

ریزطیف‌نمایی لیزر رامان میانبارهای سیال و تکامل سیال‌های کانه‌ساز در سامانه مس پورفیری باغ خشک، جنوب کمربند ماگمایی ارومیه- دختر

مرتضی عین‌علی^{۱*}، سعید علیرضایی^۲ و رونالد بکر^۳

^۱ دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه علوم زمین کاربردی و ژئوفیزیک، دانشگاه لئوین، لئوین، اتریش

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۱۱

چکیده

سامانه پورفیری باغ‌خشک در بخش جنوبی کمربند ماگمایی سنوزویک ارومیه-دختر جای گرفته است. کانی‌سازی مس در باغ‌خشک با دو توده نفوذی نیمه‌ژرف دیوریتی-مونوزدیوریتی و گرانودیوریتی همراه است که در سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی نفوذ کرده‌اند. هر دو توده نفوذی توسط سیال‌های گرمابی به مجموعه‌های دگرسانی پتاسیک، فلیک و پروپیلیتیک دگرسان شده‌اند. کانی‌سازی در باغ‌خشک، به شکل استوک‌ورک‌های کوارتز-سولفید و همچنین سولفیدهای افشان در این دو توده نفوذی و نیز به مقدار کمتر در سنگ‌های آتشفشانی میزبان رخ داده است. در سامانه پورفیری باغ‌خشک، دو نوع رگچه کوارتز شناسایی شده است: (۱) رگچه‌های کوارتز+کالکوپریت+پیریت±مولیبدیت (رگچه‌های کانه‌دار یا بارور)؛ و (۲) رگچه‌های کوارتز±پیریت (رگچه‌های نابارور). توده‌های نفوذی باغ‌خشک در نمودار بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه، با غنی‌شدگی در عناصر لیتوفیل بزرگ‌یون و عناصر خاکی کمیاب سبک، نسبت به عناصر با شدت میدان بالا و عناصر خاکی کمیاب سنگین، و نیز فروافتادگی در محل عناصر Ta و Nb، مشخص می‌شوند که از ویژگی‌های شاخص کمان‌های ماگمایی مرتبط با فرورانش است. در نمودارهای تفکیک جایگاه زمین‌ساختی، توده‌های نفوذی باغ‌خشک در محیط کمان قاره‌ای قرار می‌گیرند. سه نوع اصلی میانبار سیال در رگچه‌های کوارتز کانه‌دار شناسایی شده است: میانبارهای غنی از بخار با شوری پایین (۸-۴ درصد جرمی معادل نمک)، میانبارهای چندفازی با شوری بالا (۳۵-۳۲/۵ درصد جرمی معادل نمک) و میانبارهای غنی از مایع با شوری به نسبت پایین (۱۰-۴ درصد جرمی معادل نمک). میانبارهای غنی از بخار، دماهای همگنی میان ۳۲۶ تا ۴۳۴ درجه سانتی‌گراد دارند و بیشتر اندازه‌گیری‌ها میان ۳۸۰ تا ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد است. تجزیه ریزطیف‌نمایی لیزر رامان (Laser Raman Microspectroscopy) حضور گاز کربن دی‌اکسید و بلورهای نوزاد کالکوپریت را در میانبارهای غنی از بخار تأیید کرده است. میانبارهای چندفازی غالباً در گستره دمای ۳۰۰ تا ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد به فاز مایع همگن شدند. میانبارهای غنی از مایع، دماهای همگن‌شدگی میان ۱۵۰ تا ۳۸۴ درجه سانتی‌گراد دارند و بیشتر اندازه‌گیری‌ها میان ۲۵۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۷۵-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است. شوری و دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال کوارتز در رگچه‌های نابارور، به ترتیب ۴-۰/۵ درصد جرمی معادل نمک و ۲۴۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. داده‌های میانبار سیال نشان از آن دارد که مس با یک سیال غنی از بخار یا فوق بحرانی (داغ ۴۲۰-۳۸۰ درجه سانتی‌گراد)، دارای کربن دی‌اکسید، و نه چندان شور (۸-۴ درصد جرمی معادل نمک) در سامانه وارد شده است. کاهش دما در شوری ثابت از میانبارهای غنی از بخار به میانبارهای غنی از مایع در رگچه‌های کانه‌دار، پیشنهاد می‌کند که سرد شدن عامل کنترل‌کننده مهمی در فرایند کانی‌سازی به‌صورت استوک‌ورک و افشان بوده است. در مرحله‌های پسین فعالیت گرمابی، سیال‌های گرمابی با شوری پایین و فقیر از مس، سبب تشکیل رگچه‌های فراوان نابارور کوارتز-پیریت شده است.

کلیدواژه‌ها: میانبار سیال، ریزطیف‌نمایی لیزر رامان، مس پورفیری، باغ‌خشک، ارومیه-دختر، ایران.

*نویسنده مسئول: مرتضی عین‌علی

E-mail: m_einali@sbu.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

از سامانه پورفیری باغ‌خشک گزارش و بحث می‌شود. همچنین پتروژن توده‌های نفوذی این کانسار مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. هدف از این پژوهش، شناسایی ویژگی‌های توده‌های نفوذی باغ‌خشک و منبع، ماهیت و تکامل سیال‌هایی است که عامل دگرسانی و کانی‌سازی در این سامانه مس پورفیری بوده‌اند.

کانسارهای مس ± مولیبدن ± طلای پورفیری بی‌شماری در کمربند کوهزایی آلپ-همالیا وجود دارد (برای نمونه: Calagari, 2004; Singer et al., 2005; Hou & Cook, 2009; Alirezai & Hasanpour, 2011). کمربند ماگمایی سنوزویک ارومیه-دختر در ایران، با بیش از ۱۰۰ کانسار و ذخیره شناخته شده مس از این نوع، در بخش باختری این کمربند کوهزایی واقع شده است. سیستم مس پورفیری باغ‌خشک، در جنوب کمربند ارومیه-دختر و در ۱۵ کیلومتری جنوب خاور کانسار سترگ مس-مولیبدن-طلای سرچشمه قرار دارد (شکل ۱). این سامانه پورفیری برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۷۰ توسط زمین‌شناسان یوگسلاو شناسایی و ذخیره‌ای برابر با ۲۴ میلیون تن با عیار ۰/۲۷ درصد مس برای آن گزارش شد (Nedimovic, 1973). این کانسار به تازگی توسط شرکت ملی صنایع مس ایران مورد اکتشاف تفصیلی و ارزیابی دوباره، با استفاده از حفاری مغزه‌ای قرار گرفته است (شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۹).

۲- روش مطالعه

این مطالعه بر مشاهدات میدانی، برداشت‌های زمین‌شناسی سطحی و لاگ مغزه‌های حفاری استوار است. شناسایی واحدهای سنگی، دگرسانی‌ها و کانی‌سازی، با بررسی روابط صحرائی و مطالعه مغزه‌های حفاری در مقیاس‌های میکروسکوپی و میکروسکوپی انجام شده است. برای بررسی پتروژن توده‌های نفوذی، ۷ نمونه از توده‌های نفوذی با کمترین دگرسانی برای تجزیه شیمی‌گزیته‌ها انتخاب شد. نمونه‌ها تا اندازه کمتر از ۴۰۰ مش با آسیاب آگاتی در دانشکده علوم زمین کاربردی و ژئوفیزیک دانشگاه لئوین اتریش، آماده‌سازی و با روش ذوب LiBO₂ و دستگاه‌های ICP-MS و ICP-ES در آزمایشگاه ACME و نکور کانادا تجزیه شدند. گوگرد و کربن کل با کوره Leco اندازه‌گیری شد. دقت و درستی تجزیه‌ها با استانداردهای USGS و

سرشت و تکامل سیال‌های درگیر در کانی‌سازی و دگرسانی گرمابی در سامانه‌های پورفیری، موضوع بررسی‌های فراوان از دیدگاه علمی و کاربرد آن در اکتشاف بوده است. در این مقاله، برای نخستین بار تجزیه‌های لیزر رامان و داده‌های میانبار سیال

فراوانی مودال)، هورنلند (۲۰-۱۸ درصد)، کوارتز (۲۰-۱۵ درصد) و بیوتیت (۵-۱ درصد) است (شکل ۳-الف). کانی‌های همراه اولیه، شامل مگنتیت و زیرکن است؛ اگر چه مقداری سولفید (به‌ویژه پیریت و کالکوپیریت) و روتیل، حتی در نمونه‌هایی با کمترین دگرسانی نیز دیده می‌شود. بافت این توده از گرانولار تا پورفیری تغییر می‌کند.

توده گرانودیوریتی شامل پلاژیوکلاز (۴۵-۴۰ درصد)، کوارتز (۴۰-۳۵ درصد)، فلدسپار قلیایی (۱۵-۱۰ درصد)، بیوتیت (۸-۵ درصد) و هورنلند (۴-۲ درصد) با بافت گرانولار تا پورفیری است (شکل ۳-ب). کانی‌های همراه، شامل زیرکن، آپاتیت، مگنتیت و ایلمنیت است. روابط قطع‌شدگی پیشنهاد می‌کند که توده دیوریتی-مونزودیوریتی کهن‌تر از توده گرانودیوریتی است. داده‌های سن‌سنجی موجود نشان می‌دهند که بیشتر توده‌های نفوذی کم‌ژرفا همراه با کانی‌سازی مس نوع پورفیری در بخش جنوبی کمر بند ارومیه-دختر، مربوط به میوسن بالایی هستند (Shahabpour, 1982; Hassanzadeh, 1993; McInnes et al., 2005). کاظمی مهرنیا، ۱۳۸۹). از این رو، می‌توان سن مشابهی را برای توده‌های نفوذی در باغ‌خشک در نظر گرفت.

هر دو توده نفوذی و سنگ‌های میزبان آنها به‌طور گسترده دستخوش دگرسانی گرمایی شده‌اند و مجموعه‌های دگرسانی پتاسیک، فلیک و پروپیلیتیک در آنها پدید آمده است. دگرسانی پتاسیک در توده دیوریتی-مونزودیوریتی و در سنگ‌های آتشفشانی میزبان به خوبی گسترش یافته است. این دگرسانی با تشکیل بیوتیت ثانویه در زمینه و نیز به‌صورت جانیشینی هورنلند و بیوتیت ماگمایی اولیه شناخته می‌شود (شکل ۳-پ). مگنتیت در این دگرسانی معمول است و به‌صورت افشان و همچنین رگچه‌ای پدید آمده است. دگرسانی پروپیلیتیک در حاشیه توده‌های نفوذی و سنگ‌های میزبان رخ داده است که در آن سیلیکات‌های آهن و منیزیم‌دار به کلریت، اپیدوت، کلسیت و تیتانیت، و پلاژیوکلازها به‌طور بخشی به کلسیت و اپیدوت دگرسان شده‌اند.

دگرسانی فلیک، در توده‌های نفوذی به‌ویژه در توده گرانودیوریتی گسترش یافته است و با رخداد سرسیت-کوارتز-کلریت-پیریت \pm کالکوپیریت مشخص می‌شود (شکل ۳-ت). این دگرسانی، با استوک‌ورک‌های کوارتز-سولفید و همچنین سولفید افشان همراه است. کالکوپیریت کانه هیپوژن اصلی مس است و مقدار کمی مولیبدنیت نیز شناسایی شده است. توده گرانودیوریتی با دگرسانی فلیک، عیار مس بالاتری (۴/۳-۰/۴ درصد مس) در مقایسه با توده دیوریتی-مونزودیوریتی با دگرسانی پتاسیک (۲/۱-۰/۱ درصد مس) دارد.

کانی‌سازی در باغ‌خشک به‌صورت استوک‌ورک‌های کوارتز-سولفید و همچنین سولفید افشان در هر دو توده نفوذی و همچنین سنگ‌های دیواره رخ داده است. بر پایه کانی‌شناسی و روابط قطع‌شدگی، دو نوع اصلی رگچه همراه با دگرسانی‌های پتاسیک و فلیک شناسایی شد: (۱) رگچه‌های کانه‌دار کوارتز + کالکوپیریت + پیریت \pm مولیبدنیت؛ و (۲) رگچه‌های نابارور کوارتز \pm پیریت. رگچه‌های کانه‌دار از کوارتز بلورین، همراه با پیریت، کالکوپیریت و گاه مولیبدنیت تشکیل شده‌اند (شکل ۴-الف) و سبزی آنها از ۵/۰ تا ۲ سانتی متر تغییر می‌کند. مولیبدنیت، چنانچه حضور داشته باشد، معمولاً در حاشیه رگچه‌ها دیده می‌شود. رگچه‌های نابارور شامل کوارتز، همراه با مقادیر متفاوتی پیریت هستند (شکل ۴-ب). سبزی این رگچه‌ها از کمتر از ۱ تا ۱۰ سانتی متر تغییر می‌کند. رگچه‌های نابارور فراوانی بیشتری نسبت به رگچه‌های کانه‌دار دارند.

۴-۲. ژئوشیمی و سنگ‌شناسی توده‌های نفوذی

توده‌های نفوذی باغ‌خشک دارای ۴۸/۷ تا ۶۸/۲ درصد SiO_2 هستند (جدول ۱) و گستره سنگ‌شناسی آنها از مونزوکابرو تا گرانودیوریت تغییر می‌کند (شکل ۵). قرارگرفتن یک نمونه در محدوده مونزوکابرو، می‌تواند به دلیل تأثیر دگرسانی

نمونه‌های تکراری مشخص شد که در بازه ± 1 درصد برای اکسیدهای اصلی و ± 10 درصد برای عناصر فرعی و کمیاب است.

پس از بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری از سطح و مغزه‌های حفاری، ۶ مقطع دوبر صیقلی از رگچه‌های کوارتز برای سنگ‌نگاری میانبارهای سیال تهیه شد که از این میان چهار نمونه برای مطالعات و اندازه‌گیری‌های سرمایش-گرمایش انتخاب شد: سه نمونه مربوط به رگچه‌های کانه‌دار و یک نمونه از رگچه‌های نابارور. توصیف این نمونه‌ها در جدول ۲ آمده است. آزمایش‌های سرمایش-گرمایش میانبارهای سیال، در گروه علوم زمین و ژئوفیزیک دانشگاه لئوین اتریش، و با استفاده از دستگاه Linkam MDS600 مجهز به میکروسکوپ Olympus BX40 انجام شد. دامنه دمای قابل اندازه‌گیری توسط این دستگاه، میان ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است و کالیبراسیون آن با استفاده از میانبارهای سیال مصنوعی شرکت Synflinc انجام شد. برای سرمایش، دقت در حدود ± 0.3 درجه سانتی‌گراد برای ذوب کربن دی‌اکسید و ± 0.2 درجه سانتی‌گراد برای ذوب یخ، و برای گرمایش، دقت در حدود ± 1 درجه سانتی‌گراد برای نقطه بحرانی آب است. شوری به‌صورت درصد جرمی معادل نمک (mass% NaCl equivalent) (کلمه وزن، کمی برای بیان نیرو است و کلمه مناسبی برای بیان مقدار ماده در یک ترکیب نیست. در نتیجه استفاده از درصد جرمی به جای درصد وزنی، بر پایه استانداردهای بین‌المللی، مناسب‌تر است (Bakker, 2011)) گزارش شده است که بر پایه فرمول حل‌پذیری نمک برای میانبارهای اشباع از نمک (Sterner et al., 1988) و دمای پایانی ذوب یخ برای میانبارهای ناشباع از نمک (Bodnar, 1993) است. آزمایش‌های سرمایش و گرمایش، روی ۲۶۶ میانبار سیال انجام شده است.

ترکیب میانبارهای سیال، به‌وسیله ریزتیف‌نمایی رامان (Raman Microspectroscopy) و با استفاده از یک سامانه LABRAM Jobin-Yvon در دانشگاه لئوین تعیین شد. مواد جامد موجود در میانبارهای سیال، با استفاده از ابزار ISA Jobin Yvon با بسامد ۱۲۰ میکروولت و لیزر Nd-YAG با طول موج 532.2 nm نانومتر شناسایی شدند. اعداد موج حاصل از تیف‌نمایی با پراکنش Rayleigh (0 cm^{-1})، سیلیکون (520.7 cm^{-1}) و پلی‌اتیلن (قله‌های اصلی در $1062.1, 1128.09, 1294.8, 1438.8, 2880.9 \text{ cm}^{-1}$ ، با استفاده از اعداد موج تصحیح شده به روش معادله بهترین خط همخوان (best fit line) تصحیح شدند. زمان تابش لیزر میان ۲۰ تا ۶۰ ثانیه متغیر بوده که بستگی به حساسیت سیگنالی میانبارها، حجم میانبارها، حجم بلورها و ژرفای میانبارها در کوارتز میزبان داشته است.

۳- بحث

۳-۱. زمین‌شناسی

کمر بند ماگمایی سنوزویک ارومیه-دختر، میزبان اصلی کانسارهای مس-مولیبدن پورفیری و فلزات گرانبه‌ای اپی‌ترمال در ایران است. این کمر بند، بخشی از کمر بند کوهزایی برخوردی آلپ-همیالیا است که از باختر اروپا تا ترکیه، ایران و باختر پاکستان گسترش دارد (Mao et al., 2014; Richards, 2014). کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر، با چیرگی سنگ‌های نفوذی، آتشفشانی و آذرآواری کالک‌آلکالین مشخص می‌شود و به عنوان یک کمان ماگمایی قاره‌ای تفسیر شده که با فرورانش با شیب شمال‌باختر پوسته اقیانوسی نوتیس به زیر خردقاره (Microcontinent) ایران مرکزی در مزوزویک پسین-سنوزویک پدید آمده است (Berberian et al., 1982; Hassanzadeh, 1993; Alavi, 1980 & 1994; Omrani et al., 2008).

کهن‌ترین سنگ‌هایی که در ناحیه باغ‌خشک رخنمون دارند، شامل یک توالی از گدازه‌ها و مواد آذرآواری آندزیتی ائوسن است. یک توده دیوریتی-مونزودیوریتی و یک توده گرانودیوریتی در این سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری نفوذ کرده است (شکل ۲). توده نخست به رنگ خاکستری تیره و شامل پلاژیوکلاز (۶۵-۶۰ درصد

بیشتر میانبراهای دوفازی غنی از مایع در رگچه‌های نابارور شکل نامنظم دارند و اندازه آنها از ۱ تا ۱۰ میکرومتر تغییر می‌کند، اگر چه بیشتر میانبرها میان ۲ تا ۵ میکرومتر هستند. در رگچه‌های کانه‌دار، این میانبرها شامل مایع و حباب بخار هستند که حباب بخار کمتر از ۳۵ درصد حجم میانبار را تشکیل می‌دهد (شکل ۱۰-ب). این میانبرها به شکل‌های نامنظم، کم‌بیش کروی و کشیده دیده می‌شوند (شکل ۱۰-ب) و ۳ تا ۴۰ میکرومتر قطر یا درازا دارند، اگر چه بیشتر آنها میان ۵ تا ۱۰ میکرومتر هستند. میانبرهای دوفازی غنی از مایع، در طول شکستگی‌های ترمیم شده و به صورت دسته‌های پراکنده دیده می‌شوند که نوع اول آن در رگچه‌های کانه‌دار فراوان تر است. مجموعه‌های همزیست میانبرهای دوفازی غنی از مایع و بخار در یکی از نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده شد (شکل ۱۰-پ). میانبرهای دوفازی غنی از بخار، دارای فاز بخار+مایع ± فاز جامد هستند. فاز جامد که با ریزطیف‌نمایی رامان شناسایی شده، کالکوپریت است که بیشتر با بلورهای سه‌گوش دیده می‌شود (شکل ۱۰-ت). حباب‌های بخار اندازه‌های گوناگونی دارند، اما در بیشتر موارد بیش از ۶۰ درصد حجم میانبار را فرا گرفته‌اند. این میانبرها شکل‌های بیضوی گرد و گاه بلور منفی (negative crystal form) دارند (شکل‌های ۱۰-پ و ت) و اندازه آنها میان ۴ تا ۲۵ میکرومتر است، اگر چه بیشتر آنها میان ۵ تا ۱۰ میکرومتر هستند. میانبرهای دوفازی غنی از بخار به صورت پراکنده و مجزا در کوارتز دیده می‌شوند.

میانبرهای چندفازی، همواره شامل یک حباب بخار، یک مایع شور و بلور هالیت هستند (شکل ۱۰-ث). در برخی از آنها، افزون بر فازهای یادشده، بلورهای نوزاد مات شامل ورقه‌های هماتیت سرخ رنگ و کمتر از آن کالکوپریت سه‌گوش نیز دیده می‌شود. اندازه میانبرهای چندفازی از ۴ تا ۱۵ میکرومتر تغییر می‌کند، اما بیشتر آنها میان ۵ تا ۱۰ میکرومتر هستند. این میانبرها بیشتر با شکل‌های کم و بیش گرد و بلور منفی حضور دارند (شکل‌های ۱۰-ث و ج) و به صورت ردهایی در کوارتز میزبان در رگچه‌های کانه‌دار دیده می‌شوند (شکل ۱۰-ج). در نمونه‌های مورد مطالعه، هیچ همبود یا همنشینی میان میانبرهای چندفازی و دوفازی غنی از بخار دیده نشد، که این امر نشانگر نبود یا عدم رخداد جفت‌های ناهم‌آمیز (immiscible pairs) در این رگچه‌هاست.

۳-۴. توزیع و فراوانی نسبی میانبرهای سیال

توزیع و فراوانی نسبی انواع گوناگون میانبار در رگچه‌های کانه‌دار و نابارور بررسی شد تا ارتباط میان سیال‌ها، دگرسانی و نهشت کانه‌ها مشخص شود. به این منظور، فراوانی نسبی انواع میانبرها در ۶ برش دوبر صیقلی برآورد شده است (جدول ۳). میانبرهای دوفازی غنی از مایع، فراوان‌ترین نوع میانبار در همه رگه‌ها بوده و بیش از ۹۰ درصد میانبرها را تشکیل داده است (جدول ۳). میانبرهای دوفازی غنی از بخار، به‌طور کلی کمتر از ۱۰ درصد میانبرها را تشکیل داده است، به‌جز نمونه BAK02 از یک رگچه کانه‌دار در دیوریت با دگرسانی پتاسیک، که در آن میانبرهای دوفازی غنی از بخار ۲۸ درصد میانبرها را تشکیل می‌دهد. به عنوان یک قاعده عمومی، می‌توان گفت که با افزایش ژرفا، فراوانی میانبرهای دوفازی غنی از بخار افزایش می‌یابد. میانبرهای چندفازی تنها در رگچه‌های کوارتز کانه‌دار مربوط به دگرسانی فیلک در توده گرانودیوریتی دیده شد.

۳-۵. دماسنجی

دماهای همگن‌شدگی برای میانبرهای دوفازی غنی از مایع در نمونه BAK02-312 از رگچه‌های کانه‌دار، میان ۱۹۲ تا ۳۰۶ درجه سانتی‌گراد، با بیشترین اندازه‌گیری‌ها میان ۲۲۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، است. شوری این میانبرها از ۴ تا ۸ درصد جرمی معادل نمک تغییر می‌کند. میانبرهای دوفازی غنی از بخار در همین نمونه، در دماهای ۳۷۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با تبدیل به فاز بخار همگن شدند. شوری این میانبرها میان ۲/۶ تا ۸/۷ درصد جرمی معادل نمک است. تفاوت دمای آشکار میان

پتاسیک در این نمونه خاص باشد، که دارای مقداری بیوتیت ثانویه است. میزان SiO_2 توده گرانودیوریتی از ۶۲/۴ تا ۶۸/۳ و توده دیوریتی-مونودیوریتی از ۴۷/۳ تا ۵۳/۱ تغییر می‌یابد.

در نمودار تفکیک ANK در برابر ACNK (Maniar & Piccoli, 1989) نمونه‌های معرف توده گرانودیوریتی، در محدوده پراآلومینوس و توده دیوریتی-مونودیوریتی در محدوده متالومینوس قرار می‌گیرند (شکل ۶). توده گرانودیوریتی باغ‌خشک، الگوی عناصر خاکی کمیاب تفریق‌یافته‌تر و پرشیب‌تری نسبت به دیوریت-مونودیوریت نشان می‌دهد (شکل ۷). نسبت La_N/Yb_N برای گرانودیوریت، میان ۵/۵۸ تا ۱۶/۴ و برای دیوریت-مونودیوریت میان ۱/۸۴ تا ۶/۳ است. گرانودیوریت همچنین با بی‌هنجاری کمی منفی Eu مشخص می‌شود که موافق با سرشت تفریق یافته‌تر ماگمای مادر است.

نمودار عناصر فرعی و کمیاب بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه، برای این دو توده در شکل ۸ نشان داده شده است. هر دو توده، غنی‌شدگی آشکار در عناصر لیتوفیل بزرگ‌یون (LILE) و عناصر خاکی کمیاب نسبت به عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) نشان می‌دهند. بی‌هنجاری‌های منفی برای عناصر Ta و Nb، Ti و Gd، و غنی‌شدگی در عناصر ناسازگار (برای نمونه Cs، Rb، Th، U) از ویژگی‌های ماگماهای تولید شده در جایگاه‌های کمان ماگمایی مرتبط با فرورانش است (Pearce & Peate, 1995; Richards et al., 2012; Walker et al., 2001; Wilson, 1989).

در نمودار Yb+Nb در برابر Rb (Pearce et al., 1984)، هر دو توده نفوذی باغ‌خشک در محدوده گرانتیت کمان آتشفشانی (شکل ۹-الف)، و در نمودار مثلی $(\text{Zr}^*/3) - (\text{Nb}^*/50) - (\text{Ce}/\text{P}_2\text{O}_5)$ ، هر دو توده نفوذی در محدوده کمان قاره‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۹-ب). یک محیط زمین‌ساختی کمان قاره‌ای وابسته به فرورانش برای چندین توده نفوذی پورفیری همراه با کانی‌سازی نوع پورفیری در کمربند ارومیه-دختر گزارش شده است (Hassanzadeh, 1993; Hezarkhani, 2006; Aftabi & Atapour, 2000; Taghipour et al., 2008; Alirezai & Mohammadzadeh, 2009).

نسبت La/Sm بهنجار شده در توده گرانودیوریتی باغ‌خشک از ۳/۵ تا ۶/۴ تغییر می‌کند و این نسبت در توده دیوریتی-مونودیوریتی باغ‌خشک از ۱/۵ تا ۲/۸ است. نسبت Dy/Yb بهنجار شده در توده گرانودیوریتی از ۰/۹۲ تا ۱ و در توده دیوریتی-مونودیوریتی از ۰/۹۷ تا ۱/۲۴ تغییر می‌کند. این نسبت‌ها نشانگر این است که هورنبلند یک کنترل‌کننده مهم در تفکیک عناصر خاکی کمیاب میانی و سنگین در منبع ماگمای این سامانه پورفیری بوده است (Richards et al., 2012).

۳-۳. سنگ‌نگاری میانبرهای سیال

تفسیر میانبرهای سیال در کانسارهای مس پورفیری مشکل است، زیرا رخداد چندین مرحله شکستگی، جریان سیال و کانی‌سازی، روابط زمانی را در میان نسل‌های گوناگون رگچه‌ها پیچیده می‌سازد (Bodnar & Beane, 1980; Bloom, 1981; Masterman et al., 2005). مطالعات سنگ‌نگاری میانبرهای سیال، می‌تواند به شناسایی روابط پیچیده میان میانبرهای سیال و کانی‌های میزبان کمک نماید (Goldstein & Reynolds, 1994; Van den Kerkhof & Hein, 2001).

سه نوع میانبار سیال بر پایه فازهای موجود در دمای اتاق، در انواع مختلف رگچه‌های کوارتز شناسایی شد: (۱) میانبرهای دوفازی غنی از مایع (۲) میانبرهای دوفازی غنی از بخار؛ (۳) میانبرهای چندفازی. میانبرهای دوفازی غنی از مایع، فراوان‌ترین نوع میانبار سیال در رگچه‌های کانه‌دار و نابارور هستند. رگچه‌های کوارتز ± پیریت نابارور تنها دارای میانبرهای دوفازی غنی از مایع هستند که بیشتر به صورت ردها یا دنباله‌هایی (trails) در کانی میزبان (کوارتز) وجود دارند (شکل ۱۰-الف).

چنداتی در محلول را در اختیار می‌گذارد (Burke, 2001; Burruss, 2003; Bakker, 2004; Frezzotte et al., 2012). روش رامان همچنین می‌تواند برای محاسبه چگالی سیال‌های کربن دی‌اکسید، شیمی سیال‌های آبگون و نسبت یا کسر مولی مخلوط‌های گازی در میانبرها به کار رود (Morizet et al., 2009; Frezzotte et al., 2012). برتری مهم این روش، سادگی آماده‌سازی نمونه و دقت بالا برای شناسایی شیمی و ساختار نمونه‌هایی با اندازه‌های بسیار کوچک (تا حد یک میکرومتر) است (Burke, 2001; Frezzotte et al., 2012).

طیف‌نمایی رامان بر پایه پراکنش ناکشسان (Inelastic scattering) نور از سوی ماده، در حالت‌های جامد، مایع یا گاز پایه‌گذاری شده است. نور تک‌رنگ منتشر شده از سوی ماده، دارای تابش‌هایی با بسامدهای مختلف از نور تابیده است. این اثر برای نخستین بار توسط دانشمند هندی (Raman 1928) شرح داده شد و به نام وی شناخته می‌شود.

تجزیه ریزطیف‌نمایی لیزر رامان، حضور گاز کربن دی‌اکسید را در میانبرهای دوفازی غنی از بخار نشان داد (شکل ۱۴). همچنین مشخص شد که کانی مات سه‌گوش در میانبرهای دوفازی غنی از بخار و چندفازی، کالکوپیریت است (شکل ۱۵). کالکوپیریت در نزدیک به نیمی از میانبرهای دوفازی غنی از بخار و همچنین در برخی از میانبرهای چندفازی شناسایی شد. بر پایه مطالعات (Williams-Jones & Heinrich, 2005) فاز بخار می‌تواند مقدار زیادی فلز را حمل کند و برخی فلزات، به‌ویژه مس و طلا، در سامانه‌های گرمایی-ماگمایی به‌طور ترجیحی با فاز بخار، در مقایسه با شوراب مایع (liquid brine) حمل می‌شوند. گواه مستقیمی از تمرکزهای بالای فلز در فاز بخار، حضور کانی‌های نوزاد فلزی در میانبرهای غنی از بخار است. این میانبرها از بسیاری از کانسارهای پورفیری، که فاز بخار آنها بیشتر آب بوده است، گزارش شده‌اند (Roedder, 1971; Eastoe, 1978; Heinrich et al., 1999; Williams-Jones & Heinrich, 2005). همراهی کانی‌های نوزاد کالکوپیریت با میانبرهای دوفازی غنی از بخار و دارای کربن دی‌اکسید در سامانه پورفیری باغ‌خشک، نشان می‌دهد که فاز بخار و کربن دی‌اکسید سهم مهمی در ترابری فلز داشته‌اند.

هماتیت نیز در برخی میانبرهای چندفازی شناسایی شد (شکل ۱۶). حضور کانی نوزاد همتایت در سنگ‌های بدون همتایت، می‌تواند نشانگر نشت هیدروژن از میانبرها باشد، به این صورت که با نشت و خروج هیدروژن، فوگاسیته اکسیژن در درون میانبر افزایش می‌یابد و در نتیجه آهن محلول موجود به‌صورت کانی نوزاد همتایت رسوب می‌کند (Mavrogenes & Bodnar, 1994). تجزیه‌های لیزر رامان، با شناسایی هیدروهالیت در پیرامون بلورهای نمک در طی فرایند انجماد، حضور بلور نمک کلرید سدیم را در میانبرهای چندفازی مشخص کرد.

۴- نتیجه‌گیری

کانی‌سازی مس در باغ‌خشک، از دید زایش در ارتباط با دو توده گرانودیوریتی و دیوریتی-مونوزودیوریتی است که در سنگ‌های آندزیتی ائوسن نفوذ کرده‌اند. دگرسانی گرمایی اولیه، یک مجموعه پتاسیک در توده دیوریتی-مونوزودیوریتی ایجاد کرده است، که با فراوانی بیوتیت و به مقدار کمتر فلدسپار قلیایی مشخص می‌شود. دگرسانی پروپیلیتیک با حضور کلریت، اپیدوت و کلسیت شناخته می‌شود که بخش‌های حاشیه‌ای توده‌های نفوذی و همین‌طور سنگ‌های آتشفشانی میزبان را تحت تأثیر قرار داده است. دگرسانی فلیک با فراوانی سربست و کوارتز مشخص می‌شود که بیشتر در توده گرانودیوریتی گسترش یافته است. کانی‌سازی مس به‌صورت استوک‌ورک‌های کوارتز-سولفید و همچنین دانه‌های افشان سولفید، همراه با دگرسانی پتاسیک و فلیک رخ داده است. الگوی کلی دگرسانی گرمایی و کانی‌سازی در باغ‌خشک، و همراهی با توده‌های نفوذی کم‌ژرفا، مشابه

میانبرهای دوفازی غنی از مایع و غنی از بخار (تقریباً ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد)، در شوری ثابت، می‌تواند نشانگر نقش فرایند سرد شدن سیال به عنوان یکی از فرایندهای مؤثر در نهشت کانسنگ باشد.

در نمونه‌ای دیگر از رگچه‌های کانه‌دار (BAK06-276.10)، دو گروه میانبر غنی از مایع، یکی با شوری بالا و دیگری با شوری کم تا متوسط، شناسایی شد. در میانبرهای با شوری بالا، آخرین فازی که به هنگام آزمایش‌های سرمایش ذوب شد، هیدروهالیت بود که رخداد آن با طیف‌نمایی لیزر رامان نیز شناسایی شد. دماهای همگن‌شدگی در این نوع میانبر، میان ۲۵۳ تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد، و شوری آنها میان ۲۲/۲ تا ۲۴/۴ درصد جرمی معادل نمک اندازه‌گیری شد. میانبرهای دوفازی غنی از مایع با شوری پایین در این نمونه، دماهای همگن‌شدگی گسترده‌ای دارند (۱۹۱ تا ۳۶۴ درجه سانتی‌گراد)، اگر چه بیشترین فراوانی مربوط به دماهای ۲۲۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد است. شوری این میانبرها از ۴ تا ۱۵ درصد جرمی معادل نمک تغییر می‌کند، اگر چه بیشتر آنها شوری کمتر از ۱۰ درصد جرمی معادل نمک دارند. میانبرهای دوفازی غنی از بخار در این نمونه، دماهای همگن‌شدگی میان ۳۲۶ تا ۴۳۴ درجه سانتی‌گراد، با بیشترین فراوانی میان ۴۰۰ تا ۴۲۵ درجه سانتی‌گراد، دارند. شوری این میانبرها میان ۴ تا ۸ درصد جرمی معادل نمک است. در این نمونه تعدادی مجموعه میانبرهای دوفازی غنی از بخار و غنی از مایع به‌طور همزیست شناسایی شدند که دمای همگن‌شدگی آنها به‌طور میانگین ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد که می‌تواند معرف فرایند جوشش سیال کانه‌دار باشند. میانبرهای چندفازی در این نمونه، با ناپدید شدن حباب بخار همگن می‌شوند و دمای همگن‌شدگی آنها میان ۱۹۲ تا ۳۸۲ درجه سانتی‌گراد، با بیشترین فراوانی میان ۳۰۰ تا ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد است. شوری میانبرهای چندفازی میان ۳۲/۵ تا ۳۵ درصد جرمی معادل نمک، با دمای ذوب‌هالیت میان ۱۷۳ تا ۲۴۹ درجه سانتی‌گراد است.

دو گروه میانبر دوفازی غنی از مایع در نمونه BAK05-178.50 (کانه‌دار) شناسایی شد. یک گروه، دماهای همگن‌شدگی میان ۳۲۴ تا ۳۷۹ درجه سانتی‌گراد، با بیشترین فراوانی میان ۳۴۰ تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۵ تا ۶ درصد جرمی معادل نمک، به نمایش می‌گذارد. این گروه از میانبرها به هنگام گرمایش، رفتار نقطه بحرانی نشان می‌دهند و به یک فاز شبه مایع همگن می‌شوند، مانند آنچه که توسط (Selby et al., 2000) از کانسار مولیبدن پورفیری Endako گزارش شده است. گروه دیگر، دماهای همگن‌شدگی میان ۱۷۲ تا ۲۲۷ درجه سانتی‌گراد، با بیشترین فراوانی میان ۲۰۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، و شوری ۶ تا ۸ درصد جرمی معادل نمک دارند. تفاوت دمای چشمگیر در دماهای همگنی میان این دو گروه از میانبرهای دوفازی غنی از مایع (نزدیک به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) در شوری کم‌ویش یکسان، می‌تواند نشانگر این باشد که فرایند سرد شدن عامل مهمی در تکامل سامانه گرمایی باغ‌خشک بوده است. نمودار فراوانی دماهای همگن‌شدگی و شوری در انواع میانبرها در رگچه‌های کوارتز کانه‌دار باغ‌خشک در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

شوری و دماهای همگن‌شدگی میانبرهای دوفازی غنی از مایع در رگچه نابارور (نمونه BAK02-269.50) به ترتیب ۴-۵/۵ درصد جرمی معادل نمک و ۲۴۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۱۳) که نشان می‌دهد رگچه‌های نابارور از سیالی با شوری کم و دمای متوسط تشکیل شده‌اند. در شکل ۱۳ می‌توان مقایسه میان دما و شوری میانبرهای دوفازی غنی از مایع رگچه‌های کانه‌دار را با رگچه نابارور دیده نشد. همان‌گونه که در شکل ۱۳ دیده می‌شود شوری میانبرهای دوفازی غنی از مایع رگچه نابارور به‌طور مشخص کمتر از میانبرهای دوفازی غنی از مایع رگچه‌های کانه‌دار است.

۳-۶. داده‌های لیزر رامان

طیف‌نمایی رامان یک شیوه نویرانگر برای تجزیه میانبرهای سیال است و گستره‌ای از کاربردها در تشخیص کیفی فازهای جامد، مایع و گازی و تشخیص یون‌های

دوفازی غنی از مایع در نمونه BAK05-178.50 از رگچه‌های کانه‌دار، در دمای ۳۴۰ تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به سیال فوق بحرانی همگن می‌شود.

سه گروه مشخص از میانبراهای دوفازی غنی از مایع در شکل ۱۳ قابل تشخیص است. یک گروه، مربوط به رگچه‌های نابارور است که دمای همگنی پایین (۲۰۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد) و شوری پایین (۰/۳۵ تا ۴ درصد جرمی معادل نمک) دارند. دو گروه میانبراهای غنی از مایع در رگچه‌های کانه‌دار قابل تفکیک است؛ یکی با مقادیر دمای همگنی بالا (۳۰۰ تا ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد) و شوری پایین تا متوسط (۳ تا ۲۴/۲ درصد جرمی معادل نمک) و گروه دیگر با دمای همگنی پایین (۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) و شوری پایین (۴ تا ۱۰ درصد جرمی معادل نمک). این دو گروه را می‌توان با فرایند سرد شدن به هم مرتبط کرد. شوری‌های بالاتر برای گروه با دمای بالاتر را می‌توان با تفکیک یک فاز بخار و در نتیجه افزایش شوری در سیال باقیمانده توضیح داد. آمیختگی با یک سیال سردتر با شوری کمتر مانند آب جوی را نمی‌توان نادیده گرفت. میانبراهای با شوری و دمای پایین در رگچه‌های نابارور می‌تواند ناشی از حضور سیالی مانند آب جوی، یا تراکم فاز بخار فقیر از مس در مراحل پایانی باشد.

شواهدی چون روندهای شوری-دمای همگن‌شدگی، از میانبراهای غنی از بخار تا میانبراهای غنی از مایع با شوری کم تا متوسط و همچنین کاهش پیشرونده دما در شوری ثابت (شکل ۱۷) پیشنهاد می‌کند که سرد شدن یک عامل مهم در نهشت کانسنگ در باغ‌خشک بوده است. سرد شدن همچنین می‌تواند سبب تراکم یا میعان سیال داغ غنی از بخار به یک سیال آبرگونه با دمای پایین شود. در سامانه‌های پورفیری، سرد شدن سیال با هیدرولیز SO_2 و تولید گوگرد کاهیده برای تشکیل کانی‌های سولفیدی همراه است (Burnham, 1997; Ohmoto & Goldhaber, 1997). داده‌های میانبراهای سیال نشان از آن دارد که سیال کانه‌دار اولیه در باغ‌خشک، یک سیال غنی از بخار یا فوق بحرانی با شوری پایین (۴ تا ۸ درصد جرمی معادل نمک) بوده است. نقش کلیدی یک سیال داغ و غنی از بخار در انتقال و نهشت فلز در باغ‌خشک، با حضور بلورهای نوزاد کالکوپیریت و گاز کربن دی‌اکسید در میانبراهای سیال غنی از گازپشتیبانی می‌شود. داده‌های این پژوهش شواهدی در پشتیبانی از مطالعات (William-Jones & Heinrich (2005) در اختیار می‌گذارد که مس در سامانه‌های پورفیری، می‌تواند در یک فاز بخار حمل شود.

سپاسگزاری

این مطالعه به عنوان بخشی از پایان‌نامه دکترای نویسنده اول در دانشگاه شهید بهشتی تهران، انجام شده است. از مدیران اکتشاف شرکت ملی صنایع مس ایران برای فراهم کردن امکان دسترسی به محدوده اکتشافی و مغزه‌های حفاری باغ‌خشک و از مسئولان دانشگاه شهید بهشتی و وزارت علوم، تحقیقات و فناوری برای بورسیه فرصت مطالعاتی سپاسگزاری می‌شود. مطالعه میانبراهای سیال و لیزر رامان، در دانشگاه لئون و با پشتیبانی مالی دکتر رونالد بکر انجام شده است. از آقایان دکتر امیر مرتضی عظیم‌زاده و هلموت مولنوس و از بخش زمین‌شناسی دانشگاه لئون نیز برای یاری رساندن در کارهای آزمایشگاهی سپاسگزاری می‌شود.

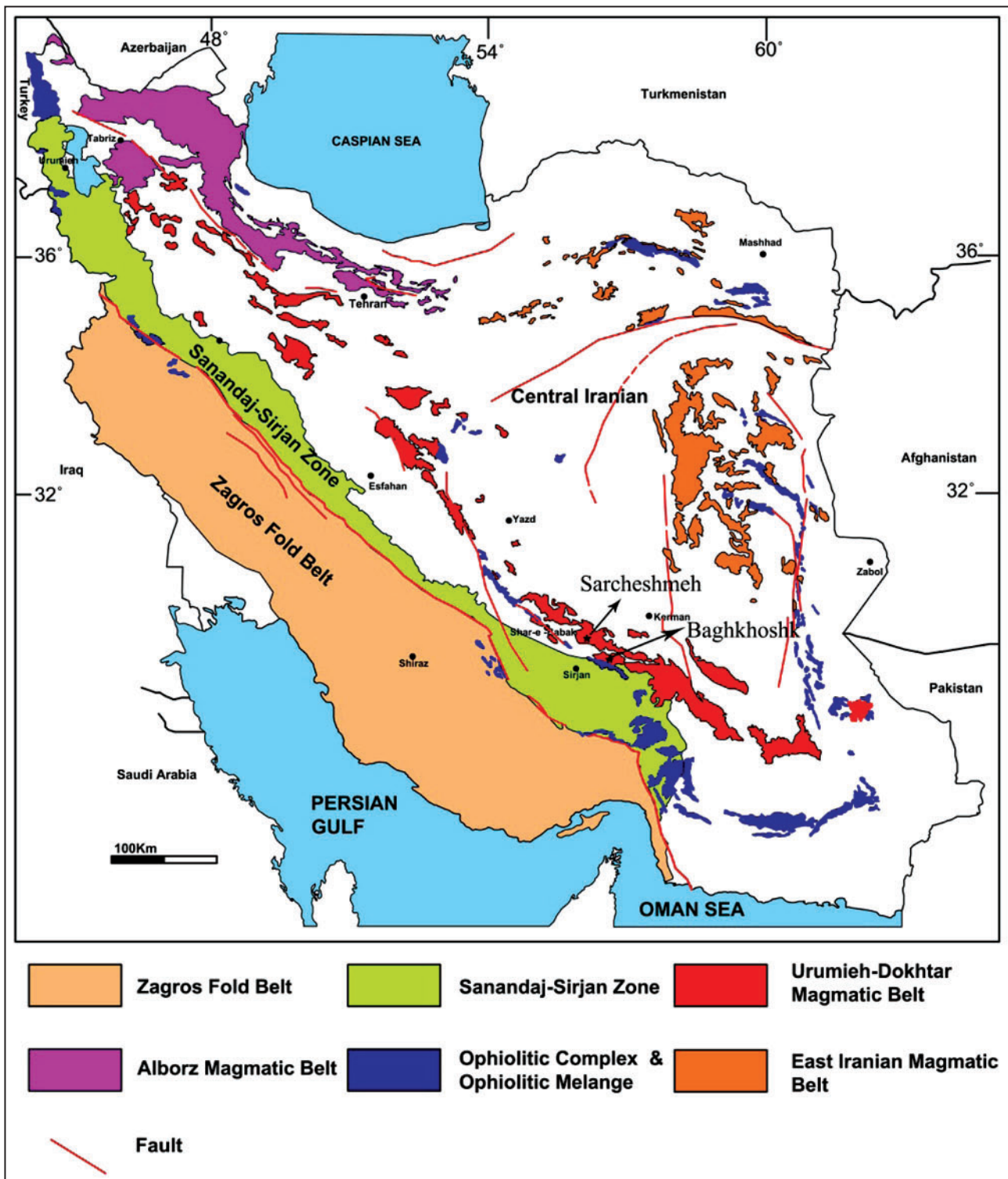
با ویژگی‌های گزارش شده از بسیاری از کانسارهای مس پورفیری در ایران (Hezarkhani & Williams-Jones, 1998; Calagari, 2004; Zarasvandi et al., 2005; Alirezaei & Hassanpour, 2011) و جاهای دیگر (Ulrich et al., 2002; Rusk et al., 2008; Landtwing et al., 2010) است.

در نمودار توزیع عناصر فرعی و کمیاب بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه، توده‌های نفوذی باغ‌خشک با غنی‌شدگی آشکار در عناصر لیتوفیل بزرگ‌یون و عناصر خاکی کمیاب نسبت به عناصر با شدت میدان بالا، و نیز فرورفتگی در محل عناصر Nb، Ti، Ta، و برآمدگی در عناصر U، Rb، Cs، K مشخص می‌شوند. این ویژگی‌ها، معرف سنگ‌های آذرین جایگیر شده در جایگاه زمین‌ساختی کمان قاره‌ای وابسته به فرورانش است (Pearce & Peate, 1995; Richards et al., 2012; Walker et al., 2001; Wilson, 1989). نسبت Dy/Yb و La/Sm بهنجار شده در توده‌های نفوذی سامانه پورفیری باغ‌خشک، نشانگر آن است که هورنبلند یک کنترل کننده مهم در تفکیک عناصر خاکی کمیاب میانی و سنگین در منبع ماگما بوده است (Richards et al., 2012).

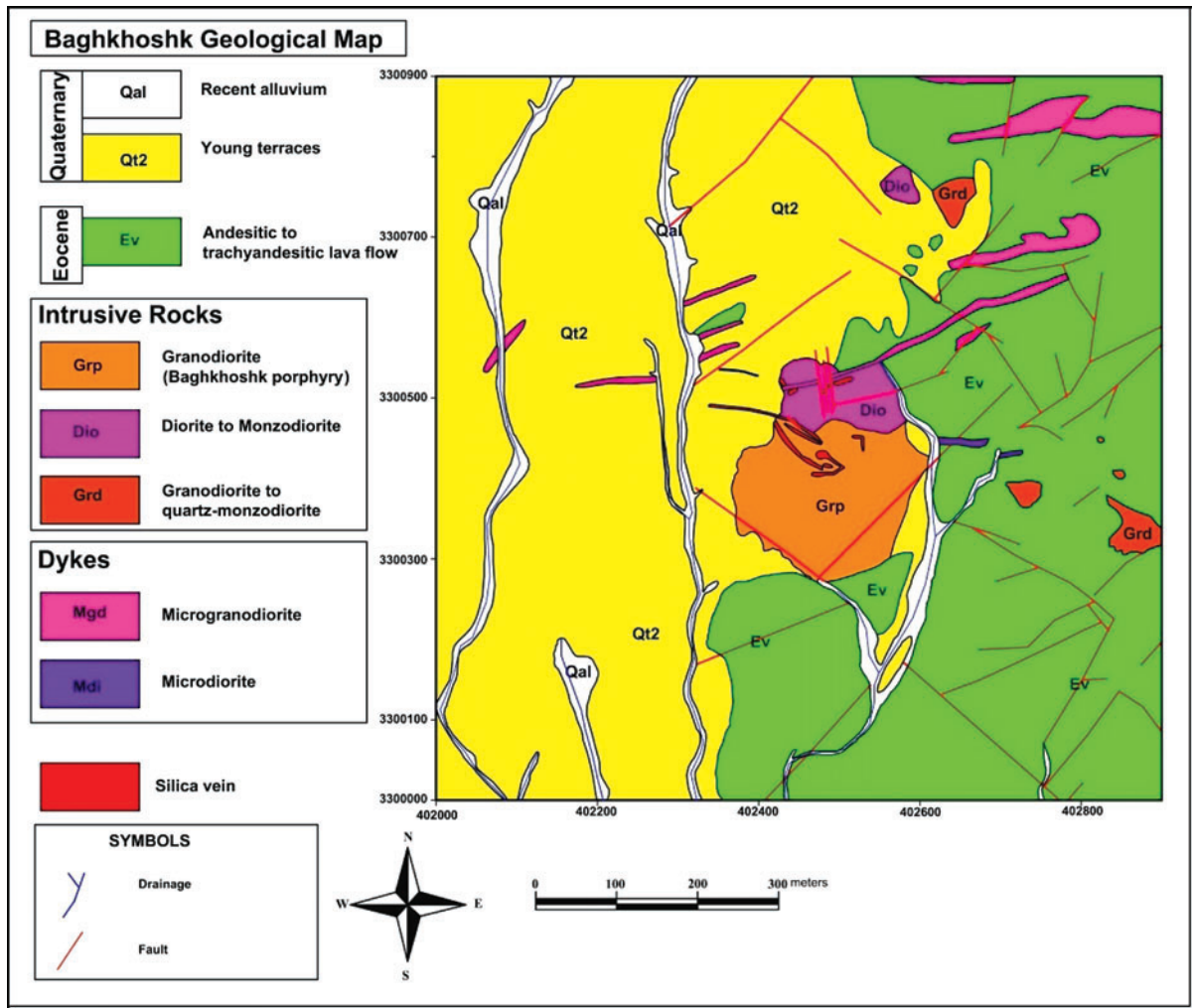
سه نوع میانبراهای سیال در رگچه‌های کوارتز-سولفید بارور شناسایی شد: (۱) میانبراهای دوفازی غنی از مایع؛ (۲) میانبراهای دوفازی غنی از بخار؛ (۳) میانبراهای چندفازی. رگچه‌های نابارور تنها دارای میانبراهای دوفازی غنی از مایع هستند. در رگچه‌های بارور، بالاترین دماها در میانبراهای دوفازی غنی از بخار اندازه‌گیری شد که در گستره دمای ۳۲۶ تا ۴۳۴ درجه سانتی‌گراد به فاز بخار همگن شدند. بیشترین فراوانی دمای همگن‌شدگی در این میانبراهای سیال ۳۸۰ تا ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد است. میانبراهای دوفازی غنی از بخار دارای بلورهای نوزاد کالکوپیریت هستند که نشانگر تمرکز به نسبت بالای مس در سیال گرمایی است و نشان می‌دهد که دست کم بخشی از مس در سامانه‌های پورفیری توسط فاز بخار انتقال یافته است. این میانبراهای همچنین دارای گاز کربن دی‌اکسید هستند. شوری میانبراهای دوفازی غنی از بخار میان ۴ تا ۸ درصد جرمی معادل نمک تغییر می‌کند. همچنین در یکی از نمونه‌ها، مجموعه‌های همزیست میانبراهای دوفازی غنی از بخار و مایع دیده شد که میانگین دمای همگن‌شدگی آنها حدود ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده که معرف رخداد فرایند جوشش سیال بوده است و می‌تواند در نهشت کانه‌ها نیز مؤثر باشد. با توجه به عدم حضور مجموعه‌های جوشش در دیگر رگچه‌های کانه‌دار، احتمالاً فرایند جوشش به‌طور محدود در این سامانه مس پورفیری رخ داده است و گسترش کمی دارد.

میانبراهای چندفازی، به هنگام گرمایش به فاز مایع همگن شدند. در این میانبراهای دمای حل شدن بلور نمک کمتر از دمای ناپدید شدن بخار و همگنی به فاز مایع است. شوری این میانبراهای، زیر منحنی اشباع نمک قرار می‌گیرد که نشانگر زیراشباع بودن سیال گرمایی در سامانه کانی‌سازی باغ‌خشک است (شکل ۱۷).

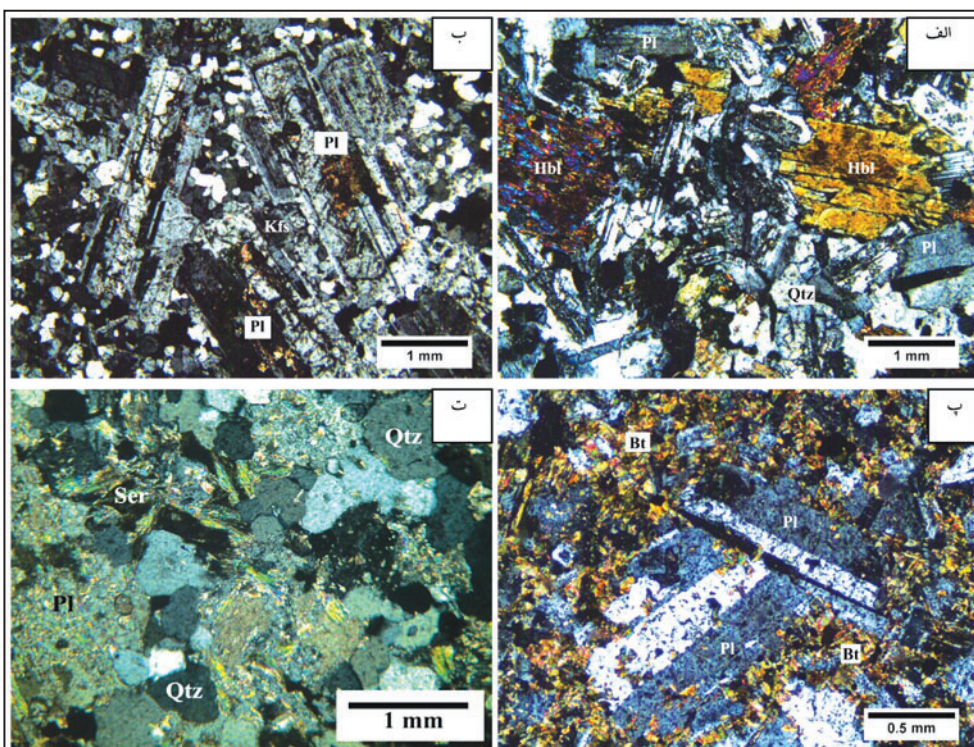
میانبراهای دوفازی غنی از مایع، در هر دو رگچه‌های کانه‌دار و نابارور با ناپدید شدن حباب بخار همگن شدند. این میانبراهای دامنه گسترده‌ای از دماهای همگن‌شدگی (۱۵۰ تا ۳۸۴ درجه سانتی‌گراد) به نمایش می‌گذارند، اگر چه بیشتر اندازه‌گیری‌ها میان ۲۵۰-۳۰۰ و ۳۷۵-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است. شوری این میانبراهای میان ۲۴/۴ تا ۱۰/۳۵ درصد جرمی معادل نمک تغییر می‌کند، اگر چه بیشتر اندازه‌گیری‌ها میان ۴ تا ۱۰ درصد جرمی معادل نمک است. یک گروه از میانبراهای



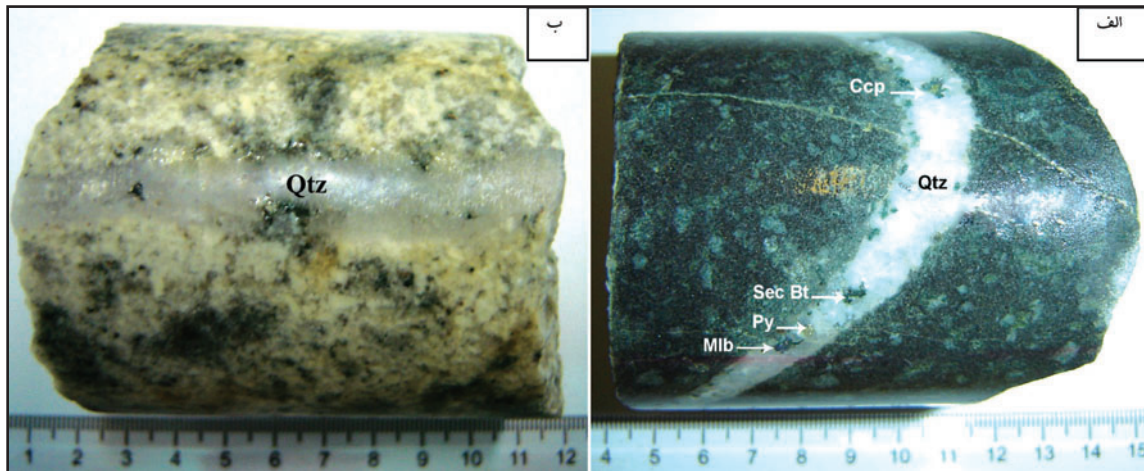
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ایران که نشانگر پهنه‌های زمین‌شناسی اصلی و کمربند‌های ماگمایی مزوزوییک-سنوزوییک و کمپلکس‌های افیولیتی است (Stöcklin, 1968; Aghanabati, 1990).
موقعیت سامانه‌های پورفیری باغ‌خشک و سرچشمه نیز نشان داده شده است.



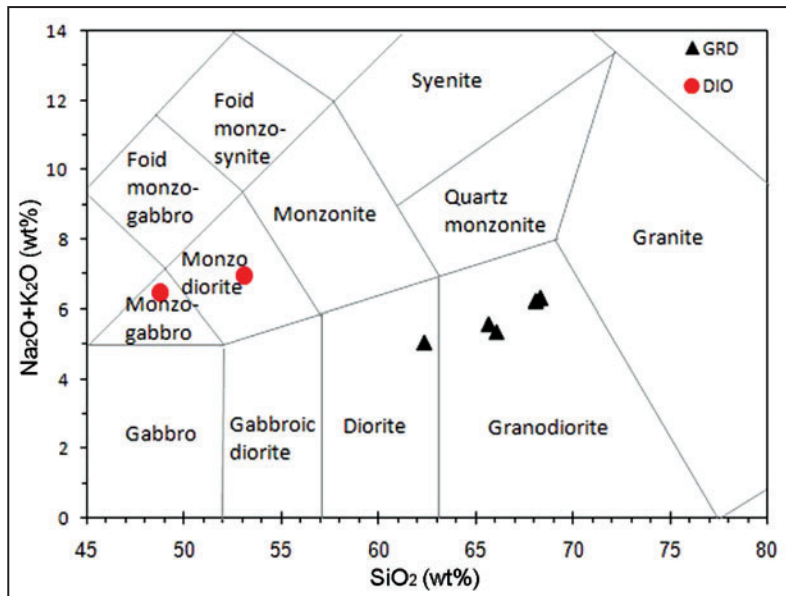
شکل ۲- نقشه زمین شناسی سامانه پورفیری باغ خشک (برگرفته از شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۹ با اصلاحات).



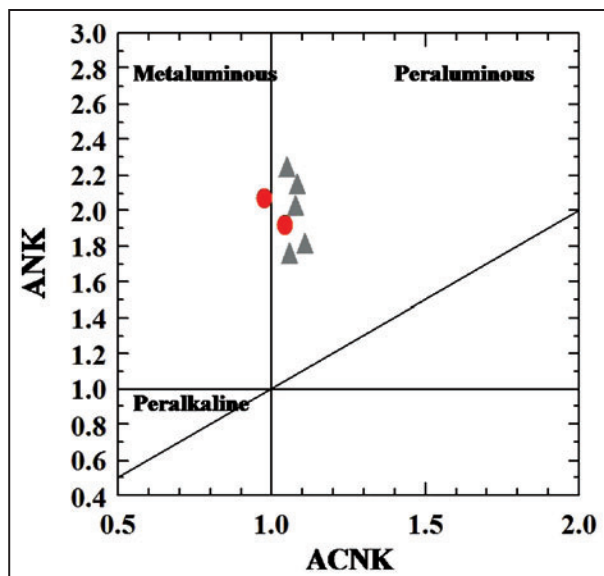
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی از کانی شناسی و بافت و نیز انواع دگرسانی در توده های نفوذی باغ خشک: الف) دیوریت دارای پلاژیوکلاز (Pl)، هورنبلند (Hbl) و کوارتز (Qtz) با بافت گرانولار؛ ب) گرانودیوریت با پلاژیوکلاز (Pl)، کوارتز (Qtz) و فلدسپار پتاسیم (Kfs) با بافت پورفیری؛ پ) دگرسانی پتاسیک در دیوریت که با گسترش بیوتیت ثانوی فیلیک در گرانودیوریت، که در آن بیوتیت و فلدسپار با سریسیت (Ser)، کوارتز (Qtz) و کلسیت (Cal) جانشین شده است. حروف نشانه کانی ها از Kretz (1983).



شکل ۴- الف) یک رگچه کانه‌دار شامل مولیبدنیت (Mlb)، کالکوپیریت (Ccp)، پیریت (Py) و بیوتیت ثانوی (Bt) در توده دیوریت با دگرسانی پتاسیک. نمونه مغزه از گمانه BAK-02 در بخش شمالی کانسار؛ ب) یک رگچه کوارتز نابارور در گرانودیوریت با دگرسانی فیلیک که شامل کوارتز (Qtz) است. نمونه مغزه از همان گمانه در شکل الف. حروف نشانه‌کانی‌ها از Kretz (1983).

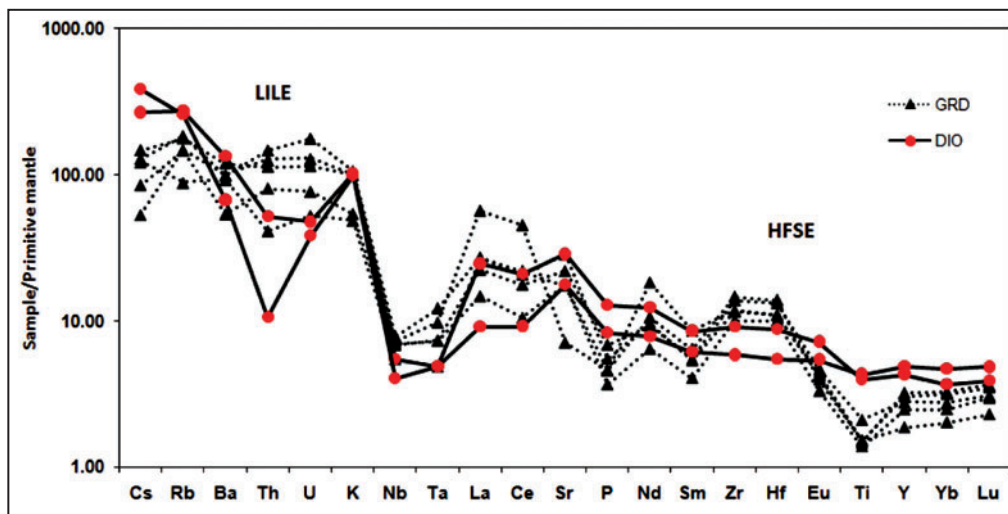
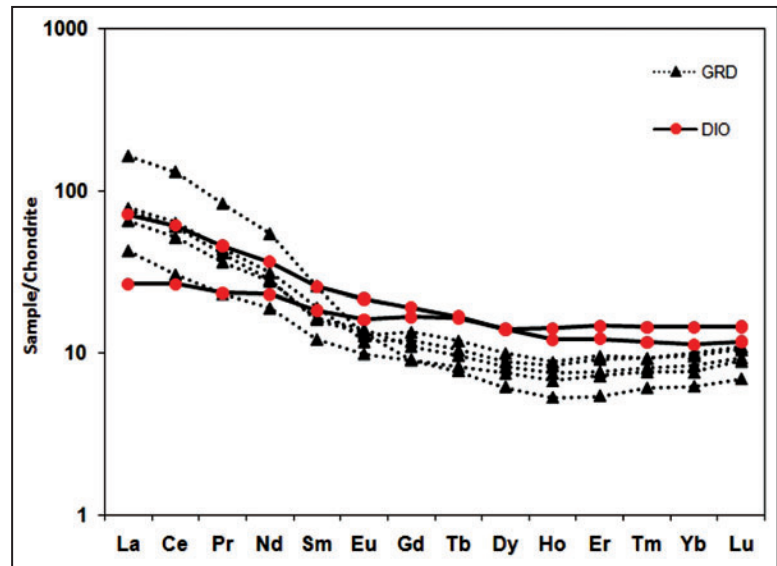


شکل ۵- جانمایی نمونه‌های معرف توده‌های نفوذی سامانه پورفیری باغ‌خشک در نمودار TAS (Middlemost, 1994) برای نام‌گذاری سنگ‌های آذرین.

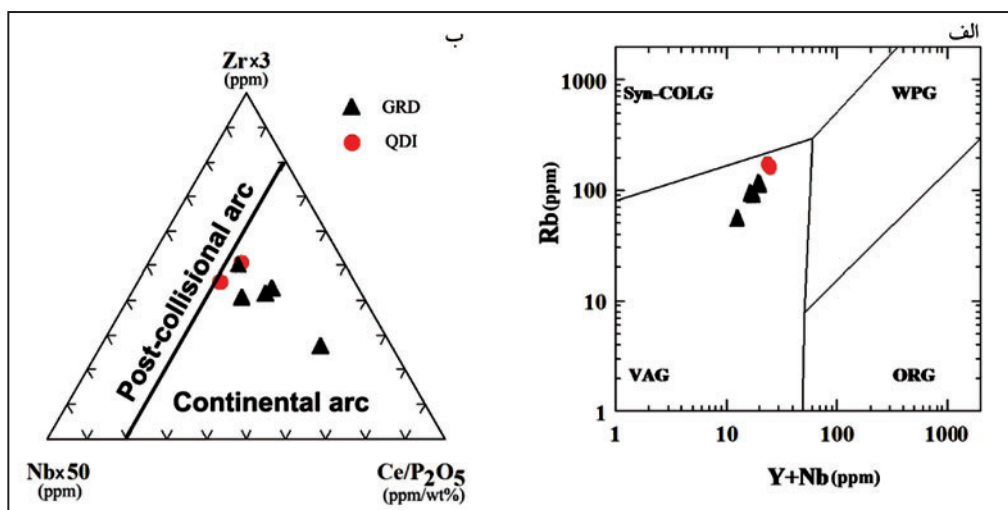


شکل ۶- جانمایی نمونه‌های معرف توده‌های نفوذی باغ‌خشک در نمودار A/NK در برابر A/CNK (Maniar and Piccoli 1989). نشانه‌ها: گرانودیوریت (مثلث)، دیوریت-مونزودیوریت (دایره).

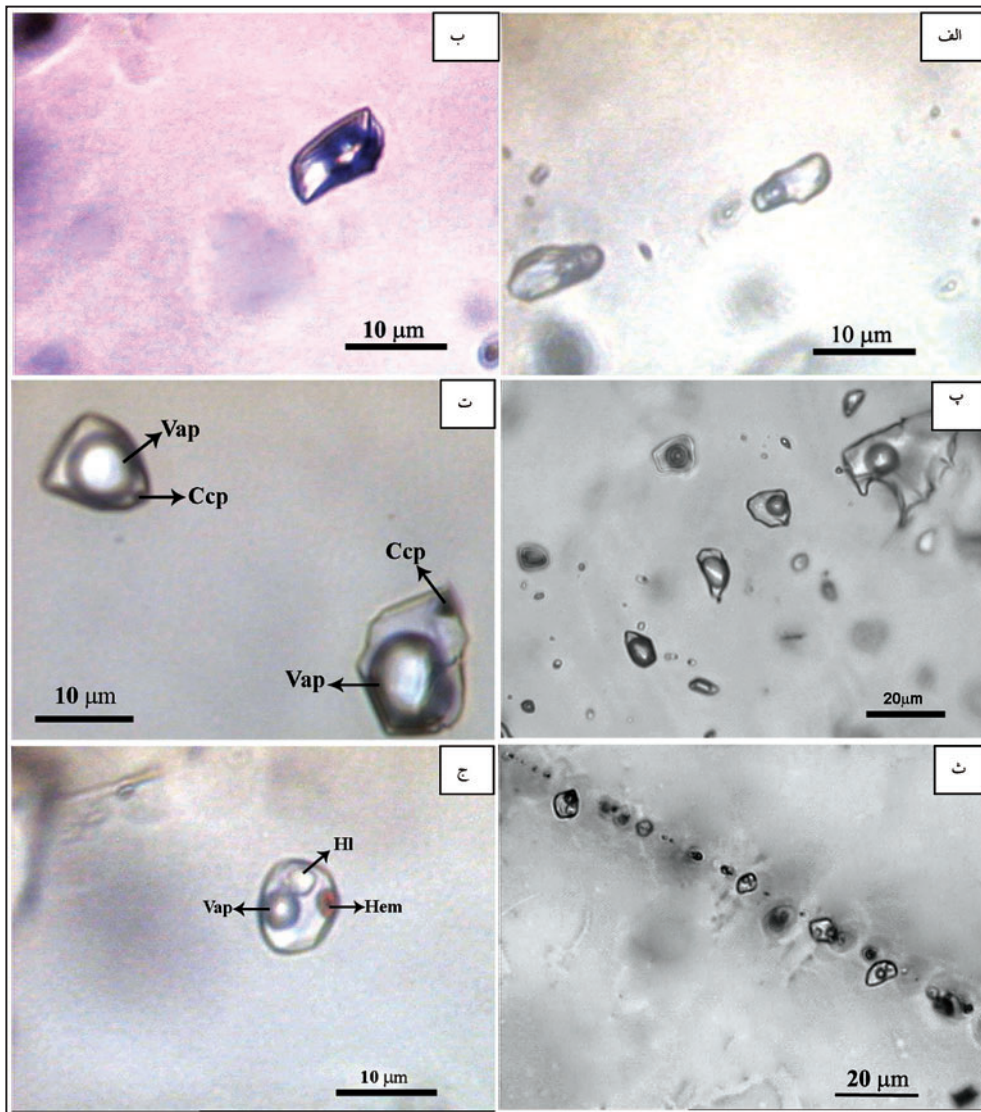
شکل ۷- نمودار عنکبوتی عناصر خاکی کمیاب، بهنجار شده نسبت به کندریت، برای نمونه‌های معرف توده‌های نفوذی باغ‌خشک مقادیر بهنجارسازی از Sun & McDonough (1989).



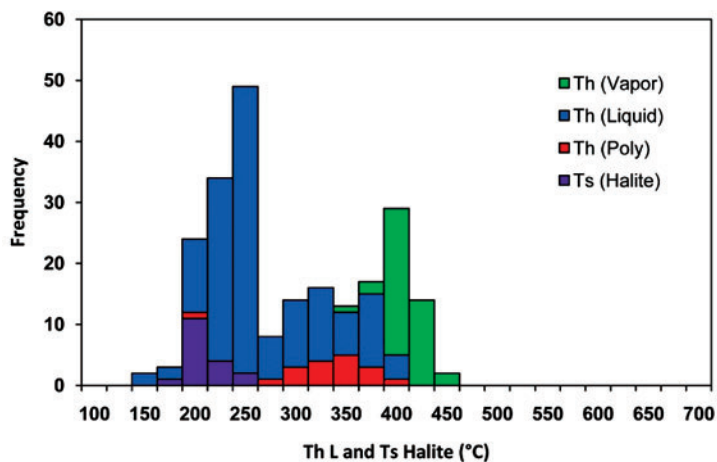
شکل ۸- نمودار عنکبوتی عناصر فرعی و کمیاب، بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه، برای نمونه‌های معرف توده‌های نفوذی باغ‌خشک مقادیر بهنجارسازی از Sun & McDonough (1989).



شکل ۹- الف) جانمایی نمونه‌های معرف توده‌های نفوذی باغ‌خشک در نمودار Rb در برابر Y+Nb (Pearce et al., 1984)؛ ب) جانمایی نمونه‌های معرف توده‌های نفوذی باغ‌خشک در نمودار $(Zr \times 3) - (Nb \times 50) - (Ce/P_2O_5)$ (Müller & Groves, 2000).

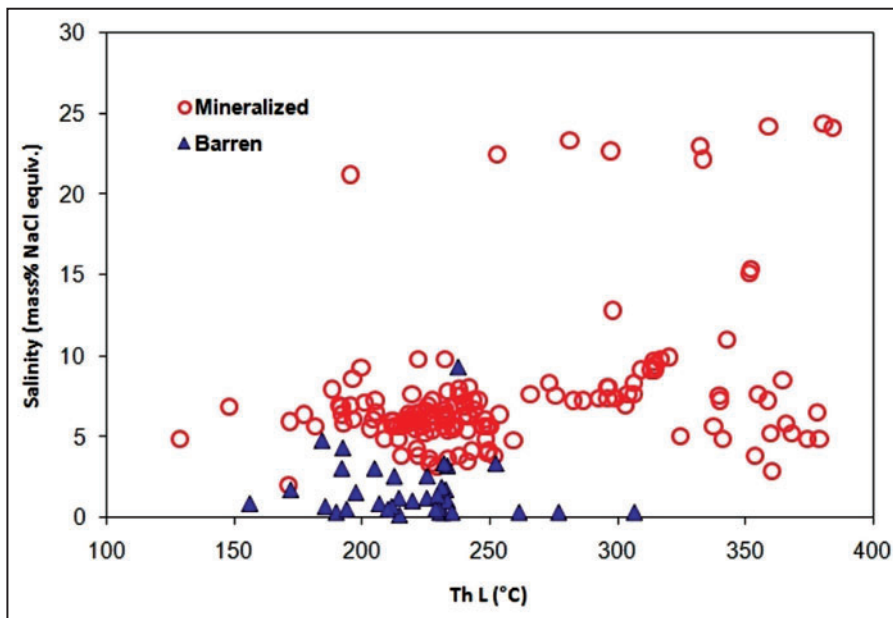
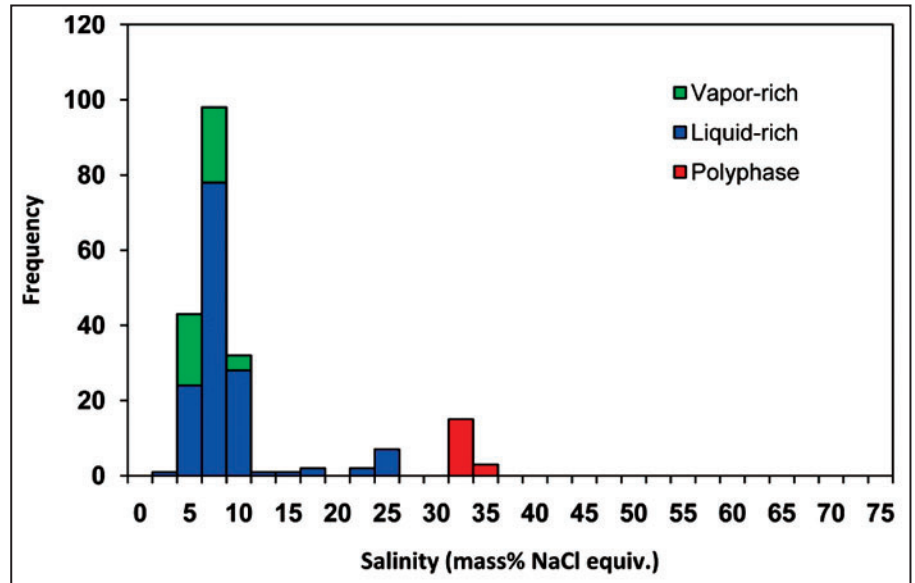


شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپی از انواع میانبار در رگچه‌های نابارور (الف) و کانه‌دار (ب، پ، ت، ث و ج). الف) یک دنباله از میانبارهای دوفازی غنی از مایع در رگچه کوارتز نابارور؛ ب) میانبار دو فازی غنی از مایع با دمای همگن‌شدگی نقطه بحرانی؛ پ) مجموعه همزیست میانبارهای دوفازی غنی از بخار و مایع (فرایند جوشش)؛ ت) میانبارهای دوفازی غنی از بخار با شکل بلور منفی، همراه با بلورهای کالکوپیریت؛ ث) یک میانبار چندفازی با بلور نوزاد هماتیت سرخ‌رنگ؛ ج) میانبارهای چندفازی در یک دنباله که دارای بلور نوزاد نمک هستند. Vap: حباب بخار؛ Ccp: کالکوپیریت؛ Hem: هماتیت؛ Hl: بلور هالیت.



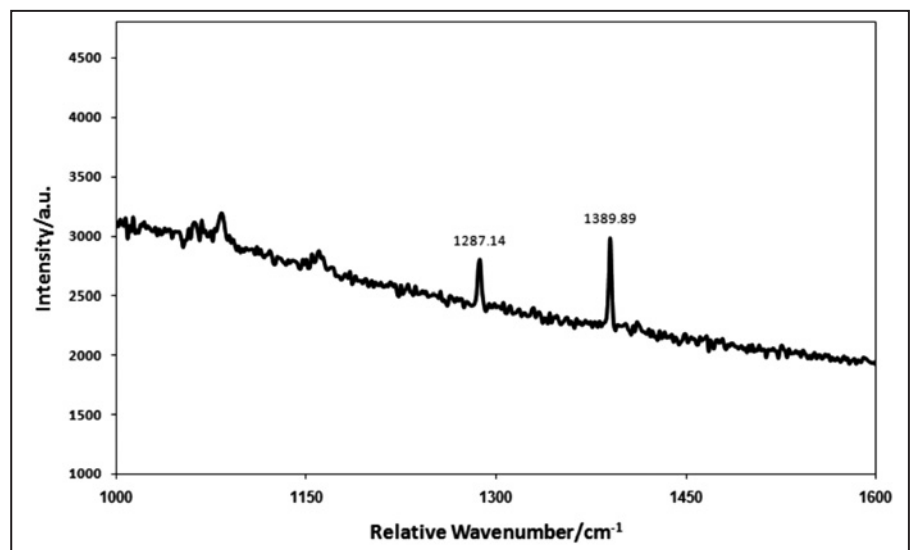
شکل ۱۱- توزیع فراوانی دمای همگن‌شدگی (Th) و دمای حل شدن نمک (Ts) برای انواع میانبار سیال در رگچه‌های کوارتز کانه‌دار در باغ‌خشک.

شکل ۱۲- نمودار ستونی مقادیر شوری (درصد جرمی معادل نمک) برای انواع میانبار سیال در رگچه‌های کوارتز کانه‌دار در باغ‌خشک.

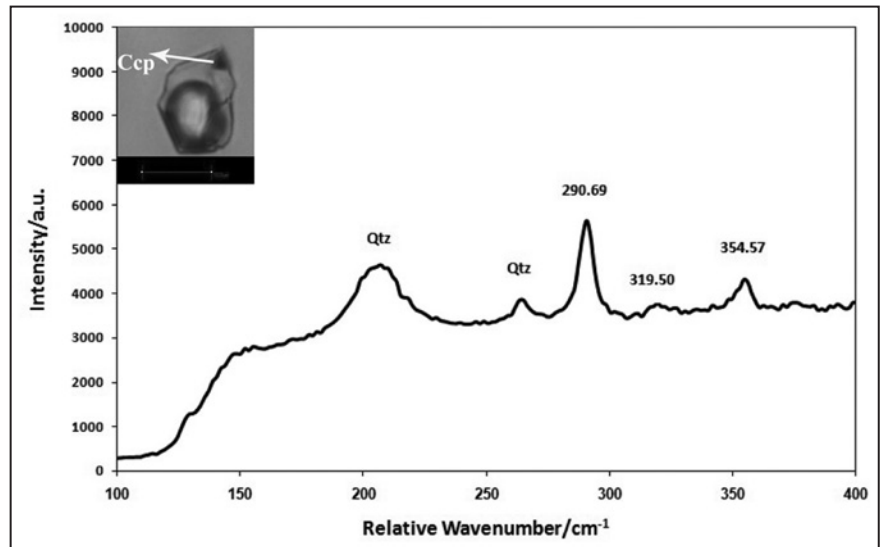


شکل ۱۳- توزیع مقادیر شوری و دماهای همگنی میانبارهای دوفازی غنی از مایع در رگچه‌های کوارتز کانه‌دار و نابارور در باغ‌خشک.

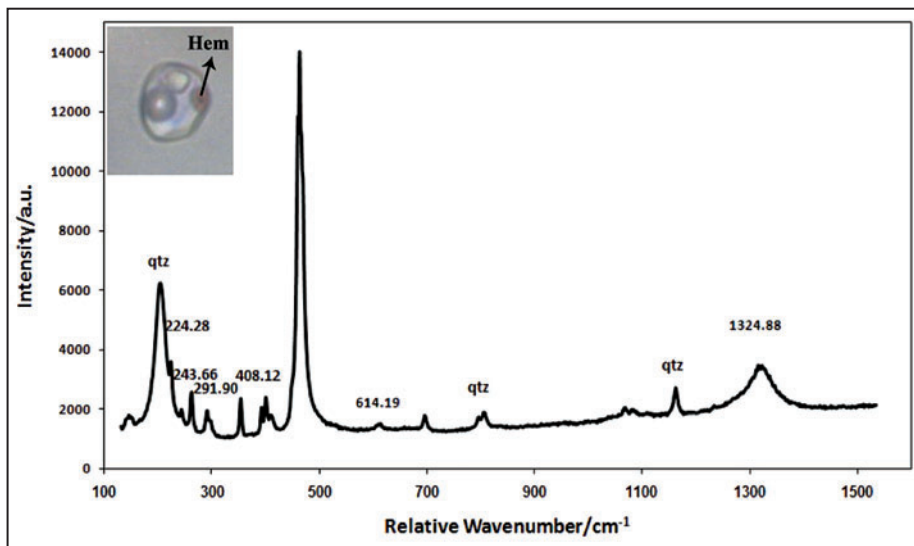
شکل ۱۴- طیف رامان گاز کربن دی‌اکسید در یک میانبار دوفازی غنی از بخار؛ نمونه BAK02-312.



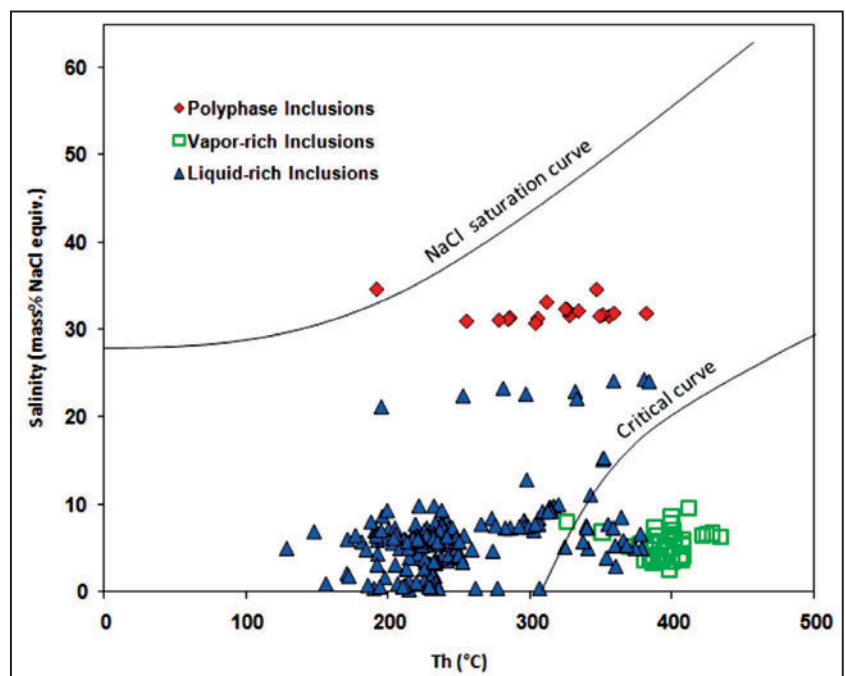
شکل ۱۵- طیف رامان فاز نوزاد کالکوپیریت در یک میانبار دوفازی غنی از بخار؛ نمونه BAK02-312.



شکل ۱۶- طیف رامان هماتیت در یک میانبار چندفازی؛ نمونه BAK06-276.10.



شکل ۱۷- توزیع مقادیر شوری و دمای همگن‌شدگی برای انواع میانبارهای سیال در باغ‌خشک. منحنی اشباع نمک و دماهای بحرانی از Ahmad & Rose (1980).



جدول ۱- ترکیب ژئوشیمیایی سنگ کل از توده‌های نفوذی باغ‌خشک.

Rock type	GRD	GRD	GRD	GRD	GRD	DIO	DIO
Sample No.	BAK-1	BAK-2	BAK-5	BAK-7	BAK-8	BAK-4	BAK-6
SiO ₂ (%)	65.63	66.03	62.36	68.03	68.27	53.08	48.78
Al ₂ O ₃	16.97	15.36	16.66	15.34	15.32	18.74	18.65
Fe ₂ O ₃	3.77	2.66	6.03	2.63	2.69	9.11	11.02
MgO	1.32	1.37	2.52	1.52	1.36	4.64	6.51
CaO	4.05	3.88	4.66	2.98	3.18	4.49	5.54
Na ₂ O	4.13	2.37	3.45	3.05	3.33	3.92	3.53
K ₂ O	1.46	3	1.62	3.18	2.99	3.06	2.95
TiO ₂	0.33	0.32	0.46	0.33	0.3	0.87	0.94
P ₂ O ₅	0.12	0.1	0.15	0.1	0.08	0.28	0.18
MnO	0.04	0.05	0.06	0.04	0.04	0.11	0.15
LOI	2	4.4	1.8	2.4	2.1	1.2	1.3
S	0.04	0.57	0.05	0.58	0.59	0.22	0.16
C (ppm)	0.09	0.8	0.1	0.17	0.17	0.15	0.1
Ba	643	833	374	689	693	931	468
Co	4.8	7.3	11	11.2	6.9	31.7	31.3
Cs	3.9	4.7	2.7	4.1	1.7	8.5	12.2
Ga	16.4	13.8	16.6	13.7	13.6	17.6	19.1
Hf	3.4	3.4	4.1	4.3	3.1	2.7	1.7
Nb	3.9	5.2	4.9	5.6	5	3.9	2.9
Rb	56.3	113	93.2	117.5	94.3	173.9	165.2
Sr	602.4	150.3	462.3	368.3	369.8	603.9	374
Ta	0.2	0.4	0.3	0.5	0.3	0.2	0.2
Th	3.5	9.6	6.8	12.4	10.7	4.4	0.9
U	1.1	2.4	1.6	3.7	2.7	1	0.8
V	60	77	131	66	60	288	361
W	3.3	4	3.5	1	1.1	<0.5	0.5
Zr	129.9	131.5	155	163.8	112.6	101.7	65.8
Y	8.5	14.7	12.7	13.9	11.3	19.6	22.2
La	18.2	38.9	15.4	18.6	10.1	16.9	6.3
Ce	37	80.3	31.4	39	18.6	37.2	16.3
Pr	3.83	7.73	3.36	4.07	2.16	4.22	2.17
Nd	13	24.8	12.6	14.3	8.7	16.6	10.6
Sm	2.38	3.82	2.45	2.85	1.81	3.79	2.73
Eu	0.75	0.72	0.79	0.67	0.56	1.21	0.91
Gd	1.81	2.68	2.19	2.38	1.81	3.81	3.34
Tb	0.28	0.43	0.35	0.38	0.3	0.61	0.59
Dy	1.52	2.45	2.02	2.2	1.85	3.46	3.45
Ho	0.29	0.48	0.41	0.46	0.37	0.66	0.78
Er	0.87	1.53	1.23	1.48	1.16	1.96	2.35
Tm	0.15	0.23	0.2	0.23	0.19	0.29	0.36
Yb	1	1.61	1.35	1.56	1.23	1.82	2.33
Lu	0.17	0.27	0.23	0.26	0.22	0.29	0.36
Mo	<0.1	0.7	0.7	1.2	2.8	5.8	373.4
Cu	4.3	2734.6	658.4	2640.8	1692	1499.8	931.2
Pb	0.7	7.3	0.9	0.9	0.8	0.6	0.3
Zn	26	29	33	31	24	63	60

جدول ۲- توصیف رگچه‌های کوارتز- سولفید برای اندازه‌گیری‌های دماسنجی.

کد نمونه (کمانه- ژرفا)	سنگ میزبان	کانی‌شناسی	دگرسانی سنگ میزبان
BAK02-269.50	دیوریت	کوارتز، کلریت، پیریت	فلیک
BAK02-312	دیوریت	کوارتز، بیوتیت، پیریت، کالکوپیریت، مولیدنیت	پتاسیک
BAK05-178.50	گرانودیوریت	کوارتز، پیریت، کالکوپیریت	پتاسیک
BAK06-276.10	گرانودیوریت	کوارتز، پیریت، کالکوپیریت	فلیک

جدول ۳- فراوانی انواع میانبارهای سیال در نمونه‌های مورد استفاده در این مطالعه.

کد نمونه (شماره کمانه- ژرفا)	کانی‌شناسی رگچه	سنگ میزبان	دگرسانی	میانبارهای چندفازی (نسبت %)	میانبارهای دوفازی غنی از گاز (نسبت %)	میانبارهای دوفازی غنی از مایع (نسبت %)	میانبار شماره شده
BAK02-312	کوارتز+کالکوپیریت+پیریت+مولیدنیت	دیوریت	پتاسیک	۰/۰۰	۲۸	۷۲	۱۶۴۴
BAK05-178.50	کوارتز+پیریت+کالکوپیریت	دیوریت	پتاسیک	۰/۰۰	۱/۵۰	۹/۸۵	۲۹۱۹
BAK06-330.40	کوارتز+پیریت+کالکوپیریت	گرانودیوریت	فلیک	۰/۱	۹	۹۰/۹	۱۴۰۰
BAK02-300.70	کوارتز+کالکوپیریت+مولیدنیت	گرانودیوریت	فلیک	۰/۳	۷	۹۲/۷	۱۷۳۹
BAK06-276.1	کوارتز+پیریت+کالکوپیریت	گرانودیوریت	فلیک	۱	۵	۹۴	۱۹۱۹
BAK02-269.50	کوارتز+پیریت	گرانودیوریت	فلیک	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۱۰۳۳

کتابنگاری

شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۹- گزارش مطالعات زمین‌شناسی و آلتراسیون محدوده باغ‌خشک در مقیاس ۱:۱۰۰۰، مدارک منتشر نشده.
 کاظمی مهرنیا، ا.، ۱۳۸۹- ویژگی‌های پوشش شسته شده و تکامل زون غنی‌شدگی سوپرژن در کانسارهای مس-مولیدن پورفیری شمال غرب کرمان، پایان‌نامه دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شهید بهشتی، ۳۱۰ صفحه.

References

- Aftabi, A. & Atapour, T., 2000- Regional aspects of shoshonitic volcanism in Iran. *Episodes* 23: 119-125.
- Aghanabati, A., 1990- Distribution of Magmatic Rocks in Iran (Scale: 1: 2,500,000). Geological Survey of Iran.
- Ahmad, S. N. & Rose, A. W., 1980- Fluid inclusions in porphyry and skarn ore at Santa Rita, New Mexico. *Economic Geology* 75: 229-250.
- Alavi, M., 1980- Tectonostratigraphic evolution of Zagros sides of Iran. *Geology* 8: 144-149.
- Alavi, M., 1994- Tectonic of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229: 211-238.
- Alirezaei, S. & Hasanpour, S., 2011- An Overview of Porphyry Copper Deposits in Iran: The 1st World Copper Congress, Iran. *Proceedings with Abstracts*, pp.49-62.
- Alirezaei, S. & Mohammadzadeh, Z., 2009- Hydrothermal alteration-mineralization at Chahfiroozeh porphyry copper deposit, Kerman province, Southern Iran. Paper presented at 2009 Joint Assembly, 24-27 May, in Toronto, Canada.
- Bakker, R. J., 2004- Raman spectra of fluid and crystal mixtures in the system H_2O , H_2O -NaCl and H_2O -MgCl₂ at low temperatures: applications to fluid inclusion research. *Canadian Mineralogist* 42: 1283-1314.
- Bakker, R. J., 2011- The use of quantities, units and symbols in fluid inclusion research. *European current research on fluid inclusions (ECROFI-XXI)*. Montanuniversitat Leoben, Austria, 9-11 August, 5-11.
- Berberian, F., Muir, I. D., Pankhurst, R. J. & Berberian, M., 1982- Late Cretaceous and early Miocene Andean type plutonic activity in northern Makran and central Iran. *Journal of Geological Society of London* 139: 605-614.
- Bloom, M. S., 1981- Chemistry of inclusion fluids: Stockwork molybdenum deposits from Questa, New Mexico, and Hudson Bay Mountain and Endako, British Columbia. *Economic Geology* 76: 1906-1920.
- Bodnar, R. J. & Beane, R. E., 1980- Temporal and spatial variations 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.
- Bodnar, R. J., 1993- Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O -NaCl solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 57: 683-684.

- Burke, E. A. J., 2001- Raman microspectrometry of fluid inclusions. *Lithos* 55: 139–158.
- Burnham, C. W., 1997- Magmas and hydrothermal fluids, in Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 3d ed.: New York, John Wiley and Sons, 63–123.
- Burruss, R. C., 2003- Raman spectroscopy of fluid inclusions. In: Samson, I., Anderson, A., Marshall, D. (Eds.). *Fluid inclusions: analysis and interpretation: Mineralogical Association of Canada, short course series*, 32: 279–289.
- Calagari, A. A., 2004- Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azərbayjan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 23: 179–189.
- Eastoe, C. J., 1978- Fluid inclusion study of the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua-New Guinea. *Economic Geology* 73: 721–748.
- Frezotte, M. L., Tecce, F. & Casagli, A., 2012- Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration* 112: 1-20.
- Goldstein, R. H. & Reynolds, T. J., 1994- Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals, *Society for Sedimentary Geology Short Course* 31: 199 p.
- Hassanzadeh, J., 1993- Metallogenic and tectonomagmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of Iran (Shahre Babak area, Kerman Province). Ph.D. thesis, University of California, United States.
- Heinrich, C. A. Günther, D., Audétat, A., Ulrich, T. & Frischknecht, R., 1999- Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions. *Geology* 27: 755–758.
- Hezarkhani, A. & Williams-Jones, A. E., 1998- Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Economic Geology* 93: 651–670.
- Hezarkhani, A., 2006- Petrology of intrusive rocks within the Sungun porphyry copper deposit, Azərbayjan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 73: 326–340.
- Hou, Z. Q. & Cook, N. J., 2009- Metallogenesis of the Tibetan Collisional Orogen: a review and introduction to the special issue. *Ore Geology Reviews* 36: 2–24.
- Kretz, R., 1983- Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68: 277-279.
- Landtwing, M. R. Furrer, C., Pettke, T., Guillong, M. & Heinrich, C. A., 2010- The Bingham Canyon porphyry Cu-Mo-Au deposit: III. Zoned copper- gold ore deposition by magmatic vapor expansion. *Economic Geology* 105: 91–118.
- Maniar, P. D. & Piccoli, P. M., 1989- Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin* 101: 635–643.
- Mao, J., Pirajno, F., Lehmann, B., Luo, M. & Berzina, A., 2014- Distribution of porphyry deposits in the Eurasian continent and their corresponding tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences* 79: 576-584.
- Masterman, G. J., Cooke, D. R., Berry, R. F., Walshe, J. L., Lee, A. W. & Clark, A. H., 2005- Fluid chemistry, structural setting, and emplacement history of the Rosario Cu-Mo Porphyry and Cu-Ag-Au epithermal veins, Collahuasi district, Northern Chile. *Economic Geology* 100: 835–862.
- Mavrogenes, J. A. & Bodnar, R. J., 1994- Hydrogen movement into and out of fluid inclusions in quartz: Experimental evidence and geological implications. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58: 141–148.
- McInnes, B. I. A., Evans, N. J., Fu, F.Q., Garwin, S., Belousova, E., Griffin, W. L., Bertens, A., Sukarna, D., Permanadewi, S., Andrew, R. L. & Deckart, K., 2005- Thermal history analysis of selected Chilean, Indonesian and Iranian porphyry Cu-Mo-Au deposits; In Porter, T.M., (Ed.) *Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective*, Adelaide, 1-14.
- Middlemost, E. A. K., 1994- Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Sci. Review* 37: 215–224.
- Morizet, Y., Paris, M., Gaillard, F. & Scaillet, B., 2009- Raman quantification factor calibration for CO-CO₂ gas mixture in synthetic inclusions: Application to oxygen fugacity calculation in magmatic systems. *Chemical Geology* 264: 58-70.
- Müller, D. & Groves, D. I., 2000- *Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization*, 3rd ed. Springer, Berlin Heidelberg, New York.
- Nedimovic, R., 1973- Exploration for ore deposits in Kerman region, Geological Survey of Iran, Iran, Report No. 53.
- Ohmoto, H. & Goldhaber, M. B., 1997- Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes HL (ed) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 3rd ed. Wiley, 517–611.
- Omrani, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. & Jolivet, L., 2008- Arc-magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos* 106: 380–398.
- Pearce, J. A. & Peate, D. W., 1995- Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Science* 23: 251–285.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. & Tindle, A. G., 1984- Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25: 956–983.
- Raman, C. V., 1928- A new radiation. *Indian Journal of Physics* 387.

- Richards, J. P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A. & Fletcher, T., 2012- High Sr/Y Magmas Reflect Arc Maturity, High Magmatic Water Content, and Porphyry Cu \pm Mo \pm Au Potential: Examples from the Tethyan Arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan. *Economic Geology* 107: 295–332.
- Richards, J., 2014-Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: from subduction to collision. *Ore Geology Review* <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.11.009>.
- Roedder, E., 1971- Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado. *Economic Geology* 66: 98–118.
- Rusk, B. G. Reed, M. H. & Dilles, J. H., 2008- Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, Montana. *Economic Geology* 103: 307–334.
- Selby, D., Nesbitt, B. E., Muehlenbachs, K. & Prochaska, W., 2000- Hydrothermal alteration and fluid chemistry of the Endako porphyry molybdenum deposit, British Columbia. *Economic Geology* 95: 183–202.
- Shahabpour, J., 1982- Aspects of alteration and mineralization at the Sar-Cheshmeh copper-molybdenum deposit, Kerman, Iran; Unpublished Ph.D. Thesis, University of Leeds, 342 p.
- Singer, D. A., Berger, V. I. & Moring, B. C., 2005- Porphyry copper deposits of the world: database, map, and grade and tonnage models. U.S.G.S. Open-File Report 2005-1060.
- Sterner, S. M., Hall, D. L. & Bodnar, R. J., 1988- Synthetic fluid inclusions. V. Solubility relations in the system NaCl-KCl-H₂O under vapor-saturated conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52: 989-1005.
- Stöcklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran: a review. *American Association of Petrology and Geology Bulletin* 52: 1229–1258.
- Sun, S. S. & McDonough W. F., 1989- Chemical and isotopy systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the Ocean: Basins*. The Geological Society of London, special publication 42.
- Taghipour, N., Aftabi, A. & Mathur, R., 2008- Geology and Re-Os geochronology of mineralization of the Miduk porphyry copper deposit, Iran. *Resource Geology* 58: 143–160.
- Ulrich, T., Günthür, D. & Heinrich, C. A., 2002- The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions. Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology* 97: 1889–1920.
- Van den Kerkhof, A. M. & Hein, U. F., 2001- Fluid inclusion petrography. *Lithos* 55: 27–47.
- Walker, J. A., Patino, L. C., Carr, M. J., Feigenson, M. D., 2001- Slab control over HFSE depletions in central Nicaragua. *Earth Planet. Sc. Lett.* 192: 533–543.
- Williams-Jones, A. E. & Heinrich, C. A., 2005- Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits. *Economic Geology* 100: 1287–1312.
- Wilson, M., 1989- *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. Harper Collins Academic, 466.
- Zarasvandi, A., Liaghat, S. & Zentilli, M., 2005- Geology of the Darreh-Zereshk and Ali-Abad porphyry copper deposits. Central Iran. *International Geology Review* 47: 620–646.

Laser Raman Microspectroscopy of Fluid Inclusions and Evolution of Ore Fluids in Baghkhoshk Porphyry Copper System, Southern Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt

M. Einali ^{1*}, S. Alirezai ² & R. Bakker ³

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

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

³ Associate Professor, Department of Applied Geosciences and Geophysics, University of Leoben, Leoben, Austria

Received: 2012 October 23

Accepted: 2013 January 30

Abstract

The Baghkhoshk porphyry copper system is located in the southern part of the Cenozoic Urumieh-Dokhtar magmatic belt of Iran. Mineralization in Baghkhoshk is associated with two shallow diorite-monzodiorite and granodiorite bodies that intruded the older andesitic volcanic rocks. Both intrusions are extensively altered by hydrothermal fluids into potassic, phyllic, and propylitic assemblages. Mineralization occurs as quartz-sulfide stockworks as well as sulfide disseminations in both intrusions and to a lesser extent in the host volcanic rocks. Two types of quartz veinlets can be distinguished in the Baghkhoshk porphyry system: 1) quartz+ chalcopyrite+ pyrite± molybdenite veinlets (mineralized veinlets); and 2) quartz± pyrite veinlets (barren veinlets). The intrusions display distinct enrichments in large-ion lithophile elements and rare earth elements relative to high-field strength elements and heavy rare earth elements, and distinct Nb, Ta and Ti troughs that are characteristic of subduction-related magmatic arcs. On various diagrams separating tectonic settings, the intrusions plot in the continental arc domain. Three main types of fluid inclusions were identified in quartz from mineralized veinlets: low salinity (4-8 mass% NaCl equivalent), vapor-rich inclusions; high salinity (mainly in the range of 32.5-35 mass% NaCl equivalent), poly-phase inclusions; and low to moderate salinity (mainly in the range of 4-10 mass% NaCl equivalent), liquid-rich inclusions. The vapor-rich inclusions yielded homogenization temperatures ranging between 325 and 434 °C, with a mode at 380-420 °C. Laser Raman microspectroscopic analysis confirmed the presence of CO₂ gas and chalcopyrite daughter crystals in the vapor-rich inclusions. The high salinity, poly-phase inclusions were homogenized to liquid at temperatures of mainly 300-375 °C. The liquid-rich inclusions were homogenized at temperatures between 150 and 384 °C, with most of the measurements falling in the range of 200-250 °C and 300-375 °C. The salinities and homogenization temperatures for fluid inclusions in quartz from the barren veinlets were found to be 0.5-4 mass% NaCl equivalent and 200-240 °C, respectively. The fluid inclusion data suggest that Cu was originally accommodated into the system by a hot (380-420°C), low salinity (4-8 mass% NaCl equivalent), CO₂-bearing, vapor-rich or supercritical fluid. A considerable drop in temperature at constant salinity from vapor-rich to liquid-rich inclusions in the mineralized veinlets suggests that cooling was the main control on ore formation as stockworks and sulfide disseminations. In the later stages of the hydrothermal activity, low salinity, Cu-poor fluids gave rise to abundant barren veinlets consisting essentially of quartz and pyrite.

Key words: Fluid inclusion, Laser Raman spectroscopy, Porphyry copper, Baghkhoshk, Urumieh-Dokhtar, Iran.

For Persian Version see pages 21 to 36

*Corresponding author: M. Einali; E-mail: m_einali@sbu.ac.ir