



بررسی عوامل کنترل کننده‌ی تشکیل کانی‌های سیلیس و پیریت در خرده‌های اسکلتی واحد ۲ سازند شیشتو (کربونیفر پیشین) واقع در حوض دوراه - جنوب شرقی طبس

محمد خانه باد*، رضا موسوی حرمی، اسداله محبوبی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله ۸۹/۹/۱۵، نسخه نهایی: ۹۰/۲/۱۴)

چکیده: بخش ۲ سازند شیشتو به سن کربونیفر پیشین در ناحیه‌ی مورد بررسی از یک توالی به سمت بالا کم عمق شونده تشکیل شده است. بیوکست پکستون‌های این رسوب‌ها اغلب دارای خرده‌های اسکلتی کرینوئید، براکیوپود، بریوزوآ، تریلوبیت، مرجان و مقداری فرامینیفر است. سنگ‌های کربناتی این سازند تحت تأثیر تاریخچه‌ی دیاژنتیکی پیچیده‌ای قرار گرفته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها، فرایند سیلیسی شدن و پیریتی شدن است. پیچیدگی سیلیسی شدن در این سنگ‌های آهکی بیشتر به خاطر سیلیسی شدن انتخابی جانداران مختلف است. از نظر ریخت‌شناسی، سیلیسی شدن خرده‌های اسکلتی این ناحیه بیشتر از نوع میکروکوارتز، کلسدونی و مقداری مگاکوارتز است. ارتباط مشاهده شده‌ی بین انواع خرده اسکلتی و نوع کوارتز جانشینی بیانگر آنست که ریزساخت خرده اسکلتی کنترل کننده‌ی نوع کوارتز جانشینی است. سیلیسی شدن خرده‌های اسکلتی این سازند در راستای غشاهای انحلالی نازک رخ داده است که در این حالت خرده کلسیتی انحلال یافته و سیلیس نهشته شده است. خرده‌های براکیوپود، مرجان و کرینوئید در این رسوب‌ها بیشترین حساسیت برای سیلیسی شدن را داشته‌اند. وجود ناخالصی‌هایی مانند منیزیم در ترکیب خرده‌های اسکلتی مانند براکیوپودها و کرینوئیدها از عوامل کنترل کننده‌ی حساسیت این اجزا به سیلیسی شدن است. پیریت دیاژنتیکی در این سنگ‌های آهکی به صورت بلورهای منفرد شکلدار دیده می‌شوند. این فرایند بعد از مرگ جاندار در طی دیاژنز تدفینی رخ می‌دهد. پیریتی شدن به شدت به شرایط احیایی و در دسترس بودن یون‌های Fe و S در محیط دیاژنتیکی تدفینی وابسته است.

واژه‌های کلیدی: سیلیسی شدن؛ پیریتی شدن؛ کانی‌شناسی اولیه؛ ریزساخت؛ خرده‌های فسیلی؛ سازند شیشتو؛ طبس.

مقدمه و زمین‌شناسی

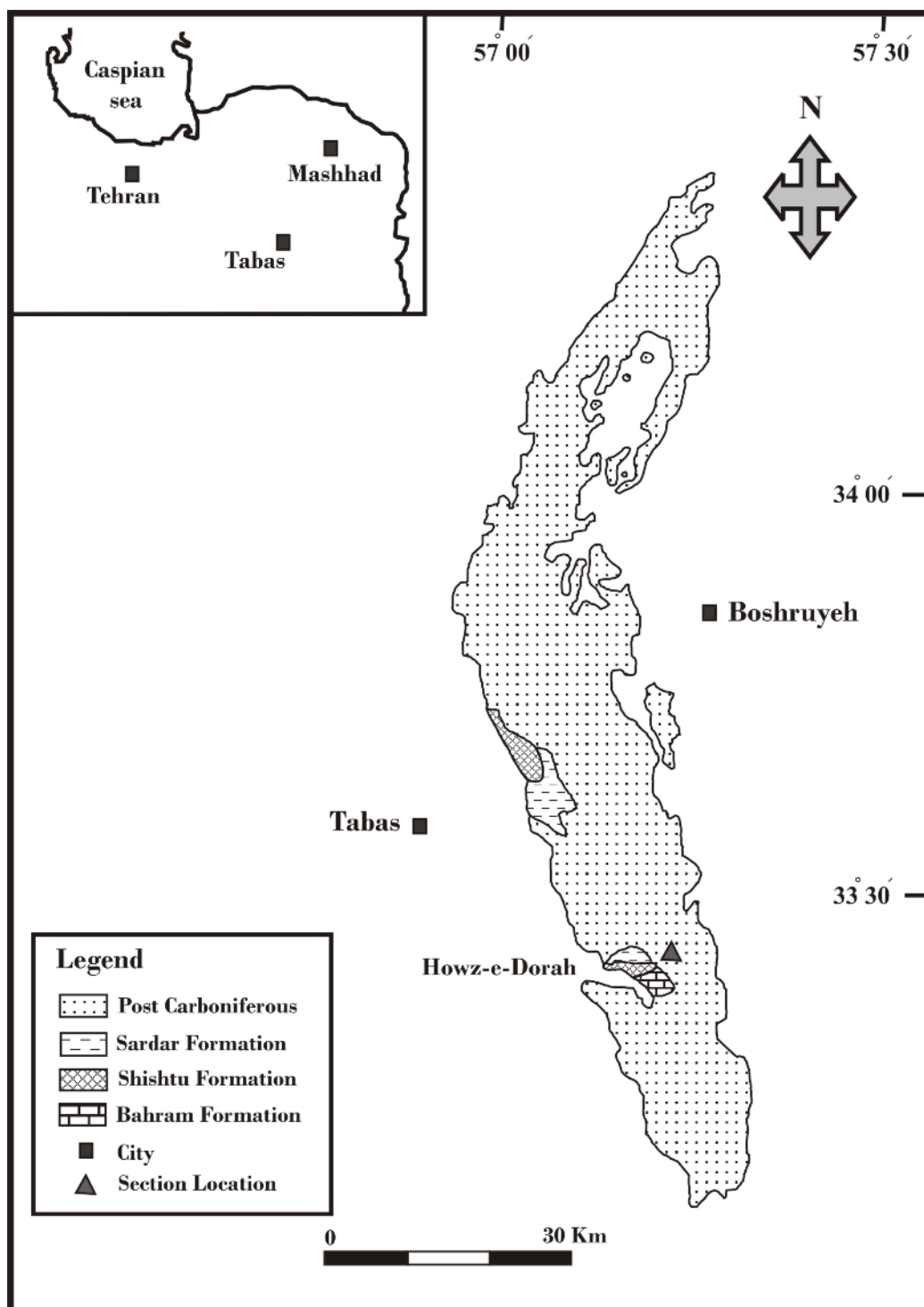
خرده‌های فسیلی سیلیسی شده و پیریتی شده در این پژوهش، در سنگ آهک‌های بخش ۲ سازند شیشتو به سن کربونیفر زیرین واقع شده‌اند. این بخش از سازند شیشتو دارای توالی به سمت بالا کم عمق شونده بوده و تحت شرایط معمولی دریایی در یک رمپ کربناته نهشته شده‌اند [۱]. سن سازند شیشتو ۲ تورنیزین پایانی تا ویزین آغازین است [۲]. برش الگوی سازند شیشتو برای اولین بار در ناحیه‌ی ازبک کوه معرفی شده است [۳]. این سازند جدا از برش الگو، برش مرجعی در ناحیه جنوب

شرقی طبس (ناحیه‌ی حوض دو راه، شکل ۱) دارد [۴]. در این ناحیه سازند شیشتو از دو بخش شیشتوی ۱ به سن دونین فوقانی و شیشتوی ۲ به سن کربونیفرپیشین تشکیل شده است. این دو بخش به وسیله‌ی افقی شیلی به نام افق موش از یکدیگر قابل تشخیص‌اند. در ناحیه‌ی حوض دوراه، شیشتوی ۱ دارای ضخامتی در حدود ۳۲۰ متر است و در نزدیکی رأس آن یک زون پر فسیل شیلی و ماسه سنگی همراه با سنگ آهک الییتی آهن‌دار به ضخامت ۲۸ متر دیده می‌شود (زون سفالوپود دار).

* نویسنده مسئول، تلفن-نمبر: ۸۷۹۷۲۷۵ (۰۵۱۱)، پست الکترونیکی: mkhanehbad@ferdowsi.um.ac.ir

بخشی از سرزمین ساختاری ایران مرکزی است. با نگاه به تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های زمین‌شناسی ناحیه، مشخص می‌شود که مقطع مورد بررسی در بلوک طبس قرار گرفته است.

روی این واحد، ۲۵ متر شیل آهکی تیره با فسیل‌های فراوان یا همان افق موش وجود دارد. ضخامت شیشتوی ۲ در ناحیه‌ی حوض دوراه، در حدود ۲۲۰ متر است که از تناوب سنگ آهک خاکستری و شیل تشکیل شده است. گستره مورد بررسی



شکل ۱ موقعیت زمین‌شناسی ناحیه‌ی مورد بررسی.

شکل‌دار، به‌طور جزئی در حاشیه‌ی خرده‌های اسکلتی جانشین شده‌اند. اینکلوزیون‌هایی از خرده‌های فسیلی در تعدادی از کوارتزهای شکل‌دار مشاهده شدند، ولی شبی از ریزساخت خرده‌های اسکلتی بندرت حفظ شده است (شکل ۲ ث).

۲- **مگا کوارتز دانه‌ای (Granular Mega quartz):** این نوع کوارتز به ابعاد بزرگتر از ۲۰ میکرون و به شکل دانه‌ای، و بیشتر از مرکز خرده فسیلی به سمت حاشیه‌ی پوسته گسترش یافته‌اند (شکل‌های ۲ ث، ۵ ب). اغلب فاقد رنگ و به خاطر اینکه از نوع جانشینی هستند، میانبارهایی از خرده اسکلتی در بلورهای کوارتز مشاهده می‌شوند. در براکیوپودها میانبارها شامل قطعات فیبری از ریزساخت آن‌هاست.

۳- **کلسدونی (Chalcedony):** اغلب فاقد رنگ، حاشیه‌هایی قهوه‌ای و دارای نوارهایی از میانبارهاست که گاهی درون این فابریک گسترش یافته‌اند. دو نوع جانشینی در خرده‌های اسکلتی به وسیله‌ی کلسدونی مشاهده می‌شود.

الف) جانشینی اسفرولیتی که رشته‌های کلسدونی مستقل از ریزساخت خرده اسکلتی جهت یابی شده‌اند. مثلاً در خرده‌های براکیوپودی، ریزساخت منشوری به وسیله‌ی گروهی از رشته‌های کلسدونی جانشین شده‌اند که به‌طور مایل نسبت به محور منشور جهت‌یابی شده‌اند (شکل ۲ ث).

ب) جانشینی که با ریزساخت خرده اسکلتی کنترل شده و رشته‌هایی از کلسدونی بیشتر در راستای ریزساخت خرده اسکلتی جهت یابی شده‌اند. مثلاً رشته‌هایی از کلسدونی در خرده‌های بازوپایان به طور ترجیحی موازی با فیبرهای خرده‌های اسکلتی جهت‌یابی شده باشند.

هر دوی این جانشینی‌ها (اسفرولیتی و آن‌هایی که با ریزساخت کنترل می‌شوند) از مرکز شروع شده و به حاشیه منتهی می‌شوند (شکل‌های ۲ ث، ۳ پ).

۴- **کوارتز ریزبلورین (Microcrystalline quartz):** این نوع کوارتز فاقد رنگ بوده مگر اینکه دارای میانبارهایی باشند که در این حالت پراکندگی لکه‌ای از خود نشان می‌دهند. بلورهای کوارتز ریزبلور نیمه هم بعد بوده و قطر آن‌ها کمتر از ۲۰ میکرون است (شکل ۲ ب). کوارتزهای ریزبلور مهم‌ترین نوع کوارتز در گرکه‌های چرتی منطقه بوده که جانشین ماتریکس و دانه‌ها شده‌اند.

به‌طور کلی در رسوب‌های کربناتی دریایی نواحی کم عمق و عمیق فرایند سیلیسی شدن متداول است [۵-۸]. در سنگ‌های کربناتی منطقه‌ی مورد بررسی که اغلب دارای رخساره پکستونی است، تعدادی از پوسته‌های فسیلی به طور انتخابی سیلیسی شده در حالی که ماتریکس سنگ‌ها بدون تاثیر باقی مانده‌اند.

گرچه خرده‌های فسیلی بی‌مهرگان سیلیسی شده در بعضی از سنگ‌های آهکی فراوان است، ولی سازوکار این فرایند به روشنی مشخص نشده است. در این پژوهش ریخت‌شناسی سیلیس جایگزین شده، و ارتباط آن با کانی‌شناسی و ریزساخت اولیه خرده‌های فسیلی که از فاکتورهای اصلی کنترل کننده‌ی سیلیسی شدن انتخابی‌اند مورد بررسی قرار گرفته است. در این کار پژوهشی نخست انواع بافت سیلیسی شدن در انواع خرده‌های اسکلتی مشخص شده است و در مرحله‌ی دوم ارتباط هر بافت با کانی‌شناسی و ریزساخت اولیه‌ی خرده اسکلتی مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله‌ی سوم عوامل کنترل کننده‌ی جانشینی انتخابی این خرده‌های فسیلی مشخص و خاستگاه سیلیس و نیز فرایند پیریتی شدن نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه تاکنون مقالات بسیار کمی در مورد این پدیده‌های دیاژنتیکی منتشر شده، امید است که این بررسی بتواند کمکی به شناخت بهتر فرایند تشکیل سیلیس و پیریت در سنگ‌های کربناتی بنماید.

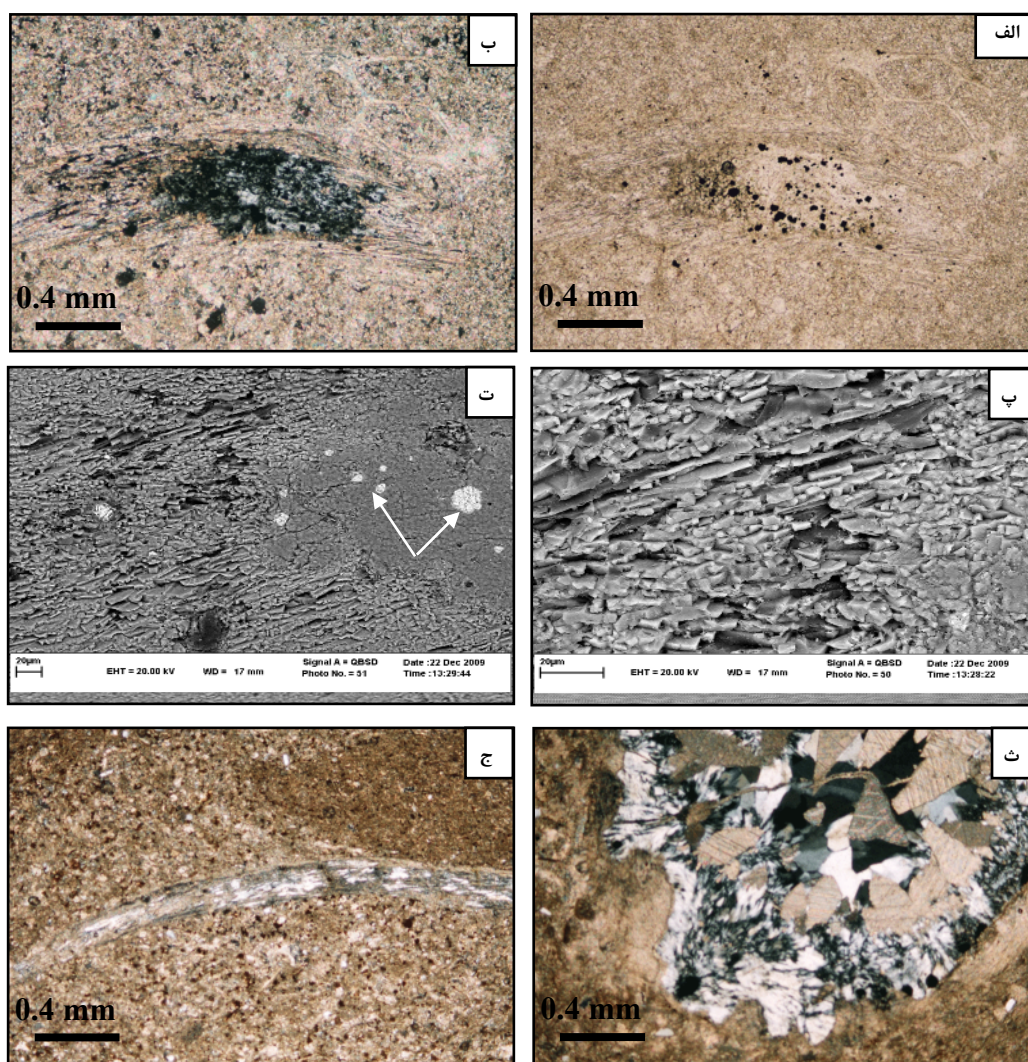
روش بررسی

در حدود ۹۵ نمونه‌ی سنگی از واحد ۲ سازند شیشو مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پس از بررسی سنگ‌نگاری، تعدادی از خرده‌های اسکلتی سیلیسی شده در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مجهز به EDX (مدل LEO 1450 VP) به‌منظور تعیین ماهیت جانشینی و ارتباط آن با ریزساخت و کانی‌شناسی خرده‌های اسکلتی بررسی شدند.

انواع کوارتز جانشینی در سنگ‌های آهکی منطقه‌ی مورد بررسی

چهار نوع کوارتز جانشینی از نظر اندازه و ریخت‌شناسی در خرده‌های اسکلتی منطقه مورد بررسی قابل تشخیص‌اند [۹].

۱- **کوارتزهای شکل‌دار (Euhedral quartz):** کوارتزهای



شکل ۲ الف) ریزساخت رشته‌ای در براکیوپود (PPL) که نقاط تیره رنگ کانی پیریت است. ب) تصویر الف در XPL که در آن فرآیند سیلیسی شدن را نشان می‌دهد. پ) تصویر SEM خرد براکیوپود که رشته‌ها و تخلخل‌های ریز بین آن‌ها به وضوح قابل مشاهده است. د) تصویر SEM قسمت‌های سیلیسی شده و نشده رشته‌های براکیوپود، نقاط روشن کانی پیریت و اطراف آن سیلیس است. ث) سیلیسی شدن به شکل کلسدونی و میکروکوارتز در حاشیه‌ی خرد براکیوپود و کوارتزهای دانه‌ای و شکلدار در مرکز (XPL). ج) سیلیسی شدن لامینه‌های براکیوپود (XPL).

عوامل کنترل کننده‌ی جانیشینی انتخابی

فرایند سیلیسی شدن انتخابی به این معنی است که اجزای خاصی از سنگ میزبان آهکی جایگزین شده و قسمت‌های دیگر دست نخورده باقی می‌مانند. گاهی هم این جانیشینی به صورت فراگیر تمام اجزای سنگ را تحت تاثیر قرار داده و باعث تشکیل ندول و یا فرم‌های عدسی شکل می‌شود [۶].

نوع سیلیسی شدن انتخابی ممکن است آنی و یا تاخیری باشد [۹]. نوع اول زمانی رخ می‌دهد که نرخ انحلال اجزای اسکلتی کلسیتی و نهشته شدن سیلیس تقریباً برابر بوده و هیچگونه حفره‌ای به وجود نیاید. این حالت جانیشینی، درون غشاهای نازک رخ می‌دهد و ممکن است از فابریک پیروی کند

(fabric selective) و یا تحت تاثیر فابریک نباشد (nonfabric selective). نوع تبعیت کننده از فابریک، جانیشینی تقلیدی (mimic replacement) [۱۰] یا جانیشینی انتخابی بافتی نیز نامیده می‌شود [۱۱]. سیلیسی شدن تاخیری زمانی رخ می‌دهد که سیلیس در یک فضای خالی حاصل از انحلال خرده‌های اسکلتی ته نشین شود [۹]. در این حالت نرخ انحلال کربنات بیشتر از نرخ نهشته شدن سیلیس بوده و یا اینکه خرده‌های اسکلتی به طور کامل قبل از نهشته شدن سیلیس بر اثر انحلال از بین رفته‌اند. خرده‌های براکیوپود در منطقه‌ی مورد بررسی اغلب فاقد این شواهد هستند و

آراگونیت و کلسیت با منیزیم بالا پایدارترند [۱۲] و به همین دلیل، بایستی براکیوپودها جانشینی کمتری از خود نشان دهند [۱۱]. در صورتی که در نمونه‌های مورد بررسی، این پوسته‌ها با شدت بالایی سیلیسی شده‌اند. وجود ناخالصی‌هایی مانند یون-های Mg^{2+} در ترکیب اغلب این خرده‌های اسکلتی یک عامل کنترل کننده‌ی حساسیت این اجزا به سیلیسی شدن است [۱۳]. در این حالت، عمل سیلیسی شدن در محل‌های که دارای ناخالصی یون منیزیم بوده بهتر رخ داده است [۱۴]. این سیلیسی شدن زیاد در پوسته‌های براکیوپود شاید به خاطر ریزساخت آن‌ها باشد که در ادامه به شرح آن می‌پردازیم.

۲- ریزساخت خرده‌های اسکلتی: خرده‌های اسکلتی دارای ریزساخت متفاوتی هستند که می‌تواند در فرایند سیلیسی شدن یک عامل موثر باشد [۱۴]. ریخت‌شناسی سیلیس جایگزین شده در خرده‌های اسکلتی تحت تاثیر نفوذپذیری ریزساخت اسکلتی است. به‌طور مثال تشکیل بلورهای شکل دار سیلیس درون خرده اسکلتی موقعی که نفوذپذیری و تخلخل ریزساخت بسیار بالاست رخ می‌دهد. بر این اساس، ریزساخت اسکلتی موجودات مهم‌تر از ضخامت پوسته یا کفه برای عمل سیلیسی شدن است و حتی در ریخت‌شناسی نوع کوارتز نیز موثر خواهد بود. به همین خاطر از نظر ریخت‌شناسی، سیلیسی شدن خرده‌های اسکلتی ناحیه‌ی مورد بررسی از نوع کلسدونی، میکروکوارتز و تا حدودی مگاکوارتز است.

میانبرهای کربناتی و طرح‌های سیلیسی ریزساختارهای اولیه آن‌ها نشان دهنده‌ی سیلیسی شدن آنی است. بقیه خرده‌های اسکلتی اغلب سیلیسی شدن انتخابی از هر دو حالت را نشان می‌دهند. از عوامل بسیار مهم این جانشینی انتخابی، کانی-شناسی اولیه و ریزساخت اولیه خرده‌های اسکلتی است که به صورت زیر و جداگانه بررسی شده‌اند.

۱- کانی شناسی اولیه خرده‌های اسکلتی: در مقاطع نازک منطقه مورد بررسی، خرده‌های اسکلتی براکیوپود، مرجان‌های روگوزا و تابولاتا، کرینوئید، بریوزوا، تریلوبیت، سفالوپود، گاستروپود و فرامینیفر وجود دارند. بر اساس بررسی‌های انجام شده، حساسیت به سیلیسی شدن خرده‌های اسکلتی این سازند در جدول ۱ ارائه شده است. درجه‌ی حساسیت این خرده‌های کربناتی براساس فراوانی نمونه‌های سیلیسی شده به نمونه‌های سیلیسی نشده برآورد شده است و نشان می‌دهد که کانی شناسی اولیه خرده‌های اسکلتی احتمالاً یکی از عوامل کنترل کننده‌ی فرایند سیلیسی شدن در ناحیه مورد بررسی بوده است. خرده‌های اسکلتی با ترکیب اولیه آراگونیتی (مانند گاستروپودها) بندرت سیلیسی شده‌اند در صورتی که خرده‌های اسکلتی با ترکیب کلسیت با منیزیم بالا (کرینوئیدها) به‌طور متوسط تا زیاد و خرده‌های اسکلتی با منیزیم کم مانند خرده-های براکیوپود به شدت سیلیسی شده‌اند. پوسته‌ی براکیوپود از کلسیت با منیزیم پایین (کمتر از ۴ درصد مول کربنات منیزیم) تشکیل شده‌اند [۱۲] و از نظر دیاژنتیکی در مقایسه با

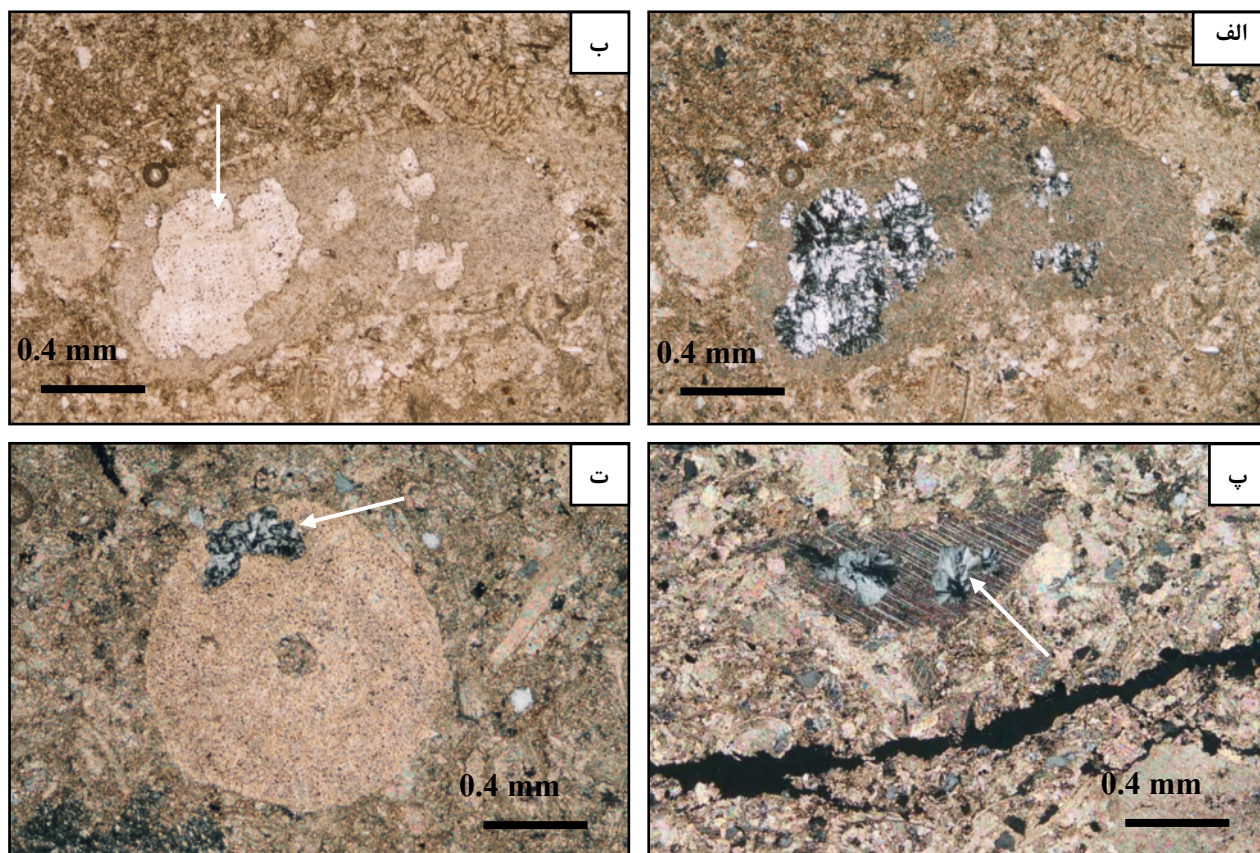
جدول ۱ رده‌بندی حساسیت خرده‌های اسکلتی به سیلیسی شدن در رسوب‌های کربونیفر زیرین ناحیه‌ی مورد بررسی براساس بررسی‌های مقاطع نازک.

براکیوپودهای فیبری، مرجانهای روگوزا و تابولاتا	
کاهش حساسیت به سیلیسی شدن ↓	براکیوپودهای پریسماتیک
	براکیوپودهای لامینار
	کرینوئیدها
	تریلوبیت‌ها
	دو کفه ایها
	فرامینیفرها
	گاستروپودها

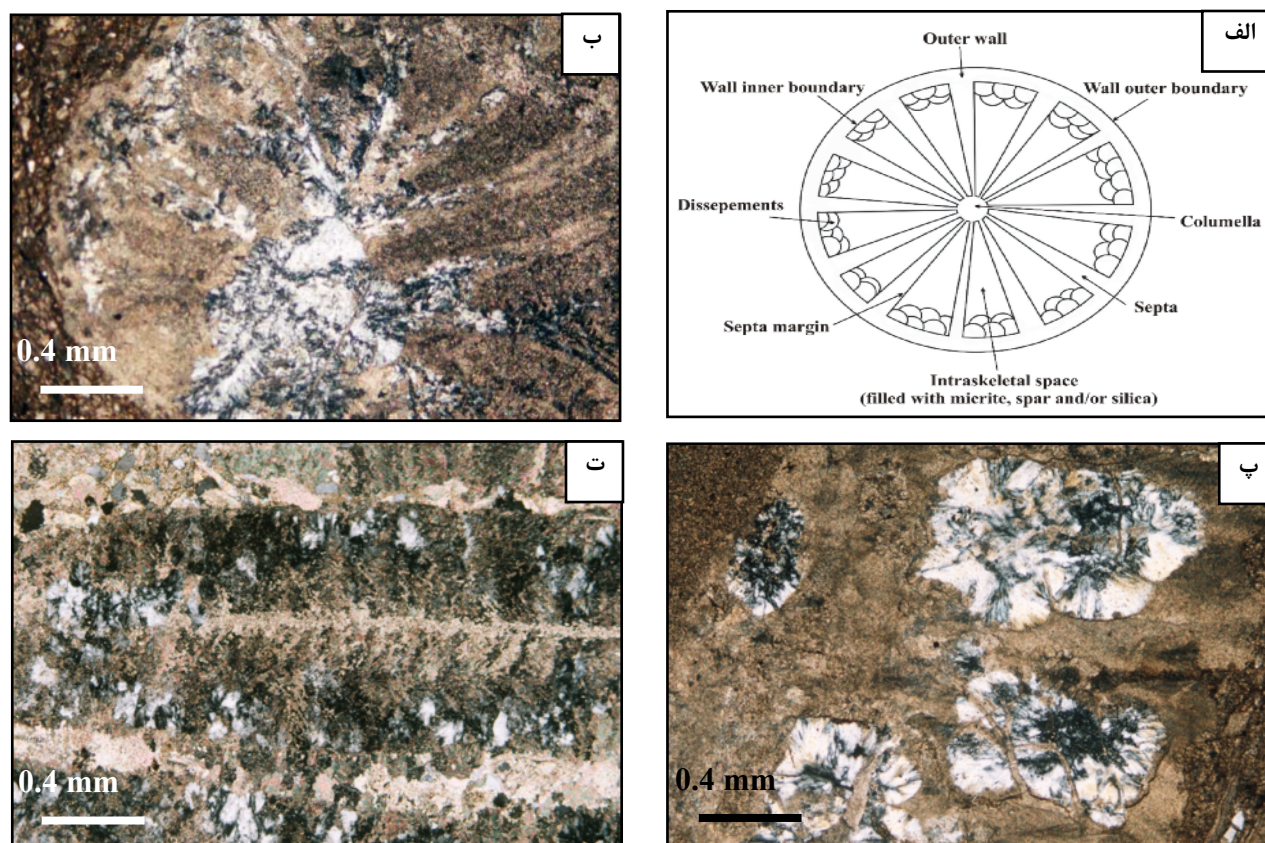
خرده‌های کرینوئیدی به صورت بلورهای منفرد جدا از هم دیده می‌شوند. فرایند سیلیسی شدن نیز در راستای سطوح ضعیف این خرده‌ها مشاهده می‌شوند (شکل های ۳ الف، ب، پ، ت).

اغلب دیاژنز اولیه و پیشرفته در برخی شرایط در مرجان-های روگوزا دیده شود. در اکثر موارد، ویژگی‌های اولیه پس از دفن موجود از بین می‌رود. مهمترین پدیده‌های دیاژنزی مشاهده شده در این مرجان‌های روگوزا سیلیسی شدن است. جایگزینی سطحی بیشتر بوسیله سیلیس، شکل و ریخت درونی ساختار را حفظ کرده در حالی که جایگزینی فراگیر ممکن است هر دو را از بین ببرد. خرده‌های مرجانی با این سن ترکیب کلسیتی کم منیزم داشته [۱۵] و عمل سیلیسی شدن آن‌ها اغلب در بخش‌هایی از دیواره و پرده‌ها که از سطوح ضعیف‌اند به خوبی مشاهده می‌شوند (شکل ۴ الف، ب، پ، ت).

خرده‌های براکیوپود دارای ریزساخت‌های رشته‌ای منشوری، منشوری و لایه‌ای هستند. در ریزساخت رشته‌ای فرایند سیلیسی شدن به خوبی دیده می‌شود. در براکیوپودهای موجود در مقاطع مورد بررسی، حالت برگواره‌ی بخش درونی دیواره برای سیلیسی شدن آماده‌اند (شکل های ۲ الف، ب، پ، ت، ث، ج). اختلاف در حساسیت پذیری به سیلیسی شدن در براکیوپودها با کانی‌شناسی اولیه مشابه، احتمالاً بخاطر تفاوت در ریزساخت و محل مواد ارگانیکی اسکلتی در آن پوسته هاست. به طوری که در براکیوپودهای فیبری، فرایند سیلیسی شدن از حاشیه ی خرده اسکلتی به سمت درون گسترش می‌یابد (شکل ۲ ث) در حالی که در براکیوپودهای لایه‌ای سیلیسی شدن به طور جانبی از میان پوسته‌ی موازی با مرزهای اسکلتی صورت می‌گیرد (شکل ۲ ج). براین اساس ریزساخت و مرزهای بین لایه‌ای در دیواره‌ی خرده‌های اسکلتی نقش بسیار مهم‌تری نسبت به کانی‌شناسی اولیه در فرایند سیلیسی شدن دارند.



شکل ۳ الف) سیلیسی شدن بلورهای منفرد اکینودرم (XPL) ب) تصویر الف در PPL که بلور منفرد اکینودرم با حفره پر شده به وسیله سیلیس در آن بهتر تشخیص داده می‌شود. پ) خرده اکینودرم که در سطوح ضعیف رخ آن کوارتز کلسدونی جانشین شده است (XPL). ت) سیلیسی شدن به شکل کوارتز دانه‌ای در خرده اکینودرم (XPL).



شکل ۴ الف) شکل شماتیکی از یک مرجان روگوزا که نشان می‌دهد عمل جانشینی اغلب در فضاهای درون اسکلتی آن رخ می‌دهد. ب) سیلیسی شدن کالوملا، سپتاها و فضای درون اسکلتی یک مرجان روگوزا (XPL). پ) سیلیسی شدن به شکل کلسدونی در فضاهای درونی یک مرجان (XPL). ت) سیلیسی شدن پراکنده فضاهای درونی یک مرجان (XPL).

ماندن تخلخل‌های ریز درون اسکلتی اولیه و مواد ارگانیکی در زمان هجوم سیالات سیلیسی شده باشد. تخلخل‌های ریز فراهم کننده‌ی مجاری برای ورود سیالات غنی از سیلیس به درون اسکلت (ریزساخت) بوده و مواد ارگانیکی به تولید یک ریز محیط شیمیایی برای انحلال کربنات و نهشته شدن سیلیس کمک می‌کنند [۱۴].

پیریتی شدن خرده‌های اسکلتی

علاوه بر سیلیسی شدن ریزساخت‌ها، پیریتی شدن در پوسته‌ی براکیوپودها (شکل‌های ۶ الف، ب، پ، ت) و دوکفه‌ای‌ها (شکل‌های ۷ الف، ب، پ، ت) با بررسی‌های SEM و EDX به اثبات رسیده است.

پیریت (FeS_2) یک محصول دیاژنتیکی است که در سنگ‌های رسوبی کربناتی مشاهده می‌شود. به‌طور کلی پیریت از واکنش سولفید (که در اثر احیای باکتریایی سولفات ایجاد می‌-

شده‌اند. خرده‌های دوکفه‌ای در مقاطع میکروسکوپی اغلب به وسیله‌ی کلسیت با منیزیم کم جانشین شده‌اند و بخش‌هایی از منشورهای کلسیتی دیواره آن‌ها سیلیسی شده‌اند (شکل‌های ۵ الف، ب، پ، ت). در بعضی مقاطع میکروسکوپی استراکودها نیز سیلیسی شده‌اند (شکل‌های ۵ ث، ج). ذرات کروی کلسی اسفر که اغلب دیواره آن‌ها میکریتی و یا کلسیتی است در بعضی مقاطع میکروسکوپی سیلیسی شده‌اند. با توجه به اینکه ارتباط روشنی بین ریزساخت خرده اسکلتی و نوع کوارتز جانشینی دیده می‌شود، اهمیت آن نسبت به تاثیر کانی‌شناسی اولیه بیشتر بوده است. تأثیر ریزساخت اغلب در ارتباط با اندازه بلورها، درصد مواد ارگانیکی و یا نفوذپذیری درونی خود خرده اسکلتی است.

تفاوت در حساسیت پذیری به سیلیسی شدن خرده‌های اسکلتی با کانی‌شناسی متفاوت ممکن است در ارتباط با باقی

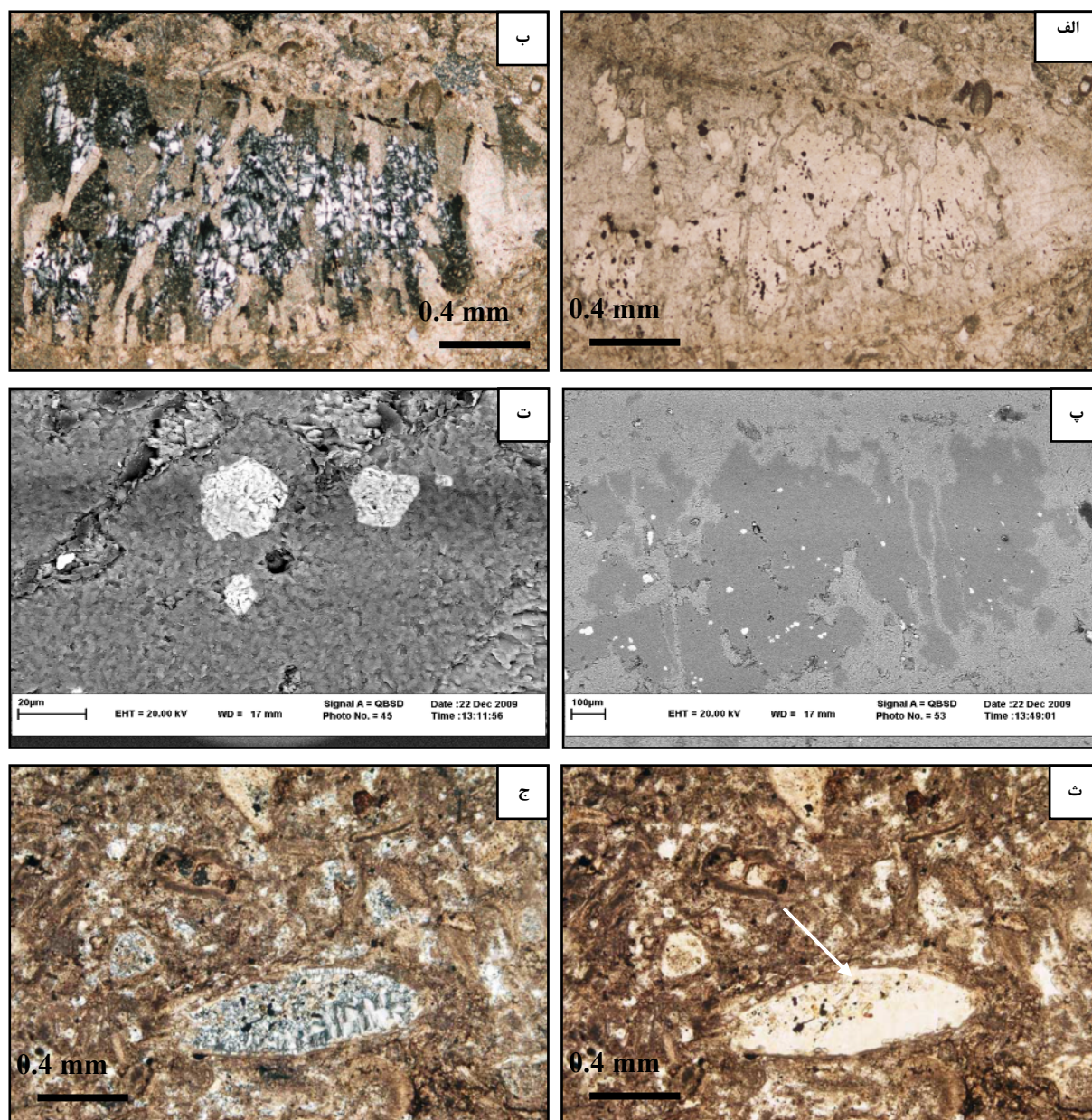
شود [۱۶] با آهن سه ظرفیتی و یا آهن دو ظرفیتی حاصل از احیای باکتریایی آهن سه ظرفیتی [۱۷] به وجود می آید. از نظر ریخت‌شناسی دو نوع پیریت رسوبی در سنگ‌های رسوبی مشاهده می‌شود:

۱- حالت تمشکی با فرامبوئید (framboids) که به صورت

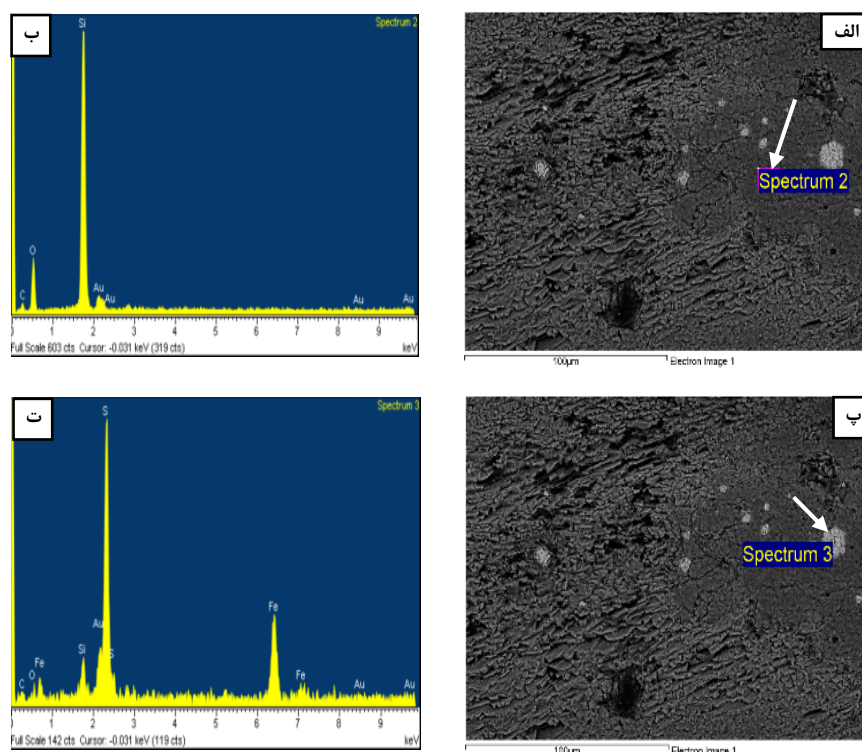
اجتماع کروی بلورهای پیریت در اندازه‌ی میکرون هستند [۱۸].

۲- بلورهای شکل‌دار (euhedral crystal) در اندازه‌ی میکرون و بزرگتر [۱۹].

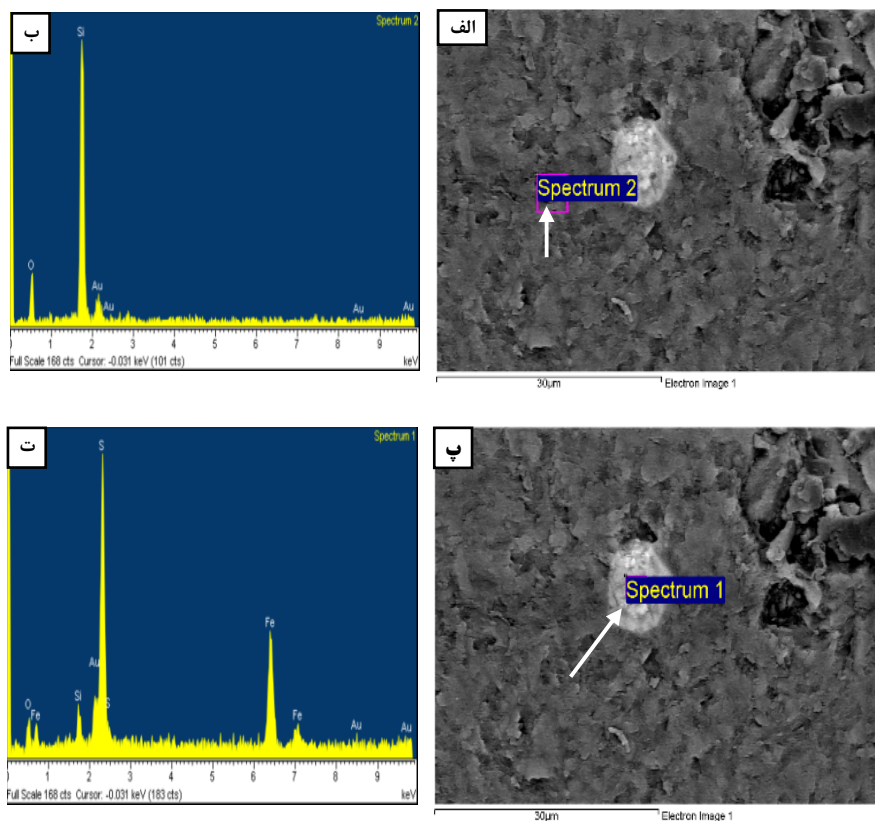
عمل پیریتی شدن در خرده‌های اسکلتی نمونه‌های مورد بررسی اغلب به صورت بلورهای شکل‌دار پیریت است.



شکل ۵ الف) ریزساخت منشوری یک دوکفه‌ای (PPL) که نقاط تیره‌ی آن کانی پیریت است. ب) همان ریزساختار دوکفه‌ای (XPL) که عمل جانشینی سیلیسی در آن به خوبی قابل تشخیص است. پ) تصویر SEM بخشی از شکل الف که گستره‌ی خاکستری تیره‌تر عمل سیلیسی شدن و گستره‌ی خاکستری روشن بخش‌های سیلیسی نشده خرده دوکفه‌ای را نشان می‌دهد. ت) تصویر پ با بزرگنمایی بالاتر که نقاط روشن شکل‌دار در متن سیلیس کانی‌های پیریت هستند. ث) دوکفه کامل استراکود (PPL)، نقاط تیره احتمالاً کانی پیریت هستند. ج) عمل سیلیسی شدن همان خرده استراکود (XPL).



شکل ۶ الف) تصویر SEM بخشی از خرده اسکلتی براکیوپودی. ب) تصویر EDX بخش سیلیسی شده همان خرده براکیوپودی شکل الف. پ) تصویر SEM بخشی از خرده اسکلتی براکیوپودی که نقاط روشن آن کانی پیریت است. ت) تصویر EDX نقاط پیریتی شده همان خرده براکیوپودی شکل پ.



شکل ۷ تصویرهای SEM و EDX بخش‌های سیلیسی شده (الف و ب) و پیریتی شده (پ: نقطه شکلدار روشن و ت) خرده دو کفه‌ای بخشی از شکل ۵ الف.

سازو کار جانشینی

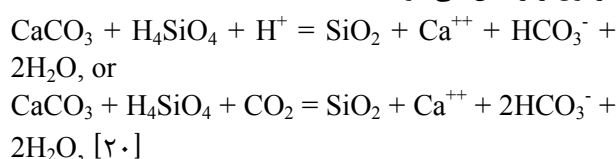
سیلیسی شدن خرده‌های فسیلی منطقه‌ی مورد بررسی احتمالاً طی دو مرحله رخ داده است:

۱- انحلال خرده‌های کلسیتی همراه با انتشار کربنات و کلسیم حل شده

۲- ورود سیلیس به محلول و نهشته شدن آن به صورت انواع کوارتز

سرنوشت کربنات کلسیم حل شده به درستی شناخته نشده است. آن‌ها احتمالاً در نواحی مجاور سیلیسی نشده به صورت سیمان کربناتی نهشته می‌شوند. ممکن است پوسته‌ی فسیلی به‌طور کامل حل شده و سپس سیلیسی شدن به صورت پرکننده‌ی حفره (pore-filling) صورت گیرد [۹].

در هر حال انحلال کربنات کلسیم و نهشته شدن سیلیس با فرمول زیر بیان می‌شود:



مدل محتمل‌تر برای سیلیسی شدن خرده‌های اسکلتی در ناحیه‌ی مورد بررسی، انحلال محلی کربنات و نهشته شدن سیلیس در غشاهای نازک حل شده بین فازهای سیلیس و کربنات است. بنابراین مدل انحلال کربنات و نهشته شدن سیلیس به‌طور همزمان رخ می‌دهد. محدودیت فاز انحلالی نسبت به غشاهای نازک اجازه می‌دهد که شبی از ریزساخت خرده‌های اسکلتی مانند رشته‌های براکیوپود و حفره‌های استروم (Stereom pores) اکیئودرم‌ها با سیلیس جانشین شده، حفظ شود. برای سیلیسی شدن، غشاهای انحلالی بایستی نسبت به فاز سیلیسی نهشته شده اشباع و نسبت به خرده‌های اسکلتی غیراشباع باشند. در محلی که سیلیسی شدن رخ می‌دهد تغییرات محلی در شیمی آب درون حفره‌ای بایستی به صورت افزایش انحلال کربنات کلسیم و کاهش انحلال‌پذیری سیلیس باشد. در این بین سیلیسی شدن متفاوت در خرده‌های اسکلتی ممکن است به خاطر انحلال شدید کربنات در پوسته‌های با ترکیب آراگونیتی، کلسیت با منیزیم بالا و یا کلسیت بلورین باشد. مواد آلی که به صورت میانبار در این خرده‌های

اسکلتی وجود دارند، نقش مهمی در سیلیسی شدن خرده‌های فسیلی با فراهم کردن محل هسته‌ها برای شروع نهشته شدن سیلیس، ایفا می‌کنند [۵].

بلورهای شکل‌دار پیریت نیز از آب‌های حفره‌ای فوق اشباع نسبت به پیریت ولی تحت اشباع نسبت به مونوسولفیدهای آهن ایجاد می‌شوند [۲۱، ۲۲]. فرایند پیریتی شدن ممکن است در زمان حیات جاندار رخ دهد [۲۳] اگرچه این فرایند بلافاصله پس از مرگ جانور و در شرایط دیاژنتیکی کم عمق تدفینی محتمل‌تر است [۲۴].

شرایط پیریتی شدن نمونه‌های مورد بررسی با شرایط سیلیسی شدن کاملاً متفاوت بوده و از نظر تقدم و تأخر ممکن است کمی پس از عمل سیلیسی شدن ریزساخت‌های اسکلتی رخ داده باشند.

خاستگاه سیلیس و آهن برای فرایند سیلیسی و پیریتی شدن

خاستگاه سیلیس می‌تواند از اسپیکول اسفنج‌های سیلیسی و یا دیگر میکروفسیل‌های سیلیسی، دگرسانی کانی‌های رسی، انحلال کوارتزهای آواری و یا دگرسانی شیشه‌های آتشفشانی تامین شود [۲۵]. به دلیل اینکه در نمونه‌های مورد بررسی و یا نواحی مجاور وجود اسکلت‌های سیلیسی یا شیشه‌های آتشفشانی گزارش نشده است بنابراین خاستگاه مهم تامین سیلیس، انحلال دانه‌های آواری درون خود سازند و یا سازندهای قدیمی‌تر و یا دیاژنز کانی‌های رسی در شیل‌های موجود در این بخش از سازند شیشو و یا سازندهای قدیمی‌تر (مثل افق شیلی موجود در زیر این سازند) باشد. در این حالت، سیلیس مورد نیاز برای عمل جانشینی از آب‌های حفره‌ای فوق اشباع نسبت به سیلیس از خارج سنگ میزبان کربناتی مشتق می‌شوند.

یون‌های آهن برای تشکیل پیریت اغلب از رسوب‌های قدیمی‌تری که در زیر این سازند قرار داشته (به‌طور مثال لایه‌های اوولیت‌های آهن‌دار زون سفالوپود دار و شیل‌های پیریت-دار افق موش) تأمین می‌شوند. این فرایند وابسته به وجود شرایط احیایی و در دسترس بودن یون‌های آهن و سولفور در شرایط دیاژنز تدفینی است.

برداشت

به‌طور کلی فرایندهای دیاژنتیکی متفاوتی رسوبات بخش ۲ سازند شیش‌تو به سن کربونیفر پیشین را تحت تأثیر قرار داده است که از مهم‌ترین آن‌ها پدیده‌ی سیلیسی شدن و پیریتی شدن است. این فرایند جانشینی در اغلب خرده‌های اسکلتی از قبیل براکیوپودها، کرینوتیدها، مرجان‌ها، تریلوبیت‌ها، دوکفه‌ای‌ها و حتی کلسی اسفرها نیز شناسایی شده‌اند. براساس شواهد به‌دست آمده از بررسی مقاطع میکروسکوپی، ریزساخت اسکلتی جانداران در این عمل جانشینی نقش مهمی داشته‌اند. فرایند سیلیسی شدن در خرده‌های اسکلتی با جنس کلسیت منیزیم‌دار از قبیل براکیوپودها و کرینوتیدها به‌طور گسترده‌ای رخ داده است که ممکن است حضور ناخالصی مانند یون منیزیم در ترکیب براکیوپودها و کرینوتیدها فاکتور کنترل کننده‌ی حساسیت به سیلیسی شدن این موجودات باشد. ریزساخت اسکلتی این جانداران نیز نقش مهمی در عملکرد این فرایند داشته؛ مثلاً ریزساخت رشته‌ای براکیوپودها به خاطر وجود ریزتخلخل‌های بیشتر، ناحیه‌ی سطحی بیشتری برای واکنش جانشینی را در اختیار قرار می‌دهند. در هر حال فقدان یک ارتباط روشن بین کانی‌شناسی اولیه خرده‌های اسکلتی و نوع کوارتز جانشینی بیانگر آن است که کانی‌شناسی به تنهایی نمی‌تواند کنترل کننده‌ی مهمی برای نوع کوارتز جانشینی باشد، ولی ارتباط واضحی بین ریزساخت خرده اسکلتی و نوع کوارتز جانشینی وجود دارد. شرایط پیریتی شدن نمونه‌های مورد بررسی با شرایط سیلیسی شدن متفاوت بوده و اغلب پس از پدیده‌ی سیلیسی شدن در شرایط تدفینی که حالت احیایی حکم‌فرماست تشکیل شده‌اند.

مراجع

[۱] خانه باد م، موسوی حرمی ر، محبوبی ا، نجفی م، محمودی قرایی، م. ح، "ساقه‌های کرینوتیدی رسوبات کربونیفر، نشان دهنده یک محیط رمپ کربناته، ناحیه حوض دو راه - جنوب شرق طبس"، سومین همایش انجمن دیرینه‌شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۸) ص ۸۳-۸۶.

[۲] علوی نائینی م، ۱۳۷۲، "چینه‌شناسی پالئوزوئیک ایران"، طرح تدوین کتاب زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۷۲) ۴۹۲ص.

[3] Rutner A., Nabavi M. H., Alavi M., "Geology of the Ozbak-Kuh Mountains (Tabas area, East Iran)", Geological Survey of Iran, (1960) 133.

[4] Stocklin J., Eftekhar-nezhad J., Hushamand-Zadeh A., 1991, "Geology of the Shotori Range (Tabas area, East Iran)", Geological Survey of Iran Report No. 3 (1991) 69.

[5] Maliva R., Siever R., "Mechanisms and controls of silicification of fossils in limestones", Journal of Geology 96 (1988) 387-398.

[6] Maliva R.G., "Silicification in the Belt Supergroup (Mesoproterozoic), Glacier National Park, Montana, USA", Sedimentology 48 (2001) 887-896.

[7] Pope M., "Cherty carbonate facies of the Montoya Group, southern New Mexico and western Texas and its regional correlatives a record of Late Ordovician paleoceanography on southern Laurentia", Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 210 (2004) 367-384.

[8] Tobin K. J., "A survey of Paleozoic microbial fossils in chert", Sedimentary Geology 168 (2004) 7-107.

[9] Schmitt J. G., Boyd D. W., "Pattern of silicification in Permian pelecypods and brachiopods from Wyoming", Journal of Sedimentary Petrology (1981) 1297-1308.

[10] Bullen S. B., Sibley D. F., "Dolomite selectivity and mimic replacement", Geology 12 (1984) 655-658.

[11] Popp B. N., Anderson J. F., Sandberg P. A., "Textural, elemental and isotopic variation among constituents in Middle Devonian limestones, North America", Journal of Sedimentary Petrology 54 (1986), 715-727.

[12] Bathurst R. G. C., "Carbonate sediments and their diagenesis", Second enlarged edition, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, (1975) 658.

[13] Hein J. R., Karl S. M., "Comparison between Open Ocean and continental margin chert

- [20] Blatt H., Middleton G. V., Murray, R. G., *"Origin of sedimentary rocks"*, (2nd edition), Prentice-Hall Inc. New Jersey, (1980) 782.
- [21] Wang Q., Morse J. W., *"Pyrite formation under conditions approximating those in anoxic sediments I. Pathways and morphology"*, Marine Chemistry 52 (1996) 99–121.
- [22] Rickard D., *"Kinetics of pyrite formation by the H₂S oxidation of iron (II) monosulfide in aqueous solutions between 25 and 125°C: the rate equation"*, Geochimica et Cosmochimica Acta 61 (1997), 115–134.
- [23] Howarth R. W., *"Pyrite: Its rapid formation in a salt marsh and its importance to ecosystem metabolism"*, Science 203 (1979), 49-51.
- [24] Raiswell R., Berner R. A., *"Pyrite formation in euxinic and semi-euxinic sediments"* American Journal of Science 285 (1985) 710-724.
- [25] Schmitt J. G., *"Description and interpretation of silicified skeletal material from the Park City Formation (Permian) of Wyoming"*, M.S. thesis, University of Wyoming, Laramie, (1979) 84.
- sequences"*, In: A. Iijima and Hein, J. R. and Siever, R. eds. Siliceous deposits in the Pacific region, Elsevier Sci. Pub. Co., Amsterdam, (1983) 25-43.
- [14] Daley R. L., Boyd D. W., *"The role of skeletal microstructure during Selective Silicification of Brachiopods"*, Journal of Sedimentary Research 66, 1 (1996) 155-162.
- [15] Adams A.E., Mackenzie W.S., Guilford C., 1984, *"Atlas of sedimentary rocks under the microscope"*, Longman (1984) 104.
- [16] Berner R.A., *"Sedimentary pyrite formation"*, American Journal of Science 268 (1970) 1–23.
- [17] Lovley D.R., *"Dissimilatory Fe (III) and Mn (IV) reduction"*, Microbiological Reviews 55 (1991) 259–287.
- [18] Sweeney R.E., Kaplan I.R., *"Pyrite framboid formation: laboratory synthesis and marine sediments"*, Economic Geology 68 (1973) 618–634.
- [19] Passier H. F., Middelburg J. J., de Lange G. J., Bottcher M.E., *"Pyrite contents, microtextures, and sulfur isotopes in relation to formation of the youngest eastern Mediterranean sapropel"*, Geology 25 (1997) 519–522.