

بَلور شناسی و کانی سناسی ایر ان

سال بیست و نهم، شمارهٔ سوم، پاییز ۱۴۰۰، از صفحهٔ ۵۸۷ تا ۵۹۶

بررسی شرایط دمایی، خاستگاه بیسموت و سازوکار روبش طلا توسط فاز بیسموتی در کانسار طلای آتش انبار (جنوب قزوین)

ابراهيم طالع فاضل ، نركس اعلايي مقتدر، عباس اروجي

گر*وه زمینشناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان* (دریافت مقاله: ۹۹/۷/۲۰، نسخه نهایی: ۹۹/۱۰/۱

چکیده: بر پایه مدلسازیهای ترمودینامیکی انجام شده، عناصر گوگرد دوست با نرخ ذوب پایین چون بیسموت نقش مهمی در روبش عناصر گرانبها (مانند طلا، نقره و عناصر گروه پلاتین) از سیال گرمایی دارند که به عنوان مدل روبشی بیسموت مایع (LBCM) مطرح شده است. در این پژوهش، ترکیب شیمیایی کانه سولفوسالتی فریبرجیت، سولفیدهای بیسموت و ذرات طلای آزاد (با اندازه ۲۰ تا ۱۰۰ میکرون) در رگه کوارتز- سولفید برشی کانسار طلای آتش انبار (جنوب قزوین)، به عنوان پر عیارترین رگه طلا-بیسموت این ذخیره بررسی شده است. بر اساس زمیندماسنجی فهلور و محاسبه نسبتهای مولی (Ag+Cu) و (Ag+Cu) در ترکیب فریبرجیتها، دمای ۲۰۰ تا ۲۰[°] ۲۵۰ برای کانهسازی بدست آمد. بر پایه محاسبه نسبتهای مولی (Ag+Cu) و (Zn+Fe) در ترکیب فریبرجیتها، دمای ۲۰۰ تا ^{20°} ۲۵۰ برای کانهسازی بدست آمد. بر پایه بررسیهای، خاستگاه بیسموت در رگههای چندفلزی کانسار آتش انبار، پلاژیوکلازهای موجود در سنگ میزبان داسیت پورفیری بوده که طی دگرسانی به مجموعه کائولینیت±سریسیت، عنصر بیسموت از ترکیب آن آزاد شده است. نتایج نشان میدهد که واکنشهای اکسایش-سولفیدزدایی سیال گرمابی توسط دولومیتهای آهندار باطله (به عنوان عامل اکسیدی و فاز میانگیری پایدار) موجب ناپایداری کمپلکسهای Au[°] Bi₂S₂(OH) و تبدیل ^{+a}Bi و Bi³ شده که طی آن، الکترونهای آزاد شده اید. نتایج نشان میدهد که واکنشهای اکسایش-سولفیدزدایی HBi₂S₄⁻ جذب ذرات طلا توسط ذرات بیسموت شدهاند.

واژههای کلیدی: شیمی کانیها؛ روبش طلا توسط بیسموت؛ طلای آزاد؛ کمپلکسهای بیسولفیدی؛ آتش انبار.

مقدمه

آگاهی از چگونگی تشکیل کانیهای میزبان و عناصر همراه طلا چون بیسموت، تلوریم و آرسنیک نقش مهمی در بررسی رخداد ذخایر طلا و فرایندهای مهاجرت و ته نشست طلا در سامانههای گرمابی دارد [۱]. در بسیاری از کانسارهای گرمابی طلا، این عنصر گرانبها به صورت میانبار (طلای آزاد یا الکتروم و کمتر در غالب ترکیبهای تلورید طلا و نقره) یا نامرئی در شبکه کانیهای سولفیدی چون پیریت و آرسنوپیریت تشکیل میشود [۲، ۳].

کانسار طلا آتش انبار (مختصات [']۴۹°۳۹ تا [']۴۹°۳۶ طول شرقی و [']۴۹°۳۵ تا [']۴۹°۳۵ عرض شمالی) به مساحت تقریبی ۲۰ کیلومتر مربع، در جنوب غربی دانسفهان از توابع استان قزوین واقع است. این منطقه

در بخش شمالی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر قرار دارد که از دیدگاه فلززایی، مهمترین پهنه فلززایی مس، مولیبدن و طلا در ایران محسوب میشود [۴]. شکل گیری این کمربند سازوکار مشابه با فعالیت ماگمایی منطقه آند داشته و در نتیجه فرورانش سنگ کره اقیانوسی نئوتتیس به زیر خرده قاره ایران مرکزی در سنوزوئیک ایجاد شده است [۵، ۶]. فعالیتهای اکتشافی در منطقه آتش انبار توسط سازمان صنایع و معادن استان قزوین انجام شده که بر اساس آن، تناژ ۲ میلیون تن (از مجموعه عناصر فلزات پایه و طلا) و عیار متوسط طلا کانسار آتش انبار در رده کانسارهای فراگرمایی سولفیدشدگی متوسط کانسار آتش انبار در رده کانسارهای فراگرمایی سولفیدشدگی متوسط

*نویسنده مسئول، تلفن: ۸۱۳۸۳۸۱۶۰۱، نمابر: ۸۱۳۸۳۸۱۱۷۲، پست الکترونیکی: tale.fazel@gmail.com

(Axioplan2) بررسی گردیدند. پس از بررسیهای سنگ نگاری و انتخاب نمونههای مورد نظر، تعداد ۱۰ مقطع پس از کربن اندود شدن (با ضخامت تقریبی ۲۰۰ آنگستروم)، در موسسه زمینشناسی و کانیشناسی نووسیبریسک (Novosibirsk) روسیه با ریزکاو Cameca الکترونی (EMPA)، تجزیه شدند. این کار با دستگاه Cameca الکترونی (SX100)، تجزیه شدند. این کار با دستگاه X100 کیلوولت، قطر باریکهی الکترونی ۳–۱۰ میکرون و زمان شمارش ۲۰ کیلوولت، قطر باریکهی الکترونی ۳–۱۰ میکرون و زمان شمارش ۲۰ تا ۳۰ ثانیه، انجام شد. زاویه جهش هندسی پرتوی ایکس دستگاه بین ۴۰ تا ۵۲ درجه، خطای تجزیه ۲۰٫۰ درصد و حد تشخیص بین ۴۰ تا ۲۵ درجه، خطای تجزیه ۲۰٫۰ درصد و مد تشخیص طلای آزاد تجزیه نقطهای گردیدند (جدول ۱). تجزیه ریزکاوالکترونی و تصاویر پس پراکنده الکترونی شرایط دمایی کانهزایی، خاستگاه بیسموت و شبیه سازی چگونگی روبش طلا توسط مذاب بیسموتی در سیال گرمابی بررسی شده است. روشن است که بررسی روابط بافتی-شیمیایی عناصر فلزی همراه طلا و سازوکار انحلال و ته نشست آنها می تواند نقش مفیدی در راستای گسترش برنامه های اکتشافی در منطقه آتش انبار داشته باشد.

روش بررسی

بازدید صحرایی و نمونهبرداریهای از رگههای سولفیدی مختلف در منطقه برای بررسی شیمی کانیها و روابط بافتی-شیمیایی آنها، انجام شد. به این منظور، تعداد ۲۰ مقطع صیقلی و نازک-صیقلی تهیه شده و با میکروسکوپ قطبشی عبوری- بازتابی زایس (مدل

جدول ۱ مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین درصد وزنی (%wt) ۱۵ عنصر آشکار شده در ترکیب کانههای سولفید بیسموت، فریبرجیت و طلای آزاد کانسار آتش انبار براساس تجزیه ریزکاو الکترونی (EMPA). (n: تعداد نقاط تجزیه شده و ND: آشکار شده)

طلا (۱۰=n)	فريبرجيت (λ=n)	بیسموتینیت (۳=n)	ایمپلکتیت (۲=n)	فردریچیت (۹=n)	سری بیسموتینیت-آیکینیت (۶=n)	عناصر
۰ _۱ ۰ ۳– ۰ _۱ ۵ ۱	14/22-26/14	۲٫۳۸-۴٫۳۶	۱۳٫۸۶-۱۹٫۳۱	۵٫۳۵-۱۱٫۲۰	١,٢۶-٣,١٧	مس
(• _/ ٢۶)	(۲ ۱/۳۰)	(٣,٣٧)	(۱Y,·۸)	(Y,44)	(۲,۲۶)	(میانگین)
ND	۴٫۸۱-۶٫۸۸	•,•-•,• ٩	•,•-۶,•۲	۰٬۰-۰٬۱۹	۰,۰۲-۰,۱۶	آهن
	(۵٫۷۴)	(۰٬۰۴)	(1,2m)	(•,•۵)	(• _/ •٩)	(میانگین)
ND	•,1•-•,7Y (•,1Y)	ND	ND	ND	ND	قلع (میانگین)
ND	ND	•,\•=•,\\ (•,\\)	•,•=•,1۴ (•,•۶)	ND	ND	سلنيوم (ميانگين)
ND	•,•-•,۶۴ (•,١٢)	ND	ND	ND	ND	آرسنیک (میانگین)
۲۱/۳۲-۱۵/۳۸	۳۵٬۰۳۰٬۵۳	•,• ٢ -•,٣٣	۰, <i>۰</i> –۳,۵۲	ND	<i>۹</i> ۸ _۱ ۰ – ۰ ، ۸۹	نقره
(17/71)	(78,74)	(۰٫۱۵)	(۰,۹۴)		(•,YY)	(میانگین)
ND	۲۰,۷۸-۲۷,۲۷ (۲۴,۲۶)	•,•=•,•¥ (•,•Y)	ND	ND	ND	آنتيموان (ميانگين)
ND	7,27-4,27 (7,89)	ND	•,•=•,•٣ (•,•1)	ND	ND	روی (میانگین)
ND	ND	ND	۰, ۰–۳ _/ ۷۰	۳۰,۴۷-۳۶,۰۵	۴,۳۵-۹,۵۲	سرب
			(1,81)	(۳۳٫۷۰)	(۶,۲۱)	(میانگین)
•,•=•,•₩ (•,•1)	۰٬۰-۰٬۰۶ (۰٬۰۳)	ND	ND	ND	ND	جيوه (ميانگين)
ND	۰,۰۳–۰,۱۰	ND	•,·-•,· ۵	•,•-•,•۶	•,• \ -•,• ۴	كادميوم
	(•,·Y)		(• ₁ •1)	(•,•٢)	(• _/ •۲)	(میانگین)
•,•-•,•¥ (•,•Y)	ND	&N, &N-N&, TT	۵۰٫۴۸-۶۷٫۵۶	۳۶٬۰۸–۴۷٬۱۱	۶۹٫۳۸–۷۷٫۰۷	بيسموت
		$(V \cdot \Delta)$	(Δ٩ _/ ΔΥ)	(۴۱٬۸۸)	(۲۳٬۶۷)	(میانگین)
۸۳٬۹۳–۸۸ _/ ۷۱	•,•-•,1٣ (•,•٣)	•,•=•,•۴	•,•-•,•٣	$\begin{array}{c} \bullet_{I} \bullet = \bullet_{I} \bullet \mathfrak{V} \\ (\bullet_{I} \bullet \mathfrak{l}) \\ \end{array} \qquad \begin{array}{c} \bullet_{I} \bullet \Delta = \bullet_{I} \bullet \Lambda \\ (\bullet_{I} \bullet \mathfrak{l}) \\ \end{array}$	ND	طلا
(۶۶/۱۹۹)		(• _/ •۲)	(• _/ • \)			(میانگین)
ND	ND	•,·-•,• <i>۴</i>	•,•-•,•۴	•,•-•,•۴	ND	تلوريم
		(• _/ •۲)	(• _/ •1)	(• _/ •1)		(میانگین)
ND	10,17-70,78	۱۶٫۸۱–۱۸٫۲۴	۱۸٫۸۵-۲۱٫۱۶	۱۳٬۷۷-۱۷٬۷۵	10/98-11/40	گوگرد
	(1Y/AY)	(17/87)	(۱۹٫۴۶)	$(10/\Lambda \cdot)$	(14/24)	(میانگین)

زمينشناسى

کانسار آتش انبار در چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ ساوه [۹] و برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ دانسفهان [۱۰]، قرار دارد. بر اساس نقشههای زمین-شناسی ناحیهای، قدیمیترین واحدهای سنگی منطقه آتش انبار مربوط به سنگ آهک و دولومیتهای چرتدار سازند میلا به سن کامبرین هستند که در منطقه مورد بررسی رخنمون ندارد. پس از آن، بیشترین حجم سنگهای رخنمون یافته در منطقه دانسفهان مربوط به سنگهای آتشفشانی ائوسن پیشین تا پسین است (شکل ۱). واحدهای سنگی ائوسن پیشین شامل توالی انواع توفهای ریزدانه سبز رنگ دربردارنده قطعههای فسیل نومولیت با ترکیب حدواسط تا اسیدی است که رخنمون های آن با گسترش افقی به نسبت بالا در نواحی رزک و کورچشمه (جنوب گسل حسن آباد) دیده می شود. پس از آن، واحد ائوسن میانی اغلب از نهشتههای رسوبی شامل نومولیت تشکیل شده است که به دلیل ضخامت کم، با نام نهشتههای بین لایهای معرفی شدهاند. سرانجام واحد ائوسن پسین شامل گدازههای با ترکیب حدواسط- بازی است که این گدازههای آتشفشانی با مجموعهای از رسوبهای آذرآواری شامل برش آتشفشانی، توف سبز نازک لایه و ایگنمبریتهای با ترکیب اسیدی پوشیده میشوند. مهمترین سنگهای رخنمون یافته در منطقه آتش انبار شامل واحدهای Eo^{br} (ریولیت و ریوداسیت)، Eo (آندزیت، داسیت و ریوداسیت) و Eo^{ab} (تراکیآندزیت) هستند



شکل ۱ موقعیت کانسار آتش انبار در بخش شمالی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر به همراه نقشهی زمینشناسی معدنی منطقه مورد بررسی (بر پایه تصویر ماهوارهای و نقشه پایه دانسفهان [۱۰]).

(شکل ۱). بر اساس نقشههای زمینشناسی منطقه، واحدهای نفوذی در منطقه آتش انبار رخنمون ندارد. از دیدگاه ساختاری، گسل حسن آباد با راستای شمال غربی- جنوب شرقی (NW-SE) و درازای بیش از ۵۰ کیلومتر مهمترین پدیده ساختاری در منطقه مورد بررسی بوده که بصورت معکوس و با مولفه راستا لغز و چپگرد است [۱۱]. بر اساس بررسیها، آثار جنبشی و حرکتهای کوهزاد زاگرس بر عملکرد رفتاری این گسل اثر داشته و منجربه شکل گیری انشعابهای گسلی فرعی با ماهیت راستالغز شدهاند که کنترل کننده کانهزایی رگهای سولفیدی در منطقه آتش انبار هستند.

کانهزایی و دگرسانی

کانهزایی در کانسار آتش انبار با ماهیت روزادی در غالب ۳۴ رگه چندفلزی طلادار (مجموعه عناصر Pb-Zn-Cu-Au) با پهنایی ۵/۰ تا ۶ متر و درازای تقریبی ۵ تا ۸۰ متر، در سه منطقه رخداده است (شکل ۱). تغییرات و چگونگی رخداد کانهزایی در هر سه منطقه مشابه هستند و این رگهها با شیب ۵۵ درجه تا نزدیک به قائم و عمق ۲۰ تا ۴۵ متر در سنگ میزبان ریوداسیت و داسیتهای دگرسان ائوسن میانی (واحد ^{br}od)، تشکیل شدهاند (شکلهای ۲ الف و ب). در مجموع ۱۳ ترانشه و چاهک اکتشافی با هدف بررسی رگههای معدنی و طلا در کانسار آتش انبار حفر شده که راستای اغلب رگهها شرقی– غربی تا NW-SE است (شکل ۲ پ).



شکل ۲ تصاویر صحرایی و نمونهدستی از رخنمونهای کانهزایی در کانسار آتش انبار الف) نمایی از رگه کوارتز- سولفید برشی طلادار در سنگ میزبان داسیت پورفیری با دگرسانی آرژیلی، ب) نمونهدستی از رگه باریت- سولفید و وجود بلورهای زرد عسلی اسفالریت در آن، پ) نمایی نزدیک از ترانشه اکتشافی Tr-2 عمود بر رگه معدنی (دید عکس به سمت شمال غرب) و ت) نمایی نزدیک از رگه معدنی گرفته شده در ترانشه شماره ۲. (باریت Brt اسفالریت Sp، مالاکیت MIC).

بافت و ساخت ماده معدنی در کانسار آتش انبار بطور عمده شامل رگه- رگچهای، قشرگون، گل کلمی، برشی و افشان است. دگرسانی آرژیلی با مجموعه کانیهای رسی کائولینیت⊣یلیت±دیکیت به همراه دگرسانی سیلیسی (مجموعه کوارتز±ژاسپر) و دگرسانی سریسیتی (مجموعه موسکویت±پیریت) اصلیترین دگرسانیهای سریسیتی با مجموعه کانیهای کلریت-کلسیت±اپیدوت در فاصله پروپلیتی با مجموعه کانیهای کلریت-کلسیت±اپیدوت در فاصله دورتر از کانهزایی در سنگهای آتشفشانی میزبان کانهزایی قابل دیده میشود.

کانیشناسی و توالی همبرزایی

کانیهای سولفیدی، اکسیدی، سیلیکاتی و کربناتی مهمترین کانیهای کانسار آتش انبار هستند. برپایه بررسیهای کانهنگاری میکروسکوپی، کالکوپیریت (با فراوانی ۵۰ درصد)، گالن و اسفالریت (با مجموع فراوانی ۴۰ درصد)، پیریت، سولفید بیسموت، فریبرجیت، کالکوسیت-کوولین، مالاکیت، طلا و مس آزاد (با مجموع فراوانی کمتر از ۱۰ درصد) به ترتیب مهمترین کانههای فلزی کانسار آتش

انبار هستند که همراه باطلههای کوارتز، باریت، دولومیت و کلسیت تشکیل شدهاند (شکل ۲ت). روتیل، زیرکن و آپاتیت نیز به مقدار جزیی در رگهها تشخیص داده شدند. براساس شواهد صحرایی و آزمایشگاهی، سه مرحله همبرزایی کانیایی در کانسار طلای آتش انبار قابل تشخیص است. مرحله پیش از کانی سازی (مرحله I) با حضور پیریتهای افشان نسل اول در سنگ میزبان واحد Eord قابل تشخیص است. مرحله کانی سازی اصلی (مرحله II) از سه زیر مرحله کالکوپیریت رگهای شامل کالکوپیریت و مقادیر جزئی مس آزاد، ۲) رگه کوارتز - سولفید برشی غنی از طلا شامل پیریت نسل دوم، كالكوپيريت، سولفيد بيسموت، اسفالريت، گالن و مقادير جزئي فريبرجيت و طلاى آزاد همراه باطله دولوميت آهندار و ۳) رگه باریت- سولفید شامل باریت، اسفالریت و گالن تشکیل شده است. مرحله پس از کانیسازی مرحله (III) با مجموعه کانیهای برونزاد مس (چون کالکوسیت-کوولین، مالاکیت، آزوریت)، کوپریت و گوتیت مشخص می شود. توالی همبرزایی کانسار آتش انبار در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ توالی همبرزایی و مراحل زمانی رخداد کانیها در کانسار آتش انبار. ضخامت خطوط نشان دهنده فراوانی است.

سنگنگاری و شیمی کانیها

در این پژوهش، کانیهای سولفید بیسموت، فریبرجیت و طلای آزاد تشکیل شده در رگه کوارتز-سولفید برشی غنی از طلا با هدف دستیابی به روابط بافتی-شیمیایی، تعیین شرایط دمایی و سازوکار روبش طلا توسط فاز بیسموتی تجزیه نقطهای شدند. دادههای بدست آمده بصورت کمینه، بیشینه و متوسط غلظت عناصر مختلف در جدول ۱ ارائه شدهاند و در ادامه توضیح داده می شوند.

سولفید بیسموت: این کانی با ابعاد تقریبی ۰٫۱ تا ۰٫۳ میلیمتر، رنگ بازتابی سفید مات تا زرد روشن، ناهمسانگردی خاکستری و بلورهای کشیده در بررسی های میکروسکوپی قابل شناسایی است (شکل ۴ الف). بر اساس نتایج تجزیه ریز کاو الکترونی و برپایه گزارش تستا و همکاران [۱۲]، کانههای سولفیدی بیسموتدار در کانسار آتش انبار شامل، سری بیسموتینیت- آیکینیت (با فرمول تجربی $(Pb_{0.8}Cu_{1.2}Bi_{1.0}S_{2.9})$ فردريچيت (فرمول تجربى ($Cu_{1,2}Bi_{0,9}S_{1.8}$ نام المربول تجربى ($Pb_{5.02}Cu_{5.8}Bi_{6.6}S_{18}$)، ايمپلكتيت (فرمول تجربى $Bi_{0.9}S_{1.8}$ و بیسموتینیت (فرمول تجربی $Cu_{0.2}Bi_{1.9}S_{3.1}$) هستند (شکلهای ۴ ب و پ). در ترکیب سری بیسموتینیت – آیکینیت، مقادیر متوسط سرب ۶٬۲۱ درصد وزنی، مس ۲٬۲۶ درصد وزنی، بیسموت ۷۳٬۶۷ درصد وزنی و نقره ۲۷ درصد وزنی آشکار شد (جدول ۱). در ترکیب فردریچیت نیز بطور متوسط مقدار مس ۷٬۴۴ درصد وزنی، سرب ۳۳٬۷۰ درصد وزنی، بیسموت ۴۱٬۸۸ درصد وزنی و طلا ۰٬۰۷ درصد وزنی به دست آمد. در ترکیب ایمیلکتیت مقادیر متوسط مس ۱۷٬۰۸ درصد وزنی، آهن ۱٬۵۳، سرب ۱٬۶۱ درصد وزنی، بیسموت

۵۹٬۵۷ درصد وزنی و نقره ۰٬۹۴ درصد وزنی آشکار شد. ترکیب شیمیایی بیسموتینیت نیز بطور متوسط دربردارنده ۳٬۳۷ درصد مس، ۱۱/۰ درصد سلنیوم، ۱۵/۰ درصد نقره و ۷۵٬۵۱ درصد بیسموت است (جدول ۱). همچنین در ترکیب کانههای بیسموتدار کانسار آتش انبار به صورت ناچیز عناصر آنتیموان، روی، کادمیوم و تلوریم با مقادیر کمتر از ۰۰٬۰۵ درصد وزنی آشکار شد.

فريبرجيت: اين كانه سولفوسالتي با ابعاد تقريبي ٠/٣ تا ٠/٨ ميليمتر، تەرنگ بازتابی خاکستری تا قهومای، بدون ناهمسانگردی و بلورهای بی شکل در بررسی های میکروسکوپی شناسایی شد (شکل ۴ت). این کانی با فرمول تجربی Cu_{7.0}Ag_{3.0}Fe_{1.2}Zn_{0.8})₁₂Sb₄S₁₃ در تصاویر الکترونهای پس پراکنده (BSE) نیز شناسایی گردید (شکلهای ۴ ث و ج). بر اساس تجزیه نقطهای انجام شده، در تركيب بلورهاى فريبرجيت كانسار آتش انبار، مقدار متوسط عناصر روی ۳٬۶۶ درصد وزنی، آهن ۵٬۷۴ درصد وزنی، مس ۲۱٬۳۰ درصد وزنی، نقره ۲۶٬۷۴ درصد وزنی، آنتیموان ۲۴٬۲۶ درصد وزنی و قلع ۰٬۱۷ درصد وزنی آشکار شد (جدول ۱). همچنین در ترکیب فريبرجيت مقادير ناچيز كادميوم، طلا و جيوه (كمتر از ۰٫۱ درصد وزنی) دیده شد. با توجه به وجود ترکیبات فلزی و شبه فلزی متعدد در کانی های سولفوسالتی گروه فهلور [۱۳]، برپایه نمودار دوتایی نسبتهای عنصری (Sb/(Sb+As و Zn/(Fe+Zn نسبت به مقدار Ag در فرمول کانی (برحسب apfu) [۱۴]، کانه های سولفوسالتی تنانتیت، تتراهدریت و فریبرجیت از هم تفکیک شدند که در گستره فریبرجیت قرار داشتند (شکل ۵).



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونهای پس پراکنده (BSE) از کانیهای سولفید بیسموت، فریبرجیت و طلای آزاد در کانسار آتش انبار الف) کانی-های بیسموتدار بصورت پراکنده در میزبان کالکوپیریت، ب) کانیهای بیسموتدار ایمپلکتیت (Cu₁₂Bi₀₉S₁₈) و سری بیسموتینیت- آیکینیت (Pb₀₈Cu₁₂Bi₁₀S₂₉)، پ) رخداد تیغههای بیسموتینیت (Cu₀₂Bi₁₉S_{3.1}) در میزبان فردریچیت (Pb₅₀₂Cu_{5.8}Bi₆₆S₁₈)، ت) بلورهای آزاد فریبرجیت بدون لبه واکنشی، ث) درهمرشدی گالن و فریبرجیت در میزبان اسفالریت، ج) رخداد فریبرجیت با فرمول تجربی 2Ds4S₁₈S₁₈(Sl)، ت) بلورهای آزاد فریبرجیت بدون چ) ذره آزاد طلا در میزبان کالکوپیریت، ح) تصویر BSE ذره آزاد طلا به همراه بیسموتینیت، خ) ذرات آزاد طلا در میزبان دولومیتهای آهندار باطله. (گالن Gn، کالکوپیریت Cro-Ct بیسموتینیت Bis-aik، فردریچیت (Frg، بیسموتینیت-آیکینیت Ard, بیسموتینیت-آیکینیت Bis-aik، فردریچیت (Cu₂Sigho)، در میزبان کالکوپیریت کار رویکه دولومیتهای آهندار باطله. (گالن



شکل ۵ نمودارهای دوتایی برای تشخیص کانیهای سولفوسالتی گروه فهلور در کانسار آتش انبار [۱۴]: الف) نسبت عنصری Sb/Sb+As نسبت به مقدار Ag در فرمول کانی و ب) نسبت عنصری Zn/Fe+Zn نسبت به مقدار Ag در فرمول کانی.

طلای آزاد: این کانی با ابعاد تقریبی ۲۰ تا ۱۰۰ میکرون، رنگ بازتابی زرد طلایی، بازتابندگی و برجستگی بالا در بررسی های

میکروسکوپ نوری و تصاویر الکترون پس پراکنده (BSE)، دیده شد (شکلهای ۴چ و ح). در کانسار آتش انبار، طلای آزاد با مقدار طلای

بین ۸۳/۹۳ تا ۸۸/۸۱ درصد وزنی (متوسط ۸۶/۸۹ درصد وزنی) و نقره ۸۸/۸۱ تا ۱۱/۳۲ درصد وزنی (متوسط ۱۲/۲۱ درصد وزنی)، وجود دارد (جدول ۱). همچنین، مس و بیسموت به ترتیب با مقادیر متوسط ۲۶/۰ و ۲۰/۰ درصد وزنی در ترکیب طلا آشکار شد. جیوه به صورت ناچیز (کمتر از ۲۰/۰ درصد وزنی) در ترکیب طلای آزاد به صورت ناچیز (کمتر از ۲۰/۰ درصد وزنی) در ترکیب طلای آزاد کانسار آتش انبار شناسایی شد. خلوص ذرات طلای آزاد و الکتروم از رابطه (۳۲%) Au (۳۲%) می / ۱۵۵0 × (۳۲%) ا مشخص می شود که بر اساس آن عیار طلای کانسار آتش انبار مقدار بالای ۱۰۱۱ تا ۱۰۱۷ بدست آمد. همچنین نسبت آمد (جدول ۱). نرات طلای آزاد این کانسار بین ۲/۴ تا ۰/۸ بدست آمد (جدول ۱). طلای آزاد همچنین در میزبان دولومیتهای آهندار کانسار آتش انبار دیده شد (شکل ۴خ).

بحث

دمای تشکیل کانسار

یکی از روشهای موثر برای برآورد دمای کانیسازی استفاده از ترکیب شیمیایی فریبرجیت و زمیندماسنجی کانههای گروه فهلور [۱۶] است. این روش بر پایه تعادلهای ترمودینامیکی سامانه کانیایی Ag₂S-Cu₂S-ZnS-FeS-Sb₂S₃-As₂S₃ استوار است کانیایی Ag₂As₂S₃ استوار است [۱۶]. به این منظور از منحنیهای همدما در نمودار (Ag(Ag+Cu) نسبت به (Zn/Zn+Fe برای ترکیب شیمیایی فریبرجیت استفاده شده است. برپایه تصاویر میکروسکوپی (شکل ۴ت)، شاهدی از واکنشهای شیمیایی انحلالی و فازهای محلول- جامد در بافت



شکل ۶ نمودار نسبت مولی (Ag/(Ag+Cu نسبت به Zn/(Zn+Fe) در ترکیب فریبرجیتهای کانسار آتش انبار. منحنیهای همدما بر اساس روابط ساک [۱۶] رسم شدهاند. بر اساس این نمودار، کانیسازی طلا در کانسار آتش انبار در گستره دمایی ۲۰۰ تا C° ۲۵۰ رخ داده است.

فریبرجیتها دیده نشد؛ از این رو میتوان از آنها به عنوان زمین-دماسنج قابل اعتماد استفاده کرد [۱۷]. همچنین، شرط دیگر استفاده از زمین دماسنج فهلور نسبت مولی (Ag+Cu)کمتر از ۵۵/۰ در ترکیب فریبرجیت است که به دلیل نزدیکی منحنیهای هم دما در نسبتهای بالا و در نتیجه عدم قطعیت دمایی مطرح میشود. این نسبت در فریبرجیتهای کانسار آتش انبار کمتر از میشود. این نسبت در فریبرجیتهای کانسار آتش انبار کمتر از ۹۶/۰ است. بر این اساس، مقادیر نسبت مولی (Ag+Cu) و ۹۶/۰ است. بر این اساس، مقادیر نسبت مولی (Ag+Cu) و ۹۶/۰ تا ۴۶/۰ تا ۴۶/۰ برای کانمزایی طلا در کانسار ساک [۱۶]، دمای ۲۰۰ تا ۲۵ م ۲۰ برای کانمزایی طلا در کانسار آتش انبار بدست آمد (شکل ۶). این نتایج با دمای همگن شدن میانبارهای سیال در کانسار آتش انبار بر رگههای کوارتز-سولفید همخوانی دارد [۸].

خاستگاه بیسموت

فراوانی بیسموت در ساختار پوسته قارمای کمتر از 1/6، گرم در تن است [۱۸]. این عنصر در محلولهای گرمابی احیایی اغلب بصورت یون Bi^{3+} جابجا میشود که به دلیل شعاع یونی بالا، اغلب جایگزین Ca^{2+} در ترکیب کانیهای سیلیکاتی می گردد [۱۹]. این عنصر در مقایسه با ترکیبات سولفیدی و اکسیدی میتواند در طیف گسترده-ای از گریزندگیهای اکسیژن و گوگرد (fO_2 و fO_2)پایدار باشد. سنگهای دارای پلاژیوکلاز از جمله سنگهای آذرین حدواسط تا اسیدی از منابع مهم بیسموت در ذخایر معدنی هستند [۲۰]. ایمیلکتیت و بیسموتینیت، همراه ذرات طلای آزاد که در تصاویر

سنگهای اسیدی چون گرانیت و داسیت یورفیری از مهمترین منابع بیسموت در ذخایر معدنی شناخته می شوند که کمربند گرانیتی یا نشانیان-هیمالیا (Yanshanian-Himalayan) در آسیا از آن جمله است [۲۱]. در منطقه مورد بررسی در آتش انبار، واحدهای سنگی آتشفشانی وابسته به ائوسن میانی تا پسین رخنمون دارند که در میان آنها، سنگهای داسیت- ریوداسیت (واحد Eord) با دگرسانی کائولینیت±سریسیت سنگ میزبان اصلی رگههای چندفلزی بیسموت - طلا در منطقه هستند (شکلهای ۱ و ۲). در این منطقه، آثاری از رخنمونهای گرانیت- گرانودیوریت دیده نشد. همچنین، وجود تودههای گرانودیوریتی موجب بالا رفتن تمرکز مولیبدن در رگههای معدنی می شود که بطور عمده ۳ تا ۸ برابر بیشتر از داسیتهای پورفیری است [۲۲]. براساس بررسیهای زمین شیمیایی و شیمی کانهها، شواهدی از حضور مولیبدن در منطقه آتش انبار دیده نشد. افزون بر این، غنی شدگی بیسموت در داسیتهای یورفیری حدود ۱۵ گرم در تن [۲۰] و در ترکیب توده-های نفوذی حدواسط- اسیدی کمتر از ۰٬۰۱ گرم در تن گزارش شده است [۲۳]. مقدار بیسموت در سنگهای آتشفشانی منطقه آتش انبار حدود ۱۳۰ گرم در تن تعیین شده [۷] که حدود ۱۰۰۰ برابر غلظت متوسط آن در ترکیب پوسته قارهای است. بنابراین، برپایه همه شواهد بیان شده بنظر میرسد که خاستگاه بیسموت در رگههای چندفلزی طلادار کانسار آتش انبار، واحدهای داسیت-ریوداسیت پورفیری میزبان هستند که در اثر دگرسانی و تبدیل پلاژيوكلاز آنها به مجموعه كائولينيت±سريسيت، عنصر بيسموت از ترکیب آنها آزاد شده و وارد جریان سیال گرمابی و همراهی آن با ذرات طلا شده است.

سازوكار روبش طلا توسط بيسموت

برپایه پژوهشهای انجام شده، عناصر گوگرد دوست با نرخ ذوب پایین چون Bt، Te و PE در فرایندهای موثر بر ته نشست طلا اثر دارند [۲۴– ۲۶]. در این بین، بیسموت با دمای ذوب C^o ۲۷۱ به عنوان یکی از عناصر کلیدی همراه طلا، هنگام اشباع شدن در سیال گرمابی، بجای تبلور، بصورت قطرکهای مذاب ته نشین میشود [۲۵]. در این شرایط، مذاب بیسموتی میتواند بخش مهمی از کمپلکسهای بی سولفیدی انتقال دهنده طلا و دیگر یونهای فلزی را بخود جذب نماید [۲۵، ۲۶]. این فرضیه نخستین بار توسط داگلاس و همکاران [۲۶] به عنوان مدل روبشی بیسموت مایع (LBCM) مطرح شد. حضور کانههای سولفیدی بیسموتدار چون سری بیسموتینیت– آیکینیت، فردریچیت،

BSE دیدہ شد (شکل ۴ح)، گویای ارتباط زایشی- بافتی تەنشست طلا با شکل گیری بیسموت در کانسار آتش انبار است. این فرایند که مذاب غنی از بیسموت می تواند مقادیر بالایی از طلا را از سیال گرمابی در تعادل با مذاب خارج نماید، در اصطلاح جاروب طلا (Gold scavenging) مینامند [۲۵، ۲۵]. رخداد چنین پدیدهای در سامانههای گرمایی طلادار در بسیاری موارد به تنوع کانیهای بیسموتدار و نسبت Bi/S در آنها بستگی دارد [۲۷] که این تغییرات کانی شناسی- شیمیایی در سولفیدهای بیسموت کانسار آتش انبار ديده مي شود. ضريب توزيع طلا ميان فاز آبگين و D=CBi-minerals/Cfluid) کانی های بیسموت دار توسط رابطه نرنست که در آن D ضریب توزیع نرنست و $C_{Bi-minerals}$ و مترتیب تمرکز بیسموت در کانی و سیال هستند) بیان می شود [۲۴]. مهاجرت طلا در سیال گرمابی با ظرفیتهای Au^+ و Au^+ مهاجرت بیسموت با ظرفیت ⁺³Bi صورت می گیرد که هنگام ته- Bi^0 و Au^0 و tim تشست، با گرفتن الکترون به صورت عناصر خنثی نهشته می شوند [۲۷]. نقش تأمین الکترون و ایجاد شرایط احیاء-کنندگی سیال اغلب توسط فازهایی چون پیروتیت و گرافیت ایفا ${
m Fe}^{3+}$ می شود. یژوهش های جدید نشان می دهد که فازهای دارای (چون مگنتیت، اپیدوت و کربناتهای آهندار) نیز می توانند موجب احیاء کمپلکسهای ${
m Bi}^{3+}({
m OH})_3$ و تبدیل آن به ${
m Bi}^0$ در سیال شوند [۲۷]. بررسیهای تکمیلی توسط اسکیرو و والشه [۲۸] نشان داد که تبادل سیال دارای Cu-Au-Bi در اثر واکنش-های اکسایش- سولفیدزدایی با کانیهای کربناتی شامل آهن (چون دولومیتهای آهندار) موجب ناپایداری کمپلکسهای بی-سولفیدی بیسموت (مانند $Bi_2S_4^-$ و $Bi_2S_2(OH)_2$ در محیط می شود. سپس با تشکیل کانی های آهن دار به عنوان فاز بافر پایدار، الکترون آزاد شده از آن منجربه تبدیل یون Au^+ (طلای محلول در شبکه) به Au^0 (طلای مرئی) در سیال و جذب آن توسط فاز بیسموت می شود. در مجموع با توجه به همبری ذرات طلای آزاد (Au^{0}) و سولفید بیسموت (چون بیسموتینیت) در زمینه دولومیتهای آهندار باطله (شکل ۴خ)، بهنظر میرسد که سازوکار تهنشینی طلا در رگههای سولفیدی برشی کانسار آتش انبار با عملكرد مستقيم فاز بيسموت صورت گرفته است. چگونگی ته-نشست طلا توسط فازهای بیسموتی و عملکرد دولومیتهای آهن-دار به عنوان عامل میانگیری محیط، بصورت یک مدل چند مرحلهای شبیهسازی شده که در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷ مدل شبیه سازی شده از سازوکار روبش طلا توسط مذاب بیسموتی و به دام افتادن آن در دولومیت های آهندار باطله در کانسار آتش انبار (با تغییرات کلی از ژو و همکاران [۲۹]): الف) حضور عناصر بیسموت و طلا بصورت محلول در سیال گرمابی و شکل گیری اولیه دولومیت آهندار، ب) همزمان با کاهش گریزندگی اکسیژن، دولومیت های آهندار تبلور یافته و مذاب بیسموتی طلای موجود در سیال گرمابی را روبش مینماید، پ) افزایش دوباره اکسیژن و نوسان آن موجب انحلال فاز بیسموتی (تشکیل ⁺³Bi) و ته نشست طلا (⁰Au) از سیال اشباع می شود (شکل ۴خ را ببینید)، ت) کاهش دما (سردشدگی) همزمان با افزایش مقدار سولفور سیال موجب سولفیدشدگی مذاب Bi-Au و تبلور همزمان بیسموتینیت (Bi₂S₃) همراه ذرات طلای آزاد (Au⁰) می شود (شکل ۴ ح را ببینید).

قدردانی

تشكر را دارند.

مراجع

بخشی از منابع مالی این یژوهش توسط مرکز حمایت از یژوهش-

های دانشگاهی از سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) تأمین شده است. از مالک معدن آتش انبار، جناب

آقای انصاری برای همکاری در بازدیدها و عملیات نمونهبرداری

صمیمانه قدردانی می شود. نویسندگان از داوران مجله بلور شناسی

و کانیشناسی ایران برای دقت نظر و پیشنهادات سازنده کمال

[1] Senanayake G., "Review of rate constants for thiosulphate leaching of gold from ores, concentrates

and flat surfaces: Effect of host minerals and pH".

[2] Ciobanu C.L., Cook N.J., Utsunomiya S., Kogagwa M., Green L., Gilbert S., Wade B., "Gold-

telluride nanoparticles revealed in arsenic-free

pyrite". American Mineralogist (2012) 97, 1515-

[3] Cook N.J., Chryssoulis S.L., "Concentrations of

invisible gold in the common sulfides". Canadian

[4] Rabiee A., Rossetti F., Tecce F., Asahara Y.,

Azizi H., Glodny J., Lucci F., Nozaem R., Opitz J

Selby D., "Multiphase magma intrusion, oreenhancement and hydrothermal carbonatisation in

the Siah-Kamar porphyry Mo deposit, Urumieh-

Dokhtar magmatic zone, NW Iran". Ore Geology

Minerals Engineering (2007) 20, 1–15.

Mineralogist (1990) 28, 1–16.

Reviews (2019) 110, 102930.

برداشت

با توجه به شواهد بافت و ساخت و همبری کانیها، سه مرحله كانەزايى اصلى شامل كالكوييريت رگەاى، رگە كوارتز- سولفيد برشی غنی از طلا و رگه باریت- سولفید در منطقه آتش انبار تشخیص داده شد. در این میان، رخداد کانی سازی کوارتز - سولفید برشی به عنوان مهمترین مرحله شکل گیری عناصر چندفلزی مس، بیسموت و طلا از اهمیت بالایی برخوردار بوده و اغلب همراه با كانى باطله دولوميت آهندار شكل گرفته است. برپايه شواهد، خاستگاه بیسموت در رگههای چندفلزی طلادار کانسار آتش انبار واحدهای داسیت-ریوداسیت یورفیری میزبان هستند که در اثر دگرسانی و تبدیل یلاژیوکلاز آنها به مجموعه کائولینیت ± سریسیت، عنصر بیسموت از ترکیب آنها آزاد شده و وارد جریان سیال گرمابی و همراهی آن با ذرات طلا شده است. بر اساس بررسی های انجام شده، عناصر گوگرد دوست با نرخ ذوب پایین چون بیسموت، سرب و تلور به عنوان فازهای عنصری همراه طلا، نقش مهمی در جاروب عناصر گرانبها و کم غلظت (مانند طلا، نقره و عناصر گروه پلاتین) در سامانههای گرمابی دارند. مدلسازیهای انجام شده بر اساس تعادلهای ترمودینامیکی نشان میدهند که مذابهای غنی از بیسموت می توانند مقادیر بالایی از طلا را از سیال گرمابی در تعادل با مذاب خارج نمایند. با توجه به همبری ذرات طلای آزاد و سولفید بیسموت در زمینه دولومیتهای آهن-دار باطله در رگه کوارتز- سولفید برشی کانسار آتش انبار، به نظر می سد که جذب و رخداد طلا در این منطقه توسط فاز بیسموت انجام شده است.

1518.

[19] Liu Y.J., Cao L.M., Liu Z.L., "*Elementary Geochemistry*". Geological Publishing House, Beijing, (1984) 548p.

[20] Ye L., Liu T., Yang Y., Gao W., Pan Z., Bao T., "Petrogenesis of bismuth minerals in the Dabaoshan Pb–Zn polymetallic massive sulfide deposit, northern Guangdong Province, China". Journal of Asian Earth Sciences (2014) 82, 1-9.

[21] Huang D.H., Ding X.S., Wu C.Y., "Mineral characteristics and occurrence of gold, silver and bismuth of the Caijiaying leadzinc-silver deposit, Hebei province". Acta Geologica Sinica (1991) 65, 127-140.

[22] Wang P.A., Kaneda H., Ding S.J., Zhang X.W., Liao X.J., Dong F.X., Li Z.J., Liu X.C., Lai Y., "Geology and mineralogy of the Baolun hydrothermal gold deposit in the Hainan Island, South China". Resource Geology (2006) 56, 157-166.

[23] Turekian K.K., Wedepohl K.H., "*Distribution of the elements in some major units of the earth crust*". Geological Society of American Bulletin (1961) 72, 175–192.

[24] Tooth B., Brugger J., Ciobanu C., Liu W., "Modeling of gold scavenging by bismuth melts coexisting with hydrothermal fluids". Geology (2008) 36, 815–818.

[25] Tooth B., Ciobanu C.L., Green L., O Neill B., Brugger J., "*Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: An experimental study*" Geochimica et Cosmochimica Acta (2011) 75, 5423– 5443.

[26] Douglas N., Mavrogenes J., Hack A., England R., "*The liquid bismuth collector model: an alternative gold deposition mechanism*". In Understanding planet Earth; searching for a sustainable future; on the starting blocks of the third millennium, 15th Australian Geological Convention (eds. C. G. Silbeck and T. C. T. Hubble). Geological Society of Australia, Sydney (2000) 135p.

[27] Acosta-Góngora P., Gleeson S.A., Samson I.M., Ootes L., Corriveau L., "Gold refining by bismuth melts in the Iron Oxide-Dominated NICO Au-Co-Bi (±Cu±W) deposit, NWT, Canada". Economic Geology (2015) 110, 291–314.

[28] Skirrow R.G., Walshe J.L., "Reduced and oxidized Au-Cu-Bi iron oxide deposits of the Tennant Creek inlier, Australia: An integrated geologic and chemical model". Economic Geology (2002) 97, 1167–1202.

[29] Zhou H., Sun X., Cook N.J., Lin H., Fu Y., Zhong R., Brugger J., "Nano- to micron-scale particulate gold hosted by magnetite: a product of gold scavenging by bismuth melts". Economic Geology (2017) 112, 993–1010. [5] Sengör A.M.C., "*Tectonics of the Tethysides:* orogenic collage development in a collisional setting". Earth and Planetary Science Letters (1987) 15, 213–244.

[6] Omrani J., Agard P., Whitechurch H., Benoit M., Prouteau G., Jolivet L., "Arc-magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences". Lithos (2008) 106, 380–398.

[7] Pirooz H., "*Report of final exploration stage in the Atash-Anbar polymetallic deposit*". Industry and mines ministry of the Qazvin province (2015) 55p.

[8] Alaei-Moghtader N., "Mineralogy, fluid inclusions and geochemistry of stable isotopes in Atash-Anbar polymetallic deposit, SW Danesfahan, Qazvin Province". MSc thesis. Bu-Ali Sina University, Hamedan, (2020) 181 p.

[9] Nogol Sadat A., Hushmand Zadeh A., "*Saveh quadrangle geological map, scale 1:250,000*". Geological Survey of Iran (1984).

[10] Eghlimi B., "*Danesfahan geological map, scale 1:100,000*". Geological Survey of Iran (2000).

[11] Bolourchi M.H., "*Etude geologique de la region d'Avaj (NW de l'Iran), stratigraphie et tectique*". Geological Survey of Iran (1975).

[12] Testa F.J., Zhang L., Cooke D.R., "Physicochemical conditions of formation for bismuth mineralization hosted in a magmatichydrothermal breccia complex: An example from the Argentine Andes" Minerals (2018) 8, 486-507.

[13] Ramdohr P., "*The ore minerals and their intergrowths*", Pergamon press (1980) 1205p.

[14] Cook N.J., Spry P.G., Vokes F.M., "*Mineralogy* and paragenetic relationships among sulphosalts and related minerals in the Bleikvassli Zn-Pb-(Cu) deposit, Nordland, Norway", Mineral Deposita (1998) 34, 35-56.

[15] Marsden J., House I., "*The chemistry of gold extraction*" SME press (2006) 490p.

[16] Sack R.O., "Internally consistent database for sulfides and sulfosalts in the system Ag_2S - Cu_2S -ZnS-FeS- Sb_2S_3 - As_2S_3 " Geochimica et Cosmochimica Acta (2005) 69, 1157–1164.

[17] Zhai D., Williams-Jones A.E., Liu J., Selby D., Voudouris P.C., Tombros S., Li K., Li P., Sun H., "The genesis of the giant Shuangjianzishan epithermal Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia, Northeastern China". Economic Geology (2020) 115, 101–128.

[18] Rudnick R.L., Gao S., "*Composition of the continental crust*". In: Rudnick, R.L., (Ed.), The Crust. Treatise on Geochemistry (2005) 3, 1-64.