

# بررسی ویژگی سیال‌های کانه‌زا با استفاده از میانبرهای سیال و ایزوتوپ‌های اکسیژن - هیدروژن در کانسار مس پورفیری بندر هنزا

آیدا محبی<sup>۱</sup>، اردشیر هزارخانی<sup>۲</sup>، مهرداد بهزادی<sup>۳</sup>، حسن میرزاد<sup>۴</sup> و حسین تقی‌زاده<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>دکتر، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

<sup>۲</sup>استاد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۳</sup>استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

<sup>۴</sup>دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۵</sup>کارشناسی ارشد، مدیریت اکتشاف، شرکت ملی صنایع مس ایران، سرچشمه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۸/۲۶

## چکیده

کانسار مس پورفیری بندر هنزا در ۱۵۰ کیلومتری جنوب خاور کرمان، در بخش جنوبی پهنه ماگمایی ارومیه-دختر و در پهنه ماگمایی دهج-ساردوییه قرار گرفته است. این کانسار در سنگ‌هایی با ترکیب دیوریت تا گرانودیوریت با سن الیگوسن تشکیل شده است. در پژوهش حاضر مطالعات میانبرهای سیال روی نمونه‌های کوارتز و هورنبلند و همچنین اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن با هدف شناسایی ویژگی سیال‌های گرمایی مؤثر در کانه‌زایی به انجام رسیده است. رگچه‌های مورد مطالعه به پنج گروه (I, II, III, IV, V) تقسیم شده‌اند؛ رگچه I: سیال با فشار بالا (<math>300</math> مگاپاسکال)، ژرفای بیشتر از ۸/۵ کیلومتر، دمای متوسط تا بالا (۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) و شوری ۳۸ تا ۴۵ درصدوزنی NaCl که دارای کانه‌زایی مولیدن است. این رگچه دارای هالیت و انیدریت بوده و سبب دگرسانی پتاسیک و سدیک-کلسیک در ژرفای بیشتر شده است. رگچه II: سیال دارای فشار بالا (<math>300</math> مگاپاسکال)، ژرفای بیشتر از ۸/۵ کیلومتر، دمای بالا (۲۵۰ تا ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد)، شوری بالا (۳۳ تا ۴۷ درصدوزنی NaCl)، کانه‌زایی مس و مولیدن و دگرسانی پتاسیک است. رگچه III: سیال با شوری بالا (۴۰ تا ۵۶ درصدوزنی NaCl) در فشار بالا (<math>300</math> مگاپاسکال)، ژرفای بیشتر از ۸/۵ کیلومتر و دمای بالا (۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) که دارای کانه‌زایی مس است. رگچه IV: سیال با دمای بالا (۲۷۷ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد)، فشار بالا (با میانگین ۲/۸ کیلوبار)، ژرفای بیشتر از ۸/۵ کیلومتر و شوری بالا (۲۵ تا ۵۳ درصدوزنی NaCl) که عامل کانه‌زایی مس همراه با کانی مگنتیت است. سیال V: سیال با شوری متوسط تا پایین (۶ تا ۷ درصدوزنی NaCl) و فشار کم (۰/۷ تا ۰/۸ مگاپاسکال)، ژرفای ۱۷۷ متر و دمای متوسط (حدود ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد) که بدون کانه‌زایی است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که جوش صورت گرفته در سیال ماگمایی اولیه، در نتیجه تغییرات دما و فشار و در اثر اختلاط با آب‌های جوی سبب کانه‌زایی مس و مولیدن شده است. نتایج تجزیه ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن در کانی کوارتز مقادیر  $\delta^{18}O$  از ۳/۹ تا ۶/۳ پرمیل را نشان می‌دهد و با توجه به دمای تشکیل آن بر پایه مطالعات دماسنجی (۱۳۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) مقادیر  $\delta^{18}O$  در سیال کانه‌ساز برابر ۵/۲۶ تا ۶/۱۹ پرمیل است که نشان‌دهنده منشأ ماگمایی سیال‌های کانه‌ساز است. مقادیر  $\delta D$  در میانبرهای سیال موجود در کانی کوارتز محدوده‌ای میان ۸۸- تا ۹۰- پرمیل را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده کاهش در میزان دوتریم سیال کانه‌ساز است. این مقادیر با توجه به دگرسانی پروپلیتیک و سدیک همراه با دگرسانی پتاسیک در رگچه یادشده، می‌تواند ناشی از تأثیر آب‌های جوی باشد.

**کلیدواژه‌ها:** پهنه ارومیه-دختر، بندر هنزا، کانسار مس پورفیری، میانبر سیال، ایزوتوپ اکسیژن و هیدروژن.

**نویسنده مسئول:** آیدا محبی

E-mail: aidamohebbi@yahoo.com

## ۱- پیش‌نوشتار

هستند و می‌توانند نشان‌دهنده مجراهایی باشند که سیال‌ها در آنها جریان داشته‌اند. ویژگی کانی‌های مختلف به‌ویژه کوارتز که درون این رگه‌ها وجود دارد، اطلاعات بارزشی از ماهیت سامانه گرمایی در اختیار قرار می‌دهند (Pirajno, 2009). مطالعات فراوانی در زمینه دماسنجی میانبر سیال در کانسارهای مس پورفیری ایران صورت پذیرفته است (Hezarkhani & Williams-Jones, 1998; Calagari, 2003 & 2004; Williams-Jones & Heinrich, 2005; Hezarkhani, 2006 & 2008). ولی تاکنون میانبرهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن در کانسار مس پورفیری بندر هنزا مطالعه نشده‌اند. هدف از این پژوهش بررسی منشأ و ویژگی‌های سیال کانه‌زا در کانسار بندر هنزا و شناسایی عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی مس  $\pm$  مولیدن است. به این منظور دگرسانی‌ها و پارائز رگچه‌های کانه‌زا در بازدید از کانسار و در مغزه‌های حفاری شناسایی، ویژگی میکروسکوپی آنها مطالعه، میانبرهای سیال بررسی و نسبت‌های ایزوتوپی آنها اندازه‌گیری شد. با استفاده از مطالعات میانبر سیال اولیه می‌توان به دما، شوری، فشار و ژرفای تشکیل کانسار پی‌برد و با اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن در رگچه‌های کوارتز کانه‌دار می‌توان به منشأ سیال دست یافت.

پهنه ارومیه-دختر که در اثر فرورانش پوسته اقیانوسی نوتیس به زیر صفحه ایران مرکزی در هنگام کوهزایی آلپی تشکیل شده (Bazin & Hubner, 1969; Berberian et al., 1982) دارای کانسارهای مهم و بزرگ مس پورفیری فراوانی است. پهنه ماگمایی دهج-ساردوییه در بخش جنوبی آن قرار گرفته است (Dimitrijevic, 1973; Meshkani et al., 2013) و تجمعی از کانسارهای مس پورفیری از جمله بندر هنزا، درآلو و سرمشک را در خود جای داده است. کانسار بندر هنزا در موقعیت جغرافیایی  $29^{\circ}$  تا  $29^{\circ} 30'$  شمالی دارای میزبانی از سنگ‌های گرانودیوریتی با سن الیگوسن است که توسط سنگ‌های آتشفشانی بیشتر آندزیتی با سن اتوسن دربرگرفته شده است. این کانسار برای نخستین بار توسط زمین‌شناسان کشور یوگوسلاوی شناسایی شد (Dimitrijevic, 1973) و در حال حاضر شرکت ملی مس ایران روی آن عملیات حفاری و اکتشاف انجام می‌دهد؛ تعداد حفاری‌های صورت گرفته ۳۷ گمانه با ژرفای میان ۲۰۰ تا ۵۵۰ متر است. تاکنون عیار متوسط کانسار مس پورفیری بندر هنزا ۰/۴۴ درصد و تناژ آن ۷۵ میلیون تن برآورد شده است. در کانسارهای مس پورفیری، رگه‌ها بهترین مشخص‌کننده ویژگی سیال گرمایی

## ۲- موقعیت زمین‌شناسی کانسار بندر هنزا

کانسار بندر هنزا در پهنه دهج- ساردوییه در بخش جنوبی پهنه ارومیه - دختر قرار دارد (شکل ۱). کوه‌های هنزا که دربرگیرنده کانسار بندر هنزا هستند، در واقع یک چین را تشکیل می‌دهند که به وسیله گسل‌های راندگی به بلوک‌هایی تقسیم شده‌اند. در محدوده کانسار بندر هنزا نیز دو گسل راندگی اصلی وجود دارد که مجموعه‌ای از گسل‌های عادی در میان آن قرار گرفته‌اند. گرانیتوئیدهای کوه هنزا در یک پهنه ضعیف فرضی نفوذ پیدا کرده و در طول فازهای چین‌خوردگی پس از ائوسن، کمپلکس ائوسن پایینی، به دلیل ترکیب آتشفشانی خود، به صورت یک توده سخت رفتار کرده است (Zolanje et al., 1972؛ شکل ۲).

استوک بندر هنزا یک مجموعه نفوذی پیچیده است که در محدوده‌ای به گستردگی یک در نیم کیلومتر گسترش یافته است (شکل ۳). این استوک شامل فازهای نفوذی گرانودیوریت، تونالیت، گرانیت، میکروکوارتزیدیوریت، میکروتونالیت، لوکوگرانیت، لوکوگرانودیوریت، گرانوفیر، گرانیت پورفیری، میکرویدیوریت، میکروگرانودیوریت و میکروگرانیت پورفیری است. واحد میکرویدیوریت- میکروکوارتزیدیوریت (mgd) از نظر گسترش مهم‌ترین واحد است که بیشتر بخش‌های مرکزی کمپلکس نفوذی در سطح فرسایش کنونی را دربر گرفته و میزبان اصلی کانه‌زایی است. واحد گرانیت- گرانودیوریت از نظر حجمی دومین واحد مهم و میزبان بخشی از کانه‌زایی نیز است. دایک‌هایی با ترکیب دلریت، مونوزیدیوریت، آندزیت، آندزیت- داسیت این دو توده نفوذی را قطع می‌کنند. سنگ‌های آتشفشانی پیرامون استوک اصلی شامل لاواهای آندزیتی، واحدهای پیروکلاستیک، لیتیک توف و توف‌های بلورین هستند.

## ۳- دگرسانی

دگرسانی چیره در کانسار بندر هنزا از نوع پروپلیتیک است و پس از آن دگرسانی‌های پتاسیک، فیلیک و آرژیلیک و آلپیتی شدن دارای اهمیت هستند. دگرسانی پروپلیتیک با گسترش فراوان در بیشتر نمونه‌های سطحی و همچنین نمونه‌های مربوط به مغزه‌های حفاری سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی دیده می‌شود. مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد که بیشتر کانی‌های فرومیزین مانند بیوتیت و آمفیبول به کانی‌های ثانویه اپیدوت، کلریت تجزیه شده‌اند و کربنات نیز به فراوانی همراه با این نوع دگرسانی یافت می‌شود. در بسیاری از نمونه‌ها دگرسانی پروپلیتیک با انواع دیگر دگرسانی همراه است. دگرسانی پتاسیک در برخی از رخنمون‌های سطحی محدوده کانسار بندر هنزا به‌ویژه در واحد میکرویدیوریت پورفیری و همچنین در مغزه‌های حفاری مربوط به استوک نفوذی دیده می‌شود. کانه‌زایی مس و مولیبدن بیشتر با این نوع دگرسانی همراه است. دگرسانی فیلیک با گسترش محدود و تنها درون توده‌ی نفوذی دیده می‌شود و کانی‌های اصلی آن شامل سریست، کوارتز، اکسید آهن و کانی‌های کدر است. دگرسانی فیلیک بیشتر در توده میکرویدیوریت پورفیری و به صورت دگرسانی فرعی رخ داده است و در اثر آن کانی‌های اولیه با سیلیس و سریست جایگزین شده‌اند. در نواحی که تحت تأثیر دگرسانی آرژیلیک قرار گرفته‌اند، فلدسپار به کانی‌های رسی تبدیل شده است و مجموعه کانی‌های رسی به همراه هماتیت و کوارتز دیده می‌شود. در نتایج تجزیه پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شده روی مجموعه رسی، کانی‌های پروفیلیت، آلونیت، ایلیت، کائولینیت و مونت‌موریلونیت گزارش شده است. دگرسانی آرژیلیک در سنگ‌های آتشفشانی دربرگیرنده توده نفوذی نیز دیده می‌شود. در نمونه‌های مورد مطالعه کانی‌های پلاژیوکلاز سدیک، اکتینولیت، اپیدوت و کلریت معرف دگرسانی سدیک- کلسیک هستند و بیشتر در دایک‌های پورفیری و در بخش‌های ژرف‌تر سنگ‌های گرانودیوریتی و گاه همراه با دگرسانی پتاسیک و پروپلیتیک دیده می‌شوند. در این نوع دگرسانی میزان پیریت از کالکوپیریت بیشتر است. در نتایج تجزیه

XRD کانی آلپیت گزارش شده است که می‌تواند تحت تأثیر دگرسانی سدیک ایجاد شده باشد.

## ۴- کانه‌زایی

کانه‌زایی مس را می‌توان به صورت هیپوزن در پهنه‌های دگرسانی پروپلیتیک و پتاسیک و به میزان کمتر در پهنه فیلیک ردیابی کرد. این کانه‌زایی به شکل دانه پراکنده و رگچه‌ای بوده و کانی اصلی مس کالکوپیریت است. کانه‌زایی مولیبدن به صورت مولیبدنیت در سنگ‌های ژرف‌تر تمرکز یافته و بیشتر همراه با دگرسانی پتاسیک و سدیک- کلسیک است. در رخنمون‌های سطحی سنگ‌ها به شدت دگرسان شده‌اند و به دلیل وجود اکسید آهن فراوان به رنگ سرخ درآمده است و کانه‌زایی مالاکیت و آزوریت در آنها دیده می‌شود.

## ۵- رده‌بندی رگچه‌ها

در بسیاری از بخش‌های کانسار بندر هنزا کانه‌زایی به صورت استوک‌ورک دیده می‌شود؛ این سیستم رگه و رگچه‌ای بیشتر در کوارتز و در پهنه پتاسیک وجود دارد و در بررسی‌های انجام شده روی مغزه‌های حفاری بر پایه کانی‌شناسی و روابط قطع‌شدگی رگچه‌ها توسط یکدیگر، به پنج گروه تقسیم می‌شوند. گروه I: کوارتز+ مولیبدنیت+ هورنبلند؛ گروه II: کوارتز+ مولیبدنیت+ پیریت+ کالکوپیریت؛ گروه III: کوارتز+ پیریت+ کالکوپیریت؛ گروه IV: کوارتز+ پیریت+ کالکوپیریت± هماتیت± منیتیت، گروه V: کوارتز± کلسیت؛ گروه VI: کوارتز. رگچه‌های گروه I دارای ستبرای متفاوتی از ۱ تا ۵۰ میلی‌متر است و در بخش‌های ژرف‌تر استوک پورفیری یافت می‌شوند. مولیبدنیت به صورت کانی نقره‌ای رنگ در این رگچه‌ها فراوان است. کانی‌های اصلی که پیرامون رگچه یادشده را فرا گرفته‌اند بیشتر از نوع هورنبلند، بیوتیت ثانویه و فلدسپار قلیایی به شدت دگرسان هستند. میزان کوارتز در این رگچه‌ها به بیش از ۹۵ درصد می‌رسد و به نظر هر دو نوع دگرسانی پتاسیک و سدیک بر این رگچه تأثیر گذاشته‌اند. رگچه‌های گروه II دارای یک مرکز تیره‌رنگ دارای کانی هورنبلند هستند که در دو سوی آن به‌طور قرینه کانی کوارتز دارای پیریت، کالکوپیریت و مولیبدنیت تشکیل شده است. بیشتر رگچه‌های گروه II توسط انواع دیگر رگچه قطع شده‌اند (شکل ۴). رگچه‌های گروه III دارای ستبرایی از ۲ تا ۱۳ میلی‌متر هستند. سنگ دربرگیرنده این رگچه‌ها یک گرانودیوریت است که در آن کانی‌های آلپیت، ارتوز و ترمولیت- اکتینولیت به فراوانی یافت می‌شود. در این رگچه‌ها پیریت دیده شده است. همچنین کانی هورنبلند دگرسان شده که حامل ذرات پیریت است به فراوانی در سنگ وجود دارد (شکل ۴).

رگچه‌های گروه IV دارای ستبرایی میان ۲ تا ۱۰ میلی‌متر هستند. سنگ دربرگیرنده آن یک کوارتزیدیوریت است و کانی‌های ترمولیت- اکتینولیت و بیوتیت ثانویه به فراوانی در سنگ وجود دارد. سنگ، دگرسانی پتاسیک نشان می‌دهد و با توجه به فراوانی کانی‌های پلاژیوکلاز سدیک، اکتینولیت، اپیدوت و کلریت به نظر می‌رسد دگرسانی سدیک- کلسیک سنگ را تحت تأثیر قرار داده است. در متن سنگ نیز کانه‌زایی پراکنده هماتیت، منیتیت، پیریت و کالکوپیریت دیده می‌شود (شکل ۴). رگچه‌های گروه V دارای ستبرایی در حدود ۳ تا ۷ میلی‌متر و بیش از ۹۹ درصد کوارتز خالص هستند. تنها در برخی بخش‌های رگچه، پراکنده‌گی‌هایی از کانی کلسیت دیده می‌شود و سنگ دربرگیرنده آنها گرانودیوریت دارای کانی‌های کوارتز، هورنبلند و فلدسپار قلیایی است. رگچه‌های گروه V به نظر تأخیری هستند که در مرحله پس از کانه‌زایی تشکیل شده‌اند (شکل ۴).

## ۶- مطالعه میانبارهای سیال

این باور وجود دارد که سیالها و بیشتر فلزات موجود در کانسارهای مس پورفیری از یک توده نفوذی که بیشتر در بخش‌های زیر کانسار قرار دارد منشأ می‌گیرند. نقش سیال‌ها جوی فرورو بیشتر در سرد کردن و رقیق کردن محلول‌های گرمابی و ته‌نشست مواد معدنی است و سیال‌های گرمابی بالارونده حامل فلزات هستند (Bodnar & Vityk, 1994). بنا بر اطلاعاتی که تاکنون درباره ویژگی‌های میانبارهای سیال و دمای همگن شدن کانسارهای مس پورفیری ارائه شده است، دمای همگن شدن آنها عموماً میان ۲۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری آنها میان صفر تا ۷۰ درصد وزنی معادل نمک طعام است. در پژوهش حاضر، بیشتر مطالعات میانبار سیال روی کانی کوارتز صورت گرفته و تنها در یک مورد میانبارهای سیال موجود در کانی هورنبلند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. میانبارهای سیال مورد مطالعه از دید اندازه میان ۱ تا ۳۰ میکرومتر متغیر هستند و بر حسب شکل و ویژگی به دو نوع اولیه و ثانویه تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل ۵). میانبارهای سیال دارای شکل‌های کروی، میله‌ای و گاه بی‌شکل هستند و دارای بخش مایع، بخار و گاه هالیت، انیدریت و در مواردی کانی فلزی (شکل ۶) به شرح زیر هستند. برای دست‌یابی به نتیجه، از میانبارهای سیال نوع اولیه استفاده شد.

### ۶-۱. میانبارهای سیال نوع مایع - بخار (LV)

میانبارهای سیالی هستند که شامل فازهای مایع + بخار هستند. بیشتر حجم این سیال‌ها را مایع تشکیل می‌دهد؛ به گونه‌ای که درصد فاز مایع موجود در آنها میان ۶۰ تا ۹۰ درصد است و به صورت اولیه و یا ثانویه تشکیل شده‌اند. این نوع از میانبارهای سیال در گروه‌های رگچه‌ای و دگرسانی‌های مختلف دیده می‌شوند؛ ولی مقدار فاز مایع آنها در رگچه‌های کوارتز گروه II و IV و V بیشتر است. از سوی دیگر حباب‌های بخار موجود در آنها از دید اندازه متغیرند و از دید حجمی ۱۵ تا ۴۰ درصد میانبارهای سیال را شامل می‌شوند. این میانبارهای سیال به مایع همگن شده‌اند (شکل ۶).

### ۶-۲. میانبارهای سیال نوع بخار - مایع (VL)

میانبارهای سیال هستند که شامل فازهای بخار + مایع هستند و فاز بخار موجود در این سیال‌ها میان ۶۰ تا ۷۵ درصد است و همگی به صورت اولیه تشکیل شده‌اند. این نوع میانبارهای سیال در گروه‌های رگچه‌ای III دیده می‌شوند و بیشتر به گاز همگن شده‌اند.

### ۶-۳. میانبارهای سیال نوع مایع - بخار - هالیت (LVH)

در این سیال‌ها افزون بر فازهای مایع و بخار، فاز نمک طعام هم دیده می‌شود (شکل ۶-الف).

### ۶-۴. میانبارهای سیال نوع مایع - بخار - هالیت - جامد (LVHS)

دارای فازهای مایع، بخار، نمک طعام و کانی فلزی هستند (شکل ۶-ب). کانی کالکوپریت که می‌توان آن را از روی ویژگی‌های سطح مقطع عرضی سه گوش شناسایی کرد (Hezarkhani, 2006) در بسیاری از میانبارهای سیال مورد مطالعه دیده شده‌اند.

### ۶-۵. میانبارهای سیال نوع مایع - بخار - هالیت - انیدریت (LVHAN)

دارای فازهای مایع، بخار و نمک طعام به همراه کانی انیدریت هستند. برای شناسایی هالیت از شکل مکعبی و شبه مکعبی و خواص نوری آن استفاده می‌شود. برای شناسایی هالیت از سیلویت از شکل گرد شده لبه‌های سیلویت و برجستگی پایین‌تر استفاده شد. همچنین دمای انحلال سیلویت پایین‌تر است. اصولاً بلورهای هالیت بزرگ‌تر و دارای فراوانی نسبی بیشتری از بلورهای سیلویت هستند؛ ظاهر مشخصی دارند و علامت ویژه کانی انیدریت داشتن رخ‌های لوزی است.

## ۷- ریزدماسنجی

مطالعات ریزدماسنجی شامل دو بخش گرم و سرد کردن است. مرحله اول برای به دست آوردن دمای همگن شدن یا دمای کانه‌زایی است که در این مرحله میانبارهای

در پژوهش حاضر دمای ذوب آخرین ذره یخ (Tmi) و دمای همگن شدن به مایع یا بخار (Th) و دمای انحلال نمک (Th-H) اندازه‌گیری شد، سپس بر پایه داده‌های اندازه‌گیری شده، محاسبات ویژگی‌های شوری، فشار، چگالی و شیب dp/dT در میانبارهای سیال انجام شد (بر پایه مدل‌های ارائه شده توسط Steele-MacInnis & Bodnar, 2013; Steele-MacInnis et al., 2012; جدول‌های ۱ و ۲).

در گروه I، بیشتر میانبارهای سیال از نوع سه فازی یا دو فازی هستند و سیال‌های هالیت‌دار به همراه سیال‌های هالیت و انیدریت‌دار و سیال‌های هالیت‌دار به همراه فاز جامد دیده می‌شوند. دمای ذوب آخرین ذره یخ در سیال‌های هالیت‌دار به ۱۸/۷- درجه سانتی‌گراد و دمای انحلال هالیت در نهایت به ۴۷۷/۲ درجه سانتی‌گراد رسید. این دما نشان‌دهنده شوری بالای سیال (۳۲/۲۶ تا ۵۶/۳۴ درصد وزنی NaCl) است. دسته دیگری از سیال‌ها در گروه I دارای هالیت، انیدریت و بخش جامد هستند و شوری آنها به بیشتر ۴۴/۹۲ درصد وزنی NaCl می‌رسد. با محاسبات صورت گرفته چگالی این نوع سیال‌ها میان ۰/۹۹ تا ۱/۲۴ است و میزان فشار در سیال انیدریت‌دار به بیش از ۳ کیلوپار می‌رسد (جدول‌های ۱ و ۲ و شکل‌های ۹ و ۱۰). در رگچه نوع II، سیال‌هایی با ترکیب متفاوتی از بدون نمک تا دارای انواع نمک‌های هالیت، انیدریت و جامدات کدر دیده می‌شود. در سیال نوع LV دمای ذوب آخرین ذره یخ میان ۲۴/۶- تا ۰/۵- درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند و بنابراین شوری میان ۰/۸ تا ۱۵/۳۳ درصد وزنی NaCl را نشان می‌دهد. بیشترین شوری در این نوع رگچه متعلق به سیال‌های دارای هالیت، انیدریت و بخش جامد کدر است که درجه شوری آنها به ۴۷/۳۲ درصد وزنی NaCl می‌رسد. در این رگچه، سیال دارای کانی هالیت‌داری دیده شده است که هالیت در دمای ۴۱۶/۵۰ درجه سانتی‌گراد انحلال می‌یابد و درجه شوری آن ۴۶/۲۱ درصد وزنی NaCl است. با توجه به محاسبات، فشار تشکیل آن بیش از ۳ کیلوپار است (جدول‌های ۱ و ۲ و شکل‌های ۷، ۸ و ۹). این سیال در کانه‌زایی کالکوپریت و مولیبدنیت مؤثر است. در این رگچه تنها در یک مورد کلاتریت دیده شده است. در رگچه نوع III، میانبارهای سیال در کوارتز و هورنبلند مجاور رگچه دیده و مطالعه شد. میانبارهای سیال موجود در هورنبلند از نوع LV با شکل‌های کشیده و میله‌ای بودند و همگی به فاز مایع همگن شدند. دمای تبدیل آخرین ذره یخ به مایع در آنها میان ۱۶۸/۷ تا ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است. این سیال‌ها دارای شوری متوسط حدود ۳ درصد وزنی NaCl هستند. میانبارهای سیال موجود در کانی از نوع LV، LVH و LVHS هستند و در آنها انیدریت دیده نشد. دمای ذوب آخرین ذره یخ در سیال نوع LV میان ۲۲/۸- تا ۰/۵- درجه سانتی‌گراد و دمای همگن شدن آن به فاز مایع میان ۱۶۸/۴ تا ۲۸۶/۱ درجه سانتی‌گراد است که با شوری ۰/۸۸ تا ۲۴/۲۱ درصد وزنی NaCl همخوانی دارد. میزان شوری در

(جدول ۳)، با استفاده از معادله ۲ (Méheut et al., 2007) که برای کانی کوارتز و در دمای میان ۱۳۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد صدق می‌کند. نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن سیال در هنگام تشکیل رگچه در گستره ۵/۲۶ تا ۶/۱۹ پرمیل قرار می‌گیرد. نسبت ایزوتوپی هیدروژن در میانبرهای سیال موجود در کانی کوارتز نمونه‌هایی که در آنها تجزیه اکسیژن نیز انجام شده است، در گستره ۸۸- تا ۹۰- پرمیل متغیر است (جدول ۳).

$$1000\ln \alpha = A(10^{18})/T^2 + B(10^{12})/T + C(10^9)/T^3 + D(10^6)/T^2 + E(10^3)/T + F \quad (2)$$

## ۹- بحث

میزان بیشترین فشار وارد بر میانبرهای سیال در کانسار بندر هنزا را می‌توان با محاسبه ستبرای واحدهای سنگی روی کانسار در هنگام نفوذ ماگما به دست آورد. بر پایه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ ساردوییه (Zolanje et al., 1972)، کانسار بندر هنزا به میزبانی توده نفوذی گرانودیوریتی با سن الیگوسن به درون سنگ‌های آتشفشانی به سن اتوسن و با ستبرای بیش از ۸/۵ کیلومتر نفوذ کرده است. در این شرایط، فشار لیتواستاتیک (با احتساب چگالی ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای سنگ‌های آتشفشانی) در حدود ۲/۳ کیلو بار، فشار هیدرواستاتیک (با احتساب ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای سیال‌ها) ۰/۸۵ کیلو بار و فشار کل در حدود ۳/۱ کیلو بار است. با توجه به موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در کانسار بندر هنزا روی نمودار انحلال‌هالیت در برابر دمای ذوب آخرین قطعه یخ (Beker et al., 2008) میزان فشار موجود در برخی از رگچه‌ها بیش از ۳ کیلو بار تعیین می‌شود (شکل ۱۱) که معادل با ژرفایی در حدود ۸/۵ کیلومتر است. در این نمودار با در نظر گرفتن میزان دمای انحلال‌هالیت (Th-H) اندازه‌گیری شده و دمای همگن شدن فاز بخار به فاز مایع (Th-L-V)، فشار سیال برآورد شده است. با توجه به نتایج اندازه‌گیری‌ها، محاسبات و نمودارها، کانه‌سازی در کانسار بندر هنزا در محدوده دمایی و فشاری به نسبت گسترده‌ای انجام شده است.

## ۱۰- احتمال جوشی در میانبرهای سیال

متوسط شوری میانبرهای سیال در کانسار بندر هنزا حدود ۴۰ درصد وزنی NaCl است؛ بنابراین از نمودار دما-فشار-شوری (Bodnar & Vityk, 1994) برای نمایش آنها استفاده شد (شکل ۱۲). با توجه به این نمودار ملاحظه می‌شود که در رگچه‌های نوع I که با کانه‌زایی مولیبدنیت همراه هستند، سیال‌های درگیر تغییرات زیادی را از دید میزان فشار و دما نشان می‌دهند؛ به گونه‌ای که میانبرهای سیال با فشار نزدیک به سطح، در کنار میانبرهای سیال با فشار حدود ۳ کیلو بار دیده می‌شوند. تغییرات دما در این نوع رگچه میان ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است؛ در حالی که در رگچه نوع II تغییرات فشار میان ۱ تا ۳/۵ کیلو بار دیده می‌شود و دمای آن میان ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد ثابت است. به نظر می‌رسد عامل کانه‌زایی مس و مولیبدن در رگچه نوع II تغییر فشار است. در رگچه نوع III اختلاف زیادی در فشار میانبرهای سیال دیده می‌شود (از ۴ کیلو بار تا نزدیک به سطح) و کانه‌زایی در سیال‌هایی با شوری حدود ۴۰ درصد وزنی NaCl در دمایی میان ۱۵۰ تا ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده است. رگچه نوع IV در دو نقطه مختلف از نمودار بیشترین تمرکز را نشان می‌دهد؛ یکی در فشار حدود ۲ کیلو بار و دیگری در نزدیکی سطح زمین و در دمایی میان ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به دام افتاده است. به نظر می‌رسد عامل تغییر فشار در این نوع رگچه نقش مهمی در ته‌نشست مس در کانسار بندر هنزا دارد (شکل ۱۲).

با توجه به میزان شوری و دمای همگن شدن میانبرهای سیال موجود در گروه‌های رگچه‌ای مختلف، نمودار شوری-دمای همگن شدن میانبرهای سیال در شکل ۱۳ آورده شده است. این نمودار با توجه به Wilkinson (2001) تنظیم شده و در آن محل قرارگیری سیال‌های مربوط به کانسارهای پورفیری به صورت یک محدوده

سیال دارای هالیت و کانی جامد کدر بیشینه به ۵۶/۹ درصد وزنی NaCl می‌رسد که بیشترین مقدار شوری محاسبه شده در کانسار بندر هنزا را نشان می‌دهد (جدول‌های ۱ و ۲ و شکل‌های ۹ و ۱۰). رگچه نوع IV دارای انواع میانبرهای سیال مختلف LVH، LVHAnS و LVHS است. در این رگچه بیشترین شوری متعلق به سیال LVH (۵۳/۳۱ درصد وزنی NaCl) است (جدول‌های ۱ و ۲ و شکل‌های ۹ و ۱۰). رگچه نوع V تأخیری و دمای تبدیل آخرین ذره یخ به مایع در آن میان ۴/۱- تا ۴/۷- درجه سانتی‌گراد و دمای همگن شدن آنها ۱۷۰ تا ۱۷۰/۹ درجه سانتی‌گراد است که با شوری میان ۶/۵۹ تا ۷/۴۵ درصد وزنی NaCl و فشار حدود ۰/۰۹۴ تا ۰/۰۹۵ کیلو بار همخوانی دارد. اطلاعات مربوط به تبدیل آخرین ذره یخ به مایع (Tmi)، دمای همگن شدن به مایع ((Th(V→L))، دمای انحلال‌هالیت (Th-H) شوری، فشار، چگالی و ژرفای میانبرهای سیال اولیه و ثانویه در جدول‌های ۱ و ۲ و شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. میزان فشار بر پایه Becker et al. (2008) به دست آمده است. در بخشی از رگچه‌های نوع III کانی هورنبلند دارای ذرات کانی کدر و مکعبی پیریت دیده می‌شود که در آن می‌توان میانبرهای سیال نوع LV را به صورت سوزنی شکل و بی‌شکل دید (شکل ۱۰). دمای همگن شدن این نوع میانبر سیال میان ۱۶۰ تا ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد و دارای شوری پایین میان ۰/۸ تا ۳/۵ درصد وزنی NaCl است.

## ۸- ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن

ترکیب ایزوتوپی پایدار سیال در کانسارهای مس پورفیری می‌تواند مستقیماً با تجزیه سیال به دام افتاده درون میانبرهای سیال (برای اندازه‌گیری نسبت ایزوتوپی هیدروژن) و از روی کانی میزبان (با محاسبه نسبت ایزوتوپی اکسیژن در سیال با تصحیح دمایی آن) اندازه‌گیری شود (John, 2010). در این پژوهش ۳ نمونه کوارتز از رگچه‌های کانه‌دار نوع I و II برای تجزیه ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن انتخاب شد (جدول ۳). مقادیر نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن، عموماً به صورت نشانه یا مقدار دلتا (δ) برحسب پرمیل (‰) نسبت به میانگین استاندارد آب اقیانوسی (SMOW) گزارش می‌شوند (برای نمونه Hoefs, 2009؛ رابطه ۱):

$$\delta = ((R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}}) - 1) * 1000 \quad (1)$$

که در آن R sample برابر با نسبت  $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})$  یا  $(\text{D}/\text{H})$  در نمونه و R standard برابر با نسبت  $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})$  یا  $(\text{D}/\text{H})$  در استاندارد است (Taylor, 1997).

آماده‌سازی و جدایش نمونه‌های مربوط به تجزیه ایزوتوپی در دانشگاه شهید بهشتی و سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شد. تجزیه ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن در آزمایشگاه ایزوتوپ پایدار دانشگاه Queens کانادا و بر پایه روش Clayton & Mayeda (1963) انجام و نتایج به صورت پرمیل نسبت به میانگین استاندارد آب اقیانوسی ارائه شده است. برای تجزیه نسبت ایزوتوپی اکسیژن، حدود ۵ میلی‌گرم از کانی کوارتز جدا شده و به مدت یک شب درون  $\text{BrF}_5$  قرار گرفته است و اکسیژن آن از کوارتز با روش Clayton & Mayeda (1963) استخراج شده است. و در تماس با گرافیت به  $\text{CO}_2$  تبدیل شده است. نسبت ایزوتوپی اکسیژن با استفاده از دستگاه طیف سنج جرمی (IRMS) از نوع Finnigan MAT 252 اندازه‌گیری شده است. برای تجزیه ایزوتوپی هیدروژن، کانی کوارتز وارد دستگاه TC/EA و هیدروژن موجود در میانبرهای سیال آن آزاد و وارد دستگاه طیف سنج جرمی DeltaplusXP IRMS می‌شود. دقت اندازه‌گیری برای عنصر هیدروژن  $\pm 0.3\%$  و برای عنصر اکسیژن  $\pm 3\%$  پرمیل است. استانداردهای آزمایشگاه با استاندارد میانگین آب اقیانوسی وین (V-SMOW) کالیبره شده‌اند.

نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن در ۳ نمونه کوارتز در گستره ۶/۳ تا ۳/۹ پرمیل متغیر است و در اندازه‌گیری‌های دماسنجی که روی رگچه‌های دارای این سه نمونه کانی کوارتز انجام شده است، میزان دمای متوسط رگچه بر پایه دمای همگن شدن میانبرهای سیال در گستره ۲۹۹/۵ تا ۳۰۴/۸ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند

سیال اشباع از NaCl را به همراه میانبرهای سیال غنی از گاز می‌توان شاهدهی از رخداد جوشش در سیال‌های کانه‌ساز دانست. بنابراین در این نوع از میانبرهای سیال بی‌درنگ پس از به دام افتادن سیال حباب‌گاز تشکیل می‌شود و درجه همگن شدن این میانبرهای سیال با دمای به تله افتادن آنها برابر است (معانی‌جو و همکاران، ۱۳۹۱). اطلاعات مربوط به میانبر سیال در رگچه‌های کوارتز کانسار بندر هنزا نشان می‌دهد که یک کاهش کلی در دما و شوری با توجه به زمان در سیالی که مسئول کانه‌زایی است صورت گرفته است. دمای همگن شدن میانبرهای سیال از حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در رگچه‌های گروه IV تا کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در گروه V و بخشی از میانبرهای سیال گروه III است و شوری میانبرهای سیال LVHS از ۵۷ درصد وزنی NaCl تا حدود کمتر از ۳۷ درصد وزنی NaCl و شوری میانبرهای سیال LV از ۳۰ درصد وزنی NaCl تا حدود کمتر از ۱ درصد وزنی NaCl کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات در دما و شوری میانبر سیال نشان‌دهنده سرد شدن سیال آبداری است که از ماگمای دیوریت-گرانودیوریت منشأ گرفته است و سپس تحت تأثیر جوشش و آمیختگی با سیال جوی در شرایط کاهش فشار لیتوستاتیک واقع شده است.

اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن برای شناخت منشأ سیال‌های کانه‌زا در کانسارهای مس پورفیری بسیار ارزشمند است (Taylor et al., 1986; Taylor, 1978 & 1997) و در پژوهش حاضر تلاش شده است که با تعیین نسبت ایزوتوپی در سیال، منشأ سیال‌های کانه‌زا در دگرسانی پتاسیک و پروپلیتیک شناسایی شود. مطالعات ایزوتوپی گذشته در کانسارهای مس پورفیری نشان می‌دهد که دگرسانی پتاسیک توسط سیال‌های ماگمایی ایجاد شده است، در حالی که دگرسانی فلیک در نتیجه سیال‌های جوی به وجود آمده است (Sheppard, 1971; Sheppard & Taylor, 1974; Sheppard & Gustafson, 1976; John, 2010). نسبت ایزوتوپی اکسیژن در نمونه‌های کوارتز همراه با کانی‌سازی در سامانه پورفیری بندر هنزا (شکل ۱۷ و جدول ۳) نشانگر دامنه‌ای محدود و هماهنگ با منشأ ماگمایی است که با توجه به شکل ۱۷ با بیشتر کانسارهای مس پورفیری در ایران و جهان همخوانی دارد. از نتایج نسبت ایزوتوپی اکسیژن در کوارتز همزاد با کانی‌های سولفیدی می‌توان نتیجه گرفت که سیال عامل کانه‌سازی در تشکیل استوک‌ورک‌های کانه‌دار، منشأ ماگمایی داشته است و آب‌های ماگمایی نقش اصلی در کانه‌سازی سامانه پورفیری مورد مطالعه دارند.

نتایج تجزیه ایزوتوپی هیدروژن در میانبر سیال دارای مقادیر ۸۸- تا ۹۰- است که با در نظر گرفتن شیب خط آب جوی (شکل ۱۴) از این خط فاصله گرفته است و کاهش مشخصی را در میزان دوتریم نشان می‌دهد. کانسار بندر هنزا از دید نسبت ایزوتوپی هیدروژن با بیشتر کانسارهای مس پورفیری تفاوت نشان می‌دهد و بیشترین انطباق را با کانسار Butte در مونتانا آمریکا نشان می‌دهد. کاهش در میزان دوتریم در نمونه‌های مورد اندازه‌گیری ممکن است ناشی از عملکرد آب‌های جوی با میزان دوتریم پایین باشد.

## ۱۱- نتیجه‌گیری

مجموعه‌ای از توده‌های آذرین با ترکیب دیوریت تا گرانودیوریت در منطقه بندر هنزا نفوذ کرده‌اند و سبب فعالیت محلول‌های گرمایی شده‌اند.

برپایه مطالعات میانبر سیال در ۵ دسته رگچه مختلف، میانبرهای سیالی با ویژگی‌های زیر شناسایی شد:

- رگچه I: سیال با دمای متوسط تا بالا (۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، فشار بالا و شوری بالا (۳۸ تا ۴۵ درصد وزنی NaCl) که عامل کانه‌زایی مولیدن است. این سیال دارای حالت و انبساط بوده، سبب دگرسانی سدیک-کلسیک در کانسار شده و بدون کانه‌زایی مس است.

مشخص شده است. پس از پیاده کردن نمونه‌های مربوط به کانسار بندر هنزا روی این نمودار، ۵ محدوده جداگانه قابل تشخیص است که عبارتند از محدوده A که معرف یک سیال با دما و شوری بالا است؛ این ویژگی در سیال‌های ماگمایی دیده می‌شود و بیشتر نمونه‌های موجود در این بخش از نوع LVH و LVHS و مربوط به دگرسانی پتاسیک کانسار هستند. بنابراین در صورتی که عمل جوشش یا کاهش حرارت به صورت جزئی رخ بدهد، مسیر حرکت سیال به سوی محدوده A خواهد بود. در نتیجه سیال به سوی منحنی اشباع از حالت حرکت می‌کند (Wilkinson, 2001)؛ این حالت عمدتاً در رگچه‌های گروه IV موجود در دگرسانی پتاسیک کانسار مورد مطالعه دیده می‌شود که میانبرهای سیال موجود در آنها دارای شوری و دمای همگن شده بالایی هستند. لازم به یادآوری است که شمار کمی از میانبرهای سیال مطالعه شده این ویژگی‌ها را نشان می‌دهند. محدوده B نیز معرف سیالی با فشار و دمای با ویژگی سیال‌های ماگمایی است و بیشتر نمونه‌های موجود در این بخش از نوع LVH و LVHS و مربوط به دگرسانی‌های پتاسیک و سدیک هستند. به نظر می‌رسد برای تشکیل رگچه‌ها و کانه‌زایی‌های موجود در این بخش کاهش دما نقش بالایی داشته باشد. بیشتر نمونه‌های متعلق به رگچه‌های GI، GII، GIII و GIV در این محدوده قرار می‌گیرند. محدوده C یک گروه از میانبرهای سیال متعلق به رگچه‌های گروه III و IV را در بر می‌گیرد که در زیر منحنی اشباع حالت جای گرفته‌اند. این سیال‌ها در شرایط دمای متوسط و با شوری بالا تشکیل می‌شوند. همه میانبرهای سیال در این بخش از نوع LVH و LVHS هستند. با توجه به کاهش دما در این سیال‌ها بدون کاهش شوری، به نظر می‌رسد که عامل کاهش فشار سبب تشکیل آنها شده است. محدوده D در حدواسط محدوده‌های A و E قرار می‌گیرد و نمونه‌های مربوط به گروه‌های رگچه‌های III و IV را در بر می‌گیرد. سیال‌های موجود در این ناحیه از نوع LV است. این سیال‌ها، نشان‌دهنده کاهش دما در سیال اولیه در اثر ورود سیال‌های جوی و رقیق‌شدگی سیال در برخی از میانبرهای سیال موجود در این گروه‌های رگچه‌ای است (Wilkinson, 2001). محدوده E، معرف یک سیال با شوری و دمای پایین است، این ویژگی یعنی داشتن دما و شوری پایین مختص سیال‌های جوی است. میانبرهای سیال موجود در این محدوده از نوع LV هستند. بیشتر نمونه‌های موجود در رگچه‌های گروه V در این گروه قرار می‌گیرند و این دما و شوری بیشتر معرف دگرسانی پروپلیتیک در کانسار بندر هنزا است. (Wilkinson 2001) بر این باور است که سیال‌های اولیه می‌توانند در اثر رقیق‌شدگی با سیال‌های جوی، کاهش دما و شوری داشته باشند. بنابراین میانبرهای سیال موجود در محدوده E ممکن است از کاهش دمای میانبرهای سیال اولیه ماگمایی به وجود آمده باشند.

(Hezarkhani 2008) بر این باور است که در میانبرهای سیالی که در زیر منحنی حالت تشکیل می‌شود (محدوده C)، ابتدا فاز گاز و بعد فازهای جامد همگن شده‌اند (شکل ۱۳). از سوی دیگر، همگن شدن یک سیال به حالت نشان‌دهنده آن است که این سیال در اثر تحولات فشار تشکیل شده است (Bodnar & Vityk, 1994). (Beker et al., 2008). بنابراین به نظر می‌رسد سیال‌های موجود در محدوده C در اثر تحولات فشار و در دیگر محدوده‌ها بیشتر در اثر تحولات دمایی و در اثر اختلاط با آب‌های جوی تشکیل شده‌اند. اصولاً فرایند جوشش زمانی رخ می‌دهد که فشار هیدروستاتیک بیشتر از فشار لیتوستاتیک شود و همین امر سبب کاهش سریع فشار در برگیرنده سیال‌های گرمایی خواهد شد. در حقیقت جوشش سیال‌های گرمایی یک سازوکار و فرایند اولیه برای تحرک و تمرکز فلزات در هنگام تشکیل کانسارهای فلزی به شمار می‌آید. این فرایند در شرایط دما و فشار پایین رخ می‌دهد و نتیجه آن افزایش شوری، افزایش pH، تغییر در شرایط Eh و ته‌نشینی مواد معدنی است (Wilkinson, 2001). همچنین این پدیده موجب به دام افتادن میانبرهای سیال با نسبت‌های فازی مختلف می‌شود (Kerkhof & Hein, 2001). حضور میانبرهای

به دلیل تغییرات فشار و دما در اثر آمیختگی با آب‌های جوی، سبب کانه‌زایی مس و مولیبدن شده است.

در کانسار بندر هنزا سیال‌های یادشده در نتیجه فازهای نفوذی مختلف تکرار شده‌اند و روی یکدیگر تأثیر گذاشته‌اند، به گونه‌ای که در بیشتر نمونه‌ها می‌توان دگرسانی پتاسیک، پروپلیتیک و سدیک-کلسیک را در کنار هم دید.

با توجه به نتایج آزمایش‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن، سیال‌های نوع I و II که عامل کانه‌زایی مس و مولیبدن بوده‌اند از نوع ماگمایی هستند که به نظر می‌رسد سیال‌های جوی بر آنها تأثیراتی داشته‌اند. این نتایج دارای همخوانی با دیگر کانسارهای مس پورفیری در ایران و جهان هستند.

### سپاسگزاری

از امور تحقیق و توسعه شرکت ملی صنایع مس ایران و مسئولین مربوطه که ما را در انجام این پژوهش یاری رساندند سپاسگزاری می‌شود.

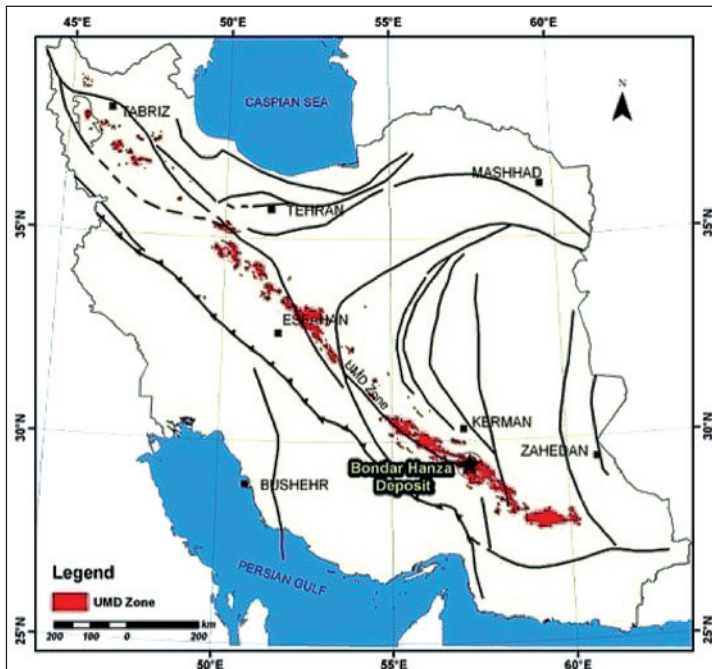
- رگچه II: سیال با دمای بالا (۲۵۰ تا ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد)، فشار بالا و شوری بالا (۳۳ تا ۴۷ درصدوزنی NaCl) که عامل کانه‌زایی مس و مولیبدن بوده و سبب دگرسانی پتاسیک در سنگ‌ها شده است.

- رگچه III: سیال با دمای بالا (۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد)، فشار بالا و شوری بالا (۴۰ تا ۵۶ درصدوزنی NaCl) که عامل کانه‌زایی مس بوده و در سنگ‌های پیرامون دگرسانی پتاسیک ایجاد کرده است.

- رگچه IV: سیال با دمای بالا (۲۷۷ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد)، فشار بالا و شوری بالا (۲۵ تا ۵۳ درصدوزنی NaCl) که عامل کانه‌زایی مس همراه با کانی مگنتیت است و در سنگ‌های پیرامون دگرسانی پتاسیک و سدیک کلسیک ایجاد کرده است.

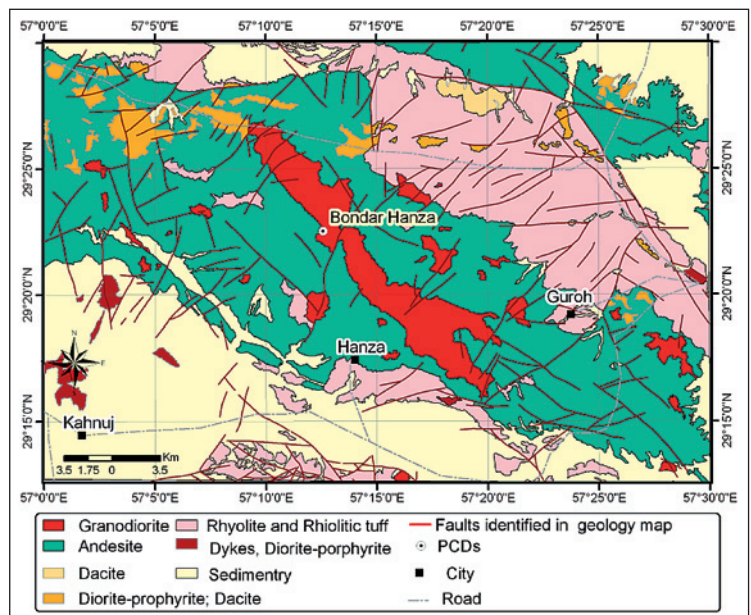
- رگچه V: سیال با دمای متوسط (حدود ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد)، فشار کم (۰/۰۸ تا ۰/۰۰۷ کیلو بار) و شوری متوسط (۶ تا ۷ درصدوزنی NaCl) که سبب دگرسانی پروپلیتیک شده و بدون کانه‌زایی است.

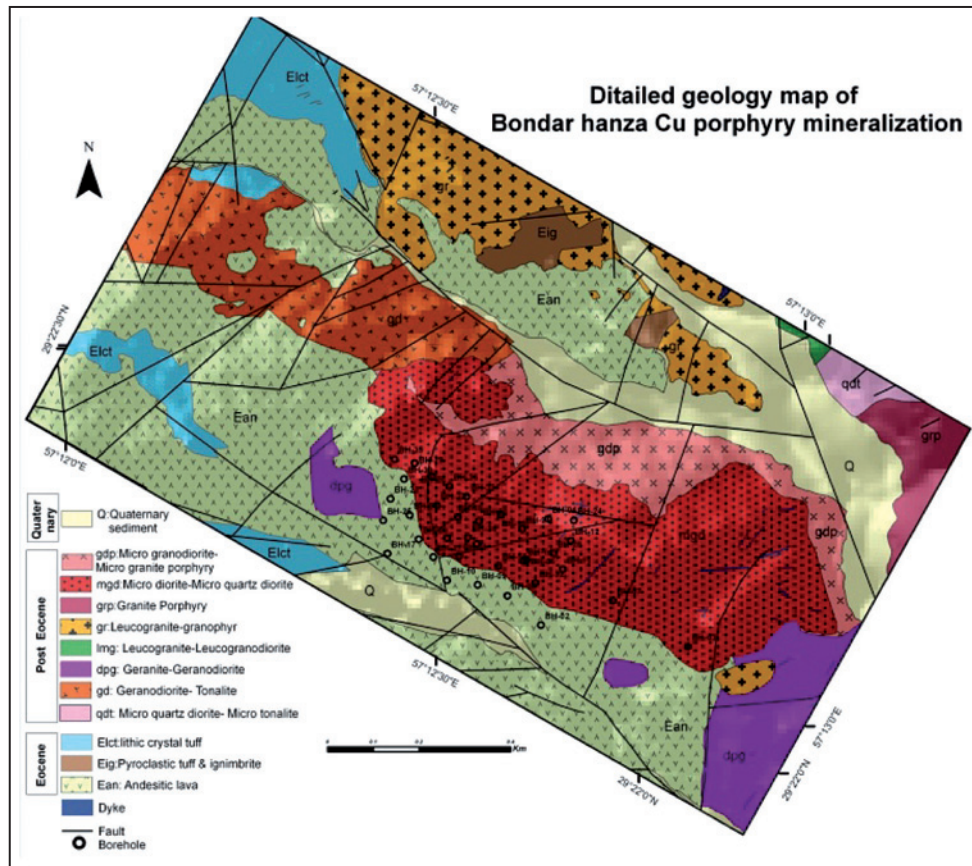
مطالعات انجام شده نشان می‌دهد جوشش صورت گرفته در سیال ماگمایی اولیه



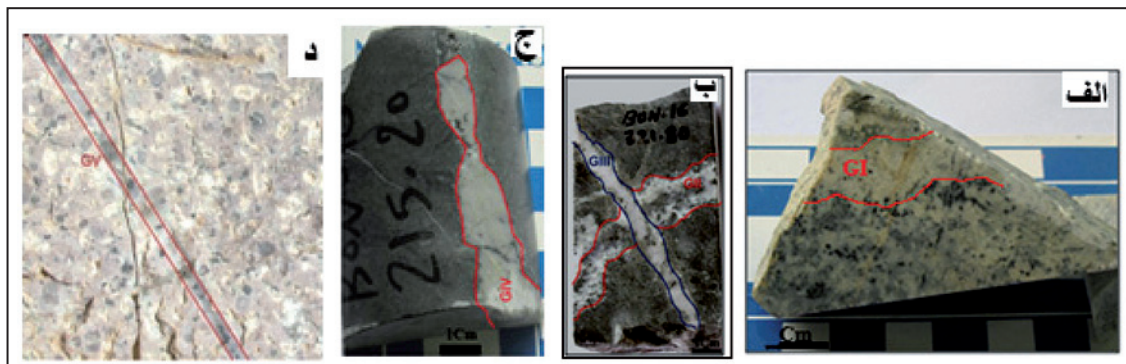
شکل ۱- موقعیت کانسار بندر هنزا در جنوب خاور ایران و پهنه ساختاری ارومیه- دختر (بر پایه نقشه زمین‌شناسی ایران، سهندی، ۱۳۹۳).

شکل ۲- موقعیت کانسار بندر هنزا در نقشه زمین‌شناسی ساردوییه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (Zolanje et al., 1972).

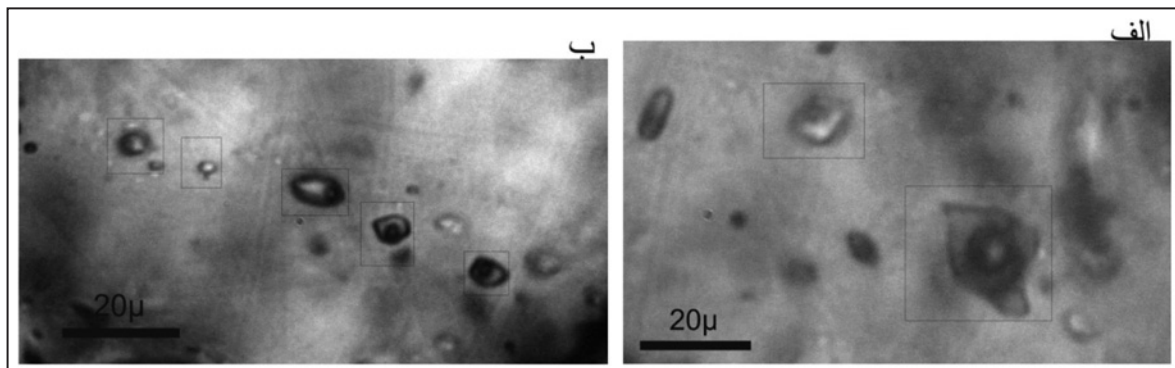




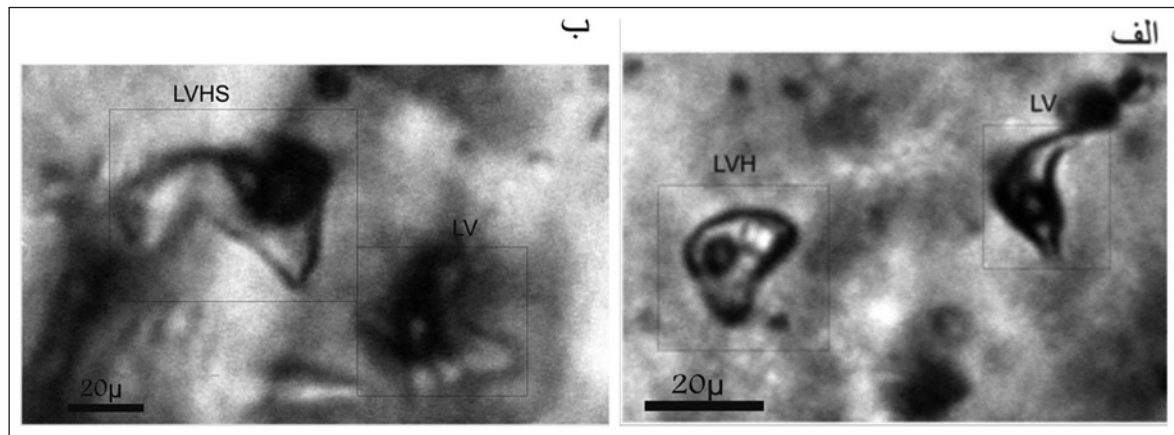
شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی کانسار بندر هنزا با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (شرکت ملی مس ایران، ۱۳۸۹).



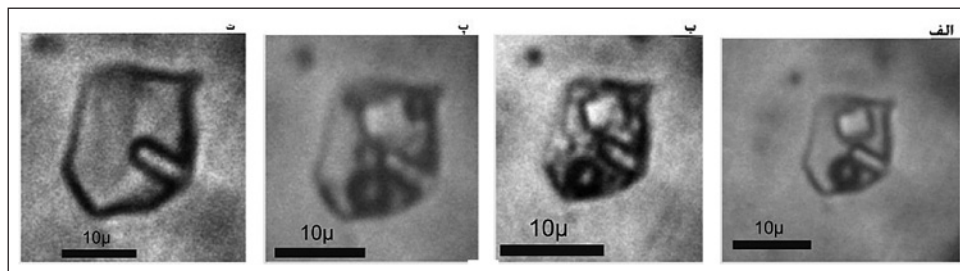
شکل ۴- الف) تصویری از رگچه‌های کوارتز متعلق به متعلق به گروه‌های مختلف در نمونه دستی. الف) I (GI)؛ ب) II (GII) و III (GIII)؛ ج) IV (GIV)؛ د) V (GV).



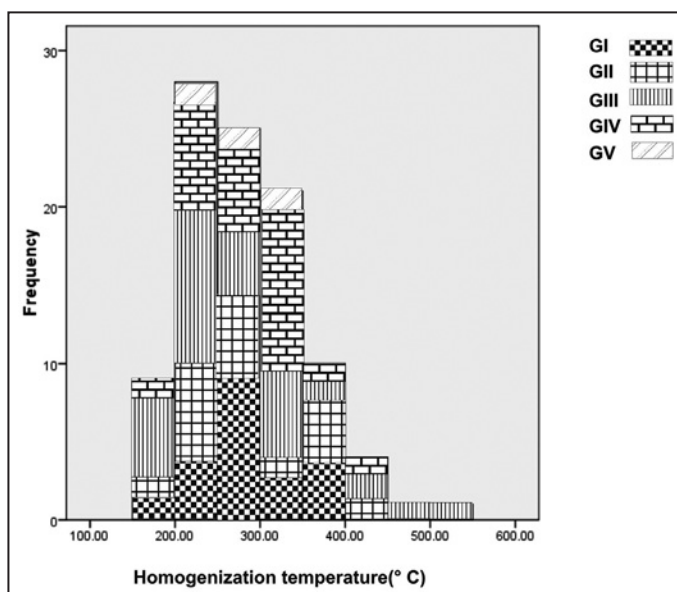
شکل ۵- میانبارهای سیال در رگچه‌های کوارتز. الف) میانبارهای سیال اولیه؛ ب) میانبارهای سیال ثانویه.



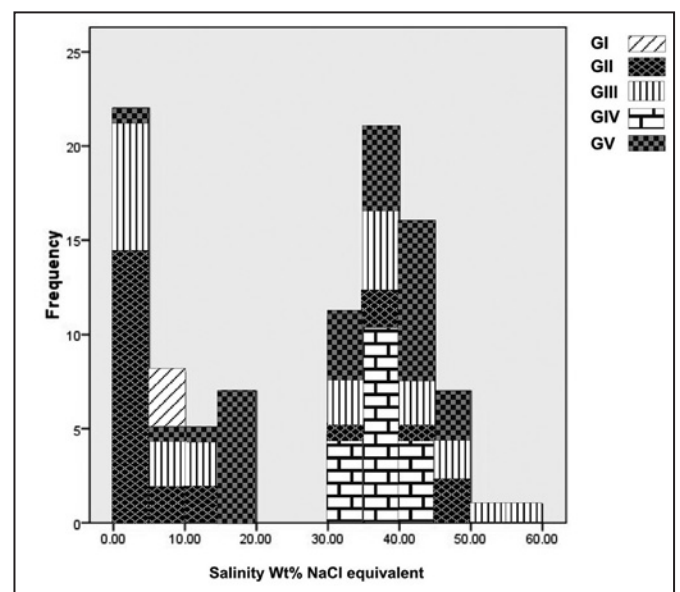
شکل ۶- شکل‌های میانبرهای سیال در رگچه‌های کوارتز کانسار مس پورفیری بندر هنزا. الف) میانبرهای سیال LV و LVH در رگچه GIV؛ ب) میانبرهای سیال LV و LVHS در رگچه GIV.



شکل ۷- تصویر یک میانبر سیال دارای حالت از رگچه GII که در دماهای مختلف نشان داده شده است. الف) در دمای آزمایشگاه؛ ب) در مراحل ابتدایی سرد کردن؛ پ) پس از سرد کردن کامل؛ ت) در هنگام همگن شدن.



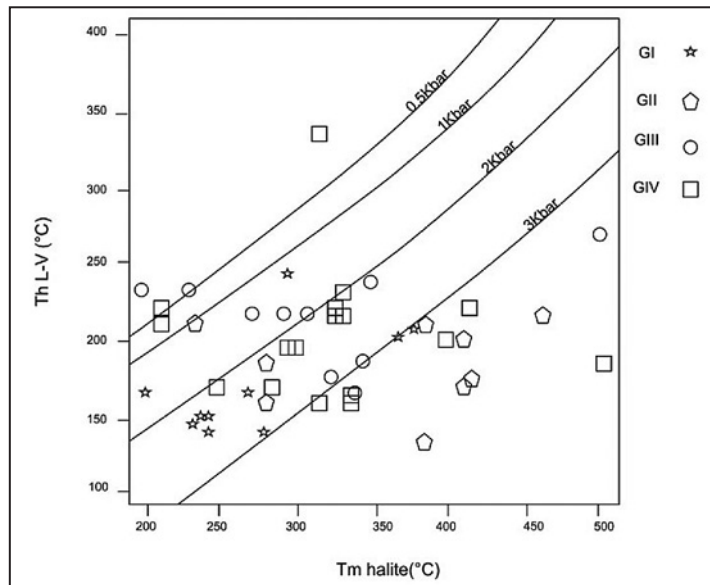
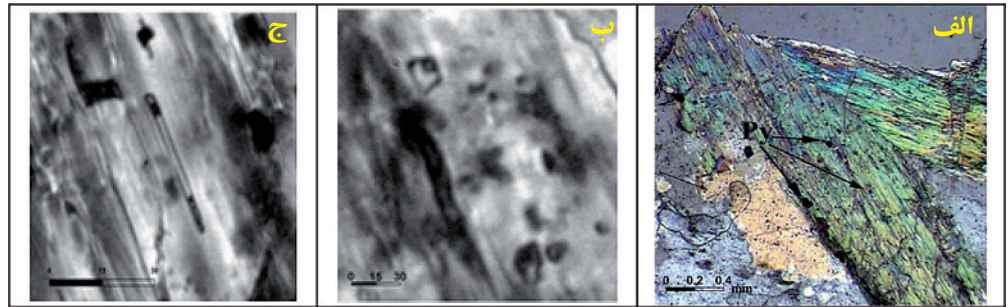
شکل ۹- نمودار دمای همگن شدن میانبرهای سیال در انواع رگچه‌های کوارتز کانسار مس پورفیری بندر هنزا.



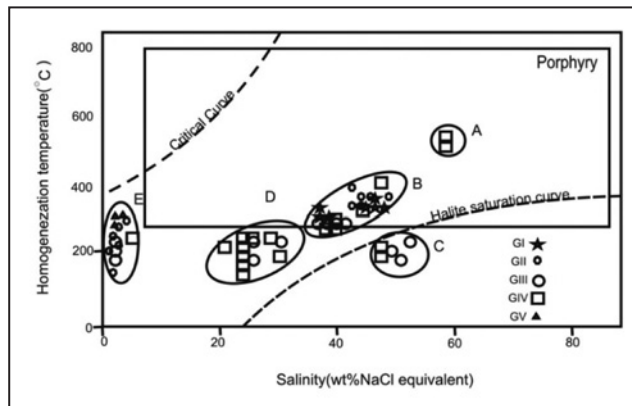
شکل ۸- میزان شوری میانبرهای سیال در انواع رگچه‌های کوارتز کانسار مس پورفیری بندر هنزا.



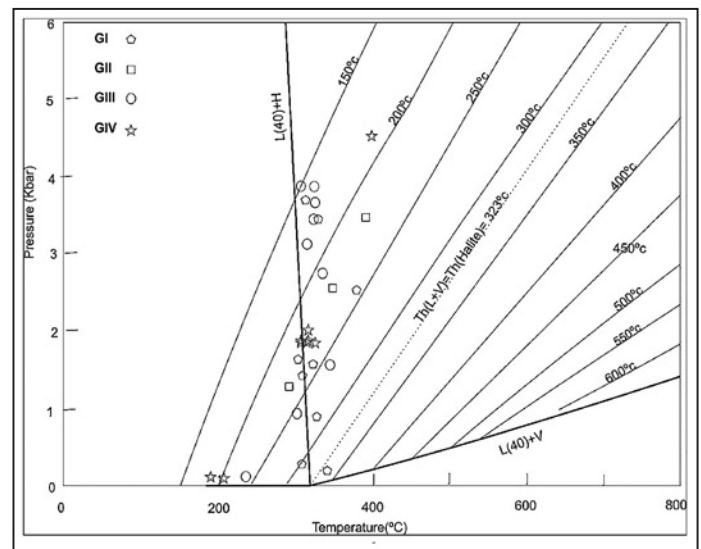
شکل ۱۰- الف) کانی هورنبلند دارای ذرات پراکنده پیریت (Py) در رگچه نوع III (نور پلازیان)؛ ب و ج) میانبرهای سیال LV درون کانی هورنبلند.



شکل ۱۱- نمودار ارتباط میان دمای انحلال هالیت و دمای ذوب آخرین ذره بخ (Becker et al., 2008).

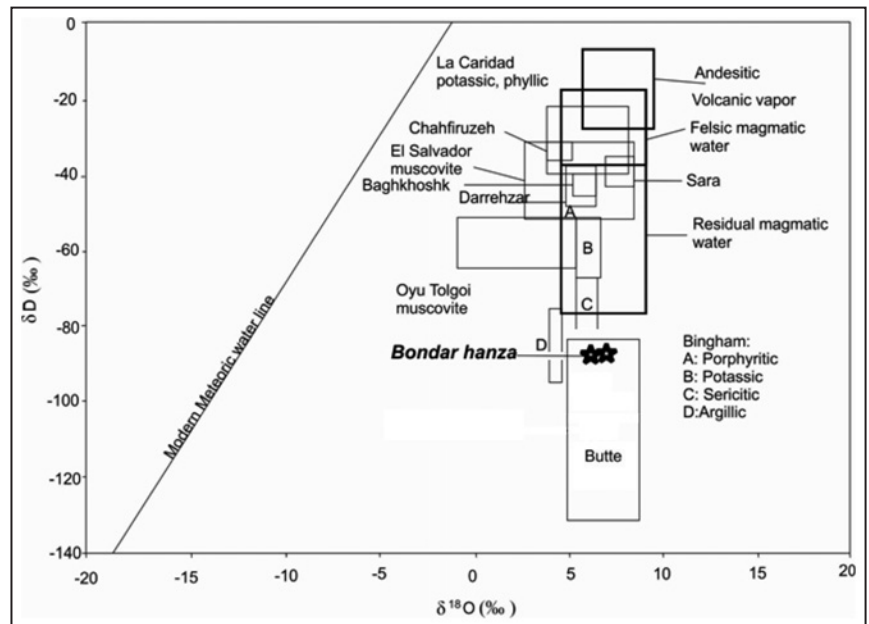


شکل ۱۳- مدل نمادین برای نشان دادن تغییرات احتمالی میانبرهای سیال پس از تشکیل در گروه‌های رگچه‌ای کانسار بندر هنزا. محدوده چهارضلعی معرف محدوده پیشنهادی برای میانبرهای سیال موجود در کانسارهای مس پورفیری است (Wilkinson, 2001). میانبرهای سیال مورد مطالعه بر پایه دمای همگن شدن و شوری به محدوده‌های A, B, C, D و E تقسیم می‌شوند.



شکل ۱۲- موقعیت میانبرهای سیال کانسار بندر هنزا در نمودار فشار- دما (Bodnar & Vityk, 1994).

شکل ۱۴- مقادیر ایزوتوپی  $\delta D$  و  $\delta^{18}O$  سیال‌های گرمابی در تعادل با کانی کوارتز برای سامانه مس پورفیری بندر هنزا و کانسارهای مس پورفیری السالوادور در شیلی، Oyu Tolgoi در مغولستان، LaCaridad در مکزیک، بینگام و بیوت در ایالات متحده آمریکا و چاه فیروزه، دره زار، باغ خشک و سارا در ایران (داده‌های ایزوتوپی از (1979) Ohmoto؛ Khashgerel؛ Watanabe & Hedenquist (2001) Valencia et al. (2008) et al. (2006) (1392)؛ محدوده آب ماگمایی فلسیک از Taylor (1997)؛ محدوده آب ماگمایی باقیمانده از Taylor (1974).



جدول ۱- نتایج مربوط به مطالعه میانبرهای سیال ثانویه در گروه‌های رگچه‌ای موجود در کانسار بندر هنزا.

نام	نوع میانبار	Tmi (°C)	Th(V→L) (°C)	Th - H (°C)	شوری (w%NaCl)	فشار (Kbar)	چگالی (g/m <sup>3</sup> )	ژرفا (m)
GII	LV	-22/3 < Tmi < -0/5	122-361	-	0/88-3/89	0/02-11	1/09-0/60	600-2270
	LV+H	-24/3 < Tmi < -21/2	209/8-306/1	237/1-315/1	31/95-43/30	3 < -0/2	1/09-1/23	1810-3520
GIII	LV	-2 < Tmi < -0/5	157/6-307/9	-	0/88-3/39	0/08-0/09	0/72-0/92	970-1730
GIV	LV	-24/7 < Tmi < -0/1	161/2-281/5	-	0/18-25/39	0/06-0/05	0/83-1/04	124-207
GV	LV	-4/1 < Tmi < -4/7	170-170/9	-	6/59-7/45	0/07-0/08	0/95-0/94	177-179

جدول ۲- نتایج مربوط به مطالعه میانبرهای سیال اولیه در گروه‌های رگچه‌ای موجود در کانسار بندر هنزا.

نام	نوع میانبار	Tmi (°C)	Th(V→L) (°C)	Th - H (°C)	شوری (w%NaCl)	فشار (Kbar)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	ژرفا (km)
GI	L+V+H	-18/7 < Tmi < -11/4	140/9-386/9	200-477/2	32/26-56/34	>3	0/99-1/21	>8.5
	L+V+H-An	-18/7 < Tmi < -18/6	203-292/5	364/1-375/3	43/98-44/92	>3	1/23-1/24	>8.5
	L+V+H-So	-14/8 < Tmi < -12/6	287-292/5	300-343	38/35-42/44	>3	1/11-1/14	>8.5
GII	LV	-24/6 < Tmi < -0/5	130/9-346/6	-	0/88-25/33	>3	0/76-1/02	>8.5
	LV+H	-25/5 < Tmi < -10/8	143/7-196/7	227/1-356/9	33/65-43/3	>3	1/15-1/24	>8.5
	L+V+H-An	-40/3 < Tmi < -36/6	180/2-212/2	301/6-252	39/20-35/65	>3	1/17-1/18	>8.5
	L+V+H+Hm	-14/8	157/90	416/50	46/21	>3	1/33	>8.5
	L+V+H+So	-24 < Tmi < -14/3	132/8-210/9	384/6-230/7	33/60-44/33	>3	1/14-1/33	>8.5
	L+V+H+So+An	-22/1	198/1	409/70	47/32	>3	1/28	>8.5
GIII	LV	-22/8 < Tmi < -0/5	168/4-286/1	-	0/88-24/21	>3	0/82-1/08	>8.5
	LV+H	-24/2 < Tmi < -11/1	227/4-167/5	234/5-344/3	20/67-40/52	>3	0/83-1/22	>8.5
	L+V+H+So	-24/6 < Tmi < -16/7	168/7-267/8	314/2-500	40/20-56/9	>3	1/18-1/31	>8.5
GIV	LV	-24/4 < Tmi < -3/2	175/5-282/9	-	5/26-25/21	>3	0/89-1/08	>8.5
	LV+H	-24/7 < Tmi < -10/9	156/7-219/8	277/5-500	37/42-53/31	>3	1/18-1/40	>8.5
	L+V+H+So	-18/3 < Tmi < -16/5	153/2-213/1	323/5-500	40/4-51/91	>3	1/20-1/43	>8.5
	L+V+H+So+An	-16/5	167/3	248/5	35/47	>3	1/18	>8.5
GV	LV	-4/1 < Tmi < -4/7	170-170/9	-	6/59-7/45	0/07-0/08	0/95-0/94	177-179

جدول ۳- نتایج داده‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن.

ردیف	شماره نمونه	سامانه پورفیری	شماره گمانه- ژرفا	سنگ میزبان	دگرسانی	دما	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} (\text{‰})$	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ در سیال	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} (\text{‰})$ در سیال
۱	Bon1	بندر هنزا	۱۸-۲۰۸/۸۰	گرانودیوریت	پتاسیک و پروپلیتیک	۳۰۴/۸	۶/۳	-۹۰	۵/۲۶
۲	Bon2	بندر هنزا	۳۲-۲۸۳/۲	گرانودیوریت	پتاسیک و پروپلیتیک	۲۸۶/۴	۴/۶	-	۶/۱۹
۳	Bon3	بندرهنزا	۱۷-۳۱۲	گرانودیوریت	پتاسیک و پروپلیتیک	۲۹۹/۵	۳/۹	-۸۸	۵/۶۲

### کتابنگاری

سهندی، ر.، ۱۳۹۳- نقشه زمین‌شناسی ایران، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.  
 شرکت ملی مس ایران، ۱۳۸۹- گزارش مطالعات زمین‌شناسی و آلتراسیون محدوده بندر هنزا در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ مدارک منتشر نشده.  
 عینعلی، م.، ۱۳۹۲- تکوین ذخایر مس پورفیری جنوب کمربند ارومیه- دختر، با نگاهی ویژه به معیارهای تشخیص پورفیری‌های عقیم و بارور، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شهید بهشتی، ایران، ۲۷۴ ص.  
 معانی‌جو، م.، مستقیمی، م.، عبداللهی ریس، م. و سپاهی‌گرو، ع.، ۱۳۹۱- مطالعات سیستماتیک ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد و میانبرهای سیال گروه‌های رگچه‌ای مختلف کانسار مس پورفیری سرچشمه بر اساس داده‌های جدید، مجله زمین‌شناسی اقتصادی.

### References

- Bazin, D. & Hubner, H., 1969- Copper deposits in Iran, Geology Survey of Iran 232.p.  
 Becker, S. P., Fall, A. & Bondar, R. J., 2008- Synthetic Fluid Inclusions. XVII. PVTX Properties of High Salinity H<sub>2</sub>O-NaCl Solutions (>30 wt % NaCl): Application to Fluid Inclusions that Homogenize by Halite Disappearance from Porphyry Copper and Other Hydrothermal Ore Deposits: Economic Geology, v. 103, p 539-554.  
 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, v. 139, p. 605-614.  
 Bodnar, R. J. & Vityk, M. O., 1994- Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions. In Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications (eds. B. de Vivo and M. L. Frezzotti). Virginia Tech, Blacksburg, pp. 117-130.  
 Calagari, A. A., 2003- Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phyllic and potassic- phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaijan, Iran: Asian Earth Science, v. 21, no.7, p. 767-780.  
 Calagari, A. A., 2004- Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaijan, Iran: Journal of Asian Earth Sciences, v. 23, no. 2, p.179-189.  
 Clayton, R. N. & Mayeda, T. K., 1963- the use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 27, p. 43-52.  
 Dimitrijevic, M. D., 1973- Geology of the Kerman region. Geology survey of Iran. Report 52.334p.  
 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, v. 93, no. 5, p. 651-670.  
 Hezarkhani, A., 2006- Hydrothermal evolution of the Sar-Cheshmeh porphyry Cu-Mo deposit, Iran: evidence from fluid inclusions: Journal of Asian Earth Sciences, v. 28, no. 4, p. 409-422.  
 Hezarkhani, A., 2008- Hydrothermal evolution of the Miduk porphyry copper system, Kerman, Iran: a fluid inclusion investigation: International Geology Review, v. 50, no. 7, p. 665-684.  
 Hoefs, J., 2009- Stable isotope geochemistry; Sixth ed., Springer, 293p.  
 John, D. A., 2010- Porphyry copper deposit model. Scientific investigations report 2010, 5070-B. USGS.  
 Kerkhof, A. M. V. & Hein, U. F., 2001- Fluid inclusion petrography, Lithos, v. 55, p. 27-47.  
 Khashgerel, B. E., Rye, R. O., Hedenquist, J. W. & Kavalieris, I., 2006- Geology and reconnaissance stable isotope study of the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au system, South Gobi, Mongolia. Economic Geology, v. 101, no.3, p. 503-522.  
 Méheut, M., Lazzari, M., Balan, E. & Mauri, F., 2007- Equilibrium isotopic fractionation in the kaolinite, quartz, water system: Prediction from first-principles density-functional theory: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 71, no. 13, p. 1370-1381.

- Meshkani, S. A., Mehrabi, B., Yaghubpur, A. & Sadeghi, M., 2013- Recognition of the regional lineaments of Iran: Using geospatial data and their implications for exploration of metallic ore deposits: *Ore Geology Reviews* v. 55, p. 48-63.
- Ohmoto, H., 1979- Isotopes of sulfur and carbon, in Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 2<sup>nd</sup> ed.: New York, John Wiley and Sons, p.509-567.
- Pirajno, F., 2009, *Hydrothermal processing and mineral systems*, Australia, Springer, 1250 p.
- Pirajno, F., 2009- *Hydrothermal processing and mineral systems*, Australia, Springer, 1250p.
- Sheppard, S. & Gustafson, L., 1976- Oxygen and hydrogen isotopes in the porphyry copper deposit at El Salvador, Chile: *Economic Geology*, v. 71, no. 8, p.1549-1559.
- Sheppard, S. M. & Taylor, H., 1974- Hydrogen and oxygen isotope evidence for the origins of water in the Boulder batholith and the Butte ore deposits, Montana. *Economic Geology*, v. 69, no.6, p. 926-946.
- Sheppard, S. M., 1971- Hydrogen and oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposit: *Economic Geology*, v.66, p. 515-542.
- Steele-MacInnis, M. & Bodnar, R. J., 2013- Effect of the vapor phase on the salinity of halite-bearing aqueous fluid inclusions estimated from the halite dissolution temperature: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 115, p. 205-216.
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P. & Bodnar, R., 2012- Hokiefling-H<sub>2</sub>O-NaCl: A Microsoft Excel spread sheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H<sub>2</sub>O–NaCl: *Computers & Geosciences*, v. 49, p. 334-337.
- Taylor, Jr. H. P., Simon, M. F. & Sheppard, S. M., 1986- Igneous rocks; I, Processes of isotopic fractionation and isotope systematics. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, V.16.N.1 p. 227-271.
- Taylor, Jr. H. P., 1974- The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. *Economic geology*, v. 69, no 6, p. 843-883.
- Taylor, Jr. H. P., 1978- Oxygen and hydrogen isotope studies of plutonic granitic rocks: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 38, no. 1, p. 177-210.
- Taylor, Jr. H. P., 1997- Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, v.3, p.229-302.
- Valencia, V. A., Eastoe, C., Ruiz, J., Ochoa-Landin, L., Gehrels, G., González-Leon, C. & Espinoza, E., 2008- Hydrothermal evolution of the porphyry copper deposit at La Caridad, Sonora, Mexico, and the relationship with a neighboring high-sulfidation epithermal deposit. *Economic Geology*, v.103, no 3, p. 473-491.
- Watanabe, Y. & Hedenquist, J. W., 2001- Mineralogic and stable isotope zonation at the surface over the El Salvador porphyry copper deposit, Chile. *Economic Geology*, v.96, no.8, p. 1775-1797.
- Wilkinson, J. J., 2001- Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits, *Lithos*, v. 55, P. 229 -272.
- 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.
- Zolanje, S., Timotijevic, S. & Grabeljsek, V., 1972- sarduiye1:100000 scale map. Geology Survey of Iran.

# Study of Mineralizing Fluids Characterization by Use of Fluid Inclusion and Oxygen-Hydrogen Isotopes in Bondar Hanza Porphyry Copper Deposit (Southeast of Kerman)

A. Mohebi <sup>1\*</sup>, A. Hezarkhani <sup>2</sup>, M. Behzadi <sup>3</sup>, H. Mirnejad <sup>4</sup> & H. Taghi Zadeh <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Ph. D., Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University; Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Mining, Metallurgy and Petroleum Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Associate Professor, Faculty of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>5</sup> M.Sc., Exploration Management, National Iranian Copper Industries Co., Sarcheshmeh, Iran

Received: 2014 August 12

Accepted: 2014 November 17

## Abstract

Bondar Hanza porphyry copper deposit occurs 150 km southeast of Kerman, in Dehaj-Sardoieyeh zone in southern part of the Urmia-Dokhtar belt. The deposit is hosted in dioritic to granodioritic rocks. The present paper deals with the study of fluid inclusions on quartz and hornblende samples as well as the measurement of isotopic ratio of oxygen and hydrogen with the aim to recognize characterization of hydrothermal fluids effective in mineralization. The studied veinlets are divided into five groups. Veinlet I: fluid of high pressure (>300 MPa) and medium to high temperature (250°C-300°C) with salinity of 38-45 Wt%NaCl that includes molybdenum mineralization. This veinlet contains halite and anhydrite and has resulted in potassic and sodic-calcic mineralization in deeper parts of the ore deposit. Veinlet II: high pressure (>300 MPa), high salinity (33-47 Wt%NaCl) and high temperature (250°C-420°C), containing copper and molybdenum mineralization as well as potassic alteration. Veinlet III: high salinity (40-56 Wt%NaCl), high pressure (>300 MPa) and high temperature (200°C-500°C), containing copper mineralization. Veinlet IV: medium to low salinity (6-7 Wt%NaCl), medium temperature (approximately 170°C), low pressure (0/7-0/8 MPa), containing no mineralization. The study performed indicate that the boiling occurred in the initial magma, as a result of pressure and temperature changes and mixing with meteoric waters, caused copper and molybdenum mineralization. Results obtained from oxygen and hydrogen isotopic analysis in quartz show  $\delta^{18}O$  to vary from 3.9 to 6.3 per mil. Considering its formation temperature and based on thermometric study (130-400°C), the amount of  $\delta^{18}O$  in mineralizing fluid is from 5.26 to 6.19 per mil, being indicative of magmatic origin of mineralization fluids like the other porphyry copper deposits of Iran and the world. While results of hydrogen analysis existed in fluid inclusions of quartz mineral illustrate a range between -88 to -90 per mil, being indicative of a decrease in the amount of mineralizing fluid deuterium. These values are traceable to the effect of meteoric waters, given the propylitic and sodic alterations accompanied with potassic alteration in mentioned veinlet.

**Keywords:** Urmia-Dokhtar zone, Bondar hanza, Porphyry copper deposit, Fluid Inclusion, Oxygen-Hydrogen Isotopes.

For Persian Version see pages 53 to 64

\*Corresponding author: A. Mohebi; E-mail: aidamohebbi@yahoo.com