

# کانی‌شناسی، ژئوشیمی و فرایندهای تشکیل کانسنگ غیر سولفیدی برونزاد کانسار روی - سرب نوع رسوبی - بروندمی (SEDEX) آب‌باغ در پهنه سنندج - سیرجان

مهدی موحندیا<sup>۱</sup>، ابراهیم راستاد<sup>۲</sup>، عبدالرحمان رجبی<sup>۳</sup> و فلاوین شولت<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۳</sup>استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۴</sup>استادیار، آزمایشگاه محیط‌زیست کرونو، دانشگاه فرانکفورت، فرانسه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۰۲

## چکیده

کانه‌زایی روی - سرب آب‌باغ در بخش میانی پهنه سنندج - سیرجان و منتهی‌الیه جنوب خاوری کمربند فلززایی ملایر - اصفهان، در توالی رسوبی آواری - کربناته ژوراسیک بالایی - کرتاسه زیرین و کربناته کرتاسه زیرین در دو افق کان‌زایی با جایگاه چینه‌ای متفاوت تشکیل شده است. افق ۱ کان‌زایی روی - سرب با سنگ میزبان شیل و سیلت‌سنگ سیاه دارای مواد آلی با سن ژوراسیک بالایی - کرتاسه زیرین به شکل گوه‌ای کشیده، در مجاورت گسل هم‌زمان با رسوب‌گذاری رخ داده است. افق ۲ کان‌زایی سرب و روی کانسار آب‌باغ با سنگ میزبان آهنکی به سن کرتاسه زیرین به صورت هم‌روند با سنگ میزبان و به شکل لایه‌ای تشکیل شده است. فرایندهای ثانویه موجب گسترش کانسنگ برونزاد در بخش‌های نزدیک به سطح در هر دو افق شده است. بر پایه زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی، کانسنگ غیرسولفیدی کانسار آب‌باغ به دو نوع «کانسنگ سرخ» و «کانسنگ سفید» قابل تقسیم است. کانسنگ سفید در بخش‌های بالایی کانسنگ سولفیدی اولیه و به صورت جانشینی بخش‌های کربناته سنگ میزبان با عیار بالای روی و عیار پایین آهن و سرب و کانسنگ نوع سرخ به صورت جانشینی مستقیم کانسنگ سولفیدی اولیه با عیار پایین روی، عیار بالای آهن و عیار متوسط سرب و آرسنیک در مقایسه با کانسنگ سفید، تشکیل شده‌اند. کانی‌شناسی کانسنگ برونزاد، شامل اسمیت‌زونیت، هیدروزینسیت، سروزیت، رس‌های غنی از روی، گرینوکیست، کوولیت و اکسیدهای آهن و منگنز است. بخش غیرسولفیدی کانسار آب‌باغ در طول هوازگی طولانی‌مدت بخش سولفیدی کان‌زایی رسوبی - بروندمی (SEDEX) اولیه، در اثر اکسایش و انحلال پیریت، اسفالریت و گالن تشکیل شده است. اکسایش کانی‌های سولفیدی، خنثی‌سازی اسید و تشکیل کانی‌های کربناتی روی به‌عنوان فرایندهای اصلی ژئوشیمیایی مؤثر در تشکیل کانسنگ برونزاد در این کانسار شناخته شده‌اند. الگوی عناصر کمیاب حاکی کانسنگ برونزاد نوع سفید و نوع سرخ متفاوت است؛ به گونه‌ای که در کانسنگ نوع سفید الگوی عناصر کمیاب مشابه سنگ میزبان و در نوع سرخ مشابه کانسنگ سولفیدی است. مقایسه فرایندهای مؤثر در تشکیل کانسنگ هوازده برونزاد کانسار آب‌باغ با دیگر کانسارهای غیرسولفیدی برونزاد در ایران؛ همانند کانسارهای مهدی‌آباد، چاه تلخ، مجموعه ایرانکوه و معادن غیرسولفیدی کوه‌بان - بهاباد، نشان از همانندی کانسار آب‌باغ با کانسارهای کلاه‌دروازه، از مجموعه معادن ایرانکوه و مهدی‌آباد یزد است. همچنین، بخش برونزاد کانسار آب‌باغ از دید ویژگی‌های کانی‌شناسی و انواع کانسنگ برونزاد، قابل مقایسه با کانسارهای غیرسولفیدی مراکش است.

**کلیدواژه‌ها:** کانسار روی و سرب، کانسنگ غیرسولفیدی، برونزاد، رسوبی - بروندمی، آب‌باغ، شهرضا.

**\*نویسنده مسئول:** ابراهیم راستاد

E-mail: Rastad@modares.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

اصلی آنها گسل‌ها هستند (Appold and Monteiro, 2009; Borg, 2009; Slezak et al., 2014). همچنین در مناطق با دگرگونی درجه بالا، کانسارهای غیرسولفیدی برونزاد، به صورت چینه‌سان رخ می‌دهند (Brugger et al., 2003; Peck et al., 2009).

در محیط‌های برونزاد، ذخایر غیرسولفیدی به دوزیرده کانسارهای جانشینی مستقیم و کانسارهای جانشینی سنگ میزبان تقسیم می‌شوند (Heyl and Bozion, 1962; Hitzman et al., 2003).

کانسارهای غیرسولفیدی جانشینی مستقیم به‌عنوان «کانسنگ سرخ» شناخته شده‌اند که در آنها فلزات آزاد شده، به صورت محلی و به‌طور معمول مستقیم در بخش بالایی کانسنگ سولفیدی اولیه به دام می‌افتند. این زیر رده، غنی از اکسیدهای آهن (بیشتر گوتیت و هماتیت)، همی‌مورفیت، سروزیت و هیدروزینسیت هستند و به صورت تیبیک بیش از ۲۰ درصد روی، بیش از ۷ درصد آهن و مقادیری سرب و آرسنیک دارند (Reichert and Borg, 2008; Reichert, 2007).

کانه‌زایی غیرسولفیدی نوع جانشینی سنگ میزبان، بیشتر با عنوان «کانسنگ سفید» شناخته می‌شوند که در آنها، فلزات توسط آب‌های زیرزمینی پایین‌رو و شیب ژئوشیمیایی از سوی کانسنگ سولفیدی اولیه به سوی سنگ میزبان حمل می‌شوند (Heyl and Bozion, 1962; Hitzman et al., 2003). این کانسارها شامل اسمیت‌زونیت، هیدروزینسیت و به مقدار کم اکسیدهای آهن و دارای کمتر از ۴۰ درصد روی، کمتر از ۷ درصد آهن و تمرکز بسیار پایینی از سرب هستند

ذخایر غیرسولفیدی که از سال ۱۹۳۰ مورد توجه قرار گرفته‌اند، بخشی مهمی از ذخایر روی - سرب جهان را تشکیل می‌دهند. از میان ذخایر شناخته شده روی جهان، حدود ۱۱ درصد آنها مربوط به ذخایر غیرسولفیدی است (Borg, 2002; Hitzman et al., 2003). کانسارهای غیرسولفیدی در طول هوازگی مرتبط با زمین‌ساخت و آب‌وهوا (Hitzman et al., 2003) و در سنگ میزبان‌های مختلف از آواری تا کربناته (Boni and Large, 2003) تشکیل شوند.

کانسارهای غیرسولفیدی روی شامل دو نوع اصلی ذخایر برونزاد و ذخایر درونزاد (Heyl and Bozion, 1962) هستند. منشأ ذخایر برونزاد روی در ارتباط با اکسایش کانسارهای سولفیدی و غیرسولفیدی است و تشکیل آنها توسط عامل‌های زمین‌ساختی آب‌وهوایی کنترل می‌شود (Hitzman et al., 2003). کانسارهای برونزاد، نوع چیره ذخایر غیرسولفیدی روی هستند و گسترش چشمگیری در سطح جهان دارند (Holland, 2005).

به‌طور کلی، کانسارهای غیرسولفیدی فلزات پایه با سنگ میزبان کربناته که در محیط‌های برونزاد تشکیل می‌شوند؛ از هوازگی کانسارهای اولیه سولفیدی همانند کانسارهای نوع می‌سی‌سی‌پی (MVT)، جانشینی کربناته، رسوبی - بروندمی (SEDEX)، نوع ایرلندی و به‌طور غیرمعمول در کانسارهای اسکارنی که هوازگی در آنها گسترش یافته باشد، تشکیل می‌شوند (Heyl and Bozion, 1962; Hitzman et al., 2003). کانسارهای غیرسولفیدی که در محیط‌های برونزاد تشکیل می‌شوند، بیشتر به‌صورت ذخایر جانشینی دیده می‌شوند که کنترل‌کننده

واحدهای سنگی ژوراسیک بالایی- کرتاسه زیرین در محدوده کانسار آب‌باغ برحسب جایگاه چینه‌شناختی و سنگ‌شناختی، به ۵ واحد تقسیم می‌شوند (شکل‌های ۲ و ۳).

کهن‌ترین واحد چینه‌ای در محدوده معدن آب‌باغ سنگ‌آهک سترلابه (واحد ۱) است که در محل کارگاه روباز معدن رخنمون کوچکی دارد. در بخش بالایی این واحد، سنگ‌های توفی به شکل عدسی گسترش دارد که با عنوان عضو لیتیک توف در ستون چینه‌شناسی مشخص شده است (شکل ۳).

توالی آواری واحد ۲ که دربرگیرنده افق اول کانسار آب‌باغ است؛ از شیل و سیلت سنگ تیره رنگ دارای مواد آلی همراه با تناوب میان لایه‌های کربناتی تشکیل یافته است (Movahhednia et al., 2014).

توالی آواری واحد ۲، توسط واحد سیلت سنگ‌آهکی خاکستری رنگ پوشیده می‌شود (واحد ۳). مجموعه واحدهای ژوراسیک بالایی- کرتاسه زیرین، در زیر واحد سنگ‌آهک آلییدی با میان‌لایه‌های تخریبی (گری وک آهکی) به رنگ زرد تا قهوه‌ای قرار می‌گیرند (واحد ۴). جوان‌ترین رسوبات مزوزوییک، واحد سنگ‌آهک رودیست و اوریتولین دار است که میزبان افق دوم کانه‌زایی در منطقه معدنی است.

#### ۴- افق‌های معدنی و کانه‌زایی سولفیدی اولیه

کانه‌زایی سولفیدی روی و سرب در منطقه آب‌باغ، در دو افق و جایگاه چینه‌ای رخ داده است (شکل ۳) (موحدنیا، ۱۳۹۴). کانه‌زایی در افق ۱ در شیل و سیلت سنگ‌های سیاه به سن ژوراسیک بالایی- کرتاسه زیرین و به صورت گوه‌ای شکل و رگه- رگچه‌ای تشکیل شده است (شکل ۳). کانه‌زایی در افق ۲ در واحدهای کربناتی کرتاسه زیرین و به صورت لایه‌ای و رگه- رگچه‌ای شکل گرفته است.

افق ۱ کانه‌زایی به شکل گوه‌ای کشیده در مجاورت گسل هم‌زمان با رسوب‌گذاری رخ داده است. از شواهد گسلش هم‌زمان با رسوب‌گذاری می‌توان به رخداد برش‌های هم‌زمان با رسوب‌گذاری، تغییر ستری برای واحد ۲ اشاره کرد. بر پایه ماهیت کانه‌زایی سولفیدی، بافت و کانی‌شناسی سولفیدها، می‌توان سه رخساره کانسنگی رگه- رگچه‌ای، توده‌ای و لایه‌ای را در این افق از هم تمییز داد (Movahhednia et al. 2014). کانی‌های سولفیدی در افق اول شامل اسفالریت، گالن، پیریت و کالکوپریت است. در رخساره رگه- رگچه‌ای ماده معدنی با بافت رگه- رگچه‌ای و برشی، در رخساره کانسنگ توده‌ای ماده معدنی با بافت توده‌ای و برشی و در رخساره کانسنگ لایه‌ای، بافت‌های لامینه، دانه‌پراکنده و فراموبیدال دیده می‌شود.

بر پایه موحدنیا (۱۳۹۴)، افق ۱ کانسار آب‌باغ را می‌توان در رده کانسارهای رسوبی-بروندمی نزدیک به محل دهانه بروندم (Vent proximal SEDEX deposit) در نظر گرفت (Goodfellow and laydon, 2007; Goodfellow, 2007; Large et al., 2004; Cooke et al., 2000).

افق ۲ کانه‌زایی سرب و روی کانسار آب‌باغ با سنگ میزبان آهکی و به سن کرتاسه زیرین است که به صورت هم‌روند با سنگ میزبان تشکیل شده است (شکل ۳). کانه‌زایی در افق ۲ کانسار آب‌باغ بر پایه نوع و شکل ماده معدنی، بافت و ساخت و عیار ماده معدنی، به صورت دو رخساره کانسنگی توده‌ای و رگه- رگچه‌ای دیده می‌شود و کانی‌های سولفیدی موجود در این افق شامل گالن، اسفالریت، پیریت و تنانتیت است.

افق ۲ کانسار آب‌باغ در رده کانسارهای رسوبی- بروندمی جاننشینی با میزبان کربناته (Carbonate replacement SEDEX deposit) شبیه کانسارهای Anarraaq و ایرلندی (Wilkinson et al., 2005; Wilkinson, 2014; Kelley et al., 2004) است (موحدنیا، ۱۳۹۴).

#### ۵- کانه‌زایی ثانویه برونزاد

در کانسار آب‌باغ، فرایندهای ثانویه موجب گسترش کانسنگ غیرسولفیدی

(Reichert and Borg, 2008; Reichert, 2007). این ذخایر ممکن است نسبتاً در نزدیکی کانسنگ اولیه و تا چند صد متر دورتر از آن تشکیل شوند (Heyl and Bozion, 1962; Hitzman et al., 2003; Reichert and Borg, 2008; Reichert, 2007). این زیررده به نسبت زیررده «کانسنگ سرخ» معمولاً غنی از روی و فقیر از سرب است و از دیدگاه متالورژی و محیط‌زیست نیز برتری دارد (Reichert, 2007).

در سال‌های اخیر فعالیت‌های علمی و اکتشافی در ایران روی کانسنگ‌های سولفیدی تمرکز داشته‌اند و شمار کمی از ذخایر غیرسولفیدی (از جمله انگوران، ایرانکوه، آب‌باغ و کوه سورمه) در حال معدنکاری هستند. بنابراین داده‌های علمی در مورد کانسارهای غیرسولفیدی روی و سرب ایران بسیار اولیه و کم است. کانسارهای روی و سرب غیرسولفیدی برونزاد در بیشتر پهنه‌های ساختاری ایران گسترش دارد اما بیشترین گسترش این نوع از ذخایر، در بخش‌های بالا آمده خردقاره ایران مرکزی است (شکل ۱). بالا آمدگی شدید این خردقاره، یک عامل مهم برای تشکیل ذخایر روی و سرب برونزاد است (Daliran and Borg, 2004). کانسارهای مهدی‌آباد با ۴۵/۲ میلیون تن ذخیره غیرسولفیدی، انگوران با ۱۴/۶ میلیون تن کانسنگ غیرسولفیدی (Boni, 2005) و ایران‌کوه با بیش از ۲۰ میلیون تن ذخیره سولفیدی و غیرسولفیدی، غنی‌ترین ذخایر غیرسولفیدی روی و سرب ایران به شمار می‌آیند. در این مقاله با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی، فرایندهای اکسایش برونزاد و تشکیل کانسنگ ثانویه برونزاد کانسار نوع SEDEX آب‌باغ (موحدنیا، ۱۳۹۴) مورد بحث قرار گرفته و چگونگی تشکیل آن، با دیگر کانسارهای غیرسولفیدی برونزاد ایران مقایسه شده است. معدن آب‌باغ هم‌اکنون فعال بوده و فعالیت استخراجی بخش سولفیدی و غیرسولفیدی در بخش باختری کانسار به صورت روباز در حال انجام است.

#### ۲- روش پژوهش

در انجام این پژوهش، به منظور بررسی‌های زمین‌شناسی و مطالعه ویژگی‌های کانسنگ ثانویه برونزاد افق‌های کانه‌زایی کانسار آب‌باغ، برش‌های بسیار زمین‌شناسی تهیه و مغزه‌های حفاری گمانه‌ها بررسی شده است. بر این اساس، ۱۴ مقطع نازک و ۲۲ مقطع نازک- صیقلی تهیه و مطالعات میکروسکوپی سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت ماده معدنی غیرسولفیدی روی آنها انجام گرفته است. برای شناسایی سنگ‌های دارای روی در صحرا، از محلول شناساگر روی (Zinc Zap) استفاده شده است.

کانی‌شناسی ۱۰ نمونه کانسنگ غیرسولفیدی با استفاده از دستگاه XRD در آزمایشگاه پرتو ایکس بخش زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس و آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران بررسی شده است. به منظور شناسایی فازهای کانیایی و روابط بافتی، ۵ نمونه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در دانشگاه فرانش- کونته فرانسه مطالعه شده است. همچنین، با هدف بررسی ویژگی‌های ژئوشیمی کانسنگ ثانویه برونزاد و سنگ میزبان، ۸ نمونه به روش ICP-MS در آزمایشگاه زرآما تجزیه شده است.

#### ۳- زمین‌شناسی

کمربند فلززایی ملایر- اصفهان در بخش میانی پهنه سنندج- سیرجان با طولی بیش از ۳۵۰ و عرضی بیش از ۵۰ کیلومتر، با روند شمال باختر- جنوب خاور قرار دارد (شکل ۱). در این کمربند بیش از ۱۷۳ کانسار، معدن و نشانه سرب و روی، آهن و باریت گزارش شده است. که در آن، سنگ‌های کربناته کرتاسه زیرین سنگ میزبان شمار زیادی از کانسارهای روی و سرب هستند؛ اما شماری از کانسارها و نشانه‌های معدنی نیز با سنگ‌های تخریبی ژوراسیک میزبانی می‌شوند (Momenzadeh, 1976). با وجود اینکه کانه‌زایی سولفیدی در این کمربند چیره است؛ اما کانسنگ ثانویه برونزاد نیز در برخی از کانسارها (کانند معادن ایران‌کوه و کانسار آب‌باغ) گسترش دارد.

با توجه به تمرکز بالای کادمیوم در اسفالریت‌های کانسار آب‌باغ (موحدنیا و همکاران، ۱۳۹۳)، در بخش‌هایی که شدت هوازدگی کم است، کادمیوم به شکل کانی گریونوکیت در شکستگی‌ها و حفرات اسفالریت متمرکز شده است (شکل ۸). در بخش‌هایی که شدت هوازدگی زیاد است، این کانی همراه با اسمیت‌زونیت و کوولیت حضور دارد. مقادیر بسیار ناچیزی از اکسیدهای منگنز نیز در کانسنگ ثانویه برونزاد کانسار آب‌باغ با بافت رگه-رگچه‌ای در شکستگی‌های کلسیت و اسمیت‌زونیت دیده می‌شود (شکل ۹).

#### ۷- ژئوشیمی

تحلیل نتایج تجزیه شیمیایی (ICP-MS) نمونه‌های کانسنگ ثانویه برونزاد کانسار آب‌باغ نشان‌دهنده دو نوع کانسنگ مختلف از دید ترکیب شیمیایی است (جدول ۱): الف) کانسنگ سفید غنی از اسمیت‌زونیت که غنی از روی (بالای ۳۰ درصد) اما فقیر از سرب (۳۰۰ ppm) و اکسیدهای آهن (۹۰۰ ppm) است؛ ب) کانسنگ سرخ که غنی از اکسیدهای آهن (بیشتر از ۷ درصد) به همراه سرب (۲/۲ درصد) و روی (۱ درصد) است.

مطالعه ژئوشیمی عناصر فرعی و کمیاب نمونه‌های کانسنگ برونزاد، نشان از همبستگی بالا میان عناصر کادمیم-روی و کبالت-روی در کانسنگ سفید (جدول ۲) و عناصر سرب-نقره و سرب-آنتیمون در کانسنگ سرخ (جدول ۳) است. میزان اصلی کادمیم در نمونه‌های کانسنگ غیرسولفیدی سفید کانسار آب‌باغ، کانی اسمیت‌زونیت است. این کانی می‌تواند تا ۴۵۵۰۰ ppm کادمیم را در شبکه خود جای دهد (Reichert, 2007)؛ اما در کانسار آب‌باغ، به‌طور میانگین، کادمیم موجود در کانسنگ غنی از اسمیت‌زونیت ۶۰ پی‌پی‌ام است. در نمونه‌های کانسنگ سرخ که محتوای سرب آنها بالاست، عناصر Sb, Ag و Sn نیز مقادیر بالایی دارند.

بررسی الگوهای عناصر خاکی کمیاب کانسنگ غیرسولفیدی نشانگر تمرکز بالای این عناصر در آنها در مقایسه با کانسنگ‌های سولفیدی است (موحدنیا، ۱۳۹۴). الگوی توزیع عناصر خاکی کمیاب در نمونه‌های غیرسولفیدی کانسار آب‌باغ، نشان‌دهنده متفاوت بودن الگوها در انواع کانسنگ غیرسولفیدی بوده و در مقایسه با نمونه‌های کانسنگ غیرسولفیدی سرخ، محتوای عناصر خاکی کمیاب در کانسنگ غیرسولفیدی سفید بیشتر است؛ به‌گونه‌ای مقادیر  $\Sigma\text{REE}$  میانگین برای نمونه‌های کانسنگ سفید ۳۲/۶۲، برای کانسنگ نوع سرخ ۱۲/۲۳ و برای سنگ میزان ۲۷/۷۱ است.

نمونه‌های کانسنگ غیرسولفیدی سفید، دارای الگوی توزیع عناصر خاکی کمیاب و مقدار مقادیر  $\Sigma\text{REE}$  مشابه با سنگ میزان و همانند سنگ میزان، دارای بی‌هنجاری مثبت Eu هستند؛ به‌طوری که میانگین  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  در نمونه‌های کانسنگ نوع سفید ۵/۱۹ و در سنگ میزان این میانگین برابر ۴/۷۶ است. این در حالی است که میانگین  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  در نمونه‌های کانسنگ نوع سرخ ۳/۲ است.

محتوای بالای عناصر خاکی کمیاب سبک و سنگین در کانسنگ غیرسولفیدی نوع سفید در مقایسه با سنگ میزان و کانسنگ نوع سرخ را می‌توان در ارتباط با انحلال سنگ میزان کربناته و ته‌نشینی کانسنگ کربناته روی دانست؛ بدین گونه که با توجه به قابلیت تحرک کم عناصر خاکی کمیاب، سیال اسیدی در برخورد با سنگ میزان کربناته، موجب انحلال آن و خروج کلسیم و غنی‌تر عناصر کمیاب در محیط می‌شود.

مقادیر پایین عناصر خاکی کمیاب در نمونه‌های کانسنگ غیرسولفیدی قرمز و مقدار  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  این نمونه‌ها و مقایسه آنها با کانسنگ سولفیدی اولیه (موحدنیا، ۱۳۹۴) نشان از همانندی این مقادیر به یکدیگر دارد. از آنجایی که کانسنگ غیرسولفیدی نوع سرخ در اثر جانمایی مستقیم کانسنگ سولفیدی شکل گرفته است، بنابراین همانندی در الگو و محتوای عناصر خاکی کمیاب امری طبیعی است.

در بخش‌های نزدیک به سطح در هر دو افق معدنی شده است (شکل ۴). بر پایه زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی، کانسنگ غیرسولفیدی در افق‌های کانه‌دار کانسار آب‌باغ به دو نوع «کانسنگ سرخ» و «کانسنگ سفید» قابل تقسیم است (شکل ۴). کانسنگ نوع سرخ به‌صورت جانمایی مستقیم کانسنگ سولفیدی اولیه و کانسنگ سفید به‌صورت جانمایی بخش‌های کربناته سنگ میزان دیده می‌شود. گسترش کانسنگ سفید بسیار بیشتر از کانسنگ سرخ است و با توجه به عیار بالای روی در کانسنگ سفید، در حال حاضر این نوع کانسنگ، استخراج و بهره‌برداری می‌شود (شکل ۴).

#### ۶- کانی‌شناسی و مطالعات SEM کانسنگ برونزاد

بر پایه نتایج مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش پرتو ایکس (XRD)، کانی‌شناسی کانسنگ برونزاد کانسار آب‌باغ شامل اسمیت‌زونیت ( $\text{ZnCO}_3$ )، هیدروزینسیت ( $\text{Zn}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$ )، سروزیت ( $\text{PbCO}_3$ )، رس‌های غنی از روی، گریونوکیت (Cds)، کوولیت و اکسیدهای آهن و منگنز است. در میان کانی‌های باطله، کوارتز و ژپس گسترش دارند. کانی‌های غیرسولفیدی به‌صورت تأخیری هستند و بیشتر جانمایی سنگ میزان و کانی‌های سولفیدی اولیه شده‌اند. بافت‌های جانمایی، توده‌ای و رگه-رگچه‌ای نیز حضور دارند.

اسمیت‌زونیت اصلی‌ترین کانی اقتصادی موجود در بخش کانسنگ غیرسولفیدی است که گسترش قابل توجهی دارد. بیشتر کانسنگ سفید، متشکل از کانی کربناته اسمیت‌زونیت است (شکل ۵). این کانی گاه همراه با مقادیر کمی هیدروزینسیت به‌صورت محلی (شکل ۵) و دارای بافت توده‌ای، جانمایی و رگه-رگچه‌ای است. هیدروزینسیت (کربنات آب‌دار روی) در بخش‌هایی از کانسار که  $\log P_{\text{CO}_2(\text{g})}$  پایین‌تر از ۰/۵ بوده (Reichert and Borg, 2008) شکل گرفته است (شکل ۱۰). در بخش‌های سرخ، مقادیر قابل توجهی از اکسیدهای آهن نیز حضور دارند. در بخش‌هایی که شدت هوازدگی به نسبت پایین است، بقایای از گالن، اسفالریت و پیریت به‌صورت محلی مجموعه غیرسولفیدی را همراهی می‌کنند (شکل ۵).

در کانسنگ غیرسولفیدی کانسار آب‌باغ، کانی‌های رسی غنی از روی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی شناسایی شده است که فراوانی بسیار ناچیزی دارند (شکل ۶-ب). در بسیاری از ذخایر برونزاد روی، کانی‌های رسی دارای روی اهمیت اقتصادی قابل توجهی دارند (Choulet et al., 2015). توانایی کانی‌های رسی در گنجاندن کاتیون  $\text{Zn}^{2+}$  در فضای میان‌لایه‌های متورم شده رس، به‌خوبی شناخته شده است (Bradbury and Baeyens, 1999; Churakov and Dähn, 2012). مطالعات بسیار کمی برای شناسایی و بررسی ماهیت کانی‌های رسی غنی از روی صورت پذیرفته است و امکان شناسایی دقیق کانی‌های رسی غنی از روی در کانسار آب‌باغ نیز فراهم نشد. کانی‌های رسی غنی از روی در این کانسار به‌صورت رگچه‌های پرکننده شکستگی‌های اسمیت‌زونیت حضور دارند (شکل ۶-الف).

فعالیت‌های هوازدگی و تخریب کانی‌های سولفیدی اولیه، سبب تشکیل کانی‌های سولفیدی ثانویه (کوولیت و گریونوکیت) شده است که سازگار با شرایط جدید محیط هستند (شکل ۷). کانی کوولیت در اثر اکسایش کالکوپیریت موجود در رخساره کانسنگ توده‌ای تشکیل شده است. کوولیت به مقدار جزئی در کانسنگ ثانویه حضور دارد و بیشتر به‌صورت رگچه‌ای دیده می‌شود (شکل ۷). در بخش‌هایی از کانسار که شرایط به نسبت احیایی حاکم بوده، این کانی تشکیل شده است. تشکیل کانی‌های سولفیدی همراه با کانسنگ برونزاد در بیشتر ذخایر مراکش نیز رایج است (Choulet et al., 2014). همچنین، در کانسارهای غیرسولفیدی روی و سرب در ایرلند (Morrissey, 1970)، زامبیا (Taylor, 1958; Terracciano, 2008) و نامبیا (Borg et al., 2003)، کانی‌های سولفیدی ثانویه گزارش شده‌اند. تغییرات موضعی سطح آب به دلایل فصلی و زمین‌ساختی می‌تواند موجب ایجاد شرایط احیایی کوتاه‌مدت در محیط شود و تشکیل کانی‌های سولفیدی ثانویه را آسان کند (Choulet et al., 2014).

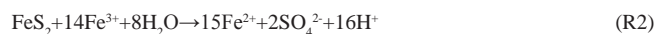
## ۸- فرایندهای مؤثر در تشکیل و نوع کانسنگ ثانویه برونزاد

در تشکیل کانسنگ هوازده برونزاد، اکسایش کانی‌های سولفیدی، خنثی‌سازی اسید و تشکیل کانی‌های کربناتی روی به‌عنوان فرایندهای اصلی ژئوشیمیایی هستند (Reichert and Borg, 2008) که در ادامه، نقش هر یک از این فرایندها در تشکیل کانسنگ برونزاد کانسار آب‌باغ بررسی خواهد شد:

### ۸-۱. اکسایش کانی‌های سولفیدی

مهم‌ترین عامل اکسایش کانی‌های سولفیدی، واکنش این کانی‌ها با اکسیژن مولکولی است. فرایند مهم دیگر اکسایش سولفیدها (به‌ویژه پیریت)، واکنش سولفیدها با یون‌ها و کمپلکس‌های  $Fe^{3+}$  است که این کاتیون به‌عنوان گیرنده الکترون (همانند اکسیژن مولکولی) رفتار می‌کند.  $Fe^{3+}$  در طی اکسایش  $Fe^{2+}$  با اکسیژن و یا اکسایش باکتریایی تولید می‌شود (Reichert and Borg, 2008). دیگر اکسیدکننده‌ها، برای نمونه نیترات و منگنز، می‌توانند در سنگ‌های میزبان سولفیدها حضور داشته باشند (Herbert, 1999)؛ اما در کانسار آب‌باغ به دلیل تمرکز نداشتن آنها، نقش آنها در فرایند اکسایش ناچیز است. میزان تمایل به اکسایش در پیریت به نسبت اسفالریت و گالن بیشتر بوده و پایداری گالن در برابر اکسایش بیشتر از اسفالریت است (Reichert and Borg, 2008).

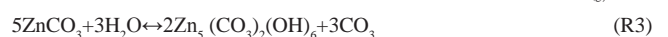
حضور پیریت و اکسایش سریع آن در کانسار آب‌باغ و در پی آن آبکافت (Hydrolysis) آهن فریک، به دلیل تولید اسید، نقش مهمی در تشکیل کانسنگ ثانویه دارد. در واکنش‌های زیر، اکسایش پیریت توسط اکسیژن (R1) و توسط آهن فریک (R2) نشان داده شده است (Herbert, 1999):



### ۸-۲. واکنش‌های خنثی‌سازی اسید و ته‌نشست کانی‌های ثانویه روی

واکنش‌های خنثی‌سازی اسید و ته‌نشست کانی‌های ثانویه روی محلول اسیدی که در طی فرایند اکسایش تولید شده است، می‌تواند با کانی‌های کربناته و سیلیکات‌ها واکنش دهد. کانی‌های مهم خنثی‌کننده محلول اسیدی، کلسیت و دولومیت هستند که در کانسار آب‌باغ، کلسیت گرمایی همراه با سولفیدها و همچنین ترکیب آهکی سنگ میزبان به فراوانی وجود دارد. کانی‌های کربناته و یون‌های  $H^+$  در طول خنثی‌سازی از میان رفته و سبب رها شدن کاتیون  $Ca^{2+}$  و بی‌کربنات  $HCO_3^-$  درون محلول می‌شود و در اثر فروپاشی اسید سولفوریک، یون‌های سولفات آزاد می‌شوند که با ترکیب شدن با  $Ca^{2+}$ ، موجب تشکیل کانی ژپس می‌شوند که در کانسار آب‌باغ، حضور ژپس همراه با کانسنگ برونزاد فراوان و عادی است. بی‌کربنات به یون‌ها فلزی  $Zn^{2+}$ ،  $Pb^{2+}$ ،  $Mn^{2+}$  و  $Cd^{2+}$  موجود در محلول آبی متصل و موجب ته‌نشست کانی‌های ثانویه می‌شود. همان‌گونه که پیشتر گفته شد، در کانسنگ برونزاد کانسار آب‌باغ، افزون بر اسمیت‌زونیت و هیدروزینسیت، کانی‌های ثانویه کادمیم (گرینوکیت)، منگنز (اکسیدهای منگنز) و مس (کولیت) نیز تشکیل شده‌اند.

ته‌نشینی کانی‌های ثانویه به‌طور شدید وابسته به pH محلول آبی بوده و نیازمند محلول‌های با pH بالاست (Reichert and Borg, 2008) (شکل ۱۱). تشکیل اسمیت‌زونیت محدود به مقادیر بالای  $P_{CO_2(g)}$  است:  $\log P_{CO_2(g)} = 0.4 \text{ kPa at } 298.2K$ ؛ بنابراین در شرایط تعادل سیال با اتمسفر، ته‌نشینی اسمیت‌زونیت از محلول آبی امکان‌پذیر نیست. فشار گاز دی‌اکسید کربن در حال حاضر  $P_{CO_2(g)}$  خاک‌های فقیر از آب در ایران (جدول ۴) توسط Drever (1997) و Amundson et al. (1989) و Brugger et al. (2003) مطالعه شده است که از مقدار کمیته مورد نیاز برای ته‌نشست اسمیت‌زونیت کمتر است. مطابق واکنش (R3) مقدار کمیته  $P_{CO_2(g)}$  برای تشکیل کانی اسمیت‌زونیت 0.4 kPa است (Takahashi, 1960).



این واکنش در شرایط  $\log P_{CO_2(g)} = 0.4 \text{ kPa}$  به سوی راست صورت می‌گیرد و کانی هیدروزینسیت ته‌نشست می‌یابد. این شرایط برای محلول‌های آبی که در تعادل با اتمسفر هستند، معمول است و محلول‌های آبی در سطوح ژرف و یا در

بخش‌های اشباع از آب، تعادل با  $CO_2$  اتمسفر ندارند که شرایط مطلوب برای ته‌نشست اسمیت‌زونیت است. بنابراین وجود اسمیت‌زونیت در کانسار آب‌باغ، نشان‌دهنده فشار بالای دی‌اکسید کربن در زمان تشکیل کانسنگ برونزاد است. علل مختلفی برای ایجاد فشار بخشی بالای گاز دی‌اکسید کربن وجود دارد که مهم‌ترین آنها وجود سنگ آهک و دولومیت در توالی سنگی و فعالیت‌های باکتریایی است (Reichert and Borg, 2008). با توجه به مقادیر  $\log P_{CO_2(g)}$  خاک حال حاضر ایران و وجود مقادیر فراوان اسمیت‌زونیت در کانسار آب‌باغ، تشکیل بخش برونزاد این کانسار در ژرفای زیاد و اشباع از آب صورت گرفته است. وجود کانی‌های کربناته گرمایی به همراه کانسنگ سولفیدی و سنگ میزبان، عامل اصلی فشار بخشی بالای  $CO_2$  در این کانسار بوده‌اند.

در مقایسه با گالن، وجود دیگر سولفیدها به همراه کانسنگ غیرسولفیدی بسیار ناچیز است. در یک پاراژنز کانیایی متشکل از پیریت، اسفالریت و گالن، کانی پیریت بیشترین میل به اکسایش و گالن کمترین میل را دارد. همچنین، در پیرامون کانی گالن نوار نازکی از سروزیت تشکیل می‌شود. این دو عامل موجب حفظ گالن در برابر فرایندهای اکسایش می‌شود. در کانسار آب‌باغ، کانی گالن همراه با کانسنگ غیرسولفیدی روی به فراوانی دیده می‌شود (شکل ۴).

### ۸-۳. نوع کانه‌زایی برونزاد

Hitzman et al. (2003) بر پایه فرایند تشکیل، کانسارهای برونزاد را به سه نوع الف) جانیشینی سولفیدها، ب) جانیشینی سنگ میزبان و ج) پرکننده کارست‌ها تقسیم می‌کنند. ترکیبی از این سه نوع مدل ژنتیکی می‌تواند در یک ذخیره رخ دهد (Choulet et al., 2015). در کانسار آب‌باغ، حضور کانسنگ سرخ به‌صورت جانیشینی سولفیدها و کانسنگ سفید به‌صورت جانیشینی سنگ میزبان، نشان از رخداد این دو نوع کانه‌زایی سوپرژن در این کانسار دارد (شکل ۱۲).

### ۸-۴. مقایسه کانسار آب‌باغ با دیگر کانسارهای روی و سرب برونزاد در ایران و مراکش

بیشتر ذخایر غیرسولفیدی روی و سرب در ایران، به‌صورت برونزاد و ثانویه تشکیل شده‌اند. در این بخش، با توجه به ویژگی‌های کانی‌شناسی، ساخت و بافت ماده معدنی و مدل ژنتیکی برخی از کانسارهای غیرسولفیدی برونزاد ایران، فرایندهای تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی برونزاد کانسار آب‌باغ با آنها مقایسه شده است. مهم‌ترین ذخایر قابل مقایسه با کانسار آب‌باغ، کانسارهای مهدی‌آباد، کلاه‌دروازه، چاه تلخ و کانسارهای غیرسولفیدی منطقه کوهبنان-بهباد هستند.

کانسار مهدی‌آباد که یکی از بزرگ‌ترین ذخایر روی و سرب جهان است، در بلوک یزد جای گرفته و بر پایه Maghfouri et al. (2014) در آن، کانسنگ غیرسولفیدی در بخش میانی سازند آبکوه به سن کرتاسه زیرین تشکیل شده است. ماده معدنی در این کانسار به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود که گسترش اصلی کانسنگ غیرسولفیدی در بخش‌های مرتفع و ستیخ (Mountain ore body) است و بقایایی از سولفیدهای اولیه در آن دیده می‌شود. بقایای سولفیدها نشانگر تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی در اثر اکسایش سولفیدها است. همی‌مورفیت، هیدروزینسیت و اسمیت‌زونیت مهم‌ترین کانی‌های اقتصادی هستند که با بافت برشی و پرکننده فضای خالی دیده می‌شوند. در این کانسار، همانند کانسار آب‌باغ، کانسنگ غیرسولفیدی به دو نوع «سفید» و «سرخ» تقسیم می‌شود (Reichert, 2007).

مجموعه معدنی ایرانکوه نیز یکی از بزرگ‌ترین ذخایر روی و سرب ایران است که کانسنگ غیرسولفیدی برونزاد در آن گسترش دارد. کانسارهای مجموعه معدنی ایرانکوه در پهنه سندنج-سیرجان جای دارد و متشکل از چندین کانسار از جمله گوشفیل (بیشتر سولفیدی) و کلاه‌دروازه (بیشتر غیرسولفیدی) است (Reichert, 2007). کانسار کلاه‌دروازه توسط سنگ‌های آهکی و دولومیتی واحد  $K_3^D$  کرتاسه زیرین میزبانی می‌شود (Rastad, 1981). بیشتر کانسنگ غیرسولفیدی، محدود میان دو گسل کلاه‌دروازه و تنگچی‌ها بوده و ماده معدنی غیرسولفیدی در

برونزاد کانسار آب‌باغ را می‌توان قابل مقایسه با کانسار کلاه‌دروازه و به مقدار کمتر، کانسار مهدی‌آباد دانست. هر دو نوع کانسنگ جانشینی مستقیم (کانسنگ سرخ) و جانشینی سنگ میزبان (کانسنگ سفید) در کانسارهای کلاه‌دروازه و مهدی‌آباد، همانند کانسار آب‌باغ، تشکیل شده است. کانسنگ سفید کانسار آب‌باغ، بیشترین همانندی را از دید کانی‌شناسی با کانسنگ سفید کانسار کلاه‌دروازه دارد و کانی اصلی در هر دو کانسار، اسمیت‌زونیت است که نشان از شرایط مشابه فوگاسیته  $CO_2$  در زمان تشکیل کانسنگ برونزاد در این کانسارها دارد.

کانسارهای غیرسولفیدی برونزاد در شمال قاره آفریقا و در رشته‌کوه‌های اطلس مرتفع در مراکش دارای گسترش قابل توجهی هستند. فرایندهای تشکیل این کانسارها توسط Choulet et al. (2015) بررسی شده است. بر این اساس، سنگ میزبان آنها، سنگ‌آهک‌های ریفی ژوراسیک زیرین است که در این کانسارها، کانی‌های کربناتی و سیلیکاتی روی، به صورت جانشینی مستقیم کانسنگ سولفیدی اولیه و همچنین جانشینی سنگ میزبان و پرکننده شکستگی‌ها تشکیل شده‌اند. کانی‌شناسی بیشتر این ذخایر شامل اسمیت‌زونیت، هیدروزینسیت و سروزیت است که در برخی از ذخایر، کانی‌های رسی غنی از روی نیز تشکیل شده‌اند. ویژگی‌های کانی‌شناسی از جمله چیره بودن اسمیت‌زونیت، ویژگی‌های ساخت و بافت ماده معدنی و حضور انواع کانسنگ جانشینی مستقیم و جانشینی سنگ میزبان در بخش غیرسولفیدی کانسار آب‌باغ قابل مقایسه با کانسارهای مراکش (Moroccan High Atlas) است (جدول ۵).

### سپاسگزاری

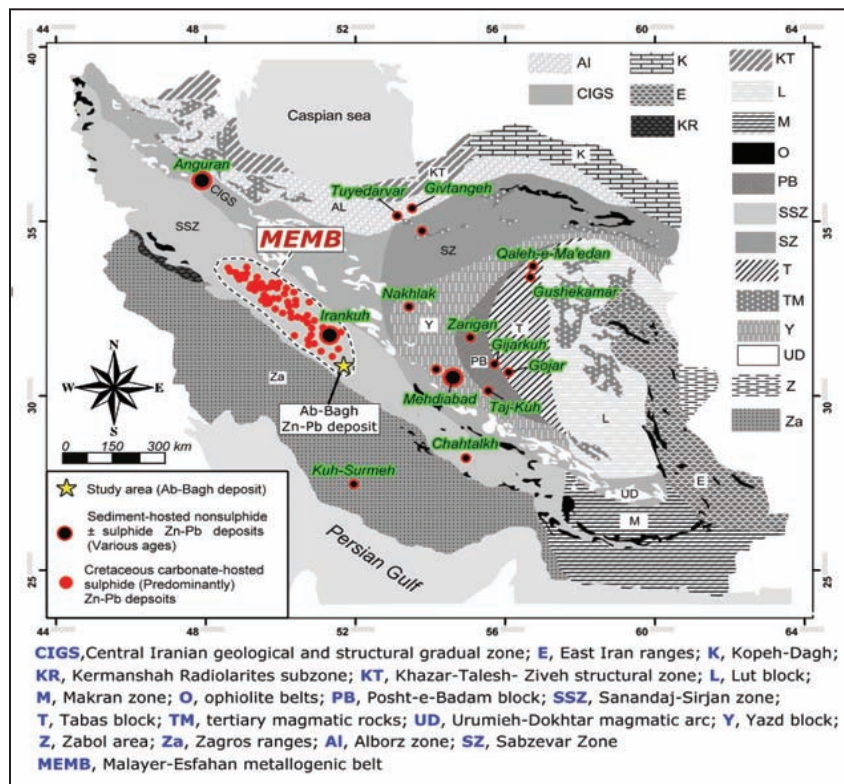
این مقاله بخشی از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نویسنده اول در دانشگاه تربیت مدرس است. نگارندگان مراتب سپاس خود را از حوزه معاونت محترم پژوهشی و فناوری این دانشگاه ابراز می‌دارند. همچنین از جناب آقای مهندس رسول استادان‌فرد و مسئولان محترم شرکت فراپارس قشم که در انجام بازدیدهای صحرایی و نمونه‌گیری از مغزه‌ها، یاری‌رسان بوده‌اند، سپاسگزاری می‌شود.

ارتباط با برش‌های کارستی و در محل گسل‌ها و شکستگی‌ها تشکیل شده است. اسمیت‌زونیت، هیدروزینسیت، همی‌مورفیت، سروزیت، مالاکت، کلسیت، گوتیت، هماتیت، لیمونیت و باریت اصلی‌ترین کانی‌های بخش اکسید هستند و کانسنگ نوع سفید در معدن کلاه‌دروازه چیره است. تشکیل اسمیت‌زونیت در حجم زیاد در این کانسار، نشان‌دهنده مقادیر بالای  $P_{CO_2(g)}$  است که شرایط تشکیل مشابهی در کانسار آب‌باغ نیز دیده می‌شود. در این کانسار، نوع کانسنگ برونزاد این کانسار همانند کانسار آب‌باغ از نوع جانشینی مستقیم و جانشینی سنگ میزبان است (Reichert, 2007).

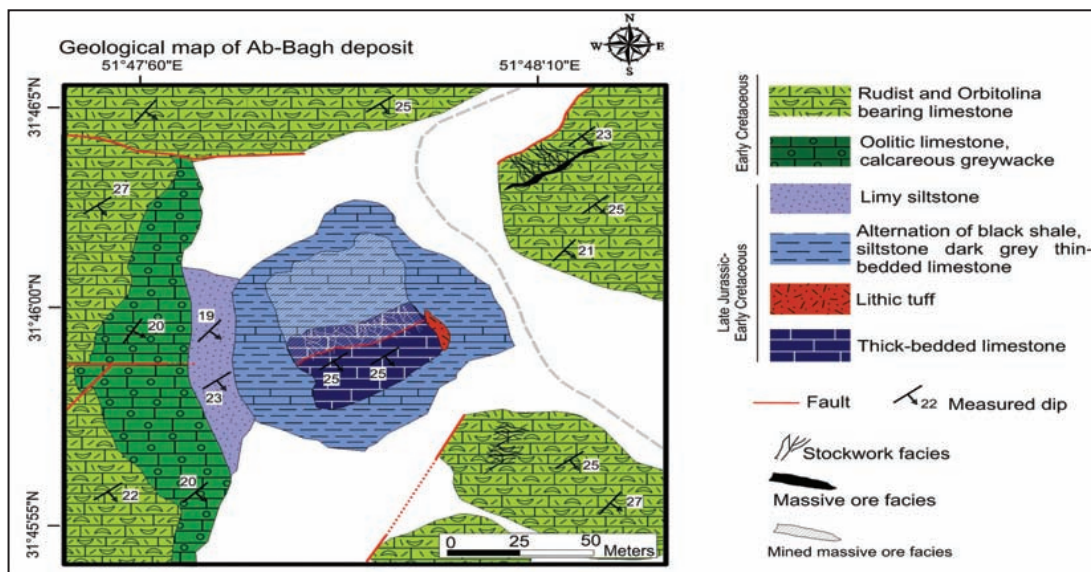
کانسار روی و سرب چاه‌تلخ با ذخیره ۷۲۰۰۰۰ تنی کانسنگ غیرسولفیدی (کربناتی و سیلیکاتی)، در بخش جنوبی پهنه سندج-سیرجان جای گرفته است. کانه‌زایی اولیه سولفیدی در این کانسار با واحدهای کربناتی کراتاسه بالایی میزبانی می‌شود. کانسنگ برونزاد به صورت رگه‌ای بوده و از کانی‌های اسمیت‌زونیت، همی‌مورفیت، هیدروزینسیت، ویلمیت و سروزیت با بافت‌های توده‌ای، جانشینی، برشی، پرکننده فضاهای خالی، شکستگی‌ها و حفرات کارستی و کلوform تشکیل یافته است. انواع ذخایر غیرسولفیدی، شامل جانشینی مستقیم و جانشینی سنگ میزبان در این کانسار حضور دارد (رضائیان و همکاران، ۱۳۸۹).

در منطقه کانه‌زایی روی و سرب کوه‌بان-بهاباد، در بخش جنوبی بلوک پشت‌بادام، شمار زیادی کانسار و نشانه معدنی روی و سرب، از جمله تاجکوه، گوجر و گیجرکوه، وجود دارد که بیشتر توسط واحدهای دولومیتی-آهکی پرموتریاس میزبانی می‌شوند. کانه‌زایی سولفیدی اولیه در این منطقه در اثر فرایندهای برونزاد تبدیل به کانسنگ غیرسولفیدی شده است و کانی‌های همی‌مورفیت، اسمیت‌زونیت، سروزیت و آنگلزیت تشکیل شده‌اند. امیری و همکاران (۱۳۸۴) نوع آنها را از جانشینی مستقیم معرفی می‌کنند.

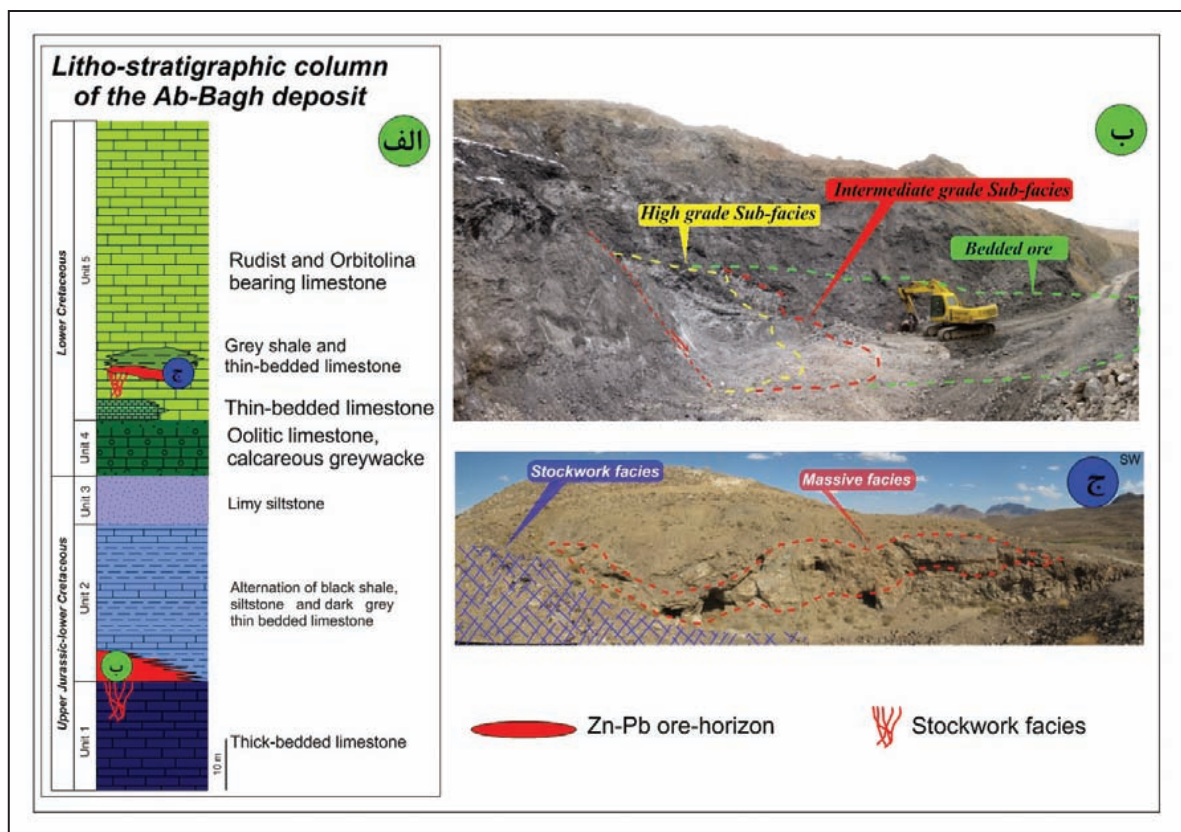
با توجه به ویژگی‌های شاخص کانسنگ برونزاد کانسار آب‌باغ، از جمله کانی‌شناسی، ساخت و بافت، سنگ میزبان، میزان  $P_{CO_2(g)}$  و فرایندهای مؤثر در تشکیل و مقایسه آنها با ویژگی‌های دیگر کانسارهای برونزاد روی و سرب ایران، کانسنگ



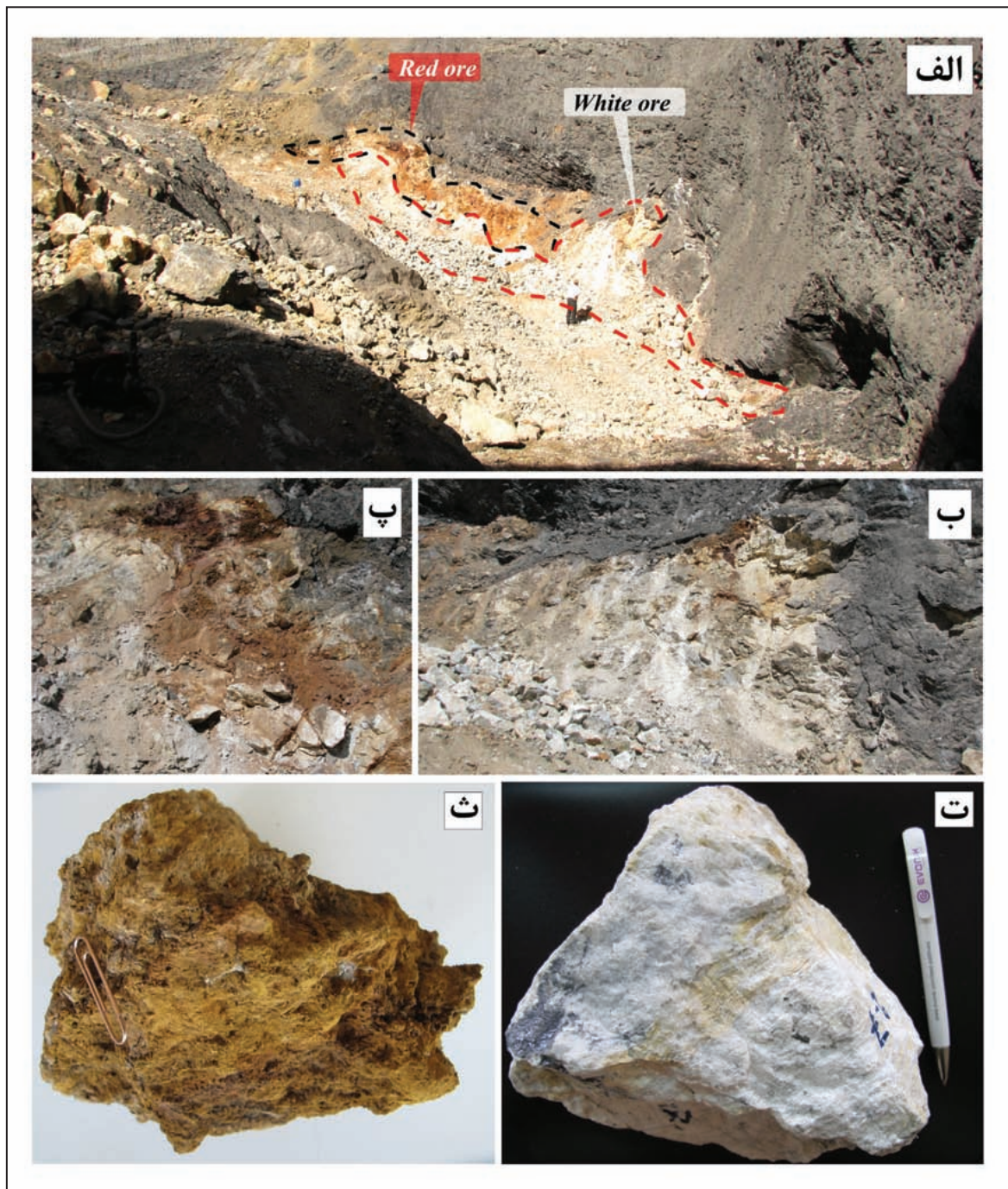
شکل ۱- پهنه‌های ساختاری ایران (آقاباتی، ۱۳۸۳؛ Alavi, 1991) و موقعیت کمر بند فلز زایی ملایر- اصفهان در پهنه سندج-سیرجان (Momenzadeh, 1976; Rajabi et al., 2012) و گسترش کانسارهای روی و سرب غیرسولفیدی در پهنه‌های ساختاری ایران.



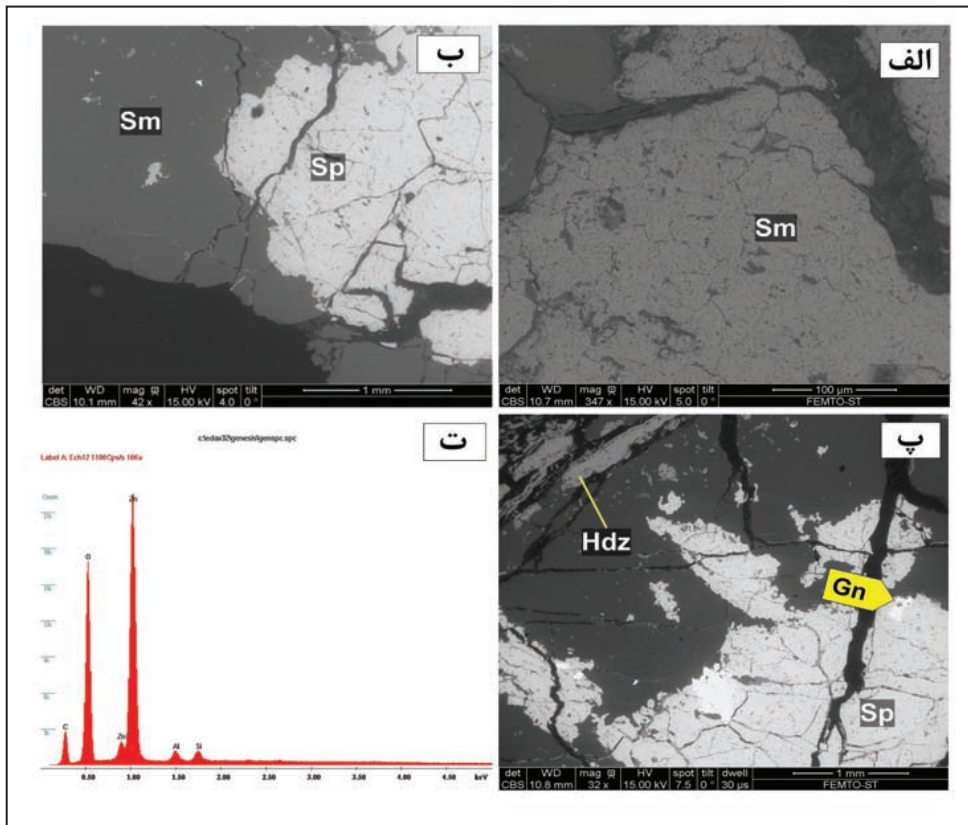
شکل ۲- نقشه زمین شناسی ۱:۵۰۰۰ کانسار آب باغ و موقعیت قرارگیری افق کانه‌زایی ۱ در بخش مرکزی و افق کانه‌زایی ۲ در شمال خاوری آن.



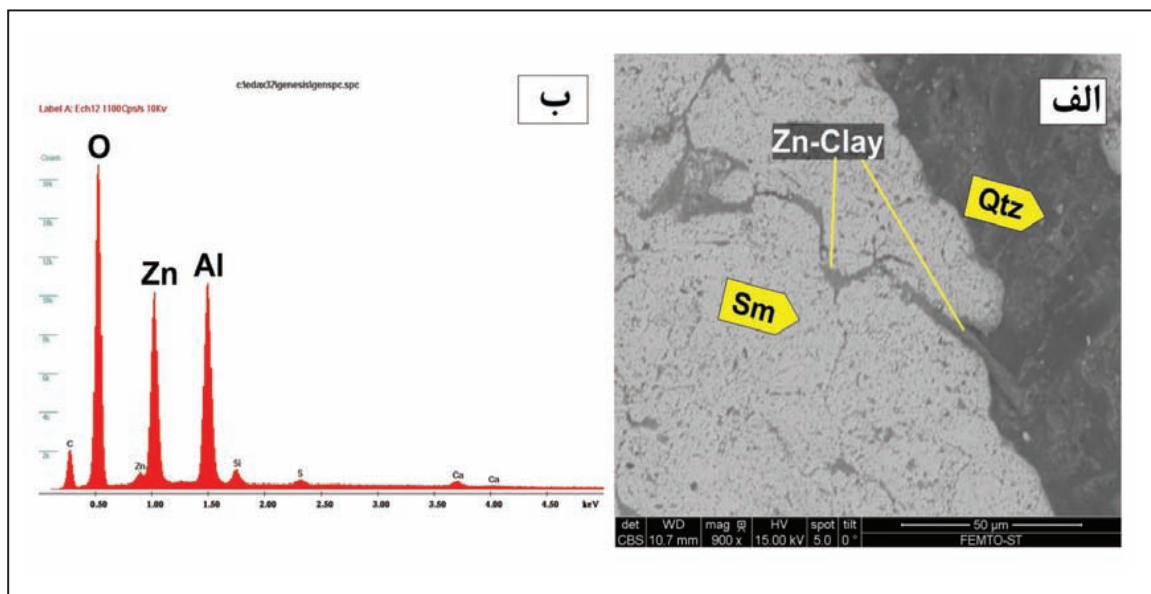
شکل ۳- الف) ستون چینه شناسی کانسار آب باغ و موقعیت افق‌های معدنی در آن؛ ب) نمایی از رخنمون افق کانه‌زایی ۱ و موقعیت رخساره‌های کانسنگی مختلف در آن (دید به سوی باختر)؛ ج) رخنمون افق کانه‌زایی ۲ و موقعیت رخساره‌های کانسنگی رگه-رگچه‌ای و توده‌ای در آن (دید به سوی شمال خاور).



شکل ۴- الف) دورنمایی از رخنمون کانه‌زایی غیرسولفیدی در کانسار آب‌باغ و کانسنگ‌های سفید و سرخ با سنگ میزبان شیل تیره همراه با میان‌لایه‌های کربناتی (دید عکس به سوی شمال باختر)؛ ب) رخنمون کانسنگ سفید غنی از روی که بیشتر کانسنگ بروتراد کانسار آب‌باغ را تشکیل می‌دهد؛ پ) رخنمون کانسنگ بروتراد سرخ غنی از آهن در افق ۱ کانسار آب‌باغ؛ ت) نمونه دستی کانسنگ غنی از اسمیت‌زونیت (به رنگ سفید) و قطعات گالن (رنگ تیره)؛ ث) نمونه دستی کانسنگ غنی از آهن و سرب سرخ رنگ.

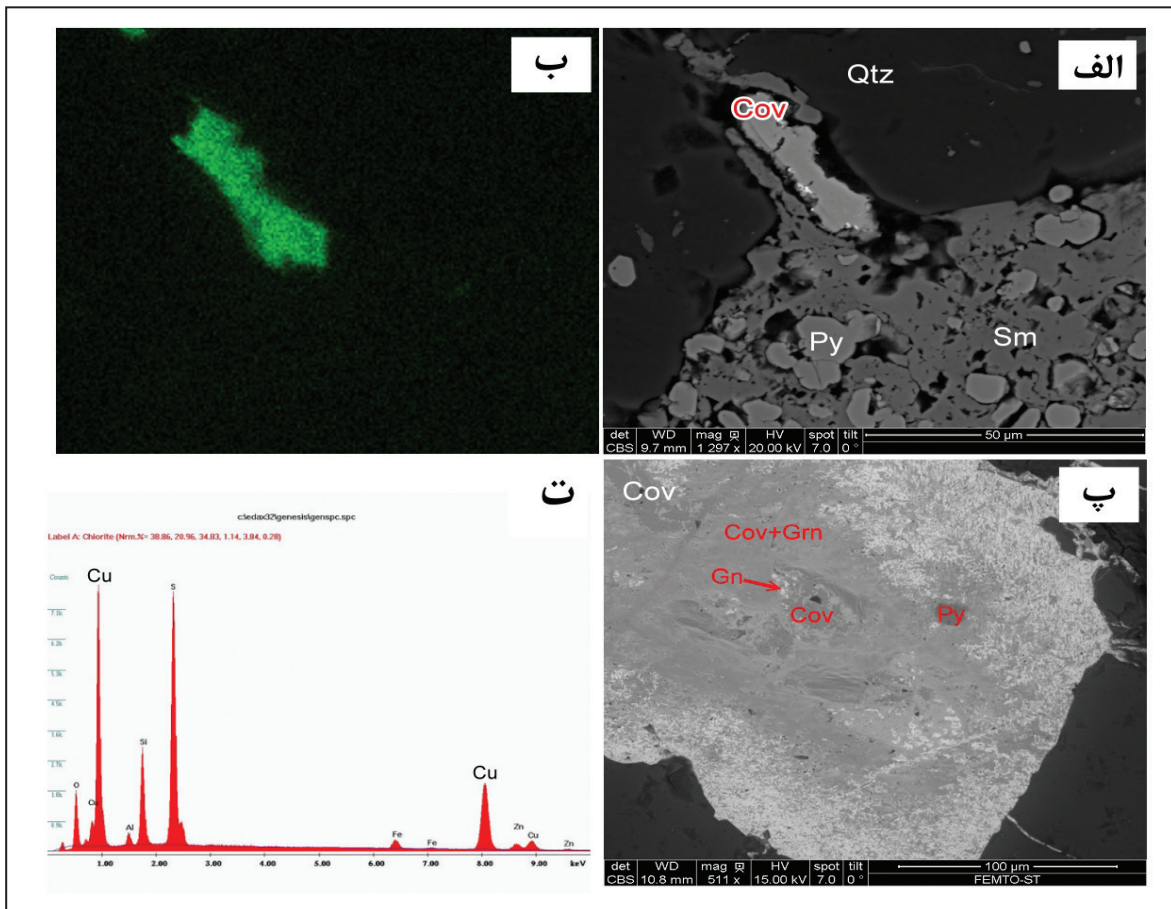


شکل ۵- الف) تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی کانی اسمیت‌زونیت (Sm)؛ ب) جانشینی اسفالریت (Sp) با اسمیت‌زونیت؛ پ) جانشینی اسفالریت توسط اسمیت‌زونیت و هیدروزینسیت (Hdz)؛ ت) طیف EDX حاصل از تجزیه کانی اسمیت‌زونیت.

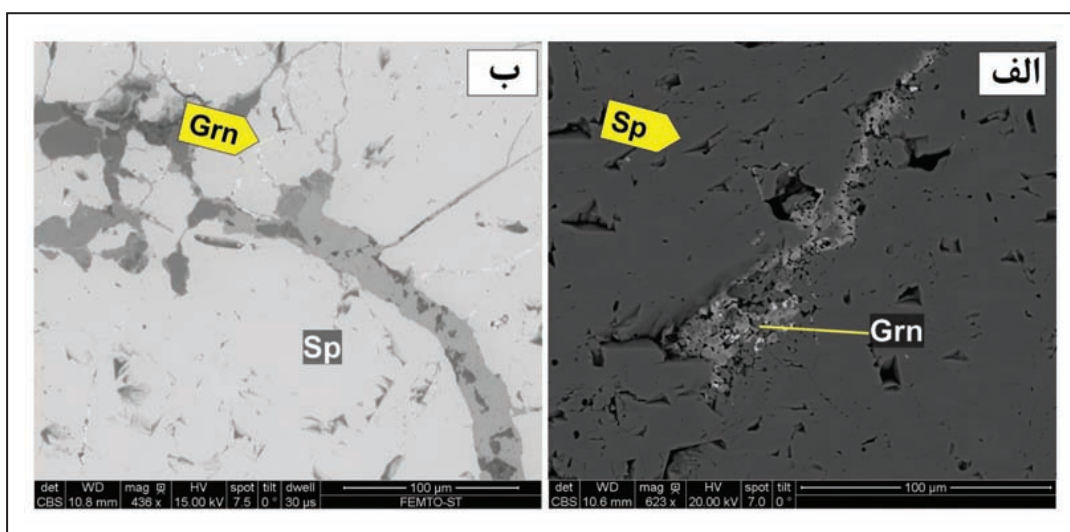


شکل ۶- الف) تصویر SEM کانی‌های رسی غنی از روی در شکستگی‌های اسمیت‌زونیت (Sm)، که همراه با آنها کوارتز (Qtz) نیز حضور دارد؛ ب) طیف EDX حاصل از تجزیه رس‌های غنی از روی که پیک‌های مربوط به عناصر آلومینیم، روی و اکسیژن در آن مشهود است.

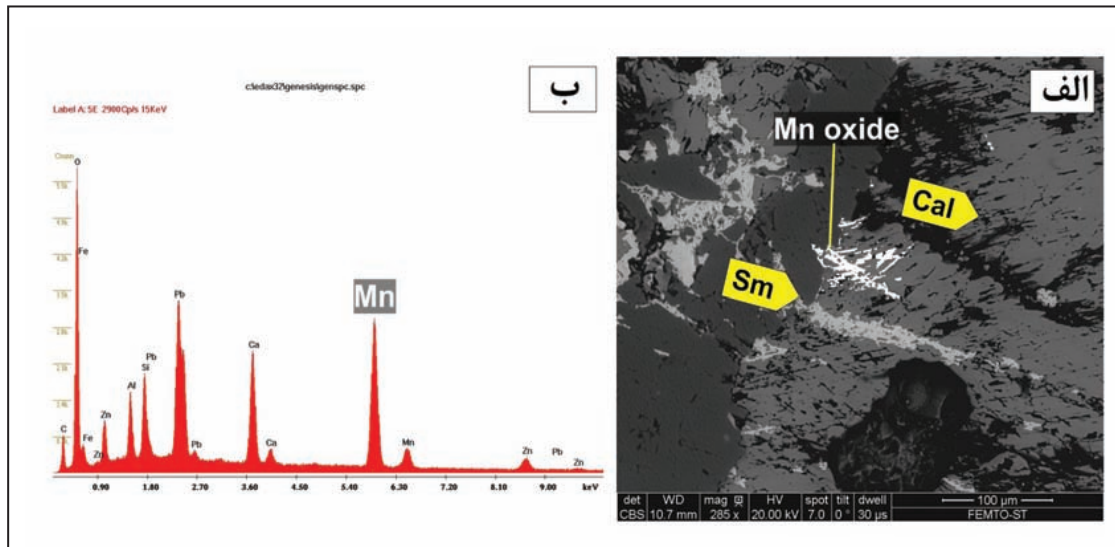




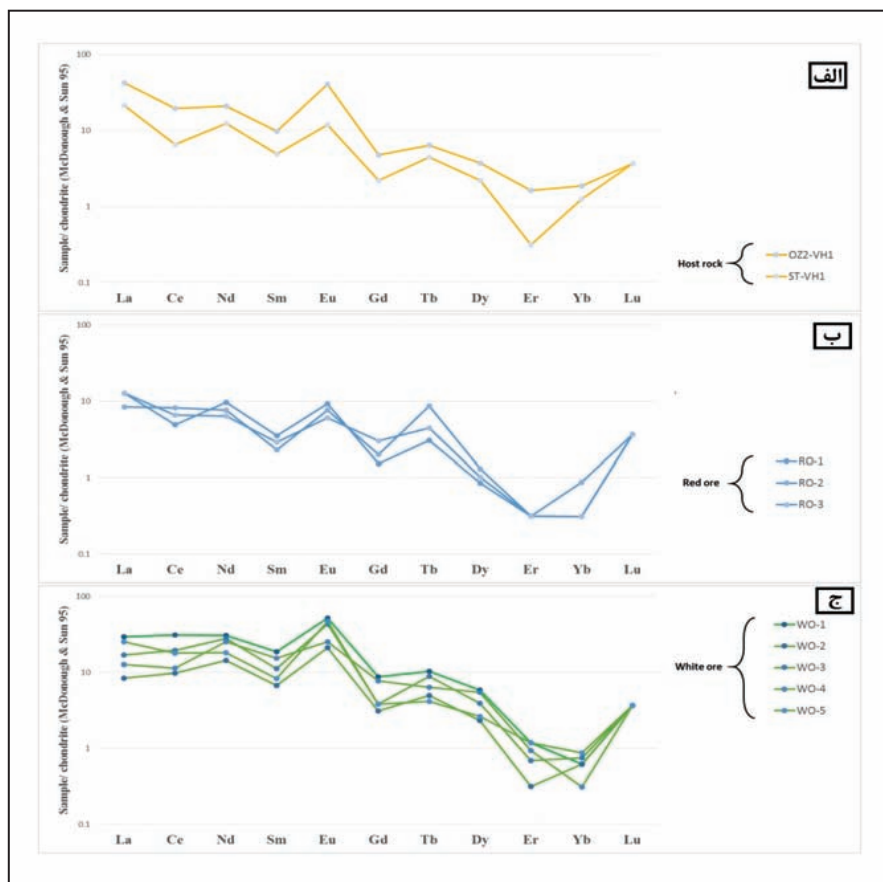
شکل ۷- الف) تصویر SEM از کانی کولیت (Cov) در بخش کانسنگ غیرسولفیدی؛ ب) نقشه عنصری مس تصویر الف که نشان‌دهنده تمرکز مس در محدوده مربوط به کانی کولیت است؛ پ) تصویر SEM کانی‌های کولیت و گرینوکیت (Gm) در کانسنگ غیرسولفیدی؛ ت) طیف EDX نمونه کانسنگ غیرسولفیدی دارای کولیت که پیک‌های مس ناشی از حضور کولیت است.



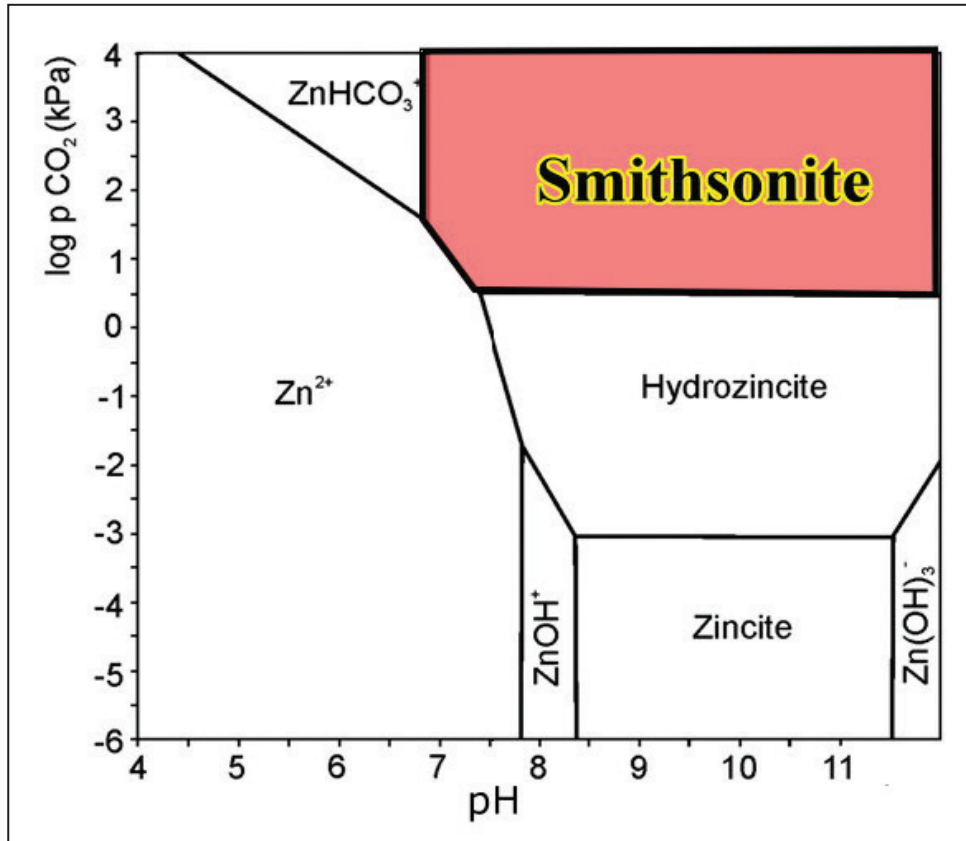
شکل ۸- الف) تشکیل گرینوکیت در حفرات اسفالریت؛ ب) حضور گرینوکیت در ریزشستگی‌های اسفالریت.



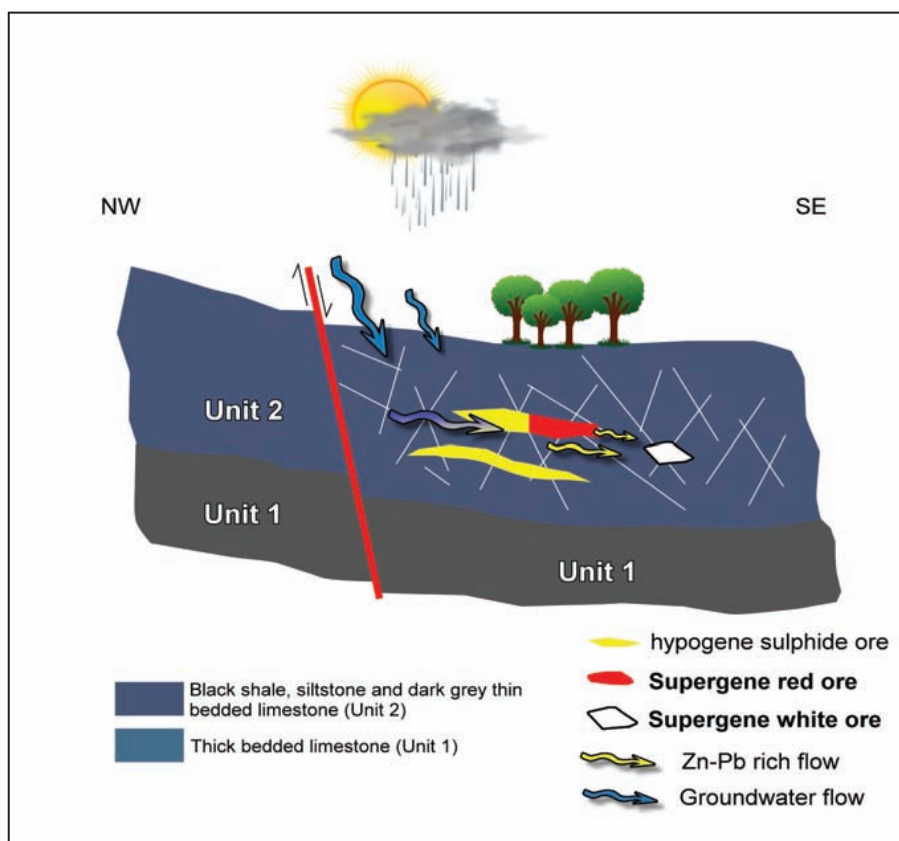
شکل ۹- الف) تشکیل اکسیدهای منگنز در شکستگی‌های کلسیت (Cal)؛ ب) طیف EDX حاصل از تجزیه اکسیدهای منگنز.



شکل ۱۰- الگوی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده با کندریت نمونه‌های کانسار آب‌باغ؛ الف) سنگ میزبان؛ ب) کانسنگ غیرسولفیدی نوع سرخ؛ ج) کانسنگ غیرسولفیدی نوع سفید.



شکل ۱۱- پایداری کانی‌های کربناتی، اکسیدی و هیدروکسیدی روی در سامانه شیمیایی Zn-O-H-C نسبت به  $\text{P}_{\text{CO}_2(\text{g})}$  و pH (Reichert and Borg, 2008).



شکل ۱۲- مدل نمادین فرایندهای تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی جانشینی مستقیم (کانسنگ سرخ) و جانشینی سنگ میزبان (کانسنگ سفید) در کانسار آب‌باغ، برگرفته از (Reichert, 2007).

جدول ۱- نتایج تجزیه ICP-MS و مقادیر عناصر اصلی، فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی نمونه‌های کانسنگ غیرسولفیدی سفید و سرخ کانسار آب‌باغ.

	Ag	As	Ba	Ca	Cd	Ce	Co	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Fe	Gd
<b>WO-1</b> (White ore)	<0.1	4	2	>10%	41.4	19	17.1	<0.5	8	1.45	0.19	2.92	982	1.73
<b>WO-2</b> (White ore)	<0.1	2.9	3	>10%	78.4	6	19.7	<0.5	18	0.57	<0.05	1.19	2163	0.62
<b>WO-3</b> (White ore)	<0.1	1.8	1	>10%	64.3	12	20.3	<0.5	9	0.96	0.11	2.43	1548	0.76
<b>WO-4</b> (White ore)	<0.1	1.3	4	>10%	47.2	7	16.9	<0.5	12	1.35	0.15	1.43	2205	1.54
<b>WO-5</b> (White ore)	<0.1	0.8	3	>10%	67.3	11	22.5	<0.5	23	0.65	0.19	2.65	1647	0.76
<b>RO-1</b> (Red ore)	37.7	27.9	18	88731	11.1	3	2.3	<0.5	217	0.21	<0.05	0.52	48290	0.3
<b>RO-2</b> (Red ore)	45.5	34.5	6	>10%	21.7	5	3.1	<0.6	245	0.32	<0.05	0.43	53430	0.4
<b>RO-3</b> (Red ore)	35.6	24.3	12	>10%	9.76	4	1.9	<0.7	156	0.25	<0.05	0.34	45359	0.6
	Hf	In	K	La	Li	Lu	Mg	Mn	Mo	Na	Nb	Nd	Ni	Pb
<b>WO-1</b> (White ore)	<0.5	<0.5	70	7	2	<0.1	168	1602	0.5	454	<1	14.1	7	373
<b>WO-2</b> (White ore)	<0.5	<0.5	24	2	<1	<0.1	191	2574	0.7	130	<1	6.6	9	63
<b>WO-3</b> (White ore)	<0.5	<0.5	32	4	3	<0.1	139	2352	0.4	274	<1	12.7	6	214
<b>WO-4</b> (White ore)	<0.5	<0.5	45	3	2	<0.1	206	1481	0.4	253	<1	11.6	3	54
<b>WO-5</b> (White ore)	<0.5	<0.5	22	6	1	<0.1	104	939	0.3	349	<1	8.3	5	102
<b>RO-1</b> (Red ore)	<0.5	7.93	210	3	14	<0.1	<100	30	<0.1	236	<1	4.4	4	22633
<b>RO-2</b> (Red ore)	<0.5	5.45	187	2	11	<0.1	135	43	0.3	211	<1	3.5	3	26543
<b>RO-3</b> (Red ore)	<0.5	6.34	194	3	13	<0.1	<100	29	0.2	207	<1	2.9	2	19757
	Pr	Rb	Sb	Sc	Se	Sm	Sn	Tb	Th	Tl	Tm	Y	Yb	Zn
<b>WO-1</b> (White ore)	3.21	<1	6.3	0.7	<0.5	2.75	0.9	0.37	0.54	<0.1	<0.1	3.4	0.1	>3%
<b>WO-2</b> (White ore)	1.51	<1	5.1	0.8	0.68	1	0.9	0.18	0.55	<0.1	<0.1	<0.5	0.1	>3%
<b>WO-3</b> (White ore)	2.75	<1	5.7	0.9	0.82	1.65	1.2	0.32	0.47	0.2	<0.1	<0.5	0.12	>3%
<b>WO-4</b> (White ore)	2.52	<1	4.3	0.7	<0.5	2.28	0.7	0.23	0.35	0.19	<0.1	<0.5	<0.05	>3%
<b>WO-5</b> (White ore)	1.98	<1	4.7	0.9	<0.5	1.23	0.6	0.15	0.65	<0.1	<0.1	<0.5	0.14	>3%
<b>RO-1</b> (Red ore)	0.99	<1	110	1	<0.5	0.52	5.7	0.11	0.62	0.38	<0.1	<0.5	<0.05	10778
<b>RO-2</b> (Red ore)	0.76	<1	134	0.9	<0.5	0.34	6.4	0.31	0.52	0.23	<0.1	<0.5	0.14	13232
<b>RO-3</b> (Red ore)	0.55	<1	96.1	0.8	<0.5	0.43	3.8	0.16	0.45	0.32	<0.1	<0.5	<0.05	98754

جدول ۲- ماتریکس همبستگی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب کانسنگ برونزاد نوع سفید.

	As	Ba	Cd	Ce	Co	Cu	Fe	Mn	Pb	Sb	Sn	Zn
As	1											
Ba	-0.33666	1										
Cd	-0.26945	-0.04859	1									
Ce	0.530995	-0.59631	-0.59346	1								
Co	-0.52904	-0.20569	0.749818	-0.18637	1							
Cu	-0.51177	0.482357	0.660615	-0.49602	0.726977	1						
Fe	-0.49604	0.674023	0.471776	-0.98858	0.049037	0.424649	1					
Mn	0.422192	-0.40885	0.446183	-0.26357	-0.11047	-0.3285	0.224562	1				
Pb	0.678853	-0.69255	-0.56161	0.963475	-0.30498	-0.65633	-0.94932	-0.0101	1			
Sb	0.786195	-0.8164	-0.25409	0.818584	-0.18773	-0.60286	-0.83905	0.329214	0.92467	1		
Sn	0.397464	-0.83813	0.114869	0.232045	-0.08335	-0.64842	-0.2785	0.789306	0.444612	0.661133	1	
Zn	-0.46706	-0.12126	0.961931	-0.55261	0.861838	0.658743	0.420804	0.317877	-0.55767	-0.30203	0.115892	1

جدول ۳- ماتریکس همبستگی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب کانسنگ برونزاد نوع سرخ.

	Ag	As	Ba	Cd	Ce	Co	Cu	Fe	Mn	Pb	Sb	Sn	Zn
Ag	1												
As	0.988361	1											
Ba	-0.74765	-0.63793	1										
Cd	0.994997	0.968219	-0.81026	1									
Ce	0.747653	0.637927	-1	0.810256	1								
Co	0.991458	0.99976	-0.65465	0.973469	0.654654	1							
Cu	0.861889	0.929	-0.30764	0.806918	0.307637	0.920665	1						
Fe	0.986549	0.999934	-0.62904	0.965284	0.629043	0.999442	0.933188	1					
Mn	0.990408	0.957862	-0.83224	0.999257	0.83224	0.963928	0.783556	0.954501	1				
Pb	0.972937	0.996765	-0.57397	0.944986	0.57397	0.994764	0.955738	0.997622	0.931679	1			
Sb	0.987199	0.999972	-0.63216	0.966327	0.632164	0.999568	0.931735	0.999992	0.955693	0.997337	1		
Sn	0.835727	0.909539	-0.26015	0.776686	0.260153	0.90021	0.998774	0.914251	0.751836	0.94	0.912614	1	
Zn	-0.64558	-0.75424	-0.02449	-0.56606	0.024491	-0.73967	-0.94368	-0.76173	-0.53387	-0.80457	-0.75912	-0.95891	1

 جدول ۴- مقادیر  $P_{CO_2(g)}$  در اتمسفر و خاک ایران و ضروری برای تشکیل کانی غیرسولفیدی اسمیت زونیت.

Atmospheric $\log P_{CO_2}^*$	Soil $\log P_{CO_2}^*$	Arid soils $\log P_{CO_2}^{**}$	Minimum $\log P_{CO_2}$ -Smithsonite***
Actual $\log PCO_2(g) = -1.5$ kPa	- 0.5 to 0.5 kPa	< - 0.2 kPa	0.4 kPa (298.2)

جدول ۵- مقایسه ویژگی‌های کانسنگ غیرسولفیدی آب‌باغ با کانسارهای مشابه در ایران و جهان.

کانسارهای غیرسولفیدی روی موآش	کانسار جاه تلخ	مجموعه معادن کوهبان-تهاباد	کانسار کلاه دروازه	کانسار مهدی آباد	کانسار آب باغ	سن و نوع سنگ میزبان
MVT	کرناسه بالایی	پرموتریاس / دولومیت و سنگ آهک	کرناسه زیرین / سنگ آهک، سیلت‌سنگ	کرناسه زیرین / سنگ آهک و دولومیت	ژوراسیک بالایی - کرناسه زیرین / سیلت‌سنگ و سنگ آهک	نوع ذخیره دروزاد
پرکنده فضای خالی، رگه- رگچه ای، برشی، جانشینی و توده‌های	رگه- رگچه ای، برشی، فضای خالی	کلوروم، پرکنده فضای خالی	برشی، کارستی، رگه- رگچه ای	برشی، پرکنده خترات، جانشینی، رگه- رگچه ای	جانشینی و توده‌های، برشی، رگه- رگچه‌ای، پرکنده فضای خالی	بافت و ساخت کانسنگ پروتزاد
اسپتروژنیت، هیدروژنیت، سروریت	هیدروژنیت، همی مورفیت، اسپتروژنیت	همی مورفیت، اسپتروژنیت، سروریت، آنگاریت	همی مورفیت، اسپتروژنیت، سروریت	همی مورفیت، اسپتروژنیت، سروریت	اسپتروژنیت، هیدروژنیت، رسهای غنی از روی، سروریت	کانفی شناسی کانسنگ پروتزاد
جانشینی مستقیم و جانشینی سنگ میزبان	جانشینی مستقیم و جانشینی سنگ میزبان	جانشینی مستقیم	جانشینی مستقیم و جانشینی سنگ میزبان	جانشینی مستقیم و جانشینی سنگ میزبان	جانشینی مستقیم و جانشینی سنگ میزبان	نوع کانسنگ پروتزاد
Choulet et al. (2014)	رضایتیان و همکاران (۱۳۸۹)	امیری و همکاران (۱۳۸۴)	Reichert (2007) Rastad (1981)	Reichert (2007)	پژوهش حاضر	منبع

## کتابنگاری

- امیری، ع.، قربانی، م.، اکبرزاده، ع. و شجاعی باغبینی، و.، ۱۳۸۴- نگرشی نو بر کانسارهای استراتاباند غیرسولفیدی روی و سرب در ناحیه کوهبنان- بهاباد. مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران. صص. ۳۷۵ تا ۳۸۵.
- آفانباتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران. وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین شناسی و اکتشافات مواد معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- رضائیان، ع.، رسا، ا.، جعفری، م.، امیری، ع. و خسروتهرانی، خ.، ۱۳۸۹- دولومیتی شدن اپی ژنتیک، راهنمای اکتشافی کانسارهای روی و سرب غیرسولفیدی با سنگ میزبان کربناته، مطالعه موردی: کانسار روی و سرب چاه تلخ (سیرجان). فصلنامه زمین و منابع، سال سوم، شماره چهارم، صص. ۳۱ تا ۴۰.
- موحدنیا، م.، ۱۳۹۴- رخساره های کانسنگی، ژئوشیمی و تیپ کانه زایی روی-سرب (باریم) در کانسار آب باغ (کهرویه)، جنوب شهرضا، پهنه سندج-سیرجان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- موحدنیا، م.، راستاد، ا. و رجبی، ع.، ۱۳۹۳- بررسی ویژگی های ژئوشیمیایی عناصر فرعی و کمیاب کانی های اسفالریت و گالن در کانسار روی و سرب آب باغ، جنوب شهرضا، پهنه سندج-سیرجان. هجدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، تهران.

## References

- Alavi, M., 1991- Tectonic map of the Middle East: Tehran. Geological Survey of Iran, scale 1:5,000,000.
- Amundson, R. G., Chadwick, O. A. and Sowers, J. M., 1989- A comparison of soil climate and biological activity along an elevation gradient in the eastern Mojave Desert. *Oecologia*, 80: 395–400.
- Appold, M.S. and Monteiro, V.S., 2009- Numerical modeling of hydrothermal zinc silicate and sulfide mineralization in the Vazante deposit, Brazil. *Geofluids* 9:96–115.
- Boni, M. and Large, D., 2003- Non-sulfide zinc mineralization in Europe: an overview. *Economic Geology* 98:715–729.
- Boni, M., 2005- The geology and mineralogy of nonsulfide zinc ore deposit. *Proceedings of Lead and Zinc 05, Kyoto 17–19 October 2005*: 15.
- Borg, G., 2002- The good, the bad and the ugly-a maturity index for supergene non-sulphide deposits. *Geological Society of America, Program with Abstracts* 34/6, p. 287.
- Borg, G., 2009- The influence of fault structures on the genesis of supergene zinc deposits. *Society of Economic Geologists, Spec Publ* 14, Chapter 11:121–132.
- Borg, G., Kärner, K., Buxton, M., Armstrong, R. and Schalk, W., 2003- Geology of the Skorpion non-sulphide deposit, southern Namibia. *Economic Geology* 98: 749–771.
- Bradbury, M. H. and Baeyens, B., 1999- Modelling the sorption of Zn and Ni on Ca-montmorillonite. *Geochimica Cosmochimica Acta* 63:325–336.
- Brugger, J., McPhail, D.C., Wallace, M. and Waters, J., 2003- Formation of willemite in hydrothermal environments. *Economic Geology* 98: 819–835.
- Choulet, F., Buatier, M., Barbanson, L., Guegan, R. and Ennaciri, A., 2015- Zinc-rich clays in supergene non-sulfide zinc deposits. *Miner Deposita* 51: 467–490.
- Choulet, F., Charles, N., Barbanson, L., Branquet, Y., Sizaret, S., Ennaciri, A., Badra, L. and Chen, Y., 2014- Non-sulfide zinc deposits of the Moroccan high atlas: multi-scale characterization and origin. *Ore Geol Rev* 56: 115–140.
- Churakov, S. V. and Dähn, R., 2012- Zinc adsorption on clays inferred from atomistic simulations and EXAFS spectroscopy. *Environ Sci Technol* 46:5713–5719.
- Cooke, D. R., Bull, S. W., Large, R. R. and McGoldrick, P. J., 2000- The importance of oxidized brines for the formation of Australian Proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (Sedex) deposits. *Economic Geology*, 95: 1–18.
- Daliran, F. and Borg, G., 2004- Nonsulphide zinc deposits, Iran: a preliminary study of the zinc ores at Angouran mine, NW-Iran. *BGR Reihe Berichte zur Lagerstätten- und Rohstoffforschung*. BGR, Hannover (103 pp.).
- Drever, J. I., 1997- *The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments*, 3rd edition. Prentice-Hall International, New Jersey. 436 pp.
- Goodfellow, W. D. and Lydon, J. W., 2007- Sedimentary-exhalative (Sedex) deposits, In: Goodfellow, W.D., (eds.), *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, p. 163–183.
- Goodfellow, W. D., 2007- Base metal metallogeny of the Selwyn Basin, Canada, In: Goodfellow, W.D., (eds.), *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 553-579.
- Herbert, R. B., 1999- Sulphide oxidation in mine waste deposits: a review with emphasis on dysoxic weathering. *Mitigation of the environmental impact from mining waste (MiMi)*. MiMi Print, Luleå, Sweden.

- Heyl, A. and Bozior, C. N., 1962- Oxidized zinc deposits of the United States. Part 1. General Geology. Geological Survey Bulletin 1135-A, 1–52.
- Hitzman, M. W., Reynolds, N. A., Sangster, D. F., Allen, C. R. and Carman, C., 2003- Classification, genesis and exploration guides for nonsulphide zinc deposits. *Economic Geology* 98, 685–714.
- Holland, H. D., 2005- Sedimentary mineral deposits and the evolution of earth's near-surface environments. *Economic Geology*, 100th Anniversary Special Paper 100: 1489-1509.
- Kelley, K. D., Leach, D. L., Johnson, C. A., Clark, J. L., Fayek, M., Slack, J. F., Anderson, V. M., Ayuso, R. A and Ridley, W. I, 2004- Textural, compositional, and sulfur isotope variations of sulfide minerals in the Red Dog Zn-Pb-Ag deposits, Brooks Range, Alaska: Implications for ore formation. *Economic Geology* 99: 1509–1532.
- Large, R. R., McGoldrick, P., Bull, S. and Cooke, D., 2004- Proterozoic stratiform sediment-hosted zinc-lead-silver deposits of northern Australia, in: Deb, M. and Goodfellow, W.D., (eds.), *Sediment-hosted lead-zinc sulphide deposits: Attributes and models of some major deposits of India, Australia and Canada*. Narosa publishing house, Delhi, India, p. 1-24.
- Maghfouri, S., Hoseinzadeh, M. R., Rajabi, A., Azimzadeh, A. M. and Choulet, F., 2014- Geology and origin of mineralization in the Mehdiabad Zn-Pb-Ba (Cu) deposit, Yazd block, Central Iran. 13th SGA Biennial Meeting 2015. Proceedings, Volume 5.
- Momenzadeh, M., 1976- Stratabound lead-zinc ores in the lower Cretaceous and Jurassic sediments in the Malayer-Esfahan district (west Central Iran): lithology, metal content, zonation and genesis [Unpublished Ph.D. thesis]. Heidelberg, University of Heidelberg, 300 p.
- Morrissey, C. J., 1970- The Mineralogy, Structure and Origin of the Lead-Zinc Copper Residual Ore Body at Tynagh, Co., Galway, Ireland. (dissertation) Imperial College, London University, Stuttgart.
- Movahednia, M., Rastad, E., Rajabi, A. and Choulet, F., 2014- The Ab-Bagh Stratiform and Stratabound Zn-Pb Deposit, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. 13th SGA Biennial Meeting 2015. Proceedings, Volume 5.
- Peck, W. P., Volkert, R. A., Mansur, A. T. and Doverspike, B. A., 2009- Stable isotope and petrologic evidence for the origin of regional marble-hosted magnetite deposits and the zinc deposits at Franklin and Sterling Hill, New Jersey Highlands, United States. *Economic Geology* 104:1037–1054.
- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2012- Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn-Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, 54: 1649-1672.
- Rastad, E., 1981- Geological, mineralogical, and facies investigations on the Lower Cretaceous stratabound Zn-Pb-(Ba-Cu) deposits of the Iran Kouh Mountain Range, Esfahan, west Central Iran [Unpublished Ph.D. thesis]: Heidelberg, University of Heidelberg, 334 p.
- Reichert, J. and Borg, G., 2008- Numerical simulation and a geochemical model of supergene carbonate-hosted non-sulphide zinc deposits, *Ore Geology Reviews* 33: 134–151.
- Reichert, J., 2007- A metallogenetic model for carbonate-hosted non-sulfide zinc deposits based on observations of Mehdi Abad and Iran Kouh, central and southwestern Iran [Unpublished Ph.D. thesis]: Shillong, University of Martin Luther, 129 p.
- Slezak, P. R., Olivo, G. R., Oliveira, G. D. and Dardenne, M. A., 2014- Geology, mineralogy, and geochemistry of the Vazante Northern Extension zinc silicate deposit, Minas Gerais, Brazil. *Ore geology reviews* 56:234– 257.
- Takahashi, T., 1960- Supergene alteration of zinc and lead deposits in limestone. *Economic Geology* 55: 1084–1115.
- Taylor, J. H., 1958- The formation of supergene galena at Broken Hill, northern Rhodesia. *Miner. Mag.* 31: 908–913.
- Terracciano, R., 2008- Willemite mineralization in Namibia and Zambia. (dissertation) Università di Napoli.
- Wilkinson, J. J., 2014- Sediment-hosted zinc-lead mineralization: processes and perspectives. In: *Treatise on Geochemistry* (2nd ed.), Elsevier (2014), pp. 219–248.
- Wilkinson, J. J., Eyre, S. L. and Boyce A. J., 2005- Ore-forming processes in Irish-type carbonate-hosted Zn-Pb deposits: Evidence from mineralogy, chemistry and isotopic composition of sulfides at the Lisheen Mine. *Economic Geology* 100: 63–86.



# Mineralogy, geochemistry and genetic processes of supergene non-sulphide ore of the Ab-Bagh Sedimentary-Exhalative (SEDEX-type) Zn-Pb deposit, Sanandaj-Sirjan zone

M. Movahednia<sup>1</sup>, E. Rastad<sup>2\*</sup>, A. Rajabi<sup>3</sup> and F. Choulet<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

<sup>4</sup>Assistant Professor, Chrono-Environnement Lab., Université de Franche-Comté/CNRS, Besançon, France

Received: 2016 June 21

Accepted: 2016 October 23

## Abstract

The Ab-Bagh Zn-Pb deposit is located in the central part of the Sanandaj-Sirjan zone (SSZ) and at the southeastern part of the Malayer-Esfahan metallogenic belt. This deposit is hosted by Upper Jurassic-Lower Cretaceous sedimentary sequence. Zinc and lead mineralization occurred within two horizons. The ore horizon 1 is hosted by Late Jurassic-Early Cretaceous black shale and siltstone. The ore body displays a wedge-like shape and is located close to syn-sedimentary fault. The ore horizon 2 occurs in lower Cretaceous carbonates and includes a massive ore facies that is concordant with host rock layering. It is also underlain by a stockwork facies. Weathering processes led to a supergene ore stage at Ab-Bagh deposit in parts toward the surface. Based on geology, mineralogy and geochemistry, two types of non-sulfide ore were distinguished: the white ore and the red ore. The white ore is a wall-rock replacement mineralization that contains high Zn, low Fe and a very low concentration of Pb. To the opposite, the red ore formed after the direct replacement of sulfide protore and it typically contains low Zn, high Fe and medium Pb± As concentrations. Supergene ore consists of smithsonite and hydrozincite. Minor cerussite, Zn-rich clays, greenockite, covellite and Fe-Mn oxides were also identified. The supergene part of the Ab-Bagh deposit formed as a consequence of long time weathering of a SEDEX-type sulfide protore. Oxidation of sulfide minerals (mainly pyrite and sphalerite), carbonate buffering reactions and precipitation of secondary Zn-bearing minerals are the main geochemical process involved. The REE patterns of the white non-sulfide ore are similar to that recorded in the host rocks but REE patterns of red ore, is similar to sulfide ore. The comparison with other major non-sulfide Iranian deposits suggests that Ab-Bagh deposit is very similar to Kolahdarvazeh and Mehdiabad deposits; it also shows lots of similarities with other worldwide examples (e.g. Moroccan non-sulfide ore deposits).

**Keywords:** Zn-Pb deposit, Nonsulphide ore, Supergene, Smithsonite, SEDEX, Ab-Bagh, Shahreza.

For Persian Version see pages 249 to 264

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