بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کوارتزهای خودشکل رنگی منطقه قهرود بر اساس شواهد سنگ‌نگاری و مطالعات میانبارهای جامد و سیال

محمدرضا رضاپور[۱]، وارطان سیمونز[۲]*، محسن موذن[۳] و رباب حاجی‌علی‌اوغلی[۴]

[۱]کارشناسی ارشد، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[۲]دانشیار، مرکز تحقیقات علوم پایه، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[۳]استاد، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[۴]دانشیار، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۲۲/ ۰۸/ ۱۳۹۵ تاریخ پذیرش: ۰۸/ ۱۰/ ۱۳۹۶

چکیده

توده گرانیتوییدی قهرود با ترکیب گرانیت تا گرانودیوریت و تونالیت به سن میوسن، در ۴۰ کیلومتری جنوب باختر کاشان واقع است. فعالیت‌های گرمابی به دنبال نفوذ این توده باعث تشکیل بلورهای کوارتز درشت، خود شکل و رنگی در شکستگی‌ها و حفرات موجود در لیتولوژی‌های مختلف منطقه شده است. انواع بلورهای کوارتز به لحاظ تنوع رنگی شامل کوارتزهای شفاف، نیمه‌شفاف، سبز کم‌رنگ، زرد، سیاه، پایه دودی، پایه قهوه‌ای متمایل به قرمز و کوارتزهای روتیل‌دار هستند. مطالعات ترکیب شیمیایی بلورهای کوارتز و میانبارهای سیال و جامد داخل آنها نشان می‌دهد که عوامل فیزیکی و شیمیایی از جمله دما، فشار، ترکیب توده نفوذی، سنگ میزبان و سیال گرمابی، رخداد دگرسانی و شرایط pH و Eh در تشکیل بلورهای کوارتز رنگی و خود شکل قهرود دخیل بوده‌اند. میانبارهای جامد موجود در کوارتز احتمالاً به دو صورت تشکیل شده‌اند: ۱) تأمین عناصر مورد نیاز برای تشکیل کوارتز و میانبارهای جامد از طریق سیال و سپس محصور شدن این میانبارها در بین لایه‌های رشد بلورهای کوارتز؛ ۲) ورود مستقیم ذرات بسیار ریز از کانی‌ها در لایه‌های رشد بلوری و تشکیل بلورهای کوارتز با رنگ‌های متفاوت. بلورهای دودی را می‌توان به دلیل جانشینی عنصر Si با Al و همچنین حضور عناصر U و Th دانست. رنگ قرمز در کوارتزها به دلیل حضور سوزن‌های روتیل تشخیص داده شد. بلورهای سیاه رنگ در شرایط اکسیدان و pH تقریباً بالا با رسوب اولیه مگنتیت و پس از آن اکسیدهای منگنز در لایه‌های پایانی رشد بلور تشکیل شده‌اند. بلورهای سبز رنگ حاصل رخداد دگرسانی‌های کلریتی و اپیدوتی در سنگ‌های مجاور و دربرگیرنده هستند.

کلیدواژه‌ها: قهرود، کاشان، کوارتز رنگی، میانبار سیال، میانبار جامد، دمای همگن‌شدگی، شوری.

***نویسنده مسئول:** وارطان سیمونز
E-mail: simmonds_vartan@tabrizu.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

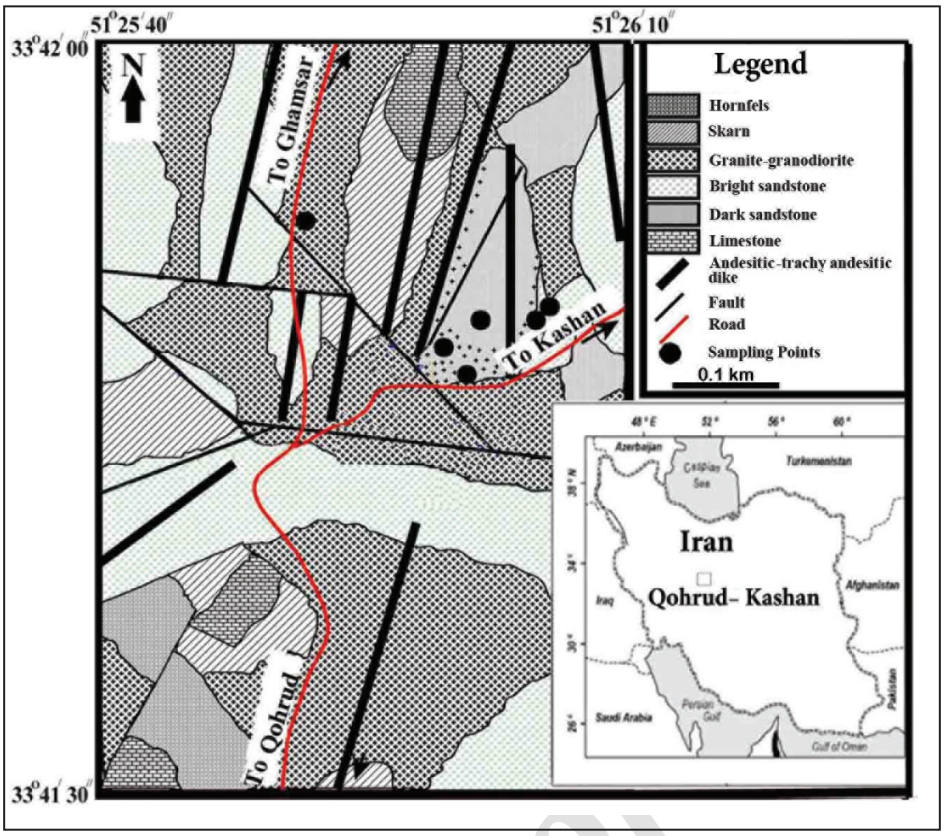
تنوع رنگی در بلورهای کوارتز (رنگ‌های دودی، زرد، سیاه و...) و حضور میانبارهای سیال و جامد (بلورهای ریز روتیل، کلریت و...) اطلاعات با ارزشی در مورد مکانیسم و شرایط فیزیکوشیمیایی رشد بلور کوارتز به‌دست می‌دهند (Rykart, 1995; Dibble, 2002). مطالعات زیادی بر روی علت تنوعات رنگی در بلورهای کوارتز انجام شده است. برای مثال Maneta and Voudouris (2010) رنگ بلورهای خودشکل کوارتز و همچنین میانبارهای جامد داخل آنها را به ترکیب سنگ در برگیرنده و شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل آن نسبت داده‌اند. Deer et al. (2013) رنگ‌های مختلف در کوارتز را به حضور عناصر آلومینیم، تیتانیم، عناصر قلیایی و عناصر کمیاب در ترکیب آنها نسبت می‌دهند. بر این اساس، رنگ سرخ (رز کوارتز) و آبی کوارتز به ترتیب به حضور سوزن‌های ریز روتیل و حالت کلوییدی TiO_2 مربوط است (Deer et al., 2013). Maneta and Voudouris (2010) حضور روتیل به‌صورت میانبارهای جامد در کوارتزهای بلوری را گزارش کرده‌اند. Howard (2008) تنوع رنگ کوارتزها را به حضور ذرات بسیار ریز رس، کلریت و کربن در لایه‌های رشد بلوری نسبت داده است. Rao et al. (1989) رنگ سیاه کوارتز را مرتبط با میانبارهایی از زغال‌سنگ و آنتراسیت و در مقادیر کمتر مربوط به حضور Mn^{2+} در شرایط احیایی می‌دانند. همچنین Rao et al. (1989) رنگ سیاه در بلورهای کوارتز را به حضور ذرات ریزی از شیل‌های سیاه، کربن یا اکسیدهای منگنز نسبت داده‌اند که در لایه‌های رشد بلوری گیر افتاده‌اند. Kurt and Betty (1977) رنگ سبز کوارتز را نتیجه حضور عناصر Al، Fe، B، در شرایط احیایی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد معرفی کرده‌اند. Heber and Rossman (2008) تغییرات شوری و دما را در سامانه گرمابی از دلایل مهم در تشکیل ساختار و تغییرات رنگی کوارتز عنوان کرده‌اند. با این وجود، تا کنون در ایران مطالعه مشابهی بر روی بلورهای شکل‌دار و رنگی کوارتز صورت نگرفته است و معدود مطالعات موجود نیز، تنها به دماسنجی میانبارهای سیال و شناسایی تغییرات دما، ترکیب شیمیایی و شرایط فیزیکی تبلور کوارتزهای گرمابی پرداخته‌اند (از جمله پادیار و همکاران، ۱۳۹۵).

در این پژوهش، علاوه بر معرفی رخداد بلورهای خودشکل و رنگی کوارتز در منطقه قهرود به همراه زمین‌شناسی منطقه و مشخصات سنگ‌های میزبان، سعی شده است با اندازه‌گیری دما و شوری میانبارهای سیال بلورهای کوارتز به روش ریزدماسنجی، شرایط فیزیکوشیمیایی تبلور انواع کوارتزهای بلوری تعیین و اختلافات موجود شناسایی و بر اساس آن توالی تبلور آنها مشخص شود و در ادامه، علت تنوع رنگی آنها و مکانیسم‌های مربوط با استفاده از شواهد صحرایی، سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی مورد بحث قرار گرفته است.

۲- زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه با مختصات جغرافیایی ″۱۰ ′۲۶ °۵۱ تا ″۴۰ ′۲۵ °۵۱ طول خاوری و ″۳۰ ′۴۱ °۳۳ تا ′۴۲ °۳۳ عرض شمالی، در ۴۰ کیلومتری جنوب باختر کاشان در نوار ماگمایی سنوزوییک ارومیه- دختر واقع است. پلوتونیسم در منطقه قهرود به‌صورت یک توده گرانیتوییدی با ترکیب گرانیت، گرانودیوریت تا تونالیت و مونزونیت به سن میوسن است که به داخل مجموعه‌ای از شیل و ماسه‌سنگ ژوراسیک و سنگ‌آهک و مارن ائوسن نفوذ کرده و باعث دگرگونی مجاورتی در آنها و تشکیل هورنفلس و اسکارن شده است (بدر و همکاران،۱۳۹۲؛ شکل ۱). بیرونزدگی‌های بزرگ وکوچک آن نزدیک به ۶۵ کیلومتر مربع مساحت دارند. ماسه‌سنگ‌های موجود در منطقه به دو صورت معمولی با رنگ روشن و ماسه‌سنگ‌های دارای مقادیر زیادی از کانی‌های کدر دیده می‌شوند. سنگ‌های آتشفشانی منطقه با ترکیب آندزیت، تراکی- آندزیت و کمتر به‌صورت آندزی‌بازالت به سن جوان‌تر از میوسن میانی هستند که به‌صورت دایک در منطقه برونزد دارند. تعداد این دایک‌ها بسیار زیاد است و به‌موازات هم در راستای NE-SW نفوذ کرده‌اند (شکل ۱).

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ منطقه قهرود. موقعیت نقاط نمونه‌برداری بلورهای خودشکل کوارتز نشان داده شده است.

۳- دگرسانی گرمابی

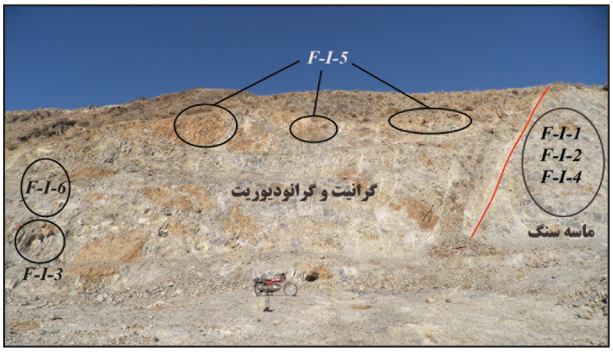
فرایندهای گرمابی حاصل از نفوذ توده گرانیتوییدی قهرود موجب شکل‌گیری زون‌های دگرسانی سیلیسی، سریسیتی، کلریتی و به مقدار کمتر اپیدوتی و ژاروسیتی در بخش‌هایی از توده نفوذی شده‌اند. در عین حال، سیالات گرمابی باعث تشکیل یک سری بلورهای کوارتز خودشکل با رنگ‌های مختلف در اندازه‌های بین ۱ تا ۱۲ سانتی‌متر در داخل درز و شکاف‌های سنگ‌های منطقه شده‌اند. درز و شکاف‌های ایجاد شده به همراه کوارتززایی بعد از آن در داخل تمامی سنگ‌های منطقه (گرانیت- گرانودیوریت، اسکارن، هورنفلس و ماسه‌سنگ)، به‌جز دایک‌ها، قابل مشاهده هستند. ساخت برشی و شکافه پرکن کوارتزهای مورد مطالعه خود می‌تواند دلیلی بر منشأ گرمابی آنها باشد. علاوه بر این، مقادیر کمی پیریت و کالکوپیریت نیز به‌صورت پراکنده در داخل حفرات این سنگ‌ها تشکیل شده است که به اکسیدهای آهن و مالاکیت تبدیل شده‌اند. این کانی‌سازی‌ها گاه تجمعات بلورهای کوارتز را همراهی می‌کنند.

۴- مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری از کوارتزهای خود شکل با خصوصیات رنگی متفاوت از رگه‌ها و حفرات داخل لیتولوژی‌های مختلف، شامل برونزدهای توده نفوذی، اسکارن و ماسه‌سنگ‌ها انجام گرفت. در شکل ۲، موقعیت رخداد و نمونه‌برداری انواع بلورهای کوارتز رنگی در منطقه قهرود نشان داده شده است.

برای آنالیز شیمیایی، ابتدا نمونه‌ها توسط پودرکُن کربید تنگستن تا اندازه کوچک‌تر از ۲۰۰ میکرون پودر شدند. سپس مقدار مشخصی از پودر نمونه با کمک ذوب لیتیم‌بورات مخلوط و در ظروف پلاتینی بر روی شعله ذوب شد (ذوب قلیایی). شیشه حاصل توسط مخلوط چهار اسید قوی (HF، $HClO_4$، HNO_3، HCl) حل و پس از به حجم‌رسانی توسط آب مقطر، به وسیله دستگاه طیف‌سنجی پلاسمای جفتیده القایی (ICP-MS) در شرکت Actlabs کانادا تجزیه شد.

جهت مطالعات میکروسکوپی، در مجموع ۱۵ مقطع دوبرصیقل با قطر متوسط ۵۰ تا ۳۰۰ میکرون برای مطالعات سنگ‌نگاری میانبارهای سیال و ۶ مقطع دوبرصیقل با ضخامت زیر ۲۰۰ میکرون برای مطالعات ریزدماسنجی از هر یک از تنوعات رنگی بلورهای کوارتز تهیه شد. مطالعات سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی میانبارهای سیال با استفاده از میکروسکوپ تحقیقاتی Olympus-B2 و دستگاه Linkam THM600 با کنترل کننده حرارتی TMS-94 و سردکننده LNP، در دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام گرفت.



شکل ۲- کنتاکت توده گرانیتوییدی با ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک و محل رخداد و نمونه‌برداری بلورهای کوارتز رنگی در منطقه قهرود. علایم اختصاری همانند جدول ۱ هستند.

Archive of SID

www.SID.ir

۵– بررسی ماکروسکوپی انواع کوارتزهای رنگی و خود شکل قهرود

ترکیب اصلی تمامی کوارتزهای خودشکل منطقه قهرود بر اساس نتایج آنالیز شیمیایی به روش ICP-MS، سیلیس است (حدود ۹۹/۹۴ درصد) و فقط در قسمت‌های تحتانی (پایه) و یا حاشیه‌ای برخی بلورها، ناخالصی‌هایی از سایر عناصر یا میانبارهای جامد وجود دارد که سبب ایجاد تنوع رنگی در آنها شده است. همچنین خواص فیزیکی و میکروسکوپی آنها نیز به خوبی بیانگر ترکیب کوارتزی آنهاست. کوارتزهای بلوری قهرود به لحاظ تنوع رنگی و میانبارهای جامد داخل آنها شامل انواع زیر هستند:

۵– ۱. کوارتزهای شفاف و نیمه‌شفاف

این گروه از کوارتزها اساساً بی‌رنگ و شفاف و گاه دارای پایه‌های شیری رنگ نیز هستند که در داخل حفرات و شکستگی‌های بزرگ موجود در لیتولوژی ماسه‌سنگ‌های رنگ روشن تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۳- الف و ب). اندازه بلورهای آنها از ۰/۵ تا ۱۱ سانتی‌متر متغیر است.

۵– ۲. کوارتزهای زرد رنگ (سیترین)

این سری از کوارتزها در ماسه‌سنگ‌های غنی از کانی‌های کدر (احتمالاً مگنتیت) با دگرسانی نوع هماتیتی یافت می‌شوند که این هم‌یافتی، باعث ایجاد رنگ زرد ناشی از اکسید آهن (هماتیت و لیمونیت) به‌صورت سطحی بر روی آنها شده است (شکل ۳-پ) و در داخل بلور اثری از هماتیت یا کانی بیگانه دیگری به‌چشم نمی‌خورد. مشاهدات صحرایی نیز شواهدی از هماتیتی شدن در این ماسه‌سنگ‌ها را تأیید می‌کنند.

۵– ۳. کوارتزهای تیره رنگ

این سری از کوارتزها در حفرات موجود در ماسه‌سنگ‌های غنی از کانی‌های کدر و سنگ‌های گرانیت- گرانودیوریتی دگرسان یافت شدند. کوارتزهای تیره رنگ به دو صورت کوارتزهای سیاه رنگ و کوارتزهای در برگیرنده ذرات سیاه و سبز دیده می‌شوند. در این کوارتزها، ذرات سیاه رنگ هم در داخل بلور (حاشیه بیرونی) و هم روی سطح بلور قابل تشخیص هستند (شکل ۳- ت).

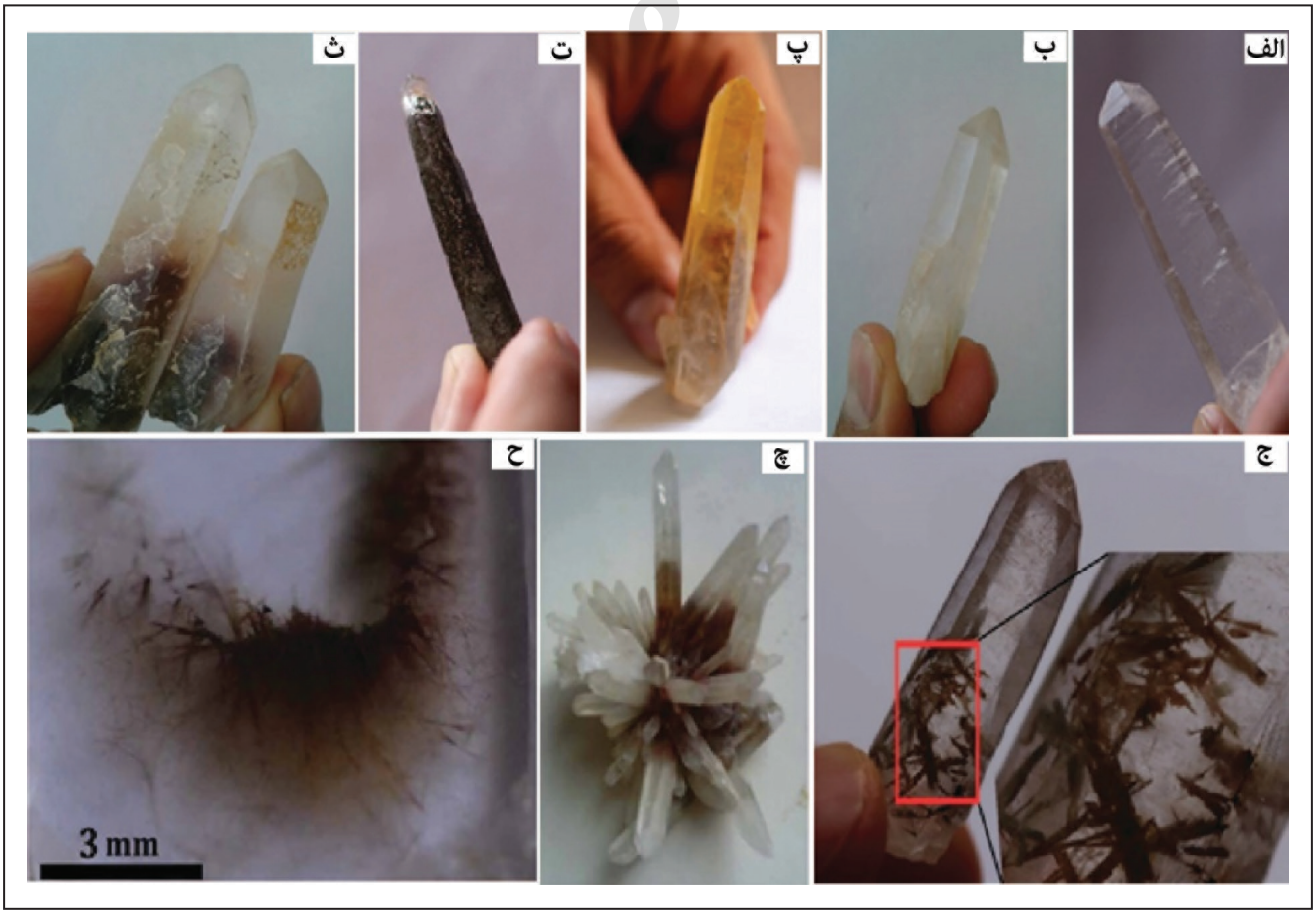
برخی از کانی‌های تیره به راحتی توسط آهنربا جذب می‌شوند که بر این اساس می‌توان آنها را مگنتیت در نظر گرفت و برخی دیگر با ویژگی‌های دندریتی و عدم جذب توسط آهن ربا، احتمالاً اکسید منگنز هستند. این گروه کمترین قطر را بین کوارتزهای بلوری یافت شده در منطقه دارند و طول آنها از ۲ تا ۹ سانتی‌متر متغیر است (شکل ۳- ت).

۵– ۴. کوارتزهای پایه دودی تا قهوه‌ای مایل به قرمز

این کوارتزها در داخل سنگ‌های گرانیتی و گرانودیوریتی دگرسان تشکیل شده‌اند. اندازه بلورهای کوارتز از ۳ تا ۱۲ سانتی‌متر متغیر است. رنگ این کوارتزها در پایه، دودی تا قهوه‌ای مایل به قرمز است (شکل ۳- ث). رنگ دودی به حضور ناخالصی‌های پرتوزا و رنگ قهوه ای مایل به قرمز به حضور مقادیر کمی Ti^{4+} به‌صورت ناخالصی در کوارتز نسبت داده می‌شود (Klein and Hurberbut, 1985). گاه سوزن‌های بسیار ریزی از روتیل به‌صورت میانبارهای قهوه‌ای مایل به قرمز به سختی داخل این کوارتزها دیده می‌شوند.

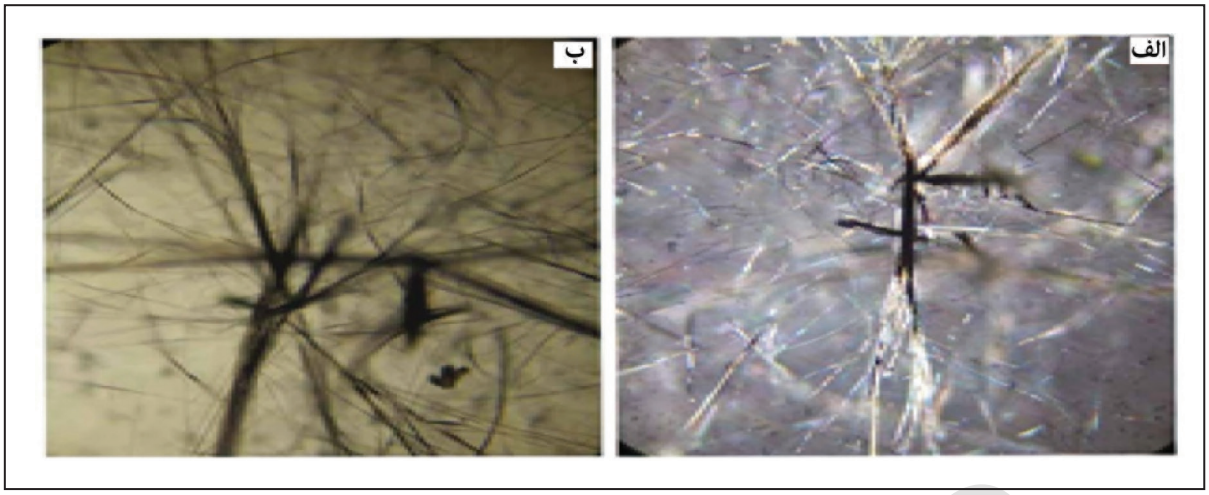
۵– ۵. کوارتزهای روتیل‌دار

این کوارتزها همانند کوارتزهای پایه دودی تا قهوه‌ای مایل به قرمز در سنگ‌های گرانیتی و گرانودیوریتی دگرسان شده تشکیل شده‌اند. این سری از کوارتزها به‌صورت شفاف با میانبارهایی از کانی‌های روتیل به رنگ‌های قهوه‌ای و قهوه‌ای مایل به قرمز در قسمت پایه هستند (شکل‌های ۳- چ و ح و شکل ۴). فراوانی این نوع از کوارتزها نسبت به کوارتزهای شفاف و خالص کمتر و اندازه بلورهای خودشکل کوارتز از ۰/۵ تا ۷ سانتی‌متر متغیر است.



شکل ۳- تصاویر ماکروسکوپی از بلورهای: الف) کوارتز شفاف؛ ب) کوارتز نیمه‌شفاف؛ پ) کوارتز زرد رنگ؛ ت) کوارتز سیاه؛ ث) کوارتز با پایه‌های دودی تا قهوه‌ای مایل به قرمز؛ ج و چ) کوارتز با روتیل‌های درشت؛ ح) سوزن‌های ریز روتیل در داخل کوارتز.

www.SID.ir

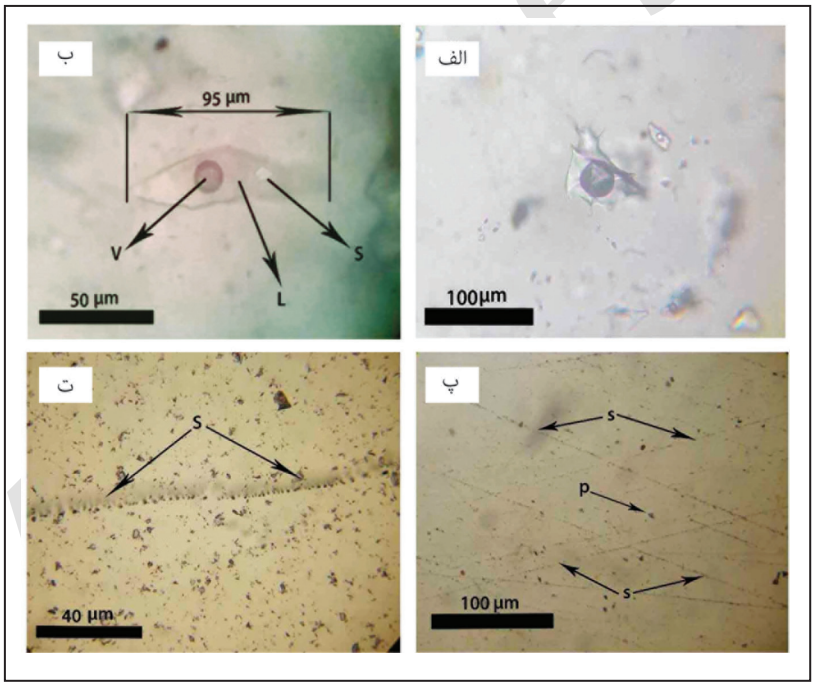


شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های روتیل در داخل کوارتزهای روتیل‌دار، الف) حالت XPL (میدان دید ۱/۵ میلی‌متر)؛ ب) حالت PPL (میدان دید ۱/۵ میلی‌متر).

۶- میانبارهای سیال

۶- ۱. سنگ‌نگاری میانبارهای سیال

مشاهدات سنگ‌نگاری کوارتزهای شکل‌دار و شفاف منطقه قهرود آشکار ساخت که بخش اعظم میانبارهای سیال داخل آنها به‌صورت ثانویه و در امتداد خطوط شکستگی‌ها به دام افتاده‌اند. میانبارهای سیال اولیه در رتبه دوم از نظر فراوانی قرار دارند و به‌صورت منفرد با ابعاد درشت‌تر و توزیع تصادفی مشاهده می‌شوند. میانبارهای سیال ثانویه کاذب نیز در رتبه سوم از نظر فراوانی قرار دارند (شکل ۵).



شکل ۵- الف) میانبار سیال دوفازی اولیه با درجه پرشدگی بالا؛ ب) میانبار سیال سه‌فازی اولیه؛ پ و ت) میانبار سیال اولیه در کنار میانبارهای سیال ثانویه و ثانویه کاذب به‌صورت دانه‌تسبیحی. این میانبارها خیلی ریز و تماماً دوفازی مایع+گاز و تک‌فاز مایع هستند.

اشکال میانبارهای سیال درون کوارتزهای شکل‌دار قهرود بسیار متفاوت و شامل اشکال بلوری منفی، میله‌ای، کروی، استوانه‌ای، گوه‌ای و بی‌شکل است که در این بین، اکثر میانبارهای سیال بی‌شکل هستند.

اندازه میانبارها نیز تنوع زیادی دارد و کوچک‌ترین اندازه بین ۱ تا ۲ میکرون و بزرگ‌ترین اندازه تا ۹۶ میکرون اندازه‌گیری شده است (جدول ۱). این میانبارهای سیال بر اساس محتویات فازی درونشان به ۳ دسته تقسیم بندی شدند: الف) میانبارهای تک‌فاز مایع که فراوان‌ترین نوع و اکثراً ثانویه هستند؛ ب) میانبارهای سیال دوفازی (مایع + بخار) که در رتبه دوم از نظر فراوانی قرار دارند؛ ج) میانبارهای سیال سه‌فازی حاوی مایع + بخار + فاز جامد (هالیت) که تنها در کوارتزهای روتیل‌دار و کوارتزهای با پایه دودی- قهوه‌ای مایل به قرمز یافت شدند.

۶- ۲. اندازه‌گیری شوری و دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال

انجماد نهایی میانبارهای سیال در دمای ۹۰- تا ۱۱۰- درجه سانتی‌گراد حاصل شد. دمای اولین ذوب پس از انجماد بین ۵۱- تا ۳۲- اندازه‌گیری شد که بر اساس آن می‌توان گفت علاوه بر حضور ترکیبات NaCl و به‌مقدار کمتر KCl در سیال تشکیل‌دهنده میانبارها، حضور ترکیبات دیگری از جمله $MgCl_2$، $CaCl_2$ و $FeCl_2$ نیز محتمل است. دمای آخرین ذوب یخ برای میانبارهای سیال دوفازی بین ۱۹- تا ۱/۲- به‌دست آمد. همچنین برای میانبارهای سیال همگن شونده به فاز مایع، دمای ذوب هیدروهالیت بین ۲۱/۲- تا ۲۰/۵ - اندازه‌گیری شد.

www.SID.ir

جدول ۱- الف) نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال در کوارتزهای خودشکل و رنگی قهرود؛ ب) نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال درون کوارتزهای روتیل‌دار به‌تفکیک میانبارهای دوفازی و سه‌فازی.

(الف)

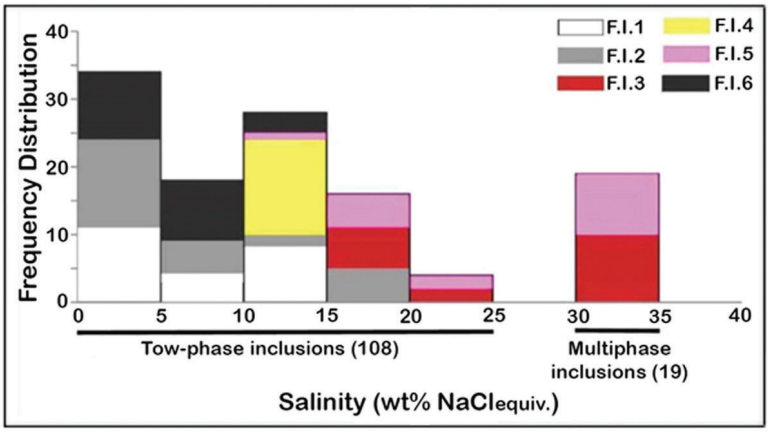
نوع بلور کوارتز	تعداد اندازه‌گیری	اندازه میانبار (μm)			نوع میانبار	نوع همگنش	دمای همگن‌شدگی (°C)			شوری (wt% $NaCl_{equi.}$)		
		میانگین	حداکثر	حداقل			میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل
F-I-1 (کوارتز شفاف)	۲۲	۲۱	۴۳	۹	۲ فازی	L	۱/۳۰۳	۲/۳۶۳	۲/۲۲۸	۵/۷	۲/۱۲	۷/۳
F-I-2 (کوارتز نیمه شفاف)	۲۵	۶/۳۰	۸۰	۹	۲ فازی	L	۰/۳۵۹	۱/۳۹۰	۰/۳۳۴	۸/۶	۷/۱۸	۱/۲
F-I-3 (کوارتز روتیل‌دار)	۱۸	۲/۳۰	۹۲	۱۵	۲ و ۳ فازی	جدول ۱ب	۱/۴۰۱	۰/۴۴۱	۸/۳۲۳	۷/۲۵	۸/۳۳	۲/۱۶
F-I-4 (کوارتز زرد)	۱۴	۴/۱۹	۳۱	۸	۲ فازی	L	۴/۳۲۹	۳/۳۴۲	۰/۳۲۴	۱/۱۳	۴/۱۳	۳/۱۱
F-I-5 (کوارتز پایه دودی)	۱۷	۶/۲۸	۵۲	۱۰	۳ فازی	انحلال هالیت	۲/۵۵۰	۵/۵۷۹	۹/۴۹۱	۶/۲۴	۵/۳۳	۲/۱۶
F-I-6 (کوارتز سیاه)	۲۱	۶/۱۸	۳۱	۸	۲ فازی	L	۱/۳۰۵	۱/۳۲۹	۱/۲۸۵	۷/۵	۰/۱۲	۹/۱

(ب)

نوع بلور کوارتز	تعداد اندازه‌گیری	اندازه میانبار (μm)			نوع میانبار	نوع همگنش	دمای همگن‌شدگی (°C)			شوری (wt% $NaCl_{equi.}$)		
		میانگین	حداکثر	حداقل			میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل
F-I-3 (کوارتز روتیل‌دار)	۸	۲۴	۳۹	۱۵	۲ فازی	L	$TH_{(L-V)}$ ۳۶۳/۷	۳۹۴/۰	۳۲۳/۸	۳۲/۸	۳۳/۸	۳۲/۰
	۱۰	۳۵/۱	۹۲	۱۹	۳ فازی	انحلال هالیت	$S_{(NaCl)}$ ۴۲۳/۰	۴۴۱/۰	۴۱۲/۷	۱۸/۰	۲۰/۴	۱۶/۲

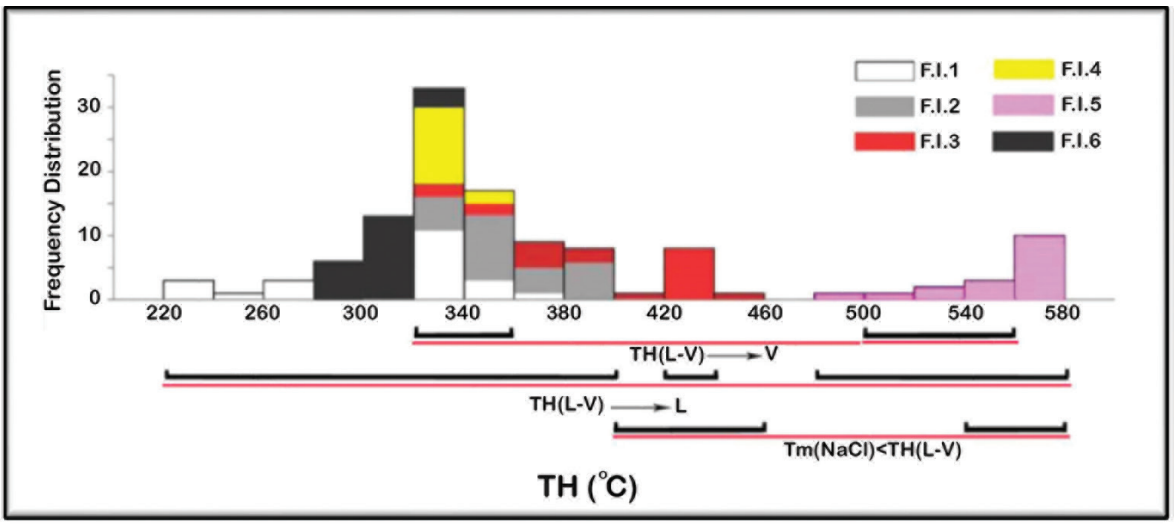
بر اساس هیستوگرام شکل ۶، شوری میانبارهای سیال بین ۱/۹ تا ۳۳/۵ wt % $NaCl_{equiv}$ در نوسان و بیشترین پیک شوری اندازه‌گیری شده از نظر فراوانی، به‌ترتیب بین ۰ تا ۵، ۱۰ تا ۱۵ و ۳۰ تا ۳۵ wt% $NaCl_{equiv.}$ است. شوری‌های بین ۰ تا ۲۵ wt % $NaCl_{equiv.}$ تماماً مربوط به میانبارهای سیال دوفازی و شوری‌های ۳۰ تا ۳۵ wt % $NaCl_{equiv}$. متعلق به میانبارهای سیال سه‌فازی هستند. دلیل فقدان بلور هالیت در شوری‌های زیر ۲۷ wt % $NaCl_{equiv}$. عدم توانایی در هسته‌بندی و رفتار نیمه‌پایدار آن است (Shepherd et al., 1985; Bodnar and Vityk, 1994). در کل، سه جمعیت میانبارهای سیال با شوری پایین و فاقد بلور هالیت (شوری کمتر از ۱۰ wt % $NaCl_{equiv.}$)، میانبارهای سیال با شوری متوسط و فاقد بلور هالیت (شوری بین ۱۰ تا ۲۵ wt % $NaCl_{equiv.}$) و میانبارهای سیال با شوری متوسط به بالا و حاوی بلور هالیت (شوری بیش از ۲۵ تا ۳۴ wt% $NaCl_{equiv.}$) در این هیستوگرام قابل تشخیص است (شکل ۶).

عملیات گرمایش بر روی میانبارهای سیال دوفازی و سه‌فازی انجام گرفت. محدوده دمایی همگن‌شدگی میانبارهای سیال دو فازی بین ۲۲۰ تا ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد (شکل ۷) و تقریباً اکثر آنها به‌حالت مایع همگن شدند. میانبارهای سیال سه‌فازی تنها با از بین رفتن بلور هالیت همگن می‌شوند. محدوده دمایی همگن‌شدگی این نمونه‌ها بین ۴۰۰ تا ۴۶۰ درجه سانتی‌گراد برای کوارتزهای روتیل‌دار و ۴۸۰ تا ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد برای کوارتزهای پایه دودی- قهوه‌ای مایل به قرمز است (شکل ۷). در مجموع برای کل میانبارهای سیال مطالعه شده می‌توان دو بازه دمایی ۲۲۰ تا ۴۶۰ و ۴۸۰ تا ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد و همچنین دو پیک دمایی ۳۲۰ تا ۳۴۰ و ۵۶۰ تا ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفت (شکل ۷). مقایسه نتایج شوری و دمای همگن‌شدگی به‌دست آمده برای میانبارهای سیال موجود در انواع بلورهای کوارتز رنگی نشان می‌دهد که میانبارهای سیال درون بلورهای کوارتز روتیل‌دار و پایه دودی، شوری و دمای همگن‌شدگی بالاتری نسبت به‌سایر انواع دارند و در این میان، بلورهای کوارتز روتیل‌دار بالاترین مقادیر را نشان می‌دهند.



شکل ۶- هیستوگرام فراوانی شوری‌های اندازه‌گیری شده از میانبارهای سیال موجود در کوارتزهای شکل‌دار منطقه قهرود.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۷- هیستوگرام فراوانی درجه‌حرارت‌های همگن‌شدگی میانبارهای سیال موجود در کوارتزهای شکل‌دار در منطقه قهرود.

۷- بررسی نحوه تشکیل انواع بلورهای کوارتز رنگی قهرود

مکانیسم تشکیل بلورهای کوارتز و دگرسانی سیلیسی در سنگ‌ها ممکن است به دو صورت بوده باشد (کریم‌پور و سعادت، ۱۳۸۵): ۱) اضافه شدن SiO_2 به سنگ و درز و شکاف‌ها توسط سیال ماگمایی- گرمابی اشباع یا فوق اشباع از سیلیس؛ ۲) بالا رفتن مقدار سیلیس سیال به دلیل تجزیه کانی‌های سیلیکاتی موجود در سنگ در برگیرنده (واکنش‌های ۱ تا ۳؛ Guilbert and Park, 1997):

$$3KAlSi_3O_8 + 2H^+ \rightarrow KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6SiO_{22} + K^+ \quad (۱$$

فلدسپار پتاسیم — مسکوویت (سریسیت)

$$3NaAlSi_3O_8 + 2H^+ \rightarrow NaAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6SiO_2 \quad (۲$$

آلبیت — پاراگونیت

$$2CaAl_2Si_2O_8 + H^+ + Fe^{3+} \rightarrow Ca_2(Fe,Al)Al_3(Si_3O_4)O(OH) + SiO_2 \quad (۳$$

اپیدوت — آنورتیت

بر اساس شواهد صحرایی و سنگ‌نگاری، هر دو حالت فوق در خصوص تشکیل کوارتزهای خود شکل قهرود محتمل به نظر می‌رسند. بر اساس مطالعات ریزدماسنجی، بازه دمایی کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تا بیش از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برای میانبارهای سیال بلورهای کوارتز قهرود به دست آمده است (جدول ۱). لذا سیال گرمابی دما بالای اولیه احتمالاً برخاسته از توده نفوذی گرانیتوییدی بوده که با عبور از داخل گسل‌ها و درزه‌های موجود در سنگ‌های اطراف به نزدیکی سطح رسیده و در اثر اختلاط با آب‌های زیرزمینی و جوی، دما و شوری بالای خود را از دست داده است. این سیالات در حین بالا آمدن موجب تخریب شبکه کانی‌ها، از جمله بیوتیت، آمفیبول و فلدسپارهای توده نفوذی و سنگ‌های مسیر و در نتیجه تولید پروتون شده‌اند (واکنش‌های ۴ و ۵؛ Guilbert and Park, 1997):

$$KAlSi_3O_8 + 6.5Mg^{2+} + 10\,H_2O \rightarrow Mg_{6.5}(Si_3Al)O_{10}(OH)_8 + K^+ + 12H^+ \quad (۴$$

پتاسیم‌فلدسپار — کلریت

$$KFe_3AlSi_3O_{10}(OH)_2 + 6.5Mg^{2+} + 12H_2O \rightarrow Mg_{6.5}(Si_3Al)O_{10}(OH)_8 + Fe_3O_4 + K^+ + 12H^+ \quad (۵$$

مگنتیت — کلریت — بیوتیت

در طی واکنش‌های ۴ و ۵، سیال گرمابی اسیدی می‌شود و یون‌های H^+ حاصل به شبکه فلدسپارها حمله می‌کنند و از تجزیه آنها، میکاها و مقدار زیادی سیلیس محلول تولید می‌شود (واکنش‌های ۱، ۲ و۳). سیلیس محلول حاصل شده به همراه مازاد سیلیس باقیمانده از تبلور ماگمای اسیدی سبب اشباع شدن سیالات ماگمایی- گرمابی از سیلیس خواهد شد. برای ته‌نشست سیلیس سه عامل کاهش فشار، دما و pH سیال مورد نیاز است. کاهش تدریجی دما و فشار در حین بالا آمدن و تماس با سنگ‌های مسیر و وقوع واکنش‌های پروتون‌ساز ۴ و ۵ که به عنوان عاملی در کاهش pH سامانه عمل می‌کند، شرایط رسوب کوارتز را از سیال فوق اشباع فراهم آورده‌اند (Fouriner and Rowe, 1966). لذا واکنش‌های پروتون‌ساز، علاوه بر پایین آوردن pH سیال، موجب افزیش درجه اشباع‌شدگی سیلیس نیز می‌شوند که همراه با کاهش دما و فشار سیال، سبب رسوب آهسته کوارتز به شکل بلوری در داخل درز و شکاف‌ها خواهند شد.

۷- ۱. شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کوارتزهای شفاف و نیمه‌شفاف

کوارتزهای شفاف و نیمه‌شفاف فقط داخل شکاف‌های موجود در ماسه‌سنگ‌های رنگ روشن یافت می‌شوند. این بلورها می‌توانند در ارتباط با رشد آرام از یک سیال فوق اشباع از سیلیس، بدون حضور ناخالصی‌ها و یا واکنش شیمیایی با مواد تشکیل‌دهنده سنگ میزبان باشند خصوصاً که ماسه‌سنگ‌های میزبان صرفاً از کوارتز و مقادیر کمی فلدسپار تشکیل شده‌اند. میانگین دمای همگن‌شدگی سیالات به دام افتاده در این کوارتزها به‌ترتیب برابر با ۳۰۳ و ۳۵۹ درجه سانتی‌گراد و شوری آنها ۷/۵ و ۶/۸۱ wt % $NaCl_{equiv.}$ است (جدول ۱). علت نیمه‌شفاف و شیری بودن برخی از کوارتزها را می‌توان به فراوانی و ابعاد بزرگ‌تر میانبارهای سیال در آنها نسبت داد (Klein and Hurberbut, 1985).

۷- ۲. شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کوارتزهای زرد رنگ

میانگین دمای همگن‌شدگی و شوری سیال به دام افتاده در این نوع از بلورهای کوارتز به ترتیب ۳۲۹ درجه سانتی‌گراد و ۱۳/۱ wt% $NaCl_{equiv.}$ به دست آمده است. این گروه از بلورها در درز و شکستگی‌های ماسه‌سنگ‌های غنی از کانی‌های کدر یافت می‌شوند. سیالات گرمابی مولد این بلورها، به دلیل ماهیت اکسیدانشان و همچنین سیالات سطحی موجب اکسایش مگنتیت‌های موجود داخل ماسه‌سنگ‌ها و تبدیل آنها به هماتیت و لیمونیت شده‌اند که این اکسیدهای آهن، پوششی روی بلورهای کوارتز تشکیل داده و رنگ زرد کاذبی در آنها ایجاد کرده‌اند.

۷- ۳. شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کوارتزهای تیره رنگ

میانبارهای سیال موجود در این گروه از بلورهای کوارتز دارای میانگین دمای همگن‌شدگی ۳۰۵ درجه سانتی‌گراد و شوری ۵/۷ wt% $NaCl_{equiv.}$ هستند که از نظر دمایی، پایین‌تر از اکثر بلورهای کوارتز منطقه است (جدول۱) و لذا این بلورها احتمالاً در مراحل انتهایی فرایندهای گرمابی شکل گرفته‌اند. کوارتزهای تیره قهرود

Archive of SID

www.SID.ir

به دو صورت تک‌رنگ سیاه و ترکیبی از نقاط سیاه و سبز، داخل حفرات و درزه‌های سنگ‌های گرانودیوریتی یافت می‌شوند.

مطالعات مشابه بر روی آگات‌های میانه در شمال باختر ایران (حاج‌علیلو و همکاران، ۱۳۹۰)، حضور عناصر Mn، Fe و Ni و در مقادیر کمتر عناصر Cr و U را در ایجاد رنگ سیاه آگات‌ها دخیل دانسته‌اند. همچنین طبق مطالعات Hurlbut and Kammerling (1991) رنگ سیاه آگات‌ها به بالا بودن مقادیر اورانیم و توریم و تأثیرپذیری از تابش‌های رادیواکتیو نسبت داده می‌شود. ترکیب شیمیایی کوارتزهای با رنگ‌های سیاه و سیاه- سبز منطقه قهرود حاکی از فروانی بالای عناصر U، La Ge، Te، Mo، Ga، Zn، Bi، Co، Ni، Cr، Mg، Fe، Mn و Li در مقایسه با ترکیب شیمیایی سایر بلورهای کوارتز رنگی قهرود است (جدول ۲؛ رضاپور، ۱۳۹۳) و لذا حضور عناصری نظیر آهن، منگنز و منیزیم می‌تواند دلیل دیگری برای رنگ سیاه آنها باشد.

جدول ۲- نتایج آنالیز شیمیایی چهار نوع کوارتز از منطقه قهرود. QW1: کوارتز شفاف و نیمه‌شفاف، QS2: کوارتز پایه دودی- قهوه‌ای، QY3: کوارتز زرد رنگ، QB4: کوارتز سیاه رنگ (تیره).

Elem.	Unit	Det. Limit	QW1	QS2	QY3	QB4	Elem.	Unit	Det. Limit	QW1	QS2	QY3	QB4
Mn	ppm	۱	۱۲۶	۱۱۲	۱۳۰	۱۷۸	Y	ppm	۰/۱	۱/۲	۱/۷	۱/۵	۰/۶
W	ppm	۰/۱	۰/۱	۰/۳	۰/۱	۰/۱	Zr	ppm	۱	۰/۲	۰/۲	۰</۱	۰</۱
B	ppm	۱	۱۲	۱۳	۱۱	۱۱	Nb	ppm	۰/۱	<۱	<۱	<۱	<۱
Li	ppm	۰/۵	۱۱	۸/۴	۹/۷	۱۲/۲	Mo	ppm	۰/۰۵	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	۰/۲
Na	%	۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	In	ppm	۰/۱	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۳۱
Mg	%	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۶	Sn	ppm	۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	۰</۱
Al	%	۰/۰۱	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۴	Sb	ppm	۰/۱	۲	۴	۲	۲
K	%	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	Te	ppm	۰/۱	۰/۸	۰/۹	۰/۹	۱/۸
Ca	%	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۰۵	Ba	ppm	۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱
Ti	ppm	۰/۰۱	۱/۲۲	۱/۰۷	۱/۱۳	۱/۰۵	La	ppm	۰/۱	۱۶	۱۴	۱۴	۱۸
Cd	ppm	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	Ce	ppm	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲	<۰/۱
V	ppm	۱	۲	۳	۲	۲	Pr	ppm	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۰/۲	۰/۲
Cr	ppm	۰/۵	۷/۴	۶/۲	۶/۸	۷/۵	Nd	ppm	۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱
Fe	%	۰/۰۱	۰/۲۶	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۸	Sm	ppm	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲	<۰/۱
Hf	ppm	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	Gd	ppm	۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱ <	<۰/۱
Ni	ppm	۰/۵	۴	۲/۴	۴/۵	۷	Tb	ppm	۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱
Er	ppm	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	Dy	ppm	۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱
Be	ppm	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	Cu	ppm	۰/۲	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱
Ho	ppm	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	Ge	ppm	۰/۱	۴۱/۶۳	۳۹/۵	۴۰/۳۸	۴۳/۱
Hg	ppb	۱۰	۱۰<	۱۰<	۱۰<	۱۰<	Tm	ppm	۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱
Ag	ppm	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۶	۰/۱	۰/۱	Yb	ppm	۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱
Cs	ppm	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۱۶	Lu	ppm	۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱
Co	ppm	۰/۱	۳	۲	۳	۳/۱	Ta	ppm	۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱
Eu	ppm	۰/۰۵	<۰/۰۵	<۰/۰۵	<۰/۰۵	<۰/۰۵	Sr	ppm	۰/۲	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱
Bi	ppm	۰/۰۲	۱/۸۶	۰/۰۸	۱/۶۵	۲/۶۱	Re	ppm	۰/۰۱	۲/۷	۵/۲	۳/۶	۱/۹
Se	ppm	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	Tl	ppm	۰/۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲
Zn	ppm	۰/۲	۶/۳۷	۵/۱	۵/۳	۸/۳	Pb	ppm	۰/۵	<۰/۰۵	<۰/۰۵	<۰/۰۵	<۰/۰۵
Ga	ppm	۰/۱	۶/۵	۵/۲	۵/۲۸	۸/۳	Th	ppm	۰/۱	۴/۲۴	۷/۲	۲/۴۵	۲/۳
As	ppm	۰/۱	۰/۱	۰/۳	۰/۱	۰/۱	U	ppm	۰/۱	۰/۵	۰/۳	۰/۳	۰/۶
Rb	ppm	۰/۲	۳	۲/۳	۳	۳	Si	%	۰/۰۱	۴۶/۴۲	۴۶/۴۱	۴۶/۴۱	۴۶/۴۱

Archive of SID

www.SID.ir

آهن می‌تواند از طریق دگرسانی کانی‌های بیوتیت و آمفیبول توده گرانیتوییدی آزاد شود و فازهای اکسیدی- هیدروکسیدی تشکیل دهد (واکنش‌های ۵ و ۶). همزمان با دگرسان شدن کانی‌های بیوتیت و آمفیبول و تولید آهن مورد نیاز، سیال می‌تواند کانی‌های کلریت و اپیدوت را طبق واکنش‌های ۴ تا ۷ تولید کند (Guilbert and Park, 1997). مطالعات سنگ‌نگاری توده نفوذی قهرود حاکی از دگرسانی بیوتیت‌ها و آمفیبول‌ها و جانشینی‌شان توسط کلریت و اپیدوت و اکسیدهای آهن است که تأثیرگذاری آن بر تبلور کوارتزها، توسط حضور کوارتزهای سیاه رنگ، ترکیبی از سیاه و سبز و نیز سبز کم‌رنگ تأیید می‌شود.

$KFe_3(Al,Si)_3O_{10}(OH)_2 + 2Ca^{2+} \rightarrow (Ca,Fe)_2Al_3(Si_3O_2)O_{12}(OH) + Fe(OH) + K^+$ (۶

بیوتیت اپیدوت

$K_2(Mg,Fe)_5Si_6(AL,Si)_2O_{22}(OH)_2 + (Fe,Mg)^{2+}(aq) + 4H^+ \rightarrow Mg_3(Si,Al)_2(OH)_2(Mg,Fe)_3(OH)_6 + Fe_3O_4 + 6SiO_2 + 2K^+$ (۷

آمفیبول کلریت

همچنین آثاری از منگنز نقطه‌ای در لایه‌های رشدی بیرونی بلور و به‌صورت پوشش بر سطح خارجی بلورهای کوارتز سیاه مشاهده می‌شود. طبق نظر Maynard (1983) رسوب منگنز در شرایط Eh و pH بالا رخ می‌دهد و در محدوده وسیعی از Eh و pH پایین به‌صورت محلول در آب باقی می‌ماند. pH ۷ تا ۸ و بالاتر در حضور Eh > 0.2 ولت می‌تواند شرایط مساعدی برای شروع نهشت منگنز اکسیدی فراهم آورد (Maynard, 1983). در این راستا، یکی از عوامل مؤثر در تغییرات Eh سیال در منطقه می‌تواند وجود درز و شکستگی‌های فراوان و انواع گسل‌های اصلی و فرعی در منطقه باشد که مسیر نفوذ اکسیژن و آب‌های اکسیژن‌دار سطحی و اختلاط با سیالات گرمابی را فراهم می‌کنند و در نتیجه، باعث افزایش Eh سیال می‌شوند. از طرف دیگر، واکنش سیال با سنگ‌های دیواره گرانیتوییدی در طی دگرسانی‌های کلریتی و سریسیتی، نیازمند مصرف یون‌های H^+ است که به تدریج موجب افزایش pH می‌شود. از دیگر عوامل مهم در تغییرات Eh و pH می‌توان به واکنش‌های شیمیایی جهت مصرف یون‌های سولفید و سولفات اشاره کرد که در طی دگرسانی‌های سریسیتی و ژاروسیتی رخ می‌دهند (واکنش ۸) که شواهد هر دو دگرسانی در منطقه قهرود در مجاورت بلورهای کوارتز وجود دارد. به‌طور کلی ژاروسیت در محیط‌های اسیدی و غنی از سولفات در حضور آهن شکل می‌گیرد (Sazaki et al., 1998). در طی تشکیل ژاروسیت طبق واکنش ۸، با کاهش سولفات و مصرف شدن اسید سولفوریک محلول و تولید O_2 pH و Eh ،محیط به‌طور همزمان بالا می‌رود.

$KAlSi_3O_{10}(OH)_2 + 2H_2SO_4 + 2Fe_3O_4 + 7H_2O \rightarrow KFe_3(SO_4)_2(OH)_6 + Al_2Si_2O_5(OH)_4 + K(OH) + Fe(OH)_3 + 4SiO_2 + 6O_2(g)$ (۸

ژاروسیت مسکوویت (سریسیت) کائولینیت

در خصوص نقاط سبز رنگ یا بلورهای سبز کم‌رنگ می‌توان سه حالت زیر را پیشنهاد کرد (Heber and Rossman, 2008): ۱) ورود مقادیر جزیی آهن فریک درون شبکه کانی یا لایه‌های رشد؛ ۲) حضور عناصر فرعی نظیر آهن، منیزیم و منگنز در ترکیب محلول سازنده کوارتزها؛ ۳) آلایش با کانی‌های کلریت و اپیدوت تشکیل شده در اثر دگرسانی توده نفوذی. طبق نظر Heber and Rossman (2008) و با توجه به عناصر به دست آمده از آنالیز این کوارتزها (رضاپور و همکاران، ۱۳۹۶)، حضور مقادیر بالای آهن و عناصر کمیاب می‌تواند از دلایل ایجاد رنگ سبز در این نمونه‌ها باشد. در مجموع، با در نظر گرفتن غلظت عناصر در کوارتزهای سیاه و سبز رنگ قهرود و همچنین آنالیز شیمیایی توده گرانیتوییدی منطقه (جدول‌های ۲ و ۳)، به نظر می‌رسد سیال غنی از آهن، منیزیم و منگنز و ورود کانی‌های کلریت و اپیدوت در داخل لایه‌های رشد، عوامل اصلی در تشکیل بلورهای سیاه و سبز رنگ کوارتزهای مورد مطالعه بوده باشند.

۷-۴. شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کوارتزهای پایه دودی تا قهوه‌ای مایل به قرمز

این کوارتزها همانند نوع روتیل‌دار داخل سنگ‌های گرانیتی و گرانودیوریتی تشکیل شده‌اند. کوارتزهای دودی تا قهوه‌ای مایل به قرمز بالاترین دمای همگن‌شدگی (بالای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد) و شوری (۲۴/۶ wt % $NaCl_{equiv.}$) را نشان می‌دهند که احتمالاً می‌تواند در ارتباط با شکل‌گیری در مراحل اولیه فرایندهای گرمابی باشد. از مهم‌ترین دلایل رنگ دودی در کوارتز می‌توان به وجود عناصر پرتوزا و رادیواکتیو از قبیل اورانیم و توریم (Klein and Hurberbut, 1985) و نیز طبق نظر Deer et al. (2013) به فراوانی عنصر آلومینیم در سایت‌های بلوری به جای سیلیسیم اشاره کرد. مقدار توریم در نمونه‌های این نوع کوارتز (۷/۲ ppm) بیشتر از سایر کوارتزهای منطقه است و اورانیم نیز به مقدار قابل توجهی در این نمونه‌ها حضور دارد (۰/۳ ppm؛ رضاپور و همکاران، ۱۳۹۶). این در حالی است که مقدار توریم در بلورهای کوارتز زرد رنگ، شفاف- نیمه‌شفاف و سیاه رنگ به ترتیب برابر با ۲/۴۵ ، ۴/۲۴ و ۲/۳۰ ppm و مقدار اورانیم نیز به ترتیب برابر با ۰/۳ ، ۰/۵ و ۰/۶ ppm است. علاوه بر این، می‌توان ادعا کرد که این بلورها جزو اولین کوارتزهای رشد کرده در منطقه هستند. در این حالت، آلومینیم با داشتن غلظت بالاتر نسبت به مراحل بعدی در داخل سیال، این امکان را داشته است که بتواند بیشترین جانشینی را با Si^{4+} انجام دهد و سبب رنگ دودی ضعیف شود. همچنین به اعتقاد Maneta and Voudouris (2010) در مناطقی که کوارتزهای دودی یافت می‌شوند سریسیت معمولاً می‌تواند به‌صورت فانتوم (Phantom) داخل بلور کوارتز ظاهر شود. بر این اساس، احتمالاً بتوان حضور سریسیت و کلریت را به‌صورت میانبار جامد داخل بلور کوارتز، یکی دیگر از عوامل موثر در ایجاد رنگ دودی در نظر گرفت (Maneta and Voudouris, 2010). در نهایت می‌توان غلظت بالای عناصر U، Re، Pr، Sb، Zr، Y، As، Cs، V، Ca، K، Al، W و Th (در مقایسه با سایر کوارتزهای رنگی قهرود) را در ایجاد رنگ دودی در پایه کوارتز دخیل دانست (جدول ۲؛ رضاپور، ۱۳۹۳). Deer et al. (2013) رنگ سرخ کوارتز را به‌حضور سوزن‌های روتیل نسبت داده‌اند. مطالعه مقاطع تهیه شده از کوارتزهای دودی- قهوه‌ای مایل به قرمز، حضور کانی‌های روتیل به‌صورت سوزن‌های ریز را تأیید می‌کند. بر این اساس می‌توان رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز این کوارتزها را در کنار رنگ دودی، به تشکیل سوزن‌های ریز روتیل در دمای بالا نسبت داد.

۷-۵. شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کوارتز حاوی بلورهای سوزنی روتیل

میانگین دمای همگن‌شدگی این گروه ۴۰۱ درجه سانتی‌گراد و شوری آنها ۲۵/۷ wt% $NaCl_{equiv.}$ است که از این لحاظ، جزو کوارتزهای دما بالا محسوب می‌شوند. مطالعات بدر و همکاران (۱۳۹۲) نشان داده است که اسفن مهم‌ترین کانی فرعی در توده گرانیتوییدی قهرود است. از طرف دیگر، مقادیر TiO_2 اندازه‌گیری شده بر روی گرانیتویید قهرود بین ۰/۵۸ تا ۰/۹۴ درصد با میانگین ۰/۷۶ درصد است (جدول ۳).

لذا این توده به احتمال زیاد تأمین کننده تیتانیم مورد نیاز برای تشکیل فاز روتیل در بلورهای کوارتز بوده است که به دنبال دگرسان شدن کانی‌های فرومنیزین و کدر موجود در توده، وارد بلورهای کوارتز شده و در دما و فشار مناسب به‌صورت میانبارهای جامد متبلور شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳- نتایج تجزیه عناصر اصلی توده گرانیتوییدی قهرود. نمونه‌ها توسط بدر و همکاران (۱۳۹۲) تجزیه شده‌اند.

Samp. /(wt%)	J12+1	J12	A1	J6	J8	J29	J1
TiO_2	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۵۸	۰/۶۵	۰/۷۸	۰/۸۳	۰/۹۴
Al_2O_3	۱۷/۱۰	۱۷/۲۰	۱۶/۴۰	۱۶/۷۲	۱۶/۷۱	۲۱/۹۰	۱۶/۶۲
Fe_2O_3	۲/۱۰	۲/۱۱	۱/۷۳	۲/۲۵	۲/۸۰	۲/۵۸	۲/۸۳
FeO*	۳/۱۶	۳/۱۷	۲/۶۰	۳/۴۰	۴/۱۸	۳/۵۸	۴/۲۴
MnO	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۱۳
MgO	۲/۷۹	۲/۷۴	۱/۹۳	۲/۵۸	۳/۴۰	۲/۳۳	۲/۸۹

۸- نتیجه‌گیری

فعالیت‌های ماگمایی و گرمابی حاصل از توده گرانیتوییدی قهرود منجر به تشکیل کوارتزهای خودشکل با رنگ‌های شفاف، نیمه‌شفاف، سبز کم‌رنگ، زرد، سیاه، روتیل‌دار، پایه دودی و پایه قهوه‌ای مایل به قرمز در شکستگی‌ها و حفرات درون سنگ‌های منطقه شده است.

نحوه تشکیل بلورهای کوارتز به دو صورت وارد شدن SiO_2 توسط سیال گرمابی به داخل شکاف‌ها وهمچنین بالارفتن مقدار سیلیس سیال به دلیل تجزیه کانی‌های سیلیکاتی توده گرانیتوییدی و ماسه‌سنگ‌های منطقه در حضور یون H^+ و خروج سیلیس سیال از پیکره آنهاست.

نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال درون بلورهای رنگی کوارتز نشان می‌دهد که کوارتزهای پایه دودی تا قهوه‌ای از سیالی با بالاترین دما و شوری متبلور شده‌اند و می‌توان آنها را اولین نسل بلورهای کوارتز در منطقه در نظر گرفت. بلورهای کوارتز حاوی روتیل در دمای پایین‌تری نسبت به کوارتزهای پایه دودی و احتمالاً به‌دنبال افت دمای سیال نهشته شده‌اند. میانبارهای سیال حاوی بلور نوزاد هالیت تنها در این دو نوع مشاهده شدند که خود مؤید دما و شوری بالاتر سیال مولدشان است. سایر انواع بلورهای کوارتز دماهای پایین‌تر نزدیک به هم دارند و پایین‌ترین دما مربوط به بلورهای کوارتز شفاف و بلورهای تیره‌رنگی است که در لایه‌های بیرونی رشدشان آغشتگی به اکسید آهن و منگنز مشاهده می‌شود. داده‌های ریزدماسنجی مؤید سرد شدن سیال مولد برخاسته از توده نفوذی با طی مسافت در داخل ماسه‌سنگ‌هاست.

مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد که بلورهای کوارتز زرد، سبز و تیره رنگ دارای هسته شفاف هستند و رنگ‌های مربوطه تنها در لایه‌های بیرونی رشد بلور ظاهر شده‌اند. در این راستا، رنگ زرد به‌علت آغشتگی به اکسیدهای آهن حاصل شده است. کوارتزهای سبز در اثر آغشتگی با دگرسانی‌های کلریتی و اپیدوتی سنگ‌های دربرگیرنده و کوارتزهای تیره رنگ با نهشته شدن اکسیدهای آهن و منگنز در لایه‌های پایانی تشکیل شده‌اند. رنگ کوارتزهای قهوه‌ای مایل به قرمز نیز نتیجه حضور سوزن‌های ریز روتیل است و تشکیل بلورهای دودی را می‌توان به دلیل جانشینی عنصر Al به جای Si و همچنین حضور عناصر U و Th دانست.

میانبارهای جامد درون بلورهای خود شکل کوارتز، اعم از بلورهای روتیل، یا ذرات اپیدوت و کلریت، احتمالاً به دو صورت تشکیل شده‌اند: ۱) تأمین عناصر مورد نیاز برای تشکیل کوارتز و میانبارهای جامد از طریق سیال و سپس محصور شدن این میانبارها در بین لایه‌های رشد بلورهای کوارتز؛ ۲) ورود مستقیم ذرات بسیار ریز از کانی‌ها در لایه‌های رشد بلوری و تشکیل بلورهای کوارتز با رنگ‌های متفاوت.

Archive of SID

www.SID.ir

کتابنگاری

بدر، ا.، طباطبائی‌منش، م.، مکی‌زاده، م.، هاشمی، م. و تقی‌پور، ب.، ۱۳۹۲- مطالعه کانی‌شناسی و ژئوشیمی توده نفوذی قهرود. پترولوژی، ۱۵، ص. ۹۷ تا ۱۰۴.

پادیار، ف.، رهگشای، م.، علیرضایی، س.، پورمعافی، م.، تورینتا، ا.، واندر حقی، ا. و کمیل کومون، م.، ۱۳۹۵- مطالعه کوارتزهای گرمابی بر پایه کاتدولومینسانس، ریز دماسنجی و لیزر رامان در کانسار لاطلا، شمال میدوک. علوم زمین، ۱۰۲، ص. ۳۹ تا ۵۲.

حاج‌علیلو، ب.، وثوق، ب. و مؤذن، م.، ۱۳۹۰- ویژگی‌های کانی‌شناسی، ژئوشیمی، گوهرشناسی و علل تنوع رنگ در آگات‌های میانه، شمال غرب ایران. مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، ۱۹، ص. ۴۲۷ تا ۴۳۸.

رضاپور، م. ر.، مؤذن، م.، حاجی‌علی‌اوغلی، ر. و سیمونز، و.، ۱۳۹۶- برآورد دمای تبلور بلورهای کوارتز خودشکل منطقه قهرود کاشان با استفاده از دماسنج TitaniQ. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲۵، ص. ۸۰۱ تا ۸۱۰

رضاپور، م.ر.، ۱۳۹۳- مطالعه بلورهای شکل‌دار کوارتز منطقه کاشان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، ۱۷۶ ص.

کریم‌پور، م. ح. و سعادت، س.، ۱۳۸۵- زمین‌شناسی اقتصادی کاربردی. چاپ سوم، انتشارات ارسلان مشهد، ۴۸۵ ص.

References

Bodnar, R. J. and Vityk, M. O., 1994- Short Course IMA: Fluid inclusions in minerals, methods and applications. p. 117- 130.

Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J., 2013- An introduction to the rock forming minerals. Longman, p. 496- 502.

Dibble, H. L., 2002- Quartz: An introduction to crystalline quartz. NY, USA, 100 p.

Fouriner, R. O. and Rowe, J. J., 1966- Estimation of underground temperature from silica content of water from hot springs and wet-steam wells. American Journal of Science, V. 264, p. 685- 697.

Guilbert, J. M. and Park, Jr. C. F.,1997- Geology of ore deposits. Freaman and Company, New York, 985 p.

Heber, L. B. and Rossman, G. R., 2008- Greenish quartz from the Thunder Bay Amethyst Mine Panorama, Thunder Bay, Ontario, Canada. The Canadian Mineralogist, V. 46, p. 61- 74.

Howard, M. J., 2008- Arkansas quartz crystals. Arkansas Geological Survey, Brochure Series 001.

Hurlbut, C. S. and Kammerling, R. C., 1991- Gemology. John Wiley and Sons, NY, 371 p.

Klein, C. and Hurberbut, C. S. Jr., 1985- The manual of mineralogy. 20th ed., Johan Wiley and Sons, 681 p.

Kurt, N. and Betty, E. P., 1977- A unique green quartz. American Mineralogist, V. 62, p. 582- 590.

Maneta, V. and Voudouris, P., 2010- Quartz megacrysts in Greece: mineralogy and environment of formation. Bulletin of the Geological Society of Greece, Proceedings of the 12th International Congress Patras.

Maynard, J. B., 1983- Geochemistry of sedimentary ore deposits. Springer- Verlag, 305 p.

Rao, P. S., John, A., Weil, J. A. and Williams, J. A. S., 1989- EPR investigation of Carbonaceous natural quartz single crystals. The Canadian Mineralogist, V. 27, p. 219-224.

Rykart, R., 1995- Quartz-Monographie. Ott Verlag Thun, 461 p.

Sazaki, K., Tanaike, O. and Konno, H., 1998- Distinction of Jarosite-group compounds by Raman spectroscopy. The Canadian Mineralogist, V. 36, p. 1225- 1235.

Shepherd, T. J., Rankin, A. H. and Alderton, D. H., 1985- A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie and Son, 239 p.

Archive of SID

www.SID.ir

Investigation on the physical and chemical conditions of the formation of hexagonal colored quartz crystals in Qohrud area based on petrographic evidence and fluid and solid inclusion studies

M. R. Rezapour[1], V. Simmonds[2*], M. Moazzen[3] and R. Hajialioghli[4]

[1]M.Sc. of geochemistry, Department of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[2]Associate Professor, Research Institute for Fundamental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[3]Professor, Department of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[4]Associate Professor, Department of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 2016 November 12 Accepted: 2017 December 29

Abstract

The Qohrud granitoid body of Miocene age is located 40 km SW Kashan, ranging in composition from granite through granodiorite to tonalite. Hydrothermal activities following the magma intrusion have brought about formation of various coarse automorphic and colored quartz crystals within the fractures and cavities of different lithologies. The quartz crystal varieties include transparent, semi-transparent, pale green, yellow and black crystals, as well as those with smoky and reddish brown bases and also crystals containing tiny acicular rutile inclusions. Geochemical, as well as fluid and solid inclusion studies on the colored and automorphic quartz crystals indicate that various physical and chemical factors, such as temperature, pressure, magma and host rock compositions, hydrothermal fluids and the associated alterations, as well as pH and Eh were involved in the formation of these automorphic colored crystals. The solid inclusions within these automorphic quartz crystals might have formed in two ways: 1) introduction of the required elements for the formation of quartz and the solid inclusions by the fluids and then, entrapment of these inclusions within the growth layers of quartz crystals; 2) direct introduction of very fine mineral particles within the growth layers of quartz, leading to the occurrence of various colored crystals. Smoky crystals can be formed by the replacement of Si by Al and also by the presence of U and Th within them. The reddish color of quartz crystals was attributed to the presence of fine rutile needles. Automorphic black-colored quartz crystals are formed at oxidant and almost high pH conditions by initial precipitation of magnetite, followed by manganese oxides at the outermost growth layers. The green quartz crystals have been resulted from chloritic and epidotic alterations within the host and neighboring rocks.

Keywords: Qohrud, Kashan, Colored quartz, Fluid inclusion, Solid inclusion, Homogenization temperature, Salinity.

For Persian Version see pages 95 to 104

*Corresponding author: V. Simmonds; E-mail: simmonds_vartan@tabrizu.ac.ir

Archive of SID

Created with nitroPDF professional
www.SID.ir
download the free trial online at nitropdf.com/professional