

مطالعات سنگ‌شناسی و سیالات درگیر در اندیس مولیبدن (قلع) پورفیری ماربین (شمال شرق اصفهان)

معصومه میرزایی^۱، هاشم باقری^۱ و فریمه آیتی^{۲*}

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران ۳۶۹۷ - ۱۹۳۹۵، ایران

چکیده

اندیس ماربین در شمال روستای زفره در استان اصفهان و پهنه ماگمایی ارومیه - دختر قرار دارد. واحدهای سنگی منطقه بیش‌تر سنگ‌های نیمه‌آتشفشانی و آتشفشانی ائوسن با ترکیب ریولیت تا داسیت هستند. بر اساس مطالعات پتروگرافی کانی‌های اصلی، پلاژیوکلاز، کوارتز، سانیدین و بیوتیت و کانی‌های ثانوی، کلریت، کلسیت، اپیدوت و سریسیت هستند. اصلی‌ترین دگرسانی‌های گرمایی سریسیتی، پروپلیتیک، رسی حد واسط و سیلیسی شدن است. متوسط عیار قلع، مولیبدن، مس و طلا به ترتیب ۹۸۰۷، ۲۳۶، ۶۰۷ ppm و ۱۳۷ ppb است. مطالعات ریزدماسنجی در رگه و رگچه‌های سیلیسی، نشان‌دهنده حضور ۵ نوع از میان‌بارهای سیال است که از این قرار هستند: نوع سه فاز $L+V+S \rightarrow L$ ، نوع سه فاز $L+V+S \rightarrow V$ ، نوع دو فاز $L+V \rightarrow L$ ، نوع دو فاز $V+L \rightarrow V$ ، نوع تک فاز غنی از گاز. مطالعات سیالات درگیر در رگه‌های کانه‌سازی در پهنه‌های سریسیتی و پروپلیتی، نشان‌دهنده گستره وسیع دمای همگن‌شدگی از ۲۴۵ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد و شوری از ۲۸ تا ۶۵ درصد وزنی معادل نمک طعام (NaCl) است. دما، شوری و چگالی سیالات از پهنه دگرسانی سریسیتی به پروپلیتی کاهش می‌یابد. دامنه وسیع دمای همگن‌شدن برای سیالات درگیر مطالعه‌شده در این اندیس نشان‌دهنده آمیختگی با آب‌های جوی و جوشش سیال است که از عوامل مهم در ته‌شست کانسار است. با توجه به مطالعات صحرایی، کانی‌شناختی، ژئوشیمیایی و مطالعات سیالات درگیر به دست آمده می‌توان اندیس ماربین را یک کانسار تیپ پورفیری محسوب کرد که بیش‌ترین شباهت را با سیستم‌های مولیبدن پورفیری در جهان نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پتروگرافی، کانه‌زایی مولیبدن - قلع، سیال درگیر، اندیس ماربین، پهنه ماگمایی ارومیه - دختر

مقدمه

به نام‌های بیدشک و ماربین قرار دارد و بخشی از ورقه

۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان و چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشان

را تشکیل می‌دهد (Radfar, 1998; Amidi and

محدوده اکتشافی قلع - مولیبدن ماربین در ۸۰

کیلومتری شمال شرق اصفهان و در نزدیکی دو روستا

* f.ayati@pnu.ac.ir

(Zahedi, 1983). این محدوده در عرض جغرافیایی $33^{\circ} 09' 42''$ و طول جغرافیایی $55^{\circ} 34' 52''$ است. در اندیس ماربین تا کنون فعالیت‌های اکتشافی دقیقی انجام نشده است و طی بررسی‌های انجام‌شده، گزارش‌های مورد اطمینانی که دربردارنده اطلاعاتی درباره منطقه مورد نظر باشد، دیده نشد. بنابراین، در این پژوهش مطالعات قبلی انجام شده در نزدیک‌ترین نواحی اکتشافی (مس - مولیبدن پورفیری کهنک و زفره) اندیس مذکور بررسی می‌شود.

از مهم‌ترین مطالعات قبلی انجام‌شده در منطقه زفره می‌توان به پژوهش‌هایی که Farmahini Farahani و همکاران (۲۰۰۹) در محدوده اکتشافی مس - مولیبدن پورفیری کهنک انجام داده‌اند، اشاره کرد. او در این منطقه با بررسی‌های ژئوشیمیایی خاک و نمونه‌های سنگی از رخنمون‌های منطقه، بیش‌ترین تمرکز عناصر زیر کانساری را مانند مس و مولیبدن در بخش‌های مرکزی سیستم کانه‌زایی و به استوک کوارتز موزونیت و دیوریتی متعلق می‌داند، در صورتی که بیش‌ترین میزان غلظت عناصر بالای کانساری همچون سرب، روی و نقره در قسمت‌های حاشیه‌ای و در سنگ‌های آندزیتی منطقه اتفاق افتاده است. همچنین، برای تفکیک پهنه‌های دگرسانی و مناطق مستعد کانه زایی در محدوده اکتشافی کهنک مطالعات دورسنجی را انجام داده است (Farmahini Farahani et al., 2012). او پس از مطالعات سنگ نگاری و دگرسانی در منطقه، تشکیل حجم زیاد محلول‌های گرمابی را نه تنها حاصل تفریق ماگمایی می‌داند بلکه آمیختگی ماگماهای متفاوت را در تمرکز کانه‌های مس مؤثر ذکر کرده است و افزون بر دگرسانی‌های فلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک، ساختارهای زمین شناختی و آمیختگی ماگمایی را فرایند مؤثری در تشکیل کانی سازی در منطقه بیان می‌کند (Farmahini Farahani et al., 2014). Hatami (۲۰۰۸) پتروولوژی سنگ‌های آتشفشانی و توده گرانیتویدی

کهنک، کانی سازی و به تفکیک پهنه‌های دگرسانی منطقه را بررسی کرده است.

Komeili و همکاران (۲۰۱۴) اندیس مس - مولیبدن پورفیری کهنک را از نظر پتروولوژی، ژئوشیمی و شناسایی پهنه‌ها و فرایندهای دگرسانی گرمابی و رخساره‌های دگرسانی مرتبط با کانه‌زایی بررسی کرده است. Moinifar (۲۰۱۱) در اندیس فلزی مس پورفیری زفره شناسایی و تفکیک پهنه‌های دگرسانی، مطالعات لیتوژئوشیمیایی سیستماتیک و نیز بررسی‌های ژئوفیزیکی را انجام داده است. محدوده مورد مطالعه ماربین بر پایه داده‌های ژئوشیمیایی، میان‌بارهای سیال و بررسی‌های انجام‌شده از نظر ذخیره قلع - مولیبدن و همچنین، طلا مستعد شناخته شده است. بر اساس مطالعات ژئوشیمیایی، عناصر قلع، مولیبدن، مس و طلا و عناصر همراه مانند روی، بیسموت، استرانسیوم، از مقادیر بالایی برخوردارند، به طوری که در برخی نمونه‌ها به‌نجاری نشان می‌دهند. متوسط عیار مولیبدن، قلع، مس و طلا به ترتیب ۲۲۵، ۳۸۸۱، ۳۳۰ ppm و ۸۲ ppb است (Mirzaei et al., 2015).

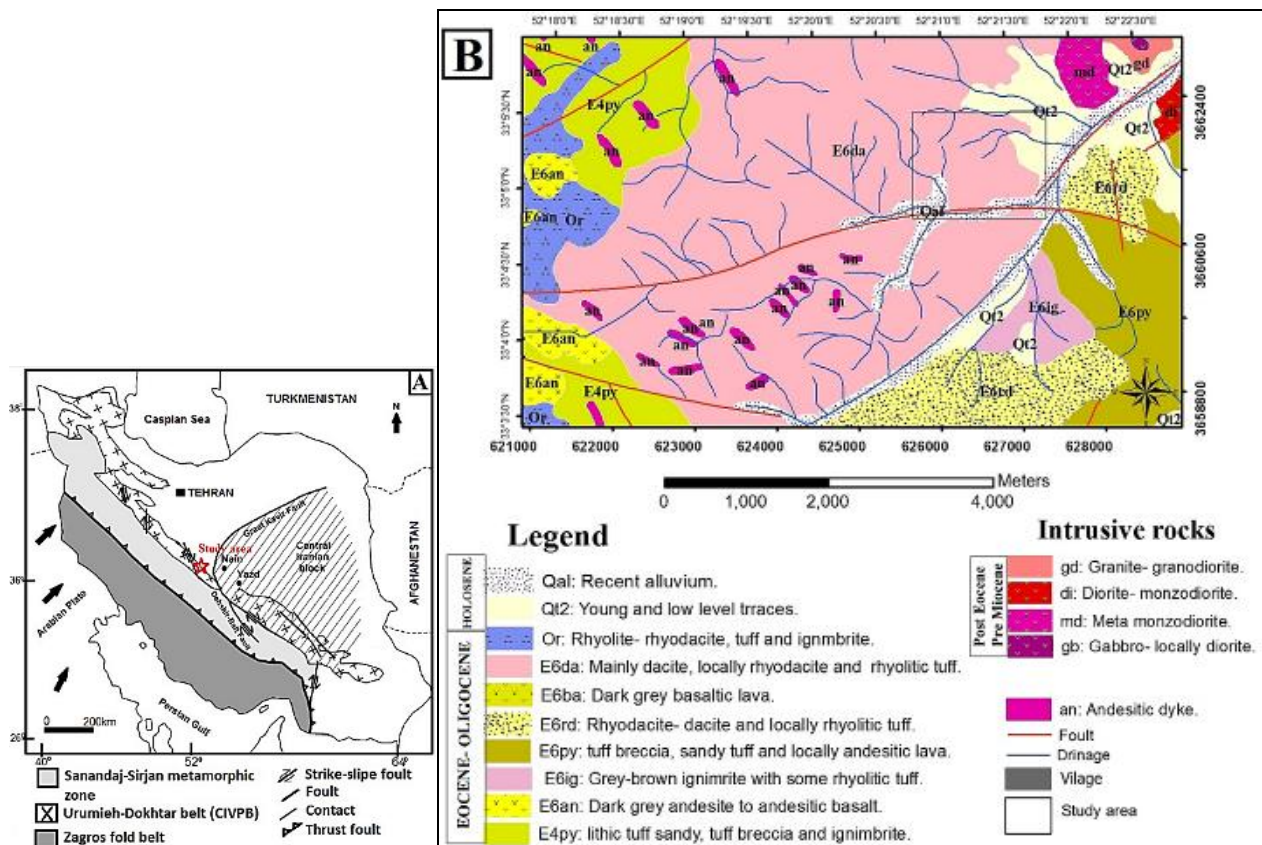
بنابراین، هدف از مطالعات پتروگرافی و میان‌بارهای سیال در این مقاله تعیین نوع کانی سازی و بررسی تحول سیالات گرمابی در رگه‌های سیلیسی پهنه‌های مختلف دگرسانی - کانی سازی، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز و تعیین شرایط سیال در زمان و مکان همگام با نهشت مواد معدنی منطقه اکتشافی ماربین و در نهایت تخمین تیپ کانی سازی با میان‌بارهای سیال است.

زمین‌شناسی منطقه

از نظر زمین‌شناسی ساختاری، اندیس ماربین روی پهنه ماگمایی ارومیه - دختر قرار دارد (Aghanabati, ۲۰۰۸).

اندیس ماربین از لحاظ جغرافیایی در بخش شرقی قسمت مرکزی گسل زفره با روند شمال غربی - جنوب شرقی قرار دارد. از لحاظ زمین‌شناسی منطقه‌ای سنگ‌های موجود در محدوده ماربین و بخش‌های حاشیه‌ای آن بیش‌تر از سنگ‌های آذرین بیرونی ائوسن شامل ریولیت و توف ریولیتی، داسیت و ریوداسیت، برش‌های گرمایی، دایک‌های آندزیتی و آبرفت‌های عهد حاضر تشکیل شده‌اند (شکل ۱- B).

(شکل ۱- A). این کمربند، شاهد تکاپوی ماگمایی گسترده‌ای در سنوزوییک بوده است که به‌ویژه در ائوسن، شدت بیش‌تری داشته است و تا پلیوسن و کواترنری نیز ادامه داشته است. سنگ‌های آذرین درونی، بیرونی و آذرآوری با طبیعت کالک‌آلکان، آلکان و حتی شوشونیتی در این پهنه رخنمون دارند (Amidi, 1977; Alavi, 1994; Hassanzadeh, 1993).



شکل ۱- A) موقعیت پهنه ماگمایی ارومیه - دختر در ایران و موقعیت اندیس ماربین (شمال شرق اصفهان) روی آن (Zarasvandi et al., 2005)؛ B) نقشه زمین‌شناسی منطقه ماربین که از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان اقتباس شده است (Radfar, 1998).

تفریق سیالات گرمایی و ایجاد شکستگی و درزه در سنگ‌های آتشفشانی است که از جوشش سیال گرمایی ایجاد شده است. در ادامه با نفوذ سیالات کانه‌زا در داخل درز و شکاف‌های واحدهای داسیت

به‌طور کلی در اندیس ماربین یک سیستم کانی‌زایی به‌صورت استوکورکی و رگه‌ای سیلیسی دیده می‌شود که در سنگ‌های ریوداسیتی نفوذ کرده است (شکل ۲). کانی‌زایی احتمالاً بر اثر

رگه ای که هوازده شده اند و اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن را تشکیل داده اند، مشخص می شود. این دگرسانی ها به طرف حاشیه منطقه کانی زایی به دگرسانی های پروپیلیتی و به مقدار کم تر آرژیلی تبدیل می شود. سیلیسی شدن نیز به صورت رگه و رگچه ای در پهنه دگرسانی فیلیک و مناطق دربردارنده کانی زایی رایج است. در شکل ۴ نمایی از منطقه کانی زایی دیده می شود.



شکل ۳- توده ریوداسیتی برشی شده در منطقه ماربین (شمال شرق اصفهان).

- ریوداسیت نهشت میزان کمی از فلزات ابتدا به صورت افشان و در ادامه به صورت رگه - رگچه ای رخ داده است. همچنین، نفوذ محلول های گرمابی کانه دار در سنگ های آتشفشانی منطقه موجب خرد شدن آن ها و ایجاد برش های گرمابی دارای کانی زایی شده است (شکل ۳).

دگرسانی های گرمابی موجود در اندیس ماربین شامل دگرسانی فیلیک مرکزی است که با حضور مجموعه کانیایی کوارتز، سولفیدها و پیریت های افشان و



شکل ۲- رگه - رگچه ها و کانی زایی استوکورکی سیلیسی در منطقه ماربین (شمال شرق اصفهان).



شکل ۴- نمایی از واحدهای نیمه آتشفشانی داسیت - ریوداسیت (E_6^{da}) و موقعیت تقریبی پهنه دگرسان شده اصلی (Altered zon) در تماس با آبرفت های عهد حاضر (Q^{al}) در اندیس ماربین (شمال شرق اصفهان) (دید به سمت شمال غرب).

روش انجام پژوهش

بررسی های صحرایی و سنگ شناسی با انتخاب رخنمون های مناسب از سنگ های آتشفشانی میزبان و دارای کانی زایی برای نمونه برداری آغاز شد. پس از انتخاب

نمونه های مناسب، ۱۳ مقطع نازک و نازک صیقلی برای بررسی های میکروسکوپی تهیه شد. مطالعات سنگ نگاری با میکروسکوپ پلاریزان Olympus مدل BH-2 ساخت کشور ژاپن انجام شد. برای تعیین نوع سیالات گرمابی

(شکل ۵- B).

هم‌چنین، رگچه‌هایی از اپیدوت، کلریت و سیریسیت ثانوی حاصل از دگرسانی، درشت بلورهای کوارتز را قطع کرده‌اند (شکل ۵- C). کوارتز در زمینه ریزدانه فلسیتی به میزان فراوان و گاهی به صورت درشت بلورهای بی‌شکل با حاشیه خلیج خورده و خاموشی موجی در متن سنگ دیده می‌شود (شکل ۵- D). خوردگی خلیجی کوارتز می‌تواند به علت تغییرات فشار بر اثر صعود سریع ماگما حاصل شود و یا نتیجه رشد ناپایدار اولی باشد (Shelley, 1993).

در مقاطع ریولیت - داسیت نیز کانی‌های پلاژیوکلاز، ارتوکلاز (از نوع سانیدین)، کوارتزهای خلیجی و خردشده، فنوکریست‌های اصلی هستند (شکل ۶- A). از کانی‌های فرعی می‌توان به کلریت که ناشی از تجزیه و دگرسانی کانی‌های فرومنیزین (احتمالاً بیوتیت) است، اشاره کرد (شکل ۶- B).

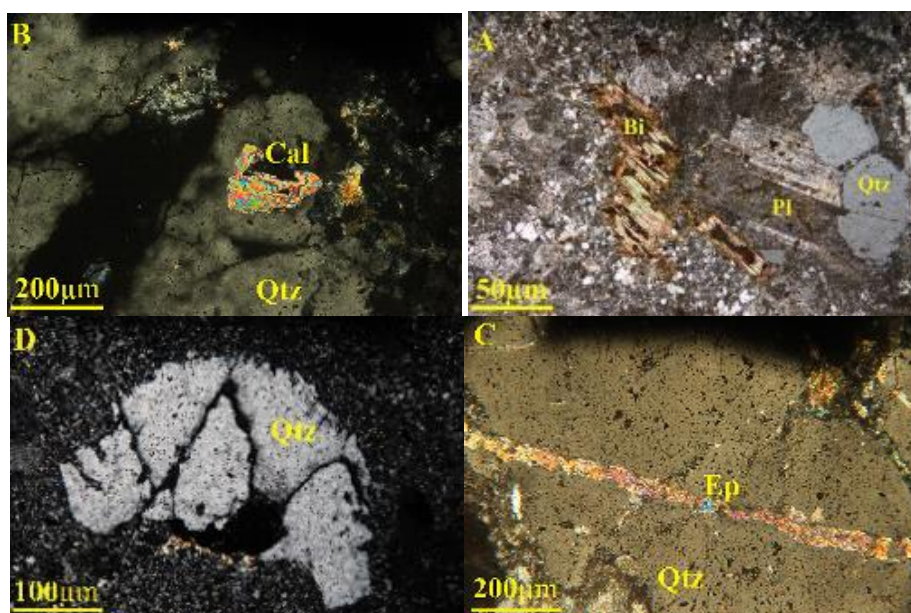
بافت سنگ فلسوفیریک و زمینه ریزدانه، کوارتز - فلدسپاری است که رگچه‌هایی از کوارتزهای گرمابی در آن نفوذ کرده است. پیریت نیز به صورت بلورهای شکل دار و نیمه شکل دار به صورت پراکنده و تجمعی در متن سنگ وجود دارد. تجزیه و تبدیل بلورهای پیریت موجود در این نمونه‌ها به اکسیدهای آبدار آهن موجب ایجاد رنگ قهوه‌ای در قالب پیریت‌ها شده است (شکل ۶- B).

مقاطع نازک و صیقلی برش‌های گرمابی منطقه دربردارنده بلورهای تخریبی کوارتزهای زاویه دار و سنگ ریوداسیتی است که همه فضای بین قطعات برشی با رگه - رگچه‌ای هماتیت گاه به صورت کلوفرمی پر شده است. هم‌چنین، اکسیدهای آهن به صورت پراکنده نیز در متن سنگ دیده می‌شود. بافت سنگ خرد شده موزاییکی است و با توجه به این که نمونه‌ها سطحی هستند، بیش‌ترین بخش اکسیدهای آهن مشاهده شده در بین قطعات خردشده حاصل هوازدگی است (شکل‌های ۷- A و B).

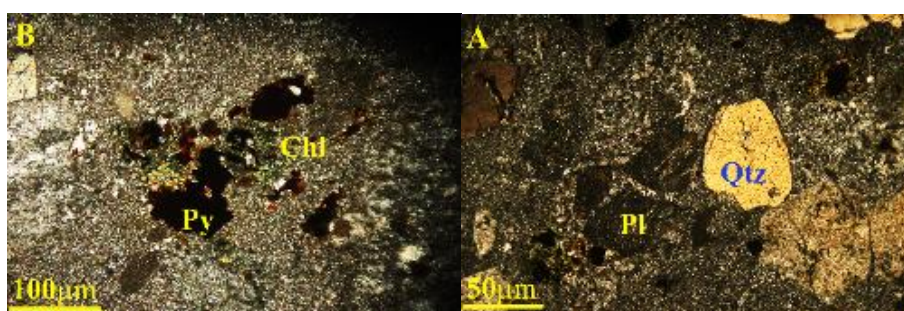
موجود در منطقه، تعداد ۶ مقطع دو بر صیقل نیز از رگه - رگچه‌های استوک ورکی سیلیسی و رگه‌های سیلیسی دارای کانه زایی برای مطالعات سیالات درگیر تهیه شد. در منطقه ماربین، رگه‌های گرمابی کوارتزی و کلسیتی دارنده کانه‌زایی سولفیدی و اکسیدی، مناسب‌ترین سیالات درگیر را برای مطالعات ریزدماسنجی دارند. بنابراین، پس از انتخاب نمونه‌های مناسب از پهنه‌های مختلف دگرسانی - کانی‌سازی از محل رگه‌های سیلیسی، مطالعات سرمایشی و گرمایشی با دستگاه سیالات درگیر ساخت شرکت Linkam مدل THM600 انجام شد. این دستگاه، کنترل کننده حرارتی TMS-92 و سردکننده نوع LNP دارد و با میکروسکوپ تحقیقاتی ZIESS ساخت کشور آلمان مجهز شده است. برای سرمایش میان بارهای مورد مطالعه از نیتروژن مایع استفاده شد. بررسی‌های ریزدماسنجی در مجموع، روی ۶۱ عدد میان بار سیال صورت انجام شد.

سنگ‌نگاری

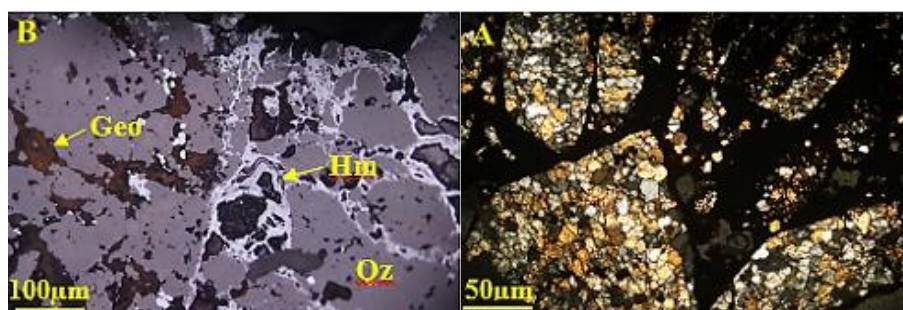
واحدهای سنگی دربردارنده کانی‌زایی در منطقه، سنگ‌های نیمه آتشفشانی ریوداسیت و ریولیت - داسیت سبز رنگ مربوط به زمان ائوسن را شامل می‌شوند که محلول‌های گرمابی حاصل از تفریق ماگما به آنها هجوم آورده‌اند و دگرسانی‌های متفاوتی در آنها رخ داده است. در نمونه‌های ریوداسیتی که سنگ میزبان کانی‌زایی هستند، درشت بلورهای اصلی شامل پلاژیوکلازهای مستطیلی شکل با ماکل پلی سنتتیک، کوارتزهای خردشده و خلیجی و بیوتیت با رخ یک طرفه که در جهت رخ آن اکسیدهای آهن آزاد شده‌اند و به مقدار جزیی تر ارتوکلاز و کانی‌های فرومنیزین آبدار که کاملاً دگرسان شده‌اند، دیده می‌شوند. بافت غالب سنگ، فلسوفیری (شکل ۵- A) و زمینه سنگ کوارتز - فلدسپاری است. کربنات‌های ثانوی حاصل از دگرسانی پلاژیوکلازها نیز به مقدار کم به صورت پراکنده در داخل شکستگی‌های درشت بلورها در متن سنگ دیده می‌شود.



شکل ۵- تصویرهای میکروسکوپی از سنگ‌های ریوداستی ماربین (شمال شرق اصفهان): (A) زمینه کوارتز فلدسپاری ریزدانه با بافت فلسوفیری؛ (B) تشکیل کربنات‌های حاصل از تجزیه پلاژیوکلازها در شکستگی‌های کوارتزهای درشت‌بلور؛ (C) رگچه‌های اپیدوت که کوارتزهای درشت‌بلور را قطع کرده‌اند؛ (D) درشت‌بلور کوارتز با حاشیه خلیجی در یک زمینه دانه ریز. همه تصویرها در نور XPL (cross polarized light) گرفته شده‌اند (Bi: بیوتیت، Cal: کلسیت، Qtz: کوارتز، Ep: اپیدوت، Pl: پلاژیوکلاز).



شکل ۶- مقاطع میکروسکوپی از سنگ‌های ریوداستی ماربین (شمال شرق اصفهان): (A) بافت فلسوفیریک به همراه قالب مکعبی پیریت‌های اکسید شده؛ (B) پیریت‌های نیمه‌شکل اکسید شده به همراه کلریت‌های ثانوی ناشی از تجزیه و هوازدگی کانی‌های فرومنیزین موجود در متن سنگ (تصاویر در نور XPL)، (Chl: کلریت، Py: پیریت، Pl: پلاژیوکلاز، Qtz: کوارتز).



شکل ۷- مقطع نازک سنگ‌های ریوداستی ماربین (شمال شرق اصفهان): (A) برش گرمایی، قطعات کوارتز در زمینه با اکسیدهای آهن حاصل از هوازدگی؛ (B) مقطع صیقلی برش گرمایی دربردارنده کوارتزهای خرد شده به همراه هماتیت و گوئیتیت (در نور XPL)، (Goe: گوئیتیت، Hm: هماتیت).

مطالعه میان‌بارهای سیال

سنگ‌نگاری میان‌بارهای سیال: میان‌بارهای مطالعه‌شده از رگه - رگچه‌های استوک ورکی سیلیسی و رگه‌های دارنده کانه‌زایی سولفیدی پهنه دگرسانی سربستی و پروپیلیتی انتخاب شدند که در منطقه فراوان یافت می‌شوند. سیال‌های درگیر در این نمونه‌ها به صورت میان‌بارهای پراکنده و جدا از هم (اولی) و نیز در امتداد شکستگی‌ها (ثانوی) وجود دارند که برای مطالعات زمین‌دماسنجی از سیالات درگیر اولی استفاده شد؛ زیرا سیالات ثانوی هیچ اطلاعاتی از ماهیت سیال در زمان تشکیل سیال ندارند.

مطالعه پتروگرافی و دما فشارسنجی انجام‌شده در سیالات درگیر موجود در بلورهای کوارتز به تفکیک ۵ نوع سیال درگیر به شرح ذیل منجر شده است (شکل ۸).

نوع A، سیالات درگیر سه فاز همگن‌شده به فاز بخار ($L+V+S \rightarrow V$): در این نوع از سیالات درگیر، بعضی از کانی‌های اوپاک و بلور نمک به صورت کانی دختر دیده می‌شوند. بلور هالیت در بیش‌تر نمونه‌ها در اشکال مستطیلی مشاهده می‌شود. اندازه میان‌بارها اغلب حدود ۱۰ میکرون است و شکل چند ضلعی دارد.

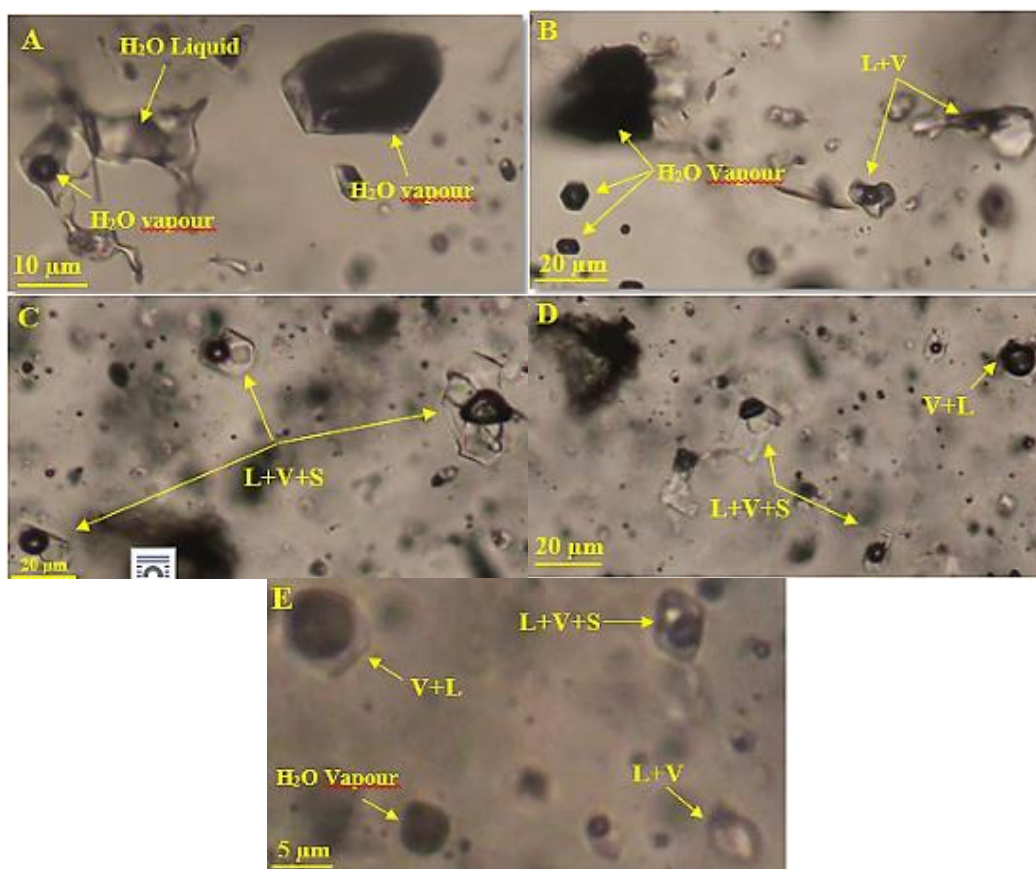
نوع B، سیالات درگیر سه مرحله که به فاز مایع همگن می‌شوند ($L+V+S \rightarrow L$): در این نوع از سیالات، بیش‌ترین حجم سیال را فاز مایع فراگرفته است و بلور هالیت و گاز به نسبت حجمی کم تر هستند. گاهی به جز هالیت، نمک سیلویت نیز این اذخال‌ها را همراهی می‌کند. این میان‌بارها به شکل چندضلعی و مستطیلی دیده می‌شوند، اندازه میان‌بارها از ۶-۲۰ میکرون متغیر است و اغلب در حدود ۱۰ میکرون مشاهده می‌شوند. این سیالات، بیش‌ترین نوع سیال درگیر مطالعه‌شده در نمونه‌ها را شامل می‌شوند.

نوع C، سیالات درگیر دو فاز همگن‌شده به فاز مایع ($L+V \rightarrow L$): در این نوع سیال درگیر، فاز مایع همراه با فاز حباب گاز وجود دارد. بیش‌ترین حجم سیال درگیر را فاز مایع دربرمی‌گیرد و فاز گازی تنها ۱۰ تا ۳۵ درصد حجم سیالات درگیر مطالعه‌شده را پر کرده و به شکل‌های کروی، بیضوی و مربعی و در اندازه متوسط ۱۲ میکرون یافت می‌شوند.

نوع D، سیالات درگیر دو فاز غنی از گاز که به فاز بخار همگن می‌شوند ($V+L \rightarrow V$): در این نوع از سیالات، حباب گاز بیش‌ترین حجم سیال را (بیش از ۷۰ درصد) پر کرده و به شکل کروی با اندازه متوسط ۱۰ میکرون است.

نوع E، سیالات درگیر تک فاز (V): در این نوع از سیالات کروی‌شکل حباب گاز بیش از ۹۵ درصد از حجم سیال را پر کرده است و امکان مشاهده فاز مایع وجود ندارد. اندازه متوسط اذخال‌ها ۷ میکرون است. از این نوع سیالات نمی‌توان برای اندازه‌گیری دما فشارسنجی استفاده کرد، اما حضور این سیالات به همراه سیالات درگیر غنی از مایع و سه فازی دارنده بلور نمک نشان دهنده رخداد جوشش در محلول گرمایی است.

ریز دماسنجی: در مورد سیستم‌های آبگین آب - نمک، مطالعات انجماد بهترین روش برای تعیین شوری میان‌بارهای آبگین است؛ زیرا کاهش نقطه انجماد آب خالص، رابطه مستقیم با نمک موجود در محلول دارد. این کار با اندازه‌گیری دمای ذوب نهایی یخ (T_{LM}) در هنگام حرارت‌دادن مجدد میان‌بارهایی که قبلاً منجمد شده‌اند، انجام می‌شود (Potter et al., 1978). دمای یوتکتیک (T_e)، دمای مربوط به زمانی است که نخستین قطره مایع پدید می‌آید و مقدار آن به میزان و نوع کاتیون‌های حل‌شده در سیال وابسته است.



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی از میان بارهای سیال موجود در رگه ها و رگچه های درون سنگ های ریوداستی ماربین (شمال شرق اصفهان). (A) میان بارهای تک فاز گاز به همراه دو فاز غنی از مایع H_2O ; (B) میان بار تک فاز گاز به همراه میان بارهای دو فاز؛ (C) میان بارهای سه فاز با شکل منظم؛ (D) میان بارهای دو فاز غنی از گاز H_2O و سه فاز مستطیلی شکل؛ (E) همیافتی میان بارهای سه فاز دارنده بلور نمک، تک فاز گاز و غنی از مایع نشان دهنده جوشش سیالات گرمایی.

بیش ترین بازه شوری ۴۰ تا ۵۰ درصد وزنی است و برای میان بارهای دو فاز حدود ۱ درصد وزنی اندازه گیری شد (جدول ۱). با توجه به دمای نقطه یوتکتیک $NaCl$ ، دمای نقطه اوتکتیک سیال های درگیر منطقه در میان بارها تا $-37/5$ درجه سانتیگراد متغیر است (جدول ۱). بر اساس داده های فاز منتهی برای سیستم های نمک - آب رایج در میان بارهای سیال آبگین (Borisenko, 1977 Crawford, 1981) می توان نتیجه گرفت که علاوه بر نمک های اصلی Na^+ دار کاتیون های نمک های دیگری مانند Mg^{2+} ، Fe^{2+} و K^+ در محلول گرمایی وجود دارد. در مطالعات میان بارهای سیال، هدف نهایی مطالعات حرارت دهی، اندازه گیری دمای نهایی همگن شدن است. عموماً این همان دمای کل

نقطه یوتکتیک برای سیستم خالص تشکیل شده از $NaCl+H_2O$ معادل $-20.8^{\circ}C$ است (William-Jones et al., 1992). برای به دست آوردن شوری سیالات مورد مطالعه به علت حضور بلور نمک به صورت فاز جامد از دمای انحلال فاز جامد (T_s) برای تعیین شوری استفاده شد. به علاوه با استفاده از سرمایش میان بارها نیز تعداد کمی از میان بارهای دو فاز دمای ذوب نهایی یخ (T_{LM}) اندازه گیری و سپس داده های به دست آمده از انحلال بلور نمک و ذوب یخ با استفاده از نمودارهای ($Hall et al., 1988$) برای میان بارهای دو فاز و سه فاز به صورت درصد وزنی معادل نمک $NaCl$ محاسبه شد. میزان شوری به دست آمده برای میان بارهای سه فاز، ۲۸ تا ۶۵ درصد وزنی نمک به دست آمد که

همگن‌شدن مایع - بخار است (T_H)، اما برای میان‌بارهای دارنده کانی نوزاد، می‌تواند دمای انحلال نمک نیز باشد (T_S). البته دمای همگن‌شدن برابر دمای به‌دام‌افتادن سیال (T_t) در زمان تشکیل نیست و بنابراین، برای به‌دست‌آوردن دمای واقعی به‌دام‌افتادن میان‌بارهای سیال باید تصحیح عوامل فشار، چگالی و ترکیب محلول را انجام داد. با وجود این در این مطالعه دماهای به‌دست‌آمده از گرمایش، برابر کم‌ترین دمای تشکیل سیال کانه‌ساز محسوب شده است. دمای همگن‌شدن برای میان‌بارهای سه‌فازی دارنده بلور نمک

از ۲۵۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد و برای میان‌بارهای دو‌فازی از ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد به‌دست آمد (جدول ۱). در شکل ۹ فراوانی درجه همگن‌شدن سیالات درگیر در نمونه‌های دو‌فازی و سه‌فازی سیالات منطقه آمده است. با توجه به (T_H) سیالات، می‌توان گفت که کانه‌زایی اصلی در دو فاز دمایی انجام شده است. با توجه به شکل ۹، سیالات دو‌فازی غنی از مایع نیز در محدوده دمایی پایین تری نسبت به سیالات دو فاز غنی از گاز و سه فاز دارای بلور نمک همگن شده‌اند.

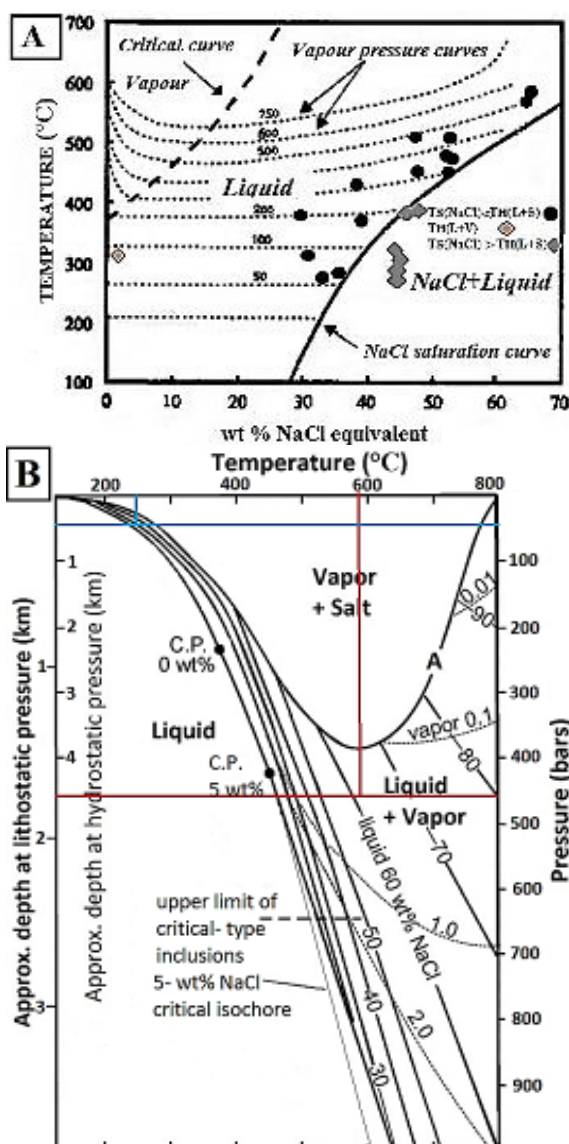
جدول ۱- داده‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال. N: تعداد نمونه‌ها، T_{ice} : دمای انجماد سیال، T_{lmice} : دمای ذوب نهایی یخ، T_H : دمای همگن‌شدن نهایی، T_{Halite} : دمای ذوب نمک.

Sample code.	Number	T_{ice} (°C)	T_{lmice} (°C)	T_H (°C)	Type of homogenization	T_{Halite} (°C)	Salinity NaCl eq. %	Size (μ)	توضیح
Z ₅	2	-	-0.5	307	L+V→L	-	0.9	12	رگه - رگچه‌های استوک ورکی کوارتز از پهنه سربستی با مشاهدۀ پدیدۀ جوشن سیالات
Z ₅	1	-	-	248	L+V→L	-	-	12	
Z ₅	1	-	-	256	L+V→L	-	-	12	
Z ₅	2	-	-	274	L+V+S→L	251	%35	10	
Z ₅	1	-	-	352	L+V+S→L	382	%44	10	
Z ₅	3	-	-	372	L+V+S→L	$T_{S1}=115 T_{S2}=380$	%28%44	20	
Z ₅	3	-	-	310	L+V+S→L	$T_{S1}=140 T_{S2}=370$	%29%44	10	
Z ₅	2	-	-	>500	L+V+S→L	400	%46	10	
Z ₅	2	-	-	452	L+V+S→L	409	%47	10	
Z ₅	5	-	-	>500	L+V+S→V	-	-	-	
Z ₃	3	-	-	330	L+V+S→L	378	%44	15	کوارتز رگه‌ای از پهنه سربستی دارای پدیدۀ جوشن
Z ₃	3	-	-	445	L+V+S→L	298	%37.5	10	
Z ₃	2	-	-	385	L+V+S→L	322	%39	10	
Z ₃	2	-	-	380	L+V+S→L	-	-	10	
Z ₃	10	-	-	>500	L+V→?	-	-	10	
Z ₂	1	-	-	290	L+V+S→L	174	%31	10	کوارتز توده‌ای از پهنه سربستی
Z ₂	3	-	-	454	L+V+S→L	445	%51	7	
Z ₂	1	-	-	501	L+V+S→L	450	%51	8	
Z ₂	1	-	-	456	L+V+S→L	447	%51	8	
Z ₂	1	-	-	459	L+V+S→L	448	%51	7	
Z ₂	2	-	-	580	L+V+S→L	576	%65	6	
Z ₂	1	-	-	600	L+V+S→L	-	-	7	
Z ₂	-	-	-	575	L+V+S→L	562	%64	6	
Z ₂	-	-	-	600	L+V→V	-	-	6	
Z ₁₇	2	-	-	287	L+V+S→L	-	-	20	کوارتز توده‌ای از پهنه پروپیلیتی با رخداد پدیدۀ جوشن؟
Z ₁₇	3	-	-	285	L+V+S→L	375	%44	15	
Z ₁₇	2	-	-	354	L+V+ S→V	-	-	20	
Z ₁₇	1	-	-	287	L+V+S→L	376	%44	15	

۱ تا ۱/۱ و میان‌بارهایی که $T_H > T_S NaCl$ است، ۰/۸۵ تا ۱/۰۸ به‌دست آمد (شکل ۱۰). این نمودار گویای شوری بالای محلول‌های گرمایی است.

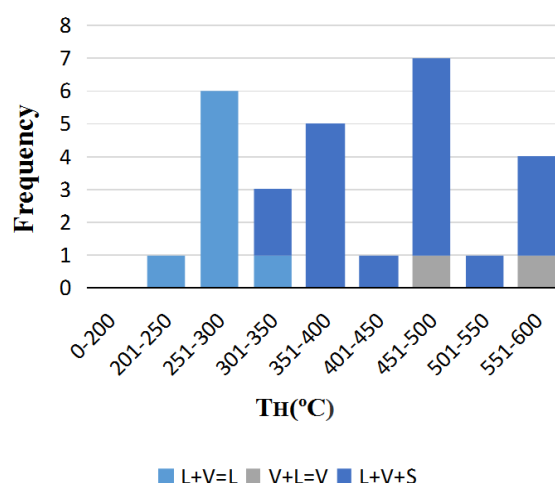
چگالی سیالات درگیر نیز با استفاده از نمودار (Wilkinson, 2001) اندازه‌گیری شد. چگالی سیالاتی که روند همگن‌شدن در آنها به‌صورت $T_S NaCl > T_H$ است، حدود gr/cm^3

سپس فازهای جامد، همگن شده‌اند.

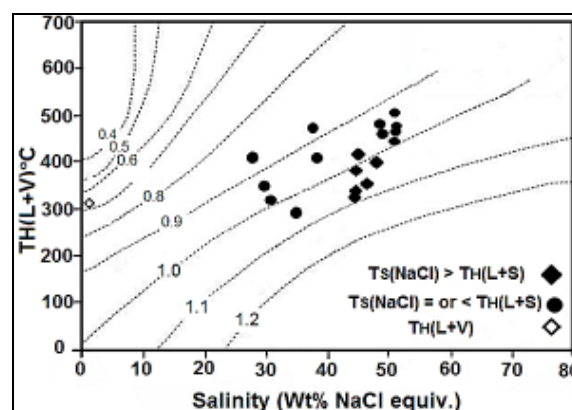


شکل ۱۱- A) نمودار معادل درصد وزنی نمک طعام در مقابل دمای همگن شدن، خط چین‌های افقی نشان‌دهنده فشار بخار محلول سدیم کلرید در درجه حرارت مربوط است (Chou, 1978)، نمودار تعیین فشار - عمق برای سیستم NaCl-H₂O سیالات درگیر (Fournier, 1999) بر اساس داده‌های دمای همگن‌شدگی و شوری.

اختلاف دمای میان ناپدیدشدن حباب گاز و انحلال نهایی بلور نمک، فشار نسبی سیستم را منعکس می‌کند. اگر اختلاف دما بین T_H و T_S کم باشد، سیال درگیر می‌تواند در هر شرایطی از فشار

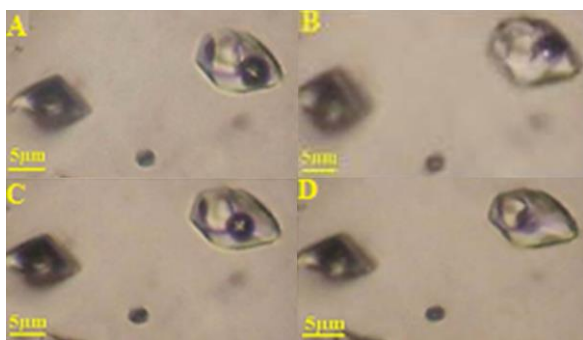


شکل ۹- هیستوگرام فراوانی داده‌های حاصل از دمای همگن‌شدن سیالات درگیر در اندیس ماربین (شمال شرق اصفهان) نسبت به سیالات دو فاز و سه فاز بر حسب درجه سانتیگراد.



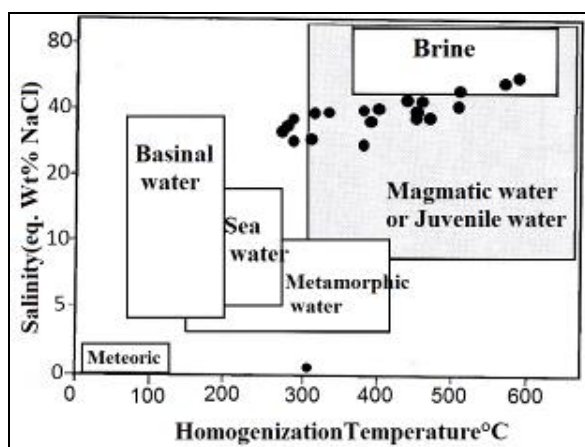
شکل ۱۰- نمایش داده‌های منطقه سنگ‌های ریوداستی ماربین (شمال شرق اصفهان) در نمودار شوری - درجه یکنواختی سیال درگیر برای تعیین چگالی (Wilkinson, 2001).

تحول سیال کانه‌ساز و تعیین فشار، عمق و نوع کانی‌زایی: فشار و عمق تشکیل سیالات گرمابی را با توجه به دمای همگن‌سازی و شوری محاسبه‌شده، می‌توان مشخص کرد (شکل‌های ۱۱- A و B). همان طور که در شکل مشخص شده است، میان بارهای غنی از فاز جامد منطقه که بالای منحنی اشباع نمک طعام (NaCl) قرار گرفته اند، فاز جامد قبل از فاز گاز همگن شده است ($T_H > T_S(\text{NaCl})$) ولی در نمونه‌هایی که در زیر منحنی قرار می‌گیرند ($T_S(\text{NaCl}) > T_H$)، ابتدا فاز گاز و



شکل ۱۲- روند همگن‌شدگی سیالات با $(T_S NaCl > T_H)$ در سیالات درگیر موجود در رگه‌های سیلیسی منطقه ماربین (شمال شرق اصفهان).

با استفاده از نمودار دوتایی میزان شوری و درجه شدگی (شکل ۱۳) می‌توان خاستگاه سیال کانسار ساز را پیش‌بینی کرد، اگرچه انجام مطالعات ایزوتوپی دقیق نیز برای اثبات این امر مفید است. با توجه به شکل ۱۳ تمرکز اغلب میان‌بارهای سیال اندیس ماربین در محدوده آب‌های ماگمایی است.

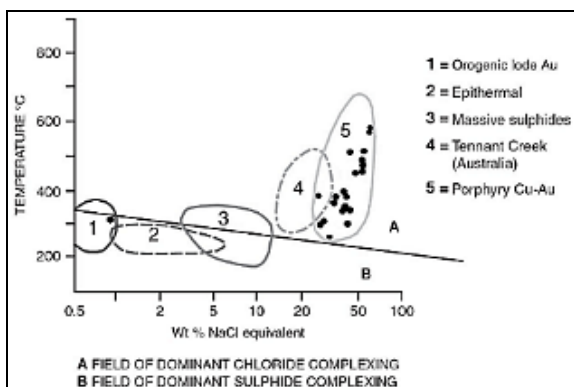


شکل ۱۳- تعیین خاستگاه سیال کانسار ساز با استفاده از میزان شوری نسبت به دمای همگن‌شدن (Kesler, 2005).

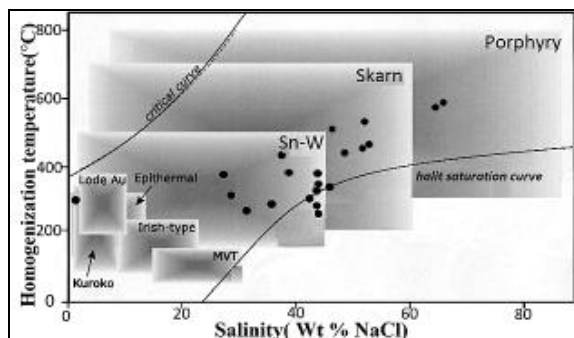
بر اساس شکل ۱۴ سیال ماگمایی - گرمابی روند خطی مشخصی را به طرف مناطق کم عمق و به سمت محدوده های دما و شوری پایین تری که حاصل از آمیختگی با آب های سرد و رقیق سطحی و نیز جوشش سیال است، نشان می دهد. با توجه به مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی تشکیل

به دام افتاده باشد، اما اگر این اختلاف دما چشمگیر باشد، سیال درگیر نمی‌توانسته است در فشار پایین به دام افتاده باشد. سیالات با روند $T_S NaCl > T_H$ نشان‌دهنده بالاتر بودن فشار به صورت محلی و موقتی نسبت به سیالات با روند $T_H > T_S NaCl$ هستند (Chivas and Wilkins, 1977; Hezarkhani and Williams-Jones, 1998). در شکل ۱۲ روند همگن‌شدن سیالاتی که در آنها $T_S NaCl > T_H$ است، نشان داده شده است. در مبحث تخمین فشار نیز فشار بخار سیالات اندازه‌گیری شده با استناد بر شکل ۱۱: A از ۵۰۰ تا ۵۰ بار است. شایان ذکر است، حداقل فشاری (لیتواستاتیک) که یک سیال می‌تواند تحمل کند برابر فشار بخار آن در هر دما و ترکیب معین است. اگر فشار به کم تر از این مقدار افت کند، مایع خواهد جوشید (Shepherd et al., 1985). این کار بر اثر خروج ناگهانی سیالات و کاهش فشار محصور کننده سیالات گرمابی (بر اثر ایجاد درزه و شکستگی) رخ می‌دهد که در نهایت به افزایش شوری و به دنبال آن کاهش دمای سیالات منجر شده است. بنابراین، از آن جا که در پدیده جوشش، سیالات در امتداد منحنی جوشش به دام می‌افتند، تصحیح فشار لازم نیست و دمای همگن‌شدن، همان دمای به دام افتادن سیال درگیر است (Roedder and Bodnar, 1980). به علت وجود شواهد جوشش (میان بارهای تک فازی و سه فازی در کنار هم) در سیالات درگیر منطقه می‌توان جوشش سیال را صحیح دانست. ب

یش‌ترین و کم‌ترین فشار لیتواستاتیک برای سیالات درگیر سه فازی منطقه به ترتیب حدود ۴۵۰ و ۵۰ بار به دست آمد. هم‌چنین، حداکثر عمق کانی‌زایی بر اساس فشار لیتواستاتیک و هیدرواستاتیک به ترتیب ۱/۷ و ۵ کیلومتر تخمین زده شد (شکل ۱۱ - B).



شکل ۱۵- حوضه‌های دما - شوری و منحنی تغییرات میانگین برای محدوده‌ای از سیستم‌های کانه‌زایی گرمابی (Large et al., 1988) و نمایش داده‌های مطالعه‌شده از اندیس ماربین (شمال شرق اصفهان).

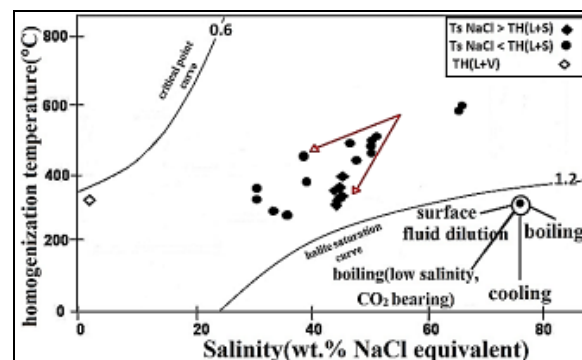


شکل ۱۶- نمودار دمای همگن‌شدن در مقابل شوری در کانسارهای مختلف (Wilkinson, 2001) و بررسی نمونه‌های اندیس ماربین (شمال شرق اصفهان).

بحث و نتیجه‌گیری

اندیس ماربین در شمال شرق اصفهان و در بخش مرکزی پهنه ماگمایی ارومیه - دختر قرار دارد. از لحاظ زمین‌شناسی، قدیمی‌ترین سنگ‌هایی که در محدوده ماربین رخمون دارند، سنگ‌های آذرین آتشفشانی و نیمه‌آتشفشانی ائوسن هستند. این سنگ‌ها واحدهای داسیت تا ریولیت با روند شمال غربی - جنوب شرقی را شامل می‌شوند که با آبرفت‌های عهد حاضر در تماس هستند. مهم‌ترین دگرسانی‌های گرمابی یادشده در رخمون منطقه با گسترش تقریبی ۱ کیلومتر مربع، دگرسانی‌های سریسیتی، پروپیلیتی، سیلیسی و دگرسانی آرژیلی به مقدار محدودتر

مرحله‌های سولفیدی و اکسیدی به صورت افشان و در ادامه تحولات سیال گرمابی نهشت مرحله‌های سولفیدی به صورت رگه و رگچه به همراه کوارتز گرمابی رخ داده است.



شکل ۱۴- نمودار شوری - درجه همگن‌شدگی سیالات درگیر (Wilkinson, 2001). منحنی نقطه بحرانی و اشباع نمک نشان‌دهنده چگالی سیالات درگیر است.

طبق نمودار ۱۵ و حضور میان‌بارهای سه فاز دارنده بلور جامد و با توجه به بالابودن دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال، کمپلکس اصلی حمل‌کننده عناصری هم‌چون مس، طلا، مولیبدن و قلع را می‌توان کمپلکس‌های کلریدی دانست.

بر اساس مقایسه نمودار ۱۶ و دماها و شوری‌های به دست آمده از سیالات ناحیه، اندیس ماربین جزو ذخایر پورفیری است. در حال حاضر مشخص شده است که ویژگی‌های کانسارهای پورفیری از ماگمایی تا گرمابی متغیر است. مطالعات سیالات درگیر در این کانسارها نشان‌دهنده متغیر بودن درجه حرارت یکنواختی از ۲۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد است (McMillan and Panteleyev, 1988).

بنابراین، با در نظر گرفتن شرایط فیزیکوشیمیایی سیالات گرمابی در کانسارهای پورفیری، قرار گرفتن اندیس ماربین در ذخایر پورفیری دور از انتظار نیست.

بیشینه فشار لیتواستاتیک نیز ۴۵۰ بار اندازه‌گیری شد. بیشینه عمق کانی‌زایی بر اساس فشار لیتواستاتیک نسبت به سطح دیرینه ۱۷۰۰ متر محاسبه شد که مشابه با کانسارهای دیگر پورفیری ایران روی پهنه ماگمایی ارومیه - دختر است (Azadi et al., 2014; Hezarkhani, 2006).

دمای همگن‌شدگی و شوری بالا می‌تواند نشانهٔ حمل و انتقال عناصری چون مس، مولیبدن، قلع و طلا به‌صورت کمپلکس‌های کلریدی که در دماهای بالا محتمل‌تر هستند، باشد. بر اساس نظر Cao (۱۹۸۹) مولیبدن در محلول‌های گرمابی اغلب به‌صورت $\text{MoO}(\text{OH})\text{Cl}_2$ و $\text{MoO}(\text{OH})_2\text{Cl}$ حمل می‌شود که به‌ترتیب در دماهای پایین و بالای ۳۰۰ درجهٔ سانتیگراد پایدار هستند. بر اساس پژوهش‌های اخیر، مولیبدن اغلب به‌صورت H_2MoO_4 و کم‌تر به‌صورت MoO_3F^- در محلول‌های آبکی انتقال می‌یابد و کمپلکس‌های کلریدی به‌جز در مواردی که محلول‌های گرمابی دارای شوری بالا هستند، بی‌اهمیت محسوب می‌شوند (Ulrich and Mavrogenes, 2008). طبق نظر Heinrich (۱۹۹۰) قلع در دماهای بیش‌تر از ۳۵۰ درجه و در $\text{pH} = 2 - 7/5$ به‌صورت کمپلکس‌های $\text{Sn}(\text{OH})_2$ و $\text{Sn}(\text{OH})_4$ و در دما و شوری بالا، شرایط اسیدی و احیایی به‌صورت کمپلکس‌های کلریدی حمل می‌شود. آمیختگی محلول‌های گرمابی حاصل از تفریق ماگما با آب‌های سرد و رقیق (احتمالاً جوّی) موجب کاهش شوری و دمای سیال گرمابی شده است که خود یکی دیگر از عوامل نهشت عناصر است.

نهشت عناصر به دو صورت افشان و رگچه‌ای سولفیدی همراه با ایجاد دگرسانی فیلیک، پروپیلیتی و آرژیلی حدّ واسط رخ داده است. در مراحل انتهایی کانی‌سازی نیز به‌علت چیرگی سیالات با شوری پایین‌تر، سیال گرمابی از

است که در واحدهای داسیت تا ریولیت منطقه رخ داده است.

بر مبنای همهٔ شواهد صحرایی، مطالعات پتروگرافی و ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال، می‌توان گفت کانه‌زایی اصلی در کنترل شکستگی‌های حاصل از استوک‌ورک‌های سیلیسی در واحدهای داسیتی و ریوداسیتی منطقه اکتشافی ماربین است. ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال نشان‌دهندهٔ دما و شوری بالا است؛ به‌طوری که بیش‌ترین دمای همگن‌شدگی و به عبارت دیگر بیش‌ترین دمای نهشت کانه‌های فلزی در دو گسترهٔ دمایی ۲۵۰ تا ۳۰۰ و ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجهٔ سانتیگراد انجام شده است. میزان شوری سیالات نیز از ۲۸ تا ۶۵ درصد وزنی معادل نمک NaCl اندازه‌گیری شد. چگالی میان‌بارهای سیال برای سیالات سه فازي دارای بلور نمک 0.85 gr/cm^3 تا $1/1$ و میان‌بارهای دو فازي 0.7 gr/cm^3 است که گویای شوری بالای سیالات کانه‌زا است.

برای اندازه‌گیری فشار و عمق به‌دام‌افتادن سیالات گرمابی از کوارتزهای رگه - رگچه‌ای و توده‌ای استفاده شد که نتیجهٔ حاصل گویای تخمین فشار هیدرواستاتیک برای سیالات سه فازي در حدود ۵۰ تا ۵۰۰ بار است. این بازهٔ وسیع فشاری نشان‌دهندهٔ تغییرات میان شرایط فشار هیدرواستاتیک و لیتواستاتیک و خود دلیلی بر رخداد جوشش در سیالات گرمابی منطقه است (Hezarkhani and Williams-Jones, 1998). همزیستی سیالات تک فازي غنی از بخار، غنی از مایع و سه فازي دارای نمک، نشانهٔ جوشش سیال است و به‌نظر می‌رسد که یکی از دلایل مهم نهشت کانسار پدیدهٔ جوشش باشد.

وجود برش‌های گرمابی که از فشار بخار بالای سیالات کانه‌زا ناشی است به همراه دیگر شکل‌های کانه‌زایی نیز تأییدی بر جوشش سیال است.

به دست آمده از منطقه در جدول ۲ ویژگی‌های اندیس ماربین و کانسارهای پورفیری مولیبدن و قلع با یکدیگر مقایسه شده است.

با توجه به جدول ۲ نشانه معدنی ماربین از نظر سنگ میزبان، دگرسانی، شکل و کنترل کننده‌های کانسارسازی با کانسارهای مولیبدن و قلع پورفیری، همخوانی دارد. اما از مهم‌ترین تفاوت‌های بارز اندیس ماربین با کانسارهای مولیبدن نوع کلایمکس می‌توان به این موارد اشاره کرد: نبودن گرانیات به عنوان سنگ میزبان کانسار، نبودن سنگ‌های آلکالین مناطق کافتی، پایین بودن محتوای مولیبدن نسبت به مس در مقایسه با کانسارهای نوع کلایمکس، وجود بی‌هنجاری‌هایی از طلا و تطابق نداشتن در میزان عناصر کمیاب (پایین بودن مقادیر Cs, Li, Be و Nb و بالا بودن مقادیر Sr و TiO_2)، پایین بودن میزان فلئور در پهنه فیلیک و نبودن شواهدی از گرایزنی شدن در سطح منطقه و همچنین، نبودن کانی‌های قلع و تنگستن به صورت کاسیت، شیلیت و ولفرامیت.

در مقایسه اندیس ماربین با کانسارهای قلع پورفیری نوع آندی (Sillitoe et al., 1975) مشخص می‌شود که با وجود این که هر دو سنگ میزبان یکسان دارند، اما نبودن شواهدی مانند گرایزن، کانی‌های قلع، نقره و تنگستن و کانی‌های فلورین، توپاز و تورمالین و با در نظر گرفتن صحت نداشتن نتایج ژئوشیمیایی سنگی عنصر قلع، اندیس ماربین از گروه کانسارهای قلع پورفیری خارج می‌شود.

اندیس ماربین با ویژگی‌های بنیادین دیگر کانسارهای مولیبدن پورفیری همخوانی دارد که از جمله آن می‌توان این موارد را نام برد:

کمپلکس‌های بی‌سولفیدی غنی است. در چنین شرایطی ناپایداری این کمپلکس‌ها به کانی‌زایی سولفیدهای فلزی از جمله پیریت در رگه - رگچه‌های کوارتز گرمابی منجر شده است و در ادامه در تأثیر از فرایند هوازدگی سطحی سولفیدها به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند. از نظر دگرسانی گرمابی در منطقه نیز دگرسانی سرسیتی مرکزی در سطح به‌طور جانبی به دگرسانی پروپیلیتی می‌رسد که به موازات آن نیز از دمای همگن شدن و شوری سیالات از پهنه سرسیتی به سمت پروپیلیتی کاسته می‌شود. دگرسانی آرژیلی و سیلیسی شدن سنگ نیز در پهنه دگرسانی سرسیتی به صورت جزئی‌تر قابل مشاهده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از ریزدماسنجی سیالات درگیر، مطالعات سنگ‌شناسی و نوع سنگ میزبان و دگرسانی‌های همراه اندیس ماربین ویژگی‌های یک کانسار پورفیری را نشان می‌دهد، اما با توجه به نتایج به دست آمده قبلی از تجزیه‌های ژئوشیمیایی و بالا بودن مقادیر عناصر مولیبدن (میانگین ۲۲۵ ppm) نسبت به مقادیر ناچیز مس (میانگین ۳۳۰ ppm) و طلا (میانگین ۸۲ ppm) و همچنین، صحت نداشتن نتایج حاصل از تجزیه زمین‌شیمی نمونه‌های سنگی دارای بی‌هنجاری قلع (میانگین ۳۸۸۱ ppm) و نبودن غنی‌سازی برونزاد در منطقه، این کانسار در حقیقت یک کانسار سرشار از مولیبدن، طلا و قلع با اهمیت به نسبت پایین مس است.

بنابراین، این ویژگی‌ها کانسار ماربین را از گروه کانسارهای مس پورفیری بیرون می‌آورد و شباهت آن را با کانسارهای نوع مولیبدن و قلع پورفیری آشکار می‌کند. در نتیجه، با توجه به اطلاعات

جدول ۲- مقایسه ویژگی‌های اندیس ماربین (شمال‌شرق اصفهان) با کانسارهای مولیدن و قلع پورفیری تیپیک در دنیا.

ویژگی‌ها	کانسارهای مولیدن پورفیری کلیمکس	کانسارهای مولیدن پورفیری (کالک‌آلکانل استوک‌ورکی)	کانسارهای قلع پورفیری بولیوی (نوع آندی)	اندیس ماربین
نوع سنگ میزبان و سری ماگمایی	گرانیت و ریولیت‌های پورفیری کالک‌آلکانل (سری A) و گرانیت‌ها و کم‌تر ریولیت‌های نوع I و S	نفوذی‌های فلسیک تا حد واسط نیمه‌آتشفشانی گرانودیوریت و گرانیت کالک‌آلکانل و هم‌ارزهای خرجی آن (نوع I)	مجموعه‌های نیمه‌آتشفشانی فلسیک کوارتز لاتیت و ریوداسیت و برش‌های گرمایی (نوع I)	نیمه‌آتشفشانی بسیار تفریق‌یافته ریوداسیت تا آتشفشانی ریولیت - داسیت کالک‌آلکانل
موقعیت تکتونیکی	مناطق کششی واقع در پشت کمان فرورانشی	مناطق داخلی‌تر کمان قاره‌ای فرورانشی، برخورد قاره - قاره	مناطق کششی پوسته قاره‌ای ضخیم‌شده واقع در پشت پهنه فرورانشی با شیب کم	کمان آتشفشانی حاصل از فرورانش
سن کانه‌زایی	مزوزویک تا ترسیر	مزوزویک تا ترسیر	پالئوزویک تا ترسیر	بعد از اتوسن
فرم کانسار سازی	رگه - رگچه‌های درهم مولیدن‌دار	رگه - رگچه‌های درهم	رگه - رگچه‌ای و برش گرمایی	پراکنده، رگه - رگچه‌های درهم و برش گرمایی
شکل توده معدنی	فنجانی واژگون و یا صفحه‌ای	فنجانی واژگون و یا صفحه‌ای	فنجان واژگون و سیلندری شکل با گسترش قائم	گنبدی‌شکل
دگرسانی	از داخل به خارج: پتاسیک، فیلیک، کوارتز - آرژیلیک، پروپیلیتیک	از داخل به خارج: پتاسیک، کوارتز، سریسیتیک، پروپیلیتیک	از داخل به خارج: تورمالینی‌شدن، سریسیتیک، آرژیلیک، پروپیلیتیک	از داخل به خارج: سریسیتیک، کوارتز، آرژیلیک، پروپیلیتیک
گریزنی شدن	موجود است	موجود نیست	موجود است	موجود نیست
مجموعه کانه‌ها	مولیدنیت، ولفرامیت، کاسیت، روتیل و ایلمنیت	مولیدنیت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن	کاسیت، استانتیت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن	کالکوپیریت، مگنتیت، ایلمنیت و روتیل
عیار میانگین ماده معدنی	۰/۱-۰/۴ درصد مولیدن	۰/۰۶-۰/۲۰ درصد مولیدن	۰/۳ درصد قلع	۰/۳-۰/۲۳ درصد مولیدن ۰/۰۱ درصد طلا ۰/۳۷ درصد روی
محصولات فرعی	قلع، تنگستن، سرب و روی	طلا، مس، تنگستن و قلع	رگه‌های پلی متالیک نقره، سرب، روی و قلع	مس، سرب، بیسموت و آرسنیک
کانی‌های باطله	توپاز، فلورین، گارنت، مسکوویت و Na-K - فلدسپار	شیثلیت، ولفرامیت، بیسموتینیت فلورین، کوارتز، کلسیت و انیدریت و کانی‌های قلع به صورت نادر	پیریت، آرسنوپیریت، توپاز، فلورین، موسکوویت، تورمالین، کوارتز	پیریت، کالکوسیت، همتایت، اکسیدهای منگنز و کوارتز
مقدار فلوئور	۰/۱-۰/۵٪	>۰/۱٪	>۰/۱٪	>۰/۱٪
کنترل‌کننده‌های ساختاری	شکستگی‌های حاصل از استوک‌ورک	شکستگی‌های حاصل از استوک‌ورک	شکستگی‌های حاصل از استوک‌ورک و برش‌های گرمایی	شکستگی‌های حاصل از استوک‌ورک و برش‌های گرمایی
مطالعات سیالات درگیر	سیالات سه فازی دارای هالیت و سیلویت، دمای همگن‌شدن بالا (>۶۰۰- ۲۰۰ درجه سانتیگراد) و شوری بالا	با سیالات دو فازی غنی از گاز و مایع، سیالات سه فازی دارای بلور نمک، فاز گازی اغلب CO ₂ است، دمای ۴۵۰-۲۰۰ درجه سانتیگراد، شوری کم تا متوسط (>۱۶ درصد وزنی نمک NaCl)	شورابه‌های غنی از Na - Ca، دارای جوشش در محلول گرمایی	اغلب با سیالات سه فازی دارای هالیت و سیلویت، سیالات دوفازی غنی از گاز و مایع، سیالات تک فازی گازی، دمای همگن‌شدن بالا (>۶۰۰ درجه سانتیگراد) و شوری تا ۶۵ درصد وزنی نمک NaCl، دارنده جوشش سیال
شیمی سنگ (ppm)	Rb >۲۵۰ Nb >۵۰ Sr <۱۰۰ Zr ۵۰-۱۲۰ TiO ₂ >۰/۱٪	Rb <۳۰۰ Nb <۳۰ Sr >۱۰۰ Zr ? TiO ₂ >۰/۱٪	-	Rb ? Nb >۱ Sr ۱۵-۱۶۶ Zr ۵-۱۲۴ TiO ₂ ۰/۰۱-۰/۴۶٪
مثال	کلیمکس، هندرسون، مونت امونز	انداکو، آداناک، کوارتزهیل	کاتای و سرو ریو (بولیوی) ینیان (چین) تارونگاو آردلتن (استرالیا)	نوجون (کرمان) سپه کمر (غرب میانه)

مرتبط است؛ اگر چه تعیین کردن موقعیت تکتونیکی منطقه به طور دقیق و هم چنین، آگاهی دقیق از نتایج ژئوشیمی عناصر کمیاب منطقه می تواند کانسارسازی نوع کلیمکس را به طور جدی در منطقه مطرح کند که اطمینان از آن به برنامه ریزی های ژئوشیمیایی اکتشافی دقیق و فشرده تر در مراحل اکتشافات بعدی منطقه نیازمند است.

سپاس‌گزاری

نگارندگان این پژوهش از حمایت‌های مالی تحصیلات تکمیلی گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان سپاس‌گزاری می‌کنند.

عیار میانگین پایین مس (۰/۳۳ درصد) و طلا (۰/۰۸ درصد)، عیار میانگین بالای مولیبدن (۰/۲۳ درصد) و قلع (۰/۳۸ درصد)، وجود سنگ‌های تفریق‌یافته ریوداسیتی کالک‌آلکان حاصل از فروران، کانسارسازی به صورت استوکورک‌های سیلیسی و برش گرمابی، وجود پهنه های دگرسانی معمول در کانسارهای پورفیری و نبودن کانی سازی فلئور به صورت فلورین و توپاز، بالابودن مقادیر Sr، TiO₂ و Zr و پایین بودن Nb. بر این اساس و بر پایه اطلاعات به دست آمده از مطالعات ریزدماسنجی سیالات درگیر مشخص می‌شود که نوع کانسارسازی در اندیس ماربین احتمالاً با کانسارهای مولیبدن پورفیری نوع کمان فرورانشی

منابع

- Aghanabati, S. A. (2004) Geology of Iran. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran (in Persian).
- Alavi, M. (1994) Tectonic of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229: 211-238.
- Amidi, S. M. and Zahedi, M. (1983) Geological map of Iran (Kashan), Scale 1:250000. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran (in Persian).
- Amidi, S. M. (1977) Etude geologique de la region de Natanz-Nain-Surk, stratigraphie et petrologie. Geological Survey of Iran Report 42: 36.
- Azadi, M., Mirmahmoodi, M. and Hezarkhani, A. (2014) Petrology and fluid inclusions investigations in the Kahang copper porphyry deposit. *Journal of Crystallography and Mineralogy* 22(1): 155-172 (in Persian).
- Borisenko, A. S. (1977) Studies of salinity of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method. *Soviet Geology and Geophysics* 18: 11-19.
- Cao, X. (1989) Solubility of molybdenite and the transport of molybdenum in hydrothermal solution. Ph.D. thesis, Iowa State University.
- Chivas, A. R. and Wilkins, W. T. (1977) Fluid inclusion studies in relation to hydrothermal alteration and mineralization at the Koloula porphyry copper prospect, Guadalcanal. *Economic Geology* 72: 153-169.
- Chou, I. M. (1987) Phase relations in the system NaCl-KCl-H₂O: Solubility of halite in vapor-saturated liquids above 445°C and redetermination of phase equilibrium properties in the system Na₂O-H₂O to 1000 °C and 1500 bars. *Geochemical et Cosmochimica Acta* 51: 1965-1975.
- Crawford, M. L. (1981) Phase equilibrium in aqueous fluid inclusions. In: Short course in Fluid Inclusions (Eds. Hollister, L. S. and Crawford, M. L.) application to Petrology 6: 75-100. Mineralogical Association of Canada.
- Farmahini Farahani, M., Khakzad, A., Asadi Harooni, H. and Emami, M. H. (2012) Results of the remote sensing studies and reasons of composite halos in exploration Kahang area. *Journal of Earth Sciences* 21(84): 161-168 (in Persian).

- Farmahini Farahani, M., Khakzad, A., Asadi Harooni, H. and Emami, M. H. (2014) The investigation of alteration zones and magma mixing in exploration Kahang area. *Journal of Earth Sciences* 24(93): 183-194 (in Persian).
- Farmahini Farahani, M., Khakzad, A., Asadi Harooni, H., Emami, M. H. and Rasa, I. (2009) Geochemical investigation in exploration Kahang area. *Journal of Earth Sciences* 19(73): 51- 56 (in Persian).
- Fournier, R.O. (1999) Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic to brittle rocks in magmatic epithermal environment. *Economic Geology* 94: 1193-1211.
- Hall, D. L., Sterner, S. M. and Bodnar, R. J. (1988) Freezing point depression of NaCl-KCL-H₂O solution. *Economic Geology* 83: 197-202.
- Hassanzadeh, J. (1993) Metallogenic and tectonomagmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of Iran. PhD thesis, University of California, Berkley.
- Hatami, Sh. (2008) Petrology of Kahang granitoids and volcanic rocks with emphasis on mineralization and alteration zones. MSc thesis, Islamic Azad University Khorasgan Branch, Isfahan, Iran (in Persian).
- Heinrich, C. A. (1990) The chemistry of hydrothermal tin (-tungsten) ore deposition. *Economic Geology* 85: 457-481.
- Hezarkhani, A. (2006) Hydrothermal evolution of the Sar-Cheshmeh porphyry Cu-Mo deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions. *Journal of Asian Earth Sciences* 28: 409-422.
- Hezarkhani, A. and Williams-Jones, A. E. (1998) Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusion and stable isotopes. *Economic Geology* 93: 651-670.
- Kesler, S. E. (2005) Fluids in planetary systems: Ore-forming fluids. *Elements* 1: 13-18.
- Komeili, S. S., Khalili, M., Asadi Harooni, H. Bagheri, H. and Ayati, F. (2014) Petrography and mineral chemistry of alteration zones in the Kahang porphyry Cu-Mo deposit, Northeast of Isfahan. *Journal of Petrology* 5(19): 1-20 (in Persian).
- Large, R., Huston, D., McGoldrich, P., McArthur, G. and Ruxton, P. (1988) Gold distribution and genesis in Paleozoic volcanogenic massive sulfide systems. *Boicentennial Gold* 88: 22: 121-126.
- McMillan, W. J. and Panteleyev, A. (1988) Porphyry copper deposits. In: *Ore deposits models* (Eds. Rpberts, R. G. and Sheahan, P. A.) 3: 45-58. Geological Association of Canada.
- Mirzaei, M., Bagheri, H. and Ayati, F. (2015) Reconnaissance geochemical exploration and genesis investigation of Marbin Copper- Molybdenum and Tin index, North of Zefreh, 33rd National Geosciences Symposium, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran (in Persian).
- Moinifar, S. (2011) Lithochemical studies, IP/RS geophysics and hydrothermal alteration separation with uses ASTER satellite data in Zefreh porphyry Cu index. MSc thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (in Persian).
- Potter, R. W. I., Clynne, M. A. and Brown, D. L. (1978) Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. *Economic Geology* 73: 284-285.
- Radfar, J. (1998) Geological map of Iran (Ardestan), Scale 1:100000. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran (in Persian).
- Roedder, E. and Bodnar, R. J. (1980) Geologic pressure determinations from fluid inclusions studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 8: 263–301.
- Shelley, D. (1993) Igneous and metamorphic rocks under the microscope. Chapman and Hall, London.
- Shepherd, T., Rankin, A. H. and Alderton, D. H. M. (1985) A practical guide to fluid inclusion studies.

Chapman and Hall, New York.

Sillitoe, R. H., Halls, C. and Grant, J. N. (1975) Porphyry tin deposits in Bolivia. *Economic Geology* 70: 913- 927.

Ulrich, T. and Mavrogenes, J. (2008) An experimental study of the solubility of molybdenum in H₂O and KCl-H₂O solutions from 500 degrees C to 800 degrees C and 150 to 300 MPa. *Geochemical et Cosmochimica Acta* 72: 2,316-2,330.

Wilkinson, J. J. (2001) Fluid inclusion in hydrothermal ore deposit. *Lithos* 55: 229-272.

Williams - Jones, A. E., Schrijver, K., Doig, R. and Sangster, D. F. (1992) A model for epigenetic Ba-Pb-Zn mineralization in the Appalachian Trust Belt Québec: evidence from fluid inclusions and isotopes. *Economic Geology* 87: 154-174.

Zarasvandi, S., Liaghat, S. and Zentilli, M. (2005) Geology of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad porphyry copper deposits, central Iran. *International Geology Review* 47: 620-646.

Petrography and fluid inclusions study in Marbin porphyry Molybdenum (Sn) index (northeast of Isfahan)

Masoumeh Mirzaei¹, Hashem Bagheri¹ and Farimah Ayati^{2*}

¹ Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Department of Geology, Payame Noor University, 19395-3697 Tehran, I. R. of Iran

Abstract

Marbin Tin and Molybdenum index is located in north of Zefreh Village the Isfahan Province and Uromieh-Dokhtar magmatic zone. The main rock units in this area are Eocene subvolcanic and volcanic rocks with rhyolite to dacite composition. Based on petrography studies the main minerals are plagioclase, quartz, sanidine and biotite and secondary minerals are chlorite, calcite, epidote and sericite. The main hydrothermal alterations are including sericitic, propylitic, intermediate argillic and silicification. Average grade of tin, molybdenum, copper and gold is about 4850, 157, 330 ppm and 82 ppb, respectively. Microthermometric studies on silica veins and veinlet indicate five different types of fluid inclusion, 1-three-phase type (L+V+S→L), 2- three-phase type (L+V+S→V), 3- two-phase type (L+V→L), 4- two-phase type (V+L→V), 5- vapor rich single phase type (V). Fluid inclusion studies in mineralized veins in phyllic and propylitic zones, show the wide range of homogenization temperature from 248 to 600 °C and salinity from 28 to 65 wt% NaCl equivalent. The temperature, salinity and density of fluids decrease from phyllic to propylitic alteration zone. The wide range of homogenization temperatures for the studied fluid inclusions in index show dilution with surface water and fluid boiling, as the most important factor in ore deposition. According to field, mineralogical, geochemical and fluid inclusion studies Marbin index has been considered as a porphyry deposit type which show the most similarity with Mo porphyry systems in world wide.

Key words: Petrography, Mo-Sn Mineralization, Fluid inclusion, Marbin index, Uromieh-Dokhtar magmatic zone

* f.ayati@pnu.ac.ir