

زمین‌شناسی و کانه‌زایی کانسار طلای اپی‌ترمال سه‌بندون، شمال بردسکن، خراسان رضوی

بهزاد حمامی پور بارنجی^۱، حسینعلی تاج‌الدین^{۲*} و لیلا برهمند^۳

^۱ کارشناس ارشد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۲۵

چکیده

کانسار طلای سه‌بندون در بخش شمالی زون ایران مرکزی و در ۴۰ کیلومتری شمال بردسکن واقع است. واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده کانسار، مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی کرتاسه شامل تراکیت- تراکی آندزیت، آندزیت بازال، توف و شیل کربناته هستند که بعد از انوسن، توسط نفوذی‌های نیمه‌عمیق با ترکیب سینیت- کوارتزسینیت و دایک‌های دیابازی قطع شده‌اند. کانسار طلای سه‌بندون، به‌صورت یک توده دگرسان شده قیفی شکل با بروزند سطحی ۵۰×۹۰ و عمق حدود ۷۰ متر است که در گدازه‌های تراکیت- تراکی آندزیت رخ داده است. کانسنگ‌های طلادار، بیشتر با دگرسانی‌های سیلیسی، سولفیدی و در بخش‌هایی با دگرسانی آرژیلی (برونزاد) همراه و توسط دگرسانی فراگیر پروپیلیتیکی احاطه شده‌اند. اصلی‌ترین ساخت و بافت‌های کانسنگ‌های طلادار، رگه- رگچه‌ای (استوک‌ورک) و برشی است که با کوارتز و کانی‌های سولفیدی پر شده‌اند. کانی‌شناسی کانسنگ ساده و شامل کانی‌های فلزی اولیه پیریت، اسفالریت، کالکوپیریت، بورنیت، گالن، آرسنوپیریت و طلا و کانی‌های ثانویه کالکوسیت، کوولیت و اکسیدهای آهن است. طلا در اندازه‌های کوچک‌تر از ۶۰ میکرون، به‌صورت ادخال در پیریت و کالکوپیریت، در مرز کانه‌های سولفیدی و به‌صورت آزاد در کوارتز مشاهده شده است. بر اساس داده‌های زمین‌شیمیایی، بیشینه مقدار طلا و نقره در کانسنگ‌های طلادار کانسار سه‌بندون به ترتیب ۸/۵ و ۲۸ گرم در تن اندازه‌گیری شده است. مطالعات میانبارهای سیال روی کوارتزهای کانسنگ‌های طلادار، نشانگر آن است که میانبارهای اولیه بیشتر از نوع دوفازی غنی از مایع هستند. دمای همگن‌شدگی سیالات کانه‌ساز در بازه ۱۶۵ تا ۲۵۴ درجه سانتی‌گراد و شوری آنها از ۰/۹ تا ۷/۸ درصد وزنی معادل نمک طعام اندازه‌گیری شده است. مقایسه ویژگی‌های مطالعه شده در کانسار سه‌بندون با ویژگی‌های شاخص کانسارهای طلا، نشان می‌دهد که این کانسار از نظر ویژگی‌های زمین‌شناختی و کانی‌سازی از جمله سنگ میزبان، دگرسانی‌های همراه، زمین‌شیمی و پاراژنر عصری، ساخت، بافت و پاراژنر کانی‌شناسی و میانبارهای سیال بیشترین شباهت را با ذخایر اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین تا حد واسط نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: کانه‌زایی طلا، اپی‌ترمال، میانبارهای سیال، سه‌بندون، زیرپهنه سبزوار.

*نویسنده مسئول: حسینعلی تاج‌الدین

E-mail: h.tajeddin@modares.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

ساخت، بافت و پاراژنر کانی‌ها، میانبارهای سیال نیز مطالعه و با توجه به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز، چگونگی نهشت کانسنگ و تیپ کانی‌سازی بررسی شده است. بدیهی است که مطالعه ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی این کانسار می‌تواند برای اکتشاف این نوع از کانسارهای طلا در بخش‌هایی از زیرپهنه سبزوار مورد استفاده قرار گیرد که شرایط زمین‌شناسی مشابهی دارند.

بر اساس مدل‌های زمین‌شناسی و ژئودینامیکی، کمربند تیتس پتانسیل بالای برای کانه‌زایی‌های فلزی به‌ویژه کانسارهای اپی‌ترمال- پورفیری طلا و مس دارد (Richards and Sholeh, 2016; Richards, 2015). ایران به علت قرارگیری در کمربند کوهزایی تیتس میزبان ذخایری از طلا و مس است که عمده این ذخایر در ارتباط با ماگماتیسیم مرتبط با کمان‌های آتشفشانی کالک‌آلکال تشکیل شده‌اند. زیرپهنه سبزوار به‌عنوان بخشی از کمربند نئوتیتس (Shojaat et al., 2003; Shafaii Moghadam et al., 2014; Shafaii Moghadam and Stern, 2014 and 2015) تعدادی از کانسارهای طلا از جمله ارغش (اشرف پور و همکاران، ۱۳۸۸)، کوه سرخ (نیرماتی، ۱۳۸۰) و کوه‌زرت تربت حیدریه (مظلومی و همکاران، ۱۳۸۷) را در خود جای داده است.

۲- روش مطالعه

این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی است. مطالعات صحرایی شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰، مطالعه پهنه‌های دگرسانی و کانسنگی و ساخت و بافت کانسنگ‌ها است. در این مرحله همزمان با تهیه نقشه زمین‌شناسی، بالغ بر ۱۲۰ نمونه سنگی از رخنمون‌ها، ترانشه‌ها و مغزه‌های حفاری برداشت و به آزمایشگاه‌های مربوطه ارسال شد. در مرحله مطالعات آزمایشگاهی، پس از بررسی‌های مقدماتی، از میان نمونه‌های برداشت شده، ۳۰ مقطع نازک، ۳۵ مقطع نازک- صیقلی و ۱۰ مقطع دو بر صیقلی تهیه و به منظور مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری، ساخت، بافت و ترسیم توالی پاراژنری کانه‌ها و میانبارهای سیال مطالعه شد. همچنین با استفاده از دستگاه XRD (بخش زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس)، کانی‌شناسی دو نمونه برداشت شده از پهنه دگرسانی آرژیلی تعیین شد. مطالعات میانبارهای سیال روی ۴ نمونه از کانسنگ‌های سیلیسی انجام شده است. اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی با استفاده از دستگاه میانبار سیال مدل Linkam THMSG600 متصل به میکروسکوپ ZEISS و مجهز به کنترل‌کننده حرارتی TMS94 و سردکننده LNP در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شده است. دامنه حرارتی دستگاه، ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است. کالیبراسیون دستگاه در مرحله گرمایش با دقت ± 0.6 درجه سانتی‌گراد و با نیترا سزیم با نقطه

نخستین مطالعات اکتشافی طلا (و فلزات پایه) در زیرپهنه سبزوار، در سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۷۶ توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و شرکت چینی جیانگزی (Jiangxi Exploration Co, 1994) انجام شد. این اکتشافات منجر به شناسایی و معرفی تعدادی محدود ناهنجاری برای عناصر مختلف و از جمله طلا شد؛ که محدوده سه‌بندون نیز به‌عنوان یک محدوده ناهنجاری طلا معرفی شد و متعاقباً به لحاظ کانی‌سازی احتمالی طلا مورد توجه قرار گرفت. کانسار طلای سه‌بندون در ۴۰ کیلومتری شمال بردسکن و در مختصات $41^{\circ} 00' 58''$ طول شرقی و $31^{\circ} 31' 42''$ عرض شمالی واقع است. پس از تکمیل اکتشافات تفصیلی توسط شرکت مهندسی مشاور پارس آسیا پی‌جو (۱۳۸۷)، این محدوده به‌عنوان کانسار طلای سه‌بندون معرفی شد. فعالیت‌های اکتشافی انجام گرفته توسط شرکت مزبور، مواردی از جمله نمونه‌برداری ژئوشیمیایی آبراه‌ای، تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس‌های ۱:۲۰۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰، حفر ترانشه و گمانه‌های مغزه‌گیری را شامل می‌شود. در پژوهش حاضر، ضمن بیان ویژگی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی،

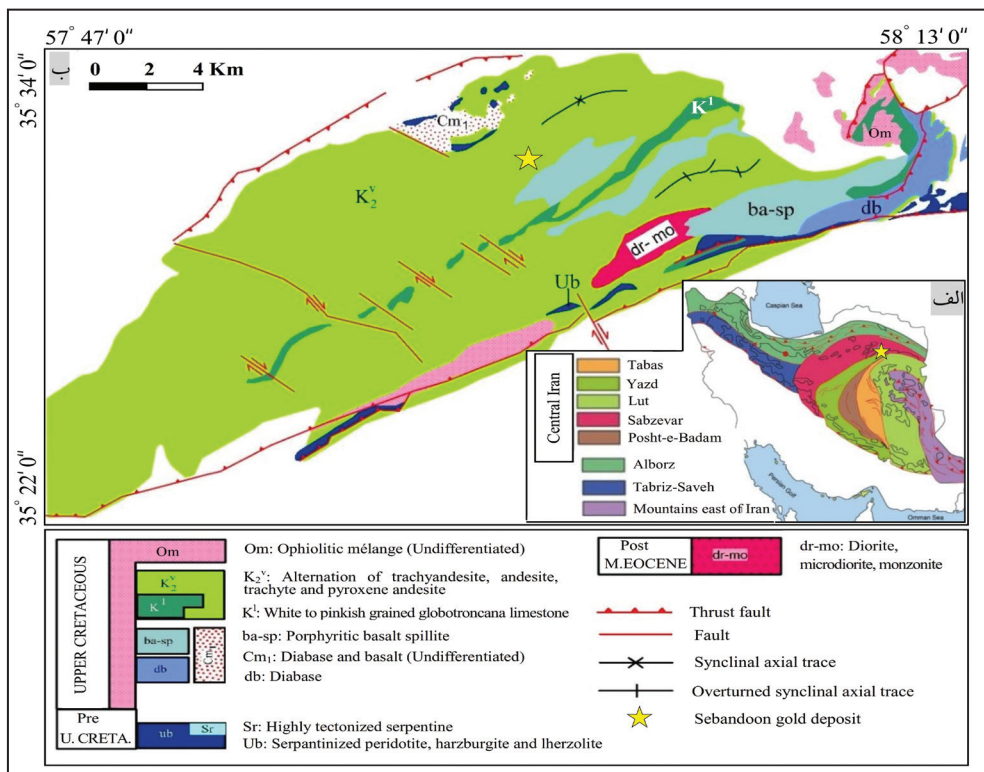
سنگواره‌های موجود در آهک‌های گلوبوترونکانادار سن آنها کراتاسه بالایی تعیین شده است.

در گستره نقشه زمین‌شناسی ورقه‌های شامکان (نادری میقان، ۱۳۷۷)، ششمند (جعفریان و جلالی، ۱۳۷۹)، کاشمر (طاهری و شمغانیان، ۱۳۸۰) و بردسکن (شهرابی و همکاران، ۱۳۸۵)، در این منطقه مجموعه سنگ‌های متعلق به پالئوزویک، مزوزویک و سنوزویک برونزد دارند (شکل ۱-ب). سنگ‌های غالب در محدوده کانسار سه‌بندون، سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی سری افیولیتی با سن کراتاسه بالایی (واحد K_2^v) و با ماهیت آلکانل تا کالک آلکانل (Baronz and Macaudiere, 1984) را شامل می‌شوند که از تناوب سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب تراکیت، تراکی آندزیت، آندزیت و پیروکسن آندزیت و سنگ‌های آذرآواری و شیل‌های سیلیسی تشکیل شده‌اند.

ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد و در مرحله سرمایش با دقت ± 0.2 درجه سانتی‌گراد و با ماده استاندارد ان‌هگزان (n-Hexane) با نقطه ذوب 94.3° - درجه سانتی‌گراد انجام شد. میزان شوری به صورت معادل درصد وزنی نمک طعام (wt. % NaCl) و از طریق دمای ذوب آخرین قطعه یخ (Tm-ice) با استفاده از فرمول ارائه شده توسط Hall et al. (1988) و مقایسه با روش Sterner et al. (1988) محاسبه شده است.

۳- زمین‌شناسی محدوده معدنی

محدوده کانسار طلای سه‌بندون، به لحاظ تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری، در بخش شمالی پهنه ایران مرکزی و زیرپهنه سبزوار (Alavi, 1994) قرار دارد (شکل ۱-الف). بر اساس نقشه زمین‌شناسی یکصد هزارم ورقه شامکان (نادری میقان، ۱۳۷۷)، این محدوده بخشی از افیولیت‌های سبزوار است که با توجه به



شکل ۱- موقعیت کانسار سه‌بندون، که با علامت ستاره نشان داده شده است؛ روی الف) نقشه زمین‌شناسی-ساختاری ایران (Alavi, 1994)؛ ب) نقشه حاصل از تلفیق بخش‌هایی از نقشه‌های یک صد هزارم زمین‌شناسی ورقه‌های شامکان (نادری میقان، ۱۳۷۷)، ششمند (جعفریان و جلالی، ۱۳۷۹)، کاشمر (طاهری و شمغانیان، ۱۳۸۰) و بردسکن (شهرابی و همکاران، ۱۳۸۵).

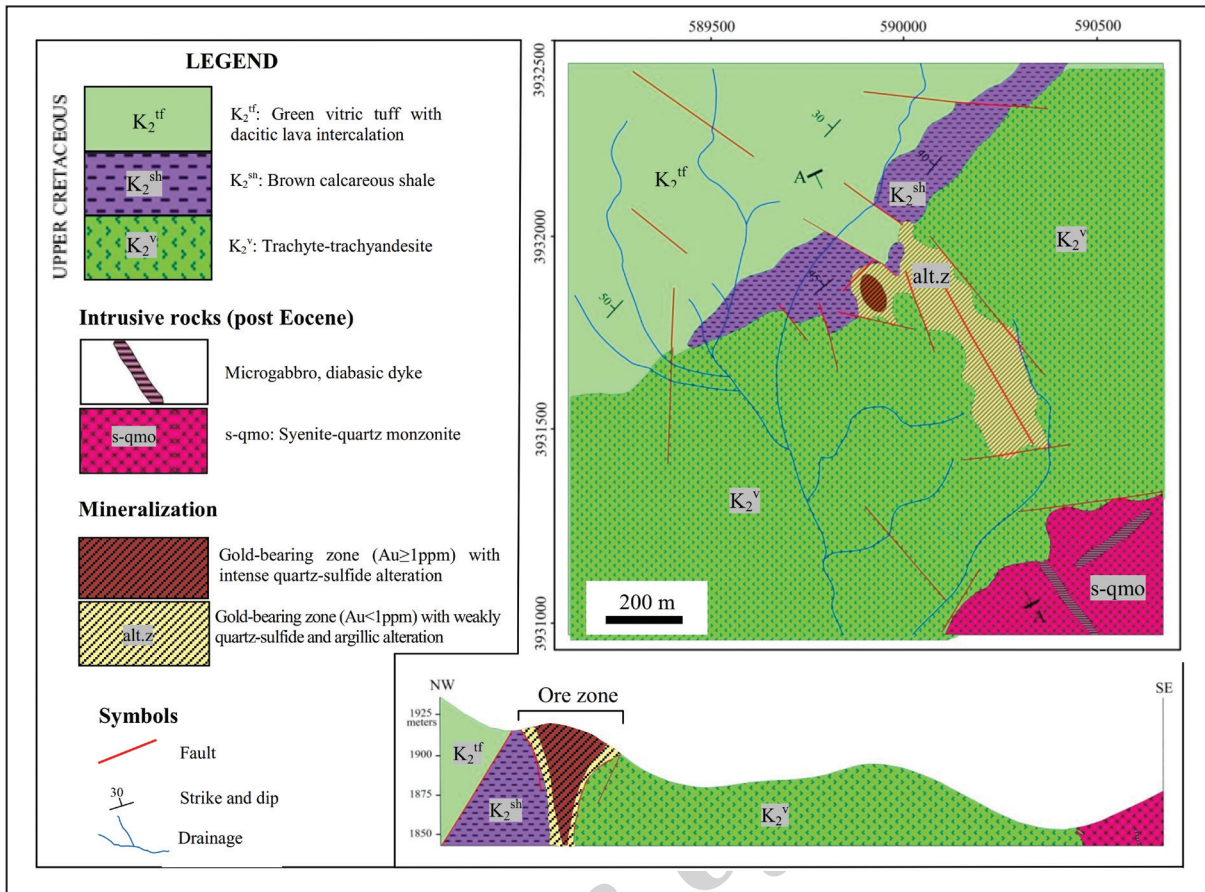
دید می‌شود (شکل ۴-الف). در این واحد شواهدی از دگرسانی کلریتی، کلسیتی و زئولیتی مشهود است.

- **واحد K_2^v** : این واحد که از شیل‌های کربناتی قرمز رنگ با میان‌لایه‌های چرتی تشکیل شده؛ دارای گسترش محدودی است و به صورت همشیب روی واحد K_2^v قرار دارد. لایه‌های شیلی از بلورهای کوچک و شکسته کوآرتز و فلدسپار با زمینه‌ای از رس و کربنات تشکیل شده‌اند. علاوه بر کانی‌های ذکر شده، آثار فسیل‌های کروی شکل رادیولاریت در زمینه سنگ حضور دارد (شکل ۴-ب).

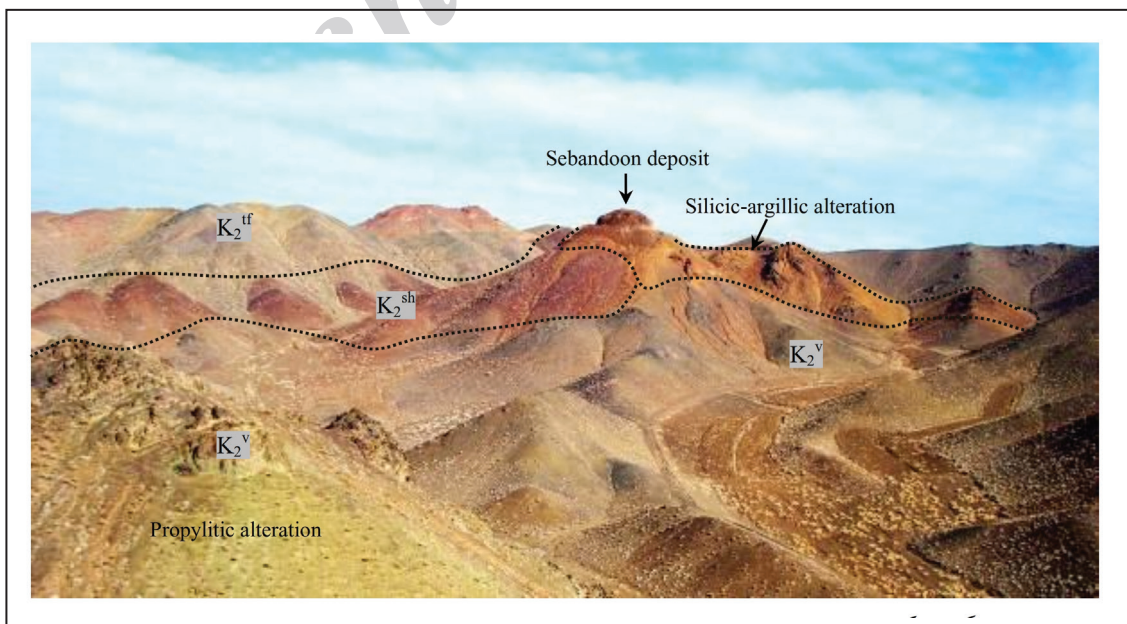
- **واحد K_1^l** : این واحد سبز رنگ که از ویتریک کریستال‌توف همراه با میان‌لایه‌هایی از گدازه اسیدی و سیلت تشکیل شده؛ به صورت همشیب روی شیل‌های کربناتی قرار گرفته است و گسترش قابل توجهی در بخش شمالی محدوده دارد. بخش غالب ویتریک کریستال‌توف‌های مورد مطالعه را زمینه بسیار دانه‌ریز و شیشه‌ای تشکیل داده است که بلورهای شکسته و ریز کوآرتز و فلدسپار به صورت دانه‌پراکنده در آن قرار دارند (شکل‌های ۴-ج و د).

بر اساس مطالعات صحرایی و نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰، واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده کانسار، شامل یک توالی از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی هستند که از قدیم به جدید مجموعه‌ای از گدازه‌های با ترکیب تراکیت تا تراکی آندزیت، شیل‌های کربناتی و نهشته‌های آذرآواری از جنس ویتریک کریستال توف همراه با میان‌لایه‌هایی از گدازه‌های ریولیتی تا داسیتی را شامل می‌شوند (شکل‌های ۲ و ۳). فعالیت‌های ماگمایی پس از ائوسن با نفوذ توده‌های نیمه عمیق با ترکیب سینیت تا کوآرتز مونزونیت در سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی کراتاسه بالایی مشخص می‌شود. به‌طور خلاصه زمین‌شناسی واحدهای سنگی در محدوده کانسار سه‌بندون به شرح زیر است:

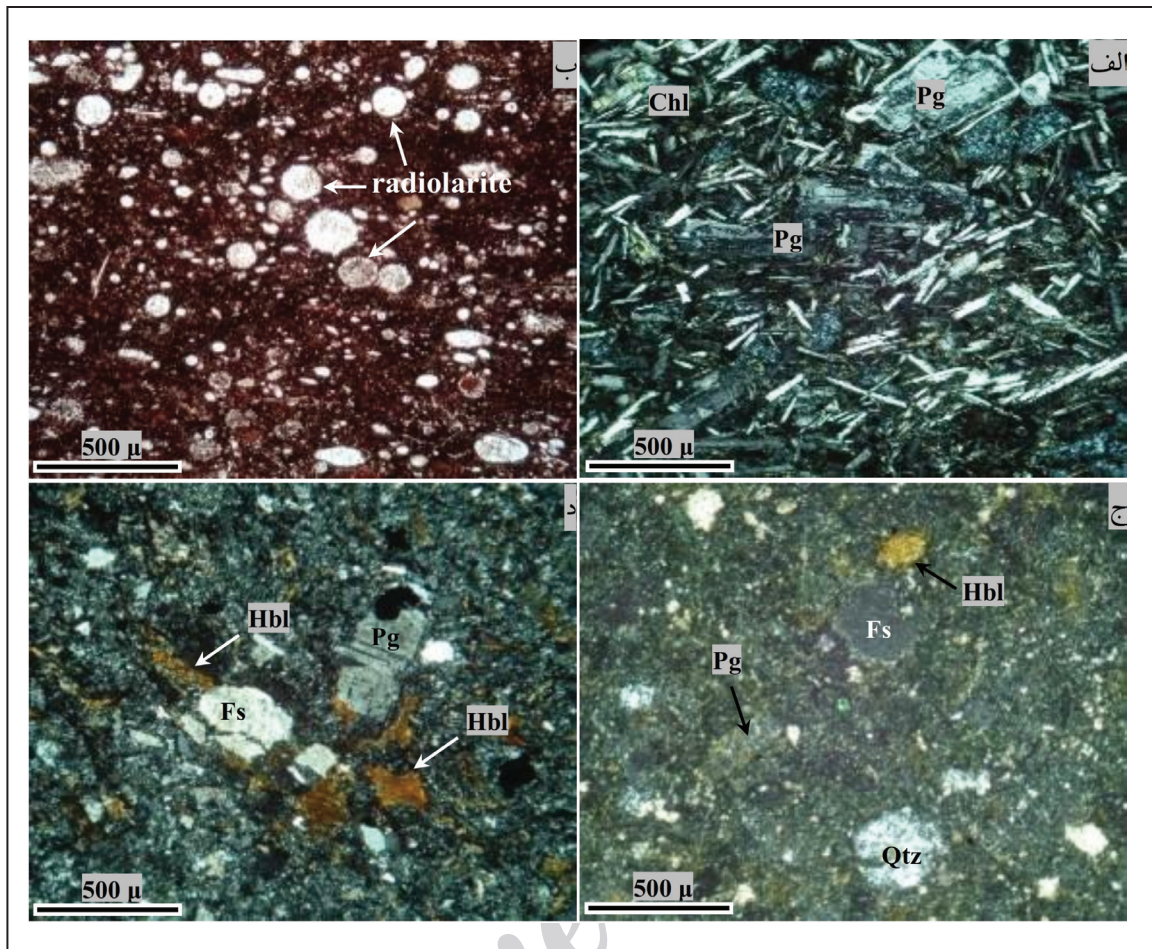
- **واحد K_2^v** : این واحد که میزبان اصلی کانسار سه‌بندون است؛ از گدازه‌های با ترکیب تراکیت، تراکی آندزیت و گاه آندزی‌بازالت با رنگ سبز تا سیاه تشکیل شده است (شکل‌های ۲ و ۳). بافت گدازه‌ها پیلوتاکستیک (تراکیتی)، میکروولیت-پورفیری، گلو موبورفیری است. پلاژیوکلاز و فلدسپارهای آلکانل کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده سنگ‌ها هستند و همراه با آنها مقادیر فرعی آمفیبول و پیروکسن نیز



شکل ۲- نقشه زمین شناسی محدوده کانسار سه بندون با مقیاس ۱:۵۰۰۰.



شکل ۳- نمایی از واحدهای سنگی و دگرسانی های رخ داده در کانسار طلای سه بندون. دید به سوی شمال خاور.



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از واحدهای سنگی محدوده کانسار طلای سه‌بندون: الف) تراکیت (واحد K_2^v) حاوی کانی‌های پلاژیو کلاز در زمینه میکروولیتی. زمینه سنگ تا حد زیادی به کلریت دگرسان شده است؛ ب) شیل کربناتی (واحد K_2^{sh})، که حاوی فسیل‌های رادیولاریت و خرده‌سنگ در زمینه‌ای از رس غنی از اکسیدهای آهن است؛ ج) ویتریک کریستال توف (واحد K_2^f) که از خرده‌کانی‌های کوارتز، فلدسپار، پلاژیو کلاز و هورنبلند در زمینه‌ای از خاکستر تشکیل شده است؛ د) میان‌لایه‌های گدازه ریولیتی- داسیتی در واحد K_2^f .

نسبتاً بالایی را در همراهی با کانسنگ‌های طلا دار نشان می‌دهند. نسبت Ag/Au در بخش‌های کانه دار کانسار سه‌بندون از 0.3 تا 62 (میانگین 9.2) متغیر است که با مقادیر پیشنهاد شده برای کانسارهای طلای اپی‌ترمال (Albinson et al., 2001; Sillitoe and Hedenquist., 2003; Simmons et al., 2005) مطابقت دارد.

۵- ساخت، بافت و پارازنز کانه‌ها

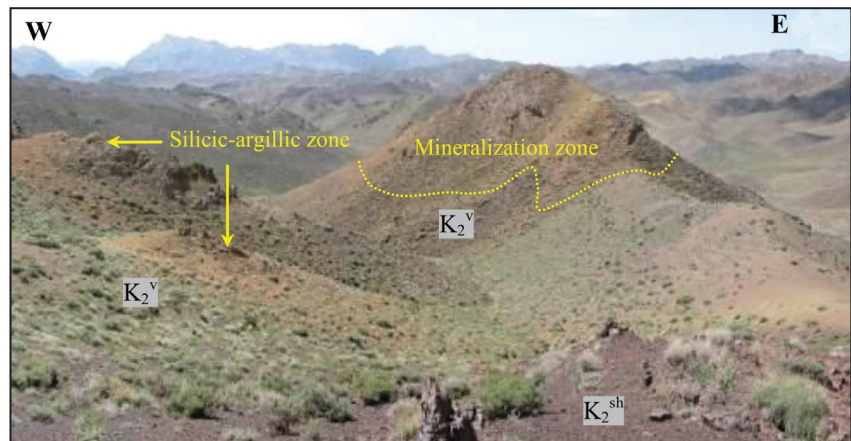
اصلی‌ترین ساخت و بافت‌های کانسنگ‌های طلا دار، رگه- رگچه‌ای و پرشی است. ساخت و بافت‌های رگه- رگچه‌ای (استوک و رک)، به صورت مجموعه‌ای از رگه- رگچه‌های سیلیسی سولفیددار، سنگ میزبان را مورد هجوم قرار داده و سبب دگرسانی آنها شده‌اند (شکل‌های ۶- د و ۵)؛ این نوع ساخت و بافت در نیمی از کانسنگ‌های مطالعه شده از رخنمون‌های سطحی و مغزه‌های حفاری قابل مشاهده است. بر اساس مطالعه مغزه‌های حفاری، این شکل از کانی‌سازی از سطح کانسار تا عمق 40 متری گسترش داشته و به صورت رگچه‌های منفرد قطع کننده تا شبکه‌ای بیشتر در سنگ میزبان تراکیت- تراکی آندزیت و گاه در شیل کربناته حادث شده است. ضخامت رگه- رگچه‌های کوارتزی- سولفیددار از کمتر از 1 میلی‌متر تا چند سانتی‌متر متغیر است و بسته به مقدار کانی‌های سولفید همراه به رنگ‌های شیری و خاکستری دیده می‌شوند.

۴- کانه‌زایی

توده‌های نفوذی: فعالیت‌های ماگمایی پس از ائوسن در محدوده کانسار طلای سه‌بندون با نفوذ توده‌های نیمه‌عمیق و دایک‌ها در سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی کرتاسه مشخص می‌شود. در جنوب خاور محدوده، یک توده با ترکیب سینیت- کوارتز مونوزیوت برنزد دارد. توده مذکور توسط دایک‌های دیابازی قطع شده است.

بر اساس مطالعات صحرائی و بررسی مغزه‌های حفاری، کانسار طلای سه‌بندون، به صورت یک توده دگرسان شده قیفی شکل با برنزد سطحی 90×50 متر و عمق حدود 70 متر است که بیشتر در سنگ‌های آتشفشانی تراکیتی- تراکی آندزیتی رخ داده است (شکل‌های ۳ و ۵). در بخش‌های مختلف کانسار، طلا از 0.1 تا $8/5$ گرم در تن و نقره از 1 تا 28 گرم در تن اندازه‌گیری شده است. کانسنگ‌های طلا دار، بیشتر با دگرسانی‌های سیلیسی، سیلیسی- سولفیدی و در بخش‌هایی با دگرسانی سیلیسی- آرژیلی (برونزاد) همراهی و توسط دگرسانی پروپیلیتیکی احاطه شده‌اند.

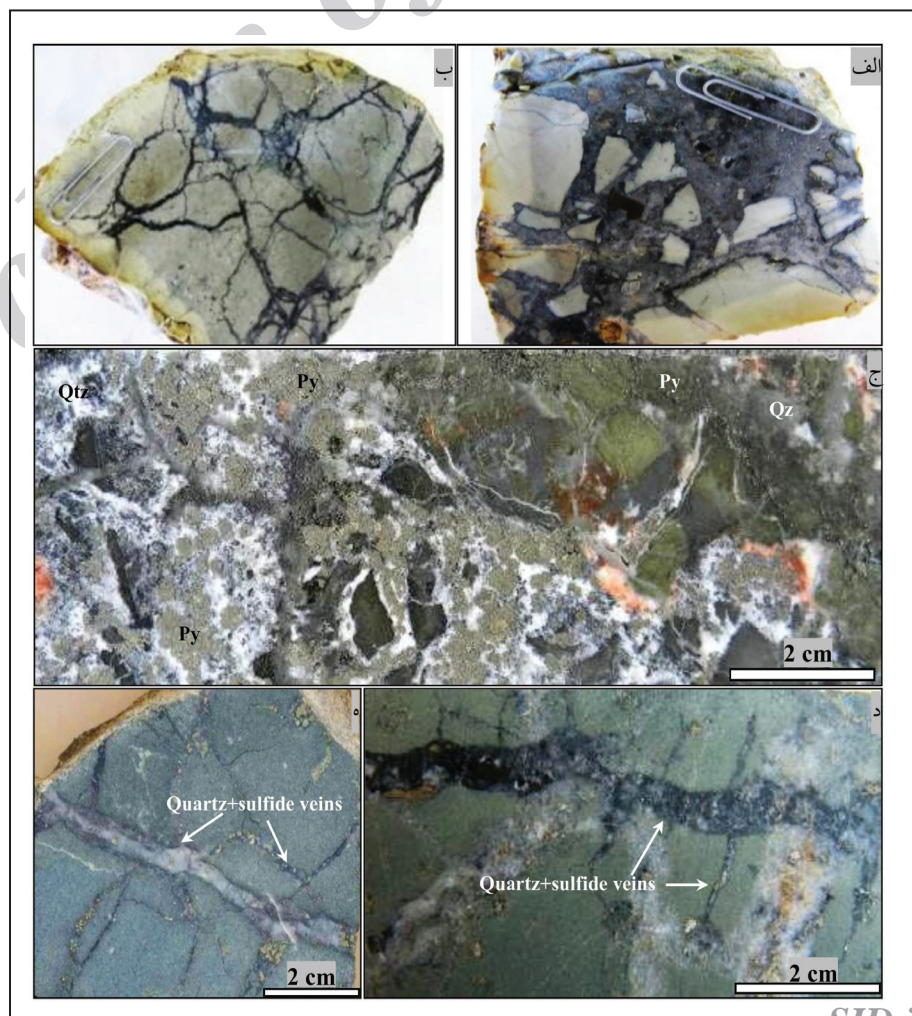
مطالعه نتایج آنالیز نمونه‌های کانسنگی حاکی از آن است که علاوه بر طلا و نقره، عناصر مس (تا 3500 گرم در تن)، روی (تا 2010 گرم در تن)، سرب (تا 1200 گرم در تن) و آرسنیک (تا 900 گرم در تن) ناهنجار هستند و تمرکزهای



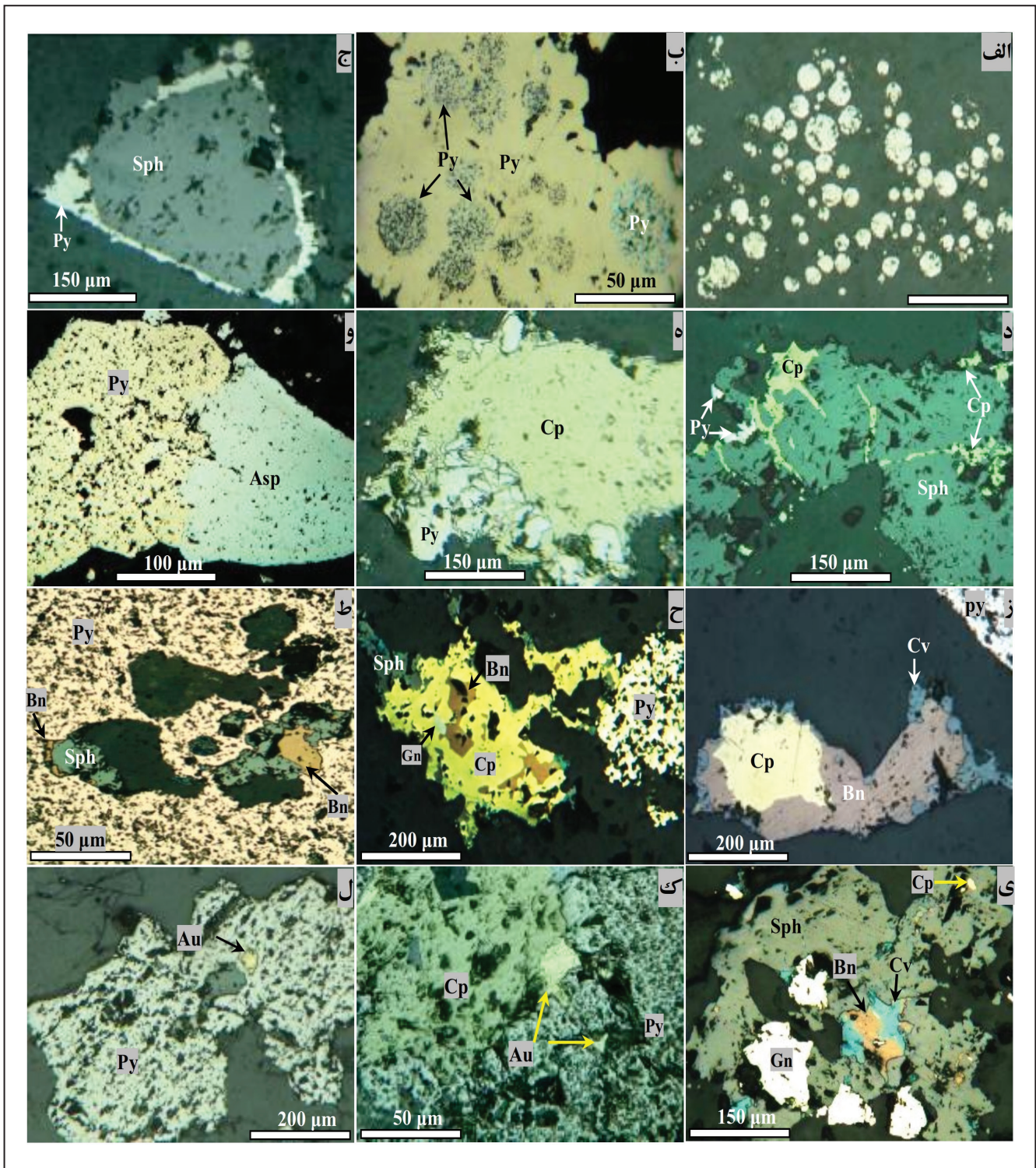
شکل ۵- نمایی از شکل و ابعاد پهنه طلا دار کانسار سه بندون، که با خط چین زرد مشخص شده است. این پهنه با دگرسانی سیلیسی- سولفیدی و رنگ قهوه‌ای روشن در واحد K_2^v مشخص است.

برش‌های مرتبط با کانه زایی در کانسار طلای سه بندون، محصول توأمان فرایندهای تکنونیک و سیالات گرمایی هستند. بر اساس مطالعات پتروگرافی و کانه‌نگاری نمونه‌های کانسنگی (طلادار)، کانی‌های فلزی موجود در کانسار ساده و شامل کانی‌های اولیه پیریت، اسفالریت، کالکوپیریت، بورنیت، گالن، آرسنوپیریت و طلا و کانی‌های ثانویه کالکوسیت، کولیت و اکسیدهای آهن هستند. به‌رغم پاراژنز ساده، بافت کانه‌ها متنوع است و بافت‌های دانه پراکنده، فراموبیدال، اسفنجی، رگچه‌ای، جانیشینی، برون‌رستی (exsolution) کاتا کلاستیک را شامل می‌شود (شکل ۷).

از دیگر ساخت‌های متداول در کانسار سه بندون، ساخت برشی است که معمولاً در عمق‌های ۴۰ تا ۷۰ متری گسترش دارد. در کانسنگ‌های برشی، معمولاً قطعات خرد شده سنگی از گدازه آتشفشانی (تراکیت- تراکی آندزیت) دگرسان شده و زمینه پرکننده بین آنها از کوارتز و سولفید تشکیل شده است. قطعات سنگی جورشدگی ضعیفی دارند و به‌صورت قطعات زاویه‌دار تا گرد شده با اندازه‌های کوچک‌تر از ۵ سانتی‌متر دیده می‌شوند. فضای بین قطعه‌سنگ‌های برشی، توسط سیمانی از کوارتز و سولفید پر شده است (شکل‌های ۶- الف، ب و ج). بر پایه روابط صحرائی، مطالعه نمونه‌های دستی و تقسیم‌بندی برش‌ها که توسط Jébrak (1997) ارائه شده است؛



شکل ۶- نمونه‌هایی از ساخت و بافت‌های کانسنگ در کانسار طلای سه بندون. الف) ساخت برشی که در آن فضای بین قطعات خرد و دگرسان شده سنگ میزبان آتشفشانی، توسط سیمانی از کوارتز و کانه‌های سولفیدی (عمدتاً پیریت) پر شده است؛ ب) ساخت استوک‌ورک که در آن سنگ میزبان دگرسان شده، توسط رگچه‌های کوارتز و سولفید قطع شده است؛ ج) کوارتز و کانه‌های سولفیدی (عمدتاً پیریت) فضای بین قطعات برشی را پر کرده‌اند؛ د و ه) نمونه‌هایی از ساخت رگه و رگچه‌ای در کانسنگ. در این تصاویر رگه و رگچه‌های کوارتزی سولفید دار که از نظر محتوای سولفیدی با هم متفاوتند؛ گدازه‌های میزبان را قطع کرده و منجر به دگرسانی در آنها شده‌اند. Py: پیریت، Qtz: کوارتز.



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی (نور انعکاسی) از تنوع کانی‌های فلزی در کانسار سه‌بندون: الف) پیریت با بافت فراموبیدال؛ ب) پیریت‌های بلورین (مرحله اصلی) در اطراف پیریت‌های فراموبیدال تشکیل شده و آنها را دربر گرفته‌اند؛ ج) پیریت‌های مرحله تأخیری، بعد از تبلور اسفالریت تشکیل شده و کانی اسفالریت را احاطه کرده‌اند؛ د) بخشی از کالکوپیریت‌ها بعد از تبلور اسفالریت تشکیل شده و به صورت رگچه‌ای اسفالریت را قطع کرده‌اند؛ ه) کالکوپیریت‌ها در فضای پیریت‌های کاتاکلاستیک تشکیل شده‌اند؛ و) هم‌رشدی پیریت با آرسنوپیریت؛ ز) هم‌رشدی کالکوپیریت و بورنیت، بورنیت‌ها از حاشیه به کولیت تبدیل شده‌اند؛ ح) بورنیت‌ها و گالن، به صورت ادخال در کالکوپیریت مشاهده می‌شوند؛ ط) هم‌رشدی در کانی‌های پیریت، اسفالریت و بورنیت؛ ی) کالکوپیریت به صورت ادخال در پیریت مشاهده می‌شود؛ ولی اسفالریت، گالن و بورنیت هم‌رشدی نشان می‌دهند و بورنیت از حاشیه‌ها به کولیت تبدیل شده است؛ ک) طلا در مرز کالکوپیریت و پیریت؛ ط) طلا به صورت ادخال درون پیریت. Asp: آرسنوپیریت، Bn: بورنیت، Cp: کالکوپیریت، Cv: کولیت، Py: پیریت، Sph: اسفالریت، Au: طلا.

بورنیت و گالن در مقایسه با دیگر کانه‌های سولفیدی فراوانی کمتری دارند. با توجه به روابط بافتی، این کانه‌ها همزمان با پیریت‌های اصلی، اسفالریت و کالکوپیریت و گاه به صورت ادخال در آنها تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۷-ز، ح، ط و ی). آرسنوپیریت با فراوانی خیلی کم و به صورت کانی‌های خودشکل تا نیمه شکل دار با اندازه‌های ۵۰ تا ۲۰۰ میکرون مشاهده شده است (شکل ۷-و). طلا در اندازه‌های کوچکتر از ۶۰ میکرون، به صورت ادخال در پیریت، کالکوپیریت، در مرز کانه‌های سولفیدی و همچنین به صورت آزاد در کوارتزهای دگرسانی مشاهده شده است (شکل‌های ۷-ک و ل).

هوازدگی سبب اکسایش کانه‌های سولفیدی و تشکیل کانی‌های برونزاد کولیت، کالکوسیت و ترکیبات هیدروکسید آهن شده است. کولیت و کالکوسیت از اکسایش کالکوپیریت و بورنیت و ترکیبات هیدروکسیدی آهن از اکسایش پیریت و همچنین کالکوپیریت و بورنیت حاصل شده‌اند.

بخش اصلی کانه زایی طلا در کانسار سه‌بندون، در همراهی با زون دگرسانی سیلیسی-سولفیدی رخ داده و کانی اصلی باطله کوارتز بوده که معمولاً بیش از ۹۰ درصد از حجم کانسنگ را تشکیل داده است. دیگر کانی‌های باطله، کلینوکلر، کانی‌های رسی و آدولاریا هستند که با مقادیر فرعی و جزئی کوارتز را همراهی می‌کنند. بر اساس داده‌های مغزه‌های حفاری، رخداد آدولاریا انطباق خوبی با موقعیت کانسنگ‌های پرعبار طلا نشان می‌دهد.

توالی پاراژنزی کانی‌ها در کانسار سه‌بندون به دو مرحله اصلی کانی‌سازی (درونزاد) و اکسایش (برونزاد) قابل تقسیم است (شکل ۸). در مرحله اصلی کانی‌سازی، حجم اصلی پیریت همراه با سولفیدهای فلزات پایه، آرسنوپیریت و طلا تشکیل شده است. کانه‌های سولفیدی تشکیل شده در مرحله درونزاد، تحت تأثیر هوازدگی و آب‌های جوی فرورو، اکسایش یافته و به تشکیل ترکیبات هیدروکسیدی آهن، کالکوسیت، کولیت و مالاکیت منجر شده‌اند.

پیریت به عنوان فراوان‌ترین کانه سولفیدی، معمولاً ۳ تا ۵ درصد از حجم کانسنگ و بیش از ۵۰ درصد محتوای کانه‌های سولفیدی را تشکیل داده است. این کانی بی‌شکل تا خودشکل است و در اندازه‌های ۲۰ میکرون تا ۵ میلی‌متر مشاهده می‌شود. بر اساس روابط بافتی، پیریت‌ها در سه بازه زمانی پیوسته شکل گرفته‌اند و از این رو به پیریت‌های فراموبیدال، پیریت‌های اصلی و پیریت‌های تأخیری قابل تفکیک هستند (شکل‌های ۷-الف، ب و ج). در کانسار سه‌بندون طلا در همراهی با پیریت‌های اصلی مشاهده شده است که بیشترین فراوانی را دارند.

اسفالریت که بالغ بر ۲۰ درصد از محتوای سولفیدها را تشکیل داده؛ فراوان‌ترین کانه از سولفیدهای فلزات پایه است و اغلب به صورت کانه‌های نیمه‌شکل دار تا بی‌شکل و در اندازه‌های ۴۰ میکرون تا ۲ میلی‌متر مشاهده می‌شود (شکل‌های ۷-ج و د). بیماری کالکوپیریت در اسفالریت‌ها مشهود است. این بافت معمولاً در نتیجه تغییرات فوگاسیته گوگرد، دما و/یا محتوای آهن اسفالریت تشکیل می‌شود (Bortnikov et al., 1991; Bente and Doering, 1995; Lepetit et al., 2003). اگر چه شواهدی از جانشینی پیریت‌های اصلی توسط اسفالریت وجود دارد؛ اما اسفالریت با سولفیدهای فلزات پایه و پیریت‌های اصلی همپوشانی پاراژنزی دارد و تقریباً همزمان تشکیل شده‌اند.

کالکوپیریت با فراوانی ۱۰ تا ۲۰ درصد از محتوای سولفیدی کانسنگ‌ها، به صورت کانی‌های پراکنده بی‌شکل با اندازه‌های کوچک‌تر از ۲۰۰ میکرون مشاهده شده است. بخش کوچکی از این کانه، به صورت قطرک‌های حاصل از فرایند برون‌رستی داخل اسفالریت حضور دارد؛ ولی بیشتر کالکوپیریت‌ها هم‌رشد با پیریت‌های اصلی هستند و همزمان با سایر کانه‌های سولفیدی فلزات پایه تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۷-ز و ح). در مقاطع مطالعه شده، بخش دیگری از کالکوپیریت‌ها دیرزادتر هستند و جانشین پیریت و اسفالریت شده و یا در امتداد شکستگی‌های موجود در پیریت‌های کاتاکلاستیک شکل گرفته‌اند (شکل‌های ۷-د و ه).

Minerals	Mineralization (hypogene)		Oxidation
	Early	Late	
Pyrite	framboidal	—————>	
Sphalerite		—————	
Galena		—————	
Chalcopyrite		—————	
Bornite		—————	
Arsenopyrite		—————	
Gold		—————	
Covelite, Chalcocite			—————
Malachite			—————
Fe-hydroxides			—————
Quartz		—————	
Adularia		—————	

شکل ۸- نمودار توالی پاراژنزی در کانسار طلای سه‌بندون.

۶- دگرسانی

دگرسانی پروپلیتیک که به‌طور فراگیر دگرسانی سیلیسی-سولفیدی را احاطه کرده است؛ گسترش قابل توجهی در واحد گدازه‌ای (K_2^V) دارد. بر اساس مغزه‌های مطالعه شده، این نوع دگرسانی نشان‌دهنده بخش زیرین کانه‌زایی طلا بوده و عیار طلا در این نوع دگرسانی همواره کمتر از ۰/۱ گرم در تن است. کانی‌های کلریت، اپیدوت، کوارتز و کلسیت که گاه تا ۳۰ درصد از حجم سنگ‌های دگرسان شده را تشکیل داده‌اند؛ جانشین درشت‌بلورهای آمفیبول، پیروکسن، فلدسپار و زمینه سنگ شده‌اند.

۷- میانبارهای سیال

۷-۱. نوع و ویژگی میانبارهای سیال

از لحاظ شکل ظاهری و با توجه به پارامترهای (Roedder 1984) و (Shepherd et al. 1985)، می‌توان میانبارهای سیال در نمونه‌های مورد مطالعه را به ترتیب فراوانی به اشکال نامنظم، کشیده و کروی تقسیم‌بندی کرد. میانبارهای سیال در انواع دوفازی غنی از مایع (LV)، تک‌فازی مایع (L)، تک‌فازی بخار (V) و دوفازی غنی از بخار مشاهده شدند. در این مطالعه، تنها میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (LV)، به لحاظ اولیه و درشت‌تر بودن مطالعه شدند. میانبارهای سیال دوفازی مورد مطالعه، ریز تا بسیار ریز هستند و اندازه آنها از ۲ تا ۱۷ میکرون متغیر است. در این نوع از میانبارها، فاز مایع ۶۰ تا ۸۰ درصد و فاز بخار ۲۰ تا ۴۰ درصد حجم کل سیال را تشکیل داده‌اند. این نوع از میانبارها اغلب با اشکال نامنظم و کمتر کروی در کوارتز میزبان پراکنده‌اند (شکل ۹). از پدیده‌های قابل مشاهده در مطالعات پتروگرافی، حضور میانبار غنی از مایع هم‌زیست با میانبار غنی از بخار بوده که نشانه‌ای بر رخداد جوشش در کانسار است (Shepherd et al., 1985).

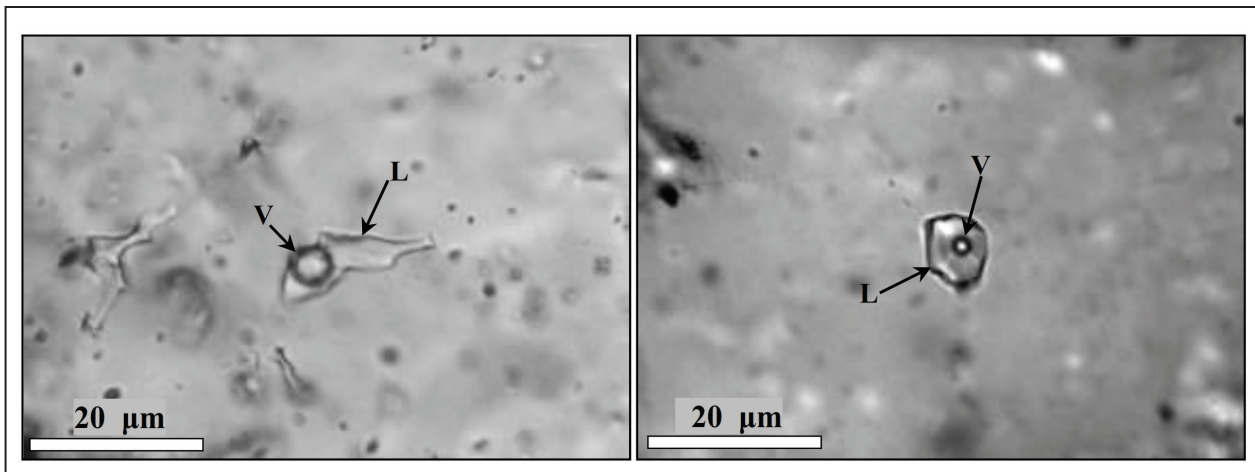
۷-۲. ریزدماسنجی میانبارهای سیال

محدوده دمای همگن‌شدگی برای میانبارهای سیال اولیه دوفازی مورد مطالعه از ۱۶۵ تا ۲۵۴ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۲۰۲) اندازه‌گیری شده است (جدول ۱ و شکل ۱۰). در تمامی نمونه‌ها همگن‌شدگی به فاز مایع صورت گرفته است. محدوده اولین نقطه ذوب یخ یا اتکتیک (Te) در نمونه‌های کوارتزی، ۲۱- تا ۳۸- درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد که نشان می‌دهد سیال کانه‌ساز، به صورت یک شورابه ساده تشکیل شده از NaCl نبوده است؛ 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 ۰/۵- تا ۵- درجه سانتی‌گراد ثبت شد که به ترتیب معادل شوری‌های ۰/۹ تا ۷/۸۲ معادل درصد وزنی NaCl هستند (جدول ۱ و شکل ۱۰).

دگرسانی‌های گرمابی در محدوده کانسار سه‌بندون در محدوده‌ای با وسعت حدود ۲ کیلومتر مربع گسترش دارد و به واسطه رنگ ظاهری قهوه‌ای روشن تا آجری، به راحتی از سنگ‌های آتشفشانی میزبان قابل تمایز هستند (شکل ۳). دگرسانی‌ها بیشتر در واحد گدازه تراکیت-تراکی آندزیت (واحد K_2^V) و به‌طور محدود در واحد شیل کربناتی (K_2^{sh}) رخ داده‌اند. شدت و نوع دگرسانی‌ها، با توجه به جنس سنگ میزبان و فاصله از مرکز دگرسانی متفاوت بوده و شامل انواع سیلیسی، سولفیدی و پروپلیتیک است (شکل ۵).

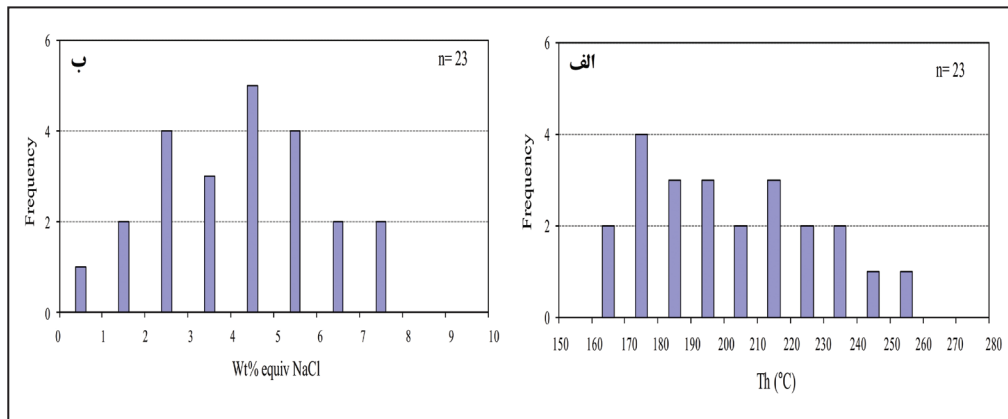
دگرسانی سیلیسی-سولفیدی بخش مرکزی سامانه دگرسانی گرمابی را تشکیل داده و بخش اصلی کانسنگ‌های طلا دارد. این نوع از دگرسانی که در سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه (واحد K_2^V) رخ داده است؛ در گستره‌ای با وسعت 150×90 متر مربع رخنمون و تا عمق ۷۰ متری کانسار گسترش دارد. دگرسانی سیلیسی-سولفیدی به صورت مجموعه‌ای از کانی‌های کوارتز و سولفید با ساخت برشی و رگه-رگچه‌ای (استوکورک)، واحد گدازه تراکیت-تراکی آندزیتی را قطع کرده است (شکل‌های ۵ و ۶). در این نوع دگرسانی، کوارتز بالغ بر ۸۰ درصد و سولفیدها (بیشتر پیریت) ۱ تا ۲۰ درصد از حجم کانسنگ را تشکیل داده‌اند (شکل ۶-ج). سولفیدهای موجود در دگرسانی سیلیسی-سولفیدی شامل پیریت، اسفالریت، کالکوپیریت، بورنیت، گالن، آرسنوپیریت، کولیت و کالکوسیت هستند. بر اساس مطالعات میکروسکوپی و نتایج آنالیز XRD کانی‌های باطله تشکیل دهنده این دگرسانی شامل کوارتز، کینوکلر و به مقدار کم کانی‌های رسی هستند. علاوه بر کوارتز و سولفید، آدولاریا به صورت بلورهای کوچک‌تر از ۲۰۰ میکرون و با فراوانی کمتر از یک درصد، این مجموعه را همراهی کرده است. در اثر هوازدگی، کانی‌های سولفیدی موجود در بخش‌های سطحی دگرسانی سیلیسی-سولفیدی اکسایش یافته و به اکسید و هیدروکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند؛ از این رو بخش‌های سطحی این نوع دگرسانی با رنگ‌های قهوه‌ای تا آجری برونزد دارند. آب‌های سطحی، که در گذر از کانسنگ‌های سولفیدی اکسایش و ماهیت اسیدی یافته‌اند؛ با گدازه‌های میزبان واکنش داده و موجب تشکیل کانی‌های رسی (از جمله کائولینیت و مونتموریلونیت) شده‌اند. بیشینه مقادیر طلا و نقره در ترانه‌ها و مغزه‌های حفر شده در این نوع دگرسانی به ترتیب تا ۸/۵ و ۲۸ گرم در تن نیز اندازه‌گیری شده است.

دگرسانی سیلیسی-آرژیلی در کانسار سه‌بندون، محدود به رخنمون‌های سطحی کانسار بوده و در امتداد درز و شکستگی‌ها و در اثر تأثیر آب‌های سطحی روی سولفیدهای موجود در زون دگرسانی سیلیسی-سولفیدی و اکسایش آنها تشکیل شده است (شکل ۵). نتایج آنالیزهای XRD نیز نشان‌دهنده حضور کانی‌های کوارتز، مونتموریونیت، کائولینیت، پیریت و اکسیدهای آهن در این دگرسانی است.



شکل ۹- تصاویر میکروسکوپی (دمای اتاق و نور عبوری صفحه‌ای) از میانبارهای سیال اولیه دوفازی غنی از مایع (LV) موجود در کوارتزهای کانسنگ سیلیسی کانسار طلای سه‌بندون.

L: Liquid, V: Vapor



شکل ۱۰- الف) نمودار دماهای همگن شدگی در مقابل فراوانی میانبراهای سیال؛ ب) نمودار درجه شوری در مقابل فراوانی میانبراهای سیال در کانی‌های کوارتزی موجود در کانسنگ سیلیسی طلا دار.

جدول ۱- خلاصه داده‌های مطالعات ریزدماسنجی میانبراهای سیال اولیه دو فازی (LV) در کانی کوارتز کانسار طلای سه‌بندون.

ncl. type	Size (μm)	T_e ($^{\circ}\text{C}$)	T_{m-ice} ($^{\circ}\text{C}$)	T_h ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity (wt. % NaCl equiv.)	ρ (g/cm^3)
LV (n=23)	۵-۱۷	-۲۱ تا -۳۸	-۵ تا -۰/۵	۱۶۵ تا ۲۵۴ (۲۰۲)	۰/۹-۷/۸۲ ۴/۲	/۸۴-۰/۹۵

اعداد داخل پرانتز مبین میانگین داده‌هاست. T_e = دمای اولین نقطه ذوب یخ، T_{m-ice} = دمای ذوب آخرین قطعه یخ، T_h = دمای همگن شدگی.

۸- تیپ کانه‌زایی و مدل تشکیل

در زون ارومیه- دختر، ساری گونی (نیرومند، ۱۳۷۸؛ Richards et al., 2006) در زون سندانج- سیرجان، مسجد داغی (اکبرپور و همکاران، ۱۳۸۶) و گندی و ابوالحسنی (Shamanian et al., 2004; Fard et al., 2006) در کمان آتشفشانی تروند - چاه شیرین اشاره کرد. مقایسه ویژگی‌های کانسار طلای سه‌بندون با ذخایر مذکور نشان می‌دهد که این کانسار بیشترین شباهت را با کانسارهای ارغش (اشرف پور و همکاران، ۱۳۸۸؛ مهدوی و گورابجیری پور، ۱۳۸۱) چاه زرد (کوهستانی، ۱۳۹۰؛ Kouhestani et al., 2012 and 2015) و گندی (فرد، ۱۳۸۰؛ Shamanian et al., 2003 and 2004) دارد که به‌عنوان کانسارهای سولفیداسیون پایین تا حدواسط معرفی شده‌اند.

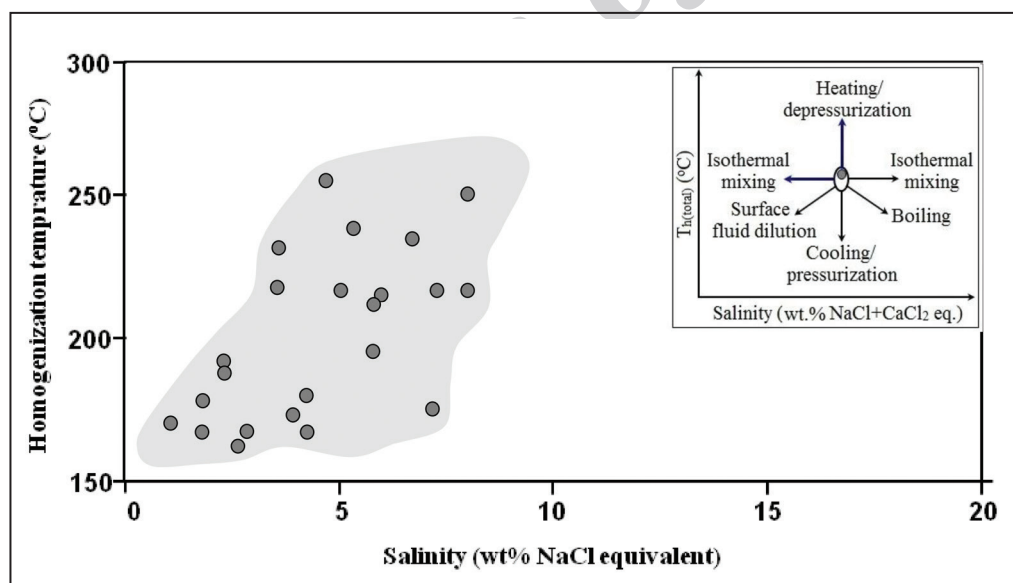
روند تحول سیال کانه‌ساز در کانسار سه‌بندون بر اساس نمودار تغییرات دمای همگن‌شدگی در برابر شوری، در شکل ۱۱ آمده است. این نمودار روندی از اختلاط یک سیال گرمایی با شوری و دمای بالاتر را با سیالی با دما و شوری پایین‌تر نشان می‌دهد که با ترکیبی از فرایندهای رقیق‌شدگی، اختلاط و احتمالاً جوشش سازگار است (Hedenquist et al., 1996; Wilkinson., 2001). سیال رقیق‌کننده می‌تواند آب‌های با منشأ جوی بوده باشد. بنابراین، مشابه بسیاری از کانسارهای طلایابی ترمال

به منظور بررسی تیپ کانه‌زایی کانسار طلای سه‌بندون، ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی این کانسار با انواع کانسارهای اپی‌ترمال مقایسه شده است. بر اساس ویژگی‌های اصلی زمین‌شناسی و کانی‌سازی از جمله جایگاه تکتونیکی، ماهیت و نقش کنترل‌کننده‌های ساختاری، سنگ‌شناسی، نوع دگرسانی، ساخت، بافت و پاراژنز کانی‌شناسی، ویژگی‌های دما و شوری میانبراهای سیال و مطالعات زمین‌شیمیایی می‌توان نتیجه گرفت که کانسار طلای سه‌بندون بیشترین شباهت را با کانسارهای طلای تیپ اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین تا متوسط نشان می‌دهد. مقایسه ویژگی‌های کانسار طلای سه‌بندون با ذخایر اپی‌ترمال سایر مناطق جهان نشان‌دهنده شباهت آن با کانسارهای سولفیداسیون پایین تا حد واسط از جمله دونگان چین (Zhang et al., 2010)، راشا مونتانی رومانی (Lexa, 1999; Wallier et al., 2006) و کلیان اندونزی (Van Leeuwen et al., 1990) است (جدول ۲).

کانه‌زایی‌های طلایابی ترمال، بیشتر با کمان‌های ماگمایی کالک‌آلکالین تا آلکالین واقع در صفحات با حواشی همگرا مرتبط هستند. در ایران نیز در مناطق با محیط‌های تکتونیکی مشابه چندین کانسار اپی‌ترمال معرفی شده‌اند که از میان آنها می‌توان به کانسارهای لاطلا (فتحی‌جو، ۱۳۸۸) و چاه‌زرد (کوهستانی، ۱۳۹۰)

جدول ۲- مقایسه ویژگی‌های کانسار طلای سه‌بندون با تعدادی از ذخایر اپی‌ترمال جهان.

نام کانسار	سه‌بندون	(چین) Dong'an	(رومانی) Rosia Montana	(اندونزی) Kelian	(آمریکا) Goldfield
نوع ماگماتیسم	کالک‌آلکان	کالک‌آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی	کالک‌آلکان	کالک‌آلکان	کالک‌آلکان
سنگ میزبان	تراکیت- تراکیآندزیت	ریولیت	داسیت	آندزیت، ریولیت	آندزیت
سن (میلیون سال)	بعد از انوسن (؟)	۱۰۷	۱۲/۸	۲۰	۲۱
کانی‌های دگرسانی	کوارتز، \pm آدولاریا، کانولینیت	کوارتز، آدولاریا، سریسیت، فلوریت	کوارتز، آدولاریا، کرنات، کلریت، سریسیت، کانولینیت	کوارتز، آدولاریا، کرنات، سریسیت، اپلیت	کوارتز، آلپیت، باریت
پاراژنز	پیریت، اسفالریت، کالکوپیریت، بورنیت، آرسنوپیریت، گالن، طلا	پیریت، گالن، کالکوپیریت، کالکوسیت، اسفالریت، آرسنوپیریت، الکتروم	پیریت، اسفالریت، گالن، کالکوپیریت، تنانتیت، طلا	پیریت، اسفالریت، گالن، کالکوپیریت، تتراهدريت، تنانتیت، طلا	پیریت، مارکازیت، تنانتیت، بیسموتیت، گلدفیلدیت، تلورید و طلا
بافت	استوک‌ورک و برشی	دانه پراکنده، استوک‌ورک و برشی	برشی، استوک‌ورک و رگه‌ای	رگه‌ای، استوک‌ورک و برشی	کوارتز حفره‌دار و کوارتز توده‌ای
تیب کانی‌سازی	سولفیداسیون پایین تا حدواسط	سولفیداسیون پایین	سولفیداسیون پایین تا حدواسط	سولفیداسیون حدواسط	سولفیداسیون بالا
منابع	تحقیق حاضر	Zhang et al. (2010)	Lexa (1999); Wallier et al. (2006)	Van Leeuwen et al. (1990)	Ashley (1979); Vikre (1989)

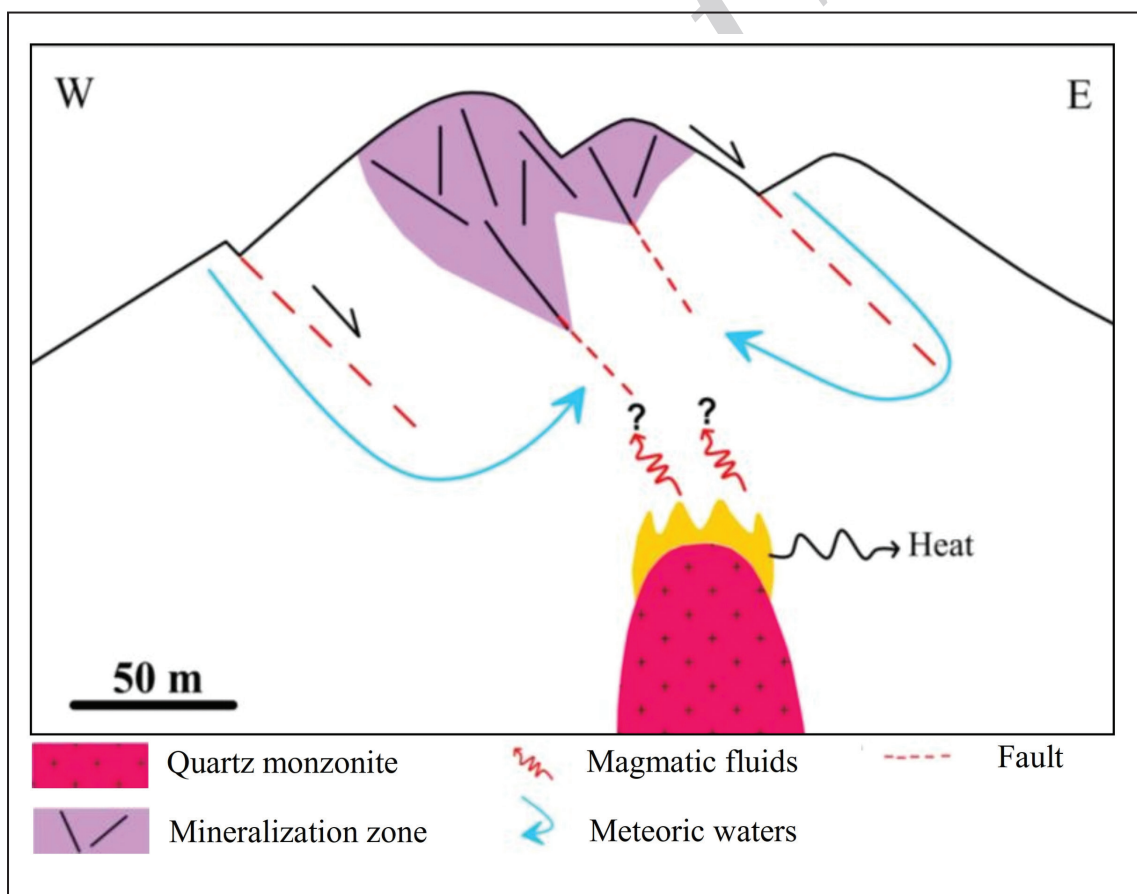


شکل ۱۱- نمودار دوتایی دمای همگن‌شدگی نهایی در مقابل شوری برای داده‌های میانبارهای سیال در کانسار سه‌بندون. روندها نشان‌دهنده فرایند آمیختگی و رقیق‌شدگی حین تحول سیال گرمایی هستند. نمودار شماتیک داخلی بیانگر روندهای معمول میانبارهای سیال در فضای شوری- دمای همگن‌شدگی ناشی از فرآیندهای مختلف تحول سیال (Wilkinson, 2001) است.

که توده‌های مذکور در تأمین بخشی از سیال (و/ یا فلز) مشارکت داشته باشند. گردش سیالات گرمایی در سنگ‌های آتشفشانی میزبان، موجب شسته شدن فلزات و حرکت و تمرکز آنها در مناطق با نفوذپذیری بالا، مانند شکستگی‌ها و زون‌های گسلی در محل کانسار شده است. سیالات حاوی فلزات، با سنگ‌های آتشفشانی مسیر واکنش داده و به دگرسانی و ته‌نشست اولیه کوارتز و کانه‌های فلزی در ساختارهای استوک‌ورکی و برشی (تکتونیک) منجر شده است. با مسدود شدن معبرها و افزایش فشار سیالات گرمایی، جوشش رخ داده است. فرایند جوشش سبب تشکیل و تقویت برش‌های هیدروترمال (در قسمت‌های عمیق‌تر کانسار) و سیستم شکستگی‌های استوک‌ورکی (در بخش‌های کم عمق) شده است (شکل ۵). طی این فرایند دگرسانی سیلیسی و سولفیدی \pm آدولاریا تشکیل می‌شود که بخش عمده کانه‌زایی طلا در همراهی با آن قرار دارد. بخش‌های زیرین و اطراف این زون کانی‌سازی را یک زون دگرسانی پروپیلیتیک احاطه کرده است. پس از تشکیل کانسنگ‌های طلا، واحدهای بالادست زون‌های کانسنگی فرسایش یافته و در سطح زمین نمایان شده‌اند. هوازدگی زون‌های کانی‌سازی، سبب اکسایش کانه‌های سولفیدی و تشکیل ضخامت‌های کانسنگ‌های سیلیسی در همراهی با کانی‌های رسی، ترکیبات هیدروکسیدی آهن و کانی‌های سوپرژن کالکوسیت، کولیت و مالاکیت شده است.

(Hedenquist et al., 2000)، سیال کانه‌دار در کانسار طلای سه‌بندون، یک سیال رقیق با دمای ۱۶۵ تا ۲۵۴ درجه سانتی‌گراد و شوری کمتر از ۸ درصد وزنی معادل نمک طعام بوده که ممکن است از اختلاط سیالات ماگمایی با سیالات جوی تشکیل شده باشد. با توجه به نمودار ژرفا-دما (Haas (1971) و براساس پیشینه دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال، کمیته ژرفای کانه‌زایی در کانسار سه‌بندون حدود ۵۰۰ متر (فشار معادل ۱۱۵ بار) زیر سطح ایستایی قدیمی است. همچنین مقایسه نتایج حاصل از مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال در کانسار سه‌بندون، با ویژگی سیالات کانه‌ساز توصیف شده برای کانسارهای نوع اپی‌ترمال (Wilkinson, 2001)، قابل مقایسه و منطبق است.

در شکل ۱۲، مدل پیشنهادی برای تشکیل کانسار سه‌بندون آمده است. در این مدل سنگ‌های (های) میزبان کانه‌زایی، مربوط به یک توالی از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی هستند که در یک محیط کششی پشت کماتی با سن کرتاسه تشکیل شده‌اند. در زمان پالئوسن زیرین تا ائوسن، رژیم تکتونیک حاکم از کششی به فشارشی تغییر یافته و سبب بسته شدن حوضه و متعاقباً چین‌خوردگی و گسلس سنگ‌ها شده است (Shafaii Moghadam et al., 2014). این مرحله بعد از ائوسن، با جایگیری توده‌های نیمه عمیق با ترکیب کوارتزموزنویت-سینیت در توالی آتشفشانی-رسوبی کرتاسه دنبال شده است. پس از جایگیری، توده‌ها به عنوان موتور حرارتی عمل کرده و موجب گردش سیالات جوی فرورو شده‌اند. همچنین ممکن است



شکل ۱۲- مدل پیشنهادی برای تشکیل کانسار طلای سه‌بندون.

۹- نتیجه‌گیری

از اختلاط سیالات ماگمایی با سیالات جوی تشکیل شده است. این کانسار از معدود کانسارهای طلای اپی‌ترمال شناخته شده در توالی آتشفشانی- رسوبی کرتاسه است که پنجره جدیدی را برای اکتشاف این نوع کانسارها در زیرپهنه سبزوار و مناطق با شرایط زمین‌شناسی مشابه می‌گشاید.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از دانشگاه تربیت مدرس بخاطر حمایت‌های مالی، از مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران به جهت انجام برخی از آزمایش‌ها و مطالعات میانبراهای سیال، از جناب آقای دکتر عقیل اجاقی (مدیر عامل محترم شرکت پارس آسیا پی‌جو) و همکارانشان برای همکاری صمیمانه‌شان در طول انجام این تحقیق و همچنین از سردبیر و داوران محترم فصلنامه علوم زمین، به خاطر راهنمایی‌های ارزنده علمی‌شان در راستای غنای بیشتر مقاله حاضر تشکر کنند.

بیشترین تعداد ذخایر طلای کشور در گروه ذخایر طلای تیپ اپی‌ترمال قرار گرفته‌اند و کانسارهای مهمی مانند ساری‌گونی، چاه‌زرد، ارغش، بزمان، تولزار، گلوچه، لاطلا، دارستان و گندی را شامل می‌شوند. بیشتر این ذخایر در کمربند آتشفشانی- ماگمایی ارومیه- دختر، پهنه ارسبارن، کمان ترو- چاه‌شیرین و پهنه ایران مرکزی قرار دارند که همگی در سنگ‌های آتشفشانی با سن ائوسن تا پلیوسن تشکیل شده‌اند. با توجه به موقعیت تکنونوماگمایی و جنس سنگ میزبان، ساخت، بافت و نوع دگرسانی کانسنگ، کانی‌شناسی و توالی پاراژنزی کانه‌ها و نیز ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و پاراژنر عنصری، کانسار طلای سه‌بندون بیشترین شباهت را با ذخایر اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین تا حدواسط نشان می‌دهد. با توجه به نتایج مطالعه میانبراهای سیال، به نظر می‌رسد که سیال کانه‌دار در کانسار طلای سه‌بندون همانند بسیاری از کانسارهای طلای اپی‌ترمال، یک سیال رقیق با دمای میانگین حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری کمتر از ۸ درصد وزنی معادل نمک طعام باشد که احتمالاً

کتابنگاری

- اشرف‌پور، ا.، علیرضایی، س. و انسادل، ک.، ۱۳۸۸- زمین‌شناسی کانسنگ و مطالعات میانبراهای سیال در محدوده طلای ارغش، جنوب باختر نیشابور، شمال خاور ایران، فصلنامه علوم زمین، سال هجدهم، شماره ۷۱، ص. ۱۲۹ تا ۱۳۶.
- اکبرپور، ا.، رسا، ا. و مهرپرتو، م.، ۱۳۸۶- بررسی کانی‌شناسی منطقه‌ای و حاشیه‌ای هاله‌های دگرسان شده اطراف رگه‌های کانه‌دار محدوده مسجد داغی جلفا، فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۶، ص. ۱۴۰ تا ۱۵۳.
- جعفریان، م. ب. و جلالی، ع.، ۱۳۷۹- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه ششم، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- شرکت مهندسی مشاور پارس آسیا پی‌جو، ۱۳۸۷- گزارش عملیات زمین‌شناسی و اکتشافی معدن طلای سه‌بندون، ۲۳۵ ص.
- شهرابی، م.، حسینی، م. و شعبانی، غ. ک.، ۱۳۸۵- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه بردسکن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- طاهری، ج. و شمعیان، غ. م.، ۱۳۸۰- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه کاشمر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- فتحی‌جو، د.، ۱۳۸۸- زمین‌شناسی و کانه‌زایی طلا و عناصر همراه در محدوده اکتشافی لاطلا (استان کرمان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال.
- فرد، م.، ۱۳۸۰- کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار طلا، سرب، روی و مس (باریم) گندی (جنوب شرق دامغان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۱۸ ص.
- کوهستانی، ح.، ۱۳۹۰- زمین‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی ایزوتوپی و خاستگاه کانسار نقره- طلای چاه‌زرد، جنوب باختری یزد، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، ۲۸۶ ص.
- مظلومی، ع. ر.، کریم‌پور، م. ح.، رسا، ا.، رحیمی، ب. و وثوقی عابدینی، م.، ۱۳۸۷- کانسار طلای کوه‌زرت تربت حیدریه مدل جدیدی از کانی‌سازی طلا، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال شانزدهم، شماره ۳، ص. ۳۶۳ تا ۳۷۶.
- مهدوی، پ. و گورابجیری‌پور، آ.، ۱۳۸۱- نظری اجمالی به وضعیت طلا در ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، ۶۷ ص.
- نادری میقان، ن.، ۱۳۷۷- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه شامکان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نریمانی، ا.، ۱۳۸۰- ساخت، بافت و پاراژنر کانسار آنتیموان- آرسنیک- طلای چلیو و کلاه‌چوبک (کوه سرخ کاشمر) و عوامل کنترل‌کننده تشکیل و تمرکز آن، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۰۷ ص.
- نیرومند، ش.، ۱۳۷۸- ویژگی‌های ژئوشیمیایی، کانه‌شناختی و ژنز کانسار آنتیموان داشکسن (شرق قروه، استان کردستان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، ۲۳۵ ص.

References

- Alavi, M., 1994- Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations. *Tectonophysics*, 229: 211-238.
- Albinson, T., Norman, D. I., Cole, D. and Chomiak, B., 2001- Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constraints from fluid inclusion and stable isotope data, *Society of Economic Geologists Special Publication*, 8: 1-32.
- Ashley, R. P., 1979- Relation between volcanism and ore deposition at Goldfield, Nevada, in *International Association for the Genesis of Ore Deposits (IAGOD), 5th Quadrennial Symposium Proceedings, Vol II Nevada Bureau of Mines and Geology Report 33: 77-86.*
- Baronz, F. and Macaudiere, J., 1984- La serie volcanosedimentaire du chainon ophiolitique de Sabzevar (Iran). *Ofoliti*, 9: 3-26.
- Bente, K. and Doering, T., 1995- Experimental studies on the solid-state diffusion of Cu + In in ZnS and on "disease", DIS (Diffusion Induced Segregations), in sphalerite and their geological applications. *Mineralogy and Petrology*, 53: 285-305.

- Bortnikov, N. S., Genkin, A. D., Dobrovolskaya, M. G., Muravitskaya, G. N. and Filiminova, A. A., 1991- The nature of chalcopyrite inclusions in sphalerite: exsolution, coprecipitation, or disease. *Economic Geology*, 86: 1070-1082.
- Fard, M., Rastad, E. and Ghaderi, M., 2006- Epithermal gold and base metal mineralization at Gandy, north of Central Iran and the role of rhyolitic intrusions. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, University of Tehran*, v. 17, p. 327-335.
- Haas, J. L., 1971- The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure, *Economic Geology*, 66: 940-946.
- Hall, D. L., Sterner, S. M. and Bodnar, R. J., 1988- Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions. *Econ. Geol.* V. 83, 197-202.
- Hedenquist, J. W., Arribas, J. A. and Gonzalez-Urein, E., 2000- Exploration for epithermal gold deposits. *Society of Economic Geology Review*, 13: 254-277.
- Hedenquist, J. W., Izawa, E., Arribas, A. and White, N. C., 1996- Hydrothermal system in volcanic arcs, origin of the exploration for epithermal gold deposits: a short course at Mineral Resource Department. Geological Survey of Japan, Higashi 1-1-3, Tsukuba 305, Japan, 139 p.
- Jébrak, M., 1997- Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: A review of mechanisms, morphology and size distribution, *Ore Geology Reviews*, 12: 111-134.
- Jiangxi Exploration Co., 1994- Explanatory text of geochemical map of Shamkan (7760), Stream sediment survey 1:100000. Report No 22, China.
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Chang, Z. and Zaw, K., 2015- Constraints on the ore fluids in the Chah Zard breccia-hosted epithermal Au-Ag deposit, Iran. Fluid inclusions and stable isotope studies. *Ore Geol. Rev.* 65, 512-521.
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Zaw, K., Meffre, S. and Emami, M. H., 2012- Geological setting and timing of the Chah Zard breccia-hosted epithermal gold-silver deposit in the Tethyan belt of Iran. *Mineralium Deposita*, 47:425-440.
- Lepetit, P., Bente, K., Doering, T. and Luckhaus, S., 2003- Crystal chemistry of Fe-containing sphalerites. *Physics and Chemistry of Minerals*, 30: 185-191.
- Lexa, J., 1999- Outline of the Alpine geology and metallogeny of the Carpatho-Pannonian region: Society of Economic Geologists Guidebook Series, v. 31, p. 65-108.
- Richards, J. P and Sholeh, A., 2016- The Tethyan tectonic history and Cu-Au metallogeny of Iran. *Economic Geology*, Special Publication 19: 193-212.
- Richards, J. P., 2015- Tectonic, magmatic and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision, *Ore Geology Reviews*, 70: 323-345.
- Richards, J. P., Wilkinson, D. and Ullrich, T., 2006- Geology of the Sary Gunay epithermal gold deposit, northwest Iran. *Economic geology*, 101: 1455-1496.
- Roedder, E., 1984- Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*, 12, 664 p.
- Shafaii Moghadam, H. and Stern, R. J., 2014- Ophiolites of Iran: keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia: (I) Paleozoic ophiolites. *Journal of Asian Earth Science*. 91: 19-38.
- Shafaii Moghadam, H. and Stern, R. J., 2015- Ophiolites of Iran: Keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia: (II) Mesozoic ophiolites. *Journal of Asian Earth Science*. 100: 31-59.
- Shafaii Moghadam, H., Stern, R. J., Corfu, F., Chiaradia, M. and Ghorbani, G., 2014- Sabzevar Ophiolite, NE Iran: Progress from embryonic oceanic lithosphere into magmatic arc constrained by new isotopic and geochemical data. *Lithos*, 224-241.
- Shamanian, G. H., Geffrey, W., Hedenquist, J. W., Hattori, K. H. and Ghaderi, M., 2003- The Gandy and Abolhassani epithermal prospects in the Alborz magmatic arc, Semnan province, Northern Iran. *Econ. Geol.*, v.99, pp.691-712.
- Shamanian, G. H., Hedenquist, J. W., Hattori, K. H. and Hassanzadeh, J., 2004- The Gandy and Abolhassani epithermal prospects in the Alborz magmatic arc, Semnan province, northern Iran. *Economic Geology*, 99: 691-712.
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H. and Alderton, D. H. M., 1985- A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, 223 p.
- Shojaat, B., Hassanipak, A. A., Mobasher, K. and Ghazi, A. M., 2003- Petrology, geochemistry and tectonics of the Sabzevar ophiolite, north central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21: 1053-1067.
- Sillitoe, R. H. and Hedenquist, J. W., 2003- Linkages between volcano-tectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits. In: Simmons, S.F., Graham, I. (eds.) *Volcanic, geothermal, and ore forming fluids: rulers and witnesses of processes within the earth*. Society of Economic Geologists, Special Publication, 10: 315-343.

- Simmons, S. F., White, N. C. and John, D. A., 2005- Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, pp: 485-522.
- Sterner, S. M., Hall, D. L. and Bodnar, R. J., 1988- Synthetic fluid inclusions V: solubility relations in the system NaCl-KCl-H₂O under vaporsaturated conditions. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, Vol: 52(5), p: 989-1005.
- 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.
- Van Leeuwen, T. M., Leach, T. M., Hawke, A. A. and Hawke, M. M., 1990- The Kelian disseminated gold deposit, East Kalimantan, Indonesia: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 35, pp. 1-61.
- Vikre, P. G., 1989- Ledge Formation at the Sandstorm and Kendall Gold Mines, Goldfield, Nevada, *Economic Geology* Vol. 84, 1989, pp. 2115-2138.
- Wallier, S., Rey, R., Kouzmanov, K., Pettke, T., Heinrich, C. A., Leary, S., O'Connor, G., Tamas, C. G., Vennemann, T. and Ullrich, T., 2006- Magmatic fluids in the brecciahosted epithermal Au-Ag deposit of Ros, ia Montana, Romania. *Economic Geology* 101, pp. 923-954.
- Wilkinson, J. J., 2001- Fluid Inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55: 229-279.
- Zhang, Z., Mao, J., Wang, Y., Pirajno, F., Liu, J. and Zhao, Z., 2010- Geochemistry and geochronology of the volcanic rocks associated with the Dong'an adularia-sericite epithermal gold deposit, Lesser Hinggan Range, Heilongjiang province, NE China: Constraints on the metallogenesis, *Ore Geology Reviews*, 37: 158-174.

Archive of SID

Geology and mineralization of Sebandoon gold deposit, North of Bardaskan

B. Hammamipour¹, H. A. Tajeddin^{2*} and L. Bahremand³

¹Ph.D. Student, Department of Geophysics, Faculty of Sciences, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

²Assistant Professor, Department of Geophysics, Faculty of Sciences, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

³Profesor, Department of Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴Assistant Professor, Department of Geophysics, Faculty of Sciences, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 2017 February 18

Accepted: 2017 August 16

Abstract

The Sebandoon gold deposit is located 40 km north of the Bardaskan in the northern part of the Central Iran. The rock units exposed in the area consist of upper Cretaceous volcano-sedimentary sequences of trachyte-trachyandesite, andesibasalt, tuff and carbonaceous shale which intruded by post Eocene syenite-quartz monzonite subvolcanic intrusions and diabasic dikes. The main gold reservoir in the Sebandoon deposit has occurred in cone-shaped and mostly in the trachyte-trachyandesite lava with dimensions of 90×150 m in the surface which continue up to the depth of 70 m. The hydrothermal alterations occurred in the deposit area include silicic, sulphidic, partly argillic (supergen) and propylitic which two former contains most of the high grade gold ores. The main ore structures and textures in the deposit are vein-veinlets (stockwork) and breccia which consists of quartz, sulphide minerals and rare adularia. Primary ore mineral assemblages of the deposit are simple and consist of pyrite, sphalerite, chalcopyrite, bornite, galena, arsenopyrite and gold. Covellite, chalcocite and iron hydroxides are secondary minerals in the deposit. Gold grains with less of than 60 microns in size has been found as inclusion in pyrite and chalcopyrite, in sulfides rims and intergrowth with quartz. Fluid inclusion studies on ore-bearing quartz reveal that majority of primary inclusions are liquid-rich two-phase (LV). The studies indicate homogenization temperatures between 165 and 254°C and salinity between 0.9 to 7.8 wt% NaCl eq. Comparison of the main characteristics of the Sebandoon deposit with epithermal gold deposits reveals that the geology, alteration, ore mineralogy, geochemical characteristics and fluid inclusions of the Sebandoon gold deposit is similar to low to intermediate-sulphidation type epithermal deposits.

Keywords: Gold mineralization, Epithermal, Fluid inclusion, Sebandoon, Sabzevar subzone.

For Persian Version see pages 155 to 168

*Corresponding author: H. A. Tajeddin; E-mail: h.tajeddin@modares.ac.ir