

دماسنجی و منشأ سیال کانه‌ساز در کانسار طلای باریکا، خاور سردشت

حسینعلی تاج‌الدین^۱، ابراهیم راستاد^۲، عبدالمجید یعقوب‌پور^۳، محمد مجمل^۴ و ریچارد کلدفارب^۵

^۱استادیار، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲استاد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۴دانشیار، گروه زمین‌ساخت، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۵استاد، دانشکده علوم زمین و منابع معدنی، دانشگاه علوم زمین، پکن، چین

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۰۳

چکیده

کانسار سولفید توده‌ای غنی از طلا (و نقره) باریکا، در ۱۸ کیلومتری خاور سردشت، در شمال باختر پهنه دگرگونه سنندج- سیرجان قرار دارد. واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده باریکا، مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی دگرگون شده شامل فیلیت، اسلیت، آندزیت و توفیت‌های کراتاسه هستند. کانسار باریکا، از دو بخش کانسنگ چینه‌سان و پهنه استرینگر تشکیل شده است که در واحد متاآندزیت میزبان شده‌اند. بخش چینه‌سان کانسار، متشکل از کانسنگ‌های سولفیدی و باریتی همراه با بخش‌های فرعی از نوارهای سیلیسی است که به شکل یک عدسی به طول حدود ۱۵۰ و سترای ۱ تا ۲۰ متر بر روی پهنه استرینگر قرار گرفته است. بر اساس مطالعات میانبارهای سیال بر روی نمونه‌های کوارتز (پهنه استرینگر) و باریت (کانسنگ چینه‌سان) در کانسار باریکا، دمای همگن‌شدگی سیالات کانه‌ساز برای میانبارهای سیال اولیه دو فاز مایع- گاز (LV) در کوارتز و باریت به ترتیب در بازه‌های ۱۴۶ تا ۲۸۳ و ۱۳۲ تا ۲۲۳ درجه سانتی‌گراد و شوری آنها به ترتیب در محدوده ۱/۴ تا ۹/۶ و ۰/۴ تا ۷/۶ درصد وزنی معادل NaCl اندازه‌گیری شد که نزدیک به شوری آب دریاست. این مطالعه نشان می‌دهد سرد شدن سیالات گرمایی کانه‌دار - که در اثر اختلاط با آب دریا رخ داده - یکی از فرایندهای مهم در نهشت کانسنگ‌های باریکا بوده است. مقدار $\delta^{34}\text{S}$ برای کانه‌های سولفیدی (پیریت، اسفالریت و گالن) موجود در بخش‌های مختلف پهنه استرینگر، تغییرات محدودی در بازه ۰/۸ تا +۵/۶ در هزار را نشان می‌دهد و در محدوده کانسارهای سولفیدی آتشفشانزاد قرار می‌گیرد. همچنین این مقادیر از ترکیبات $\delta^{34}\text{S}$ نشان می‌دهد که مشابه بیشتر کانسارهای آتشفشانزاد نوع کوروکو، گوگرد سازنده کانه‌های سولفیدی از سنگ‌های آندزیتی کمرباین منشأ گرفته است. دماهای ایزوتوپی برای دوازده جفت کانه همراه گالن- اسفالریت و گالن- پیریت در محدوده ۱۴۶ تا ۲۹۳ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد که با دماهای حاصل از مطالعات میانبارهای سیال منطبق است.

کلیدواژه‌ها: کانسار سولفید توده‌ای آتشفشانزاد، میانبار سیال، ایزوتوپ گوگرد، باریکا، سردشت.

*نویسنده مسئول: ابراهیم راستاد

E-mail: rastad@modares.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

پهنه دگرگون شده سنندج- سیرجان، به لحاظ موقعیت ژئودینامیکی، منطق بر حاشیه فعال قاره‌ای است (Sheikholeslami, 2002; Azizi and Moein Vaziri, 2009) که امروزه به عنوان خاستگاه بسیاری از کانسارهای طلای کوهزایی و سولفیدهای توده‌ای (VMS) محسوب می‌شوند (Kerrich et al., 2005; Goldfarb et al., 2005). تاکنون در محدوده سقر- سردشت، ۱۰ کانسار و رخداد طلا اکتشاف و معرفی شده است که می‌توان آنها را به دو نوع سولفید توده‌ای غنی از طلا و کوهزایی تقسیم‌بندی کرد (تاج‌الدین، ۱۳۹۰). کانه‌زایی نوع سولفید توده‌ای غنی از طلا، تنها کانسار باریکا را شامل می‌شود و دیگر کانسارها و رخدادهای طلا در محدوده (از جمله قلقله، کرویوان، قیغلوچه، حمزه قرین و کسزان) از نوع کوهزایی هستند که رخداد آنها توسط پهنه‌های برشی و گسل‌ها کنترل می‌شود.

کانسارهای سولفید توده‌ای غنی از طلا (Au-VMS)، نوعی از کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشانزاد هستند که در آنها مقدار طلا (بر حسب گرم در تن) بیشتر از مجموع مقدار عناصر همراه مس، سرب و روی (بر حسب درصد) است. از این رو، در این دسته از کانسارها طلا به عنوان فلز اصلی است (Poulsen et al., 2000; Dubé et al., 2004). کانسار باریکا، که اولین و تنها کانسار سولفید توده‌ای غنی از طلا (و نقره) گزارش شده در ایران است (یارمحمدی و همکاران، ۱۳۸۴)، در ۱۸ کیلومتری خاور سردشت در شمال باختر پهنه دگرگونه سنندج- سیرجان واقع است. یارمحمدی (۱۳۸۵) و یارمحمدی و همکاران (۱۳۸۴ و ۱۳۸۷)، کانسار باریکا را با ذخایر غنی از طلای Au-Zn-Pb-Ag معرفی شده توسط Large et al. (1989) و Huston (2000) و چند ذخیره تپ کوروکو با سن میوسن در حوضه هوکوروکو (Hokuroko Basin) ژاپن قابل مقایسه دانسته‌اند. این کانسار، به صورت یک کانسار سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد (تپ کوروکو)، تشکیل شده و سپس در اثر فرایندهای کوهزادی آلپین، که در

کراتاسه پایانی - پالئوسن رخ داده، متحمل دگرگونی و دگرشکلی شده است. در این مقاله، ضمن ارائه خلاصه‌ای از ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی کانسار باریکا، سعی شده است با استفاده از نتایج مطالعات میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های گوگرد، دمای تشکیل کانسنگ تعیین و ماهیت فیزیکی‌شیمیایی سیال (سیالات) کانه‌ساز و نیز منشأ احتمالی آنها مورد بررسی قرار شود.

۲- زمین‌شناسی

کانسار باریکا در شمال باختر پهنه سنندج- سیرجان و در زیرپهنه حاشیه‌ای آن (Mohajjel et al., 2003) قرار دارد. (Azizi and Jahangiri (2008) و Azizi and Moinevaziri (2009) سنگ‌های آتشفشانی رخنمون یافته در شمال باختر پهنه سنندج- سیرجان را به جزایر قوسی و یا حاشیه‌های فعال قاره‌ای با ماهیت کالک‌آلکالن نسبت داده‌اند که در زمان کراتاسه میانی- بالایی تشکیل شده‌اند.

واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده باریکا، مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی زیردریایی دگرگون شده با سن کراتاسه، شامل متاولکانیک‌های با ترکیب آندزیت- تراکی آندزیت، توفیت، فیلیت و اسلیت هستند که در رخساره شیبست سبز دگرگون شده‌اند. بر اساس پیمایش‌های انجام شده، این توالی از نهشته‌ها، با سترای حدود ۱۵۰۰ متر، از قدیم به جدید از واحدهای زیر تشکیل شده‌اند (شکل ۱):

- **واحد K^{ph}** : شامل اسلیت و فیلیت با میان‌لایه‌هایی از آهک دگرگون شده، سیلتستون و ماسه‌سنگ است.

- **واحد K^{mv}** : از گدازه‌های با ترکیب غالب آندزیتی و کمتر تراکی آندزیت و آندزیتی لایت تشکیل شده است. این واحد میزبان کانسار باریکاست و هر دو بخش کانسنگ چینه‌سان و پهنه استرینگر را دربر دارد.

۲-۲. دگرشکلی مرحله دوم (D2)

در واقع مهم‌ترین مرحله دگرشکلی در منطقه سقز- سردشت و نیز کانسار باریکا است که در اثر این مرحله از دگرشکلی، شدیدترین تغییرات ساختاری از قبیل چین خوردگی، توسعه ساختارهای میلونیتی و گسترش برگوارگی (S2) به وقوع پیوسته است. نمونه بارز این مرحله از دگرشکلی، رخداد پهنه برشی باریکا، با راستای شمال باختر- جنوب خاور (N20-35 W) و شیب ۴۵ تا ۷۰ درجه به سوی شمال خاور بوده که بر موقعیت کانسار باریکا منطبق شده است.

۲-۳. دگرشکلی مرحله سوم (D3)

جوان‌ترین دگرشکلی در محدوده باریکا بوده که به صورت ساختارهای حاصل از دگرشکلی شکنا (گسلش و درزه‌شدگی) در واحدهای سنگی محدوده باریکا نمایان است.

۳- کانه‌زایی

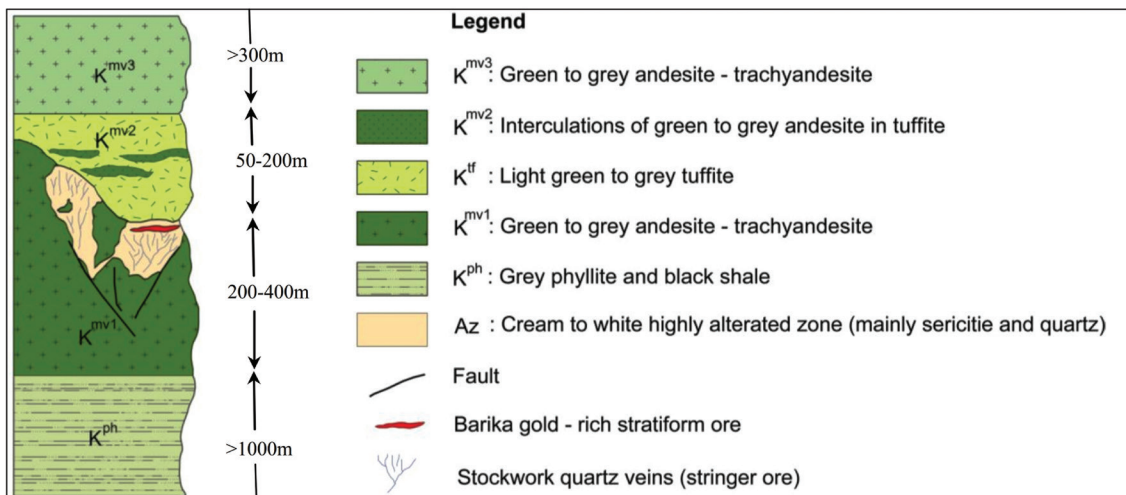
کانسار باریکا، یک کانسار سولفید توده‌ای غنی از طلا (ونقره) بوده که از دو بخش کانسنگ چینه‌سان و کانسنگ رگه‌ای (پهنه استرینگر) تشکیل شده است. سنگ میزبان کانسار باریکا، در هر دو بخش، واحد گدازه آندزیتی (K^{mv1}) بوده که در رخساره شیست سبز دگرگون شده است (شکل ۱).

– واحد K^{tf} : توف زیردریایی (توفیت)، با درون‌لایه‌هایی از آهک دگرگون شده، اسلیت، ماسه‌سنگ و گدازه‌های آندزیتی (واحد K^{mv2}) را شامل شده است.
– واحد K^{mv3} : مشابه با واحدهای گدازه‌ای K^{mv1} و K^{mv2} ، از گدازه‌های با ترکیب آندزیتی تشکیل شده است.

محدوده باریکا، همانند دیگر بخش‌های سندج- سیرجان، تحت تأثیر فازهای متعدد کوهزایی - که مهم‌ترین آنها فاز کوهزایی آلپین است - در رخساره شیست سبز دگرگون شده و تحت تأثیر دگرشکلی‌های چندمرحله‌ای قرار گرفته است. عملکرد مراحل مختلف دگرشکلی‌ها به ایجاد برگوارگی، خطوارگی، چین خوردگی و گسل خوردگی‌های مختلف در سنگ‌های محدوده مورد مطالعه منجر شده است. بر اساس مطالعات ساختاری، مراحل مختلف دگرشکلی‌های رخ داده در محدوده باریکا به شرح زیر است:

۲-۱. دگرشکلی مرحله اول (D1)

همزمان با دگرگونی ناحیه‌ای است و نه تنها در محدوده باریکا، بلکه در کل پهنه سندج-سیرجان دیده می‌شود (Mohajjel, 1997).
آثار این مرحله از دگرشکلی، با رخداد برگوارگی نسل اول (S1) نمایان می‌شود که در نتیجه جهت یافتگی پورفایروبلاست‌ها و تشکیل کانی‌های ثانویه کلریت و سربیسیت ایجاد شده است.

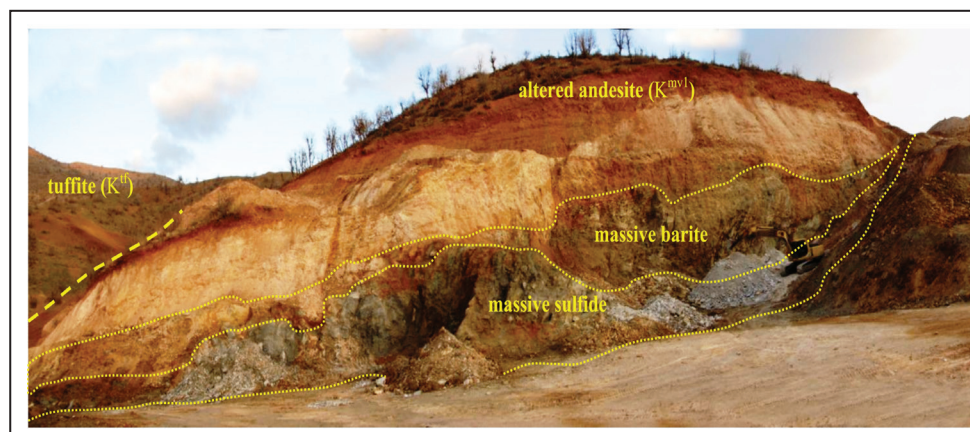


شکل ۱- زمین‌شناسی و توالی واحدهای آتشفشان- رسوبی کرتاسه در محدوده کانسار باریکا (تاج‌الدین، ۱۳۹۰).

۳-۱. کانسنگ چینه‌سان

سولفید و باریت توده‌ای- نواری همراه با بخش‌های فرعی از نوارهای سیلیسی است که مجموعاً در طول حدود ۱۵۰ و سبترای ۱ تا ۲۰ متر رخمون دارد (شکل ۲).

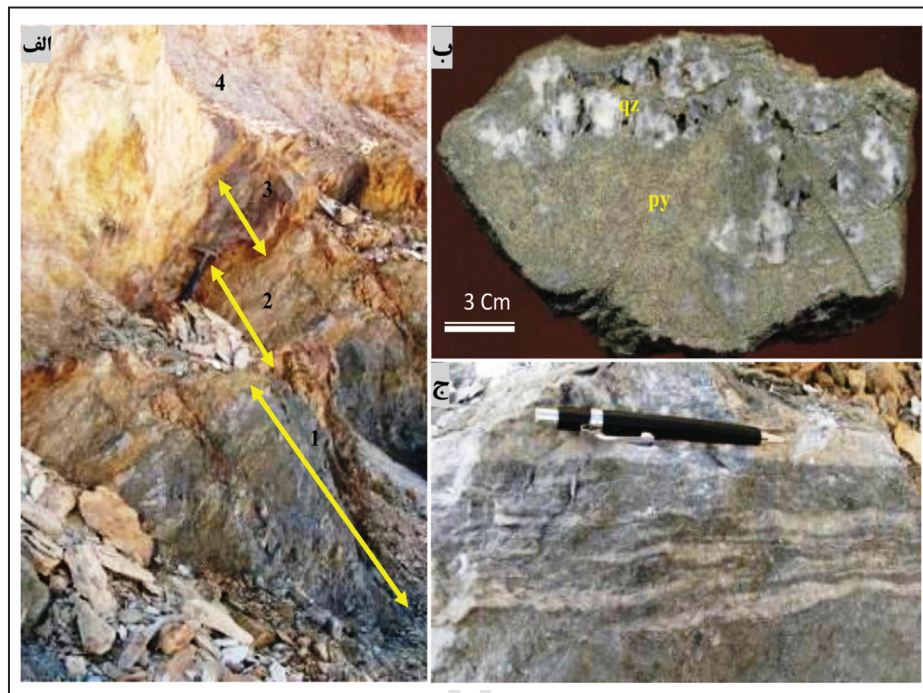
این بخش از کانسار، خصوصیات کانسنگ سیاه (black ore) از کانسارهای نوع کوروکو را نشان می‌دهد (تاج‌الدین و همکاران، ۱۳۸۸؛ تاج‌الدین، ۱۳۹۰) و شامل کانسنگ‌های



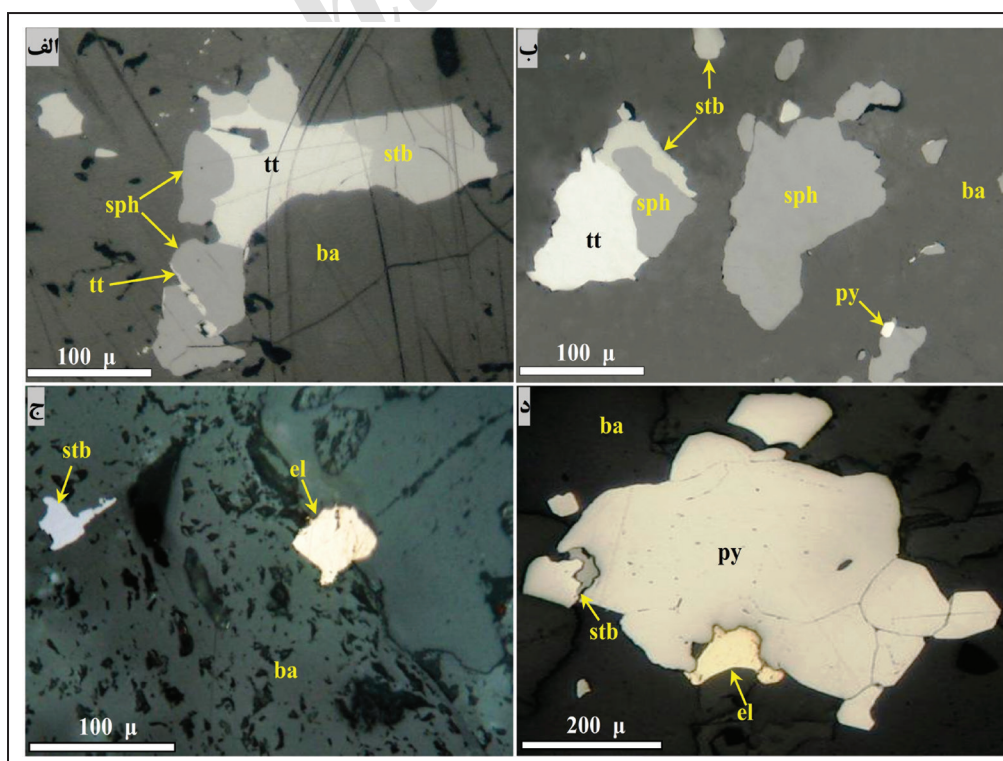
شکل ۲- نمایی از زمین‌شناسی، ژئومتری و ابعاد کانسنگ‌های باریتی (barite ore) و سولفیدی (sulfide ore) در بخش چینه‌سان کانسار باریکا. در این تصویر کانسنگ‌های سولفیدی و باریتی در واحد متاآندزیتی (واحد K^{mv1}) رخ داده است، دید به سوی شمال خاور.

کانسنگ چینه‌سان، به ترتیب ۴/۷ و ۳۱۸ گرم بر تن اندازه‌گیری شده است (جدول ۱). کانه‌های شناسایی شده در قسمت‌های مختلف کانسنگ چینه‌سان شامل پیریت، اسفالریت، گالن، مجموعه‌ای از کانه‌های سولفوسالنی (از جمله تراهدریت-تانانتیت)، استینیت، طلا (الکتروم)، مالاکیت، آزوریت، کولیت و رآلگار است (شکل ۴). باریت، کوارتز، سریسیت-مسکوویت و کلریت مهم‌ترین کانی‌های غیرفلزی کانسنگ را تشکیل داده‌اند.

ژئومتری این بخش از کانسار، به صورت یک عدسی است که در راستای N20-35W و شیب ۴۵ تا ۷۰ درجه به سوی شمال خاور امتداد دارد. چینه‌سان بودن بخش‌های مختلف کانسنگ (شکل ۳) و حضور ساخت و بافت‌های توده‌ای، نواری و فرامبویدال در بخش‌های کمتر دگرشکل شده، نهشت این بخش از کانسار بر روی بستر دریا را نشان می‌دهد. عیار متوسط طلا و نقره در ۴۷ نمونه برداشت شده از بخش‌های مختلف



شکل ۳- الف) ساخت لایه‌ای در کانسنگ‌های چینه‌سان کانسار در: (۱) بخش سولفید توده‌ای؛ (۲) تناوب باریت و سولفید؛ (۳) باریت توده‌ای؛ (۴) متاآندزیت دگرسان شده (سریسیت- کوارتز- باریت- ایلیت)؛ (ب) نمونه دستی از کانسنگ سولفید توده‌ای؛ (ج) نمای نزدیک از تناوب نوارهای باریت (خاکستری روشن- سفید) و سولفید (خاکستری تیره). Py: پیریت و qz: کوارتز.



شکل ۴- کانی‌شناسی در کانسنگ‌های چینه‌سان، که شامل پیریت (py)، تراهدریت-تانانتیت (tt)، اسفالریت (sph)، استینیت (stb) و الکتروم (el) در همراهی با باریت (ba) است.

جدول ۱- ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی بخش‌های چینه‌سان و پهنه استرینگر کانسار باریکا. میانگین فراوانی عناصر مندرج در جدول، مربوط به نتایج آنالیز ۴۷ نمونه برداشت شده از بخش چینه‌سان و ۱۱۰ نمونه از رگه‌های کوارتزی پهنه استرینگر کانسار باریکاست. cpy: کالکوپیریت، el: الکتروم، gn: گالن، py: پیریت، sph: اسفالریت، ss: کانی‌های سولفوسالنی، stb: استیبینیت، tet: تتراهدريت، tn: تنانیت.

main characteristics	stratiform ore			stringer zone
	A) sulfidic ore	B) baritic ore	C) silica bands	
ore nature	A) sulfidic ore	B) baritic ore	C) silica bands	silicic veins
ore feature	typically massive to semimassive up to 5 meters in thickness; subordinary banded	mainly massive up to 15 meters in thickness; subordinary banded	typically banded up to 1.5 meters in thickness	stockwork; mainly parallel to foliation due to shearing
mineralogy	py>>ss+ stb+ sph+ gn+ el	py>sph+ gn+ ss+ stb+ el	ss>>py+ el	py+ sph+ gn+ ss(td- tn)± cpy
metallic elements association	Au, Ag, Cu, Pb, Zn, As, Sb, Hg	Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Sb, As± Hg	Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Sb, As, Hg	Pb, Zn, Cu, As, Sb, Ag, Au
Au (ppm)	4.70	3.70	9.30	0.48
Ag (ppm)	318	165	1210	21
As (ppm)	1479	298	1101	217
Sb (ppm)	1215	470	1320	73
Hg (ppm)	214	59.2	850	12.4
Zn (%)	0.05	0.48	0.08	0.10
Pb (%)	0.08	0.41	0.12	0.16
Cu (%)	0.14	0.11	0.07	0.02
Zn+Pb+Cu	0.28	1.00	0.26	0.27
Au/Ag	0.015	0.022	0.008	0.023

۳-۲. پهنه استرینگر

دگرسانی سولفیدی، به صورت رخداد کانه‌های سولفیدی پیریت، اسفالریت، گالن، استیبینیت (و تتراهدريت- تنانیت) در رگه و رگچه‌های کوارتزی و زون‌های دگرسانی اطراف آنها، در سراسر گستره پهنه استرینگر مشاهده می‌شود.

مشاهدات صحرائی و مطالعه مقاطع میکروسکوپی نشان می‌دهد که به‌رغم تنوع وسیع در ضخامت رگه و رگچه‌های کوارتزی پهنه استرینگر، پاراژنز کانه‌ای ساده بوده و شامل پیریت، اسفالریت، گالن، تتراهدريت- تنانیت و مقادیر نادر کالکوپیریت است (جدول ۱ و شکل ۵). مقادیر متوسط طلا و نقره در رگه‌های کوارتزی پهنه استرینگر به ترتیب ۰/۴۸ و ۲۱ گرم در تن و مقدار مجموع فلزات پایه کمتر از ۱ درصد اندازه‌گیری شده است (جدول ۱).

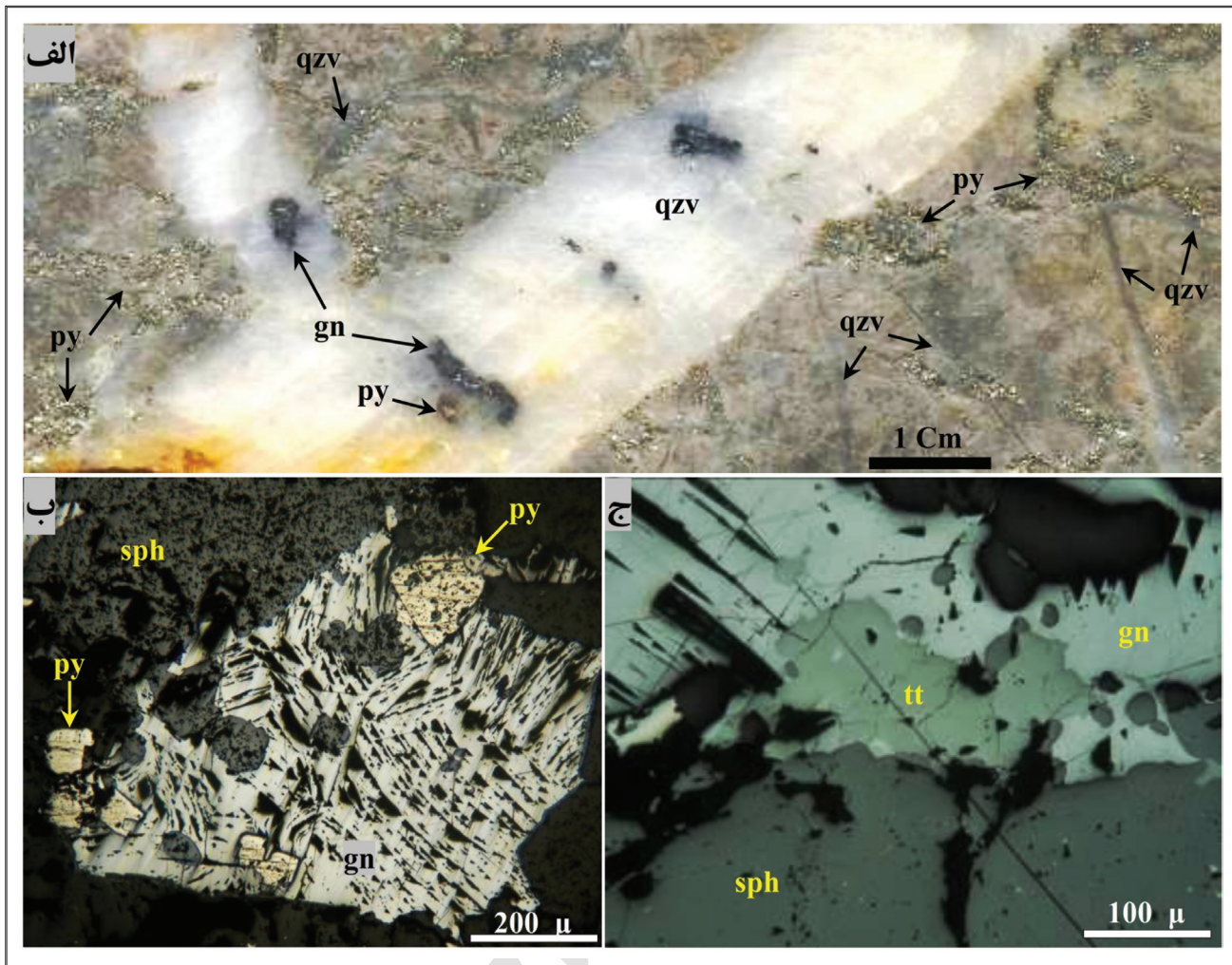
فراوانی عناصر فلزی در کانسار باریکا نشان می‌دهد که تنها بخش چینه‌سان کانسار، از نظر طلا و نقره اهمیت اقتصادی دارد و پهنه استرینگر، به لحاظ محتوای فلزات طلا، نقره و یا فلزات پایه اقتصادی نیست. میزان ذخیره فلزات گرانبها در بخش کانسنگ چینه‌سان، که بخش اعظم ذخایر طلا و نقره کانسار را دربردارد، بالغ بر ۷۷۰ هزار تن کانسنگ با عیار متوسط ۱/۸ گرم در تن طلا و بالغ بر یک میلیون و ۵۰۰ هزار تن کانسنگ نقره با عیار متوسط ۱۰۲ گرم در تن برآورد شده است (شرکت معدن طلای گل‌دیس سردشت، ۱۳۸۷). عیار مجموع فلزات پایه در بخش‌های مختلف کانسار باریکا همواره کمتر از ۱ درصد است (تاج‌الدین، ۱۳۹۰).

این بخش از کانسار در محدوده‌ای به طول بالغ بر ۳ کیلومتر و پهنای ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر با راستای شمال-شمال باختر، جنوب-جنوب خاور، در کمربند کانسنگ چینه‌سان باریکا رخ داده است.

پهنه استرینگر از رگه-رگچه‌های کوارتزی سولفید-طلادار با ساخت استوک‌ورک (stockwork) و متآندزیت‌های میزبان همراه با دگرسانی کوارتز-سریسیت-ایلیت-سولفید تشکیل شده است (شکل ۵). رگه و رگچه‌های کوارتزی پهنه استرینگر، در طول‌های چند سانتی‌متر تا ده‌ها متر و با ستبراهای کمتر از میلی‌متر تا ۱ متر رخنمون دارند.

دگرسانی‌های گرمابی، که در سنگ میزبان کانسار باریکا قابل مشاهده هستند، شامل انواع کوارتز-سریسیت، سریسیت-کوارتز، سیلیسی و سولفیدی هستند که بیشتر در کمربند کانسنگ چینه‌سان دیده می‌شوند.

دگرسانی‌های کوارتز-سریسیت و یا سریسیت-کوارتز با رنگ‌های سفید، خاکستری روشن و آجری، شاخص‌ترین و گسترده‌ترین انواع دگرسانی گرمابی در گستره پهنه استرینگر و بخش چینه‌سان کانسار باریکا هستند. این نوع از دگرسانی‌ها، بیشتر در کمربند و به‌طور محلی در کمربند بالایی بخش چینه‌سان و در همراهی با رگه و رگچه‌های کوارتزی پهنه استرینگر گسترش دارند و معمولاً مقدار طلای موجود در آنها از کمتر از ۰/۵ گرم در تن متغیر است.



شکل ۵- الف) رگه و رگچه‌های کوارتزی (qzv) در پهنه استرینگر با ساخت استوک ورک (stockwork)؛ ب) هم‌رشدی گالن، اسفالریت و پیریت؛ پیریت و اسفالریت به صورت ادخال در گالن نیز وجود دارند؛ ج) هم‌رشدی گالن، تتراهدريت- تنانیت و اسفالریت. gn: گالن، py: پیریت، sph: اسفالریت و tt: تتراهدريت- تنانیت.

۴- میانبارهای سیال

کوچک آنها صرف‌نظر شد. با توجه به تفاوت در کانی‌های میزبان میانبارهای سیال در رگه‌های کوارتزی پهنه استرینگر و بخش چینه‌سان کانسار، نتایج مطالعات میانبارهای سیال در هر یک از انواع نمونه‌ها، به صورت زیر ارائه می‌شود:

۴-۱. میانبارهای سیال در کوارتز (پهنه استرینگر)

اندازه میانبارهای سیال مورد مطالعه از ۲ تا ۱۵ میکرون متغیر است. از میان انواع میانبارهای مذکور، میانبارهای سیال دوفازی مایع-گاز (LV) با درجه پرشدگی ۰/۷ تا ۰/۸، از بقیه انواع فراوان‌تر هستند و اندازه‌های بزرگ‌تری نیز دارند. این نوع از میانبارها اغلب با اشکال نامنظم و کمتر کروی به طور نامنظم در کوارتز میزبان پراکنده‌اند (شکل ۶- الف). سنگ‌نگاری نمونه‌ها حاکی از آن است که تنها میانبارهای دوفازی نوع LV و میانبارهای نادر CO₂ دار، شواهدی از اولیه بودن نشان می‌دهند. بعضی از بخش‌های کوارتز آرایشی از ریزشکستگی‌های ترمیم شده را نشان می‌دهند که احتمالاً در اثر فرایندهای دگرشکلی و تبلور مجدد تکتونیکی ایجاد شده است. اغلب میانبارهای سیال نوع L و VL، که اندازه آنها کوچک‌تر از ۵ میکرون است، در امتداد این شکستگی‌ها تمرکز یافته‌اند.

محدوده دمای همگن‌شدگی برای میانبارهای سیال اولیه دوفازی مایع-گاز (LV) کوارتزی مورد مطالعه از ۱۴۶ تا ۲۸۳ و با میانگین ۱۹۶/۳ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده (شکل ۷- الف) و در تمامی نمونه‌ها همگن‌شدگی به فاز مایع صورت گرفته است.

به منظور شناخت ماهیت فیزیکی‌شیمیایی سیال (سیالات) کانه‌ساز و روند تحول سیال گرمایی و با توجه به بافت و توالی پاراژنزی کانه‌ها، از رگه‌های کوارتزی پهنه استرینگر و عدسی‌های باریتی بخش چینه‌سان کانسار باریکا، ۲۷ مقطع دوبر صیقل تهیه شد که پس از انجام مطالعات سنگ‌نگاری، ۱۱ مقطع مناسب از نظر تعداد و فراوانی میانبارهای سیال و تأثیر ضعیف دگرشکلی انتخاب شد که ۷ نمونه مربوط به رگه‌های کوارتزی پهنه استرینگر و ۴ نمونه از کانسنگ‌های باریتی بخش چینه‌سان کانسار است.

مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال در آزمایشگاه کانی‌شناسی مؤسسه تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران به کمک استیج گرم‌کننده و منجمدکننده (Stage: THMS600) مدل Linkam نصب شده بر روی میکروسکوپ Zeiss انجام شد. این بخش از مطالعات بر روی ۶۶ میانبار سیال اولیه از کانسنگ باریتی و ۵۶ میانبار اولیه از رگه‌های سیلیسی پهنه استرینگر انجام شده است.

میانبارهای سیال در نمونه‌های مورد مطالعه را می‌توان از لحاظ شکل ظاهری و با توجه به پارامترهای (Roedder (1984) و Shepherd et al. (1985) به ترتیب فراوانی، به اشکال نامنظم، کشیده و کروی تقسیم‌بندی کرد. میانبارهای سیال در سه نوع مشاهده شدند که عبارتند از: الف) دوفازی مایع-گاز (LV)؛ ب) دوفازی گاز-مایع (VL)؛ ج) تک‌فاز مایع (L). در هر دو نوع نمونه‌های کوارتزی و باریتی، تنها میانبارهای سیال دوفازی مایع-گاز (LV)، به لحاظ اولیه و درشت‌تر بودنشان مطالعه شدند و از مطالعه میانبارهای دوفازی گاز-مایع و تک‌فازی مایع، به جهت ثانویه بودن و اندازه

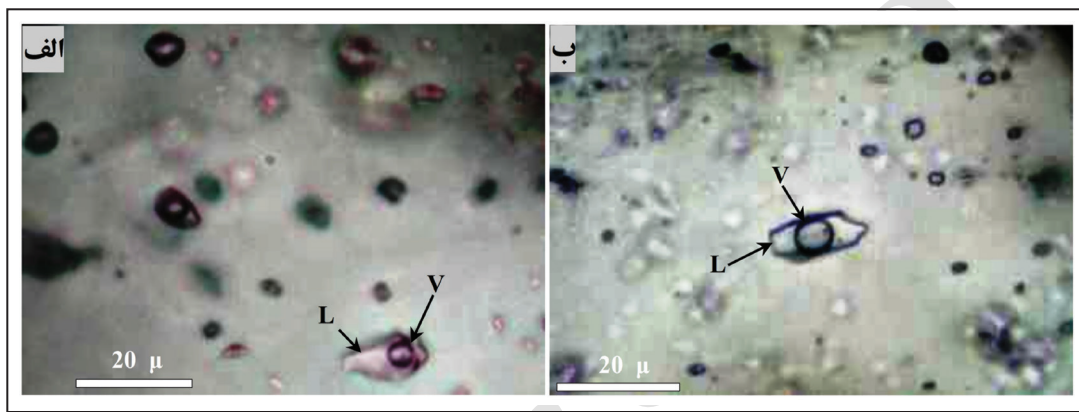
اغلب میانبارهای سیال در نمونه‌های باریتی از نوع دوفازی گاز-مایع (VL) و تک‌فازی مایع (L) و ثانویه هستند و در اشکال کشیده در امتداد ریزشکستگی‌های ترمیم شده تمرکز یافته‌اند. میانبارهای سیال اولیه در کانسنگ‌های باریتی، از نوع دوفازی مایع-گاز (LV) هستند و بیشتر در اشکال نامنظم و کروی در زمینه کانی‌های باریت پراکنده‌اند (شکل ۶-ب). در نمونه‌های باریتی، تعداد معدودی میانبار CO_2 دار مشاهده شد.

همان‌طور که در شکل ۷-ب آمده است، محدوده دمای همگن‌شدگی برای نمونه‌های باریتی از ۱۳۲ تا ۲۲۳ و با میانگین ۱۷۵/۸ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. در این نمونه‌ها نیز همگن‌شدگی به فاز مایع صورت گرفته است. محدوده آخرین نقطه ذوب یخ ($T_{m_{ice}}$) در نمونه‌های باریتی از ۰/۴ تا ۴/۷- درجه سانتی‌گراد ثبت شده است که به ترتیب معادل با شوری‌های ۰/۴ تا ۷/۶ درصد وزنی NaCl است (شکل ۷-ب).

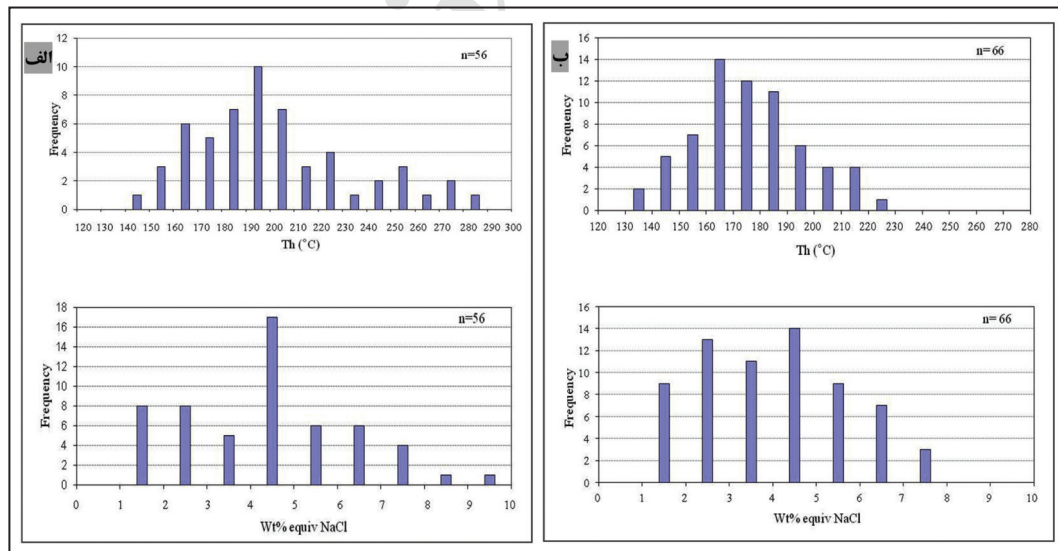
محدوده اولین نقطه ذوب یخ یا اوتکتیک (Te) در نمونه‌های کوارتزی، ۲۷- تا ۴۵- درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد که نشان می‌دهد سیال کانه‌ساز، به صورت یک شورا به ساده تشکیل شده از NaCl نبوده، بلکه ممکن است علاوه بر سدیم، حاوی نمک‌های منیزیم، پتاسیم، کلسیم، آهن و منگنز نیز بوده باشد (Valenza et al., 2000). محدوده آخرین نقطه ذوب یخ ($T_{m_{ice}}$) در نمونه‌های مذکور، از ۰/۸- تا ۶/۳- درجه سانتی‌گراد ثبت شد که به ترتیب معادل شوری‌های ۱/۴ تا ۹/۶ معادل درصد وزنی NaCl هستند (شکل ۷-الف).

۴-۲. میانبارهای سیال در باریت (کانسنگ چینه‌سان)

شکل ظاهری و نوع میانبارهای سیال در نمونه‌های باریتی، مشابه با میانبارهای سیال مشاهده شده در نمونه‌های کوارتزی است، با این تفاوت که اندازه میانبارهای سیال در نمونه‌های باریتی به طور محسوسی کوچک‌تر (حداکثر ۱۰ میکرون)، ولی تعداد آنها بیشتر است.



شکل ۶- میانبارهای سیال اولیه دوفازه (LV): الف) در کوارتزهای مربوط به رگه‌های سیلیسی پهنه استرینگر؛ ب) در باریت‌های بخش چینه‌سان کانسار. V: Vapor و L: Liquid



شکل ۷- نمودارهای دماهای همگن‌شدگی و درجات شوری برای میانبارهای سیال در: الف) کوارتز (پهنه استرینگر)؛ ب) باریت (کانسنگ چینه‌سان). نمودارهای بالایی و پایینی در دو شکل به ترتیب مربوط به دماهای همگن‌شدگی و شوری میانبارهاست.

۵- مطالعات ایزوتوپی

دمایی، شرایط احیایی، تغییرات pH و نیز مقدار ایزوتوپ خاستگاه اولیه حاصل شود (Ohmoto, 1972).

در محدوده کانسار باریکا، مطالعات ایزوتوپی پایدار گوگرد بر روی ۲۲ نمونه سولفیدی استخراج شده از ۹ رگه کوارتزی پهنه استرینگر انجام شد. پس از انتخاب نمونه‌های مناسب، کانسنگ‌های سولفیددار در اندازه‌های ۱ تا ۵ میلی‌متر خرد و

با استفاده از ایزوتوپ‌های گوگرد می‌توان منشأ گوگرد مورد نیاز برای تشکیل کانسار را تعیین کرد. همچنین تعیین دمای سیال کانه‌دار، نسبت مؤثر آب به سنگ در طی کانی‌سازی، درجه تعادل موجود در سیستم و تعیین سازوکار تشکیل و ته‌نشست ماده معدنی از دیگر کاربردهای ایزوتوپ گوگرد است (Hofes, 2009). به طور کلی تغییرات مشاهده شده در مقادیر $\delta^{34}S$ در کانی‌ها می‌تواند بر اساس تغییرات

فیزیکی و شیمیایی در نظر گرفته شده برای مرحله اصلی سیال ($T < 300^\circ\text{C}$) سهم اصلی گوگرد به صورت H_2S است (Ohmoto and Rye, 1979). در این دماها، مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ درون سولفیدها مشابه با مقدار $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ در نظر گرفته می‌شود (Ohmoto and Rye, 1979).

در تکمیل این بخش از مطالعات، مقادیر ایزوتوپی گوگرد در کانی‌های پیریت، اسفالریت و گالن استخراج شده از رگه‌های کوارتزی، جهت مطالعات دماسنجی مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲- داده‌های ایزوتوپ گوگرد مربوط به کانه‌های سولفیدی کانسار باریکا. مقدار $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ بر اساس Ohmoto and Rye (1979) برای پیریت و بر اساس Li and Liu (2006) برای گالن و اسفالریت محاسبه شده است.

.Sample no	Mineral	%($\delta^{34}\text{S}$ CDT)	(Temperature avg. $^\circ\text{C}$)	% $\delta^{34}\text{S}$ H_2S
BA-21.a	Gn	-0.8	200	2.1
BA-21.b	Sp	2.0	200	1.5
BA-22.a	Py	5.3	190	3.4
BA-22.b	Gn	0.4	190	3.4
BA-22.c	Sp	5.2	190	4.7
BA-23.a	Py	5.6	180	3.6
BA-23.b	Gn	0.2	180	3.3
BA-23.c	Sp	3.7	180	3.2
BA-24.a	Gn	0.0	220	2.6
BA-24.b	Sp	2.0	220	1.5
BA-26.a	Py	3.9	220	2.2
BA-26.b	Gn	0.4	220	3.0
BA-27.a	Py	4.3	200	2.5
BA-27.b	Gn	0.2	200	3.0
BA-27.c	Sp	2.6	200	2.1
BA-28.a	Py	4.6	200	2.9
BA-28.b	Gn	0.4	200	3.2
BA-29.a	Py	3.6	240	2.1
BA-29.b	Gn	0.3	240	2.8
BA-29.c	Sp	2.5	240	2.2
BA-30.a	Gn	0.2	210	3.0
BA-30.b	Sp	3.8	210	3.4

۵-۲. دماسنجی ایزوتوپی تشکیل کانسنگ‌ها

از زمان انتشار مقاله Urey (1947) که خواص ترمودینامیک مواد ایزوتوپی را توضیح داده، به کارگیری ایزوتوپ‌های پایدار در دماسنجی ایزوتوپی بسیار متداول شده است. مناسب‌ترین کانی‌ها برای دماسنجی ایزوتوپی، جفت کانی اسفالریت-گالن هستند و بر اساس Rey and Ohmoto (1974) این جفت کانی بهترین مطابقت را با دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال در محدوده دمایی ۱۲۵ تا ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند. مطالعه کانسارهای سولفیدی دگرگون شده (Seccombe et al., 1985; Skauli et al., 1992) نشان می‌دهد که به رغم دگرگونی، تغییرات ایزوتوپی چندانی در کانسنگ‌های اولیه کانسار صورت نگرفته است.

بر پایه مطالعات کانه‌نگاری رگه‌های کوارتزی پهنه استرینگر کانسار باریکا، کانی‌های پیریت، گالن و اسفالریت در تعادل بافتی و ایزوتوپی هستند و به‌طور هم‌زمان و از یک نوع سیال تشکیل شده‌اند. در این مطالعه، کانی‌های گالن-اسفالریت و گالن-پیریت، به‌عنوان جفت کانی‌های سولفیدی برای مطالعات دماسنجی انتخاب شدند. دماهای تخمین زده شده در این مطالعه در جدول ۳ آمده است. به جز دمای ۳۳۵ درجه سانتی‌گراد که برای یک مورد دماسنجی جفت کانی گالن-پیریت، محاسبه شده (نمونه BA24a,b)، دمای ایزوتوپی برای بقیه نمونه‌ها در محدوده ۱۶۶ تا ۲۹۳ درجه سانتی‌گراد محاسبه شده که با دماهای حاصل از مطالعه میان‌بارهای سیال در رگه‌های کوارتزی منطبق است.

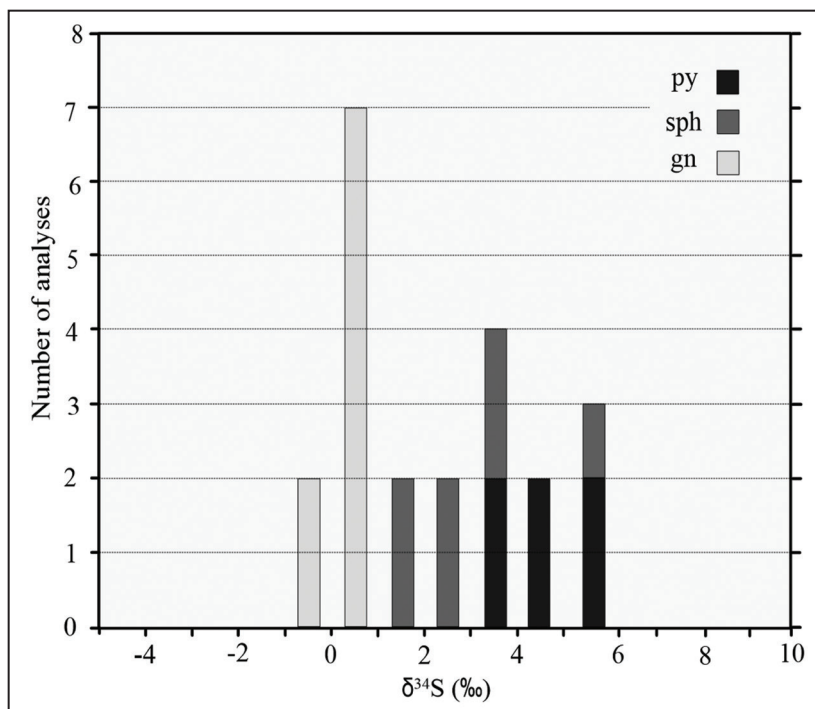
سپس مقادیر مناسب از کانه‌های سولفیدی (پیریت، اسفالریت و گالن)، به روش دستی در زیر میکروسکوپ بینا‌کولار جدا شدند. نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد در آزمایشگاه‌های سازمان زمین‌شناسی آمریکا واقع در دنور و با استفاده از دستگاه اسپکترومتر جرمی مدل MN-1201، با محدوده خطای ± 0.15 در هزار اندازه‌گیری شده است.

در جدول ۲، میزان فراوانی $\delta^{34}\text{S}$ در کانه‌های سولفیدی موجود در پهنه استرینگر - که نسبت به دمای تشکیل تصحیح شده‌اند - آمده است. البته در شرایط

۵-۱. ترکیب ایزوتوپی گوگرد

همان‌طور که در جدول ۲ و شکل ۸ مشهود است، مقادیر ایزوتوپی $\delta^{34}\text{S}$ برای کانه‌های سولفیدی در پهنه استرینگر کانسار باریکا، در بازه -0.8 تا $+5.6$ در هزار متغیر بوده و برای کانه‌های پیریت از 3.6 تا 5.6 در هزار، اسفالریت از 2 تا 5.2 در هزار و گالن از -0.8 تا 0.4 در هزار به ثبت رسیده است (جدول ۲).

بر اساس Rollinson (1993) مقادیر مذکور مطابقت خوبی با بازالت-آندزیت‌های کمان‌های آتشفشانی نشان می‌دهند که خاص مناطق برخوردی است و بر اساس (Taylor (1986), Ohmoto (1986) و Solomon et al. (2004) این محدوده باریک از $\delta^{34}\text{S}$ با محدوده ایزوتوپی گوگرد با منشأ آتشفشانی و ماگمایی (± 0.5 در هزار) بیشترین مطابقت را دارد؛ بنابراین محتمل‌ترین منبع تأمین گوگرد در کانه‌های سولفیدی باریکا، سولفیدهای موجود در سنگ‌های آتشفشانی کم‌ریز هستند که در اثر عملکرد واکنش سیالات گرمایی با منشأ آب دریا، از سنگ‌های میزبان شسته می‌شوند و همراه با مقادیری از گوگرد احیا شده موجود در آب دریا، ترکیب ایزوتوپی نهایی کانه‌ها را تعیین می‌کنند. از طرف دیگر، این محدوده باریک از $\delta^{34}\text{S}$ نشان می‌دهد که سیالات گرمایی کانه‌ساز، از یک منبع واحد تأمین شده و در طی یک مرحله از فعالیت سیستم گرمایی، کانسنگ‌های سولفیدی را تشکیل داده‌اند.



شکل ۸- محدوده ترکیب ایزوتوپی گوگرد در کانه‌های سولفیدی کانسار باریکا.

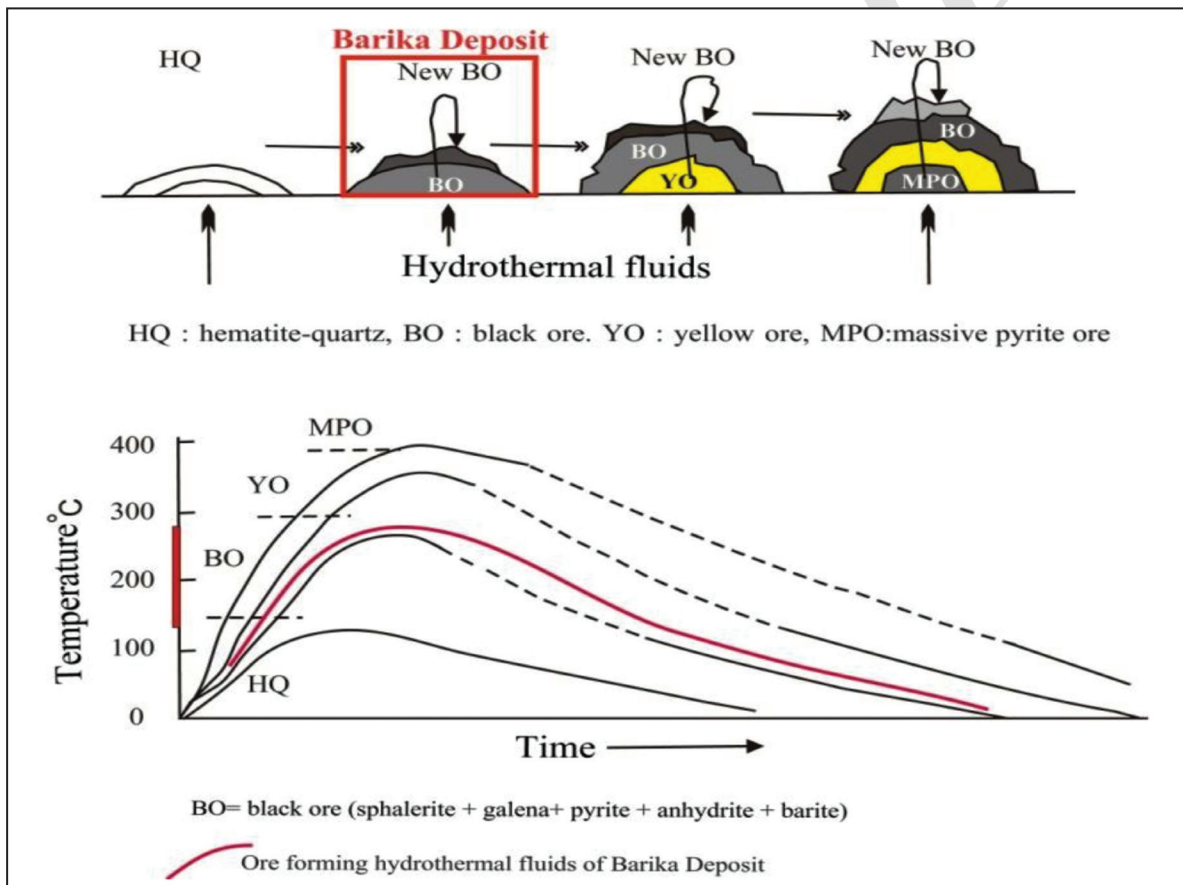
جدول ۳- دماهای ایزوتوپی تعیین شده برای کانی‌های سولفیدی همراه در کانسار باریکا.

Sample no.	Mineral Pair	$\Delta^{34}\text{S}$ (‰)	Temperature (°C)
BA-21(a,b)	sphalerite - galena	2.8	240
BA-22(a,b)	galena - pyrite	-4.9	187
BA-22(b,c)	sphalerite - galena	4.8	146
BA-23(a,b)	galena - pyrite	-5.4	165
BA-23(b,c)	sphalerite - galena	3.5	186
BA-24(a,b)	sphalerite - galena	2	335
BA-26(a,b)	galena - pyrite	-3.5	271
BA-27(a,b)	galena - pyrite	-4.1	224
BA-27(b,c)	sphalerite - galena	4.2	281
BA-28(a,b)	galena - pyrite	-4.1	224
BA-29(a,b)	galena - pyrite	-3.3	288
BA-29(b,c)	sphalerite - galena	2.2	293
BA-30(a,b)	sphalerite - galena	3.6	179

۶- بحث
۶-۱. تکامل سیال کانه‌ساز

کم‌دما با شوری پایین (۱ تا ۹/۶ درصد وزنی معادل نمک طعام) هستند که به صورت رخساره ریزدانه کانسنگ سیاه تشکیل شدند. به علت دمای کم سیال کانه‌ساز، فرایند پالایش پهنه‌ای، که مستلزم افزایش حرارت سیال از دمای حدود ۲۰۰ به بالاتر از ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد بوده، رخ نداده است تا گذر کانسنگ سیاه به کانسنگ زرد و متعاقباً کانسنگ پیریتی را امکان‌پذیر سازد (شکل ۹). از این رو، کانسار باریکا یک کانسار سولفید توده‌ای غنی از طلاست که تنها کانسنگ سیاه (black ore) در آن تشکیل شده و فاقد بخش‌های کانسنگی زرد و پیریتی است (تاج‌الدین، ۱۳۹۰). با توجه به دمای همگن شدگی تا ۲۸۳ درجه سانتی‌گراد و عدم رخداد جوشش در کانسار باریکا، فشار تا حدود ۶۷۰ بار (bar) و حداقل عمق آب حدود ۷۰۰ متر برآورد می‌شود.

قرابت درجه شوری سیالات کانه‌ساز باریکا (با میانگین‌های ۴/۷ و ۴/۱ معادل درصد وزنی NaCl به ترتیب برای کوارتز و باریت) با درجه شوری آب دریا (۳/۵ درصد وزنی NaCl)، نشان‌دهنده منشأ آب دریا برای سیالات گرمابی کانه‌ساز است. ویژگی‌های دما و شوری میانبارهای سیال در کانسار باریکا، با ویژگی سیالات کانه‌ساز توصیف شده برای کانسارهای سولفید توده‌ای نوع کوروکو (Pisutha-Arnond and Ohmoto, 1983; Wilkinson, 2001) قابل مقایسه است. با این تفاوت که دمای سیال در کانسار باریکا در حدی بوده که فقط به تشکیل کانسنگ سیاه منجر شده و نتوانسته است کانسنگ‌های زرد و پیریتی را تشکیل دهد. بر اساس مطالعات میانبارهای سیال، کانسنگ‌های سیلیسی (پهنه استرینگر) و باریتی (بخش چینه‌سان) کانسار باریکا، محصول نهشت یک مرحله از سیالات گرمابی



شکل ۹- مدل تشکیل کانسار سولفید ولکانوژنیک (بالا) و تاریخچه حرارتی سیالات گرمابی تخلیه شونده (پایین) بر اساس Ohmoto et al. (1983) و Ohmoto (1996). در بالای شکل، موقعیت کانسنگ باریکا، منطبق با کانسنگ سیاه مدل، با کادر آبی نشان داده شده است. در قسمت پایین شکل، شرایط حرارتی سیال کانه‌ساز باریکا، با نمودار آبی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در تشکیل کانسنگ باریکا، تنها یک مرحله سیال کم‌دما شرکت داشته است.

(بر روی کف دریا) سهم بیشتری از آب دریا در اختلاط با سیالات کانه‌ساز مشارکت دارد. فرایند اختلاط آب دریا با سیال گرمابی، در کاهش شوری سیال کانه‌ساز از میانگین ۴/۷ (در پهنه استرینگر) به میانگین ۴/۱ (در کانسنگ باریتی) نیز مشهود است.

سرد شدن سیالات گرمابی کانه‌ساز در کانسنگ‌های کوارتزی و باریتی از ۲۸۳ به ۱۳۲ درجه سانتی‌گراد، مستلزم سرد و رقیق شدن سیال کانه‌دار در اثر اختلاط با آب دریا در سنگ‌های بستر (پهنه استرینگر) و بر روی کف دریا (کانسنگ چینه‌سان) است؛ با این تفاوت که در تشکیل کانسنگ‌های باریتی

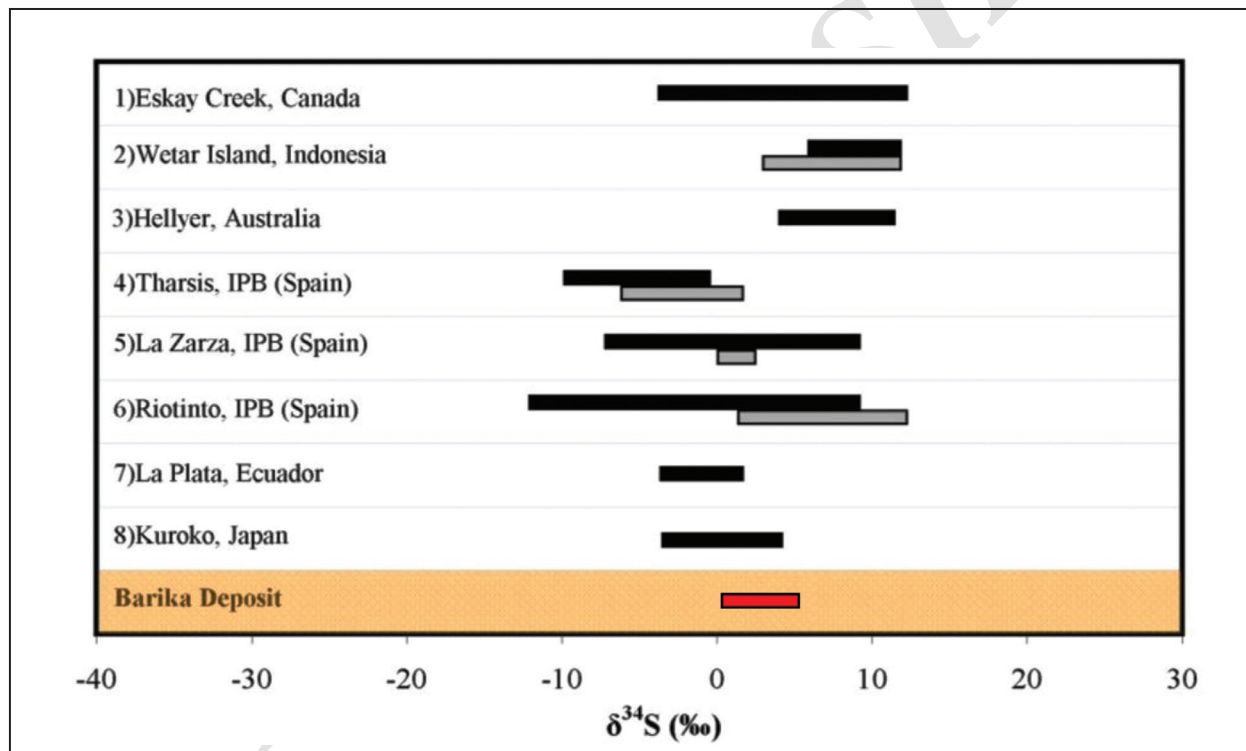
۶-۲. منشأ گوگرد و فلزات

کانسارهای نوع کوروکوی ژاپن، از شستشوی سنگ‌های آتشفشانی میزبان منشأ گرفته باشند (Solomon et al., 2004). در شکل ۱۰، مقادیر ایزوتوپ گوگرد در کانسار باریکا و کانسارهای سولفید توده‌ای کوروکو با سن فانروزویک در دیگر مناطق جهان مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقادیر ایزوتوپی گوگرد در کانسار باریکا در محدوده ایزوتوپی کانسارهای سولفیدی آتشفشان‌زاد کوروکو قرار می‌گیرد.

بر اساس نسبت‌های ایزوتوپی مذکور، آب دریا که از طریق گسل‌ها و شکستگی‌های کف دریا به اعماق نفوذ کرده، پس از مجاور شدن با توده‌های نفوذی گرم شده و هنگام صعود با سنگ‌های آتشفشانی مسیر (واحد آندزیتی K^{mvi}) واکنش داده و از نظر ترکیب ایزوتوپی با آنها به تعادل رسیده است؛ از این رو در اثر تبادل قابل توجه ایزوتوپی گوگرد در واکنش سیال-سنگ، سیالات گرمایی به‌طور چشمگیری ویژگی‌های ایزوتوپ گوگرد شاخص برای سیالات با منشأ آتشفشانی را نشان می‌دهند.

به‌طور کلی، دو مدل برای منشأ گوگرد و فلزات موجود در نهشته‌های VMS پیشنهاد شده است. بر اساس مدل اول، اعتقاد بر این است که فلزات و گوگرد از داخل چینه‌های کم‌پایین کانسارهای VMS منشأ گرفته‌اند. در این مدل، یک زون واکنشی حرارت بالا با ژرفای بیش از ۱ کیلومتر از کف دریا وجود دارد که در اثر واکنش آب دریای داغ شده با چینه‌های این زون، فلزات و گوگرد موجود در سنگ شسته وارد سیالات گرمایی می‌شود. در مدل دوم منشأ تمام یا بخشی از فلزات و گوگرد موجود در کانسارها، به‌طور مستقیم از مواد فرار خارج شده از ماگما تأمین می‌شود (Franklin et al., 2005).

نسبت‌های ایزوتوپی $\delta^{34}S$ برای کانه‌های سولفیدی موجود در رگه‌های سیلیسی پهنه استرینگر کانسار باریکا، در محدوده -0.8 تا $+5.6$ در هزار متغیر بوده و با محدوده ایزوتوپی گوگرد با منشأ آتشفشانی و یا ماگمایی (Ohmoto, 1986; Taylor, 1986: $0 \pm 5\%$) همپوشی دارد. با توجه به مقادیر ایزوتوپ گوگرد، به نظر می‌رسد گوگرد، طلا و دیگر فلزات کانه‌ساز در کانسار باریکا، مشابه با اغلب



شکل ۱۰- مقایسه محدوده تغییرات ایزوتوپ $\delta^{34}S$ در کانسار باریکا با برخی از کانسارهای نوع کوروکوی تشکیل شده در جهان با سن فانروزویک. محدوده ترکیب ایزوتوپی گوگرد برای دو بخش چینه‌سان و پهنه استرینگر کانسار باریکا، به ترتیب با مستطیل‌های قرمز و سبز رنگ نشان داده شده‌اند.

۷- نتیجه‌گیری

کانه‌های سولفیدی (پیریت، اسفالریت و گالن) موجود در رگه‌های سیلیسی پهنه استرینگر، بازه -0.8 تا $+5.6$ در هزار را نشان می‌دهد. همچنین این مقادیر از ترکیبات $\delta^{34}S$ نشان می‌دهد که مشابه بیشتر کانسارهای آتشفشان‌زاد نوع کوروکو، گوگرد سازنده کانه‌های سولفیدی از سنگ‌های آندزیتی کم‌پایین منشأ گرفته است. دماهای ایزوتوپی برای دوازده جفت کانه همراه گالن-اسفالریت و گالن-پیریت در محدوده ۱۴۶ تا ۲۹۳ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد که با دماهای حاصل از مطالعات میانبارهای سیال منطبق است.

کانسار باریکا یک کانسار سولفید توده‌ای غنی از طلای تپ کوروکو است که در واحد متاآندزیت با سن کرتاسه تشکیل شده است. بر اساس مطالعات میانبارهای سیال، کانسار باریکا محصول نهشت یک مرحله از سیالات گرمایی کم‌دما با شوری پایین است که تنها کانسنگ سیاه در آن تشکیل شده و فاقد بخش‌های کانسنگی زرد و پیریتی است. این مطالعه نشان می‌دهد که سرد شدن سیالات گرمایی کانه‌دار - که در اثر اختلاط با آب دریا رخ داده - یکی از فرایندهای مهم در نهشت کانسنگ‌های باریکا بوده است. مقدار $\delta^{34}S$ برای

سپاسگزاری

کردن امکانات لازم جهت انجام عملیات صحرایی کمال تشکر و سپاسگزاری را دارند. همچنین از سردبیر و داوران محترم فصلنامه علوم زمین، به خاطر راهنمایی‌های ارزنده علمی که منجر به غنای بیش‌تر مقاله حاضر شده است، تشکر می‌شود.

این مقاله بخشی از رساله دکترای نویسنده اول در دانشگاه تربیت مدرس است. نگارندگان مراتب سپاس خود را از حوزه معاونت محترم پژوهشی و فناوری این دانشگاه ابراز می‌دارند و از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، به جهت حمایت‌های مالی و فراهم

کتابنگاری

- تاج‌الدین، ح.، ۱۳۹۰- عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی طلا در سنگ‌های دگرگون‌شده منطقه سقز- سردشت، شمال‌باختر پهنه دگرگونه سنندج- سیرجان، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- تاج‌الدین، ح.، راستاد، ا.، یعقوب‌پور، ع.، محجل، م.، عابدیان، ن.، برنا، ب.، دری، م.، روزه، س. و یارمحمدی، ع.، ۱۳۸۸- مراحل تشکیل و تکوین کانسار سولفید توده‌ای غنی از طلای باریکه، براساس مطالعه ساخت، بافت و میکروترمومتری میانبراهای سیال، خاور سردشت، سنندج- سیرجان شمالی. بیست و هفتمین گردهمایی علوم زمین و سیزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- شرکت معدن طلای گل‌دیس سردشت، ۱۳۸۷- گزارش نیمه‌تفصیلی اکتشاف طلا در محدوده معدنی باریکه، خاور شهرستان سردشت.
- یارمحمدی، ع.، ۱۳۸۵- کانی‌شناسی، ژئوشیمی، ساخت و بافت و ژنز کانه‌زایی طلا (نقره، فلزات پایه و باریت) در محدوده معدنی باریکه، خاور سردشت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- یارمحمدی، ع.، راستاد، ا.، محجل، م. و شمس، م. ج.، ۱۳۸۴- رخداد طلای باریکه: کانه‌زایی تیپ ماسیوسولفید و لکانوژنیک غنی از طلا در ایران، خلاصه مقالات بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- یارمحمدی، ع.، راستاد، ا.، محجل، م. و شمس، م. ج.، ۱۳۸۷- رخداد طلای باریکه: کانه‌زایی تیپ ماسیوسولفید و لکانوژنیک غنی از طلا در ایران. مجله علوم دانشگاه تهران. جلد ۳۴، شماره ۱، ص. ۴۷ تا ۶۰.

References

- Azizi, H. and Jahangiri, A., 2008- Cretaceous subduction-related volcanism in the northern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *J. Geodyn.* 45: 178- 190.
- Azizi, H. and Moinevaziri, H., 2009- Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran. *Journal of Geodynamics* 47: 167- 179.
- Dubé, B., Mercier-Langevin, P., Hannington, M., Davis, D. and Lafrance, B., 2004- Le gisement de sulfures massifs volcanogènes aurifères LaRonde, Abitibi, Québec: altération, minéralisations, genèse et implications pour l'exploration. *Ministères des Ressources naturelles de la faune et des parcs*. MB 2004-03. 112 p.
- Franklin, J. M., Gibson, H. L., Jonasson, I. R. and Galley, A. G., 2005- Volcanogenic massive sulfide deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 523- 560.
- Goldfarb, R. J., Baker, T., Dube, B., Groves, D. I., Hart, C. J. R., Gosselin, P., 2005- Distribution, character and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, pp 407- 450.
- Hofes, J., 2009- *Stable Isotope Geochemistry*, Springer, 6th edn, 285 p.
- Huston, D. L., 2000- Gold in volcanic-hosted massive sulfide deposits: distribution, genesis, and exploration, in Hagemann, S.G. ed., *Gold in 2000: Reviews in Economic Geology*, 13: 401- 426.
- Kerrick, R., Goldfarb, R. J. and Richards, J. P. R., 2005- Metallogenic Provinces in an Evolving Geodynamic Framework. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, pp 1097- 1136.
- Large, R. R., Huston, D. L., McGoldrick, P. J. and Ruxton, P. A., 1989- Gold distribution and genesis in Australian volcanogenic massive sulfide deposits and their significance for gold transport models. *Economic Geology Monograph* 6, 520- 536.
- Li, Y. and Liu, J., 2006- Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 1789- 1795.
- Mohajjel, M., 1997- Structure and tectonic evolution of Palaeozoic- Mesozoic rocks, Sanandaj±Sirjan Zone, western Iran. Ph.D. thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia (unpublished).
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L. and Sahandi, M. R., 2003- Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21: 397- 412.
- Ohmoto, H., 1972- Systematic of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology* 67(5): 551- 579. .
- Ohmoto, H., 1986- Stable isotope geochemistry of ore deposits. In: Valley JM, Taylor HP, O'Neil JR (eds) *Stable isotopes in high temperature geological processes*. *Rev Mineral* 16: 491- 560.

- Ohmoto, H., 1996- Formation of volcanogenic massive sulfide deposits: the Kuroko perspective. *Ore Geology Reviews*, 10: 135- 177.
- Ohmoto, H., and Rye, R. O., 1979- Isotopes of sulfur and carbon. In: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 2nd edn. Holt Rinehart and Winston, New York.
- Ohmoto, H., Mizukami, M., Drummond, S. E., Eldridge, C. S., Pisutha–Armond, V. and Lenagh, T. C., 1983- Chemical processes of Kuroko formation. *Economic Geology Monograph 5*: 570- 604.
- Pisutha–Armond, V. and Ohmoto, H., 1983- Thermal history and chemical and isotopic compositions of the ore–forming fluids responsible for the Kuroko massive sulfide deposits in the Hokuroko district of Japan. *Economic Geology Monograph 5*: 198- 223.
- Poulsen, K. H., Robert, F. and Dubé, B., 2000- *Geological Classification of Canadian Gold Deposits: Geological Survey of Canada Bulletin 540*, 106 p.
- Roedder, E., 1984- Fluid inclusions. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, 12, 644 p.
- Rollinson, H. R., 1993- *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific & Technical, London, 352 p.
- Rye, R. O. and Ohmoto, H., 1974- Sulfur and carbon isotopes in ore genesis: a review. *Economic Geology* 69: 826- 842.
- Seccombe, P. K., Spry, P. G., Both, R. A., Jones, M. T. and Schiller, J. C., 1985- Base metal mineralization in the Kaumantoo Group, South Australia: a regional sulfur isotope study. *Economic Geology* 80: 1824- 1841.
- Sheikholeslami, M. R., 2002- Evolution structurale et métamorphique de la marge sud de la microplaque de l’Iran central: les complexes métamorphiques de la région de Neyriz (Zone de Sanandaj-Sirjan), Thèse, université de Brest, 194p.
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H. and Alderton, D. H. M., 1985- *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie, Glasgow, 239 p.
- Skauli, H., Boyce, A. J. and Fallick, A. E., 1992- A sulphur isotopic study of the Bleikvassli Zn-Pb-Cu deposit, Nordland, northern Norway. *Mineralium Deposita* 27: 284- 292.
- Solomon, M., Tornos, F., Large, R. R., Badham, J. N. P., Both, R. A. and Zaw, K., 2004- Zn–Pb–Cu volcanic-hosted massive sulphide deposits: criteria for distinguishing brine pool-type from black smoker-type sulphide deposition. *Ore Geology Reviews* 25: 259- 283.
- Taylor, H. P. Jr., 1986- The oxygen isotope geochemistry of igneous rocks: *Contributions to Mineralogy and Petrology* 19: 1- 71.
- Urey, H. C., 1947- The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of Chemical Society* 562- 581.
- Valenza, K., Moritz, R., Mouttaqi, A., Fontignie, D. and Sharp, Z., 2000- Vein and karst barite deposits in the western Jebilet of Morocco: fluid inclusion and isotope (S, O, Sr) evidence for regional fluid mixing related to central Atlantic Rifting. *Economic Geology* 95(3): 587- 606.
- Wilkinson, J. J., 2001- Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55: 229- 272.

Archives of SID

Thermometry and origin of the mineralizing fluid at Barika gold deposit, East of Sardasht

H. A. Tajeddin¹, E. Rastad^{2*}, A. Yaghoubpour³, M. Mohajjel⁴ and R. Goldfarb⁵

¹Assistant Professor, Department of Economic Geology, Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Professor, Department of Economic Geology, Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³Professor, Department of Geology, Kharazmi University, Tehran, Iran

⁴Associate Professor, Department of Structural Geology, Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

⁵Professor, Department of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing, China

Received: 2017 February 18

Accepted: 2017 October 25

Abstract

Barika gold (and silver)-rich volcanogenic massive sulfide deposit is located 18 km east of Sardasht in the northwestern Sanandaj–Sirjan metamorphic zone. The rocks in the vicinity of the Barika deposit predominantly consist of Cretaceous volcano-sedimentary sequences of phyllite, slate, andesite and tuffite, metamorphosed under greenschist facies grade. The Barika deposit is composed of stratiform ore and stringer zone which both are hosted in an altered and sheared meta-andesite unit. The stratiform ore, approximately 150 m long and up to 20 m thick consists of sulfide and barite ores associated with lesser amounts of silica bands. Fluid inclusion studies indicate that quartz (stringer zone) and barite (stratiform ore) samples homogenized between 146°C to 283°C and 132° to 223°C, respectively. Salinities of the fluid inclusions show a range from 1.4 to 9.6 wt. % NaCl equivalent which are close to that of normal seawater. The study indicates that cooling occurred in the initial ore fluids, as a result of mixing with seawater, as an important process in the formation of the Barika deposit. The $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfide minerals (pyrite, sphalerite and galena) from stockwork mineralization in the Barika deposit range from -0.8 to +5.6 per mil and fall within the range of values observed for volcanogenic massive sulfide deposits. The narrow range of measured $\delta^{34}\text{S}$ values from the sulfide minerals suggests that similar to most Kuroko VMS deposits, the ore-forming sulfur derived from leaching of igneous sulfur from the underlying andesitic rocks. Calculated sulfur isotope temperatures for twelve coexisting galena-sphalerite and galena-pyrite pairs range from 146 to 293°C which is consistent with temperatures estimated from fluid inclusion studies.

Keywords: VMS deposit, Fluid inclusion, Sulfur isotope, Barika, Sardasht.

For Persian Version see pages 17 to 28

*Corresponding author: E. Rastad; E-mail: rastad@modares.ac.ir