

## نقش دیاژنز در تشکیل کانسار سرب، روی و باریت در کربنات‌های کرتاسه زیرین (سازندهای تفت و آبکوه) - معدن مهدی‌آباد یزد

محمد صفایی<sup>۱</sup>، اسداله محبوبی<sup>۲\*</sup>، سروش مدبری<sup>۳</sup> و سیدرضا موسوی حرمی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترا رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی رسوبی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲ و ۴- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

نویسنده مسئول: mahboubi@um.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸

نوع مقاله: پژوهشی

### چکیده

سنگ‌های کربناتی کرتاسه زیرین (سازندهای تفت و آبکوه) در جنوب یزد میزبان کانسارهای سرب، روی و باریت هستند. فرایندهای دیاژنزی بعد از رسوبگذاری در این کربنات‌ها عامل تشکیل این کانسارها شده‌اند. عمده فرایندهای اصلی دیاژنزی تاثیرگذار بر این رسوبات شامل فشردگی، پرشی شدن، نئومورفیسم، سیمانی شدن، انحلال، دولومیتی شدن و جانیشینی است. فرایندهای دولومیتی شدن و جانیشینی باعث تشکیل کانسار سرب، روی و باریت شده‌اند. سیالات گرمایی از طریق مجاری حاصل از گسل‌های فعال و نرمال، شرایط تشکیل این کانسارها را در سنگ‌های کربناتی ناحیه فراهم نموده است. تشکیل کانسار طی دو مرحله مزوژنز و تلوژنز روی داده است. در مرحله مزوژنز و در شرایط دفنی ابتدا دولومیت و پس از ورود سیالات هیدروترمالی و تامین عناصر لازم، در اثر جانیشینی کانسارهای سولفیدی تشکیل شده است. در مرحله تلوژنز، بخشی از کانسارهای سولفیدی تشکیل شده مجدداً تحت تاثیر سیالات متئوریک قرار گرفته و منجر به تشکیل کانسارهای اکسیدی شده است.

**واژگان کلیدی:** کربنات‌های کرتاسه زیرین، معدن مهدی‌آباد، فرایندهای دیاژنزی، دولومیتی شدن، کانه‌زایی سرب و روی

### پیشگفتار

بعد تا اواسط ژوراسیک میانی و همزمان با گسترش حوضه پشت‌کمانی دریایی ناشی از فرورانش نئوتتیس، رخساره گروه شمشک از مولاس به رسوبات آواری همزمان با کافت (سازند سنگستان) و رسوبات دریایی عمیق (سازند تفت و آبکوه) در طی کرتاسه پیشین تغییر یافته است (فورسیچ و همکاران، ۲۰۰۵؛ ویلمسن و همکاران، ۲۰۱۵). سنگ‌های آهکی اربیتولین‌دار، از بارزترین سکانس‌های کرتاسه پایینی ایران هستند که در البرز (سازند تیزکوه)، کپه‌داغ (سازند تیرگان)، ایران مرکزی (واحد‌های اربیتولین‌دار ناحیه اصفهان، سازند تفت و سازند شاهکوه) و زاگرس (فهلپان و داریان) گسترش درخور توجهی دارند که در بعضی از این مناطق کانسارهای فلزی در آن‌ها تشکیل شده است (حیاتی و همکاران، ۱۳۹۵؛ طالع‌فاضل، ۱۳۹۷). حوضه جنوب یزد در قسمت جنوبی کمربند فلزایی یزد-انارک واقع شده است. کانسارهای فراوانی از سرب، روی در این حوضه مانند کانسار مهدی‌آباد،

تاکنون بیش از ۳۰۰ کانسار سرب و روی با میزبانی سنگ‌های رسوبی در ایران گزارش گردیده است که از این تعداد حدود ۲۸۵ مورد در سنگ‌های کربناتی و بقیه در سنگ‌های آواری و در زمان‌های مختلف زمین‌شناسی تشکیل شده‌اند (رجبی و همکاران، ۲۰۱۲ الف). توزیع کانسارهای سرب و روی با میزبان رسوبی در ایران نشان دهنده قرارگیری این کانسارها در اطراف زمین‌درزهای اصلی واقع در مرکز ایران و بیانگر ارتباط نزدیک تشکیل این کانسارها با تحولات تکتونیکی اساسی در پوسته ایران است (رجبی و همکاران، ۲۰۱۲ الف و ب). فرورانش نئوتتیس به زیر ورقه ایران مرکزی در ژوراسیک باعث تشکیل کمان ماگمایی قروه-الیگودرز در پهنه سنندج-سیرجان و تشکیل حوضه کششی پشت‌کمانی دریایی در بلوک یزد و اطراف خرده‌قاره ایران مرکزی شده است (محجل و فرگوسن، ۲۰۱۴). از زمان ژوراسیک پیشین به

است. سازندهای تفت و آبکوه در منطقه مورد مطالعه از سنگ‌آهک و دولوستون تشکیل شده‌اند (شکل B۱). سازند سنگستان با مرزی فرسایشی بر روی گرانیب شیرکوه یزد و بصورت پیوسته در زیر کربنات‌های سازند جوان‌تر تفت در هر دو بُرش قرار دارد. سازند تفت با مرزی پیوسته در بُرش A در زیر سازند آبکوه قرار دارد و مرز بالایی سازند آبکوه مشخص نیست و به صورت گسله است. در بُرش B سازند آبکوه تشکیل نشده است. نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی و صحرایی نشان می‌دهد که سازندهای تفت و آبکوه در یک پلاتفرم کربناته کم‌عمق از نوع رمپ و در چهار زیرمحیط دریای باز، سد، لاگون و پهنه کشندی رسوبگذاری کرده است (صفایی و همکاران، ۲۰۲۰). کانسار سرب، روی و باریت در سازندهای کربناتی تفت و آبکوه در این توالی تشکیل شده است.

### روش مطالعه

در این پژوهش ۲ بُرش سطحی از سازندهای تفت و آبکوه در معدن انتخاب و نمونه‌برداری سیستماتیک در آن‌ها صورت پذیرفت همچنین نمونه‌برداری از مغزه‌های حاصل از حفاری‌های معدنی (از چهار گمانه حفر شده در قسمت سازندهای تفت و آبکوه نمونه اخذ شد) در محدوده کانسار مهدی‌آباد انجام گرفت. در مجموع تعداد ۲۰۰ نمونه سنگی از بُرش‌ها و تعداد ۵۰ نمونه از مغزه‌ها برداشت شد. نمونه‌های برش‌نازک، صیقلی و دوبر صیقل جهت مطالعات پتروگرافی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، رخساره‌های رسوبی و بررسی توالی پاراژنتیک تهیه شد.

### فرایندهای دیاژنزی

مطالعه پتروگرافی سنگ‌های کربناتی سازندهای تفت و آبکوه طیف وسیعی از فرایندهای دیاژنتیکی از قبیل فشردگی، برشی شدن، سیمانی شدن، میکریتی شدن، نئومورفیسیم، انحلال، شکستگی، دولومیتی شدن و جانیشینی کانسار را نشان می‌دهد.

**فشردگی:** فرایند فشردگی بسیاری از دانه‌های اسکلتی و غیراسکلتی را تحت تأثیر قرار داده است در برخی از این موارد فشردگی به صورت فیزیکی اتفاق افتاده است (شکل A۲) و در بعضی از نمونه‌ها فشردگی شیمیایی در رسوبات مشاهده می‌گردد و شامل مرز مضرس می‌باشد (شکل E۲). فشردگی تمامی رسوبات نهشته شده در معدن را تحت تأثیر خود قرار داده است.

منصورآباد، فرح‌آباد و دره‌زنجیر تشکیل شده‌اند (مغفوری و همکاران، ۲۰۲۰، ۲۰۲۱). کانسار مهدی‌آباد با قرارگیری در ایران مرکزی و حوضه جنوب یزد در زمان کرتاسه پیشین در یک محیط دریایی متأثر از کشش پشت‌کمانی تشکیل شده است. کانسار مهدی‌آباد بزرگ‌ترین ذخیره روی در دنیا و دارای ۳۹۴ میلیون تن ذخیره با عیار ۴/۲ درصد روی، ۱/۶ درصد سرب و ۳۶ گرم بر تن نقره است همچنین ذخیره باریت این کانسار به طور غیر معمول زیاد و بیش از ۴۰ میلیون تن تخمین زده می‌شود (مغفوری و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات قبلی در خصوص تشکیل، کانی‌شناسی، ژنز و مشخصات کانسار در این محدوده صورت گرفته (رایچرت، ۲۰۰۷؛ مغفوری و همکاران، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸) اما کمتر با نگاه رسوب‌شناسی و فرایندهای رسوبی به این معدن توجه شده است. هدف از انجام این مطالعه بررسی فرایندهای دیاژنزی در سنگ‌های کربناتی سازندهای تفت و آبکوه و نقش آن‌ها در تشکیل کانسارهای سرب، روی و باریت در معدن مهدی‌آباد یزد است. این مطالعات می‌تواند با تکیه بر شواهد ارایه داده شده در اکتشاف و شناسایی کانسارهای مشابه اطلاعات با ارزشی را ارایه نماید.

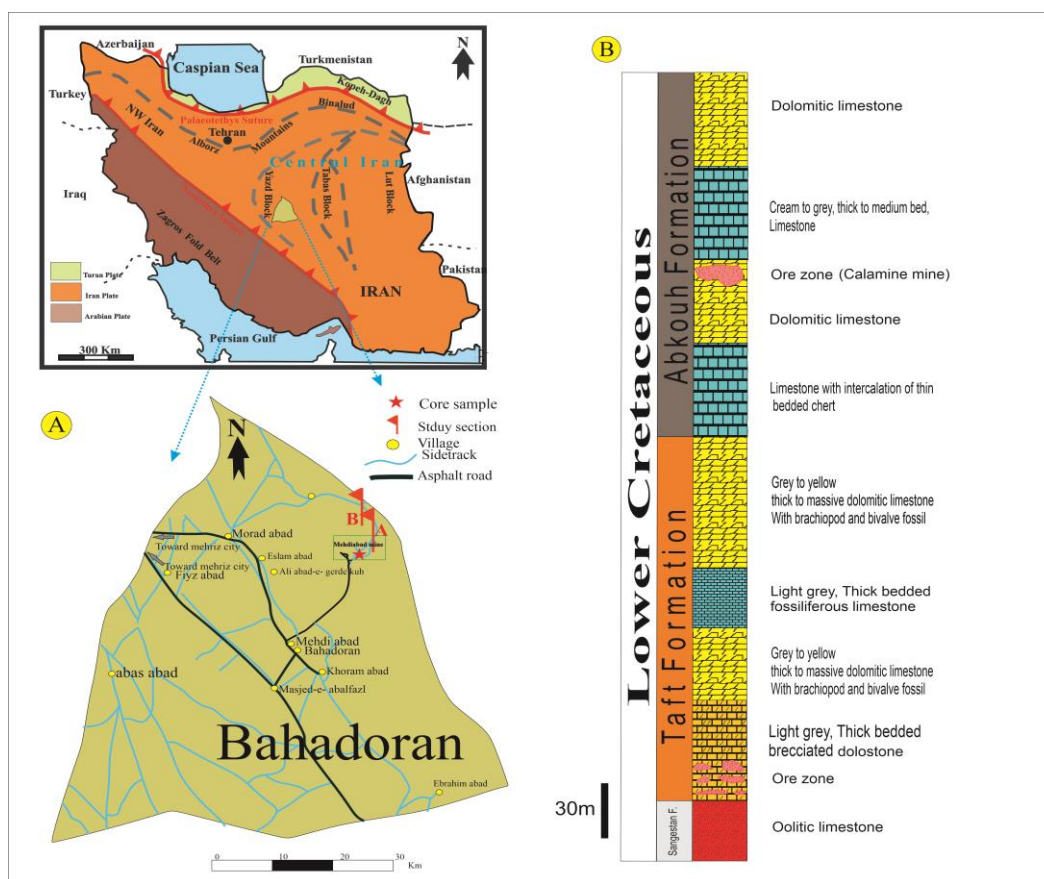
### موقعیت جغرافیایی

معدن مهدی‌آباد در فاصله ۱۱۵ کیلومتری جنوب‌خاوری یزد در شمال دهستان بهادران قرار گرفته است. ناحیه مورد مطالعه در طول جغرافیایی ۵۵ درجه تا ۵۴ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه تا ۳۱ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی واقع شده است. این معدن از طریق جاده اصلی یزد-کرمان قابل دسترس است. برای این منظور پس از گذر از مهریز و طی مسافت ۶۰ کیلومتر در جاده یزد-کرمان به روستای بهادران رسیده و معدن در فاصله ۸ کیلومتری خاور آن واقع است (شکل ۱ A).

### موقعیت زمین‌شناسی کرتاسه زیرین در معدن

#### مهدی‌آباد

توالی کرتاسه زیرین در معدن مهدی‌آباد از سه سازند سنگستان، تفت و آبکوه تشکیل شده است. از لحاظ چینه‌شناسی، سازند سنگستان در منطقه مورد مطالعه به سه واحد ماسه‌سنگ با میان‌لایه‌های شیلی، سنگ‌آهک و ماسه‌سنگ با میان‌لایه‌های شیلی و سنگ‌آهک تقسیم شده



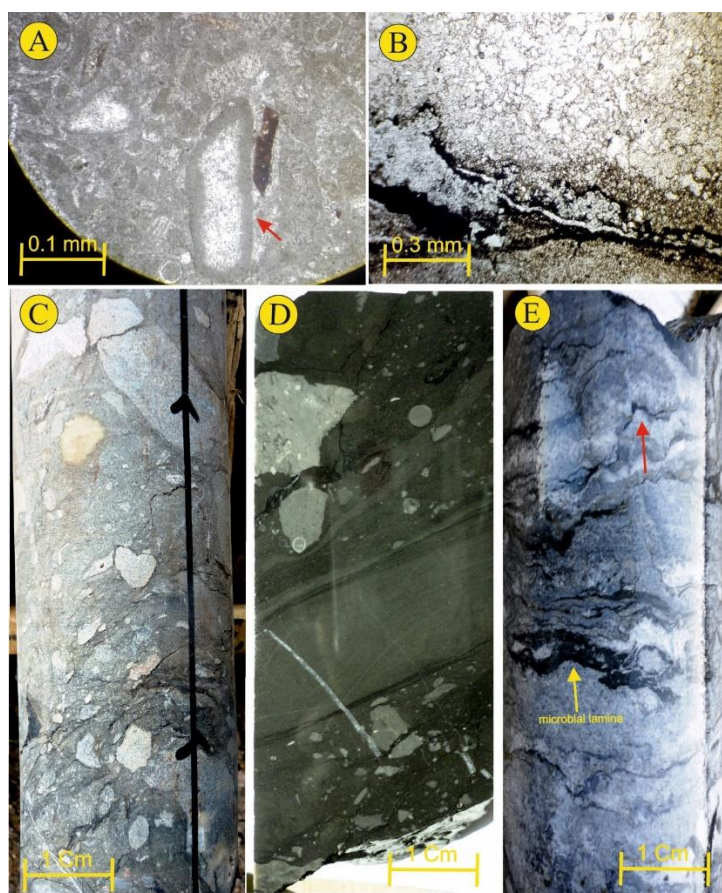
شکل ۱. A- موقعیت ناحیه مورد مطالعه (سهندی، ۱۳۸۵) و B- توالی چینه‌شناسی کانسار مهدی‌آباد در بُرش A و محل تشکیل کانسار

نمی‌دهند. آثاری از فشردگی در پُرش‌ها دیده می‌شود که نشان‌دهنده ریزش قطعات است (شکل C۲). پُرش‌های نوع دوم در ارتباط با کانه‌زایی است.

میکریتی شدن: به طور کلی این فرایند به میزان اندکی در خرده‌های اسکلتی سازندهای مورد مطالعه مشاهده شده است. در نمونه‌های مورد مطالعه این فرایند به صورت پوشش کامل و یکنواخت و یا ناکامل در اطراف خرده‌های اسکلتی مشاهده می‌شود (شکل A۲). میکریتی شدن خرده‌های اسکلتی مختلف مانند اکینوئید، براکیوپود و دوکفه‌ای را تحت تاثیر قرار داده است. در مواردی نیز میکریتی شدن به حدی است که تشخیص خرده اسکلتی اولیه ممکن نیست.

نئومورفیسم: در نمونه‌های مورد مطالعه نئومورفیسم افزایشی به دو صورت تبدیل ماتریکس میکریتی به کلسیت ریزبلور در زمینه سنگ‌های آهکی و در پوسته‌های ناپایداری با ترکیب آراگونیتی مانند دوکفه‌ای ایجاد شده (تبدیل پلیمرفیک) که باعث از بین رفتن ریزساخت اولیه دیواره بیوکلاست‌ها گردیده است (شکل B۲, A).

پُرش شدن: یکی از بارزترین فرایندهایی که در سازندهای کربناتی تفت و آبکوه مشاهده می‌گردد پُرش شدن است. پُرش شدن معمولاً در مکان‌هایی که کانه‌زایی صورت پذیرفته از شدت بیشتری برخوردار است. در توالی معدن مهدی‌آباد دو نمونه پُرش مشاهده گردید. پُرش نوع اول در ارتباط با فعالیت گسل، همزمان با رسوبگذاری و پُرش نوع دوم، باز نوع ریزشی است که بعد از رسوبگذاری و در طی دیاژنز تشکیل شده است. پُرش نوع اول در بعضی از نمونه‌های حفاری در مجاورت گسل‌ها بخصوص گسل تپه‌سیاه مشاهده می‌شود. در این نوع پُرش، لامینه و لایه‌های رسوبی که نشان‌دهنده رسوبگذاری در کف دریا است در بین لایه‌های پُرش شده قرار گرفته‌اند که مویید فعالیت گسل در حین رسوبگذاری است (شکل F۳). این نوع پُرش‌ها معمولاً در طول تکوین حوضه رسوبی و در اثر تکانه‌های حوضه و در طی افزایش ضخامت آن تشکیل می‌شوند (لیچ و همکاران، ۲۰۱۰). در پُرش‌های نوع دوم اکثر حاشیه دانه‌ها نامنظم هستند و در اکثر آن‌ها محور بلند دانه‌ها به صورت اتفاقی در زمینه قرار گرفته و جهت‌یابی خاصی و شواهدی از چرخش را نشان



شکل ۲. A- میکربیتی شدن در دیواره اسکلتی سازند تفت (فلش قرمز رنگ) همچنین در این نمونه فشردگی نیز صورت گرفته است و باعث شده است آلوکمه‌ها به هم نزدیک شوند (نور عبوری PPL). B- فرایند نئومورفیسم در زمینه میکربیتی سنگ صورت پذیرفته و بلورهای درشت‌تر تشکیل شده‌اند. در قسمت پایین نمونه لامینه‌های میکروبی در تناوب با میکربیت نئومورف شده مشاهده می‌گردند (سازند تفت نور عبوری PPL). C- نمونه مغزه از پرش تشکیل شده در سازند تفت. دانه‌ها در اندازه‌های مختلف درون ماتریکس قرار گرفته‌اند و پرش تشکیل شده است. غالب جنس دانه‌ها از دولومیت است که در زمینه‌ای از رسوبات ریزدانه و میکروبی که دولومیتی شده‌اند قرار گرفته‌اند. D- نمونه از پرش‌های رسوبی در سازند تفت در مجاورت گسل تپه‌سیاه. در این نمونه یک سطح حاصل از رسوبگذاری در بین دو سطح پرشی شده مشاهده می‌گردد. E- نمونه مغزه حفاری از رسوبات میکروبی که تحت تاثیر فرایند فشردگی فیزیکی و شیمیایی قرار گرفته است (سازند تفت).

سیمانی شدن: حضور رخساره‌های گرینستونی و رودستونی فراوان در سنگ‌های کربناتی مورد مطالعه سبب شده است تا انواع مختلفی از سیمان کلسیتی در برش‌های مورد مطالعه شناسایی شود. فابریک‌های سیمان در این رسوبات شامل رشته‌ای حاشیه‌ای هم‌ضخامت<sup>۱</sup>، بلوکی<sup>۲</sup>، گرانولار<sup>۳</sup>، رورشدی هم‌محور<sup>۴</sup> و دروزی<sup>۵</sup> است. از نظر فراوانی، سیمان‌های رورشدی هم‌محور و حاشیه‌ای هم‌ضخامت و بلوکی فراوانی بیشتری نسبت به سایر انواع سیمان دارند. کمترین فراوانی نیز متعلق به سیمان‌های دروزی و گرانولار است. سیمان سنگ‌های کربناته سازندهای مورد مطالعه از نوع کلسیت، دولومیت، باریت،

پیریت، کالکوپیریت، همتایت، گوتیت و مالاکیت است. کانه‌های فلزی به صورت سیمان درون حفرات حاصل از انحلال و یا شکستگی‌ها تشکیل شده‌اند (شکل A۳، B، شکل A۴). شکستگی و پرشدگی: شکستگی‌ها با اندازه‌های متنوع بصورت رگه‌های نازک و ضخیم کشیده با پهنای حدود یک تا سه میلی‌متر و طولی در حدود چندین میلی‌متر وجود دارند. منشأ بسیاری از این شکستگی‌ها تکتونیکی است. این شکستگی‌ها بعداً توسط دولومیت یا باریت پر شده‌اند (شکل A۳).

۱ - Isopachous rim  
۲ - Blocky  
۳ - Granular  
۴ - Syntaxial overgrowth  
۵ - Drusy

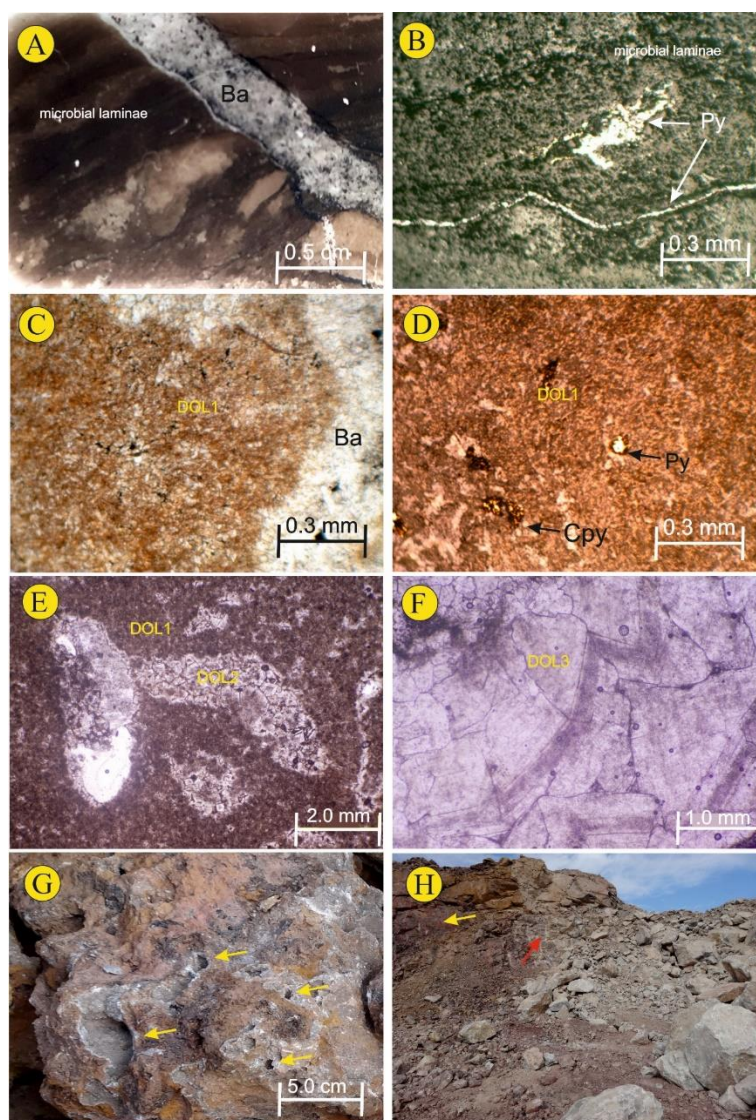
<sup>۴</sup> - Syntaxial overgrowth

<sup>۵</sup> - Drusy

۱ - Isopachous rim

۲ - Blocky

۳ - Granular



شکل ۳. فرایندهای دیازنزی در رخساره‌های کربناتی سازندهای مورد مطالعه. (A) شکستگی درون زمینه سنگ رخ داده و توسط سیمان باریتی پر شده است (سازند تفت نور عبوری PPL). (B) فرایند انحلال صورت گرفته در لامینه میکربیتی و زمینه سنگ که توسط پیریت پر شده است (سازند تفت نور بازتابی PPL). (C) دولومیتی شدن و تشکیل دولومیت ریز بلور در زمینه سنگ، در قسمت راست مقطع دولومیت توسط باریت جانشین شده است (سازند تفت نور عبوری PPL). (D) جانشینی پیریت و کالکوپیریت درون زمینه دولومیتی (سازند تفت نور بازتابی PPL). (E) نمونه‌ای از رسوبات لاگون سازند تفت، نشان‌دهنده دو نسل از دولومیتی شدن. زمینه سنگ از دولومیت ریز دانه نسل اول تشکیل شده است درون زمینه قالب اوربیتولین توسط دولومیت‌های خودشکل نسل بعدی جانشین شده است. (F) دولومیت زین‌اسبی در سازند آبکوه. (G) نمونه دستی حاوی حفرات انحلالی ایجاد شده در دولومیت و تشکیل کانسار اکسیدی در آن‌ها (سازند آبکوه، معدن کالامین). (H) فرایند اکسیداسیون در سازند آبکوه که در آن کانی‌های ثانویه مالاکیت (فلش قرمز)، اسمیت‌سونیت (فلش زرد) و همتایت تشکیل شده است. (Py = پیریت، Cpy = کالکوپیریت، Ba = باریت، DOL = دولومیت).

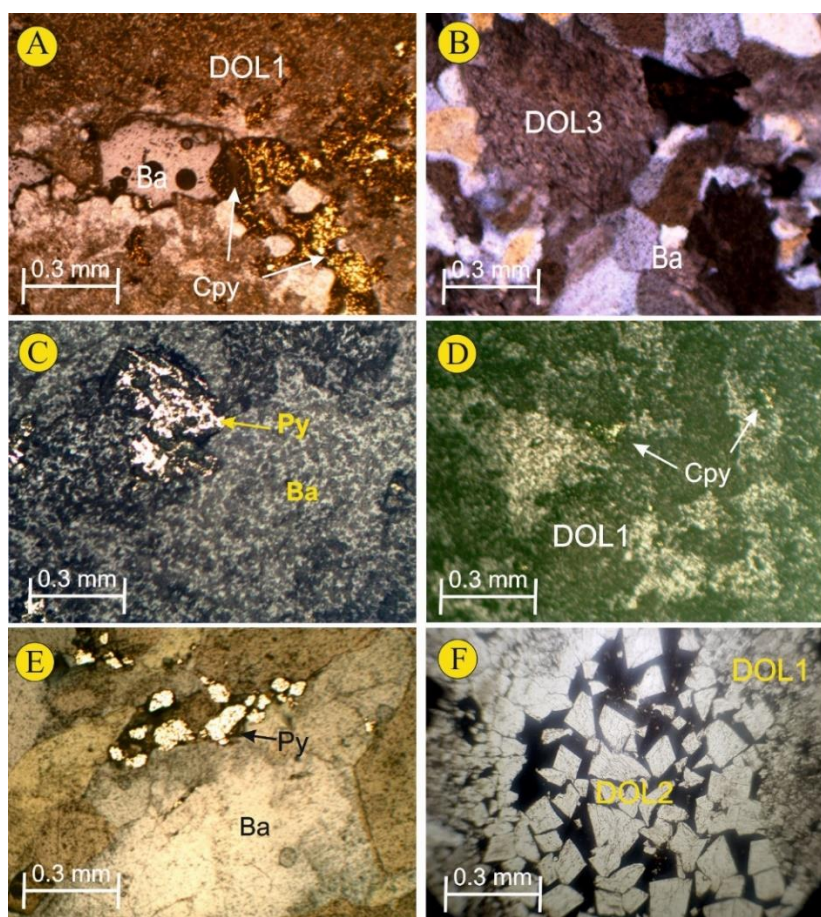
اصلی آن (زمینه، سیمان و آلوکم‌ها) را تحت تاثیر قرار داده است حفرات ناشی از انحلال در مراحل بعد توسط کانی‌های سولفیدی و سولفات‌ی (باریت) و یا دولومیت پر شده‌اند (شکل B۳).

**دولومیتی شدن:** فرایند دولومیتی شدن از فرایندهای اصلی دیازنتیکی و تشکیل کانسار در سازندهای مورد مطالعه در معدن مهدی‌آباد است. دولومیتی شدن در سازند تفت و سازند آبکوه در واحدهای کربناتی به صورت

**انحلال:** مهم‌ترین و فراوان‌ترین فرایند موثر بر رسوبات سازندهای مورد مطالعه، انحلال است. در نمونه‌های مورد مطالعه، فرایند انحلال هم در مقیاس میکروسکوپی و هم در مقیاس میکروسکوپی به فراوانی مشاهده می‌شود (شکل G۳) و علاوه بر ریزرخساره‌های دانه‌پشتیبان، ریزرخساره‌های دانه‌ریز را نیز تحت تاثیر قرار داده است. انحلال در زمینه سنگ اتفاق افتاده است. در بعضی موارد انحلال به بخش خاصی از سنگ محدود نشده و تمام اجزای

شکستگی‌ها و در حفرات همراه با تشکیل کانسار مشاهده می‌شود (شکل E۳). دولومیت نسل دوم در محل حفرات، شکستگی‌ها و نیز به صورت جانشینی در سیمان‌های کربناتی دیده می‌شود (شکل F۴). دولومیت‌های نسل سوم در توالی مورد مطالعه دولومیت‌های درشت‌بلور زین‌اسبی هستند که از سیالات گرمایی به وجود آمده‌اند (شکل F۳) و گاه این دولومیت‌ها به صورت جانشینی در درون بلورهای کانسار تشکیل شده رشد می‌نمایند (شکل B۴). این دولومیت‌ها در زون کانه‌زایی از فراوانی بیشتری برخوردار هستند و همراه با حجم اصلی کانسار سرب و روی مشاهده می‌شوند.

کامل یا فراگیر<sup>۱</sup> اتفاق افتاده و تمامی اجزای سنگ را در بر گرفته است (شکل C, D۳) در این سازندها سه نسل از دولومیت شامل دولومیت‌های نسل اول<sup>۲</sup>، نسل دوم<sup>۳</sup> و نسل سوم<sup>۴</sup> تشکیل شده است. دولومیت‌های نسل اول به صورت ریزبلور و بی‌شکل هستند که زمینه سنگ را تشکیل داده‌اند و به صورت فراگیر در آن حضور دارند. دولومیت‌های نسل دوم دولومیت‌های ریز تا متوسط بلور خودشکل و نیمه خودشکل هستند که بعد از دولومیت نسل اول به وجود آمده‌اند این دولومیت‌ها گاه به صورت بخشی<sup>۵</sup> و انتخابی اجزاء مشخصی از سنگ را تحت تاثیر قرار داده و گاه بصورت بلورهای لوزی شکل، در



شکل ۴. فرایندهای دیانرژی در رخساره‌های کربناتی سازندهای مورد مطالعه. (A) رشد باریت و کالکوپیریت درون حفره ایجاد شده در دولومیت (سازند تفت، نور بازتابی PPL). (B) رشد دولومیت در داخل بلور باریت به صورت ثانویه (سازند تفت، نور بازتابی XPL). (C) جانشینی پیریت درون بلور درشت باریت که در مرحله مزوزنز رخ داده است حاشیه واکنشی باریت مشخص کننده فرایند جانشینی می‌باشد (سازند تفت، نور بازتابی PPL). (D) جانشینی کالوپیریت درون بلورهای دولومیت (سازند تفت، نور بازتابی PPL). (E) تشکیل پیریت درون باریت (سازند تفت، نور بازتابی PPL). (F) رشد بلورهای خودشکل دولومیت درون حفره. در این مقطع دو نسل از دولومیت قابل مشاهده است (سازند آبکوه، نور عبوری PPL). (Py = پیریت، Cpy = کالکوپیریت، Ba = باریت، DOL = دولومیت)

<sup>۴</sup> - DOL3

<sup>۵</sup> - Partial

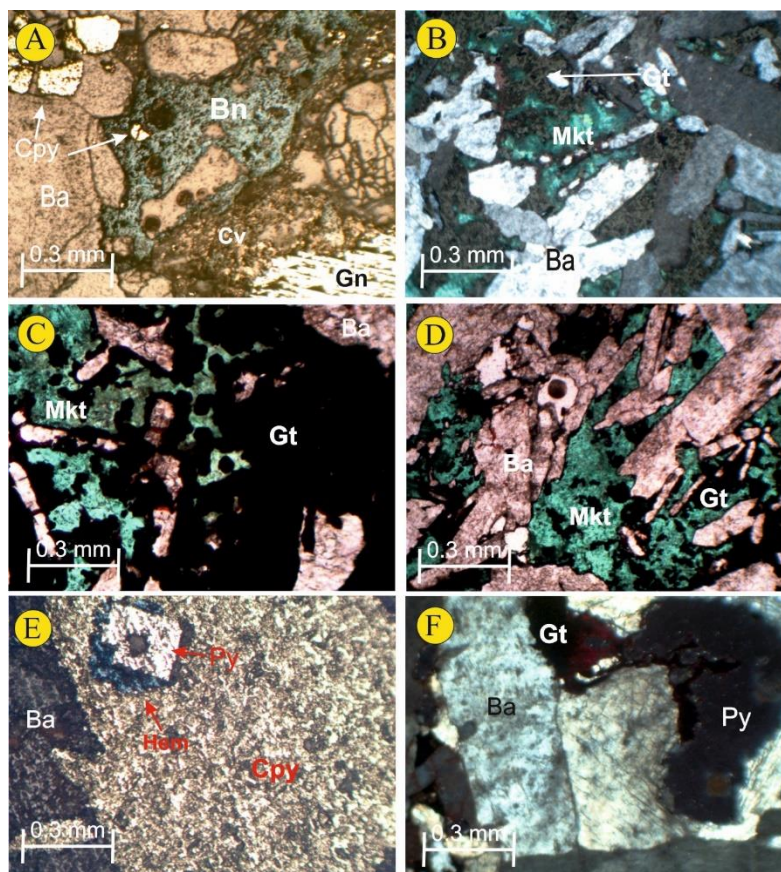
<sup>۱</sup> - Pervasive

<sup>۲</sup> - DOL1

<sup>۳</sup> - DOL2

توسط کانی‌های سولفیدی نسل دوم به جای کانی‌های سولفیدی اولیه شکل گرفته است. در مرحله تلوژنز، کانسار غالب جانشینی‌ها، جانشینی گالن و اسفالریت به جای دولومیت، جانشینی پیریت به جای کالکوپیریت (شکل E۵)، کولیت به جای کالکوپیریت اولیه در سازند آبکوه (شکل A۵) و در مرحله اکسیداسیون، جانشینی اسمیت‌سونیت و سروسیت به جای اسفالریت و گالن (شکل H۳)، جانشینی بورنیت و نیز مالاکیت و گوتیت به جای کالکوپیریت (شکل B، C، D۵)، جانشینی هماتیت به جای پیریت (شکل E۵) و جانشینی گوتیت به جای پیریت (شکل F۵) بوده است.

جانشینی: جانشینی از جمله فرایندهای شاخص در کانسار مهدی‌آباد است. وجود بافت جانشینی در بخش وسیعی از کانسار مهدی‌آباد قلیل مقایسه با حجم جانشینی سولفیدی در کانسار لیشن<sup>۱</sup> و گالموی<sup>۲</sup> در حوضه ایرلندی می‌باشد (ویلکینسون، ۲۰۱۱). جانشینی پیریت توسط گالن، اسفالریت، کالکوپیریت و اکسیدهای آهن در کانسار سولفیدی مهدی‌آباد در سازند تفت عمومیت دارد. فرایند جانشینی در مراحل مختلف تشکیل کانسار از مرحله ائوژنز تا تلوژنز صورت پذیرفته است. در مراحل اولیه دیانژنز جانشینی عمدتاً توسط کانی‌های سولفیدی درون دولومیت‌ها و باریت‌ها صورت پذیرفته است (شکل E۴، C، D). در مراحل بعدی این جانشینی



شکل ۵. A- تصویر میکروسکوپی حاوی گالن و کالکوپیریت که همراه با باریت رشد کرده‌اند. کالکوپیریت در مرحله تلوژنز اکسید شده و به کولیت و بورنیت تبدیل شده است (سازند آبکوه، نور بازتابی PPL). B- جانشینی کالکوپیریت درون باریت که در مرحله بعدی کالکوپیریت تبدیل به مالاکیت و گوتیت شده است (سازند تفت، نور بازتابی XPL). C- جانشینی گوتیت و مالاکیت به جای کالکوپیریت (سازند تفت، نور بازتابی XPL). D- مقطع میکروسکوپی حاوی باریت و کالکوپیریت به صورت اولیه بوده است که کالکوپیریت بر اثر اکسیداسیون به گوتیت و مالاکیت تبدیل شده است (سازند تفت، نور بازتابی XPL). E- مقطع میکروسکوپی حاوی باریت و کالکوپیریت اولیه که به صورت جانشینی پیریت درون کالکوپیریت تشکیل شده و در فرایند اکسیداسیون تبدیل به هماتیت شده است (سازند آبکوه، نور بازتابی XPL). F- مقطع میکروسکوپی حاوی باریت و پیریت اولیه که در فرایند تلوژنز و اکسیداسیون پیریت به گوتیت تبدیل شده است (سازند آبکوه، نور بازتابی XPL). (Py = پیریت، Cpy = کالکوپیریت، Ba = باریت، Bn = بورنیت، Cv = کولیت، Gn = گالن، Gt = گوتیت، Mkt = مالاکیت، Hem = هماتیت)

<sup>2</sup> - Galmoy

<sup>1</sup> - Lisheen

## تفسیر

## توالی پاراژنتیکی سنگ‌های کربناتی در سازندهای تفت و آبکوه

بر اساس مطالعات پتروگرافی و بررسی تقدم و تاخر فرایندهای دیاژنتیکی توالی پاراژنتیکی سنگ‌های کربناتی سازند تفت و آبکوه رسم شده است (شکل ۶). این فرایندهای دیاژنتیکی در سه مرحله ایجاد شده‌اند. در مرحله انورژ که در محیط‌های دریایی و متئوریک به وقوع پیوسته فرایندهای میکریتی شدن، تشکیل سیمان حاشیه هم‌ضخامت، نئومورفیسیم، انحلال و آغاز تراکم فیزیکی رسوبات را تحت تاثیر قرار داده است. در مرحله مزوژنز در شرایط تدفینی کم‌عمق تا عمیق، تشکیل سیمان بلوکی،

رورشدی هم‌محور، دولومیتی شدن، برشی شدن، پیریتی شدن، جانیشینی کانه سولفیدی، ادامه تراکم فیزیکی و نیز آغاز تراکم شیمیایی انجام شده‌اند. در آخرین مرحله (تلوژنز) و طی بالآمدگی رسوبات، گسترش شکستگی‌ها، اکسیداسیون کانسارهای سولفیدی، انحلال، هماتیته شدن، دولومیتی شدن و تشکیل سیمان‌های پرکننده رگه در داخل شکستگی‌ها انجام شده است. با توجه به اینکه فرایندهای دیاژنتیکی دریایی و دفن کم‌عمق تا عمیق گستردگی بیشتری نسبت به سایر فرایندها دارند، محیط‌های دریایی و تدفینی به عنوان محیط اصلی دیاژنز برای رسوبات سازندهای مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود و این رسوبات در اثر بالآمدگی در محیط متئوریک قرار می‌گیرند.

STAGE		EOGENESIS	MESOGENESIS	TELOGENESIS
		EARLY → LATE		
Diagenetic Processes	Mechanical	-----		
	Chemical	-----		
Compaction	Micritization	-----		
	Cementation	Fibrous	-----	
Granular		-----		
Blocky			-----	
Drusy		-----	-----	
Overgrowth		-----	-----	
Dolomitization	Late	-----		
Brecciation		-----	-----	
Fracturing & vein filling			-----	-----
Dissolution		-----		-----
Replacement		-----	-----	-----
Neomorphism		-----	-----	
Mineralization			-----	-----

شکل ۶. توالی پاراژنتیکی رسوبات کربناتی سازندهای تفت و آبکوه در معدن مهدی آباد

## نقش دیاژنز در تشکیل کانسار

رسوبات کربناتی سازندهای تفت و آبکوه در یک محیط کم‌عمق از نوع رمپ نهشته شده‌اند (صفایی و همکاران، ۲۰۲۰). در معدن مهدی‌آباد این رسوبات میزبان کانسار سرب، روی و باریت است. فرایندهای دیاژنتیک در این معدن از زمان ته‌نشینی رسوبات شروع و عامل تشکیل کانسار بوده‌اند. حضور منابع آذری‌ن در حوضه‌های پشت‌کمانی

(مانند حوضه جنوب یزد و تشکیل گرانیت شیرکوه) تامین کننده گرمای مورد نیاز برای حرکت سیالات است. این گرما می‌تواند منجر به تسریع گردش سیالات در توالی رسوبی و غنی‌شدگی سیال از فلزات گردد (گودفلو و لیدان، ۲۰۰۷). در بسیاری از کانسارهای سرب و روی با میزبان رسوبی گسترش دگرسانی‌های گرمایی در کانه‌زایی نقش مهمی ایفا می‌نماید (دیویس و اسمیت، ۲۰۰۶؛ ویلکینسون،



درجه سانتی‌گراد) و شوری پایین (در حدود ۹ درصد نمک طعام) به دست آمد همچنین این مطالعات نشان داد منشا کربنات از آب اقیانوس‌های زمان کرتاسه بوده است (مغفوری و همکاران، ۲۰۲۱). چنین دما و شوری مناسب جهت تشکیل دولومیت در سنگ میزبان کربناتی است (دوران و همکاران، ۲۰۲۱؛ ویلکینسون، ۲۰۱۴). در کانسارهای اپی‌ژنتیک که مدت‌ها بعد از سنگ‌شدگی تشکیل می‌گردند فرایندهای واکنش با سیالات گرمایی معمولاً حفرات باز، بافت نواری و کانسارهای گرمایی را تشکیل می‌دهد اما در کانسارهایی که سیالات گرمایی با رسوبات سخت نشده واکنش می‌دهند فرایندهای عمده دیاژنتیک شامل جانیشینی، تغییر حجم رسوبات و فشردگی می‌باشد (ویلکینسون و همکاران، ۲۰۱۱). وجود گسل‌های بزرگ و ساختاری مانند گسل نرمال تپه‌سیاه در مجاورت کانسار مهدی‌آباد که هم در زمان رسوبگذاری فعالیت داشته و باعث تغییر شرایط رسوبگذاری و نرخ تامین فضای رسوبگذاری شده است (به نحوی که در بُرش A که نزدیک به گسل است با تشکیل گرابن عمق رسوبگذاری بیشتر از بُرش B بوده است) و هم در زمان پس از رسوبگذاری نقش تامین کننده سیالات کانه‌ساز را داشته است، منابع لازم جهت تشکیل دولومیت و کانه‌زایی سرب، روی و باریت را در محدوده کانسار فراهم نموده است. دولومیت‌های تشکیل شده بستر مناسب برای جانیشینی فلزات محلول در سیالات را ایجاد کرده و منجر به تشکیل کانسار در آن‌ها می‌شوند (شکل ۷). مشابه چنین فرایندی در کانسارهای لیشن<sup>۴</sup> و استون‌پارک<sup>۵</sup> در حوضه ایرلندی رخ داده است (هیتزمن و همکاران، ۲۰۰۲؛ کر، ۲۰۱۳، الیوت و همکاران، ۲۰۱۹) شواهد پتروگرافی مشاهده شده در این مطالعه وجود حاشیه‌های واکنشی بین دولومیت میزبان و کانسارهای سولفیدی و سولفات‌ی (باریت) را تایید می‌نماید. بر اساس این مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت فرایند اصلی دیاژنزی در تشکیل کانسار

(۲۰۱۴). شواهدی از حضور این سیالات در کانسار مهدی‌آباد را می‌توان با وجود برش‌های ریزشی و دولومیت‌های گرمایی اثبات نمود. علت اصلی تشکیل برش‌های ریزشی در کربنات‌های سازندهای تفت و آبکوه حضور این سیالات است. تخلخل به وجود آمده در فرایند دولومیتی شدن به دلیل اثر سیالات گرمایی بر کربنات‌های میزبان، باعث ریزش رسوبات و تشکیل برش شده است. مجرای اصلی این سیالات گسل تپه‌سیاه است که سیالات گرم گرمایی را به رسوبات رسانیده و در مجاورت آن بیشترین کانه‌زایی به وقوع پیوسته است. مدلسازی سیالات تشکیل دهنده کانسارهای سرب، روی و باریت مشخص نمود که سیالات بافیری که از اختلاط با کربنات‌ها به وجود می‌آیند یک عامل حیاتی برای تشکیل سرب، روی و باریت بعد از رسوبگذاری در سنگ‌های کربناتی هستند (لی و همکاران، ۲۰۲۱). سیالات گرمایی که بر اثر گسل نرمال تپه‌سیاه در حوضه پشت‌کمانی جنوب یزد به رسوبات کربناتی معدن مهدی‌آباد رسیده‌اند با تاثیر بر روی کربنات‌های ریزبلور و میکریستی که در محیط لاگون تشکیل شده بودند باعث تشکیل دولومیت در مقیاس وسیع در سنگ میزبان در مرحله مزوژنز شدند. فرایندهای دیاژنتیکی و گرمایی از مهم‌ترین عوامل دولومیتی شدن در حوضه‌های رسوبی-گرمایی محسوب می‌شود (بریتوییت و ریزی، ۱۹۹۷؛ زنت‌مایر، ۲۰۱۱؛ گومز-ریواز، ۲۰۱۴) دولومیت‌های گرمایی عمدتاً در ذخایر نوع سدکس<sup>۱</sup> (تورنر، ۱۹۹۰؛ رجبی و همکاران، ۲۰۱۲ الف، ۲۰۱۵)، نوع ایرلندی<sup>۲</sup> (هیتزمن و همکاران، ۲۰۰۲؛ ویلکینسون، ۲۰۰۳؛ ویلکینسون و همکاران، ۲۰۰۵) و نوع دره می‌سی‌سی‌پی<sup>۳</sup> (رداد و بوهل، ۲۰۱۶) دیده می‌شوند. دولومیتی شدن می‌تواند در اعماق کم رخ دهد و توسط سیالات با دما و فشارهای بیشتر از سنگ میزبان ایجاد شود (دیویس و اسمیت، ۲۰۰۶). با توجه به مطالعاتی که بر روی میانبارهای سیال در معدن مهدی‌آباد انجام شده است دمای تشکیل کانسار بالا (در حدود ۱۹۰

<sup>۴</sup> - Lisheen

<sup>۵</sup> - Stonepark

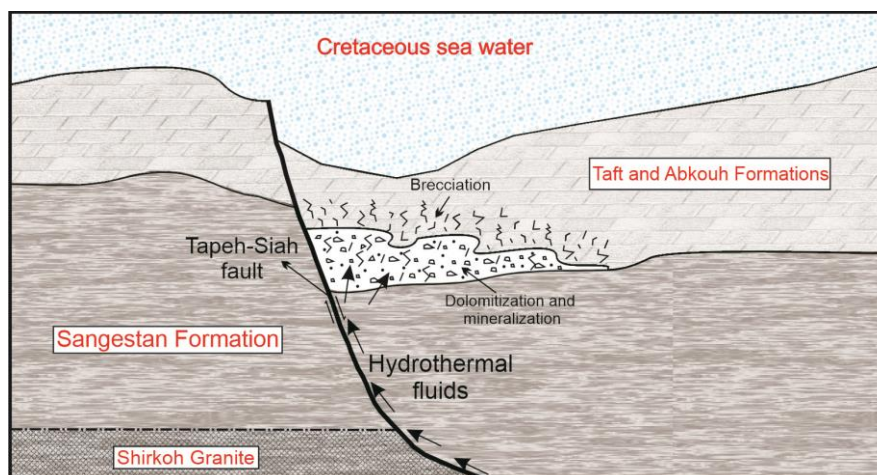
<sup>۱</sup> - SEDEX

<sup>۲</sup> - Irish

<sup>۳</sup> - MVT

اسمیت‌سونیت و هیدروزنگسیت بر اثر این فعل و انفعالات تشکیل می‌گردند (رایچرت و بورگ، ۲۰۰۸). در خصوص تشکیل کانی‌های اکسیدی مس در شرایط سوپرژن می‌توان گفت، ابتدا کالکوپیریت به بورنیت و سپس هر دو این کانی‌ها به کوولیت و کالکوسیت تبدیل می‌شوند. با افزایش شدت هوازدگی و از دست رفتن سولفید، این کانی‌ها به کوپریت، مالاکیت، آزوریت و اکسیدهای آهن تبدیل می‌شوند (ژاو و همکاران، ۲۰۱۴). مهم‌ترین کانی‌های غیرسولفیدی کانسار مهدی‌آباد شامل همی‌مورفیت، اسمیت‌سونیت، هیدروزنگسیت و سروسیت هستند و مالاکیت به صورت فرعی وجود دارد. این شواهد به وضوح در مقاطع حاصل از رخنمون و مغزه‌های حفاری قابل مشاهده است و عمدتاً کانی‌های اکسیدی به صورت کامل یا بخشی جانشین کانی‌های سولفیدی اولیه شده‌اند. فرایندهای اکسیداسیون در کانسار مهدی‌آباد باعث شده است این کانسار به عنوان یکی از بزرگ‌ترین ذخایر غیرسولفیدی سرب و روی در ایران و جهان شناخته شود (رایچرت، ۲۰۰۷؛ رجبی و همکاران، ۲۰۱۲).

مهدی‌آباد دولومیتی شدن گسترده و جانشینی فلزات در دولومیت‌ها بوده است و کانسار سرب، روی و باریت مهدی‌آباد طی فرایند جانشینی بعد از رسوبگذاری تحت فازهای مختلف در طی مزوژنز و تلوژنز تشکیل شده است. پس از تشکیل کانسار سولفیدی و جانشینی در سنگ میزبان در اثر فرایند تلوژنز و در معرض قرار گرفتن رسوبات در محیط متئوریک، با اکسید شدن کانه‌های سولفیدی و بخصوص پیریت محلول‌های اسیدی حاصل از آن باعث ایجاد حفرات انحلالی در کربنات‌ها شده است که بعداً توسط کانه‌های اکسیدی پر شده‌اند. فرایند اکسیداسیون در سولفیدهای اولیه شکل گرفته و کانسار اکسیدی در بخش‌هایی از سازند تفت و درسازند آبکوه (معدن کالامین) تشکیل شده است. واکنش اکسیژن با پیریت باعث تولید حجم بسیار زیادی از اسید سولفوریک می‌شود. سیالات اسیدی و اکسیدان حاصل از این واکنش باعث انحلال فلزات پایه مانند Cu, Cd, Pb, Zn و گردیده و واکنش این سیالات اسیدی با سنگ‌های کربناتی میزبان باعث افزایش pH شده و یون‌های فلزی آزاد با کربنات‌ها و بی‌کربنات‌های تولید شده ترکیب می‌شوند. کانی‌های اکسیدی همی‌مورفیت،



شکل ۷. مدل شماتیک از معدن مهدی‌آباد و عملکرد گسل نرمال تپه‌سیاه در انتقال سیالات و نقش آن‌ها در جانشینی دولومیت و کانسارهای فلزی در کربنات‌های سازندهای تفت و آبکوه.

## نتیجه‌گیری

سازندهای تفت و آبکوه در معدن مهدی‌آباد به طور عمده از سنگ‌آهک و دولومیت تشکیل شده‌اند. فرایندهای دیاژنزی در این سازندها شامل سیمانی شدن، فشردگی فیزیکی و شیمیایی، برشی شدن، دولومیتی شدن، شکستگی و جانیشینی است. مطالعات سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که فرایندهای دیاژنتیکی موثر بر این رسوبات در سه مرحله صورت گرفته و در مراحل مزوژنز و تلوژنز کانسارهای رسوبی تشکیل شده‌اند. فراوانی سیمان‌های با فابریک تدفینی (بلوکی) و عدم وجود سیمان‌های با فابریک‌های متئوریک، فراوانی سیمان‌های آهن‌دار، وجود دولومیت‌های زین‌اسبی و با دیواره‌های مسطح و نبود فرایند کارستی شدن در رسوبات نشان می‌دهند که بخش مهمی از تغییرات دیاژنتیکی در محیط‌های تدفینی کم‌عمق تا عمیق رخ داده است. با توجه به مطالعات صورت پذیرفته در خصوص مکانیزم تشکیل کانسار سرب، روی و باریت معدن مهدی‌آباد مشخص گردید کانسار سولفیدی به صورت جانیشینی در دولومیت‌ها و کربنات‌های تحت تاثیر فرایند دولومیتی شدن ناحیه‌ای سازند تفت و آبکوه در مرحله مزوژنز تشکیل شده است و در مرحله تلوژنز پس از در معرض قرار گرفتن کانسار سولفیدی فرایند اکسیداسیون در آن انجام و منجر به تشکیل کانسار اکسیدی در بخش‌هایی از سازندهای تفت و سازند آبکوه شده است.

## تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از رساله دکتری نویسنده اول در دپارتمان زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد به کد طرح ۳۸۱۰۸ است. نویسندگان این مقاله از همکاری مجتمع سرب و روی مهدی‌آباد جهت نمونه‌برداری و حمایت‌های فیلد کمال تشکر را دارند. همچنین از آقایان دکتر عبدالرحمن رجیبی و دکتر سجاد مغفوری به جهت ارائه راهنمایی‌های مفید و سازنده صمیمانه قدردانی می‌گردد.

## منابع

سهندي، م. ر (۱۳۸۵) نقشه زون‌های ساختاری ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- حیاتی، س.، معانی‌جو، م.، طالع‌فاضل، ا.، محسنی، ح (۱۳۹۵) بررسی ارتباط دگرسانی دولومیتی‌شدن و رخداد کانه‌زایی در کانسار اپی‌ژنتیک آهن‌گران (جنوب خاور ملایر): شواهد کانی‌شناسی، ژئوشیمی و شیمی کانی‌ها. رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۴، شماره ۷، ص ۱-۱۷.
- طالع‌فاضل، ا (۱۳۹۷) پتروگرافی و ترکیب شیمیایی دولومیت‌ها در کانسار سرب و روی خان‌سرمه و ارتباط آن با رخداد کانه‌زایی سولفیدی در منطقه واقع در غرب اصفهان. رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۶، شماره ۱۱، ص ۶۵-۸۱.
- Braithwaite, C., and G. Rizzi (1997) The geometry and petrogenesis of hydrothermal dolomites at Navan, Ireland: *Sedimentology*, 44: 421-440.
- Choquette, P. W., and L. C. Pray (1970) Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates: *AAPG bulletin*, 54: 207-250.
- Davies, G. R., and L. B. Smith (2006) Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview: *AAPG bulletin*, 90: 1641-1690.
- Doran, A. L., S. P. Hollis, J. F. Menuge, S. J. Piercey, A. J. Boyce, S. Johnson, J. Güven, and O. Turner (2021) A Distal, High-grade Irish-type Orebody: Petrographic, Sulfur Isotope, and Sulfide Chemistry of the Island Pod Zn-Pb Orebody, Lisheen, Ireland: *Economic Geology*.
- Elliott, H. A., T. M. Gernon, S. Roberts, A. J. Boyce, and C. Hewson (2019) Diatremes act as fluid conduits for Zn-Pb mineralization in the SW Irish ore field: *Economic Geology*, 114: 117-125.
- Fürsich, F., M. Hautmann, B. Senowbari-Daryan, and K. Seyed-Emami (2005) The Upper Triassic Nayband and Darkuh formations of east-central Iran: Stratigraphy, facies patterns and biota of extensional basins on an accreted terrane: *Beringeria*, 35: 53-133.
- Gernon, T. M., S. Roberts, A. J. Boyce, C. Hewson, and H. Elliott (2019) Diatremes act as fluid conduits for Zn-Pb mineralization in the SW Irish Ore field.
- Gomez-Rivas, E., M. Corbella, J. Martín-Martín, S. Stafford, A. Teixell, P. Bons, A. Griera, and E. Cardellach (2014) Reactivity of dolomitizing fluids and Mg source evaluation of fault-controlled dolomitization at the Benicàssim outcrop analogue (Maestrat Basin, E Spain): *Marine and Petroleum Geology*, 55: 26-42.
- Goodfellow, W., and J. Lydon (2007) Sedimentary exhalative (SEDEX) 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*

- sedimentary-exhalative deposit, Posht-e-Badam Block, Central Iran: *International Geology Review*, 54: 1635-1648.
- Rajabi, A., E. Rastad, and C. Canet (2012b) Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn-Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration: *International Geology Review*, 54: 1649-1672.
- Rddad, L., and S. Bouhleb (2016) The Bou Dahar Jurassic carbonate-hosted Pb-Zn-Ba deposits (Oriental High Atlas, Morocco): Fluid-inclusion and C-O-S-Pb isotope studies: *Ore Geology Reviews*, 72: 1072-1087.
- Reichert, J (2007) A metallogenetic model for carbonate-hosted non-sulphide zinc deposits based on observations of Mehdi Abad and Irankuh, Central and Southwestern Iran: Unpublished Ph. D. thesis], Shillong, University of Martin Luther.
- Reichert, J., and G. Borg (2008) Numerical simulation and a geochemical model of supergene carbonate-hosted non-sulphide zinc deposits: *Ore Geology Reviews*, 33: 134-151.
- Safaei, M., A. Mahboubi, S. Modabberi, and S. R. Moussavi Harami (2020) Palaeoenvironment, sequence stratigraphy and palaeogeography of the Lower Cretaceous deposits of Mehdi Abad, Yazd Block, Central Iran: *Neues Jahrbuch fur Geologie und Palaontologie – Abhandlung*, 295: 61-89.
- Turner, R. J (1990) Jason stratiform Zn-Pb-barite deposit, Selwyn Basin, Canada (NTS 105-0-1): geological setting, hydrothermal facies and genesis: *Mineral deposits of the northern Canadian Cordillera. International Association On the Genesis of Ore Deposits, Field Trip*, 14: 137-175.
- Wilkinson, J., H. Crowther, and B. Coles (2011) Chemical mass transfer during hydrothermal alteration of carbonates: Controls of seafloor subsidence, sedimentation and Zn-Pb mineralization in the Irish Carboniferous: *Chemical Geology*, 289: 55-75.
- Wilkinson, J., S. Eyre, and A. Boyce (2005) Ore-forming processes in Irish-type carbonate-hosted Zn-Pb deposits: Evidence from mineralogy, chemistry, and isotopic composition of sulfides at the Lisheen mine: *Economic Geology*, 100: 63-86.
- Wilkinson, J. J (2003) On diagenesis, dolomitisation and mineralisation in the Irish Zn-Pb orefield: *Mineralium Deposita*, 38: 968-983.
- Wilkinson, J. J (2014) Sediment-Hosted Zinc-Lead Mineralization: Processes and Perspectives, *Treatise on Geochemistry 2nd Edition*.
- Wilmsen, M., F. T. Fürsich, and M. R. Majidifard (2015) An overview of the Cretaceous Division, Special Publication, 5: 163-183.
- Hardie, L. A. (1991) On the significance of evaporites: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 19:131-168.
- Hitzman, M., P. Redmond, and D. Beaty (2002) The carbonate-hosted Lisheen Zn-Pb-Ag deposit, County Tipperary, Ireland: *Economic Geology*, 97: 1627-1655.
- Kerr, N (2013) Geology of the Stonepark Zinc-Lead prospects, County Limerick, Ireland, Colorado School of Mines.
- Leach, D. L., D. C. Bradley, D. Huston, S. A. Pisarevsky, R. D. Taylor, and S. J. Gardoll (2010) Sediment-hosted lead-zinc deposits in Earth history: *Economic Geology*, 105: 593-625.
- Liu, W., S. C. Spinks, M. Glenn, C. MacRae, and M. A. Pearce (2021) How carbonate dissolution facilitates sediment-hosted Zn-Pb mineralization: *Geology*, 49: 1363-1368.
- Maghfouri, S., M. Hosseinzadeh, R. Rajabi, and A. Azimzadeh (2017) Facies analysis and stratigraphy position of carbonate-clastic hosted Zn-Pb-Ba mineralization horizons in the early cretaceous sedimentary sequence, Southern Yazd Basin: *Journal of Geoscience*, 26: 233-246.
- Maghfouri, S., M. R. Hosseinzadeh, A. Rajabi, and F. Choulet (2018) A review of major non-sulfide zinc deposits in Iran: *Geoscience Frontiers*, 9: 249-272.
- Maghfouri, S., M. R. Hosseinzadeh, D. R. Lentz, and F. Choulet (2020) Geological and geochemical constraints on the Farahabad vent-proximal sub-seafloor replacement SEDEX-type deposit, Southern Yazd basin, Iran: *Journal of Geochemical Exploration*, 209: 106436.
- Maghfouri, S., M. R. Hosseinzadeh, D. R. Lentz, H. A. Tajeddin, M. Movahednia, and A. Shariefi (2021) Nature of ore-forming fluids in the Mehdiabad world-class sub-seafloor replacement SEDEX-type Zn-Pb-Ba-(Cu-Ag) deposit, Iran; constraints from geochemistry, fluid inclusions, and OC-Sr isotopes: *Journal of Asian Earth Sciences*, 207: 2531-2555.
- Mohajjel, M., and C. Fergusson (2014) Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran: *International Geology Review*, 56: 263-287.
- Rajabi, A., C. Canet, E. Rastad, and P. Alfonso (2015) Basin evolution and stratigraphic correlation of sedimentary-exhalative Zn-Pb deposits of the Early Cambrian Zarigan-Chahmir Basin, Central Iran: *Ore Geology Reviews*, 64: 328-353.
- Rajabi, A., E. Rastad, P. Alfonso, and C. Canet (2012a) Geology, ore facies and sulphur isotopes of the Koushk vent-proximal

stratigraphy and facies development of the Yazd Block, western Central Iran: *Journal of Asian Earth Sciences*, 102: 73-91.

Young, L. E (2004) A geologic framework for mineralization in the western Brooks Range, Alaska: *Economic Geology*, 99: 1281-1306.

Zentmyer, R., P. Pufahl, N. James, and E. Hiatt (2011) Dolomitization on an evaporitic Paleoproterozoic ramp: widespread synsedimentary dolomite in the Denault Formation, Labrador Trough, Canada: *Sedimentary Geology*, 238: 116-131.

Zhao, J., Brugger, J., Ngothai, Y., & Pring, A (2014) The replacement of chalcopyrite by bornite under hydrothermal conditions. *American Mineralogist*, 99 (11-12): 2389-2397.