

شواهد گسلش همزمان با رسوب‌گذاری و محیط تشکیل احیایی در کانسار روی و سرب تپ رسوبی - برون‌دمی آب‌باغ، جنوب شهرضا، پهنه سندج - سیرجان

مهدی موحدنیا^۱، ابراهیم راستاد^۲، عبدالرحمان رجبی^۳ و فرانسیسکو زاویر گونزالز سانز^۴

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

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

^۳استادیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۴محقق، بخش زمین‌شناسی دریایی، سازمان زمین‌شناسی اسپانیا، مادرید، اسپانیا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۲۷

چکیده

کانه‌زایی روی - سرب تپ رسوبی - برون‌دمی آب‌باغ در جنوب خاوری‌ترین بخش کمربند فلززایی ملایر - اصفهان، در توالی رسوبی آواری - کربناته ژوراسیک بالایی - کرتاسه زیرین و کربناته کرتاسه زیرین در دو افق کانه‌زایی با جایگاه چینه‌ای متفاوت تشکیل شده است. در افق ۱ کانه‌زایی روی - سرب با سنگ میزبان شیل و سیلستون سیاه حاوی مواد آلی با سن ژوراسیک بالایی - کرتاسه زیرین به شکل گوه‌ای کشیده و در افق ۲ کانه‌زایی سرب و روی، با سنگ میزبان آهنی به سن کرتاسه زیرین به صورت هم‌روند با سنگ میزبان و به شکل عدسی تشکیل شده است. گسل‌های همزمان با رسوب‌گذاری، حوضه‌های نیمه‌گرانی و محیط‌های احیایی حاصل از فعالیت این گسل‌ها در تشکیل کانسار روی و سرب تپ رسوبی - برون‌دمی آب‌باغ و ته‌نشست سولفیدها نقش اساسی داشته‌اند. جریان‌های واریزه‌ای و برش‌های همزمان با رسوب‌گذاری در سنگ میزبان کانه‌زایی و تغییر ضخامت واحدهای چینه‌ای در امتداد گسل همزمان با رسوب‌گذاری در کانسار آب‌باغ نشان‌دهنده گسلش نرمال در زمان رسوب‌گذاری و تشکیل حوضه‌های نیمه‌گرانی در محل کانسار است. تشکیل ساختارهای نیمه‌گرانی، یکی از عوامل اصلی کنترل‌کننده شرایط اکسایش - کاهش محیط تشکیل کانسار است که موجب ایجاد بسترهای عمیق‌تر درون حوضه شده و شرایط بدون اکسیژن درون این نیمه‌گرانی‌ها را گسترش و توسعه داده است. بررسی ژئوشیمی عناصر کمیاب و نادر خاکی سنگ میزبان، اندازه پیریت‌های فرموبیدال و حضور مواد آلی در سنگ میزبان افق‌های کانه‌دار کانسار آب‌باغ، بیانگر شرایط Anoxic و Euxinic در این حوضه است که توسط عمق زیاد حاصل از گسل‌های نرمال همزمان با رسوب‌گذاری و فعالیت‌های باکتریایی ایجاد شده است. مقایسه شواهد گسل نرمال همزمان با رسوب‌گذاری و همچنین محیط ته‌نشست احیایی کانسار آب‌باغ با سایر کانسارهای تپ رسوبی - برون‌دمی ایران حاکی از شباهت محیط تشکیل کانسار آب‌باغ با این کانسارهاست.

کلیدواژه‌ها: کانسار روی و سرب، رسوبی - برون‌دمی، گسل همزمان با رسوب‌گذاری، شرایط اکسایش - کاهش، آب‌باغ، کمربند فلززایی ملایر - اصفهان.

E-mail: rastad@modares.ac.ir

*نویسنده مسئول: ابراهیم راستاد

۱- پیش‌نوشتار

کنترل‌کننده مهم کانه‌زایی، در کانسارهای روی و سرب تپ رسوبی - برون‌دمی با سنگ میزبان شیلی و رسوبی - برون‌دمی جان‌شینی کربناته زیر کف دریا (Sub-seafloor replacement SEDEX) به شمار می‌رود (Wilkinson et al., 2005; Wilkinson, 2014).

بررسی‌های ژئوشیمیایی در محیط‌های رسوبی دگرگون نشده، با حذف تأثیر هوازدگی، در تعیین شرایط محیط ته‌نشست کانسارها، نوع حوضه رسوبی و بررسی‌های مربوط به ژنتز کانسار از اهمیت خاصی برخوردار است. همچنین ویژگی‌های محیط رسوبی و شرایط اکسایش - کاهش حاکم بر آن، نقش اساسی در تشکیل و حفظ شدن کانسارهای روی و سرب رسوبی - برون‌دمی دارد (Betts et al. 2003; Goodfellow and Lydon, 2007). در این پژوهش شواهد رخداد گسل همزمان با رسوب‌گذاری و نقش آن در کانه‌زایی و تشکیل محیط بدون اکسیژن در کانسار تپ رسوبی - برون‌دمی آب‌باغ (موحدنیا، ۱۳۹۴) و همچنین شواهد محیط احیایی ته‌نشست کانسنگ سولفیدی در این کانسار مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. کانسار آب‌باغ در ۲۰ کیلومتری جنوب شهرضا و در جنوب استان اصفهان واقع شده است که در این معدن، آثاری از معدنکاری قدیمی، تونل‌های استخراجی و روباره‌های ذوب محدودی جهت استخراج سرب مشاهده می‌شود. هم‌اکنون این کانسار به صورت معدن فعال بوده و فعالیت استخراجی بخش سولفیدی در بخش باختری کانسار به صورت روباز در حال انجام است. بدیهی است تشخیص گسل‌های همزمان با رسوب‌گذاری در شرایط مشابه کانسار آب‌باغ، می‌تواند کلیدی جهت اکتشاف این نوع از ذخایر باشد.

کانسارهای روی و سرب رسوبی - برون‌دمی SEDEX در محیط‌های زمین‌ساختی کشتی شامل حوضه‌های رسوبی محیط‌های ریفتی درون‌قاره‌ای ناقص، حوضه‌های ریفتی حاشیه قاره‌ای (Large, 1980; Lydon, 1996; Leach et al., 2005; Wilkinson, 2014) و حوضه‌های ریفتی پشت قوسی (McClay and Bidwell, 1986; Ziegler, 1990; Betts et al., 2003; Large et al., 2005; Leach et al., 2005; Goodfellow, 2007; Mueller, 2008; Wilkinson, 2014) تشکیل می‌شوند که حوضه‌های کشتی مذکور توسط گسل‌های فرعی کشتی به زیرحوضه‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شوند که در این زیرحوضه‌ها، به دلیل عمق زیاد، مواد آلی می‌توانند در ستون آب تجمع پیدا کنند و موجب ایجاد محیط بی‌هوازی شوند (Lyons et al., 2006). کانسارهای رسوبی - برون‌دمی عموماً دارای ارتباط مستقیم با گسل‌های همزمان با رسوب‌گذاری هستند و کانه‌زایی به صورت شاخص در کمربالایی گسل همزمان با رسوب‌گذاری تشکیل می‌شود (Goodfellow and Lydon, 2007; Wilkinson, 2014). این گسل‌ها محل اصلی عبور سیالات کانه‌زا در کانسارهای روی و سرب تپ رسوبی - برون‌دمی هستند. در این تپ از کانسارهای روی و سرب، سنگ‌های رسوبی خرد و برشی شده به صورت محلی حضور دارند که این برش‌ها در ارتباط با گسلش نرمال همزمان با رسوب‌گذاری هستند (Goodfellow, 2007; Wilkinson, 2014). خردشدگی سنگ‌های رسوبی شامل جریان‌های واریزه‌ای، برش‌های چینه‌سان محدود به یک لایه، کنگلومرا و جریان‌های گلی هستند. فرایند خردشدگی ناشی از گسل همزمان با رسوب‌گذاری می‌تواند هم در سنگ‌های میزبان ماده معدنی و هم در سنگ‌های بخش زیرین افق ماده معدنی صورت گیرد (Leach et al., 2005). گسلش نرمال همزمان با رسوب‌گذاری به عنوان یک

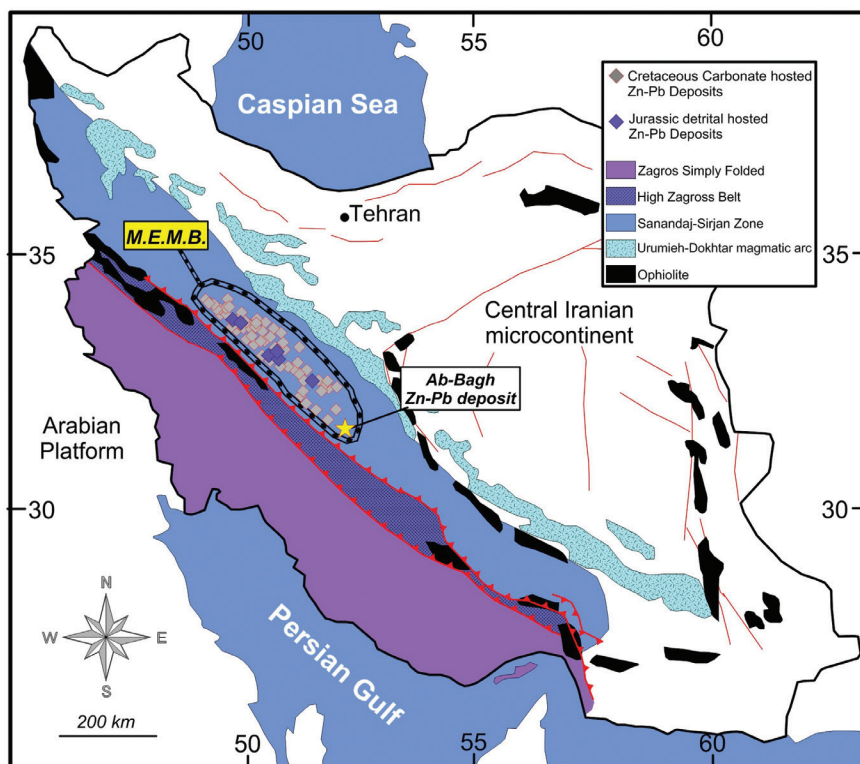
۲- روش پژوهش

است (شکل ۱)، سنگ‌های آواری ژوراسیک فوقانی و کربناته کرتاسه زیرین در ایالت فلززایی ملایر- اصفهان، میزان تعداد قابل توجهی کانسار روی و سرب است. در حال حاضر معادن بزرگی همچون مجموعه معدنی ایرانکوه، معدن عمارت، معدن آهنگران و معدن آب‌باغ در حال فعالیت هستند (Momenzadeh, 1976; Rajabi et al., 2012; Movahhednia et al., 2015). پیدایش و توسعه پهنه سندج- سیرجان به زایش اقیانوس نوتیس در پرمین و از بین رفتن آن در اثر همگرایی و برخورد صفحات عربستان و ایران در طول کرتاسه تا ترشیری مربوط می‌شود (Mohajjel et al., 2003; Agard et al., 2005; Ghasemi and Talbot, 2005). مطالعات اخیر نشان داده است که پهنه سندج- سیرجان در اثر رشد پیوسته چند کمان ماگمایی از تریاس تا کرتاسه شکل گرفته است (Khalaji et al., 2007; Arvin et al., 2007)؛ به گونه‌ای که در محیط کششی پشت کمان حاصل از این کمان ماگمایی، کانسارهای روی و سرب کمرند فلززایی ملایر- اصفهان، تشکیل شده‌اند (Rajabi et al., 2012; Mohajjel and Fergusson, 2014; Movahhednia et al., 2015). کانسار روی و سرب تیپ برون‌دمی- رسوبی آب‌باغ در بخش میانی پهنه سندج- سیرجان و منتهی‌الیه جنوب خاوری کمرند فلززایی ملایر- اصفهان (شکل ۱) و در توالی رسوبی تخریبی- کربناته ژوراسیک بالایی- کرتاسه زیرین و کربناته کرتاسه زیرین در دو افق کانه‌دار با جایگاه چینه‌ای متفاوت (شکل ۲) تشکیل شده است (Movahhednia et al., 2017).

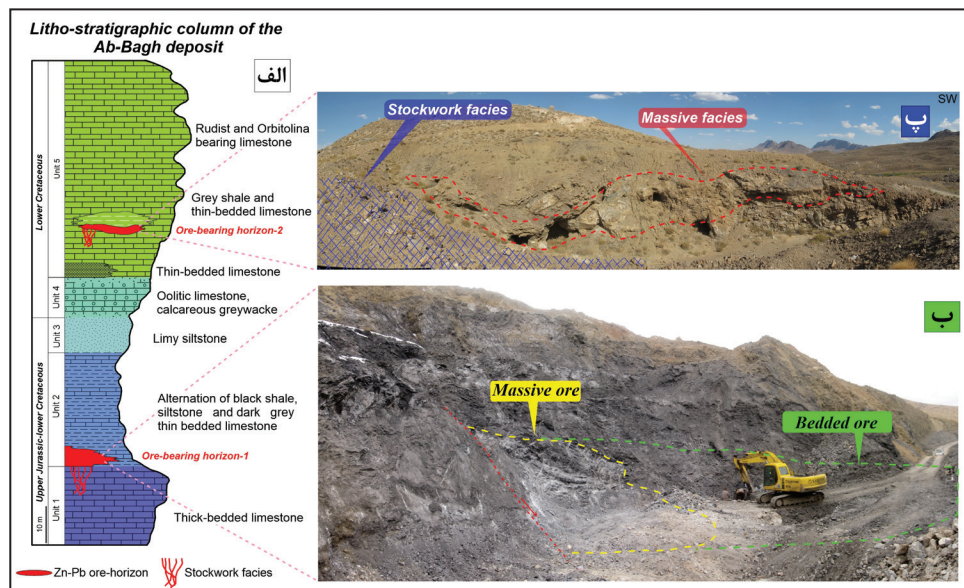
برای مطالعه ویژگی‌های افق‌های کانه‌زایی کانسار آب‌باغ و خصوصیات گسل همزمان با رسوب‌گذاری، برش‌های متعدد زمین‌شناسی تهیه و مغزه‌های حفاری ۷ گمانه بررسی شد. به منظور تهیه مقاطع میکروسکوپی، آزمایش‌های مربوط به تجزیه سنگ میزان بدون کانه‌زایی و کانسنگ سولفیدی، نمونه‌برداری سیستماتیک صورت گرفت. ۱۴ مقطع نازک و ۲۲ مقطع نازک- صیقلی، جهت مطالعات میکروسکوپی سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت ماده معدنی سولفیدی، در آزمایشگاه تهیه مقاطع میکروسکوپی دانشگاه تربیت مدرس تهیه شد. به منظور اندازه‌گیری اندازه فرمبویدهای پیریت، ۳ مقطع میکروسکوپی نازک- صیقلی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM در آزمایشگاه محیط‌زیست کرونو دانشگاه فرانش کونته فرانسه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اهمیت ژئوشیمی سنگ میزان جهت بررسی شرایط اکسیداسیون- احیا در زمان تشکیل سنگ، از نمونه‌های مغزه‌های حفاری و غیره‌ها برای انجام تجزیه شیمیایی استفاده شد. از سنگ میزان فاقد کانه‌زایی و غیردگرسان هر افق، ۴ نمونه انتخاب شد. نمونه‌های سنگ میزان پس از نمایش، با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت شده ICP-MS در آزمایشگاه زرآزما مورد تجزیه قرار گرفت.

۳- زمین‌شناسی و کانه‌زایی

ایالت فلززایی ملایر- اصفهان در بخش میانی پهنه سندج- سیرجان واقع شده



شکل ۱- نقشه پهنه‌های ساختاری باختر ایران و کوهزاد زاگرس (Alavi, 1991؛ آقائباتی، ۱۳۸۳) و موقعیت کمرند فلززایی ملایر- اصفهان در پهنه سندج- سیرجان (Momenzadeh, 1976; Rajabi et al., 2012) و کانسار آب‌باغ در جنوب خاوری ترین بخش آن (کمرند فلززایی ملایر- اصفهان: M.E.M.B.).



شکل ۲- الف) ستون چینه‌شناسی کانسار آب‌باغ و موقعیت افق‌های معدنی در آن؛ ب) نمایی از رخنمون افق کانه‌زایی ۱ و موقعیت رخساره‌های کانسنگی مختلف در آن؛ پ) رخنمون افق کانه‌زایی ۲ و موقعیت رخساره‌های کانسنگی رگه-رگچه‌ای و توده‌ای در آن.

مرز واحد ۱ چینه‌ای با توالی آواری-کربناته کمربالا (واحد ۲) در بخش‌هایی گسلی بوده و بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، نوع گسل نرمال است و در امتداد گسل آواری از جریانات واریزه همزمان با رسوب‌گذاری Syndimentary debris flow و برش‌های همزمان با رسوب‌گذاری (شکل ۳) دیده می‌شود که نشان‌دهنده گسلش نرمال در زمان رسوب‌گذاری و فرونشست حوضه رسوبی در زمان تشکیل رسوبات است (Leach et al., 2005; Wilkinson, 2014).

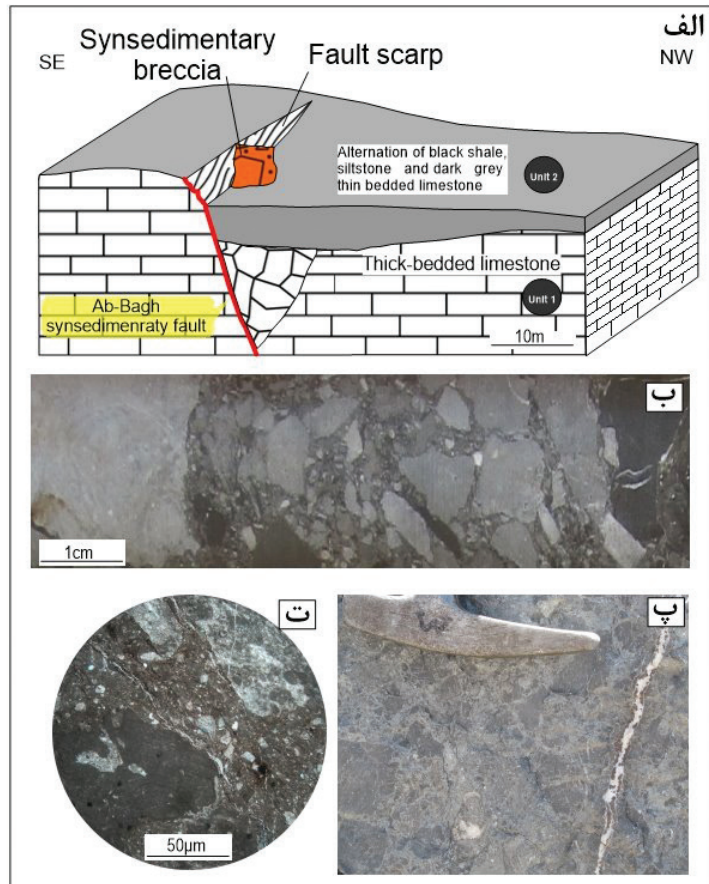
مطالعه گمانه‌های حفاری نشان‌دهنده بالا بودن میزان و شدت این برش‌ها و جریانات واریز در محل گسل نرمال همزمان با رسوب‌گذاری است که با فاصله گرفتن از گسل همزمان با رسوب‌گذاری، مقدار این برش‌ها کاهش می‌یابد. بر اساس مطالعات میکروسکوپی در این بخش‌های برشی و جریاناتی، جنس قطعات و ماتریکس یکسان بوده و عمدتاً متشکل از میکرایت است (شکل ۳). برش‌های مذکور در اغلب کانسارهای رسوبی-بروندمی نظیر Tom (Goodfellow and Rhodes, 1990) Janson (Turner, 1990) و HYC (Large et al., 2001) نیز گزارش شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است؛ ضخامت واحد میزان ماده معدنی در افق ۱، بیانگر تغییر ضخامت این واحد از محل رخساره کانسنک سولفید توده‌ای به سمت رخساره لایه‌ای و بخش‌های حاشیه‌ای است. علاوه بر اینکه تغییر ضخامت، شاهدهی بر گسلش نرمال همزمان با رسوب‌گذاری (Goodfellow, 1984; Large et al., 2005) و نشان‌دهنده نقش ساختارهای نیمه‌گرانی ناشی از فعالیت گسل نرمال در ایجاد این تغییر ضخامت و شکل‌گوه‌ای واحد میزان نیز است (Dunster and McConachie, 1998; Lindsay, 2001; Betts and Lister, 2002). ساختار زمین‌شناسی نیمه‌گرانی فقط از یک طرف به گسل ختم می‌شود و فقط بخش کمربالای گسل نرمال، به سمت پایین حرکت می‌کند (شکل ۸). تشکیل ساختارهای نیمه‌گرانی، یکی از عوامل اصلی کنترل‌کننده شرایط اکسایش-کاهش محیط تشکیل کانسار است که موجب ایجاد بسترهای عمیق‌تر درون حوضه رسوبی می‌شود و شرایط بدون اکسیژن یا احیایی داخل این نیمه‌گرانی‌ها حاکم است و مواد آلی همراه با ته‌نشست سنگ میزان، تشکیل می‌شوند (Large et al., 2005; Betts et al., 2003).

افق ۱ کانه‌زایی روی-سرب با سنگ میزان شیل و سیلتستون سیاه حاوی مواد آلی با سن ژوراسیک بالایی-کرتاسه زیرین به شکل گوه‌های کشیده و در مجاورت گسل نرمال همزمان با رسوب‌گذاری رخ داده است که بر اساس ماهیت کانه‌زایی سولفیدی، بافت و کانی‌شناسی سولفیدها، می‌توان سه رخساره سولفیدی رگه-رگچه‌ای، کانسنک توده‌ای و کانسنک لایه‌ای را در این افق از هم تشخیص داد (شکل ۲-پ). افق ۲ کانه‌زایی سرب و روی کانسار آب‌باغ با سنگ میزان آهکی به سن کرتاسه زیرین به صورت همروند با سنگ میزان و در بخش زیرین به صورت رگه-رگچه‌ای رخ داده است (شکل ۲-ت). برخلاف افق ۱، کانه‌زایی در این افق، به دلیل تأثیر فرایندهای هوازدگی، عمدتاً به صورت کانی‌های غیرسولفیدی مشاهده می‌شود (موحدنیا و همکاران، ۱۳۹۶). بر اساس موحدنیا (۱۳۹۴) افق ۱ کانسار آب‌باغ را می‌توان در رده کانسارهای بروندمی-رسوبی نزدیک به محل دهانه بروندم (Vent proximal SEDEX deposit) (Goodfellow and Laydon, 2007; Goodfellow, 2004; Large et al., 2004;) در نظر گرفت. افق ۲ کانسار آب‌باغ در رده کانسارهای رسوبی-بروندمی جانشینی با میزان کربناته (Carbonate replacement SEDEX deposit) (Cooke et al., 2000) شبیه کانسارهای Anarraaq در حوضه Red Dog و ایرلندی (Wilkinson et al., 2005) است (Wilkinson, 2014; Kelley et al., 2004).

۴- شواهد گسل همزمان با رسوب‌گذاری

ترسیم نقشه‌های زیرسطحی حاصل از مطالعه مغزه‌های گمانه‌های حفاری و برش‌های طولی کانسار آب‌باغ، نشان‌دهنده گسترش کانه‌زایی از محل گسل همزمان با رسوب‌گذاری است (موحدنیا، ۱۳۹۴). بررسی منطقه‌بندی ژئوشیمیایی کانسار آب‌باغ بیانگر جهت جریان سیال کانه‌زا از این گسل‌ها (به‌عنوان تغذیه‌کننده سیستم) به سمت بخش‌های حاشیه‌ای است (موحدنیا، ۱۳۹۴). همچنین کانه‌زایی در مجاورت گسل ضخامت بیشتری دارد. این شواهد نشان‌دهنده عملکرد این گسل‌ها به‌عنوان زون تغذیه‌کننده در کانسارهای رسوبی-بروندمی است؛ به‌طوری‌که فعالیت زمین‌ساختی همزمان با رسوب‌گذاری این گسل‌ها موجب برشی شدن سنگ‌ها و ایجاد معابر مناسب جهت صعود سیالات به کف حوضه رسوبی شده است (Logan et al., 1990; Lydon, 1996; Large et al., 2004; Goodfellow, 2004; Goodfellow and Lydon, 2007; Wilkinson, 2014).



شکل ۳- الف) مقطع شماتیک از واحدهای سنگی ۱ و ۲ و موقعیت گسل همزمان با رسوب‌گذاری آب‌باغ و برش‌ها همزمان با رسوب‌گذاری و جریان واریزه در مجاورت گسل همزمان با رسوب‌گذاری. ب و پ) نمایی از نمونه دستی جریان‌های واریزه‌ای همزمان با رسوب‌گذاری؛ ت) نمای میکروسکوپی جریان واریزه‌ای که قطعات و زمینه فقط از لحاظ اندازه دانه‌ها با یکدیگر اختلاف دارند (قطعه میکرایتی توسط زمینه دانه‌ریز احاطه شده است).

۵-۱. ژئوشیمی سنگ میزبان ماده معدنی

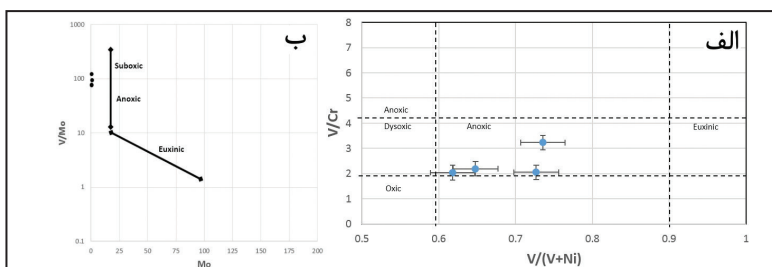
بررسی ترکیب ژئوشیمیایی عناصر فرعی و نادر خاکی سنگ میزبان، اطلاعات مفیدی را در خصوص شرایط اکسیداسیون و احیای محیط ته‌نشست فراهم می‌آورد. تعیین شرایط اکسیداسیون- احیای دیرینه در شیل‌ها با استفاده از بررسی‌های ژئوشیمیایی چندعنصری سنگ بسیار پیچیده است؛ هیچ روش تحلیلی یک‌جانبه‌ای برای اندازه‌گیری دقیق شرایط اکسایشی- کاهش‌ی دیرینه برای شیل‌ها وجود ندارد. ولی با استفاده از نسبت‌گیری چندعنصری، می‌توان در مورد شرایط اکسایشی- کاهش‌ی دیرینه قضاوت کرد (Spinks et al., 2016). با توجه به جنس سنگ میزبان افق‌های کانه‌دار کانسار آب‌باغ، در این بخش با استفاده از ژئوشیمی سنگ میزبان، شرایط اکسیداسیون- احیای محیط ته‌نشست هر کدام از دو افق، جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.

در رسوبات تخریبی دانه‌ریز می‌توان از نسبت عناصر $V/(V+Ni)$ و V/Cr برای تعیین شرایط اکسیدی محیط استفاده کرد (Calvert and Pedersen, 1993; Jones and Manning, 1994; Hoffman et al., 1998; Sáez et al., 2011). نسبت این عناصر در واحد میزبان کانه‌زایی در افق ۱ (جدول ۱)، بیانگر حاکم بودن شرایط Anoxic بر محیط رسوبی میزبان این افق است (شکل ۴).

۵-۲. شواهد محیط احیایی ته‌نشست کانسار

محیط‌های رسوبی دریایی را از نظر محتوای اکسیژن موجود در آب، می‌توان به ۵ دسته تقسیم کرد (Hallberg, 1974; Gerlach, 1994; Bond and Wignall, 2010): الف) محیط‌های Euxinic که فاقد اکسیژن و معرف محیط‌های رسوبی کاملاً احیایی هستند؛ ب) محیط‌های Anoxic که شامل محیط‌های فاقد اکسیژن تا با اکسیژن بسیار کم و با شرایط احیایی هستند؛ پ) محیط‌های Lower dysoxic شامل محیط‌های با اکسیژن بسیار کم که نسبت به محیط‌های anoxic کمی اکسیدان و با این وجود معرف شرایط احیایی هستند؛ ت) محیط‌های Upper dysoxic که به محیط‌های با اکسیژن کم گفته می‌شود؛ ث) محیط‌های Oxidic که شامل محیط‌های با اکسیژن زیاد است.

همان‌گونه که اشاره شد؛ شرایط زمین‌ساختی کششی و گسترش ساختارهای نیمه‌گرانی، موجب گسترش محیط‌های Anoxic و Euxinic می‌شود و شرایط را برای تشکیل کانسارهای رسوبی- برون‌دمی مساعد می‌کند. بررسی شرایط دیرینه اکسایش- کاهش محیط رسوبی را می‌توان با استفاده از شواهد مختلف از جمله ژئوشیمی سنگ میزبان، اندازه‌گیری پیریت‌های فرموبیدال و حضور مواد آلی بررسی کرد که در ادامه، این شواهد در کانسار آب‌باغ مورد بحث قرار خواهد گرفت:



شکل ۴- الف) نمودار V/Cr در برابر $V/(V+Ni)$ و موقعیت نمونه‌های سیلتستون افق اول کانسار آب‌باغ در آن؛ ب) نمودار تغییرات V/Mo در برابر $V/(V+Ni)$ برای نمونه‌های سنگ میزبان افق ۱ کانسار آب‌باغ (طرح نمودار با تغییرات از Piper and Calvert, 2009; Xu et al., 2012; Spinks et al., 2016).

جدول ۱- مقادیر و نسبت‌های عناصر حساس به شرایط اکسیداسیون- احیا در نمونه‌های سنگ میزبان شیلی افق ۱ کانه‌زایی.

	Cr	Ni	Mo	V	V/Cr	V/(V+Ni)	V/Mo
SR2-1	27.2	34	0.7	55	2.03	0.61	78.57
SR2-2	21.1	25	0.6	46	2.19	0.64	76.66
SR2-3	50.6	39.1	1.1	104	2.05	0.72	94.54
SR2-4	30.7	35.6	0.8	99	3.23	0.73	123.75

میزبان افق ۲ کانسار آب‌باغ (جدول ۲)، نشان‌دهنده ته‌نشست این رسوبات در محیط فقیر از اکسیژن است (شکل ۵).

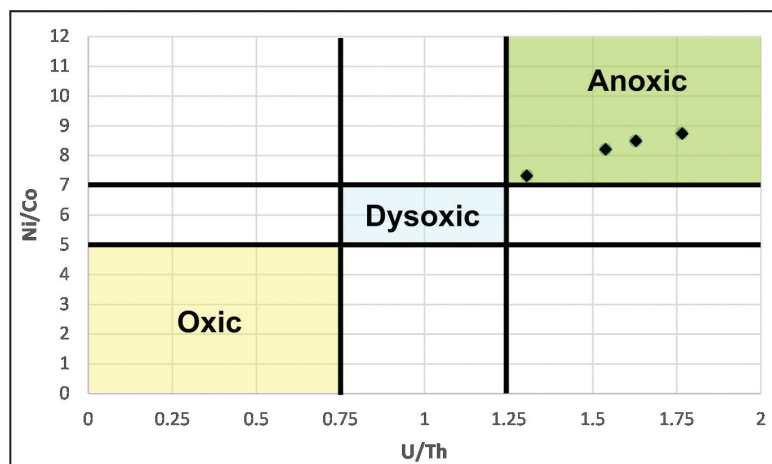
۵-۲. اندازه پیریت‌های فرموبیدال

تجزیه و تحلیل اندازه پیریت‌های فرموبیدال در رسوبات دریایی می‌تواند به‌عنوان یک شاخص قابل اعتماد در تعیین شرایط اکسایش-کاهش ته‌نشست رسوبات جدید و قدیمی مورد استفاده قرار گیرد (Wilkin et al., 1996; Wilkin and Barnes, 1997; Wignall and Newton, 1998). پیریت‌های فرموبیدال شاخص محیط‌های رسوبی با اکسیژن پایین یا فاقد اکسیژن هستند (Raiswell and Berner, 1985; Wignall et al., 2005) که می‌توانند در مراحل نخست دیاژنز اولیه رشد کنند (Wilkin et al., 1996). اما این رشد تابعی از شرایط احیایی و محتوای اکسیژن موجود در محیط است (Wilkin et al., 1996; Wilkin and Barnes, 1997) که به واسطه احیای سولفات آب دریا توسط باکتری‌ها (BSR) روی می‌دهد (Goldberg et al., 2007). در شرایط euxinic که H_2S به‌صورت آزاد در محیط وجود دارد؛ پیریت‌های فرموبیدال همراه با پیریت‌های مکعبی ریزدانه در ستون آب تشکیل می‌شوند و در کف حوضه ته‌نشست می‌یابند. اما اندازه آنها بیشتر از ۵ تا ۶ میکرون نخواهد بود (Wilkin et al., 1996). اما در محیط‌های dysoxic که حاوی میزان کمی اکسیژن هستند؛ فراموبیدها در رسوبات سطحی تشکیل می‌شوند و می‌توانند رشد کنند.

البته باید در استفاده از این نمودار توجه داشت که واندیم ممکن است تحت تأثیر آب‌های جوی از محیط خارج شود و موقعیت نسبت عناصر $V/(V+Ni)$ و V/Cr نمونه‌ها را در نمودار به سمت محیط‌های اکسیدان منحرف سازد. لذا می‌توان گفت محیط‌های تعیین شده به کمک این روش، عمدتاً کمی احیایی‌تر از آنچه هستند که نشان داده می‌شود (Sáez et al., 2011).

تحت شرایط احیایی (Anoxic)، واندیم می‌تواند در رسوب متمرکز شود که این تمرکز عمدتاً با جذب به‌وسیله کانی‌های رسی و مواد آلی صورت می‌گیرد (Xu et al., 2012). مولیدن می‌تواند تنها تحت شرایط Euxinic در رسوب متمرکز یابد (Crusius et al., 1996). بنابراین نسبت بالای V/Mo در رسوبات، اشاره به ته‌نشست در شرایط Anoxic دارد؛ در حالی که نسبت پایین در رسوبات و غنی‌شدگی مولیدن حاکی از ته‌نشست در شرایط Euxinic است (Piper and Calvert, 2009). بررسی محتوای واندیم و مولیدن، همان‌طوری که در شکل ۴ مشخص شده است؛ در نمونه‌های سنگ میزبان فاقد کانه‌زایی در افق ۱ کانسار آب‌باغ، نشان از محیط Anoxic ته‌نشست سنگ میزبان دارد.

بررسی نسبت‌های U/Th و Ni/Co در سنگ‌های کربناته می‌تواند در تعیین شرایط اکسایش-کاهش محیط ته‌نشست رسوبات مورد استفاده قرار گیرد، که در شرایط فقیر از اکسیژن، مقادیر نسبت Ni/Co بیشتر از ۷ و نسبت U/Th بیشتر از ۱/۲۵ است (Jones and Manning, 1994). بررسی مقادیر این عناصر در نمونه‌های سنگ



شکل ۵- نمودار Ni/Co در برابر U/Th (Jones and Manning, 1994) و موقعیت نمونه‌های سنگ میزبان کربناتی افق دوم کانسار آب‌باغ در آن.

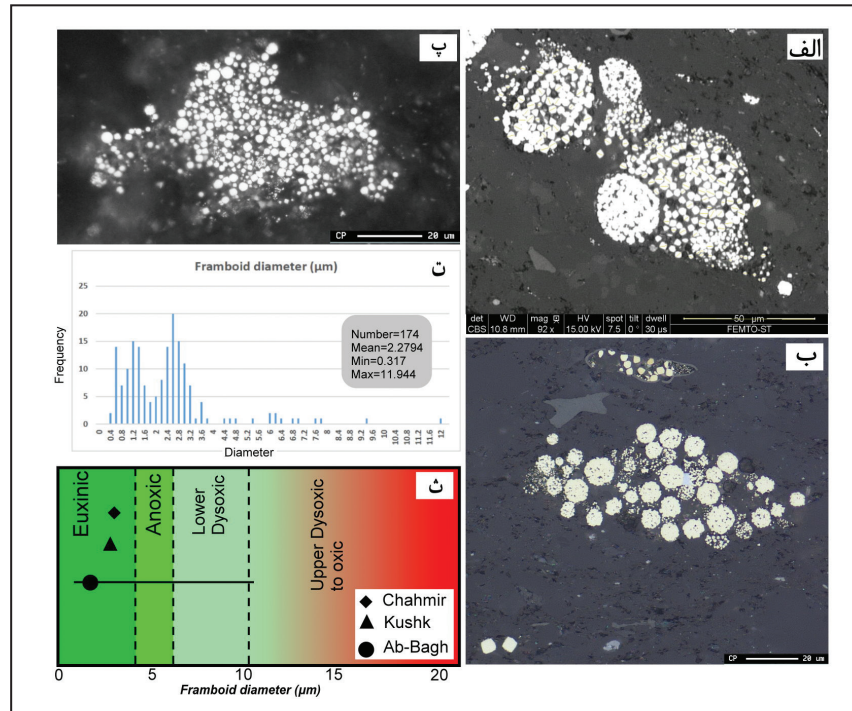
جدول ۲- مقادیر و نسبت‌های عناصر حساس به شرایط اکسیداسیون- احیا در نمونه‌های سنگ میزبان کربناتی افق ۲ کانه‌زایی.

	Th	U	U/Th	Ni	Co	Ni/Co
SR5-1	0.43	0.7	1.62	34	4	8.5
SR5-2	0.46	0.6	1.30	22	3	7.3۳
SR5-3	0.34	0.6	1.76	21	2.4	8.75
SR5-4	0.52	0.8	1.53	23	2.8	8.21

۲/۲۷ میکرون و بیشترین فراوانی مربوط به پیریت‌هایی با قطر ۲/۴ تا ۳/۲ میکرون است که بر اساس روش Bond and Wingall (2010) محیط محلی تشکیل آنها Euxinic و Anoxic است. اندازه فرامبویدهای پیریت در کانسار آب‌باغ با کانسارهای تیپ رسوبی -بروندمی حوضه زیرگان -چاه میر (Rajabi et al., 2015) مورد مقایسه قرار گرفت؛ که اندازه فرامبویدهای پیریت کانسارهای چاه میر و کوشک نیز همانند کانسار آب‌باغ در محدوده فقیر از نظر اکسیژن (Euxinic) قرار می‌گیرند (شکل ۶).

تعیین اندازه پیریت‌های فرامبویدهال می‌تواند شاخصی برای تعیین شرایط ژئوشیمیایی محیط میزبان کانسار باشد. با آنالیز اندازه پیریت‌های فرامبویدهال در کانسار آب‌باغ با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، شرایط ژئوشیمیایی محیط میزبان کانه‌زایی به صورت دقیق مشخص شد. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص شده است؛ اندازه‌گیری قطر روی ۱۷۴ نمونه پیریت فرامبویدهال صورت پذیرفت و بر این اساس هیستوگرام فراوانی اندازه آنها رسم شد. به‌طور میانگین قطر پیریت‌های فرامبویدهال

شکل ۶- الف) تصویر BSE پیریت‌های فرامبویدهال افق ۱ کانسار آب‌باغ که دانه‌های اندازه‌گیری شده با خطوط زرد مشخص شده‌اند؛ ب) تصویر نور انعکاسی پیریت‌های فرامبویدهال افق ۱؛ پ) تصویر BSE پیریت‌های فرامبویدهال افق ۲؛ ت) هیستوگرام اندازه پیریت‌های فرامبویدهال کانسار آب‌باغ؛ ث) تقسیم‌بندی محیط‌های رسوبی بر اساس محتوی اکسیژن (Bond and Wignall, 2010) و موقعیت نمونه‌های کانسارهای آب‌باغ، کوشک و چاه میر در آن (رجبی، ۱۳۹۱).



روی و سرب بروندمی - رسوبی در دو زمان تشکیل شده‌اند. کانسارهایی همچون چاه میر، کوشک و زیرگان در بلوک طیس - پشت بادام (Rajabi et al., 2015)، کانسار هفت‌هر در بلوک یزد در زمان کامبرین و کانسارهای مهدی‌آباد، فرح‌آباد و منصورآباد (قاسمی، ۱۳۸۵؛ مغفوری، ۱۳۹۵؛ مغفوری و همکاران، ۱۳۹۵) در زمان کرتاسه زیرین در بلوک یزد تشکیل شده‌اند. کانسارهایی که در بخش میانی پهنه سندانج - سیرجان واقع شده‌اند؛ توسط سنگ‌های آواری - کربناته کرتاسه زیرین و آواری ژوراسیک میزبانی می‌شوند که از جمله آنها می‌توان به مجموعه کانسارهای ایرانکوه (بویری، ۱۳۹۵؛ Rastad, 1981)، انجیره - تیران (Yarmohammadi et al., 2016)، کوه کلنگه (پیرنجم‌الدین و همکاران، ۱۳۹۷)، حسین‌آباد و هفت‌سواران (محمودی و همکاران، ۱۳۹۳) و آب‌باغ (موحدنیا، ۱۳۹۴) اشاره کرد.

رخداد گسل‌های همزمان با رسوب‌گذاری و نقش آن در کانه‌زایی در اغلب کانسارهای تیپ رسوبی - بروندمی کمربند فلززایی ملایر - اصفهان مورد بررسی قرار گرفته است. در کانسار تپه‌سرخ، گسل همزمان با رسوب‌گذاری توسط ناکینی (۱۳۹۲) و بویری و همکاران (۱۳۹۴) بررسی شده است (جدول ۳). در این منطقه، گسل گوشفیل - باغ ابریشم به‌عنوان گسل نرمال همزمان با رسوب‌گذاری معرفی و رخداد برش‌های همزمان با رسوب‌گذاری در مجاورت آن به‌صورت بارز گزارش شده است. بررسی ژئوشیمی عناصر جزئی سنگ میزبان کانه‌زایی در منطقه معدنی ایرانکوه (جدول ۴) نیز حاکی از تنه‌نشست این رسوبات در یک محیط فقیر از اکسیژن دارد (بویری، ۱۳۹۵).

در کانسارهای منطقه انجیره - تیران، شواهد گسلش همزمان با رسوب‌گذاری اعم از برش‌های همزمان با رسوب‌گذاری، جریانات واریزه‌ای و تغییر ضخامت واحدهای کمربلای گسل نرمال (جدول ۳) گزارش شده‌اند (Yarmohammadi et al., 2016).

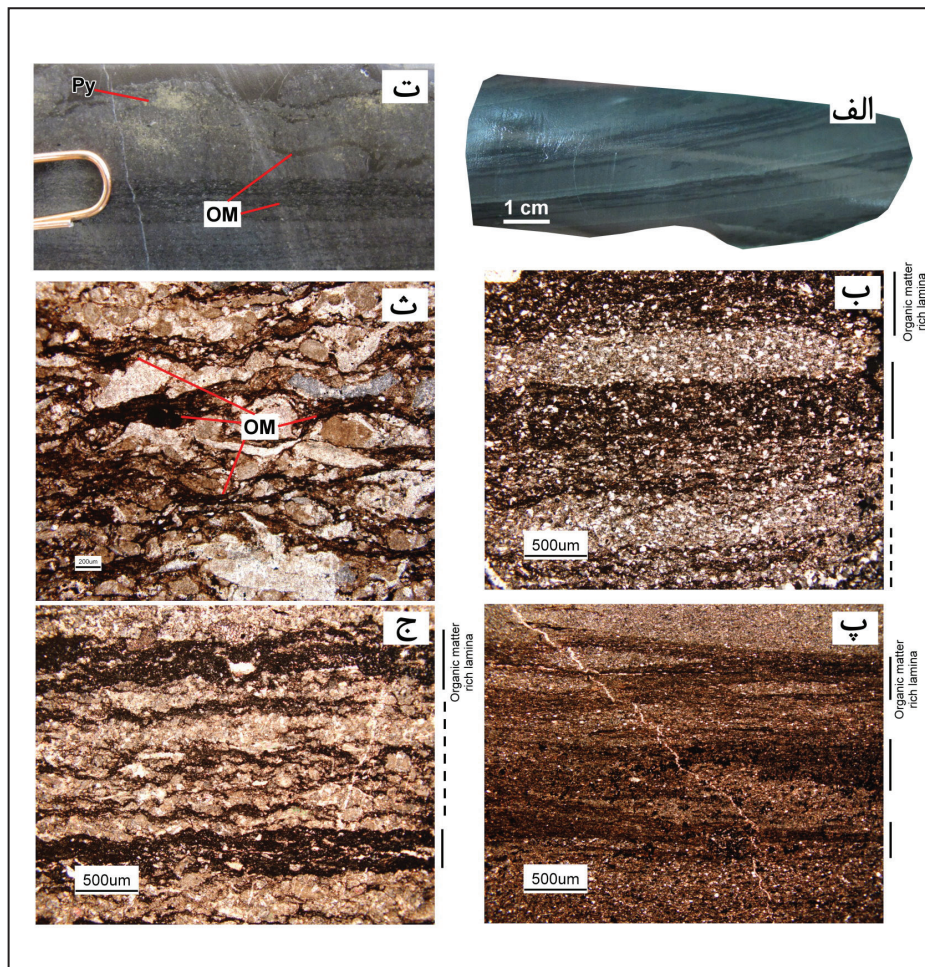
۳-۵. حضور مواد آلی

سنگ‌های شیلی و کربناتی غنی از مواد آلی، پتانسیل بالقوه‌ای برای میزبانی کانسارهای تیپ رسوبی - بروندمی دارند (Wilkinson, 2014; Spinks et al., 2016). در بسیاری از محیط‌های رسوبی، مواد آلی در سطح رسوبات تجزیه می‌شوند و از بین می‌روند و لیکن اگر نرخ تولید مواد آلی زیاد باشد؛ مواد آلی می‌توانند باقی بمانند. چنانچه چرخش آب تا حدی محدود بوده؛ اکسیژن کافی به رسوبات کف برای تجزیه مواد آلی نرسیده و شرایط anoxic تا euxinic در حوضه حاکم باشد؛ در آن صورت شرایط برای تجمع مواد آلی مطلوب خواهد بود (Tucker, 1994; Cooke et al., 2000). در کانسارهای رسوبی - بروندمی، عملکرد گسل‌های همزمان با رسوب‌گذاری و شرایط کشتی موجب افزایش عمق حوضه و تسهیل رسوب‌گذاری مواد آلی همراه با تنه‌نشست سنگ‌های رسوبی می‌شود (Spinks et al., 2016). بر اساس Tucker (1994) با توجه به رنگ تیره و غنی بودن سنگ میزبان افق‌های کانه‌دار کانسار آب‌باغ (شکل ۷) از پیریت، این رسوبات در یک محیط ضعیف از نظر چرخش آب، درجه بالای حفظ مواد آلی و شرایط بی‌هوازی تشکیل شده‌اند. حضور مواد آلی در سنگ میزبان کانسارهای چاه میر و کوشک (رجبی، ۱۳۹۱)، هفت‌سواران و حسین‌آباد (محمودی و همکاران، ۱۳۹۳)، گل‌رزد (فرهادی‌نژاد، ۱۳۷۷) و باقله (احیاء و همکاران، ۱۳۸۷) نیز به محیط فقیر از اکسیژن تشکیل این کانسارها اشاره دارد.

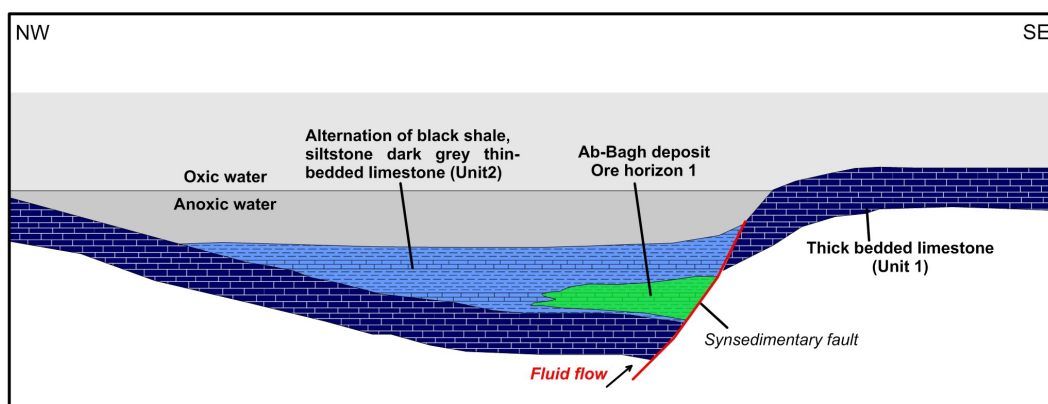
۶- مقایسه شواهد گسلش همزمان با رسوب‌گذاری و محیط احیایی تنه‌نشست

کانسار آب‌باغ با سایر کانسارهای روی و سرب تیپ رسوبی بروندمی در ایران

کانسارهای روی و سرب تیپ رسوبی - بروندمی در ایران، در پهنه‌های ساختاری ایران مرکزی و سندانج - سیرجان گزارش شده‌اند. در پهنه ایران مرکزی، کانسارهای



شکل ۷- الف) نمایی از نمونه دستی سنگ میزبان سیلستون حاوی مواد آلی افق ۱ کانسار آب باغ، ب و پ) تصاویر میکروسکوپی سنگ میزبان سیلستونی افق ۱ و تناوب لامینه‌های غنی از مواد آلی در آنها؛ ت) نمایی از نمونه دستی سنگ میزبان کربناته افق ۲ که آثار مواد آلی با رنگ سیاه (OM) و پیریت با رنگ زرد (Py) در آن مشهود است؛ ث و ج) تصاویر میکروسکوپی سنگ میزبان کربناته حاوی مواد آلی (OM) افق ۲.



شکل ۸- مدل شماتیک از موقعیت گسل همزمان با رسوب گذاری و شرایط Anoxic حوضه نیم گرابنی در محل تشکیل افق ۱ کانسار آب باغ که بر اساس داده‌های صحرایی و گمانه‌های حفاری ترسیم شده است (مدل برگرفته از Spinks et al., 2016).

جدول ۳- مقایسه شواهد گسلش همزمان با رسوب‌گذاری در آب‌باغ با کانسارهای مشابه در ایران.

	کانسار آب‌باغ	منطقه معدنی ایرانتکوه	کانسارهای حوضه انجیره- تیران	کانسارهای حسین‌آباد و هفت‌سواران	کانسار کوه کلنگه	کانسار مهدی‌آباد	کانسارهای کوشک و چاه‌میر
سن سنگ میزبان	ژوراسیک بالایی- کرتاسه زیرین	کرتاسه زیرین	کرتاسه زیرین	ژوراسیک	کرتاسه زیرین	کرتاسه زیرین	کامبرین زیرین
جنس سنگ میزبان	سیلت‌سنگ و سنگ آهک	سنگ آهک، سیلت‌سنگ	سنگ آهک، سیلت‌سنگ	سیلت‌سنگ، شیل و ماس‌سنگ	سنگ آهک و دولومیت	شیل‌ها و سیلت‌سنگ غنی از مواد آلی-دولومیت	سیلت‌سنگ و شیل
گسل همزمان با رسوب‌گذاری	وجود دارد	وجود دارد	وجود دارد	وجود دارد	وجود دارد	وجود دارد	وجود دارد
تغییر ضخامت واحدهای کمربالا	وجود دارد	گزارش نشده است	وجود دارد	وجود دارد	وجود دارد	وجود دارد	وجود دارد
برش‌های همزمان با رسوب‌گذاری و جریان‌های واریزه‌ای	وجود دارد	وجود دارد	وجود دارد	گزارش نشده است.	وجود دارد	وجود دارد	وجود دارد
منبع	تحقیق حاضر	بویری (۱۳۹۵)	Yarmohammadi et al. (2016)	محمودی و همکاران (۱۳۹۳)	پیرنجم‌الدین و همکاران (۱۳۹۵)	Maghfouri et al. (2015) پورفرج و همکاران (۱۳۹۳)؛ قاسمی (۱۳۸۵)؛ مغفوری (۱۳۹۵)	رجبی (۱۳۹۱)

جدول ۴- مقایسه شواهد محیط‌تنشست احیایی در آب‌باغ با کانسارهای مشابه در ایران.

	کانسار آب‌باغ	منطقه معدنی ایرانتکوه	کانسارهای حوضه انجیره- تیران	کانسارهای حسین‌آباد و هفت‌سواران	کانسار کوه کلنگه	کانسار مهدی‌آباد	کانسارهای کوشک و چاه‌میر
ژئوشیمی سنگ میزبان	بیانگر محیط احیایی	بیانگر محیط احیایی	بیانگر محیط احیایی	-	-	بیانگر محیط احیایی	بیانگر محیط احیایی
وجود پیریت فرموبیدال	حضور دارد	حضور دارد	حضور دارد	حضور دارد	حضور دارد	حضور دارد	حضور دارد
اندازه پیریت‌های فرموبیدال	متوسط ۲/۲۷ میکرون	-	-	-	۱ تا ۱۵ میکرون	-	۴ تا ۵ میکرون
حضور مواد آلی	حضور دارد	حضور دارد	حضور دارد	حضور دارد	حضور دارد	حضور دارد	حضور دارد
شرایط Redox محیط تنشست	احیایی	فقیر از اکسیژن	احیایی	احیایی	فقیر از اکسیژن	احیایی	احیایی
منبع	تحقیق حاضر	بویری (۱۳۹۵)	Yarmohammadi et al. (2016)	محمودی و همکاران (۱۳۹۳)	پیرنجم‌الدین و همکاران (۱۳۹۵)	Maghfouri et al. (2015) پورفرج و همکاران (۱۳۹۳)؛ قاسمی (۱۳۸۵)؛ مغفوری (۱۳۹۵)	رجبی (۱۳۹۱)

گسل‌های همزمان با رسوب‌گذاری موجب ایجاد حوضه‌های نیمه‌گرانی در این منطقه، گسترش شرایط Anoxic و تشکیل رسوبات غنی از مواد آلی در این حوضه‌ها شده است (رجبی، ۱۳۹۱). اندازه پیریت‌های فرموبیدال، ژئوشیمی عناصر جزئی و غنی بودن رسوبات میزبان ماده معدنی از مواد آلی بیانگر محیط فقیر از اکسیژن ته‌نشست این کانسارهاست (رجبی، ۱۳۹۱).

۷- نتیجه‌گیری

در فرایند ته‌نشینی سولفید در محیط‌های دریایی Anoxic و Euxinic، سولفید هیدروژن حاصل از احیای باکتریایی سولفات آب دریا نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. شواهد پتروگرافی حاصل از مطالعه کانسارهای تیپ SEDEX، اهمیت حوضه‌های Anoxic و به طبع آن، فعالیت‌های میکروبی را در شکل‌گیری سولفیدها در این تیپ از ذخایر به خوبی روشن می‌سازد (McGoldrick, 1999).

وجود جریان‌های واریزه‌ای و برش‌های همزمان با رسوب‌گذاری و افزایش مقادیر آنها در محل گسل، برشی شدن سولفیدها در رخساره کانسنگ توده‌ای و تغییر ضخامت واحدهای چینه‌ای در امتداد گسل، شواهد گسلس همزمان با رسوب‌گذاری در کانسار آب‌باغ هستند که در محیط کشتی پشت قوس در زمان ژوراسیک فوقانی- کرتاسه زیرین تشکیل شده است. عملکرد گسل همزمان با رسوب‌گذاری موجب گسترش ساختارهای نیمه‌گرانی (Half graben) در این کانسار شده است. بررسی وضعیت اکسایش- کاهش دیرینه محیط ته‌نشست کانسار آب‌باغ، اعم از ژئوشیمی عناصر کمیاب و نادر خاکی سنگ میزبان، اندازه پیریت‌های فرموبیدال و حضور مواد آلی، بیانگر شرایط Anoxic و Euxinic در این حوضه است که این شرایط به دلیل فعالیت‌های میکروبی و همچنین عمق زیاد حوضه ایجاد شده که حاصل گسل‌های نرمال همزمان با رسوب‌گذاری است.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول است که در دانشگاه تربیت مدرس به انجام رسیده است. نویسندگان مراتب سپاس خود را از حوزه معاونت محترم پژوهشی و فناوری این دانشگاه ابراز می‌دارند. همچنین از جناب آقای مهندس رسول استادان فرد و مسئولان محترم شرکت فراپارس قشم برای یاری رسانیشان در انجام بازدیدهای صحرائی و نمونه‌گیری از مغزه‌ها تشکر و قدردانی می‌شود.

همچنین ژئوشیمی سنگ‌های میزبان کانه‌زایی در این منطقه معدنی و بالا بودن نسبت $V/(V+Ni)$ ، نشان‌دهنده ته‌نشست آنها در یک محیط Anoxic است (جدول ۴). حضور مواد آلی و پیریت‌های فرموبیدال نیز شواهدی بر ته‌نشست سنگ میزبان در یک محیط احیایی است (Yarmohammadi et al., 2016).

در برخی از کانسارهای روی و سرب بخش شمال باختری کمربند فلززایی ملایر- اصفهان (حوضه جنوب اراک)، همانند کوه کلنگه (پیرنجم‌الدین و همکاران، ۱۳۹۷)، هفت‌سواران و حسین‌آباد (محمودی و همکاران، ۱۳۹۳) شواهد گسل همزمان با رسوب‌گذاری همانند تغییر ضخامت واحدهای چینه‌ای کمربالاً در امتداد گسل بررسی و در مورد اهمیت آن در تشکیل کانسار بحث شده است. در مناطق هفت‌سواران و حسین‌آباد، سنگ میزبان ماده معدنی، غنی از مواد آلی و پیریت‌های فرموبیدال بوده (محمودی و همکاران، ۱۳۹۳) که نشانگر تشکیل آنها در محیط احیایی است. بر اساس مطالعات پیرنجم‌الدین و همکاران (۱۳۹۷)، اندازه پیریت‌های فرموبیدال در کانسار کوه کلنگه از ۱ تا ۱۵ میکرون متغیر است که شواهدی بر تشکیل آنها در یک محیط احیایی است.

همان‌طور که اشاره شد، در اغلب کانسارهای روی و سرب با سنگ میزبان رسوبی در کمربند ملایر- اصفهان، عملکرد گسل‌های نرمال همزمان با رسوب‌گذاری، نقش اساسی در ایجاد حوضه‌های احیایی و همچنین رخداد کانه‌زایی داشته‌اند. به نظر می‌رسد عامل اصلی چنین شرایطی، جایگاه ژئودینامیکی پشت قوسی حاصل از فرورانش اقیانوس نوتیس به زیر پهنه سندج- سیرجان و گسترش حوضه‌های کشتی و گسل‌های همزمان با رسوب‌گذاری در ارتباط با آن، در زمان ژوراسیک فوقانی و کرتاسه زیرین باشد. علاوه بر کانسارهای کمربند ملایر- اصفهان، در کانسار کلاس جهانی مهدی‌آباد نیز شواهد گسل همزمان با رسوب‌گذاری گزارش شده است. در این کانسار، گسل تپه‌سیاه به‌عنوان گسل نرمال همزمان با رسوب‌گذاری معرفی شده که ماده معدنی به‌صورت همروند با لایه‌بندی سنگ میزبان در کمربالای این گسل تشکیل شده است (مغفوری، ۱۳۹۵؛ مغفوری و همکاران، ۱۳۹۵؛ Maghfouri et al., 2015). این گسل موجب ایجاد تغییرات در ضخامت سازند تفت می‌شود؛ به گونه‌ای که در مجاورت گسل تپه‌سیاه، ضخامت سازند تفت افزایش و با دور شدن از گسل، ضخامت آن کاهش می‌یابد.

در کانسارهای حوضه زیریگان- چاه‌میر به سن کامبرین گسل‌های همزمان با رسوب‌گذاری موجب ایجاد برش‌های همزمان با رسوب‌گذاری، جریان‌های واریزه‌ای و تغییر ضخامت واحد کمربالای گسل، همانند کانسار آب‌باغ شده است. عملکرد

کتابنگاری

- احیاء، ف.، لطفی، م. و رساء، ا.، ۱۳۸۷- کانی‌سازی سرب و روی ژوراسیک در باباقله. فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۴، ص. ۲۳۴ تا ۲۴۶.
- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران. وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات مواد معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- بوری، م.، ۱۳۹۵- رخساره‌های کانسنگ سولفیدی و الگوی تشکیل کانه‌زایی روی و سرب با سنگ میزبان آواری- کربناته در کانسار تپه‌سرخ، حوضه معدنی ایرانکوه، جنوب اصفهان، رساله دکتر، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس.
- بوری، م.، راستاد، ا.، محجل، م.، ناکینی، ع. و حق‌دوست، م.، ۱۳۹۴- ساخت و بافت، کانی‌شناسی و چگونگی تشکیل رخساره‌های سولفیدی در کانسار روی-سرب- (نقره) تپه‌سرخ با سنگ میزبان آواری- کربناتی، جنوب اصفهان، فصلنامه علوم زمین، شماره ۹۷، ص. ۲۲۱ تا ۲۳۶.
- پورفرج، ح.، مغفوری، س.، محجل، م. و راستاد، ا.، ۱۳۹۳- نقش گسل نرمال در تشکیل ماده معدنی و تغییر سازوکار آن در معدن مهدی‌آباد یزد، سی و سومین گردهمایی ملی علوم زمین، تهران.
- پیرنجم‌الدین، ح.، راستاد، ا. و رجبی، ع.، ۱۳۹۷- ساخت و بافت، کانی‌شناسی و میانبرهای سیال کانسار روی-سرب- باریت کوه کلنگه، کمربند فلززایی ملایر- اصفهان، جنوب اراک، فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۰۷، ص. ۲۸۷ تا ۳۰۲.
- رجبی، ع.، ۱۳۹۱- عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی و الگوی تشکیل کانسارهای سولفیدی روی-سرب رسوبی- برون‌دمی (Sedex Type) در منطقه زیریگان- چاه‌میر، شرق بافق، ایران مرکزی. رساله دکتر، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس.
- فهادی‌نژاد، ط.، ۱۳۷۷- زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژنز کانسار روی و سرب گل‌زرد، شمال الیگودرز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس.
- قاسمی، م.، ۱۳۸۵- نحوه تشکیل کانسار روی-سرب مهدی‌آباد یزد و مقایسه آن با سایر کانسارهای کرتاسه اطراف مهدی‌آباد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- محمودی، پ.، راستاد، ا.، رجیبی، ع. و بیرنجم‌الدین، ح.، ۱۳۹۳- رخساره‌های کانه دار کانسار روی- سرب هفت سواران با سنگ میزبان آواری، در حوضه جنوب اراک، سی و سومین گردهمایی علوم زمین.
- مغفوری، س.، ۱۳۹۵- زمین‌شناسی، ژئوشیمی، عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی و الگوی تشکیل کانسارهای روی- سرب با سنگ درونگیر کربناته- تخریبی کرتاسه زیرین در حوضه جنوب یزد، با تأکید بر کانسار مهدی‌آباد، رساله دکترا، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.
- مغفوری، س.، حسین‌زاده، م.، رجیبی، ع. و عظیم‌زاده، ا.، ۱۳۹۵- تحلیل رخساره‌ای سنگی و جایگاه چینه‌ای افق‌های کانه‌زایی روی- سرب- باریت با میزبان کربناته- تخریبی در توالی رسوبی کرتاسه پیشین، حوضه جنوب یزد، فصلنامه علوم زمین، سال بیست و ششم، شماره ۱۰۲، صص. ۲۳۳ تا ۲۴۶.
- موحدنیا، م.، ۱۳۹۴- رخساره‌های کانسنگی، ژئوشیمی و تیپ کانه‌زایی روی-سرب (باریم) در کانسار آب‌باغ (کهرویه)، جنوب شهرضا، پهنه سندیج- سیرجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس.
- موحدنیا، م.، راستاد، ا.، رجیبی، ع. و چولت، ف.، ۱۳۹۶- کانی‌شناسی، ژئوشیمی و فرایندهای تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی پروتوزوئاد کانسار روی- سرب نوع رسوبی- پروندمی (SEDEX) آب‌باغ در پهنه سندیج- سیرجان، فصلنامه علوم زمین، سال بیست و ششم، شماره ۱۰۳، صص. ۲۴۹ تا ۲۶۴.
- ناکینی، ع.، ۱۳۹۲- تحلیل ساختاری مناطق ایرانکوه و تیران، جنوب و باختر اصفهان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005- Convergence history across Zagros, Iran: Constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences*, 94: 401–419.
- Alavi, M., 1991- Tectonic map of the Middle East: Tehran. Geological Survey of Iran, scale 1:5,000,000.
- Arvin, M., Pan, Y., Dargahi, S., Malekizadeh, A. and Babaei, A., 2007- Petrochemistry of the Siah-Kouh granitoid stock southwest of Kerman, Iran: Implications for initiation of Neotethys subduction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30: 474–489.
- Betts, P. G. and Lister, G. S., 2002- Geodynamically indicated targeting strategy for shale-hosted massive sulfide Pb–Zn–Ag mineralization in the Western Fold Belt, Mt Isa terrane. *Australian Journal of Earth Sciences*, 49: 985–1010
- Betts, P. G., Giles, D. and Lister, G. S., 2003- Tectonic environment of shale-hosted massive sulfide Pb–Zn–Ag deposits of Proterozoic northeastern Australia: *Economic Geology*, 98: 557–576.
- Bond, D. P. G., and Wignall, P. B., 2010- Pyrite framboid study of marine Permo- Triassic boundary sections: A complex anoxic event and its relationship to contemporaneous mass extinction: *Geological Society of America Bulletin*, 122: 1265–1279.
- Calvert, S. E. and Pedersen, T. F., 1993- Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: implications for the geological record. *Marine Geology*, 113: 67–88.
- 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.
- Crusius, J., Calvert, S., Pedersen, T. and Sage, D., 1996- Rhenium and molybdenum enrichments in sediments as indicators of oxic, suboxic and sulfidic conditions of deposition. *Earth and Planetary Science Letters*, 145: 65–78.
- Dunster, J. N. and McConachie, B. A., 1998- Tectono-sedimentary setting of the Lady Loretta Formation: Synrift, sag or passive margin?. *Australian Journal of Earth Sciences*, 45: 89–92.
- Gerlach, S., 1994- Oxygen conditions improve when the salinity in the Baltic Sea decreases. *Marine Pollution Bulletin*, 28: 134–438.
- Ghasemi, A. and Talbot, C. J., 2005- a new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran): *Journal of Asian Earth Sciences*, 26: 683–693.
- Goldberg, T., Strauss, H., Guo, Q. and Liu, C., 2007- reconstructing marine redox conditions for the early Cambrian Yangtze Platform: Evidence from biogenic sulphur and organic carbon isotopes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254: 175–193.
- 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. and Rhodes, D., 1990- Geological setting, geochemistry and origin of the Tom stratiform Zn–Pb–Ag–barite deposits, in Abbott, J.G., and Turner, R.J.W., (eds.), *Mineral deposits of the northern Canadian Cordillera: Ottawa, International Association on the Genesis of Ore Deposits, Eighth Symposium, Field Trip 14 Guidebook*, p. 177–244.
- Goodfellow, W. D., 1984- Geochemistry of rocks hosting the Howards Pass (XY) strata-bound Zn–Pb deposit, Selwyn Basin, Yukon Territory, Canada: *Proceedings of the Sixth Quadrennial IAGOD Symposium: Stuttgart, Germany*, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nagele u. Obermiller), p. 91–112.
- Goodfellow, W. D., 2004- Geology, genesis and exploration of SEDEX deposits, with emphasis on the Selwyn basin, Canada, in Deb, M., Goodfellow, W.D., (eds.), *Sediment-hosted lead-zinc sulphide deposits: Attributes and models of some major deposits of India, Australia and Canada*. Delhi, India, Narosa Publishing House, p. 24–99.

- 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.
- Hallberg, R. O., 1974- Paleoredox conditions in the Eastern Gotland Basin during the recent centuries. *Merentutkimuslait. Julk./Havsforskningsinstitutets Skrift*, 238: 3-16.
- Hoffman, D. L., Algeo, T. J., Maynard, J. B., Joachimski, M. M., Hower, J. C. and Jaminski, J., 1998- Regional stratigraphic variation in bottom water anoxia in offshore core shales of Upper Pennsylvanian cyclothems from Eastern Midcontinent Shelf (Kansas), U.S.A. in: Schieber, J., Zimmerle, W., Sethi, P., (eds.), Shales and mudstones I. E Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, p 243-269.
- Jones, B. and Manning, D. A. C., 1994- Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstone. *Chemical Geology*, 111: 111-129.
- Kelley, K. D., Dumoulin, J. A. and Jennings, S., 2004- The Anarraaq Zn-Pb- Ag and barite deposit, northern Alaska: Evidence for replacement of carbonate by barite and sulfides. *Economic Geology*, 99: 1577-1591.
- Khalaji, A. A., Esmaily, D., Valizadeh, M. V. and Rahimpour, H., 2007- Petrology and geochemistry of the granitoid complex of Boroujerd, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran: *Journal of Asian Earth Sciences*, 29: 859-877.
- Large D. E., 1980- Geological Parameters associated with sediment-hosted, submarine exhalative Pb-Zn deposits - An Empirical Model for Mineral Exploration. *Geologisches Jahrbuch*, 40: 59-129.
- Large, R. R., Bull, S. W. and Winefield, P. R., 2001- Carbon and oxygen isotope halo in carbonates related to the McArthur River (HYC) Zn-Pb-Ag deposit: Implications for sedimentation, ore genesis, and mineral exploration. *Economic Geology*, 96: 1567-1593.
- Large, R. R., Bull, S. W., McGoldrick, P. J., Walters, S., Derrick, G. M. and Carr, G. R., 2005- Stratiform and strata-bound Zn-Pb-Ag deposits in Proterozoic sedimentary basins, northern Australia. *Society of Economic Geologists, 100th Anniversary Volume*: 561-607.
- 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.
- Leach, D. L., Sangster, D. F., Kelley, K. D., Large, R. R., Garven, G., Allen, C. R., Gutzmer, J. and Walters, S., 2005- Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective. *Economic Geology, 100th Anniversary Volume*: 561-607.
- Lindsay, J. F., 2001- Basin dynamics and mineralization, McArthur Basin, northern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 703-720.
- Logan, R. G., Murray, W. J. and Williams, N., 1990- HYC silver-lead-zinc deposit, McArthur River: *Australasian Institute of Mining and Metallurgy Monograph*, 14: 907-911.
- Lydon, J. W., 1996- Sedimentary exhalative sulphides (SEDEX), in Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., (eds.), *Geology of Canadian Mineral Deposit Types, Geology of Canada, No. 8, Geological Survey of Canada (also Geological Society of America, The Geology of North America P-1)*, 130-152.
- Lyons, T. W., Gellatly, A. M., McGoldrick, P. J. and Kah, L. C., 2006- Proterozoic sedimentary exhalative (SEDEX) deposits and links to evolving global ocean chemistry. In: Kesler, S.E., Ohmoto, H., (eds.), *Evolution of Early Earth's Atmosphere, Hydrosphere, and Biosphere-Constraints from Ore Deposits. Geological Society of America Memoir*. 198: 169-184.
- Maghfouri, S., Hoseinzadeh, M. R., Rajabi, A., Azimzadeh, A. M. and Choulet, F., 2015- 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.
- McClay, K. R. and Bidwell, G. E., 1986- Geology of the Tom deposit, MacMillan Pass, Yukon. *The Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, 11-1004.
- McGoldrick, P. J., 1999- Northern Australian SEDEX deposits: microbial oases in Proterozoic seas. In: *Mineral deposits: processes to processing. Proceedings of the 5th Biennial SGA Meeting and the 10th Quadrennial IAGOD Symposium, London 2*: 885-888.
- Mohajjel, M. and Fergusson, C. L., 2014- Jurassic to Cenozoic tectonic of the Zagros orogeny in northwestern Iran. *J. international geology review*. 56: 263-287.
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L. and Sahandi, M. R., 2003- Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *J. Asian Earth Science*. 21: 397-412.
- 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.
- Movahednia, M., Rastad, E., Rajabi, A. and Choulet, F., 2015- The Ab-Bagh Stratiform and Stratabound Zn-Pb Deposit, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. 13th SGA Biennial Meeting 2015. Proceedings, Volume 5.

- Movahednia, M., Rastad, E., Rajabi, A. and Choulet, F., 2017- Rare earth elements geochemistry of hydrothermal gangue calcites of Ab-Bagh Sedimentary-exhalative (SEDEX-type) Zn-Pb deposit, Sanandaj-Sirjan zone, Iran. TRIGGER ("Trans-disciplinary Research on Iranian Geology, Geodynamics, Earthquakes and Resources") conference, Volume 1.
- Mueller, A. G., 2008- The Rammelsberg shale-hosted Cu-Zn-Pb sulfide and barite deposit, Germany: Linking SEDEX and Kuroko-type massive sulfides - Slide presentation and explanatory notes. Name of internet website.
- Piper, D. Z., and Calvert, S. E., 2009- A marine biogeochemical perspective on black shale deposition. *Earth-Sci. Rev.* 95, 63–96.
- Raiswell, R. and Berner, R. A., 1985- Pyrite formation in euxinic and semi-euxinic sediments. *American Journal of Science*, 285: 710–724.
- 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.
- Rajabi, A., Rastad, E., Canet, C. and Alfonso, P., 2015- The early Cambrian Chahmir shale hosted Zn–Pb deposit, Central Iran: an example of vent-proximal SEDEX mineralization. *Mineralum Deposita*, 50: 571–590.
- 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.
- Sáez, R., Moreno, C., González, F. and Almodóvar, G. R., 2011- Black shales and massive sulfide deposits: causal or casual relationships? Insights from Rammelsberg, Tharsis, and Draa Sfar. *Mineralum Deposita*, 46: 585–614.
- Spinks, S. C., Schmid, S., Pagés, A. and Bluett, J., 2016- Evidence for SEDEX-style mineralization in the 1.7 Ga Tawallah Group, McArthur Basin, Australia, *Ore Geology Reviews*, 76: 122-139.
- Tucker, M. E., 1994- Sedimentary petrology (an introduction to the origin of sedimentary rocks). 2Ed, Blackwell Scientific Publication, London. 252p.
- Turner, R. J. W., 1990- Jason stratiform Zn-Pb-barite deposit, Selwyn Basin, Canada (NTS 105-O-1): geological setting, hydrothermal facies and genesis. In: Abbott JG, Turner RJW (eds) Mineral deposits of the northern Canadian Cordillera. International Association on the Genesis of Ore Deposits, Field Trip Guidebook, 14: 137–175.
- Wignall, P. B. and Newton, R., 1998- Pyrite framboid diameter as a measure of oxygen-deficiency in ancient mudrocks. *American Journal of Science*, 298: 537–552.
- Wignall, P. B., Newton, R. and Brookfield, M. E., 2005- Pyrite framboid evidence for oxygen-poor deposition during the Permian–Triassic crisis in Kashmir: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 216: 183–188.
- Wilkin, R. T. and Barnes, H. L., 1997- Formation processes of framboidal pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 323–339.
- Wilkin, R. T., Barnes, H. L. and Brantley, S. L., 1996- The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: an indicator of redox conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 3897–3912.
- Wilkinson, J. J., 2014- Sediment-hosted zinc-lead mineralization: processes and perspectives. In: *Treatise on Geochemistry* (2nd ed.), Elsevier, 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.
- Xu, G., Hannah, J. L., Bingen, B., Georgiev, S., and Stein, H. J., 2012- Digestion methods for trace element measurements in shales: Paleoredox proxies examined. *Chemical Geology*. 324-325: 132–147.
- Yarmohammadi, A., Rastad, E. and Rajabi, A., 2016- Geochemistry, fluid inclusion study and genesis of the sediment-hosted Zn-Pb (\pm Ag \pm Cu) deposits of the Tiran basin, NW of Esfahan, Iran. *Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 193: 183-203.
- Ziegler, P. A., 1990- Geological atlas of western and central Europe (2nd edition). Shell International Petroleum Maatschappij B.V., 239 p.

Evidence for syn-sedimentary faulting and reduced formation environment of the Ab-Bagh SEDEX-type Zn-Pb deposit, South of Shahreza, Sanandaj-Sirjan zone

M. Movahednia¹, E. Rastad^{2*}, A. R. Rajabi³ and F. J. González⁴

¹Ph.D. Student, Department of Economic Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

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

³Assistant Professor, Faculty of Geology, College of Science, Tehran University, Tehran, Iran

⁴Researcher, Marine Geology Division, Geological Survey of Spain (IGME), Madrid, Spain

Received: 2016 November 29

Accepted: 2017 September 18

Abstract

The Ab-Bagh Zn-Pb deposit is located 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 massive ore, concordant with the host rock layering. Syn-sedimentary faults, half-graben basins and related anoxic environments, had an important role in formation of SEDEX-type Zn-Pb mineralization in the Ab-Bagh and deposition of sulfides. Sedimentary debris flows and syn-sedimentary braccia within host rocks of the Ab-Bagh deposit suggests activity of normal faulting simultaneously with sedimentation of host rock and consequently development of half-graben structures. Formation of half-graben structures is one of the most important factors of redox condition of ore forming environment. This structures led to development of deeper zones within the basin, where anoxic condition were occurred. Trace and rare earth elements geochemistry of host rocks, size of pyrite framboids and presence of organic matter in the host rocks, represent anoxic to euxinic paleo-redox condition of this basin, which is caused by microbial activities and depth of the basin, associated with normal syn-sedimentary fault. Comparison of syn-sedimentary normal faulting and anoxic formation environment of the Ab-Bagh deposit with other SEDEX deposit of Iran, indicates similarity of their formational environment.

Keywords: Zn-Pb deposit, Sedimentary-Exhalative, Synsedimentary fault, Redox condition, Ab-Bagh, Malayer-Esfahan metallogenic belt

For Persian Version see pages 233 to 244

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