

سنگ‌نگاری و مدل دولومیتی شدن سازند شهبازان در تاق‌دیس خرم‌آباد، شمال لرستان

نسیم ملکی‌صادقی^{۱*} و رضا زارعی‌سهامیه^۲

۱- دانش‌آموخته دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

نویسنده مسئول: *Setareh89amiri@gmail.com

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۲۱

دریافت: ۱۴۰۳/۵/۸

چکیده

در این پژوهش، روند دولومیتی شدن سازند شهبازان (اوسن میانی - پسین) با استفاده از مطالعات سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. ناحیه مورد مطالعه در شمال لرستان و در ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان خرم‌آباد واقع شده است. در این برش، سازند شهبازان با سنگ‌شناسی غالب سنگ‌آهک و دولومیت دارای ضخامت ۸۵ متر می‌باشد که مرز پایینی آن به صورت هم‌شیب بر روی سازند آواری کشکان و مرز بالایی آن توسط کربنات‌های سازند آسماری به صورت ناپیوستگی پیوسته‌نما پوشیده شده است. بر پایه مطالعات سنگ‌نگاری بر روی ۸۰ مقطع نازک رسوبی و مطالعات ژئوشیمیایی بر روی ۲۶ نمونه به روش (EDS) دو گروه از دولومیت‌ها شناسایی گردید. دولومیت‌های اولیه (دولومیکرایت‌ها) با بافت موزائیکی و اغلب بی‌شکل در اندازه‌های کمتر از ۱۰ میکرون و دولومیت‌های ثانویه (دولومیکرواسپاریت‌ها و دلواسپاریت‌ها) با بافت نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار در اندازه‌های بزرگ‌تر از ۱۰ میکرون و حتی بزرگ‌تر از ۲۵۰ میکرون مشاهده شدند. در دولومیت‌های مورد مطالعه یک روند افزایشی از عناصر Fe و Mn و یک روند کاهش از عنصر Sr از دولومیکرایت‌ها به سمت دلوامیکرواسپاریت‌ها و دلواسپاریت‌ها مشاهده می‌شود. وجود برخی شواهد مانند تخلخل چشم‌پرنده‌ای، لامینه‌های جلبکی و اینتراکلیست‌ها و نبود کانی‌های تبخیری در نمونه‌های مورد مطالعه نشان داد، دولومیت‌های اولیه در یک مدل جزرومدی تشکیل شده‌اند و سپس بر اثر تراوش شورابه‌های کف حوضه‌ای در پلت‌فرم کربناته سازند شهبازان دولومیت‌های ثانویه در یک مدل دیاژنزی دفنی کم عمق تا متوسط گسترش یافته‌اند. تمرکز نسبتاً بالای Na در دولومیت‌های مورد مطالعه (۰/۱ تا ۱/۴ درصد وزنی) بیانگر تأثیر شورابه‌های کف حوضه‌ای بر روی آن‌ها می‌باشد. نسبت Ca/Mg در تمام دولومیت‌های مورد مطالعه، بیشتر از حد استاندارد (۱/۶) بوده و دلالت بر غیراستوکیومتری بودن آن‌ها دارد. این موضوع را می‌توان با توجه به سن سازند شهبازان در این بخش از حوضه‌ی رسوبی لرستان توجیه نمود.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌نگاری، دولومیت، زمین‌شیمی، سازند شهبازان، خرم‌آباد، لرستان

۱- پیشگفتار

ویژگی سازند شهبازان در زاگرس، فرآیند دیاژنز دولومیتی شدن است که بر اساس آن، این سازند با رنگ سفید متمایل به کرم و لایه‌بندی منظم از نظر ضخامت، مشخص می‌گردد (جیمز و وایند، ۱۹۶۵). در میان کانی‌های دیاژنتیکی، دولومیت یک کانی پیچیده می‌باشد که تحت تأثیر چندین فرآیند دیاژنزی بوده و این فرآیندها طی چند مرحله صورت می‌گیرند (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ هو و همکاران، ۲۰۱۰؛ ژاو و همکاران، ۲۰۱۲). امروزه با اضافه کردن داده‌های ژئوشیمیایی به داده‌های سنگ‌نگاری می‌توان درک بهتری از منشأ، زمان تشکیل، ترکیب سیالات دولومیت‌ساز، مدل دولومیتی شدن و روند دیاژنز فراهم نمود (ازمی و همکاران، ۲۰۰۱؛ آزومانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ کالن، ۲۰۱۶). دولومیت‌ها به طور کلی به دو صورت اولیه

گسترش جغرافیایی سازند شهبازان (اوسن میانی تا پسین) به طور عمده محدود به حوضه‌ی رسوبی لرستان و بخش‌هایی از زاگرس مرتفع می‌باشد. تغییرات جانبی این سازند در خور توجه می‌باشد به گونه‌ای که از لرستان به سوی جنوب خاوری، کربنات‌های شهبازان به تدریج با آواری‌های سازند کشکان جانشین می‌شود و سرانجام در زاگرس مرتفع، سازند شهبازان به قسمت‌های بالایی سازند چهرم می‌پیوندد. سازند شهبازان شامل ۳۳۳/۸ متر دولومیت و آهک‌های دولومیتی با رنگ هوازده سفید تا قهوه‌ای با سیمای ضخیم لایه است که به طور پیوسته بر روی سازند آواری کشکان و با ناپیوستگی پیوسته‌نما در زیر سازند آسماری قرار دارد (مطیعی، ۱۳۸۲). مهمترین

بر اساس نقشه زمین‌شناسی منطقه که بخشی از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ شهرستان خرم‌آباد می‌باشد، در یال شمالی تاکدیس خرم‌آباد واحدهای دوران سوم رخنمون دارند که شامل سازندهای امیران، سازند آواری کشکان، سازندهای آسماری و شهبازان، سازند گچساران و رسوبات آبرفتی عهد حاضر می‌باشند (شکل ۲). سازند شهبازان در برش مورد مطالعه دارای ضخامت ۸۵ متر می‌باشد که مرز پایینی آن به صورت هم‌شیب بر روی سازند آواری کشکان و مرز بالایی توسط کربنات‌های سازند آسماری به صورت ناپیوستگی پیوسته‌نما پوشیده شده است (شکل ۳). لیتولوژی این سازند در برش مورد مطالعه سنگ‌آهک و سنگ‌آهک دولومیتی نازک لایه، متوسط لایه و ضخیم لایه می‌باشد و ستون سنگ‌چینه‌ای آن به همراه موقعیت نمونه‌های برداشت شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

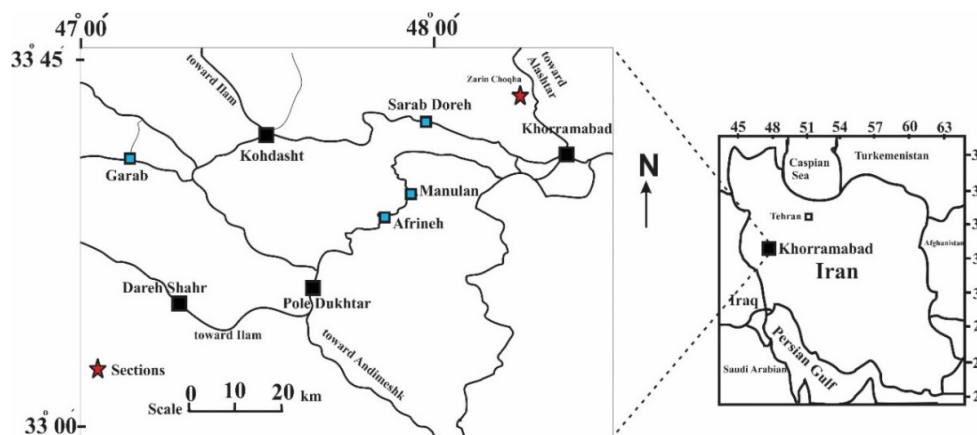
۳- مواد و روش مطالعه

جهت انجام مطالعات سنگ‌نگاری و تعیین ریزرخساره‌های برش شمال خرم‌آباد ۸۰ مقطع نازک میکروسکوپی مورد مطالعه قرار گرفت. تمام مقاطع نازک به روش (دیکسون، ۱۹۶۵) توسط محلول آلیزارین قرمز (ARS) برای تشخیص کانی‌های کلسیت از دولومیت و محلول فروسینایدپتاسیم برای تشخیص دولومیت‌های آهن‌دار رنگ‌آمیزی شدند. در نام‌گذاری سنگ‌های کربناته از رده‌بندی فولک (۱۹۵۹) و دانهام (۱۹۶۲) استفاده شد. نام‌گذاری دولومیت‌ها بر پایه تلفیقی از رده‌بندی بافتی سیبلی و گرک (۱۹۸۷) و مازالو (۱۹۹۲) صورت گرفت. برای اندازه بلورهای دولومیت از مقیاس ارائه شده توسط (فولک، ۱۹۶۵) و آدابی (۲۰۰۹) استفاده شد. برای انجام مطالعات زمین‌شیمیایی تعداد ۲۶ نمونه از سنگ‌آهک‌های دولومیتی جهت آنالیز عنصری به روش‌های (EDS) و (EPMA) و تصویربرداری الکترونی (SEM) انتخاب شده است. مطالعات سنگ‌نگاری توسط میکروسکوپ پلاریزان Olympus BH-2 و میکروسکوپ الکترونی (SEM) و مطالعات زمین‌شیمیایی بر مبنای آنالیز عنصری به روش (EDS) در آزمایشگاه مرکزی شماره ۱ دانشگاه لرستان صورت گرفت که دیگرام‌های این داده‌ها توسط نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۸ ترسیم شد. این مطالعات در پایان به تعیین منشأ سیالات دولومیت‌ساز کمک فراوانی می‌کند (سیبلی و گرگ، ۱۹۸۷؛ لی و فریدمن، ۱۹۸۷؛ آم‌تور و فریدمن، ۱۹۹۲؛ ای و مازالو، ۱۹۹۳؛ آدابی ۲۰۰۹).

و ثانویه تشکیل می‌شوند که نوع ثانویه آن یا بدون فاصله پس از ته‌نشینی و یا مدتی پس از رسوبگذاری تشکیل می‌شود. دولومیت اولیه به طور مستقیم از آب دریا رسوب می‌کند. از جمله مطالعات دیاژنزی انجام شده بر روی سازندهای شهبازان - آسماری در حوضه‌ی رسوبی زاگرس می‌توان به مطالعات عبدی و آدابی (۱۳۸۸)، محسنی و همکاران (۱۳۹۰)، بهرامی و همکاران (۱۳۹۳)، فرش و همکاران (۱۳۹۶)، جانباز و همکاران (۱۳۹۷) و میربیک سبزواری و صداقت‌نیا (۱۴۰۰) اشاره نمود. سازند شهبازان در یال شمالی تاکدیس خرم‌آباد برای اولین بار از دیدگاه زمین‌شیمی عنصری و سنگ‌نگاری دولومیت‌های آن مورد بررسی قرار می‌گیرد لذا در این پژوهش جهت شناسایی و تفکیک انواع دولومیت‌ها و به دنبال آن ارائه مدل دولومیتی شدن این سازند، در این بخش از حوضه‌ی رسوبی زاگرس از تلفیق مطالعات سنگ‌نگاری و روش‌های زمین‌شیمیایی، مانند عناصر اصلی و فرعی استفاده شده است که امید است نتایج این پژوهش گامی مفید جهت استفاده سایر پژوهشگران در زمینه مطالعات زمین‌شیمی بر روی سازند شهبازان در سایر نقاط حوضه‌ی رسوبی لرستان باشد.

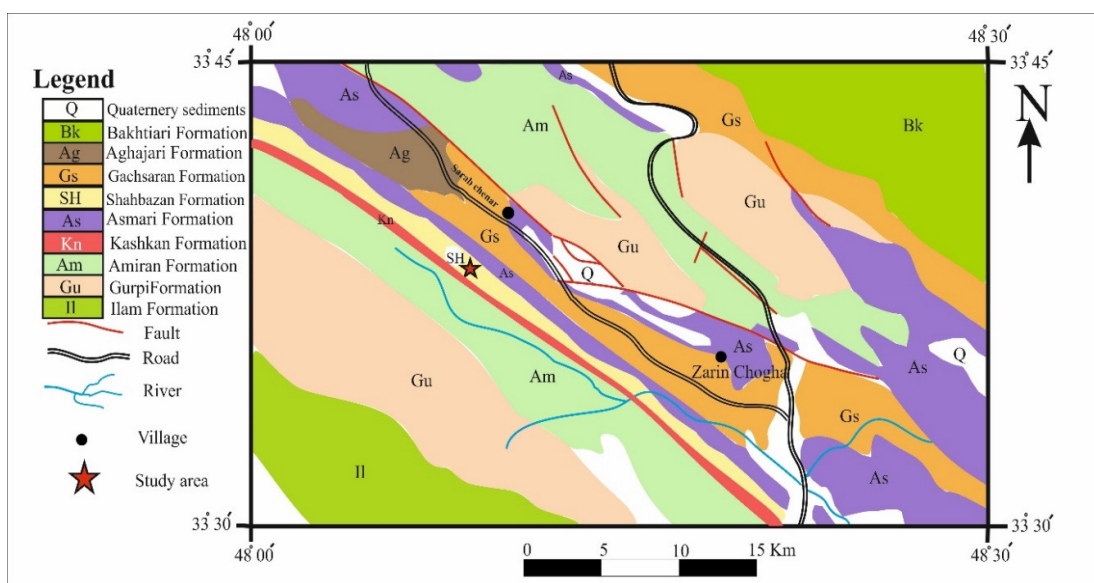
۲- زمین‌شناسی و چینه‌نگاری ناحیه مورد مطالعه

برش مورد مطالعه در ۲۵ کیلومتری شمال خاوری شهرستان خرم‌آباد و در ضلع جنوب‌شرقی روستای زرین چقا واقع شده است که برای رسیدن به این برش از طرق جاده آسفاته شهرستان خرم‌آباد به سمت روستای مذکور امکان‌پذیر می‌باشد. برش مورد مطالعه دارای مختصات جغرافیایی طول خاوری " 48° 12' 12.25 E و عرض شمالی " 33° 38' 17.9 N می‌باشد (شکل ۱). سازند شهبازان، با سازندهای کشکان، تله‌زنگ، پابده و جهرم ارتباط بین انگشتی دارد (مطیعی، ۱۳۸۲). برش نمونه این سازند در جنوب خاوری حوضه‌ی لرستان (شمال خاور استان خوزستان) در فاصله نزدیکی از جنوب خاوری ایستگاه راه آهن تله‌زنگ به همراه برش نمونه سازند تله‌زنگ توسط جیمز و وایند (۱۹۶۵) انتخاب، اندازه‌گیری و معرفی شده است. ناحیه مورد مطالعه بر اساس نقشه پهنه‌های ساختاری حوضه زاگرس (اسرافیلی - دیزجی و کیانی هرچگانی، ۲۰۱۱) در زون زاگرس چین‌خورده واقع شده است.



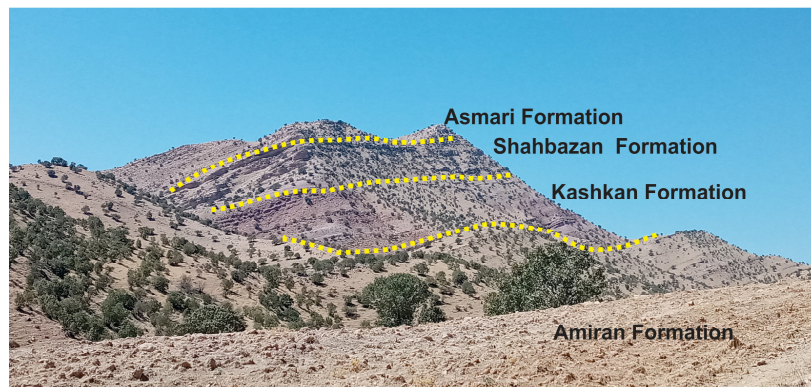
شکل ۱. راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت برش انتخاب شده

Fig. 1. access ways to the study area along with the selected section position



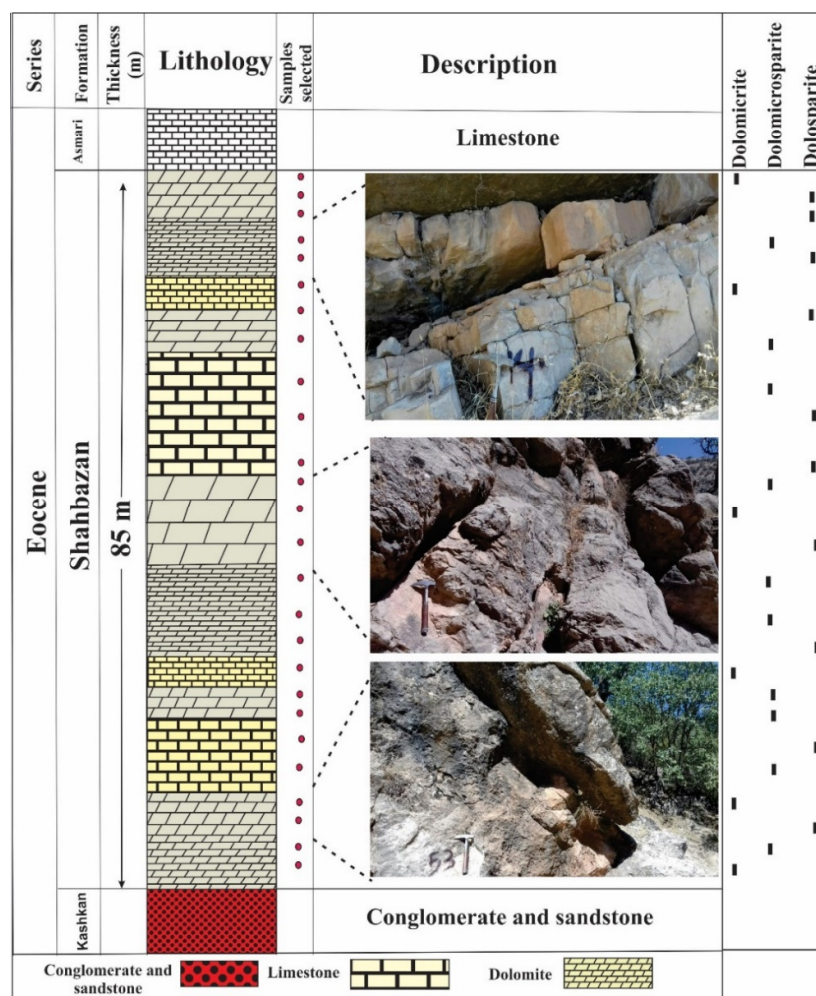
شکل ۲. قسمتی از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شهرستان خرم‌آباد به همراه گسترش سازندهای ناحیه مورد مطالعه. (اسرافیلی-دیزجی و کیانی هرچگانی، ۲۰۱۱)

Fig. 2. Part of geological map 1/100000 of Khorram Abad city along with the expansion of formations of the studied area. (Esrafil - Dizaji and Kiani Harchgani, 2011)



شکل ۳. نمایی از سازندهای ناحیه مورد مطالعه در یال شمالی تاق‌دیس خرم‌آباد (دید به سمت شمال باختری)

Fig. 3. A view of the formations of the studied area on the northern edge of the Khorramabad anticline (view towards the northwest)



شکل ۴. ستون سنگ‌چینه‌ای سازند شهبازان در منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت نمونه‌های برداشت شده جهت آنالیز که با دوائر قرمز رنگ نشان داده شده است.

Fig. 4. The stratific rock column of Shahbazan Formation in the study area along with the location of the samples taken for analysis, which are shown with red circles.

۴- بحث

کربناته این سازند در برش مورد مطالعه می‌توان گفت که این نهشته‌ها در یک محیط دریایی کم عمق و در یک پلاتفرم کربناته از نوع رمپ هموکلینال شکل گرفته‌اند (فلوگل، ۲۰۱۰) به گونه‌ای که در این پلاتفرم محیط لاگون غیر محصور (بدلیل تنوع جانوری کم) غالب می‌باشد (شکل ۵).

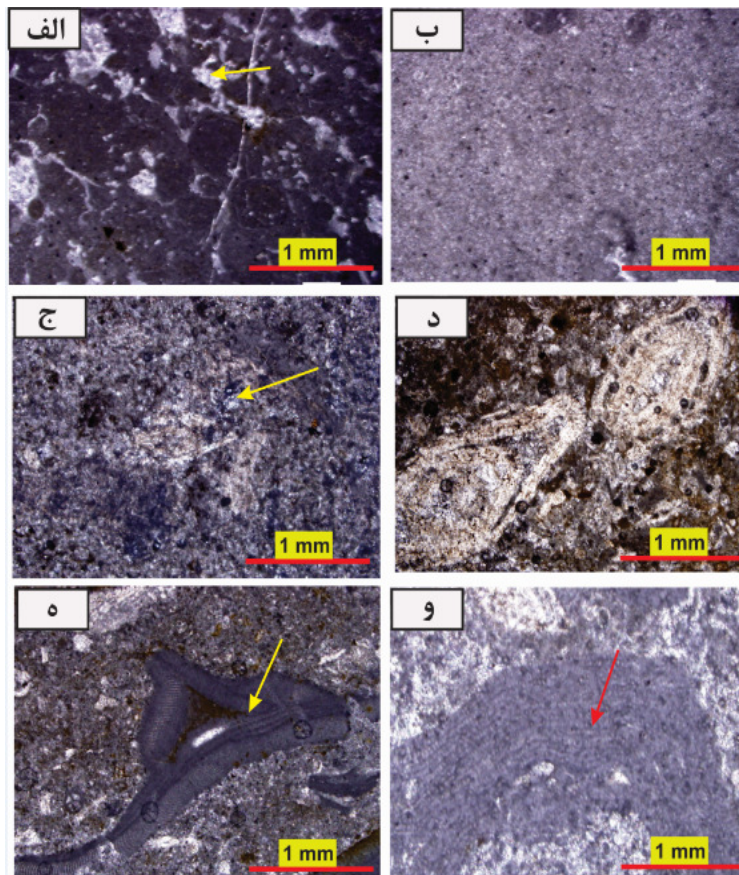
۴-۱- سنگ‌نگاری دولومیت‌ها

دولومیت در اشکال و انواع مختلف یکی از کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سازند شهبازان به شمار می‌رود. دولومیت‌های سازند شهبازان با توجه به فابریک، توزیع اندازه بلورها و شکل مرز بلورها به چهار گروه مختلف تقسیم شده‌اند. اندازه بلورها به وسیله انرژی‌های رشد و هسته‌سازی

مطالعات انجام شده بر روی ۸۰ مقطع نازک میکروسکوپی سبب شناسایی ریزرخساره‌های غالباً گل‌پشتیبان شد که از جمله این ریزرخساره‌ها می‌توان به مادستون کربناته، مادستون دولومیتی، مادستون دولومیتی فسیل‌دار، وکستون تا پکستون دولومیتی اینتراکلیست‌دار، بایوکلست وکستون تا پکستون بایوکلستی دولومیتی، مادستون فنسترال و رخساره‌های دولومیتی اشاره کرد. از جمله شواهد بارز در واحدهای دولومیتی سازند شهبازان می‌توان به ساخت حفره‌ای چشم پرنده‌ای، اینتراکلیست‌های ریز و درشت، تخلخل بالا و ساخت‌های لامینه‌ای جلبکی اشاره نمود. با توجه به موارد مذکور و نبود رخساره‌های سدی و دریایی باز و نبود رخساره‌های تیخیری در نهشته‌های

سانتی‌گراد سطوح بلوری غیرمسطح و بلورهای بی‌شکل گسترش پیدا می‌کنند (گرگ و سیبلی، ۱۹۸۴؛ گرگ و شلتون، ۱۹۹۰). در این مطالعه اندازه بلورهای دولومیت از روی بیشینه قطر بلورها و بر پایه مقاله (فولک، ۱۹۶۵ و آدابی، ۲۰۰۹) تعیین گردید.

کنترل می‌شود، در حالی که شکل مرز بلورها تنها به وسیله رشد بلورها کنترل می‌شود (سیبلی و گرگ، ۱۹۸۷). به طور کلی در دماهای پایین سطوح بلوری صاف و بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار رشد می‌کنند. در بالاتر از دمای بحرانی یعنی دمای بین ۵۰ تا ۱۰۰ درجه



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی از نمونه سنگ‌های کربناته سازند شهبازان در تاق‌دیس خرم‌آباد، الف: ریزرخساره مادستون کربناته با تخلخل چشم‌پرنده‌ای (نمونه شماره SH-22). ب: ریزرخساره مادستون دولومیتی (دولومیکرایت) فاقد فسیل (نمونه شماره SH-62). ج: ریزرخساره وکستون بایوکلاستی که اجرای بایوکلاستی توسط دولومیت تخریب شده‌اند (نمونه شماره SH-45) (پیکان زرد رنگ). د: ریزرخساره پکستون بایوکلاستی (نمونه شماره SH-40). ه: ریزرخساره وکستون تا پکستون حاوی اینتراکلاست (نمونه شماره SH-61) (اینتراکلاست‌ها از نوع جلبک قرمز می‌باشند). و: ریزرخساره وکستون تا پکستون حاوی لامینه‌های جلبک قرمز (نمونه شماره SH-30) (پیکان قرمز رنگ). تصاویر در نور XPL تهیه شده‌اند.

Fig. 5. Microscopic images of carbonate rock samples of Shahbazan Formation in Khorramabad anticline, A: Microfacies of carbonate mudstone with bird's eye porosity (sample number SH-22). B: Microfacies of dolomite mudstone (dolomicrite) without fossils (sample no. SH-62). C: Bioclastic wackestone microfacies that have been destroyed by bioclastic action by dolomite (Sample No. SH-45) (yellow arrow). D: Packstone bioclast microfacies (sample no. SH-40). E: microfacies from wackestone to packstone containing intraclasts (Sample No. SH-61) (the intraclasts are red algae type). F: Wackestone to packstone microfacies containing red algal laminae (Sample No. SH-30) (red arrow). The images were prepared in XPL light.

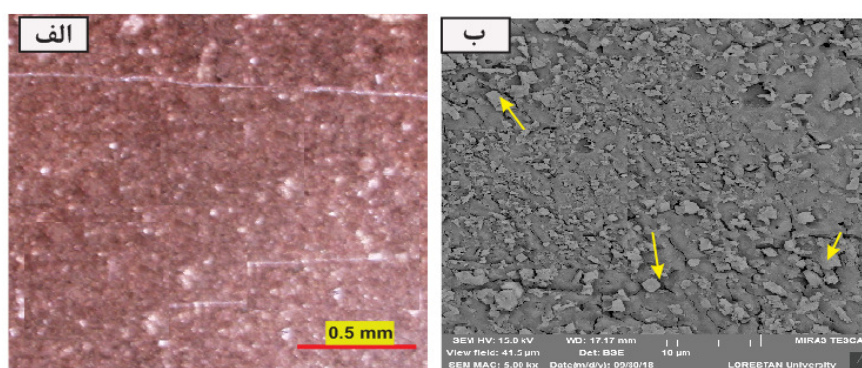
۵ - و) و فابریک چشم‌پرنده‌ای (شکل ۵-الف)، فابریک متراکم و فاقد فسیل (شکل ۵-ب) این نوع از دولومیت‌ها به نظر می‌رسد تحت شرایط سطحی و دمای پایین تشکیل شده‌اند (سیبلی و گرگ، ۱۹۸۷؛ گرگ و شلتون، ۱۹۹۰؛ مازالو، ۱۹۹۲؛ آل-آسام و پاکارد، ۲۰۰۰؛ آدابی، ۲۰۰۹).

دولومیت نوع اول یا دولومیت‌های خیلی ریز بلور (دولومیکرایت‌ها): در مقاطع مورد مطالعه این نوع از دولومیت‌ها با بافت موزائیکی و اغلب بی‌شکل و در اندازه‌های کمتر از ۱۰ میکرون شناسایی گردید (شکل ۶). شواهد بافتی رسوبی اولیه نظیر لامیناسیون جلبکی (شکل

مجدد دولومیت‌های ریز بلور ایجاد می‌شوند (آدابی، ۱۳۹۰؛ آدابی و رآو، ۱۹۹۶). فابریک نیمه مسطح شکل‌دار در این نوع از دولومیت‌ها نتیجه رشد آرام بلورها تحت جریان پیوسته‌ای از سیالات دولومیت ساز در دمای پایین می‌باشد. بنابراین با توجه به ویژگی‌های بافتی و اندازه بلورها، احتمالاً این دولومیت‌ها در مرحله تدفین کم عمق تا عمیق به صورت جانیشینی تشکیل شده‌اند (سیبلی و گرگ، ۱۹۸۷؛ مازالو، ۱۹۹۲؛ ویتاکر و همکاران، ۲۰۰۴). در برخی از دولومیکرواسپارایت‌ها وجود آثار انحلالی در بلورهای دولومیت می‌تواند به دلیل عبور سیالات غنی از فاز کلسیم (Ca) در محیط باشد.

به عقیده (گرگ و شلتون، ۱۹۹۰؛ سیبلی و گرگ، ۱۹۸۴؛ لند، ۱۹۸۵) این نوع دولومیت‌ها احتمالاً همزمان با رسوبگذاری یا در مراحل اولیه دیاژنز در محیط بالای جزرومدی یا بین جزرومدی تشکیل شده‌اند. با توجه به فابریک و اندازه خیلی ریز این نوع از دولومیت‌ها فقط با میکروسکوپ نوع الکترونی قابل مشاهده هستند.

دولومیت نوع دوم یا دولومیت‌های متوسط بلور (دولومیکرواسپارایت‌ها): در نمونه‌های مورد مطالعه، دولومیت‌های متوسط بلور بصورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و در اندازه‌های بین ۱۰ تا ۲۰ میکرون شناسایی گردید (شکل ۷). دولومیت‌های متوسط بلور معمولاً از تبلور



شکل ۶. الف: تصویر میکروسکوپی از ریزرخساره مادستون دولومیتی (دولومیکرایت) (نمونه شماره SH-13). ب: تصویر میکروسکوپ الکترونی همان نمونه، همانطور که پیداست اکثر بلورهای دولومیکرایت در اندازه‌های کمتر از ۱۰ میکرون مشاهده می‌شوند (پیکان‌های زرد رنگ).

Fig. 6. A: Microscopic image of dolomite mudstone (dolomicrite) microfacies (Sample No. SH-13). B: Electron microscope image of the same sample, as it can be seen that most dolomicrite crystals are less than 10 microns in size (yellow arrows).

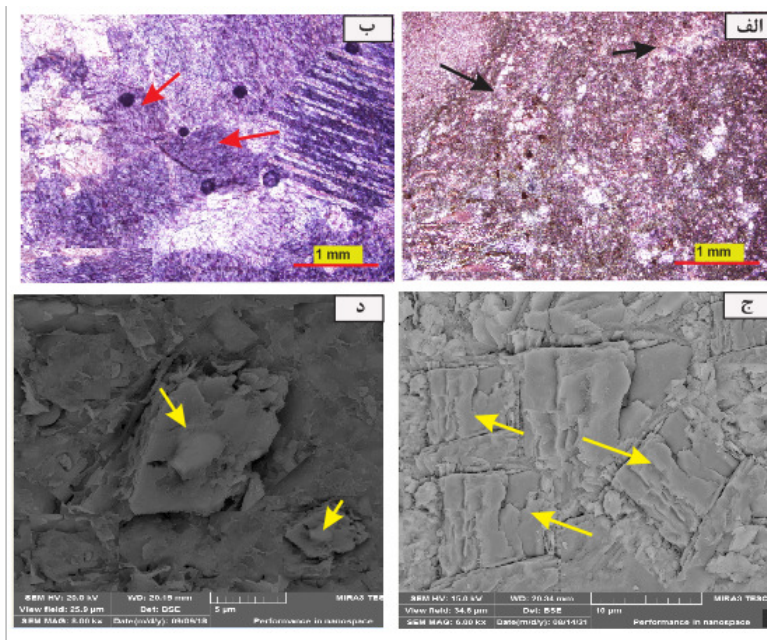
که توسط محلول فروسیانید پتاسیم رنگ آمیزی شده‌اند. وجود رنگ آبی فیروزه‌ای در این نوع از دولومیت‌ها حاکی از وجود آهن Fe در ترکیب آن‌ها می‌باشد.

دولومیت نوع چهارم یا دولومیت‌های بسیار درشت بلور (پر کننده فضای شکستگی‌ها و رگه‌ها): در مقاطع مورد مطالعه این نوع از دولومیت‌ها به صورت بی‌شکل، نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار و در اندازه‌های چندین بلور (بزرگ‌تر از ۱۵۰ میکرون تا بیش از چند میلی‌متر) به صورت پر کننده شکستگی‌ها و حفرات سنگ مشاهده گردید (شکل ۹). این نوع از دولومیت‌ها حاصل مراحل آخر فرایندهای دیاژنتیکی می‌باشند و باعث کاهش تخلخل می‌شوند. دولومیت‌های تشکیل شده در شرایط تدفینی عمیق به طور معمول می‌توانند ابعاد بلوری متفاوت و فابریک‌های متنوعی داشته باشند که این موضوع بستگی به اندازه فضاهای خالی سنگ دارد (تاکر و رایت، ۱۹۹۰؛ ویلسون و همکاران،

دولومیت نوع سوم یا دولومیت‌های درشت بلور (دولواسپارایت‌ها): در مقاطع مورد مطالعه این نوع از دولومیت‌ها به صورت موزائیک‌های نیمه شکل‌دار و شکل‌دار و در اندازه‌های بین ۲۰ تا بیش از ۱۵۰ میکرون شناسایی گردید (شکل ۸). این نوع از دولومیت‌ها عمدتاً به صورت موزائیک‌های هم اندازه با مرزهای مشترک بین بلوری مستقیم بوده و در مواردی فصل مشترک سطوح کریستالی به خوبی حفظ شده است (شکل ۸-د). همچنین در بین این سطوح کریستالی تخلخل‌های بین‌بلوری نیز مشاهده می‌شود (شکل ۸-ج). دولومیت‌های نوع سوم بیانگر جانیشینی دیاژنتیکی سنگ‌آهک‌های قبلی و یا تبلور مجدد دولومیت‌های اولیه زیر دمای بحرانی (کمتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشند (آدابی، ۱۳۹۰؛ گرگ و شلتون، ۱۹۹۰؛ مازالو، ۱۹۹۲ و آدابی، ۲۰۰۹). این نوع از دولومیت‌ها در مقاطع مورد مطالعه از نوع آهن‌دار می‌باشند

(فرامبوئیدال) نیز شناسایی گردید (شکل ۱۰ - ب) که می‌تواند شاخصی برای احیاء بودن محیط دیاژنتیکی دولومیت‌های پرکننده شکستگی‌ها و رگه‌ها باشند.

(۲۰۰۷). دولومیت‌های تدفینی نسبتاً عمیق دارای آهن (Fe) در ترکیب خود می‌باشند که این موضوع می‌تواند به دلیل احیا بودن محیط دیاژنتیکی باشد (شکل ۱۰ - الف). همراه این نوع از دولومیت‌ها پیریت‌های دانه تمشکی



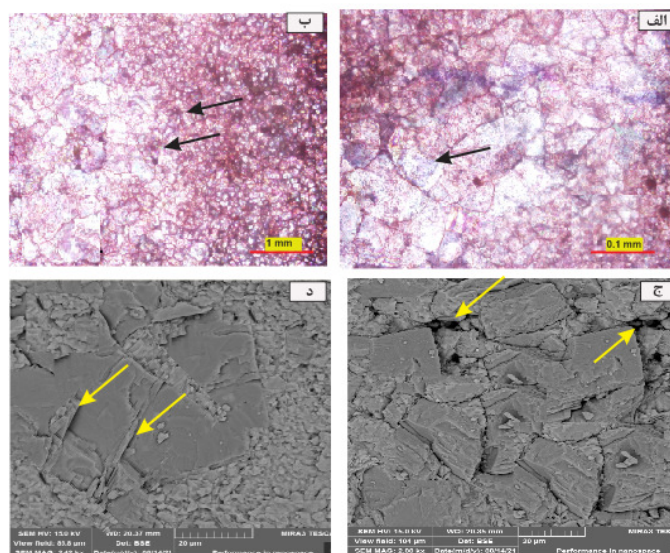
شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی و الکترونی بعضی از نمونه‌های دولومیت سازند شهبازان در تاق‌دیس خرم‌آباد، الف: دولومیکرایت در حال تبدیل به دولومیکرواسپارایت (در جهت پیکان تیره رنگ) (نمونه شماره SH-10). ب: شکستگی‌های ایجاد شده در دولومیکرواسپارایت که توسط دولومیت‌های درشت بلور آهن‌دار پر شده است، پیکان‌های قرمز رنگ (نمونه شماره SH-09) مقطع با آلزارین قرمز و فروسیانید پتاسیم رنگ‌آمیزی شده است (پیکان‌های قرمز رنگ). ج: تصویر میکروسکوپ الکترونی یک بلور دولواسپارایت در اندازه ۲۰ میکرون (نمونه شماره SH-04). د: تصویر میکروسکوپ الکترونی یک بلور دولواسپارایت در اندازه کمتر از ۲۰ میکرون، انحلال ایجاد شده در بلور دولومیت می‌تواند به دلیل تاثیر فازهای سیال غنی از کلسیم در محیط تدفینی باشد. (نمونه شماره SH-05).

Fig. 7. Microscopic and electron images of some dolomite samples from the Shahbazan Formation in the Khorramabad anticline, A: Dolomicrite transforming into dolomicrite (in the direction of the dark arrow) (Sample No. SH-10). B: Fractures created in dolomicroparite filled by iron-bearing coarse crystal dolomites, red arrows (Sample No. SH-09) cross-section stained with alizarin red and potassium ferrocyanide (arrows Red color). C: Electron microscope image of a 20 micron dolosparite crystal (sample number SH-04). D: Electron microscope image of a dolomite crystal less than 20 microns in size, the dissolution created in the dolomite crystal can be due to the effect of calcium-rich fluid phases in the burial environment. (Sample No. SH-05).

۴-۲- تجزیه عنصری دولومیت‌های برش مورد مطالعه

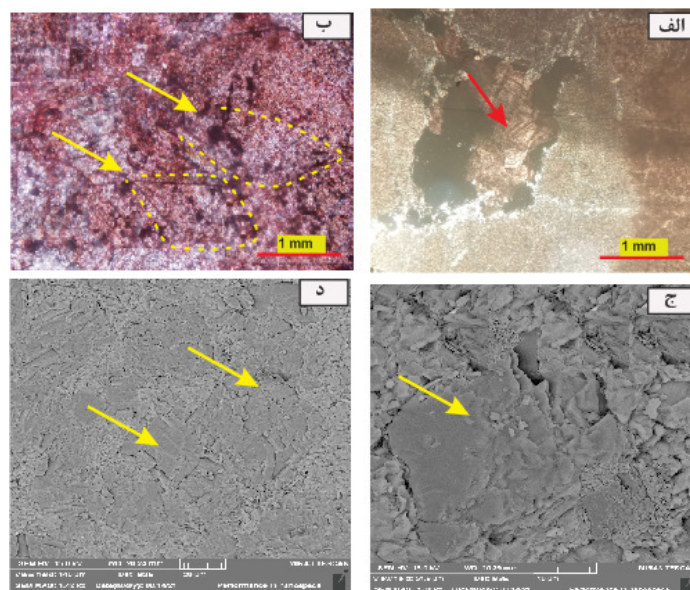
۱۹۸۷؛ سیبلی و گرگ، ۱۹۸۷؛ وایزر و همکاران، ۱۹۸۷؛ شاکلا و باکر، ۱۹۸۸؛ مازالو، ۱۹۹۲؛ آدابی، ۲۰۰۹) در زمینه ژنز دولومیت و سازوکارهای دولومیتی شدن پژوهش کرده‌اند. تمرکز عناصر اصلی و فرعی در دولومیت‌های سازند شهبازان در برش مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. شایان ذکر است عناصر کمیاب در آنالیزهای انجام شده مشاهده نشده است و یا درصد آن‌ها بسیار اندک بوده و لذا از آوردن این عناصر در جدول داده‌ها صرف‌نظر شده است.

ترکیب داده‌های زمین‌شیمیایی با اطلاعات سنگ‌نگاری می‌تواند درک بهتری از منشأ، زمان تشکیل، ترکیب سیال دولومیت‌ساز، مدل دولومیتی شدن و روند دیاژنز فراهم کند (ازمی و همکاران، ۲۰۰۱؛ سوارت و همکاران، ۲۰۰۵؛ ناوارو-سیورانا و همکاران، ۲۰۱۶). پژوهشگرانی نظیر (فریدمن و سندرز، ۱۹۶۷؛ زنگار و همکاران، ۱۹۸۰؛ مورو، ۱۹۸۲؛ لند، ۱۹۸۳؛ مائل و مونت‌جوی، ۱۹۸۶؛ هاردی،



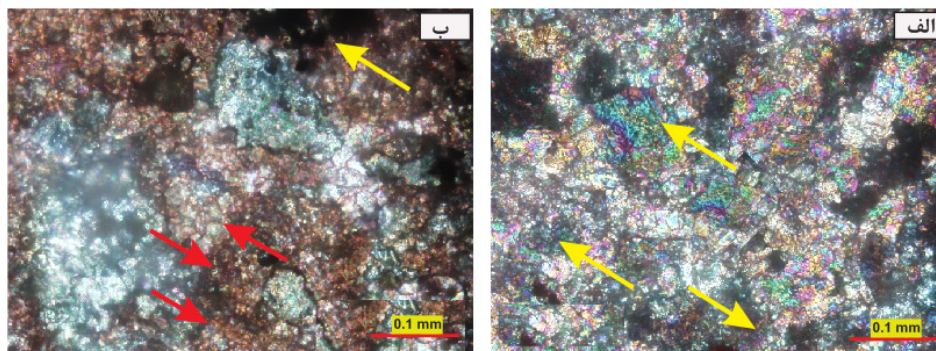
شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی و الکترونی بعضی از نمونه‌های دولومیت سازند شهبازان در برش مورد مطالعه، الف و ب: دلواسپارایت آهن‌دار به رنگ آبی فیروزه‌ای مربوط به دیاژنز تدفینی (پیکان تیره) (نمونه شماره SH-23,28). مقطع با آلizarin قرمز و فروسیانید پتاسیم رنگ‌آمیزی شده است. ج: بلورهای درشت دلواسپارایت تحت میکروسکوپ الکترونی، تخلخل بین بلوری در سطوح کریستالی بلورهای دولومیت به خوبی شکل گرفته است (پیکان زرد رنگ) (نمونه شماره SH-25)، مرزهای مضرسی در این بلورها حاکی از تشکیل در شرایط تدفینی دارد. د: سطوح کریستالی صاف در مرز مشترک بین بلورهای دلواسپارایت تحت میکروسکوپ الکترونی (نمونه شماره SH-30).

Fig. 8. Microscopic and electron images of some dolomite samples of the Shahbazan Formation in the section under study, A and B: iron-bearing dolomite with a turquoise blue color related to burial diagenesis (dark arrow) (Sample No. SH-23, 28). The section is stained with alizarin red and potassium ferrocyanide. C: Large crystals of dolomite under the electron microscope, the intercrystalline porosity is well formed in the crystalline surfaces of dolomite crystals (yellow arrow) (Sample No. SH-25). D: smooth crystalline surfaces at the common boundary between dolosparite crystals under an electron microscope (Sample No. SH-30).



شکل ۹. الف: تصویر میکروسکوپی از دولومیت درشت بلور نوع باروک پر کننده حفره (پیکان تیره) (نمونه شماره SH-19). ب: بلورهای دولومیت درشت بلور پر کننده شکستگی که دلالت بر منشأ دیاژنتیکی آن دارد (پیکان‌های زرد رنگ) (نمونه شماره SH-21). ج و د: تصاویر میکروسکوپ الکترونی بلورهای درشت دولومیت پر کننده شکستگی‌ها (به ترتیب نمونه‌های شماره SH-17 و شماره SH-18).

Fig. 9. A: Microscopic image of the baroque-type coarse-grained dolomite filling the cavity (dark arrow) (Sample No. SH-19). B: Coarse dolomite crystals filling the fracture, which indicates its diagenetic origin (yellow arrows) (Sample No. SH-21). C and D: Electron microscope images of large dolomite crystals filling fractures (samples No. SH-17 and no. SH-18, respectively).



شکل ۱۰. الف: تصویر میکروسکوپی از دولومیت درشت بلور آهن‌دار به رنگ آبی فیروزه‌ای پرکننده شکستگی‌های عمیق (پیکان‌های زرد رنگ) (نمونه شماره SH-23) مقطع با آلزارین قرمز و فروسیانید پتاسیم رنگ‌آمیزی شده است. ب: بلورهای دولومیت درشت بلور (پیکان قرمز) همراه با پیریت‌های دانه تمشکی (پیکان زرد رنگ) که حاکی از شرایط احیایی برای تشکیل بلورهای درشت دولومیت دارد (نمونه شماره SH-09).

Fig. 10. A: Microscopic image of large iron-bearing dolomite in turquoise blue color filling deep fractures (yellow arrows) (Sample No. SH-23) thin - section stained with alizarin red and potassium ferrocyanide. B: Coarse dolomite crystals (red arrow) along with raspberry grain pyrites (yellow arrow), which indicates reducing conditions for the formation of coarse dolomite crystals (Sample No. SH-09).

جدول ۱. توزیع عناصر اصلی و فرعی در انواع دولومیت‌های برش مورد مطالعه، یال شمالی تاقدیس خرم‌آباد (مقادیر بر حسب درصد وزنی)

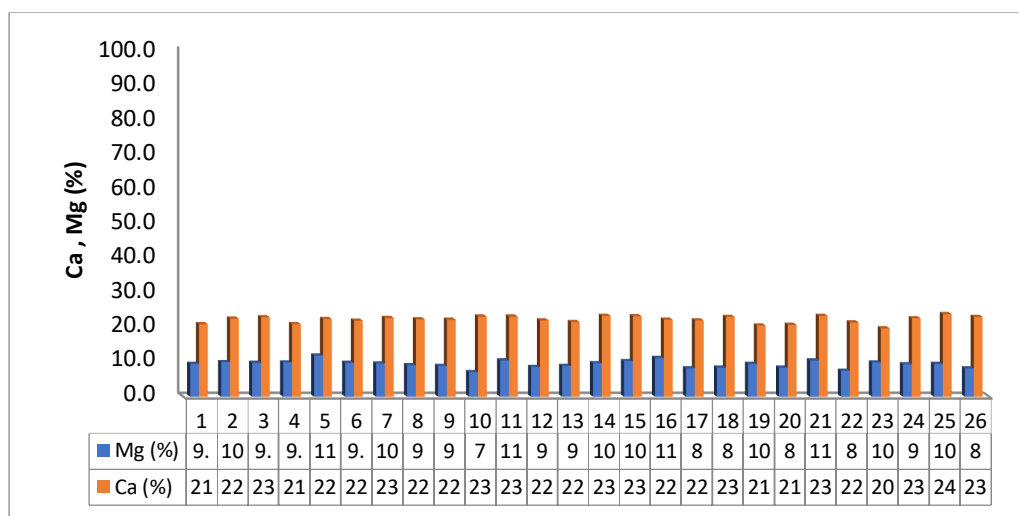
Table 1. Distribution of major and minor elements in the types of sheared dolomites studied, the northern edge of the Khorramabad anticline (values by weight percentage)(

Dolomite type	Sample. No	C (%)	O (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (%)	Mn (%)	Na (%)	Sr (%)
Dolomicrite	Sh-1	42.0	25.3	21.0	9.5	0.5	0.1	0.5	0.8
	Sh-4	22.3	42.3	22.6	10.0	0.2	0.2	0.7	1.2
	Sh-9	29.9	33.0	23.0	9.8	0.7	0.5	1.3	0.9
	Sh-14	23.2	42.0	21.0	9.9	0.7	0.2	1.2	1.2
	Sh-21	45.0	17.1	22.5	11.9	0.6	0.3	1.1	1.1
	Sh-26	22.3	43.0	22.0	9.8	0.3	0.6	0.8	0.8
	Max	45.0	43.0	23.0	11.9	0.7	0.6	1.3	1.2
	Min	22.3	17.1	21.0	9.5	0.2	0.1	0.5	0.8
	Average	30.8	33.8	22.0	10.2	0.5	0.3	0.9	1.0
Dolomicrosparite	Sh-2	37.5	26.5	22.8	9.6	0.5	0.7	0.8	0.8
	Sh-5	34.2	31.4	22.4	9.1	0.2	0.5	0.6	0.7
	Sh-7	36.2	28.6	22.3	8.9	1.3	0.2	0.8	0.9
	Sh-8	26.4	40.1	23.2	7.1	1.3	0.9	0.5	0.1
	Sh-11	21.9	41.1	23.2	10.5	1.1	0.5	0.7	0.3
	Sh-12	41.2	25.3	22.1	8.6	0.9	0.7	0.6	0.4
	Sh-15	41.8	25.8	21.6	8.9	0.3	0.3	0.4	0.8
	Sh-18	39.1	24.1	23.4	9.7	1.3	0.4	0.3	0.9
	Sh-19	31.9	31.1	23.3	10.3	0.8	0.7	0.7	0.7
	Sh-23	27.6	36.1	22.3	11.2	0.9	0.1	0.4	0.9
	Max	41.8	41.1	23.4	11.2	1.3	0.9	0.8	0.9
	Min	21.9	24.1	21.6	7.1	0.2	0.1	0.3	0.1
	Average	33.78	31.01	22.66	9.39	0.86	0.5	0.58	0.65
Dolosparite	Sh-3	43.2	24.6	22.1	8.2	0.6	0.8	0.2	0.2
	Sh-6	27.4	37.5	23.1	8.4	0.8	0.5	0.9	0.6
	Sh-10	23.7	42.3	20.6	9.5	1.5	0.4	1.4	0.3
	Sh-13	45.1	22.5	20.8	8.4	0.8	1.2	0.6	0.5
	Sh-16	33.7	30.1	23.4	10.5	0.9	0.8	0.2	0.1
	Sh-17	36.7	30.6	21.5	7.5	1.1	0.9	0.1	0.7
	Sh-20	41.1	26.5	19.8	9.9	1.4	0.5	0.2	0.5
	Sh-22	25.1	40.1	22.7	9.4	0.5	1.2	0.1	0.2
	Sh-24	38.2	24.8	23.9	9.5	1.3	0.4	0.8	0.7
	Sh-25	38.4	26.2	23.1	8.2	1.7	0.5	0.4	0.7
	Max	45.1	42.3	23.9	10.5	1.7	1.2	1.4	0.7
	Min	23.7	22.5	19.8	7.5	0.5	0.4	0.1	0.1
	Average	35.26	30.52	22.1	8.95	1.06	0.72	0.49	0.45

عناصر اصلی

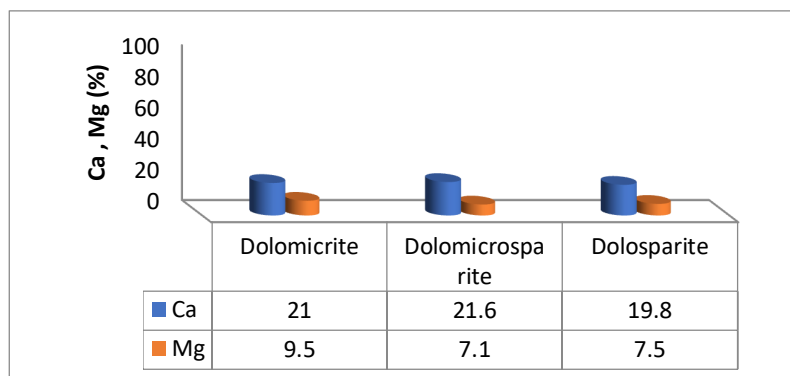
کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg): به طور کلی میزان کلسیم (Ca) در دولومیت‌های برش مورد مطالعه از ۱۹/۸ تا ۲۳/۹ درصد (میانگین ۲۲/۳ درصد) تغییر می‌کند. میزان منیزیم (Mg) در این دولومیت‌ها از ۷/۱ تا ۱۱/۹ درصد (میانگین ۹/۴ درصد) در تغییر است. مقدار Ca در نمونه‌های مورد مطالعه، در دلواسپارایت‌ها بین ۱۹/۸ تا ۲۳/۹ درصد (میانگین ۲۲/۱ درصد) در دلو میکرواسپارایت‌ها بین ۲۱/۶

تا ۲۳/۴ درصد (میانگین ۲۲/۶۶ درصد) و در دلو میکرایت‌ها بین ۲۱ تا ۲۳ درصد (میانگین ۲۲ درصد) و مقادیر Mg در دلواسپارایت‌ها بین ۷/۵ تا ۱۰/۵ درصد (میانگین ۸/۹۵ درصد) دلو میکرواسپارایت‌ها بین ۷/۱ تا ۱۱/۲ درصد (میانگین ۹/۳۹ درصد) و در دلو میکرایت‌ها بین ۹/۵ تا ۱۱/۹ درصد (میانگین ۱۰/۲ درصد) در تغییر است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).



شکل ۱۱. توزیع هیستوگرام عناصر Ca و Mg در نمونه‌های مورد مطالعه

Fig. 11. Histogram distribution of Ca and Mg elements in the studied samples



شکل ۱۲. توزیع هیستوگرام عناصر Ca و Mg در دولومیت‌های مورد مطالعه به تفکیک انواع دولومیت‌ها (دلو میکرایت‌ها، دلو میکرواسپارایت‌ها و دلواسپارایت‌ها) (مقادیر بر حسب میانگین می‌باشند)

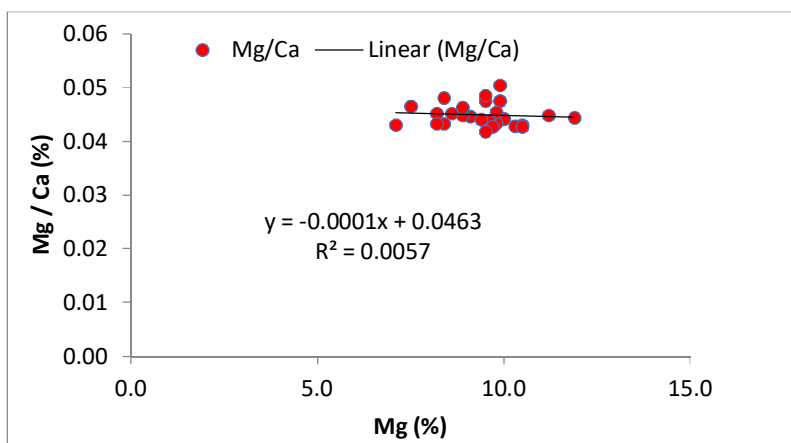
Fig. 12. Histogram distribution of Ca and Mg elements in the studied dolomites by different types of dolomites, dolomicrites, dolomicrosparites, and dolosparite (values are average)

از ۱۱/۹ به ۷/۱ درصد می‌تواند به علت دگرسانی جزئی این دولومیت‌ها می‌باشد (بلت و همکاران، ۱۹۸۰). از طرفی با توجه به اینکه در طی فرآیند دولومیتی شدن مقادیر Mg/Ca به دلیل تشکیل دولومیت کاهش پیدا می‌کند

مقادیر منیزیم (Mg) در دولومیت‌های برش مورد مطالعه با نسبت ارتباط مثبتی دارد ($R^2=0.0057$) (شکل ۱۳). از آنجایی که نسبت (Mg/Ca) در دولومیت‌های خالص حدود ۶۵ درصد می‌باشد، کاهش اندک مقادیر Mg

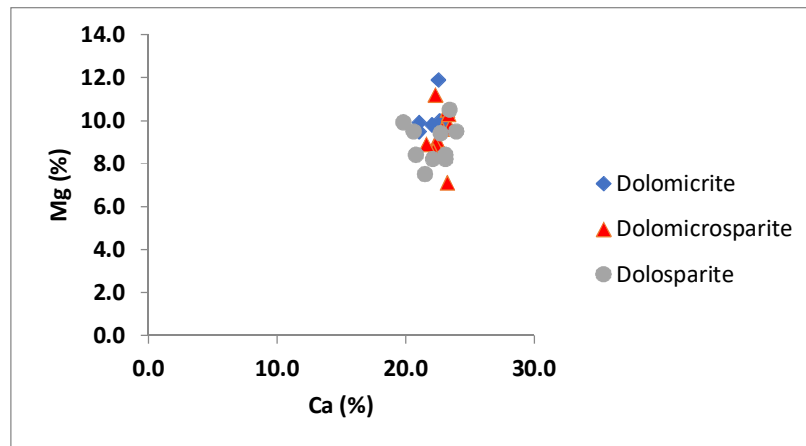
فازهای مختلف آنالیز شده برای دولواسپارایت‌ها، دولومیکرواسپارایت‌ها و دولومیکرایت‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب برابر ۲/۵، ۲/۴ و ۲/۲ می‌باشد. همانطور که مشخص است هر سه نوع دولومیت غیراستوکیومتری (فاقد نظم بلوری) هستند، این روند را با توجه به سن سازند شهبازان در برش مورد مطالعه می‌توان توجیه نمود.

(آدابی، ۱۳۹۰)، بنابراین مقدار Mg در دولومیت‌های درشت بلور کمتر از سایر دولومیت‌هاست، به گونه‌ای که دولواسپارایت‌ها نسبت به دولومیکرایت‌ها مقدار Mg کمتری دارند (شکل ۱۴). بیشترین میزان Mg در دولومیت‌های خالص ۱۳ درصد می‌باشد (بلت و همکاران، ۱۹۸۰). نسبت Ca/Mg در دولومیت‌های ایده‌آل برابر ۱/۶ می‌باشد (شانلی و همکاران، ۲۰۱۸). این نسبت برای



شکل ۱۳. روند کلی تغییرات نسبت Mg/Ca به Mg در نمونه‌های دولومیتی برش مورد مطالعه

Fig. 13. The general trend of changes in the ratio of Mg/Ca to Mg in the dolomite samples of the study section



شکل ۱۴. روند تغییرات مقادیر Mg در برابر Ca در دولومیت‌های برش مورد مطالعه

Fig. 14. The trend of changes in Mg values against Ca in the studied section dolomites

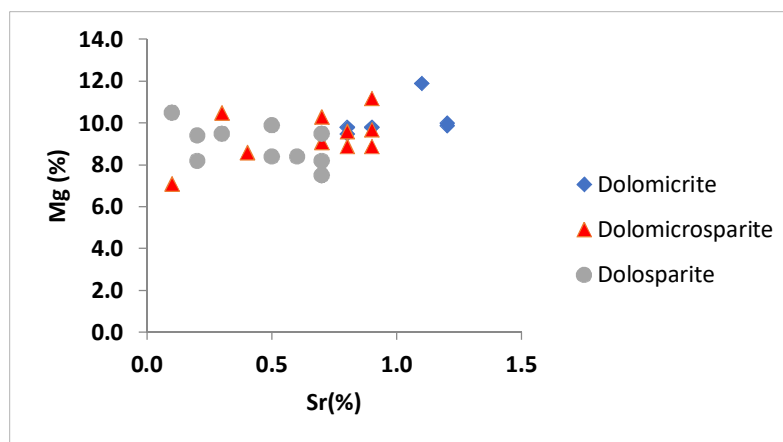
نیافته بلکه میزان این دو نوع عنصر وابسته به نسبت Mg/Ca سیال منشأ و سنگ‌آهک و دولومیت اولیه می‌باشد. همچنین وجود دولومیت‌های انحلال یافته (شکل ۷ تصویر د) در نمونه‌های مورد مطالعه را می‌توان به سیالات دیاژنزی غنی از یون کلسیم Ca^{+2} در محیط دیاژنزی نسبت داد (شانلی و همکاران، ۲۰۱۸).

با توجه به نمودار کلسیم (Ca) در برابر منیزیم (Mg) در نمونه دولومیت‌های برش مورد مطالعه تقریباً با افزایش مقدار کلسیم (Ca) مقدار منیزیم (Mg) نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۲)، این موضوع خلاف روند معمول را نشان می‌دهد که احتمالاً به دلیل جریان دائم و مکرر سیال دولومیت‌ساز می‌باشد که با تشکیل دولومیت (با توجه به باز بودن سیستم) میزان منیزیم (Mg) کاهش

عناصر فرعی

استرانسیم (Sr): استرانسیم یکی از مهمترین عناصر ردیاب تجمع یافته در دولومیت‌ها می‌باشد (میاو و همکاران، ۲۰۲۰). این عنصر وابسته به شکل کریستالی شدن دولومیت‌ها، ویژگی سیالات دیاژنتیکی (مانند شوری) و مواد متشکله آن می‌باشد که شامل فاکتورهای متعددی می‌باشد. دولومیت‌های اولیه مقدار استرانسیم بیشتری از دولومیت‌های ثانویه یا دیاژنزی دارند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ شانلی و همکاران، ۲۰۱۸). به طور کلی

تمرکز استرانسیم Sr در نمونه‌های برش مورد مطالعه بین ۰/۱ تا ۱/۲ درصد وزنی (میانگین ۰/۷ درصد) در تغییر می‌باشد. تمرکز استرانسیم در دلواسپارایت‌ها بین ۰/۷ تا ۱ درصد (میانگین ۰/۴ درصد وزنی) در دولومیکرواسپارایت-ها بین ۰/۹ تا ۰/۱۱ (میانگین ۰/۶ درصد) و در دولومیکرایت‌ها ۰/۸ تا ۱/۲ درصد (میانگین ۱ درصد وزنی) در تغییر است. به طور کلی مقادیر Sr در دولومیت‌های مورد مطالعه از دولومیکرایت‌ها به سمت دلواسپارایت‌ها کاهش پیدا می‌کند (شکل ۱۵).

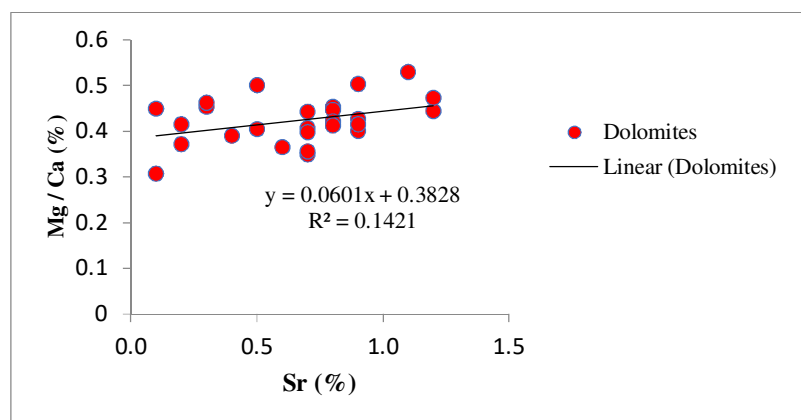


شکل ۱۵. روند تغییرات مقادیر Sr در دولومیت‌های برش مورد مطالعه. همانگونه که از شکل پیداست از دلواسپارایت‌ها به سمت دولومیکرایت‌ها مقدار Sr افزایش پیدا کرده است.

Fig. 15. Changes in Sr values in the studied section dolomites. As can be seen from the figure, the amount of Sr has increased from dolosparites to dolomicrites.

بالاتری دارند. هامفری (۱۹۸۸) میاو و همکاران (۲۰۲۰)، بر این باور است که مقادیر بالای Sr در دولومیت‌ها نشان از دولومیتی شدن آهک‌های آراگونیتی در محیط‌های به نسبت بسته دیاژنزی دارد. تمرکز استرانسیم (Sr) به طور میانگین در دولومیت‌هایی که در محیط‌های تبخیری و یا مستقیماً از آب دریا تشکیل می‌شوند، به ترتیب ۶۰۰ و ۴۰۰ پی‌پی‌ام است مقادیر پایین این عنصر می‌تواند به دلیل تبلور مجدد در طی دیاژنز تدفینی باشد (وایزر ۱۹۸۳؛ لند ۱۹۹۱؛ ژسک و همکاران، ۲۰۱۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). رسم مقادیر Sr در برابر Mg/Ca در نمونه‌های مورد مطالعه یک روند افزایشی خطی را نشان می‌دهد ($R^2=0.1421$) که می‌تواند به دلیل حالت غیراستوکیومتری (فاقد نظم بلوری) بلورهای دولومیت باشد (شانلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ میاو و همکاران، ۲۰۲۰). (شکل ۱۶).

دولومیت‌های اولیه ریز بلور به دلیل داشتن شبکه بلوری با نظم کمتر (غیراستوکیومتری) دارای مقادیر بیشتری استرانسیم نسبت به دولومیت‌های درشت بلور حاصل از دیاژنز تاخیری هستند (کیرماسی، ۲۰۰۸؛ میاو و همکاران، ۲۰۱۸). در دولومیت‌های نوع سوم (درشت بلور) مقدار استرانسیم به دلیل رسیدن به حالت ایده‌آل در شبکه بلوری کاهش یافته است (آدابی، ۲۰۰۹). توسعه فرآیند دولومیتی شدن به طور کلی سبب کاهش میزان عنصر استرانسیم در شبکه بلورها می‌گردد (هو و همکاران، ۲۰۱۶؛ شانلی و همکاران، ۲۰۱۸). تمرکز بالای استرانسیم در دولومیکرایت‌ها می‌تواند به دلیل فرایندهای دیاژنزی باشد که بر روی پوسته‌های آراگونیتی برخی دوکفه‌ای‌ها، فرامینفرهای بنتیک و برخی جلبک‌های سبز در نمونه‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). به طور کلی دولومیت‌هایی که جایگزین آراگونیت می‌شوند نسبت به آن‌هایی که جانشین کلسیت می‌شوند مقدار Sr



شکل ۱۶. وجود همبستگی خطی مثبت بین نسبت Mg/Ca و Sr (افزایش نسبت Mg/Ca به معنای افزایش مقدار Sr در دولومیت‌ها می‌باشد که می‌تواند به دلیل غیراستوکیومتری بودن بلورهای دولومیت باشد).

Fig. 16. The presence of a positive linear correlation between the ratio of Mg/Ca and Sr (an increase in the ratio of Mg/Ca means an increase in the amount of Sr in dolomites, which can be due to the non-stoichiometry of dolomite crystals).

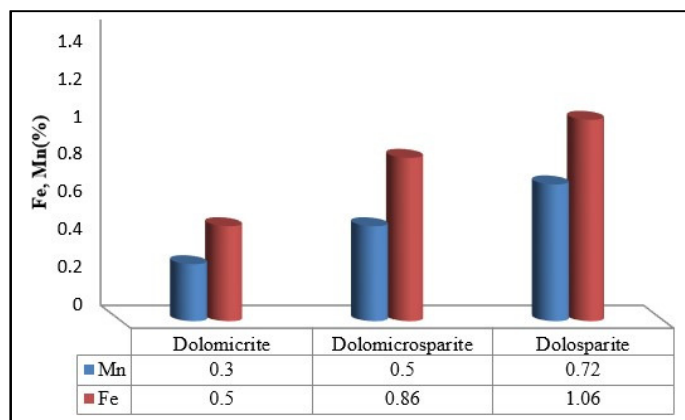
توسط سیال‌های غنی از منگنز تحت شرایط احیاء می‌باشد. یکسان نبودن مقادیر آهن و دیگر عناصر فرعی در انواع مختلف دولومیت‌ها نیز به دلیل ترکیب به نسبت متفاوت سیال‌های تشکیل دهنده دولومیت‌ها است. توزیع این دو عنصر اغلب نسبت به تغییرات pH و Eh سیال حساس می‌باشند. در سیالات اکسیدان با Eh مثبت، Fe^{+2} و Mn^{+2} بیشتر به صورت اکسید می‌باشند و برای مشارکت در ساختار کربنات‌ها (سیدریت‌ها) حضور ندارند (تاکر و رایت، ۱۹۹۱). میزان Fe و Mn در طی تبلور مجدد به تناوب افزایش می‌یابند (تاکر و رایت، ۱۹۹۱). در آنالیزهای انجام شده در نمونه‌های سازند شهبازان عنصر Fe معمولاً در شبکه بلور جانشین Mg می‌گردد. بنابراین باید رابطه‌ی معکوسی بین میزان Fe با Mg وجود داشته باشد (شکل ۱۸) که این رابطه برای دولومیت‌های تدفینی عمیق (دولواسپارایت‌ها) صادق می‌باشد ولی برای دولومیکرایت‌ها و دولومیکرواسپارایت‌ها چندان صادق نمی‌باشد (شکل ۱۹) که یک دلیل آن می‌تواند به علت حضور این عنصر به صورت اکسید و سولفید به شکل پراکنده در بین و درون این نوع دولومیت‌ها باشد و نه به صورت جانشینی با Mg دولومیت‌ها، که این موضوع باعث افزایش مقدار آهن Fe در آنالیز نمونه‌ها می‌گردد. بدین معنی که احتمالاً مقداری از این عنصر به صورت عنصر فرعی درون ساختار بلور قرار ندارد، بلکه به شکل ناخالصی همراه نمونه وجود دارد. اختلاف در مقدار Fe نمونه‌های آنالیز شده (بین ۰/۲ تا ۱/۴) می‌تواند به علت حضور کانی‌های اکسیدی و سولفیدی در نمونه‌های دولومیتی ریزبلور باشد.

آهن (Fe) و منگنز (Mn): آهن و منگنز بر خلاف استرانسیم و سدیم در دولومیت‌های دیاژنزی تأخیری نسبت به دولومیت‌های اولیه تمایل به افزایش نشان می‌دهند. این افزایش می‌تواند به دلایل زیر باشد:

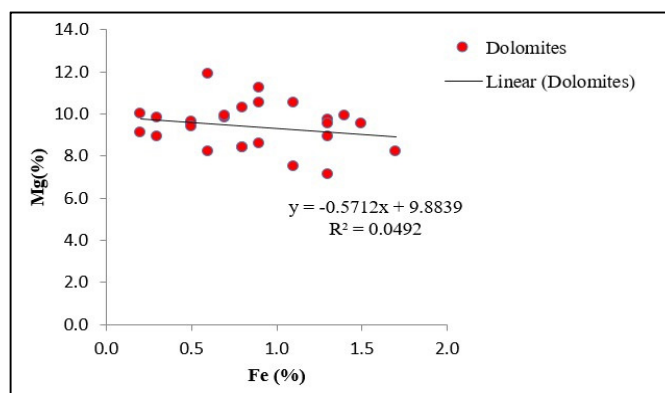
- آهن و منگنز در آب دریا تمرکز پایین، ولی در سیال‌های دیاژنزی تمرکز بالایی دارند (میاو و همکاران ۲۰۲۰).
- تمرکز بیشتر آهن و منگنز به شرایط احیایی حاکم بر محیط بستگی دارد، به طوری که مقادیر Fe و Mn در دولومیت‌های اولیه نزدیک به سطح به دلیل شرایط اکسایشی، نسبت به دولومیت‌های تدفینی که در شرایط احیایی تشکیل می‌شوند، پایین‌تر است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ شانلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ میاو و همکاران، ۲۰۲۰). مقادیر آهن Fe در نمونه‌های مورد مطالعه بین ۰/۲ تا ۱/۷ درصد وزنی (میانگین ۰/۹ درصد) در تغییر است. در دولواسپارایت‌ها بین ۰/۵ تا ۱/۷ درصد (میانگین ۱/۰۶ درصد وزنی) در دولومیکرواسپارایت‌ها بین ۰/۲ تا ۱/۳ درصد (میانگین ۰/۸۶ درصد وزنی) و در دولومیکرایت‌ها بین ۰/۲ تا ۰/۷ درصد (میانگین ۰/۵ درصد وزنی) در تغییر است. مقادیر منگنز Mn در نمونه‌های مورد مطالعه بین ۰/۱ تا ۱/۲ درصد وزنی (میانگین ۰/۵ درصد) در تغییر است. در دولواسپارایت‌ها بین ۰/۴ تا ۱/۲ درصد (میانگین ۰/۷۲ درصد وزنی) در دولومیکرواسپارایت‌ها بین ۰/۱ تا ۰/۹ درصد (میانگین ۰/۵ درصد وزنی) و در دولومیکرایت‌ها بین ۰/۱ تا ۰/۶ درصد (میانگین ۰/۳ درصد وزنی) در تغییر است (شکل ۱۷). مقدار بالای عناصر آهن و منگنز در دولومیت‌ها بیانگر تحت تأثیر قرار گرفتن دولومیت‌ها

با استرانسیم و سدیم، مقادیر آهن و منگنز در دولومیت‌های دیاژنتیکی بالاتر از دولومیت‌های اولیه است (شکل ۲۰) (شانی و همکاران، ۲۰۱۸). رسم مقادیر Mn در برابر Fe نشان داد که این دو عنصر همبستگی مثبتی با هم دارند که می‌تواند به دلیل دگرسانی دولومیت‌ها توسط سیالات دیاژنتری (غیردریایی) باشد (شکل ۲۱).

دولوستون‌ها معمولاً با میزان بالایی از Fe, Na و کمتری Sr, Mn مشخص می‌شوند و تنها یک بخشی از دولوستون‌ها میزان Mn بالایی دارند (پنگ و همکاران، ۲۰۱۷). از آنجایی که مقادیر آهن و منیزیم در آب دریا بسیار پایین‌تر از آب درون سازندی است، یک محیط کاهشی برای آهن و منگنز با کلسیم و منیزیم در شبکه دولومیت به صورت جانشینی را مساعد می‌سازد. در مقایسه



شکل ۱۷. توزیع هیستوگرام عناصر Fe و Mn در دولومیت‌های مورد مطالعه (مقادیر بر حسب میانگین درصد وزنی می‌باشند)
Fig. 17. Histogram distribution of Fe and Mn elements in the studied dolomites (values are in average weight percentage)



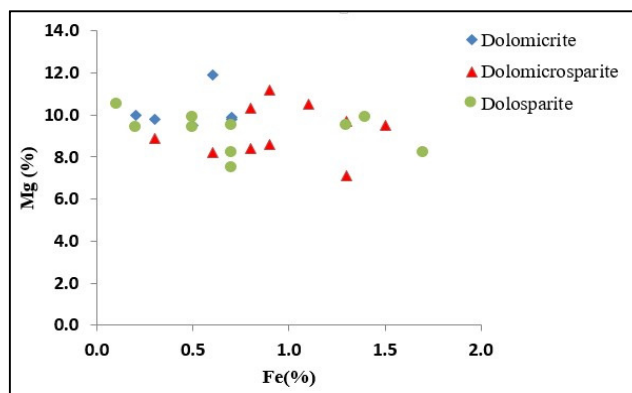
شکل ۱۸. رسم مقادیر Fe در برابر Mg در دولومیت‌های سازند شهبازان (Fe به مرور جایگزین Mg می‌شود)
Fig. 18. Plot of Fe values against Mg in Shahbazan formation dolomites (Fe gradually replaces Mg)

تمرکز این عنصر در بیشتر انواع مختلف دولومیت‌ها نزدیک به یکدیگر است. این مقادیر بیش از میانگین دولومیت‌هایی است که در محیط دریایی عادی شکل می‌گیرند و به طور تبیین ۱۱۰ تا ۱۶۰ پی‌پی‌ام سدیم Na دارند (وایزر، ۱۹۸۳؛ شانی و همکاران، ۲۰۱۸). رسم نمودار Na در برابر Mg نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که تمرکز Na با افزایش مقادیر Mg افزایش می‌یابد (شکل ۲۲) که می‌تواند شاهدی برای غیراستوکیومتری بودن بلورهای دولومیت باشد. مقدار Na همانند Sr در دولومیت‌های

سدیم (Na): سدیم فراوان‌ترین کاتیون آب دریا می‌باشد و تمرکز آن در دولومیت‌ها درجه شوری سیالات دولومیت‌ساز را نشان می‌دهد (وارن، ۲۰۰۰). تمرکز Na در دولومیت‌های برش مورد مطالعه بین ۰/۱ تا ۱/۴ درصد وزنی (میانگین ۰/۶ درصد وزنی) در تغییر است. مقادیر تمرکز Na در دولواسپارایت‌ها بین ۰/۱ تا ۱/۴ درصد (میانگین ۰/۴۹ درصد وزنی) در دولومیکرواسپارایت‌ها بین ۰/۳ تا ۰/۸ درصد (میانگین ۰/۵۸ درصد وزنی) و در دولومیکریت‌ها بین ۰/۵ تا ۱/۳ درصد (میانگین ۰/۹ درصد وزنی) در تغییر است.

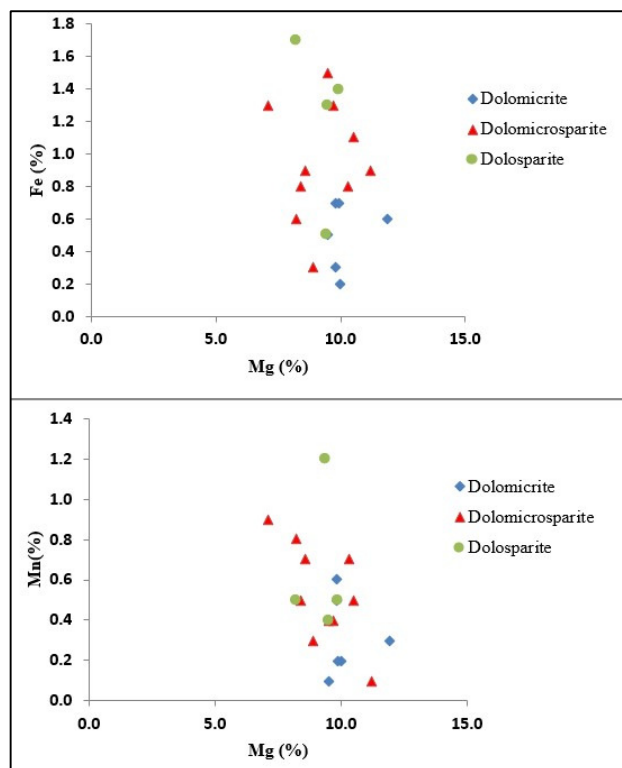
Na در انواع مختلف دولومیت‌های مورد مطالعه (بین ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰۰ پی‌پی‌ام) نشان می‌دهد که احتمالاً این نوع از دولومیت‌ها متأثر از شورابه‌های کف حوضه‌ای باشند.

غیراستوکیومتری (فاقد نظم بلوری) بیشتر می‌باشد در نتیجه می‌توان گفت دولومیت‌های مورد مطالعه هنوز به نظم بلوری (استوکیومتری) نرسیده‌اند. تمرکز نسبتاً بالایی



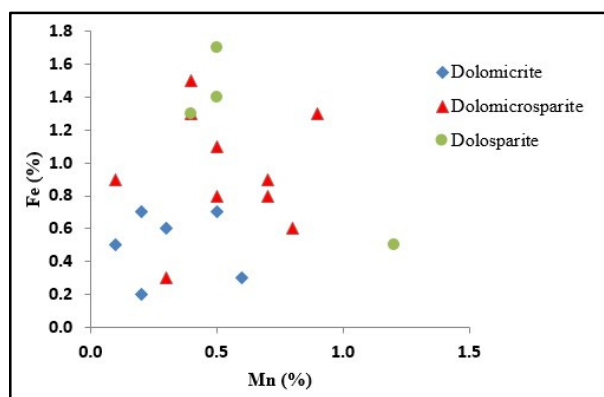
شکل ۱۹. رسم مقادیر Fe در برابر Mg به تفکیک انواع دولومیت‌های منطقه مورد مطالعه. وجود Fe در دولومیکرایت‌ها به دلیل شرایط اکسیدی بوده در صورتی که در دولومیکرواسپارایت‌ها و دولواسپارایت‌ها به دلیل شرایط نیمه احیا تا احیاء بوده است.

Fig. 19. Plot of Fe values against Mg by different types of dolomites in the studied area. The presence of Fe in dolomicrites was due to oxide conditions, while in dolomicrosparites and dolosparites it was due to semi-reduction to reduction conditions.



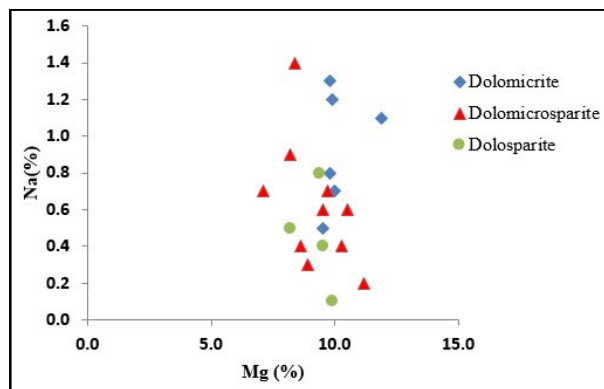
شکل ۲۰. رسم مقادیر Fe و Mn در برابر Mg به تفکیک انواع دولومیت‌های منطقه مورد مطالعه. مقادیر Fe و Mn با افزایش مقادیر Mg در دولومیت‌ها افزایش می‌یابد که به دلیل جانشینی ترجیحی یون‌های Fe و Mn به جای Mg در شبکه بلور دولومیت است. با توجه به تأثیر بیشتر دیاژنز بر روی دولومیت‌های ثانویه (دولومیکرواسپارایت‌ها و دولواسپارایت‌ها) مقادیر Fe و Mn در این نمونه‌ها بیشتر از دولومیکرایت‌ها می‌باشد.

Fig. 20. Plot of Fe and Mn values against Mg by different types of dolomites in the studied area. The amounts of Fe and Mn increase with the increase of Mg in dolomites, which is due to the preferential substitution of Fe and Mn ions instead of Mg in the dolomite crystal network. Due to the greater impact of diagenesis on secondary dolomites (delomicrosparites and dolosarites), Fe and Mn values in these samples are higher than dolomicrites.



شکل ۲۱. روند توزیع عنصر Mn در برابر Fe برای انواع دولومیت‌های منطقه مورد مطالعه. همانطور که مشاهده می‌شود یک ارتباط مثبتی بین مقادیر Mn و Fe وجود دارد یعنی با افزایش فرآیند دگرسانی توسط سیالات دیاژنی، مقادیر Mn و Fe افزایش پیدا می‌کند.

Fig. 21. Distribution trend of Mn element against Fe for all types of dolomites in the studied area. As can be seen, there is a positive relationship between the amounts of Mn and Fe, that is, with the increase in the alteration process by diagenesis fluids, the amounts of Mn and Fe increase.



شکل ۲۲. رسم مقادیر Na در برابر Mg برای انواع مختلف دولومیت‌های برش مورد مطالعه. تمرکز Na با افزایش مقادیر Mg افزایش می‌یابد. مقادیر نسبتاً بالای Na در دولومیت‌های مورد مطالعه شاهدهی بر غیراستوکیومتری بودن آن‌ها می‌باشد.

Fig. 22. Plot of Na vs. Mg values for different types of studied cut dolomites. Na concentration increases with increasing Mg values. Relatively high amounts of Na in the studied dolomites are proof of their non-stoichiometry.

۲۰۰۰؛ گرگ و شلتون، ۱۹۹۰). دولومیت‌های نوع دوم و سوم بر اثر تبلور مجدد و یا جانشینی دولومیت‌های خیلی ریز بلور تشکیل شده‌اند. دولومیکرواسپارایت‌ها و دولواسپارایت‌ها عمدتاً به همراه استیلولیت‌ها مشاهده می‌شوند. دولومیت‌هایی که در طول استیلولیت‌ها رشد کرده‌اند توسط پژوهشگران زیادی گزارش شده است (ماتس و مونتهجوی، ۱۹۸۰؛ زنگر، ۱۹۸۳؛ میلر و فولک، ۱۹۹۴؛ شانلی و همکاران، ۲۰۱۸). هر چند در خیلی از موارد شکل‌گیری دولومیت‌ها ارتباطی به فرایند انحلال فشاری نداشته و صفحات استیلولیتی را به عنوان مجرای برای هدایت سیالات دولومیت‌ساز در نظر می‌گیرند (زنگر، ۱۹۸۳؛ میلر و فولک، ۱۹۹۴). به علاوه دولومیت‌هایی که بر اثر فرایند انحلال فشاری شکل می‌گیرند منحصراً ریموندری و آهن‌دار می‌باشند (وانلس، ۱۹۷۹). با توجه به اینکه

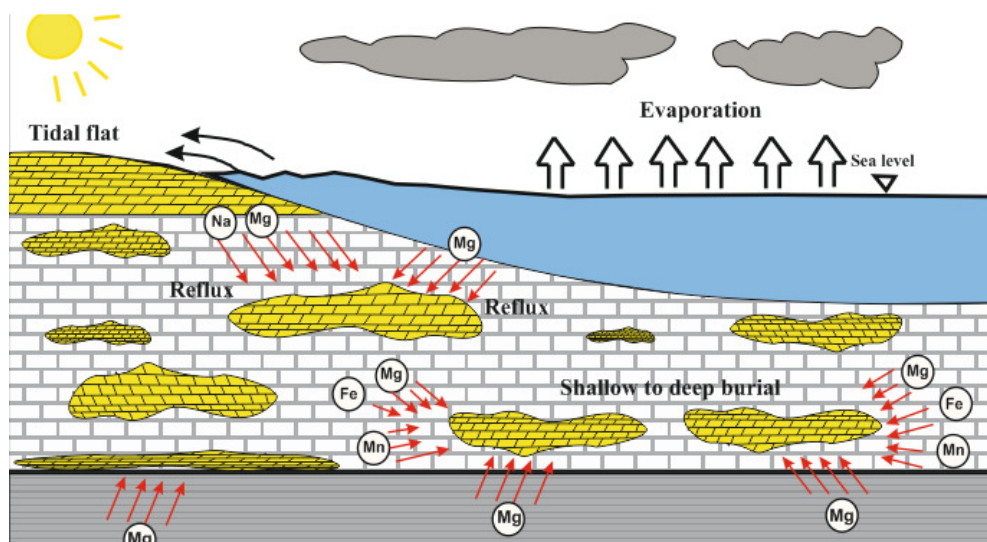
۳-۴- تعیین محیط دولومیتی شدن و منشأ سیالات دولومیت‌ساز

به طور کلی دو نوع دولومیت در سازند شهبازان تحت عنوان دولومیت‌های اولیه (دولومیکرایت‌ها) و دولومیت‌های ثانویه (دولومیکرواسپارایت‌ها، دولواسپارایت‌ها و دولومیت‌های بسیار درشت بلور پر کننده حفرات و شکستگی‌ها) تشخیص داده شد. با توجه به فابریک و اندازه خیلی ریز بلورهای دولومیت، حفظ بافت‌های اولیه رسوبی، نظیر اینتراکلیست‌ها، لامینه‌های جلبکی و فابریک چشم پرنده‌ای، عدم فسیل و کانی‌های تبخیری و همچنین نبود شواهدی که نشان دهنده تشکیل آن‌ها تحت تأثیر فرایندهای دیاژنتیکی تأخیری باشد به نظر می‌رسد که دولومیت‌های نوع اول (دولومیکرایت‌ها) تحت شرایط سطحی، دمای پایین و در محیط بین جزرومدی تشکیل شده باشند (وارن،

سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی، دولومیت‌های سازند شهبازان را می‌توان از مدل جزرومدی، تراوش و سپس دفن کم عمق تا متوسط در نظر گرفت (شکل ۲۳). نکته حائز اهمیت این است که سازند شهبازان در بخش‌های کم عمق یک پلتفرم کربناته رسوب‌گذاری نموده است و نقش سیالات دولومیت-ساز با منشأ آب‌های متئوریک را نباید نادیده گرفت و جهت پی بردن به منشأ دقیق سیالات دولومیت‌ساز نیازمند تکنیک‌های دقیق‌تر مانند کاتودولومینسانس و ایزوتوپ-های پایدار می‌باشد.

در سرتاسر دوره‌های زمین‌شناسی همانند سازند شهبازان، بسیاری از توالی‌های کربناته کم عمق (از پهنه‌های جزرومدی تا بخش‌های ابتدایی دریای باز) ائوسن تحت تاثیر فرآیندهای شدید دولومیتی شدن قرار گرفته‌اند (بوسنس و همکاران، ۲۰۰۰؛ آدابی و همکاران، ۲۰۰۸؛ زهدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ مدرس و همکاران، ۲۰۱۸). از جمله مطالعاتی که در ارتباط با پتروگرافی و ژئوشیمی دولومیت‌های سازند شهبازان می‌توان نام برد مطالعات وزیری‌مقدم و همکاران (۱۳۹۷) در شمال غرب شهرستان سمیرم می‌باشد. در این مطالعه وجود دولومیت‌های ریزبلور به شرایط سطحی و دمای پایین و دولومیت‌های ثانویه به محیط‌های دیاژنزی کم عمق تا متوسط توسط تراوش سیالات دولومیت‌ساز با شوری نرمال نسبت داده شده است. همچنین سبزواری و صداقت‌نیا (۱۴۰۰)، سنگ‌نگاری و مدل دولومیتی شدن سازند شهبازان را جنوب لرستان مورد بررسی قرار دادند، سازند شهبازان در این بخش از حوضه‌ی رسوبی زاگرس در یک محیط دیاژنزی دفنی کم عمق تا متوسط در اثر تراوش شورابه‌های کف حوضه‌ای تبخیر شده به داخل پلتفرم کربناته سازند شهبازان در ناحیه مورد مطالعه می‌باشد. مقادیر پایین Fe و مقادیر بالای Na و Sr در دولومیکرایت‌ها و تمرکز بالای Fe در دولومیکرواسپاریت‌ها و دولواسپاریت‌ها به همراه وجود برخی شواهد مانند اینتراکلاست، تخلخل فنسترال و نبود کانی‌های تبخیری نشان‌دهنده تشکیل این دولومیت‌ها از مدل جزرومدی، تراوش و سپس دفن کم عمق تا متوسط می‌باشد. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی دولومیت‌های مورد مطالعه با دیگر برش‌های این سازند در حوضه رسوبی زاگرس بیانگر شرایط متفاوت دیاژنزی در طی دفن سیالات دولومیتی‌کننده زمان ائوسن در بخش‌های مختلف حوضه زاگرس می‌باشد.

دولواسپاریت‌ها و دولومیکرواسپاریت‌های مورد مطالعه هیچ یک از این خصوصیات را دارا نمی‌باشند و آثاری از بافت اولیه (دولومیکرایت‌ها) در آن‌ها مشاهده می‌شود نمی‌توان آن‌ها را مرتبط با فرایند انحلال فشاری در نظر گرفت بلکه بیشتر بر اثر جانشینی و تبلور مجدد حاصل شده‌اند. مقادیر پایین استرانسیم (میانگین ۰/۷ درصد) و به نسبت بالاتر آهن (میانگین ۰/۹ درصد) و منگنز (میانگین ۰/۵ درصد) در دولومیت‌های درشت بلورتر، احتمالاً بیانگر افزایش اندازه بلورهای دولومیت و تبلور دوباره بلورهای دولومیت در طی تدفین است. در طی دیاژنیز تدفینی تبلور مجدد در بلورهای دولومیت مشاهده می‌شود همچنین انحلال در پوسته‌ی آلوکم‌ها و جانشینی آن‌ها توسط کلسیت و دولومیت رخ داده است. در برخی نمونه‌ها فضای حاصل از شکستگی‌ها و حفرات توسط کلسیت اسپاریت و دولواسپاریت‌ها پر شده است، اندازه این بلورها در حد چند ده میکرون و حتی در حد چند میلی‌متر می‌باشد که حاصل دیاژنیز تدفینی بوده و در آن‌ها با توجه به نتایج آنالیز ژئوشیمیایی و رنگ‌آمیزی با محلول فروسیانید پتاسیم عنصر آهن یافت می‌شود. به نظر می‌رسد این نوع از دولومیت‌ها آخرین نسل از دولومیت‌ها باشند که در نمونه‌های سازند شهبازان شکل گرفته‌اند و تخلخل حاصل از شکستگی‌ها را پر کرده‌اند. دولومیت نوع یک (دولومیکرایت‌ها) به عنوان دولومیت تقریباً همزمان با رسوب‌گذاری در نظر گرفته شده است. دولومیت نوع دوم (دولومیکرواسپاریت‌ها) و دولومیت نوع سوم (دولواسپاریت‌ها) از تبلور دوباره دولومیت‌های پیشین به وجود می‌آیند. دولواسپاریت‌ها به صورت تبلور مجدد از دولومیت‌های ریز بلور و به صورت سیمان همراه با کلسیت هم‌بعد پر کننده شکستگی‌ها و حفرات سنگ مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد که برای دولومیتی شدن اولیه و یا همزمان با رسوب‌گذاری، تنها منشأ منیزیم، آب دریا است (لند، ۱۹۸۵). این منشأ تنها برای دولومیت‌های نوع ۱ در نظر گرفته می‌شوند که در نزدیک سطح و تحت شرایط دمای پایین در یک پهنه جزرومدی و احتمالاً در اثر پمپاژ آب دریا به این پهنه تشکیل شده‌اند. اما منیزیم مورد نیاز برای دولومیت‌های نوع ۲ و نوع ۳ از منابع مختلفی قابل تأمین می‌باشد که از میان آن‌ها می‌توان به آب‌های دریایی محبوس یا آب‌های درون روزنه‌ای و دیاژنیز کانی‌های رسی در طی تدفین در نظر گرفت. در نهایت با توجه به شواهد



شکل ۲۳. مدل دولومیتی شدن سازند شهبازان در برش مورد مطالعه (بدون مقیاس)
 Fig. 23. Dolomitization model of Shahbazan Formation in the studied section (no scale)

۵- نتیجه‌گیری

فازهای مختلف آنالیز شده برای دلواسپارایت‌ها، دلومیکرواسپارایت‌ها و دلومیکرایت‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب برابر ۲/۵، ۲/۴ و ۲/۲ می‌باشد که بیانگر غیراستوکیومتری (فاقد نظم بلوری) بودن این دولومیت‌ها می‌باشد. این روند را با توجه به سن سازند شهبازان در برش مورد مطالعه می‌توان توجیه نمود.

با توجه به مطالعات سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی بر روی عناصر اصلی نظیر Mg و Ca و عناصر فرعی نظیر Sr، Fe، Na، Mn دو گروه اصلی از دولومیت‌ها در سازند شهبازان، تاقدیس خرم‌آباد مطالعه شناسایی شده است که شامل دولومیت‌های اولیه (هم‌زمان با رسوب‌گذاری) و دولومیت‌های ثانویه (پس از رسوب‌گذاری) می‌باشند. دولومیت‌های اولیه (دلومیکرایت‌ها) با بافت موزائیکی و اغلب بی‌شکل در اندازه‌های کمتر از ۱۰ میکرون و دولومیت‌های ثانویه (دلومیکرواسپارایت‌ها و دلواسپارایت‌ها) با بافت نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار در اندازه‌های بزرگ‌تر از ۱۰ میکرون و حتی در اندازه‌های چندین میلی‌متر مشاهده شدند. در دولومیت‌های مورد مطالعه یک روند افزایشی از عناصر Fe و Mn و یک روند کاهشی از عنصر Sr از دولومیت‌های اولیه به سمت دولومیت‌های ثانویه مشاهده شد. تمرکز بالای عناصر Fe و Mn در دولومیت‌های ثانویه نسبت به دولومیت‌های اولیه، به دلیل قرار گرفتن در شرایط احیایی و در محیط دیاژنزی تدفینی برای این نوع از دولومیت‌ها می‌باشد. وجود برخی شواهد مانند تخلخل چشم‌پرنده‌ای و اینتراکلیست‌ها و نبود کانی‌های تبخیری در نمونه‌های مورد مطالعه نشان داد که تشکیل دولومیت‌های اولیه در یک مدل جزرومدی بوده و سپس بر اثر تراوش شورابه‌های کف حوضه‌ای در پلت‌فرم کربناته سازند شهبازان دولومیت‌های ثانویه در یک مدل دیاژنزی دفنی کم عمق تا متوسط گسترش یافته‌اند. نسبت Ca/Mg برای

References

- Abdi, A., Adabi, M. H (2009) Dolomites petrography diagenesis analysis, probable Shahbazan- Asmari formations boundary and facies based on dolomicrite geochemistry, petrographic evidence and statistic methods in Darabi section. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 25 (1): 81-100 doi.org/20.1001.1.20087888.1388.25.1.6.8 (in Persian).
- Adabi, M. H (2009) Multistage dolomitization of upper Jurassic Muzduran Formation, Kopet-Dagh basin, N. E. Iran: *Crab. Eva*, 24: 16-32.
- Adabi, M. H (2009) Multistage dolomitization of upper Jurassic Muzduran Formation, Kopet-Dagh basin, N. E. Iran: *Carbonate. Evaporite*, 24: 16-32.
- Adabi, M. H., Rao, C. P (1996) Petrographic, element and isotopic criteria for Central Iran: *Iranian Petroleum Institute*, 15: 561- 574.
- Adabi, M. H., Zohdi, A., Ghabeishavi, A., Amir-Bakhtiyar, H (2008) Applications of nummulitids and other larger benthic foraminifera in depositional environment and sequence stratigraphy: an example from the Eocene deposits in Zagros Basin, SW Iran: *Facies*, 54 (4): 499-512.

- Al-Aasm, I. S., Packard, J. J (2000) Stabilization of early-formed dolomite, atale of divergence from two Mississippian dolomites: *Sedimentary Geology*, 131: 97-108.
- Amthor, J. E., Friedman, G. M (1992) Early to late-diagenetic dolomitization of platform carbonates: Lower Ordovician Ellenburger Group, Permian Basin, West Texas. *J. Sed. Petrol.*, 62: 1023-1043.
- Azmy, K., Veizer, J., Misi, A., de Oliveira, T. F., Sanches, A. L., Dardenne, M. A (2001) Dolomitization and isotope stratigraphy of the Vazante formation, São Francisco Basin, Brazil: *Precambrian Research*, 112(3): 303-329.
- Azomani, E., Azmy, K., Blamey, N., Brand, U., Al-Aasm, I (2013) Origin of Lower Ordovician dolomites in eastern Laurentia: Controls on porosity and implications from geochemistry: *Marine and Petroleum Geology*, 40: 99-114.
- Bahrami, F., Moussavi Harami, S. R., Khanehbad, M., Mahmudi Gharaie, M. H., Sadeghi, R (2014) Facies analysis, depositional environment and effective diagenesis processes on reservoir quality of the Asmari Formation in Ramin Oilfield. *Journal of Applied Sedimentology*, 4 (4): 16-26 (in Persian).
- Bosence, D. W. J., Wood, J. L., Rose, E. P. F., Qing, H (2000) Low and high-frequency sea-level changes control peritidal carbonate cycles, facies and dolomitization in the Rock of Gibraltar (Early Jurassic, Iberian Peninsula): *Journal of the Geological Society, London*, 157: 61-74.
- Dickson, J. A. D (1965) A modified staining technique for carbonate in the thin section: *Nature*, 205: 587.
- Callen, J. M (2016) In Situ Geochemistry of Middle Ordovician Dolomites of the Upper Mississippi Valley: Evaluation of the Dorag Model and New Implications for Dolomitizing Fluids: Master dissertation, Louisiana State University, 88 p.
- Dunham, R. J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *American Association of Petroleum Geologists*, 108-121.
- Folk, R. L (1959) Practical petrographic classification of limestones. *American Association of Petroleum Geologists. Bulletin*, 3 (1): 1-38.
- Farshi, M., Mousavi- Harami, S. R., Mahboubi, A., Khanehbad, M (2017) Facies and diagenesis processes and it effect on distribution on petrophysical properties on reservoir quality of the Asmari Formation in Gachsaran oil field. *Journal of Applied Sedimentology*, 5(9): 40-57. doi.org/10.22.84/psj.2017.13230.1136. (in persian).
- Friedman, G. M., Sanders, J. E (1967) Origin and Occurrence of Dolostones. In: Chilingar, G. V., Bissell, H. J. and Fairbridge, R. W., Eds., *Carbonate Rocks , Origin , Occurrence , and Classification*, 267-348.
- Geske, A., Zorlu, J., Richter, D. K., Buhl, D., Niedermayr, A., Immenhauser, A (2012) Impact of diagenesis and low grade metamorphosis on isotope ($\delta^{26}\text{Mg}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$) and elemental (Ca, Mg, Mn, Fe and Sr) signatures of Triassic sabkha dolomites, *Chemical Geology*, 332 (333): 45-64.
- Gregg, J. M., Shelton, K. L (1990) Dolomitization and Dolomite Neomorphism in the Back Reef Facies of the Bonnetterre and Davis Formations (Cambrian), Southeastern Missouri. *Journal of Sedimentary Research*, 60: 549-562.
- Gregg, J. M., Sibley, D. F (1984) Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture: *Journal of Sedimentary Petrology*, 54: 908- 931.
- Hardie, L (1987) Dolomitization: A Critical View of Some Current Views. *Journal of Sedimentary Research*, 57: 166-183.
- Hou, Y., Azmy, K., Berra, F., Jadoul, F., Blamey, N. J. F., Gleeson, S. A., Brand, U (2016) Origin of the Breno and Esino dolomites in the western southern Alps (Italy): implications for a volcanic influence: *Marine and Petroleum Geology*, 69: 38-52.
- Hu, W., Chen, Q., Wang, X., Cao, J (2010) REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs: *Oil Gas Geology*, 31(6): 810-818.
- Humphrey, J. D (1988) Late Pleistocene mixing zone dolomitization, south-eastern Barbados, West Indies. *Sedimentology*, 35: 327-348.
- James, G. A., Wynd, J. G (1965) Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium, agreement area, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 49(12): 2182-2245.
- Janbaz, M., Mohseni, H., Piryaee, A., Swennen, R., Yousefi Yeganeh, B., Sofiani Sordaghi, R (2018) Diagenetic processes of the Shahbazan Formation in the east of the Lurestan zone. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 28(109): 67- 82. doi.org/10.22071/gsj.2017.89098.1151. (in Persian).
- Kirmaci, M. Z (2008) Dolomitization of the late Cretaceous-Paleocene platform carbonates, Golkoy (Ordu), eastern Pontides, NE Turkey: *Sedimentary Geology*, 203: 289-306.
- Land, L. S (1983) Dolomitization. *AAPG Education Course Note Series*, 24: 1-20.
- Land, L. S (1985) The origin of massive dolomite: *Journal of Geological Education*, 33: 112-125.
- Land, L. S (1991) Dolomitization of the Hope Gate Formation (north Jamaica) by seawater: reassessment of mixing zone dolomite. In: Taylor, H. P., O'Neil, J. R., Kaplan, I. R. (Eds.), *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to*

- Samuel Epstein, Geochemical Society, Special Publications, 3: 121-133.
- Lee, Y. I., Friedman, G. M (1987) Deep-burial dolomitization in the Lower Ordovician Ellenburger Group carbonates in west Texas and south-eastern New Mexico. *Journal of Sedimentary Research*, 57: 544-557.
- Machel, H. G., Mountjoy, E. W (1986) Chemistry and environments of dolomitization - a reappraisal, *Earth Science Reviews*, 23: 175-222.
- Mattes, B. W., Mountjoy, E. W (1980) Burial dolomitization of the Upper Devonian Miette buildup, Jasper National Park, Alberta. In: *Concepts and Models of Dolomitization* (Eds. D. H. Zenger, J. B. Dunham and R. L. Ethington): SEPM Spec. Publ, 28: 259-297.
- Mazzullo, S. J (1992) Geochemical and neomorphic alteration of dolomite: a review: *Carbonates and Evaporites*, 7: 21-37.
- Miao, Zh., Gong, E., Zhang, Y., Guan, C., Wentao Huang, W (2020) Burial dolomitization, the genesis of dolomite in the Dapu Formation (Upper Carboniferous), Guixian area, Youjiang basin, Southwest China: petrologic and geochemical evidence. *Carbonates and Evaporites*, doi: /10.1007/s13146-020-00594-5.
- Miller, J. K., Folk, R. L (1994) Petrographic, geochemical and structural constraints on the timing and distribution of postlithification dolomite in the Rhaetian Portoro (Calcare neroli) of the Portovenere Area, La Spezia, Italy. In: B. H. Purser, M. E.
- Mirbeik- Sabzevari, K., Sedaghatnia, M (2022) Petrography and study of dolomitization model of Shahbazan Formation using elemental analysis (Zagros sedimentary basin, south of Lorestan). *Journal of Applied sedimentology*, 10 (19): 54-71. doi=10.22084/PSJ.2021.24257.1290 (in Persian).
- Modarres, M. H., Adabi, M. H., Fayazi, F., Ghobishavi, A., Moradpour, M (2018) Petrography and geochemical composition of the middle Eocene, the Shahbazan Formation at Kialu Section, Zagros Basin, Southwestern Iran: *Carbonates and Evaporites*, doi:10.1007/s13146-018-0438-xs.
- Mohseni, H., Abdollahpour, M., Rafiei, B (2012) Petrography and origin of dolomites of Shahbazan Formation (middle to upper Eocene) in east Eslamabade- Gharb (Kermanshah). *Journal of New Findings In Applied Geology*, 5(10): 1-11 (in Persian).
- Morrow, D. W (1982) Diagenesis II. Dolomite-part II: dolomitization models and ancient dolostones: *Geoscience Canada*, 9: 95-107.
- Motiei, H (2003) *Geology of Iran (Zagros stratigraphy)*, publication of the geological organization. P, 583. (in Persian)
- Navarro-Ciurana, D., Corbella, M., Cardellach, E., Vindel, E., Gomez-Gras, D., Grier, A (2016) Petrography and geochemistry of fault-controlled hydrothermal dolomites in the Riópar area (Prebetic Zone, SE Spain), *Marine and Petroleum Geology*, 71: 310-328.
- Shukla, V., Baker, P. A (1988) *Sedimentology and geochemistry of dolostones*. Society for Sedimentary Geology, 43: 266.
- Shunli, Zh., Zhengxiang, L. V., Yi, W., Sibing, L (2018) Origins and Geochemistry of Dolomites and Their Dissolution in the Middle Triassic Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin, China. *Minerals* 2018, 8: 289. doi: 10.3390/min8070289.
- Sibley, D. F., Gregg, J. M (1987) Classification of dolomite rock textures. *J. Sediment. Petrol*, 57: 967-975.
- Swart, P. K., Cantrell, D. L., Westphal, H., Handford, C. R., Kendall, C. G (2005) Origin of dolomite in the Arab-D reservoir from the Ghawar Field, Saudi Arabia: evidence from petrographic and geochemical constraints. *Journal of Sedimentary Research*, 75 (3): 476-491.
- Tucker, M. E., Wright, V. P (1990) *Carbonate Sedimentology*: Blackwell, Oxford, 482 p.
- Tucker, M. E., Wright, V. P (1991) *Carbonate Sedimentology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 482p.
- Veizer, J (1983) *Chemical diagenesis of carbonates: theory and application of trace element techniques*. In *Stable isotopes in sedimentary geology*: Blackwell Scientific Publications, Oxford, 482p.
- Veizer, J., Hinton, R. W., Clayton, R. N., Lerman, A (1987) Chemical diagenesis of carbonates in thin sections: Ion microprobe as a trace element tool: *Chemical Geology*, 64(3): 225-237.
- Wanless, H. R (1979) Limestone response to stress: pressure solution and dolomitization: *Jour.Sed. Petrol*, 49: 437-462.
- Warren, J. K (2000) Dolomite: occurrence, evolution and economically important association: *Earth Sci Reviews*, 52: 1-81.
- Whitaker, F. F., Smart, P. L., Jones, G (2004) *Dolomitization From conceptual to numerical models*: Geological Society, London, Special Publications, 235(1): 99-139.
- Wilson, M. E. J., Evans, M. J., Oxtoby, N. H., Nas, D. S., Donnelly, T., Thirlwall, M (2007) Reservoir quality, textural evolution and origin of fault-associated dolomites: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 91: 1247-1273.
- Ye, Q., Mazzullo, S. J (1993) Dolomitization of Lower Permian platform facies, Wichita Formation, North Platform, Middle Basin, Texas: *Carbonates and Evaporites*, 8: 55-70.

- Ying, R., Dakang, Z., Chonglong, G., Queqi, Y., Rui, X., Langbo, J., Yangjinfeng, J., Ningcong, Zh (2017) Dolomite geochemistry of the Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Sichuan Basin: Implication for dolomitization and reservoir prediction. *Petroleum Research* 2 (2017) 64e76.
- Zenger, D. H., Dunham, J. B., Ethington, R. L (1980) Concepts and Models of Dolomitization, 28, Society for Sedimentary Geology, Special Publications, 320 p.
- Zenger, D. H (1983) Burial dolomitization in the Lost Burro Formation/Devonian, east central California and the significance of late diagenetic dolomitization: *Geology*, 11: 519-522.
- Zhang, X., Hu, W., Jin, Z., Zhang, J., Qian, Y., Zhu, J., Zhu, D., Wang, X., Xie, X (2008) REE compositions of Lower Ordovician dolomites in Central and North Tarim Basin, NW China: A potential REE proxy for ancient seawater: *Geology Sinica*, 82(3): 610-621.
- Zhao, C., Yu, B., Zhang, C., Chen, Y., Qi, X (2012) A discussion on the formation mechanism of dolomite associated with hydrothermal solution in Tazhong area: *Petrology and Mineralogy*, 31(2): 164-172.
- Zohdi, A., Moallemi, S. A., Moussavi- Harami, S. R., Mahboubi, A (2014) Shallow burial dolomitization of an Eocene carbonate platform, Southeast Zagros Basin: *Iran GeoArabia*, 19(4): 17-54.

Petrography and dolomitization models of the Shahbazan Formation in Khorram Abad anticline, north Lorestan

N. Maleki Sadeghi^{1*} and R. Zarei Sahamieh²

1- Ph. D. (graduated), Dept., of Geology, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran

* Setareh89amiri@gmail.com

Received: 2024.7.29 Accepted: 2024.11.11

Abstract

In this research, the dolomitization process of Shahbazan Formation (Middle-Late Eocene) was investigated using petrographic and geochemical studies. The studied area is located in the north of Lorestan and 25 km north of Khorram Abad city. In this section, the Shahbazan Formation with limestone and dolomite lithology is 85 meters thicknesses, its lower border is on the slope of the Kashkan clastic formation and its upper part is discontinuously formed by the carbonates of the Asmari Formation was covered continuously. Based on petrographic studies on 80 sedimentary thin sections and geochemical studies on 26 samples by EDS method, two groups of dolomites were identified. Primary dolomites (dolomicrites) with a mosaic and often amorphous texture in sizes less than 10 microns and secondary dolomites (delomicrosparites and doloasparites) with a semi-shaped to shaped texture. They were observed in sizes larger than 10 microns and even larger than 250 microns. In the studied dolomites, an increasing trend of Fe and Mn elements and a decreasing trend of Sr element can be observed from dolomicrites towards dolomicrosparites and doloasparites. The existence of some evidences such as bird's eye porosity, algal laminae and intraclasts and the absence of evaporite minerals in the studied samples showed that, the primary dolomites were formed in a tidal model, and then the secondary dolomites were expanded in a shallow to medium burial diagenesis model due to seepage of the basin floor in the carbonate platform of the Shahbazan Formation. The relatively high concentration of Na in the studied dolomites (0.1 to 1.4% by weight) indicates the influence of basin floor sediments on them. The ratio of Ca/Mg in all the studied dolomites is higher than the standard limit (1.6) and indicates that they are non-stoichiometric. This issue can be justified considering the age of Shahbazan Formation in this part of Lorestan sedimentary basin.

Keywords: Petrography, Dolomite, Geochemistry, Shahbazan Formation, Khorramabad, Lorestan

Introduction

In the studied area, the Shahbazan Formation is separated from the Asmari Formation based on paleontological studies, and 85 meters of this section, which is mentioned in the geological map of Khorram Abad 1/100000 as the Asmari-Shahbazan formations, belongs to the Shahbazan Formation. The purpose of this research is to investigate the types of effective diagenesis processes in the Shahbazan Formation, therefore, in this research, the different conditions of the diagenesis environment during the burial and dolomitizing fluids of the Eocene time in this part of the Lorestan sedimentary basin are discussed. The results of this research can help other researchers in the field of geochemical studies of carbonate formations in Lorestan

sedimentary basin. Based on the map of the structural zones of the Zagros basin, the studied area is located in the simple folded part of the Zagros and in the Lorestan zone. According to the geological map of 1/100000 of Khorram Abad city, the units of the Mesozoic and Cenozoic periods are outcrops. The Mesozoic period units include Sarvak, Ilam, Gurpi and Amiran formations and the Cenozoic period units include, Kashkan, Asmari, Shahbazan and Gachsaran formations. The Shahbazan Formation is 85 meters thicknesses in the studied section, and its lower boundary is covered by the Kashkan clastic formation and the upper boundary by the carbonates of the Asmari Formation as a continuous discontinuity. The lithology of this formation in the studied section is thin to thick layered

dolomites. The section under study is located 25 kilometers north-east of Khorram Abad city and in the southeast side of Zarin Chogha village, which is possible to reach this cut from the asphalted road of Khorram Abad city towards the said village. The section under study has the geographic coordinates of "E 48° 12' 12.25" E longitude and N 33° 38' 17.9" latitude.

Materials and methods

In order to understand the diagenesis processes of the Shahbazan Formation in the studied section, 85 thin sections of petrography were prepared in Lorestan University. Petrographic studies were carried out by Olympus-BH2 polarizing microscope. Thin sections were stained by the method (Dickson, 1965) by alizarin red solution (ARS) to distinguish calcite minerals from dolomite and potassium ferrocyanide solution to distinguish iron-bearing dolomites. Also, in order to know the diagenesis environment of the studied dolomites, 26 samples were analyzed by (EDS) and (EPMA) methods in the Central Laboratory No. 1 of Lorestan University, and imaging by electron microscope (SEM) of dolomites was also implemented

Results and discussion

The Shahbazan Formation was deposited in a marine phreatic environment, consisting of magnesium-rich aragonite and calcite shells (red algae, foraminifers, echinoderms, and mollusks) with intragranular and intergranular porosity. Some diagenesis processes, such as micrite formation, co-axial cement formation and lamellar cement, which are related to primary diagenesis in marine environments (Ahmad et al., 2006), have been identified in the studied section, which confirms they are the initial stage of diagenesis. The physical compaction immediately after the deposition has led to the closer of the grains to each other and has created a compact fabric (fitted fabric). In the meteoric diagenesis environment, which consists of three stages (zones), the dissolution zone: as a result of dissolution, cavity, channel and mold porosities are formed and the process of incremental neomorphism is also seen? The upper border of Shahbazan Formation with Asmari Formation is an erosional variation that indicates a period of water exit. In some areas of the Lorestan sedimentary basin, there is a dissolution shear horizon at the border of

Shahbazan and Asmari formations, which confirms the erosional variation at the top of the Shahbazan formation. Therefore, the presence of meteoric diagenesis in the Shahbazan Formation can be considered as a period of exit from the water of this formation during the Upper Eocene due to the tectonic activity of the Pyrenees (Upper Eocene - Oligocene). Shahbazan has been exposed to meteoric diagenesis fluids. Active meteoric phreatic zone: spar calcite cements have filled the remaining intergranular spaces. Static meteoric phreatic zone: increasing neomorphism has occurred in micrites and dolomicrites, which has led to the creation of dolomicrosparite and dolosparite and intercrystalline porosity in dolomicrites. In this stage (freshwater diagenesis), incremental neomorphism is observed in the form of transformation of very fine micrite crystals into microsparite and sparite. The maximum sodium for dolomites in equilibrium with sea water is estimated to be about 100 to 1000 ppm. The average sodium in the studied samples is 0.6 weigh percentage, which indicates the impact of meteoric diagenesis processes in the samples. Some second-generation cement such as equant mosaic, blocky, and syntaxial cement can be formed at this stage. In the burial diagenesis environment, the physical density has reached its maximum in such a way that cracks, fractures and deformation of allochems have occurred. Chemical condensation and formation of dissolution joints and stylolites have occurred. The formation of blocky cements, poikilotopic and iron-bearing dolomitic cements in the space between grains and fractures is attributed to the burial diagenesis environment. With the increase in the depth in the burial area, the amount of oxygen has decreased and the Shahbazan Formation is closer to the reclamation conditions. Upon reaching reducing conditions, elements sensitive to these conditions, such as iron, become mobile and tend to enter the calcite and dolomite network. At this stage, the coarse crystalline iron-bearing dolomite represents the diagenesis environment of deep burial and regeneration. In the final stage of diagenesis (telegenic stage), orogeny phases acted and caused Shahbazan Formation to come out of depth and this happened with fractures in the formation. The joints and fractures formed in this stage, which

have been identified in the studied sections, have been filled by blocky cements and later, the calcite crystals in the fractures and veins after painting. They remain pale pink in color, which can indicate the oxidizing conditions in the rise stage. Based on petrographic evidence, the diagenesis sequence has been determined during four diagenesis environments (marine, burial, uplift and meteoric) in the carbonate rocks of Shahbazan Formation. Among the most important diagenesis processes in the studied section, we can mention micritization, which is a diagenesis product itself, crystallization, compression, dissolution, cementation, and replacement. The most abundant and widespread type of succession in limestones is dolomitization. Substitution of dolomite crystals instead of calcite can be done by destroying the fabric to preserve it. In the primary mineralogy dolomitization process, the size of the crystals and the nature of the dolomite-forming fluids are important. In the samples investigated in this study, dolomitization can be seen in the form of substitution in porous cells, in the form of cement between the components of the rock, and in the form of fracture filling. The high concentration of strontium (between 0.1 and 1.2 %) in dolomicrites can be due to diagenesis processes on the aragonite shells of some bivalves, benthic foraminifera and some green algae in the sample to be considered under study. According to the petrographic and geochemical evidence, the dolomites of Shahbazan Formation can be considered from the shallow to medium burial model.

Conclusion

According to petrographic and geochemical studies on the main elements such as Mg and

Ca and secondary elements such as Sr, Fe, Na, Mn, two main groups of dolomites have been identified in Shahbazan Formation, Khorramabad anticline, which includes There are primary dolomites (simultaneous with sedimentation) and secondary dolomites (after sedimentation). Primary dolomites (dolomicrites) with a mosaic and often amorphous texture in sizes less than 10 microns and secondary dolomites (delomicrosparites and dolosparites) with a semi-shaped to shaped texture They were observed in sizes larger than 10 microns and even in sizes of several millimeters. In the studied dolomites, an increasing trend of Fe and Mn elements and a decreasing trend of Sr element were observed from primary dolomites towards secondary dolomites. The high concentration of Fe and Mn elements in secondary dolomites compared to primary dolomites is due to being in a reduced condition and in a burial diagenesis environment for this type of dolomites. The presence of some evidences such as bird's eye porosity and intraclasts and the absence of evaporite minerals in the studied samples showed that the formation of primary dolomites was in a tidal model and then due to seepage of brines on the basin floor. In the carbonate platform of the Shahbazan Formation, secondary dolomites have expanded in a shallow to medium burial diagenesis model. The ratio of Ca/Mg for different phases analyzed for dolosparites, dolomicrosparites and dolomicrites in the studied samples is equal to 2.5, 2.4 and 2.2, respectively, which indicates non-stoichiometry (absence of stoichiometry) is the existence of these problems. This trend can be justified considering the age of Shahbazan Formation in the studied section.