

تحلیل و بررسی سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی دولومیت‌های پرمین در برش قره‌داغ، جنوب دریاچه ارومیه

علی‌اصغر ثیاب‌قدسی^{۱*} و شایان محرابی علمداری^۲

۱- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم‌پایه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- دانش‌آموخته‌ی گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم‌پایه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

نویسنده مسئول: a.siabeghodsy@urmia.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۷ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۲۷

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در این مطالعه بخش دولومیتی نهشته‌های پرمین در برش قره‌داغ، واقع در جنوب دریاچه ارومیه از منظر سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی مورد مطالعه و بررسی شده است. تعداد ۹۲ نمونه از برش موردنظر که دارای ضخامت ۲۰۲ متر می‌باشد، جمع‌آوری شد. مطالعات سنگ‌نگاری به وسیله میکروسکوپ پلاریزان و مطالعات زمین‌شیمی بر مبنای آنالیز عنصری به روش AAS صورت گرفته است. مطالعات سنگ‌نگاری براساس طبقه‌بندی بافتی، طبقه‌بندی انجام گرفته و بر مبنای آن دو گروه کلی دولومیت‌های اولیه (هم‌زمان با رسوب‌گذاری) و دولومیت‌های ثانویه (پس از رسوب‌گذاری) منجر به شناسایی شده است. دولومیت‌های اولیه شامل دولومیکرایت‌ها (خیلی ریزیلور) و دولومیت‌های ثانویه شامل اسپارایت‌ها و دولومیت‌های پرکننده حفرات می‌باشد. مطالعات زمین‌شیمی بر مبنای عناصر اصلی Mg و Ca و عناصر فرعی Fe, Mn, Sr, Na صورت گرفته است. با تلفیق نتایج حاصل از مطالعات سنگ‌نگاری و آنالیز عنصری، محیط تشکیل دولومیت‌های مورد مطالعه مشخص گردید. دولومیکرایت‌ها در محیط‌های بالای کشندی، اسپارایت‌ها در محیط تدفینی کم‌عمق و دولومیت‌های پرکننده حفرات تحت شرایط تدفین عمیق و توسط سیالات دولومیتی‌ساز تشکیل شده است.

واژگان کلیدی: سنگ‌های کربناته، سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی، منیزیم، قره‌داغ

۱- پیشگفتار

سنگ‌های کربناتی شامل سنگ‌آهک و دولومیت هستند که در سراسر جهان گسترده شده است. سازندهای حاوی سنگ دولومیت و انواع سیالات دولومیت‌ساز یکی از موضوعات گسترده مورد مطالعه در زمین‌شناسی رسوبی می‌باشد (میستر و همکاران، ۲۰۱۳). با استفاده از سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی می‌توان به شرایط محیط تشکیل دولومیت رسید (جین و همکاران، ۲۰۰۶). عناصر شامل دو عنصر اصلی (Ca, Mg) و عناصر فرعی (Na, Sr, Mn, Fe) می‌باشد که می‌توان برای تشخیص انواع دولومیت‌ها استفاده شود (ژسکه و همکاران، ۲۰۱۲). اهداف اصلی این مطالعه تشخیص انواع دولومیت‌ها در برش قره‌داغ با استفاده از سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی می‌باشد. برش قره‌داغ در جنوب دریاچه ارومیه واقع شده است و با وجود حضور گسترده دولومیت در این برش، پژوهشی در زمینه ویژگی‌های بافتی و زمین‌شیمیایی آن از نظر منشأ

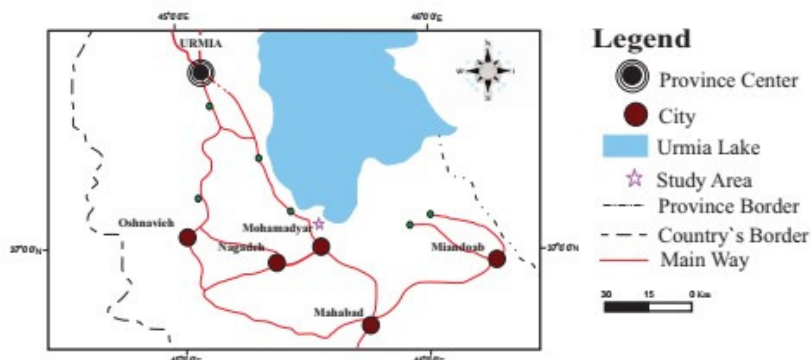
تشکیل دولومیت‌های پرمین انجام نشده است؛ از این‌رو، مطالعه حاضر با هدف تعیین ویژگی‌های بافتی و زمین‌شیمیایی دولومیت‌های پرمین در برش قره‌داغ پرداخته شده است. همچنین براساس ویژگی‌های بافتی و زمین‌شیمیایی، نوع دولومیت‌ها در برش قره‌داغ نیز تعیین شده است. بررسی ویژگی‌های سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی برش قره‌داغ می‌تواند به شناخت منشأ و فرایندهای موثر در تشکیل بخشی از نهشته سنگ‌های پرمین در بخش جنوب دریاچه ارومیه مفید باشد.

۲- زمینه‌شناسی منطقه

ناحیه مورد مطالعه، که در غربی‌ترین بخش از زون زمین‌ساختی البرز- آذربایجان و در ادامه زون تکتونیکی سندرچ- سیرجان واقع شده است، اختصاصات ساختمانی واحد زمین‌ساختی البرز- آذربایجان را نشان می‌دهد. بطور کلی تکوین زمین‌شناسی منطقه متأثر از رخداد‌های

نقشه‌ی ۱:۲۵۰۰۰۰ ارومیه قرار دارد. منطقه‌ی موردنظر در جنوب دریاچه ارومیه، ۸۰ کیلومتری شهر ارومیه واقع شده است. راه‌های دسترسی به منطقه‌ی موردنظر شامل جاده‌ی آسفالتی ارومیه- نرده و مه‌آباد- محمدیار می‌باشد (شکل ۱).

گوناگونی است که در واحدهای مختلف زمین‌شناسی از جمله افیولیت‌ملانژهای خوی- اشنویه، زون سنندج- سیرجان و زون البرز- آذربایجان روی داده است. محدوده‌ی موردنظر با مختصات طول جغرافیایی $37^{\circ}05'$ تا $37^{\circ}08'$ و عرض جغرافیایی $45^{\circ}28'$ تا $45^{\circ}32'$ در نقشه‌ی چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اشنویه و



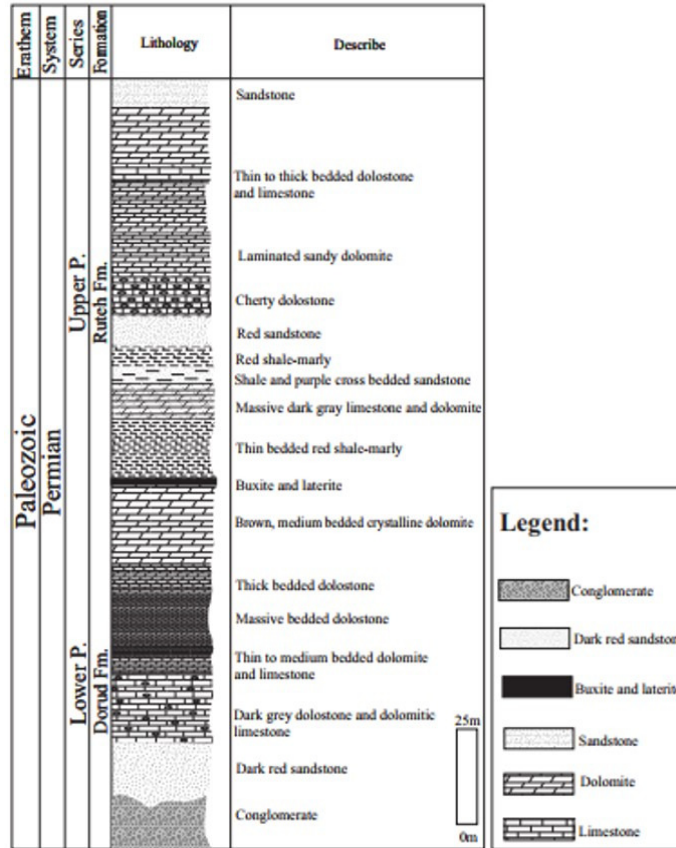
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به برش مورد مطالعه (انتشارات گیتاشناسی، سال ۱۳۸۶)
 Fig. 1. Geographical location and access paths of the section under study (Publishers Geology, 2007)

تشکیل شده است. در رخنمون پرمین منطقه مورد مطالعه یک افق لاتریتی وجود دارد که به علت بالاآمدگی پلاتفرم و پسروری آب در زمان پرمین و غالب شدن آب و هوای گرمسیری بر منطقه وسیعی از ایران تشکیل شده است (شکل ۴). پیشروی گسترده دریا در اوایل پرمین منجر به پوشش خشکی‌های ایران، به‌ویژه مناطق وسیعی از شمال غرب و ایران مرکزی شده است. در زمان پیشروی، رسوبات آواری و کربناته نهشته شده و در زمان پسروری دریا، رسوبات آواری کم‌عمق برجای می‌ماند. تشکیل دولومیت را می‌توان به پسروری دریا و گسترش پهنه آمیختگی آب شیرین و دریا نسبت داد (باوی عویدی، آدابی و همکاران، ۲۰۱۴). در بررسی‌های صحرایی نیز آثار پسروری دریا، به صورت به‌هم‌ریختگی‌هایی در اثر انحلال و گسترش اکسید آهن دیده می‌شود که در کل این چرخه‌های فرسایشی با نهشت بوکسیت همراه بوده است (شکل ۲). ارتباط بین دولومیتی شدن و پسروری آب دریا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا تغییرات سطح دریا می‌تواند محیط شیمیایی لازم برای دولومیتی شدن را تحت تاثیر قرار دهد. وقتی آب دریا پسروری می‌کند، سکوه‌های کربناته بیشتر در معرض تبخیر قرار می‌گیرند که این موضوع شوری آب را افزایش داده و شرایط را برای دولومیتی شدن مساعد می‌سازد. علاوه بر این، پسروری آب دریا می‌تواند به

واحدهای سنگی شناخته شده در این منطقه شامل ردیفی از سنگ‌های پرکامبرین تا عهد حاضر می‌باشند که از اختصاصات چینه‌ای این منطقه می‌توان به وجود سنگ‌های دگرگونی، عدم رسوب‌گذاری در دوره‌های اردویسین، سیلورین، دونین و کربونیفر، پیدایش عدسی‌های لاتریتی اشاره نمود. سنگ‌آهک‌های روته، واحدهای تخریبی و کربناته لیگومیوسن به همراه مجموعه‌های ملانژ افیولیتی رخنمون‌های اصلی منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. تفکیک واحدهای موجود در منطقه براساس داده‌های دیرینه‌شناسی و خصوصیات سنگ‌شناسی و جایگاه چینه‌شناسی آن‌ها بوده است. سنگ‌های رسوبی پرمین با پی کنگلومرایی به رنگ قرمز و خاکستری قرمز و خاکستری تیره با میان لایه‌هایی از شیل، آهک برشی و ماسه‌سنگ (معادل سازند دورود) به‌صورت پیش‌رونده و با ناپیوستگی هم‌شیب بر روی واحدهای قدیمی‌تر از خود قرار گرفته‌اند. این واحد در مجاورت با توده‌های نفوذی بطور محلی سنگ‌های هورنفلس را ایجاد نموده است. بر روی این واحد آهک‌ها و دولومیت‌های ضخیم تا توده‌های مربوط به سازند روته به‌صورت هم‌شیب ته‌نشین شده‌اند (نقی‌زاده، ۱۳۸۳) (شکل ۳). نهشته‌های پرمین در برش مورد مطالعه دارای ستبرای ۲۰۲ متر می‌باشد که بیشتر از دولومیت به همراه میان لایه‌های آهکی و میان لایه‌های ماسه‌سنگی

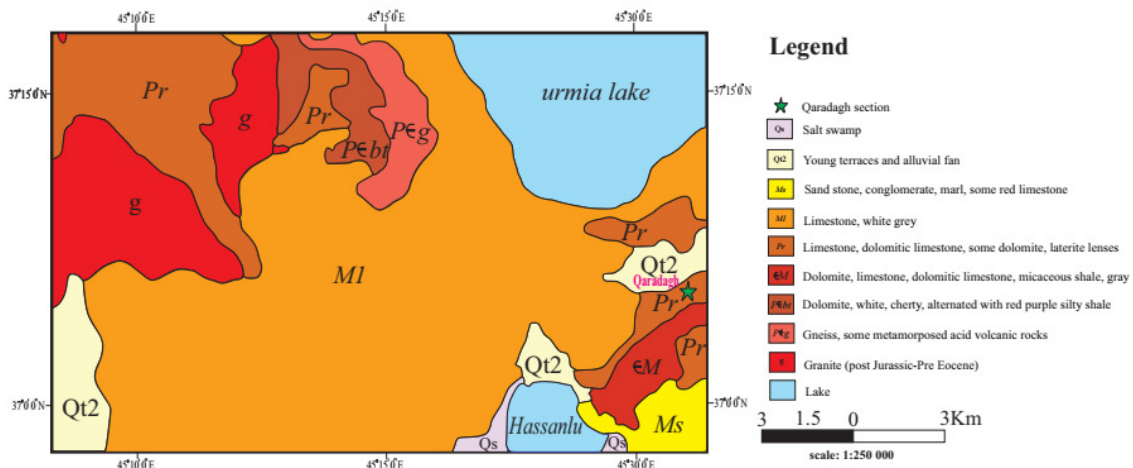
در امتداد ساحل وجود دارد که خط ساحلی صخره‌ای را نشان می‌دهد. آب و هوا، به ویژه بارندگی، نقش تعیین کننده‌ای در روند لاتریتی شدن داشته و به طور غیرمستقیم به نوع خاصی از توسعه ساحلی کمک کرده است (آگله، ۱۹۸۹).

ورود سیالات غنی از منیزیم به لایه‌های رسوبی کمک کند که این خود فرایند دولومیتی شدن را تسهیل می‌کند (زینگر، دانهام و اتینگتون، ۱۹۸۰). لندفرم‌های برجسته در منطقه ساحلی، تخت کوه‌های پوشیده از لاتریت، با شیب ملایم به سمت دریا هستند و معمولاً یک سقوط ناگهانی



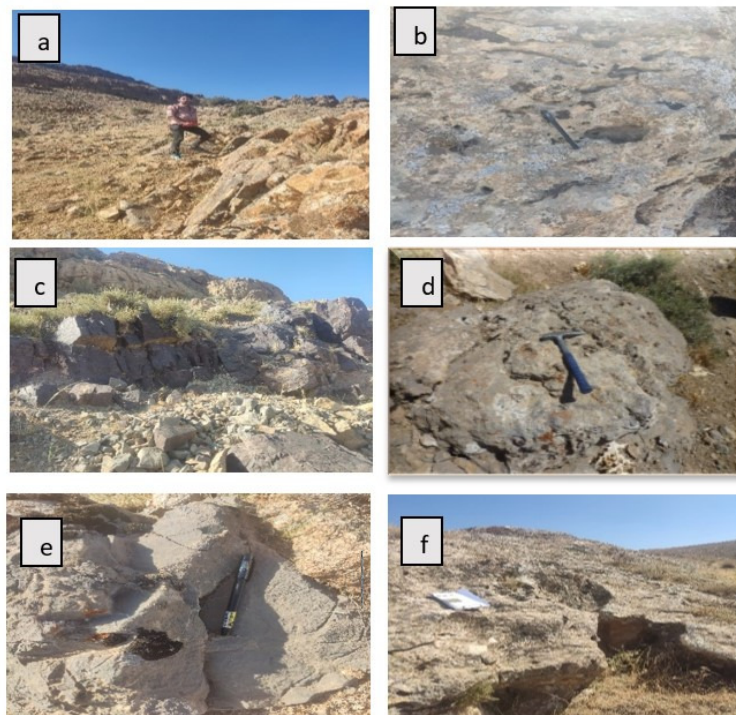
شکل ۲. ستون سنگ‌نگاری برش قره‌داغ در جنوب دریاچه ارومیه

Fig. 2. lithostratigraphy of Qaradagh section, south of Lake Urmia



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در برش قره‌داغ (با اقتباس از برگه ۱:۲۵۰۰۰۰ ارومیه، شهرابی، ۱۳۷۲)

Fig. 3. Geological map of the study area in Qaradagh section (Adapted from Sheet 1: 250000 Urmia, Shahrabi, 1993)



شکل ۴. تصاویر صحرایی از برش قره‌داغ؛ (a) نمای کلی از برش مورد مطالعه (دید به سمت جنوب‌غربی)، (b) لایه برش حاوی کنگلومراهای پیش‌رونده که دارای اکسید آهن می‌باشد، (c) یک افق بوکسیت لاتریت که نشانگر هوای گرمسیری می‌باشد. (d) آهک‌های تیره حاوی آثار فسیلی و گاستروپود، (e, f) دولومیت‌های ضخیم‌لایه سازند روته

Fig. 4. Field images of the Qaradagh section: (a) general view of the studied section (view towards the southwest), (b) section layer containing progressive conglomerates containing iron oxide, (c) a horizon Laterite bauxite, which indicates tropical weather, (d, e) dark limestones containing fossils and gastropods, (f) thick-layered dolomites of Rote Formation.

۳- روش مطالعه

برای سنگ‌نگاری دولومیت‌های پرمین، ابتدا بازدید صحرایی و همچنین مطالعات اولیه در این ناحیه صورت گرفت که منطقه دارای رنگ قهوه‌ای روشن تا تیره و تا حدودی ریخت فرسوده می‌باشد. ۹۲ مقطع نازک از برش سطح‌الارضی در جنوب دریاچه ارومیه تهیه شد. این مقاطع جهت تشخیص کلسیت از دولومیت توسط آلیزارین قرمز و به روش دیکسون (۱۹۶۶) رنگ‌آمیزی و به‌وسیله میکروسکوپ پلاریزان در آزمایشگاه چینه‌نگاری و دیرینه‌شناسی دانشکده علوم‌زمین دانشگاه ارومیه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند. پس از مطالعه دقیق مقاطع نازک، به‌منظور مطالعه زمین‌شیمی دولومیت‌های منطقه، ۱۷ نمونه از دولومیت‌ها توسط دستگاه مته دندانپزشکی نمونه‌برداری و پس از آماده‌سازی در آزمایشگاه شیمی دانشکده علوم‌زمین دانشگاه ارومیه با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AAS) تجزیه عنصری شد. برای انجام این روش باید محلولی از نمونه‌های پودر شده‌ی سنگ تهیه

کرد. بعد از مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی، نمونه‌های میکرایتی فاقد فسیل با کمترین اثر هوازدگی انتخاب گردید. روش آماده‌سازی بدین‌صورت است که ۰/۲۵ گرم پودر را توسط پنج سی‌سی اسیدکلریدریک ۱ مولار حل و پس از ۲ ساعت، محلول به‌دست آمده را صاف کرده و به حجم پنجاه سی‌سی می‌رسانیم. عناصر اصلی این محلول (Mg, Ca) بر حسب درصد و عناصر فرعی (Sr, Na, Mn, Fe) بر حسب پی‌پی‌ام اندازه‌گیری شده است.

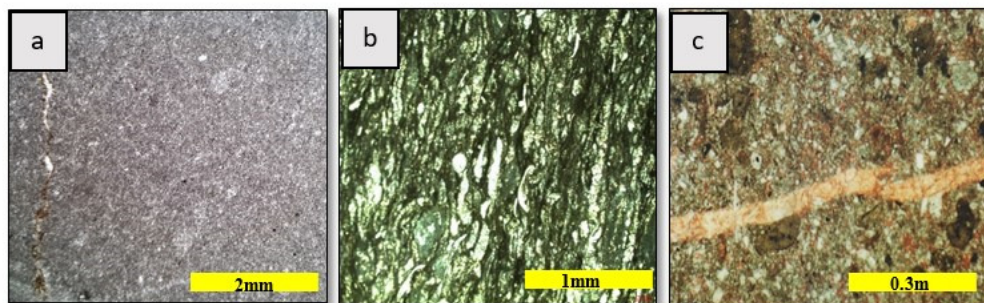
۴- سنگ‌نگاری دولومیت‌ها

دولومیت‌های این برش باتوجه به اندازه بلورها (یونی‌مدال یا پلی‌مدال) و شکل مرز بلورها (مسطح یا غیرمسطح) به پنج مدل تقسیم شده‌اند. با استفاده از اندازه بلورهای کریستالی می‌توان به نوع اولیه و ثانویه دولومیت‌ها پی برد (آمفور و فریدمن، ۱۹۹۱). برای نام‌گذاری دولومیت‌ها از روش‌های فریدمن (۱۹۶۵)، سیبلی و گرگ (۱۹۸۴)، سیبلی و گرگ (۱۹۸۷) استفاده شده است. در این مطالعه

تقسیم‌بندی سیبلی و گرگ (۱۹۸۴) از نوع دولومیت‌های صفحه‌ای دمای پایین می‌باشند. در این بافت معمولاً اثراتی از بافت‌های رسوبی اولیه مانند لامیناسیون و اینتراکلیست مشاهده می‌گردد و معمولاً با دانه‌های کوارتز تخریبی و آواری همراه می‌باشد. این نوع دولومیت تحت شرایط سطحی، دمای پایین و در محیط‌های تدفین کم‌عمق تشکیل شده‌اند (آدابی، ۲۰۰۵). در این دولومیت‌ها عامل دولومیتی شدن احتمالاً آب دریا و یا محلول‌های میان ذره‌ای سرشار از منیزیم است (وارن، ۲۰۰۰). دولومیت نوع یک، براساس اندازه بلورهای بسیار ریز و حفظ‌شدگی بافت‌های رسوبی اولیه در نظر گرفته شده است که تحت شرایط نزدیک سطحی و شرایط دمای پایین تشکیل شده است (شکل ۵)، (آدابی، ۲۰۰۹).

اندازه بلورهای دولومیت از روی مقیاس فولک (۱۹۷۴) محاسبه شده است. بر این اساس ۵ نوع دولومیت شناسایی شده است.

الف) دولومیت‌های خیلی ریزبلور یا دولومیکرایت^۱: دولومیت نوع یک از بلورهای شکل‌دار با سطوح کریستالی غیرمسطح تا مسطح تشکیل شده است. اندازه بلورهای دولومیت ۵ تا ۱۶ میکرون (میانگین ۱۱ میکرون) تغییر می‌کند. دولومیکرایت‌ها معمولاً متراکم و فاقد تخلخل بوده و رنگ خاکستری تیره دارند. این نوع بافت معادل بافت (xenotopic) فریدمن (۱۹۶۵)، (nonplanar-A)، مازولو (۱۹۹۲) و (xenotopic-A) سیبلی و گرگ (۱۹۸۴) می‌باشند. سطوح بلوری مسطح و بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار دولومیت در دما یا درجه اشباع پایین تشکیل می‌شود (وارن، ۲۰۰۰). این نوع دولومیت‌ها براساس



شکل ۵. (a) تصویر میکروسکوپی از دولومیت خیلی دانه‌ریز همراه با کانی‌زایی تبخیری (نمونه شماره ۱۲)، (b) تصویر میکروسکوپی از استرماتولیت (نمونه شماره ۱۰)، (c) دولومیت نوع ۱ را نشان می‌دهد در آن قطعات کوارتز آواری مشاهده می‌گردد (نمونه شماره ۱۴).

Fig. 5. (a) Microscopic image of very fine dolomite with evaporate mineralization (sample 12), (b) Microscopic image of the stromatolite (sample 10), (c) Dolomite shows type 1 in which detrital quartz fragments are observed (sample 14).

وجود می‌آید (گازی و همکاران، ۲۰۰۷). جانشینی دیاژنتیکی سنگ‌های آهکی پیشین و یا تبلور دوباره دولومیت‌های اولیه زیر دمای بحرانی (کمتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد) عامل تشکیل دولومیت‌های نوع دوم به شمار می‌آید (هود و همکاران، ۲۰۰۴). دولومیکرواسپارایت‌ها معمولاً از جانشینی سنگ‌های آهکی و یا از تبلور مجدد دولومیکرایت‌ها به وجود می‌آیند. ممکن است این فرایند به صورت ناقص و یا کامل انجام پذیرد. در اغلب نمونه‌های مورد مطالعه، دولومیت‌های ریز بلور دارای مرزهای شکل‌دار و مسطح می‌باشد. با توجه به شواهد موجود می‌توان نتیجه گرفت که این بافت حاصل تبلور مجدد دولومیکرایت‌ها می‌باشد (شکل ۶).

ب) دولومیت‌های ریزبلور یا دولومیکرواسپارایت^۱

این نوع دولومیت تحت عنوان دولومیت نوع دوم نام‌گذاری گردیده است که عمدتاً از بلورهای متراکم و هم‌اندازه تا بی‌شکل و دارای مرزهای بین‌بلوری مسطح تشکیل شده است. رنگ بلورها خاکستری روشن بوده و اندازه آن‌ها بین ۱۶ تا ۶۲ میکرون (بطور میانگین ۴۵ میکرون) تغییر می‌کند. این نوع دولومیت مشابه با بافت (hypidiotopic) فریدمن (۱۹۶۵)، (planar-s)، مازولو (۱۹۹۲) و (Idiotopic) سیبلی و گرگ (۱۹۸۴) می‌باشد. بافت مسطح نیمه شکل‌دار در اثر رشد آرام بلورها تحت جریان پیوسته‌ای از سیال‌های دولومیت‌ساز در دمای پایین به

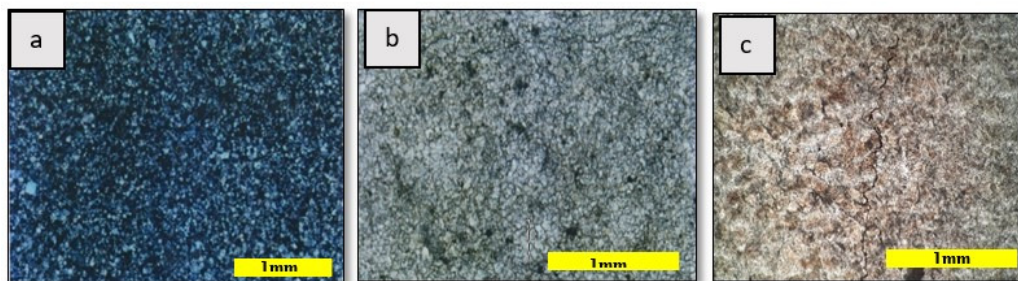
¹ Dolomicrosparite

¹ Dolomicrite

دلیل ساخت‌های رسوبی اولیه مانند لامیناسیون‌های استروماتولیتی در این نوع دولومیت قابل تشخیص نمی‌باشد. دولومیت نوع سوم حدود ۱۰ درصد از دولومیت‌های این سازند را در بر می‌گیرد. تغییر در فابریک دولومیت از دولومیکرایت به دولومیکرواسپارایت و به دولواسپارایت در دولومیت‌های این منطقه نشان‌دهنده درجه دگرسانی در دولومیت می‌باشد. مرزهای بین‌بلوری از نوع غیرمسطح می‌باشد. این نوع بافت معادل (xenotopic) فریدمن (۱۹۶۵)، (nonplanar-A) مازولو (۱۹۹۲) و (xenotopic-A) سیبلی و گرگ (۱۹۸۴) می‌باشد (شکل ۷).

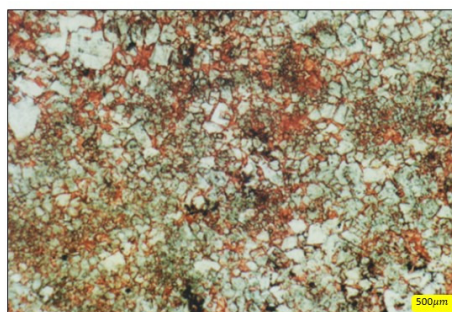
(پ) دولومیت‌های متوسط بلور یا دولواسپارایت^۱:

این نوع دولومیت به‌عنوان دولومیت نوع سوم در نظر گرفته می‌شود. اندازه بلورها بین ۶۲ تا ۲۷۰ میکرون (میانگین ۱۷۰ میکرون) تغییر می‌کند. دولواسپارایت‌ها از موزائیک‌های درشت‌بلور سفیدرنگ، متراکم، بی‌شکل و در اندازه‌های مختلف تشکیل شده است. بلورهای ریموندی به‌صورت پراکنده در داخل بافت اگزوتوپیک^۲ سنگ قرار دارند. دولواسپارایت‌ها معمولاً دولومیکرایت‌ها و دولومیکرواسپارایت‌ها را قطع می‌کنند و به‌عنوان دولومیت‌های دیاژنتیکی تاخیری در نظر گرفته می‌شوند. این نوع دولومیت از نظر بافتی مخرب بوده و اشکال دیاژنتیکی اولیه را تغییر داده و یا محو می‌کند، به همین



شکل ۶. الف و ب) دولومیت نوع ۲ که عمدتاً از بلورهای متراکم و هم‌اندازه تا بی‌شکل و دارای مرزهای بین‌بلوری مسطح تشکیل شده‌اند (به ترتیب نمونه شماره ۳۸ و ۴۰). ج) دولومیت ریزبلور دارای استیلولیت و اکسیدهای آهن که رگه‌ها و فضاهای خالی را پر کرده‌اند (نمونه شماره ۱۹).

Fig. 6. (a,b) Type 2 dolomites consisting mainly of dense and uniform crystals with amorphous and flat intercrystalline boundaries (Sample Nos. 38 and 40, respectively), (c) Crystalline dolomite containing stylolite and iron oxides that fill the veins and voids (Example 19)



شکل ۷. حاوی دولواسپارایت‌ها که از موزائیک‌های درشت‌بلور سفیدرنگ، متراکم، بی‌شکل و در اندازه‌های مختلف تشکیل شده است (نمونه شماره ۴۲)

Fig. 7. Contains dolosparites, white, dense, amorphous, crystalline mosaics (sample number 42)

درون گسل‌ها و شکاف‌های عادی برای تشکیل دولومیت رگه‌ای، پرکننده حفرات و زین‌اسبی (مونتجوی و همکاران، ۱۹۹۹). این نوع دولومیت که تحت عنوان دولومیت نوع چهارم در نظر گرفته می‌شود، از بلورهای بی‌شکل می‌باشد. بلورها در دولومیت‌های رگه‌ای با دیواره شکاف مرز مشخص

(ت) دولومیت رگه‌ای^۱: دولومیت رگه‌ای از بلورهای درشت که اندازه آن‌ها بین ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ میکرون (میانگین ۶۰۰ میکرون) تغییر می‌کند، تشکیل شده است. این نوع دولومیت‌ها تحت شرایط تدفین عمیق و توسط سیالات دولومیتی تشکیل شده‌اند. حرکت سیالات گرمایی داغ از

¹ vein Dolomite

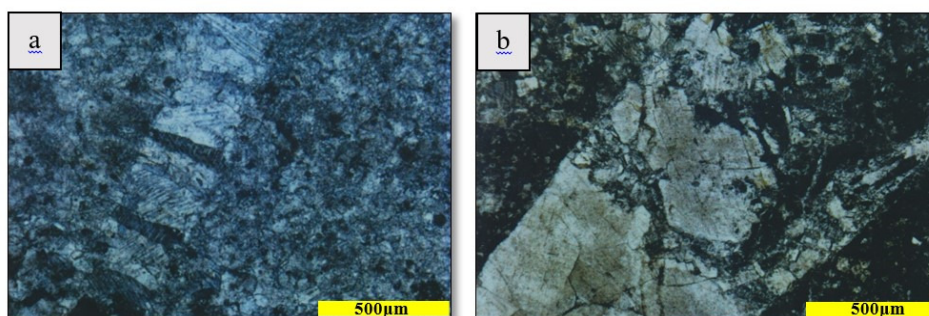
¹ Dolosparite

² xenotopic

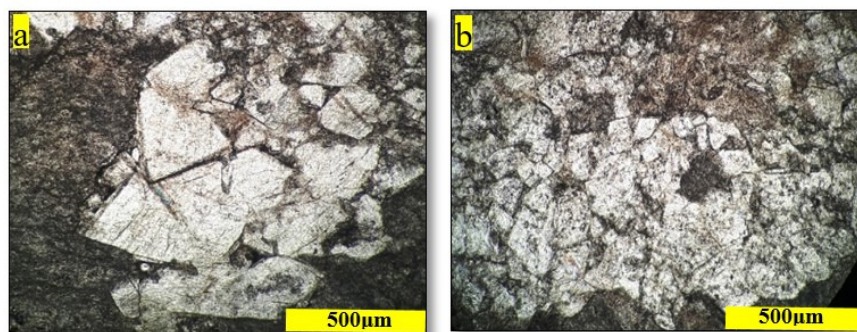
مشاهده است. دولومیت‌های زین‌اسبی درون شکستگی‌ها و حفرات یافت می‌شود که تأییدکننده منشا تأخیری آن است. دولومیت زین‌اسبی در شرایط تدفینی عمیق یا گرمایی از شورابه‌های بسیار شور در دمای بالا، یا به صورت محصولی از احیای حرارتی- شیمیایی سولفات‌ها حاصل می‌شوند (فلاگل، ۲۰۰۴). نوع دیگر از دولومیت‌های پرکننده حفره‌ها و شکستگی‌ها، دولومیت زین‌اسبی می‌باشد. اغلب بلورهای این دسته از دولومیت‌ها دارای مرزهای مسطح هستند و با توجه به طبقه‌بندی سیبلی و گرگ (۱۹۸۷) از نوع دولومیت‌های planar و planar-A می‌باشند (شکل ۹).

و واضحی دارند و در بسیاری موارد خاموشی موجی مشابه با دولومیت زین‌اسبی نشان می‌دهند که این امر نشان دهنده تشکیل آن‌ها در دمای بالاتر از ۱۰۰ درجه می‌باشد (رادکه و ماتیس، ۱۹۸۰). رنگ‌آمیزی مقاطع نازک نشان داده است که در بعضی موارد دولومیت‌های پرکننده حفرات کمی آهن‌دار می‌باشند (شکل ۸).

ث) **دولومیت خیلی درشت‌بلور یا زین‌اسبی^۲**: اندازه بلورهای این نوع دولومیت بین ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ میکرون است. این نوع دولومیت‌ها مشخص به داشتن بلورهای درشت‌اند که اغلب به دولومیت‌های زین‌اسبی معروف‌اند. این بافت به‌طور کلی به صورت سیمان‌های بی‌شکل قابل



شکل ۸. (a,b) دولومیت نوع ۴ که دولومیت رگه‌ای می‌باشد و برخی تخلخل‌های قالبی را پر کرده‌اند (نمونه شماره ۶۱ و ۶۲).
Fig. 8. (a, b) Type 4 dolomite, which is a vein dolomite and has some molded pores (Sample No. 61 and 62).



شکل ۹. (a,b) دولومیت نوع ۵ می‌باشد، بلورهای این دسته از دولومیت‌ها دارای مرزهای مسطح هستند.
Fig. 9. (a, b): Dolomite type 5, the crystals of these dolomites have flat boundaries.

ضریب توزیع موثر میان دولومیت و سیال‌های دولومیت‌ساز پی برد (وارن، ۲۰۰۰). ادغام داده‌های سنگ‌شناختی و زمین‌شیمیایی درک بهتری از منشا، زمان تشکیل، ترکیب سیال‌های دولومیتی‌کننده و مدل‌های دولومیتی شدن فراهم می‌کند (مازولو، ۲۰۰۰). برای این منظور، یون‌های Fe، Mn و Sr بیش‌تر ارزیابی می‌شوند. مقادیر درصد کلسیم و منیزیم و آهن و منگنز، در جدول ۱ آورده شده است.

۵- مطالعات زمین‌شیمی

دیاژنز موجب می‌شود تا شناسایی کانی‌شناسی اولیه سنگ‌های کربناته تنها با استفاده از بررسی‌های سنگ‌نگاری امکان‌پذیر نباشد، از این‌رو استفاده از روش‌های زمین‌شیمی در این زمینه الزامی است. با استفاده از عناصر فرعی می‌توان به میزان واکنش آب-سنگ و

² saddle Dolomite

جدول ۱. مقادیر میانگین عناصر اصلی و فرعی، نمونه‌های دولومیتی شده در ناحیه مورد مطالعه

Table 1. Mean values of principal and minor elements of dolomitized samples in the study area

	Type of dolomites	Ca%	Mg%	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Na (ppm)	Sr (ppm)	Mg/Ca
12	1	30.97	9.33	1670	570	540	450	0.301259
14	1	25.65	9.33	1734	358	405	307	0.363743
16	1	27.71	11.93	1424	125	510	350	0.43053
18	1	21.31	11.25	1284	115	560	288	0.527921
20	1	21.95	11.51	1214	120	580	278	0.524374
38	2	23.84	3.48	1248	113	608	200	0.145973
40	2	25.89	3.31	1566	114	706	230	0.127849
41	3	25.38	12.98	1337	112	503	233	0.511426
42	3	27.78	11.35	1184	540	570	204	0.408567
43	3	25.06	9.43	1268	103	582	210	0.376297
44	3	27.45	9.79	1160	105	490	175	0.356648
60	4	30.83	12.22	1708	227	480	162	0.396367
62	4	22.15	10.57	1812	177	450	165	0.477201
64	4	21.18	11.31	1092	177	550	166	0.533994
66	4	25.77	10.77	1593	386	520	168	0.417928
68	4	23.82	11.98	1484	375	786	173	0.502939
70	4	23.45	10.29	1101	303	520	155	0.438806

بررسی‌های عنصری

الف) کلسیم و منیزیم: میزان کلسیم در دولومیت‌های بررسی شده بین ۲۱/۱۸ درصد تا ۳۰/۹۷ درصد (میانگین ۲۵/۳۰) و مقادیر منیزیم بین ۸/۳۱ درصد تا ۱۲/۹۸ درصد (میانگین ۱۰/۶۸ درصد) متغیر است. نسبت Mg/Ca در دولومیت‌های خالص حدود ۰/۶۵ است (نصیر و همکاران ۲۰۰۸). کاهش مقدار Mg در دولومیت‌های نوع اول نسبت به دیگر دولومیت‌ها به دلیل بالاتر بودن مقدار Ca در این نوع دولومیت‌ها است، کاهش مقادیر Mg به علت دگرسانی این دولومیت‌ها می‌باشد. بیشترین میزان Mg در دولومیت‌های خالص ۱۳ درصد است. تغییرات کلسیم در برابر منیزیم رابطه معکوس دارد که این به دلیل جایگزینی بخشی از کلسیم توسط منیزیم در کرنات‌های دولومیتی است. ترسیم مقادیر منیزیم در مقابل نسبت منیزیم به کلسیم در دولومیت یک روند مثبتی را نشان می‌دهد (شکل A - ۱۰).

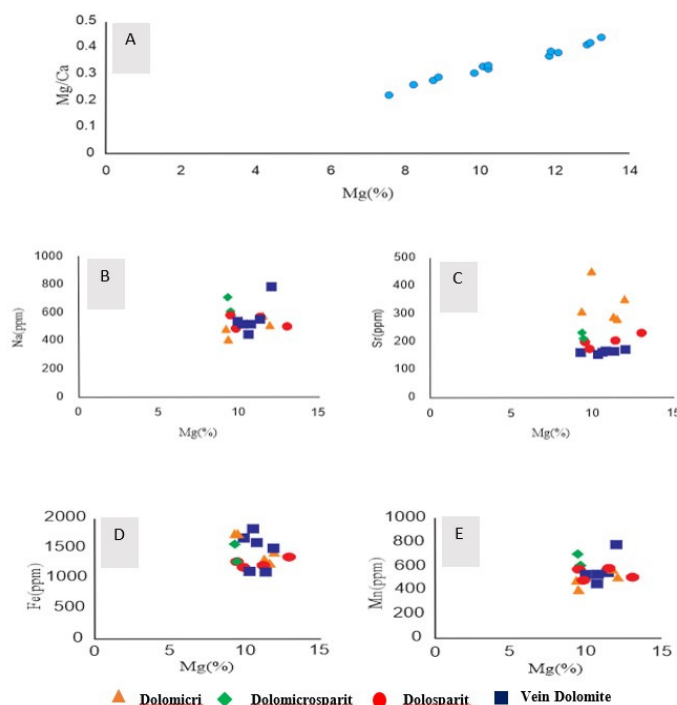
ب) استرانسیوم: از بین عناصر فرعی مختلف موجود در دولومیت‌ها، عنصر استرانسیوم همواره بیشترین توجه را داشته است (لند، ۱۹۸۰) اصولاً میزان تمرکز استرانسیوم در دولومیت‌ها به عوامل مختلفی وابسته است. از آن جایی که عنصر استرانسیوم به طور معمول جایگزین کلسیم

می‌گردد و مقدار کلسیم در دولومیت نصف مقدار کلسیم موجود در کلسیت است، لذا مقدار تمرکز استرانسیوم در دولومیت‌ها کمتر از سنگ‌آهک می‌باشد (روا، ۱۹۹۶). لند (۱۹۸۵) عقیده دارد که دولومیت‌های اولیه (همزمان با رسوب‌گذاری) مقادیر استرانسیوم بالاتری در مقایسه با دولومیت‌های ثانویه دارند که این به علت تغییر در فابریک آن‌ها می‌باشد. اصولاً تمرکز استرانسیوم با افزایش اندازه بلورها کاهش می‌یابد و به همین دلیل دولومیت‌های دیاژنتیکی که درشت بلورتر از دولومیت‌های اولیه هستند حاوی مقادیر کمتری استرانسیوم می‌باشد (کیرماچی، ۲۰۰۸). از طرف دیگر مقدار استرانسیوم اولیه‌ای که دولومیت جایگزین آن شده است نیز بسیار مهم می‌باشد (ویزر و همکاران، ۱۹۷۸). به طور کلی دولومیت‌هایی که جایگزین آراگونیت می‌گردند مقدار استرانسیوم بالاتری نسبت به آن‌هایی که جانشین کلسیت می‌شوند، دارند. هامفری (هامفری، ۱۹۸۸) عقیده دارد که وجود مقادیر بالای استرانسیوم در دولومیت‌ها حاکی از دولومیتی شدن آهک‌های آراگونیتی در محیط‌های نسبتاً بسته دیاژنتیکی می‌باشد. تغییرات استرانسیوم در دولومیت‌های منطقه بین ۱۵۵ تا ۴۵۰ پی‌پی‌ام (میانگین ۲۲۶ پی‌پی‌ام) تغییر می‌کند. مقادیر استرانسیوم این دولومیت‌ها نسبت به مقدار

سیالات قدیم استفاده می‌شود (اغرایی، ۲۰۰۸) مقدار سدیم در دولومیت‌های مورد مطالعه بین ۴۰۵ تا ۷۸۶ پی‌پی‌ام (میانگین ۵۵۶ پی‌پی‌ام) در نوسان می‌باشد. این مقادیر بیش از میانگین دولومیت‌هایی است که در محیط دریایی نرمال شکل می‌گیرند و به طور تیبیک ۱۱۰ تا ۱۶۰ پی‌پی‌ام سدیم دارند (ویزر، ۱۹۸۳). نمودار سدیم در مقابل منیزیم نشان می‌دهد که تمرکز سدیم با افزایش مقادیر منیزیم افزایش می‌یابد (شکل C-۱۰).

میانگین که ۵۰ پی‌پی‌ام است بسیار بالا می‌باشد، ترسیم نمودار استرانسیوم در مقابل منیزیم حاکی از یک روند مثبت است به طوری که میزان استرانسیوم با افزایش میزان منیزیم افزایش می‌یابد. که این امر را می‌توان به نامنظم بودن شبکه کریستالین و کاهش شدت دگرسانی دانست که عاملی بر افزایش استرانسیوم می‌باشد (واهرنکامپ و سوارت، ۱۹۹۰) (شکل B-۱۰).

پ) سدیم: سدیم فراوان‌ترین کاتیون موجود در آب دریا می‌باشد و به عنوان شاخصی برای پی بردن به درجه شوری



شکل ۱۰. (A) روند تغییرات نسبت Mg/Ca به منیزیم در نمونه‌های دولومیتی برش مورد مطالعه. (B) رسم نمودار تغییرات منیزیم در مقابل سدیم نمونه‌های دولومیتی منطقه مورد مطالعه (تمرکز سدیم با افزایش مقادیر منیزیم افزایش می‌یابد). (C) بالاترین تمرکز استرانسیوم در نوع دولومیت ۱ و ۲ و کمترین آن در دولومیت‌های درشت بلور و اسپارایتی می‌باشد. (D, E) روند تغییرات آهن و منگنز در دولومیت‌های منطقه

Fig. 10. (a) Trend of changes in $Mg, Ca / Mg$ ratio in dolomitic samples studied. (b) Draw diagram of magnesium vs. sodium dolomitic samples in the study area (Sodium concentration increases with increasing magnesium values), (c) Highest concentration Strontium in type 1 and type 2 dolomite and lowest in coarse crystalline and sparite dolomites. (d, e) Trends of iron and manganese changes in the dolomites of the study area.

دولومیت‌های نوع سوم ۱۰۳ تا ۵۴۰ (میانگین ۲۱۵) و دولومیت‌های نوع چهارم ۱۷۷ تا ۳۴۶ (میانگین ۲۷۴) متغیر است. مقادیر میانگین آهن و منگنز در دولومیت‌های مورد مطالعه به مراتب بالاتر از آهک‌های منطقه است زیرا آهن و منگنز معمولاً جایگزین منیزیم می‌شوند و چون مقدار منیزیم در دولومیت‌ها بالاتر از آهک‌ها است طبیعتاً تمرکز این عناصر نیز در دولومیت بالاتر خواهد رفت و

(ت) آهن و منگنز: تمرکز آهن در دولومیت‌های نوع اول به ترتیب ۱۲۱۴ تا ۱۶۷۰ (میانگین ۱۴۶۵/۵)، دولومیت‌های نوع دوم ۱۲۴۸ تا ۱۵۶۶ و دولومیت‌های نوع سوم ۱۱۶۰ تا ۱۳۳۷ (میانگین ۱۲۳۷) و دولومیت‌های نوع چهارم ۱۰۹۲ تا ۱۸۱۲ (میانگین ۱۴۶۵) تغییر می‌کند. تمرکز منگنز در دولومیت‌های نوع اول به ترتیب ۱۱۵ تا ۵۷۰ (میانگین ۲۵۷/۶) و دولومیت‌های نوع دوم ۱۱۳ تا ۱۱۴ و

تقریباً همزمان با رسوب‌گذاری در نظر گرفته می‌شوند. این نوع دولومیت‌ها ویژگی‌های بافتی سازندهای کربناته و فابریک‌های رسوبی اولیه را حفظ می‌کنند (وارن، ۲۰۰۶). دولومیت‌های نوع دوم و سوم می‌تواند بیانگر جانیشینی دیاژنتیکی سنگ‌آهک اولیه و یا تبلور دولومیت‌های تشکیل شده قبلی باشد (چن و همکاران، ۲۰۰۴). این جانیشینی و یا تبلور مجدد در زیر دمای بحرانی و در شرایط تدفین کم‌عمق انجام می‌شود (گرگ و شلتون، ۱۹۹۰). دولومیت‌های حفره پرکن باتوجه به اینکه دیگر فازهای دولومیتی (دولومیکرایت‌ها و اسپاریت‌ها) و شکستگی‌ها و استیلولیت‌ها را قطع کرده‌اند و همچنین مقادیر زیاد منگنز و آهن و میزان کم سدیم و میزان نسبتاً بالای استرانسیوم را از نظر زمانی می‌توان آخرین نسل فازهای دولومیتی و مربوط به محیط‌های تدفینی نسبتاً عمیق در نظر گرفت. البته از میان دولومیت‌های پرکننده حفرات به نظر می‌رسد دولومیت‌های زونه با توجه به مرزهای مسطح آن‌ها در دما و عمق کمتری نسبت به دولومیت‌های زین‌اسبی شکل گرفته باشند. اکثر آب‌های زیرزمینی به استثناء مواقعی که آب در تماس با دولومیت یا سنگ‌های تبخیری غنی از Mg باشند، محتوی مقادیر نسبتاً کمی از منیزیم هستند (باور، ۱۹۷۸). رایج‌ترین منبع برای مقادیر زیاد منیزیم در آب‌های طبیعی دولومیت است (میسر و بکر، ۱۹۶۷). منشاء منیزیم در آب، از سنگ‌های آذرین، کانی‌های الیوین، آمفیبول و میکاهای تیره می‌باشد. در سنگ‌های دگرگونی منشاء منیزیم از کانی‌های کلریت، مونت‌موریلونیت و سرپانتین بوده و در سنگ‌های رسوبی از کانی‌های دولومیت و منیزیت نشأت می‌گیرد (فت و همکاران، ۱۹۶۴). تبدیل‌های کانی‌شناسی رس‌ها در اعماق تدفین باعث آزادسازی کاتیون منیزیم می‌شود که می‌تواند منشایی برای سیالات دولومیت‌ساز است (کیرماچی، ۲۰۰۸). ممکن است منیزیم لازم برای تشکیل دولومیت‌های جانیشینی از انحلال اجزای اسکلتی با ترکیب کانی‌شناسی کلسیت پرمینیزیم فراهم شود (کیرماچی، ۲۰۰۸). منیزیم در شرایط تدفینی از منابع مختلفی مانند آب دریا و حل شدن منیزیم‌های موجود در فسیل‌های آلی به وجود می‌آید (مونتس هرناندز و همکاران، ۲۰۱۶)

الف: مدل سبخا: در این مدل دولومیتی شدن بلورهای ریز دولومیت به نسبت‌های مختلف در متن میکرایتی پراکنده‌اند و بیشتر از دولومیت‌های نوع ۱ و ۲ می‌باشند.

همچنین چون مقدار منیزیم در نمونه‌ها با هم خیلی متفاوت نیست پس مقدار آهن و منگنز نیز با تناسب با آن تغییرات کمی را دارند. تمرکز آهن و منگنز در دولومیت‌های منطقه نشان‌دهنده شرایط احیایی حاکم بر محیط می‌باشد (لند، ۱۹۸۶). شرایط احیایی با افزایش عمق تدفین افزایش می‌یابد. دولومیت‌های دیاژنتیکی تاخیری که در شرایط احیاء تشکیل شده‌اند (دولومیت‌های نوع ۳ و ۴) مقادیر آهن و منگنز بالاتری نسبت به دولومیت‌های اولیه نزدیک سطح (دولومیت‌های نوع ۱ و ۲) دارند. از آنجایی که تمرکز آهن و منگنز در سیالات دریایی کم است، از این‌رو افزایش مقادیر آهن و منگنز از دولومیت‌های ریزبلور با کمترین دگرسانی به دولومیت‌های درشت‌بلور با دگرسانی بیشتر احتمالاً در نتیجه واکنش آن‌ها با سیالات غیردریایی بوده است (آدابی، ۱۹۹۶). روند تغییرات آهن و منگنز در مقابل منیزیم ترسیم شده است (شکل - ۱۰D, E). آهن و منگنز بر خلاف استرانسیوم و سدیم در دولومیت‌های دیاژنتیکی تاخیری نسبت به دولومیت‌های اولیه روند افزایشی نشان می‌دهند. این افزایش می‌تواند به دلایل زیر باشد:

- ۱) آهن و منگنز در آب دریا تمرکز پایین داشته و در حالی که در سیالات دیاژنتیکی تمرکز بالایی دارند.
- ۲) تمرکز بیشتر آهن و منگنز به شرایط احیایی حاکم بر محیط بستگی دارد. به طوری که مقادیر آهن و منگنز در دولومیت‌های اولیه نزدیک به سطح به دلیل شرایط اکسیداسیونی، نسبت به دولومیت‌های تدفینی که در شرایط احیایی تشکیل می‌گردند، پایین‌تر است (تاگر و رایت، ۱۹۹۰).

۶- مدل‌های دولومیتی شدن

دولومیت یک کانی ثانویه است که طی فرایندی پیچیده دیاژنتزی در اثر جایگزینی یون‌های کلسیم توسط منیزیم در داخل کربنات‌ها تشکیل می‌شود. این کانی توسط مدل‌های مختلفی همانند دریایی، نفوذ تراوش (گیوری و همکاران، ۲۰۲۰)، تبخیری سبخایی (لوکوسکی و همکاران، ۲۰۱۹)، زون مخلوط و تدفین عمیق تشکیل می‌شود (آدابی، ۱۳۸۳). سه مکانیسم دولومیتی شدن در این مطالعه شامل مدل سبخا، مدل تدفین کم‌عمق و مدل تدفین عمیق می‌باشد. با استفاده از بررسی‌های سنگ‌نگاری دولومیت‌های نوع اول به عنوان دولومیت‌های

می‌آیند (آنان و واناس، ۲۰۱۵). استیلولیت‌ها از ویژگی‌های این نوع دولومیت می‌باشند که در اثر تراکم رسوبات و فشار رسوبات ایجاد می‌شوند (فابریسیوس و بوره، ۲۰۰۷). در تشخیص دولومیت‌های پهنه مخلوط با توجه به بافت‌ها و ساخت‌های سنگ‌شناسی می‌توان به تخلخل قالبی و سیمان کلسیتی هم‌بعد آب شیرین اشاره کرد. مدل دولومیتی شدن دولومیکرواسپارایت‌ها و دولومیت‌های دانه شکری به این مدل نسبت داده می‌شود (رحیمی و آدابی، ۲۰۱۶). دولومیتی شدن در محیط‌های تدفینی به این صورت اتفاق می‌افتد که با افزایش عمق و بالا رفتن دما نسبت منیزیم (Mg) لازم برای تشکیل دولومیت افزایش پیدا می‌کند (تاگر و رایت، ۱۹۹۰). این اولین فاز دولومیت جایگزین غیر آهنی است، که نشان‌دهنده یک محیط دفن کم عمق است که در آن Fe^{2+} در دسترس نبود تا در کلسیت گنجانده شود (گیوری و همکاران، ۲۰۲۰). این نوع دولومیت در یک محیط دفن کم عمق تشکیل شد و این سنگ‌ها طیف وسیعی از محتویات آهن و منگنز، نشان می‌دهد که ممکن است آن‌ها توسط آب‌های جوی تغییر یافته باشند.

(ب) مدل تدفین عمیق: در الگوی دولومیتی شدن عمیق، اندازه بلورهای دولومیت با افزایش عمق تدفین نسبت به محیط‌های تدفینی کم عمق و محیط‌های سطحی بزرگ‌تر می‌شود. این نوع دولومیت‌ها دارای بافت‌های غیرمسطح و بی‌شکل (کازمارک و سیبلی، ۲۰۱۱) هستند که نشان دهنده تشکیل آن‌ها در دماهای بیشتر از دمای بحرانی ۶۳ تا ۷۳۳ درجه سانتی‌گراد است (آزمی و همکاران، ۲۰۰۹). دولومیت‌های تدفینی به صورت جانشینی در زیر منطقه فریاتیکی فعال در فواصل نفوذپذیر رسوبات که تحت نفوذ آب‌های گرم غنی از منیزیم هستند تشکیل، سپس در ژرفا توسط دولومیت‌های مراحل پایانی پوشیده می‌شود و از بین می‌روند (وارن، ۲۰۰۰). دولومیت‌های تدفینی نسبتاً عمیق دارای آهن (Fe) در ترکیب خود می‌باشند که این موضوع می‌تواند به دلیل احیا بودن محیط دیاژنتیکی باشد. مقادیر منیزیم و کلسیم نیز از مسیر تبخیر آب دریا امروزی، که با این آب نمک‌ها که در دولومیتی شدن نقش دارند و در نتیجه منیزیم کاهش می‌یابد، همخوانی دارد (کای و همکاران، ۲۰۲۱).

براساس بررسی‌های سنگ‌نگاری مانند بافت ریزبلور، دولومیت‌های نوع اول به عنوان دولومیت‌های تقریباً همزمان با رسوب‌گذاری در نظر گرفته می‌شوند. این نوع دولومیت‌ها توالی‌هایی هستند که رخساره‌های سنگی مدل سبخا را نشان می‌دهند. از جمله این شواهد می‌توان به همراهی با رخساره‌های منطقه بالای کشندی و داشتن لامیناسیون، بلورهای تبخیری افزون بر این ریزبلور بودن دولومیت‌ها اشاره کرد (وارن، ۲۰۰۶). افزون بر این ریزبلور بودن دولومیت‌ها بیانگر زیاد بودن مکان‌های مناسب برای هسته‌سازی بلورهای دولومیت در رسوبات دانه‌ریز سبخایی است و براساس ویژگی‌های سنگ‌شناختی دولومیت‌های ریزبلور منطقه که شامل بقایای استرماتولیتی، ذرات آواری کوارتز، وجود آثار آشفستگی زیستی، اندازه میکرایتی بلورهای دولومیت می‌باشد بیانگر مدل سبخایی دولومیتی شدن می‌باشد (رحیمی و آدابی، ۲۰۱۶). به نظر می‌رسد که برای دولومیتی شدن اولیه و یا همزمان با رسوب‌گذاری، تنها منشاء منیزیم آب دریا می‌باشد (لند، ۱۹۸۵). این منشاء تنها برای دولومیت‌های نوع یک در نظر گرفته می‌شوند که در نزدیک سطح و تحت شرایط دمای پایین در یک محیط کشندی تشکیل شده‌اند. اما منیزیم مورد استفاده برای سایر دولومیت‌ها از منابع مختلفی تامین گردیده که می‌توان به آب‌های شور حوضه‌ای اشاره کرد (آدابی، ۲۰۰۹). با توجه به اینکه دولومیت‌های نوع اول در شرایط نزدیک به سطح و دمای کم و محیط جزرومدی تشکیل می‌شوند، دارای مقادیر Fe و Mn و مقادیر نسبی Sr, Na نشانگر تبخیر و شوری بالای محیط است (کومبرا و همکاران، ۲۰۱۷). مقادیر بالای آهن و منگنز نیز موید این مطلب است که این دولومیت‌ها نه تحت تاثیر آب دریا قرار گرفته‌اند، بلکه سیالات غیردریایی نیز در فرایند دولومیتی شدن دخیل بوده‌اند. می‌توان گفت که مدل دولومیتی شدن در دولومیکرایت‌های این برش، مدل سبخا می‌باشد. شواهد ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که دولومیکرایت به دنبال مدل سبخا در یک محیط فوق شور با دمای پایین تشکیل شده است، زیرا این سنگ‌ها دارای مقادیر غیر طبیعی Sr و Na، مقادیر کمتر آهن و منگنز و نسبت Mg/Ca بالاتر هستند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸).

(ب) مدل تدفینی کم عمق: دولومیت‌های نوع اول با افزایش عمق از شرایط محیطی سطحی به محیط‌های تدفینی کم عمق تبلور می‌یابند و دولومیت‌های نوع دوم به وجود

- in Darabi Section (Southwest Iran). *Stratigraphic Sedimentology Res.*, 25(1): 81–100.
- Adabi, M. H (2009) multistage dolomitization of upper Jurassic Muzduran Formation, Kopet-Dagh basin, N. E. Iran: *Crab. Eva*, 24: 16-32. DOI:10.1007/BF03228054.
- Bakha, J. K (2000) Dolomite: occurrence, evolution and economically important association: *Earth Sci Reviews*, 52: 1-81. DOI: 10.1016/S0012-8252(00)00022-2.
- Borkhataria, R., Aigner, T., Pöppelreiter, M. C. & Pipping, J. C. P (2005) Characterisation of epeiric "LAYER-CAKE" carbonate reservoirs: Upper Muschelkalk (Middle Triassic), the Netherlands, *Journal of Petroleum Geology*, 28 (2): 15-42.
- Cai, K. W., Liu, H. J., Zhou, H. Ch., Keeling, J., Glasmacher, U. A (2021) Structure, genesis and resources efficiency of dolomite: New insights and remaining enigmas. *Chemical Geology*, 573: 120191.
- Du, Y., Fan, T., Machel, H. G., and Gao, Z (2018) Genesis of Upper Cambrian-Lower Ordovician dolomites in the Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China: Several limitations from petrology, geochemistry, and fluid inclusions. *Marine and Petroleum Geology*, 91: 43-70.
- El-Hefnawi, M. A., Mashaly, A. O., Shalaby, B. N. and Rashwan, M. A (2010) Petrography and geochemistry of Eocene limestone from Khashm Al-Raqaba area, El-Galala El-Qibliya, Egypt: Carbonates and Evaporites, 25: 193–202. DOI: 10.1007/s13146-010-0023-4.
- Flügel, E (2004) *Microfacies analysis of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application*, Springer Verlag, Berlin, 976 p. DOI: 10.1007/978-3-662-08726-8.
- Gabriela Sara Guzzy, A., Gustavo Murillo, M., Dante Jaime Morán, Z., José Manuel Grajalas, N., Ricardo Martínez, I. & Peter, S (2007) High-temperature dolomite in the Lower Cretaceous Cupido Formation, Bustamante Canyon, northeast Mexico: petrologic, geochemical and microthermometric constraints, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24: 131-149.
- Geske, A., Zorlu, J., Richter, D. K., Buhl, D., Niedermayr, A., Immenhauser, A (2012) Impact of diagenesis and low-grade metamorphism 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. *Chem Geol*, 332: 45–64. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.09.014.
- Gomez-Rivas, E. M., Corbella, J., Martín-Martín, S., Stafford, A., Teixell, P., Bons, A., Griera, and E., Cardellach (2014) Reactivity of dolomitizing fluids and Mg source evaluation of fault-controlled dolomitization at the Benicàssim outcrop analogue (Maestrat Basin, E Spain):

۷- نتیجه‌گیری

پژوهش‌های سنگ‌شناختی و زمین‌شیمیایی صورت گرفته در منطقه بررسی شده منجر به این نتایج شده است:

۱. در منطقه بررسی شده ۵ نوع دولومیت بدین شرح شناسایی شدند: دولومیت‌های خیلی ریز تا ریزبلور، دولومیت‌های ریز تا متوسط بلور، دولومیت‌های متوسط و درشت‌بلور با مراکز کدر و حواشی روشن، دولومیت‌های متوسط تا درشت‌بلور پرکننده حفره‌ها و شکستگی‌ها، دولومیت‌های خیلی درشت‌بلور (دولومیت‌های زین‌اسبی) پرکننده شکستگی‌ها می‌باشند.

۲. دولومیکرایت‌ها با توجه به شواهد سنگ‌نگاری از قبیل اندازه خیلی ریزبلورها، وجود ذرات پراکنده در حد سیلت، حفظ بافت‌های اولیه رسوبی، عدم وجود فسیل، قطعات پراکنده کوارتز آواری و نبود شواهدی که نشان‌دهنده تشکیل آن‌ها تحت تأثیر فرآیندهای دیاژنتیکی تأخیری باشد و همچنین شواهد زمین‌شیمی از قبیل بالا بودن نسبی مقادیر استرانسیوم و سدیم به نظر می‌رسد که دولومیت‌های نوع اول تحت شرایط سطحی، دمای پایین و در محیط‌های فوق جزرومدی تا قسمت بالایی بین جزر و مدل سبخایی (آدابی، ۲۰۰۹) و در محیط کم‌عمق دریایی تشکیل شده است.

۳. دولومیت متوسط بلور نوع دوم با توجه به اندازه بلورها، شکل رومبئوئدری آن‌ها، مقادیر کم آهن و منگنز و مقادیر بیشتر استرانسیوم و سدیم نسبت به دولومیت نوع سوم به نظر می‌رسد که در مراحل اولیه تدفین (عمق کم) و از جان‌شینی سنگ‌های آهک قبلی حاصل شده باشند.

۴. دولومیت نوع پنجم براساس خصوصیات سنگ‌نگاری با توجه به دارا بودن کریستال‌های درشت پرکننده رگه‌ها و میزان بالای عنصر آهن در آن به عنوان محصول تدفین عمیق و آخرین مرحله دولومیتی شدن در نظر گرفته می‌شود. این نوع دولومیت که به صورت موزائیک‌های شکل‌دار با مرز مسطح می‌باشند نشان‌دهنده تشکیل آن در دمای بالاتر از حد بحرانی است (مازولو، ۱۹۹۲). منشاء تأمین منیزیم برای تشکیل این نوع دولومیت‌ها می‌تواند به تراکم شیل‌ها نسبت داد. تبدیل کانی‌های رسی و تراکم شیل‌ها در حین دیاژنز باعث خروج منیزیم به سمت بالا گردیده و سبب دولومیتی شدن لایه‌های بالای خود می‌شوند.

References

- Abdi, A., Adabi M. H (2009) Dolomites petrography diagenesis analysis, probable Shahbazn-Asmari Formations boundary and facies based on dolomitic geochemistry, petrographic evidences and statistical methods

- Lukoczki, G., Hass, J., Gregg, J. M., Machel, H. G., Kele, S., John, M. C (2019) Multi-phase dolomitization and recrystallization of Middle Triassic shallow marine peritidal carbonates from the Mecsek Mts. (SW Hungary), as inferred from petrography, carbon, oxygen, strontium and clumped isotope data. *Marine and Petroleum Geology*, 101: 440-458. DOI:10.1016/j.marpetgeo.2018.12.004.
- Mazzullo, S. J (2000) Organogenic Dolomitization in Peritidal to Deep-Sea Sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 70: 10-23.
- Meister, P., McKenzie, J. A., Bernasconi, S. M., Brack, P (2013) Dolomite formation in the shallow seas of the Alpine Triassic. *Sedimentology*, 60 (1): 270-291.
- Rahimi, A., Adabi, M. H., Aghanabati, A., Majidifard, M. R. and Jamali, A. M (2016) Dolomitization mechanism based on petrography and geochemistry in the Shotori Formation (Middle Triassic), Central Iran. *Open Journal of Geology*, 6: 1149-1168.
- Rahimi, A., and Adabi, M. H (2010) The effect of original carbonate mineralogy on diagenetic and porosity evolution in the Kangan, South Pars Field, Persian Gulf. *The First international, Applied Geological Congress, Mashhad, Iran*, 2: 2095- 2003.
- Rahimi, A., and Adabi, M. H (2016) the effect of original carbonate mineralogy on diagenetic and porosity evolution in the Early Triassic, Central Iran. *The Second international, Applied Geological Congress, Tehran, Iran*, 1: 300-307.
- Rddad, L., and S. Bouhlef (2016) The Bou Dahar Jurassic carbonate-hosted Pb-Zn-Ba deposits (Oriental High Atlas, Morocco): Fluid-inclusion and C-O-S-Pb isotope studies: *Ore Geology Reviews*, 72: 1072-1087.
- Shalalvand, M., Adabi, M. H., Zohdi, A (2019) Petrography, geochemistry and model of dolomitization of Tale Zang Formation (Late Paleocene - Early Eocene) in the south and southwest of Kermanshah. *Journal of Applied Sedimentology*, 7: 149-166. DOI: 10.22084/PSJ.2020.20357.1226.
- Sibley, D. F., Gregg, J. M (1987) Classification of dolomite rock texture. *Jour. Sed. Petrology*, 57: 967-975.
- Suzuki, Y., Iryu, Y., Inagaki, S., Yamada, T., Aizawa, S., Budd, D. A (2006) Origin of atoll dolomites distinguished by geochemistry and crystal chemistry: Kita-daito-jima, northern Philippine Sea. *Sedimentary Geology*, 183(3): 181-202. DOI:10.1016/j.sedgeo.2005.09.016.
- 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, *Marine and Petroleum Geology*, 55: 26-42. DOI: 10.3997/2214-4609.201400912.
- Gregg, J. M (1985) Regional epigenetic dolomitization in the Bon neterre Dolomite (Cambrian), southeastern Missouri. *Geology*, 13 (7): 503-506.
- Gregg, J. M. and Shelton, K. L (1990) Dolomitization and Dolomite Neomorphism in the Back Reef Facies of the Bonneterre and Davis Formations (Cambrian), Southeastern Missouri. *Journal of Sedimentary Research*, 60: 549-562.
- Györi, O., Haas, J., Hips, K., Lukoczki, G., Budai, T., Demény, A., Szöcs, E (2020) Dolomitization of shallow-water, mixed siliclastic-carbonate sequences The Lower Triassic ramp succession of the Transdanubian Range, Hungary. *Sedimentary Geology*, 395- 105549. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2019.105549.
- Hood, S. D., Nelson, C. S. & Kamp, P. J. J (2004) Burial dolomitisation in a non-tropical carbonate petroleum reservoir: the Oligocene Tikorangi Formation, Taranaki Basin, New Zealand, *Sedimentary Geology*, 172: 117-138. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2004.08.005.
- Jalilian, A. H (2017) Petrography, geochemistry and diagenetic history of Sefidar dolomite section (Upper Triassic) in Fars region, south of Iran, two quarterly journals of applied sedimentology, 5 (10): 81-96.
- Jiang, L., Cai, C. F., Worden, R. H., Li, K. K., Xiang, L (2013) Reflux dolomitization of the Upper Permian Changxing Formation and the Lower Triassic Feixianguan Formation, NESichuan Basin, China. *Geofluids*, 13 (2): 232-245.
- Jin, Z. J., Zhu, D. Y., Hu, W. X., Zhang, X. F., Wang, Y. and Yan, X. B (2006) Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin. *Acta Geologica Sinica*, 80 (2): 245-253.
- Jones, B (2005) Dolomite crystal architecture: genetic implications for the origin of the Tertiary dolostones of the Cayman Islands. *J Sediment Res*, 75(2): 177-189.
- Jones, B (2007) Inside-out dolomite. *J Sediment Res*, 77 (7): 539-551.
- Kirmaci, M. Z., & Akdag, K (2005) Origin of dolomite in the Late Cretaceous-Paleocene limestone turbidites, Eastern Pontides, Turkey *Sedimentary Geology*, 181: 39-57. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2005.07.003.
- Lakirouhani, A., Asemi, F., Zohdi, A (2018) Relationship between grain size and physical properties of dolomites in order to geomechanics study of dolomite reservoirs, *Journal of Petroleum research*, 28 (98): 150-161. DOI: 10.22078/PR.2017.2688.2238.

- Journal of Sedimentary Research, 75: 476-491.
DOI: 10.2110/jsr.2005.037.
- Tucker, M. E., Wright, V. P (1990) Carbonate Sedimentology. Blackwell Sci Pub, London, 482 p. DOI: 10.1002/9781444314175.
- Warren, J. K (2006) Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. Springer, Berlin, 1036 p.
- Wheeler, C. W., Aharon, P., Ferrell, R. E (1999) Successions of Late Cenozoic platform dolomites distinguished by texture, geochemistry, and crystal chemistry: Niue, South Pacific. J Sediment Res, 69(1): 239-255.
- Yagubi, M., Najafzadeh, A., Zohdi, A., Mahari, R., Khalegi, F (2022) Petrography and geochemistry of Elika formation dolomites in Zal Jolfa section, northwest of Iran. Journal of Applied Sedimentology, 10: 35-53. DOI: 10.22084/PSJ.2022.25490.1326.
- Zenger, D. H, Dunham, J. B., Ethington, R. L (1980) Concepts and models of dolomitization. SEPM, 28. DOI: 10.2110/pec.80.20.0001.
- Zohdi, A., Moallemi, S. A., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Richter, D. K., Geske, A., Nickandish, A. A., Immenhauser, A (2014) Shallow burial dolomitization of an Eocene carbonate platform, southeast Zagros Basin, Iran, GeoArabia, 19: 17-54. DOI: 10.2113/geoarabia190417.

Analysis and investigation of petrography and geochemistry of Permian dolomites in Qaradagh section, south of Lake Urmia

A. A. Ciabeghodsy*¹ and Sh. Mehrabi alamdari²

1- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

2- (graduated), Dept., of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

* a.siabeghodsy@urmia.ac.ir

Received: 2024.1.27 Accepted: 2024.7.17

Abstract

In this study, the dolomitic part of the Permian deposits in the Qaradagh section, located in the south of Lake Urmia, has been studied and investigated from the perspective of lithology and geochemistry. 92 samples were collected from the 202-meter-thick section. The petrographic studies were conducted by use of polarizing microscope, whereas the geochemical studies were accomplished using AAS method. The petrographic studies were carried out based on textural classification and based on that, two general groups of primary dolomites (at the same time as sedimentation) and secondary dolomites (after sedimentation) were identified. Primary dolomites include dolomicrites (very fine crystals) and secondary dolomites include sparites and dolomites filling holes. The geochemical studies are focused on main elements including Ca and Mg, and rare elements including Fe, Na, Si and Mn. Combining results from lithostratigraphic studies and elemental analysis, the formation environment of the studied dolomites concluded as follow: dolomicrites are deposited in supra-tidal to upper parts and inter-tidal zones, sparites are deposited in a shallow burial environment, and pore-filling dolomites are deposited in a deep burial environment by dolomitic fluids.

Keywords: Carbonate rocks, Petrography, Geochemical, Magnesium, Qaradagh

Introduction

Carbonate rocks including limestone and dolomite are widespread throughout the world. Formations containing dolomite and dolomite-forming fluids are one of the important topics in sedimentary geology. By using petrography and geochemistry, the conditions of dolomite formation can be investigated. The main elements (Mg, Ca) and minor elements (Sr, Na, Fe, Mn) are used to distinguish different types of dolomites. The aim of this study is to identify the types of dolomites in Qaradagh section using petrography and geochemistry. This section is located in the south of Lake Urmia, and despite the extensive dolomite, no research has been done on its textural and geochemical characteristics. This study deals with the determination of textural and geochemical characteristics of Permian dolomites in Qaradagh section and can help to understand the origin and effective processes in the formation of Permian rocks.

Study method

To study the petrography of Permian dolomites, a field visit and preliminary studies

were conducted in the area, which showed that the area has a light to dark brown color and weathered appearance. 92 thin sections were prepared from the surface section in the south of Lake Urmia. In order to distinguish calcite from dolomite, these sections were stained with alizarin red according to Dixon's (1966) method and examined by polarizing microscope in the stratigraphy and paleontology laboratory of Urmia University Faculty of Earth Sciences. After careful study of the thin sections, to study the geochemistry of dolomites in the region, 17 dolomite samples were sampled with a dental drill, and after preparation, elemental analysis was performed in the chemical laboratory of Urmia University Faculty of Earth Sciences using an atomic absorption spectrometer (AAS). For this method, a solution of powdered rock samples was prepared. Micrite samples without fossils with the least effect of weathering were selected for this study. The preparation consisted of dissolving 0.25 grams of rock powder in 5 cc of 1 M hydrochloric acid and filtering the obtained solution after 2 hours and bringing its volume to 50 cc. The main

elements (Mg, Ca) were measured as percentages and minor elements (Sr, Na, Mn, Fe) were measured as ppm.

Petrography of the Dolomites

In this article, different dolomites are investigated and divided based on the size and shape of their crystals. Based on the characteristics of the crystals, dolomites are divided into five types: a) Dolomicrite, these types of dolomites have very small crystals (5 to 16 microns) and are often dense and non-porous. This type is formed under surface conditions and low temperature and preserves the original sedimentary textures. b) Dolomicrosparite, which is composed of dense and uniform to amorphous crystals with flat borders, and the size of the crystals is between 16 and 62 microns. This type is formed at low temperatures and may result from the replacement of limestones or the recrystallization of dolomicrites. c) Dolosparite is a type of dolomite whose crystal size is between 62 and 270 microns and usually has scattered rhomboidal crystals. This type of dolomite usually changes the primary sedimentary structures and is formed at higher temperatures. d) Vein dolomite is a type of dolomite that consists of coarse crystals (200 to 1100 microns) and is usually formed in deep burial conditions and by hydrothermal fluids. These dolomites are found in cracks and holes. e) Saddle Dolomite, which has crystal sizes between 1000 and 1200 microns and is usually found in fractures and cavities. These types of dolomites are formed in high temperatures and deep burial conditions. Also, each type of dolomite has special characteristics that depend on its formation environment and diagenesis conditions.

Geochemical studies

In this article, the diagenesis of carbonate rocks and the need for geochemical methods to identify primary mineralogy have been discussed. Minor elements such as Fe, Mn, Sr, and Na are used for further analysis. The amount of calcium in dolomites varies between 21.18% and 30.97% and magnesium between 8.31% and 12.98%. The Mg/Ca ratio in pure dolomites is about 0.65. The reverse changes of calcium and magnesium are due to the replacement of these two elements. The concentration of strontium depends on the replacement of calcium. Primary dolomites

have higher strontium values than secondary dolomites. Dolomites that replace aragonite have more strontium than dolomites that replace calcite. The amounts of strontium in the dolomites of the region are between 155 and 450 ppm. Sodium in dolomites ranges from 405 to 786 ppm, which is higher than the average for normal marine dolomites. The graph of sodium versus magnesium shows the increase in sodium concentration with increasing magnesium. The concentration of iron and manganese in type 1 to 4 dolomites is different. Late diagenetic dolomites have higher amounts of Fe and Mn. The increase of iron and manganese indicates the conditions of reduction in the burial environment. So it can be said that diagenesis and the composition of dolomite-forming fluids have a great effect on the composition of minor elements of dolomites. The composition of minor elements such as strontium, sodium, iron and manganese provides important information about the origin and formation conditions of dolomites. The concentration of minor elements can indicate the reducing or oxidizing conditions of the environment and the type of dolomite (primary or secondary).

Dolomitized models

In this study, three mechanisms of dolomitization have been investigated: a) Sabkha model that this model includes microcrystalline dolomites (type 1 and 2) that are formed in tidal and evaporative environments. These dolomites are usually formed at the same time as sedimentation and retain the original textural characteristics of carbonate. The source of magnesium for this type of dolomites is mainly sea water and their formation environment is salty and shallow. Shallow burial model, in which dolomites (type 2) are formed at shallower depths through diagenetic succession. These types of dolomites often contain stylolites that result from the pressure of sediments. An increase in temperature and depth increases the proportion of magnesium that is necessary for the formation of dolomite. Deep burial model, in which dolomites (type 3) are formed at greater depths and higher temperatures. These dolomites have larger crystals and uneven textures. Iron (Fe) in these dolomites indicates a diagenetic reduction environment. In general, magnesium sources for dolomitization come from igneous, metamorphic and sedimentary

rocks, and different environmental conditions create different characteristics in dolomites.

Conclusion

The lithological and geochemical researches in the investigated area have provided the following results: a) five types of dolomites have been identified: very fine to fine crystal, fine to medium crystal, medium and coarse crystal dolomites with cloudy centers and bright edges, medium to coarse crystal filling voids and fractures, and very coarse crystal (saddle) dolomites filling fractures. b) Dolomicrites, these dolomites due to the size of very small crystals, the preservation of primary sedimentary textures, the absence of fossils and geochemical evidence such as high amounts of strontium and sodium, in surface conditions and low temperature in supratidal to intertidal

and subtidal environments and in the environment Shallow seas are formed. c) Dolomite of the second type, these dolomites have medium crystals with a rhomboidal shape, low amounts of iron and manganese, and more amounts of strontium and sodium than the third type. It seems that in the early stages of burial (shallow depth), they were obtained from the succession of previous limestones. d) The fifth type of dolomite, these dolomites have coarse crystals filling the veins and a high amount of iron, and are known as the product of deep burial and the last stage of dolomitization. Their formation took place at a temperature higher than the critical limit, and their source of magnesium is the density of shales, which release magnesium upwards during diagenesis and cause dolomitization of their upper layers.