایندهای برون‌زاد سبب تبدیل کانی‌های درون‌زاد (هیوژن) مس به کوولیت و مالاکیت و نیز تبدیل گالن به سروزیت شده است. در همین مرحله، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن نیز تشکیل شده است. در بخش‌های مختلف رگه، نوارهای قشرگون با پهنای چند میلی‌متر دیده می‌شود که از کالسدونی خاکستری، کوارتز شیری و ژاسپروید به همراه کانی‌های فلزی تشکیل شده است. در برخی بخش‌های رگه آثار برش گرمایی نیز دیده می‌شود. وجود نواربندی قشرگون و شانه‌ای، نشان‌دهنده تشکیل رگه در چند مرحله و توسط چند پالس از سیال کانه‌زا است. افزون بر رگه اصلی، چند رگه کوچک‌تر از کوارتز و کلسیت نیز در راستای شمال‌خاور-جنوب باختر رخمون دارند. رگه‌های کلسیت کانه‌زایی ندارند.

بر پایه مطالعه میانبراهای سیال، سیال مسئول کانی‌سازی در کانسار چشمه‌حافظ، دما و شوری پایین تا متوسط داشته که این امر سازگار با کانی‌شناسی کانسنگ است. داده‌های شوری، الگوی توزیع دوگانه دارند که این امر می‌تواند در ارتباط با ورود یک سیال گرمایی با شوری و دمای بالاتر باشد که در پی بازشدگی دوباره رگه تزریق شده است. وجود نواربندی قشرگون متقارن و نامتقارن در بخش‌های مختلف رگه نشانگر رخداد چنین پدیده‌ای است. تغییرات زیاد شوری در یک نمونه نیز می‌تواند در ارتباط با همین موضوع باشد. گرچه به طور کلی نمی‌توان میان شوری و دمای همگن‌شدن، همبستگی مشاهده کرد، اما در مقیاس یک نمونه، نوعی همبستگی دیده می‌شود که خود می‌تواند دلیلی بر الگوی هم‌آمیزی سیال باشد (Camprubi et al., 2006). الگوی شوری دوگانه را می‌توان به ورود یک سیال با شوری بالاتر به درون سیالی با شوری پایین‌تر نسبت داد، پدیده‌ای که توسط Simmons (1991) و Albinson et al. (2001) از کانسار فرسنیلو در مکزیک گزارش شده است. به نظر این پژوهشگران، این سیال شورتر منشأ ماگمایی داشته و احتمالاً

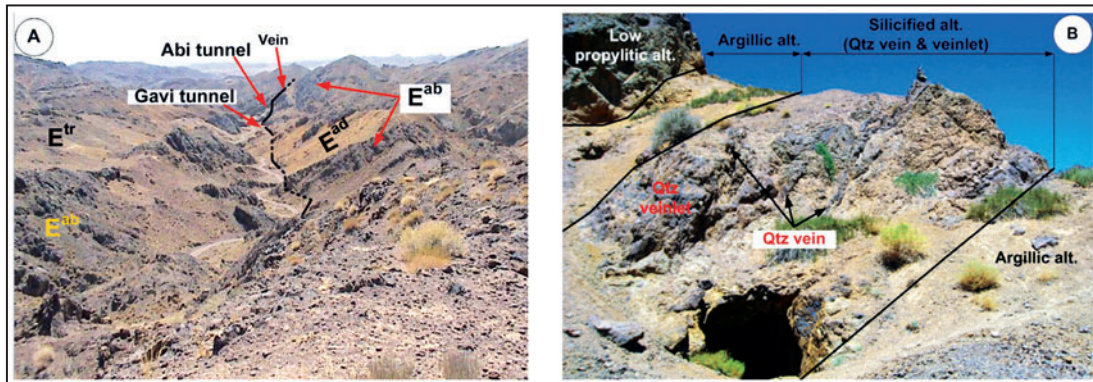


شکل ۱- نقشه زمین شناسی ساده شده ترود-چاه شیرین (بر پایه هوشمندزاده و همکاران، ۱۳۵۷). موقعیت رشته کوه ترود-چاه شیرین در نقشه ساختاری شمال ایران در تصویر کوچک مشخص و محل ذخایر فلزهای پایه و گرانبها در این رشته کوه نشان داده شده است.

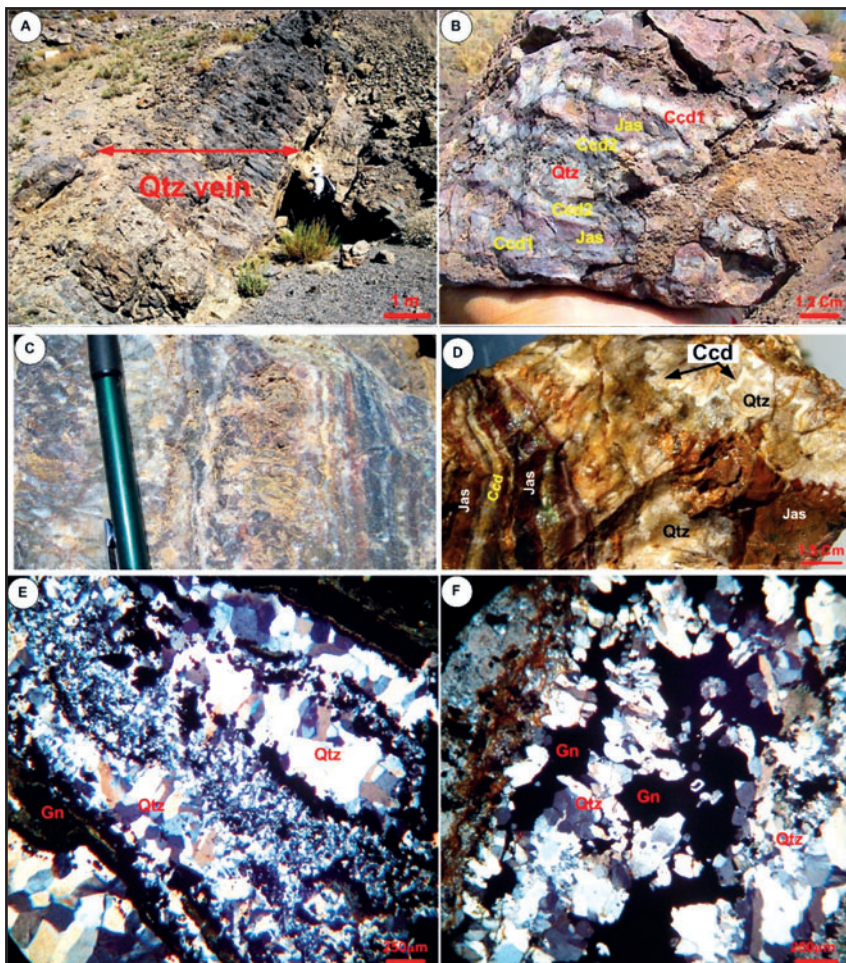
ABH: Abolhassani Pb-Cu; ALK: Alikhan Cu; BAG: Baghou Au; CHA: Cheshmeh Hafez Pb-Cu; CHM: Chah Mosa Cu; CHF: Chah Farakh Cu; GAN: Gandi Pb-Zn-Cu-Au; KAL: Kalut Cu; LAR: Larestan Pb; MIA: Mirali Cu-Au; PUS: Pusideh Pb-Cu; QK: Qoleh Kaftaran Pb-Zn; QS: Qoleh Soukhteh Cu; SUS: Susanvar Pb-Zn.



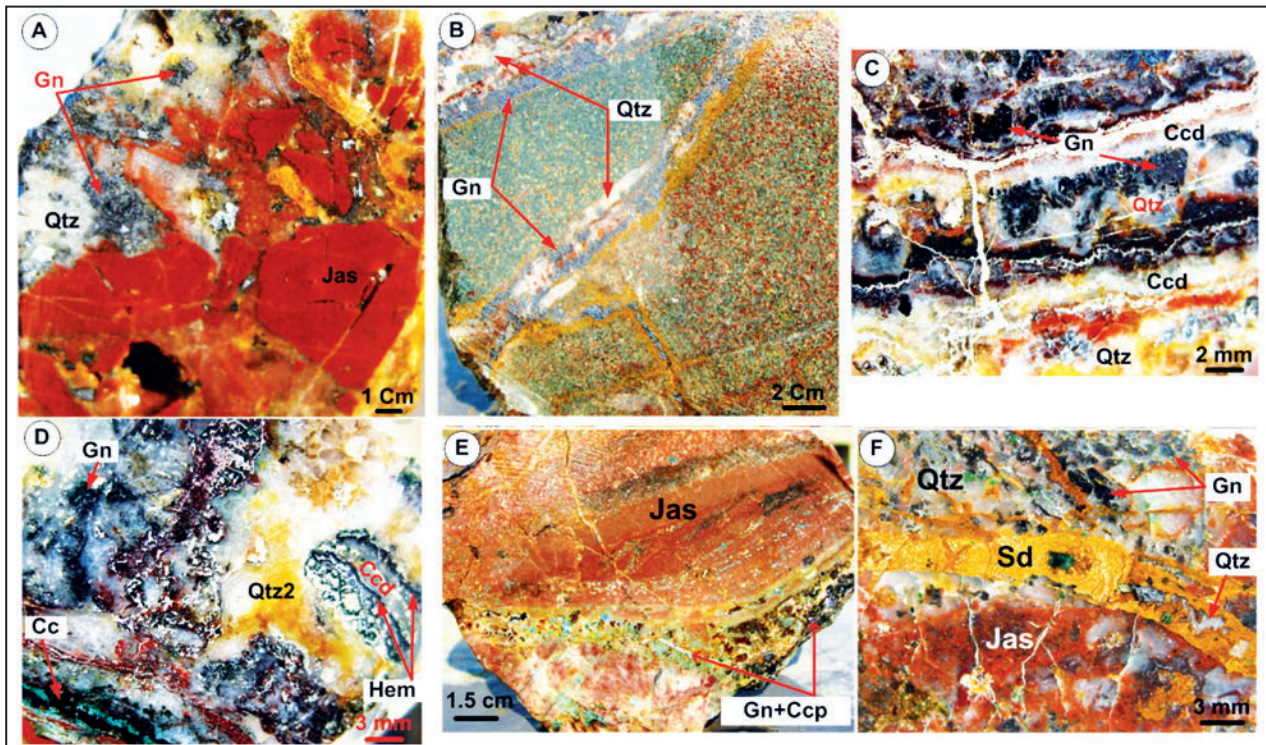
شکل ۲- نقشه زمین شناسی کانسار چشمه حافظ (بدخشان، ۱۳۸۶، با تغییرات). موقعیت تونل های استخراجی کهن، نمونه های مطالعه شده برای ایزوتوپ گوگرد و میانبرهای سیال و نیز ادامه جنوب باختری رگه گردنه توتو در شمال نقشه نشان داده شده است. رگه گردن توتو؛ CHA-CHS؛ رگه چشمه حافظ - چهار سنگ.



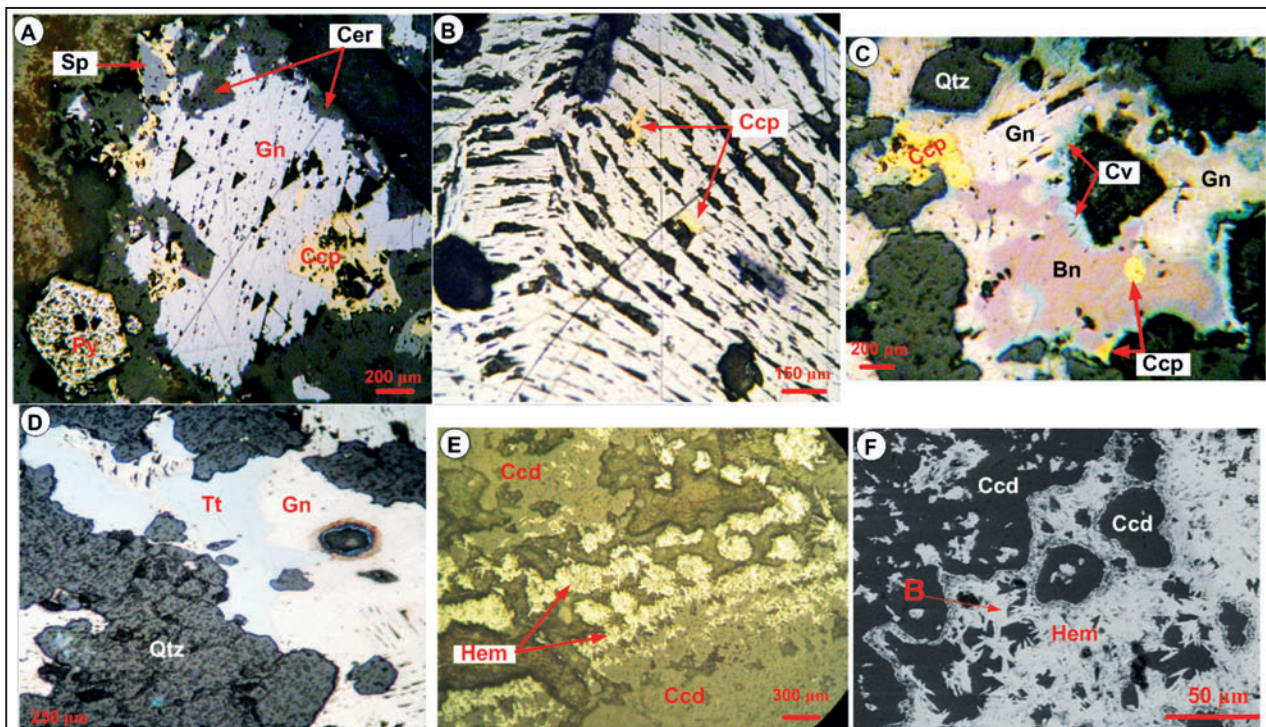
شکل ۳- نمایی از واحدهای سنگی و رگه کانهدار در کانسار چشمه‌حافظ. (A) رخنمون آندزیت بازالتی (E^{ab})، تراکی آندزیت (E^{tr}) و داسیت دگرسان (E^{ad}) در پیرامون رگه چشمه‌حافظ. محل تونل‌های گاوی و آبی نیز نشان داده شده است (دید به سوی جنوب) و (B) نمایی از رگه کوارتز (Qtz) - سولفید چشمه‌حافظ. در حاشیه رگه در سنگ میزبان داسیتی، دگرسانی رسی رخ داده که توسط دگرسانی کلریتی یا پروپیلی تیک دربر گرفته شده است (دید به سوی شمال).



شکل ۴- بافت‌های کانسنگ در رگه چشمه‌حافظ. (A) نمایی از رگه کوارتز در محل تونل قربان؛ (B) نواربندی قشرگون توسط کالسدونی (Ccd) و ژاسپروید (Jas) در محل تونل گاوی؛ (C) نواربندی قشرگون نامتقارن شامل کالسدونی به رنگ خاکستری، کوارتز شیری (Qtz)، همراه با ژاسپروید در رگه تونل قربان. بخش مرکزی رگه دارای حفره است؛ (D) نواربندی میان ژاسپروید و کالسدونی و بافت کولفورم میان کوارتز شفاف و شیری رنگ در رگه کانهدار چشمه‌حافظ؛ (E) تصویر میکروسکوپی از بافت نواربندی قشرگون میان هماتیت (اسپیکولاریت)، کوارتز شیری، کالسدونی و گالن (Gn) (نور XPL) و (F) تصویر میکروسکوپی از بافت شانه‌ای و قشرگون در رگچه‌ها. بخش تیره در مرکز رگچه گالن است (نور XPL).



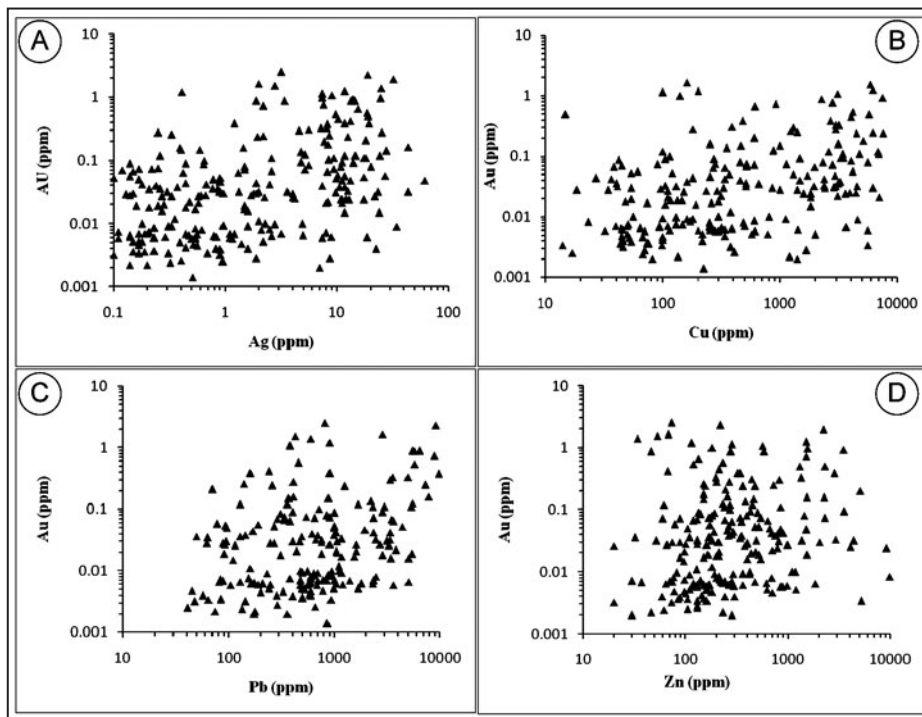
شکل ۵- بافت‌های کانسنگ در رگه چشمه‌حافظ. (A) برشی شدن ژاسپروید (Jas) و نهشت کوارتز شفاف (Qtz) و گالن (Gn) در اطراف قطعات خردشده. به حضور نداشتن کانه در بخش ژاسپرویدی (Jas) توجه شود؛ (B) تشکیل رگچه‌های کوارتز شیری + گالن در سنگ‌دیواره رگه اصلی چشمه‌حافظ؛ (C) تشکیل بافت نواربندی قشرگون که شامل تناوبی از کوارتز شیری، گالن و کالسدونی است؛ (D) تشکیل بافت نواربندی قشرگون که شامل تناوبی از کالسدونی، کوارتز شفاف، گالن، کالکوسیت (Cc) و مالاکیت است. در پایین تصویر قطعه‌ای برشی با بافت نواربندی قشرگون دیده می‌شود که خود شامل تناوبی از کالسدونی، گالن و هماتیت (Hem) است و توسط کوارتز شیری دربر گرفته شده است؛ (E) حضور نوارهای کالکوپریت و گالن در بخشی از رگه که از تناوب کالسدونی و ژاسپروید تشکیل شده است و (F) بخشی از رگه که شامل تناوبی از کوارتز دانه‌ریز، ژاسپروید، گالن و سیدریت (Sd) است.



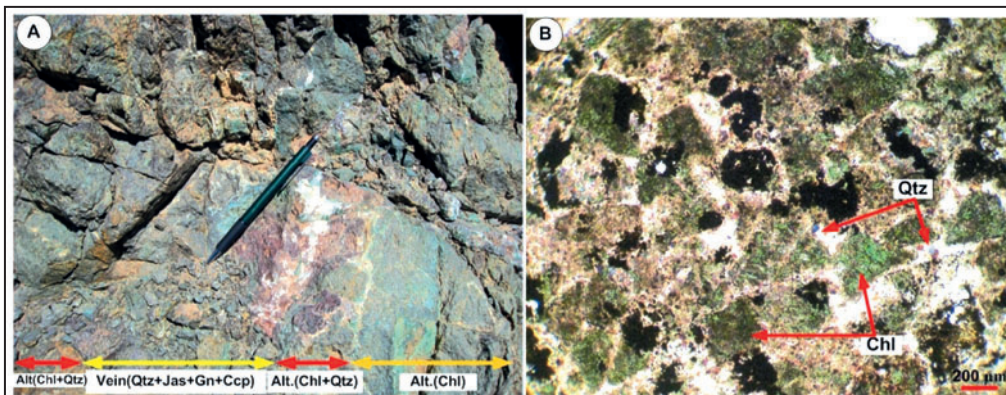
شکل ۶- تصویر میکروسکوپی از کانسنگ در کانسار چشمه‌حافظ. (A) هم‌رشدی گالن (Gn) با کالکوپریت (Ccp)، اسفالریت (Sp) و پیریت (Py)؛ (B) گالن توده‌ای به رنگ خاکستری روشن که دانه‌های کالکوپریت را در بر گرفته است؛ (C) بافت هم‌رشدی میان گالن و بورتیت (Bn) و کالکوپریت. به دربرداری دانه کالکوپریت توسط بورتیت و تشکیل کوولیت (Cv) در حاشیه بورتیت و گالن توجه شود؛ (D) هم‌رشدی میان گالن و تتراهدریت (Tt) در زمینه‌ای از کوارتز (Qtz)؛ (E) بافت کولو فورم و نواری شامل تناوبی از نوارهای کالسدونی (Ccd) دارای هماتیت (اسپکیولاریت) (Hem) و بدون هماتیت (Hem)؛ (F) تصویر پراکنش الکترونی از بافت نواربندی و کولو فورم شامل کالسدونی (Ccd) با هماتیت (اسپکیولاریت) (Hem)

Mineral	stage	Hypogene	Supergene
Galena		—————	
Sphalerite		-----	
Pyrite		-----	
Bornite		—————	
Chalcocopyrite		—————	
Tetrahedrite		—————	
Quartz (fine-coarse)		—————	
Chalcedony		—————	
Jasperoid		-----	
Siderite		-----	
Covellite			
Malachite			
Cerussite			—————
Hematite		-----	—————
Fe-hydroxides			

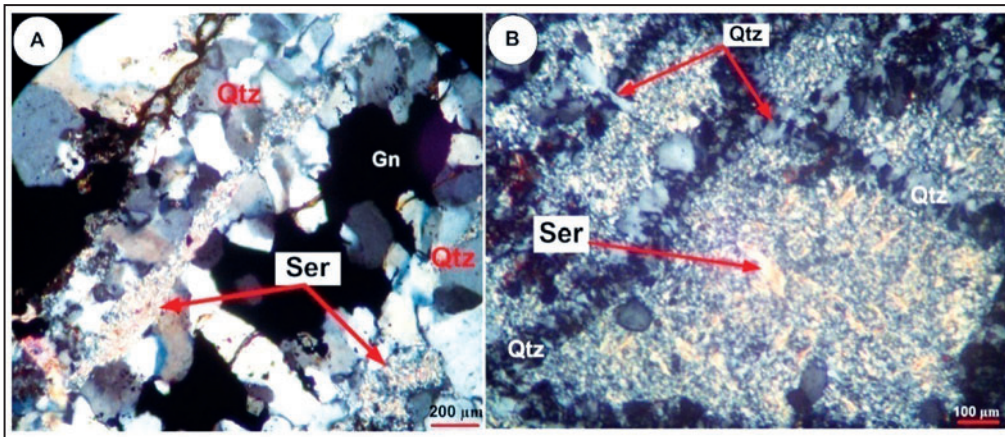
شکل ۷- توالی زایشی کانی‌ها در کانسار رگه‌ای چشمه‌حافظ.



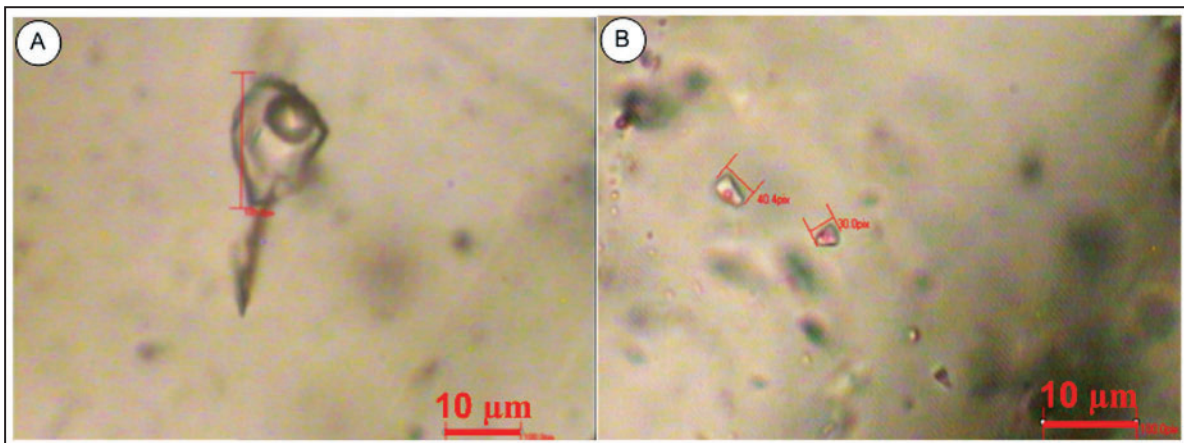
شکل ۸- تغییرات عبار طلا در برابر (A) نقره؛ (B) مس؛ (C) سرب و (D) روی در کانسار چشمه‌حافظ.



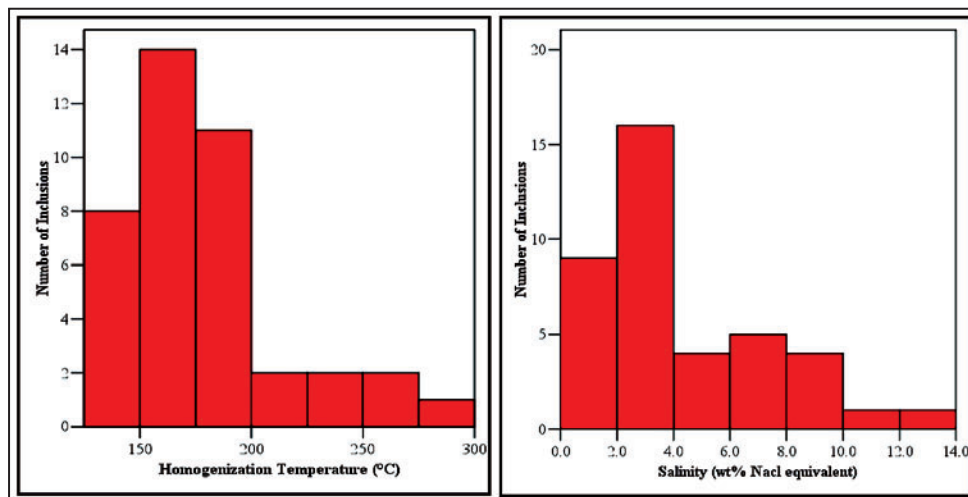
شکل ۹- نمایی از دگرسانی کلریتی (Chl) در حاشیه رگه. (A) دگرسانی کلریتی در سنگ دیواره آندزیت بازالتی در رگه چشمه‌حافظ و (B) لیتیک توف در کنار رگه که به شدت کلریتی و سیلیسی شده است (نور XPL). Qtz: کوارتز؛ Gn: گالن؛ Ccp: کالکوپیریت؛ Jas: ژاسپرئید.



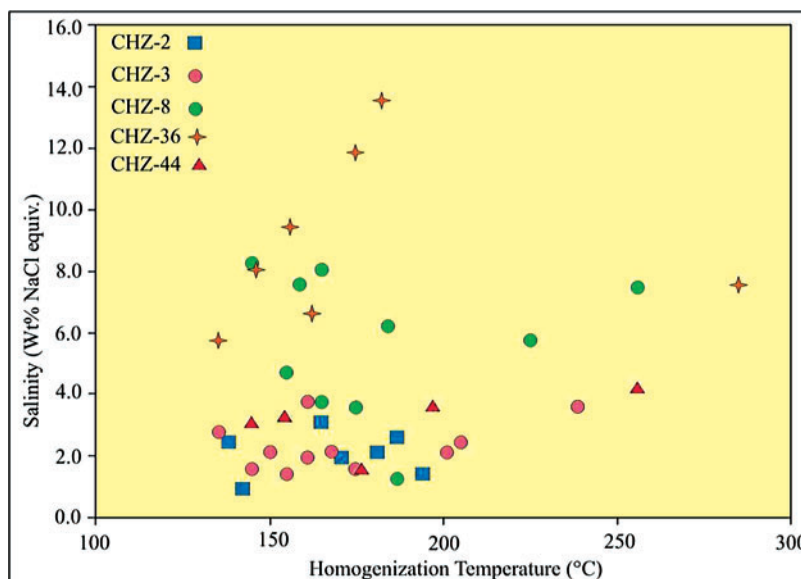
شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپی از دگرسانی سریستی (Ser) و سیلیسی (Qtz) در حاشیه رگه. (A) بافت نواری میان سریست، کوارتز دانه متوسط و گالن (Gn) (نور XPL). (B) سریست در میان رگچه‌های کوارتز در داسیت موجود در کناره رگه (نور XPL).



شکل ۱۱- نمایی از میانبارهای سیال اولیه در (A) کوارتز متوسط‌دانه و (B) کوارتز ریزدانه در کانسار چشمه‌حافظ.



شکل ۱۲- نمودارهای تغییرات دمای همگن شدن و شوری در نمونه‌های کوارتز کانسار چشمه‌حافظ.



شکل ۱۳- تغییرات دمای همگن‌شدن در برابر شوری ظاهری (برحسب درصد وزنی معادل NaCl) در نمونه‌های مختلف کوآرتز از کانسار چشمه‌حافظ. هر نمونه با علامت متفاوتی مشخص شده است.

جدول ۱- تغییرات عیار سرب، روی، مس، نقره و طلا در کانسار رگه‌ای چشمه‌حافظ.

Element	Sample No.	Minimum	Maximum	Average
Pb (ppm)	160	70	466650	30000
Cu (ppm)	160	15	50720	7000
Zn (ppm)	160	35	180600	7600
Ag (ppm)	160	0.1	41	9
Au (ppb)	160	5	2550	400
Ag/Au	160	20	16	25
Cu+Pb+Zn (ppm)	160	120	697970	44600

(تجزیه نمونه‌ها در شرکت توسعه علوم‌زمین انجام شده است.)

جدول ۲- تجزیه ریزکاو الکترونی کانی‌های سولفیدی و اکسیدی در کانسنگ چشمه‌حافظ.

Sample	Mineral	Fe	Zn	Pb	Cu	Ag	As	Sb	Cd	S	Total	Fe	Zn	Pb	Cu	Ag	As	Sb	Cd	S	Total
											Wt %										
GP-506-A	Gn	0.0		85.5	0	0.55				14.1	100.2			48.1	0.59					51.3	100.0
GP-506-B	Sph	0.7	64.53	0.0	0				0.72	33.9	99.8	0.6	47.7						0.31	51.4	99.9
GP-506-C	Gn	0.0		84.2	0	0.8				14.9	99.9			46.1	0.84					52.8	99.8
GP-506-D	Py	47.5					0.02			50.9	98.4	34.5				0.01				64.6	99.1
GP-506-E	Gn	0.0		80.1	0.68	0.9				17.6	99.3			41.1	0.88					58.1	100.0
22-A	Tt	0.7			46.4	1	0.8	19.8		31.2	99.9	0.64		0.0	38.69	0.49		8.48		51.6	99.9
22-B	Gn			80.5	5.38	1.05				13.0	100.0			48.6	1.21					50.1	99.9
41-A	Gn			85.4		0.92				13.6	99.9			48.8	1.00					50.1	99.9
W1-S1-D	Ccp	31.3		0.0	31.41					37.2	99.9	25.2		0.0	22.23					52.7	100.1
43-A	Bn	10.6		0.0	62.1					26.1	98.8	9.4		0.0	48.87					40.7	99.0
43-B	Gn-Cc	0.0		78.9	4.8	0.05				16.2	100.0			39.4	7.67	0.05				52.7	99.8
43-C	Gn-Cc	0.1		46.3	32.9	1.38				19.4	100.1			16.4	38.07	0.94				44.6	100.0
8-A	Gn	0.0		84.2	0	0.26				15.6	100.0			45.4	0.27					54.4	100.0

علایم اختصاری به کار رفته برای کانی‌ها در توضیح شکل ۶ آمده است. تجزیه در مرکز متالورژی رازی انجام شده است. به دلیل استفاده از پوشش طلا در این مرکز، تجزیه طلا ممکن نبوده است.

جدول ۳- داده‌های میانبارهای سیال برای نمونه‌های کوارتز در کانسار چشمه‌حافظ.

Sample No.	Mineral	Description	Type	Class	T _m (°C)	T _h (°C)	Wt% NaCl eq.
CHA-2	Qtz	Gn with minor Cpy-bearing Qtz vein	L+V	P	-1.1	171	1.9
CHA-2			L+V	P	-0.5	142	0.9
CHA-2			L+V	P	-1.4	138	2.4
CHA-2			L+V	P	-1.2	181	2.1
CHA-2			L+V	P	-1.8	165	3.1
CHA-2			L+V	P	-0.8	194	1.4
CHA-2			L+V	P	-1.5	187	2.6
CHA-8	Qtz	Gn with minor Cpy-bearing Qtz vein	L+V	PS	-0.7	187	1.2
CHA-8			L+V	PS	-0.9	145	1.6
CHA-8			L+V	PS	-1.2	150	2.1
CHA-8			L+V	PS	-1.4	205	2.4
CHA-8			L+V	PS	-2.2	165	3.7
CHA-8			L+V	P	-2.1	239	3.5
CHA-8			L+V	PS	-1.2	168	2.1
CHA-8			L+V	PS	-0.9	175	1.6
CHA-8			L+V	PS	-1.2	201	2.1
CHA-8			L+V	P	-1.6	135	2.7
CHA-8			L+V	PS	-0.8	155	1.4
CHA-8			L+V	PS	-1.1	161	1.9
CHA-3	Qtz	Gn with minor Cpy-bearing Qtz vein	L+V	P	-5.3	145	8.3
CHA-3			L+V	P	-2.1	175	3.5
CHA-3			L+V	PS	-2.2	161	3.7
CHA-3			L+V	PS	-3.8	184	6.2
CHA-3			L+V	PS	-4.8	159	7.6
CHA-3			L+V	PS	-3.5	225	5.7
CHA-3			L+V	PS	-5.1	165	8.0
CHA-3			L+V	PS	-4.7	256	7.4
CHA-3			L+V	P	-2.8	155	4.6
CHA-36	Qtz	Gn with minor Cpy-bearing Qtz vein	L+V	P	-9.6	182	13.5
CHA-36			L+V	PS	-3.5	135	5.7
CHA-36			L+V	P	-5.1	146	8.0
CHA-36			L+V	P	-4.8	285	7.6
CHA-36			L+V	P	-8.1	175	11.8
CHA-36			L+V	PS	-6.2	156	9.5
CHA-36			L+V	PS	-4.1	162	6.6
CHA-44	Qtz	Gn with minor Cpy-bearing Qtz vein	L+V	P	-2.5	256	4.2
CHA-44			L+V	PS	-0.9	176	1.6
CHA-44			L+V	PS	-2.1	197	3.5
CHA-44			L+V	PS	-1.9	154	3.2
CHA-44			L+V	PS	-1.8	145	3.1

Gn: گالن؛ Qtz: کوارتز؛ Cpy: کالکوپیریت؛ P: اولیه؛ PS: شبه‌ثانویه؛ L: مایع؛ V: بخار.

جدول ۴- مقادیر ایزوتوپ گوگرد در نمونه‌های گالن و کالکوپیریت در کانسار چشمه‌حافظ.

Sample No.	$\delta^{34}\text{S}_{\text{Gal}}$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} (\text{T:135})$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} (\text{T:285})$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{Cep}}$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} (\text{T:135})$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} (\text{T:285})$
CHA-35	-1.16	2.6	0.9	-1.35	-1.7	-1.6
CHZ-4	0.25	4.1	2.4	0.06	-0.2	-0.1
CHZ-2	-0.58	3.2	1.5	0.54	-0.9	-0.8
CHA-41	-1.31	2.5	0.8	-	-1.7	-1.6

کتابنگاری

- بدخشان، ق.، ۱۳۸۶- طرح اکتشاف کانسار چشمه‌حافظ، شرکت توسعه علوم زمین، ۱۹۳ ص.
- حقیقی، ا.، ۱۳۸۹- متالورژی فلزهای پایه و طلا در کمر بند آتشفشانی - نفوذی تروود- چاه شیرین، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۶۷ ص.
- مهرابی، ب. و قاسمی، م.، ۱۳۸۸- کانی‌شناسی و زمین‌شناسی اقتصادی کانسار پلی‌متال چشمه‌حافظ، استان سمنان، ایران، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۱، شماره ۲، ص. ۱۴۳-۱۶۱، دانشگاه فردوسی مشهد.
- هوشمندزاده، ع.، علوی، م. و حقی‌پور، ع.، ۱۳۵۷- تحول پدیده‌های زمین‌شناسی ناحیه تروود، از پرکامبرین تا عهدحاضر، سازمان زمین‌شناسی کشور، گزارش شماره H5، ۱۳۶ ص.

References

- Alavi, M., 1996- Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran: *Journal of Geodynamics*, v.21, p.1-33.
- Albinson, T., Norman, D. I., Cole, D. & Chomiak, B., 2001- Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constraints from fluid inclusion and stable isotope data: *Society of Economic Geologists Special Publication* 8, p. 1-32.
- Bodnar, R. J., 1993- Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.57, p.683-684.
- Camprubí, A., González-Partida, E., Iriondo, A. & Levresse, G., 2006- Mineralogy, fluid inclusion, and fluid characteristics, and depositional environment of the Paleocene epithermal Au-Ag deposits of the El Barqueño district, Jalisco, Mexico: *Economic Geology*, v., 101, p. 235-247.
- Goldstein, R. H. & Reynolds, T. J., 1994- Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals: *SEPM (Society for Sedimentary Geology), Short Course Notes* 31, 199 p.
- Hassanzadeh, J., Ghazi, A. M., Axen, G., Guest, B., Stockli, D. & Tucker, P., 2002- Oligocene mafic-alkaline magmatism in north and northwest of Iran: Evidence for the separation of the Alborz from the Urumieh-Dokhtar magmatic arc [abs.]: *Geological Society of America Abstracts with Program*, v.34, no. 6, p.331.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A. Jr. & Gonzalez-Urien, E., 2000- Exploration for epithermal gold deposits: *Reviews in Economic Geology*, v.13, p.245-277.
- John, D. A., 2001- Miocene and early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the northern Great Basin, USA: Characteristics, distribution, and relationship to magmatism: *Economic Geology*, v. 96, p. 1827-1853.
- Li, Y. B. & Liu, J. M., 2006- Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 1789 - 1795.
- McDonough, W. F., & Sun, S. S., 1995- The composition of the earth: *Chemical Geology*, v. 120, p. 223-253.
- Ohmoto, H. & Goldhaber, M. B., 1997. Sulfur and carbon isotopes: In H.L. Barnes (ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 3rd ed., New York, John Wiley and Sons, p.517-611.
- Ohmoto, H., 1986- Stable isotope geochemistry of ore deposits: *Reviews in Mineralogy*, v. 16, p. 491-560.
- Pearce, J. A. & Peate, D. W., 1995- Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas: *Annual Review of Earth and Planetary Science*, v. 23, p. 251-285.
- Seward, T. M. & Barnes, H. L., 1997- Metal transport by hydrothermal ore fluids, in Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 3rd ed.: New York, John Wiley & Sons, p. 435-486.
- Shamarian, G. H., Hedenquist, J., Hattori, K. & Hassanzadeh, J., 2004- The Gandi and Abolhassani epithermal prospects in the Alborz magmatic arc, Semnan province, Northern Iran: *Economic Geology*, v. 99, p. 691-712.
- Sillitoe, R. H. & Hedenquist, J. W., 2003- Linkages between volcanotectonic settings, ore fluid compositions, and epithermal precious metal deposits: *Society of Economic Geologists Special Publication* 10, p. 315-343.
- Simmons, S. F., 1991- Hydrologic implications of alteration and fluid inclusion studies in the Fresnillo district, Mexico: Evidence for a brine reservoir and a descending water table during the formation of hydrothermal Ag-Pb-Zn ore bodies: *Economic Geology*, v. 86, p. 1579-1602.
- Simmons, S. F., White, N. C. & John, D. A., 2005- Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits, *Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p. 485-522.
- Stöcklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran: a review: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 52, p. 1229-1258.
- Verdel, C., 2008- Cenozoic geology of Iran: an integrated study of extensional tectonics and related volcanism: Unpublished Ph.D. dissertation, California Institute of Technology, Los Angeles, 253 p.

Mineralization, Alteration and Ore Fluid Characteristics in Cheshmeh Hafez Base and Precious Metals Deposit, Torud-Chahshirin Range, North-Central Iran

E. Haghghi^{1*}, S. Alirezaei² & E. Ashrafpour¹

¹ Ph. D., Parkam Co., Tehran, Iran

² Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 2010 April 11

Accepted: 2010 September 19

Abstract

The Cheshmeh Hafez deposit in Torud-Chahshirin Range, north-central Iran, consists of a polymetal vein mineralization in Cenozoic volcanic host rocks of dominantly basaltic andesite and dacite compositions. The main ore vein, 1800 m long and <1 – 5 m wide, occurs discontinuously in a north-south direction, and includes chalcedony, fine- to coarse-grained quartz, and jasperoid, associated with galena and subordinate chalcocopyrite, sphalerite, bornite, pyrite, tetrahedrite, specular hematite and siderite. Crustiform bands, consisting of grey chalcedony, jasperoid, milky quartz, and various ore minerals are common, and breccias and comb textures are locally developed, in the vein. Supergene processes led to the replacement of galena by cerussite, and of hypogene copper minerals (chalcocopyrite and bornite) by covellite and malachite. The main ore vein is accompanied by several smaller quartz and calcite veins in NE-SW and E-W directions, respectively, where the calcite veins are barren. Alteration related to mineralization is restricted to thin halos bordering the vein, and consists of quartz, chlorite, calcite, kaolinite and sericite (illite). Fluid inclusions in quartz associated with ore minerals are studied. Most inclusions are two-phase, liquid-rich, at room temperatures; few are vapor-dominant, and few consist solely of liquid. Primary fluid inclusions display low to moderate homogenization temperatures (135-285) and salinities (1-13 wt% NaCl equivalents). The δS values for the ore fluids in equilibrium with the sulfide minerals fall in the range -1.6 to +4.1‰ and suggest a magmatic source for sulfur. The ore and gangue mineralogy, and the alteration assemblages, suggest that the ore fluids were reduced and near-neutral in nature. This, combined with the metal contents, Ag/Au ratio between 16 to 25, iron-poor sphalerite, the crustiform and colloform textures, and the T and salinity values, imply that mineralization at Cheshmeh Hafez is of epithermal, intermediate-sulfidation, character. The alteration assemblage at Cheshmeh Hafez is indicative of a sub-type of intermediate-sulfidation epithermal deposits with a tendency towards low-sulfidation type.

Keywords: Cheshmeh Hafez, Torud-Chahshirin, Fluid inclusion, Sulfur isotope, Epithermal, Intermediate sulfidation

For Persian Version see pages 99 to 110

*Corresponding author: E. Haghghi; E-mail: Ehsan.Haghghi@yahoo.com