

# منشأ سیالات دولومیت‌ساز بر مبنای ساختار بلوری و ترکیب عنصری (مطالعه موردی، سازند آسماری، شمال لرستان)

سمیرا تقدیسی نیک بخت<sup>۱\*</sup>، یعقوب نصیری<sup>۱</sup>، مصطفی صداقت نیا<sup>۲</sup>

(<sup>۱</sup>) استادیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

(<sup>۲</sup>) دانش آموخته مقطع دکتری، کارشناس آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

[\\*samirataghdisi@gmail.com](mailto:samirataghdisi@gmail.com)

تاریخ تنظیم: ۱۴۰۵/۰۵/۷

## چکیده

پژوهش‌های مربوط به دولومیت مدت‌هاست که در علوم زمین اهمیت زیادی داشته‌اند، این مطالعه بر دولومیت‌های سازند آسماری متمرکز بوده و فرآیندهای دولومیتی شدن آن‌ها را بررسی می‌کند. در این راستا یک برش چینه‌شناسی به ضخامت ۸۷ متر در یال شمالی تاق‌دیس خرم‌آباد انتخاب و مورد نمونه‌برداری قرار گرفت. عناصر اصلی و کمیاب و عناصر نادر خاکی به روش‌های EDX و XRF مورد آنالیز قرار گرفتند. پارامترهای ساختار بلوری و ترکیب عناصر در مقیاس ریزتر نیز بررسی گردید. محتوای CaO در لبه بلورهای دولومیت نسبت به مرکز بلورها، نامتوازن‌تر است و این درحالی است که محتوای CaO در مرکز بلورهای دولومیت نسبتاً یکنواخت‌تر است. اختلاف محتوای MgO در لبه و مرکز بلورهای دولومیت نسبتاً کم است. همبستگی منفی بین MgO و CaO در لبه بلورهای دولومیت نسبت به مرکز آن‌ها، بیشتر دیده می‌شود. محتوای MgO و CaO در مرکز بلورهای دولومیت به ترکیب ایده‌آل نزدیک‌تر است. دولومیت‌های مورد مطالعه اغلب غنی از کلسیم هستند. تحلیل نسبت‌های  $V/(V + Ni)$ ،  $Th/U$ ،  $Sr/Ba$ ،  $Mn/Sr$  در کربنات‌های سازند آسماری و نیز پارامترهای بافتی بلوری دولومیت نشان می‌دهد که تشکیل دولومیت با فرآیند تبخیر مرتبط بوده است. علاوه بر این، ویژگی‌های عناصر نادر خاکی و عناصر ریزمقیاس دولومیت گویای آن است که دولومیت‌های این سازند حاصل دولومیتی شدن بلورهای مخلوط و دولومیتی شدن تدفینی است. مدل دولومیتی شدن سازند آسماری در برش مورد مطالعه طی سه مرحله اصلی، دولومیتی شدن تبخیری در مرحله اولیه، دولومیتی شدن در اثر آب‌های مختلط در مرحله میانی و دولومیتی شدن تدفینی در مرحله پایانی رخ داده است. این پژوهش نشان می‌دهد که تشکیل دولومیت نتیجه‌ای پیچیده از تعامل فرآیندهای مختلف زمین‌شناختی در زمان و مکان است.

کلمات کلیدی: مدل دولومیت، سازند آسماری، زاگرس، لرستان

# Origin of dolomitizing fluids based on crystal texture and elemental composition (case study: Asmari Formation, North Lurestan)

S. Taghdisi Nikbakht<sup>1\*</sup>, Y. Nasiri<sup>1</sup>, M. sedaghatnia<sup>2</sup>

1) Assist. Prof., Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Gonabad, Gonabad, Iran

2) PhD Graduate, Central Laboratory Expert of Lorestan University, Khorramabad, Iran

## Abstract

Research on dolomite has long been of great importance in the earth sciences. This study focuses on the dolomites of the Asmari Formation and investigates their dolomitization processes. In this regard, a stratigraphic section with a thickness of 87 meters was selected on the northern flank of the Khorramabad anticline and sampled. Major and trace elements, as well as rare earth elements (REEs), were analyzed using EDX and XRF methods. Crystal texture parameters and elemental composition were also examined at finer scales. The CaO content at the edges of dolomite crystals is more heterogeneous compared to the crystal centers, whereas the CaO content in the crystal centers is relatively more homogeneous. The difference in MgO content between the edges and centers of dolomite crystals is relatively small. A negative correlation between MgO and CaO is more pronounced at the crystal edges than at the centers. The MgO and CaO contents at the centers of dolomite crystals are closer to the ideal composition. The studied dolomites are mostly calcium-rich. Analysis of V/(V+Ni), Th/U, Sr/Ba, and Mn/Sr ratios in the carbonates of the Asmari Formation, together with dolomite crystal texture parameters, indicates that dolomite formation was associated with evaporative processes. Furthermore, the rare earth element (REE) characteristics and trace element signatures of the dolomites suggest that the dolomites in this formation resulted from mixing-zone dolomitization and burial dolomitization. The dolomitization model for the Asmari Formation in the studied section occurred in three main stages: evaporative dolomitization during the early stage, mixing-zone dolomitization during the intermediate stage, and burial dolomitization during the late stage. This study demonstrates that dolomite formation is a complex product of the interplay of various geological processes through time and space.

**Keywords:** Dolomite model, Asmari Formation, Zagros, Lorestan

## ۱- مقدمه

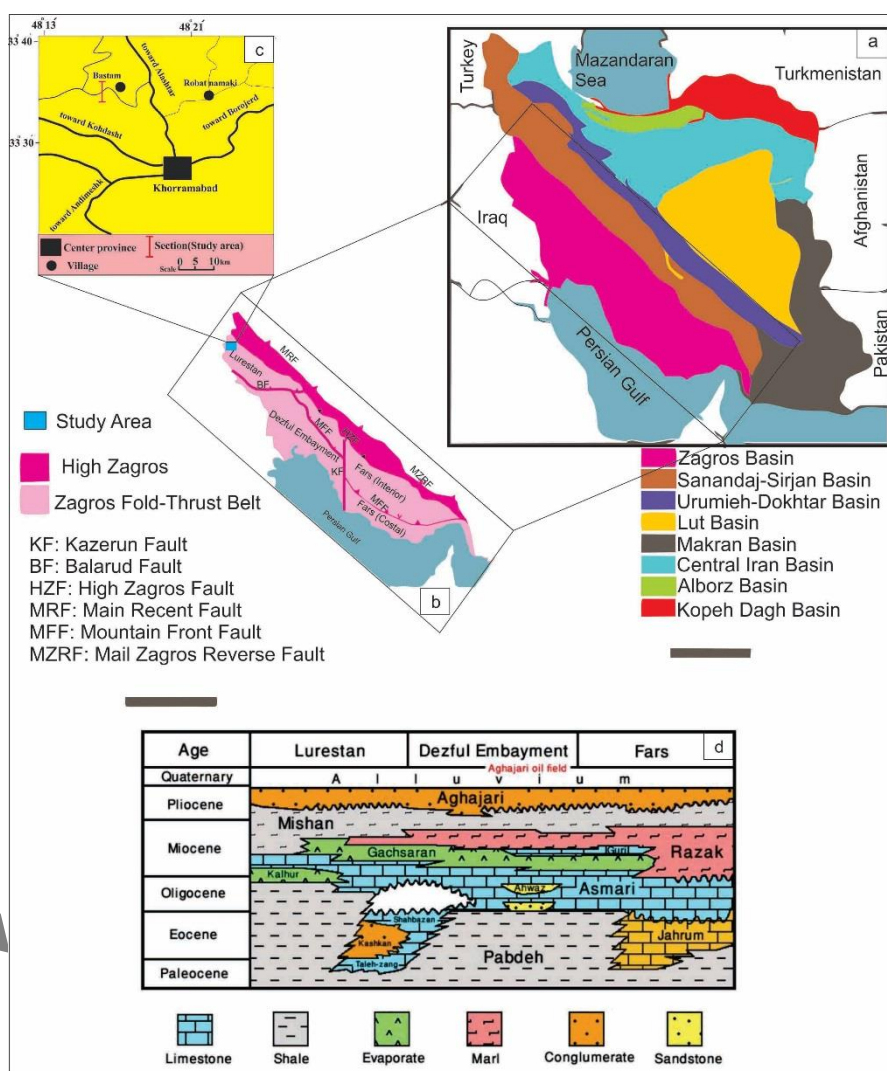
فرآیند پیدایش دولومیت، یکی از مهم‌ترین فرآیندهای کانی‌سازی رسوبی، همواره کانون توجه پژوهش‌های علوم زمین بوده است. برخلاف رسوبات کربناته امروزی که عمدتاً از کلسیت و آراگونیت تشکیل شده‌اند، دولومیت هرچند در دمای سطحی کمتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد کمیاب و با سرعت پایین تشکیل می‌شود اما در توالی‌های کربناته دریایی دیرینه به فراوانی دیده می‌شود [1, 2]. این تناقض جذاب که از قرن هجدهم مورد توجه زمین‌شناسان قرار گرفته، همچنان ذهن جامعه علمی را مشغول کرده است. با وجود پیشرفت‌ها در زمینه ترمودینامیک، منشأ دولومیت همچنان مورد بحث است، زیرا هنوز درک کاملی از فرآیندهای شیمیایی، هیدرولوژیکی و سینتیکی آن

وجود ندارد [3]. مدل‌های گوناگونی برای دیاژنز و چگونگی دولومیتی‌شدن پیشنهاد شده‌اند، از جمله: دولومیتی‌شدن از نوع نشت و بازگشت، دولومیتی‌شدن در اثر تمرکز موئینه‌ای، دولومیتی‌شدن سبخایی، دولومیتی‌شدن ناشی از آب‌های مختلط، دولومیتی‌شدن تعدیل یافته، دولومیتی‌شدن تدفینی، دولومیتی‌شدن در اثر همرفت حرارتی آب دریا و دولومیتی‌شدن گرمایی کنترل‌شده توسط ساختارهای تکتونیکی [4]. این مدل‌ها هر یک شرایط زمین‌شناختی خاصی را در طی فرآیندهای هم‌زمان با رسوب‌گذاری یا پس از تدفین نشان می‌دهند، با این حال هنوز طبقه‌بندی استاندارد بر اساس مدل‌های دیاژنتیکی وجود ندارد [5]. پژوهش‌های اخیر بیان می‌کنند که دولومیت‌های وسیع و توده‌ای عمدتاً در محیط‌های کم‌عمق فوق‌اشباع و زیرجزرومدی و نیز در برخی محیط‌های زیرسطحی تشکیل می‌شوند، و مدل‌های دولومیتی‌شدن ناشی از آب‌های مختلط و سبखा با جریان برگشتی، توضیحات قابل توجهی برای این پدیده ارائه می‌دهند [6]. روش‌های ژئوشیمیایی در سال‌های اخیر به ابزارهایی بنیادی برای بررسی منشأ و سازوکار تشکیل دولومیت تبدیل شده‌اند [7, 8]. ژئوشیمی رسوبی با تحلیل میزان عناصر و ترکیب کانی‌شناسی دولومیت، به شناخت منشأ آن، ویژگی‌های محیط رسوبی و فرآیندهای تحول سنگ کمک می‌کند [9, 10, 11]. پارامترهای مرتبط با ساختار بلوری دولومیت مانند میزان نظم شبکه و ابعاد سلولی، شاخص‌های میکروسکوپی برای مطالعه محیط و مکانیزم‌های تشکیل دولومیت محسوب می‌شوند [12, 13]. افزون بر این، ریزکاوش الکترونی با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته میکروتحلیل، می‌تواند ساختارهای حلقوی - نواری و توزیع عناصر کمیاب در درون بلورهای دولومیت را با دقت بالا تعیین کند، این داده‌ها امکان بازسازی تاریخچه چند مرحله‌ای سیالات دیاژنتیکی را فراهم کرده و شواهد مستقیمی در این زمینه ارائه می‌دهند [14].

این پژوهش به بررسی تغییرات محیط رسوبی، ویژگی‌های ژئوشیمیایی سیالات دولومیت‌ساز و منشأ دولومیت در سازند آسماری در حوضه‌ی رسوبی لرستان می‌پردازد.

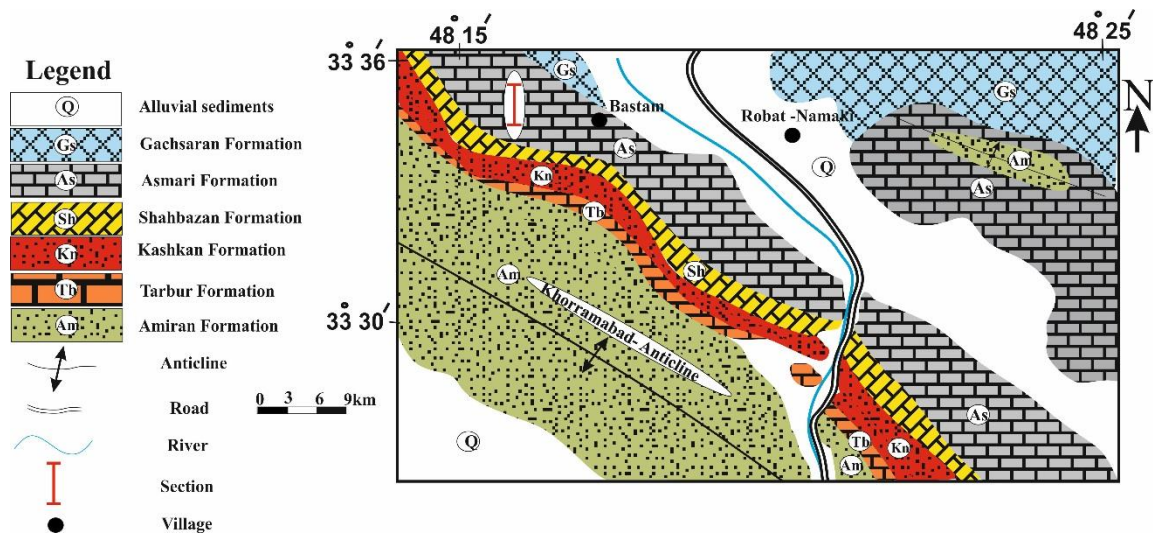
## ۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در ۲۷ کیلومتری شمال شهرستان خرم‌آباد و در منطقه بسطام قرار دارد. مختصات جغرافیایی این منطقه  $35^{\circ} 12'$  عرض شمالی و  $48^{\circ} 17' 30''$  طول خاوری می‌باشد. از طریق جاده آسفالتی شهرستان خرم‌آباد به شهرستان الشتر می‌توان به برش مورد نظر دست یافت (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه جزئی از زاگرس چین‌خورده محسوب می‌شود و بر اساس نقشه زمین‌شناسی منطقه که بخشی از نقشه ۱/۲۵۰۰۰ شهرستان خرم‌آباد می‌باشد واحدهای دوران دوم و سوم رخنمون دارند. سازندهای گسترش یافته در منطقه مورد مطالعه شامل امیران، سازند آواری کشکان، سازندهای آسماری، شهبازان و گچساران هستند (شکل ۲).



شکل ۱: a- نقشه زمین شناسی ایران که موقعیت کمربند کوهزایی زاگرس در جنوب غرب نقشه مشخص است. b- تقسیمات کمربند چین خورده-رورانده زاگرس و موقعی منطقه مورد مطالعه در حوضه لرستان. c- موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی به برش مورد مطالعه. d- ستون سنگ چینه ای سنوزوئیک حوضه زاگرس که در آن موقعیت سازند آسماری و سازندهای معادل آن مشخص شده است. با تغییر از [15].

Figure 1: (a) Geological map of Iran showing the location of the Zagros Orogenic Belt in the southwestern part of the map. (b) Subdivisions of the Zagros Fold-Thrust Belt and the location of the study area in the Lurestan Basin. (c) Geographic location and access routes to the studied section. (d) Cenozoic lithostratigraphic column of the Zagros Basin, indicating the position of the Asmari Formation and its equivalent formations. Modified from (Shabafrooz et al. 2015).



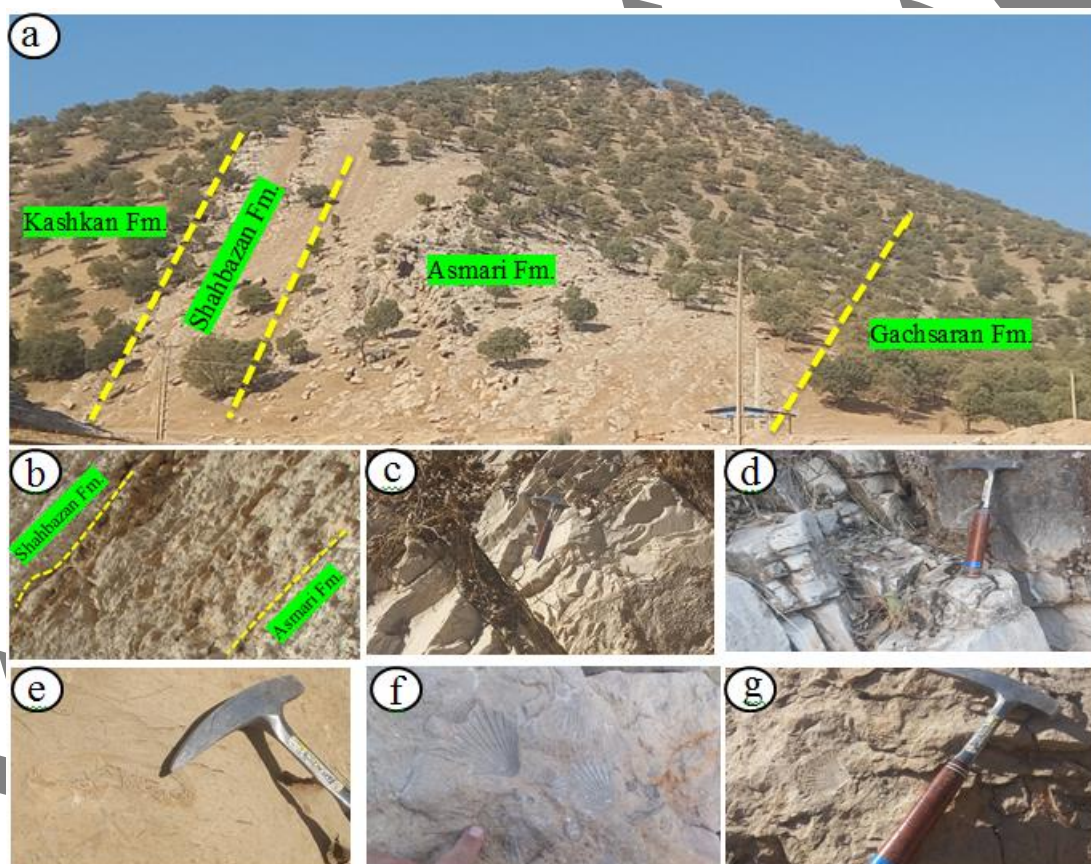
شکل ۲: بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰ شهرستان خرم‌آباد به همراه موقعیت برش مورد مطالعه و سازندهای گسترش یافته در منطقه.

Figure 2: A portion of the 1:25,000 geological map of the Khorramabad area, showing the location of the studied section and the formations exposed in the region.

### ۳- ویژگی‌های سنگ‌چینه‌ای برش مورد مطالعه

یک برش چینه‌شناسی در شمال خرم‌آباد (یال شمالی تاکدیس خرم‌آباد) با ضخامت ۸۷ متر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این برش مرز زیرین سازند آسماری با سازند شهبازان به صورت ناپیوستگی فرسایشی و هم‌شیب و مرز بالایی آن با سازند گچساران از نوع همساز است. واحدهای سنگ‌چینه‌ای تشکیل شده در این برش متشکل از سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی هستند که به صورت واحدهای نازک‌لایه، متوسط‌لایه، ضخیم و خیلی ضخیم لایه صخره‌ساز رخمون دارند (شکل ۳). معیار تفکیک نهشته‌های سازند آسماری از نهشته‌های سازند شهبازان در برش‌های مورد مطالعه بر اساس مطالعات سنگ‌شناسی بوده است. سازند شهبازان در برش‌های مورد مطالعه با رنگ سفید تا شیری رنگ خود از تناوب دولومیت و سنگ آهک دولومیتی تشکیل شده است و رخساره‌های آن بشدت دولومیتی شده‌اند. حال آنکه سازند آسماری به رنگ خاکستری روشن تا تیره اغلب از کربنات‌هایی تشکیل شده است که کمتر تحت تأثیر فرآیند

دولومیتی شدن قرار گرفته‌اند و رخساره‌های آن حفظ شدگی خوبی نشان می‌دهند. در برخی از واحدهای آن ماکروفسیل‌ها (اغلب دوکفه‌ای و خارپوستان) دیده می‌شوند. همچنین وجود یک افق هوازده با ضخامت ۲ متر در مرز دو سازند شهبازان و آسماری در برش مورد مطالعه دیده شده است که تفکیک کننده این دو سازند در مطالعات صحرایی است. در شکل ۴ ستون سنگ‌چینه‌ای سازند آسماری در برش مورد مطالعه نشان داده شده است.



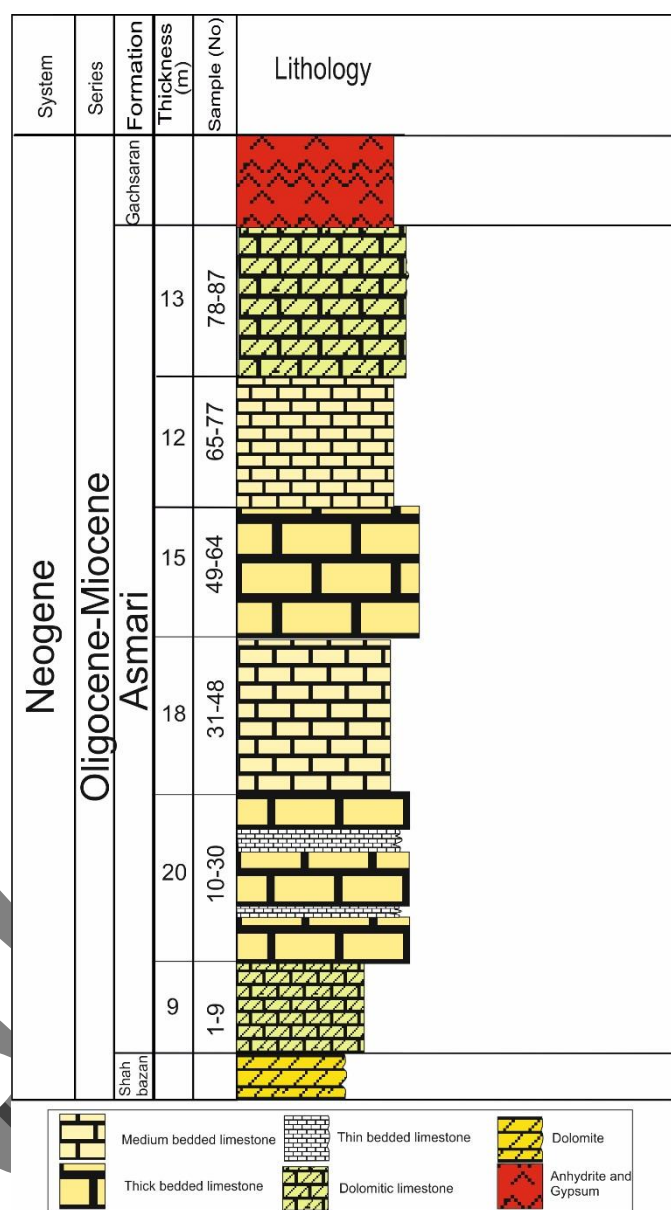
شکل ۳: واحدهای سنگ‌چینه‌ای برش مورد مطالعه. a: نمایی از سازند آسماری در برش مورد مطالعه به همراه سازندهای زیرین و بالایی آن (دید به سمت شمال). b: افق هوازده به ضخامت تقریباً ۲ متر در مرز سازند شهبازان و آسماری (طول تصویر ۳ متر). c: سنگ‌آهک دولومیتی ضخیم لایه. d: سنگ‌آهک متوسط تا ضخیم لایه. e: سنگ‌آهک نازک لایه حاوی فسیل خارپوست. f: سنگ‌آهک متوسط لایه. g: سنگ‌آهک متوسط تا ضخیم لایه به رنگ خاکستری حاوی فسیل دوکفه‌ای.

Figure 3: Lithostratigraphic units of the studied section. (a) View of the Asmari Formation in the studied section along with its underlying and overlying formations (view to the north). (b) Weathered horizon approximately 2 meters thick at the boundary between the Shahbazan and Asmari formations (image length = 3 meters). (c) Thick-bedded dolomitic limestone. (d) Medium- to thick-bedded limestone. (e) Thin-bedded

limestone containing echinoderm fossils. (f) Medium-bedded limestone containing bivalve fossils. (g) Medium- to thick-bedded, gray limestone containing bivalve fossils.

#### ۴- روش مطالعه

پژوهش حاضر بر مبنای مشاهده‌های میکروسکوپی با نور پلاریزه و میکروسکوپ نوع روبشی، سنجش عناصر اصلی و کمیاب، تحلیل ساختار بلوری دولومیت و داده‌های EDX، XRF و ICP-MS انجام شده است. نتایج این پژوهش نقش مهمی در درک منشأ سیالات دولومیت‌ساز در زمان الیگوسن- میوسن در حوضه‌ی رسوبی لرستان دارد. در این پژوهش تعداد ۸۷ نمونه از کربنات‌های سازند آسماری در برش مورد مطالعه برداشت و از آن‌ها مقطع نازک سنگ‌شناسی تهیه گردید. مقاطع نازک با میکروسکوپ پلاریزان نوع Olympus-BH2 در دانشگاه گناباد مورد مطالعه و تصویربرداری قرار گرفته است. تعداد ۶ نمونه از کربنات‌های سازند آسماری مورد آنالیز XRF و ICP-MS قرار گرفته است. (آنالیزها در شرکت زر آزما تهران صورت گرفته است). از دولومیت‌های مورد مطالعه تعداد ۲۴ نقطه از لبه‌ها و مرکز بلورها مورد آنالیز EDX (ریز کاوش الکترونی) قرار گرفته است و از آن‌ها تصویر میکروسکوپ الکترونی نیز تهیه شده است (آنالیز EDX و تصویربرداری الکترونی در دانشگاه لرستان صورت گرفته است).



شکل ۴: ستون سنگ‌چینه‌ای برش مورد مطالعه.

Figure 4: Lithostratigraphic column of the studied section.

۵- نتایج

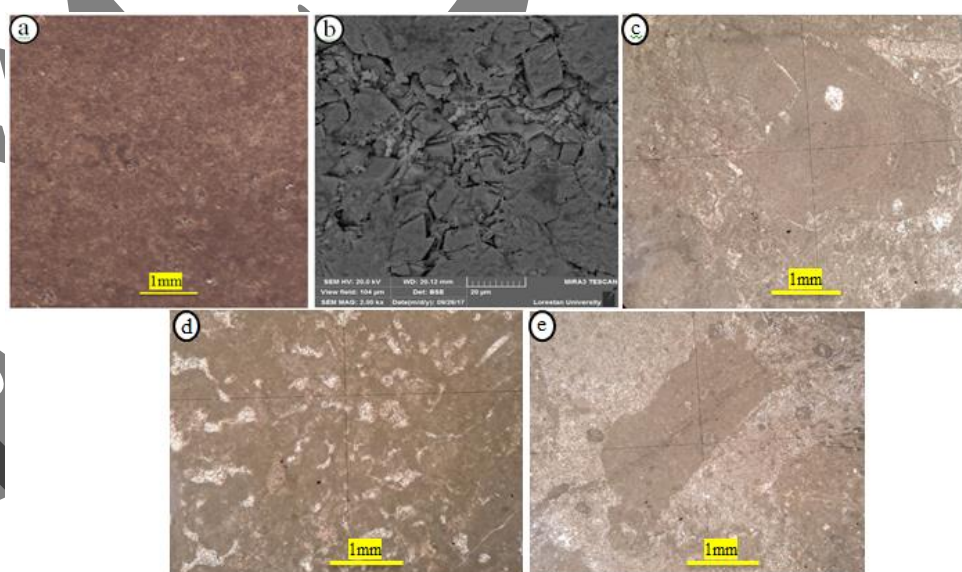
۵-۱ سنگ‌نگاری دولومیت‌ها

چهار گروه دولومیت در نهشته‌های سازند آسماری در برش مورد مطالعه شناسایی گردید که شامل دولومیت‌های ریزبلور (دولومیکرایت)، دولومیت‌های متوسط بلور (دولومیکرواسپارایت)، دولومیت‌های درشت‌بلور (دولواسپارایت‌ها) زونه و دولومیت‌های درشت‌بلور پرکننده شکستگی‌ها است.

#### ۱-۵ دولومیت‌های ریزبلور (دولومیکرایت)

توصیف: دولومیت‌های ریزبلور سازند آسماری در اندازه‌های بین ۵ تا ۲۰ میکرون دیده می‌شوند (شکل ۵). این نوع از دولومیت‌ها دارای فابریک متراکم، تیره رنگ و فاقد فسیل و دارای شواهد بافتی رسوبی اولیه نظیر لامیناسیون جلبکی و فابریک فنسترال می‌باشند. این نوع دولومیت‌ها در برش مورد مطالعه اغلب در قسمت بالای توالی دیده شده‌اند و همراه این دولومیت‌ها کانی‌های تبخیری نظیر ژپس و انیدریت مشاهده شده است.

تفسیر: این نوع از دولومیت‌ها در شرایط سطحی و دمای پایین و همزمان با رسوبگذاری یا در مراحل اولیه دیاژنز در محیط بالای جزر و مدی یا بین جزر و مدی تشکیل شده‌اند. این بافت دولومیتی معادل بافت Planar – S مازالو [16] و سیلی و گرگ [17] و بافت ایدیوتوپیک Idiotopic – S گرگ و سیلی [18] است [19]. با توجه به حضور تبخیری‌ها همراه با این گروه از دولومیت‌ها تشکیل آن‌ها به محیط بالای جزر و مدی نسبت داده می‌شود.



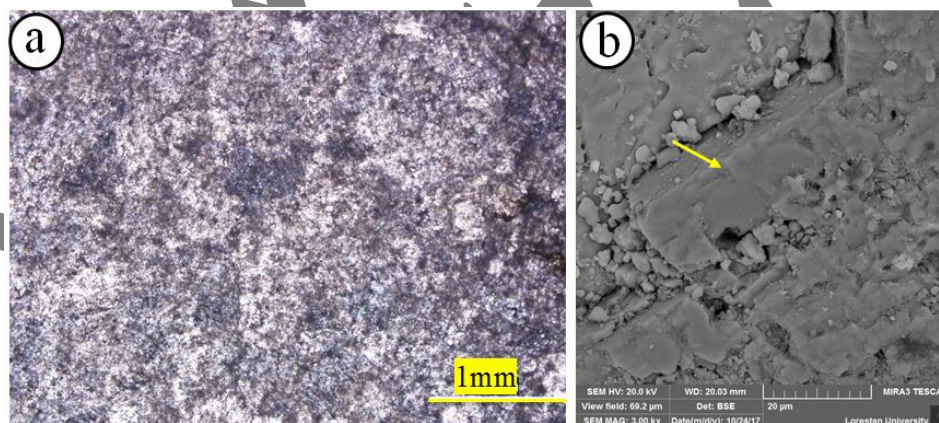
شکل ۵: a- دولومیت‌های ریزبلور تحت میکروسکوپ پلاریزان. b: تصویر میکروسکوپ الکترونی دولومیت‌های ریزبلور مقطع a. تصاویر c تا e به ترتیب شواهد رسوبی دولومیکرایت‌ها (لامینه‌های جلبکی، تخلخل فنسترال و اینتراکست‌های گلی) را نشان می‌دهند.

Figure 5: (a) Fine-crystalline dolomites under a polarizing microscope. (b) Scanning electron microscope (SEM) image of the fine-crystalline dolomites from sample (a). Images c to e, respectively, display sedimentary evidence of dolomicrites (algal laminae, fenestral porosity, and mud intraclasts).

### ۵-۱-۲ دولومیت‌های متوسط بلور (دولومیکرواسپارایت)

توصیف: دولومیت‌های متوسط بلور سازند آسماری بصورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار در اندازه‌های بین ۲۰ تا ۸۰ میکرون در مقاطع مورد مطالعه شناسایی گردید (شکل ۶).

تفسیر: این نوع از دولومیت‌ها نیز معادل فابریک Idiomatic – P گرگ و سیبلی [18] و دولومیت‌های Planar – P مازالو [16] می‌باشد [19] که از تبلور مجدد دولومیت‌های ریزبلور ایجاد شده‌اند. وجود لکه‌هایی از دولومیت‌های ریزبلور در بین دولومیت‌های متوسط بلور تأییدی بر این نظریه است [20]. این نوع دولومیت‌ها در برش مورد مطالعه اغلب در قسمت میانی تا بالایی توالی دیده شده‌اند.



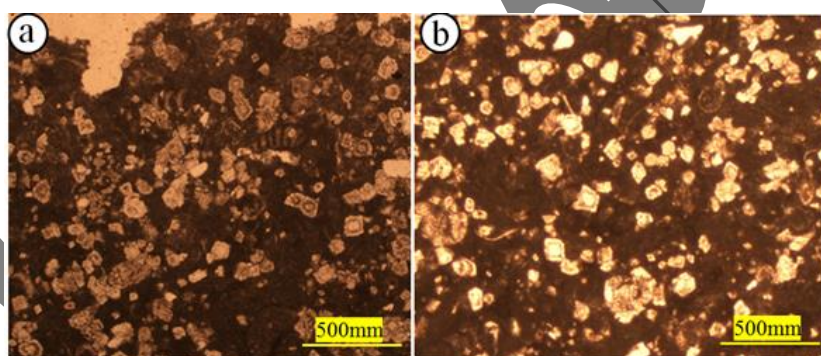
شکل ۶: a- دولومیت‌های متوسط بلور تحت میکروسکوپ پلاریزان. b: تصویر میکروسکوپ الکترونی دولومیت‌های متوسط بلور مقطع a

Figure 6: (a) Medium-crystalline dolomites under a polarizing microscope. (b) Scanning electron microscope (SEM) image of the medium-crystalline dolomites from sample (a).

### ۵-۱-۳ دولومیت‌های درشت بلور (دولواسپارایت) زونه

توصیف: این نوع از دولومیت‌ها در سازند آسماری به صورت بلورهای خودشکل زونه در مقاطع مورد مطالعه شناسایی گردید (شکل ۷). اندازه این بلورها بین ۸۰ تا ۲۰۰ میکرون و در برخی موارد بیش از ۵۰۰ میکرون می‌باشند. در این نوع از دولومیت‌ها ادخال‌های تیره‌رنگ

در مرکز بلورها دیده می‌شود که حالت زونه (منطقه‌بندی) به دولومیت‌ها داده است. به نظر می‌رسد این ادخال‌ها غنی از مواد آلی هستند که در مرکز بلورها قرار گرفته‌اند. این نوع دولومیت‌ها در برش مورد مطالعه اغلب در قسمت میانی تا بالایی توالی دیده شده‌اند. تفسیر: از دلایل ایجاد منطقه‌بندی در بلورهای دولومیت می‌توان به تغییر در ترکیب محلول (نوسانات در غلظت یون‌های موجود در محلولی که بلور از آن رشد می‌کند)، تغییر دما و فشار (این عوامل بر سینتیک رشد بلور و قابلیت جذب عناصر تأثیر می‌گذارند)، سرعت رشد بلور (اگر بلور خیلی سریع رشد کند، ممکن است ناخالصی‌ها را راحت‌تر در خود جای دهد)، فرایندهای دیاژنتیکی (پس از رسوب‌گذاری اولیه، سنگ ممکن است تحت تأثیر فرایندهای شیمیایی و فیزیکی (دیاژنز) قرار گیرد که منجر به رشد مجدد بلورها یا جایگزینی با محلول‌های جدید و در نتیجه زوناسیون می‌شود) اشاره کرد [21, 22].



شکل ۷: a و b- دولومیت‌های درشت بلور زونه به صورت پراکنده و شناور در زمینه میکرایتی

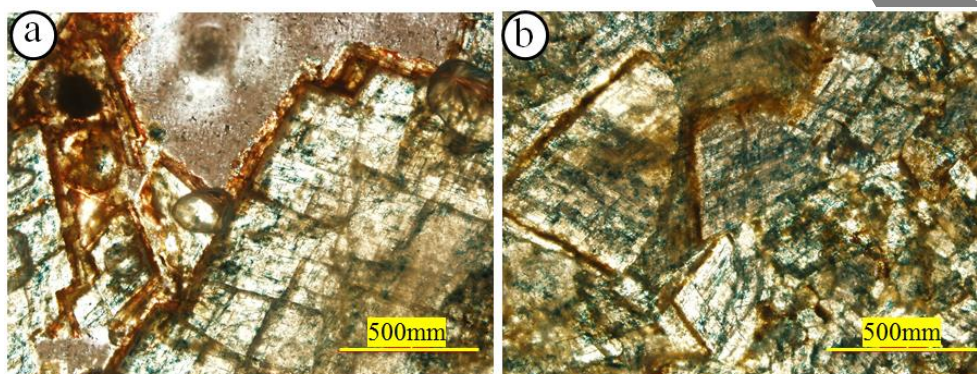
Figure 7: (a and b) Coarse-crystalline, zoned dolomites scattered and floating within a micritic matrix.

#### ۴-۵ دولومیت خیلی درشت‌بلور پرکننده شکستگی‌ها

توصیف: در مقاطع مورد مطالعه این نوع از دولومیت‌ها اغلب به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و در اندازه‌های چندین میلی‌متر به صورت پرکننده شکستگی‌ها مشاهده گردید. این دولومیت‌ها پس از رنگ آمیزی با آلزارین قرمز و فروسیانید پتاسیم به رنگ آبی فیروزه‌ای ظاهر شده‌اند. برخی از بلورهای دولومیت حالت زین اسبی (باروک) به خود گرفته‌اند (شکل ۸).

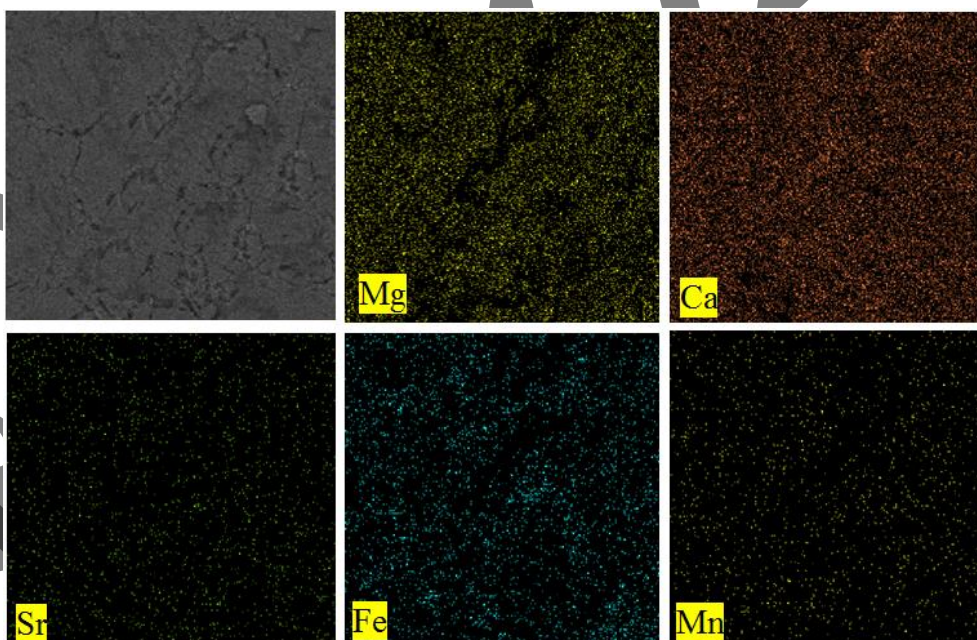
تفسیر: وجود دولومیت‌های بسیار درشت‌بلور پرکننده شکستگی‌ها و حالت زین اسبی آن‌ها بیانگر تشکیل در شرایط تدفینی نسبتاً عمیق می‌باشد [19]. رنگ آبی فیروزه‌ای در این گروه از دولومیت‌ها این موضوع را اثبات می‌کند. مرز بین بلورها در این گروه از دولومیت‌ها در برخی موارد به صورت غیر مسطح نوع A مازولو [16] می‌باشند. دولومیتی شدن در محیط‌های تدفینی به این صورت اتفاق می‌افتد که

با افزایش عمق و بالارفتن دما نسبت منیزیم (Mg) لازم برای تشکیل دولومیت افزایش پیدا می‌کند [19]. این نوع دولومیت‌ها در برش مورد مطالعه اغلب در قسمت زیرین توالی دیده شده‌اند. تصاویر نقشه رقومی شده (Digi maps) این گروه از دولومیت‌ها به همراه توزیع عناصر اصلی و فرعی در آن‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸: a- و b- دولومیت‌های خیلی درشت بلور زین اسبی (سدل)

Figure 8: (a and b) Very coarse-crystalline saddle dolomites.



شکل ۹: تصاویر نقشه رقومی شده دولومیت‌های درشت بلور به همراه توزیع عناصر اصلی و فرعی در آن‌ها

Figure 9: Digi maps images of coarse dolomites, including the distribution of major and trace elements within them

## ۵-۲ زمین‌شیمی عنصری

نتایج زمین‌شیمی عنصری بر روی کربنات‌های سازند آسماری به روش‌های XRF و ICP-MS در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. تمرکز مقادیر Ca و Mg به روش EDX به صورت نقطه‌ای بر روی بلورهای ریز و درشت دولومیت صورت گرفته است (جدول ۳). در این روش حاشیه (لبه‌ها) و مرکز بلورهای دولومیت به روش نقطه‌ای مورد آنالیز قرار گرفته است. همچنین در شکل ۱۰ محل نقاط مورد آنالیز برای بلورهای دولومیت نشان داده شده است.

جدول ۱: نتایج آنالیز XRF کربنات‌های سازند آسماری در منطقه مورد مطالعه. مقادیر بر حسب درصد وزنی می‌باشند

Table 1: XRF analysis results of the carbonates from the Asmari Formation in the study area. Values are in weight percent (wt%).

| Samples | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO   | K <sub>2</sub> O | MgO   | MnO  | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|---------|--------------------------------|------------------|-------|------------------|-------|------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 1       | 0.5                            | 6.5              | 50.15 | 0.09             | 3.5   | 0.02 | 0.05              | 0.01                          | 0.1                            |
| 2       | 1.5                            | 1.7              | 45.17 | 0.05             | 14.5  | 0.03 | 0.03              | 0.02                          | 1.01                           |
| 3       | 1.2                            | 3.5              | 39.8  | 0.1              | 14.25 | 0.02 | 0.03              | 0.01                          | 0.02                           |
| 4       | 0.74                           | 2.1              | 44.7  | 0.03             | 5.6   | 0.01 | 0.01              | 0.01                          | 0.2                            |
| 5       | 1.9                            | 3.4              | 45.9  | 0.4              | 4.1   | 0.01 | 0.02              | 0.03                          | 0.1                            |
| 6       | 0.9                            | 7.1              | 39.8  | 0.1              | 13.71 | 0.02 | 0.02              | 0.01                          | 0.5                            |

جدول ۲: نتایج آنالیز ICP-MS کربنات‌های سازند آسماری در منطقه مورد مطالعه. مقادیر بر حسب پی‌پی‌ام می‌باشند.

Table 2: ICP-MS analysis results of the carbonates from the Asmari Formation in the study area. Values are in parts per million (ppm).

| Samples | Ti  | V    | Mn    | Ni  | Sr     | Ba    | Th   | U    |
|---------|-----|------|-------|-----|--------|-------|------|------|
| 1       | 101 | 1.5  | 30.2  | 5.6 | 155.96 | 10.56 | 1.05 | 0.6  |
| 2       | 98  | 2.1  | 15.8  | 1.7 | 225.47 | 25.6  | 0.4  | 0.11 |
| 3       | 75  | 3.95 | 40.15 | 2.4 | 118.74 | 19.17 | 0.61 | 0.21 |
| 4       | 68  | 0.68 | 115.9 | 3.6 | 98.68  | 16.42 | 0.24 | 0.38 |
| 5       | 120 | 1.02 | 98.71 | 2.8 | 69.78  | 18.73 | 0.12 | 0.51 |
| 6       | 145 | 0.54 | 66.7  | 1.9 | 195.25 | 19.50 | 0.75 | 0.73 |

جدول ۳: نتایج آنالیز EDX مقادیر Ca و Mg به صورت نقطه‌ای بر روی لبه‌ها و مرکز بلورهای دولومیت.

**Table 3:** EDX analysis results of Ca and Mg values as spot measurements on the edges and centers of dolomite crystals.

|                     | Points | Ca   | Mg   |                   | Points | Ca   | Mg   |
|---------------------|--------|------|------|-------------------|--------|------|------|
| Inside of dolomites | 1      | 34.5 | 13.1 | Edge of dolomites | 13     | 45.6 | 15.3 |
|                     | 2      | 36.3 | 13.7 |                   | 14     | 44.2 | 14.9 |
|                     | 3      | 34.6 | 15.2 |                   | 15     | 39.7 | 13.8 |
|                     | 4      | 34.7 | 14.5 |                   | 16     | 32.5 | 15.5 |
|                     | 5      | 35.5 | 13.0 |                   | 17     | 33.4 | 14.0 |
|                     | 6      | 35.1 | 14   |                   | 18     | 37.6 | 13.4 |
|                     | 7      | 33.7 | 13.9 |                   | 19     | 40.5 | 14.1 |
|                     | 8      | 32.5 | 14.1 |                   | 20     | 33.7 | 13.5 |
|                     | 9      | 36.7 | 13.8 |                   | 21     | 32.1 | 15.8 |
|                     | 10     | 35.4 | 15.2 |                   | 22     | 33.6 | 14.3 |
|                     | 11     | 35.2 | 14.7 |                   | 23     | 41.9 | 13.6 |
|                     | 12     | 33.1 | 13.6 |                   | 24     | 31.7 | 15.1 |

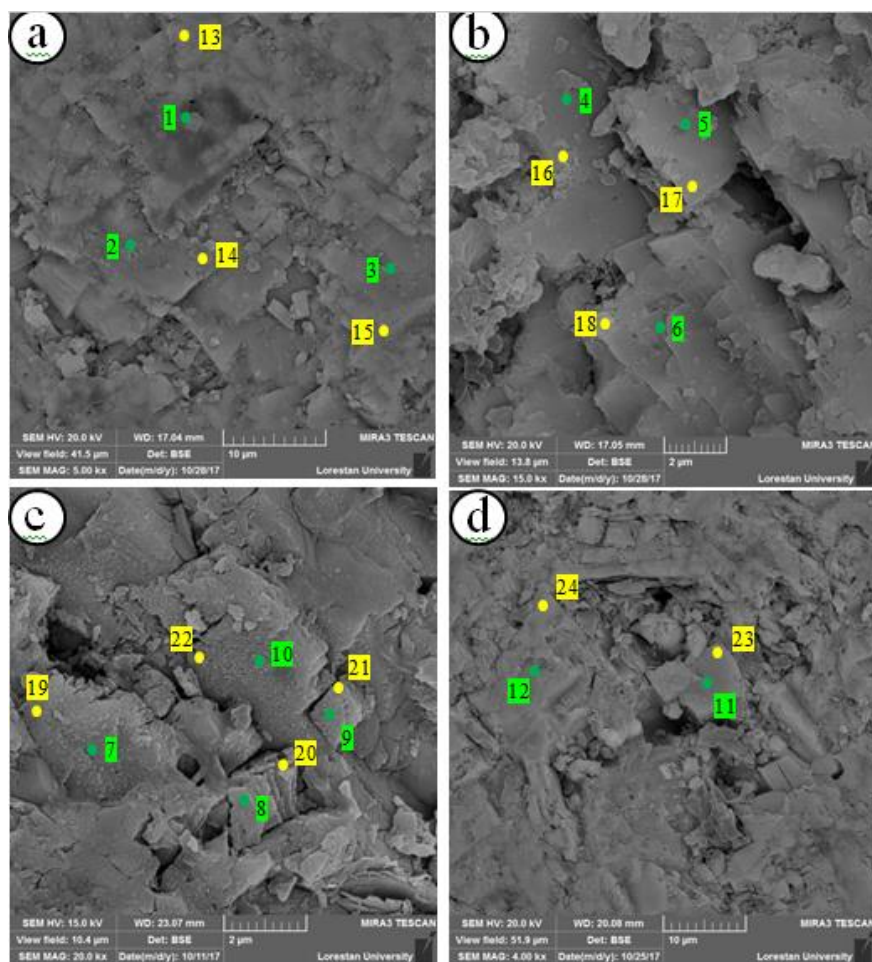
#### ۵-۲-۱ ویژگی‌های ژئوشیمیایی

در سنگ‌های کربناته، حضور عناصری مانند Cu، Ni، Cr، K، Si، Ti، Al و Ba تحت تأثیر مواد آواری است، در حالی که عناصری مانند Ca، Mg و Sr توسط کانی‌های کربناته کنترل می‌شوند [23]. منشأ ترکیبات  $Al_2O_3$  و  $K_2O$  در ارتباط با کانی‌های رسی موجود در سازندهای آواری است [35]. دولومیت‌های مورد مطالعه سازند آسماری به طور کلی دارای محتوای پایین  $Al_2O_3$  و  $K_2O$  هستند و همبستگی خطی مثبت ( $R^2=0.4935$ ) بین این دو نشان داده می‌شود (شکل ۱۱). این موضوع نشان می‌دهد که  $Al_2O_3$  و  $K_2O$  در کربنات‌های این سازند عمدتاً از کانی‌های رسی یا مواد آواری منشأ گرفته‌اند و میزان ورودی مواد آواری محدود بوده است. حضور عناصری مانند Al، Si و K نشان‌دهنده تأثیر بسیار جزئی مواد آواری بر رسوب‌گذاری سازند آسماری است، اگرچه این تأثیر چشمگیر نبوده است.

محتوای  $\text{SiO}_2$  با نوسانات سطح آب دریا همبستگی دارد و در سازند آسماری بین  $1/7$  تا  $7/1$  درصد (میانگین  $1/12$  درصد) متغیر است. به طور خاص، در بخش بالایی سازند آسماری، میانگین محتوای  $\text{SiO}_2$  کمتر از بخش زیرین آن است. این موضوع نشان‌دهنده کاهش کلی سطح آب دریا به سمت بالای توالی سازند آسماری است (روند کاهش عمق به سمت بالا).

## ۲-۵ نسبت $\text{Mn/Sr}$ به عنوان شاخص محیط رسوبی و دیاژنتیک

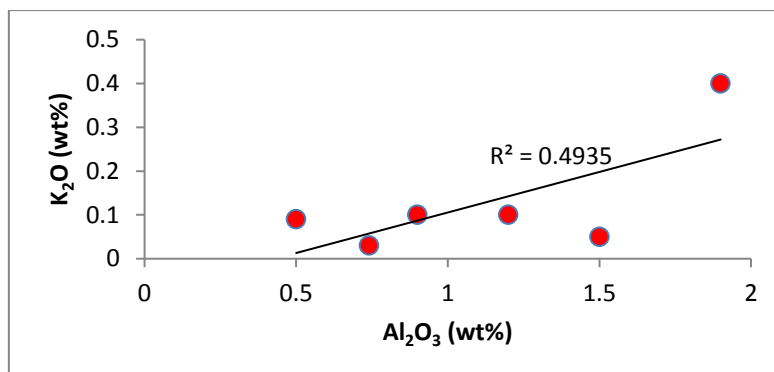
عناصر استرانسیم ( $\text{Sr}$ ) و منگنز ( $\text{Mn}$ ) علاوه بر اینکه مبنای مهمی برای تشخیص محیط‌های رسوبی هستند، به عنوان نشانگرهای ژئوشیمیایی جهت تشخیص خصوصیات سیالات نیز عمل می‌کنند. سنگ‌های کربناته دریایی معمولی، نسبت  $\text{Mn/Sr}$  نزدیک به ۱ دارند. هنگامی که سیال دیاژنتیک تحت تأثیر سیال جوی قرار می‌گیرد،  $\text{Sr}$  از کانی‌های کربناته دریایی جدا شده و  $\text{Mn}$  جذب می‌شود. این امر باعث افزایش نسبت  $\text{Mn/Sr}$  می‌گردد، بدون اینکه بر شیمی دیگر عناصر اصلی تأثیر بگذارد [24]. نسبت  $\text{Mn/Sr}$  در توالی‌های بالایی سازند آسماری افزایش می‌یابد (شکل ۱۲). این افزایش احتمالاً به دلیل دخالت آب شیرین جوی در فرآیند دولومیتیزاسیون در تماس با سازند گچساران رخ داده است. با توجه به شکل ۱۲ (نمودار مقادیر  $\text{Sr}$  در برابر  $\text{Mn/Sr}$ )، قرار گرفتن نمونه‌ها در محدوده I و III بیانگر تأثیر فرآیندهای دیاژنزی متعدد (چند مرحله‌ای) بر روی نهشته‌های سازند آسماری در منطقه مورد مطالعه است.



شکل ۱۰: a تا d- تصاویر SEM از بلورهای دولومیت به همراه نقاط مورد آنالیز. نقاط زرد رنگ لبه‌ها و نقاط سبز رنگ مرکز بلورهای دولومیت را نشان می‌دهند که مورد آنالیز قرار گرفته‌اند.

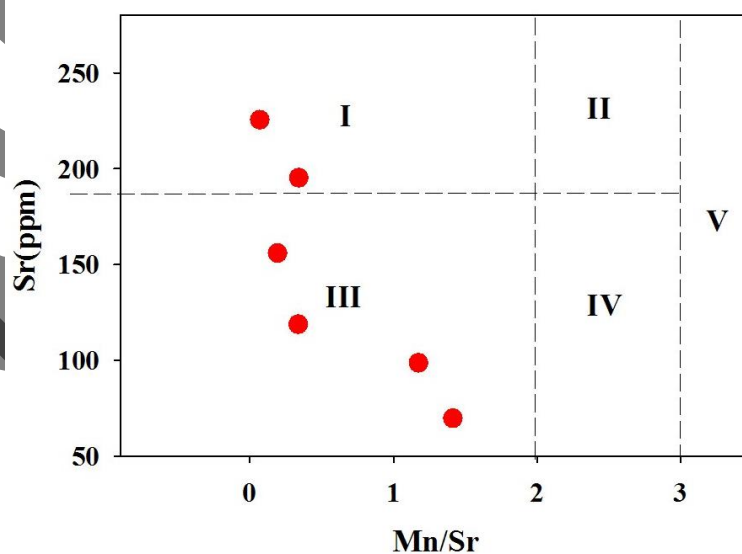
Figure 10: (a–d) SEM images of dolomite crystals with analyzed points. Yellow points indicate the crystal edges, and green points indicate the crystal centers that were analyzed.

مقایسه ترکیب شیمیایی مرکز و لبه بلورهای دولومیت نشان می‌دهد که محتوای CaO در لبه بلورها تغییرات بیشتری نسبت به مرکز دارد، در حالی که مقدار CaO در مرکز نسبتاً یکنواخت است. اختلاف MgO بین لبه و مرکز بلورها نسبتاً کم است. همچنین، همبستگی منفی CaO و MgO در لبه بلورها بیشتر مشاهده می‌شود. این ویژگی‌ها بیانگر تغییر ترکیب سیال دولومیت‌ساز و شرایط شیمیایی در مراحل مختلف رشد بلور است. نزدیک‌تر بودن ترکیب مرکز بلورها به ترکیب ایده‌آل دولومیت نیز می‌تواند نشان‌دهنده شرایط پایدارتر در زمان تشکیل بخش مرکزی بلورها باشد.



شکل ۱۱: همبستگی خطی مثبت بین  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{K}_2\text{O}$  در کربنات‌های سازند آسماری که بیانگر ورودی مواد آواری محدود به حوضه بوده است.

Figure 11: Positive linear correlation between  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{K}_2\text{O}$  in the carbonates of the Asmari Formation, indicating limited terrigenous input into the basin.



شکل ۱۲: قرار گرفتن نمونه‌ها در محدوده I و III در نمودار Sr در برابر Mn/Sr که بیانگر تأثیر فرآیندهای دیاژنزی متعدد (چند مرحله‌ای) بر روی نهشته‌های سازند آسماری در منطقه مورد مطالعه است.

Figure 12: Plot of samples within fields I and III on the Sr vs. Mn/Sr diagram, indicating the influence of multiple diagenetic processes (multi-stage) on the deposits of the Asmari Formation in the study area.

### ۳-۲-۵ نسبت‌های Sr/Ba و Mn/Ti به عنوان شاخص‌های محیط رسوبی و شوری

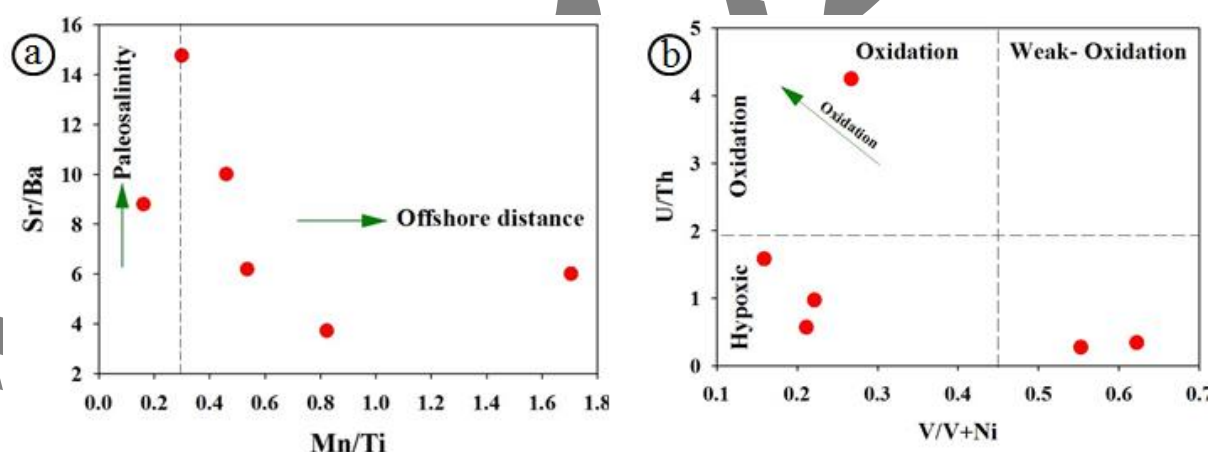
در مطالعات ژئوشیمی رسوبات عهد حاضر، ارتباطی بین تجمع و پراکندگی عناصر و عمق حوضه (فاصله از ساحل) مشاهده شده است که عمدتاً به تمایز عناصر در طول رسوب‌گذاری مربوط می‌شود [25]. به طور کلی غلظت Ca و Sr با افزایش فاصله از ساحل افزایش می‌یابد (به ویژه Sr)، در حالی که محتوای Ba با فاصله از ساحل همبستگی منفی دارد. این امر منجر به افزایش تدریجی مقادیر Sr/Ba با افزایش عمق آب می‌شود [26]. با وجود خواص شیمیایی مشابه، Sr نسبت به Ba تحرک بیشتری دارد و توسط جریان آب به اقیانوس‌های عمیق منتقل می‌شود، در حالی که Ba تمایل به تجمع در رسوبات نزدیک ساحل دارد و ورود بسیار کمی به محیط‌های عمیق دریایی دارد. نسبت Sr/Ba در رسوبات به عنوان شاخص شوری در نظر گرفته می‌شود [27]. نسبت Sr/Ba کمتر از ۱ معمولاً نشان‌دهنده محیط آب شیرین و نسبت Sr/Ba بالاتر از ۱ نشان‌دهنده محیط شور است [27, 28]. نسبت Mn/Ti در رسوبات به عنوان شاخص فاصله از ساحل در نظر گرفته می‌شود [26]. در سنگ‌های کربناته، محتوای Mn معمولاً با افزایش فاصله از ساحل افزایش می‌یابد. عناصر Al و Ti به عنوان ردیاب‌های مواد آواری استفاده می‌شوند و نسبت (Mn/Ti) ارتباط نزدیکی با فاصله از ساحل دارد [27]. مقادیر Mn/Ti بین ۰/۱ تا ۰/۳ نشان‌دهنده یک محیط دریایی دور از ساحل است [26]. تجزیه و تحلیل شاخص‌های Sr/Ba و Mn/Ti سازند آسماری نشان می‌دهد که نمونه‌های این سازند در منطقه مورد مطالعه دارای مقادیر Sr/Ba بین ۳/۷۲ تا ۱۴/۷۶ (میانگین ۸/۲۵ درصد) متغیر است. که به طور قابل توجهی بالاتر از آستانه محیط شور است. مقادیر Mn/Ti بین ۰/۱۶ تا ۱/۷۰ (میانگین ۰/۶۶ درصد) متغیر است که در محدوده رسوب‌گذاری دریایی دور از ساحل قرار می‌گیرد. بر اساس این شاخص‌های متمایز کننده (شکل ۱۳-ا)، سازند آسماری در یک دریای حاشیه‌ای به نسبت دور از ساحل با ویژگی‌های شوری متوسط تا بالا نهشته شده است.

### ۴-۲-۵ عناصر حساس به ردوکس (Redox) و تعیین شرایط اکسیداسیون-احیاء

عناصر حساس به ردوکس، عمدتاً شامل U (اورانیوم)، V (وانادیم)، و Mo (مولیبدن) هستند. این عناصر، توزیع، چرخه و تفکیک خود را در آب‌های اقیانوسی و رسوبات، بر اساس خواص شیمیایی و شرایط ردوکس غالب تنظیم می‌کنند [29]. این عناصر دارای اهمیت زمین‌شناسی برای تحقیقات اقیانوس‌شناسی دیرینه در اقیانوس‌های مدرن هستند. مطالعات نشان داده‌اند که عناصری مانند Mn, Mo, Ni و Co می‌توانند به تشخیص وضعیت ردوکس رسوبات دریایی کمک کنند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۸). نسبت V/V+Ni به عنوان شاخصی برای ردوکس رسوبات عمل می‌کند [30]. مقادیر نسبت V/V+Ni بین ۰/۸۴ تا ۰/۹۸ به عنوان محیط بی‌هوازی، بین ۰/۵۴ تا

۰/۸۲ به عنوان اکسیداسیون ضعیف و مقادیر بین ۰/۴۶ تا ۰/۶ به عنوان کاهش اکسیژن شناخته می‌شوند. مقادیر بالاتر نشان‌دهنده افزایش سطح بی‌هوازی است.

ویگنال و تویچت ۱۹۹۶، استفاده از نسبت  $Th/U$  را برای ارزیابی شرایط ردوکس رسوبات پیشنهاد کردند. در شرایط بی‌هوازی،  $U$  به صورت کمپلکس‌های نامحلول فلوراید اورانیوم ( $U^{4+}$ ) تشکیل می‌شود. در محیط‌های اکسیژنه، به کربنات اورانیل محلول ( $U^{6+}$ ) تبدیل می‌شود که منجر به غلظت بالاتر  $U$  در رسوبات بی‌هوازی می‌گردد. عنصر  $Th$  که به ردوکس حساس نیست، نامحلول باقی می‌ماند. نسبت  $Th/U$  در رسوبات بی‌هوازی کمتر از ۲ است، در حالی که در رسوبات دریایی اکسیژنه این نسبت بین ۲ تا ۷ قرار دارد. نسبت  $V/V+Ni$  در نهشته‌های سازند آسماری بین ۰/۶۲ تا ۰/۱۵ (میانگین ۰/۳۳ درصد) متغیر است. نسبت  $Th/U$  در نهشته‌های سازند آسماری بین ۰/۲۳ تا ۳/۶۳ (میانگین ۱/۶۹ درصد) متغیر است. ارزیابی جامع شاخص‌های ردوکس نشان می‌دهد که سازند آسماری در محیطی اکسیدان نهشته شده است (شکل ۱۳-ب). این امر نشان‌دهنده یک روند کاهش عمق آب در بدنه آبی رسوبی است که از یک دریای کم‌عمق به سمت نواحی ساحلی در حال تغییر بوده است.



شکل ۱۳: a- رسم مقادیر  $Sr/Ba$  در برابر  $Mn/Ti$ . نمونه‌ها در محیط دریایی به نسبت دور از ساحل نهشته شده‌اند. b- رسم مقادیر  $U/Th$  در برابر  $V/(V+Ni)$ . نمونه‌های سازند آسماری در محدوده شرایط اکسیدان نهشته شده‌اند.

Figure 13: (a) Plot of  $Sr/Ba$  values versus  $Mn/Ti$ . The samples were deposited in a relatively offshore marine environment. (b) Plot of  $U/Th$  values versus  $V/(V+Ni)$ . The Asmari Formation samples plot within the oxic conditions field.

### ۵-۳ ویژگی‌های ریزساختاری دولومیت

مطالعات در زمینه کانی‌شناسی نشان می‌دهد که رابطه خطی بین  $\text{CaO}$  و  $\text{MgO}$  در دولومیت می‌تواند میزان جایگزینی کلسیت توسط دولومیت را مشخص کند. همبستگی مثبت معمولاً نشان‌دهنده منشأ رسوبی و تبلور سریع است، در حالی که همبستگی منفی اغلب به بازتبلور جایگزینی (Replacement recrystallization) اشاره دارد [31]. برای بررسی ترکیب مواد ساختار منطقه‌ای دولومیت، از

تکنولوژی میکروسکوپ الکترونی بر روی نمونه‌ها استفاده شد و ۲۴ نقطه داده جمع‌آوری گردید (جدول ۳ و شکل ۱۰).

محتوای  $\text{CaO}$  در لبه‌های دولومیت‌های مورد مطالعه سازند آسماری بین ۳۱/۷ تا ۴۵/۶ (میانگین ۳۷/۲۰ درصد) متغیر است.

محتوای  $\text{MgO}$  در لبه‌های دولومیت‌های مورد مطالعه سازند آسماری بین ۱۳/۴ تا ۱۵/۸ (میانگین ۱۴/۴۴ درصد) متغیر است.

محتوای  $\text{CaO}$  در مرکز دولومیت‌های مورد مطالعه سازند آسماری بین ۳۲/۵ تا ۳۶/۷ (میانگین ۳۴/۷۷ درصد) متغیر است.

محتوای  $\text{MgO}$  در مرکز دولومیت‌های مورد مطالعه سازند آسماری بین ۱۳ تا ۱۵/۲ (میانگین ۱۴/۰۶ درصد) متغیر است.

دولومیت ایده‌آل دارای  $\text{CaO}$  در حدود ۳۰/۴۰٪ و  $\text{MgO}$  در حدود ۲۱/۹۰٪ است. نمونه‌های مورد بررسی محتوای  $\text{CaO}$  بالا و  $\text{MgO}$  پایین نشان می‌دهند. محتوای  $\text{CaO}$  در لبه دولومیت‌ها نامتوازن است و اختلاف محتوا آشکار می‌باشد، در حالی که  $\text{CaO}$  در داخل بلورهای دولومیت نسبتاً یکنواخت‌تر است. اختلاف محتوای  $\text{MgO}$  بین لبه و داخل بلورهای دولومیت مورد مطالعه نسبتاً کم است. در نمونه‌های مورد مطالعه، همبستگی منفی بین  $\text{CaO}$  و  $\text{MgO}$  در لبه‌های دولومیت بیشتر از داخل می‌باشد. محتوای  $\text{CaO}$  و  $\text{MgO}$  در داخل بلورهای دولومیت به ترکیب ایده‌آل نزدیک‌تر است. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که دولومیت غنی از کلسیم می‌تواند برای مدت طولانی پایدار بماند و وجود دولومیت آهکی نشان‌دهنده تشکیل در محلولی با نسبت  $\text{Mg/Ca}$  نسبتاً پایین است [32]. دولومیت‌های سازند آسماری دارای کلسیم بالا و منیزیم پایین هستند که نشان‌دهنده منشأ مرتبط با آب‌های جوی است. وجود دولومیت‌های درشت‌بلور در مرز بین نهشته‌های سازند آسماری و گچساران در منطقه مورد مطالعه بیانگر این موضوع است.

### ۵-۴ بحث

#### ۵-۴-۱ تفسیر ژئوشیمیایی محیط رسوبی

در میان نهشته‌های کربناته  $\text{CaO}$ ،  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{Sr}$  به عنوان شاخص‌های مهم تغییرات محیطی عمل می‌کنند [28]. افزایش  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  نشان‌دهنده کاهش سطح آب دریا و افزایش  $\text{Sr}$  و  $\text{CaO}$  نشان‌دهنده افزایش سطح آب دریا می‌باشد [32]. تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی سازند آسماری نشان می‌دهد که  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  معمولاً با وارونگی در رابطه با تغییرات  $\text{CaO}$  و  $\text{Sr}$  قرار دارند. نسبت‌های ژئوشیمیایی مانند  $\text{Mn/Sr}$ ،  $\text{Sr/Ba}$ ،  $\text{Th}$ ،  $\text{V/(V + Ni)}$  نشان می‌دهند که سازند آسماری عمدتاً در یک محیط

دریای درون‌قاره‌ای (Epicontinental sea environment) با ورودی مواد آواری کم (Low terrigenous input)، شوری بالای آب دریا و شرایط اکسیدان نهشته شده است. روند کلی سطح آب دریا در این دوره پس‌رونده (Regressive) بوده است (توالی به سمت بالا کم‌عمق شونده). این شرایط، محیط‌های آب کم‌عمق، اکسیدکننده و با شوری بالا را برای دولومیتی شدن تبخیری هم‌زمان در بخش بالایی توالی مورد مطالعه (در تماس با سازند گچساران) را فراهم کرده است.

### مدل دولومیتی شدن

تشکیل دولومیت در سازند آسماری یک فرآیند پیچیده چند مرحله‌ای بوده که با دولومیتی شدن تبخیری اولیه و سپس دولومیتی شدن توسط آب‌های شیرین جوی و دفنی مشخص می‌شود (شکل ۱۴). این امر منجر به ایجاد دولومیتی شدن با ویژگی‌های ریزساختاری و شیمیایی خاص، از جمله نظم پایین و توزیع ناهمگن عناصر شده است. دولومیت‌های مورد مطالعه دارای Ca بالا و Mg پایین می‌باشند. این مشاهدات نشان‌دهنده تأثیر آب شیرین جوی در طول فرآیند دیاننتیکی اپی‌ژنتیک است. شواهد سنگ‌شناسی و ژئوشیمی عنصری نشان می‌دهد که سیالات آب مخلوط (Mixed-water fluids) نقش مهمی در دولومیتی شدن این سازند ایفا کرده‌اند. تجزیه و تحلیل تغییرات محیط رسوبی و ویژگی‌های سیالات نشان می‌دهد که دولومیتی شدن در منطقه مورد مطالعه طی سه مرحله اصلی رخ داده است:

مرحله ۱: دولومیتی شدن تبخیری اولیه: پس از هر پس‌روی دریا، سازند آسماری عمدتاً در محیط رسوبی فراساحلی قرار داشته است. این محیط با آب و هوای خشک تا نیمه خشک، تبخیری و شوری بالا مشخص می‌شود. آب دریا به عنوان سیال غالب در لایه‌های دولومیتی، اغلب توسط تبخیر یا فعالیت میکروبی تغییر می‌یابد [33]. با تشدید تبخیر  $Ca^{+2}$  فوق اشباع شده و منجر به رسوب  $CaCO_3$  می‌شود. نسبت Mg/Ca در آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. تبخیر هم‌زمان دولومیتی شدن رسوبات کربناته اولیه را تسهیل می‌کند. دولومیت حاصل، شکل بلوری ضعیف و نظم نسبتاً پایینی را نشان می‌دهد. در این مرحله، رفلاکس نفوذی نیز ممکن است رخ دهد.

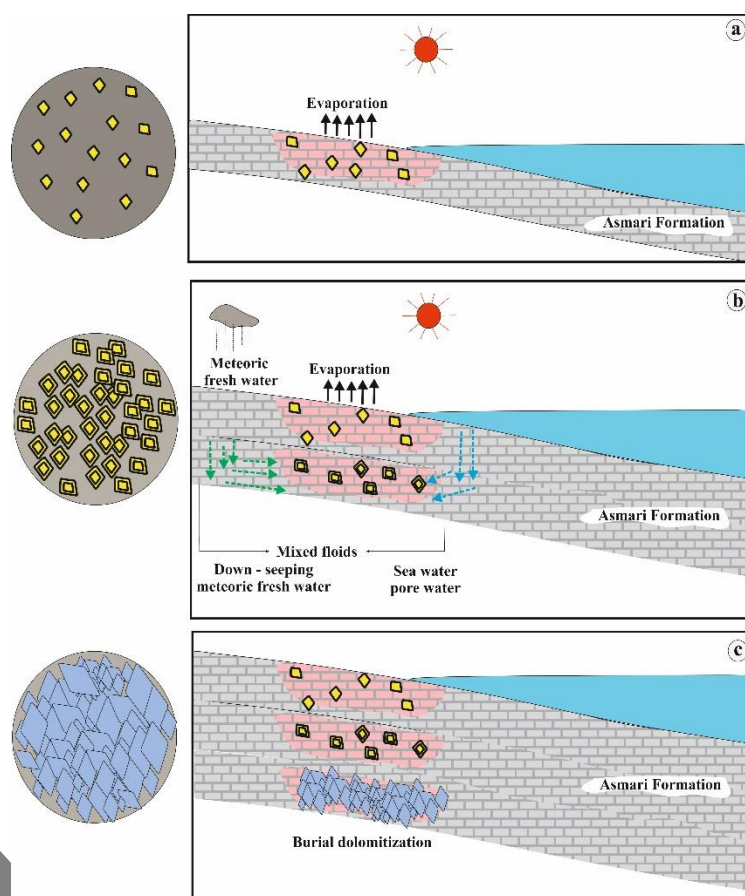
مرحله ۲: دولومیتی شدن با آب مخلوط: تغییرات مداوم سطح دریا و فرآیندهای رسوبی باعث تشکیل رسوبات کربناته جدیدی می‌شود که در نهایت دولومیت‌های از قبل موجود را می‌پوشانند. نفوذ باران جوی، آب زیرزمینی و آب حفره‌ای باقی‌مانده، سیال مخلوطی از آب شیرین و آب دریا را در زیر زمین تولید می‌کند. این سیال مخلوط باعث تغییرات متاسوماتیک و انحلال دولومیت توسط آب شیرین می‌شود. این فرآیند منجر به ایجاد ساختار منطقه‌ای متمایز (شکل ۷)، سیمان‌های کربناته و حفره‌های انحلالی می‌گردد. کانی‌های رسوبی که معمولاً ناپایدارند (مانند ترکیبات آراگونیتی)، با گذشت زمان و تغییرات محیطی به اشکال پایدارتر بازبلور می‌شوند [34].

مرحله ۳: دولومیتی شدن در مرحله دفن: این مرحله شامل تشکیل دولومیت‌های بسیار درشت‌بلور آهن‌دار (شکل ۸) می‌باشد. به دلیل شرایط احیایی در طی دفن عنصر آهن وارد شبکه بلورهای دولومیت شده است. دولومیت‌های تشکیل شده در این مرحله اغلب بسیار درشت‌بلور، زین اسبی (سدل) و پرکننده شکستگی‌ها در طی دفن عمیق می‌باشند.

ویژگی‌های عناصر نادر خاکی و عناصر کمیاب دولومیت‌ها نشان می‌دهد که سیالات درگیر در فرآیند دولومیتی شدن از یک منبع واحد نبوده‌اند. برخی ویژگی‌های ژئوشیمیایی با تأثیر آب‌های مخلوط سازگار است، در حالی که سایر شواهد نشان‌دهنده تأثیر سیالات تدفینی هستند. بر این اساس، دولومیتی شدن سازند آسماری در برش مورد مطالعه حاصل برهم‌کنش سیالات مختلف در مراحل متفاوت دیاژنز تفسیر شده است.

سه مرحله دولومیتی شدن بر اساس شواهد ژئوشیمیایی، ترکیب عناصر اصلی و کمیاب، ویژگی عناصر نادر خاکی و همچنین پارامترهای بافتی و ساختار بلوری دولومیت‌ها تفکیک شده‌اند. شواهد مرتبط با نسبت‌های  $\text{Sr/Ba}$ ،  $\text{Mn/Sr}$ ،  $\text{Th/U}$  و  $\text{V/(V+Ni)}$  و ویژگی‌های بلوری، نقش فرآیند تبخیر را در مرحله اولیه نشان می‌دهند. در مرحله میانی، ویژگی عناصر نادر خاکی و عناصر کمیاب با تأثیر آب‌های مخلوط سازگار است، در حالی که ویژگی‌های ژئوشیمیایی و بافتی برخی دولومیت‌ها نشان‌دهنده دولومیتی شدن تدفینی در مرحله پایانی هستند.

در نهایت می‌توان گفت نتایج مطالعات بافتی و ساختار بلوری با داده‌های ژئوشیمیایی سازگار هستند. تفاوت ترکیب عناصر در مرکز و لبه بلورها، میزان نظم ساختار بلوری و ویژگی‌های بافتی دولومیت‌ها نشان‌دهنده تغییر شرایط تشکیل در طول فرآیند دولومیتی شدن است. این شواهد در کنار داده‌های عناصر اصلی، کمیاب و عناصر نادر خاکی، مدل سه‌مرحله‌ای شامل دولومیتی شدن تبخیری اولیه، دولومیتی شدن توسط آب‌های مخلوط در مرحله میانی و دولومیتی شدن تدفینی در مرحله پایانی را پشتیبانی می‌کنند.



شکل ۱۴- مدل دولومیتی شدن سازند آسماری در منطقه مورد مطالعه

Figure 14: Dolomitization model for the Asmari Formation in the study area.

## ۶- نتیجه گیری

نسبت‌های ژئوشیمیایی مانند  $Mn/Sr$ ,  $Sr/Ba$ ,  $Th$ ,  $V/(V + Ni)$  نشان می‌دهند که سازند آسماری عمدتاً در یک محیط دریایی درون‌قاره‌ای با ورودی مواد آواری کم، شوری بالای آب دریا و شرایط اکسیدان نهشته شده است. روند کلی سطح آب دریا در این دوره پس‌رونده بوده است (توالی به سمت بالا کم‌عمق شونده). این شرایط، محیط‌های آب کم‌عمق، اکسیدکننده و با شوری بالا را برای دولومیتی شدن تبخیری هم‌زمان در بخش بالایی توالی مورد مطالعه در تماس با سازند گچساران را فراهم کرده است. این امر منجر به ایجاد دولومیتی شدن با ویژگی‌های ریزساختاری و شیمیایی خاص، از جمله نظم پایین و توزیع ناهمگن عناصر شده است. دولومیت‌های مورد مطالعه دارای  $Ca$  بالا و  $Mg$  پایین می‌باشند. این مشاهدات نشان‌دهنده تأثیر آب شیرین جوی در طول فرآیند دیاژنتیکی اپی‌ژنتیک

است. شواهد سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی عنصری نشان می‌دهد که سیالات آب مخلوط نقش مهمی در دولومیتی شدن این سازند ایفا کرده‌اند. تجزیه و تحلیل تغییرات محیط رسوبی و ویژگی‌های سیالات دیاژنزی نشان می‌دهد که دولومیتی شدن در منطقه مورد مطالعه طی سه مرحله اصلی دولومیتی شدن تبخیری اولیه، دولومیتی شدن توسط آب‌های شیرین جوی و دولومیتی شدن تدفینی رخ داده است.

#### منابع

- [1] Jinghwa H.S. Siegenthaler C. "Preliminary experiments on hydrodynamic movement induced by evaporation and their bearing on the dolomite problem". *Sedimentology*, 12 (2010) 11–25.
- [2] Roberts J.A. 2024. "The problem with dolomite". *Natural Geoscience*, 17 (2024) 716.
- [3] Machel H.G. 2004. "Concepts and models of dolomitization: A critical reappraisal". *Geological Society Special Publication*, 235 (2004) 7–63
- [4] Zhao W.Z. Shen A.J. Qiao Z.F. Pan L.Y. Hu A.P. Zhang J. 2018. "Genetic types and distinguished characteristics of dolomite and the origin of dolomite reservoirs". *Petroleum Exploration Development*, 45 (2018) 983–997.
- [5] Huang S.G. Hou M.C. Chen A.Q. Xu S.L. Zhang B.J. Deng Y.W. and Yu Y. 2022. "Fluid properties and genesis of dolomites in the devonian Guanwushan Formation of Upper Yangtze Platform, SW China". *Minerals*, 12 (2022) 317.
- [6] Machel H.G. 1986. Mountjoy, E.W. "Chemistry and environments of dolomitization-a reappraisal". *Earth Science Review*, 23 (1986) 175–222.
- [7] Compton J.S. Harris C. and Thompson S. 2001. "Pleistocene dolomite from the Namibian Shelf: High  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values indicate an evaporative, mixed-water origin". *Journal of Sedimentary Research*, 71 (2001) 800–808.
- [8] Rameil N. 2008. "Early diagenetic dolomitization and dedolomitization of Late Jurassic and earliest Cretaceous platform carbonates: A case study from the Jura Mountains (NW Switzerland, E France)". *Sedimentary Geology*, 212 (2008) 70–85.
- [9] Veizer J. and Demovic R. 1974. "Strontium as a tool in facies analysis". *Journal of Sedimentary Research*, 44 (1974) 93–115
- [10] Calvo J.P. Jones B.F. Bustillo M. Fort R. Alonso Zarza A.M. and Kendall C. 1995. "Sedimentology and geochemistry of carbonates from lacustrine sequences in the Madrid Basin, central Spain". *Chem. Geol.* 123 (1995) 173–191
- [11] Vincent B. Rambeau C. Emmanuel L. Loreau J.P. 2006. "Sedimentology and trace element geochemistry of shallow-marine carbonates: An approach to paleoenvironmental analysis along the Pagny-sur-Meuse Section (Upper Jurassic, France)". *Facies*, 52 (2006) 69–84.
- [12] Liu J.Y. and Wang Z.Y., "Crystal structure characterization and X-ray study of dolomite". *Miner. Rocks*, 8 (1998) 28–33.
- [13] Zhong Q.Q. Huang S.J. and Zhou M.L., Tong, H.P.; Huang, K.K.; Zhang, X.H. "Controlling factors of order degree of dolomite in carbonate rocks: A case study from Lower Paleozoic in Tahe Oilfield and Triassic in northeastern Sichuan Basin". *Lithol. Reservoirs*, 21 (2009) 50–55.

- [14] Xiao K. Shi Z.Q. Wu B. Li Z.Y. Duan X., "Electron microprobe analysis of the Permian Sinian Dengying Formation in well Lin-1, southeastern Sichuan: Element concentration changing during the hydrothermal dolomitization". *Bull. Mineral. Petrology Geochemistry*, 36 (2017) 289–298.
- [15] Shabafrooz R. Mahboubi A. Vaziri-Moghaddam H. Moussavi-Harami R. Ghabeishavi A. and Al-Aasm I.S., "Facies analysis and carbonate ramp evolution of Oligo-Miocene Asmari Formation in the Gachsaran and Bibi-Hakimeh oilfields and the nearby Mish Anticline, Zagros Basin, Iran". *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 276 (2017) 121-146.
- [16] Mazzollo S.J., "Geochemical and neomorphic alteration of dolomite: a review". *Carbonates and Evaporites*, 7 (1992) 21–37.
- [17] Sibley D.F. and Gregg J.M., "Classification of dolomite rock textures". *Journal of Sedimentary Petrology*, 57 (1987) 967–975.
- [18] Gregg J.M. and Sibley D.F., "Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture". *Journal of Sedimentary Petrology*, 54 (1984) 908- 931.
- [19] Adabi M.H., "Multistage dolomitization of upper Jurassic Muzdur Formation, Kopet-Dagh basin, N.E. Iran". *Carbonates Evaporites*, 24 (2009) 16-32.
- [20] Adabi M.H. and Rao C.P., "Petrographic, element and isotopic criteria for Central Iran". *Iranian Petroleum Institute*, 15 (1996) 561- 574.
- [21] Blendinger W. Lohmeier S. Bertini A. Meibner E. and Sattler C.D., "A new model for the formation of dolomite in the Triassic dolomites, northern Italy". *Journal of Petroleum Geology*, 38(1) (2015) 5-36. <https://doi.org/10.1111/jpg.12596>.
- [22] Adam J. and Al-Aasm, I.S., "Petrologic and geochemical attributes of calcite cementation, dolomitization and dolomite recrystallization: an example from the Mississippian Pekisko Formation, west-central Alberta". *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 65(2) (2017) 235–261. DOI: 10.2113/gscpgbull.65.2.235.
- [23] Scott M. McLennan B.J. Fryer B.J. and Young G.M., "The geochemistry of the carbonate-rich Espanola Formation (Huronian) with emphasis on the rare earth elements". *Canadian Journal of Earth Science*, 16 (1979) 230–239.
- [24] Marquillas R. Sabino I. Sial A.N. Papa C. Ferreira V. and Matthews S., "Carbon and oxygen isotopes of Maastrichtian–Danian shallow marine carbonates: Yacoraite Formation, northwestern Argentina". *J. S. Am. Earth Sci*, 23 (2007) 304–320.
- [25] Deng H.W. and Qian K., "Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis, 1st ed" Gansu Science and Technology Press: Lanzhou, China; (1993) 28–29.
- [26] Guo Z.G. and Yang Z.S., Fan, D.J.; Li, B.L., "The geochemical characteristics of Ca, Sr, Ba in the surface sediments of the middle continental shelf mud area and its ambient areas in the East China Sea". *J. Ocean Univ. Qingdao*, 28 (1998) 481–488.
- [27] Tian Y. Zhao X.M. Wang L.Z. Tu B. Xie G.G. and Zeng B.F., "Geochemical Characteristics and its paleoenvironmental implication of Permian Qixia Formation in Shizhu, Chongqing". *Acta Sedimentology Sinica*, 32 (2014) 1035–1045.
- [28] Hou E.G. Gao J.H. Wang X.L. Wang G.H. Hu X.R. and Ma Z.C., "Geochemical characteristics and environmental significance of the Upper Triassic Riganpeicuo Formation in Gaize, Tibet". *Bull. Mineral. Petrol. Geochem*, 34 (2015) 556–563.

- [29] Chang H.J. Chu X.L. Feng L.J. Huang J. and Zhang Q.R., "Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies". *Geol. Rev.*, 55 (2009) 91–99.
- [30] Hatch J.R. and Leventhal J.S., "Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) stark shale member of the dennis limestone, Wabaunsee County, Kansas", *U.S.A. Chem. Geol.*, 99 (1992) 65–82.
- [31] Zheng J.F. Shen A.J. Liu Y.F. and Chen Y.Q., "Multi-parameter comprehensive identification of the genesis of Lower Paleozoic dolomite in Tarim basin, China". *Acta Sedimentology Sinica*, 33 (2012) 145–153.
- [32] Krmac M.Z. Akdag K., "Origin of dolomite in the Late Cretaceous Paleocene limestone turbidites, eastern Pontides, Turkey". *Sedimentary Geology*, 181 (2005) 39–57.
- [33] Esmat A.A., "Composition and origin of the dolostones of Um Bogma Formation, Lower Carboniferous, West Central Sinai", *Egypt. Carbonates Evaporites*, 29 (2014) 239–250.
- [34] Wang J.K. Li T.G. Xiong Z.F. Chang F.M. Qin B.B. Wang L.M. and Jia Q., "Sedimentary geochemical characteristics of the redox-sensitive elements in Ross Sea, Antarctica: Implications for paleoceanography". *Mar. Geol. Quaternary Geology*, 38 (2018) 112–121.
- [35] Xiang P.F., "Sedimentary Microfacies and Dolomitization Mechanism of Ordovician Carbonates in the North-Central North China Platform. Ph.D. Thesis", China University of Petroleum, Qingdao, China. (2022).

## **Origin of dolomitizing fluids based on crystal texture and elemental composition (case study: Asmari Formation, North Lurestan)**

### **1- Abstract**

This study focuses on the dolomites of the Asmari Formation and investigates their dolomitization processes. In this regard, a stratigraphic section with a thickness of 87 meters was selected on the northern flank of the Khorramabad anticline and sampled. The CaO content at the edges of dolomite crystals is more heterogeneous compared to the crystal centers, whereas the CaO content in the crystal centers is relatively more homogeneous. The difference in MgO content between the edges and centers of dolomite crystals is relatively small. A negative correlation between MgO and CaO is more pronounced at the crystal edges than at the centers. The MgO and CaO contents at the centers of dolomite crystals are closer to the ideal composition. The studied dolomites are mostly calcium-rich. Analysis of V/(V+Ni), Th/U, Sr/Ba, and Mn/Sr ratios in the carbonates of the Asmari Formation, together with dolomite crystal texture parameters, indicates that dolomite formation was associated with evaporative processes. Furthermore, the rare earth element (REE) characteristics and trace element signatures of the dolomites suggest that the dolomites in this formation resulted from mixing-zone dolomitization and burial dolomitization. The dolomitization model for the Asmari Formation in the studied section occurred in three main stages: evaporative dolomitization during the early stage, mixing-zone dolomitization during the intermediate stage, and burial dolomitization during the late stage.

### **2- Introduction**

The process of dolomite formation, one of the most significant sedimentary mineralization processes, has long been a focal point of Earth sciences research. In contrast to modern carbonate sediments, which consist mainly of calcite and aragonite, dolomite—although rare at surface temperatures below 80°C and forming at low rates—is abundantly found in ancient marine carbonate sequences (Jinghwa and Siegenthaler 2010; Roberts 2024). Various models have been proposed for the diagenesis and mechanisms of dolomitization, including:

seepage-reflux dolomitization, capillary-concentration dolomitization, sabkha dolomitization, mixing-zone dolomitization, recrystallization dolomitization, burial dolomitization, thermal convection of seawater dolomitization, and hydrothermal dolomitization controlled by tectonic structures (Zhao et al. 2018). Each of these models reflects specific geological conditions during either syn-depositional or post-burial processes; however, a standardized classification based on diagenetic models is still lacking (Huang et al. 2022). Geochemical methods have become fundamental tools in recent years for investigating the origin and formation mechanisms of dolomite (Compton et al. 2001; Rameil 2008). Sedimentary geochemistry, through the analysis of elemental concentrations and dolomite mineralogy, contributes to understanding its origin, depositional environment characteristics, and rock evolution processes (Veizer and Demovic 1974; Calvo et al. 1995; Vincent et al. 2006). Parameters related to dolomite crystal structure, such as degree of ordering and cell dimensions, are microscopic indicators for studying the environment and formation mechanisms of dolomite (Liu and Wang 1998; Zhong et al. 2009). Furthermore, electron microprobe analysis, utilizing advanced microanalytical technologies, can precisely determine concentric-zonal structures and trace element distributions within dolomite crystals. These data enable the reconstruction of the multi-stage history of diagenetic fluids and provide direct evidence in this regard (Xiao et al. 2017). This study investigates the changes in depositional environment, the geochemical characteristics of dolomitizing fluids, and the origin of dolomite in the Asmari Formation within the Lorestan sedimentary basin.

### 3- Materials & Methods

The present research is based on observations using polarized light microscopy and scanning electron microscopy (SEM), measurements of major and trace elements, analysis of dolomite crystal structure, and EDX, XRF, and ICP-MS data. The results of this study play an important role in understanding the origin of dolomitizing fluids during the Oligo-Miocene in the Lorestan sedimentary basin. In this study, 87 samples were collected from the carbonates of the Asmari Formation in the studied section, from which petrographic thin sections were prepared. The thin sections were studied and imaged using an Olympus-BH2 polarizing microscope at the University of Gonabad. A total of 6 samples of the Asmari Formation carbonates were analyzed by XRF and ICP-MS (the analyses were carried out at the Zar Azma Company laboratory in Tehran). On the studied dolomites, 24 points from the crystal edges and centers were analyzed by EDX (electron microprobe analysis), and scanning electron microscope (SEM) images were also obtained from them (EDX analysis and electron imaging were carried out at Lorestan University).

### 4- Discussion of Results & Conclusions

Four types of dolomite have been identified in the Asmari Formation deposits within the studied section. These include: finely crystalline dolomites (dolomicrite), medium-crystalline dolomites (dolomicrosparte), coarse-crystalline, zoned dolomites (dolosparite), and coarse-crystalline dolomites filling fractures. The concentrations of Ca and Mg were measured by EDX as spot analyses on fine and coarse dolomite crystals. In this method, the margins (edges) and centers of dolomite crystals were analyzed as spot measurements. The Mn/Sr ratio increases in the upper sequences of the Asmari Formation. This increase is likely due to the involvement of meteoric freshwater in the dolomitization process in contact with the Gachsaran Formation. Analysis of Sr/Ba and Mn/Ti indices for the Asmari Formation shows that the samples from this formation in the study area have Sr/Ba values ranging from 3.72 to 14.76 (average 8.25%), which is significantly above the threshold for a saline environment. The Mn/Ti values range from 0.16 to 1.70 (average 0.66%), which falls within the range of offshore marine sedimentation. Based on these distinguishing indices, the Asmari Formation was deposited in a relatively offshore marginal sea with moderate to high salinity characteristics. The V/V+Ni ratio in the Asmari Formation deposits ranges from 0.15 to 0.62 (mean 0.33). The Th/U ratio in the Asmari Formation deposits varies between 0.23 and 3.63 (mean 1.69). A comprehensive evaluation of the redox proxies indicates that the Asmari Formation was deposited in an oxic environment. This points to a decreasing trend in water depth within the depositional water body, transitioning from a shallow marine setting towards coastal areas. Geochemical ratios such as V/(V+Ni), Th, Sr/Ba, and Mn/Sr indicate that the Asmari

Formation was primarily deposited in an epicontinental sea environment with low terrigenous input, high seawater salinity, and oxic conditions. The overall sea-level trend during this period was regressive (shallowing-upward succession). These conditions provided shallow, oxidizing, high-salinity environments for evaporative syndepositional dolomitization in the upper part of the studied succession (in contact with the Gachsaran Formation). The studied dolomites are characterized by high Ca and low Mg contents. These observations indicate the influence of meteoric freshwater during the epigenetic diagenetic process. Petrographic and elemental geochemical evidence suggest that mixed-water fluids played a significant role in the dolomitization of this formation. Analysis of depositional environment changes and diagenetic fluid characteristics reveals that dolomitization in the study area occurred during three main stages: early evaporitic dolomitization, meteoric freshwater dolomitization, and burial dolomitization.

**Keywords: Dolomite model, Asmari Formation, Zagros, Lorestan**