



## زمین‌شیمی سیالات ماگمایی - گرمابی پورفیری‌های بارور و نابارور، مجموعه مس شهرباک، کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان

سینا اسدی<sup>۱\*</sup>، فرید م<sup>۲</sup>

۱- استادیار زمین‌شناسی اقتصادی و ژئوشیمی، گروه علوم زمین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- استاد زمین‌شناسی اقتصادی و ژئوشیمی، گروه علوم زمین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

\* عهده‌دار مکاتبات: sinaasadi@shirazu.ac.ir

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۳/۱۰، پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۳/۱۶

### چکیده

ذخایر مس پورفیری شهرباک، در شمال غرب کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان واقع شده‌اند. زمین‌شیمی میانبرهای سیال با استفاده از ریزدماسنجی، طیف‌نمایی رامان و فرسب لیزری- طیف‌سنجی جرمی پلاسما جفت‌شده القایی بر روی سه توده بارور (گروه ۱: میدوک، چاه‌فیروزه و ایجو) و سه ذخیره نابارور (گروه ۲: کدر، آبدر و پرکام) در مجموعه مس شهرباک مطالعه گردید. دگرسانی گرمابی در این منطقه به تشکیل سه مرحله کانه‌زایی رگه‌های کوارتز  $\pm$  سولفیدی در هر دو گروه منجر شده است. این رگه‌ها شامل: (۱) رگه‌های تیپ A و M (مرحله ۱: با دگرسانی پتاسیمی)؛ (۲) تیپ B (مرحله ۲: با دگرسانی پتاسیمی - سریسیتی)؛ و (۳) تیپ D (مرحله ۳: با دگرسانی پروپیلیتی) است. کانه‌زایی اصلی طی مراحل ۱ و ۲ رخ داده است. کانه‌زایی در گروه ۱ در ارتباط با سیالات آبگین- کربن‌دار ( $X_{CO_2} > 9/6$  - درصد حجم مولی  $CO_2$ ) با شوری ۳۱ تا ۴۴ درصد وزنی معادل نمک طعام در دماهای بین ۳۷۴ تا ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار بیش از ۷۵۱ بار طی فرایند نامیژاکی سیال بوده است. در مقابل، کانه‌زایی در گروه ۲ در ارتباط با سیالات آبگین همگن، با  $X_{CO_2}$  کمتر از ۷/۱، شوری بالا (۵۷) تا ۷۶ درصد وزنی معادل نمک طعام، دمای بالا (۵۷۰ تا ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد) و فشار کمتر از ۵۷۲ بار رخ داده است. شرایط اکسایش-کاهش ( $\log f_{O_2}$ ) متفاوت و ضریب تفکیک ( $D_E^{V/B}$ ) بارز فلزات کانسنگ‌ساز بین فاز بخار/شوراب در سامانه‌های بارور ( $3/8 =$ ؛  $\log f_{O_2} < -29/5 D_E^{V/B}$ ) و نابارور ( $D_E^{V/B} = 0/32$ ؛  $\log f_{O_2} > -32/4$ ) نشان داد که تمایل بیشتر فلزات به استثنای مس و گوگرد، به تمرکز در فاز شوراب نسبت به فاز بخار بوده است.

واژه‌های کلیدی: مس پورفیری، میانبر سیال، فوگاسیته اکسیژن، LA-ICP-MS، کرمان

### ۱- مقدمه

سراسر جهان به خوبی از یک مدل توصیفی عمومی تبعیت می‌کنند که همگی در حاشیه صفحات همگرا، در ارتباط با فرورانش سنگ کره اقیانوسی و دارای پنج رخساره اصلی دگرسانی (پتاسیمی، پروپیلیتی، سریسیتی، رسی حدواسط و رسی پیشرفته) و کانه‌زایی افشان گرمابی می‌باشند. مدل زایشی که در دهه ۱۹۷۰ به تدریج کامل شد برای بیشتر سیمای مدل توضیحات قانع‌کننده‌ای دارد. اساس این مدل آزاد شدن و تمرکز سیال غنی از فلز صعود کننده‌ای است که حاصل بلورش یک توده نفوذی مادر (استوک‌های پورفیری اسیدی تا متوسط) در پوسته قاره‌ای است. در سامانه‌های پورفیری سیالات کانسنگ‌ساز و مواد فرآر اسیدی به طور پیچیده‌ای با استوک، سنگ‌های دیواره و سیالات جوی و فسیل در محیط واکنش می‌دهند (Pasteris, 1996; Hou & Cook, 2009; Hou et al., 2011).

مطالعاتی که تا به حال در کمر بند ماگمایی- آتشفشانی ارومیه- دختر برای شناسایی پورفیری‌های بارور از نابارور انجام شده است بیشتر بر پایه بررسی‌های زمین‌شیمیایی (بررسی تحرک مس در خاک‌های سطحی) و کانی‌شناختی رُخدادهای دگرسانی، زمین‌شیمی عنصری و تمایز ایزوتوپی

ذخایر پورفیری مهم‌ترین منابع مس، مولیبدن، طلا و تنگستن جهان هستند. این ذخایر حاصل فرایندهای سنگ‌زایی- گرمابی بزرگی هستند که جایگزینی آنها در ارتباط با استوک‌ها یا دایک‌های نفوذی است. این ذخایر در گروه ذخایر ماگمایی- گرمابی قرار دارند و در تشکیل آنها سیالات با منشا ماگمایی و غیرماگمایی نقش دارند (Qu et al., 2001; Richards, 2009; Hou & Cook, 2009; Sillitoe, 2010). رُخداد کانه‌زایی در ذخایر مس پورفیری به صورت افشان، رگچه‌ای و ریز رگچه‌ای است. به طور کلی الگوی دگرسانی و کانه‌زایی در این ذخایر مشابه و در پی‌جویی فعالیت‌های اکتشافی حائز اهمیت است. با این حال عوامل مختلفی مانند عمق جایگزینی، ترکیب شیمیایی سنگ دیواره پیش از کانه‌زایی، کنترل کننده‌های ساختاری توده نفوذی قبل از کانه‌زایی و تغییرات فیزیکی و شیمیایی سیالات کانسنگ‌ساز در کانی‌شناسی و تقارن الگوی دگرسانی کانه‌زایی تاثیر دارند (Richards et al., 2012). ذخایر مس پورفیری در

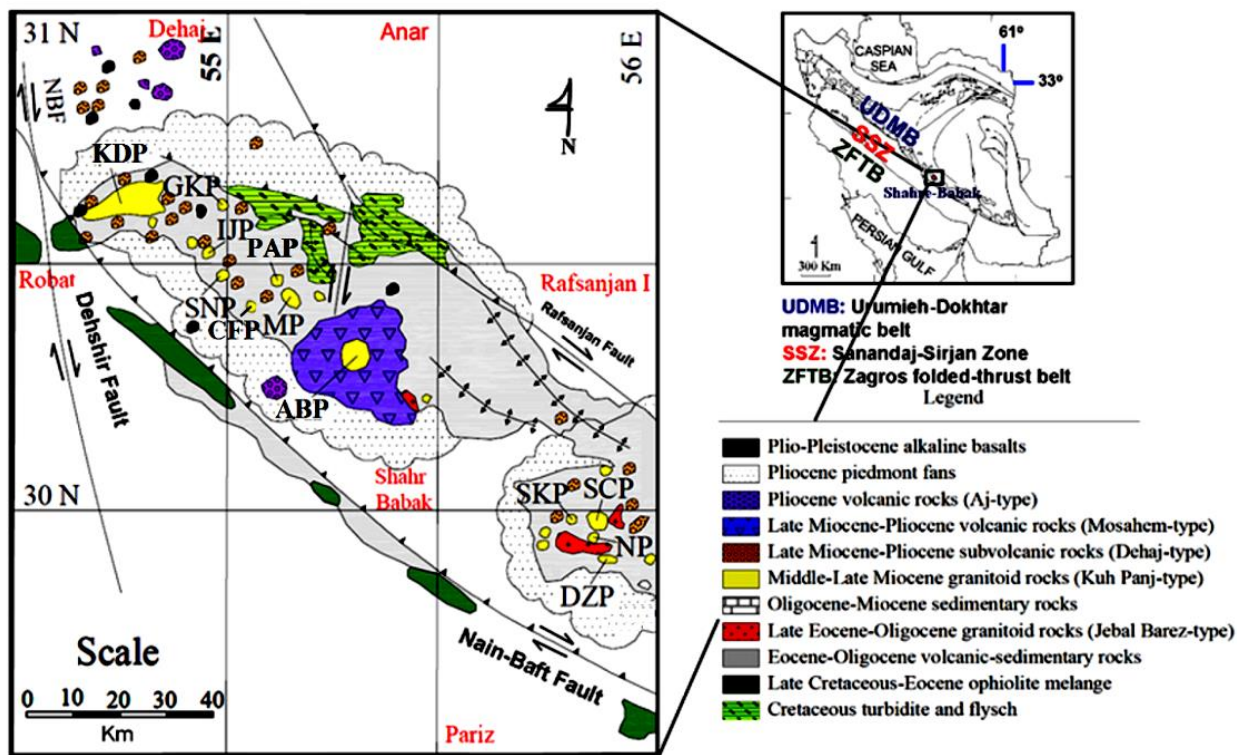
ایجو، آبدر، سرنو، گودکلواری، پرکام (کوه سارا) و کدر (شکل ۱). این مطالعه بر روی مجموعه مس میدوک متمرکز شده است. اهداف این پژوهش مشخص کردن مراحل مختلف تکوین و تکامل رگه‌ها، و بررسی نوسانات دمایی، پاراژنزی و تهنشست کانسنگ، مطالعه زمین‌شیمی میانبارهای سیال و تشخیص ترکیب سیال تشکیل‌دهنده سامانه‌های پورفیری بارور و نابارور با استفاده از ریزدماسنجی و روش‌های نوین فرسب لیزری- طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفتیده القایی (LA-ICP-MS) و طیف‌نمایی رامان رگه‌های کوارتزی کانه‌دار در مجموعه معادن مس شهرباک کرمان است. این پژوهش نخستین گزارش تفکیک سیالات ماگمایی- گرمایی بارور و نابارور با استفاده از روش‌های نوین اکتشافی در کمان سنوزوئیک کرمان و کمرند مس جنوب شرق ایران می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

با توجه به گسترش منطقه شهرباک، برای سهولت درک روابط زمین‌شیمیایی، ۶ پورفیری مورد مطالعه در این تحقیق، به دو گروه ۱ (بارور): میدوک، چاه‌فیروزه و ایجو و گروه ۲ (نابارور): آبدر، کدر و پرکام تقسیم شدند و روش مطالعه به صورت زیر طراحی گردید: ۱- بررسی‌های صحرائی از مناطق اکتشافی و مغزه‌های حفاری، ۲- نمونه‌برداری رگه‌های کوارتزی از ژرفای مختلف گمانه‌ها و رُخمون‌های سطحی، ۳- مشخص کردن مراحل مختلف تکوین و تکامل رگه‌ها، و ۴- مطالعه ریزدماسنجی (۳۰ نمونه مقطع دوبرصیقل در آزمایشگاه آذین زمین پویا) و زمین‌شیمی میانبارهای سیال در تشخیص ترکیب سیالات تشکیل‌دهنده سامانه‌های پورفیری بارور و نابارور با استفاده از LA-ICP-MS و طیف‌نمایی رامان (۸ نمونه مقطع دوبرصیقل ضخیم برای اندازه‌گیری غلظت فلزات و ترکیبات مولکولی در ۸ فاز شوراب (آبگین شور) و ۸ فاز بخار در آزمایشگاه طیف‌نگاری و فرسب لیزری دانشگاه جیمز کوک استرالیا) در رگه‌های مختلف کانه‌دار به منظور بررسی تکامل سیالات کانسنگ‌ساز.

توده‌های پورفیری و آتشفشانی‌های میزبان و روش‌های زمین‌فیزیکی به ویژه قطبش القایی (IP) یا مغناطیس‌سنجی (به دلیل تمرکز مگنتیت در زون پتاسیمی و بالا بودن شدت میدان مغناطیسی استوک‌های پورفیری) بوده است (Hassanzadeh, 1993; Zarasvandi et al., 2005; McInnes et al., 2005; Taghipour et al., 2008; Shafiei et al., 2009; Hou et al., 2011; Richards et al., 2012). این روش‌ها با وجودی که هاله‌های دگرسانی را به خوبی تفکیک می‌کنند، اما به دلیل شباهت این پورفیری‌ها به ویژه از نظر نوع دگرسانی، روش‌های موفقیت‌آمیزی نبوده‌اند. از دیدگاه هاینریش (Heinrich, 2005) بهترین روش شناسایی و تمایز این سامانه‌ها بررسی مستقیم سیالات ماگمایی- گرمایی آنهاست. از نظر این پژوهشگر تفاوت ترکیب سیالات گرمایی- ماگمایی در سامانه‌های نابارور و بارور به روند تکامل این سیالات بستگی دارد. بنابراین هیچ توده پورفیری‌ای نابارور نمی‌شود مگر آنکه روند تکامل سیالات آن از نظر ویژگی‌های گرمایی و فشارشی متفاوت باشد. این دیدگاه توسط دیگر محققین نیز در سال‌های اخیر نیز تایید شده است (Audetat et al., 2008). این ویژگی‌ها تنها با مطالعه روش‌های نوین زمین‌شیمی میانبارهای سیال مشخص می‌شود.

سامانه‌های پورفیری کمرند تکتونو- ماگمایی ارومیه- دختر به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم می‌شوند (شفیعی‌بافتی، ۱۳۸۶؛ اسدی، ۱۳۹۲). مهم‌ترین ذخیره مس پورفیری در بخش شمالی، کانسار مس سونگون است. بیشترین تمرکز ذخایر مس پورفیری ایران در بخش جنوبی و در شمال غرب کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان (KCMA) واقع شده‌اند. سامانه‌های مس پورفیری در این کمان سه مجموعه را شامل می‌شوند (Asadi et al., 2014): الف) مجموعه جبال بارز با فعالیت‌های گسترده آتشفشانی ائوسن تا انتهای الیگوسن همراه با جایگیری توده‌های گرانیتوئیدی با گرایش غالب کلسیمی- قلیایی تا پرتاسیم و کانه‌زایی ضعیف مس، ب) مجموعه سرچشمه شامل کانسارها و ذخایر سرچشمه، دره‌زار، ده‌سیاهان، سرکوه، نوچون، کوه پنج، دره‌زار و باغ خشک، و ج) مجموعه میدوک شامل کانسارها و ذخایر میدوک، چاه‌مسی، چاه‌فیروزه،

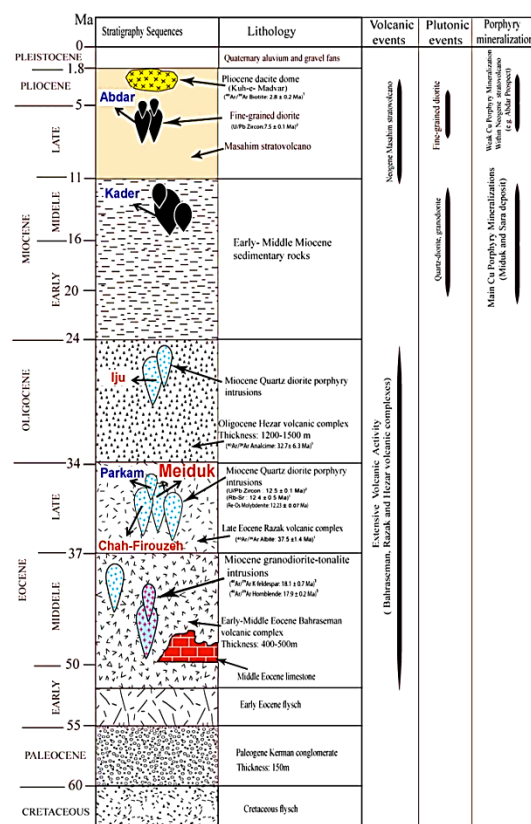


شکل ۱- نقشه زمین‌شناختی منطقه مورد مطالعه در شمال غرب کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان در مجموعه شهرابک بین دو سامانه گسل‌های فشارشی با مولفه امتداد لغز راستگرد رفسنجان در شمال و نائین- بافت در جنوب (شفیعی‌بافتی، ۱۳۸۶). اختصارات استفاده شده در روی نقشه (از شمال غرب به جنوب شرق): KDP: توده گرانودیوریتی کدر، GKP: توده دیوریت پورفیری گود کلواری، IJP: توده کوارتز دیوریتی ایجو، SNP: توده کوارتز دیوریت پورفیری سرنو، PAP: توده گرانودیوریتی پرکام (کوه سارا)، CFP: توده گرانودیوریتی چاه‌فیروزه، MP: میدوک پورفیری، ABP: آبدر پورفیری، SKP: توده گرانودیوریتی سرکوه، SCP: سرچشمه پورفیری، DZP: توده گرانودیوریت پورفیری دره‌زار، و NP: توده دیوریت پورفیری نوچون

در منطقه ائوسن پایانی ( $1 \pm 33$  Ma) می‌دانند. براساس این پژوهش تمام ذخایر پورفیری مورد مطالعه در منطقه شهرابک پس از تصادم و برخورد نهایی تشکیل شده‌اند. کوتاه‌شدگی پوسته در این دوران با بالآمدگی سست کره و رُمبش کششی همراه بوده است. این ماگماتیسم کششی به افزایش گرادبان‌های زمین‌گرمایی، بالآمدگی سریع و مذاب‌زایی دما بالای پیش‌رونده همراه با ماگماتیسم گرانیتهی پسازمین‌ساختی در شهرابک منجر شده است. به باور پیراژنو (Pirajno, 2009)، زایش ماگما در گوه سست‌کره‌ای در حال آب‌زدایی، باعث تشکیل توده‌های پورفیری‌ای می‌شود که دامنه ترکیب آنها از دیوریتی (ماگماهای نوع A) تا گرانودیوریتی (ماگماهای نوع I) تغییر می‌کند. این ماگماها در سطح باعث ایجاد گستره‌ای از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب بازالتی تا آندزیتی و داسیتی تا ریولیتی می‌شود (شکل ۲؛ مجموعه‌های آتشفشانی بحرآسمان، رازک، هزار و کالدراي آتشفشانی مساهیم). براساس این نظریه گذار از سامانه فشارشی به کششی پس‌برخوردی در شهرابک با تشکیل یک پهنه بُرشی امتدادلغز راستگرد با رژیم ترفشارشی (مانند گسل‌های رفسنجان و نائین - بافت) همراه بوده است (Asadi et al., 2013).

### ۳- ویژگی‌های تکتونو- ماگمایی منطقه شهرابک

مجموعه معادن مس شهرابک در کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان (KCMA) و در یک پهنه بُرشی راستگرد جای گرفته‌اند که به احتمال زیاد می‌تواند ناشی از همگرایی مایل تختال فرورونده تا زمان تصادم قاره‌ای در این دوران باشد (تقی‌پور، ۱۳۸۶؛ شفیعی‌بافتی، ۱۳۸۶؛ شکل ۱). آغاز شکل‌گیری این کمان، با جایگیری بخش جنوبی خُردقاره در حال چرخش ایران مرکزی طی پالئوسن- ائوسن بوده است. پایان فرورانش مایل در راستای شمال‌شرق با حضور منشورهای برافزایشی به سن میوسن بر می‌گردد (Mohajjel et al., 2003). حسن‌زاده (Hassanzadeh, 1993) و شهاب‌پور (Shahabpour, 2005) بر پایه روش‌های K/Ar و Rb/Sr به ترتیب سن پورفیری‌های میدوک و سرچشمه را  $12.5 \pm 0.5$  و  $12.4 \pm 0.2$  Ma گزارش کرده‌اند. این شواهد نشان می‌دهد که برخورد بین حاشیه آفرو- عربی و صفحه ایران مرکزی احتمالاً در الیگو- میوسن رخ داده است. درگاهی و همکاران (Dargahi et al., 2010) براساس شواهد زمین‌شیمیایی و سن‌سنجی Rb/Sr، زمان بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس را



شکل ۲- توالی چینه‌شناختی، رویدادهای آتشفشانی- نفوذی و دوره‌های کانه‌زایی مس در مجموعه شهر بابک (Hassanzadeh, 1993; McInnes et al., 2005; Taghipour et al., 2008)

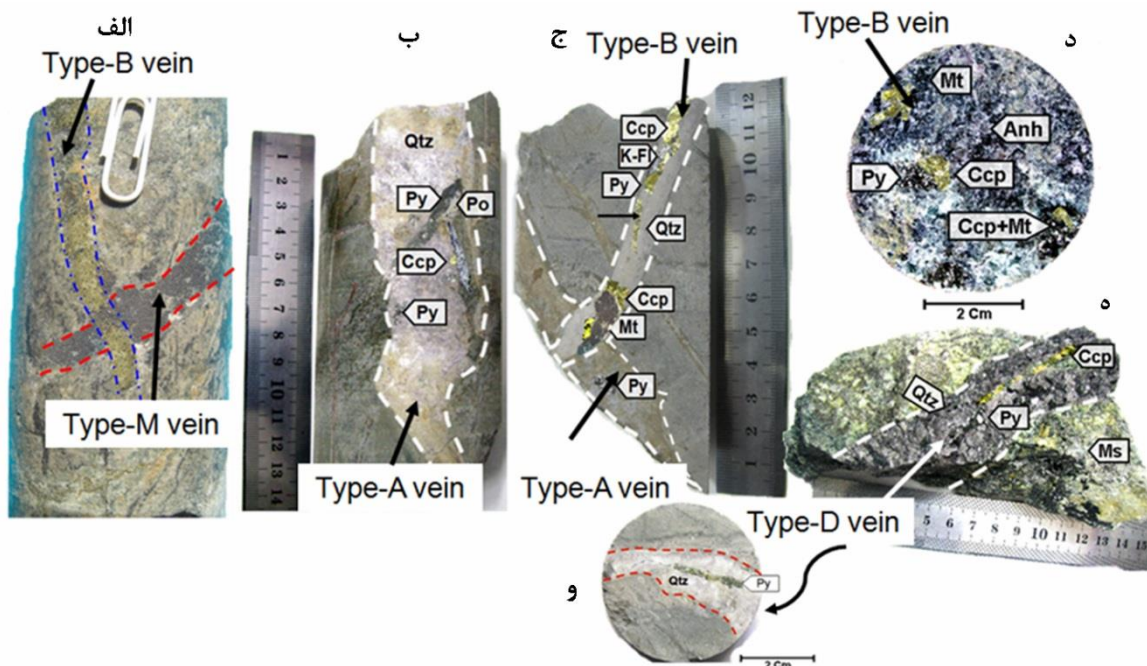
#### ۴- کانی‌شناسی رگه‌های کوارتز و زمین‌شیمی میانبارهای سیال

و مشخصاً توسط هاله‌های دگرسانی‌ای که در آنها سرسیت جانشین بیوتیت ثانویه شده است، احاطه گردیده‌اند. این رگه‌ها حاصل اولین فعالیت‌های گرمایی ارتوماگمایی هستند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که بخش اعظم کانه‌زایی مس درون‌زاد در سامانه‌های بارور، هم‌زمان با تشکیل رگه‌های کوارتزی گروه M و A صورت گرفته است. براساس مطالعات انجام شده بر روی میانبارهای سیال در ذخایر بارور مشخص شد که سیالات گرمایی بسیار شور (بیش از ۳۰ درصد وزنی معادل نمک طعام) با فازهای بخار کم‌شور (میانبارهای غنی از بخار)، در رگه‌های کوارتزی M و A و با دگرسانی پتاسیمی دما بالا (۳۵۰ تا بیش از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) همراه بوده‌اند. این سیالات ارتوماگمایی بارها دچار جوشش شده‌اند، و رگه‌های گروه B را با تجمعات کانیایی کوارتز + پیریت + کلسیت ± سرسیت ± کلکوپیریت ± (ژپس) ± روتیل ± هماتیت ± کریزوکولا تشکیل داده‌اند. جایگیری و گسترش این رگه‌ها به طور کلی در بخش بالایی توده‌های بارور و در زون دگرسانی سرسیتی رخ داده است. در این رگه‌ها تمام سیلیکات‌های اولیه به سرسیت، کوارتز و پیریت ثانویه تبدیل شده‌اند. برای ایجاد دگرسانی سرسیتی در این سامانه رگه‌ای، به سیالات جوی با شوری بین ۱ تا ۱۶ درصد معادل وزنی نمک طعام نیاز است. رگه‌های گروه D به طور نسبی تداوم اندکی دارند و دارای شکستگی فراوان و ضخامت بین ۲ تا ۲۵ سانتی‌متر هستند. کانی‌شناسی بیشتر این رگه‌ها شامل کلسیت، ژپس و پیریت می‌شود، و تشکیل اسفالریت و گالن در آنها بسیار ناچیز و فاقد

بررسی‌های کانی‌شناختی و نیز نحوه قطع‌شدگی رگه‌های کوارتز نسبت به یکدیگر براساس روش تفکیک سیلیتو (Sillitoe, 2010)، چهار گروه اصلی رگه را در ذخایر گروه ۱ نشان می‌دهد (شکل ۳). این رگه‌ها شامل رگه‌های کوارتز همراه با دگرسانی پتاسیمی (شکل ۳ - الف - ج؛ M و A) در بخش مرکزی توده‌های پورفیری، رگه‌های کوارتز همراه با دگرسانی پتاسیمی - سرسیتی (شکل ۳ - د؛ B) در بخش بالایی و رگه‌های کوارتز پروپیلیتی (شکل ۳ - ه - و؛ D) در حاشیه سامانه‌های پورفیری، تشخیص داده شد. رگه‌های تیپ M با دگرسانی پتاسیمی و تجمعات کانیایی کوارتز + اندریت ± مولیبدنیت ± فلدسپات پتاسیم ± سرسیت همراه با ذرات بسیار کوچک پیریت، کلکوپیریت، بورتیت، مگنتیت و پیروتیت مشخص می‌شود. پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک در این رگه‌ها به ترتیب توسط فلدسپات پتاسیم و بیوتیت‌های غنی از منیزیم ثانویه (پولکی) جایگزین شده‌اند. این رگه‌ها یکدیگر را قطع کرده، و با ضخامت متفاوت (از ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر) اغلب دارای هاله‌های غنی از بیوتیت بوده، و در اثر شکستگی هیدرولیکی (Hydrofracturing) ناشی از فشار سیالات ارتوماگمایی تشکیل شده‌اند. رگه‌های گروه A در زون دگرسانی پتاسیمی نیز دارای کانی‌شناسی کوارتز + کلکوپیریت + سرسیت + پیریت ± مولیبدنیت ± بورتیت ± گالن ± پیروتیت ± تیتانیت ± هماتیت است. این گروه گسترده‌تر از گروه M در منطقه بوده

پورفیری بارور، و توقف گردش سیالات در استوک است. میانبارهای سیال در تمام درشت بلورهای کوارتز رگه‌های بالا دیده می‌شود. ابعاد این میانبارها اغلب از ۶ میکرون بیشتر بوده و به بیش از ۳۰ میکرون هم می‌رسد. با توجه به روابط کانی‌شناختی و کانه‌زایی مس، تمام اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی در این پژوهش بر روی میانبارهای سیال رگه‌های A, M و B انجام شد.

مگنتیت، پیروتیت و تیتانیت هستند. همچنین جزئی کلکوپیریت و پیریت در این رگه‌ها به صورت پراکنده دیده می‌شود. سیالات گرمایی عامل تشکیل رگه‌های گروه D هستند. یک هاله سیلیسی کم‌ضخامت نیز بیشتر این رگه‌ها را احاطه کرده است. رگه‌های گروه D، رگه‌های قبلی را قطع و جایجا کرده‌اند، که نشان‌دهنده آخرین مرحله ایجاد شکستگی در سامانه‌های



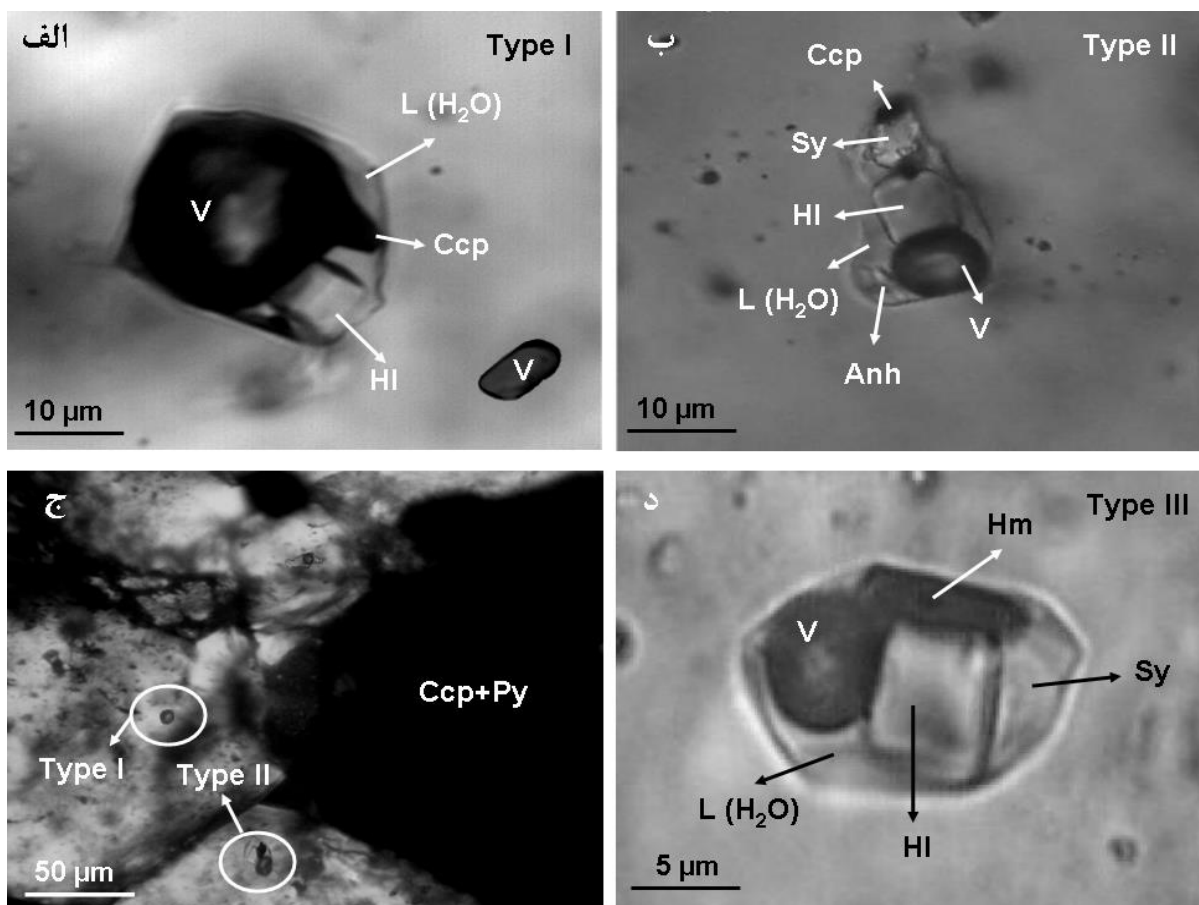
شکل ۳- ویژگی‌های کانی‌شناختی و ارتباط رگه‌های کوارتزی مختلف. الف، ب، ج و د) رگه‌های تیپ A, M و B (رگه‌های تیپ B، رگه‌های A و M را قطع کرده‌اند؛ ه و و) رگه‌های تاخیری تیپ D. اختصارات: Py: پیریت، Po: پیروتیت، Ccp: کلکوپیریت، Mt: مگنتیت، Anh: انیدریت، K-F: پتاسیم فلدسپار، Qtz: کوارتز و Ms: مسکوویت

تشخیص است. حجم حباب گاز در آنها بین ۴۰ تا ۶۵ درصد کل مجموعه است. گروه دوم (تیپ II) علاوه بر فازهای بالا دارای کانی‌های سیلیت و انیدریت هستند. حجم فازهای جامد بین ۲۰ تا ۴۰ درصد کل حجم این میانبارها است. هر دو گروه این میانبارها از نوع گاز-مایع-جامد (V+L+S) هستند. این دو تیپ بیشتر در نمونه کانی‌های مناطق عمیق (دگرسانی‌های پتاسیمی-سرسییتی) رگه‌های کوارتزی پورفیری‌های بارور (گروه ۱) دیده می‌شود. گروه سوم (تیپ III) شامل هماتیت + هالیت + سیلیت و فاقد کلکوپیریت است. حجم فازهای جامد در این گروه ۳۰ درصد کل میانبارها و نیز حجم حباب بین ۲۰ تا ۳۰ درصد کل سیال است. این تیپ در نمونه‌های کم‌عمق‌تر زون‌های دگرسانی‌های سریسیتی رگه‌های کوارتزی پورفیری‌های نابارور (گروه ۲) بیشتر دیده می‌شود. نسبت هالیت به سیلیت در میانبارهای سیال چند فاز (طبق مطالعات طیف‌نمایی رامان) نشان می‌دهد که مقدار NaCl بین ۳۰ تا ۴۵ درصد وزنی و مقدار KCl بین ۱۵ تا ۲۵ درصد وزنی است. ترکیب شیمیایی کلی میانبارها در سیالات بارور نشان می‌دهد که این سامانه‌ها دارای مقدار زیادی  $\text{NaCl-MgCl}_2$   $\text{CaCl}_2\text{-FeCl}_2$  همراه با کلریدهای فلزی پایه بوده‌اند. در چنین سامانه‌هایی و در دماهای بالا، سدیم در محلول به صورت جفت‌های یونی و

پتروگرافی میانبارهای سیال بر اساس تراکم فازهای موجود در دمای اتاق انجام شد. میانبارهای مایع + گاز (L+V) که در آنها آثاری از فاز جامد، دختر و فاز  $\text{CO}_2$  نیز دیده می‌شود بیشترین نوع سیالات را در ذخایر گروه ۱ تشکیل می‌دهند. حجم فاز گاز در آنها بسیار بیش از فاز مایع است. حجم فاز مایع در آنها به طور متوسط کمتر از ۴۰ درصد کل مجموعه است. رُخداد این میانبارها بیشتر در نمونه‌های دارای رگه‌های گروه A, M و B است. همگن‌شدگی این میانبارها با افزایش دما، غالباً به فاز گاز است. گاهی اوقات بلورهای ریزی از هماتیت نیز در آنها دیده می‌شود. برخی میانبارها همراه با شکل‌های منفی بلورین کوارتز در زون‌های رشد تشکیل شده‌اند. به علت نامتناسب بودن حجم مایع نسبت به گاز در برخی از میانبارها، پدیده بدام افتادگی ناهمگن (Heterogeneous Entrapment) نیز رُخ داده است. با توجه به اینکه حجم و نیز نحوه گسترش فاز جامد در این میانبارها کاملاً ناهمگن و نامنظم است، می‌توان گفت که این بلورها فازهای به دام افتاده در دگرسانی پتاسیمی-سرسییتی و سریسیتی هستند. میانبارهای مایع + گاز + هالیت  $\pm$  سیلیت + فاز جامد گروه دیگری از میانبارها هستند که بر اساس تنوع کانی‌شناختی به سه زیر تیپ تقسیم می‌شوند (شکل ۴- الف، ب، ج و د): گروه اول (تیپ I) دارای هالیت + کلکوپیریت  $\pm$  فازهای غیرقابل

مس، آهن و گوگرد بوده و در نهایت سرد شدن و خنثی شدن آنها به رسوب کلکوپیریت، بورنیت و پیریت منجر شده است (Rusk et al., 2008; Asadi et al., 2015). محلول‌های شور اشباع از این کانی‌ها، کم‌دما (کمتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) هستند.

به شکل هالیت، بوده و می‌توان فعالیت ترمودینامیکی این سامانه‌ها را برابر با نسبت تمرکز مولکولی آنها در حدود ۱/۵ درصد تخمین زد (Sillitoe, 2010). وجود کلکوپیریت به صورت کانی‌های دختر در سیالات شور سامانه‌های بارور، نشان می‌دهد که شوراب‌های اولیه ماگمایی مسئول حمل



شکل ۴- پتروگرافی میانبارهای سیال الف) تیپ I (بخار + مایع + کلکوپیریت + هالیت)؛ ب) تیپ II (بخار + مایع + کلکوپیریت + هالیت + سیلیت + انیدریت)؛ ج) همزاد بودن تیپ‌های I و II همراه با دگرسانی پتاسیمی - سریستی و هم‌رشدی با پیریت و کلکوپیریت؛ د) تیپ III (بخار + مایع + هماتیت + سیلیت + هالیت). اختصارات: L: مایع، V: بخار، HI: هالیت، Sy: سیلیت، Anh: انیدریت، Ccp: کلکوپیریت، Py: پیریت

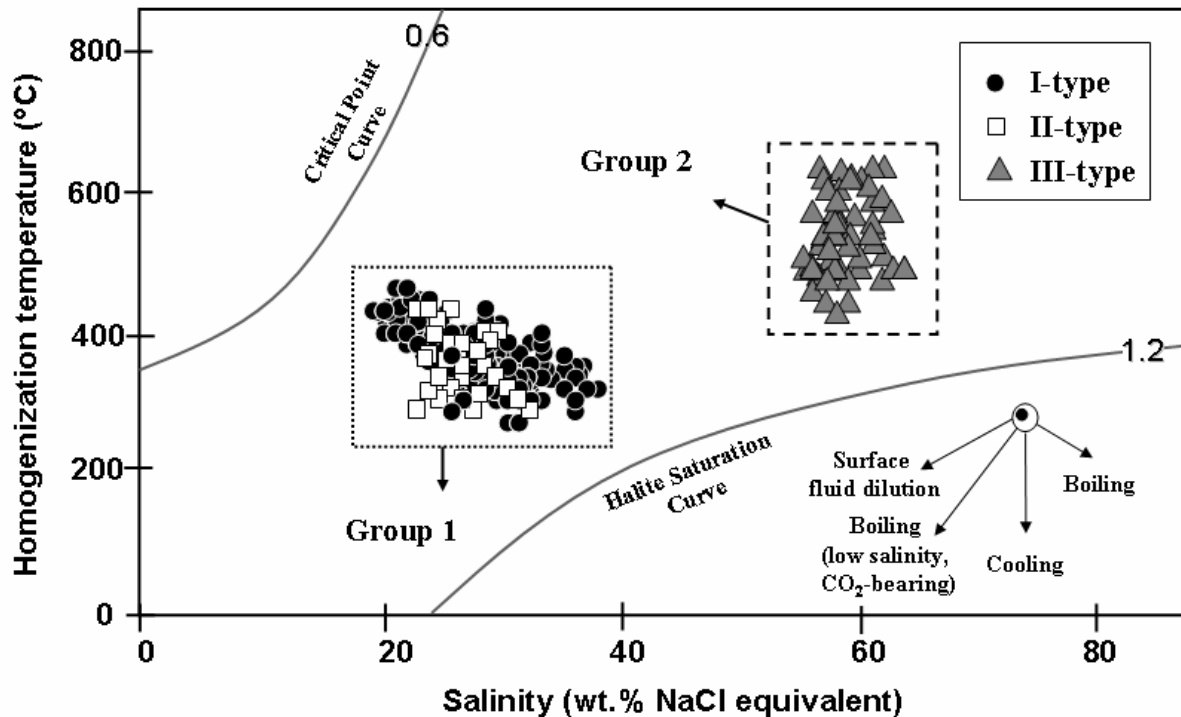
## ۵- بحث و بررسی

### ۵-۱- فرایند جوشش و ضریب توزیع عناصر در فازهای بخار/شوراب

مس پورفیری در آمریکای شمالی و جنوبی، نشان داد که پدیده جوشش در سیالات کانسنگ‌ساز ذخایر پورفیری، به طور کلی با دمای همگن‌شدگی حدود ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد و شوری حدود ۴۰ درصد وزنی معادل نمک طعام همراه است. مشاهده این پدیده در رگه‌های کوارتزار سامانه‌های پورفیری می‌تواند به عنوان یک ابزار اکتشافی برای ردیابی این ذخایر بسیار مهم و کاربردی باشد. این فرایند به خوبی در میانبارهای سیال تیپ I و II در رگه‌های کوارتزی گروه ۱ دیده می‌شود (شکل ۵)، درحالی‌که میانبارهای تیپ III بیشتر با جوشش ناقص و فرایند سرپایش همراه بوده‌اند (شکل ۵). به باور راسک و همکاران (Rusk et al., 2008) جوشش عامل اصلی تفکیک عناصر بین فازهای مختلف می‌باشد و عناصر با چگالی کمتر، میل به تمرکز در فاز بخار را نشان می‌دهند. از نظر این محققان این ویژگی در عناصر گوگرد دوست بیشتر دیده می‌شود. از نظر زاجاکس و همکاران

فرایند جوشش (boiling) در مراحل نهایی تفریق و تجمع سیالات در بالای محفظه ماگمایی و طی و افشارش رُخ داده و باعث برون‌رست مواد فرار می‌شود (Wilkinson, 2001). فرایند جوشش باعث ایجاد جدایش فازی (phase separation) و تشکیل فازهای شوراب و بخار در ذخایر مس پورفیری می‌گردد (Robb, 2005). جوشش یکی از عوامل مهم تفکیک عناصر بین فازهای بخار و شوراب است (Pirajno, 2009). مطالعات آدات و همکاران (Audetat et al., 2008) بر روی میانبارهای سیال ۱۷ کانسار

(Zajacz et al., 2008) پدیده جوشش با افزایش چگالی در فاز شوراب و کاهش چگالی در فاز بخار همراه است. این کاهش چگالی طی جوشش کم فشار (Low Pressure Boiling) می‌تواند با نهشت کانسنگ همراه باشد.



شکل ۵- روند تکامل سیالات ماگمایی- گرمایی در دو گروه از پورفیری‌های بارور (گروه ۱-۱ Group) و نابارور (گروه ۲-۲ Group) (نمودار اقتباس از ویلکینسون (Wilkinson, 2001)

کمپلکس‌های فلز- لیگاند و در نتیجه ته‌نشینی سولفیدهای فلزی مس‌دار شده است. در حالیکه سیال گرمایی پُردها (نسبت به گروه ۱) و اکسنده، در انحلال‌پذیری مس و عدم رسوب آن موثر بوده است. ضریب توزیع مس بین فاز بخار و شوراب در ذخایر مس پورفیری بارور معمولاً بین ۱ تا ۱۰ تغییر می‌کند (Zajacz et al., 2008). با این حال بیشترین گزارش این ضریب توزیع در کانسار بینگام یوتا ۳۰ گزارش شده است (Landtwing et al., 2010). در مطالعه حاضر این ضریب در ذخایر گروه ۱ قابل توجه و بین ۱/۸ تا ۶/۲ تغییر می‌کند (جدول ۳). به نظر می‌رسد که جدایش فاز گازی در اولین مرحله تکوین سامانه‌های بارور شهرباک صورت گرفته است و علت آن آزاد شدن سیال مولد کانه‌زایی، افزایش به موقع فشار هیدروستاتیکی و در نتیجه بروز سامانه شکستگی وسیع استوک‌ورک بوده است. در مقابل ضریب توزیع مس بین فاز بخار و شوراب در ذخایر گروه ۲ بین ۰/۱۲ تا ۰/۷۵ تغییر می‌کند. عدم جدایش مس بین فاز شوراب و بخار یکی از عوامل نابارور شدن این سامانه‌ها است. مطالعات عنصری اولیه بر روی میانبارهای سیال ذخایر مس پورفیری توسط لِرچباومر و آدتات (Lerchbaumer & Audetat, 2012) نشان داده است که عامل اصلی حمل‌کننده فلزات کانسنگ‌ساز در این سامانه‌ها، فاز شوراب است، چراکه انحلال‌پذیری فلزات پایه با افزایش شوری افزایش می‌یابد.

تجزیه میانبارهای سیال براساس نتایج LA-ICP-MS و طیف‌نمایی رامان (جدول ۱)، و محاسبه ضریب توزیع بخار/شوراب (عناصر) ( $D_E^{V/B}$ ) نشان می‌دهد که تمام عناصر تجزیه شده (به‌استثنای S و Cu)، ترجیحاً به جای فاز بخار در فاز شوراب باقی مانده‌اند. الگوی درجه تفکیک عناصر بین فاز بخار و شوراب با استفاده از معادله زیر تعریف می‌گردد (Ulrich & Heinrich, 2001):

$$D_E^{V/B} = C_{\text{vapour}}/C_{\text{brine}} \quad (\text{غلظت عناصر } C)$$

ضریب توزیع بیش از ۱ در سامانه‌های بارور گروه ۱ نشان می‌دهد که طی جوشش عنصر مس از فاز شوراب به فاز بخار منتقل شده و شرایط pH قلیایی سیال و حضور  $H_2S$  در محیط کانه‌زایی، عامل اصلی رسوبگذاری فلزات کانسنگ‌ساز شده است (جدول ۲). در تمام سامانه‌های بارور پورفیری در کمربند مس شیلی و آمریکای شمالی نیز ضریب توزیع بیش از ۱ گزارش شده است (Becker, 2002). گوگرد براساس مطالعات طیف‌نمایی رامان به دو صورت  $H_2S$  و  $HSO_4^-$  به ترتیب در شوراب‌های ذخایر گروه ۱ و ۲ تمرکز می‌یابد. این تفاوت ترکیب گوگرد شرایط کاهشی و اکسایشی این ذخایر را نشان می‌دهد. ارتباط کانه‌زایی مس در شرایط کاهشی در توده‌های گروه ۱ نشان می‌دهد که سیال گرمایی کم دما، باعث ناپایداری

جدول ۱- نتایج تجزیه فرساب لیزری- طیفسنجی جرمی پلاسمای جفتیده القایی (LA-ICP-MS) در مجموعه مس میدوک

PCDs	NaCl equiv (wt.%)	Phase	Ca	Fe	Na	K	Mg	Mn	Cl	F	Cs	Rb	Cu	Mo	Y	Zr	Pb
PAP	76	Brine	32192	38127	79000	21546	21000	15000	321	12	215	111	1432	72	30.4	1294	188
PAP	n.d	Vapour	521	57	72	453	43	67	112	143	15	2	170	23	n.d	14	96
PAP	62	Brine	42179	36173	83122	12765	18000	16788	126	3	541	95	1784	31	32.5	1264	432
PAP	n.d	Vapour	464	21	74	214	210	123	98	254	14	4	292	19	n.d	n.d	69
KDP	69	Brine	39876	42983	95616	14563	29000	23103	342	14	327	43	2234	70	28.8	983	578
KDP	n.d	Vapour	827	76	234	126	124	239	76	198	10	7	542	35	n.d	19	125
ABP	57	Brine	53219	62982	68325	25792	32000	25631	184	10	494	64	1214	10	35.1	829	827
ABP	n.d	Vapour	379	59	92	243	321	197	83	365	19	9	918	20	n.d	n.d	143
MD	37	Brine	42141	38002	63007	43219	15000	10234	56	23	983	213	523	9	5.7	107	33
MD	n.d	Vapour	983	126	187	1234	342	423	994	65	12	16	2245	6	n.d	11	15
MD	40	Brine	52828	39012	47890	34521	9000	9452	78	10	826	421	412	5	2.6	231	49
MD	n.d	Vapour	762	521	35	983	110	361	422	73	82	20	2563	n.d	n.d	9	12
IJP	44	Brine	38763	30000	74165	36727	16000	11784	115	16	742	536	653	7	7.4	427	88
IJP	n.d	Vapour	1129	314	27	1326	94	n.d	741	91	46	14	1784	3	n.d	n.d	26
CFP	31	Brine	65321	39005	53956	32705	14000	14327	110	10	920	371	651	8	3.5	373	111
CFP	n.d	Vapour	1024	210	38	1073	53	167	453	26	36	10	1206	2	n.d	n.d	76

غلظت عناصر برحسب گرم بر تن (ppm) است. اختصارات: MP: میدوک، IJP: ایجو، CFP: چاه فیروزه، PAP: پرکام، KDP: کدر، و ABP: آبدر. n.d.= تشخیص داده نشده، Brine= فاز شوراب، Vapour= فاز بخار، و NaCl equiv (wt.%)= درصد وزنی معادل نمک طعام

توده‌های پورفیری نابارور به شمار می‌رود، چراکه شرایط برای نهشت کلکوپیریت و دیگر کانی‌های مس‌دار در آنها از بین رفته است. جوشش ناقص این سیالات (شواهد میانبارهای سیال در رگه‌های نوع B) و فرایند سرمایش باعث کاهش تبادل فازهای گوگرددوست و به ویژه مس و ضریب توزیع بسیار پایین این عنصر بین فاز بخار و شوراب (کمتر از ۱) شده است. همچنین گرمای بالای مرکز استوک از نفوذ این سیالات به درون توده و آبشویی بیشتر کانی‌های متمرکز کننده مس (مانند بیوتیت و آمفیبول) جلوگیری کرده است. این سیالات فقط توان ایجاد دگرسانی پتاسیمی نازکی را در بالای توده‌های پورفیری نابارور داشته و با توجه به شرایط اسیدی آنها، سیلیسی شدن شدید و دگرسانی رسی گسترده‌ای را در اطراف ذخایر نابارور (به ویژه کدر) ایجاد کرده‌اند.

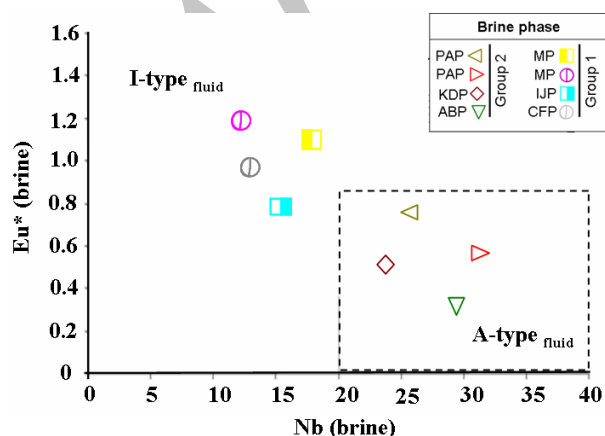
به نظر می‌رسد که دلیل اصلی بارور شدن پورفیری‌های میدوک، ایجو و چاه فیروزه عمق مناسب تزریق، بالا بودن آب در ماگمای مولد (چگالی بالای رگه‌های کوارتزی) و افزایش شرایط قلیایی سامانه (طبق مطالعات طیف‌نمایی رامان) در مراحل پایانی فعالیت ماگمایی است. این عوامل نشان می‌دهد که ماگما در مراحل نهائی انجماد، از آب اشباع شده و بیشترین غلظت مس را که توسط این سیالات به بالا انتقال یافته و بر اثر کاهش هر دو پارامتر فشار و دما با عبار اقتصادی رسوب داده است. همچنین پدیده جوشش، باعث افزایش سرعت جدایش مس، گوگرد، کلر و پتاسیم، از فاز شوراب به فاز بخار شده و طی این انتقال مس زیادی به صورت کلکوپیریت نهشته شده است. این پدیده در سیالات نابارور با عدم تغییر دما و یا کاهش ناچیز آن همراه است. این تغییرات جزئی دما، پاسخ معمای حل نشده



جدول ۱- (ادامه) نتایج تجزیه فرساب لیزری- طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفتیده القایی (LA-ICP-MS) در مجموعه مس میدوک

PCDs	NaCl equiv (wt.%)	Phase	Zn	Au	Sn	W	S	Nb	Sr	La	Ce	Sm	Eu	Gd	Dy	Yb	Lu
PAP	76	Brine	1247	0.001	34	58	1498	31	928	14.6	22.1	8.3	1.4	7.4	5.4	3.2	0.9
PAP	n.d	Vapour	85	0.1	17	19	943	9	19	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PAP	62	Brine	1450	0.001	29	66	1358	15	1231	12.1	24.4	5.8	1.1	5.5	4.9	2.7	0.7
PAP	n.d	Vapour	193	0.3	24	11	1495	2	83	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KDP	69	Brine	1986	0.001	12	34	1987	23	1476	18.1	19.7	6.6	1.2	8.1	3.7	3.4	0.5
KDP	n.d	Vapour	432	0.09	29	10	987	6	23	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
ABP	57	Brine	2169	0.001	52	17	1743	26	941	14.2	20.8	5.9	1.5	6.2	5.1	2.9	0.6
ABP	n.d	Vapour	327	0.2	13	19	838	5	14	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
MD	37	Brine	1987	0.001	59	21	145	18	1267	4.93	3.4	2.8	0.91	2.1	1.1	0.5	0.4
MD	n.d	Vapour	125	0.01	14	21	140	2	121	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
MD	40	Brine	2432	0.001	42	65	384	12	1498	5.77	2.9	3.2	1.00	2.10	1.00	0.3	0.6
MD	n.d	Vapour	337	0.08	15	32	151	4	76	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
IJP	44	Brine	1732	0.001	78	35	252	15	1521	6.1	3.6	3.3	0.74	2.5	0.6	0.2	0.5
IJP	n.d	Vapour	421	0.03	9	11	102	5	54	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
CFP	31	Brine	2432	0.001	92	82	269	13	987	7.84	4.2	3.1	0.88	2.2	0.8	0.6	0.7
CFP	n.d	Vapour	298	0.05	n.d	n.d	475	7	98	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

اختصارات در جدول شماره ۱ توضیح داده شده است.



شکل ۶- تفکیک تیپ‌های مختلف گرانیتوئیدها براساس تغییرات غلظت یوروپیم بهنجارشده ( $Eu^*$ ) به نیوبیم (Nb) (Gagnon, 2006). (نمونه‌ها براساس داده‌های NIST 610 glass های‌نریش و همکاران (Heinrich et al., 2008) بهنجار شده‌اند). اختصارات در جدول شماره ۱ توضیح داده شده است.

## ۵-۲- ماگماتیسیم آداکیتی، pH و زمین‌شیمی عناصر

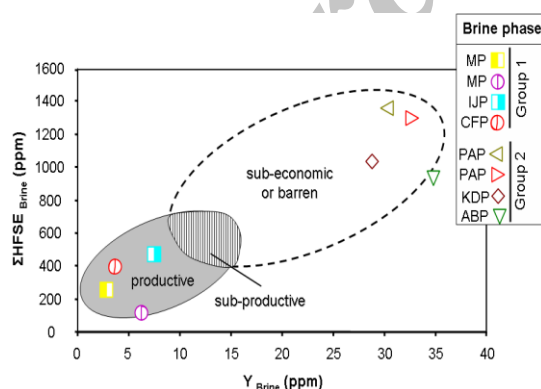
تفکیک نوع گرانیتوئیدها براساس غلظت یوروپیم بهنجارشده ( $Eu^*$ ) نسبت به نیوبیم (Nb) فاز شوراب آزاد شده از مذاب مادر نشان می‌دهد (شکل ۶) که شوراب‌های پورفیری‌های گروه ۱ تمایل به گرانیتوئیدهای تیپ I و در مقابل شوراب‌های آزاد شده از پورفیری‌های گروه ۲ تمایل به گرانیتوئیدهای تیپ A دارند (Gagnon, 2006). بنابراین شوراب‌های گروه ۱ از مذاب‌هایی آزاد شده‌اند که به احتمال زیاد در یک جایگاه پساکوهزایی تشکیل شده‌اند. چنین گرانیتوئیدهایی بیشتر از نوع I هستند. گرانیتوئیدهای تیپ A به طور معمول پس از تشکیل گرانیتوئیدهای تیپ I و در جایگاه‌های کافتی- کششی توسعه می‌یابند (Pirajno, 2009).

جدول ۲- نتایج طیف‌نمایی رامان فازهای بخار (بر حسب Mol% = درصد حجم مولی گونه‌های مولکولی)، pH و فوگاسیته اکسیژن ( $fO_2$ ) در سامانه‌های بارور و نابارور مجموعه مس شهربایک

PCDs	Phase	CO <sub>2</sub> (Mol%)	CH <sub>4</sub> (Mol%)	N <sub>2</sub> (Mol%)	H <sub>2</sub> O (Mol%)	H <sub>2</sub> S (Mol%)	HSO <sub>4</sub> (Mol%)	NaCl (Mol%)	pH	fO <sub>2</sub> (bar)
PAP	Vapour	6.3	3.5	1.1	72.9	0.001	0.2	22.1	4.2	-23.7
PAP	Vapour	4.4	2.7	1.6	70.3	0.004	0.1	25.7	3.9	-18.2
KDP	Vapour	3.2	4.6	1.2	71.2	0.002	0.5	26.8	4.1	-32.4
ABP	Vapour	7.1	2.9	1.8	70.1	0.004	0.3	23.9	2.2	-22.1
MD	Vapour	15.5	7.4	2.2	75.2	0.07	0.002	16.8	10	-37.2
MD	Vapour	12.4	9.5	1.7	77	0.05	0.003	13	8.4	-30.9
IJP	Vapour	11.7	10.3	2.9	75.5	0.09	0.001	11.5	9.1	-31.2
CHP	Vapour	9.6	8.1	2.4	80.1	0.04	0.004	7.9	11.2	-29.5

اختصارات در جدول شماره ۱ توضیح داده شده است.

نسبت به پورفیری‌های نابارور و غنی‌شدگی عناصر K, Rb و Sr در آنها است. طبق مطالعات کاستیلو (Castillo, 2012)، غلظت بالای استرانسیم ( $Avg. Mg\# = 43$ ) و غلظت پایین زیرکینیم و ایتریم ( $Avg. Sr = 702 ppm$ ) از ویژگی‌های مهم مذاب‌های بارور آداکیتی است که در سامانه‌های بارور گروه ۱ مجموعه مس شهربایک به خوبی مشاهده می‌شود (جدول ۱).



شکل ۷- نمودار مجموع عناصر با شدت میدان بالا (HFSEs) در برابر ایتریم (Y) در شوراب حاصل از میانبرهای سیال پورفیری‌های بارور گروه ۱ (Group 1) و نابارور گروه ۲ (Group 2) (Gagnon, 2006). محدوده خاکستری مربوط به شوراب‌های پورفیری‌های بارور و محدوده نقطه‌چین شوراب‌های ذخایر نیمه‌اقتصادی تا نابارور را نشان می‌دهد. اختصارات در جدول شماره ۱ توضیح داده شده است.

این تیپ از گرانیتوئیدها در مجموعه شهربایک به طور معمول جوان‌تر از گرانیتوئیدهای بارور تیپ I می‌باشند (Hassanzadeh, 1993; McInnes et al., 2005; Taghipour et al., 2008; Shafiei et al., 2009). این جایگاه‌ها نشانگر تغییرات مهمی در مراحل نهایی تکامل زمین‌ساختی کمرندهای کوهزایی برخوردی (مانند کمر بند مس کرمان) می‌باشند (Pirajno, 2009). گگنون (Gagnon, 2006) با استفاده از تغییرات عنصری مجموع عناصر با شدت میدان بالا (HFSEs) نسبت به غلظت ایتریم (Y) در فاز شوراب نشان دادند که سیالات ماگمایی- گرمایی بارور از هر دو این عناصر در ذخایر مس پورفیری تهی شده‌اند. این ویژگی به خوبی در مجموعه ذخایر مس شهربایک مشاهده می‌شود (شکل ۷) و به باور شفییعی و همکاران (Shafiei et al., 2009) و ریچاردز و همکاران (Richards et al., 2012) نشان‌دهنده تشکیل ذخایر بارور از یک مذاب آداکیتی و طی ضخیم‌شدگی پوسته قاره‌ای (تا حدود ۵۵ کیلومتر) می‌باشد. این مذاب آداکیتی از ذوب‌بخشی یک پوسته پایینی مافیک نواحی ضخیم‌شده (Thickened juvenile mafic lower-crust) منشأ گرفته است (Asadi et al., 2014). این ویژگی یا رخداد فشارهای بالاتر در سامانه‌های بارور گروه ۱ نسبت به سامانه‌های نابارور گروه ۲ ( $Avg. P = 467/8 bar$ ) نیز تایید می‌شود (جدول ۳). بر این اساس سامانه‌های بارور از مناطق ژرف‌تری منشأ گرفته‌اند. این ویژگی در عناصر سنگ‌دوست با شعاع یونی بزرگ (LILEs) نیز مشاهده می‌شود. براساس نمودارهای آدتات و همکاران (Audetat et al., 2008) غلظت عناصر LILEs در شوراب‌های آداکیتی گروه ۱ بیشتر از گروه ۲ است (شکل ۸). این ویژگی نشان‌دهنده تفریق زیاد پورفیری‌های بارور ژرف منشأ

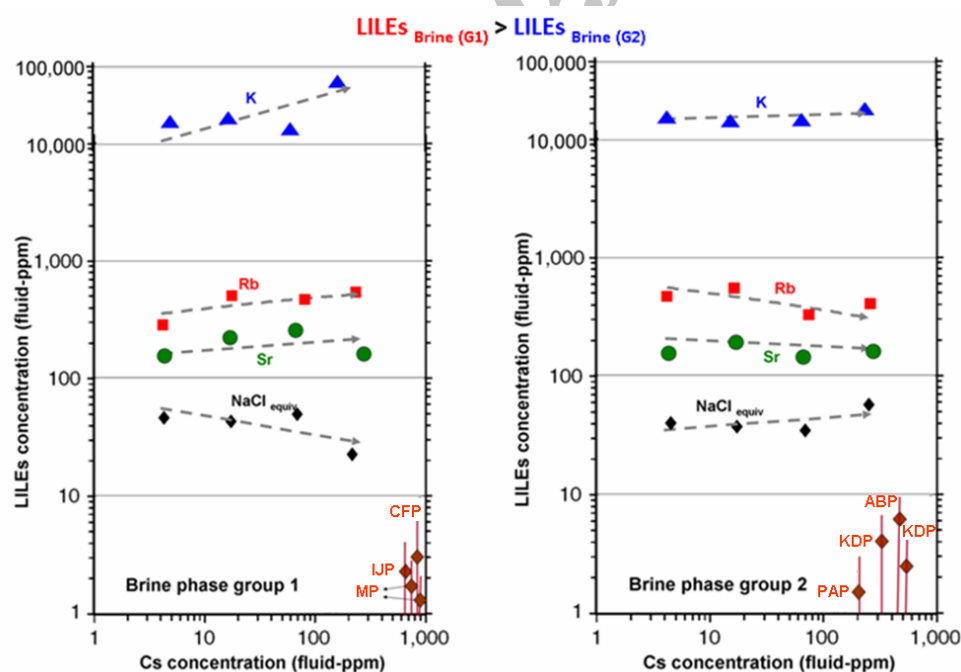
جدول ۳- معرفی گونه‌های مختلف گوگرد (S-Species)، ضریب توزیع مس ( $D_E^{V/B}$ )، ترکیب سیال، دما (T) و فشار (P) در ذخایر گروه ۱ و ۲

PCDs	S-Species	Fluid composition	$D_E^{V/B}$	T (°C)	P (bar)
PAP	$HSO_4^{2-}$	NaCl-KCl-FeCl <sub>2</sub>	0.12	660	543
PAP	$HSO_4^{2-}$	NaCl-HCl-FeCl <sub>2</sub>	0.16	651	427
KDP	$HSO_4^{2-}$	NaCl-Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -HCl	0.24	582	572
ABP	$HSO_4^{2-}$	NaCl-KCl-CuSO <sub>4</sub> -FeCl <sub>2</sub>	0.75	570	329
MP	H <sub>2</sub> S	NaCl-CuCl-KCl-CaCl <sub>2</sub>	4.29	390	751
MP	H <sub>2</sub> S	NaCl-Na <sub>2</sub> S-S-KCl	6.22	420	812
IJP	H <sub>2</sub> S	NaCl-CaCl <sub>2</sub> -FeCl <sub>2</sub> -MgCl <sub>2</sub>	2.7	374	994
CFP	H <sub>2</sub> S	NaCl-S-Na <sub>2</sub> S-MgCl <sub>2</sub>	1.85	435	865

اختصارات در جدول شماره ۱ توضیح داده شده است.

نابارور ۵۸۴ گرم بر تن است (جدول ۱). بنابراین شرایط اسیدی شوره‌های گروه ۲ باعث انحلال‌پذیری بیشتر مس (Avg. Cu=۱۶۶۶ppm) و عدم کانه‌زایی در این سامانه‌ها شده است. رفتار زمین‌شیمیایی گوگرد نیز طی فرایند جوشش مانند مس است.

میانگین pH در سامانه‌های گروه ۱ و ۲ به ترتیب ۹/۷ و ۳/۶ است (جدول ۲). این شرایط نشان می‌دهد که طی فرایند جوشش، مس در سامانه‌های گروه ۱ به دلیل شرایط قلیایی تمایل به خروج از فاز شوره و در نهایت کانه‌زایی کلکوپیریت داشته است. بر این اساس میانگین غلظت مس در فاز بخار سامانه‌های بارور ۱۹۴۹/۵ گرم بر تن (ppm) و سامانه‌های

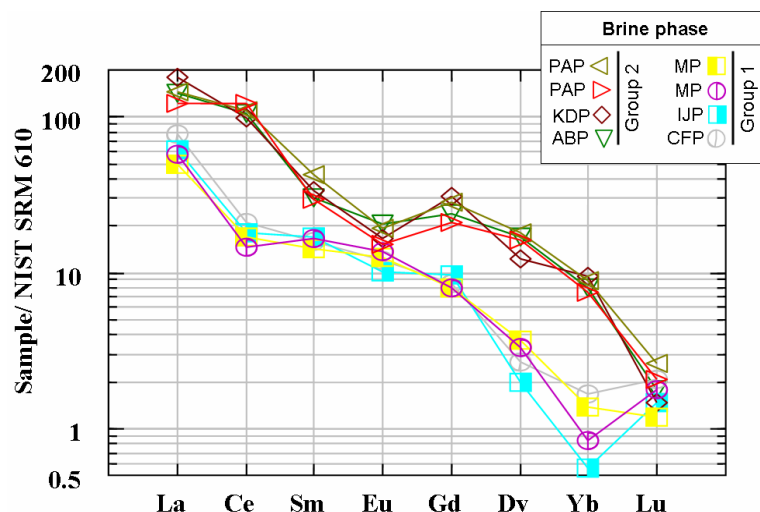


شکل ۸- نمودار عناصر سنگ‌دوست با شعاع یونی بزرگ (LILEs) در برابر سزیم (Cs) در شوره حاصل از میانبرهای سیال پورفیری‌های بارور گروه ۱ (G1) و نابارور گروه ۲ (G2). (Audetat et al., 2008). اختصارات در جدول شماره ۱ توضیح داده شده است

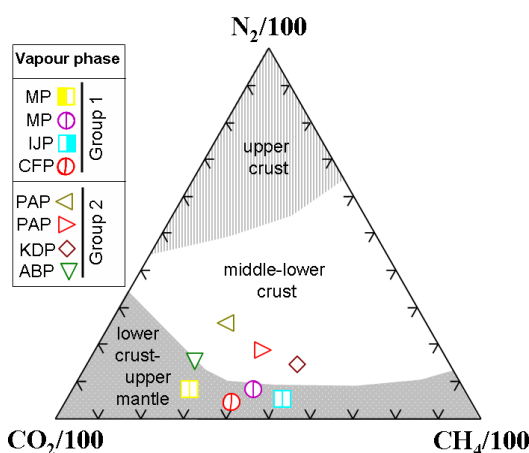
۲ به ترتیب دارای میانگین غلظت ۱۳۹۶/۵ و ۲۲۹/۲ گرم بر تن گوگرد در فازهای شوره و بخار می‌باشند. این شرایط کاملاً با عدم کانه‌زایی اقتصادی در سامانه‌های گروه ۲ همخوانی دارد. همچنین تغییرات pH نشان می‌دهد که سیالات اسیدی شوره‌های گروه ۲ دارای غلظت بیشتری از عناصر

تغییرات غلظت این عنصر نشان می‌دهد که طی جوشش مقادیر بیشتری از این عنصر در سامانه‌های بارور وارد فاز بخار شده است (Avg. S=۲۱۷۴/۲ppm) و بنابراین شوره بازماندگی دارای میانگین ۴۳۷/۷ گرم بر تن از این عنصر است. برخلاف سامانه‌های بارور، ذخایر گروه

کمیاب خاکی (REEs) هستند ( $Avg. \Sigma REE = 59/V$ ). در مقابل می‌باشند ( $Avg. \Sigma REE = 17/V$ ) (شکل ۹). سیالات قلیایی شورابه‌های گروه ۱ دارای غلظت کمتری از عناصر REE



شکل ۹- الگوی تفکیک عناصر کمیاب خاکی (REEs) شورابه‌های گروه ۱ و ۲ تیپ‌های گرانیتوئیدی مجموعه مس شهربایک، بهنجار شده براساس داده‌های NIST 610 glass هایرنیش و همکاران (Heinrich et al., 2008).

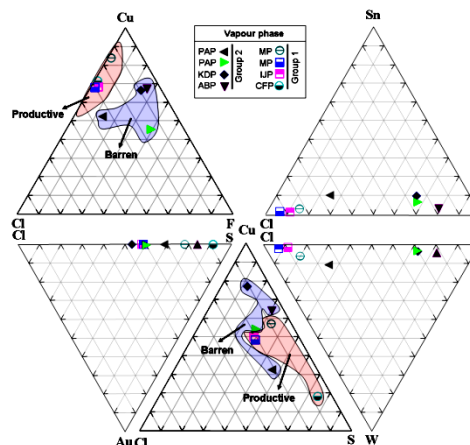


شکل ۱۱- نمودار سه‌تایی  $CO_2-CH_4-N_2$  و مقایسه منشأ سامانه‌های بارور (Group 1) و نابارور (Group 2) مجموعه مس شهربایک (Archibald, 2002). داده‌ها براساس نتایج طیف‌نمایی رامان فاز بخار است. اختصارات در جدول شماره ۱ توضیح داده شده است.

### ۵-۳- شرایط اکسایش- کاهش سیالات ماگمایی- گرمایی

مطالعات طیف‌نمایی رامان برای تشخیص شرایط اکسایش- کاهش سیالات کانسنگ‌ساز نشان می‌دهد که  $H_2S$  ( $Avg = 0.06 Mol\%$ ) گونه فراوان گوگرد در فاز بخار ذخایر بارور شهربایک است، و انتظار می‌رود که مس توسط این گونه گوگرددار کاهیده و نهشته شده باشد. نمودار سه‌تایی آرچی‌بالد (Archibald, 2002) نیز نشان می‌دهد که دیگر گونه‌های مولکولی موجود در فاز بخار ( $N_2$ ،  $CH_4$  و  $CO_2$ ) علاوه بر شرایط کاهشی محیط سامانه‌های بارور گروه ۱، منشأ این مذاب‌ها را پوسته پایینی- گوشته بالایی معرفی می‌کند (شکل ۱۱). این

مطالعات لوترموزر (Lottermoser, 1992) نیز نشان می‌دهد که در سیالات گرمایی غلظت REEها به طور کلی با کاهش pH، افزایش می‌یابد. در روابط لیگاندها و فرایند کمپلکس‌سازی، مس یک اسید نسبتاً نرم لوئیس است و کمپلکس‌های پایدار  $Cu^+$ -کلرید و  $Cu^+$ -بی‌سولفید را تشکیل می‌دهد (Robb, 2005). با توجه به شکل ۱۰ مس طی جدایش بین فاز بخار/شوراب تمایل بیشتری برای تشکیل کمپلکس با Cl نشان می‌دهد. تحرک Cu در سیالات گرمایی به احتمال زیاد از راه کمپلکس‌سازی  $Cu^+$ -کلرید به شکل  $CuCl_2^{2-}$  رخ می‌دهد. با توجه به دمای نسبتاً بالا در سامانه‌های پورفیری گروه ۲ شهربایک، کمپلکس‌های سولفیدی نقش کمتری در جابجایی این فلز ایفا کرده‌اند (شکل ۱۰).

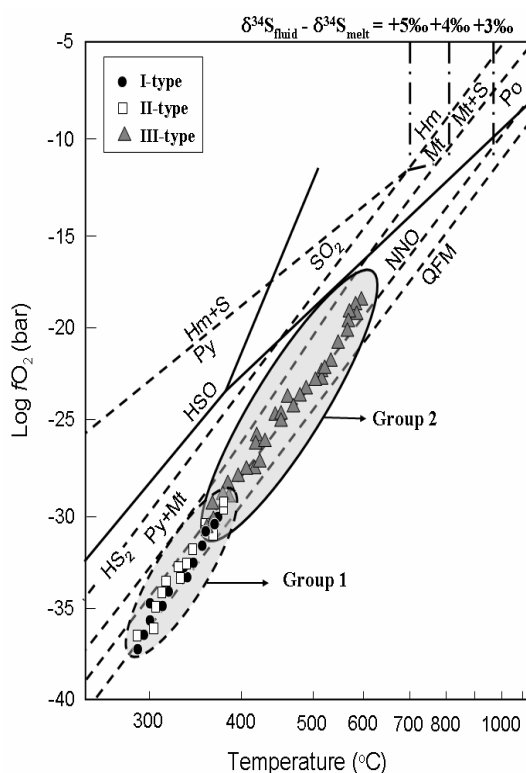


شکل ۱۰- نمودارهای سه‌تایی انواع فلزات جزئی در فاز بخار میانبارهای گروه ۱ و ۲ شهربایک و لیگاندهای مهم حمل‌کننده آنها. اختصارات در جدول شماره ۱ توضیح داده شده است.

کم عمق بوده و دارای غلظت پایینی از فلزات کانسنگ‌ساز (به استثنای Cu) هستند. افزایش غلظت مس در این سامانه‌ها نشان‌دهنده جوشش ناقص و عدم جدایش مس از فاز شورا به بخار و کانه‌زایی غیراقتصادی این ذخایر شده است. شرایط اکسایش - کاهش ( $\log fO_2$ ) متفاوت و ضریب تفکیک ( $D_E^{V/B}$ ) بارز فلزات کانسنگ‌ساز بین فاز بخار/شوراب در سامانه‌های بارور ( $D_E^{V/B} = 3/8$ ;  $\log fO_2 < -29/5$ ) و نابارور ( $D_E^{V/B} = 0/32$ ;  $\log fO_2 > -32/4$ ) نشان داد که تمایل بیشتر فلزات، به تمرکز در فاز شوراب نسبت به فاز بخار بوده است. این پژوهش نشان می‌دهد که سیالات اسیدی - کاهشی پورفیری‌های بارور شهرابک سیمایی مشخص و جالب از تایید یک جایگاه زمین‌ساختی برخوردی قاره‌ای با ماهیت آداکیتی است.

### تقدیر و تشکر

این مقاله بخشی از طرح پژوهشی شماره D/۹۰/M/۲۵۸ (نویسنده اول: مجری طرح) در شرکت ملی صنایع مس ایران است. نگارندگان بر خود لازم می‌دانند که از همکاری‌های بی‌دریغ آقایان مهندس قاسمی (مدیر محترم امور تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه)، مهندس نظری (رئیس محترم مجتمع مس میدوک)، مهندس سبزیان (مدیر محترم بخش تحقیقات معدنی)، مهندس رضائی میمند (رئیس زمین‌شناسی معدن مس چاه‌فیروزه)، مهندس خسروچردی (مدیر دفتر تحقیق و توسعه سرچشمه) و سرکار خانم مهندس عباسلو (رئیس زمین‌شناسی معدن مس میدوک) سپاسگزاری کنند.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات دما به فوگاسیته اکسیژن در سامانه‌های بارور (Group 1) و نابارور (Group 2) شهرابک. نمودار اقتباس از بارنز (Barnes, 1997) (خطوط بافر از معادلات اوموتو و کریک (Ohmoto & Kerrick, 1977) و ثابت فوگاسیته از هویزنگا (Huizenga, 1995). اختصارات: Py: پیریت، Mt: مگنتیت، Po: پیروتیت، Hm: هماتیت، S: گوگرد، NNO: نیکل - نیکل - اکسید، QFM: کوارتز - فایالیت - مگنتیت

شرایط مطابق با ضخیم‌شدگی پوسته و منشأ ژرف‌تر مذاب‌های آداکیتی گروه ۱ نسبت به گروه ۲ است. فاز بخاری که از ماگمای مادر حاصل از ذوب‌بخشی پوسته پایینی - گوشته بالایی نشأت گرفته باشد به طور معمول از گونه‌های  $CO_2$ ،  $CH_4$  و  $N_2$  غنی‌تر است (Shen et al., 2010). این پژوهش نشان می‌دهد که مقادیر گازها (به ویژه  $CO_2$ ،  $N_2$  و  $CH_4$ ) با کاهش ژرفا در سیالات گرمایی نابارور شهرابک کاهش می‌یابد. براساس مطالعات اسدی، (۱۳۹۲) و افت محسوس غلظت فازهای گازی در سیالات گرمایی نابارور، پورفیری‌های گروه ۲ حاصل ذوب‌بخشی پوسته میانی - پایینی می‌باشند (شکل ۱۱). همچنین شرایط اکسایشی (Avg. mol%  $HSO_4^{2-} = 0/27$ ) سیالات گرمایی نفوذی‌های نابارور همراه با دمای بالا، شوری بیشتر (میانگین  $\sim 66\%$  درصد وزنی معادل نمک طعام) و آب کمتر (۷۱ درصد مولی)، شرایط باقی ماندن فلزات کانسنگ‌ساز در فاز شوراب را فراهم آورده است. در این شرایط pH اسیدی (۳/۶) نیز به انحلال‌پذیری کمک کرده است. در نفوذی‌های گروه ۱، این شرایط بالعکس بوده و شرایط قلیایی (۹/۷)، شوری کمتر (میانگین  $\sim 38\%$  درصد وزنی معادل نمک طعام)، حجم بیشتر آب (۷۶ درصد مولی) و کاهیده بودن سیال شرایط را برای نهشت سیالات کانسنگ‌ساز فراهم می‌آورد. فوگاسیته اکسیژن ( $fO_2$ ) و شرایط به دام‌افتادگی در سامانه‌های پورفیری بارور میدوک، ایجو و چاه فیروزه با محاسبه مقادیر  $XCO_2$  (درصد حجم مولی  $CO_2$ ) در گستره متفاوت T-P با استفاده از معادلات اوموتو و کریک (Ohmoto & Kerrick, 1977) و ثابت فوگاسیته هویزنگا (Huizenga, 1995) در میان‌بهارهای سیال نشان داد که مقادیر به دست آمده برای سامانه‌ها بارور گروه ۱ بین  $-29/5$  تا  $-37/2$  بار و سامانه‌های نابارور گروه ۲ بین  $-18/2$  تا  $-32/4$  بار تغییر می‌کند (شکل ۱۲). این مقادیر برای سامانه‌های بارور در راستای محدوده پایداری کوارتز - فایالیت - مگنتیت (در طول خط بافر QFM) قرار می‌گیرد در حالی که سامانه‌های نابارور گروه ۲ بیشتر با خط پایدار بافر نیکل - نیکل - اکسید (NNO) مطابقت دارد. بنابراین سیال کانسنگ‌ساز پورفیری‌های بارور شهرابک در شرایط کاهشی به نهشت کانسنگ مس منجر شده است. محدوده پایداری NNO در سامانه‌های نابارور با شرایط اکسایشی باعث انحلال‌پذیری بیشتر مس در سیال گرمایی و عدم نهشت کانسنگ‌های مس‌دار شده است. بنابراین، جدایش فازی سیالات ماگمایی - گرمایی تحت شرایط کاهشی و طی فرایند جوشش منجر به کانه‌زایی گسترده مس در پورفیری‌های بارور شهرابک شده است. با این حال، این گونه سیالات در تمام سامانه‌های پورفیری هنوز ناشناخته‌اند، و پژوهش زیادی بر روی آنها انجام نشده است.

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش بر پایه محاسبات درصد تفکیک مولی برای فاز بخار میان‌بهارهای سیال گروه ۱ و ۲ شهرابک نشان می‌دهد که درصد حجم مولی  $CO_2$ ،  $CH_4$  و  $N_2$  در گروه ۱ (ذخایر بارور) بیش از گروه ۲ (ذخایر نابارور) است. این مقادیر بالا در فاز بخار سیالات کانسنگ‌ساز گروه ۱ نشان‌دهنده منشأ ژرف‌تر ماگمای والد این فاز ماگمایی - گرمایی است. براساس زمین‌شیمی سیالات گرمایی و پایداری گونه‌های فلزی در فاز بخار، نقش بخارهای ماگمایی پوسته پایینی - گوشته بالایی در تشکیل ذخایر مس پورفیری بارور شهرابک بارزتر است. بنابراین فازهای بخار در انتقال عناصر فلزی در سامانه‌های پورفیری نقش بالقوه‌ای ایفا می‌کنند. غلظت پایین عناصر Cu و S در فاز شوراب ذخایر گروه ۱ نشان‌دهنده ورود این عناصر طی فرایند جوشش به فاز بخار و تشکیل کانسنگ‌های افشان مس در این سامانه‌ها بوده است. در حالیکه ماگما‌های نابارور شهرابک از نوع پوسته‌ای و

## مراجع

- Hassanzadeh, J., 1993, "Metallogenic and tectono-magmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of Iran (Shahr-e-Babak area, Kerman province)", *Ph.D. Thesis, University of California, USA, P. 204.*
- Heinrich, C.A., 2005, "The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: A thermodynamic study", *Mineralium Deposita, Vol. 39, P. 864–889.*
- Heinrich, C.A., Jaques, A.L., Walkers, W., Soe, E.R., 2008, "Hydrothermal brine systems", *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, Vol. 6, P. 11–35.*
- Hou, Z.Q., Cook, N.J., 2009, "Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: a review and introduction to the special issue", *Ore Geology Reviews, Vol. 36, P. 2-24.*
- Hou, Z.Q., Zhang, H., Pan, X., Yang, Z., 2011, "Porphyry Cu (-Mo-Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: Examples from the eastern Tethyan metallogenic domain", *Ore Geology Reviews, Vol. 39, P. 21–45.*
- Huizenga, J.M., 1995, "Fluid evolution in shear zones from the Late Archean Harare-Shamva-Bindura greenstone belt (NE Zimbabwe): Thermodynamic calculations of the C-O-H system applied to fluid inclusions", *Netherlands Research School of Sedimentary Geology, Amsterdam, P. 146.*
- Landtwing, M.R., Furrer, C., Redmond, P.B., 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, Vol. 105, P. 91–118.*
- Lerchbaumer, L., Audetat, A., 2012, "High Cu concentrations in vapor-type fluid inclusions: An artifact?" *Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 88, P. 255–274.*
- Lottermoser, B.G., 1992, "Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes", *Ore Geology Reviews, Vol. 7, P. 25–41.*
- McInnes, B.I.A., Evans, N.J., Fu, F.Q., Garwin, S., Belousova, E., Griffin, W.L., 2005, "Thermal history analysis of selected Chilean, Indonesian, and Iranian porphyry Cu-Mo-Au deposits", *In: Porter TM editor. Super Porphyry Copper and Gold Deposits: a Global Perspective, Adelaide, PGC publishing, P. 16.*
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., Sahandi, M.R., 2003, "Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran", *Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 21, P. 397-412.*
- Ohmoto, H., Kerrick, D., 1977, "Devolatilization equilibria in graphitic systems", *American Journal of Science, Vol. 277, P. 1013-1044.*
- Pasteris, J.D., 1996, "Mount Pinatubo volcano and "negative" porphyry copper deposits", *Geology, Vol. 24, P. 1075-1078.*
- Pirajno, F., 2009, "Hydrothermal processes and mineral systems", *Springer, Australia, P. 1273.*
- Qu, X.M., Hou, Z.Q., Huang, W., 2001, "Gangdese porphyry copper belt: the second "Yulong" porphyry Cu belt in Tibet?", *Mineral Deposits, Vol. 20, P. 355-366.*
- اسدی، س.، ۱۳۹۲، "زمین‌شیمی برخی از توده‌های نفوذی بارور و نابارور در مجموعه معادن مس شهرباک، کمرند ماگمایی-آتشفشانی ارومیه-دختر" طرح تحقیقاتی امور تحقیق و توسعه، مجتمع مس شهرباک، ۲۲۲ صفحه.
- تقی‌پور، ن.، ۱۳۸۶، "کاربرد ژئوشیمی سیالات درگیر و ایزوتوپی به عنوان راهبردهای اکتشافی، دگرسانی و کانه‌زایی در کانسار مس میدوک، شهرباک، کرمان" پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۳۰۴ صفحه.
- شفیعی‌بافتی، ب.، ۱۳۸۶، "الگوی فلززایی کمرند مس پورفیری کرمان و رهیافت‌های اکتشافی آن" طرح تحقیقاتی امور تحقیق و توسعه، مجتمع مس سرچشمه، ۲۷۲ صفحه.
- Archibald, S.M., 2002, "The role of vapour in the transport and deposition of metals in ore-forming systems", *Ph.D Thesis, McGill University, Canada, P. 211.*
- Asadi, S., Mathur, R., Moore, F., Zarsavandi, A., 2015, "Cu isotope fractionation in Meiduk porphyry copper deposit, Northwest of Kerman Cenozoic magmatic arc, Iran", *Terra Nova, Vol. 27, P. 36-41.*
- Asadi, S., Moore, F., Zarsavandi, A., 2014, "Discriminating productive and barren porphyry copper deposits in the southeastern part of the central Iranian volcano-plutonic belt, Kerman region, Iran: A review", *Earth-Science Reviews, Vol. 138, P. 25-46.*
- Asadi, S., Moore, F., Zarsavandi, A., Khosrojerdi, M., 2013, "First report on the occurrence of CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions in the Meiduk porphyry copper deposit, Iran: implications for mineralisation processes in a continental collision setting", *Geologos, Vol. 19, P. 301–320.*
- Audetat, A., Pettke, T., Heinrich, C., Bodnar, R., 2008, "The Composition of Magmatic-Hydrothermal Fluids in Barren and Mineralized Intrusions", *Economic Geology, Vol. 103, P. 877–908.*
- Barnes, H. L., 1997, "Geochemistry of hydrothermal ore deposits", *John Wiley and Sons, P. 972.*
- Becker, J.S., 2002, "State-of-the-art and progress in precise and accurate isotope ratio measurements by ICP-MS and LA-ICP-MS", *Journal of Analytical Atomic Spectroscopy, Vol. 17, P. 1172–1185.*
- Castillo, P.R., 2012, "Adakite petrogenesis", *Lithos, Vol. 135, P. 304-316.*
- Dargahi, S., Arvin, M., Pan, Y., Babaei, A., 2010, "Petrogenesis of post-collisional A-type granitoids from the Urumieh-Dokhtar magmatic assemblage, Southwestern Kerman, Iran: Constraints on the Arabian-Eurasian continental collision" *Lithos, Vol. 115, P. 190-204.*
- Gagnon, J.V., 2006, "Genesis of hydrothermal HFSE mineral deposits: Evidence from laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS)", *Ph.D Thesis, McGill University, Canada, P. 578.*

- 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*, Vol. 107, P. 295-332.
- Richards, J.P., 2009**, "Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere", *Geology*, Vol. 37, P. 247-250.
- Robb, L., 2005**, "Introduction to ore-forming processes", *Blackwell publishing, South Africa*, P. 386.
- 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*, Vol. 103, P. 307-334.
- Shafiei, B., Haschke, M., Shahabpour, J., 2009**, "Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran", *Mineralium Deposita*, Vol. 44, P. 265-283.
- Shahabpour, J., 2005**, "Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz", *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 24, P. 405-417.
- Shen, P., Shen, Y., Wang, J., Zhu, H., Wang, L., Meng, L., 2010**, "Methane-rich fluid evolution of the Baogutu porphyry Cu-Mo-Au deposit, Xinjiang, NW China", *Chemical Geology*, Vol. 275, P. 78-98.
- Sillitoe, R.H., 2010**, "Porphyry copper systems", *Economic Geology*, Vol. 105, P. 3-41.
- Taghipour, N., Aftabi, A., Mathur, R., 2008**, "Geology and Re-Os Geochronology of Mineralization of the Miduk Porphyry Copper Deposit, Iran", *Resource Geology*, Vol. 2, P. 143-160.
- Ulrich, T., Heinrich, C.A., 2001**, "Geology and alteration geochemistry of the porphyry Cu-Au deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina", *Economic Geology*, Vol. 96, P. 1719-1742.
- Wilkinson, J.J., 2001**, "Fluid inclusions in hydrothermal ore deposit", *Lithos*, Vol. 55, P. 229-272.
- Zajacz, Z., Halter, W.E., Pettke, T., Guillong, M., 2008**, "Determination of fluid/melt partition coefficients by LA-ICPMS analysis of co-existing fluid and silicate melt inclusions: controls on element partitioning", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 72, P. 2169-2197.
- Zarasvandi, A., Liaghat, S., Zentilli, M., 2005**, "Geology of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad porphyry copper deposit, central Iran", *International Geology Review*, Vol. 47, P. 620-646.

