کانســـار طلای اخترچی با میزبان کربناته؛ زمین‌شناسی، مینرالوگرافی و مطالعات الکترون‌مایکروپروب (EPMA)

محمدامین نظیری[۱و*]، ایرج رسا[۲] و محمد یزدی[۳]

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران
۲. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران
۳. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۲۴
تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۲۰

چکیده

کانسار طلای اخترچی با میزبان کربناته در جنوب‌شرق محلات، استان مرکزی و در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان قرار دارد. سنگ میزبان شامل سنگ‌های کربناته ناخالص پرمین می‌باشد و در پهنه‌های کانه‌زایی تحت تأثیر انحلال (کربنات‌زدایی) و برشی شدن قرار دارد. کانه‌زایی به‌صورت ساختاری کنترل شده است و ارتباط مکانی بین گسل‌ها و کانه‌زایی وجود دارد. مهم‌ترین دگرسانی‌ها شامل سیلیسی، هماتیتی، دولومیتی، کربنات‌زدایی و رسی می‌باشند. کانه‌زایی طلا به سه صورت همراه با اکسیدهای آهن، نوع سیلیسی (ژاسپروئیدی) و نوع پلاسری ایجاد شده است. پنج نوع رگه کانه‌دار در منطقه شناسایی شده‌اند که عبارتند از رگه‌های اکسیدآهن طلادار، سیلیسی-اکسیدآهنی طلادار، سیلیسی-اکسیدآهنی مس‌دار، سیلیســـی پیریتی و کوارتزی شیری رنگ می‌باشد. بر اساس مطالعات مایکروپروب طلا به‌صورت ذرات میکروســـکوپی درون اکســـیدهای آهن و به‌صورت نامرئی درون اکسیدهای آهن، آهن-منگنز، کربنات‌ها، کانی‌های ثانویه مس‌دار و سولفیدها وجود دارد. براساس مطالعات زمین‌شناسی، ساختاری، دگرسانی، مینرالوگرافی و مایکروپروب ویژگی‌های کانسار اخترچی بیشترین شباهت را با کانسارهای طلای کارلین دارد.

واژه‌های کلیدی: اخترچی، پهنه سنندج-سیرجان ،تیپ کارلین، سنگ میزبان کربناته، طلا.

مقدمه

کانسار طلای اخترچی با میزبان کربناته، در ۲۰ کیلومتری جنوب شرق محلات، استان مرکزی و پهنه ساختاری سنندج-سیرجان قرار دارد. پهنه سنندج-سیرجان یک زون دگرگونی در کوهزایی زاگرس از منشاء گندوانایی است (Fergusson et al., 2016). در این پهنه، پدیده‌های دگرگونی، ماگماتیسم و زمین‌ساخت پی‌درپی و هماهنگ با فازهای زمین‌ساختی شناخته شده در مقیاس جهانی در بیشترین مقدار رخ داده اســـت. از همین‌رو، این پهنه ناآرام‌ترین و به‌عبارتی پویاترین پهنه زمین‌ساختی ایران است (آقانباتی، ۱۳۸۳). بر اساس داده‌های شـــیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی سنگ کل، ســـنگ‌های دگرگون در پهنه سنندج-سیرجان به محیط زمین‌ســـاختی فرورانش و کمان‌های آتشفشـــانی قاره‌ای تعلق دارنـــد (رحمانی جوانمرد و همکاران، ۱۳۹۹). ناحیه اخترچی از نظر تنوع مواد معدنی قابل توجه اســـت، به‌طوری‌که کانه‌زایی‌های مختلفی از قبیل طلا، مس، روی،

* نویسنده مرتبط: naziri.ma@gmail.com

آهن، منگنز، فلوریت، و باریت در این منطقه گزارش شـــده است. این منطقه در محل برخورد پهنه سنندج-سیرجان و کمان ماگمایی ارومیه-دختر واقع شده است؛ بنابراین علاوه بر تنوع مواد معدنی، تیپ‌های مختلفی از کانسارها همانند کانســـارهای مس-طلای پورفیری دالی و طلای کوهزایی در ســـنگ‌های پالئوزوئیک میانی تا بالائی موته در این منطقه تشـــکیل شـــده اســـت (جزیی و همکاران، ۱۳۹۵؛ مهرابی و طالع فاضل، ۱۳۹۵؛ نوریان رامشـــه و همکاران، ۱۳۹۵؛ ثابت‌ور نامخواستی و همکاران، ۱۳۹۲؛ سخدری و همکاران، ۱۳۹۰؛ مهوری و همکاران، ۱۳۹۰؛ نظیری، ۱۳۹۰؛ طورچی و نصراصفهانی، ۱۳۷۶). ازآنجایی‌که اغلب کانسارهای طلا با میزبان رســـوبی بسیار ریزدانه هستند (Arehart, 1996; Arehart et al., 1993; Wells and Mullens, 1973) و در مقیـــاس کانســـار به‌صورت دانه پراکنـــده وجود دارند (Christensen, 1996; Christensen, 1993)، تشخیص و اکتشـــاف این کانسارها مشکل است. به‌جز کانسار طلای اخترچی، تاکنون کانســـار طلای دیگـــری با میزبان کربناته در این منطقه گزارش نشـــده است. دولومیت ضخیم لایه تا توده‌ای، مهم‌ترین سنگ میزبان این کانسار است. سنگ‌آهک با تبلور مجدد در اغلب محل‌های کانه‌زایی طلا به‌صورت کمر پایین حضور دارد. از ویژگی‌های سنگ میزبان، وجود حفرات انحلالی حاصل از شستشوی اسیدی آب‌های فرورو می‌باشد. کلسیت و آراگونیت در این حفرات تشکیل شده‌اند. کانه‌زایی، ترکیب کانی‌شناسی ساده‌ای دارد و ترکیبات پیچیده عناصر همراه طلا، همچون آنتیموان، آرســـنیک و جیوه گسترش چندانی ندارند و یا در مقادیر بالا حضور ندارند. طی مطالعات زمین‌شناســـی، منطقه اخترچی از نظر ســـاختاری به سه بخش سه‌غار، پشت‌تک‌غار و تک‌غار تقسیم شد (شکل ۱). ازآنجایی‌که کانســـارهای طلا با میزبان رسوبی، منابع مهم طلا در مقیاس جهانی می‌باشـــند (Hofstra and Cline, 2000; Arehart, 1996). از این‌رو از اهداف اکتشافی مهم به‌حســـاب می‌آیند و مطالعات زیادی بر روی این کانسارها صورت پذیرفته اســـت (Muntean, 2018 Muntean and Cline, 2018; Clark Maroun et al., 2017; Vaughan et al., 2016; Hickey et al, 2014). بـــرای افزودن بر دانـــش ما از نوع کانه‌زایی، ژنـــز و کنترل‌کنندگان کانه‌زایی در کانسار اخترچی، در این مقاله زمین‌شناسی، دگرسانی، تکتونیک، مینرالوگرافی و در نهایت ویژگی‌های ژئوشیمیایی کانی‌ها و کانه‌های میزبان طلا با استفاده از ترکیب مطالعات میکروسکوپی و نتایج الکترون‌مایکروپروب[1] بررسی شد.

روش مطالعه

بعد از پیمایش‌های زمین‌شناسی از پهنه، نمونه‌برداری از سنگ‌های میزبان دگرسان و غیر دگرسان و نیز بخش‌های مختلف کانســـنگ‌های گســـتره اخترچی صورت پذیرفت. بعد از بررسی نمونه‌های دســـتی، نمونه‌های مناسب برای تهیه مقاطع نازک (۵۶ عـــدد)، نازک-صیقلی (۱۴ عدد) و صیقلی (۱۲ عدد) انتخاب شد. بعد از تهیه مقاطع، مطالعه پتروگرافی و مینرالوگرافی مقاطع با استفاده از میکروسکوپ نوری در دانشـــگاه شهید بهشـــتی صورت پذیرفت. تجزیه الکترون‌مایکروپروب شامل تصویربرداری بک‌اسکتر[2] و تجزیه نقطه‌ای کانی‌هـــا و کانه‌های میزبان طلا برای تایید ماهیت کانه‌ها و تعیین مقدار طلا و دیگر عناصر در مرکز تحقیقات فـــرآوری مـــواد معدنی ایران انجام شـــد. بـــرای مطالعات مایکروپروب، ابتدا مقاطع صیقلی تهیه شـــده از نمونه‌های منتخب با کربن مورد پوشـــش قرار گرفت و سپس به‌وسیله دستگاه مایکروپروب مدل CAMECAX100 با شرایط ۲۰ کیلـــو الکترون‌ولـــت (Kev) و ۲۰ نانوآمپر (nA) و با پرتو به قطـــر یک تا پنج میکرون مورد مطالعه قرار گرفت. کانه‌های کالکوپیریت، گالن، اســـفالریت، کالکوســـیت و ذرات طلا به همراه سیلیکات مس، اکســـیدهای آهن و آهن-منگنز، کوارتـــز، باریت و کربنات‌ها، مـــواردی بودند که بر روی آنها تجزیه صورت گرفت (۱۳۷ نقطه).

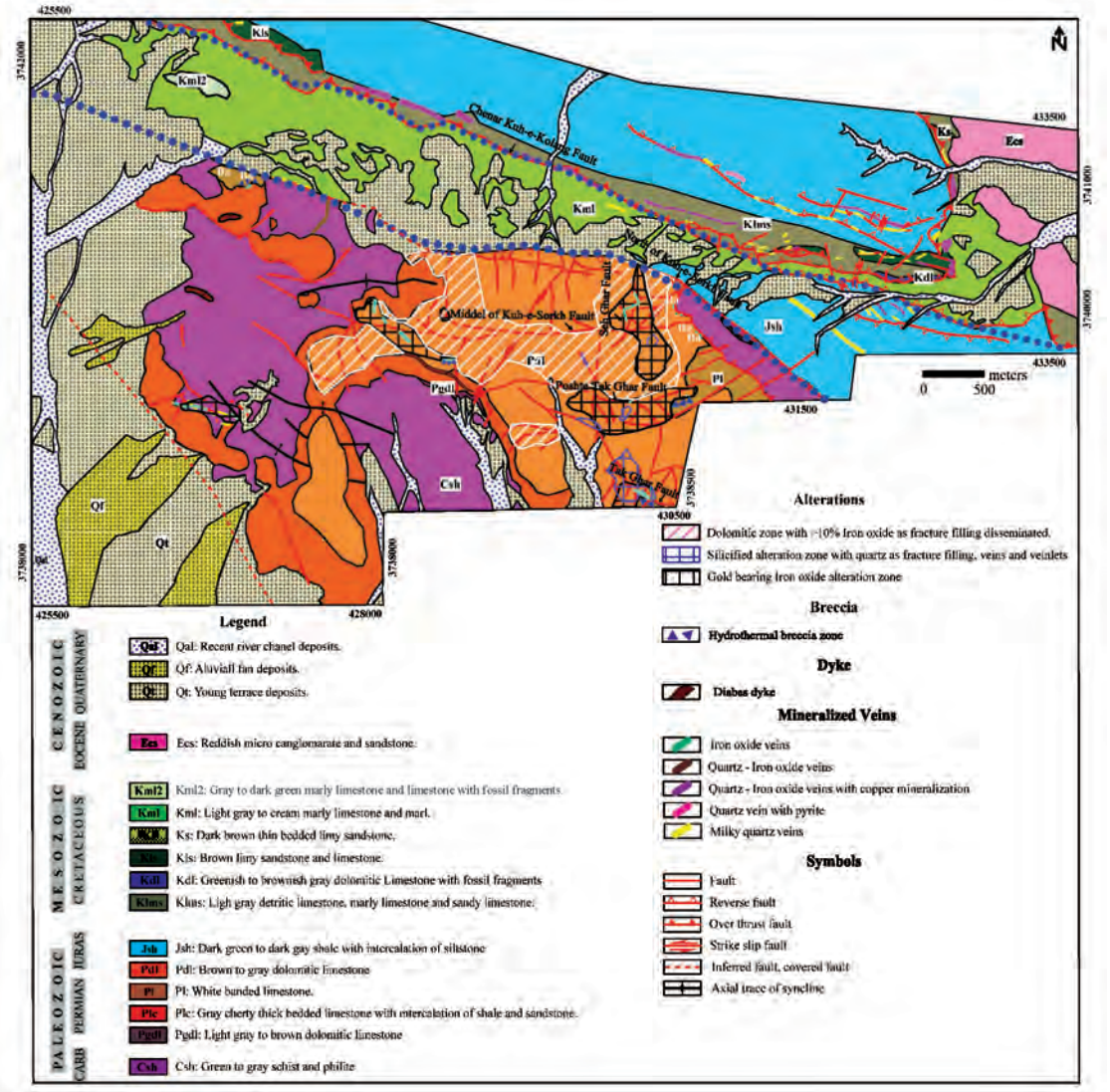
بحث

زمین‌شناسی منطقه اخترچی

واحدهای منطقـــه از قدیم به جدید عبارتند از (شـــکل ۱، شرکت مشاور پارسی کانی کاو، ۱۳۹۳ با تغییرات):

۱. واحد شیســـت و فیلیت‌های سبز تا خاکستری متمایل

1. Electron microprobe
2. Backscatter

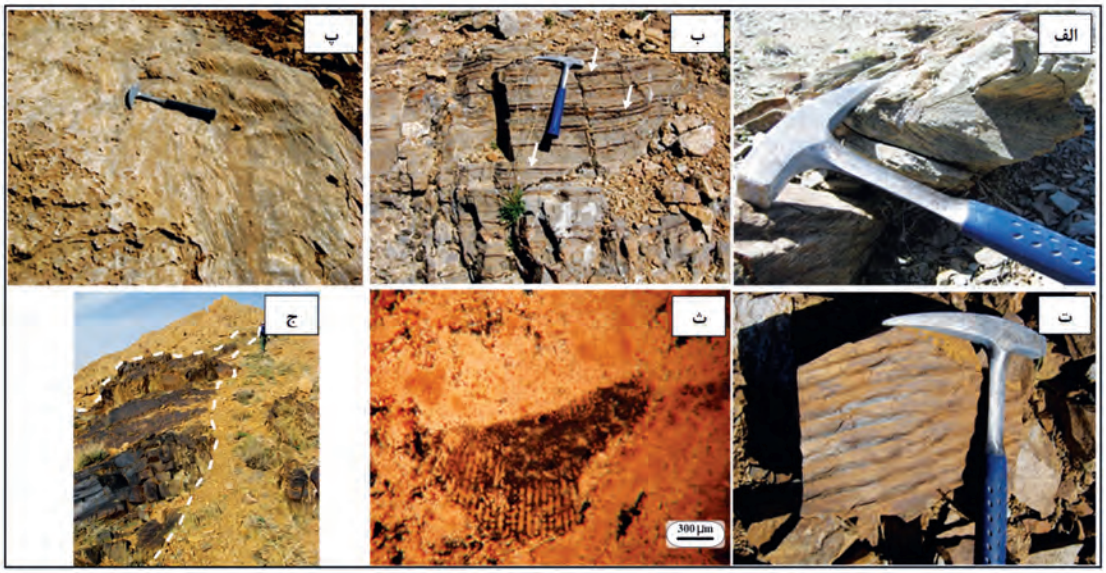


شـــکل ۱. نقشه زمین‌شناســـی گســـتره مورد مطالعه اخترچی در مقیاس ۱:۵۰۰۰ که بر روی آن واحدهای سنگی، دگرسانی‌های گرمابی، انواع گسل‌های رخ داده، کانه‌زایی‌ها و ارتباط بین پدیده‌های مختلف در سه بلوک شمالی، مرکزی و جنوبی نشان داده شده است (برگرفته از شرکت مشاور پارسی کانی کاو، ۱۳۹۳ با تغییرات)

به سبز کربونیفر (Csh). از ویژگی‌های این واحد تزریق رگه‌های کوارتز و کوارتز-اکسیدآهن شیری رنگ به درون لایه‌بندی این واحد می‌باشـــد. به نظر می‌رســـد واحد شیســـت و فیلیت کربونیفر تحت تاثیر دو نسل فشارش قرار دارد که حاصل آن وجـــود دو جهت برگوارگی، به اصطلاح برگوارگی کنگره‌ای، می‌باشد (شکل ۲-الف)؛

۲. مهم‌ترین واحد میزبان کانه‌زایی طلا در گستره اخترچی، مجموعـــه واحدهـــای پرمین می‌باشـــد. این مجموعه متشکل از الف-ســـنگ‌آهک دولومیتی قهوه‌ای روشن (pgdl)، ب-سنگ‌آهک رسی نازک تا ضخیم لایه چرتی خاکســـتری با میان لایه‌های شیل و ماسه‌سنگ (Plc) (شـــکل ۲-ب)، پ-ســـنگ‌آهک نواری سفید تا شیری با تبلور مجدد (Pl) می‌باشـــد. از ویژگی‌های این واحد، ساخت نواری اســـت که در اثر تبلور مجدد تغییر یافته اســـت (شـــکل ۲-پ) و در تمامی رخنمون‌ها همراه با کانه‌زایی اســـت و ت-ســـنگ‌آهک دولومیتی قهوه‌ای تا خاکستری تیره (Pdl). ســـطوح چروکیده حاصل از دولومیتی شدن، از ویژگی‌های این واحد می‌باشد؛

۳. واحد شـــیل ســـبز تا خاکســـتری تیره میان لایه‌های سیلتستون ژوراسیک (Jsh) (شکل ۲-ت)؛
۴. مجموعه واحدهای کرتاســـه در گستره اخترچی به دو واحد و چهار زیر واحد تقســـیم شده است. الف-واحد سنگ‌آهک تخریبی، ســـنگ‌آهک مارنی و سنگ‌آهک ماســـه‌ای خاکســـتری روشـــن (Klms)، ب-زیر واحد ســـنگ‌آهک دولومیتی با قطعات فســـیلی خاکستری متمایل به ســـبز تـــا قهوه‌ای (Kdl)، پ-ماسه‌ســـنگ آهکی و ســـنگ‌آهک قهوه‌ای (Kls). وجود ریپل مارک در این زیر واحد (شـــکل ۲-ت) نشـــان‌دهنده عمق کم محیط تشکیل آن می‌باشـــد، ت-زیر واحد ماسه‌سنگ آهکی نـــازک لایه قهوه‌ای تیـــره (Ks)، ث-واحد مارن و ســـنگ‌آهک مارنی کرم تا خاکستری روشن (Kml). در این واحد قطعات فســـیلی نیز حضور دارند (شـــکل ۲-ث) و ج- زیر واحد ســـنگ‌آهک مارنی و سنگ‌آهک خاکستری تیره با قطعات فسیلی (Kml2)؛
۵. تنها واحد مربوط به زمان ائوسن، واحد میکروکنگلومرا تا ماسه‌سنگ قرمز (Ecs) می‌باشد. این واحد متشکل از میکروکنگلومرای پلی‌ژنتیک با قطعات آتشفشانی، آهکی و ماسه‌سنگی و نیز ماسه‌سنگ درشت‌دانه می‌باشد؛
۶. واحدهـــای کواترنری به ســـه بخش تقســـیم شـــده‌اند. الف- نهشته‌های پادگانه‌ای جوان (Qt)، ب- نهشته‌های پادگانه آبرفتی (Qf) و پ- نهشته‌های آبرفتی کانال رودخانه (Qal). با توجه به کانه‌زایی طلا در ارتفاعات و فرسایش و حمل سنگ‌ها به داخل مسیل رودخانه‌ها امکان تشکیل ذخایر پلاسر طلا در این نهشته‌ها وجود دارد؛
۷. دایک‌های دیابازی خاکســـتری تیره تا سبز تیره با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی بیشتر در جنوب‌غرب گستره کـــه مجموعـــه کربونیفر-پرمین را قطـــع کرده‌اند. این دایک‌ها اغلب ابعاد کوچکی دارند (شکل ۲-ج).



شکل ۲. تصاویر صحرایی از واحدهای سنگی گستره اخترچی، الف) واحد شیست کربونیفر (Csh) در جنوب‌غرب پهنه و برگوارگی کنگره‌ای در آن، ب) تشکیل چرت در بین لایه‌های نازک کربنات در واحد Plc، پ) وجود ساخت نواری در سنگ‌آهک نواری واحد (Pl)، ت) ریپل‌مارک‌های موجود در ماسه‌سنگ‌های زیر واحد (Kls)، ث) تصویر میکروسکوپی در نور عبوری از سنگ‌آهک دارای قطعات فسیل بریوزوئد دولومیتی شده در واحد (Kml)، ج) برون‌زد دایک دیابازی (دید به‌سمت شمال‌غرب)

تکتونیک منطقه

از نظر ساختاری گســـتره معدنی اخترچی را می‌توان به سه بلوک شمالی، جنوبی و مرکزی تقسیم کرد (شکل ۱).
بلوک شـــمالی: شـــدت چین‌خوردگی در بلوک شمالی کم و چین‌ها از نوع باز می‌باشـــند. گسل‌های اصلی از نوع معکوس با روند شرقی-غربی است. شیب گسل‌های معکوس در حدود ۷۵-۵۵ درجه به‌سمت جنوب می‌باشد. گسل‌های معکوس متعدد حاشـــیه جنوبی بلوک شـــمالی به‌موازات

یکدیگر بوده و رگه‌های متعدد اکسیدهای آهن و سیلیس با آثاری از کانه‌های مس قابل مشاهده است.

بلوک مرکزی: شدت تغییر شکل در بلوک مرکزی با وجود چین‌های فشـــرده، گسل‌های معکوس و رورانده زیاد است. بخش عمده بلوک مرکزی شامل یک برگه رورانده می‌باشد و گسل‌های معکوس توسط این برگه پوشیده شده‌اند. تطابق جهت تمایل چین‌ها با رورانده‌گی اصلی در جبهه رورانده‌گی، گواه هم‌زمانی ایجاد چین برگشـــته با رورانده‌گی است. یک گسل رورانده با جهت متمایل به‌سوی جنوب، شیب سطح متغیر و با انحناهایی در مســـیر با امتداد عمومی ۷۰ درجه به سمت شـــمال‌غرب در این بلوک وجود دارد که با امتداد گسل‌های معکوس بلوک جنوبی و شمالی هماهنگی ندارند. گسل رورانده اصلی واقع در پیشانی برگه تراستی تحت عنوان گســـل رورانده اخترچی نام‌گذاری شده است. بخش شرقی کمربند تراستی دارای گسل‌های رورانده متعددی می‌باشد از شـــرق به غرب از تعداد گســـل‌های رورانده کم می‌شود. ادامه غربی این کمربند به یک گسل رورانده بهنام گسل کوه کلنگ چنار تبدیل می‌شود. گسل‌های کوچک فرعی همگی به دو گروه اصلی الف) گســـل‌های برشی مزدوج راستالغز و ب) گسل‌های کششی تقسیم می‌شوند.

بلوک جنوبی: بلوک جنوبی یک بخش بالا آمده متشکل از چین با محورهای ملایم است. روند محور چین‌ها شرقی-غربی و چین‌های اصلی شامل تاقدیس می‌باشند که توسط گســـل‌های معکوس قطع شده‌اند. تاقدیس جنوبی بلوک از نوع باز و تاقدیس شمالی در مجاورت گسل کوه‌سرخ از نوع نامتقاطع تا برگشـــته می‌باشـــد و جهت تمایل آن به‌سمت شـــمال است. تراکم گســـل‌ها در بلوک جنوبی زیاد است و دگرشکلی عمده این بلوک توسط گسل‌ها ایجاد شده است. گســـل‌های اصلی از نوع معکوس و دارای شیب بیش از ۵۰ درجه می‌باشـــند. امتداد گسل‌های معکوس بیشتر شرقی-غربی است. در حدفاصل این گســـل‌های رانده، گسل‌های امتدادلغز و کششی کوچک مقیاس قابل مشاهده است. از مهم‌ترین گســـل‌های این کمربند می‌توان به گسل تک‌غار، پشت تک‌غار، گسل میانی کوه‌سرخ و گسل شمال کوه‌سرخ اشاره کرد (شکل ۱). گســـل تک غار با روند شمال شرقی-جنوب غربی از نوع پرشیب می‌باشد و میزان شیب آن بیش از ۶۵ درجه اســـت. وســـعت کمربند برشی آن در حدود ۵۰ متر اســـت و رگه‌های متعددی در کمربند برشـــی مشاهده می‌شـــود. پیچ و تاب‌های متعددی در مســـیر گســـل دیده می‌شود و توسط گســـل‌های امتدادلغز و کششی متعددی قطع شده است. شیب گســـل شرقی-غربی پشت تک غار، ۶۸-۷۲ درجه به‌سمت جنوب است و ادامه غربی این گسل به دو شـــاخه شمالی و جنوبی تقسیم می‌شود. گسل میانی کوه‌سرخ باروند شرقی-غربی به‌طول تقریبی ۲/۵ کیلومتر بر روی محور ناودیس واقع شده است. گسل امتدادلغز سه غار با روند شمالی-جنوبی دارای شیب ۶۵ تا ۷۵ درجه به‌سمت شرق می‌باشد. گسل معکوس شمال کوه‌سرخ با روند شرقی-غربی و شیب بیش از ۷۵ درجه به‌سمت جنوب، از مهم‌ترین گسل‌های معکوس گستره اخترچی محسوب می‌شود. طول گسل بیان شده بیش از پنج کیلومتر است و سرتاسر گستره اکتشافی اخترچی را قطع می‌کند. حرکت معکوس آن سبب شده اســـت که واحدهای سنگی کربونیفر و پرمین، بر روی واحدهای سنگی کرتاسه بالایی قرار گیرند.

کنترل ســـاختاری دگرســـانی‌ها و کانه‌زایی‌های گستره حاکی از اهمیت ســـاختارها در تشـــکیل این کانسار است. گســـل‌های معکوس و امتدادلغز از اهمیت زیادی در منطقه برخوردار هســـتند. مهم‌ترین گســـل‌هایی کـــه در برونزد و تغییرات بعدی واحدهای ســـنگی منطقه نقش داشته‌اند، گسل‌های شرقی-غربی و شمال‌غربی-جنوب‌شرقی هستند. روندهای شمال‌غربی-جنوب‌شـــرقی از اهمیت بیشتری در ارتباط بـــا کانه‌زایی برخوردار هســـتند. تغییر جهت نیروها در طول زمان ســـبب شده اســـت که بردار حرکتی برخی از گســـل‌های راســـتالغز در بلوک جنوبی تغییر کند. به‌همین دلیل گسل‌های راستالغز با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق در اثر عملکرد فازهای کوهزایی جوان، دارای بازشدگی بیشتری شـــده و کانه‌زایی در طول آنها رخ داده اســـت. بااین‌حال، روندهای شمالی-جنوبی در بخش سه غار، شرقی-غربی در منطقه پشت تک غار و شمال‌غربی-جنوب‌شرقی در تک غار نیز کنترل‌کننده کانه‌زایی می‌باشند. شیب گسل‌ها در پهنه همگی بیش از ۵۰ درجه است. شاید همین شیب زیاد باعث

نفوذ محلول‌های گرمابی از میان ساختارها به‌عنوان مجاری عبوری و تشکیل کانه‌زایی (از نوع کنترل‌کننده ساختاری) در گستره شده باشد.

دگرسانی‌ها

دگرسانی‌ها در منطقه اخترچی شامل انحلال کربنات (کربنات‌زدایی)، اکسیداسیون آهن، دولومیتی شدن، سیلیسی شدن و رسی شدن کانی‌های آلومینوسیلیکاته (آرژیلیک) می‌باشند.

انحلال از پدیده‌های معمول در سنگ‌های کربناته می‌باشد (شکل ۳-الف). حفرات انحلالی حاصل از شستشوی اسیدی سنگ میزبان توسط آب‌های فرورو موجب آماده‌سازی سنگ زمینه برای تشکیل ذخیره هستند. کلسیت و آراگونیت در این حفرات تشکیل شده‌اند.تشکیل پهنه‌های سیلیسی و اکسیدآهنی در مناطق انحلالی معمول می‌باشد.

مهم‌ترین دگرسانی کنترل‌کننده کانه‌زایی، پهنه‌های اکسیدآهنی هستند (شکل ۱)، شدت پهنه‌های اکسید آهن کنترل‌کننده میزان کانه‌زایی می‌باشد دگرسانی‌های اکسیدآهن حاصل از هوازدگی سولفیدها می‌باشد (شکل ۳-ب). مهم‌ترین ویژگی این دگرسانی، جانشینی بخش زیادی از فضاهای خالی حاصل از پدیده دولومیتی شدن و نیز جانشینی دولومیت توسط اکسیدهای آهن است. اکسیدهای آهن نهشته شده در فضاهای خالی گاه بافت نواری ظریفی نشان می‌دهند. اکسیدهای آهن رگه‌ای نیز دیده می‌شوند که حاکی از تمرکز آنها در ساختارها و روندهای مشخص است. کوارتز جانشینی، رگچه‌ها و رگه‌های کوارتزی نیز همراه اکسید آهن مشاهده می‌شوند. کوارتز از متبلور تا شیری رنگ و مخفی بلور متغیر است. گاه کوارتز حفره‌ای و ژاسپروئید نیز تشکیل شده است. مقطع عرضی هوازدگی و گسترش پهنه‌ها در منطقه اخترچی، نشان‌دهنده مهیا بودن سنگ‌های میزبان برای ورود آب‌های اکسیدی به‌خاطر عملکرد تکتونیک هستند.

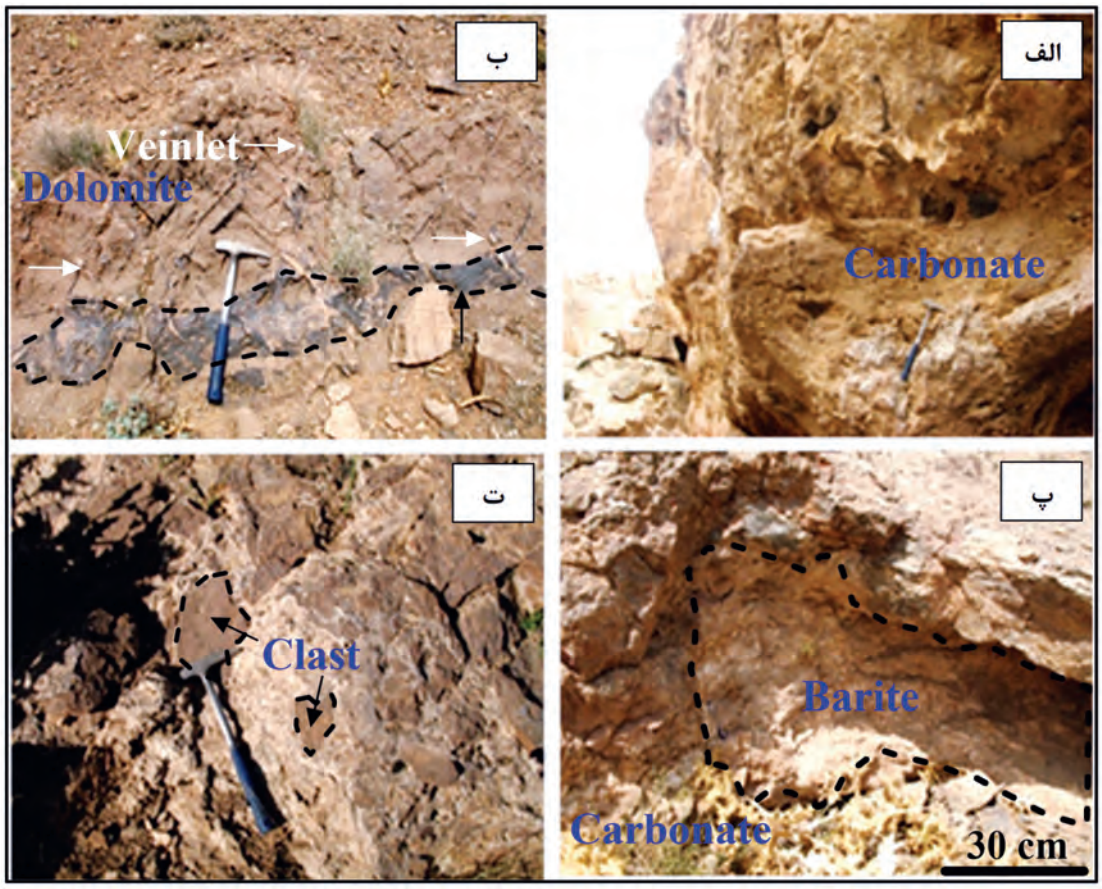
بخش مهمی از واحد سنگ‌آهک دولومیتی (Pdl) توسط دگرسانی دولومیتی با بیش از ۱۰٪ اکسیدآهن متاثر شده است (شکل ۱). دگرسانی دولومیتی به‌صورت پرکننده شکستگی‌ها و پراکنده رخ داده است. اگرچه گسترش این دگرسانی توسط واحد زمین‌شناسی کنترل شده است ولی گاهی واحد سنگ‌آهک نواری (Pl) نیز توسط این دگرسانی متاثر شده است. گسل‌ها نیز در بسیاری از موارد کنترل‌کننده مرز دگرسانی هستند. در سطح زمین وجود رنگ‌های کرم تا قهوه‌ای، شکستگی سنگ‌ها با لبه‌های تیز، سخت‌شدگی سنگ و خردشدگی شدید آن و سطح چروکیده سنگ‌ها بر فرآیندهای دولومیتی دلالت دارد. دولومیتی شدن سنگ‌های کربناته می‌تواند منجر به افزایش تخلخل سنگ شود.

دگرسانی سیلیسی در سنگ میزبان کربناتی پرمین و هم در سایر واحدها مشاهده می‌شود (شکل ۱). با توجه به حضور رگه‌های سیلیسی کانه‌دار در گستره اخترچی و افزایش شدت دگرسانی در سنگ‌های اطراف رگه‌ها، به‌نظر می‌رسد بخشی از دگرسانی در ارتباط با ورود محلول‌های دارای سیلیس هستند. دگرسانی سیلیسی به‌صورت کوارتز پرکننده شکستگی، رگه‌ها و رگچه‌های سیلیسی و سیلیس توده‌ای مشاهده می‌شود. رگه‌های کوارتز شیری، به نظر می‌رسد در ارتباط با ساختارهای برشی باشند. بخش‌های سیلیسی گاه گستره‌های وسیعی را تشکیل می‌دهند و به‌صورت پهنه‌های سیلیسی در مناطق کانه‌دار تشکیل شده‌اند. این نوع دگرسانی به‌صورت جایگزینی سنگ‌های کربناتی توسط کوارتز خودشکل نیز مشاهده می‌شود. ژاسپروئید قرمز تا بنفش نیز همواره به‌صورت ریزبلور تشکیل شده است.

باریم به‌صورت باریت (شکل ۳-پ) در مراحل پایانی کانه‌زایی تشکیل شده است. باریت در موقعیت چینه‌شناسی و ساختاری خاص تشکیل شده است. مهم‌ترین مناطق تشکیل باریت عبارتند از الف- باریت شکافه پرکن، لکه‌ای و عدسی در طول ۵۰۰ متر از ساختار اصلی منطقه با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی در موقعیت زیرین واحد سنگ‌آهک نواری در شرق سه‌غار می‌باشد. باریت توده‌ای نیز در فضاهای باز تشکیل شده است، ب- باریت شعاعی و توده‌ای در فضاهای باز در شمال‌غرب منطقه دیده می‌شود (شکل ۱).

بر اساس مشاهدات صحرایی و مطالعات میکروسکوپی، سه نوع برش در منطقه تشکیل شده است. الف- برش نوع اول، برش‌های تشکیل شده در محیط رسوبی و پس از

تشکیل سنگ است. این برش شاید به‌خاطر انحلال کربنات و فرونشست رخ داده است. این نوع برش بیشتر از قطعات هم‌جنس مجموعه سنگ‌آهک یا سنگ‌آهک دولومیتی تشکیل شده است، ب- برش‌های گسلی در امتداد گسل‌ها تشکیل شده‌اند و فراوانی زیادی دارند، پ- نوع سوم و مهم‌ترین آنها، برش‌های گرمابی مرتبط با تشکیل دگرسانی و کانه‌زایی می‌باشند (شکل ۱). مشخصه این برش‌ها زمینه اکسیدآهنی و سیلیسی در بین قطعاتی از جنس سنگ میزبان است (شکل ۳-ت).



شکل ۳. تصاویر صحرایی الف) انحلال و نهشت رسوبات در کارست قدیمی ایجاد شده و پدیده سیلیسی شدن در همان محل، ب) جانشینی سنگ‌آهک دولومیتی پرمین توسط رگچه‌های اکسیدآهن و کوارتز در پهنه دگرسان اکسیدآهنی، پ) تشکیل باریت به‌صورت پرکننده فضاهای خالی در شرق سه‌غار، ت) برش گرمابی با کلست‌هایی از جنس سنگ میزبان تشکیل شده در پهنه‌های دگرسانی-کانه‌زایی

کانه‌زایی

کانه‌زایی طلا در بخش‌های مختلف منطقه اخترچی به سه صورت وجود دارد:

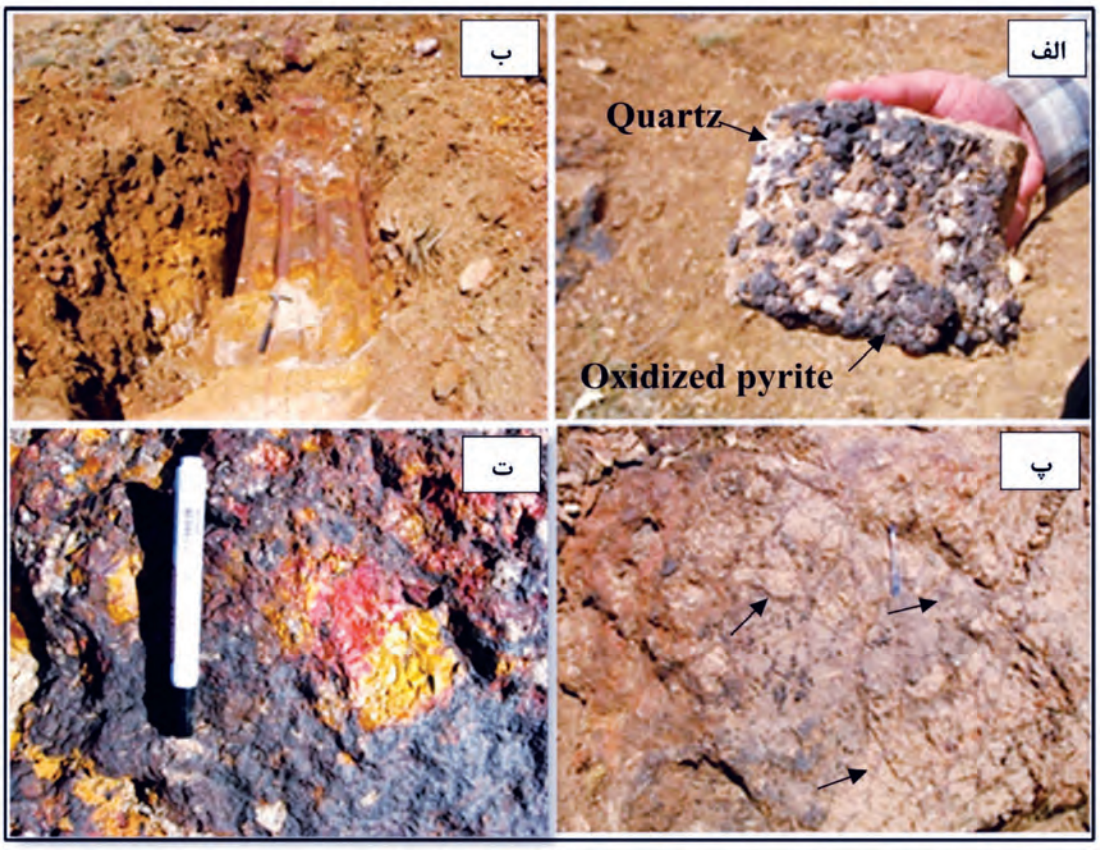
الف- کانه‌زایی طلا همراه با اکسیدهای آهن حاصل از هوازدگی سولفیدها و رگه‌های کوارتزی در سنگ میزبان کربناته پرمین می‌باشد. همراهی تنگاتنگی بین کوارتز و اکسیدآهن در این نوع کانه‌زایی وجود دارد (شکل ۴-الف). کوارتز رگه‌ای، رگچه‌ای و حفره‌ای معمول است. بخش عمده سولفیدها اکسید شده است و مقطع عرضی اکسیدی، گسترش مناسبی در منطقه دارد. اکسیدهای آهن به سه حالت دیده می‌شوند. حالت اول اکسیدهای آهن انتشاری در متن سنگ‌آهک دولومیتی که موجب تغییر رنگ سنگ شده است. افزایش مقدار این نوع اکسیدآهن گاه باعث تشکیل اکسیدآهن اسفنجی شده است (شکل ۴-ب). شکل دوم به‌صورت اکسیدهای آهن رگچه‌ای می‌باشد (شکل ۴-پ). شکل سوم به‌صورت

بلورهای پیریت اکسید شده پراکنده در متن سنگ است (شکل ۴-الف).

از ویژگی‌های کانه‌زایی طلا همراه با اکسیدآهن و کوارتز می‌توان به تشکیل کانه‌زایی در روندهای خاص، وجود سنگ‌آهک نواری با تبلور مجدد در کنار پهنه‌های اکسیدآهن طلادار، حضور باریت در بخش زیرین واحد سنگ‌آهک نواری، ارتباط با ساختارهای فشارشی و گسلش معکوس، عادی و امتدادلغز اشاره کرد.

ب- کانه‌زایی طلای نوع سیلیسی (ژاسپروئید) (شکل ۴-ت)، کانه‌زایی طلا همراه با رگه‌های سیلیسی در سرتاسر منطقه شکل می‌گیرد. مهم‌ترین رخداد این کانه‌زایی در جنوب‌غرب منطقه مشاهده می‌شود. در این مناطق حضور اکسیدهای آهن و رگه‌های سیلیسی چشمگیر است. این رگه‌ها همواره دارای کانه‌زایی کمتری هستند. کوارتز شیری و مخفی‌بلور با ساخت رگه‌ای و توده‌ای با کانه‌زایی مس همراه است. سنگ میزبان این رگه‌ها از شیست‌های کربونیفر، شیل‌های ژوراسیک و سنگ‌آهک کرتاسه متغیر است.

پ- ذخیره پلاسری طلا با عیار ۱/۷ ppm حاصل از فرسایش بخش‌های کانه‌دار و حمل آنها در محیط رودخانه‌ای است. این نوع با توجه به گسترش اکسیداسیون شدید و توسعه مقطع عرضی اکسیدی که باعث آزادسازی طلا شده است اهمیت زیادی دارد (نیاز به مطالعه دقیق اکتشافی دارد).



شکل ۴. انواع اکسید آهن در کانه‌زایی طلا همراه با اکسیدهای آهن حاصل از هوازدگی سولفیدها و رگه‌های کوارتزی در سنگ میزبان کربناته پرمین، الف) نمونه دستی از تبلور بلورهای کوارتز به‌همراه بلورهای پیریت اکسید شده (قالب بلورهای پیریت حفظ شده‌اند)، ب) تصویر صحرایی از تشکیل آهن اسفنجی در رگه‌های اکسیدآهن طلادار، پ) تصویر صحرایی از فاز اکسید آهن رگچه‌ای، ت) نمائی نزدیک از ژاسپروئیدهای زرد و قرمز طلادار در منطقه اخترچی

کانه‌زایی مس نیز در گستره وسیعی از پهنه دیده می‌شود اما در سنگ میزبان کربناته (طلادار) گسترش کمتری دارد. مهم‌ترین رخداد کانه‌زایی مس همراه با رگه‌های کوارتزی است. یکی از رگه‌های اصلی سیلیسی با کانه‌زایی طلا و مس در امتداد گسل چنار-کوه‌کلنگ با طول تقریبی پنج کیلومتر و به‌صورت ناپیوسته است (شکل ۱). رگه‌های کوارتزی درزه‌های کمتری دارند و در نتیجه آب‌های جوی کمتری در آنها نفوذ می‌کنند بنابراین عمق مقطع عرضی اکسیدی در این رگه‌ها چندان زیاد نیست.

به‌طورکلی رگه‌های کانه‌دار موجود در گستره اخترچی (شکل ۱) عبارتند از:

۱. رگه‌های اکسیدآهنی طلادار: این رگه‌ها بیشتر در مجموعه‌های دگرسانی اکسیدآهنی با میزبان سنگ‌آهک دولومیتی پرمین تشکیل شده‌اند. روند آنها اغلب شمال‌غربی-جنوب‌شرقی تا شرقی-غربی است. هماتیت، گوتیت و لیمونیت به‌ترتیب فراوان‌ترین کانی‌های آهن‌دار در این رگه‌ها می‌باشد.

۲. رگه‌های سیلیسی-اکسیدآهنی طلادار: فراوان‌ترین رگه‌ها در گستره می‌باشند. تعدادی از رگه‌های سیلیسی دارای مقادیر بالایی از اکسیدهای آهن هستند. هم‌رشدی و تشکیل هم‌زمان سیلیس و اکسیدآهن در رگه‌ها قابل مشاهده است. این رگه‌ها علاوه بر سنگ‌های کربناتی پرمین، در سایر واحدها به‌ویژه در شیل‌های ژوراسیک نیز دیده می‌شوند.

۳. رگه‌های سیلیسی-اکسیدآهنی مس‌دار: این رگه‌های سیلیسی-اکسیدآهنی، دارای کانه‌زایی مس هستند. مهم‌ترین این رگه‌ها، در واحدهای کرتاسه تشکیل شده‌اند. این رگه‌ها در امتداد گسل‌ها تشکیل شده‌اند.

۴. رگه‌های سیلیسی-پیریتی: مشاهدات صحرایی و حضور قالب‌های پیریتی و مطالعه مقاطع صیقلی نشان می‌دهند، بخش زیادی از اکسیدهای آهن موجود در رگه‌ها و زون‌های اکسیدآهنی به‌صورت اولیه پیریت هستند. رگه‌های سیلیسی به دلیل مقاومت بیشتر سیلیس در مقابل هوازدگی و نفوذ کمتر آب‌های جوی به درون بخش‌های سیلیسی، عمق گسترش اکسید به‌مراتب کمتر است و در بسیاری از نواحی پیریت و کالکوپیریت در سطح نیز قابل مشاهده‌اند.

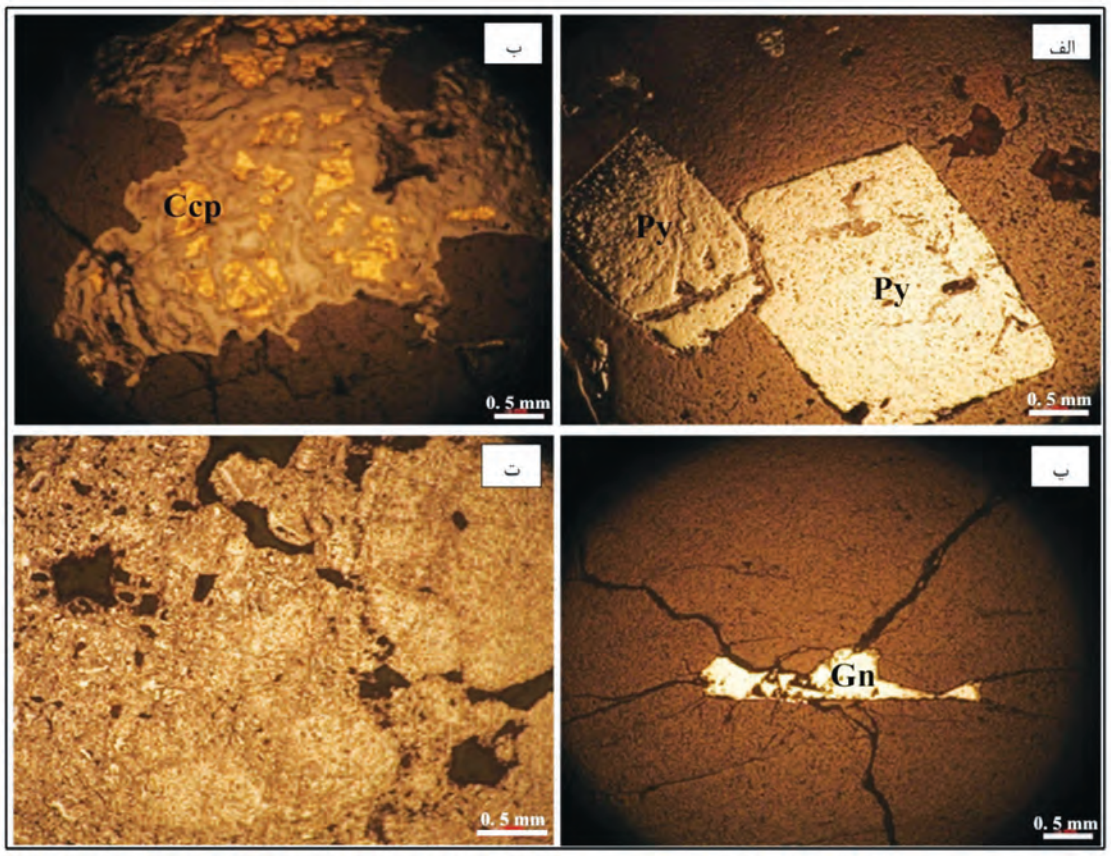
۵. رگه‌های کوارتزی شیری‌رنگ: فراوان‌ترین رگه‌های کوارتزی منطقه، رگه‌های کوارتزی شیری رنگ با بافت ریزبلور هستند. این رگه‌ها حاوی کانه‌زایی طلا و کانه‌زایی ضعیف مس می‌باشند.

کانه‌زایی در کانسار اخترچی ترکیب کانی‌شناسی ساده‌ای دارد. پیریت فراوان‌ترین کانه سولفیدی می‌باشد و به‌صورت شکل‌دار تا بی‌شکل مشاهده می‌شود. این کانه در ابعاد متفاوت از بلورهای بسیار ریز پنج میکرونی تا ۲۰۰ میکرون دیده می‌شود (شکل ۵-الف). کالکوپیریت دومین کانه سولفیدی فراوان است و به‌صورت بلورهای شکل دار و در ابعاد متفاوت دیده می‌شود. در برخی مقاطع بلورهای آن به نسبت درشت است و تا حدود ۲۰۰ میکرون می‌رسد (شکل ۵-ب). گالن به‌ندرت و با اندازه حدود ۱۰۰ میکرون مشاهده می‌شود (شکل ۵-پ). ذرات طلا توسط میکروسکوپ نوری مشاهده نشد. کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن به نسبت فراوان هستند و اغلب در اثر اکسیداسیون پیریت تشکیل شده‌اند. هماتیت (شکل ۵-ت) فراوان‌ترین کانی اکسیدی آهن می‌باشد. مالاکیت فراوان‌ترین کانی کربناتی مس با گسترش زیاد است و اغلب به‌صورت پرکننده فضاهای خالی در درزه‌ها تشکیل شده است.

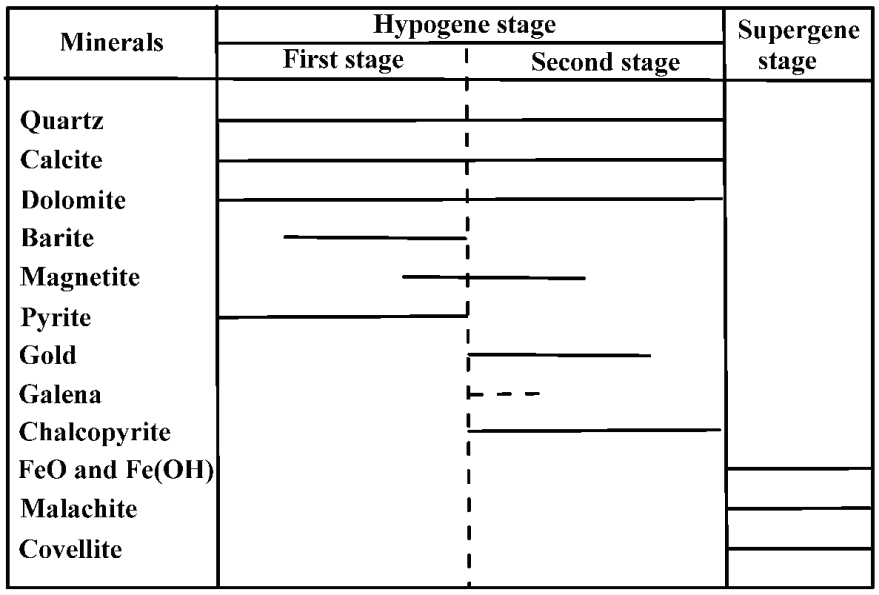
کانه‌نگاری و پاراژنز سامانه کانه‌زایی اخترچی از طریق رخنمون‌های سطحی، نقشه‌برداری صحرایی و چاه‌پیمایی مغزه‌های حفاری توصیف و تعریف شدند. خلاصه‌ای از توالی پاراژنتیکی در شکل ۶ ارائه شده است. پاراژنز شامل دو مرحله هیپوژن و سوپرژن می‌باشد. زمان‌بندی نسبی رخدادهای متوالی توسط پاراژنز در سامانه اخترچی شرح داده می‌شود.

مطالعات الکترون مایکروپروب کانه‌زایی

تشخیص طلا در کانسنگ کانسارهای طلای کارلین از نظر متالورژی از اهمیت زیادی برخوردار است چون بخش زیادی از طلا به‌صورت ذرات نامرئی در کانی‌های دیگر رخ می‌دهد. مطالعات میکروسکوپی و الکترون‌ماکروپروب



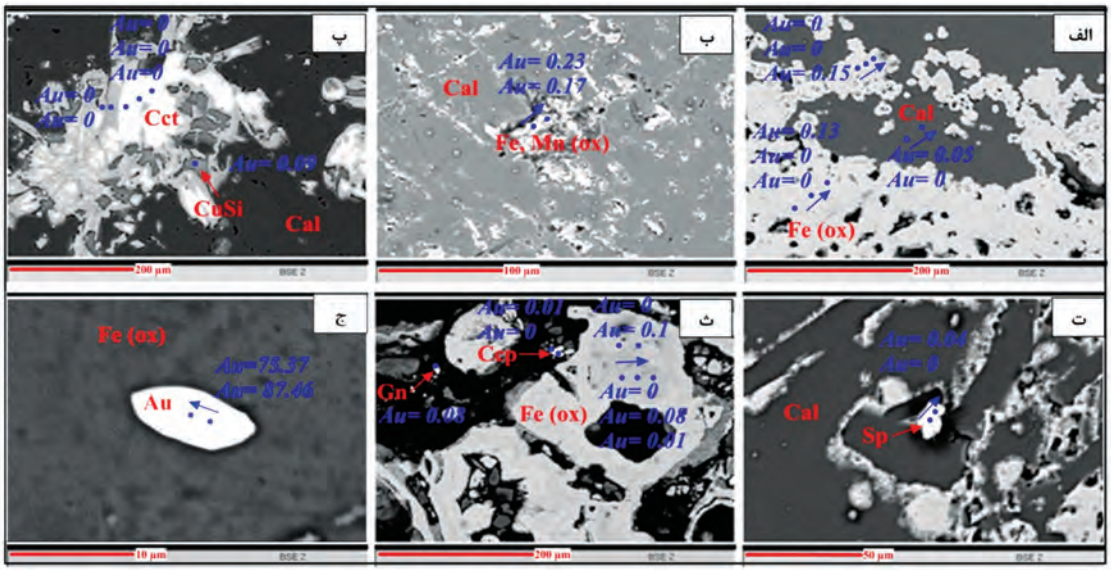
شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی با نور انعکاسی از الف) بلورهای پیریت به‌طور کامل وجه‌دار، ب) تشکیل کانه کالکوپیریت و خردشدگی و هوازدگی آن در امتداد درزه‌ها، پ) بلورهای گالن تشکیل شده در درزه‌ها، ت) کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن بخش زیادی از سنگ را تشکیل می‌دهد و قالب‌های پیریت محفوظ مانده (نشانه‌های اختصاری از Py.Whitney and Evans، 2010: پیریت؛ Cpp: کالکوپیریت؛ Gn: گالن)



شکل ۶. نمودار توالی پاراژنزی کانسار اخترچی

مقاطع صیقلی نشـــان می‌دهد طلا در اخترچی در مقیاس میکروسکوپی و ریزتر از میکروسکوپی رخ داده است.

طلای ریزتر از میکروســـکوپی یا نامرئی در اکسید آهن، اکسید آهن-منگنز، ترکیبات ثانویه مس، کربنات، کانه‌های سولفیدی کالکوپیریت، اسفالریت و گالن نیز با مقادیر کم رخ داده است (بیشینه تا ۰/۲۳ درصد وزنی در اکسیدهای آهن-منگنز). اکسیدهای آهن، حاصل اکسیداسیون پیریت‌های طلادار می‌باشـــند و در برخی بخش‌های کانسار، قالب‌های پیریت باقی‌مانده‌اند (شـــکل ۴-الف). بنابراین شاید پیریت مهم‌ترین کانه طلادار اولیه در کانسار اخترچی است. طلای مشـــاهده شده در پهنه اکسیدی تاکید می‌کند، طلا تحرک یافته و متمرکز شـــده اســـت. داده‌های مطالعات الکترون ماکروپروب، مقادیر بسیار متغیری از طلا را در نقاط مختلف در اکســـیدهای آهن نشـــان می‌دهد. این حقیقت نشـــان می‌دهد شـــاید طلا در پیریت به‌صـــورت ادخال‌های طلای بسیار ریز با پراکندگی نامنظم وجود داشته است. طلایی که توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی دیده نمی‌شود به‌عنوان طلای نامرئی شـــناخته می‌شـــود. همواره ذرات ریز مجزا (با قطر کمتر از ۰/۱ میکرومتر) درون کانه‌های ســـولفیدی می‌باشـــند. اصلی‌ترین شکل طلا در کانسارهای طلای تیپ کارلین می‌باشـــند (Wang et al., 1994; Cabri et al., 1989; Hausen et al., 1986; Radtke, 1985 Hausen, 1981). ذرات طلا با ابعاد تا چند میکرون به‌صورت ادخال داخل اکســـید آهن وجود دارند (بیشـــینه تا ۸۷/۴۶ درصد وزنـــی)، که در ترکیب آنها نقره و آرســـنیک نیز وجود دارند (شـــکل ۷ و جدول ۱). فرآیند تشکیل این طلاها در داخل اکســـیدهای آهن می‌تواند به‌دلیل رخدادهای گرمابی بعدی باشد. وجود آب‌های اســـیدی یا اکسیدی احتمالی قادر به انحلال و اکسیداسیون پیریت بوده‌اند.



شکل ۷. تصاویر بک اسکتر* از انواع کانی‌های میزبان طلای نامرئی در کانسار اخترچی به‌همراه محل نقاط تجزیه شده و مقادیر طلای اندازه‌گیری شده برحسب درصد وزنی به‌وسیله دستگاه الکترون ماکروپروب، الف) اکسید آهن و کلسیت، ب) اکسید آهن و منگنز، پ) کانی‌های ثانویه مس، ت) اسفالریت، ث) کالکوپیریت و گالن، ج) دانه طلای با ابعاد میکرومتری در زمینه اکسید آهن (نشانه‌های اختصاری از Whitney and Evans, 2010) Cal: کلســـیت؛ Fe(ox): اکسید آهن؛ Fe, Mn(ox): اکسید آهن-منگنز؛ Cct: کالکوسیت؛ CuSi: سیلیکات مس؛ Sp: اسفالریت؛ Ccp: کالکوپیریت؛ Gn: گالن؛ Au: طلا

* Back Scatter

جدول ۱. مقدار طلا و برخی از عناصر همراه با آن بر اساس نتایج تجزیه مایکروپروب برحسب درصد وزنی در کانی‌ها و کانه‌های سولفیدی کانسار اخترچی (فقط نقاطی که حاوی طلا بودند در این جدول نشان داده شده است)

ردیف	کانی	Au	Ag	As	Cu	Se	Te
۱	اکسید آهن	۰/۱۳	۰	۰/۲	۰	۰	۰/۰۲
۲	اکسید آهن	۰/۱۵	۰	۰/۲۶	۰	۰/۰۱	۰/۰۱
۳	اکسید آهن	۰/۰۳	۰/۰۴	۰	–	–	۰
۴	اکسید آهن	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۰۷	۰
۵	اکسید آهن	۰/۲۱	۰/۰۵	۰/۲۳	۰/۱۸	۰/۰۳	۰
۶	اکسید آهن	۰/۱	۰	۰	–	–	۰
۷	اکسید آهن	۰/۰۹	۰	۰/۴۱	–	–	۰/۰۲
۸	اکسید آهن	۰/۱۶	۰/۰۳	۱/۳۳	–	–	۰/۰۲
۹	اکسید آهن	۰/۱۲	۰	۰/۲۳	–	–	۰
۱۰	اکسید آهن	۰/۰۸	۰	۰	۰/۰۴	–	–
۱۱	اکسید آهن	۰/۱	۰/۰۲	۰	۰	–	–
۱۲	اکسید آهن	۰/۰۴	۰	۰	۰/۰۸	–	–
۱۳	اکسید آهن	۰/۰۱	۰	۰	۰/۰۲	–	–
۱۴	اکسید آهن، منگنز	۰/۱۷	۰	۰	۰/۲۲	۰	۰
۱۵	اکسید آهن، منگنز	۰/۲۳	۰	۰	۰/۱۳	۰	۰
۱۶	کربنات	۰/۰۵	۰/۰۵	۰	۰	۰/۰۴	۰
۱۷	کربنات	۰/۰۵	۰	۰	۰/۱۱	۰	۰
۱۸	کربنات	۰/۰۳	۰	۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰
۱۹	کربنات	۰/۰۸	۰	۰	۰/۱۲	۰/۰۱	۰
۲۰	سیلیکات مس	۰/۰۹	۰/۱	۰	۲۵/۶۳	۰	۰
۲۱	کالکوپیریت	۰/۰۱	۰/۰۶	۰	۳۵/۵۲	–	–
۲۲	گالن	۰/۰۸	۰	۰	۰/۰۵	–	–
۲۳	اسفالریت	۰/۰۴	۰	۰	۰	۰	۰
۲۴	ذره طلا	۷۵/۳۷	۰/۲	۰/۱۴	–	–	۰
۲۵	ذره طلا	۸۷/۴۶	۰/۰۵	۰/۲۲	–	–	۰

نتیجه‌گیری

میزبان اصلی کانه‌زایی طلا در پهنه اخترچی واحدهای کربناته می‌باشد. گسل‌ها، پهنه‌های گسلی و برشی کنترل‌کننده‌های اصلی کانه‌زایی در گستره هستند و مهاجرت سیال کانه‌دار از طریق فضاهای ایجاد شده حاصل از عملکرد گسل‌ها صورت پذیرفته است. انواع دگرسانی شامل کربنات‌زدایی، سیلیسی شدن، اکسیداسیون و رسی شدن می‌باشد. همراهی مشخصی بین دگرسانی و کانه‌زایی طلا وجود دارد. پهنه‌های اکسیدآهنی-سیلیسی از نظر کانه‌زایی طلا اهمیت زیادی دارند. مطالعات دگرسانی‌ها حاکی از حضور حفرات انحلالی، پهنه‌های کلسیت-آراگونیت و کارست‌ها حاکی از کربنات‌زدایی می‌باشد. انحلال کربنات، توسط ترکیب اولیه سنگ میزبان و شاید ساختارها کنترل می‌شود. از ویژگی‌های ذخیره، اکسیداسیون عمیق و گسترده سنگ‌های کانه‌دار است، به‌طوری‌که بخش مهمی از سولفیدهای اولیه به اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند. باریت در حاشیه و در نزدیکی مناطق کانه‌دار دیده می‌شود. ذرات طلا با ابعاد تا چند میکرون به‌صورت ادخال داخل اکسید آهن وجود دارند. طلای ریزتر از میکروسکوپی یا نامرئی در کانی‌های اکسیدی، کربناتی و سولفیدی توسط مطالعات مایکروپروب تشخیص داده شد. کانسار اخترچی بیشترین شباهت را به کانه‌زایی نوع کارلین دارا می‌باشد. در ادامه برخی ویژگی‌های کانسار اخترچی با کانسار کارلین مقایسه شده است. ذخیره کارلین در طول یک شکستگی پوسته‌ای همراه با کافت پروتروزوئیک در حاشیه قاره امریکای شمالی، تشکیل شده است (Heitt et al., 2003). پهنه سنندج-سیرجان نتیجه کمپلکس دنباله‌دار پرکامبرین تا تکامل دوران سوم، همراه با تغییر شکل‌های چندگانه در

رخساره‌های دگرگون است (Moritz et al., 2006). سنگ میزبان ذخایر طلا در منطقه کارلین واحدهای کربناته سازند پاپوویچ دونین هستند (Evans, 1980). این سازند متشکل از سنگ‌آهک میکرایتی، سیلتی و فسیل‌دار است. در معادن مختلف منطقه تغییرات اندکی در لیتولوژی سنگ میزبان وجود دارد (Teal and Jackson, 2002). بخش عمده کانه‌زایی طلای اخترچی در واحد سنگ‌آهک دولومیتی پرمین صورت می‌گیرد. اگرچه رگه‌های سیلیسی مس-طلادار در سایر واحدها نیز نفوذ کرده‌اند. نقش گسل‌ها به‌عنوان کنترل‌کننده کانه‌زایی طلا در کانه‌زایی‌های کارلین مورد پذیرش است (Palmer and kuiper, 2017; Rhy et al., 2015; Essman, 2010; Leonardson, 2010). از نظر ساختاری در منطقه کارلین، ساختارهای گسلی به‌عنوان معابر اولیه سیالات طلادار بوده‌اند و بر اساس (Yigit et al., 2003)، گسل‌های عادی پرشیب، محل اصلی کانه‌سازی هستند. برخی از آنها طی پالئوزئیک و مزوزوئیک به‌صورت یک گسل معکوس عمل کرده‌اند. یکی از سیماهای مهم فرایند کانه‌زایی در ذخایر کارلین حضور برش‌های قبل از کانی‌سازی است. برش‌ها به‌عنوان کنترل‌کننده طلا در تیپ کارلین معرفی شدند (Pinet et al., 2018; Clark et al., 2017). روند گسل‌های اصلی اخترچی، شمال‌غرب-جنوب‌شرق می‌باشد که مهم‌ترین آنها گسل چنار-کوه‌کلنگ می‌باشد. محل کانه‌زایی‌ها به‌طور مشخص با گسلش در ارتباط است. شیب گسل‌های مرتبط با کانی‌سازی زیاد است. برش‌های قبل کانه‌زایی در منطقه مشاهده شده است.

منابع

- آقانباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی ایران، تهران. ۵۸۶.
- ثابت‌ور نامخواستی، ح.، میرنژاد، ح.، احمدی، ا. و سجادی آل‌هاشم، س.ف.، ۱۳۹۲. چگونگی شکل‌گیری کانسار منگنز بزنین، اردستان (اصفهان) براساس بررسی‌های میکروسکوپی و داده‌های ریزکاوش الکترونی. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲۱، ۵۳۷-۵۴۸.
- جزیی، م.ا.، کریم‌پور، م.ح. و ملک‌زاده شفارودی، ا.، ۱۳۹۵. بلورشناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی گالن، کانسار سرب نخلک (اصفهان). مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲۴، ۴-۱۸.
- رحمانی جوانمرد، س.، طهماسبی، ز.، دینگ، ز. و احمدی خلجی، ا.، ۱۳۹۹. بررسی رفتار زمین‌شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب خاکی در گارنت‌های موجود در سنگ‌های دگرگونی منطقه بروجرد (پهنه سنندج-سیرجان). مجله زمین‌شناسی ایران، ۵۳، ۸۷-۱۰۷.
- سخدری، م.، یزدی، م. و بهزادی، م.، ۱۳۹۰. ژئوشیمی، دگرسانی و کانی‌زایی طلا در منطقه شانق، دلیجان (اصفهان). مجله علوم زمین، ۸۱، ۷۵-۸۰.
- شرکت مشاور پارسی کان کاو، ۱۳۹۳. گزارش پایان اکتشاف منطقه اخترچی، ۳۹۳.
- طورچی، م. و نصراصفهانی، ع.، ۱۳۷۶. بررسی زمین‌شناسی کانسارهای انجیره اصفهان. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۵، ۸۳-۹۶.
- مهرابی، ب. و طالع‌فاضل، ا.، ۱۳۹۵. کانی‌شناسی و پاراژنز کانسنگ Cu-Au-Bi منطقه‌ی پی‌جویی کوه‌دم (شمال‌شرق اردستان)، مجموعه‌ی فلززایی انارک. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲۴، ۶۳۵-۶۴۶.
- مهوری، ر.، نقره‌بیان، م.، مکی‌زاده، م.ا. و پورنقشبند، غ.ر.، ۱۳۹۰. بررسی کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی کانسار بنتونیت مهرآباد (شرق اصفهان). مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۱۹، ۳-۱۴.
- نظیری، م.ا.، ۱۳۹۰. اکتشافات لیتوشیمیایی طلا در آنومالی شماره ۳ کانسار کوه دم، اردستان، اصفهان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه پیام نور، تهران، ۱۸۶
- نوریان رامشه، ز.، یزدی، م.، رسا، ا. و مسعودی، ف.، ۱۳۹۵. توزیع طلا و عناصر فرعی در پیریت کانسار سنجده، منطقه معدنی موته، بر اساس نتایج آنالیز الکترون مایکروپروب. مجله زمین‌شناسی ایران، ۱۰، ۵۹-۷۰.
- Arehart, G.B., 1996. Characteristic and origin of sediment-hosted disseminated gold deposits: a review. Ore Geology Reviews, 11, 383-403.
- Arehart, G.B., Chryssoulis, S.L. and Kesler, S.E., 1993. Gold and arsenic in iron sulfides from sediment-hosted disseminated gold deposits: Implications for depositional processes. Economic Geology, 88, 171-185.
- Cabri, L.J., Chryssoulis, S.L., DE Vil-

liers, J. P.R., Laflamme, J.H.G. and Buseck, R., 1989. The nature of "invisible" gold in arsenopyrite. The Canadian Mineralogist, 27, 353-362.

- Christensen, O.D., 1996. Carlin Trend Geologic Overview, in Field Trip Guide Book Compendium, Geology and Ore Deposits of the American Cordillera, S.M. Green and E. Struhsacker, Editors, Geological Society of Nevada, 147-156.

- Christensen, O.D., 1993. Carlin Trend Geologic Overview; in Gold Deposits of the Carlin Trend, Nevada, O.D. Christensen, Editor, Society of Economic Geologists. Guide book Series, 18, 12-26.

- Clark Maroun, L.R., Cline, J., Simon, A., Anderson, P. and Muntean, J.L., 2017. High-grade gold deposition and collapse breccia formation, Cortez Hills Carlin-Type Gold Deposit, Nevada, USA. Economic Geology, 4, 112, 707-740.

- Essman, J., 2010. Rain revisited: New structural and stratigraphic insights and their implications for Carlin-type deposits, In Steininger, R., Pennell, B. (Eds.), Great Basin Evolution and Metallogeny. Geological Society of Nevada. Symposium Proceeding, 511-535.

- Evans, J.G., 1980. Geology of the rodeo Creek NE and Welches Canyon quadrangles, Eureka County, Nevada, US Geology Survey Bulletin, 1473, 81.Gondwana Research, 40, 43-57.

- Fergusson, C.L., Nutman, A. P., Mohajjel, M. and Bennett, V., 2016. The Sanandaj-Sirjan zone in the Neo-Tethyan suture, western Iran: Zircon U-Pb evidence of late Palaeozoic rifting of northern Gondwana and mid-Jurassic orogenesis. Gondwana Research, 40, 3-57.

- Hausen, D.M., Ahlrichs, J.W., Mueller, W. and Park, W.C., 1986. Particulate gold occurrences in three Carlin carbonaceous ores, In Process Mineralogy VI , ed. D. Hagni, TMS, Warrendale, PA, 193-214.

- Hausen, D.M., 1981. Process mineralogy of auriferous pyritic ores at Carlin, Nevada, In Hausen, D.M. and Park, W.C., eds. Process Mineralogy, TMS, Warrendale, PA, 271-289.

- Heitt, D.G., Dunbar, W.W., Thompson, T.B. and Jackson, R.G., 2003. Geology and geochemistry of the Deep Star gold deposit, Carlin Trend, Nevada. Economic Geology, 95, 1107-1135.

- Hickey, K.A., Ahmed, A.D., Barker, S. and Leonardson, R., 2014. Fault-controlled lateral fluid flow underneath and in to a Carlin-Type Gold Deposit: Isotopic and geochemical footprints. Economic Geology, 109, 1431-1460.

- Hofstra, A.H. and Cline, J.S., 2000. Characteristic and models for Carlin-type gold deposits. Economic Geology Reviews, 13, 163-220.

- Leonardson, R.W., 2010. Barrick Cortez Gold Acres structure: in Steininger, R.C. and Pennell, B., eds., Geological Society of Nevada Symposium 2010: Great Basin Evolution and Metallogeny, Reno, Nevada, 2010, 17-29.

- Moritz, R., Ghazban, F. and Singe, B.S., 2006. Eocene gold ore formation at Muteh, Sanandaj-Sirjan Tectonic Zone, Western Iran: A Result of late-stage extension and exhumation of metamorphic basement rocks within the Zagros orogen. Economic Geology, 10, 8, 1497-1524.

- Muntean, J.L., 2018. The Carlin gold system: Applications to exploration in Nevada and elsewhere: in Muntean, J.L. (ed.), Diversity of Carlin-Style Gold Deposits, Society of Economic Geologists Reviews in Economic Geology, 19, 39-88.

- Muntean, J.L. and Cline, J., 2018. Introduction: Diversity of Carlin-Style Gold Deposits: in Muntean, J.L. (ed.), Diversity of Carlin-Style Gold Deposits, Society of Economic Geologists Reviews in Economic Geology, 19, 1-5.

- Palmer, J.C. and Kuiper, Y.D., 2017. Structural geology of the eastern Nadaleen trend, Yukon Territory, Canada: Implications for recently discovered sedimentary rock-hosted gold. Ore Geology Reviews, 80, 48-60.

- Pinet, N., Sack, P.J., Mercier-Langevin, P., Lavoie, D., Dubé, B., Lane, J. and Brake, V., 2018. Breccia styles and controls on carbonate replacement-type ('Carlin-type') gold zones, Rackla belt, east-central Yukon: in Targeted Geosciences Initiative-2017 Report of Activities: Volume 1, (ed.) N. Rogers; Geological Survey of Canada, 136-168.

- Radtke, A.S., 1985. Geology of the Carlin gold deposit, Nevada. U.S. Geological Survey Professional Paper, 124.

- Rhys, D., Valli, F., Burgess, R., Heit, T.D., Griesel, G. and Hart, K., 2015. Controls of fault and fold geometry on the distribution of gold mineralization on the Carlin Trend: in Pennell, W.M. and Garside, L.J., eds., New concepts and discoveries. Geological Society of Nevada 2015 Symposium, 333-389.

- Teal, L. and Jackson, M., 2002. Geologic overview of the Carlin Trend gold deposits; in Gold deposits of the Carlin Trend, Nevada. Bureau of Mines and Geology, Bulletin, 111, 9-19.

- Vaughan, J., Hickey, K.A. and Barker S., 2016. Isotopic, Chemical, and textural evidence for pervasive calcite dissolution and precipitation accompanying hydrothermal fluid flow in low-temperature, carbonate-hosted, gold systems. Economic Geology, 5, 111, 1127-1157.

- Wang, K.R., Zhou, Y.Q., Sun, L.G. and Ren, C.G., 1994. Study on the gold occurrence from several typical Carlin-type gold deposits in China. Publishing House of University of Science and Technology of China, Hefei, 112

- Wang, K.R., Zhou, Y.Q., Li, F., Sun, L., Wang, J., Ren, C.G., Zhou, S.J., Tang, J.Y. and Yang, F.J., 1992. SPM and SEM study on the occurrence of micrograined gold in the Jinya gold deposit, Guangxi. Chinese Science Bulletin, 37, 1906-1910.

- Wells, J.D. and Mullens, T.E., 1973. Gold-bearing arsenian pyrite determined by microprobe analysis, Cortez and Carlin gold mines, Nevada. Economic Geology, 68, 187-201.

- Whitney D.L. and Evans B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95, 185-187.

- Yigit, O., Nelson, E.P., Hitzman, M. and Hofstra, A.H., 2003. Structural controls on Carlin-Type Gold Mineralization in the Gold Bar District, Eureka County, Nevada. Economic Geology, 6, 98, 1173-1188.