

## بررسی ارتباط دگرسانی دولومیتی شدن و رخداد کانه‌زایی در کانسار اپی‌ژنتیک آهن‌گران (جنوب خاور ملایر): شواهد کانی‌شناسی، ژئوشیمی و شیمی کانی‌ها

سبحان حیاتی<sup>۱</sup>، محمد معانی‌جو<sup>۲\*</sup>، ابراهیم طالع فاضل<sup>۳</sup> و حسن محسنی<sup>۴</sup>

۱، ۲، ۳ و ۴- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

نویسنده مسئول: maanijou@yahoo.com

دریافت: ۹۴/۱۱/۱۸ پذیرش: ۹۵/۴/۲۶

### چکیده

ایالت فلززایی ملایر- اصفهان در پهنه سندانج-سیرجان، میزبان ذخایر و نشانه‌های معدنی مختلفی است که از دیدگاه فلززایی اغلب آن‌ها در سنگ میزبان کربناته کرتاسه زیرین رخ داده‌اند. کانسار سرب-آهن-نقره آهن‌گران (جنوب خاور ملایر) به عنوان یکی از مهم‌ترین ذخایر این ایالت در سنگ میزبان‌های سنگ‌آهک، سنگ‌آهک دولومیتی، دولومیت و ماسه‌سنگ واحد کرتاسه زیرین تشکیل شده است. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی در منطقه شامل شیبست، اسلیت، کوارتزیت و شیل‌های منتسب به ژوراسیک است که به صورت دگرشیب بر روی سنگ‌های تریاس قرار گرفته‌اند. کانی‌سازی همراه با دگرسانی دولومیتی در قالب دو کانسنگ سولفیدی (حاوی رگه‌های سرب-نقره) و اکسیدی (کلسنگ آهک آهنی فروخته‌شده)، رخ داده است. بر اساس مطالعات پتروگرافی و شیمی کانی‌ها، حداقل سه نوع دولومیت شامل دولومیت‌های ریزبلور (RD<sub>1</sub>)، متوسط‌بلور (RD<sub>2</sub>) و درشت‌بلور دارای منطقه‌بندی (RD<sub>3</sub>)، در سنگ میزبان کانسنگ‌های سولفیدی و اکسیدی تشخیص داده شد. در این میان، دولومیت‌های RD<sub>1</sub> و RD<sub>2</sub> اغلب در سنگ میزبان کانسنگ سولفیدی و دولومیت‌های RD<sub>3</sub> اغلب در زمینه کلسیت‌های ریزبلور میزبان کانسنگ اکسیدی تشکیل شده‌اند. ترکیب شیمیایی دولومیت‌های RD<sub>2</sub> حاکی از وجود مقادیر بالای عناصر آهن (متوسط: ۱۳/۵ wt%)، سرب (متوسط ۸۰ ppm) و منگنز (متوسط ۱۶۰۰ ppm) در مقایسه با دولومیت‌های RD<sub>1</sub> است. بالا بودن محتوای عنصری سرب (۱۰۰ ppm) در دولومیت‌های RD<sub>2</sub>، وجود هم‌بستگی بالا میان سرب و عناصر کلسیم (R=۰/۵۷)، آهن (R=۰/۶۰) و استرانسیوم (R=۰/۷۸) و مجاورت این دولومیت‌ها به رگه‌های کانه‌دار سرب، احتمال تشکیل دولومیت‌های RD<sub>2</sub> را از طریق سیال کانه‌ساز تقویت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: دولومیت، کانی‌سازی، شیمی کانسار، دگرسانی، آهن‌گران

### مقدمه

می‌شود. طبق شواهد، رخداد دگرسانی در ذخایر با سنگ میزبان رسوبی اغلب هم‌زمان یا کمی بعد از تکوین مراحل رخداد کانه‌زایی انجام می‌شود. در میان سایر دگرسانی‌های شاخص در ذخایر ماگمایی-گرمایی نظیر دگرسانی‌های پتاسیک، فیلیک و آرژلیک، دگرسانی‌های مرتبط با کانسارهای با میزبان رسوبی از قبیل کربناتی‌شدن (نظیر دولومیتی و آنکریتی‌شدن)، به عنوان دگرسانی پنهان<sup>۲</sup>، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳۱ و ۴۳]. کانسار سرب-نقره-آهن آهن‌گران در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب‌خاوری شهرستان ملایر، در شمالی‌ترین بخش ایالت فلززایی ملایر- اصفهان و بخش مرکزی پهنه سندانج-سیرجان قرار گرفته است (شکل ۱). تاکنون معادن، کانسارها و نشانه‌های معدنی سرب و روی متعددی در محور ملایر-اصفهان با سنگ میزبان‌های سنگ‌آهک، سنگ‌آهک-دولومیت، شیل و در

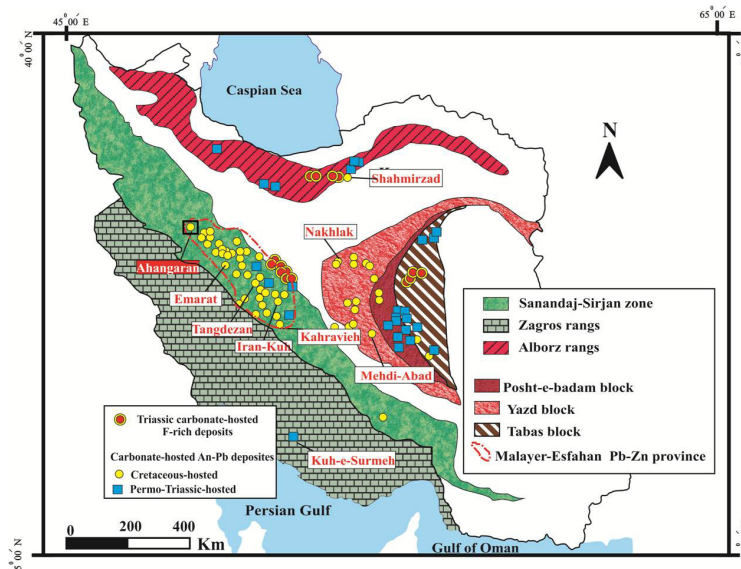
در بسیاری از کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان کربناته که ارتباط مشخصی با منابع آذرین ندارند، سنگ میزبان به عنوان تامین‌کننده عناصر فلزی، نقش موثری در رخداد کانه‌زایی دارد. در این میان، دگرسانی دولومیتی‌شدن<sup>۱</sup> به عنوان یکی از کنترل‌کننده‌های اصلی کانه‌زایی در ذخایر فلزی پایه با سنگ میزبان رسوبی از قبیل کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT)، رسوبی-متصاعدی (SEDEX)، نوع ایرلندی و آلیپ گزارش شده است [۱۷، ۳۸، ۴۲ و ۵۰]. پژوهشگران این حوزه دگرسانی دولومیتی‌شدن را تغییراتی می‌دانند که در اثر حرکت سیالات کانه‌ساز در سنگ دیواره‌ی دربرگیرنده به لحاظ خصوصیات ژئوشیمیایی (شیمی کانه‌ها و غلظت عناصر) و کانی‌شناسی (بافت، ساخت، دانه‌بندی و رنگ)، ایجاد

<sup>2</sup> Inconspicuous Alteration

<sup>1</sup> Dolomitization alteration

اپی‌ژنتیک و ارتباط آن‌ها با رخداد کانی‌سازی انجام نشده است. این پژوهش تلاش می‌کند تا ارتباط میان دولومیت‌زایی و کانه‌زایی را در هر دو بخش از دیدگاه‌های کانی‌شناسی، بافت و ساخت، ژئوشیمی و شیمی کانه‌ها مورد بررسی قرار دهد. همچنین در این پژوهش رخداد دگرسانی دولومیتی‌شدن در ارتباط با کانه‌زایی و اهمیت آن از دیدگاه اکتشافی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

مواردی ماسه‌سنگ منتسب به کرتاسه گزارش شده است [۱۱]. دولومیتی‌شدن، شایع‌ترین دگرسانی در اغلب کانسارهای سرب و روی ایران از قبیل کانسارهای نخلک [۳]، ایران کوه [۲۹]، شه‌میرزاد [۲]، که‌رویه [۱۰]، تنگ دزان [۸]، مهدی‌آباد [۴۳] و کوه سرمه [۱۲]، است (شکل ۱). از آنجایی که دولومیت به عنوان مهم‌ترین سنگ میزبان کانسنگ‌های اکسیدی و سولفیدی کانسار آهن‌گران شناخته می‌شود، تاکنون مطالعه دقیقی بر روی دولومیت‌های



شکل ۱. موقعیت برخی از مهم‌ترین کانسارهای فلزات پایه با میزبان کربناته در محور فلز زایی ملایر-اصفهان و بخش‌های دیگر ایران [۱۹ و ۴۶]

## مواد و روش‌ها

تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران<sup>۱</sup> مورد تجزیه قرار گرفت. این دستگاه با ولتاژ ۴۰kV و جریان ۳۰ mA با هدف دستیابی به کانی‌های رسی تنظیم شده است. به منظور مطالعه ژئوشیمیایی کانسنگ، نیز تعداد ۱۰۰ نمونه از زون معدنی و سنگ میزبان به روش فلورسانس اشعه مجهول (XRF) با همکاری شرکت معادن سرمک در IMPRC مورد تجزیه قرار گرفتند. برای دستیابی به شیمی کانی‌های کربناته، مطالعه محتوای عناصر اصلی و فرعی آن‌ها از تجزیه ریزکاوا الکترونی (EPMA) با دستگاه CAMECA SX100 و تصاویر الکترونی برگشتی (BSE) در IMPRC استفاده شد. این دستگاه با ولتاژ ۲۰kV و جریان ۲۰ nA با هدف دستیابی به مجموعه عناصر Mn, Sr, Na, Ca, Fe, Mg و Pb تنظیم شد. حد آشکارسازی برای عناصر مختلف در حد ۰/۰۲ درصد وزنی است.

در انجام این پژوهش به منظور بررسی سنگ میزبان کانه‌زایی کانسار آهن‌گران از رخنمون‌های سنگی در بخش کانسنگ اکسیدی و سولفیدی تعداد تقریبی ۲۰۰ نمونه برداشت شد. نمونه‌برداری‌ها با روش‌های دنبال رگه، تکه‌ای و کانالی از هر دو بخش سنگ میزبان و ماده معدنی انجام گرفته است. از نمونه‌های برداشت شده، تعداد ۳۰ مقطع نازک و صیقلی مورد آماده‌سازی قرار گرفت که از بین آن‌ها تعداد ۱۵ مقطع نازک-صیقلی و ۵ مقطع نازک با هدف شناسایی کلسیت از دولومیت توسط محلول آلیزارین قرمز (Red-s)، با روش دیکسون [۲۶] رنگ‌آمیزی شد. مطالعات کانی‌شناسی با استفاده از میکروسکوپ نوری زایس مدل Axioplan2 در دانشگاه بوعلی‌سینا انجام شد. همچنین تعداد ۵ نمونه پودر سنگ نیز به روش پراش اشعه مجهول (XRD) از رگه‌های کانی‌سازی و واحدهای دگرسان، در مرکز

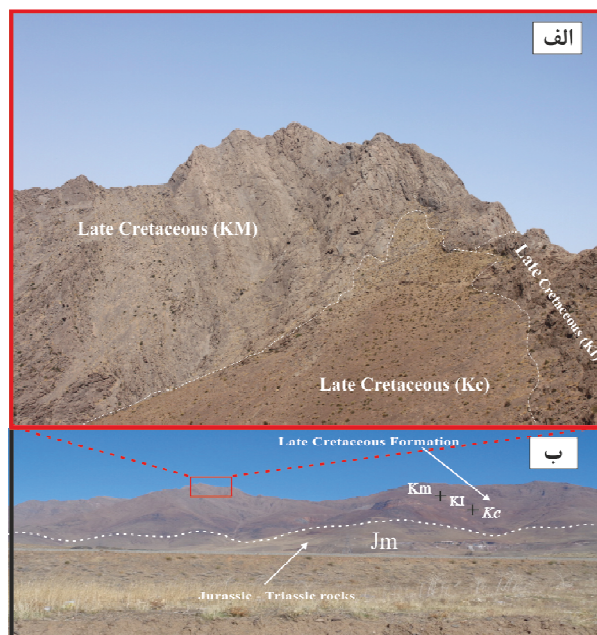
<sup>۱</sup> IMPRC

## زمین‌شناسی

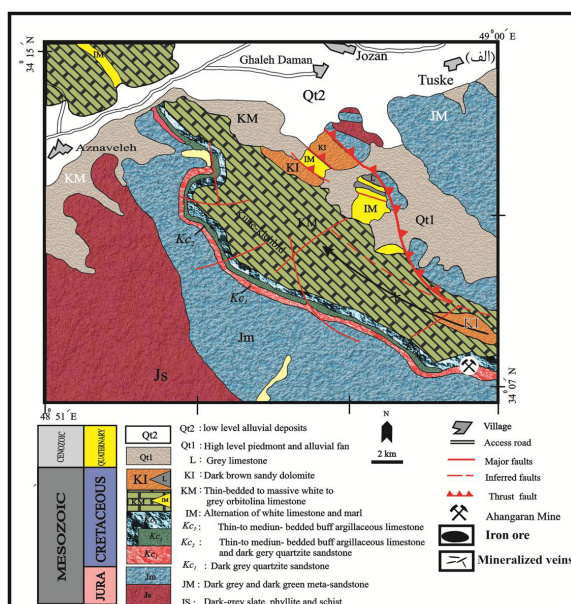
شکل‌گیری پهنه سنندج-سیرجان با زایش اقیانوس نئوتتیس طی پرمین و متعاقباً تخریب ناشی از همگرایی بعد از آن و برخورد قاره‌ای بین صفحه ایران با صفحه عربستان در گستره زمانی تریاس-کرتاسه صورت گرفته است. پژوهش‌های صورت گرفته گویای آنست که اقیانوس نئوتتیس در اواخر کرتاسه به علت فرورانش صفحه عربستان به زیر بخش ایران بسته شده و به موجب آن گسل‌های متعددی بین زون زاگرس در جنوب باختر و مجموعه قوسی ایران مرکزی پدیدار شده است [۷، ۲۱ و ۵۳].

کوه آهکی کله بید از دیدگاه ساختاری به مثابه یک ناودیس بزرگ به طول تقریبی ۸۰۰۰ متر با راستای شمال باختری- جنوب خاوری در قسمت جنوبی شهرستان ملایر واقع شده است (شکل ۳). معدن آهنگران در دامنه جنوب خاوری ارتفاعات کوه کله بید جای گرفته که تقریباً تمام واحدهای سازنده این کوه از توالی سنگ‌های کربناته کرتاسه زیرین و بویژه دولومیت تشکیل شده است (شکل ۲). فعالیت‌های ساختمانی و ایجاد گسل‌های متعدد در برخی از بخش‌ها موجب قطع‌شدگی یا جابجایی لایه‌های سازنده این ناودیس شده است. نتایج حاصل از برداشت ساختارهای زمین‌شناسی منطقه و همچنین تحلیل مقدماتی تنش‌دیرین، تشکیل ساختارهای مربوطه را به زمان کرتاسه زیرین

و در ارتباط با فازکوهزایی لارامید نشان می‌دهد [۱۵]. مهمترین واحدهای سنگی منطقه‌ی معدنی آهنگران از قدیم به جدید شامل: (۱) واحدهای دگرگونه تریاس-ژوراسیک و (۲) واحدهای رسوبی (کربناته-آواری) کرتاسه زیرین است (شکل ۲-ب). قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه مجموعه دگرگونی‌های فیلیت، اسلیت و شیست‌های سیاه و سبز متعلق به ژوراسیک است که سنگ بستر کوه کله‌بید را تشکیل داده و در جنوب خاور برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ ملایر [۴] رخنمون دارد (شکل ۲). واحدهای سنگی کرتاسه زیرین به عنوان لیتولوژی اصلی میزبان کانسار آهنگران اغلب در بخش‌های مرتفع و دامنه کوه کله‌بید رخنمون داشته و از سه عضو اصلی  $Km$ ،  $KI$ ،  $Kc$  تشکیل شده است (شکل ۲-الف). در این میان، واحد سنگی  $Kc$  دارای سه زیر عضو فرعی ( $Kc_1$ ،  $Kc_2$ ،  $Kc_3$ ) است (شکل ۳). به لحاظ لیتولوژی جنس این زیر عضوها از پایین به بالا شامل، واحد ( $Kc_1$ ) با لیتولوژی ماسه‌سنگ کوارتزی و دولومیت با میان لایه‌هایی از شیل، واحد ( $Kc_2$ ) شامل ماسه‌سنگ و کوارتزیت که با مرز تدریجی بر روی واحد پایین قرار گرفته و واحد ( $Kc_3$ ) متشکل از ماسه‌سنگ، دولومیت و سنگ آهک دولومیتی که میزبان کانه‌زایی بخش‌های سولفیدی و اکسیدی منطقه معدنی آهنگران است.



شکل ۲. الف) نمایی از ارتباط واحدهای کرتاسه زیرین ( $Kc$ ،  $Km$ ،  $KI$ ) (دید به سمت شمال باختر)، ب) دورنمایی از سنگ‌های رسوبی دگرگون شده ژوراسیک-تریاس که به عنوان سنگ بستر منطقه آهنگران در قسمت زیرین واحدهای کرتاسه قرار گرفته‌اند (دید به سمت شمال).



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مورد مطالعه و موقعیت کانسار آهنگران در آن (با تغییرات از [۴]).

### ویژگی‌های کانه‌زایی

مطالعات میدانی، بررسی رخنمون‌های سنگی و نمونه‌برداری از تونل‌های کانسار آهنگران موجب شناسایی دو افق کانه‌دار فوقانی (افق I) و تحتانی (افق II)، شده است. افق I متشکل از کانسنگ اکسیدی-هیدروکسیدی آهن، منگنز و تیتان در سطح که به صورت چندین عدسی منقطع، باریک و طویل از جنوب خاور تا شمال باختر منطقه رخنمون دارد. افق II شامل کانه‌زایی سولفیدی چندفلزی سرب، نقره، مس، آنتیموان که توسط ۳۴ تونل مورد استخراج قرار گرفته است. سنگ میزبان اصلی دو افق ذکر شده شامل سنگ‌آهک، سنگ‌آهک‌های دولومیتی، دولومیت ماسه‌سنگی و دولومیت‌های آهکی است (شکل ۵-الف). طبق مطالعات کانی‌شناسی، کانسار آهنگران شامل مجموعه‌های چندفلزی متشکل از دو گروه کانی‌شناسی-شیمیایی اکسیدی (شامل هماتیت، مگنتیت و گوتیت) و سولفیدی-سولفوسالتی (شامل گالن، کالکوپیریت، پیریت، تتراهدریت، تنانتیت و بورنویت)، است. مشاهدات صحرائی از دهانه و میزبان چندین تونل و بررسی نقشه زمین‌شناسی-اکتشافی معدن آهنگران (با مقیاس ۱:۵۰۰۰ توسط [۱۴])، گویای آن است که کانه‌زایی بخش سولفیدی اغلب در میزبان واحد دولومیت ماسه‌سنگی بوده و به لایه‌های دولومیتی ختم می‌شود.

### پتروگرافی دولومیت‌ها

در بسیاری از کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناته، عواملی نظیر دولومیتی‌شدن، تغییرات رخساره و تراوایی اولیه

سنگ میزبان آهکی از کنترل‌کننده‌های اصلی در شکل‌گیری کانسار و هاله‌های لیتوژئوشیمیایی پیرامون توده معدنی است [۳۶ و ۳۷]. رخداد فرآیندهای انحلال، تبلور مجدد و برش‌های گرمایی تقریباً در تمام ذخایر سرب با میزبان کربناته معمول است. این فرآیندها ممکن است در بخش‌هایی با دگرسانی‌های سیلیسی و دولومیتی همراه شده و شرایط رخداد کانه‌زایی در سنگ دیواره را فراهم نمایند [۸].

فرآیند دولومیتی‌شدن در منطقه‌ی معدنی آهنگران به دو صورت شامل: (۱) دولومیتی‌شدن بخشی یا انتخابی<sup>۱</sup> بوده که در آن دولومیت‌ها، دارای ساختمان ایدومورف و منطقه‌بندی هستند و (۲) دولومیتی‌شدن کامل<sup>۲</sup> که سنگ در این حالت کاملاً تبدیل به دولومیت شده و بقایای سنگ اولیه به کلی از بین رفته است. به طور کلی مکانیزم تشکیل دولومیت‌ها را می‌توان با استفاده از فابریک و اندازه بلورها و ویژگی‌های دیگری مانند تفریق ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد و اکسیژن، دما، شوری، ترکیب سیال و شرایط اکسیدان و احیا تشخیص داد [۴۸]. تشخیص و تفکیک دولومیت‌ها در کانسنگ اکسیدی و سولفیدی بر اساس مطالعات پتروگرافی، نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی (EPMA) و استفاده از رنگ‌آمیزی مقاطع دولومیت انجام شده است. کانی‌سازی دولومیت در منطقه آهنگران، براساس رده‌بندی ارائه شده توسط گرگ و

<sup>1</sup> Partial or selective dolomitization

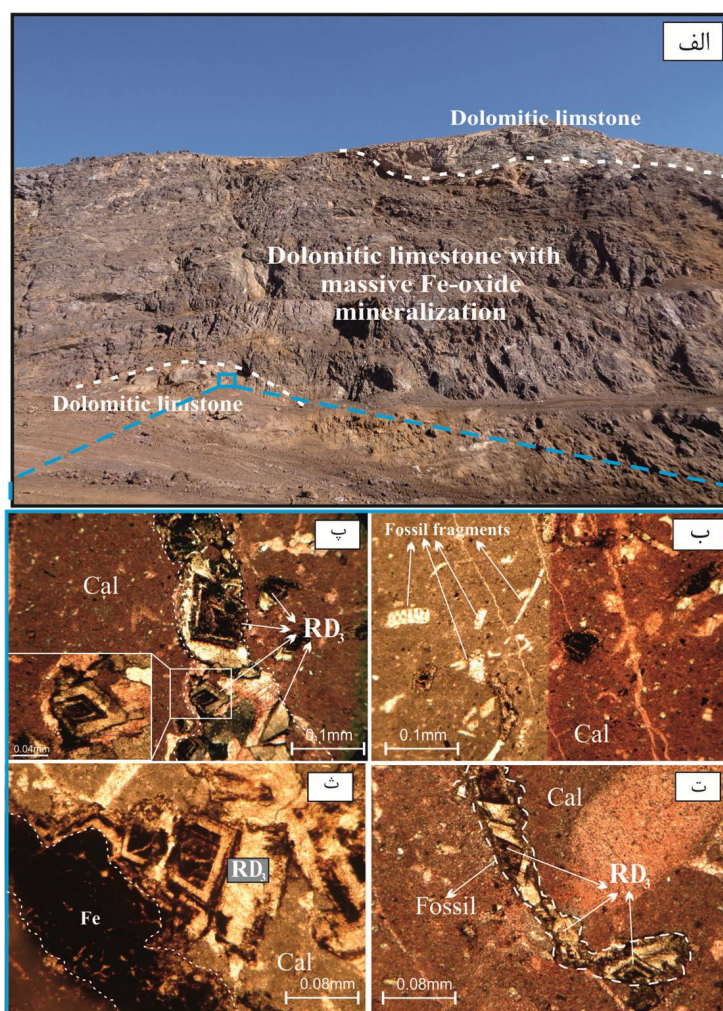
<sup>2</sup> dolomitization Complete





میزبان کانسنگ اکسیدی، وکستون دولومیتی نام دارد که دارای ۵۰ تا ۹۰ درصد حجمی کلسیت و ۱۰ تا ۲۰ درصد حجمی دولومیت است (شکل ۵). عناصر زیستی و فسیلی از قبیل قطعات خردشده‌ی خارپوستان و صفحات مربوط به روزنه‌داران نیز حدود ده درصد حجمی فضای سنگ را تشکیل داده است (شکل ۵-ب). با استفاده از مطالعات پتروگرافی و روابط متقاطع بین کانی‌ها کربناته و بخش‌های کانه‌دار، می‌توان گفت دولومیت‌های  $RD_1$  قبل از رخداد کانه‌زایی و دولومیت‌های  $RD_2$  و  $RD_3$  همزمان یا کمی بعد از رخداد کانه‌زایی تشکیل شده‌اند. توالی پاراژنتیک کانی‌ها در شکل ۶ ارائه شده است.

طبق شواهد کانی‌شناسی، دولومیت‌های درشت بلور دارای منطقه‌بندی ( $RD_3$ ) در سنگ کربناته‌ی میزبان کانسنگ اکسیدی و در متنی از کلسیت‌های ریزبلور (میکرایت) تشکیل شده‌اند (شکل ۵-الف و ب). از لحاظ کانی‌شناسی، دولومیت‌های  $RD_3$  با فراوانی کمتر از ۲۰ درصد حجمی بصورت بلورهای نیمه‌شکل تا خودشکل، کشیده با ابعاد تقریبی ۰/۱ تا ۰/۳ میلی‌متر در زمینه‌ی کلسیت‌های میکرایتی و خرده فسیل‌ها پراکنده‌اند (شکل ۵-ب). مهم‌ترین خصوصیت این دولومیت‌ها قرارگیری در امتداد شکستگی‌ها، رگه‌ها و قالب فسیل‌ها است (شکل ۵-پ-ت). بر مبنای طبقه‌بندی سنگ‌های کربناته توسط [۲۷]، سنگ



شکل ۵. تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از دولومیت‌های دارای منطقه‌بندی ( $RD_3$ ). الف) فراز رخساره توده‌ای کانسنگ اکسیدی در قسمت باختری معدن که در پایین توده معدنی لایه‌های سنگی آهک دولومیتی رخنمون پیدا کرده‌اند (دید به سمت شمال خاور، عرض تصویر حدود ۲۰۰ متر)، ب) سنگ آهک دولومیتی رنگ آمیزی شده، به همراه قطعات فسیل موجود در زمینه سنگ، پ) تشکیل دولومیت‌های ( $RD_3$ ) دارای منطقه بندی با شکل رومبوهدری منظم در امتداد یک رگه در سنگ آهک متعلق به بخش زیرین کانسنگ اکسیدی، ت) جانشین شدن دولومیت‌های دارای منطقه بندی در قالب یک خرده فسیل به صورت کامل و ت) رشد بلورهای درشت دولومیت دارای منطقه‌بندی در یک امتداد به صورت تداخلی در مجاورت آغشتگی‌های آهن ناشی کانی‌سازی فلزی

|                       | Sulfide ore        |                     | Oxide ore          |                     |
|-----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|                       | Pre mineralization | Post mineralization | Pre mineralization | Post mineralization |
| <b>Ore minerals</b>   |                    |                     |                    |                     |
| <b>Galenag</b>        | ██████████         |                     |                    |                     |
| <b>Fahlore group</b>  | ██████████         |                     |                    |                     |
| <b>Chalcopyrite</b>   | ██████████         |                     |                    |                     |
| <b>Magnetite</b>      |                    |                     | ██████████         |                     |
| <b>Hematite</b>       |                    |                     |                    | ██████████          |
| <b>Geothite</b>       |                    |                     |                    | ██████████          |
| <b>Hosted Rock</b>    |                    |                     |                    |                     |
| <b>Calcite</b>        |                    |                     | ██████████         |                     |
| <b>RD<sub>1</sub></b> | ██████████         |                     |                    |                     |
| <b>RD<sub>2</sub></b> |                    | ██████████          |                    |                     |
| <b>RD<sub>3</sub></b> |                    |                     | -----              | ██████████          |

شکل ۶. توالی پاراژنتیک انواع دولومیت و سنگ آهک دولومیتی مرتبط با کانسنگ‌های اکسیدی و سولفیدی

### شیمی کانی‌های کربناته

بررسی ترکیب شیمیایی دولومیت‌ها و عناصر فرعی موجود در ساختار آن‌ها از قبیل وجود عناصر Na، Mn و Fe، یکی از راه‌های مفید در دستیابی به شرایط تشکیل سنگ میزبان و پی‌بردن به ترکیب سیال گرمایی در کانسارهای با میزبان کربناته است [۲۲، ۴۵ و ۵۷]. با توجه به ارتباط دولومیت‌ها با کانه‌سازی در بخش‌های اکسیدی و سولفیدی، تجزیه نقطه‌ای EPMA بر روی قسمت‌های مختلف دولومیت‌ها و دیگر کانی‌های کربناته انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ آمده است.

بر اساس این نتایج، تمرکز آهن در دولومیت‌های RD<sub>1</sub> (دولومیت‌های دور از رگه) از ۶/۸۵ تا ۹/۵۳ درصد وزنی، در دولومیت‌های RD<sub>2</sub> (دولومیت‌های مجاور رگه) از ۱۳/۵۰ تا ۱۴/۴۳ درصد وزنی و دولومیت‌های RD<sub>3</sub> (دولومیت‌های دارای منطقه‌بندی مرتبط با کانسنگ اکسیدی) از ۱/۷۵ تا ۲/۷۷ درصد وزنی، در تغییر است (جدول ۱ و شکل ۸-ب). به نظر می‌رسد اختلاف تمرکز آهن در بخش‌های مختلف دولومیت‌های دارای منطقه‌بندی، ناشی از تنوع ماهیت سیال در هنگام نهشت آن است [۵۷]. محتوای Mn نیز در دولومیت‌های RD<sub>1</sub> از ۱۲۱۰ تا ۳۰۱۰ ppm، در دولومیت‌های RD<sub>2</sub> از ۱۵۷۰ تا ۱۷۹۰ ppm و در دولومیت‌های RD<sub>3</sub> از ۳۲۰ تا ۵۴۰ ppm در تغییر بوده که رفتار آن مشابه آهن در ژئوشیمی دولومیت‌ها است (جدول ۱ و شکل ۸-پ). دولومیت‌های دریایی از آهن و منگنز فقیر و دولومیت‌های تشکیل شده در شرایط احیایی و گرمایی از آهن و منگنز غنی هستند [۲۳]. غلظت Pb نیز در دولومیت‌های RD<sub>1</sub> از زیر حد آشکارسازی تا ۵۰ ppm در

دولومیت‌های RD<sub>2</sub> از ۷۰ تا ۱۰۰ ppm و در دولومیت‌های RD<sub>3</sub> از زیر حد آشکارسازی تا ۴۰ ppm در تغییر است (جدول ۱ و شکل ۷-الف).

داده‌های بدست آمده از تجزیه دستگاهی ریزکاو الکترونی (EPMA) با هدف دستیابی به خصوصیات شیمیایی دولومیت‌ها و بررسی رفتار ژئوشیمیایی عناصر، توسط نرم‌افزار SPSS مورد تحلیل آماری قرار گرفتند. به منظور مطالعه همبستگی آماری بین متغیرهای کانه‌ساز با یکدیگر در کانسنگ‌های سولفیدی و اکسیدی از ماتریس همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن-پیرسون بهره گرفته شد. طبق نتایج همبستگی اسپیرمن-پیرسون، در سنگ میزبان کانسنگ سولفیدی به ترتیب زوج عناصر کلسیم-منیزیوم ( $R=0/74$ )، کلسیم-سرب ( $R=0/57$ )، آهن-سرب ( $R=0/60$ )، آهن-منگنز ( $R=0/62$ )، استرانسیوم-سرب ( $R=0/78$ ) و استرانسیوم-کلسیم ( $R=0/5078$ ) دارای همبستگی ترتیبی هستند. علاوه بر این، در سنگ میزبان کربناته کانسنگ اکسیدی زوج عناصر کلسیم-منیزیوم ( $R=0/38$ )، آهن-منگنز ( $R=0/62$ ) و منگنز-سرب ( $R=0/96$ ) دارای همبستگی خطی هستند (جدول ۲).

به منظور تکمیل مطالعات ژئوشیمی، تعداد ۸۰ نمونه سنگی به تفکیک از کانسنگ‌های سولفیدی و اکسیدی برداشت شده و با استفاده از روش دستگاهی XRF مورد تجزیه قرار گرفتند. نتایج تجزیه ۱۰ نمونه معرف از کانسنگ سولفیدی و ۱۰ نمونه معرف از کانسنگ اکسیدی در جدول ۳ ارائه شده است. بر این اساس، مقادیر متوسط عناصر FeO (wt%)، Pb (۱۲/۰۳)، MnO (۶/۲۸ wt%)، CaO (۸/۸۸ wt%)، TiO<sub>2</sub> (۳/۱۵ wt%) و در سنگ میزبان



روند افزایش و کاهش عناصر در آن‌ها، نمودار تغییرات مقادیر میانگین برای ۹ عنصر معرف رسم شده است (شکل ۸). تشابه در روند تغییرات عناصر در سنگ‌های کربناته میزبان کانه‌زایی‌های سولفیدی و اکسیدی، احتمالاً گویای منشأ مشترک سنگ میزبان این کانسنگ‌ها است.

کربناته کانسنگ سولفیدی و مقادیر متوسط عناصر FeO (۷۲/۲۴ wt%) MnO، (۱۲/۵۰ wt%) CaO (۲/۱۴ wt%) و Pb (۰/۵۵ wt%) در میزبان کانسنگ اکسیدی، بدست آمده است (جدول ۳). به منظور نشان دادن نتایج حاصل از تجزیه XRF در کانسنگ‌های اکسیدی و سولفیدی و امکان مقایسه

جدول ۱. غلظت عناصر و ترکیبات اصلی و کمیاب در انواع دولومیت‌ها و کلسیت‌های زمینه با استفاده از تجزیه نقطه‌ای EPMA (ND).

مقادیر محاسبه نشده

| Minerals        | Fe (wt.%) | Ca (wt.%) | Mg (wt.%) | Na (ppm) | Pb (ppm) | Sr (ppm) | Mn (ppm) | CaCO <sub>3</sub> (wt.%) | MgCO <sub>3</sub> (wt.%) | FeCO <sub>3</sub> (wt.%) |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| RD <sub>1</sub> | 9.53      | 18.66     | 6.73      | 10.25    | 50       | 730      | 3010     | 46.31                    | 22.04                    | 19.76                    |
| RD <sub>1</sub> | 6.58      | 20.54     | 8.82      | 20.12    | ND       | 90       | 1210     | 51.145                   | 30.517                   | 13.56                    |
| RD <sub>2</sub> | 14.43     | 17.57     | 4.48      | 50.01    | 100      | 1300     | 1520     | 43.749                   | 16.746                   | 29.93                    |
| RD <sub>2</sub> | 13.05     | 18.6      | 5.15      | ND       | 70       | 310      | 1790     | 46.46                    | 17.819                   | 27.49                    |
| RD <sub>3</sub> | 2.77      | 22.47     | 10.11     | 10.02    | 10       | ND       | 540      | 56.59                    | 34.98                    | 5.73                     |
| RD <sub>3</sub> | 1.75      | 22.99     | 11.02     | 10.45    | ND       | 20       | 320      | 59.73                    | 38.12                    | 3.62                     |
| RD <sub>3</sub> | 2.43      | 22.99     | 10.48     | 80.12    | 40       | ND       | 460      | 57.24                    | 36.26                    | 5.03                     |
| RD <sub>3</sub> | 2.64      | 22.09     | 10.06     | 30.72    | ND       | 50       | 490      | 57.02                    | 38.80                    | 5.46                     |
| RD <sub>3</sub> | 2.66      | 22.43     | 10.07     | ND       | ND       | ND       | 450      | 55.85                    | 34.84                    | 5.29                     |
| RD <sub>3</sub> | 0.26      | 22.47     | 10.02     | ND       | ND       | 20       | 470      | 55.95                    | 34.66                    | 5.50                     |
| Calcite         | 0.26      | 35.54     | 0.87      | ND       | 40       | 10       | 110      | 9.98                     | 3.010                    | 0.53                     |
| Calcite         | 0.43      | 38.36     | 0.44      | ND       | 10       | 60       | 190      | 95.51                    | 1.52                     | 0.89                     |
| Calcite         | 1.18      | 37.34     | 0.2       | ND       | 40       | ND       | 480      | 92.97                    | 0.69                     | 2.44                     |
| Calcite         | 1.21      | 37.37     | 0.18      | ND       | ND       | ND       | 690      | 88.07                    | 0.62                     | 2.50                     |

جدول ۲. ضرایب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن-پیرسون برای عناصر موجود در ترکیب دولومیت‌ها در کانسنگ‌های اکسیدی و سولفیدی

|    | Ore-type | Mg    | Ca    | Pb    | Fe    | Mn    | Sr   |
|----|----------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Mg | Sulfide  | 1.00  |       |       |       |       |      |
|    | Oxide    | 1.00  |       |       |       |       |      |
| Ca | Sulfide  | 0.74  | 1.00  |       |       |       |      |
|    | Oxide    | 0.38  | 1.00  |       |       |       |      |
| Pb | Sulfide  | -0.79 | 0.57  | 1.00  |       |       |      |
|    | Oxide    | -0.16 | -0.66 | 1.00  |       |       |      |
| Fe | Sulfide  | -0.62 | -0.99 | 0.60  | 1.00  |       |      |
|    | Oxide    | 0.40  | -0.67 | 0.47  | 1.00  |       |      |
| Mn | Sulfide  | -0.80 | -0.60 | -0.14 | 0.62  | 1.00  |      |
|    | Oxide    | -0.41 | -0.73 | 0.96  | 0.62  | 1.00  |      |
| Sr | Sulfide  | 0.14  | 0.50  | 0.78  | -0.47 | -0.26 | 1.00 |
|    | Oxide    | 0.24  | 0.18  | -0.13 | -0.15 | -0.17 | 1.00 |

### دولومیت‌زایی

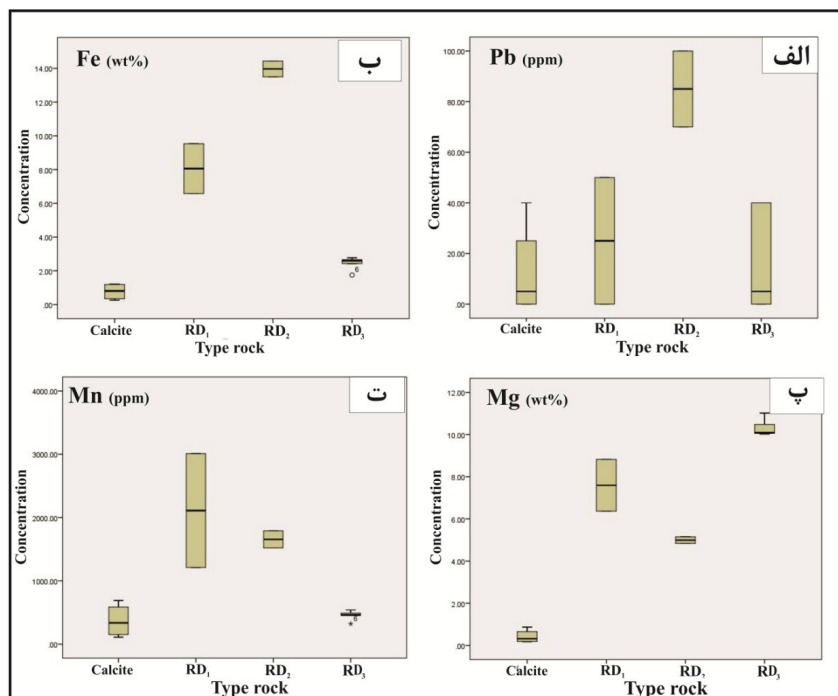
باشند، دارای بلورهای درشت‌تری هستند (شکل ۴-پ). نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی نشان داده که میزان Fe (۱۴ wt%) و Pb (۱۰۰ ppm) در دولومیت‌های RD<sub>2</sub> که در نزدیکی رگه‌های سرب شناسایی شده‌اند از دولومیت‌های RD<sub>1</sub> که به صورت جزیره‌ای در متنی از دولومیت‌های RD<sub>2</sub> قرار گرفته، بیش‌تر است (شکل ۹-الف و ب). هم‌چنین بر اساس ماتریس همبستگی، در دولومیت‌های میزبان کانسنگ سولفیدی بین عناصر مهم دولومیت‌ساز و کانه‌ساز کلسیم-سرب (R=۰/۵۷)، آهن-سرب (R=۰/۶۰)، استرانسیوم-سرب (R=۰/۷۸) و آهن-مگنزی (R=۰/۶۲)، ضریب

دولومیت‌ها از نظر زمان تشکیل به دو گروه اولیه (سین‌ژنتیک) و ثانویه (دی‌ژنتیک) تقسیم می‌شوند [۱]. دولومیت‌های اولیه ریزبلور بوده و از نظر ژئوشیمیایی دارای عناصر Sr و Na بالا و عناصر Fe و Mn کمتری نسبت به دولومیت‌های ثانویه هستند [۱۳]. اندازه بلورهای دولومیت می‌تواند در جهت تشخیص دولومیت‌های اولیه و تأخیری به کار رود [۱۸، ۲۰، ۳۹ و ۵۶]. دولومیت‌های RD<sub>1</sub> و RD<sub>3</sub> که در مجاورت رگه‌ها و بخش‌های کانه‌دار شناسایی شده‌اند و احتمال می‌رود که تحت تأثیر سیال کانه‌ساز قرار گرفته

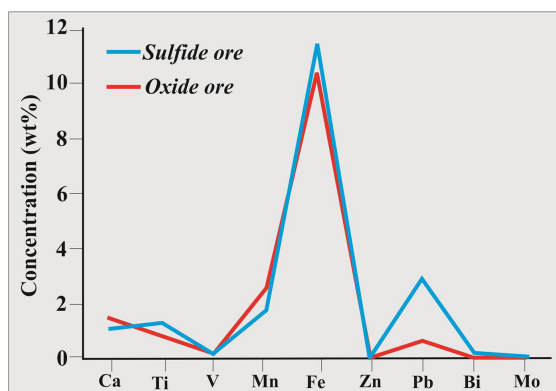


در مقابل سرب در دولومیت‌های کانسنگ سولفیدی نشان داد که آهن با سرب و استرانسیوم همبستگی مثبت و با منیزیوم و کلسیم همبستگی منفی دارد (شکل ۱۰). محاسبه همبستگی منفی بین آهن و منیزیوم ( $R = -0.62$ ) و منفی بودن روند تغییرات در نمودار دوتایی دلایلی بر جانشینی آهن به جای منیزیوم در دولومیت‌های  $RD_2$  است. از این نظر دولومیت‌های  $RD_2$  را می‌توان دولومیت‌های آهن‌دار<sup>۱</sup> محسوب کرد (شکل ۱۱). به عقیده بسیاری از پژوهشگران برای درک زمان دولومیتی‌شدن از میزان تمرکز عناصر آهن و منگنز استفاده می‌کنند که طبق آن دولومیت‌های اولیه دارای مقادیر آهن و دولومیت‌های تأخیری که در عمق بیش‌تر و به وسیله محلول‌های غیردریایی تشکیل می‌شود از محتوای آهن و منگنز بیش‌تری برخوردارند (۱۸، ۳۵ و ۴۸). طبق شواهد ذکر شده، بالا بودن مقادیر آهن در دولومیت‌های  $RD_2$  و روند مثبت تغییرات آهن نسبت به سرب و محاسبه همبستگی مثبت بین زوج عناصر سرب-آهن، سرب-کلسیم و سرب-استرانسیوم، بازتابی از اثر کانه‌زایی بر فرآیند دولومیت‌زایی در کانسار آهن‌گران است (جدول ۲ و شکل ۱۰).

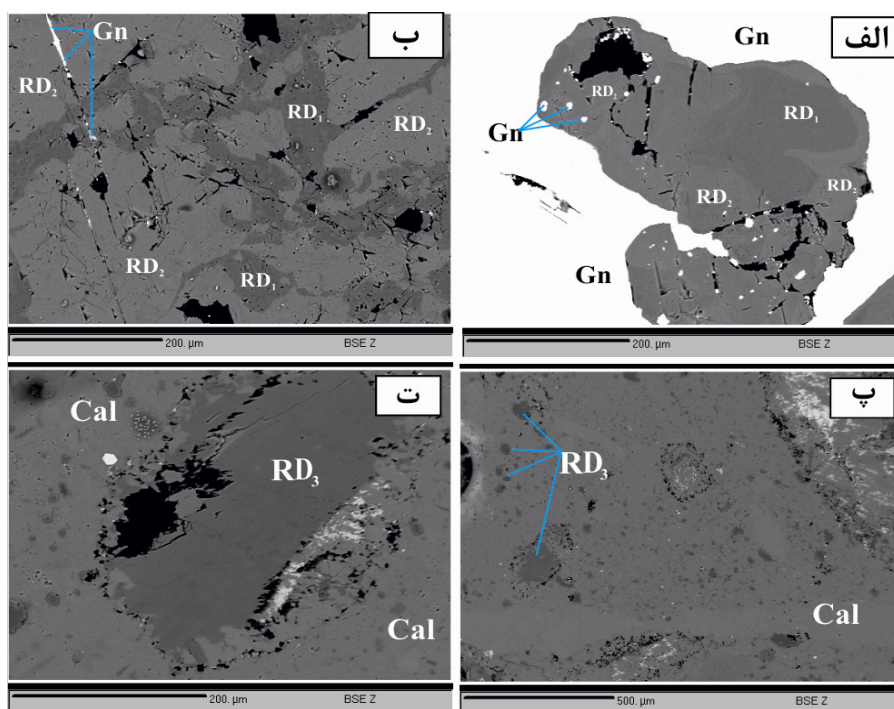
همبستگی بالایی وجود دارد (جدول ۲). بالا بودن آهن در میزبان کانسنگ سولفیدی (در مقایسه با اکسیدی) می‌تواند همبستگی‌های مذکور بین سرب و آهن را توجیه کند و بازتابی از غلظت بالای آهن در سیال کانه‌ساز باشد (شکل ۸). بالا بودن سرب در دولومیت‌های  $RD_2$  نسبت به دولومیت‌های  $RD_1$  از یک طرف (شکل ۷-الف) و وجود همبستگی بالا بین سرب و عناصری مانند کلسیم، منگنز و استرانسیوم از طرف دیگر (جدول ۲)، هم‌چنین نزدیکی دولومیت‌های  $RD_2$  به رگه‌های سرب، همگی از شواهدی است که احتمال تشکیل دولومیت‌های  $RD_2$  را از طریق تأثیر سیال کانه‌ساز تقویت می‌کند. مقایسه مقادیر آهن در داده‌های XRF گویای آنست که محتوای آهن در سنگ‌های کربناته میزبان در هر دو کانسنگ مشابه است (به طور متوسط ۱۰ wt%) (جدول ۳). محتوای بالای آهن در کل حجم سنگ‌های کربناته میزبان کانسنگ سولفیدی در مقایسه با اکسیدی، می‌تواند با بالا بودن میزان درصد وزنی آهن در ساختمان دولومیت‌های نوع  $RD_2$  مرتبط باشد (جدول ۱ و شکل ۷-ب). بررسی نمودارهای تغییرات آهن در مقابل منیزیوم، کلسیم و سرب و رسم نمودار استرانسیوم



شکل ۷. نمودار جعبه‌ای از تغییرات محتوای عناصر اصلی در سه نوع دولومیت. الف و ب) بالا بودن همزمان محتوای آهن و سرب در دولومیت‌های  $RD_2$  می‌تواند دلیلی بر تأثیر کانه‌زایی بر روی این دولومیت‌ها باشد، پ) دولومیت‌های  $RD_2$  در مقایسه با دولومیت‌های  $RD_1$  از منیزیوم کمی برخوردار است و ت) پراکندگی بالای منگنز در دولومیت‌های  $RD_1$



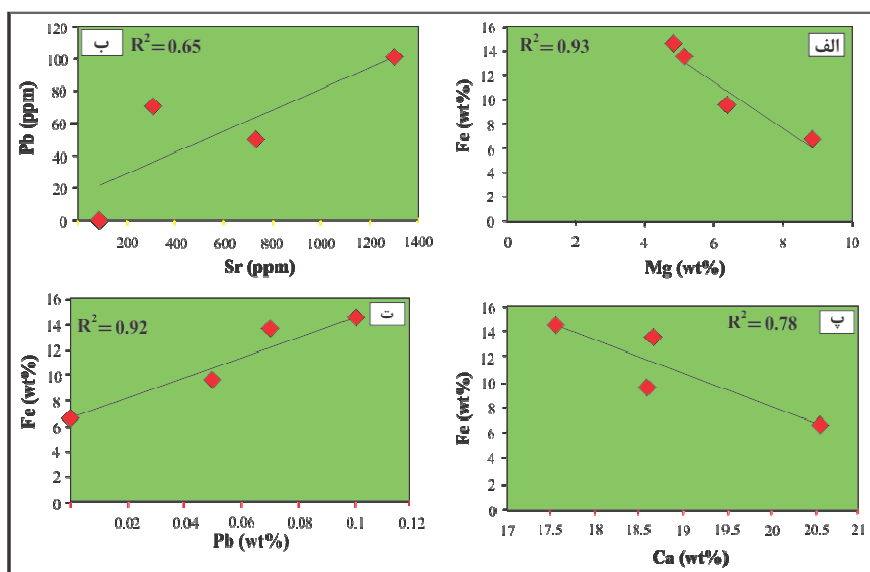
شکل ۸. نمودار مقادیر میانگین تعداد ۹ عنصر معرف در سنگ میزبان کانسنگ‌های اکسیدی و سولفیدی و روند مشابه کاهشی و افزایشی عناصر در آن‌ها



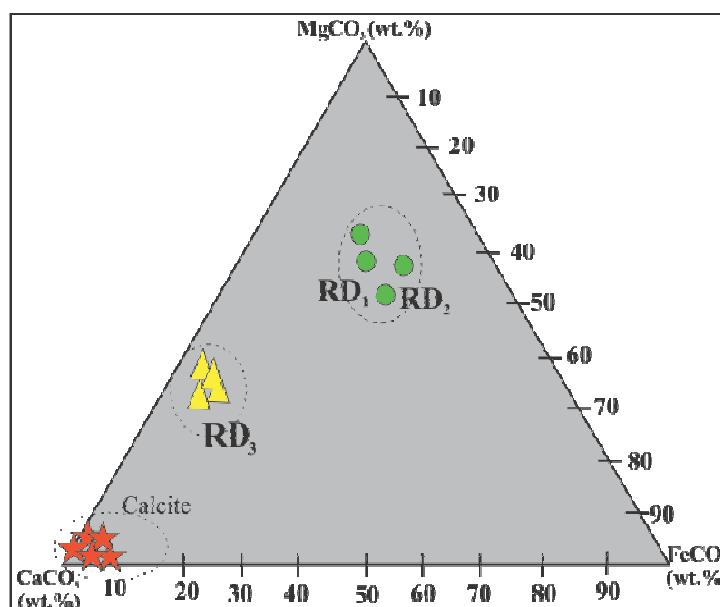
شکل ۹. تصاویر الکترونی برگشتی BSE از انواع دولومیت‌ها شامل: الف و ب) رخداد دولومیت‌های RD<sub>2</sub> در مجاورت گالن و باقی ماندن دولومیت‌های RD<sub>1</sub> به صورت جزیره در میزبان دولومیت‌های RD<sub>2</sub>، پ و ت) بلورهای درشت دولومیت RD<sub>3</sub> در زمینه کلسیت

اساسی داشته باشد: اول اینکه سیالات دولومیت‌ساز که سنگ آهک میزبان کانسنگ اکسیدی را تحت تأثیر قرار داده‌اند به علت مقاومت فیزیکی پایین فسیل‌ها و عناصر زیستی و آلوم‌ها نسبت به متن سنگ، بیش‌تر روی این قسمت‌ها تأثیر گذاشته‌اند، دوم اینکه به عقیده [۴۲] فسیل‌های دارای پوسته کلسیتی با منیزیم بالا می‌تواند یکی از منابع تامین کننده  $Mg^{+2}$  برای تشکیل دولومیت باشد. به احتمال زیاد پوسته فسیل‌هایی که در داخل آن‌ها دولومیت تشکیل شده دارای منیزیم بالایی هستند (شکل ۵-ت).

از نظر کانی‌شناسی مهم‌ترین ویژگی دولومیت‌های نوع RD<sub>3</sub> وجود منطقه‌بندی در قسمت‌های مختلف کانی و قرارگیری در زمینه کلسیت‌های ریزبلور به حالت شناور است (شکل‌های ۹-پ-ت و ۱۱). تفاوت در ساخت منطقه‌ای دولومیت‌ها مربوط به تغییرات متوالی شرایط فیزیکوشیمیایی (مانند pH, Eh) سیالاتی است که عامل حمل مقادیر متفاوتی از  $Mn^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$  و عناصر دیگر هستند [۲۹]. این تیپ دولومیت عموماً در قالب بر جای مانده‌ی خرده‌فسیل‌ها شکل گرفته‌اند (شکل ۵-ت). جانشین شدن این تیپ دولومیت در جایگاه فسیل‌ها می‌تواند دو علت



شکل ۱۰. نمودارهای دوتایی همبستگی خطی میان عناصر مختلف در کانسنگ سولفیدی، الف) آهن در مقابل منیزیوم، ب) استرانسیوم در مقابل سرب، ت) آهن در مقابل کلسیم، پ) آهن در مقابل سرب



شکل ۱۱. نمودار سه‌تایی درصد وزنی مقادیر  $MgCO_3$ ،  $CaCO_3$  و  $FeCO_3$  که بر مبنای آن نسل‌های مختلف دولومیت از کلسیت قابل تفکیک است.

### بحث و نتیجه‌گیری

غنی از یون  $Mg^{+2}$  منشأ بسیاری مهمی برای تشکیل دولومیت محسوب می‌شوند. تولید منیزیوم برای تشکیل دولومیت خاستگاه‌های متفاوتی دارد بطوری که پژوهشگرانی مانند [۳۴، ۴۰، ۴۵ و ۵۴] دو منبع مهم، را برای تولید منیزیوم مورد نیاز، اساسی می‌دانند. یکی از مهم‌ترین منابع منیزیوم، دخالت و تبدیل کانی‌های رسی مانند مونت‌موریلونیت، ایلیت و کائولینیت در واکنش‌های رخداد دولومیت است. این مدل بیان می‌کند در اثر فرایند تبدیل و

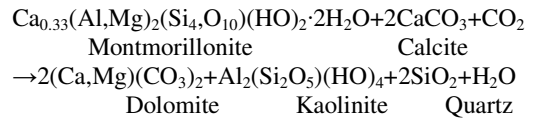
در اغلب کانسارهای فلزات پایه با میزان کربناته، بخشی از رسوبات حاوی کانی دولومیت می‌باشند و برخی از آن‌ها به طور کامل از دولومیت تشکیل شده‌اند. دولومیت می‌تواند در بیش‌تر مراحل دیاژنز، یعنی بلافاصله پس از رسوب‌گذاری تا تدفین در اعماق و از آب‌هایی با ترکیب شیمیایی مختلف (مخلوط آب‌های جوی و دریایی، آب دریا، آب‌های غیردریایی و آب‌های بسیار شور) تشکیل شود [۱]. سیالات

با نوع RD<sub>1</sub> (۵) محاسبه همبستگی مثبت بین زوج عناصر سرب-آهن، سرب-کلسیم، سرب-استرانسیوم و روند افزایشی نمودارهای دوتایی بین زوج عناصر نام برده (۶) تشابه منشأ تأمین Mg و Pb برای تشکیل کانه‌زایی سرب و دولومیت‌زایی. با کنار هم قرار دادن نحوه تشکیل کانه‌زایی سرب و کانی‌سازی دولومیت‌ها در کانسنگ سولفیدی و تلفیق شواهد بالا می‌توان نتیجه گرفت که در نتیجه کانه‌زایی، رخداد فرآیند دولومیت‌زایی پنهان و تبدیل دولومیت‌های RD<sub>1</sub> به دولومیت‌های RD<sub>2</sub> انجام شده است.

تشکیل دولومیت‌های RD<sub>3</sub> در سنگ میزبان ذخیره آهن به صورت ثانویه (شکل ۵- پ ت) می‌تواند با ماهیت ثانویه ذخیره آهن کانسار آهنگران در ارتباط باشد. قسمتی از کانسنگ اکسیدی آهنگران به احتمال زیاد توسط فرآیندهای رسوبی ایجاد شده است. بر اساس مطالعات [۶] و [۵۵]، کانسنگ اکسیدی را می‌توان یک مجموعه گوسان یا کلاک آهنی در نظر گرفت که همراه مجموعه‌ای از اکسید و هیدروکسیدهای ثانویه آهن (هماتیت، گوتیت، لیمونیت و جاروسیت) در اثر هوازدگی طی غنی‌سازی سوپرژن به صورت سطحی در بخش‌های فوقانی کانسار شکل گرفته است. در بخش اکسیدی تشکیل قسمتی از کانسنگ آهن به صورت رسوبی طی دیازنز تدفینی از یک طرف و رخداد دولومیت‌های زونه در داخل شکستگی‌های سنگ میزبان توسط انحلال فشاری و مکانیکی در مدت دیازنز تاخیری [۳۴] از طرف دیگر می‌تواند ارتباط تشکیل دولومیت‌های RD<sub>3</sub> را با کانه‌زایی بخش اکسیدی واضح تر کند.

با کنارهم قرار دادن چند شاهد مهم از جمله وجود کانی‌های رسی مانند مونت‌موریلونیت در کانسنگ اکسیدی (به منظور تأمین Mg<sup>+2</sup> مورد نیاز برای دولومیت‌سازی)، وجود منطقه‌بندی بازر در دولومیت‌ها و تشابه شرایط تشکیل دولومیت‌ها زونه با ذخیره آهن در مراحل مختلف دیازنز با توجه به نظرات [۲۹ و ۳۴] به علاوه آغستگی‌های متعدد آهن در بخش‌های مختلف این دولومیت‌ها، همگی این نظر را تقویت می‌کند که تشکیل ذخیره آهن در داخل حوضه رسوبی بر خصوصیات دولومیت RD<sub>3</sub> تأثیر گذار بوده است. تأثیرات کانه‌زایی بر دولومیت‌زایی RD<sub>2</sub> و RD<sub>3</sub> بیش‌تر در حوضه تغییرات خصوصیتی بافت و ساختی و افزایش یا کاهش برخی از عناصر در ساختمان دولومیت‌ها در زمان تشکیل بوده است.

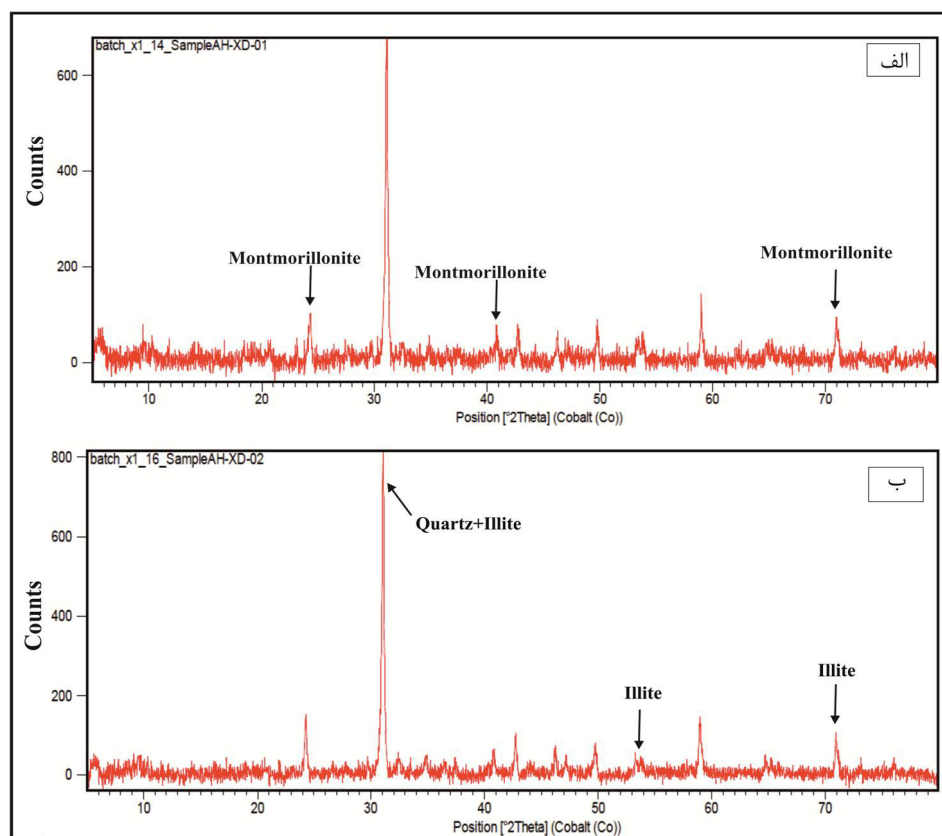
تغییر کانی‌های رسی، Mg<sup>+2</sup> از داخل ساختارهای اتمی صفحه‌ای مونت‌موریلونیت آزاد شده، سپس Mg<sup>+2</sup> حاصله جانشین Ca<sup>+2</sup> در کلسیت شده و باعث تشکیل دولومیت می‌شود (واکنش زیر). منبع دوم برای تولید منیزیم، تراکم شیل‌های بستر ژوراسیک و یا شورابه‌های حوضه‌ای است.



به عقیده بسیاری از محققان منشأ سیالات و فلزات مربوط به کانسارهای سرب غیرمرتبط با منابع آذرین (مانند آهنگران) از رسوبات عمدتاً آواری و یا شیل‌های موجود در بستر رسوبی کانسارها تأمین می‌شود. سیالات ضمن عبور از درون سنگ‌های رسوبی آواری مانند ماسه‌سنگ و شیل، فلزات موجود در سنگ را شستشو می‌دهند. این پژوهشگران تصریح می‌کنند که سرب، روی و باریم موجود در سیالات گرمایی در اثر انحلال فلدسپارپتاسیم و یا تبدیل مونت‌موریلونیت به ایلیت حاصل می‌شود [۲۴، ۲۵ و ۴۴]. در کانسار آهنگران بر مبنای نتایج XRD در نمونه‌های تجزیه شده کانسنگ اکسیدی و سولفیدی کانی‌های ایلیت و مونت‌موریلونیت مشاهده شده است (شکل ۱۲). طبق این شواهد بنظر می‌رسد در کانسار آهنگران فرآیندهای رخداد دولومیت‌زایی و کانه‌زایی احتمالاً منشأ یکسانی داشته‌اند. بنابراین بنظر می‌رسد مکانیسم تشکیل و منشأ فلزات در کانسار آهنگران و اغلب کانسارهای سرب روی با میزبان کربناته در محور ملایر-اصفهان سیالاتی هستند که احتمالاً فلزات را از توالی سنگ بستر قدیمی (در اینجا واحد شمشک) طی فرآیندهای کوهزایی جدا کرده و در زون‌های خردشده، شکستگی‌ها و امتداد مرزهای سنگی متمرکز کرده است [۵، ۶، ۱۶ و ۴۴].

بر مبنای شواهد کانه‌زایی، کانی‌شناسی، بافت و ساخت و شیمی کانی‌های کربناته مهم‌ترین دلایل ارتباط کانه‌زایی با دولومیت‌زایی در کانسنگ سولفیدی کانسار آهنگران عبارت است از: (۱) همراهی دولومیت‌های RD<sub>2</sub> در مجاورت رگه‌های کانه‌دار، (۲) ماهیت ثانویه و درشت بلور بودن دولومیت‌های RD<sub>2</sub> در مقابل دولومیت‌های دیگر، (۳) بالا بودن مقادیر آهن و منگنز در ساختمان دولومیت‌های RD<sub>2</sub>، (۴) بالا بودن مقادیر آهن کل (FeO<sub>total</sub>) در سنگ میزبان بخش کربناته کانسنگ سولفیدی در مقایسه با بخش اکسیدی، (۴) محتوای بالای عنصر سرب در دولومیت‌های RD<sub>2</sub> در مقایسه





شکل ۱۲. طیف‌های XRD حاصل از تجزیه کانسنگ‌های اکسیدی و سولفیدی که در آن حضور کانی‌های رسی ایلیت و مونت‌موریلونیت قابل رویت است.

جدول ۳. نتایج تجزیه XRF برای برخی از عناصر اصلی و فرعی در سنگ میزبان کانسنگ‌های اکسیدی و سولفیدی (ND: مقادیر اندازه‌گیری نشده)

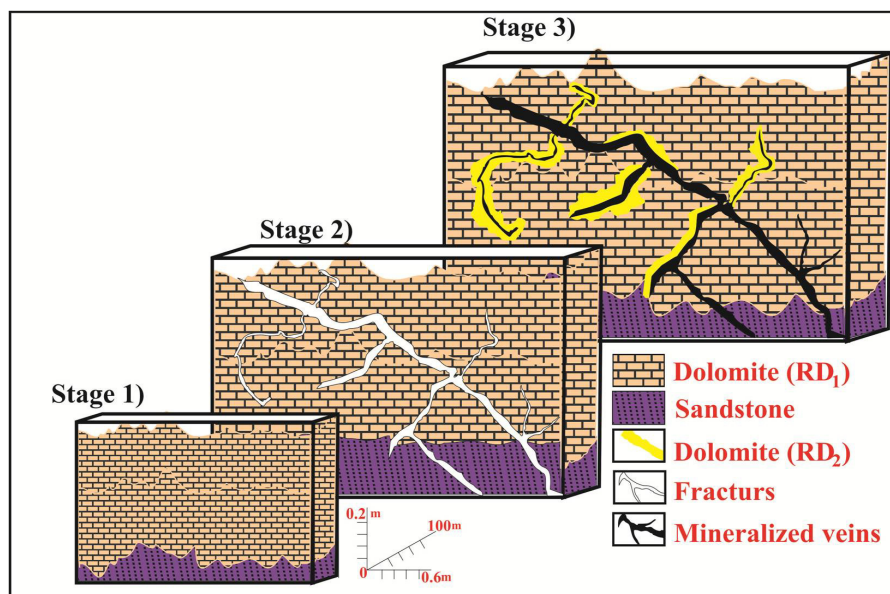
| Sample no. | Ore-type | FeO wt% | CaO wt% | MnO wt% | TiO <sub>2</sub> wt% | V wt% | Zn wt% | Pb wt% | Bi wt% | Mo wt% | Ag ppm | Se ppm |
|------------|----------|---------|---------|---------|----------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ah-S03     | Sulfide  | 12      | 8.88    | 1.62    | 1.05                 | 0.205 | 0.03   | 2.92   | 0.09   | 0.02   | 10.78  | 820    |
| Ah-S05     | Sulfide  | 11      | 0.61    | 0.27    | 0.19                 | 0.003 | 1.17   | 3.2    | 0.11   | 0.03   | 20.03  | 612.62 |
| Ah-S07     | Sulfide  | 12.3    | 1.71    | 3       | 2.85                 | 0.422 | 0.06   | 3      | 0.11   | 0.02   | 13.74  | 446.01 |
| Ah-S10     | Sulfide  | 12.4    | 2.63    | 2.83    | 1.64                 | 0.277 | 0.03   | 2.18   | 0.08   | 0.02   | 2.258  | 672.42 |
| Ah-S12     | Sulfide  | 11      | 0.80    | 0.14    | 0.28                 | ND    | 0.1    | 2.44   | 0.08   | 0.04   | 10.13  | 651.45 |
| Ah-S03     | Sulfide  | 30.3    | 2.92    | 4.74    | 0.56                 | 0.15  | 0.01   | 2.35   | 0.09   | 0.03   | ND     | 1265.6 |
| Ah-S05     | Sulfide  | 38.4    | 1.72    | 2.74    | 0.22                 | 0.02  | 0.01   | 3.16   | 0.11   | 0.04   | 10.24  | 1601.1 |
| Ah-S15     | Sulfide  | 11.7    | 2.27    | 4.09    | 4.64                 | 0.54  | 0.08   | 2.56   | 0.09   | 0.01   | 19.95  | 1132.2 |
| Ah-S45     | Sulfide  | 13.2    | 0.28    | 3.32    | 1.64                 | 0.25  | 0.25   | 3.04   | 0.1    | 0.02   | 11.79  | 884.07 |
| Ah-S45     | Sulfide  | 11.1    | 0.18    | 0.93    | 5.70                 | 0.66  | 0.03   | 2.4    | 0.09   | 0.01   | 13.75  | 674.17 |
| Ah-O34     | Oxide    | 12.9    | 2.07    | 2.61    | 1.44                 | 0.24  | 0.03   | 0.28   | 0.01   | 0.02   | 5.94   | 373.0  |
| Ah-006     | Oxide    | 13.4    | 2.66    | 8.72    | 1.69                 | 0.26  | 0.07   | 0.09   | ND     | 0.02   | 4.83   | ND     |
| Ah-O09     | Oxide    | 12.8    | 0.89    | 4.31    | 2.83                 | 0.41  | 0.02   | 0.09   | 0.01   | 0.02   | 6.93   | 25.63  |
| Ah-O11     | Oxide    | 13      | 0.73    | 2.62    | 1.59                 | 0.25  | 0.06   | 0.09   | 0.01   | 0.02   | 6.66   | 261.16 |
| Ah-O13     | Oxide    | 13.6    | 1.85    | 3.66    | 2.94                 | 0.39  | 0.03   | 1.65   | 0.08   | 0.02   | 12.04  | 664.27 |
| Ah-O04     | Oxide    | 12.9    | 2.91    | 2.3     | 1.14                 | 0.20  | 0.01   | 0.37   | 0.02   | 0.02   | 8.85   | ND     |
| Ah-O02     | Oxide    | 12.9    | 2.69    | 6.35    | 2.41                 | 0.32  | 0.01   | 0.09   | ND     | 0.02   | 4.87   | ND     |
| Ah-O25     | Oxide    | 13      | 1.40    | 3.03    | 2.60                 | 0.35  | 0.44   | 0.09   | ND     | 0.02   | 10.25  | 205.82 |
| Ah-O12     | Oxide    | 13.2    | 0.56    | 7.42    | 0.88                 | 0.12  | 0.15   | 0.85   | 0.04   | 0.03   | 6.25   | 659.22 |
| Ah-O12     | Oxide    | 13.1    | 0.06    | 2.69    | 0.52                 | 0.03  | 0.01   | 0.09   | 0.01   | 0.03   | 7.23   | 173.39 |

کربناته و ژئوشیمی سنگ میزبان مشخص شد که دولومیت‌های  $RD_2$  و  $RD_3$  همزمان و یا کمی بعد از کانه‌زایی تشکیل شده‌اند و از مصادیق مهم دگرسانی دولومیتی‌شدن در ذخایر معدنی محسوب می‌شوند. به عقیده برخی از پژوهشگران از جمله [۲۳ و ۵۰] وجود دگرسانی‌های دولومیتی در کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناته در صورتی که با داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، مطالعات صحرایی و نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی منطبق شوند می‌تواند به عنوان یک ابزار اکتشافی از آن استفاده کرد.

### سیاسگزاری

از مسئولین محترم شرکت معادن سرمک و مدیریت مجتمع معدنی آهنگران به خصوص مهندس حسینقلی و مهندس خاکباز که بستر لازم را برای بازدیدهای صحرایی و نمونه‌برداری فراهم آورده‌اند تشکر و قدردانی می‌شود. این پژوهش از طرف دانشگاه بوعلی‌سینا و سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) مورد حمایت مالی قرار گرفته است. بدین وسیله از مدیریت و کارشناسان بخش کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران نیز تقدیر و تشکر می‌شود.

بنابراین با جمع‌بندی شواهد ذکر شده می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که در بخش سولفیدی دولومیت‌زایی در دو مرحله انجام شده در مرحله اول قبل از کانه‌زایی تغییراتی در سنگ میزبان رخ داده است که به آماده شدن زمینه<sup>۱</sup> معروف است (شکل ۱۳- مرحله ۱). این تغییرات سبب بالا رفتن توان واکنش سنگ میزبان در برابر محلول کانه‌دار، افزایش تراوایی و تخلخل شده است. در کانسار آهنگران دولومیت‌های  $RD_1$  متعلق به این مرحله است. [۴۴] بر این عقیده است که آماده شدن زمینه شامل مواردی مثل کارستی‌شدن، برشی‌شدن شیمیایی، شکستگی‌های ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی و انحلال یا کارست‌های گرمایی می‌شود (شکل ۱۳-مرحله ۲). بعد از نفوذ سیال کانه‌ساز در میزبان دولومیتی واکنش سیال با میزبان کربناته، باعث تبدیل دولومیت‌های  $RD_1$  به  $RD_2$  می‌شود. البته این تبدیل‌شدگی باعث تغییرات فابریک و اندکی شیمی کانی کربناته شده است (شکل ۱۳-مرحله ۳). در تحلیل چگونگی تشکیل دولومیت‌های  $RD_2$  و  $RD_3$  شواهد ارائه شده، ثابت می‌کند این دولومیت‌ها تحت تأثیر مستقیم یا غیر مستقیم کانه‌زایی قرار گرفته‌اند و اطلاق دگرسانی دولومیتی می‌تواند توصیف صحیحی برای این دولومیت‌ها باشد. با جمع‌بندی مطالب گفته شده و بر مبنای شواهد کانی‌شناسی، شیمی کانی‌های



شکل ۱۳. مدل شماتیک از سطح مقطع کانی‌سازی در فراز تونل ۱۵-۱۰ در کانسنگ سولفیدی کانسار آهنگران. الف) تشکیل دولومیت‌ها نوع اول در بخش بالایی افق ماسه‌سنگی (قبل از کانه‌زایی)، ب) رخداد شکستگی‌های متعدد در سنگ میزبان دولومیتی ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی و پ) نفوذ سیال کانه‌ساز در داخل شکستگی‌ها و رخداد دگرسانی دولومیتی (پس از کانه‌زایی)

## منابع

- [۱۳] مرادپور، م.، آدابی، م (۱۳۸۶) پتروگرافی و ژئوشیمی دولومیت‌های کرتاسه زیرین خاور اصفهان. مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ۱، (۱۵-۲۵).
- [۱۴] مقدوری، ا.، پور احمدی، م.، نیاسری، (۱۳۸۲) نقشه زمین‌شناسی منطقه معدنی آهنگران با مقیاس ۱:۱۰۰۰، شرکت معادن سرمک.
- [۱۵] نیازی، س (۱۳۹۲) تحلیلی ساختاری زمین‌شناسی معدن آهنگران، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد دانشگاه تربیت‌مدرس، ۱۴۵ صفحه.
- [۱۶] وفایی‌زاد، معصومه (۱۳۹۲) مطالعه سیالات درگیر و ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد کانسار سرب و روی آهنگران ملایر، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، ۱۲۰ صفحه.
- [17] Abidi, R., Slim-Shimi, N., Somarin, A., Henchiri, M (2010) Mineralogy and fluid inclusions study of carbonate-hosted Mississippi valley-type Ain Allega Pb-Zn-Sr-Ba ore deposit, Northern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 57(3), 262-272.
- [18] Adabi, M. H (1997) Sedimentology and geochemistry of Upper Jurassic (Iran) and Precambrian (Tasmania) carbonates. PhD diss., University of Tasmania.
- [19] Aghanabati, A (1998) Major sedimentary and structural units of Iran (map). *Geosciences*, 7, 29-30.
- [20] Amthor, J. E., & Friedman, G. M (1991) Dolomite-rock textures and secondary porosity development in Ellenburger Group carbonates (Lower Ordovician), west Texas and southeastern New Mexico. *Sedimentology*, 38(2), 343-362.
- [21] Berberian, M., & King, G (1981) Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2), 210-265.
- [22] Bouch, J. E., Naden, J., Shepherd, T. J., McKervey, J. A., Young, B., Benham, A. J., & Sloane, H. J (2006) Direct evidence of fluid mixing in the formation of stratabound Pb-Zn-Ba-F mineralisation in the Alston Block, North Pennine Orefield (England). *Mineralium Deposita*, 41(8), 821-835.
- [23] Cao, J., Hu, W., Yao, S., Zhang, Y., Wang, X., Zhang, Y., & Huang, Z (2007) Carbon, oxygen and strontium isotope composition of calcite veins in the carboniferous to Permian source sequences of the Junggar Basin: implications on petroleum fluid migration. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(5), 722.
- [۱] آدابی، م.، ح (۱۳۸۳) ژئوشیمی رسوبی، انتشارات زمین آراین، ۴۴۸ صفحه.
- [۲] بازگانی، ک.، مهرابی، ربیعی، م (۱۳۸۹) تأثیر بستر کربناته در شکل‌گیری کانسارهای سرب و روی شمال باختر شه میرزاد، البرز مرکزی، ایران. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال ۱۸، شماره ۱، صفحه ۵۳-۶۶.
- [۳] جزی، م.، شهاب‌پور، ج (۱۳۸۹) بررسی خصوصیات کانی‌شناسی، ساختی، بافتی و ژئوشیمیایی معدن سرب نخلک، اصفهان. مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره دو، صفحه ۱۳۵-۱۵۱.
- [۴] جعفریان، م.، زمانی، پ.، سهیلی، م (۱۹۶۷) نقشه زمین‌شناسی "۱:۱۰۰۰۰۰" ملایر، انتشارات سازمان زمین‌شناسی ایران.
- [۵] حسین‌خانی، ا.، ملاصلحی، ف (۱۳۹۳) مطالعات کانی‌شناسی سرب و نقره و بررسی‌های ایزوتوپی سرب در معدن آهنگران، ملایر. فصلنامه علوم‌زمین، شماره نود و چهار، صفحه ۳۵۹-۳۶۸.
- [۶] حیاتی، س (۱۳۹۴) مطالعه خصوصیات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی کانه‌های نقره‌دار و کانسنگ اکسیدی کانسار آهنگران ملایر، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، ۱۸۰ صفحه.
- [۷] درویش‌زاده، م (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر، ۴۳۲ صفحه.
- [۸] دلاور، س.، رسا، ا.، لطفی، م.، بورگ، گ.، رشید نژاد عمران، ن.، افضل، پ (۱۳۹۱) رخساره‌های کانه‌دار کانسار روی-سرب (نقره) تنگ‌دزان در توالی کربناته ژوراسیک-کرتاسه، بوبین میان‌دشت (اصفهان). مجله علوم، سال ۲۳، شماره ۹۱، صفحه ۷۷-۸۸.
- [۹] رسا، ا.، کاظمی مهرنیا، ا (۱۳۸۴) کانسارهای فلزات پایه با میزبان سنگ‌های کربناتی، انتشارات روز بهان.
- [۱۰] شمسی‌پور، ر.، کرمانی، ن.، باقری، ه (۱۳۹۰) مطالعه ایزوتوپی و زمین‌دماسنجی کانسار سرب کهرویه (جنوب خاور شهرضا). مجله پترولوژی، سال اول، شماره چهارم، صفحه ۳۵-۴۴.
- [۱۱] قربانی، م (۱۳۸۶) زمین‌شناسی اقتصادی (ذخایر معدنی و طبیعی ایران)، انتشارات آراین زمین، ۴۹۳ صفحه.
- [۱۲] ملاصلحی، ف.، میرنژاد، ح (۱۳۸۹) مقایسه ترکیب ایزوتوپی سرب در کانسار کوه سورمه با برخی از کانسارهای سرب و روی ایران مرکزی و بررسی نقش فرورانش نئوتتیس در تحرک مجدد سرب ایران مرکزی. مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۳۸- شماره ۱، صفحه ۱۱-۱۷.

- [37] Leach, D. L., & Sangster, D. F (1993) Mississippi Valley-type lead-zinc deposits. Geological Association of Canada Special Paper, 40, 289–314.
- [38] Leach, D., Sangster, D., Kelley, K., Large, R. R., Garven, G., Allen and C., Walters, S. G (2005) Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective. *Economic Geology*, 100, 561–607.
- [39] Lee, Y. I., & Friedman, G. M (1987) Deep-burial dolomitization in the Ordovician Ellenburger Group carbonates, west Texas and southeastern New Mexico. *Journal of Sedimentary Research*, 57(3), 544–557.
- [40] McHargue, T. R., & Price, R. C (1982) Dolomite from clay in argillaceous or shale-associated marine carbonates. *Journal of Sedimentary Research*, 52(3), 873–886.
- [41] Mukhopadhyay, J., Chanda, S. K., Fukuoka, M., & Chaudhuri, A. K (1996) Deep-water dolomites from the Proterozoic Penganga Group in the Pranhita-Godavari Valley, Andhra Pradesh, India. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1), 223–230.
- [42] Navarro-Ciurana, D., Codina-Miquela, R., Cardellach, E., Gómez-Gras, D., Grier, A., Daniele, L., & Corbella, M (2013) Dolomitization Related to Zn-(Pb) Deposits in the Río Mundo Area (Riópar, Albacete). *Macla*, (17), 79–80.
- [43] Paradis, S., Hannigan, P., & Dewing, K (2007) Mississippi Valley-type lead-zinc deposits. *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, 185–203.
- [44] Pirajno, F (2009) *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer.
- [45] Pires, F. R. M., Mendes, C. L. O., & Miano, S. C (2004) Fluorite mineralization related to the dolomitization: an equilibrium study of the Proterozoic stratabound carbonate Macaia-Ijaci Basin, Lavras, Minas Gerais, Brazil. *Anuário Do Instituto de Geociências*, 27, 11–26.
- [46] Rajabi, A., Rastad, E., & 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.
- [24] Chaudhuri, S., Broedel, V., & Clauer, N (1987) Strontium isotopic evolution of oil-field waters from carbonate reservoir rocks in Bindley field, central Kansas, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(1), 45–53.
- [25] Coveney, R. M., & Glascock, M. D (1989) A review of the origins of metal-rich Pennsylvanian black shales, central USA, with an inferred role for basinal brines. *Applied Geochemistry*, 4(4), 347–367.
- [26] Dickson, J. A. D (1965) A modified staining technique for carbonates in thin section. *Nature*, 205(587), 587–587.
- [27] Dunham, R. J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional textures.
- [28] Gao, Ga and Land, L. S (1991) Early Ordovician cool creek dolomite, middle arbuckle group, slick hills, SW Oklahoma, USA: origin and modification. *Journal of Sedimentary Research*, 61(2), 542–542.
- [29] Ghazban, F., McNutt, R. H., & 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.
- [30] Gregg, J. M., & Sibley, D. F (1984) Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture. *Journal of Sedimentary Research*, 54(3), 908–931 .
- [31] Guilbert, J. M., & Park Jr, C. F (2007) *The geology of ore deposits*. Waveland Press.
- [32] Héroux, Y., Chagnon, A., & Savard, M (1996) Organic matter and clay anomalies associated with base-metal sulfide deposits. *Ore Geology Reviews*, 11(1), 157–173.
- [33] Kahle, C. F (1965) Possible roles of clay minerals in the formation of dolomite. *Journal of Sedimentary Research*, 35(2), 448–453.
- [34] Kendall, A. C (1977) Origin of dolomite mottling in Ordovician limestones from Saskatchewan and Manitoba. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 25(3), 480–504.
- [35] Land, L. S (1986) Environments of limestone and dolomite diagenesis: some geochemical considerations. *Colorado School of Mines Quarterly*, 81(4), 26–41.
- [36] Leach, D. L., Bradley, D. C., Huston, D., Pisarevsky, S. A., Taylor, R. D., & Gardoll, S. J (2010) Sediment-hosted lead-zinc deposits in Earth history. *Economic Geology*, 105(3), 593–625.



- massive sulphide deposits in the Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, 53, 181–203.
- [56] Ye, Q., & Mazzullo, S. J (1993) Dolomitization of lower Permian platform facies, Wichita Formation, north platform, Midland basin, Texas. *Carbonates and Evaporites*, 8(1), 55–70.
- [57] Zhang, J., Hu, W., Qian, Y., Wang, X., Cao, J., Zhu, LiQ, Xie X (2009) Formation of saddle dolomites in Upper Cambrian carbonates, western Tarim Basin (northwest China): Implications for fault-related fluid flow. *Marine and Petroleum Geology*, 26(8), 1428–1440.
- [47] Randell, R. N., Héroux, Y., Chagnon, A., & Anderson, G. M (1997) Organic matter and clay minerals at the Polaris Zn-Pb deposit, Canadian Arctic Archipelago. *Carbonate-Hosted Lead-Zinc Deposits. Society of Economic Geologists Special Publication*, 4, 320–329.
- [48] Rao, C. P (1996) Elemental composition of marine calcite from modern temperate shelf brachiopods, bryozoans and bulk carbonates, eastern Tasmania, Australia. *Carbonates and Evaporites*, 11(1), 1–18.
- [49] Reichert, J., & Borg, G (2008) Numerical simulation and a geochemical model of supergene carbonate-hosted non-sulphide zinc deposits. A Special Issue Devoted to Nonsulfide Zn-Pb Deposits, 33(2), 134–151. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.02.006>
- [50] Sass-Gustkiewicz, M., Dzulynski, S., & Ridge, J. D (1982) The emplacement of zinc-lead sulfide ores in the Upper Silesian District; a contribution to the understanding of mississippi valley-type deposits. *Economic Geology*, 77(2), 392–412.
- [51] Shingaly, W. S., Al-Juboury, A. I., & Elias, E. M (2014) Dolomite textures in the Upper Cretaceous carbonate-hosted Pb–Zn deposits, Zakho, Northern Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(8), 3163–3174.
- [52] Srinivasan, K., Walker, K. R., & Goldberg, S. A (1994) Determining fluid source and possible pathways during burial dolomitization of Maryville Limestone (Cambrian), Southern Appalachians, USA. *Sedimentology*, 41(2), 293–308.
- [53] Stampfli, G. M., & Borel, G. D (2002) A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1), 17–33.
- [54] Sternbach, C. A., & Friedman, G. M (1984) Ferroan carbonates formed at depth require porosity well–log correction: Hunton Group, deep Anadarko Basin (Upper Ordovician to lower Devonian) of Oklahoma and Texas: *Transaction of Southwest section: Am. Assoc. Petrol. Geology*, 68(1) 167–17.
- [55] Velasco, F., Herrero, J. M., Suárez, S., Yusta, I., Alvaro, A., & Tornos, F (2013) Supergene features and evolution of gossans capping