

Dor: [۲۰,۱۰۰۱,۱,۲۲۵۱۸۷۳۸,۱۴۰۰,۱۱,۲۱,۴,۲](https://doi.org/10.1016/j.ijpge.2021.01.001)

بررسی مشخصات پتروگرافی و ژئوشیمیایی نهشته‌های کربناته سازند جمال در برش چاه‌ریسه، شمال شرق اصفهان

بهراد ذبحی کمند^۱، محمدعلی صالحی^{۱*}، عزت حیدری^۲، علی بهرامی^۱

^۱گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۲بخش فیزیک، علوم فضایی و علوم زمین، دانشگاه ایالتی جکسون، ایالت می‌سی‌سی‌پی، ایالات متحده آمریکا

*ma.salehi@sci.ui.ac.ir

دریافت شهریور ۱۴۰۱، پذیرش آبان ۱۴۰۱

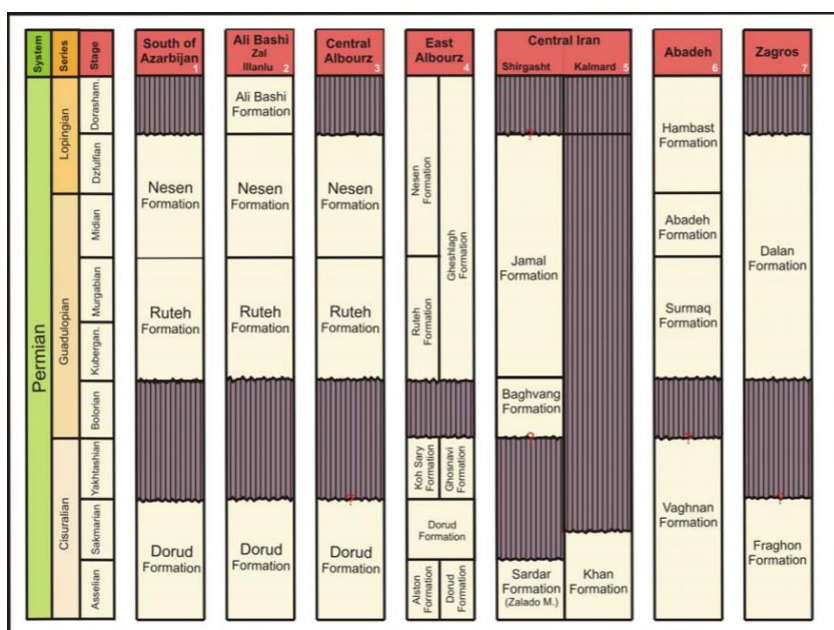
چکیده

سازند جمال به سن پرمین میانی در برش چاه‌ریسه مورد مطالعه رسوب شناسی و ژئوشیمی رسوبی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات صحرایی انجام گرفته در این تحقیق، سازند جمال با ضخامت ۲۵۱ متر به ۸ واحد لیتواستراتیگرافی تفکیک شده که شامل لیتولوژی‌های غالب سنگ آهک خاکستری، دولومیت زرد رنگ و همچنین با ضخامت کمتر سیلتستون، ماسه-سنگ قرمز و ماسه‌سنگ سفید (کوارتزآرنایت) می‌باشد. مرز زیرین این سازند که مصادف با گذر از دوره کربونیفر به پرمین است به صورت ناپیوسته و مرز بالا نیز ناپیوسته با سازند سرخ شیل به سن تریاس زیرین است. با توجه به پتروفاسیس‌های آواری و ریزرخساره‌های کربناته شناسایی شده در سازند جمال و بر اساس ارتباطات رخساره‌ای و همچنین تغییرات تدریجی آنها یک رمپ کربناته کم عمق برای ته نشست نهشته‌های آواری و کربناته این سازند در نظر گرفته شده است. در برش مورد مطالعه بر اساس مطالعات پتروگرافی صورت گرفته چهار نوع دولومیت شناسایی شده است. مدل دولومیتی شدن برای نهشته‌های دولومیتی سازند جمال در دولومیت‌های نوع اول مربوط به پهنه‌های جزر و مدی و برای سایر دولومیت‌ها (نوع دوم تا چهارم) از نوع مدل دولومیتی دفنی می‌باشد. مطالعات ژئوشیمیایی انجام شده شامل آنالیزهای عناصر اصلی و فرعی و ایزوتوپ‌های اکسیژن و کربن بر روی نمونه‌های سنگ آهکی و دولومیتی می‌باشد که در تعیین مشخصات شیمیایی در زمان ته‌نشست این سازند و تاریخچه پس از رسوبگذاری آن مورد استفاده قرار گرفته است. آنالیز عناصر اصلی و فرعی شامل عناصر کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، استرانسیوم (Sr)، منگنز (Mn) و آهن (Fe) بوده است. نسبت‌های مورد نظر از این عناصر و همچنین با مقابل قرار دادن برخی از عناصر با ایزوتوپ‌های اکسیژن و کربن در نمودارهای مختلف جهت تعیین و تفکیک کانی‌شناسی اولیه نهشته‌های کربناته و همچنین تعیین سیستم دیاژنتیکی تأثیرگذار بر روی سازند جمال مورد استفاده قرار گرفته است. سیستم دیاژنتیکی حاکم بر سازند جمال نیمه بسته بوده و همچنین کانی‌شناسی اولیه مربوط به آن آراگونیت بوده است. بررسی مقادیر عناصر اصلی و فرعی نمونه‌های دولومیتی منجر به تفکیک چهار نوع دولومیت گردیده است که در مطالعات پتروگرافی نیز بر اساس مشخصات نظیر اندازه بلور ویژگی‌های متفاوت دارند. داده‌های ایزوتوپی اکسیژن و کربن نمونه‌های دولومیتی نیز شرایط دیاژنتیکی تشکیل انواع آنها را مشخص کرده است.

کلمات کلیدی: ژئوشیمی، عناصر اصلی و فرعی، ایزوتوپ‌های اکسیژن و کربن، پرمین، دولومیت، دیاژنز

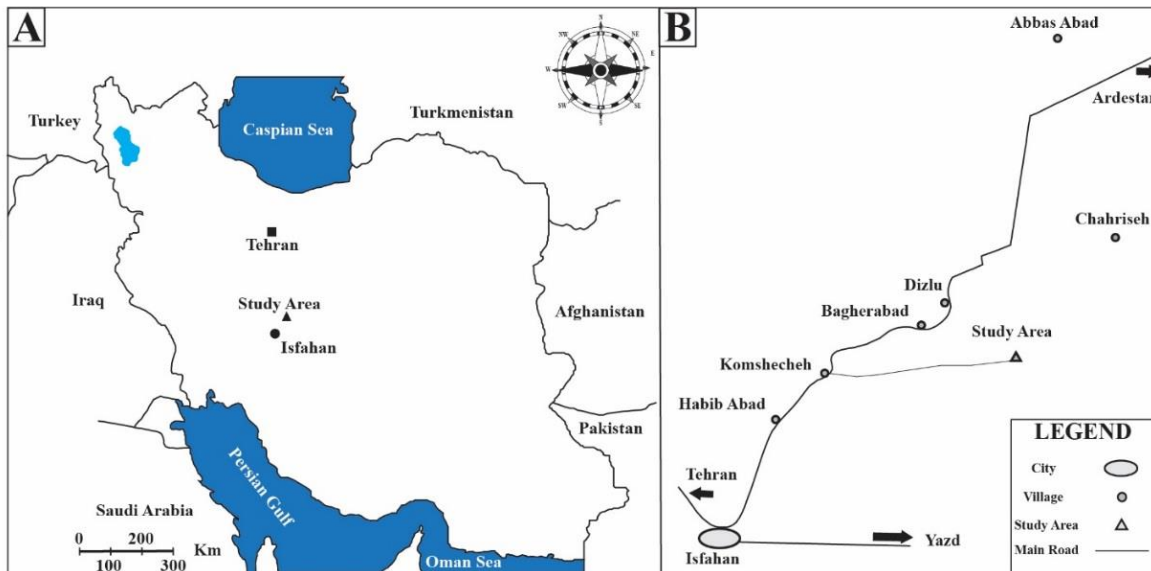
۱- مقدمه

در گذشته خرده قاره ایران مرکزی را بخشی از توده میانی ایران مرکزی می‌دانستند ولی، به باور اشتوکلین و همکاران [۳۱]، پس از سخت شدن پی سنگ پرکامبرین، بخش یاد شده در زمان پالئوزوئیک ویژگی‌های سکویی داشته و در زمان‌های مزوزوئیک و سنوزوئیک به منطقه‌ای پرتحرک و پویا تبدیل شده است. با وجود این، الگوی ساختاری حاکم بر این خرد قاره از نوع بلوک‌های جدا شده با گسل‌های پی سنگی است که هر یک ویژگی جداگانه دارند و پویایی خرد قاره در همه جا یکسان نیست. منطقه مورد مطالعه شامل بخشی از زون ایران مرکزی بوده و در مجاورت محدوده شرقی کمربند سندج-سیرجان واقع شده است. برش الگوی سازند جمال، توسط اشتوکلین و همکاران [۳۱]، در دامنه جنوبی کوه جمال، در جنوب طبس، مطالعه و معرفی شده است. در این محل، مرز زیرین سازند جمال به سازند سردر است و در بالا، با ناپیوستگی همشیب با سازند سرخ شیل، به سن تریاس پیشین، پوشیده می‌شود. سازند جمال در نقاط مختلف خرد قاره ایران مرکزی نیز رخمون دارد [۵]. در برش الگو، سازند جمال عمدتاً از سنگ‌آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای، به رنگ خاکستری و همچنین از ضخامت کمتری از دولومیت کرم رنگ تشکیل شده است. تغییرات سنی این سازند از پرمین میانی تا آغاز پرمین پسین (جلفین) است (شکل ۱). معادل سازند جمال در قسمت‌های دیگری از ایران از جمله جنوب آذربایجان، البرز مرکزی و البرز شرقی با نام‌های سازند روته و نسن رخمون دارد (شکل ۱). یافته‌های زمین‌شناسی جدید نشان می‌دهد که در برش‌های کامل سازند جمال یک عضو ماسه‌سنگ کوارتزی در زیر، یک عضو سنگ‌آهک مرجانی در وسط و یک عضو دولومیتی در بالا دارد [۸]. پژوهش‌های انجام شده قبلی بر روی ماهیت چینه نگاری سنگی و زیستی این سازند در شرق ایران مرکزی صورت گرفته (برای نمونه [۸] و [۲۳]) در صورتیکه تمرکز اصلی این پژوهش بر مطالعات پتروگرافی، دیاژنز و ژئوشیمی رسوبی به منظور بررسی شرایط ژئوشیمیایی حاکم در زمان ته‌نشست سازند جمال و همچنین شرایط پس از رسوبگذاری آن در حاشیه جنوب غربی ایران مرکزی (شمال شرق اصفهان) در مجاورت زون سندج-سیرجان می‌پردازد. آنالیزهای مربوط به عناصر اصلی و فرعی و همچنین ایزوتوپی اکسیژن و کربن در رابطه با شرایط محیطی ژئوشیمیایی نهشته‌های آهکی و دولومیتی سازند جمال در طی پرمین میانی و شرایط پس از رسوبگذاری (دیاژنزی) آن بحث می‌نماید.

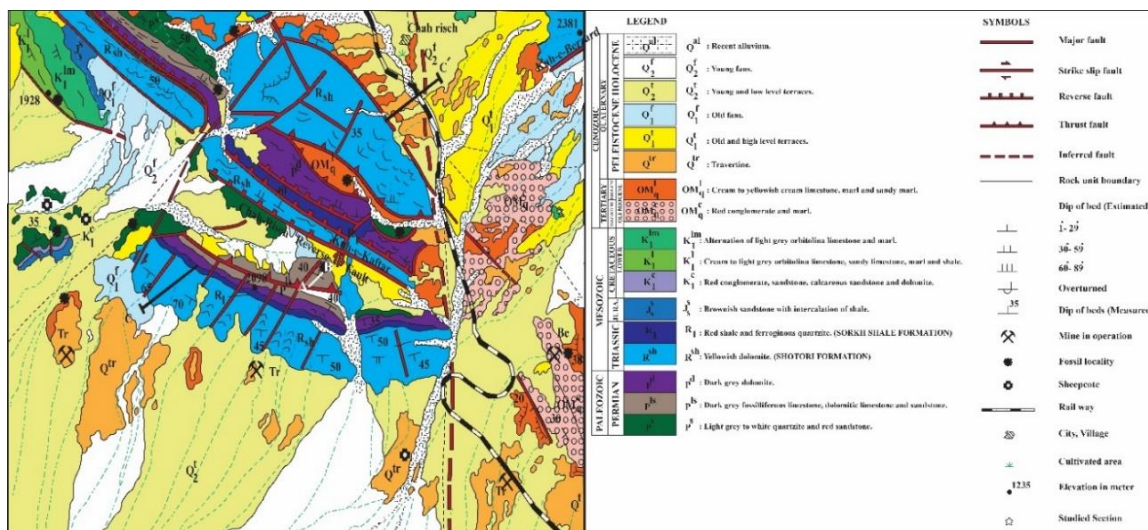


شکل ۱- تطابق چینه‌شناسی سازندهای با سن پرمین در نقاط مختلف ایران [۲۳].

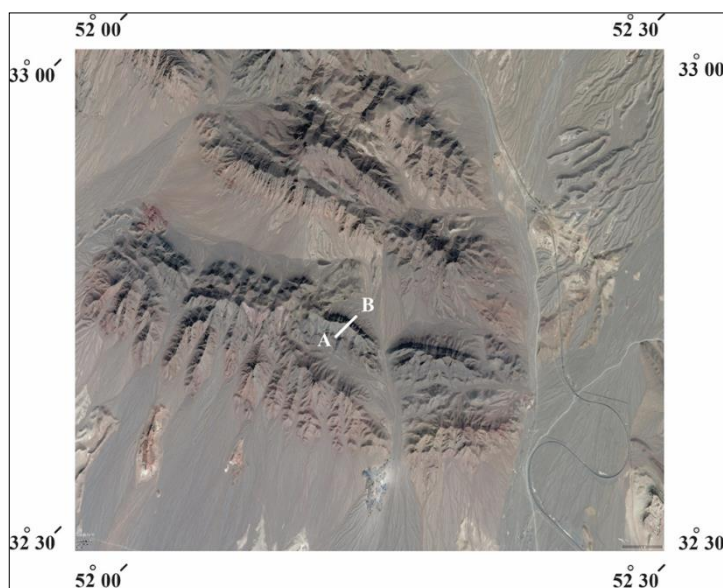
از لحاظ موقعیت جغرافیایی برش مورد مطالعه واقع در ۵۵ کیلومتری شمال شرق اصفهان در جنوب روستای چاهریسه و در شمال کوه لامار قرار دارد. مختصات جغرافیایی برش مورد مطالعه $32^{\circ} 56' 56.15'' N$ و $52^{\circ} 05' 14.49'' E$ در نقطه شروع و $32^{\circ} 06' 30.75'' N$ و $52^{\circ} 05' 28.40'' E$ در نقطه پایان می باشد (شکل های ۲ و ۳ و ۴).



شکل ۲- A: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران که با مثلث سیاه نشان داده شده است. B: راه های دسترسی به منطقه مورد مطالعه.



شکل ۳- نقشه بازمینی شده ۱:۱۰۰۰۰۰ کوهپایه، شمال شرق اصفهان که نقطه مورد نظر با خط سفید رنگ AB مشخص گردیده است.



شکل ۴- عکس ماهواره‌ای از برش مورد مطالعه که موقعیت برش مورد نظر با خط سفید رنگ AB مشخص شده است.

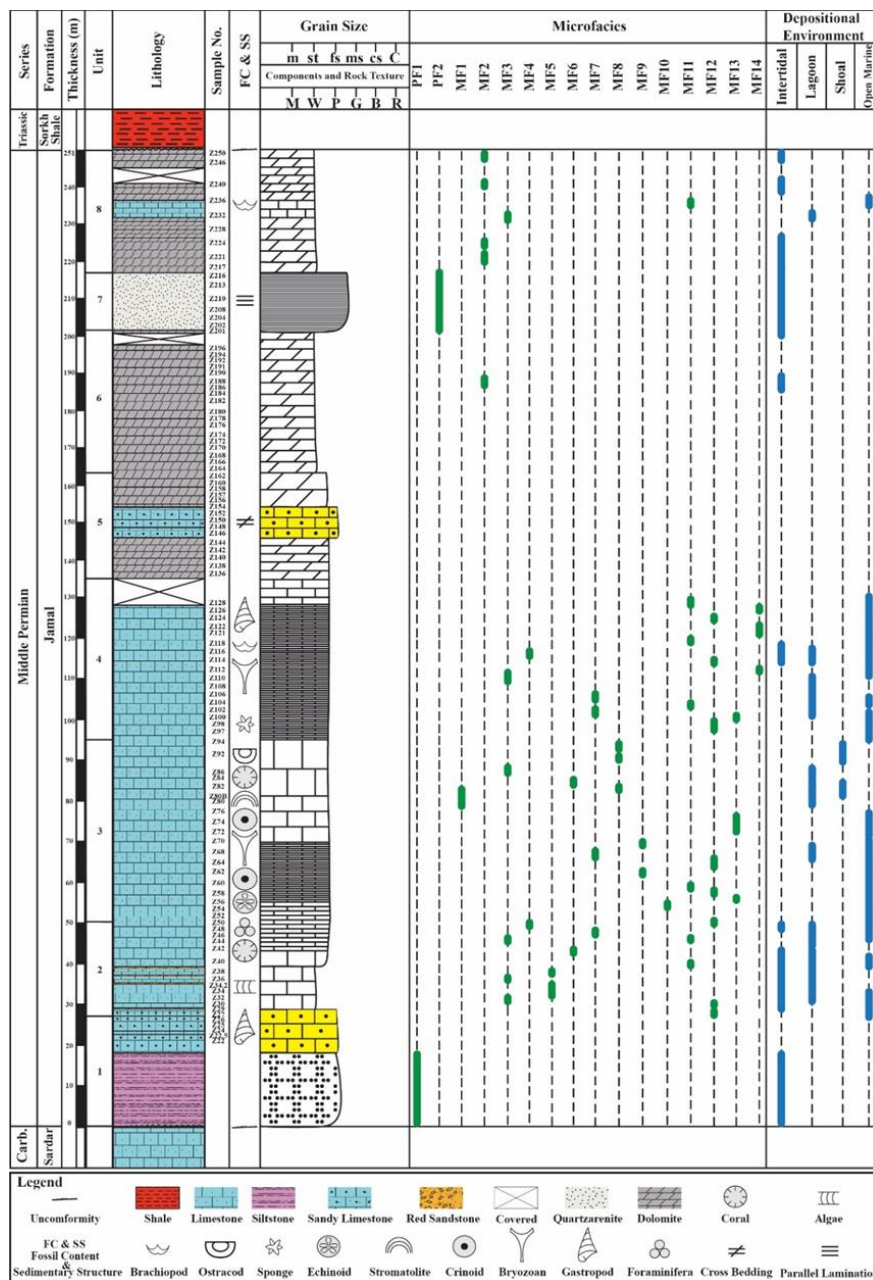
۲- داده‌ها و روش تحقیق

مطالعات صحرایی بر روی سازند جمال شامل اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ها بوده که توسط ژاکوب انجام شده است. نمونه برداری به دو صورت سیستماتیک و همچنین در مواردی با تغییرات رخساره نمونه برداری غیر سیستماتیک نیز انجام شده است. در مجموع تعداد ۱۰۴ نمونه از توالی مورد مطالعه برداشت گردیده است. در ثبت خصوصیات لایه‌ها، توجه به مرز آنها، شناسایی رخساره‌های سنگی نظیر بررسی بافت، ساخت و اندازه و نوع ذرات تشکیل دهنده و سایر ویژگی‌های شاخص از موارد مورد توجه در مطالعات و عملیات صحرایی بوده است. مطالعات پتروگرافی به جهت تشخیص بافت سنگ‌های آهکی و معرفی ریز رخساره‌ها و همچنین مشخصات پتروگرافی دولومیت‌ها بر روی مقاطع نازک توسط میکروسکوپ پلاریزان صورت گرفته است (جداول ۱ و ۲). آنالیزهای ژئوشیمیایی بر روی نمونه‌های آهکی و دولومیتی انجام گرفته که شامل آنالیز فلورسانس اشعه ایکس (XRF) به منظور اندازه‌گیری مقادیر عناصر اصلی و فرعی در نمونه‌ها بوده است. بدین منظور کمتر از یک گرم از نمونه‌های سنگ آهک (۱۰ نمونه) و دولومیت (۲۰ نمونه) پودر شده توسط دستگاه XRF مدل PANalytical Epsilon^۳-XL در دانشگاه برمن کشور آلمان مورد آنالیز قرار گرفته و عناصر اصلی (Ca و Mg) و فرعی (Sr، Fe، Mn) در نمونه‌ها بر حسب mg/kg اندازه‌گیری شدند. به منظور مطالعات ژئوشیمیایی ایزوتوپی پایدار کربن (^{۱۳}C) و اکسیژن (^{۱۸}O)، تعداد ۱۰ نمونه پودر سنگ آهک و ۲۲ نمونه دولومیت به کمک دستگاه اسپکترومتر جرمی (Finnigan MAT ۲۵۱ MS with Kiel I device) در دانشگاه برمن کشور آلمان اندازه‌گیری شد (جدول ۳).

۳- چینه‌شناسی سازند جمال در برش چاه‌ریسه

سازند جمال در منطقه چاه‌ریسه به صورت ناپیوسته بر روی نهشته‌های کربونیفر (سازند سردر) قرار گرفته است. مرز بالایی سازند جمال به صورت ناپیوسته توسط بوکسیت قرمز و لاتریت مشخص می‌گردد و مرز ناپیوسته توسط سازند سرخ شیل مربوط به تریاس زیرین پوشیده می‌شود [۵]. این سازند با ضخامت ۲۵۱ متر متشکل از سنگ آهک، دولومیت و نهشته‌های مخلوط آواری-کربناته به همراه میان لایه‌هایی از سیلستون و ماسه‌سنگ است (شکل ۵). با بررسی تغییراتی چون لیتولوژی، ضخامت و رنگ واحدها، ۸ واحد لیتواستراتیگرافی برای این سازند در نظر گرفته شد که بخش عمده آن مربوط به سنگ‌های

آهکی و دولومیتی بوده و ماسه‌سنگ‌ها و سیلتستون‌ها از سهم کمتری برخوردار هستند. این سازند در برش چاه‌ریسه با سیلتستون قرمز، ماسه سنگ خاکستری و سپس با سنگ آهک ماسه دار خاکستری تا قهوه‌ای آنکولیت‌دار شروع می‌شود. قسمت میانی توالی متشکل از سنگ آهک خاکستری با لایه‌های سنگ آهک ماسه‌ای و ماسه سنگ بوده (شکل ۵) و قسمت فوقانی توالی دولومیت تیره متوسط تا ضخیم لایه می‌باشد. در مرز پرمین به تریاس در مقطع چاه‌ریسه وقفه رسوبگذاری وجود داشته و شرایط قاره‌ای حکم فرما بوده است که وجود آلومینوسیلیکات‌ها و افق‌های لاتریت و بوکسیت به خوبی این مسئله را نشان می‌دهد [۲] و [۳۵]. بخش کریناته سازند جمال در ناحیه چاه‌ریسه براساس میکروفسیل‌های موجود در توالی، سن پرمین میانی را نشان می‌دهد که معادل آشکوب گوادالوپین است [۲] و [۵].



شکل ۵- ستون چینه‌شناسی جمال به همراه تغییرات رخساره‌ای و محیط رسوبی سازند جمال در منطقه مورد مطالعه (چاه‌ریسه).

۵- رخنساره‌ها و محیط رسوبی سازند جمال

بر اساس مطالعات صحرایی و پتروگرافی مقاطع نازک رخنساره‌های سازند جمال در توالی مورد مطالعه شامل ۲ پتروفاسیس آواری و ۱۴ ریزرخساره کربناته می‌باشد که حاوی اطلاعات ارزشمند از محیط رسوبی دیرینه می‌باشند (جدول ۱). پتروفاسیس‌های آواری شامل سیلتستون و کوارتزآرنایت و ۱۴ ریزرخساره مذکور به ترتیب شامل استروماتولیت باندستون، دولومادستون، بایوکلست و کستون، پلوئید بایوکلست و کستون، داسی‌کلاداسه رودستون، کورال فلوتستون، بنتیک فرامینیفر بایوکلست پکستون، فوزولین بایوکلست گرینستون، براکیوپود بنتیک فرامینیفر بایوکلست پکستون، براکیوپود اکینوئید بایوکلست و کستون-پکستون، براکیوپود بایوکلست و کستون، اسفنج بایوکلست و کستون، بریوزوئر بایوکلست و کستون و دوکفه‌ای بایوکلست و کستون می‌باشند (شکل‌های ۶ و ۷). با توجه به بررسی‌های انجام گرفته محیط رسوبی تعیین شده برای سازند جمال در برش چاه‌ریسه از نوع رمپ کربناته کم عمق بوده و علت آن تغییر تدریجی ریزرخساره‌ها و متعلق بودن آلوم‌های آن به محیط‌های کم عمق و نوردوست نظیر جلبک سبز داسی‌کلاداسه می‌باشد (شکل ۸). زیرمحیط‌های این رمپ کربناته شامل پهنه جزر و مدی و با ریزرخساره دولومادستون، لاگون با ریزرخساره‌های استروماتولیت باندستون، بایوکلست و کستون، پلوئید بایوکلست و کستون، داسی‌کلاداسه رودستون، کورال فلوتستون و بنتیک فرامینیفر بایوکلست پکستون، شول با ریزرخساره فوزولین بایوکلست گرینستون و دریای باز با ریزرخساره‌های براکیوپود بنتیک فرامینیفر بایوکلست پکستون، براکیوپود اکینوئید بایوکلست و کستون-پکستون، براکیوپود بایوکلست و کستون، اسفنج بایوکلست و کستون، بریوزوئر بایوکلست و کستون و دوکفه‌ای بایوکلست و کستون مشخص می‌باشد. در این میان پتروفاسیس‌های سیلتستون و کوارتزآرنایت مربوط به محیط رمپ داخلی و زیرمحیط پهنه جزر و مدی می‌باشد [۳].

۵- پتروگرافی دولومیت‌ها و انواع دولومیت

مطالعات پتروگرافی بر روی دولومیت‌های سازند جمال در برش چاه‌ریسه و بررسی اندازه بلورها و سایر مشخصات منجر به شناسایی چهار نوع دولومیت گردید که در زیر مشخصات آن‌ها توصیف می‌گردد (جدول ۲).

۱-۵- دولومیت نوع اول (I): دولومیت‌های خیلی ریز تا ریز بلور (Very Fine to Finely Crystalline Dolomite)

این نوع دولومیت‌ها به صورت موزاییک‌های یک اندازه (Unimodal Mosaics)، دارای مرزهای مسطح نیمه شکل دار (Planar-S) در اندازه خیلی ریز تا ریز بلور مشاهده می‌شوند (شکل ۹، A). اندازه بلورها بین ۱۰ تا ۶۰ میکرون (میانگین ۴۰ میکرون) در نوسان است. این دولومیت‌ها متراکم و تیره رنگ بوده و فاقد فسیل‌اند و اغلب دارای اثراتی از بافت‌های رسوبی اولیه (نظیر لامیناسیون و ایتراکلت) همراه با دانه‌های پراکنده کوارتز آواری می‌باشند. از روی اندازه بلورهای دولومیت و سایر مشخصات بافتی می‌توان دولومیت‌های اولیه را از ثانویه تشخیص داد [۱]، [۱۳]، [۱۷]، [۶] و [۱۸]. با توجه به فابریک و اندازه خیلی ریز بلورها، وجود ذرات پراکنده کوارتز در حد سیلت، حفظ بافت اولیه رسوبی، عدم وجود فسیل، به نظر می‌رسد که دولومیت‌های نوع اول تحت شرایط سطحی، دمای پایین (low-temperate) و در محیط‌های سوپراتایدال (بالای حد جزر و مدی) تا قسمت بالایی ایترتایدال (قسمت بالایی بین حد جزر و مدی) تشکیل شده‌اند [۱۲] و [۳۰]. آب دریا و یا محلول‌های بین ذره‌ای غنی از Mg احتمالاً عامل دولومیتی شدن می‌باشند [۲۸]، [۱۶]، [۴] و [۱۹].

۲-۵- دولومیت نوع دوم (II): دولومیت‌های متوسط بلور (Medium Crystalline Dolomite)

این نوع دولومیت عمدتاً به صورت موزائیک‌های هم‌اندازه، متراکم و دارای مرزهای مسطح نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل (subhedral to anhedral planar-s crystal) تشکیل شده است (شکل ۹، B). در بسیاری از بلورهای این نوع دولومیت، مرزهای مشترک بین بلوری مستقیم بوده و در بعضی از آن‌ها فصل مشترک سطوح کریستالی (crystal-face junctions) به خوبی حفظ شده است [۴]. این نوع دولومیت معادل دولومیت هیپیدئوتاپیک فریدمن [۱۱]، ایدئوتاپیک-s (idiotopic-s) سیبلی و گرگ [۱۲] و دولومیت با بافت مسطح نیمه شکل‌دار (planar-s) سیبلی و گرگ [۱۲] و مازالو [۱۸] می‌باشد. اندازه بلورها بین ۷۰ تا ۲۶۰ میکرون (میانگین ۲۲۰ میکرون) در تغییر است. دولومیت نوع دوم باعث تخریب بافت اولیه رسوبی گردیده و در نتیجه شناسایی اشکال اولیه رسوبی بسیار مشکل است. دولومیت نوع دوم از نظر ویژگی‌های پتروگرافیکی شباهت زیادی به دولومیت نوع دوم شوکلا و فریدمن [۲۹] و دولومیت ماتریکسی کوئینگ و مونتجوی [۲۴] دارد. در دولومیت نوع دوم اغلب بلورهای دولومیت به شکل نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل بوده و مرز کریستالی آن‌ها نسبتاً مستقیم است و حتی در بعضی از آن‌ها فصل مشترک سطوح کریستالی نیز مشاهده می‌شود. مورو [۲۱] و [۲۲] پیشنهاد نموده است که دولومیت‌های دارای مرز مسطح نیمه شکل‌دار نتیجه رشد آرام بلورها است. بر اساس نظریه سیبلی و گرگ [۳۰]، فابریک مسطح نیمه شکل‌دار نتیجه رشد آرام بلورها تحت جریان پیوسته‌ای از سیالات دولومیت‌ساز در دمای پایین می‌باشد. بنابراین دولومیت نوع دوم بیانگر جانشینی دیاژنتیکی سنگ آهک‌های قبلی و یا تبلور مجدد دولومیت‌های تشکیل شده اولیه یا جانشینی سایر رخساره‌ها از جمله ریزرخساره‌های شماره ۱ تا ۷ زیر دمای بحرانی یعنی کمتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد [۱۴] و [۱۸] می‌باشد.

۳-۵- دولومیت نوع سوم (III): دولومیت‌های متوسط تا درشت‌بلور (Medium-Coarsely Crystalline Dolomite)

دولومیت نوع سوم از بلورهای هم‌اندازه، متراکم، دانه درشت (میانگین حدود ۵۰۰ میکرون)، با مرزهای غیر مسطح و بی‌شکل (nonplanar-A) تشکیل شده است (شکل ۷، C و D). از ویژگی این نوع دولومیت‌ها این است که آن‌ها اغلب جانشین آلوکم‌ها (نظیر ائیدها) با ساختار نامشخص (nonmimically replaced allochems) گردیده است. جانشینی نامشخص و شبیح مانند (nonmimic replacement) به این مفهوم است که شکل کلی آلوکم حفظ گردیده اما ساخت آن‌ها نامشخص می‌باشد [۳۰]. بلورهای دولومیت دارای مرزهای بین بلوری نامنظم بوده و اغلب دارای خاموشی موجی است و به ندرت فصل مشترک سطوح بلوری در آن‌ها حفظ شده است [۴]. بافت این نوع دولومیت معادل با بافت زینوتاپیک فریدمن (xenotopic) [۱۱]، زینوتاپیک-A-سیبلی و گرگ (Gregg and Sibley, ۱۹۸۴)، بافت غیر مسطح (nonplanar) سیبلی و گرگ [۱۲] و بافت غیر مسطح-A-مازالو [۱۸] می‌باشد. در بعضی موارد این نوع دولومیت‌ها دارای مرزهای مسطح نیمه شکل‌دار می‌باشند و لذا تشخیص آن‌ها از دولومیت‌های نوع دوم مشکل است. در این گونه موارد تفکیک دولومیت‌ها بر مبنای حفظ تعداد بیشتری از فصل مشترک سطوح بلوری در دولومیت‌های نوع دوم و داشتن خاموشی موجی در دولومیت‌های نوع دوم بوده است.

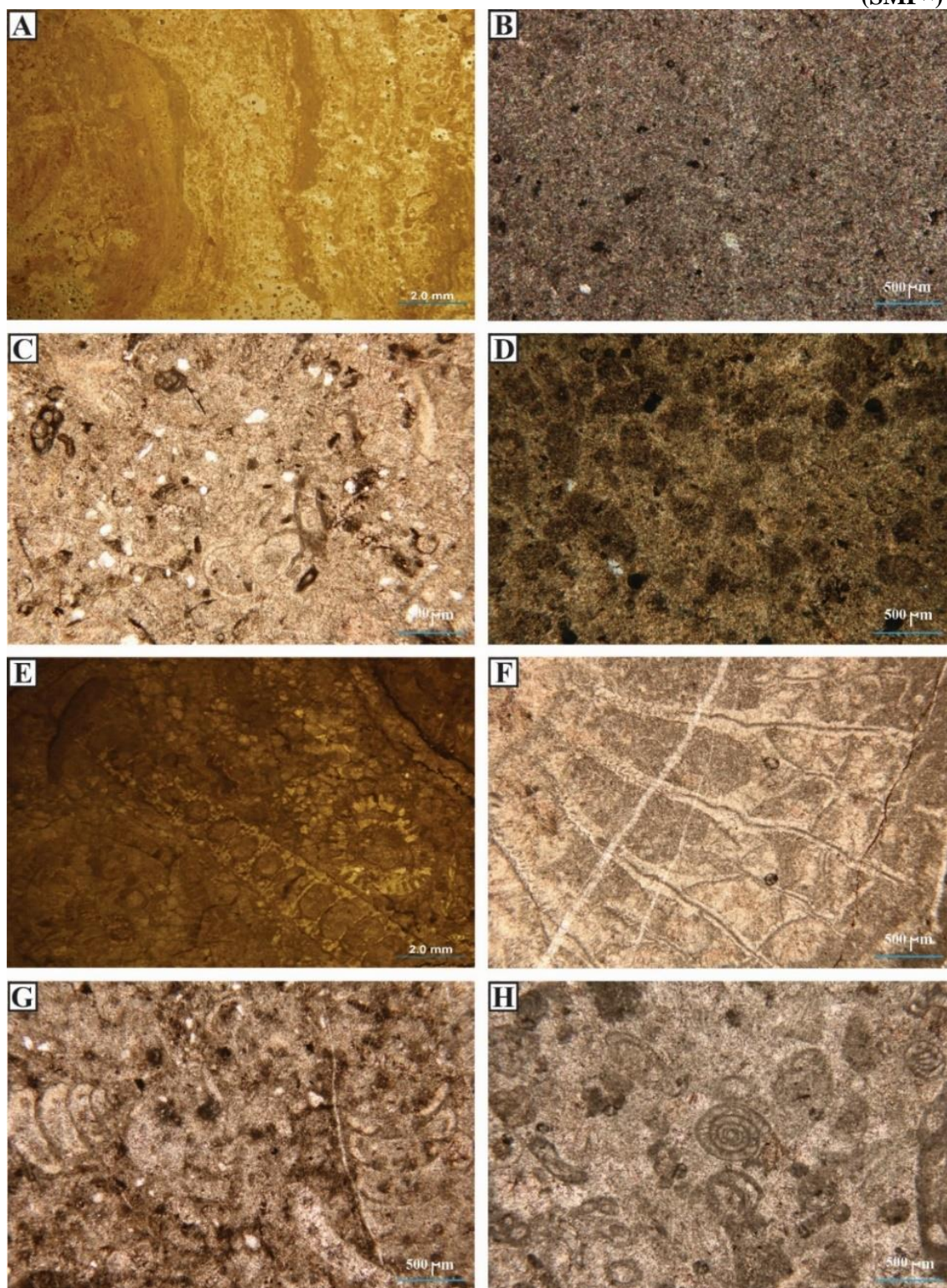
۴-۵- دولومیت نوع چهارم (IV): دولومیت‌های درشت بلور حفره پر کن (سیمان‌های دولومیتی) (Coarsely Crystalline Planar-e (Dolomite Cement))

این نوع دولومیت از بلورهای شفاف، دانه درشت و اغلب شکل‌دار (یوهدرال) با مرزهای مسطح تشکیل گردیده و به صورت

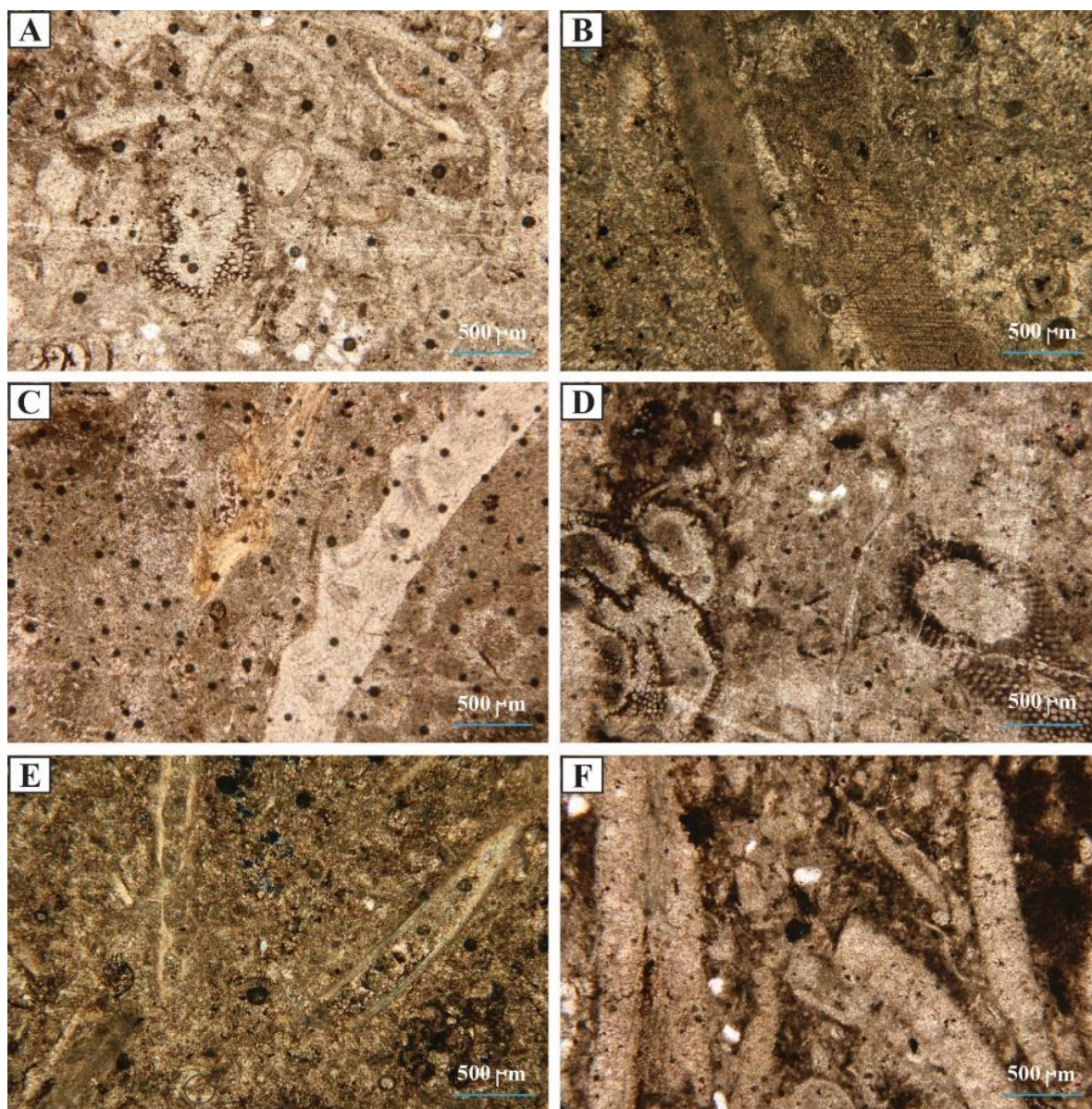
سیمان حفره پر کن (planar-c) فضاهاى کوچک و بزرگ (voids and vugs) و شکستگی‌ها را پر نموده است (شکل ۷، E و F). اما در معدود مواردی، این نوع سیمان‌های دولومیتی دارای مرزهای مسطح نیمه شکل دار (planar-s) می‌باشند. سیمان‌های دولومیتی با مرزهای مسطح یوهدرال (planar-e) تا حدود زیادی باعث پر نمودن فضاها و شکستگی‌ها و در نتیجه کاهش تخلخل گردیده و به نظر می‌رسد که محصول مراحل آخر فرآیندهای دیاژنزی باشند. اندازه بلورهای این سیمان‌های دولومیتی متفاوت بوده (بین ۲۰۰ تا بیش از ۵۰۰ میکرون) و اغلب بستگی به اندازه فضاهاى موجود دارد [۱]. اندازه این بلورها از حاشیه به طرف مرکز حفره افزایش می‌یابد. هیچ نوع اشکال جانیشینی در این نوع دولومیت مشاهده نشده است. از ویژگی این نوع دولومیت‌ها رنگ شیری سفید آن‌ها، خاموشی موحی، عدم وجود اینکلوزیون و در بعضی موارد داشتن گوشه‌های رومبوئدری می‌باشد. در بسیاری از نمونه‌های دولومیتی حفرات و فضاهاى بین بلوری توسط کلسیت‌های اسپاری دانه درشت در مراحل آخر فرآیندهای دیاژنزی پر شده است. این نوع دولومیت اغلب آهن‌دار بوده و مشخصه مهم آن داشتن بلورهایی بزرگ با سطوح بلورین و کلیواژهای انحنادار است و در دماهای بالاتر از ۵۰°C تشکیل می‌شوند [۱]. این نوع سیمان در دولومیت‌های سازند جمال در برش چاه‌ریسه به علت برخورداری از خاموشی موحی و ماهیت پرکننده بودن حفرات از نوع زین اسبی می‌باشد. منشأ سیال این نوع دولومیت احتمالاً شورابه‌های حوضه‌ای غنی از منیزیم در طی دفن می‌باشند.

جدول ۱- ریزرخساره‌های سازند جمال و تطابق با کمربندهای مدل رخساره‌ای ویلسون و ریزرخساره فلوگل

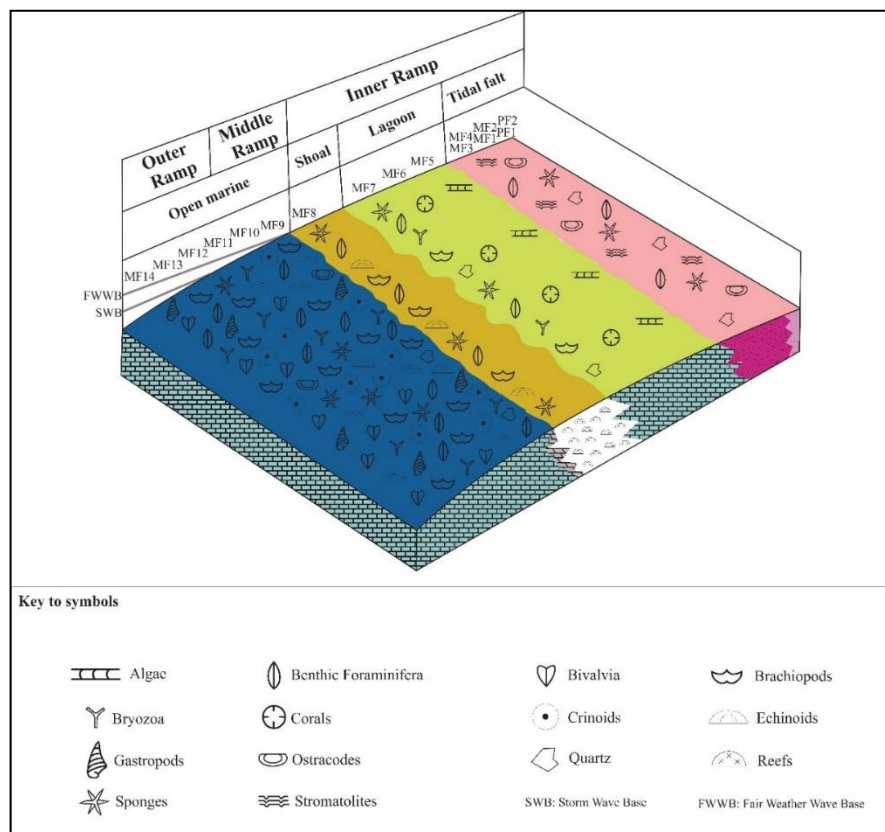
Number	Petrofacies and Microfacies Type	Depositional Environment	Wilson Model (Facies Belt), (۱۹۷۵)	Flugel RMF, (۲۰۱۰)
۱	PF ^۱ : Siltstone	Intertidal	-	-
۲	PF ^۲ : Quartzarenite	Intertidal	-	-
۳	MF ^۱ : Stromatolite Boundstone	Lagoon	۸	RMF ^{۱۲} (SMF ^۷)
۴	MF ^۲ : Dolomudstone	Intertidal	۹	RMF ^{۲۲} (SMF ^{۱۹})
۵	MF ^۳ : Bioclast Wackestone	Lagoon	۸	RMF ^{۱۸}
۶	MF ^۴ : Peloid Bioclast Wackestone	Lagoon	۸	RMF ^{۱۷} (SMF ^{۱۸})
۷	MF ^۵ : Dasycladacean Rudstone	Lagoon	۸	RMF ^{۲۸}
۸	MF ^۶ : Coral Floatstone	Lagoon	۸	RMF ^{۲۸}
۹	MF ^۷ : Benthic Foraminifera Bioclast Wackestone	Lagoon	۸	RMF ^{۲۰}
۱۰	MF ^۸ : Fusulinid Bioclast Grainstone	Shoal	۶	RMF ^{۲۶}
۱۱	MF ^۹ : Brachiopod Benthic Foraminifera Bioclast Packstone	Open Marine	۷	RMF ^۷ (SMF ^{۱۰})
۱۲	MF ^{۱۰} : Brachiopod Echinoid Bioclast Wackestone-Packstone	Open Marine	۷	RMF ^۹ (SMF ^۵)
۱۳	MF ^{۱۱} : Brachiopod Bioclast Wackestone	Open Marine	۷	RMF ^۹ (SMF ^۵)
۱۴	MF ^{۱۲} : Sponge Bioclast Wackestone	Open Marine	۷	RMF ^۹ (SMF ^۵)
۱۵	MF ^{۱۳} : Bryozoan Bioclast Wackestone	Open Marine	۷	RMF ^۳ (SMF ^۸)



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی ریزرخساره‌های سازند جمال در برش مورد مطالعه: A: پتروفاسیس (PF^۱ سیلتستون، B: پتروفاسیس (PF^۲) کوارتزآرنایت، C: ریزرخساره (MF^۱ استروماتولیت باندستون (نمونه ۸۰) B)، D: ریزرخساره (MF^۲ دولومادستون، E: ریزرخساره (MF^۳) بایوکلیست وکستون، F: ریزرخساره (MF^۴) پلوئید بایوکلیست وکستون، G: ریزرخساره (MF^۵) داسی کلاداسه رودستون (نمونه ۳۴.۲)، H: ریزرخساره (MF^۶) کورال فلوئستون.



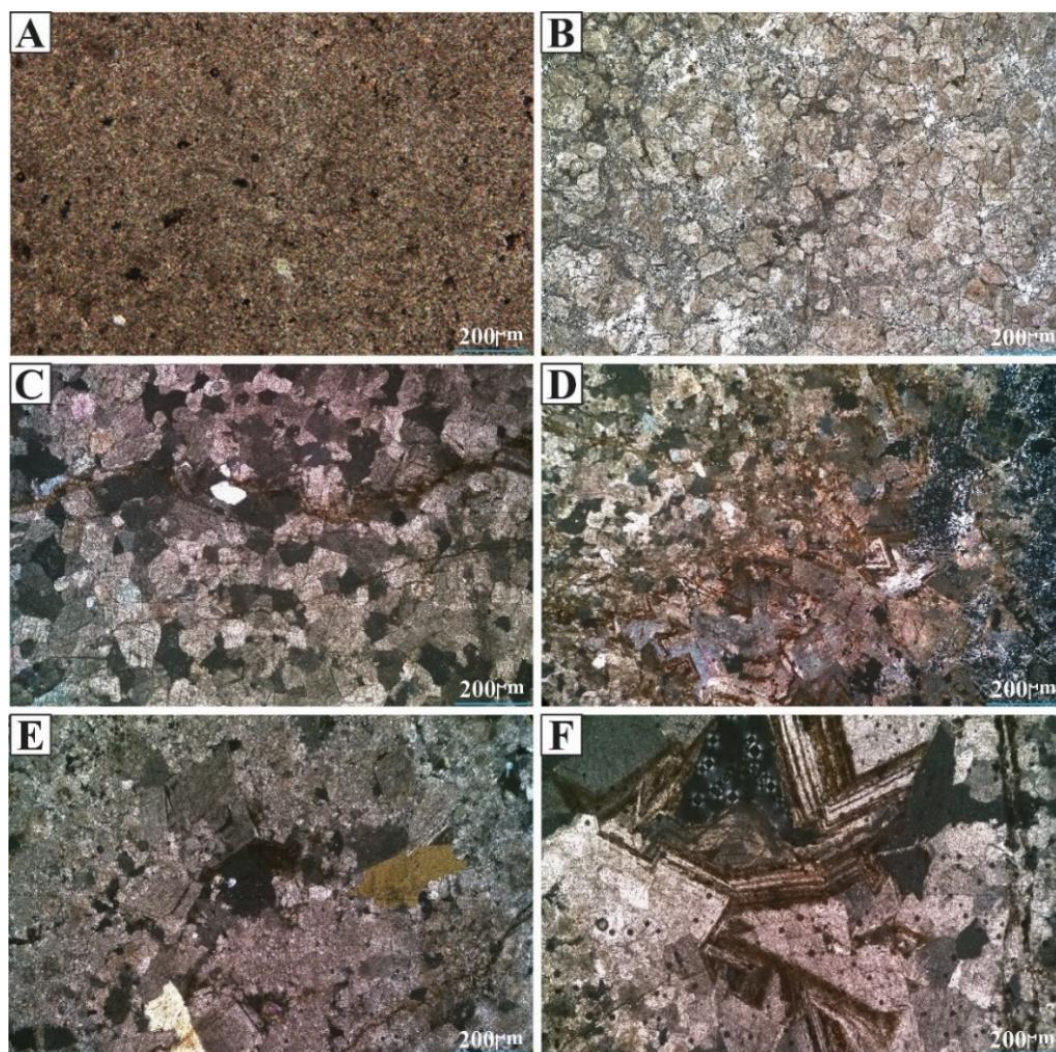
شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی ریزرخساره‌های سازند جمال در برش مورد مطالعه: **A:** ریزرخساره MF^۷ بتتیک فرامینیفر بایوکلست وکستون (نمونه ۱۲۶)، **B:** ریزرخساره MF^۸ فوزولین بایوکلست گریستون (نمونه ۸۲)، **C:** ریزرخساره MF^۹ براکیوپود بتتیک فرامینیفر بایوکلست پکستون (نمونه ۶۲)، **D:** ریزرخساره MF^{۱۰} براکیوپود اکتیوئید بایوکلست وکستون- پکستون (نمونه ۵۶)، **E:** ریزرخساره MF^{۱۱} براکیوپود بایوکلست وکستون (نمونه ۱۱۸)، **F:** ریزرخساره MF^{۱۲} اسفنج بایوکلست وکستون، **G:** ریزرخساره MF^{۱۳} بریزوئر بایوکلست وکستون (نمونه ۷۰)، **H:** ریزرخساره MF^{۱۴} دوکفه‌ای بایوکلست وکستون (نمونه ۶۲).



شکل ۶- مدل رسوبی رمپ کربناته سازند جمال در برش مورد مطالعه.

جدول ۲- انواع دولومیت‌های بررسی شده در سازند جمال

Number	Dolomite Type
۱	Very Fine to Finely Crystalline Dolomite (I)
۲	Medium Crystalline Dolomite (II)
۳	Medium-Coarsely Crystalline Dolomite (III)
۴	Coarsely Crystalline Planar-e (Dolomite Cement) (IV)



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی انواع دولومیت‌های سازند جمال در برش چاه‌ریسه. **A:** دولومیت بسیار ریزبلور تا ریزبلور (نوع یک) **B:** دولومیت متوسط بلور (نوع دوم). مرزهای این دولومیت‌ها به صورت مشخص و شکل‌دار است. **C:** دولومیت متوسط بلور تا درشت بلور (نوع سوم). مرزهای بلوری این دولومیت‌ها مشخص و نیمه شکل‌دار می‌باشد. **D:** دولومیت متوسط بلور تا درشت بلور (نوع سوم). مراحل رشد و تکامل بلورهای دولومیت‌ها با حالت زون بندی به خوبی قابل مشاهده بوده و در آن هماتیت نیز وجود دارد. **E:** دولومیت درشت بلور (نوع چهار). **F:** دولومیت درشت بلور (نوع چهارم). دولومیت شکل‌دار با مرز بلوری مشخص (Uhedral) و مرزهای چهاروجهی که مراحل رشد و تکامل بلوری را به خوبی نشان داده است.

۶- ژئوشیمی سنگ آهک‌ها

در این مطالعه ژئوشیمی عناصر اصلی و فرعی برای پی بردن به شیمی آب در زمان رسوبگذاری واحدها و شرایط محیطی حاکم بر آن‌ها و همچنین شرایط پس از رسوبگذاری انجام شده است. در زیر به نتایج آنالیز عنصری پرداخته می‌شود.

کلسیم (Ca): مقادیر مربوط به عنصر کلسیم (Ca) در نمونه‌های آهکی سازند جمال از ۴۱۱۲۲۲ ppm تا ۳۳۹۳۱۸ ppm در تغییر بوده و میانگین آن ۳۸۸۲۴۸ ppm است (جدول ۳).

منیزیم (Mg): مقادیر آنالیز شده برای عنصر منیزیم (Mg) در نمونه‌های سنگ آهک از ۱۳۱۴۰ ppm تا ۲۱۸۲ ppm تغییر کرده و میانگین آن ۵۴۵۶۷۹ ppm می‌باشد (جدول ۳). افزایش در میزان عنصر منیزیم به سبب افزایش دما انجام می‌شود، بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که تغییرات دمایی در محیط کنترل کننده تغییرات موجود در مقادیر منیزیم است. نسبت

Mg:Ca در پوسته‌های کلسیتی فرامینفرهای بتتیک و پلاژیک برای تعیین آب دربرگیرنده آن‌ها کاربرد دارد به گونه‌ای که افزایش در دما سبب افزایش در منیزیم آن (پوسته یا اسکلت) می‌شود [۱۰].

استرانسیم (Sr): مقادیر مربوط به عنصر استرانسیم سازند جمال در نمونه‌های آهکی از ۵۵۲ ppm تا ۲۱۲ ppm در تغییر بوده و میانگین آن ۳۷۸/۶ ppm می‌باشد (جدول ۱). میزان استرانسیم در رسوبات عهد حاضر نسبت به سنگ آهک‌ها و دولومیت‌های قدیمه دارای مقادیر بیشتری می‌باشد. آراگونیت‌های دریای کم‌عمق عهد حاضر دارای مقادیر بالای استرانسیم می‌باشند (تا ۱۰۰۰۰ ppm) [۱]. در حالیکه کلسیت دارای مقادیر کمتر استرانسیم است. وجود استرانسیم در کربنات‌ها به کانی‌شناسی اولیه، دمای آب، شوری، اثرات زیستی و میانگین میزان نسبت **Ca/Sr** در آب دریا بستگی دارد [۱۰]. بیشتر سنگ‌های آهکی دیرینه فقط حاوی چند صد پی‌پی‌ام استرانسیم بوده و عمدتاً علت آن از دست دادن استرانسیم در طی فرآیندهای نئومورفیکی، از قبیل تغییر آراگونیت به کلسیت، فرآیندهای تکرارشونده انحلال-رسوبگذاری و تبلور مجدد می‌باشد که مسبب حذف دیازنتیکی پیش‌رونده **Sr** در طول زمان است [۱۰]. میزان استرانسیم در طول دیازنز در آب‌های متئوریک کاهش می‌یابد اما مقدار موجود در کلسیت کم‌منیزیم دیازنتیکی (dLMC) به نسبت سنگ - آب بستگی دارد. بیشتر سنگ آهک‌های دیرینه دارای کمترین مقادیر استرانسیم و کمتر از ۲۰۰۰ ppm بوده که با مقادیر مشاهده شده در سازند جمال از برش چاه‌ریسه مطابقت می‌کند. مقایسه نمونه‌های آهکی سازند جمال با محدوده آراگونیت‌های حاره‌ای عهد حاضر [۲۰] و کربنات‌های معتدله عهد حاضر [۲۶] حاکی از ترکیب کانی‌شناسی آراگونیتی می‌باشد (شکل ۱۰).

منگنز (Mn): مقادیر موجود برای عنصر منگنز در نمونه‌های آهکی سازند جمال از ۲۹۷/۷ ppm تا ۷۹/۲ ppm تغییر کرده و دارای میانگین ۱۶۹/۴۸ ppm می‌باشد (جدول ۱؛ شکل ۱۰، A و B). وجود و یا تداخل عناصر آهن و منگنز در کلسیت کم‌منیزیم دیازنتیکی بستگی به شرایط اکسیداسیون و احیا (Eh) سیالی که از آن نهشته شده‌اند دارد به این علت که عناصر مذکور فقط تحت شرایط احیا (Fe^{2+} و Mn^{2+}) می‌توانند حضور داشته باشند. آب‌های موجود در زون وادوز (بالای ستون آب شیرین) تحت شرایط اکسیدان قرار داشته و کلسیت کم‌منیزیم دیازنتیکی (dLMC) فاقد آهن و حاوی مقادیر بسیار کم منگنز خواهد بود [۱۵]. در حالیکه بسیاری از سیالات متئوریک و دفنی (زیر ستون آب شیرین) تحت شرایط احیایی قرار داشته و حاوی آهن و غنی از منگنز می‌باشد که مقادیر مشاهده شده برای آهن و منگنز سازند جمال تشکیل در شرایط احیایی متوریکی و یا دفنی را برای نهشته‌های آن نشان می‌دهند.

آهن (Fe): مقادیر مربوط به عنصر آهن در نمونه‌های آهکی سازند جمال از ۶۱۰۲ ppm تا ۱۰۸۱ ppm در حال تغییر بوده و میانگین آن ۲۵۸۰ ppm است. مقادیر بالای عنصر آهن و همچنین افزایش مقادیر آهن با افزایش مقادیر منگنز در نهشته‌های آهکی سازند جمال در برش چاه‌ریسه حاکی از تأثیر فرآیندهای دیازنزی می‌باشد (شکل ۱۰، D). تأثیر فرآیندهای دیازنتیکی بر روی سنگ‌های کربناته موجب می‌شود تا شناسایی ترکیب کانی‌شناسی اولیه تنها با استفاده از بررسی‌های ژئوشیمیایی عنصری (به ویژه عناصر فرعی) و ایزوتوپی (کربن و اکسیژن) امکان‌پذیر باشد.

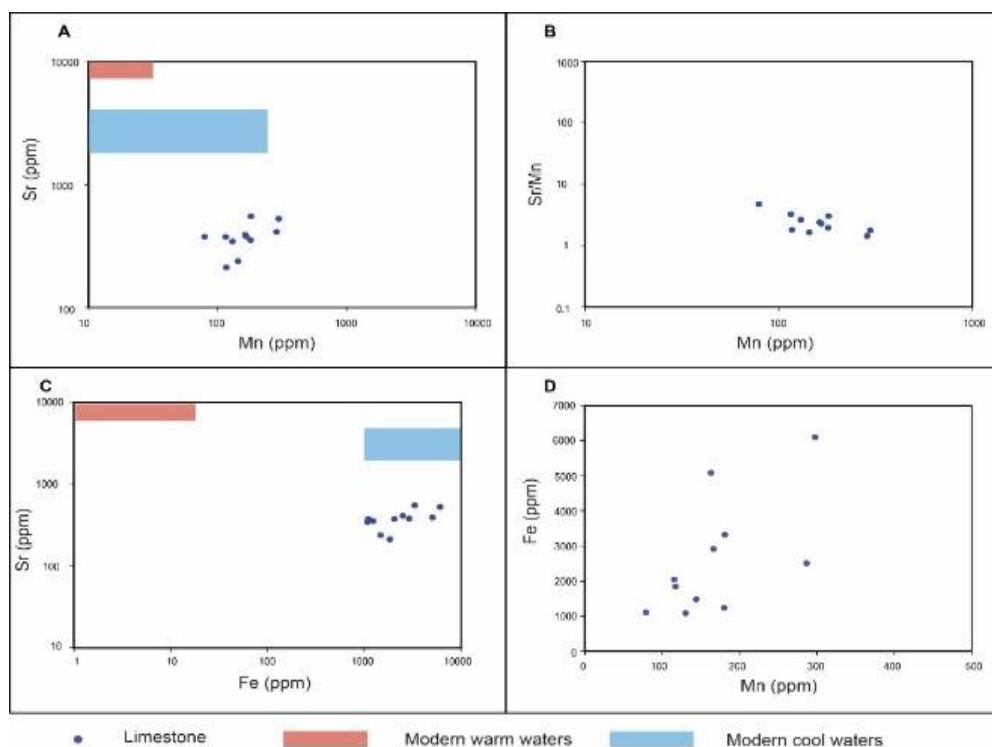
۱-۶- نسبت عناصر استرانسیم به منگنز به عنصر منگنز (Sr/Mn:Mn):

از نسبت‌های این عناصر در تعیین میزان دگرسانی استفاده می‌شود [۲۶]. بنابراین هرچه مقدار آن از ۵۰ کمتر باشد میزان دگرسانی بیشتر خواهد بود اما اگر مقدار آن بیشتر از ۵۰ باشد میزان تحمل دگرسانی کمتر است. فرآیند دگرسانی مربوط به مراحل مختلف دیازنز بوده که در شرایط متفاوت سبب تغییرات متفاوت در ویژگی رسوبات می‌شود. با انحلال آراگونیت و کلسیت پرمینزیم (HMC) و تبدیل آن‌ها به کلسیت کم‌منیزیم (LMC)، مقدار استرانسیم کاهش و میزان منگنز افزایش خواهد یافت [۱]. براین اساس افزایش نسبت **Mn** به **Sr** در نمونه‌های آهکی سازند جمال حاکی از انحلال نسبی در طی دیازنز است (شکل ۱۰، B). با توجه به توضیحات فوق و همچنین مقادیر

موجود در نمودار می‌توان نتیجه گرفت که اثر دگرسانی بر روی نهشته‌های سازند جمال به طور چشمگیری حادث بوده که ناشی از اثر مراحل مختلف دیاژنز می‌باشد.

جدول ۳- مقادیر عناصر اصلی و فرعی و ایزوتوپ‌های کربن و اکسیژن نمونه‌های آهکی و دولومیتی سازند جمال در برش چاه‌ریسه.

Sample NO.	Lithology	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Sr (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	$\delta^{13}C$ VPDB	$\delta^{18}O$ VPDB	Dolomite Type
Z۳۸	Limestone	۳۳۹۳۱۸	۶۷۵۳	۲۱۲	۱۱۷.۱	۱۸۴۲	-۰.۴۰	-۷.۴۵	-
Z۴۲	Limestone	۳۹۹۳۸۱	۳۵۱۲	۳۷۷	۷۹.۲	۱۱۰۶	۳.۶۳	-۸.۴۶	-
Z۴۴	Limestone	۳۷۸۰۶۷	۵۱۴۱	۴۱۲	۲۸۶.۵	۲۵۰۳	۲.۷۳	-۸.۶۸	-
Z۵۴	Limestone	۳۹۱۴۰۹	۷۰۹۰	۳۷۶	۱۱۵.۷	۲۰۴۶	۳.۷۴	-۷.۹۲	-
Z۵۸	Limestone	۳۹۶۸۵۳	۲۱۸۲	۳۵۴	۱۸۰.۱	۱۲۳۶	۳.۰۰	-۸.۳۷	-
Z۸۶	Limestone	۳۹۸۴۰۴	۱۳۱۴۰	۳۴۵	۱۳۰.۳	۱۰۸۱	۳.۳۹	-۹.۸۸	-
Z۱۱۰	Limestone	۴۱۱۲۲۲	۳۸۱۷	۳۹۲	۱۶۳.۱	۵۰۸۴	۴.۱۳	-۷.۴۳	-
Z۱۲۴	Limestone	۳۷۹۳۵۱	۴۹۱۷	۵۲۸	۲۹۷.۷	۶۱۰۲	۳.۶۰	-۷.۱۳	-
Z۱۲۶	Limestone	۳۷۸۱۴۳	۴۶۵۲	۵۵۲	۱۸۱	۳۳۲۴	۳.۱۳	-۶.۸۲	-
Z۸۰B	Dol. Limestone	۳۶۸۰۲۴	۵۰۴۲۰	۳۸۰	۱۶۶.۱	۲۹۱۴	-۱.۷۰	-۵.۳۲	I
Z۷۲	Dolomite	۲۷۰۴۲۰	۱۰۵۷۶۶	۲۰۹	۱۹۶.۸	۲۸۹۵	۳.۹۶	-۸.۷۱	III
Z۲۳۲	Limestone	۴۱۰۳۳۲	۳۳۶۵	۲۳۸	۱۴۴.۱	۱۴۷۶	۲.۵۳	-۹.۰۹	-
Z۱۴۰	Dolomite	۲۱۹۲۷۸	۱۳۱۳۴۵	۱۱۱	۱۸۸.۱	۲۴۳۱	۳.۰۵	-۳.۲۳	III
Z۱۴۲	Dolomite	۲۱۸۸۵۳	۱۳۳۲۱۳	۱۲۴	۷۲.۲	۱۰۰۷	۲.۸۲	-۱.۵۴	III
Z۱۵۸	Dolomite	۲۱۵۳۲۳	۱۳۲۱۴۵	۱۰۹	۹۴.۲	۲۴۲۴	۳.۱۵	-۱.۶۰	III
Z۱۶۲	Dolomite	۲۰۶۹۳۷	۱۲۸۴۵۰	۱۰۱	۵۳.۵	۱۱۷۶	۲.۷۹	-۱.۵۹	IV
Z۱۶۲ Vein	Dolomite	ND	ND	ND	ND	ND	۲.۷۹	-۲.۰۷	IV
Z۱۶۴	Dolomite	۲۲۷۳۹۸	۱۴۷۰۴۲	۱۰۰	۸۵.۵	۱۷۹۱	۳.۰۳	-۱.۸۶	IV
Z۱۶۶	Dolomite	۲۲۹۴۷۷	۱۴۹۳۵۶	۱۱۱	۱۵۴.۳	۱۴۲۳	۲.۲۶	-۱.۱۲	II
Z۱۶۸	Dolomite	۲۳۵۲۱۸	۱۴۹۲۷۰	۹۸	۱۴۵.۴	۲۰۱۸	۲.۲۲	-۱.۸۸	II
Z۱۷۲	Dolomite	۲۲۷۰۷۷	۱۴۱۵۱۴	۹۸	۱۲۹.۱	۲۳۹۴	۳.۱۷	-۱.۴۷	III
Z۱۷۴	Dolomite	۲۲۶۲۷۹	۱۳۳۳۶۴	۱۲۲	۱۶۳	۲۰۸۶	۳.۵۷	-۵.۵۶	II
Z۱۸۸	Dolomite	۲۲۲۳۷۸	۱۳۳۵۴۱	۱۱۱	۲۰۹.۲	۱۰۸۶	۲.۵۷	-۱.۴۳	I
Z۱۹۱	Dolomite	۲۲۰۹۵۱	۱۴۲۴۳۴	۸۴	۲۷۴.۷	۲۲۷۰	۱.۶۱	-۴.۵۶	III
Z۱۹۴	Dolomite	۲۱۲۰۳۲	۱۲۸۶۴۵	۱۰۶	۲۰۷.۵	۱۱۵۶	۱.۶۶	-۱.۰۲	III
Z۱۹۶	Dolomite	۲۳۵۷۸۷	۱۴۰۸۸۷	۹۹	۲۰۰.۹	۱۴۸۷	۰.۷۰	-۵.۵۲	III
Z۲۰۱	Dolomite	۲۲۰۰۰۴	۱۳۹۹۲۷	۱۰۷	۳۶۲.۱	۳۲۷۹	ND	ND	I
Z۲۲۱	Dolomite	۲۲۲۵۴۹	۱۳۴۵۲۰	۹۰	۲۱۸.۶	۲۵۶۸	۲.۹۰	-۲.۰۰	I
Z۲۲۴	Dolomite	۲۱۲۰۶۸	۱۴۱۳۳۲	۷۸	۲۰۳.۸	۲۶۶۸	۲.۷۰	-۱.۹۴	I
Z۲۲۸	Dol. Limestone	۲۹۴۳۵۷	۲۱۶۸	۹۱	۱۲۸.۱	۹۳۷	۱.۴۳	-۱۰.۲۶	II
Z۲۲۸ Vein	Dolomite	ND	ND	ND	ND	ND	۰.۷۲	-۸.۳۶	II
Z۲۴۰	Dolomite	۲۲۸۳۵۵	۱۳۳۰۲۹	۱۱۹	۴۵۸	۴۲۶۸	۳.۵۲	-۷.۵۶	I



شکل ۱۰- نمودار نسبت‌های عناصر فرعی استرانسیم (Sr)، منگنز (Mn) و آهن (Fe) نهشته‌های پرمین سازند جمال در برش چاه‌ریسه و مقایسه با کربنات‌های مناطق گرم حاره‌ای و کربنات‌های مناطق سرد معتدله عهد حاضر. A: مقادیر عنصر استرانسیم در مقابل عنصر منگنز. B: مقادیر مربوط به نسبت عناصر استرانسیم به منگنز در مقابل عنصر منگنز. C: مقادیر مربوط به عنصر استرانسیم در مقابل عنصر آهن، با توجه به این نمودار نیز کربنات‌های سازند جمال تحت شرایط متفاوتی نسبت به کربنات‌های عهد حاضر تشکیل شده‌اند. D: مقادیر مربوط به عنصر آهن در مقابل عنصر منگنز

۲-۶- مطالعات ژئوشیمی ایزوتوپی کربن (^{13}C) و اکسیژن (^{18}O) نمونه‌های آهکی

با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن می‌توان اطلاعات با ارزشی در ارتباط با روند دیازنز در محیط‌های دیاژنتیکی و تفکیک کربنات‌های نواحی آب و هوایی مختلف را بررسی کرد [۲۷]. ژئوشیمی ایزوتوپی پایدار سنگ‌های کربناته شامل اندازه‌گیری نسبت‌های $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ و $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ و مقایسه آن‌ها با نسبت‌های استاندارد PDB (بلمنیت) برای سنگ‌های کربناته و SMOW (استاندارد میانگین آب اقیانوس) برای آب‌ها و بعضی از کربنات‌ها و سنگ‌های سیلیکاته می‌باشد. نتایج ایزوتوپی به عنوان مقادیر دلتا (δ) بین نسبت ایزوتوپی نمونه‌های آنالیز شده و مقادیر استاندارد ارائه شده است. مقادیر ایزوتوپی کربن ($\delta^{13}\text{C}$) نمونه‌های آهکی از ۰/۴ در هزار تا ۴/۱۳ در هزار در تغییر بوده و دارای میانگین ۳/۰۲ در هزار می‌باشد (جدول ۳). مقادیر مربوط به ایزوتوپ اکسیژن نیز برای آهک‌ها از ۹/۸۸- پر میل تا ۶/۸۲- در هزار تغییر کرده و میانگین آن ۸/۱۲- پر میل است (جدول ۳).

۱-۲-۶- ایزوتوپ کربن در مقابل استرانسیم ($\delta^{13}\text{C}/\text{Sr}$):

از مقایسه مقادیر ایزوتوپ کربن در برابر عناصر فرعی می‌توان جهت تعیین ترکیب کانی‌شناسی اولیه نهشته‌های کربناته اظهار نظر نمود. مقادیر استرانسیم با سبک شدن ایزوتوپ کربن به طور نسبی کاهش پیدا می‌کند. مقایسه نمونه‌های سازند جمال با محدوده آراگونیت‌های عهد حاضر و کربنات‌های کلسیتی مناطق معتدله بیانگر نزدیکی اکثر نمونه‌ها به محدوده کربنات‌های آراگونیتی آب گرم است و می‌تواند تأییدکننده ترکیب کانی‌شناسی آراگونیتی برای این سازند باشد. سبک شدن برخی از نمونه‌ها حاکی از تحت تأثیر قرار گرفتن توسط آب‌های متاوریکی می‌باشد (شکل ۱۱، A).

۶-۲-۲- ایزوتوپ کربن در مقابل منگنز ($\delta^{13}\text{C}/\text{Mn}$):

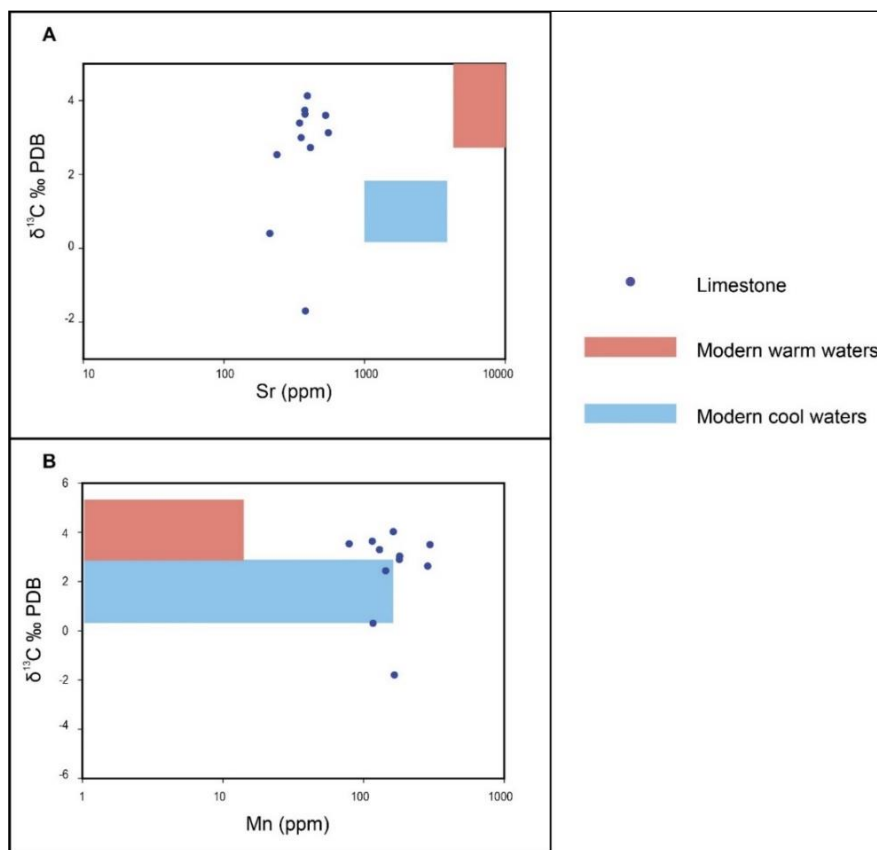
نمونه‌های آهکی سازند جمال در مجاورت محدوده کربنات‌های آراگونیتی آب‌های سرد قرار گرفته است و تأییدکننده ترکیب کانی‌شناسی آراگونیتی برای این سازند می‌باشد. برخی از نمونه‌ها به دلیل عملکرد دیاژنز غیردریایی دارای مقادیر ایزوتوپ کربن سبک‌تر و منفی نیز می‌باشند (شکل ۱۱، B).

۶-۲-۳- ایزوتوپ اکسیژن در مقابل استرانسیم ($\delta^{18}\text{O}/\text{Sr}$):

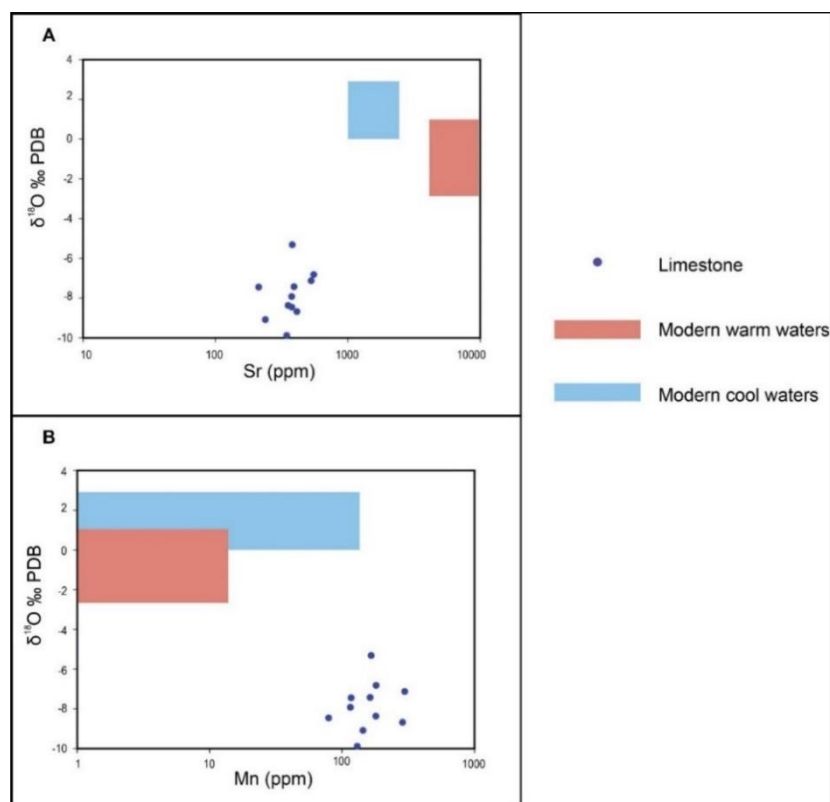
مقادیر ایزوتوپ اکسیژن و عنصر استرانسیم نمونه‌های آهکی سازند جمال با نمونه‌های گل کربناته مناطق حاره‌ای و معتدله در شکل ۱۲، A مقایسه شده است. قرارگیری اکثر نمونه‌های سازند جمال به دور از دو محدوده بیانگر عملکرد فرآیندهای دیاژنزی غیردریایی بر روی آن‌ها می‌باشد.

۶-۲-۴- ایزوتوپ اکسیژن در مقابل منگنز ($\delta^{18}\text{O}/\text{Mn}$):

اکثر نمونه‌های آهکی سازند جمال مقادیر ایزوتوپ اکسیژن سبک در مقایسه با محدوده کل کربنات‌های مناطق حاره‌ای و معتدله نشان می‌دهند (شکل ۱۲، B). این نحوه قرارگیری نمونه‌ها نیز حاکی از عملکرد دیاژنز غیردریایی بر روی نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۱۱- نمودارهای عناصر فرعی در مقابل ایزوتوپ کربن نهشته‌های پرمین سازند جمال در برش چاه‌ریسه و مقایسه با کربنات‌های آب‌های گرم و سرد عهد حاضر. A: پراکندگی مقادیر عنصر استرانسیم در مقابل ایزوتوپ B: پراکندگی مقادیر عنصر منگنز



شکل ۱۲- نمودارهای عناصر فرعی در مقابل ایزوتوپ اکسیژن نهشته‌های پرمین سازند جمال در برش چاه ریسه و مقایسه با کربنات‌های آب‌های گرم و سرد عهد حاضر. A: پراکندگی مقادیر عنصر استرانسیم در مقابل ایزوتوپ اکسیژن. B: پراکندگی مقادیر عنصر منگنز در مقابل ایزوتوپ اکسیژن.

۷- سیستم دیاژنزی (Diagenetic System)

بر اساس سیستم دیاژنزی، روند تغییرات عناصر اصلی و فرعی و همچنین ایزوتوپی (کربن و اکسیژن) در مقابل یکدیگر می‌توان تغییرات دیاژنتیکی را در سنگ‌های آهکی بررسی نمود [۱].

۷-۱- نسبت عناصر استرانسیم به کلسیم (Sr/Ca)

بر اساس نسبت عناصری نظیر نسبت عنصر استرانسیم به کلسیم می‌توان به سیستم دیاژنتیکی حاکم بر رسوبات از لحاظ باز و یا بسته بودن، تعیین محیط‌های دیاژنزی و تفکیک نمونه‌های عهد حاضر و قدیمه پی برد [۹]. علاوه بر آن از این نسبت می‌توان در تعیین و تفکیک نمونه‌های با کانی‌شناسی کلسیت کم‌منیزیم (LMC)، کلسیت پرمنیزیم (HMC) و آراگونیت استفاده نمود (شکل ۱۳، A). روند دیاژنتیکی هر چقدر که بیشتر پیش رفته و بر روی نهشته‌ها اثر کند به همان اندازه سبب کاهش در مقادیر نسبت عناصر استرانسیم به کلسیم (Sr/Ca) می‌شود. با توجه به موارد فوق و نمودار مربوطه چنین نتیجه می‌شود که نهشته‌های سازند جمال تحت یک سیستم دیاژنزی نیمه بسته بوده و همچنین کانی‌شناسی اولیه مربوط به آن آراگونیت می‌باشد. بنابراین با توجه به مقادیر عناصر استرانسیم و منگنز در نهشته‌های سازند جمال و همچنین نمودارهای مربوطه در شکل ۱۳ می‌توان چنین اظهار داشت که سیستم دیاژنتیکی اثرگذار بر روی سازند جمال در زمان تشکیل و یا پس از تشکیل آن نیمه بسته بوده (شکل ۱۳، B و C) و فرآیندهای مختلف مربوط به دیاژنز سبب کاهش آن‌ها شده است.

۲-۸- تغییرات ایزوتوپی

یکی از مفیدترین راه‌های توضیح ترکیب ایزوتوپی کربنات‌ها، بیان ارتباط بین مقادیر $\delta^{13}\text{C}$ و $\delta^{18}\text{O}$ بر روی نمودار می‌باشد. این یک روش سریع برای نمایش مقادیر و توضیح تغییرات در ترکیب ایزوتوپی کربنات‌ها است. در حالیکه مقادیر $\delta^{13}\text{C}$ به طور وسیعی در تعیین فرآیندهای آلی کاربرد دارد، کاربرد مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ علاوه بر تعیین مقادیر ایزوتوپی در آب دریا، در تعیین دمای آب دریا نیز مؤثر می‌باشد. با توجه به تغییرات این دو ایزوتوپ می‌توان روند و نوع محیط دیاژنتیکی غالب را تعیین نمود [۱]. نمونه‌های آهکی سازند جمال در داخل و نزدیکی محدوده نمونه‌های آهکی سازند جمال در شرق ایران مرکزی قرار گرفته است (شکل ۱۴). همچنین روند کلی نمونه‌های آهکی بیانگر سبک‌شدگی ایزوتوپ اکسیژن می‌باشد که تأییدکننده دیاژنز تدفینی می‌باشد. تعداد دو نمونه نیز دارای مقادیر ایزوتوپ کربن سبک و منفی می‌باشند که حاکی از عملکرد دیاژنز متئوریک بر روی آن‌ها نیز می‌باشد (شکل ۱۴).

۸- ژئوشیمی دولومیت‌ها

مطالعات ژئوشیمیایی عناصر اصلی و فرعی و مقادیر ایزوتوپ‌های کربن و اکسیژن در دولومیت‌ها برای درک ترکیب سیالات، شرایط اکسیداسیون و احیا و دمای دولومیتی شدن کاربرد دارد. در این پژوهش علاوه بر سنگ‌آهک‌ها، نمونه‌های دولومیتی که فراوانی بیشتر نیز دارند مورد آنالیز قرار گرفته‌اند (جدول ۳). همانطور که در بخش پتروگرافی مشخص گردید، بر مبنای درجه دولومیتی شدن سنگ آهک اولیه، اندازه و شکل بلورها و همچنین خصوصیات و بافت بلورها، چهار نوع دولومیت در سازند جمال شناسایی و تفکیک گردید. در این بخش نیز مشخصات ژئوشیمیایی هر کدام از دولومیت‌ها نیز در برخی از نمودارها مد نظر قرار گرفته است. نتایج آنالیز عنصری و ایزوتوپی این نمونه‌ها در ادامه شرح داده می‌شوند.

کلسیم (Ca): مقادیر مربوط به عنصر کلسیم در نمونه‌های دولومیتی سازند جمال از 3380.24 ppm تا 206937 ppm در تغییر بوده و میانگین آن $235638/25 \text{ ppm}$ می‌باشد (جدول ۱).

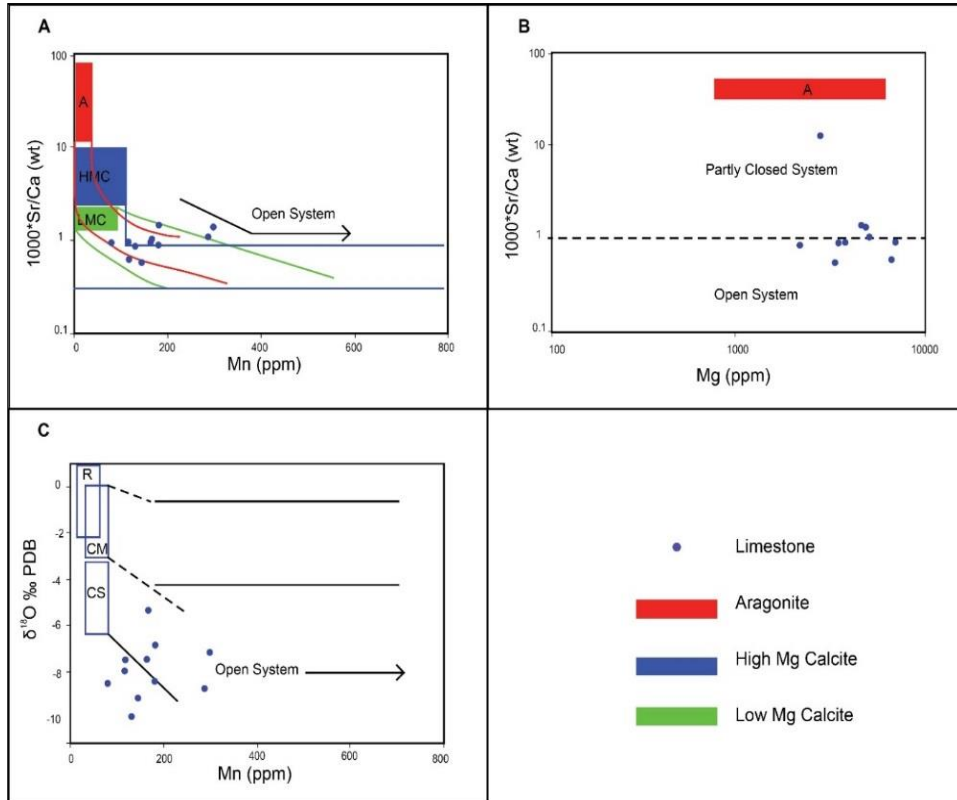
منیزیم (Mg): مقادیر مشاهده شده این عنصر برای نمونه‌های دولومیتی سازند جمال از 149356 ppm تا 2168 ppm در تغییر بوده و میانگین آن $124918/4 \text{ ppm}$ است (جدول ۱).

استرانسیم (Sr): مقادیر استرانسیم برای دولومیت‌های سازند جمال از 380 ppm تا 78 ppm تغییر کرده و دارای میانگین $122/4 \text{ ppm}$ است (جدول ۳).

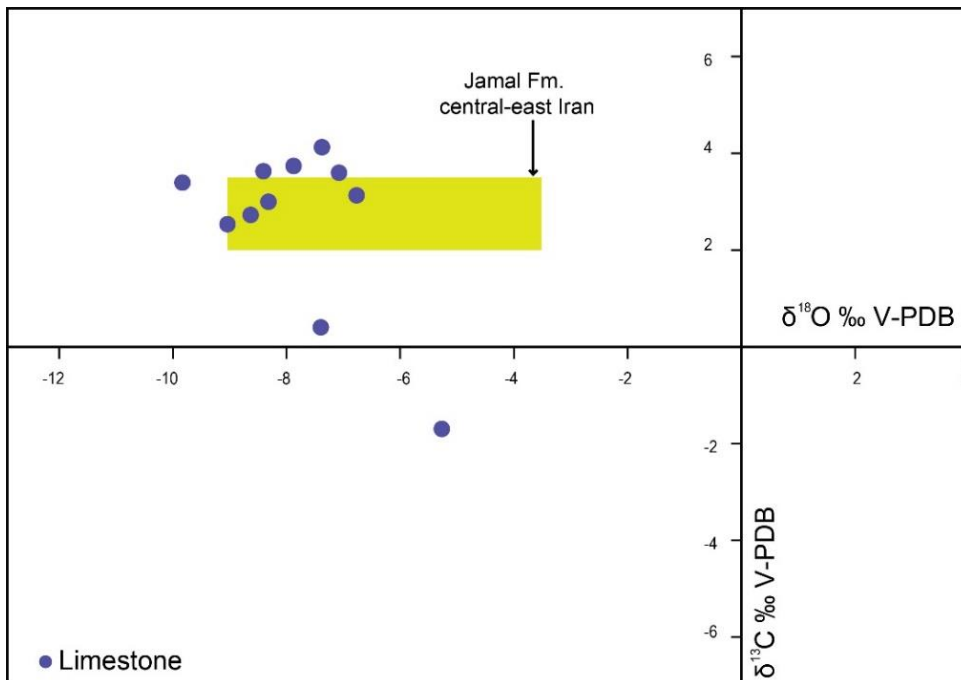
منگنز (Mn): مقادیر مربوط به عنصر منگنز دولومیت‌های سازند جمال از 458 ppm تا $53/5 \text{ ppm}$ تغییر می‌کند و میانگین مربوط به آن $185/555 \text{ ppm}$ می‌باشد (جدول ۱).

آهن (Fe): عنصر آهن در دولومیت‌های سازند جمال از 4268 ppm تا 937 ppm در تغییر بوده و دارای میانگین $2113/9 \text{ ppm}$ می‌باشد (شکل ۱۵، A).

در شکل ۱۵ مقادیر عناصر فرعی نمونه‌های دولومیتی و آهکی سازند جمال در مقابل یکدیگر قرار گرفته‌اند. به طور کلی دولومیت‌ها در مقایسه با سنگ آهک‌های این سازند از عنصر Mn غنی شده و مقدار عنصر Sr در آن‌ها کاهش یافته است. در مقابل Mn و Fe تمایز قابل توجهی در دولومیت‌ها و سنگ آهک‌ها نشان نمی‌دهد (شکل ۱۵). دامنه تغییرات ایزوتوپ‌های کربن و اکسیژن در نمونه‌های دولومیتی سازند جمال در شکل ۱۶ ارائه شده است. دولومیت‌های نوع اول (ریزبلور) در مقایسه با دولومیت‌های درشت‌بلور و رگه‌ای دارای مقادیر ایزوتوپ اکسیژن سنگین‌تری هستند که حاکی از تأثیر دیاژنز کمتر بر روی دولومیت‌های ریزبلور و افزایش عملکرد دیاژنز تدفینی با افزایش اندازه بلور دولومیت می‌باشد (شکل ۱۶).



شکل ۱۳- نمودارهای عناصر فرعی و ایزوتوپی نهشته‌های پرمین سازند جمال در برش چاه‌ریسه و تعیین سیستم دیاژنتیکی مربوط به آن‌ها. A: پراکندگی مقادیر عنصر منگنز در مقابل نسبت عناصر استرانسیم به کلسیم. B: پراکندگی مقادیر عنصر منیزیم در مقابل نسبت عناصر استرانسیم به کلسیم. C: پراکندگی مقادیر عنصر منگنز در مقابل ایزوتوپ اکسیژن.

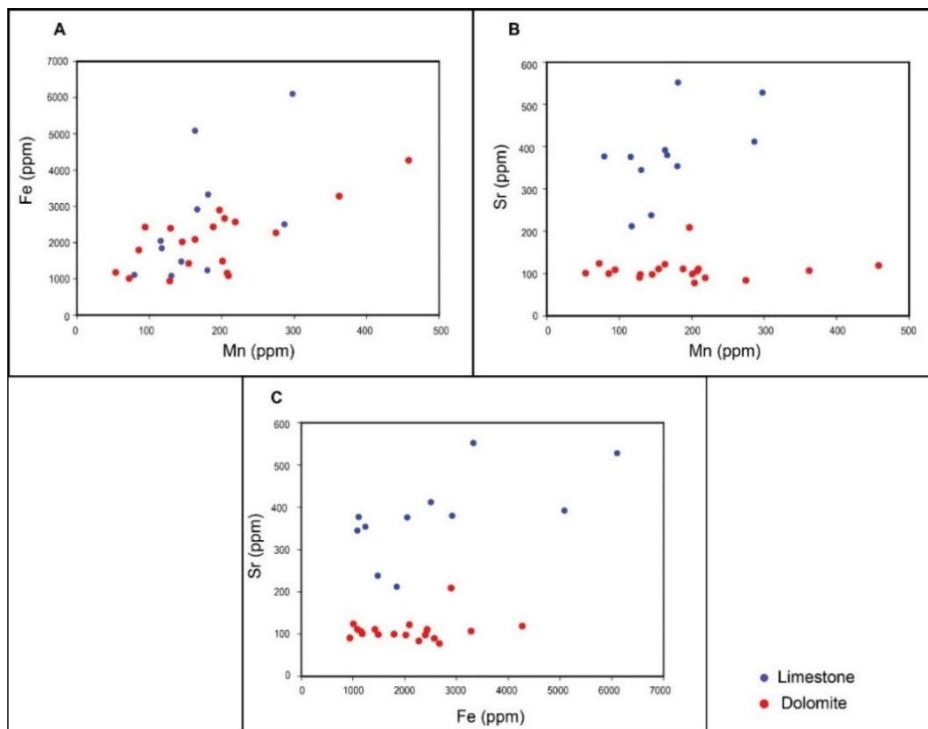


شکل ۱۴- ترسیم مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن نمونه‌های آهکی سازند جمال در برش چاه‌ریسه در مقابل یکدیگر (محدوده ایزوتوپی سازند جمال در شرق ایران مرکزی، اقتباس از [۷]).

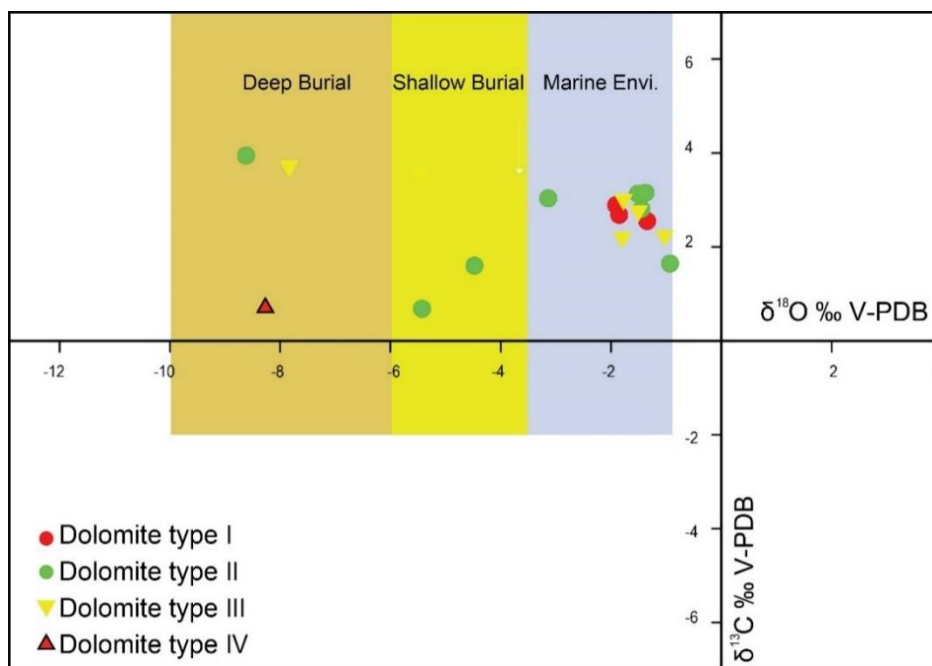
روند کلی تغییرات مقادیر ایزوتوپ کربن و اکسیژن در دولومیت‌های سازند جمال به صورت خط افقی احتمالاً نشان‌دهنده تأثیر دیاژنز عمدتاً دفنی بر روی نمونه‌ها می‌باشد به طوری که دولومیت‌های دانه‌درشت در دماهای بالاتر شکل گرفته‌اند (شکل ۱۶). با توجه به نمودار شکل ۱۶ مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن برای نمونه‌های دولومیتی حاکی از تشکیل آن‌ها در هر سه محیط دریایی، دفنی کم‌عمق و دفنی عمیق بوده که میزان نمونه‌ها در محیط دریایی بیشتر از همه می‌باشد. به عبارت دیگر بیشتر دولومیت‌های سازند جمال عمدتاً تحت شرایط دیاژنتیکی دریایی تشکیل شده‌اند. با توجه به نمودار شکل ۱۷ و مقادیر مشاهده شده برای مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن در انواع دولومیت‌ها می‌توان چنین بیان داشت که بیشتر دولومیت‌ها تحت شرایط دمای کم تشکیل شده‌اند.

۹- بحث

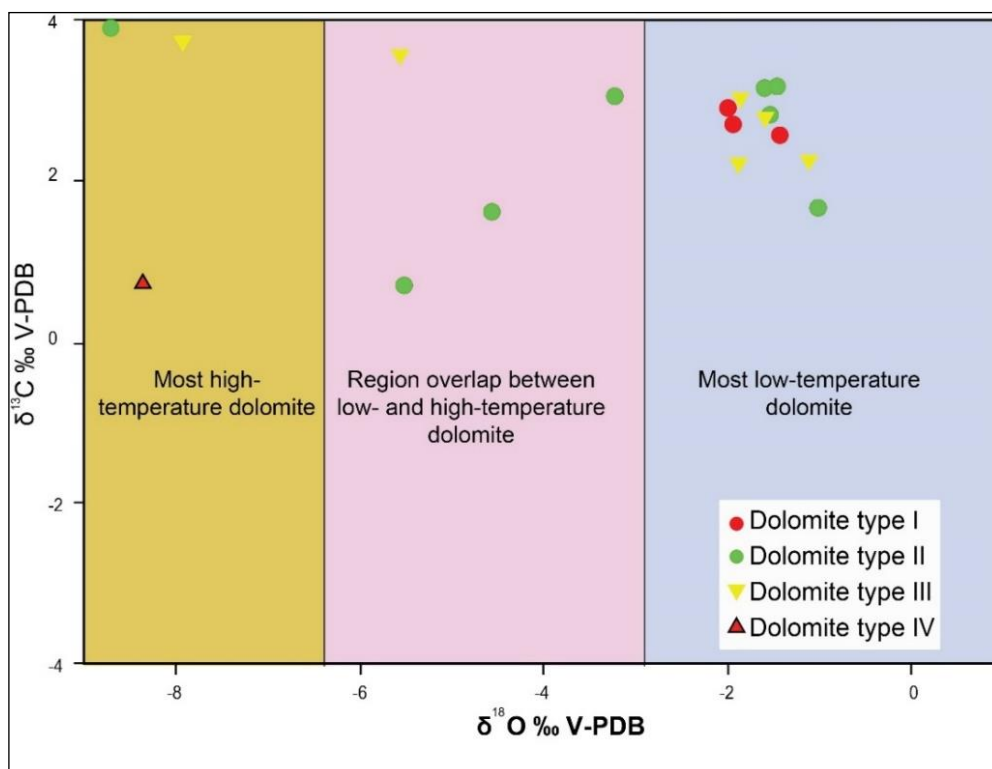
مرز زیرین سازند جمال که مصادف با گذر از دوره کربونیفر به پرمین است با یک ناپیوستگی همراه بوده و در بالا نیز مجدداً با مرز ناپیوسته به سازند سرخ شیل به سن تریاس محدود می‌شود. لیتولوژی سازند جمال از قسمت پایین به سمت بالا به ترتیب شامل سیلتستون، ماسه‌سنگ قرمز، سنگ آهک (لیتولوژی قالب)، ماسه‌سنگ سفید (کوارتزآرنایت) و دولومیت می‌شود. روش‌های مطالعه انجام گرفته در این پژوهش شامل تلفیقی از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی (پتروگرافی و ژئوشیمیایی) می‌باشد. پتروفاسیس سیلتستون و کوارتزآرنایت و ۱۴ ریزرخساره کربناته مشاهده شده در زیرمحیط‌های پهنه بین جزر و مدی، لاگون، شول و دریای باز نهشته شده‌اند. بررسی‌های انجام شده برای مطالعه رخساره‌ها و ریزرخساره‌های سازند جمال در برش چاه ریس به توجه به حضور آلوکم‌ها، ارتباطات رخساره‌ای و همچنین تغییرات تدریجی آن‌ها یک رمپ کربناته را مشخص می‌سازد که گاهی با ورود مواد دانه متوسط سیلیسی آواری از سمت خشکی همراه بوده است. بر مبنای درجه دولومیتی شدن سنگ آهک اولیه، اندازه و شکل بلورها و همچنین خصوصیات و بافت بلورها چهار نوع دولومیت به ترتیب شامل دولومیت نوع اول (I): دولومیت‌های خیلی ریز تا ریز بلور، دولومیت نوع دوم (II): دولومیت‌های متوسط بلور، دولومیت نوع سوم (III): دولومیت‌های متوسط تا درشت بلور، دولومیت نوع چهارم (IV): دولومیت‌های درشت بلور حفره پرکن یا سیمان‌های دولومیتی می‌باشند. مدل دولومیتی شدن سازند جمال نیز برای دولومیت‌های نوع اول مربوط به پهنه‌های جزر و مدی و سایر دولومیت‌ها (نوع دوم تا چهارم) از نوع مدل دولومیتی دفنی می‌باشد. با استناد به مطالعات ژئوشیمیایی، آنالیزهای عناصر اصلی و فرعی و همچنین مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن، کانی‌شناسی اولیه سازند جمال از نوع آراگونیتی و سیستم دیاژنتیکی از نوع نیمه بسته بوده است. اکثر نمونه‌های آهکی سازند جمال مقادیر ایزوتوپ اکسیژن سبک در مقایسه با محدوده کل کربنات‌های مناطق حاره‌ای و معتدله نشان می‌دهند که حاکی از عملکرد دیاژنز غیردریایی بر روی نمونه‌ها می‌باشد. همچنین روند کلی سبک‌شدگی ایزوتوپ اکسیژن در نمونه‌های سنگ آهکی تأیید کننده دیاژنز تدفینی برای اکثر نمونه‌ها می‌باشد. مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن برای نمونه‌های دولومیتی حاکی از تشکیل آن‌ها در هر سه محیط دریایی، دفنی کم عمق و عمیق بوده که فراوانی نمونه‌ها در محیط دریایی بیشتر از همه می‌باشد. به عبارت دیگر بیشتر دولومیت‌های سازند جمال عمدتاً تحت شرایط دیاژنتیکی دریایی (تحت شرایط دمای کم) تشکیل شده‌اند اما دولومیت‌های درشت بلور در دماهای بالاتر شکل گرفته‌اند. به منظور دستیابی به اطلاعات در زمینه تعیین سن دقیق سازند جمال و همچنین تطابق با دوره‌های یخچالی و بین یخچالی می‌توان از پژوهش‌های مربوط به ایزوتوپ استرانسیوم نیز بهره برد که می‌تواند در تکمیل یافته‌های فوق نقش بسزایی ایفا نماید.



شکل ۱۵- نمودارهای عناصر فرعی نمونه‌های سنگ آهک و دولومیت سازند جمال در برش چاه‌ریسه: A. پراکندگی مقادیر منگنز در مقابل آهن بر حسب پی پی ام. B: پراکندگی مقادیر منگنز در مقابل استرانسیم بر حسب پی پی ام. C: پراکندگی مقادیر آهن در مقابل استرانسیم بر حسب پی پی ام



شکل ۱۶- ترسیم مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن نمونه‌های دولومیتی نهشته‌های پرمن سازند جمال در برش چاه‌ریسه در برابر یکدیگر.



شکل ۱۷- نمودار تفکیک محدوده دمایی دولومیت‌های سازند جمال در برش چاه‌ریسه.

۱۰- نتیجه گیری

سازند جمال در برش چاه‌ریسه به سن پرمین میانی در شمال شرق اصفهان مورد مطالعه قرار گرفته است. مرز زیرین آن به فرم ناپیوستگی با سازند سردر به سن کربونیفر و مرز بالایی آن با ناپیوستگی با سازند سرخ شیل به سن تریاس ختم می‌شود. ضخامت سازند جمال در برش چاه‌ریسه ۲۵۱ متر بوده که دارای ۸ واحد لیتواستراتیگرافی است. با توجه به پتروفاسیس سیلتستون و کوارتزآرنایت و ۱۴ ریزرخساره کربناته مشاهده شده در سازند جمال، حضور آلوکم‌ها، ارتباطات رخساره‌ای و همچنین تغییرات تدریجی آن‌ها یک رمپ کربناته کم عمق همراه با زیرمحیط‌های پهنه بین جزر و مدی، لاگون، شول و دریای باز را می‌توان در نظر گرفت. بر مبنای درجه دولومیتی شدن سنگ آهک اولیه، اندازه و شکل بلورها و همچنین خصوصیات و بافت بلورها چهار نوع دولومیت شناسایی گردید. مدل دولومیتی شدن سازند جمال نیز برای دولومیت‌های نوع اول مربوط به پهنه‌های جزر و مدی و سایر دولومیت‌ها (نوع دوم تا چهارم) از نوع مدل دولومیتی دفنی می‌باشد. با استناد به مطالعات ژئوشیمیایی، آنالیزهای عناصر اصلی و فرعی و همچنین مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن، کانی‌شناسی اولیه سازند جمال از نوع آراگونیتی و سیستم دیاژنتیکی از نوع نیمه بسته بوده است. اکثر نمونه‌های آهکی سازند جمال مقادیر ایزوتوپ اکسیژن سبک نشان می‌دهند که حاکی از عملکرد دیاژنز غیردریایی بر روی نمونه‌ها می‌باشد. همچنین روند کلی سبک‌شدگی ایزوتوپ اکسیژن در نمونه‌های سنگ آهکی تأیید کننده دیاژنز تدفینی برای اکثر نمونه‌ها می‌باشد. مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن برای نمونه‌های دولومیتی نشان از تشکیل در هر سه محیط دریایی، دفنی کم عمق و عمیق بوده که فراوانی نمونه‌ها در محیط دریایی بیشتر از همه می‌باشد.

سپاس و قدردانی

از داوران مقاله، آقایان دکتر بهمن سلیمانی (استاد دانشگاه شهید چمران اهواز) و دکتر افشین زهدی (دانشیار دانشگاه زنجان) تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- [۱] آدابی، م. ح.، ۱۳۹۲، ژئوشیمی رسوبی، انتشارات آراین زمین، تهران، ۵۰۳ ص.
- [۲] باقری، ن.، ۱۳۸۱، بیواستراتیگرافی نهشته‌های پرمین در شمال شرق اصفهان (جنوب چاه‌ریسه، شمال دیزلو) براساس مطالعه کنودونت و ماکروفسیل‌ها: پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ۱۱۱ ص.
- [۳] ذبحی کمند، ب.، ۱۳۹۹، بررسی رخساره‌ها، محیط رسوبی و چینه‌نگاری سکانشی سازند جمال (پرمین) در منطقه چاه‌ریسه، شمال شرق اصفهان: پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ۹۳ ص.
- [۴] ADABI, M.H., ۲۰۰۹, Multistage dolomitization of upper Jurassic Mozduran Formation, Kopeh-Dagh basin NE Iran. *Carbonates and Evaporites*, ۲۴(۱), ۱۶-۳۲.
- [۵] AMERI, H., YAZDI, M., and BAHRAMI, A., ۲۰۱۷, Pseudophillipsia (Carniphillipsia) (Trilobite) from the Permian Jamal Formation, Isfahan, Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, ۲۸(۴), ۳۲۵-۳۳۶.
- [۶] AMTHOR, J.E., and FRIEDMAN, G.M., ۱۹۹۲, Early to late diagenetic dolomitization of platform carbonates; Lower Ordovician Ellenburger Group, Permian Basin, West Texas. *Journal of Sedimentary Petrology*, ۶۲(۱), ۱۳۱-۱۴۴.
- [۷] AREFIFARD, S., and DAVYDOV, V.I., ۲۰۰۵, Petrography and geochemistry of Permian Strata in Tabas and Kalmard regions, Eastern-Central Iran. *Geophysical Research Abstracts*, v. ۷, ۷p.
- [۸] AREFIFARD, S., ۲۰۱۷, Sea level drop, paleoenvironmental change and related biotic responses across Guadalupian-Lopingian boundary in southwest, North and Central Iran. *Geological Magazine*, ۱۵۵(۴), ۹۲۱-۹۴۳.
- [۹] BRAND, U., and VEIZER, J., ۱۹۸۰, Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system-۱: Trace elements. *Journal of Sedimentary Petrology*, ۵۰(۴), ۱۲۱۹-۱۲۳۶.
- [۱۰] FLUGEL, E., ۲۰۱۰, *Microfacies of Carbonate Rocks Analysis, Interpretation and Application*. Springer, Berlin, ۱۰۰۶ p.
- [۱۱] FRIEDMAN, G.M., ۱۹۶۵, Terminology of crystallization textures and fabrics in sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Petrology*, ۳۵(۳), ۶۴۳-۶۵۵.
- [۱۲] GREGG, J.M., and SIBLEY, D.F., ۱۹۸۴, Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture. *Journal of Sedimentary Petrology*, ۵۴(۳), ۹۰۸-۹۳۱.
- [۱۳] GREGG, J.M., ۱۹۸۸, Origins of dolomite in the offshore facies of the Bonnetterre Formation (Cambrian), Missouri, in Shukla, V., and Baker, P.A., eds., *Sedimentology and Geochemistry of Dolostones: SEPM Special publication*, ۴۳, ۶۷-۸۳.
- [۱۴] GREGG, J.M., and SHELTON, K.L., ۱۹۹۰, Dolomitization and dolomite neomorphism in the back reef facies of the Bonnetterre and Davis formations (Cambrian), southeast Missouri. *Journal of Sedimentary Petrology*, ۶۰(۴), ۵۴۹-۵۶۲.
- [۱۵] JAMES, N.P., and JONES, B., ۲۰۱۶, *Origin of Carbonate Sedimentary Rocks*. John Wiley and Sons, Alberta, ۴۶۷p.
- [۱۶] LAND, L.S., ۱۹۸۵, The origin of massive dolomite. *Journal of Geological Education*, ۳۳(۲), ۱۱۲-۱۲۵.
- [۱۷] LEE, Y.I., and FRIEDMAN, G.M., ۱۹۸۷, Deep burial dolomitization in the Ordovician Ellenburger group carbonates, West Texas and southeastern New Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology*, ۵۷(۳), ۵۴۴-۵۵۷.

- [۱۸] MAZZULLO, S.J., ۱۹۹۲, Geochemical and neomorphic alteration of dolomite: a review. *Carbonates and Evaporites*, ۷(I), ۲۱-۳۷.
- [۱۹] MITCHELL, J.T., LAND, L.S., and MISER, D.E., ۱۹۸۷, Modern marine dolomite cement in a north Jamaican fringing reef. *Geology*, ۱۵(۶), ۵۵۷-۵۶۰.
- [۲۰] MILLIMAN, J.D., ۱۹۷۴, *Marine Carbonates. Recent Sedimentary Carbonates, Part ۱*. Springer, New York, Xv, ۳۷۵p.
- [۲۱] MORROW, D.W., ۱۹۸۲a, Diagenesis ۱. Dolomite- Part ۱: The chemistry of dolomitization and dolomite precipitation. *Geoscience Canada*, ۹(۱), ۵-۱۳.
- [۲۲] MORROW, D.W., ۱۹۸۲b, Diagenesis ۲. Dolomite- Part ۲: Dolomitization models and ancient dolostones. *Geoscience Canada*, ۹(۲), ۹۵-۱۰۷.
- [۲۳] PERMOPHILES, ۲۰۰۸, Newsletter of the subcommission on Permian Stratigraphy Number, ۵۱, ۱۶۸۴-۵۹۲۷.
- [۲۴] QING, H., and Mountjoy, E.W., ۱۹۸۹, Multistage dolomitization in rainbow buildups, middle Devonian Keg River Formation, Alberta, Canada. *Journal of Sedimentary Petrology*, ۵۹(۱), ۱۱۴-۱۲۶.
- [۲۵] RAO, C.P., ۱۹۹۱, Geochemical differences between subtropical (Ordovician), cool temperate (Recent and Pleistocene) and subpolar (Permian) carbonates, Tasmania, Australia. *Carbonates and Evaporites*, ۶(۱), ۸۳-۱۰۶.
- [۲۶] RAO, C.P., and Adabi, M.H., ۱۹۹۱, Carbonate minerals, major and minor elements and oxygen and carbon isotopes and their variation with water depth in cool, temperate carbonates, western Tasmania, Australia. *Marine Geology*, ۱۰۳, ۲۴۹-۲۷۲.
- [۲۷] RAO, C.P., ۱۹۹۶, *Modern Carbonates, Tropical, Temperate, Polar: Introduction to Sedimentology and Geochemistry*. Carbonates, Howrah, Tasmania, ۲۰۶ p.
- [۲۸] SALLER, A.H., ۱۹۸۴, Petrologic and geochemical constraints on the origin of subsurface dolomite, Enewetak Atoll: An example of dolomitization by normal seawater. *Geology*, ۱۲(۴), ۲۱۷-۲۲۰.
- [۲۹] SHUKLA, V., and FRIEDMAN, G.M., ۱۹۸۳, Dolomitization and diagenesis in a shallowing upward sequence; the Lockport formation (middle Silurian), New York State. *Journal of Sedimentary Petrology*, ۵۳(۳), ۷۰۳-۷۱۷.
- [۳۰] SIBLEY, D.F., and GREGG, J.M., ۱۹۸۷, Classification of dolomite rock textures. *Journal of Sedimentary Petrology*, ۵۷(۶), ۹۶۷-۹۷۵.
- [۳۱] STÖCKLIN, J., EFTEKHAR-NEZHAD, J., and HUSHMAND-ZADEH, A., ۱۹۶۵, Geology of the Shotori Range (Tabas Area, East Iran). Geological Survey of Iran, Tehran, Report No. ۳, ۱-۶۹.
- [۳۲] STÖCKLIN, J., and NABAVI, M.H., ۱۹۷۱, Explanatory text of the Boshruyeh Quadrangle Map. Geological Survey of Iran, Tehran, Quadrangle, No. v. J۷۸, ۵۰ p.
- [۳۳] YARAHMADZAH, H. and LEVEN, E.J., ۲۰۲۱, Middle Permian (Late Murgabian) Fusulinids of the Jamal Formation, Tabas Area, Iran. *Stratigraphy and Geological Correlation*, ۲۹(۵), ۴۹۵-۵۰۳.
- [۳۴] YAZDI, M., ۱۹۹۹, Late Devonian-Carboniferous conodonts from Eastern Iran. *Rivista Italiana di paleontologia e Stratigrafia*, ۱۰۵, I, ۲, ۱۶۷-۲۰۰.
- [۳۵] YAZDI, M., and SHIRANI, M., ۲۰۰۲, first research on marine and nonmarine sedimentology sequences and micropaleontologic significance across Permian-Triassic boundary in Iran (Isfahan & Abadeh). *Journal of China University of Geosciences*, ۱۳, ۱۷۲-۱۷۶.

Investigation of petrographical and geochemical characteristics of carbonate deposits of the Jamal Formation in the Chah-Riseh section, northeast of Isfahan

Behrad Zebhi Kamand^۱, Mohammad Ali Salehi^{۱*}, Ezat Heydari^۱ and Ali Bahrami^۱

^۱Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

^۱Department of Physics, Atmospheric Science, and Geoscience, Jackson State University, Mississippi, United States of America

*ma.salehi@sci.ui.ac.ir

Received: September ۲۰۲۲, Accepted: November ۲۰۲۲

Abstract

The Middle Permian Jamal Formation have been investigated for sedimentological and geochemical aspects in the Chah-Riseh section, northeast Isfahan. According to the field studies the Jamal Formation with ۲۵۱ m thickness divided into eight lithostratigraphic unit which mostly composed of grey limestones, yellowish dolostones and less frequent thin layers of siltstones, red and white sandstones (quartzarenite). Lower boundary of this formation with an unconformity is underlain by the Sardar Formation which belongs to the Carboniferous period and upper boundary with an unconformity reaches to the Lower Triassic Sorkh-Shale Formation. Facies and microfacies studies of the Jamal Formation led to the identification of two petrofacies and ۱۴ carbonate microfacies. According to the recognized carbonate allochems, petrofacies and microfacies of the Jamal Formation and some evidence such as transitional microfacies changes, we can consider a depositional environment of a shallow mixed siliciclastic-carbonate ramp platform. Petrographically, four types of dolomites are recognized in the Jamal Formation. The dolomitization model for the type I dolomite is considered forming in tidal flat and burial dolomitization for types II, III and IV. Geochemical studies including major and trace elements as well as carbon and oxygen isotopes analysis of limestones and dolostones have been used in determining the syn- and post depositional chemical characterization of the Jamal Formation. Major and trace elements analysis comprised of elements such as Ca, Mg, Sr, Mn and Fe. Using ratios of the elements and also by plotting some of these elements cross carbon and oxygen isotopes in various diagrams have been used in determining the original mineralogy of carbonate deposits and efficient diagenetic system on the Jamal Formation. The results indicate that the dominant diagenetic environment effected on the carbonate deposits of Jamal Formation occurred in a semi-closed system and the original mineralogy was aragonite. Evaluation of major and trace elements contents of the four types dolomites, confirmed different characteristics of theses dolomite resembling crystal sizes in petrographic studies. Carbon and oxygen isotopes data of dolomites also defined their diagenetic situations.

Keywords: Geochemistry, Major and Trace Elements, Carbon and Oxygen Isotopes, Permian, Dolomite, Diagenesis