



## نظریه جدید در خصوص زمان و گرادیان حرارتی پوسته اقیانوسی فرورانده شده با تأکید بر سنگ میزبان دولومیت و شیل در تشکیل کانسارهای سرب و روی کمر بند ایرانکوه- آهنگران

محمدحسن کریم‌پور\*<sup>۱</sup>، آزاده ملکزاده شفارودی<sup>۲</sup>، زهرا اعلمی‌نیا<sup>۳</sup>، عباس اسماعیلی سویری<sup>۱</sup> و چارلز استرن<sup>۴</sup>

۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲) گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۴) دانشکده علوم زمین، دانشگاه کلرادو، بولدر، امریکا

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۱

### چکیده

کمر بند ایرانکوه- آهنگران یکی از مهم‌ترین زون‌های کانی‌سازی سرب و روی ایران است که با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی در مرکز زون ساختاری سنندج- سیرجان واقع شده است. سه منطقه ایرانکوه، آهنگران و حسین‌آباد به‌عنوان مثال موردی در این مقاله بررسی شده‌اند. بر پایه شواهد زمین‌شناسی، ساختاری، شکل و نوع کانی‌سازی، شیمی محلول هیدروترمالی، آلتراسیون و پاراژنز مینرالی و مقایسه با انواع ذخایر سرب و روی، کلیه کانسارهای سرب و روی کمر بند ایرانکوه- آهنگران از نوع MVT هستند. این کانسارها با گسل‌های تراستی مرتبط بوده و در زون ساختاری جلوی کمانی مربوط به پوسته اقیانوسی فرورونده جوان و داغ تشکیل شده‌اند. در چنین پوسته‌هایی قبل از رسیدن به اعماق ۴۰ کیلومتری، بیش از ۹۰ درصد آب اقیانوسی آزاد و سیلیکات‌های غنی از منیزیم شکسته می‌شوند. فلزات بخشی از پوسته اقیانوسی و بخشی از پوسته قاره‌ای تأمین شده است. از آنجایی که گسل‌های تراستی سنگ‌های ژوراسیک تا کرتاسه بالایی را قطع کرده‌اند و با توجه به تعیین سن دقیق انجام شده در ایرانکوه، کانی‌سازی‌های این کمر بند در دامنه سنی بین ۶۶ تا ۵۶ میلیون سال پیش اغلب در پالئوسن شکل گرفته‌اند.

شیمی محلول کانه‌دار ذخایر MVT فقیر از Si و غنی از Mg و Fe است. چنین سیالی همراه با فلزات از طریق گسل‌های تراست بالا آمده است و در سنگ میزبان دولستون (ایرانکوه و آهنگران) یا شیل- سیلستون (حسین‌آباد و بخشی از ایرانکوه و آهنگران) کانی‌سازی انجام شده است. تفاوت‌های فاحشی در نوع پاراژنرها، آلتراسیون، شکل، ابعاد، میزان ذخیره و عیار در کانسارهای این کمر بند دیده می‌شود که توسط نوع سنگ میزبان کنترل شده است.

با استناد به تمام شواهد سنگ‌شناسی، آلتراسیون، شکل و حالت کانی‌سازی، وجود گسل‌های تراست، پاراژنز مینرالی و موقعیت خاص زمین‌شناسی و جغرافیایی ارائه شده، می‌توان برای اکتشاف ذخایر MVT پنهان در این کمر بند اقدام کرد.

واژه‌های کلیدی: کانسارهای نوع MVT، شیل، دولومیت، گسل تراست، فرورانش، کمر بند ایرانکوه- آهنگران

## مقدمه

کانسارهای MVT به شکل اپی ژنتیک و استراتی‌باند در محیط‌های پلات فرم کربناته یا کمربندهای تراستی فورلند و در محیط کم عمق تشکیل می‌شوند. سنگ میزبان آنها تاکنون اغلب از نوع دولستون و کمتر سنگ آهک و شیل معرفی شده است. کانی‌شناسی بسیار ساده‌ای دارند که اغلب شامل اسفالریت، گالن، پیریت، مارکازیت، دولومیت، کلسیت و کوارتز است. کانی‌های مس گاهی حضور دارند. دولومیتی شدن مهم‌ترین آلتراسیون همراه با کانی‌سازی است و دولومیت‌های هیدروترمالی هم‌زمان و بعد از کانی‌سازی تشکیل می‌شوند (Leach and Sangester, 1993; Leach et al., 2005, 2010). وجود این آلتراسیون نشان می‌دهد که سیال کانه‌دار غنی از منیزیوم است (Kesler and Carrigan, 2002; Leach et al., 2005, 2010). زون کانی‌سازی می‌تواند از زون‌های جانشین شده توده‌ای تا پرکننده فضاهای خالی و شکستگی‌ها، برشی و پراکنده متغیر باشد. بررسی‌های ایزوتوپی نشان می‌دهد که منشأ فلزات و سولفور احیایی از پوسته قاره‌ای است (Leach and Sangester, 1993; Leach et al., 2005, 2010). کانسارهای MVT در نزدیکی فورلندهای کوه‌زایی دیده می‌شوند؛ اما مواردی هم وجود دارد که فاصله زیادی از زون‌های کوه‌زایی دارند (Bradley and Leach, 2003). محققان زیادی کنترل‌های زمین‌ساختی بر روی تشکیل ذخایر سرب و روی MVT را بررسی کرده‌اند. بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که در اغلب این کانسارها سیال کانه‌دار در اثر نیروی گرانش از کمر بند کوه‌زایی نزدیک به حوضه فورلند مهاجرت کرده است (Garven, 1985; Ge and Garven, 1999). رابطه بین کانسارهای MVT و حوضه‌های فورلند توسط افراد زیادی گزارش شده است (Kaiser and Ohmoto, 1988; Duane and de Wit, 1988; Kesler and Van der Pluijm, 1990; Bradley, 1993; Leach et al., 2001). اما در همه حوضه‌های فورلند نیز ذخایر MVT دیده نمی‌شوند. این مسئله نشان می‌دهد که عوامل دیگری تشکیل این کانی‌سازی‌ها را

کنترل می‌کند. رجیبی و همکاران (Rajabi et al., 2012) اذعان می‌دارند که به دلیل نبود سن رادیومتریک و بررسی‌های ژئوشیمیایی پیشرفته، منشأ ذخایر سرب و روی ایران مشخص نیست. غضبان و همکاران (Ghazban et al., 1994) و احیاء و همکاران (Ehya et al., 2010) معتقدند که برخورد صفحه عربی با زون سنندج-سیرجان و بسته شدن اقیانوس نئوتتیس باعث تشکیل کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناته شده است. جدیدترین پژوهش کریم‌پور و صادقی (Karimpour and Sadeghi, 2018) نشان می‌دهد که سیالات هیدروترمالی در اثر بی‌آب شدن پوسته اقیانوسی فرورانش کرده (اقیانوس نئوتتیس)، تشکیل شده و توسط گسل‌های عمیق تراستی به مکان فعلی راه پیدا کرده‌اند.

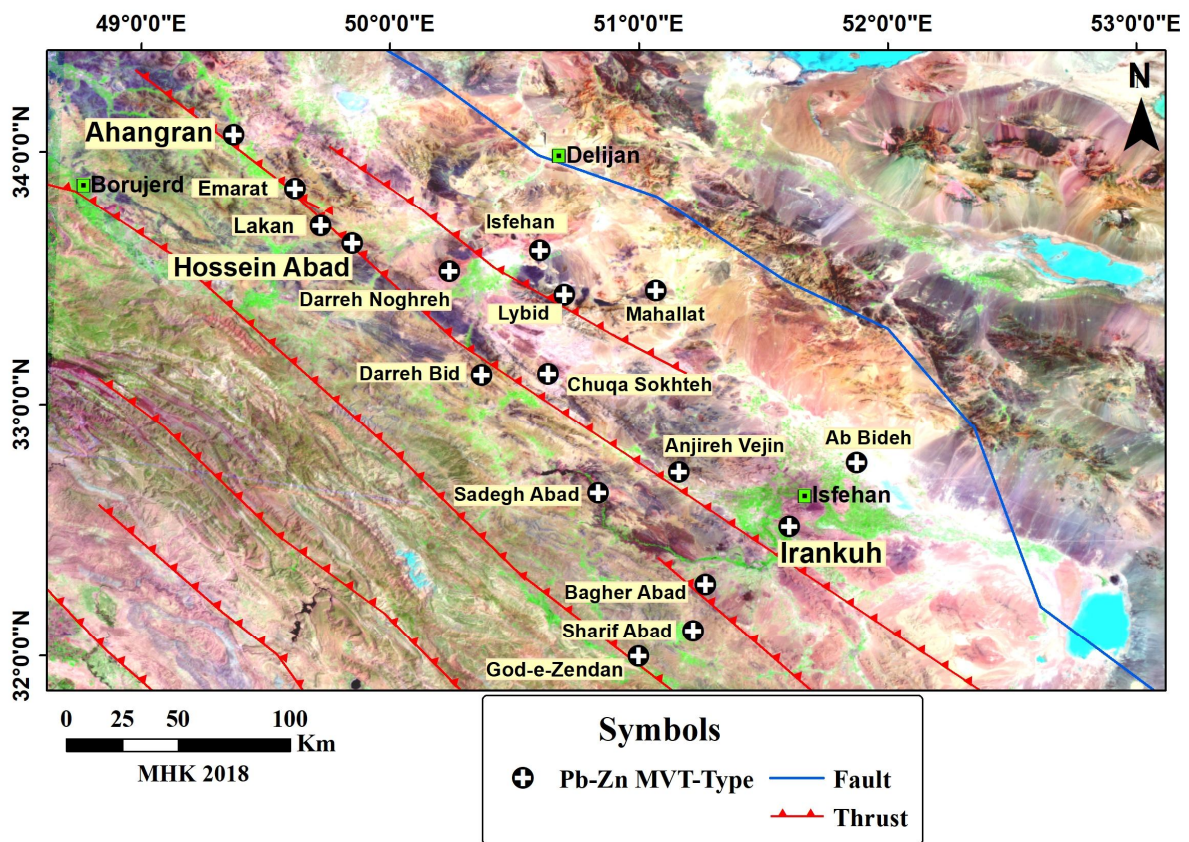
هدف از این پژوهش بررسی رابطه گرادیان حرارتی پوسته اقیانوسی فرورانده شده و زمان تشکیل کانسارهای سرب و روی پنجره ایرانکوه-آهنگران است که تاکنون درباره نوع و نحوه تشکیل آنها اطلاعات ضد و نقیضی منتشر شده است. همچنین شیمی محلول گرمایی متفاوت کانسارهای نوع MVT و تأثیر سنگ میزبان دولومیتی و شیلی بر پاراژنز مینرالی، آلتراسیون، شکل، عیار و میزان ذخیره (مطالعه موردی کانسارهای ایرانکوه، آهنگران و حسین‌آباد) مورد بحث قرار خواهد گرفت. این مؤلفه‌ها به‌طور قطع می‌توانند برای اکتشاف ذخایر سرب و روی نوع MVT پنهان در کمر بند ایرانکوه-آهنگران مفید باشند.

## معرفی کمر بند ایرانکوه-آهنگران

کمر بند ایرانکوه-آهنگران یکی از مهم‌ترین کمر بندهای ذخایر سرب و روی نوع MVT ایران با میزبان دولومیت و شیل است که بخش عمده آن استان‌های مرکزی، اصفهان و همدان را دربرمی‌گیرد (شکل ۱). این کمر بند در بخش مرکزی زون ساختاری سنندج-سیرجان قرار دارد. زون سنندج-سیرجان در اثر بسته شدن اقیانوس نئوتتیس و برخورد صفحه عربی و ایران در رژیم فشارشی از کرتاسه تا ترشیاری تشکیل شده است (Mohajjel et al., 2003; Agard et al., 2005; )

درصد سرب و ۶ درصد روی) و آهنگران (۱/۵۲ میلیون تن و ۶ درصد سرب) اشاره کرد. شریف آباد، باقرآباد، صادق آباد، حسین آباد، دره بید، انجیره و جین، محلات، دره نقره، لاکان و غیره از دیگر کانسارها و اندیس های این کمربند محسوب می شوند (شکل ۱ و جدول ۱).

(Ghasemi and Talbot, 2006). کمربند ایرانکوه-آهنگران با راستای شمال غربی- جنوب شرقی، حدود ۴۰۰ کیلومتر طول و ۱۰۰ کیلومتر عرض دارد و میزبان بیش از ۲۰ عدد معدن و اندیس های فراوان سرب و روی است (شکل ۱). از ذخایر مهم آن می توان به مجموعه معدنی ایرانکوه (۲۰ میلیون تن، ۲/۵ درصد سرب و ۱۱ درصد روی)، عمارت (۱۰ میلیون تن، ۲/۲



شکل ۱. موقعیت و نام کانسارهای سرب و روی در کمربند ایرانکوه-آهنگران

Fig. 1. Location and name of Pb-Zn deposits at Irankuh-Ahangran Belt

فعالیتی همچون گوشفیل، تپه سرخ یک، کلاه دراوزه، ذخیره مدفون (تپه سرخ سه) و زون ۵ رومرمر، معادن متروکه مانند گودزدان، خانه گرگی و چشمه زرد و مناطق اکتشافی مانند زون های یک تا چهار رومرمر و زون گوشفیل یک وجود دارد. زمین شناسی ناحیه ای معدنی ایرانکوه بر اساس نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰،۰۰۰ اصفهان (Zahedi, 1976)، شامل سنگ های رسوبی

زمین شناسی و کانی سازی کانسارهای ایرانکوه، آهنگران و حسین آباد مجموعه معدنی ایرانکوه ناحیه معدنی ایرانکوه در جنوب شهر اصفهان و در محدوده طول های جغرافیایی ۵۱° ۳۳' تا ۵۱° ۴۰' و عرض های جغرافیایی ۳۲° ۲۸' تا ۳۲° ۳۲' قرار دارد (شکل ۱). در منطقه ایرانکوه معادن

واحد دولستون توده‌ای تا ضخیم‌لایه خاکستری تا قهوه‌ای - قرمز همراه با مواد آلی و کمتر واحدهای دولستون قهوه‌ای تا خاکستری دانه درشت و سنگ آهک دولومیتی درشت‌دانه حفره‌دار، مهم‌ترین واحدهای کربناته منطقه از لحاظ میزبانی کانی‌سازی هستند. این واحدهای سنگی به دلیل دانه درشت بودن، داشتن فضاهای خالی مناسب و ترکیب شیمیایی - کانی‌شناسی خاص خود در مجاورت گسل‌های سازنده منطقه که محل عبور محلول کانه‌دار بوده، پذیرای بخش‌های اصلی و بزرگ کانی‌سازی منطقه هستند ( Karimpour et al., 2018b).

ژوراسیک و کرتاسه زیرین است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ محدوده ایرانکوه (Karimpour et al., 2018b) واحد ژوراسیک شامل شیل‌های غنی از مواد آلی کمی دگرگون‌شده تا اسلیت است که در بخش شمالی پیت گوشفیل در شرق و پیت ذخیره مدفون در شمال غربی محدوده دیده می‌شوند و بر روی سنگ‌های کربناته کرتاسه رانده شده‌اند (شکل ۲). این واحد میزبان بخشی از کانی‌سازی سرب و روی ایرانکوه به صورت رگه و رگه‌چه است. واحدهای کربناته کرتاسه بر اساس بافت، کانی‌شناسی، ضخامت، رنگ، وجود فسیل و غیره به ۱۲ نوع مختلف تقسیم می‌شوند که از این میان

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی کانسارهای سرب و روی در کمربند ایرانکوه - آهانگران

Table 1. Coordination of Pb-Zn deposits at Irankuh-Ahangran Belt

Name	latitude	longitude
Anjireh-Vejin	32.729270°	51.160429°
Emarat	33.854223°	49.614914°
Irankuh	32.513733°	51.603877°
Lakan	33.705565°	49.719107°
Darreh-e-Noghreh	33.525165°	50.235944°
Chuqa Sokhteh	33.121096°	50.632921°
Ahangaran	34.068464°	49.369793°
Hossein Abad	33.635369°	49.846084°
God-e-Zendan	31.997603°	50.997370°
Sharif Abad	32.099382°	51.216248°
Ab Baq-e- karuieh	31.767352°	51.802283°
Sadeq Abad	32.648611°	50.833889°
Ab Bideh	32.766667°	51.875°
Laybid	33.433333°	50.7°
Bagher Abad	32.283333°	51.266667°
Mahallat	33.45°	51.066667°
Darreh Bid	33.116667°	50.366667°

باریت است؛ درحالی که در بخش شیلی شامل کوارتز، پیریت، کمی کالکوپیریت، اسفالریت غنی از آهن، گالن، بیتومن، دولومیت با آهن کم، باریت و کوارتز است (Karimpour et al., 2018b).

### کانسار آهنگران

منطقه معدنی سرب و نقره آهنگران در فاصله ۲۳ کیلومتری جنوب شرق ملایر از توابع استان همدان قرار دارد. این کانسار در شمال غربی ترین نقطه کمربند ایرانکوه - آهنگران واقع شده است (شکل ۱). عیار سرب به طور متوسط ۶ درصد و نقره در بخش های پرعیار به ۷۰۰ گرم در تن می رسد (Hosseinkhani and Molasalehi, 2013; Maanijou et al., 2015).

از دیدگاه زمین شناسی، منطقه آهنگران بسیار شبیه به مجموعه معدنی ایرانکوه بوده و اغلب از دو رخساره سنگی پوشیده شده است: ۱- رخساره زیرین متشکل از رسوبات تخریبی با سن ژوراسیک است که در اثر دو فاز کوهزایی لارامید و پیرنه به مجموعه سنگ های اسلیت و کوارتزیت دگرگون شده است (Houshmandzadeh et al., 1975)، ۲- تشکیلات کربناته کرتاسه زیرین که با دگرشیبی فرسایشی بر روی مجموعه سنگی ژوراسیک دگرگونی قرار گرفته و اغلب صخره ساز است. تشکیلات کرتاسه با توالی نازک لایه تخریبی ماسه سنگ سیاه قاعده کرتاسه زیرین و ماسه سنگ کوارتزیتی شروع شده اند و با دولومیت های غنی از اکسید آهن که میزبان کانی سازی سرب و نقره هستند، ادامه می یابند. در نهایت آهک خاکستری توده ای تا ضخیم لایه قرار دارد (شکل ۳).

همانند منطقه ایرانکوه، کانی سازی توسط گسل های تراستی ناحیه ای با روند شمال غرب - جنوب شرق کنترل می شود. این گسل ها که واحدهای کرتاسه را قطع کرده اند، در اواخر کرتاسه - اوایل پالئوسن و در رژیم فشارشی تشکیل شده اند و نقش سازندگی دارند؛ زیرا محلول کانه دار از اعماق زیاد توسط این گسل ها به بالا راه پیدا کرده است و آنها نقش معبر سیال را دارند و دیگر اینکه در حریم این گسل ها فضای درز و

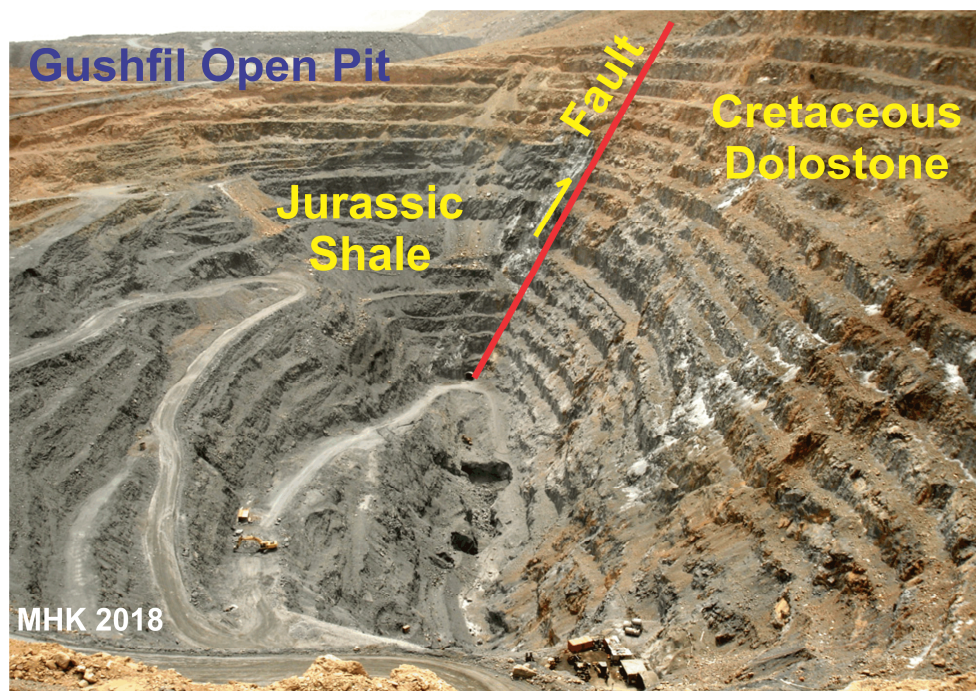
گسل های تراستی متعددی در منطقه ایرانکوه وجود دارد که برخی نقشی اساسی در تشکیل کانی سازی داشته و محل بالآ آمدن محلول کانه دار بوده اند. این گسل ها در حال حاضر به دلیل شیب زیاد، معکوس به نظر می رسند که این امر به علت چرخش های بعدی و افزایش زاویه شیب گسل به بیش از ۴۰ درجه است. مهم ترین گسل تراستی سازنده کانی سازی در منطقه، گسل بزرگ شمال محدوده و انشعابات آن است که روند شمال غربی - جنوب شرقی دارد و رخنمون آن به خوبی در پیت ها قابل مشاهده است (شکل ۲). گسل های مخرب بعدی با روند شمال شرق - جنوب غرب باعث جابه جایی، تغییرات شکلی و قطع شدن زون های کانه دار شده اند. عمده گسل های مخرب از نوع امتداد لغز هستند (Karimpour et al., 2018b).

کانی سازی در مجموعه معادن ایرانکوه به شکل اپی ژنتیک و با کنترل ساختاری در گسل های تراستی موجود در مرز شیل های کمی دگرگون شده ژوراسیک و سنگ های دولومیتی کرتاسه و یا در گسل های داخل واحد کربناته تشکیل شده است. سنگ میزبان کانی سازی هم واحد دولستون و هم واحد شیلی تا اسلیتی است؛ اما تفاوت هایی در شکل، ابعاد و پاراژنز مینرالی در دو سنگ میزبان دیده می شود (شکل ۲). در سنگ میزبان دولستون، کانهزایی به دو شکل کلی جانشینی و پرکننده فضاهای خالی (فضاهای ایجاد شده توسط گسل مانند رگه های زمین ساختی یا برش های گسلی و یا حفرات سنگ میزبان) تشکیل شده است، درحالی که در واحد شیل دگرگون شده فقط فضاهای ایجاد شده به وسیله گسل توسط محلول کانه دار پر شده است و مقدار ذخیره در آنها بسیار کمتر از واحد دولستون است. کانی شناسی ایرانکوه ساده بوده و شامل اسفالریت، گالن، پیریت و اندکی کالکوپیریت است که با کانی های باطله دولومیت، آنکریت، کوارتز، بیتومن و کمتر کلسیت و باریت همراهی می شود. کانی های ثانویه شامل کانی های ثانویه سرب و روی و اکسیدهای آهن و منگنز است. پاراژنز در بخش دولستون اغلب شامل اسفالریت غنی از آهن، گالن، بیتومن، دولومیت غنی از آهن و منیزیوم، آنکریت، کلسیت، جزئی پیریت، کوارتز و

اسفالریت، پیروتیت، مارکازیت، بورنیت، ایلمنیت و تتراندیریت است (Hosseinkhani and Molasalehi, 2013). کانی‌های باطله شامل کوارتز، کلسیت، دولومیت، باریت، آنکرایت، سرب و کلریت هستند. کانی‌های ثانویه اغلب شامل سروریت، آنگلیزیت، هماتیت، گوتیت، اکسیدهای منگنز، مالاکیت، کالکوزیت و کولیت است. سیلیسی شدن، سریسیتی شدن و کلریتی شدن دگرسانی‌های مشاهده شده در میزبان شیلی - ماسه‌سنگی کانسار آهن‌گران است؛ در حالی که دولومیتی شدن، در سنگ میزبان دولومیتی دیده می‌شود. عمده کانسنگ پرعیار سرب و گاهی مس در رگه‌ها با طول بیش از ۱۰۰ متر و ضخامت حداکثر ۱/۵ متر وجود دارد. از ویژگی‌های خاص آهن‌گران حضور مقدار زیادی اکسید آهن است. محلول کانه‌دار در کمر بند ایرانکوه - آهن‌گران علاوه بر منیزیم بالا، دارای آهن بالا نیز بوده است که در برخی مناطق به ذخایر مستعد آهنی نیز منجر شده است.

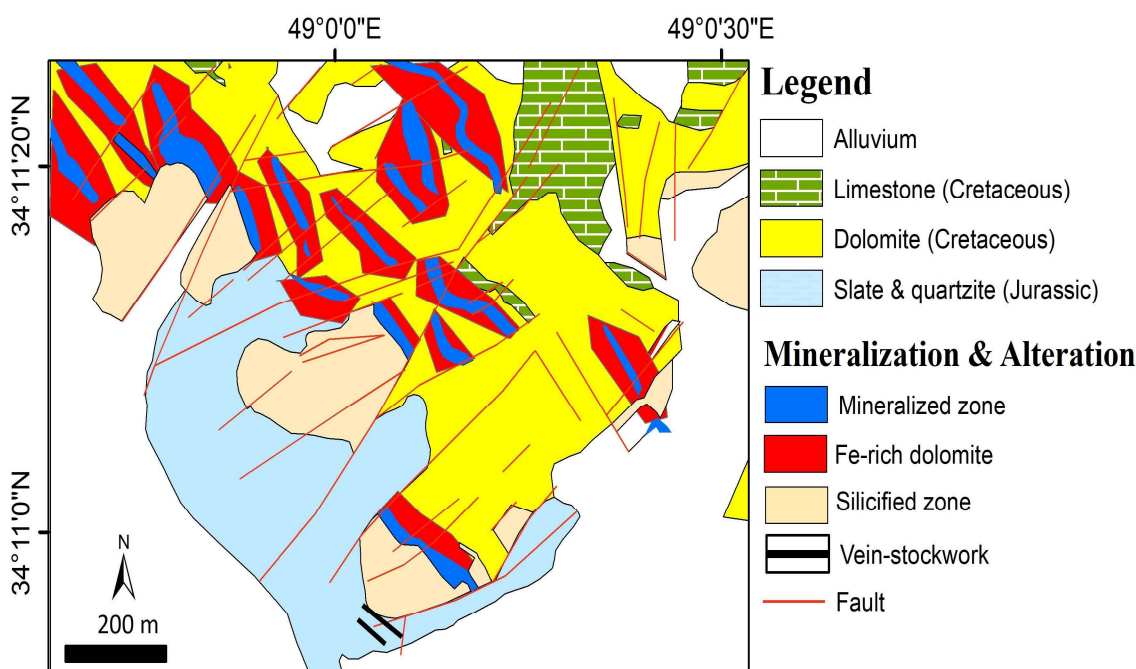
شکستگی مناسب ایجاد شده و کانی‌سازی در سنگ میزبان مناسب بر جای گذاشته شده است. گسل‌های جوان‌تر منطقه که اغلب روند شمال شرقی - جنوب غربی دارند و از نوع امتداد لغز هستند، روند کانی‌سازی را قطع کرده‌اند. این گسل‌ها از نوع مخرب هستند.

کانی‌سازی همانند منطقه ایرانکوه با کنترل ساختاری و اغلب در داخل واحد دولومیتی کرتاسه (با ابعاد گسترده) و کمتر شیلی - ماسه‌سنگی ژوراسیک دیده می‌شود و در سنگ آهک‌ها اصلاً وجود ندارد (شکل ۳). در سنگ میزبان دولومیتی، کانه‌زایی به شکل جانشینی و پرکننده فضاهای خالی (فضاهای ایجاد شده توسط گسل مانند رگه‌چه‌های زمین‌ساختی یا برش‌های گسلی و یا حفرات سنگ میزبان) تشکیل شده است؛ در حالی که در واحد شیل دگرگون‌شده فقط فضاهای ایجاد شده به وسیله گسل، توسط محلول کانه‌دار پر شده است. کانی‌های اولیه شامل گالن، پیریت، مگنتیت، کالکوپیریت و به‌طور فرعی کانی‌های



شکل ۲. گسل تراستی اصلی که باعث رانده شدن شیل دگرگون‌شده ژوراسیک بر روی دولستون کرتاسه شده و کانی‌سازی در حریم آن تشکیل شده است (پیت گوشفیل در معدن ایرانکوه).

**Fig. 2.** Main thrust fault, which is thrusts Jurassic metamorphosed shale on the Cretaceous dolostone, with mineralization around it (Gushfill open pit in Irankuh mine).



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی - کانی‌سازی آهنگران (با تغییرات از مؤمن‌زاده و همکاران (Momenzadeh et al., 1979))

Fig. 3. Geological- Mineralization map of Ahangaran (modified after Momenzadeh et al., 1979)

مارنی و سپس واحد سنگ‌چینه‌ای سبتر آهک اوریتولین‌دار خاکستری (آلین)، شیل و مارن قرار گرفته‌اند (شکل ۴-۲). مهم‌ترین روند ساختاری حاکم بر منطقه یک گسل تراستی با روند شرقی-غربی است که همانند منطقه گوشفیل در ایرانکوه در اثر وقایع چرخشی زاویه آن در حال حاضر به ۶۰ درجه افزایش یافته است و همانند گسل معکوس دیده می‌شود (شکل ۴-۳). این گسل با طول کمتر از یک کیلومتر، لایه‌بندی اولیه و شیستوزیته سنگ‌ها را قطع کرده و واحدهای قدیمی‌تر آواری را بر روی افق‌های جوان‌تر ژوراسیک رانده و شکستگی‌های متعددی را در آن به‌وجود آورده است.

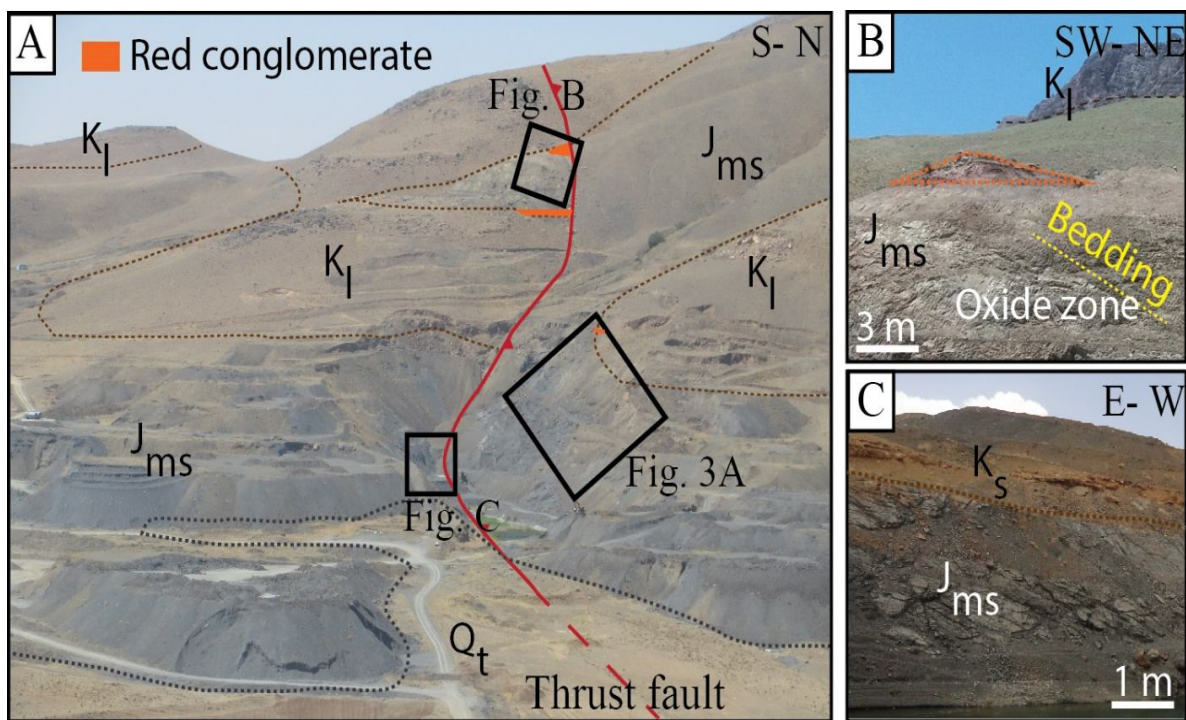
سنگ میزبان کانسار حسین‌آباد، شیل، سیلتستون و ماسه‌سنگ‌های دگرگون‌شده سازند شمشک است (شکل ۵-۲). کانی‌سازی کنترل گسلی داشته و در زون تخریبی شکننده حریم گسل تراستی متمرکز شده است. علاوه‌بر آرایش گسل، خاصیت شکنندگی و درز و شکستگی‌های شیل و ماسه‌سنگ‌ها نیز ابعاد و شکل کانی‌سازی را کنترل می‌کنند. در واحد آهکی

### کانسار حسین‌آباد

کانسار سرب و روی حسین‌آباد در فاصله ۲۷ کیلومتری غرب خمین از توابع استان مرکزی قرار دارد. این کانسار در شمال‌غرب کمربند ایرانکوه-آهنگران جای گرفته است (شکل ۱). عیار روی به‌طور متوسط ۴/۳ درصد و سرب ۴/۷ درصد با میزان ذخیره بین ۳ تا ۶ میلیون تن است. خسروییگی (Khosrobegyi, 2019) میزان نقره در حسین‌آباد را کمتر از ۱۰ گرم در تن اعلام کرده است. زمین‌شناسی منطقه اغلب شامل شیل، سیلتستون و ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک به سن ژوراسیک است که در اواسط ژوراسیک تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای در حد رخساره شیست سبز قرار گرفته‌اند و به اسلیت، سرسیت‌شیست و کلریت‌شیست تبدیل شده‌اند (شکل ۴-۳). کرتاسه زیرین با توالی کنگلومرای قرمز با ضخامت نیم تا یک متر و سنگ‌های آهکی-ماسه‌ای (Kc) شروع شده و به‌صورت دگرشیبی زاویه‌دار بر روی رخساره آواری ژوراسیک جای گرفته است. بعد از آن سنگ‌های آهکی نازک‌لایه و آهک

را قطع کرده و کنترل گسلی دارد (شکل ۶-A و B)، مشخص است که کانی‌سازی پس از وقوع دگرگونی ناحیه‌ای (اواسط ژوراسیک) تشکیل شده و جوان‌تر از کرتاسه است. آلتراسیون همراه با کانی‌سازی بسیار شبیه به کانی‌سازی داخل سنگ میزبان شیلی در گوشفیل (ایرانکوه) است و شامل سیلیس، کلریت، بیتمن و کمی سیدریت، دولومیت و گاهی آنکریت است. کانی‌های اولیه شامل گالن، اسفالریت آهن‌دار، پیریت، کالکوپیریت و کمتر پروتیت و کانی‌های ثانویه شامل اسمیت‌زونیت، سروزیت و همی‌مورفیت است. به دلیل نبود واحد دولستونی مناسب در منطقه حسین‌آباد، کانی‌سازی با ذخیره و عیار کم و در محل‌های خاص متمرکز شده است.

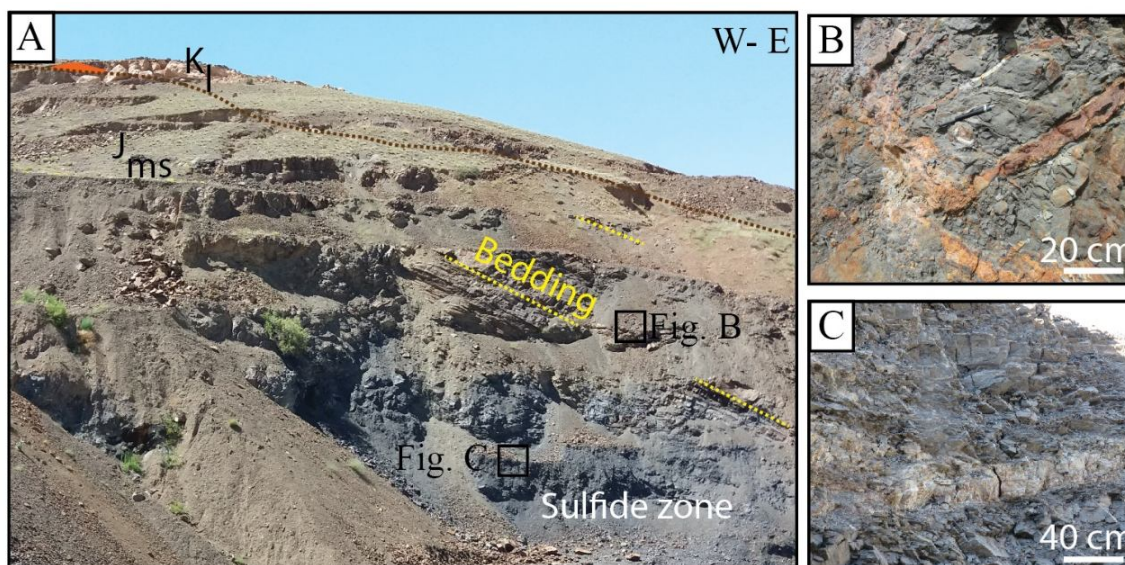
کرتاسه به دلیل شکل‌پذیری، درز و شکستگی زیادی دیده نمی‌شود. شکستگی‌ها در سنگ‌های آواری در فاصله کمتر از ۴۰ متر از خط گسل به حداقل می‌رسد؛ در حالی که در کرنات‌ها که شکل‌پذیرترند، در طول کمتر از ۱۰ متر نمود پیدا کرده است. همچنین به علت عدم واکنش‌پذیری کافی، کانی‌سازی قابل‌توجهی در این واحد تشکیل نشده است. کانی‌سازی به شکل رگه-رگه‌چه (شکل‌های ۵-B و ۶) و برشی (شکل ۵-C) همراه با بافت‌های جانیشینی و پرکننده حفرات در واحد شیلی-ماسه‌سنگی دگرگون‌شده، مشاهده می‌شود. از آنجایی که کانی‌سازی رخ‌اسلیتی، شیستوزیته و لایه‌بندی سنگ‌های رسوبی دگرگون‌شده و واحدهای کرتاسه



شکل ۴. واحدهای سنگی کانسار سرب و روی حسین‌آباد، A: نمایی از رخنمون‌های آهکی کرتاسه ( $K_1$ ) بر روی سنگ‌های کمی دگرگون‌شده ژوراسیک معادل شمشک ( $J_{ms}$ ), B: نمایی از بخش اکسیدی معدن (pit-2)، کنگلومرای قرمز با دگرشیبی زاویه‌دار بر روی سنگ‌های دگرگونی ژوراسیک ( $J_{ms}$ ) جای‌گرفته است و C: نمایی نزدیک از دیواره جنوبی گسل راندگی در بخش سولفیدی معدن (pit-1) که شیل‌های زرد رنگ کرتاسه ( $K_s$ ) به صورت دگرشیبی بر روی واحد ژوراسیک ( $J_{ms}$ ) دیده می‌شود.

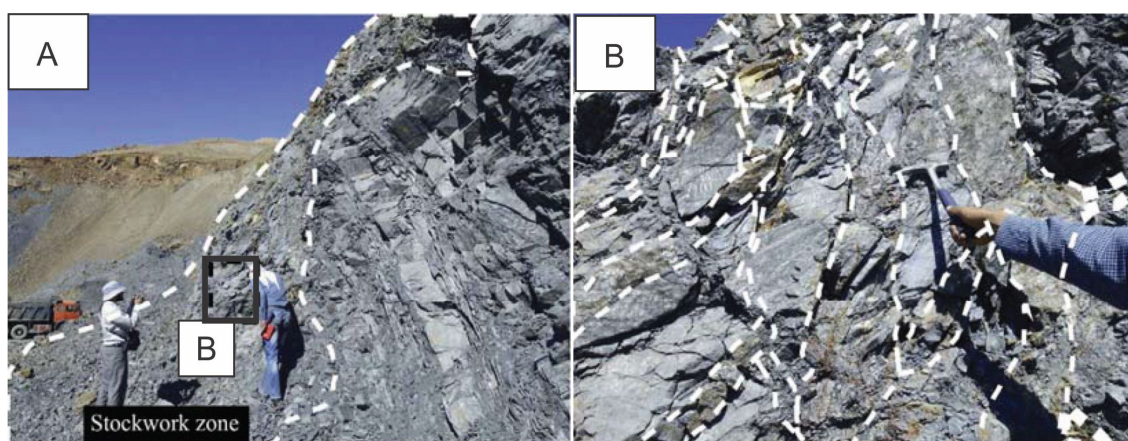
**Fig. 4.** Rock units of Hosseinabad Pb-Zn deposit, A: outcrops of Cretaceous limestone ( $K_1$ ) on Shemshak low metamorphosed Jurassic rocks ( $J_{ms}$ ), B: view of oxidized zone (pit-2), red conglomerate with angular deformation on Jurassic metamorphic rocks ( $J_{ms}$ ), and C: view of south wall of thrust fault in Sulfidic zone (pit-1), Cretaceous yellow shale ( $K_s$ ) with deformation on Jurassic unit ( $J_{ms}$ ).





شکل ۵. A: رخنمون اندکی از کنگلومرای قرمز کرتاسه زیرین بر روی سازند دگرگون شده شمشک که میزبان کانی سازی سرب و روی است، B: رگه- رگه های کوارتز، سیدریت، گالن و پیریت که اکسید شده اند و C: رگه کوارتز- پیریت که به صورت هم شیب با سنگ میزبان، سنگ های اطراف را دگرسان کرده است.

**Fig. 5.** A: Minor outcrop of lower Cretaceous red conglomerate on metamorphosed Shemshak formation, which is host rock of Pb-Zn mineralization, B: Quartz, siderite, galena, and pyrite vein-veinlets, which are oxidized, and C: Quartz-pyrite vein, which are concordant with host rock, is altered country rocks.



شکل ۶. A: نمایی از رگه- رگه های کانی سازی قطع کننده لایه بندی واحد شیلی دگرگون شده در حسین آباد و B: عکس از نمای نزدیک رگه- رگه های شامل کوارتز، کربنات و سولفیدها (Mahmoodi et al., 2018)

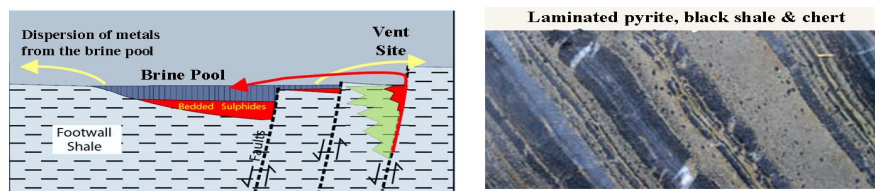
**Fig. 6.** A: View of mineralization vein-veinlets are cross-cutting bedding of metamorphosed shale in Hosseinabad, and B: Close up photograph of veins-veinlets that contain quartz, carbonate and sulfides (Mahmoodi et al., 2018)

می شوند که ویژگی های آنها در جدول ۲ خلاصه شده است. همچنین خلاصه ای از ویژگی های این کانسارها در شکل های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده است.

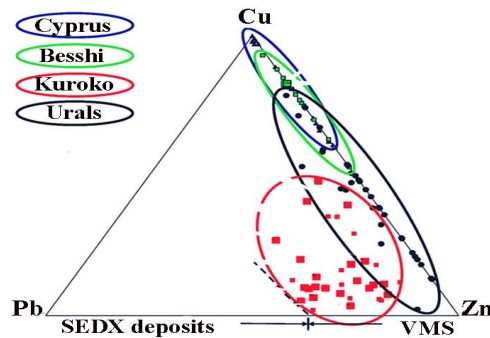
**بررسی ویژگی های انواع ذخایر سرب و روی و نوع کانسارهای سرب و روی کمربند ایرانکوه- آهنگران**  
کانسارهای سرب و روی دار به انواع MVT، سدکس، ماسیو سولفیدها و ذخایر حاشیه ای کانسارهای پورفیری تقسیم

کانسارهای سرب - روی نوع سدکس (جدول ۲ و شکل ۷)

- این کانسارها در حوضه دریایی که حاصل ریفت درون قاره‌ای بوده، تشکیل شده‌اند؛
- کانی‌سازی هم‌زمان با شیل‌ها در محیط دریا تشکیل شده است؛
- منابع معدنی مهم عبارتند از: Pb-Zn-Ag؛
- محلول‌های گرمابی از طریق گسل‌های نرمال (واقع در حاشیه حوضه) وارد حوضه شده‌اند؛
- دمای تشکیل این کانسارها کمتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد است؛
- محلول گرمابی غنی از سیلیس است و لذا تشکیل چرت شاخصی مهم است؛
- رخدادهای ماگمایی هم‌زاد با کانی‌سازی گزارش نشده است؛
- کانی‌سازی دارای لایه‌بندی بسیار منظم شیل، سولفیدها، چرت و گاهی باریت است؛
- گالن، اسفالریت، پیریت، گاهی باریت کانی‌های اصلی هستند؛
- بین مکان کانی‌سازی لایه‌ای و گسل‌های تغذیه‌کننده محلول گرمابی فاصله است؛
- آلتراسیون کلریتی محدود است؛
- میزان ذخیره چند تا ۳۰۰ میلیون تن و ۱۰ برابر ذخایر ماسیو سولفید با منشأ آتشفشانی است؛
- حدود ۵۰ درصد ذخایر سرب- روی کشف شده جهان از نوع سدکس هستند.



Country	Deposit	Tonnage of ore in Mt (reserves and past production)	Grade			By-products	Age
			Cu%	Pb%	Zn%		
Australia	Broken Hill	180	0.2	11.3	9.8	Ag 175 g t <sup>-1</sup>	Lower to Middle Prot
	McArthur River	237	0.2	4.1	9.2	Ag 41 g t <sup>-1</sup>	Middle Proterozoic
	Mount Isa	88.6	0.06	7.1	6.1	Ag 160 g t <sup>-1</sup>	Middle Proterozoic
Canada	Howard's Pass	100	—	1.5	6.0	—	Silurian
	Sullivan	160	—	6.6	5.9	Ag 68 g t <sup>-1</sup> Sn, Cd, Cu, Au	Middle Proterozoic
Germany	Meggen	60	0.2	1.3	10.0	Baryte	Devonian
	Rammelsberg	30	1.0	9.0	19.0	Ag 103 g t <sup>-1</sup> Baryte	Devonian
Ireland	Navan	70	—	2.6	10.1	—	Carboniferous
	Silvermines	18.4	—	2.8	7.4	Ag 21 g t <sup>-1</sup> Baryte	Carboniferous
	Tynagh	12.3	0.4	4.9	4.5	Ag 58 g t <sup>-1</sup>	Carboniferous
RSA	Gamsberg	93.5	—	0.6	7.4	—	Middle Proterozoic



شکل ۷. خلاصه ویژگی‌های کانسارهای سدکس

Fig. 7. Simplified characteristics of Sedex deposits

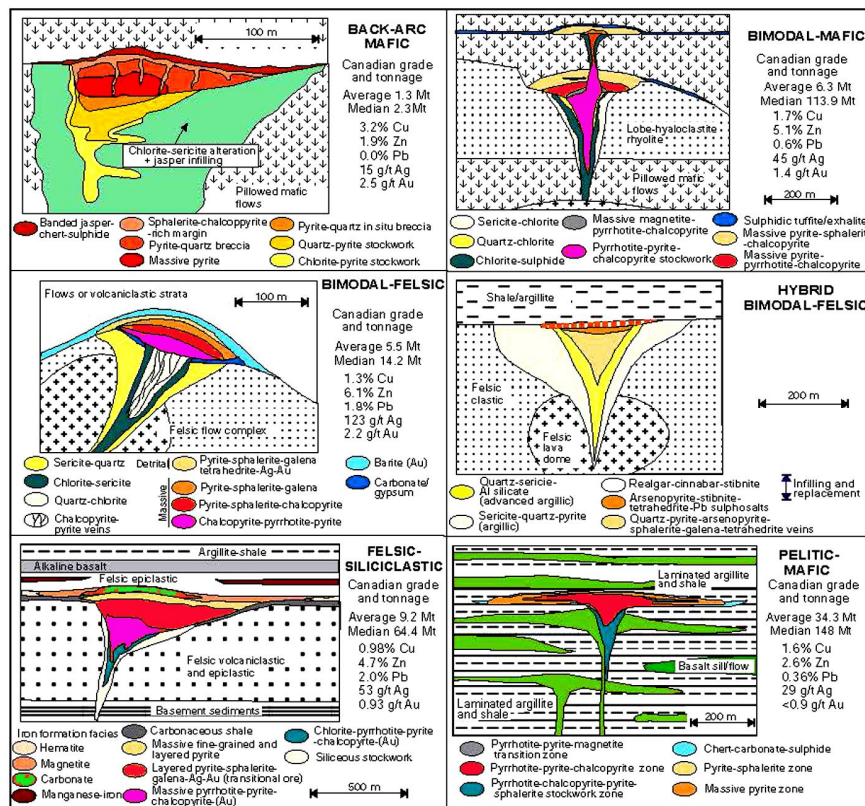
جدول ۲. ویژگی‌های کانسارهای مهم سرب و روی

Table 2. Characteristics of Pb-Zn important deposits

Pb-Zn Deposits		Syngeneic/ Epigenetic	Structural control pathway of fluid & place of mineralization	Style & shape of mineralization	Mineral paragenesis	Alteration	Magmatic source	Main commodities
MVT-Type	Dolomite (Host rock)	<b>Epigenetic</b>	Deep-seated thrust faults played an important role in the upward migration of hydrothermal fluids from the basement to shallow depths	Replacement, breccia filling, Strat bound (big deposit higher grade)	Sphalerite, galena, dolomite, ankerite, bitumen, & some pyrite	Dolomitization, minor silicification, bitumen	No	Pb-Zn-Ag ±Cd
	Shale (Host rock)	<b>Epigenetic</b>	Deep-seated thrust faults played an important role in the upward migration of hydrothermal fluids from the basement to shallow depths	Vein, breccia filling & stockwork (smaller deposit and lower grade)	Sphalerite, galena, quartz, bitumen, & higher pyrite	Silicification, minor chloritization, bitumen	No	Pb-Zn-Ag ±Cd
Sedimentary exhalative (SEDEX)		<b>Syngeneic stratiform exhalative</b>	Normal faults at the margin of basement, fluid discharge to the see	Layering (stratiform) Shale and sulfides show rhythmic layering (the form the same time)	Sphalerite, galena, quartz, some chalcopyrite, & >15% pyrite,	Minor silicification and chlorite * layer of chert	No	Pb-Zn-Ag
	Cyprus	<b>Syngeneic stratiform exhalative</b>	Normal faults Played as feeder, discharge fluid to see.	Massive lens shape with well-developed layering form in the bottom of see & Stockwork mineralization form within the feeder zone	Chalcopyrite, bornite, sphalerite, magnetite, >15% pyrite	Intense chlorite-some sericite-silicification * layer of chert	<b>Submarine Basalt- diabase</b>	Cu-Zn-Au
Volcanogenic Massive sulfide (VMS)	Kuroko	<b>Syngeneic stratiform exhalative</b>	Normal faults Played as feeder, discharge fluid to see.	Massive lens shape with well-developed layering form in the bottom of see & Stockwork mineralization form within the feeder zone	Chalcopyrite, bornite, sphalerite, magnetite, galena, > 15% pyrite	Intense chlorite-some sericite-silicification * layer of chert	<b>Submarine Rhyolite- Dacite (monzonite)</b>	Cu-Zn-Au-Pb- Ag
	Archean	<b>Syngeneic stratiform exhalative</b>	Normal faults Played as feeder, discharge fluid to see.	Massive lens shape with well-developed layering form in the bottom of see & Stockwork mineralization form within the feeder zone	Chalcopyrite, bornite, sphalerite, magnetite, >15% pyrite	Intense chlorite-some sericite-silicification * layer of chert	<b>Submarine Basalt- rhyolite- dacite</b>	Cu-Zn-Au
Distal porphyry (Cu & Mo) deposits		<b>Epigenetic</b>	Important	Mostly vein type	Galena, sphalerite, chalcopyrite, pyrite, magnetite, quartz, ± fluorite	Silicification, sericitic, argillic, propylitic	<b>Granitoids</b>	Pb-Zn-Ag ±Cu, ±Au

کانسارهای سولفید توده‌ای با منشأ آتشفشانی (جدول ۲ و شکل ۸)

- تشکیل هم‌زمان با فعالیت آتشفشان‌های زیر دریایی (همزاد با فعالیت ماگمایی)؛
- منابع معدنی Cu-Zn-Pb-Au-Ag (این کانسارها را چندفلزی می‌نامند)؛
- زمین ساخت و منشأ ماگما نوع مواد معدنی را کنترل می‌کنند؛
- تقسیم‌بندی بر اساس نوع مواد معدنی، موقعیت زمین ساختی ترکیب و منشأ سنگ آذرین؛
- pH محلول ماگمایی حدود ۳ و دمای حدود ۴۵۰ درجه سانتی گراد است؛
- pH آب اقیانوسی بیش از ۸ و دما کمتر از ۱۰ درجه سانتی گراد است؛
- کاهش سریع دما و تغییرات pH موجب می‌شوند که در فواصل مکانی نزدیک به همدیگر کمپلکس‌های کلرید مس، سرب و روی ناپایدار شوند (دلایل مهم در تشکیل کانسار چند فلزی)؛
- محلول‌های ماگمایی و اقیانوسی از طریق گسل‌های نرمال وارد کف اقیانوس می‌شوند؛
- کانی‌سازی در زون گسلی (کانال عبور محلول گرمایی) از نوع استوک‌ورک است (استرینگر)؛
- کانی‌سازی در بخش محیط دریایی به شکل عدسی و دارای لایه‌بندی بسیار منظم است؛
- محلول گرمایی دارای مقادیر قابل توجه سیلیس است؛
- در بخش بالایی و جانبی این ذخایر چرت و در برخی باریت و آهن با لایه‌بندی قرار دارند؛
- آلتراسیون‌های مهم کلریتی، سربستیک، سیلیسی و محدود ژئولیتی اغلب در بخش استوک‌ورک دیده می‌شود؛
- میزان ذخیره بین حدود ۱ تا ۸۰ میلیون تن است.

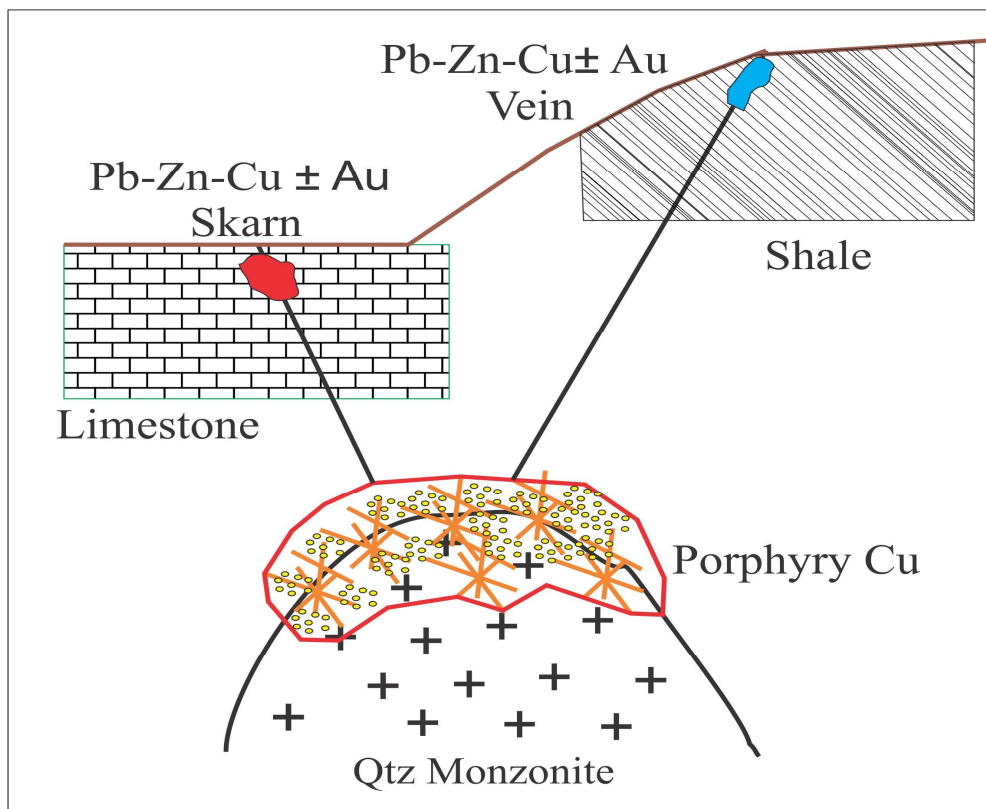


شکل ۸. تقسیم‌بندی کانسارهای VMS بر اساس سنگ‌شناسی توسط باری و هنینگتون (Barrie and Hannington, 1999) و نوع سولفید بالا که به زیر گروه بایمدال - فلسیک اضافه شده است.

Fig. 8. Lithological classification for VMS deposits by Barrie and Hannington (1999), with "high sulfidation" type an added subtype to the bimodal-felsic group

**کانسارهای سرب-روی-مس بخش حاشیه کانسارهای مس و مولیبدن پورفیری (جدول ۲ و شکل ۹)**

- این کانسارها در کمربند ماگمایی زون فرورانش واقع شده‌اند؛
- محلول ماگمایی از گرانیتوئیدها (I-Type) منشأگرفته و دمای آن ابتدا حدود ۶۵۰ درجه سانتی گراد است؛
- کمپلکس‌های مس و مولیبدن در محدوده دمای ۴۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی گراد ناپایدار شده‌اند و کانی‌سازی مس و یا مولیبدن پورفیری تشکیل می‌شود؛
- کمپلکس‌های سرب-روی در محدود دمای ۳۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد ناپایدار می‌شوند و لذا می‌توانند با فاصله از مس و یا مولیبدن پورفیری و در بخش‌های بالایی تشکیل شوند. بنابراین کانی‌سازی از نوع اپی ژنتیک است. سنگ میزبان انواع سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی است؛
- محلول گرمابی غنی از سیلیس است؛
- کانی‌سازی سرب-روی-مس اغلب از نوع رگه‌ای و به‌ندرت اسکارن است؛
- منابع معدنی مهم عبارتند از:  $Pb-Zn-Cu \pm Au$ ؛
- پاراژنز شامل کوارتز-اسفالریت-گالن-کالکوپیریت-پیریت-مگنتیت است؛
- آلتراسیون شامل پروپلیتیک، سیلیس، سریسیت، آرژلیک است؛
- این نوع کانی‌سازی راهنمای خوبی برای اکتشاف کانسارهای مس و مولیبدن پورفیری است.



شکل ۹. کانسارهای سرب و روی در حاشیه ذخایر پورفیری به شکل رگه‌ای یا اسکارن دیده می‌شوند.

Fig. 9. Distal porphyry of Pb-Zn deposits are formed as vein or skarn type mineralization.

### کانسارهای سرب- روی نوع دره می‌سی‌سی‌پی<sup>۱</sup> (جدول ۲)

- محیط زمین‌ساختی بخش جلوی کمر بند ماگمایی زون فرورانش<sup>۲</sup>؛
- در زمان تشکیل، در این منطقه فعالیت‌های ماگمایی رخ نمی‌دهد؛
- گسل‌های تراست که هم‌زمان با رژیم زمین‌ساختی فشارشی ناشی از فرایند فرورانش ایجاد می‌شوند، نقشی بسیار مهم در تشکیل این کانسارها دارند؛
- محلول‌های گرمابی ایجاد شده در زون فرورانش از طریق گسل‌های تراست شروع به حرکت و ضمن واکنش با پوسته قاره‌ای به اعماق کم که شرایط برای کانی‌سازی مناسب است، منتقل می‌شوند؛
- دولومیت بهترین سنگ میزبان است؛ زیرا قابلیت واکنش‌پذیری خوبی دارد. شیل و سایر سنگ‌ها هم می‌توانند میزبان باشند؛ اما به دلیل عدم واکنش شکل، ابعاد و عیار ذخیره آنها متفاوت است؛
- محلول گرمابی غنی از منیزیم- روی- سرب- آهن- گوگرد و سایر عناصر و بسیار فقیر از سیلیس و آلومینیم است؛
- آلتراسیون در سنگ دولومیتی موجب تشکیل انواع دولومیت‌های گرمابی ثانویه، دولومیت‌های غنی از آهن و آنکریت می‌شود؛
- آلتراسیون در سنگ میزبان شیل- ماسه‌سنگ موجب افزایش سیلیس محلول گرمابی شده و در نتیجه مهم‌ترین آلتراسیون شامل سیلیسی شدن، کلریتی، سیدریت، محدود دولومیت و پیریت است؛
- شکل، ابعاد و حالت کانی‌سازی در سنگ دولومیتی به دلیل جانشینی بسیار گسترده است و خیلی محدود، پرکننده فضاهای ساختمانی نیز دیده می‌شود؛
- شکل، ابعاد و حالت کانی‌سازی در شیل- ماسه‌سنگ فقط از نوع پرکننده فضای خالی است که به زون گسلی و حریم آن (استوکرک) محدود می‌شود.

ژئوفیزیکی، پایان‌نامه‌ها و مقالات متعددی وجود دارد که از مهم‌ترین و جدیدترین آنها می‌توان به راستاد (Rastad, 1981)، غضبان و همکاران (Ghazban et al., 1994)، قاسمی (Ghasemi, 1995)، ریچرت (Reichert, 2007)، تیموری اصل (Timoori-Asl, 2010)، تیموری اصل و همکاران (Timoori-Asl et al., 2011)، آیتی و همکاران (Ayati et al., 2013)، حسینی دینانی و همکاران (Hosseini-Dinani et al., 2015)، بویری کناری و همکاران (Boveiri Konari et al., 2015)، حسینی دینانی و آفتابی (Hosseini-Dinani and Aftabi, 2016)، بویری

درخصوص نوع ذخایر سرب و روی کمر بند ایرانکوه- آهنگران نظریات ضد و نقیضی در مقالات متعدد دیده می‌شود. البته تعبیر و تفسیرهای انجام شده برای حوضه رسوبی و نحوه تشکیل واحدهای آواری ژوراسیک و کربناته کرتاسه که توسط محققان رسوب‌شناس انجام شده است، از این موضوع استثناست. شواهد زمین‌شناسی نشان می‌دهد که واحدهای سنگی ژوراسیک و کرتاسه فقط نقش سنگ میزبان کانی‌سازی‌ها این کمر بند را داشته‌اند و به نحوه تشکیل ذخایر سرب و روی ارتباطی ندارند. از دیرباز در مجموعه معادن ایرانکوه کارهای اکتشافی زیادی انجام شده است؛ لذا گزارشات زمین‌شناسی، اکتشافی و

1. MVT

2. Forearc

کانی‌سازی از نوع متصاعدی- رسوبی بوده و در محیط زمین‌ساختی ریفت درون قاره‌ای تشکیل شده است. رنجبران (Ranjbaran, 1991) با بررسی محیط رسوبی و دیاژنز سنگ‌های کربناته آن را از نوع غیرهمزاد اولیه معرفی کرده است. حسینخانی و ملاصالحی (Hosseinkhani and Molasalehi, 2013) بر پایه نتایج ایزوتوپ سرب اذعان می‌دارند که کانی‌سازی در محیط زمین‌ساختی کمانی تشکیل شده است و فعالیت‌های کوه‌زایی و زمین‌ساختی پهنه سندج- سیرجان در زمان مزوزوئیک و پس از آن در تحرک دوباره سرب از پی سنگ دگرگون‌شده تریاس، نقشی مهم در کانه‌زایی آهن‌گران داشته است. معانی‌جو و همکاران (Maanijou et al., 2015) بر پایه بررسی سیالات درگیر و ایزوتوپ گوگرد، نوع کانسار آهن‌گران را ایرلندی معرفی کرده‌اند. آنها معتقدند که محلول گرمابی منشأ آب دریایی دارد که در اثر فشردگی رسوبات یا فشارهای ناشی از کوه‌زایی به حرکت درآمده و از طریق گسل‌ها به بالا حرکت کرده است. اکبری (Akbari, 2017) کانسار آهن- سرب آهن‌گران را از نوع جانشینی زیر کف دریا می‌داند و معتقد است که برخی ویژگی‌های آن شبیه به ذخایر سدکس و برخی شبیه ماسیوسولفیدهای کمر بند پیریتی Iberian است. چنان‌که در توصیف منطقه آهن‌گران گفته شد، گسل‌های تراستی ناحیه‌ای سازنده همانند منطقه ایرانکوه، نقشی اساسی در کنترل کانی‌سازی اپی‌ژنتیک دارند. کانی‌سازی در گسل‌های تراستی که حاصل رژیم فشارشی هستند، تشکیل شده است و بنابراین محیط ریفت که مختص کانسارهای سدکس است، برای آن رد می‌شود. بخش عمده کانسار در واحد دولومیتی کرتاسه زیرین با ابعاد گسترده و اغلب به شکل جانشینی و کمتر در واحد شیلی دگرگون‌شده به شکل پرکننده فضاها خالی تشکیل شده است. کانی‌سازی جوان‌تر از کرتاسه است و سپس توسط گسل‌های مخرب جابه‌جا شده است. همانند منطقه گوشفیل در ایرانکوه، دولومیتی شدن در سنگ میزبان دولومیتی و سیلیسی شدن در سنگ میزبان شیلی دیده می‌شود. برخلاف ذخایر سدکس،

کناری و راستاد (Boveiri Konari and Rastad, 2017) و کریم‌پور و همکاران (Karimpour et al., 2018a, 2018b) اشاره کرد. در این پایان‌نامه‌ها و مقالات که بعضی بر روی کل محدوده معدنی و بعضی در بخش‌های خاصی و در ارتباط با زمین‌شناسی، کانی‌سازی، ژئوشیمی و مطالعات ایزوتوپی کار شده است، کانی‌سازی سرب و روی ایرانکوه از نوع دره می‌سی‌سی‌پی معرفی شده است، به‌جز بویری کناری و همکاران (Boveiri Konari et al., 2015) و بویری کناری و راستاد (Boveiri Konari and Rastad, 2017) که بر پایه بافت و ساخت و کانی‌شناسی در معدن تپه سرخ (بخش غربی ایرانکوه)، آن را شبیه ذخایر سرب و روی نوع سدکس یا ایرلندی معرفی کرده‌اند و معتقدند که کانی‌سازی در محیط آب دریا در کرتاسه زیرین (حدود ۱۳۵ میلیون سال پیش) تشکیل شده و بخش‌هایی از آن سین‌ژنتیک است. همان‌طور که در ویژگی‌های ذخایر سدکس اشاره شد، این کانسارها در محیطی کششی تشکیل می‌شوند و کانی‌سازی باید با شیل و باندهای چرتی لایه‌بندی داشته باشد. محلول کانه‌دار در این ذخایر غنی از سیلیس است. این درحالی است که در معدن تپه سرخ کنترل ساختاری کانی‌سازی توسط گسل که واحد دولومیتی کرتاسه را قطع کرده است، به‌وضوح دیده می‌شود. این بدان معنی است که کانی‌سازی اپی‌ژنتیک بوده و جوان‌تر از کرتاسه بالایی است. ضمن اینکه همانند کانسارهای سدکس، لایه‌بندی بین کانی‌سازی و واحد شیل دگرگون‌شده، دیده نمی‌شود. آلتراسیون غالب دولومیتی شدن است. لذا نظریه بویری کناری و همکاران (Boveiri Konari et al., 2015) و بویری کناری و راستاد (Boveiri Konari and Rastad, 2017) رد شده و تپه سرخ نیز همانند دیگر ذخایر مجموعه معدنی ایرانکوه از نوع MVT است.

در مورد نوع کانسار سرب و روی آهن‌گران نیز نظریات متفاوتی ارائه شده است. در ارتباط با خاستگاه کانسار می‌توان به پژوهش‌های مؤمن‌زاده و همکاران (Momenzadeh et al., 1979) و زمانیان (Zamanian, 1993) اشاره کرد که معتقدند

وجود نداشته و سنگ آهک به دلیل شکل‌پذیری دارای درز و شکستگی و فضای کمتری است؛ اما در سنگ میزبان شیلی درز و شکستگی‌ها در حریم گسل افزایش یافته و کانی‌سازی سرب و روی به شکل پرکننده فضای خالی در آن تشکیل شده است. گسل کنترل‌کننده کانی‌سازی، واحدهای ژوراسیک و کرتاسه و رخ اسلیتی حاصل از دگرگونی ناحیه‌ای (احتمالاً اواسط ژوراسیک) را قطع می‌کند و مسلماً کانی‌سازی جوان‌تر از کرتاسه است. سیلیسی شدن همراه با کانه‌زایی نتیجه خروج سیلیس از واحدهای آواری است و برخلاف کانسارهای سدکس محلول کانه‌دار غنی از سیلیس نبوده است. بلکه همانند دیگر ذخایر کمرند مورد بررسی محلول غنی از آهن به تشکیل دولومیت آهن‌دار، اسفالریت آهن‌دار و گاهی آنکریت منجر شده است. بنابراین کانسار سرب و روی حسین‌آباد از نوع MVT با سنگ میزبان شیلی است.

با نگاه کلی به ذخایر سرب و روی کمرند ایرانکوه-آهنگران و موقعیت قرارگیری آنها در زون سندج-سیرجان، می‌توان دریافت که همگی منطبق بر گسل‌های تراست جنوب‌غربی ایران که در اثر رژیم فشارشی و فرورانش اقیانوس نئوتیس به وجود آمده‌اند، تشکیل شده‌اند (شکل ۱۰). این مسئله اهمیت نقش گسل‌های تراستی را در تشکیل این ذخایر یادآوری می‌کند و نشان می‌دهد که سن این کانی‌سازی‌ها باید جوان‌تر از سن سنگ میزبان آنها (ژوراسیک تا کرتاسه بالایی) باشد. همچنین هیچ‌گونه فعالیت ماگمایی در اطراف این کانسارها دیده نمی‌شود و فاصله زیادی بین آنها با سنگ‌های آذرین زون سندج-سیرجان که اغلب واحدهای آذرین مزوزوئیک هستند، دیده می‌شود (شکل ۱۰). این مسئله ذخایر سرب و روی ماسیوسولفید یا سرب و روی تشکیل‌شده در حاشیه ذخایر پورفیری را کلاً رد می‌کند. همچنین در نقشه مغناطیس‌هوایی ایران (شکل ۱۱) قرارگیری کانسارهای سرب و روی کمرند ایرانکوه-آهنگران در بخش غربی کمرند ماگمایی ارومیه-دختر کاملاً مشهود است که نشان می‌دهد تشکیل آنها در فرایندی جدا از این کمان ماگمایی بوده است. بنابراین بر پایه

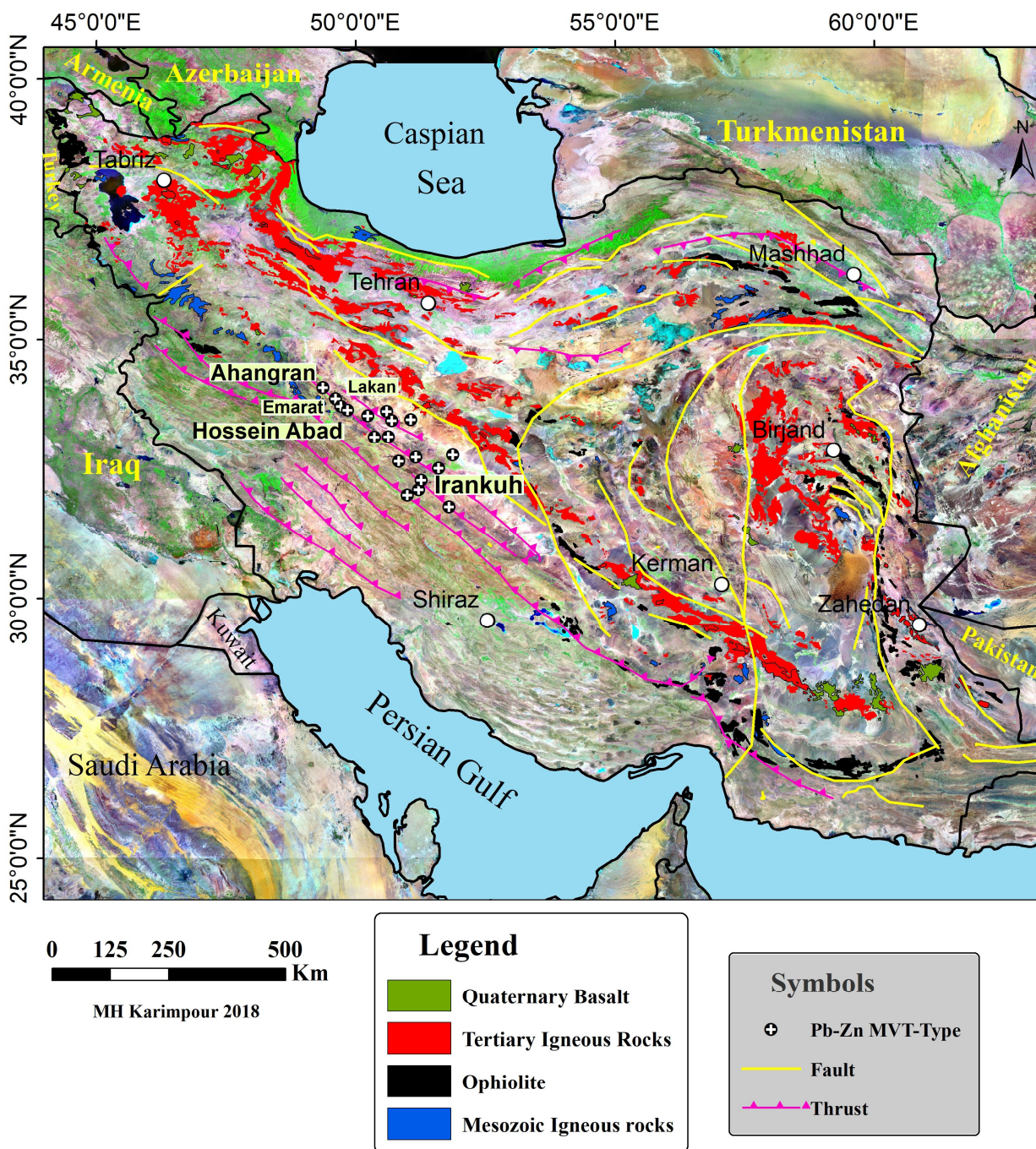
هیچ‌گونه شواهد سین‌ژنتیک بودن و لایه‌بندی کانی‌سازی با شیل یا نوارهای چرتی دیده نمی‌شود و برخلاف کانسارهای ماسیوسولفید هیچ‌گونه فعالیت آتشفشانی در محیط آن دیده نشده است. تمامی شواهد زمین‌شناسی و کانه‌زایی نشان می‌دهد که کانسار آهنگران نیز از نوع MVT است و فقط به استناد بررسی سیالات درگیر یا بررسی‌های ایزوتوپی نمی‌توان در مورد نوع کانی‌سازی اظهار نظر کرد. همچنین بررسی‌های پاراژنری کانسارهای کمرند ایرانکوه-آهنگران نشان می‌دهد که علاوه بر منیزیم، مقدار عنصر آهن در سیال بالاست که به تشکیل دولومیت‌های آهن‌دار، آنکریت و اسفالریت‌های غنی از آهن منجر شده است (Karimpour et al., 2018a, 2018b). وجود آهن بالا در ذخیره آهنگران که به تشکیل یک کانسار آهن-سرب منجر شده است، حکایت از محلول کانه‌دار غنی از آهن این کمرند دارد. در بخش‌هایی که سنگ میزبان شیل و سیلتستون بوده است، اغلب این آهن در غالب کانی پیریت ظاهر شده است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

در کانسار حسین‌آباد شیل، سیلتستون و ماسه‌سنگ‌های کمی دگرگون‌شده سازند شمشک سنگ میزبان کانی‌سازی سرب و روی است. محمودی و همکاران (Mahmoodi et al., 2018) این کانسار را از نوع سدکس معرفی کرده‌اند؛ درحالی‌که مهم‌ترین ویژگی ذخایر سدکس از جمله، لایه‌بندی واضح بین شیل، کانی‌سازی و باندهای چرتی و گسترش نسبتاً زیاد کانی‌سازی لایه‌بندی بسیار گسترده است که نشان‌دهنده سین‌ژنتیک بودن کانسار است در این کانسار دیده نمی‌شود. شواهد این لایه‌بندی به هیچ‌عنوان در این کانسار وجود ندارد و به صرف اینکه سنگ میزبان کانی‌سازی شیل و سیلتستون است، نمی‌توان ذخیره را از نوع سدکس دانست. کانسار حسین‌آباد همانند دیگر کانسارهای کمرند ایرانکوه-آهنگران در رژیم فشارشی تشکیل شده است. این منطقه بسیار شبیه به کانی‌سازی در بخش شیلی (با دگرگونی ناحیه‌ای) معدن گوشفیل در ایرانکوه است، به نحوی که کانه‌زایی توسط گسل تراستی کنترل شده است. سنگ میزبان دولومیتی مناسب در این منطقه



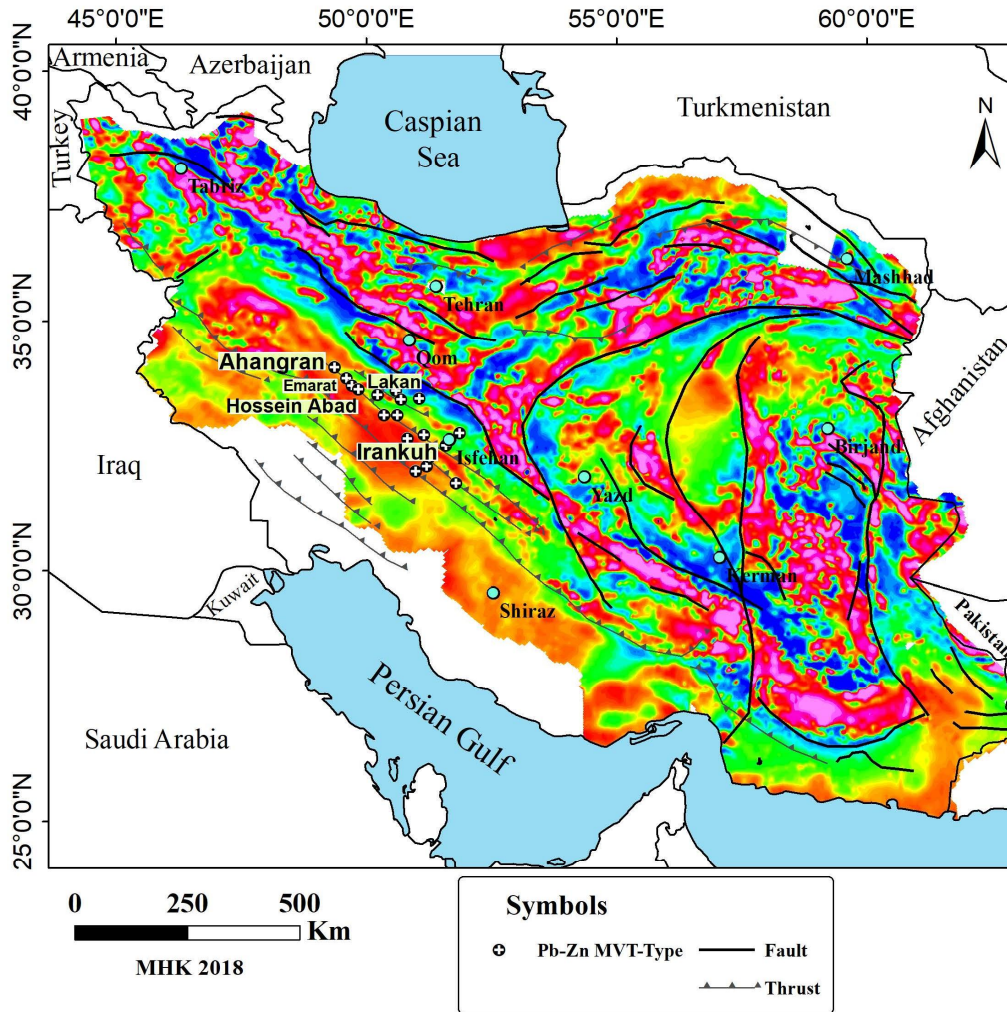
MVT هستند و تنها تفاوت در سنگ میزبان، باعث تفاوت‌هایی در پاراژنرها، شکل و ابعاد ذخیره شده است که در ادامه درباره آن توضیح داده می‌شود.

شواهد زمین‌شناسی، ساختاری، شکل و نوع کانی‌سازی، شیمی محلول هیدروترمالی، آلتراسیون و پاراژنز مینرالی کلیه کانسارهای سرب و روی کمر بند ایرانکوه-آهنگران از نوع



شکل ۱۰. موقعیت جغرافیایی کانسارهای سرب و روی در کمر بند ایرانکوه-آهنگران. به انطباق کانسارها با گسل‌های تراست توجه کنید.

Fig. 10. Location of Pb-Zn deposits at Irankuh-Ahangaran Belt. Consider the compatibility of deposits with thrust faults.



شکل ۱۱. موقعیت جغرافیایی کانسارهای سرب و روی در کمربند ایرانکوه-آهنگران در غرب کمربند ماگمایی ارومیه- دختر بر روی نقشه مغناطیس هوایی ایران

**Fig. 11.** Location of Pb-Zn deposits at Irankuh-Ahangaran Belt in western Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt on airmagnetism map of Iran

حجم رگه) و منشأ سیلیس نیز ماگمایی است. اگر محلول کانه‌دار سیلیس‌دار ماگمایی وارد سنگ کربناته شود و تشکیل اسکارن بدهد، سیلیسیوم در ساختار کانی‌های کالک سیلیکاته مصرف می‌شود. در کانسارهای ماسیوسولفید آتشفشانی، مقدار سیلیس بالای موجود در شیمی محلول در زون استرینگر به تشکیل استوک‌ورک‌های کوارتز دار منجر می‌شود. همچنین زمانی که سیال وارد آب دریا شد، لایه‌های چرت در افق‌های بالایی و جانبی عدسی تشکیل خواهد شد. در ذخایر سدکس نیز

### تفاوت شیمی محلول گرمایی ذخایر MVT با دیگر ذخایر ماگمایی و گرمایی

تفاوتی اساسی بین شیمی محلول گرمایی ذخایر MVT با سایر کانسارهای سرب و روی دار دیده می‌شود. در همه کانسارهای سرب و روی دار، عنصر Si نقش اساسی در شیمی محلول دارد. به طوری که در کانسارهای رگه‌ای که در بخش‌های جانبی و بالایی ذخایر پورفیری تشکیل می‌شوند، آلتراسیون سیلیسی یکی از زون‌های آلتراسیونی اصلی محسوب شده (بیش از ۸۰ درصد

لذا Ca از ساختار دولومیت خارج شده است و جای خود را به Fe می‌دهد. بنابراین دولومیت‌های آهن‌دار و یا آنکریت مهم‌ترین کانی‌های آلتراسیونی هستند. کانی‌سازی در دولستون به شکل اغلب جانشینی (به دلیل واکنش‌پذیری مناسب) و پرکننده فضای خالی (حفرات، تخلخل و یا درز و شکستگی‌های حاصل از فعالیت زمین‌ساختی) شکل می‌گیرد. از آنجایی که آهن محلول وارد ساختار دولومیت شده است؛ لذا مقدار ناچیزی برای واکنش با گوگرد و تشکیل کانی پیریت باقی می‌ماند. در نتیجه مقدار پیریت در سنگ میزبان دولستونی کم است و بخش عمده گوگرد برای ساختن اسفالریت و گالن صرف می‌شود. از آنجایی که Fe تمایل دارد تا در ساختار اسفالریت جانشین Zn شود، اسفالریت‌های آهن‌دار نیز تشکیل می‌شوند. مجموعه پاراژنز مینرالی کانسارهای MVT در سنگ میزبان دولستون را می‌توان به شکل زیر خلاصه کرد (شکل ۱۳): اسفالریت آهن‌دار، گالن، بیتومن، دولومیت غنی از آهن و منگنز، آنکریت، کلسیت، مقدار اندکی پیریت  $\pm$  باریت  $\pm$  کوارتز.

زمانی که همین محلول گرمابی وارد سنگ میزبان شیل - سیلتستون می‌شود، از آنجایی که سنگ میزبان خود حاوی سیلیس است، به آلتیره شدن سنگ میزبان منجر و Si آزاد می‌شود. لذا آلتراسیون غالب سیلیسی شدن همراه با تشکیل کلریت بوده و کمتر دولومیتی شدن و سیدریت اتفاق می‌افتد. آهن بالای محلول گرمابی به دلیل نبود کانی دولومیت کافی، با گوگرد واکنش داده و پیریت فراوانی تولید می‌کند. از آنجایی که خاصیت واکنش‌پذیری در سنگ میزبان وجود ندارد، کانی‌سازی در درز و شکستگی‌ها و برش‌های حاصل از فرایند زمین‌ساختی در حریم گسل و به شکل پرکننده فضای خالی تشکیل می‌شود. مجموعه پاراژنز مینرالی کانسارهای MVT در سنگ میزبان شیل - سیلتستون را می‌توان به شکل زیر خلاصه کرد (شکل ۱۴): کوارتز، پیریت، اسفالریت آهن‌دار، گالن، بیتومن، کمی کالکوپیریت، دولومیت کم آهن  $\pm$  باریت  $\pm$  کلسیت.

دو نوع سنگ میزبان مختلف با آلتراسیون و پاراژنز متفاوت

سیلیس بالای محلول گرمابی به تشکیل باندهای چرت می‌شود که به صورت لایه‌بندی با کانی‌سازی منجر دیده می‌شوند. برخلاف همه کانسارهای سرب و روی‌دار، در شیمی محلول گرمابی ذخایر MVT مقدار عنصر Si بسیار پایین و برعکس مقدار Mg و Fe بالا بوده و Mn قابل توجه است. منیزیوم بالا به تشکیل انواع مختلف دولومیت‌های هیدروترمالی منجر می‌شود و مهم‌ترین آلتراسیون همراه با کانه‌زایی دولومیتی شدن است. همچنین Fe بالای محلول به تشکیل دولومیت‌های آهن‌دار، اسفالریت‌های آهن‌دار و آنکریت منجر خواهد شد. این امر در تمامی کانسارهای سرب و روی نوع MVT کمربند ایرانکوه - آهنگران به‌ویژه با سنگ میزبان دولومیتی مشهود است. وجود آهن بالای محلول کانه‌دار به تغییر رنگ واحد دولومیتی میزبان از خاکستری به قرمز - قهوه‌ای منجر می‌شود که می‌توان از آن به‌عنوان یک مؤلفه اکتشافی استفاده کرد (شکل ۱۲ مجموعه معدنی ایرانکوه و کانسار لاکان). این درحالی است که اگر سنگ میزبان شیلی باشد، به دلیل تغییر پاراژنرها چنین تغییری دیده نمی‌شود (شکل ۱۲ کانسار حسین‌آباد).

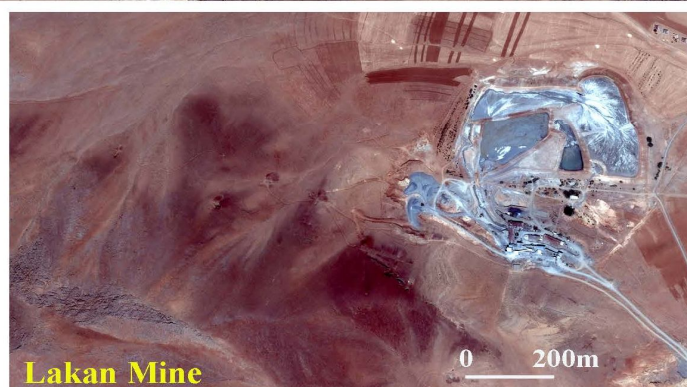
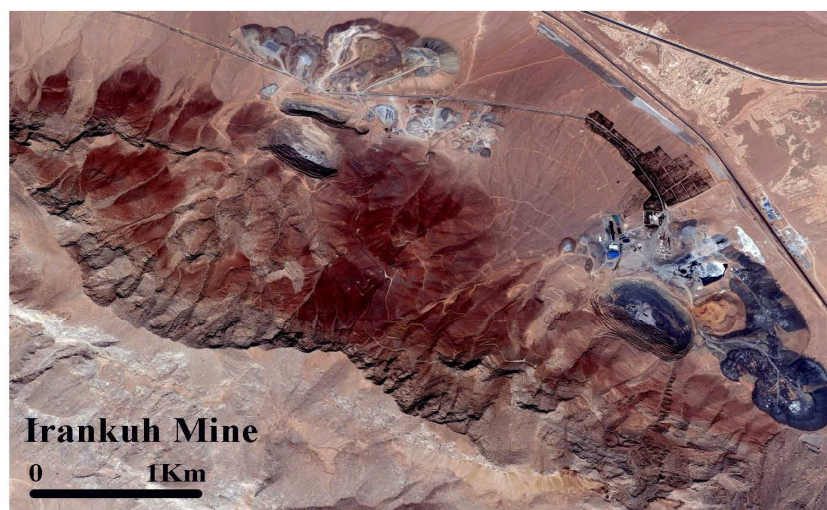
### نقش سنگ میزبان دولومیت و شیل در پاراژنرها و آلتراسیون

سنگ میزبان ذخایر MVT می‌تواند سنگ‌های رسوبی متفاوت باشد؛ زیرا کنترل‌کننده اصلی کانی‌سازی، گسل‌های تراستی هستند که نقش معبر را برای انتقال سیال از اعماق زیاد به حوضه کم عمق فراهم می‌کنند. لذا هر جایی که این گسل‌ها، واحدهای رسوبی را قطع می‌کنند و محلی مناسب برای ته‌نشست سیال کانه‌دار باشد، کانه‌زایی انجام می‌شود؛ اما به‌طور قطع تفاوت‌هایی در پاراژنز مینرالی و نوع آلتراسیون دیده می‌شود که نوع سنگ میزبان آن را کنترل خواهد کرد.

زمانی که محلول گرمابی غنی از آهن و منیزیوم و فقیر از سیلیس وارد سنگ میزبان دولستونی می‌شود، آلتراسیون دولومیتی شکل گرفته و کانی دولومیت در سنگ اولیه و دولومیت‌های هیدروترمالی تشکیل شده نیز تمایل به جذب آهن محلول دارند.

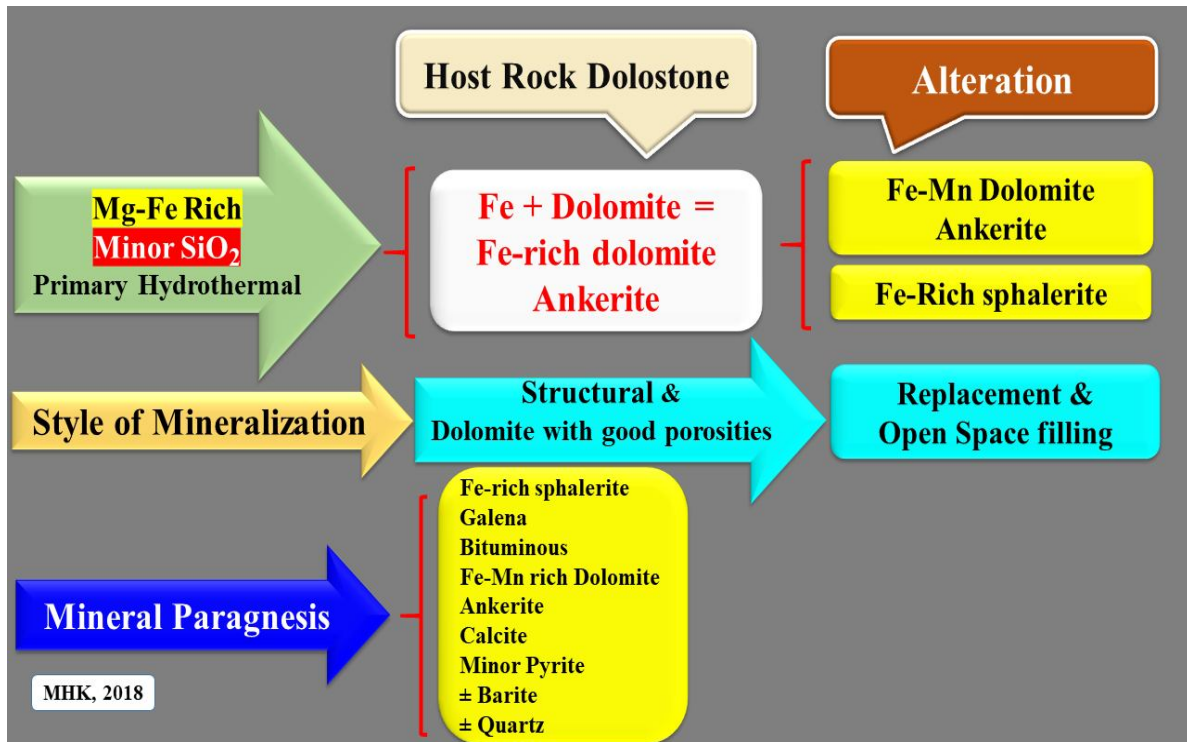
ایرانکوه- آهنگران کانه‌زایی کرده است و همگی از نوع MVT هستند و فقط نوع سنگ میزبان آلتراسیون، نوع کانی‌ها و حتی شکل و ابعاد ذخیره را کنترل کرده است.

به‌خوبی در مجموعه معدنی ایرانکوه (به‌ویژه معدن گوشفیل) و کانسار آهنگران دیده می‌شوند؛ اما در کانسار حسین‌آباد فقط سنگ میزبان شیل-سیلتستون موجود است. بنابراین یک نوع محلول گرمابی و با یک ویژگی خاص در همه مناطق کمربند



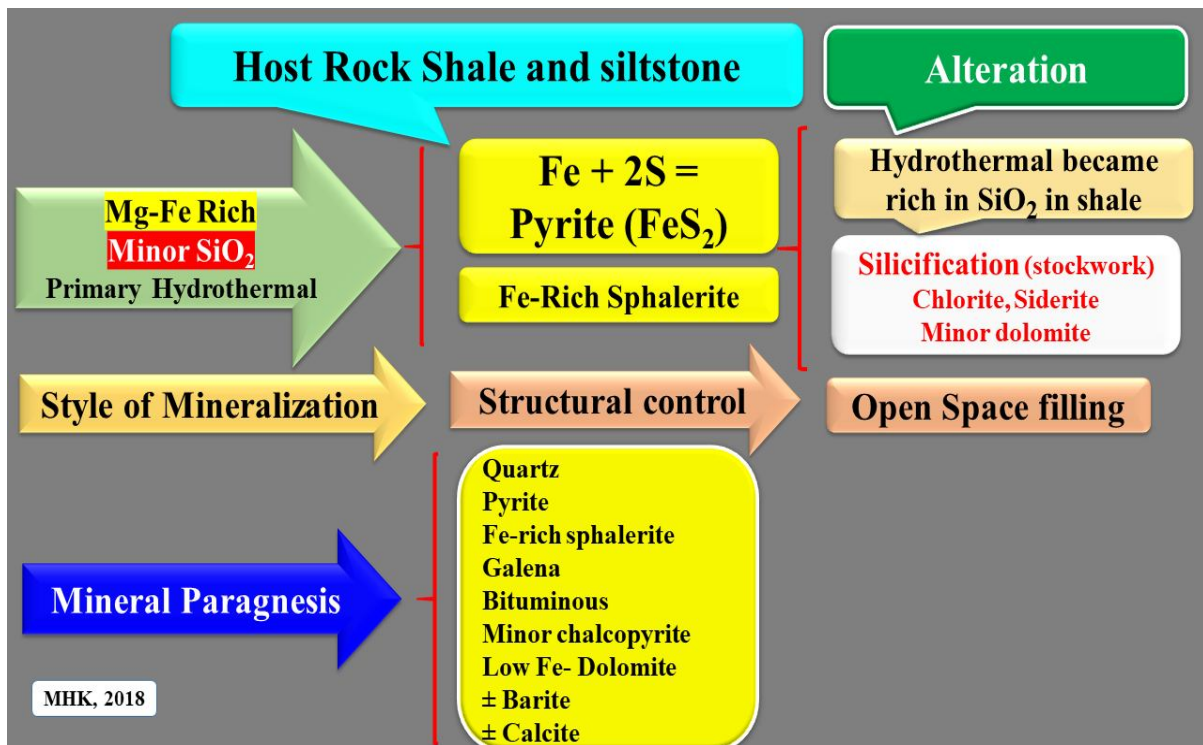
شکل ۱۲. تغییر رنگ واحدهای دولومیتی به قرمز-قهوه‌ای در ایرانکوه و لاکان به‌دلیل وجود آهن بالا در محلول کانه‌دار. این تغییر رنگ در کانسار حسین‌آباد که سنگ میزبان شیلی دارد دیده نمی‌شود.

**Fig. 12.** Color change of dolomitic units to red-brown color in Irankuh and Lakan deposits due to high Fe of ore-fluid. This color change is not shown in Hosseinabad deposit because of host rock shale.



شکل ۱۳. ویژگی‌های کانی‌سازی و آلتراسیون در سنگ میزبان دولستون در ذخایر MVT

Fig. 13. Mineralization and alteration characteristics within host rock dolostone in MVT deposits



شکل ۱۴. ویژگی‌های کانی‌سازی و آلتراسیون در سنگ میزبان شیل-سیلتستون در ذخایر MVT

Fig. 14. Mineralization and alteration characteristics within host rock shale-siltstone in MVT deposits

سنگ میزبان شیل - سیلستون خاصیت واکنش پذیری ندارد؛ لذا اگر کانی سازی درون این واحد تشکیل شود، فقط به شکل پرکننده فضای خالی (درز و شکستگی‌های ایجاد شده در حریم گسل و برش‌های گسلی) است. کانه‌زایی محدود به حریم گسل، کوچک‌تر و با عیار کمتر است. این حالت در بخش‌هایی از ایرانکوه و آهنگران و در کل کانسار حسین آباد دیده می‌شود. در نهایت نقش گسل‌های مخرب را در شکل و ابعاد نهایی ذخیره نباید نادیده گرفت. در کل پنجره ایرانکوه - آهنگران گسل‌هایی اغلب امتداد لغز و کمتر نرمال وجود دارند که روند شمال شرقی - جنوب غربی دارند و بعد از تشکیل کانی سازی، آنها را جابه جا کرده‌اند.

### بحث و نتیجه گیری

پیش از ۲۰ معدن و اندیس سرب و روی با شاخصه کانسارهای MVT در کمربند ایرانکوه - آهنگران با روند شمال غربی - جنوب شرقی و در مرکز زون ساختاری سنندج - سیرجان دیده می‌شود. تمامی این کانی سازی‌ها منطبق بر گسل‌های تراست هستند که کنترل کننده تشکیل این ذخایر بوده است (شکل ۱۰). گسل‌های تراست مهم‌ترین شاخص برای تعیین سن نسبی کانی سازی سرب و روی در کمربند کانی سازی سرب و روی نوع MVT ایرانکوه - آهنگران محسوب می‌شوند. محلول‌های گرمابی کانه‌دار با استفاده از معیار مناسب گسل‌های تراست مهاجرت کرده و به مکان‌های فعلی کانی سازی منتقل شده‌اند. این گسل‌ها شیل و ماسه سنگ‌های دگرگون شده ژوراسیک و مجموعه سنگ‌های دولومیتی و آهک‌های کرتاسه زیرین و بالایی را قطع کرده‌اند (شکل‌های ۲ و ۴). بنابراین شیل و ماسه سنگ‌های دگرگون شده ژوراسیک و مجموعه سنگ‌های دولومیتی و آهک‌های کرتاسه زیرین و بالایی فقط سنگ میزبان تمامی کانسارهای سرب و روی واقع در این محدوده جغرافیایی هستند. گسل‌های تراست در رژیم زمین ساختی فشارشی و در اثر فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتیس، در محدوده زمانی اواخر

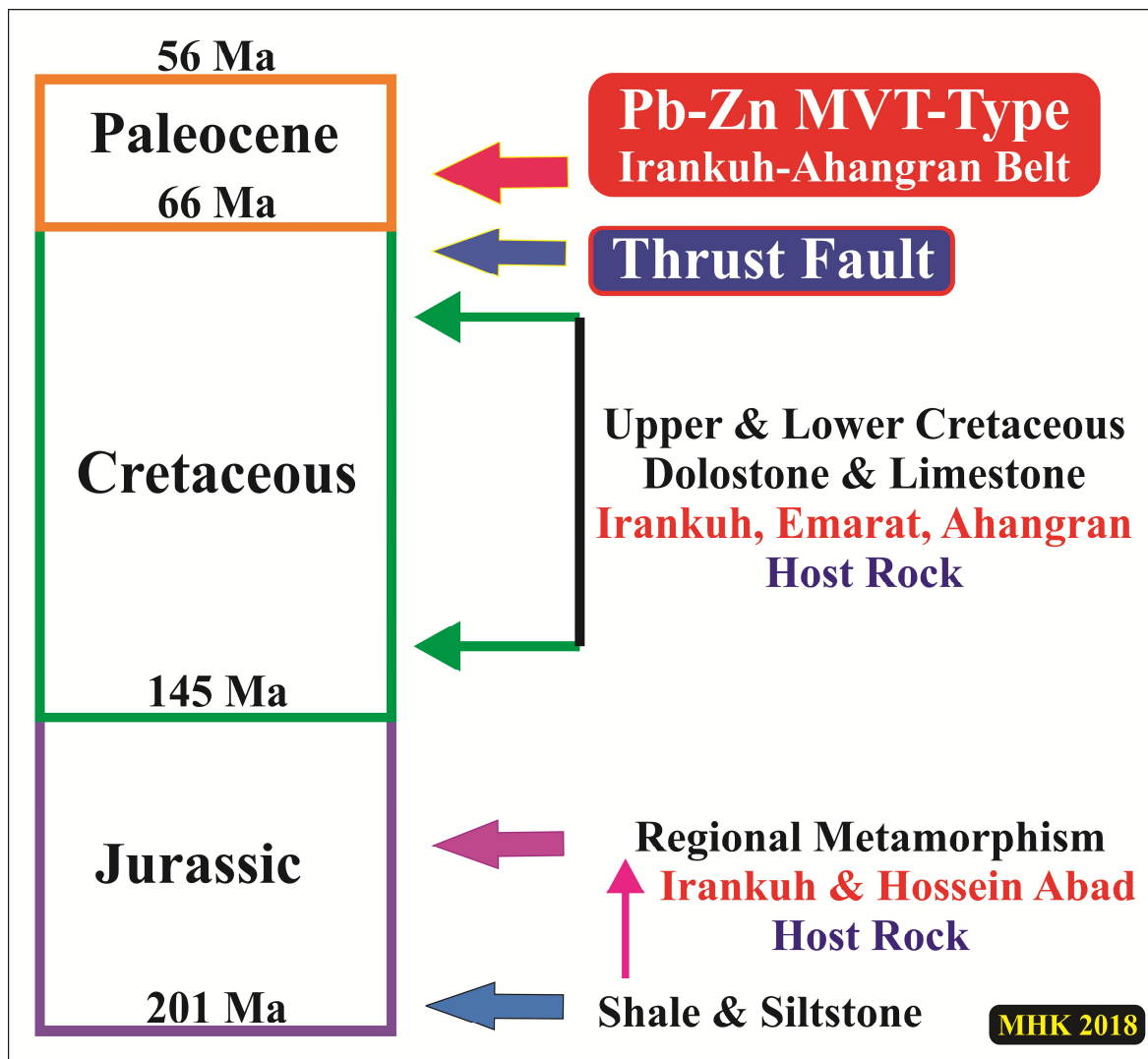
### نقش سنگ میزبان در شکل، ابعاد، میزان ذخیره و عیار

سنگ میزبان کانسارهای MVT اغلب از نوع دولستون و کمتر سنگ آهک و شیل معرفی شده است (Leach and Sangester, 1993; Leach et al., 2005, 2010). این در حالی است که نقش اصلی در تشکیل این نوع ذخایر توسط مجموعه مؤلفه‌های مهم حاکم بر فرورانش و همچنین گسل‌های عمیق تراستی که محلول کانه‌دار را از اعماق به سمت بالا هدایت می‌کنند، کنترل می‌شود. دولستون بهترین سنگ میزبان برای تشکیل کانی سازی است؛ اما این واقعیت وجود دارد که همیشه در مسیر گسل سازنده، دولستون حضور ندارد و اگر سیال کانه‌دار به سنگ دیگری همانند شیل - سیلستون وارد شود و از لحاظ دما و pH شرایطی مناسب برای ته‌نشست کمپلکس‌ها فراهم شود، کانی سازی تشکیل خواهد شد. اما آنچه که مسلم است شکل، ابعاد، میزان ذخیره و عیار کانسار در سنگ میزبان دولستونی با شیلی - سیلستونی بسیار متفاوت خواهد بود.

دولستون قابلیت واکنش پذیری بسیار خوبی دارد؛ اما همه دولستون‌ها میزبان مناسبی برای تشکیل یک کانی سازی پر عیار و اقتصادی نیستند. میزان تخلخل، مقدار حفرات سنگ و اندازه دانه‌ها عامل‌هایی مهم برای تشکیل کانسار هستند. هرچه تخلخل و مقدار حفرات بیشتر و اندازه دانه‌ها درشت‌تر باشد، کانی سازی وسیع‌تر و با عیار مناسب‌تری تشکیل خواهد شد. این مسئله در مجموعه معدنی ایرانکوه به خوبی مشهود است. انواع دولستون در این منطقه وجود دارد؛ اما فقط دولستون درشت‌دانه توده‌ای تا ضخیم لایه خاکستری تا قهوه‌ای - قرمز همراه با مواد آلی و کمتر واحدهای دولستون قهوه‌ای تا خاکستری دانه درشت و سنگ آهک دولومیتی درشت‌دانه حفره‌دار، میزبان کانی سازی شده‌اند. کانی سازی در سنگ میزبان دولستون به شکل جانشینی و پرکننده فضاهای خالی (فضاهای ایجاد شده توسط گسل مانند رگه‌های زمین ساختی یا برش‌های گسلی و یا حفرات سنگ میزبان) تشکیل می‌شود و به همین دلیل ابعادی وسیع را به خود اختصاص می‌دهد. این مورد در کانسار آهنگران نیز به وضوح دیده می‌شود.

(شکل ۱۵). یعنی اختلاف سنی شیل‌های ژوراسیک با کانی‌سازی به‌طور نسبی حدود ۱۱۰ میلیون سال و دولومیت‌های کرتاسه زیرین با کانی‌سازی به‌طور نسبی حدود ۵۰ میلیون سال است. عدم توجه به این اختلاف سنی بین سنگ میزبان و کانی‌سازی و شرایط واقعی تشکیل این کانسارها در نظریات قبلی موجب انحراف در مدل و منطق اکتشاف در این منطقه شده است.

کرتاسه بالایی (بین ۷۰ تا ۷۵ میلیون سال قبل) تشکیل شده‌اند (شکل ۱۵). اخیراً لیو و همکاران (Liu et al., 2019) با استفاده از بررسی ایزوتوپی Re-Os در کانی پیریت، سن کانی‌سازی ایرانکوه را  $66/5 \pm 1/6$  میلیون سال (اواخر کرتاسه-اوایل پالئوسن) تعیین کردند که تمامی شواهد را تأیید می‌کند. لذا سن تمامی کانسارهای سرب روی واقع در این محدوده جغرافیایی بر اساس مستندات زمین‌شناسی و سن‌سنجی انجام‌شده (Liu et al., 2019) در محدوده زمانی ۶۶ تا ۵۶ میلیون سال قبل است



شکل ۱۵. رابطه زمانی سنگ میزبان، دگرگونی ناحیه‌ای، گسل‌های تراست و کانی‌سازی سرب و روی در کمربند ایرانکوه-آهنگران

Fig. 15. Time relations of host rock, regional metamorphism, thrust faults, and Pb-Zn mineralization in Irankuh-Ahangran Belt

نحوه تشکیل کانسارهای MVT این کمر بند را می‌توان در شکل ۱۸ خلاصه کرد. یک محلول گرمابی نشأت گرفته از دهیدراته شدن پوسته اقیانوسی فرورونده در ناحیه جلوی کمانی که غنی از  $H_2O$ ،  $MgO$ ،  $SO_4$ ،  $Cl$  و  $Zn$  و فقیر از  $Si$  است، باعث متاسوماتیزم لبه گوشته شده است و سیال نهایی گرم وارد پی‌سنگ پوسته قاره‌ای می‌شود. واکنشی بین محلول گرمابی و پوسته قاره‌ای صورت می‌گیرد و ممکن است برخی عناصر مانند سرب، روی و باریم در اثر پدیده شست‌وشو وارد محلول شوند. محلول گرمابی نهایی که غنی از سرب، روی، آهن، منیزیم و دیگر عناصر بوده و تهی‌شدگی در سیلیس دارد، از طریق گسل‌های تراستی به بالا راه پیدا می‌کند. محلول گرمابی در شرایط مناسب دما و pH، کانی‌سازی خود را در سنگ میزبان دولومیتی کرتاسه و یا شیل - سیلستون ژوراسیک بر جای گذاشته است که پاراژنرها، آلتراسیون، شکل، ابعاد، میزان ذخیره و عیار در دو سنگ میزبان مختلف، کاملاً متفاوت است (شکل ۱۸).

نبود ماگماتیسیم و فاصله کانسارهای سرب و روی کمر بند ملایر - اصفهان از واحدهای آذرین مزوزوئیک (شکل ۱۰)، تفاوت آشکار اسلب فرورونده شده این بخش با قسمت‌های دیگر زون ساختاری را تأیید می‌کند؛ زیرا برای تشکیل ماگماتیسیم، آب اقیانوسی باید در اعماق بیش از ۸۰ کیلومتری آزاد شود تا به ذوب‌بخشی منجر شود (شکل‌های ۱۶ و ۱۷).

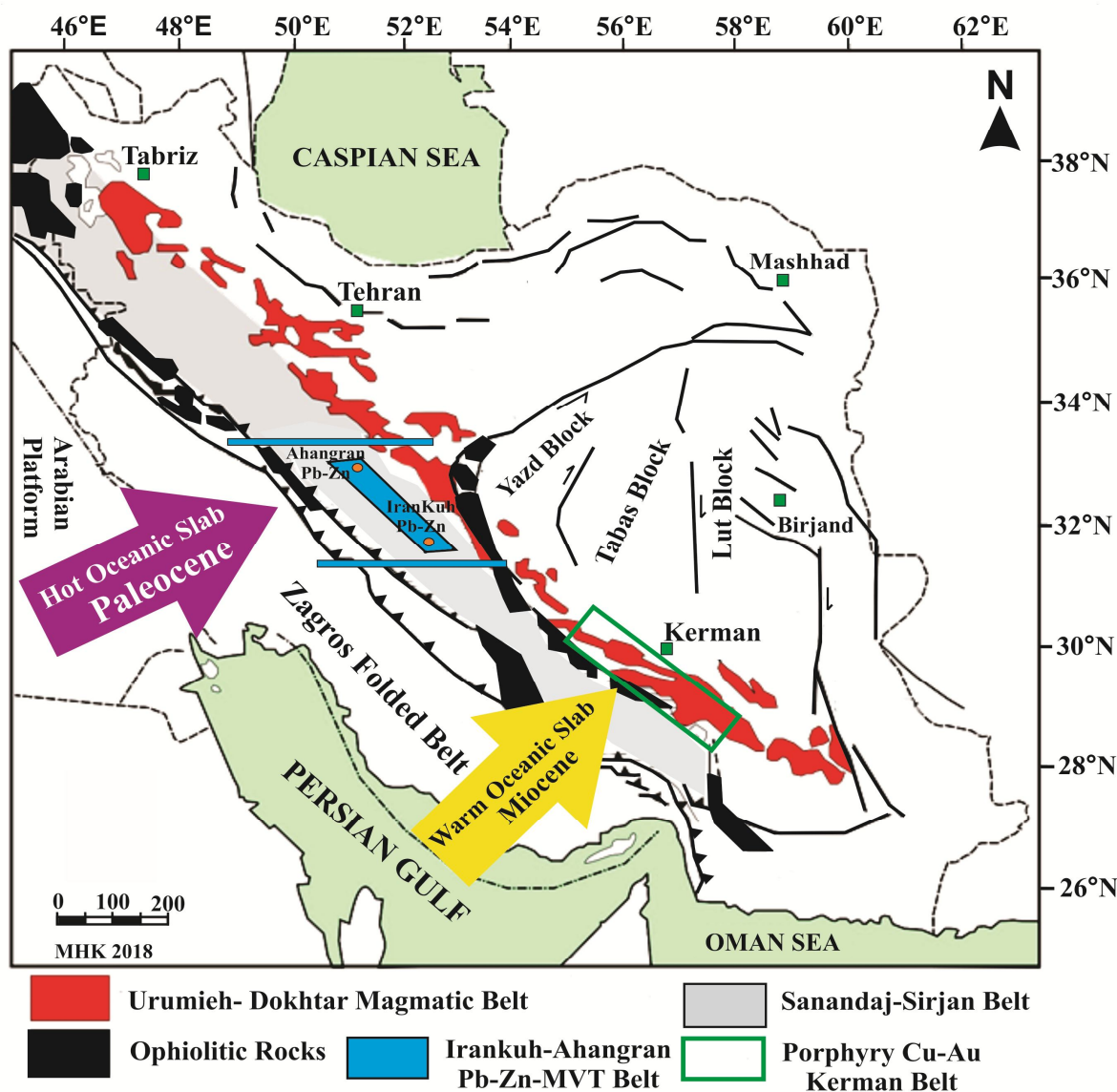
شیمی محلول منحصر به فرد کانسارهای MVT که غنی از منیزیم و فقیر از سیلیس است، در کانسارهای سرب و روی کمر بند ایرانکوه - آهنگران مشاهده می‌شود. همچنین آهن و منگنز در محلول کانه‌دار این بخش بالاست. همین ویژگی سیال باعث شده است تا در ذخایر میزبان در دولستون (ایرانکوه و آهنگران)، اسفالریت آهن‌دار، دولومیت غنی از آهن و منگنز، آنکریت، گالن، بیتومن، کلسیت، مقدار اندکی پیریت  $\pm$  باریت  $\pm$  کوارتز شکل بگیرند. اما در سنگ میزبان شیل - سیلستون (کانسار حسین‌آباد و بخش‌هایی از ایرانکوه و آهنگران) به دلیل نبود کانی دولومیت، آهن محلول با گوگرد واکنش داده و

گسل‌های تراست در پنجره‌ای ژئودینامیکی زون فشارشی و در اثر فرورانش پوسته اقیانوسی نتوتیس تشکیل شده‌اند و از آنجایی که واحدهای کرتاسه بالایی را در این کمر بند قطع کرده‌اند، پس جوان‌تر از کرتاسه بالایی هستند. نکته مهم این است که تراست‌ها در شمال‌غربی و جنوب‌شرقی کمر بند ایرانکوه - آهنگران و در سراسر زون سندج - سیرجان ادامه دارند؛ اما کانی‌سازی‌های MVT فقط در بخش خاصی دیده می‌شوند. این مسئله نشان می‌دهد که پوسته فرورنده شده در این بخش باید متفاوت با قسمت‌های دیگر باشد. کریم پور و صادقی (Karimpour and Sadeghi, 2018) معتقدند که اسلب فرورانش کرده در طول این پنجره ۴۰۰ کیلومتری (کمر بند ایرانکوه - آهنگران) از نوع پوسته اقیانوسی جوان و داغ بوده است (شکل ۱۶). در چنین پوسته‌هایی، قبل از رسیدن به اعماق ۴۰ کیلومتری در منطقه جلوی کمانی بیش از ۹۰ درصد آب اقیانوسی آزاد می‌شود. مهم‌ترین سیلیکات‌هایی که در این عمق شکسته می‌شوند، آنتیگوریت، هورنبلند، کلریت و تالک هستند که از منیزیم بالایی نیز برخوردار هستند. در نهایت محلول هیدروترمالی غنی از  $Fe$ ،  $H_2S$ ،  $Cl$ ،  $Mg$  و  $Zn$  و  $Si$  پایین از پوسته قاره‌ای عبور کرده است و از محل گسل‌های تراست به بالا راه پیدا می‌کند (شکل ۱۷). بخشی از فلزات مانند روی و آهن می‌تواند از پوسته اقیانوسی نشأت بگیرد؛ اما مقدار آن مشخص نیست. در طی صعود محلول گرمابی از عمق، به‌طور قطع پوسته قاره‌ای نیز برای تأمین فلزات به‌ویژه سرب نقش به‌سزایی دارد که این مسئله توسط بررسی‌های ایزوتوپی تأیید شده است (Ghazban et al., 1994; Hosseinkhani and Molasalehi, 2013). این نظریه و شواهد زمین‌شناسی برای تشکیل کانسارهای سرب و روی نوع MVT کمر بند ایرانکوه - آهنگران با تعیین سن انجام‌شده توسط لیو و همکاران (Liu et al., 2019) همخوانی دارد و می‌توان اذعان داشت که کانی‌سازی‌های این کمر بند در دامنه سنی بین ۶۶ تا ۵۶ میلیون سال پیش اغلب در پالئوسن شکل گرفته‌اند.



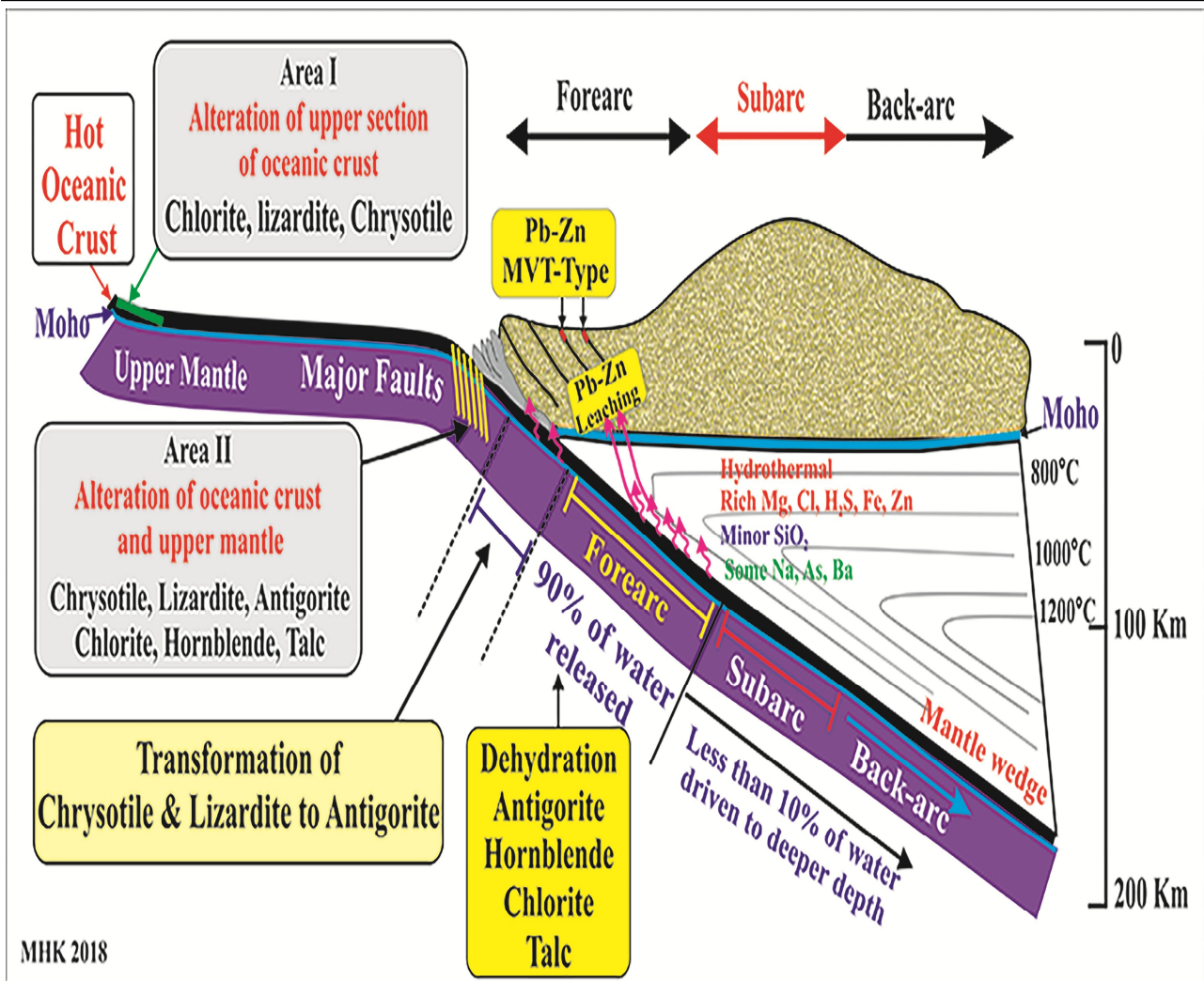
دولومیتی باشد؛ بلکه هر سنگ رسوبی دیگری که توسط گسل تراست سازنده قطع شده باشد و شرایط ته‌نشست محلول‌کننده در آن فراهم شود، می‌تواند نقش سنگ میزبان را داشته باشد. اما مسلماً باید نوع آلتراسیون، پاراژن‌ها، شکل، میزان ذخیره و عیار متفاوت باشد.

پیریت فراوانی را تولید کرده است. همچنین سیلیس از سنگ میزبان شسته شده و مقدار کانی باطله کوارتز افزایش یافته است. پاراژن‌مینرالی در این سنگ میزبان عبارتست از: کوارتز، پیریت، اسفالریت آهن‌دار، گالن، بیتومن، کمی کالکوپیریت، دولومیت کم آهن  $\pm$  باریت  $\pm$  کلسیت. بنابراین لزومی ندارد که سنگ میزبان یک کانسار MVT حتماً واحدهای کریناته



شکل ۱۶. موقعیت کانسارهای سرب و روی در کمربند ایرانکوه-آهانگران و جهت فرورانش اسلب اقیانوسی داغ پالئوسن (تغییر یافته از کریم‌پور و صادقی (Karimpour and Sadeghi, 2018))

Fig. 16. Location of Pb-Zn deposits at Irankuh-Ahangran Belt and trend of Paleocene hot oceanic slab (modified after Karimpour and Sadeghi, 2018)

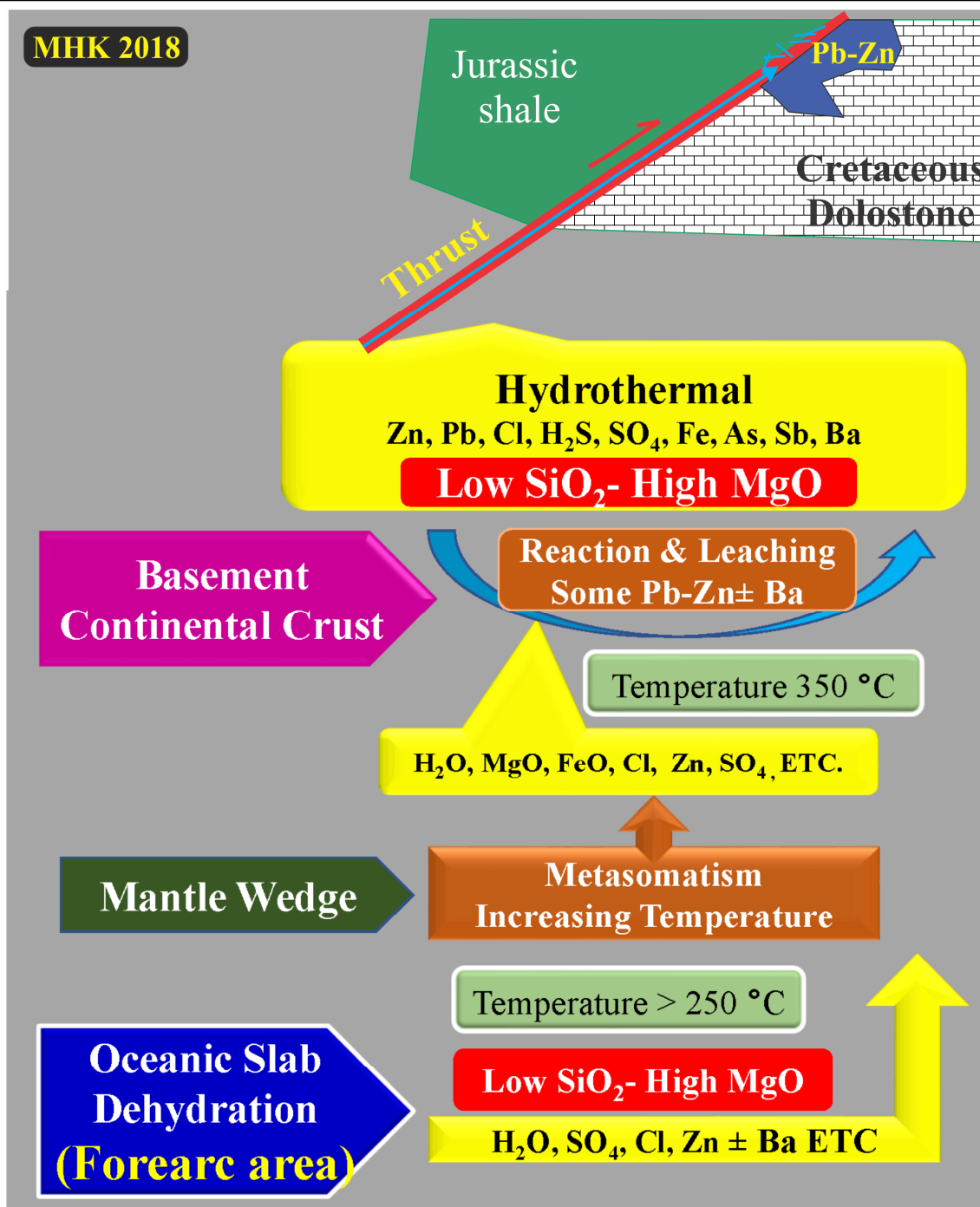


شکل ۱۷. شکل شماتیک یک پوسته اقیانوسی فرورانده شده داغ که دهیدراته شده و بخش زیادی از آب خود را در ناحیه جلوی کمان آزاد می‌کند. (تغییر یافته از کریم‌پور و صادقی (Karimpour and Sadeghi, 2018))

**Fig. 17.** A schematic figure of hot oceanic slab, dehydrates and releases most of the water within the forearc region (modified after Karimpour and Sadeghi, 2018)

ذخیره و عیار بالایی برخوردار باشد؛ اما در سنگ میزبان شیل-سیلستون، محلول کانه‌دار فقط فضاهای خالی ایجاد شده در اثر فعالیت زمین‌ساختی را در حریم گسل به شکل رگه-رگه‌چه پر می‌کند. لذا ذخیره کوچک‌تر و با عیار کمتری دیده می‌شود. حضور گسل‌های مخرب اغلب امتداد لغز که باعث جابه‌جایی‌های متعددی در کانسارهای سرب و روی کمرند ایرانکوه-آهنگران شده نیز در ابعاد و شکل نهایی ذخیره مؤثر بوده است.

وجود آهن بالا در محلول گرمابی کانسارهای MVT کمرند ایرانکوه-آهنگران به تغییر رنگ فاحش (رنگ اخراپی یا قرمز-قهوه‌ای) در دولومیت‌های میزبان منجر شده است که می‌توان از این موضوع برای اکتشاف ذخایر پنهان در دیگر نقاط این کمرند به کمک بررسی‌های ماهواره‌ای استفاده کرد. حضور دولستون دانه درشت و دارای تخلخل و حفرات زیاد به عنوان سنگ میزبان باعث می‌شود تا کانی‌سازی به شکل جانشینی و پرکننده فضاهای خالی گسترده شده و کانی‌سازی از



شکل ۱۸. شکل شماتیک و خلاصه شده نحوه تشکیل ذخایر MVT کمربند ایرانکوه- آهانگران

Fig. 18. A schematic and simplified figure of formation of MVT deposits in Irankuh-Ahangaran belt

خاص زمین شناسی و جغرافیایی ارائه شده، می توان برای اکتشاف ذخایر MVT پنهان در این کمربند اقدام کرد.

با استناد به تمام شواهد سنگ شناسی، آلتراسیون، شکل و حالت کانی سازی، وجود گسل های تراست، پاراژنز مینرالی و موقعیت

## 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(3): 401–419.
- Akbari, Z., 2017. Model for the genesis of Ahangaran Fe-Pb deposit (SE of Malayer), based on ore types, Geochemistry and stable isotopic studies. Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 264 pp.
- Appold, M.S. and Garven, G., 1999. The hydrology of ore formation in the Southeast Missouri District: numerical models of topography-driven fluid flow during the Ouachita Orogeny. *Economic Geology*, 94(6): 913–936.
- Ayati, F., Dehghani, H., Mokhtari, A.R. and Mojtahedzadeh, H., 2013. Geochemistry and mineralogy studies of Gushfil Pb-Zn deposit, Irankuh, Isfahan. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 3(6): 83–91 (in Persian).
- Barrie, C.T. and Hannington, M.D., 1999. Introduction: Classification of VMS deposits based on host rock composition. In C.T. Barrie and M.D. Hannington (Editors), *Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings*. Society of Economic Geologists, *Reviews in Economic Geology* 8, pp. 2–10.
- Bradley, D.C., 1993. Role of lithospheric flexure and plate convergence in the genesis of some Appalachian zinc deposits. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 2039: 35–43.
- Bradley, D.C. and Leach, D.L., 2003. Tectonic controls of Mississippi Valley-type lead-zinc mineralization in orogenic forelands. *Mineralium Deposita*, 38(6): 652–667.
- Boveiri Konari, M. and Rastad, E., 2017. Nature and origin of dolomitization associated with sulphide mineralization: new insights from the Tappehsorkh Zn-Pb (-Ag-Ba) deposit, Irankuh Mining District, Iran. *Geological Journal*, 53(1): 1–211
- Boveiri Konari, M., Rastad, E., Mohajjel, M., Nakini, A. and Haghdoost, M., 2016. Structure, Texture, Mineralogy and Genesis of Sulphide Ore Facies in Tappehsorkh Detrital-Carbonate-Hosted Zn-Pb-(Ag) Deposit, South of Esfahan. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 25(97): 221–236. (in Persian with English abstract).
- Duane, M.J. and de Wit, M.J., 1988. Pb-Zn ore deposits of the northern Caledonides; products of continental-scale fluid mixing and tectonic expulsion during continental collision. *Geology*, 16(11): 999–1002.
- Ehya, F., Lotfi, M. and Rasa, I., 2010. Emarat carbonate-hosted Zn-Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(2): 186–194.
- Garven, G., 1985. The role of regional fluid flow in the genesis of the Pine Point deposit, Western Canada Sedimentary Basin. *Economic Geology*, 80(2): 307–324.
- Ge, S. and Garven, G., 1992. Hydromechanical modeling of tectonically driven groundwater flow with application to the Arkoma Foreland Basin. *Journal of Geophysical Research*, 97 (B6): 9119–9144.
- Ghasemi, A., 1995. Facies analysis and geochemistry of Kolah-Darvazaeh, Goud-Zendan, and Khaneh-Gorgi Pb-Zn deposits from south of Irankuh. M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 158 pp. (in Persian)
- Ghasemi, A. and Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6): 683–693.
- Ghazban, F., McNutt, R.H. and Schwarcz, H.P., 1994. Genesis of sediment-hosted Zn-Pb-Ba deposits in the Irankuh district, Esfahan area, west-central Iran. *Economic Geology*, 89(6): 1262–1278.
- Hosseini-Dinani, H. and Aftabi, A., 2016. Vertical litho-geochemical halos and zoning vectors at Goushfil Zn-Pb deposit, Irankuh district, southwestern Isfahan, Iran: Implications for concealed ore exploration and genetic models. *Ore Geology Reviews*, 72(1): 1004–1021.
- Hosseini-Dinani, H., Aftabi, A., Esmaeili, A. and Rabbani, M., 2015. Composite soil-geochemical halos delineating carbonate-hosted zinc-lead-barium mineralization in the Irankuh district, Isfahan, west-central Iran.

- Journal of Geochemical Exploration, 156: 114–130.
- Hosseinkhani, A. and Molasalehi, F., 2013. Lead and silver mineralogical studies and lead isotope investigations in Ahangaran mine, Malayer, Iran. Scientific Quarterly Journal, Geosciences, 24(94): 359–368. (in Persian with English abstract)
- Houshmandzadeh, A.R., Ohanian, T., Sahandi, M.R., Taraz, H., Aganabati, A., Soheili, M., Azarm, F. and Hamdi, B., 1975. Geological map of Eglid, scale 1:250000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Kaiser, C.J. and Ohmoto, H., 1988. Ore-controlling structures of Mississippi Valley-type mineralization on the North American midcontinent as products of late Paleozoic convergent plate tectonism. In: G. Kisvarsanyi and S.K. Grant (Editors), North American Conference on the Tectonic Control of Ore Deposits and the Vertical and Horizontal Extent of Ore Systems, Proceedings Volume: Rolla. University of Missouri-Rolla, Missouri, pp. 424–430.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Esmaeili Sevieri, A. and Shabani, S., 2018a. Mineralogy and geochemical variations of altered host rock in Irankuh Pb-Zn mining district, SW Isfahan. Journal of Advanced Applied Geology, in press. (in Persian)
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Esmaeili Sevieri, A., Shabani, S., Allaz, J.M. and Stern, C.R., 2018b. Geology, mineralization, mineral chemistry, and ore-fluid conditions of Irankuh Pb-Zn mining district, south of Isfahan. Journal of Economic Geology, 9(2): 267–294. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H. and Sadeghi, M., 2018. Dehydration of hot oceanic slab at depth 30–50 km: KEY to formation of Irankuh-Emarat Pb-Zn MVT belt, Central Iran. Journal of Geochemical Exploration, 194: 88–103.
- Kesler, S.E. and Carrigan, C.W., 2002. Discussion on “Mississippi Valley-type lead–zinc deposits through geological time: implications from recent age-dating research” by DL Leach, D.L., Bradley, D., Lewchuk, M.T., Symons, D.T.A., de Marsily, G. and Brannon, J. (2001) Mineralium Deposita, 36: 711–740. Mineralium Deposita, 37(8): 800–802.
- Kesler, S.E. and van der Pluijm, B.A., 1990. Timing of Mississippi Valley-type mineralization: relation to Appalachian orogenic events. Geology, 18(11): 1115–1118.
- Khosrobeygi, M., 2019. Mineralization, geochemistry and microthermometry studies in the Hossein-Abad deposit (southwest Arak). M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, In Press.
- Leach, D.L., Bradley, D.C., Lewchuk, M., Symons, D.T.A., Brannon, J. and de Marsily, G., 2001. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time: implications from recent age-dating research. Mineralium Deposita, 36(8): 711–740.
- Leach, D.L. and Sangster, D., 1993. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits. Geological Association of Canadian. Specific Paper, 40: 289–314.
- Leach, D.L., Sangster, D.F., Kelley, K.D., Ross, R.L., Garven, G. and Allen, C.R., 2005. Sediment-hosted Pb-Zn deposits: a global perspective. Economic Geology, 100<sup>th</sup> Anniversary, 1905–2005: 561–608.
- Leach, D.L., Taylor, R.D., Fey, D.L., Diehl, S.F. and Saltus, R.W., 2010. A Deposit Model for Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Ores, Chapter A of Mineral Deposit Models for Resource Assessment. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, Scientific Investigations Report 2010–5070–A., 64 pp.
- Liu, Y., Song, Y., Fard, M., Zhou, L., Hou, Z. and Kendrick, M.A., 2019. Pyrite Re-Os age constraints on the Irankuh Zn-Pb deposit, Iran, and regional implications. Ore Geology Reviews, 104: 148–159.
- Maanijou, M., Vafaei Zad, M. and Aliani, F., 2015. Fluid inclusion and sulfur stable isotope evidence for the origin of the Ahangran Pb-Ag deposit. Journal of Economic Geology, 7(2): 343–367. (in Persian with English abstract)
- Mahmoodi, P., Rastad, P., Rajabi, A. and Peter, J.M., 2018. Ore facies, mineral chemical and fluid inclusion characteristics of the Hossein-Abad and Western Haft-Savaran sediment-hosted Zn-Pb deposits, Arak Mining District, Iran. Ore Geology Reviews, 95: 342–365.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L. and Sahandi, M.R., 2003. Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj–Sirjan zone, western Iran. Journal of Asian Earth Sciences,

- 21(4): 397–412.
- Momenzadeh, M., Shafighi, S., Rastad, E. and Amstutz, G.C., 1979. The Ahangaran lead-silver Deposits, SE-Malayer, west central Iran. *Mineralium Deposita*, 14(3): 323–341.
- 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(14): 1649–1672.
- Ranjbaran, M., 1991. Sedimentary environment and diagenesis of carbonate rocks containing lead and zinc in Ahangaran mine, Malayer. M.Sc. Thesis, Tehran University, Tehran, Iran, 137 pp.
- Rastad, E., 1981. Geological, mineralogical and ore facies investigations on the Lower Cretaceous stratabound Zn – Pb – Ba – Cu deposits of the Irankuh mountain range, Isfahan, west central Iran. Ph.D. Thesis, Heidelberg University, Heidelberg, Germany, 334 pp.
- Reichert, J., 2007. A metallogenic model for carbonate-hosted non-sulphide zinc deposits based on observations of Mehdi Abad and Irankuh, Central and Southwestern Iran. Ph.D. Thesis, Martin Luther University Halle Wittenberg, Halle, Germany, 152 pp.
- Timoori-Asl, F., 2010. Sedimentology and petrology of Jurassic deposits and Basinal brines studies in formation of Irankuh deposit. M.Sc. Thesis, Isfahan University, Isfahan, Iran, 120 pp. (in Persian)
- Timoori-Asl, F., Pakzad, H.R. and Bagheri, H., 2011. Source of metals and ore-bearing fluids in Irankuh Pb-Zn deposit. *Sedimentology and Stratigraphy Research*, 27(44): 83–102. (in Persian)
- Zahedi, M., 1976. Geological map of Esfahan, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Zamanian, H., 1993. Mineralogy, paragenesis and genesis of lead and silver of Ahangaran, Malayer. M.Sc. Thesis, Tarbiat Moalem University, Tehran, Iran, 280 pp.



## New hypothesis on time and thermal gradient of subducted slab with emphasis on dolomitic and shale host rocks in formation of Pb-Zn deposits of Irankuh-Ahangaran belt

Mohammad Hassan Karimpour<sup>\*1&2</sup>, Azadeh Malekzadeh Shafaroudi<sup>1&2</sup>, Zahra Alaminia<sup>3</sup>, Abbas Esmaeili Sevieri<sup>1</sup> and Charles R. Stern<sup>4</sup>

1) Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2) Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3) Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

4) Department of Geological Sciences, University of Colorado, Boulder, U.S.A.

Submitted: Nov. 10, 2018

Accepted: Jan. 01, 2019

**Keywords:** MVT-type deposits, Shale, Dolomite, Thrust fault, Subduction, Irankuh-Ahangaran belt

### Introduction

Mississippi Valley-Type (MVT) deposits are epigenetic zinc and lead deposits with minor copper hosted by dolostone, limestone, and locally sandstone in platform carbonate sequences inboard of major orogenic belts (Leach and Sangster, 1993; Leach et al., 2010).

The Irankuh-Ahangaran Belt, which is the most important Pb-Zn mineralized zone of Iran, is situated within the Sanandaj-Sirjan tectonic zone. This belt is 400 km in length and 100 km in width. Three deposits including Irankuh mininig district, Ahangaran and Hosseinabad deposits were studied in this article (Fig. 1).

The aim of this research is study of thermal gradient of subducted slab and age of formation of Pb-Zn deposits at Irankuh-Ahangaran belt, which is contrary information has been published so far on the type and their formation. Also, chemistry of ore-fluid in MVT deposits and impact of dolomitic and shale host rock on paragenesis, alteration, style, reserves and grade of deposits were discussed. These parameters will certainly be useful for exploration of the hidden MVT type deposits in the Irankou-Ahangan belt.

### Result and Discussion

The Irankuh mineralization is hosted by Cretaceous dolostone and minor Jurassic shale

rocks as epigenetic. The constructive thrust fault, which has been cut the Jurassic and Cretaceous host rocks, has played a major role in the rising of fluid and formation of mineralization. Mineralization is occurred as replacement and open space filling (fault breccia, veinlets and cavity of rock) in dolostone and breccia, veinlet and open space filling in shale host rock. The mineral assemblages are Fe-rich sphalerite, Fe- and Mn-rich dolomite, ankerite, galena, minor pyrite, bituminous, calcite ± quartz ± barite within carbonate host rocks, whereas quartz, pyrite, Fe-rich sphalerite, galena, minor chalcopyrite, low Fe-dolomite, bituminous, ± barite ± calcite are important primary minerals at clastic hos rocks (Karimpour et al., 2018).

The Ahangaran deposit is very similar to Irankuh in host rock, alteration, paragenesis, and form of mineralization. Thrust fault has a constructive role for occurrence of mineralization and later destructive strike slip and normal faults have caused the displacement and destruction of mineralization.

The Hosseinabad deposit is hosted by Jurassic shale, siltstone, and sandstone rocks as vein-veinlets, breccia and open space filling with structural control. Alteratin consists of silicification, chlorite, bituminous, and minor siderite, dolomite and ankerite similar to

\*Corresponding authors Email: karimpur@um.ac.ir

mineralization hosted by shale in Irankuh district. The mineral assemblages are galena, Fe-rich sphalerite, pyrite, chalcopyrite and minor pyrotite. Due to the lack of a proper dolostone unit in the Husseinabad deposit, mineralization is concentrated in particular areas with low-grade and low-reserves.

Based on lithology, alteration, mineralization style, structural control by thrust faults, mineral paragenesis, and comparison with different types of Pb-Zn deposits, all deposits of Irankuh-Ahangaran belt are MVT-type. Deep-seated thrust faults formed during the early stages of subduction (~ 70 to 75 Ma), and played an important role in the upward migration of hydrothermal fluids from the basement to shallow depths. The geochronology of pyrite in Irankuh district based on Re-Os method indicate age of Irankuh Pb-Zn mineralization is  $66.5 \pm 1.6$  Ma (Liu et al., 2019). Since the thrust faults have been cut the Jurassic to Upper Cretaceous rocks, and according to the absolute age determined in Irankuh, the mineralization of this belt have been formed in the age range of 66 to 56 million years ago, mainly in the Paleocene (Fig. 15).

Karimpour and Sadeghi (2018) suggested the hydrothermal fluid originated from the dehydration of a hot and young oceanic subducted slab, which liberated Pb, Zn, and other metals, and may have removed metals from rocks and organic material of the continental crust. More than 90% of all the water within the oceanic slab was released in the depth zone of the forearc region (depth of 30 to 50 km) (Karimpour and Sadeghi, 2018). In the depth zone, Mg-rich silicate minerals (such as antigorite, hornblende, chlorite, talc) have broken and the produced fluid is rich in Mg and Fe (Fig. 17).

The ore-fluid of MVT deposits is Si-poor and Fe- and Mg- rich. Such fluid is mineralized on the hosts of the dolostone (Irankuh and Ahangaran) or Shale-Siltstone (Hossein Abad, and part of

Irankuh and Ahangaran). There are significant differences in the type of paragenesis, alteration, shape, dimensions, reserves and grade in the deposits of this belt, which is controlled by the host rock type.

Based on all lithological evidence, alteration, shape of mineralization, existence of thrust faults, mineral paragenesis and specific geological and geographic location, it can be used to exploration of the hidden MVT deposits in this belt.

### References

- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Esmaeili Sevieri, A., Shabani, S., Allaz, J.M. and Stern, C.R., 2018b. Geology, mineralization, mineral chemistry, and ore-fluid conditions of Irankuh Pb-Zn mining district, south of Isfahan. *Journal of Economic Geology*, 9(2): 267–294. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H. and Sadeghi, M., 2018. Dehydration of hot oceanic slab at depth 30–50 km: KEY to formation of Irankuh-Emarat Pb-Zn MVT belt, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 194: 88–103.
- Leach, D.L. and Sangster, D., 1993. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits. *Geological Association of Canadian. Specific Paper*, 40: 289–314.
- Leach, D.L., Taylor, R.D., Fey, D.L., Diehl, S.F. and Saltus, R.W., 2010. A Deposit Model for Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Ores, Chapter A of Mineral Deposit Models for Resource Assessment. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, Scientific Investigations Report 2010–5070–A., 64 pp.
- Liu, Y., Song, Y., Fard, M., Zhou, L., Hou, Z. and Kendrick, M.A., 2019. Pyrite Re-Os age constraints on the Irankuh Zn-Pb deposit, Iran, and regional implications. *Ore Geology Reviews*, 104: 148–159.