



Evidence of hybrid dolomites in the deposits of the Gachsaran Formation (Middle Miocene) in the Afrineh Anticline, southwest of Khorramabad

Samira Taghdisi Nikbakht^{1*}, Yaghub Nasiri² and Mostafa Sedaqhat Nia³

1, 2- Assist. Prof., Dept. of Geology, Faculty of Sciences, University of Gonabad, Gonabad, Iran

3- Ph.D. Student, Dept. of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ARTICLE INFO

Article type:

Original Research

Article history:

Received: 2025 March 8

Accepted: 2025 May 25

Keywords:

Gachsaran Formation

Dolomite

Khorram Abad

Lorestan

Zagros

ABSTRACT

In this research, a cross-section of the Gachsaran Formation in the Afrineh syncline (south of Lorestan) has been selected and sampled to understand the dolomitization model of this formation. This section, with a thickness of 380 meters, is located in 46 kilometers southwest of Khorram Abad and in the Zagros folded zone. The Gachsaran Formation in the studied area is situated on the Asmari carbonate Formation and is covered by the red clastics of the Aghajari Formation as a discontinuity. In this section, petrographic studies on 100 thin sections and geochemical studies on 17 samples show the significant diagenetic processes in the Gachsaran Formation, such as the extensive dissolution and dolomitization. In this section, four groups of dolomites were identified: microcrystalline dolomites (first type), medium crystal (second type), coarse crystal (third type), and very coarse-crystalline dolomites filling fractures (fourth type, Baroque). The dolomitization mechanism is considered to be the tidal environment for the first-type dolomites, the mixing zone of saline and fresh water for the second- and third-type dolomites, and the burial model for the fourth-type dolomites. The presence of extensive mold porosity, fresh water calcite cement equant, fresh water vadose environment cements, regular and bright sugar grain dolomites, as well as medium crystal dolomites (dolomicrosparites) during shallow burial are evidence of a mixed type dolomitization model in Gachsaran Formation deposits. Evidence such as the preservation of primary sedimentary textures, including intraclasts, algal laminae, and fenestral fabric, the absence of fossils and evaporite minerals, and a high concentration of Sr and Mg elements indicate the formation of type 1 dolomites in a tidal environment. Additionally, coarse-grained dolomites with a high concentration of Fe and Mn and decreasing amounts of Sr and Mg indicate the formation of these dolomites during burial diagenesis.

DOI: 10.22084/psj.2025.30619.1465

Corresponding author: Samira Taghdisi Nikbakht, **E-mail:** samirataghdisi@gmail.com

Cite this article: Samira Taghdisi Nikbakht, Yaghub Nasiri and Mostafa Sedaqhat Nia (2026). Evidence of hybrid dolomites in the deposits of the Gachsaran Formation (Middle Miocene) in the Afrineh Anticline, southwest of Khorramabad, Applied Sedimentology, Vol. 14, No. 27, pp: 1-26.



Journal of Applied Sedimentology by Bu-Ali Sina University Press is licensed under CC BY-NC 4.0

Web Site: <https://psj.basu.ac.ir> **E-mail:** nfag@basu.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

The mixed dolomitization model typically develops near the surface in carbonate rocks not associated with evaporites. In this model, the mixing of meteoric groundwater with up to 30% seawater causes the solution to become undersaturated with respect to calcite but supersaturated with respect to dolomite. Therefore, dolomitization is predicted for areas where seawater and meteoric water are mixed, where the salinity decreases, but a relatively stable Mg/Ca ratio. In this model, Mg^{+2} is derived from seawater and groundwater movement pumps dolomite-forming fluids into the limestone. One of the notable characteristics of the Gachsaran Formation is its function as a cap rock over carbonate reservoirs, which has led to numerous studies focusing on its role in oil-bearing regions in southern Iran. The aim of this study is to investigate the dolomitization model of the Gachsaran Formation in the Afrineh syncline. Since hybrid dolomites are formed in evaporative environments near the earth's surface where highly saline brines are in contact with fresh continental waters, it is predicted that the formation of hybrid dolomites in the Gachsaran Formation is not far-fetched given the depositional environment.

The studied section is in the Afrineh syncline, 46 km southwest of Khorram Abad city at coordinates 33°14'15"E and 47°52'8"N. This section is located within the Afrineh city, on the Khorramabad-Andimeshk freeway. Following the Asmari Formation, the Gachsaran Formation extends into the depression zones of Dezful, Lorestan, northern Iraq, southeastern Turkey, northeastern Syria, and toward the southern basin of the Persian Gulf. In the eastern Fars region, this formation changes facies into Mol, Chehel, and Champeh, while in adjacent Zagros thrust areas, it becomes the Razak and this phenomenon is also seen to the northeast of Iraq. Considering all the properties of the formations after the Asmari, this entire sequence indicates a general regression phase with a smaller progradation phase during the time of the Mishan Formation. All post-Asmari sediments can be described during different stages of Zagros orogeny. Whereas the Gachsaran Formation and its equivalents were deposited in sabkha, lagoonal,

continental, and semi-continental settings, the Mishan Formation represents a relative marine transgression. Simultaneously with the deposition of the Mishan in the Dezful embayment and more southern areas, the continental sediments of Aghajari were deposited in environments such as meandering rivers, floodplains and deltas in more northern areas, such as Lorestan and the areas north of that embayment.

Materials and methods

In this study, a combination of field studies, petrography, and geochemical methods, such as major and minor elements, has been used to understand the dolomitization model of the Gachsaran Formation. The first stage involved fieldwork to investigate the stratigraphic section, measure thicknesses, and collect representative samples across the entire 380-meter sequence. In total, 100 samples were collected from carbonate intervals. The second stage focused on preparation and petrographic examination of thin sections. These thin sections were prepared and analyzed using an Olympus-BH2 polarizing microscope at Gonabad University. Detailed descriptions and microfacies analyses were conducted to characterize the dolomite textures and diagenetic features. The third stage includes geochemical studies that have been carried out on the major and minor elements of the dolomites of the studied section. At this stage, 17 rock samples were selected from the collected samples, and 15 grams of their micritic parts, free from any contamination, weathering, fractures, veins, joints, cracks, and fossils, were separated with a dental drill, and after pulverizing and homogenizing them in a planetary mill, they were subjected to elemental analysis using the EDX (Energy Dispersive X-ray) method. The samples were subjected to elemental analysis (EDX) in the Central Laboratory No. 1 of Lorestan University. The major elements (Ca, Mg) were measured in percent and the elements (Sr, Mn, Fe, Na) in ppm. The accuracy of the analyses was 0.5 percent for the major elements and ± 5 ppm for the minor elements. Geochemical data diagrams were drawn using Excel 2012 software. At this stage, scanning electron microscopy (SEM) imaging of the studied dolomites was also performed. Thin sections were stained using the Dickson (1965) method with Alizarin Red

(ARS) solution to distinguish calcite minerals from dolomite and potassium ferrocyanide solution to distinguish iron-bearing dolomites.

Discussion

The dolomites identified in the studied samples are divided into two groups: primary and secondary dolomites. The first type of dolomite (D1) is considered primary dolomite and the other dolomites (D2, D3, D4) are considered secondary dolomite. 17 samples of EDX analysis have been carried out from the studied cut dolomites.

In general, four types of dolomites were recognized in the Gachsaran Formation as primary dolomites (dolomicrites) and secondary dolomites (dolomicrosparites, dolosparites, and very large-crystal dolomites filling cavities and fractures). Considering the fabric and very small size of dolomite crystals, the preservation of primary sedimentary textures, such as intraclasts, algal laminae, and fenestral fabric, the absence of fossils and evaporite minerals, and the lack of evidence indicating their formation under the influence of late diagenetic processes, it seems that the first type of dolomites (dolomicrites) formed under surface conditions, low temperatures, and in an intertidal environment. It seems that for the initial dolomitization or simultaneously with sedimentation, the only source of magnesium is seawater. This origin is considered only for type 1 dolomites, which were formed near the surface under low temperature conditions in a tidal zone, probably by seawater pumping into this zone. From the elemental geochemical evidence, primary dolomites have a higher concentration of strontium (Sr) than secondary dolomites, which is due to changes in the dolomite crystal fabric. Primary dolomites also have a higher concentration of sodium (Na) and magnesium (Mg) than secondary dolomites. The second type (D2) and third type (D3) dolomites are related to the mixed zone of seawater and atmospheric water. The presence of extensive cast porosity, freshwater equant calcite cements, and fresh water vadose environment cements, regular and bright granulated dolomites, and also medium-crystalline dolomites (dolomicrosparites) during shallow burial are evidence of the mixed-type dolomitization model in the deposits of the Gachsaran Formation. This model is related to

dolomicrosparites and dolosparites. In this model, the dolomite-forming fluids result from the mixing of seawater with subsurface atmospheric waters. Atmospheric groundwater saturated with CO_2 is mixed with seawater, and the resulting solution is unsaturated from the perspective of CaCO_3 and supersaturated from the perspective of dolomite. In the identification of mixed zone dolomites, according to the textures and lithological structures, we can mention the widespread dissolution and formation of cast porosity in the greenstone aide facies, the formation of freshwater isodimensional calcite cement and special cements of the vadose environment, and the formation of dolomites in the grainstone facies. The mixed saline-freshwater dolomitization model (hybrid model) takes place near the surface and in carbonate rocks that are not accompanied by evaporites. The mixing of meteoric groundwater with a maximum of 30% seawater causes the solution to be undersaturated with respect to the calcite phase, but the saturation increases for the dolomite phase. Therefore, dolomitization is predicted for areas where seawater is mixed with meteoric water, where the salinity decreases but the Mg/Ca ratio remains constant. In this model, Mg^{+2} are derived from seawater, and groundwater movement pumps dolomite-forming fluids into the limestones, causing the formation of mixed-zone dolomites. The dolomitization model of dolomicrosparites and sucrosic dolomites is attributed to this model. The main source of magnesium in this model is seawater. From the elemental geochemical evidence, secondary dolomites have a higher concentration of iron (Fe) and manganese (Mn) than primary dolomites, which is due to the reduction (burial) conditions for secondary dolomites. Also, in secondary dolomites, the concentration of strontium (Sr) and magnesium (Mg) elements is lower than in primary dolomites. It seems that the fourth type dolomites (D4) are the last generation of dolomites that have formed in the samples of the Gachsaran Formation and have filled the porosity resulting from fractures as dolomite cement. A typical example of this type of dolomites is the saddle type (baroque) that shows non-planar texture, curved surfaces and cleavage, and wave extinction, indicating their formation at temperatures above 60°C . In

some cases, cavity-filling dolomite cements that form at temperatures above the critical limit can locally form mosaic-shaped crystals with flat boundaries. The fourth type dolomites are attributed to the burial diagenesis model. This type of dolomite is the last generation of dolomites formed in the Gachsaran Formation and due to their formation under reduced conditions; they have higher amounts of iron (Fe) and manganese (Mn) in their crystal lattice than other dolomites. Finally, according to petrographic and geochemical evidence, the dolomites of the Gachsaran Formation can be considered from the tidal, mixed and then shallow to medium and deep burial model.

Conclusion

Based on petrographic evidence and elemental analysis of samples from a section of the Gachsaran Formation in Afrineh syncline, four groups of dolomites were identified (fine-crystalline dolomites (type I), medium-crystalline dolomites (type II), coarse-crystalline dolomites (type III), and very coarse-crystalline baroque fracture-filling dolomites (type IV). The dolomitization mechanism for type I dolomites is considered to be a tidal environment, type II and type III dolomites are considered to be a mixed zone of seawater and freshwater, and type IV

dolomites are considered to be a burial model. The presence of extensive moldic porosity, freshwater equant calcite cements, freshwater vadose environment cements, regular and bright sucrosic dolomites, and also medium-crystalline dolomites (dolomicrosparites) during shallow burial are evidence of a mixed-type dolomitization model in the deposits of the Gachsaran Formation. The preservation of primary sedimentary textures, such as intraclasts, algal laminae and fenestral fabric, the absence of fossils and evaporite minerals, the high concentration of Sr and Mg elements and the decrease in the concentration of Fe and Mn elements indicate the formation of first-type dolomites in the tidal environment. The coarse-crystalline dolomites with high concentrations of Fe and Mn and the decrease in the amounts of Sr and Mg in them indicate the formation of these dolomites during burial diagenesis and reduction conditions, such that they appear turquoise blue after staining with alizarin red and potassium ferrocyanide. This group of dolomites (coarse-crystalline baroque type) is the last generation of dolomites that formed in the Gachsaran Formation in the study area.



شواهدی از دولومیت‌های دورگ در نهشته‌های سازند گچساران (میوسن میانی) در ناودیس افرینه، جنوب باختر خرم‌آباد

سمیرا تقدیسی نیک‌بخت^{۱*}، یعقوب نصیری^۲ و مصطفی صداقت‌نیا^۳

۱ و ۲- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران
۳- دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۴ کلیدواژه‌ها: سازند گچساران دولومیت خرم‌آباد لرستان زاگرس	در این مطالعه به منظور درک مدل دولومیتی شدن سازند گچساران در جنوب لرستان یک برش سطح‌الارضی از این سازند در ناودیس افرینه (جنوب‌باختر خرم‌آباد) مطالعه شده‌است. این برش با ضخامت ۳۸۰ متر در ۴۶ کیلومتری جنوب باختری خرم‌آباد و در زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد. در این ناحیه سازند گچساران به صورت هم‌شیب روی کربنات‌های سازند آسماری قرار گرفته و با ناپیوستگی هم‌شیب توسط آواری‌های قرمز رنگ سازند آغاچاری پوشانده شده‌است. مطالعات پتروگرافی بر روی ۱۰۰ نمونه مقطع نازک و مطالعات زمین‌شیمی تعداد ۱۷ نمونه از برش مورد نظر حاکی از وقوع فرآیندهای دیاژنتیکی قابل توجه از جمله انحلال گسترده و دولومیتی‌شدن در سازند گچساران است. در این برش چهار گروه از دولومیت‌ها شناسایی شدند: دولومیت‌های ریزبلور (نوع اول)، متوسط‌بلور (نوع دوم)، درشت‌بلور (نوع سوم) و خیلی درشت‌بلور پرکننده شکستگی‌ها (نوع چهارم). مکانیسم دولومیتی شدن برای دولومیت‌های نوع اول به محیط جزرومدی، دولومیت‌های نوع دوم و سوم پهنه مخلوط آب شور و آب شیرین و دولومیت‌های نوع چهارم مدل تدفینی در نظر گرفته می‌شود. وجود تخلخل قالبی گسترده، سیمان‌های کلسیت هم‌بعد آب‌شیرین، سیمان‌های محیط وادوز آب‌شیرین، دولومیت‌های دانه‌شکری منظم و روشن و همچنین دولومیت‌های متوسط‌بلور (دولومیکرواسپارایت‌ها) طی تدفین کم‌عمق از شواهد مدل دولومیتی‌شدن نوع مخلوط در نهشته‌های سازند گچساران می‌باشند. شواهدی مانند حفظ بافت‌های اولیه رسوبی، نظیر اینتراکلسیت‌ها، لامینه‌های جلبکی و فابریک فنسترال، عدم فسیل و کانی‌های تبخیری، تمرکز بالایی از عناصر Sr و Mg بیانگر تشکیل دولومیت‌های نوع اول در محیط جزرومدی است. همچنین دولومیت‌های درشت‌بلور با تمرکز بالایی از Fe و Mn و کاهش مقادیر Sr و Mg در آن‌ها بیانگر تشکیل این دولومیت‌ها در طی دیاژنز تدفینی می‌باشد.

DOI: 10.22084/psj.2025.30619.1465

* نویسنده مسئول: سمیرا تقدیسی نیک‌بخت، E-mail: samirataghdisi@gmail.com

استناد: سمیرا تقدیسی نیک‌بخت، یعقوب نصیری و مصطفی صداقت‌نیا (۱۴۰۵). شواهدی از دولومیت‌های دورگ در نهشته‌های سازند گچساران (میوسن میانی) در ناودیس افرینه، جنوب باختر خرم‌آباد، رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۱۴، شماره ۲۷، صفحه ۱ تا ۲۶.

این نشریه علمی رایگان است و حق مالکیت فکری خود را براساس لایسنس کرییتیو کامنز (CC BY-NC 4.0) به نویسندگان واگذار کرده است.



آدرس وبسایت نشریه: <https://psj.basu.ac.ir> | ایمیل نشریه: nfag@basu.ac.ir

۱- پیشگفتار

سازند گچساران به عنوان پوش‌سنگ مخازن نفتی آسماری، نخستین سازند گروه فارس (میوسن - پلیوسن) است که در مناطق فروافتادگی دزفول - لرستان تا خلیج فارس گسترش دارد. مرز پایینی سازند گچساران در حوالی جزیره‌ی قشم به الیگوسن و شاید انوسن برسد ولی در نواحی شمالی سن بوردیگالین (میوسن پیشین) دارد. در ناحیه فارس، این سازند به بخش‌های چهل، چمپه و مول تغییر رخساره می‌دهد ولی در نواحی مجاور راندگی زاگرس، به سازند رازک تبدیل می‌شود. از نگاه مهندسی، سازند تبخیری گچساران یک واحد سنگی با رفتار شکل‌پذیر است، به همین رو، در سطح زمین برش کامل ندارد و برش تلفیقی چاه‌های میدان گچساران به عنوان برش الگو (غیررسمی) دانسته شده که ۷ عضو و ۱۶۰۰ متر ستبراً دارد. سنگ نمک، انیدریت، مارن‌های رنگارنگ، سنگ‌آهک و مقداری شیل بیتومین دار، بدون نظم چین‌های، واحدهای اصلی سازند گچساران هستند (آقاباتی، ۱۳۸۵). سازند گچساران اولین سازند از گروه فارس است که در چرخه رسوبی فارس شکل گرفته است. این چرخه رسوبی یک واحد زمین‌ساختی - چین‌شناختی همزمان با کوهزایی آلپ است که در یک دریای پسرونده به سمت جنوب باختری نهشته شده و تغییرات سنی آن از الیگوسن تا پلیوسن است. به همین رو این چرخه، در برگرنده سازندهای گروه فارس (گچساران، میشان و آغاجاری) و سازند کنگلومرای بختیاری است که نشانگر یک فاز پسروری است. ضخامت تقریبی ردیف‌های مورد نظر، در لرستان و سکوی فارس ۳۰۰۰ متر است ولی در فروافتادگی دزفول و پس خشکی بندرعباس تقریباً ۶۰۰۰ متر ضخامت دارد (آقاباتی، ۱۳۸۵). دولومیت‌ها به طور کلی به دو صورت اولیه و ثانویه تشکیل می‌شوند که نوع ثانویه آن یا بدون فاصله پس از ته‌نشینی و یا مدتی پس از رسوب‌گذاری تشکیل می‌شود. دولومیت اولیه به طور مستقیم از آب دریا رسوب می‌کند. در میان کانی‌های دیاژنتیکی، دولومیت یک کانی پیچیده می‌باشد که تحت تأثیر چندین فرآیند دیاژنتزی بوده و این فرآیندها طی چند مرحله صورت می‌گیرند (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ هو و همکاران، ۲۰۱۰؛ ژاو و همکاران، ۲۰۱۲؛ پینا و همکاران، ۲۰۲۲؛ لی و همکاران، ۲۰۲۴؛ بی‌بی و همکاران، ۲۰۲۵؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۵؛ نی و همکاران، ۲۰۲۵). امروزه با اضافه کردن داده‌های

ژئوشیمیایی به داده‌های پتروگرافی می‌توان درک بهتری از منشأ، زمان تشکیل، ترکیب سیالات دولومیت‌ساز، مدل دولومیتی‌شدن و روند دیاژنتز فراهم نمود (ازمی و همکاران، ۲۰۰۱؛ آزومانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ کالن، ۲۰۱۶). با استفاده از روش‌های گوناگون سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی، امروزه شناخت نسبتاً کاملی از تبدیل رسوبات آهکی به سنگ‌های کربناته وجود دارد که این تغییر و تبدیل رسوبات کربناته می‌تواند در سه قلمرو دیاژنتزی دریایی، متئوریک و دفنی رخ دهد (بترست، ۱۹۷۵؛ چوکت و جیمز، ۱۹۹۰؛ تاکر و رایت، ۱۹۹۰؛ جیمز و جونز، ۲۰۱۵؛ اسدی و همکاران، ۲۰۱۶؛ بارگومانو و همکاران، ۲۰۲۰؛ لی و همکاران، ۲۰۲۴؛ بی‌بی و همکاران، ۲۰۲۵؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۵؛ نی و همکاران، ۲۰۲۵). تأثیر فرایندهای دیاژنتزی پس از ته‌نشینی رسوبات موجب تغییر ویژگی‌های اولیه از لحاظ سنگ‌نگاری و ژئوشیمی می‌شود، بررسی شدت و ضعف تأثیرات دیاژنتیکی بر روی رسوبات به آگاهی بیشتر از شرایط اولیه حاکم بر محیط رسوبی منجر می‌شود. از نگاه دیگر نیز تغییرات ایجاد شده در طی فرایندهای دیاژنتزی می‌تواند سبب ایجاد ویژگی‌ها و پتانسیل‌های جدیدی در رسوبات گردد. در پژوهش حاضر به پتروگرافی و زمین‌شیمی عنصری سازند گچساران و مدل دولومیتی‌شدن آن در یک برش سطح‌الارضی پرداخته شده که امید است نتایج این پژوهش بتواند در راستای انطباق هر چه بهتر این سازند بین بخش‌های مختلف حوضه رسوبی لرستان مفید واقع شود و در نهایت بتوان تصویر آشکارتری از بازسازی جغرافیای دیرینه زمان میوسن در حوضه رسوبی زاگرس و تاریخچه‌ی پس از رسوب‌گذاری این سازند ارائه داد. مدل دولومیتی‌شدن مخلوط (دورگ) در نزدیکی سطح و در سنگ‌های کربناته که با تبخیری‌ها همراه نیستند شکل می‌گیرد. مخلوط شدن آب‌های زیرزمینی متئوریک با حداکثر ۳۰ درصد آب دریا سبب تحت اشباع شدن محلول نسبت به کلسیت شده ولی برای دولومیت اشباع‌شدگی افزایش می‌یابد. بنابراین دولومیتی‌شدن برای مناطق مخلوط آب دریا با آب متئوریک، جایی که درجه شوری کاهش می‌یابد، ولیکن نسبت Mg/Ca ثابت می‌ماند پیش‌بینی می‌شود (بدیع‌الزمانی، ۱۹۷۳). در این مدل Mg^{+2} از آب دریا مشتق می‌شود و حرکت آب زیرزمینی، سیال‌های سازنده‌ی دولومیت را به داخل سنگ‌های آهکی پمپاژ می‌کند. یکی از ویژگی‌های مهم سازند گچساران

خصوصیات پوش‌سنگ بودن آن برای مخازن کربناته می‌باشد، لذا بیشتر مطالعات صورت گرفته بر روی سازند گچساران به مناطق نفت خیز جنوب معطوف می‌باشد. از جمله مطالعات محدود صورت گرفته بر روی سازند گچساران در منطقه مورد مطالعه و حوضه رسوبی لرستان می‌توان به مورد زیر اشاره کرد: تقدیسی نیک‌بخت و همکاران (۱۴۰۳)، پتروگرافی و کانی‌شناسی اولیه واحدهای سازند گچساران را بر مبنای زمین‌شیمی عنصری در منطقه مورد مطالعه بررسی کرده‌اند. در این مطالعه سیستم دیاژنزی واحدهای کربناته-تبخیری سازند گچساران را غالباً بسته تا نیمه‌باز با تبادل آب به سنگ پایین در نظر گرفته‌اند. مطالعات صورت گرفته بر روی سازند گچساران در سایر مناطق مجاور نظیر میدان‌های نفتی نشان می‌دهد که رخساره‌های دولومیتی در این سازند قابل توجه بوده و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعات لیاقت و همکاران (۱۳۹۹) اشاره کرد. مطالعه سنگ‌رخساره‌ها و محیط رسوبی سازند گچساران در باختر بندرعباس (برش کوه نمکی خمیر) توسط سالاری سرگرو و رضایی (۱۳۹۴) حاکی از تشکیل دولومیت‌ها در این سازند می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی مدل دولومیتی شدن سازند گچساران در ناودیس افرینه می‌باشد. از آنجایی که دولومیت‌های نوع دورگ در محیط‌های تبخیری نزدیک سطح زمین جایی که شورابه‌های خیلی شور در تماس با آب‌های شیرین قاره‌ای هستند، لذا پیش‌بینی می‌شود با توجه به محیط رسوبگذاری سازند گچساران تشکیل دولومیت‌های نوع دورگ در آن دور از انتظار نباشد.

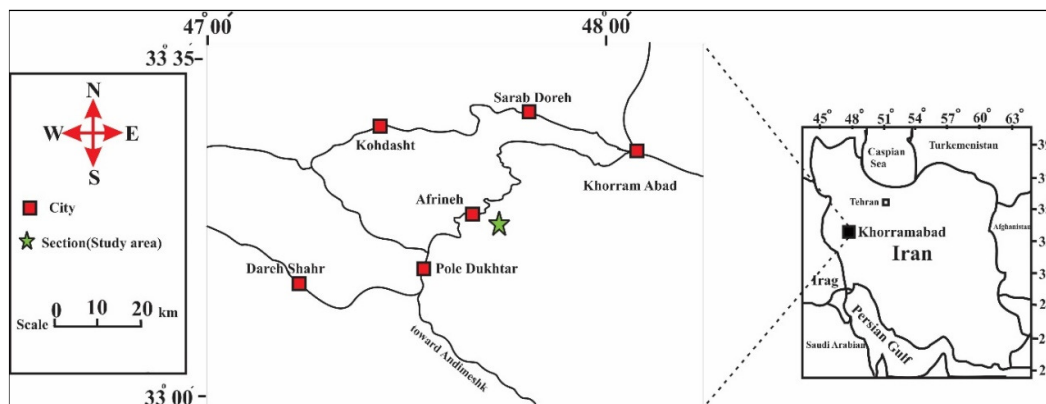
۲- موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی و چینه‌شناسی ناحیه مورد مطالعه

برش مورد مطالعه در ناودیس افرینه، ۴۶ کیلومتری جنوب غرب شهرستان خرم‌آباد با مختصات جغرافیایی ۳۳ درجه و ۱۴ دقیقه و ۱۵ ثانیه طول شرقی و ۴۷ درجه و ۵۲ دقیقه و ۸ ثانیه عرض شمالی می‌باشد. این برش در محدوده شهرستان افرینه، در مسیر آزاد راه خرم‌آباد - اندیمشک واقع شده‌اند. موقعیت این برش به همراه راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است (شکل ۱). ناودیس افرینه یکی از بزرگ‌ترین و وسیع‌ترین ناودیس‌های حوضه رسوبی لرستان می‌باشد که دارای ۳۱ کیلومتر طول و ۵ کیلومتر عرض می‌باشد (مطیعی، ۱۳۸۲؛ امامی،

۲۰۰۸). این ناودیس بین دو تاقدیس امیران (در شمال شرق) و تاقدیس سرکان (در جنوب غرب) واقع شده است (شکل ۲). سازندهای آسماری، گچساران و آغاچاری در ناودیس افرینه رخنمون دارند. سازند میشان در این بخش از حوضه رسوبی لرستان مشاهده نشده و سازند آغاچاری مستقیماً بر روی سازند گچساران قرار گرفته است (شکل‌های ۳ و ۴). سازند گچساران در رشته کوه‌های زاگرس ضخامتی بالغ بر ۲۰۰۰ متر دارد (گیل و آلا، ۱۹۸۷۲؛ آگارد و همکاران، ۲۰۱۱؛ ورجس و همکاران، ۲۰۱۹). از نظر سنگ‌شناسی، سازند تبخیری گچساران در زیر محیط‌های یک رمپ کربناته (پهنه‌های سبخایی، جزرومدی، لاگون، سدی و دریای باز) نهشته شده است که این نهشته‌ها تحت شرایط محصور تا نیمه‌محصور رسوبگذاری نموده و در این زیرمحیط‌ها تناوبی از ژئیس، انیدریت، مارن و سنگ‌های کربناته دیده می‌شود (گیل و آلا، ۱۹۷۲). محیط رسوبی سازند گچساران در منطقه مورد مطالعه به پهنه‌های سبخایی، جزرومدی، لاگون، سدی و دریای باز تحت شرایط محصور تا نیمه‌محصور نسبت داده می‌شود (مغفوری‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۰). از نظر سنی سازند گچساران محدوده‌ای از زمان الیگوسن - میوسن (بهرودی و کویی، ۲۰۰۴؛ پیروز و همکاران، ۲۰۱۵) تا میوسن زیرین - میانی (جونز و ریس، ۱۹۹۴) می‌باشد. اولین سازند پس از سازند آسماری، سازند گچساران است که در مناطق فروافتادگی دزفول، لرستان؛ شمال عراق، جنوب خاوری ترکیه، شمال خاوری سوریه و تا حوضه جنوبی خلیج فارس تداوم دارد. این سازند در ناحیه خاور فارس به بخش‌های مول، چهل و چمپه تغییر رخساره می‌دهد ولی در نواحی مجاور، رواندگی زاگرس تبدیل به سازند رازک شده و این پدیده تا شمال خاوری عراق نیز دیده می‌شود (امیری‌بختیار و نورایی‌نژاد، ۲۰۲۲). با توجه به جمیع خواص سازندهای بعد از آسماری، تمامی این ردیف مبین یک فاز پسروری عمومی به همراه یک فاز کوچک‌تر پیشروی در زمان سازند میشان است. کلیه رسوبات بعد از آسماری را می‌توان در حین مراحل مختلف کوهزایی زاگرس توصیف نمود. چنانچه بعد از رسوبات دریایی آسماری، سازند گچساران و هم‌ارزش‌هایش در شرایط سبخایی، کولابی، قاره‌ای و شبه قاره‌ای ته‌نشین شده‌اند ولی سازند میشان معرف یک پیشروی نسبی است. همزمان با رسوبگذاری میشان در فروافتادگی دزفول و نواحی

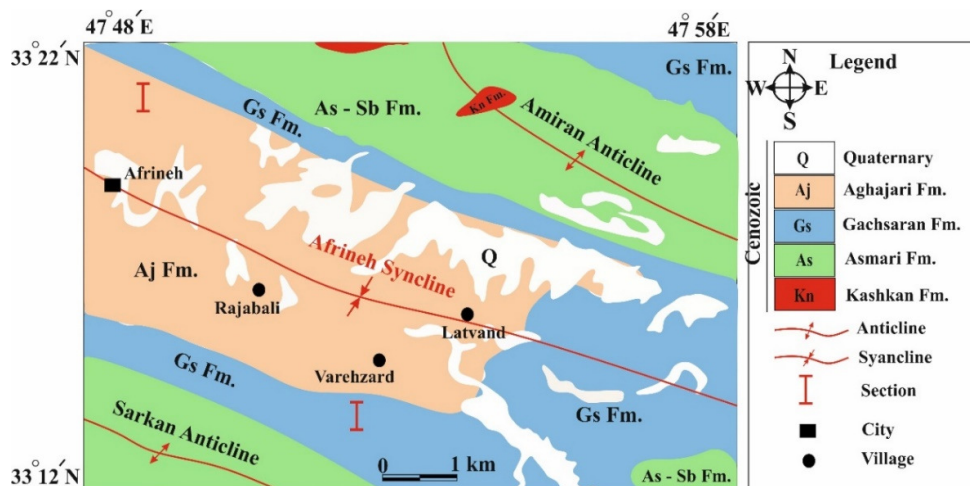
واحدها به صورت مفصل در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. واحدهای تبخیری و واحدهای آواری نظیر ماسه‌سنگ‌های متوسط تا درشت‌دانه در منطقه مورد مطالعه رخنمون دارند. واحدهای تبخیری غالباً از نوع ژئوپس با ساختار ندولار و قفس‌مرغی می‌باشند که ضخامت قابل توجهی در منطقه مورد مطالعه دارند. واحدهای آواری سازند گچساران ماسه‌سنگ‌های نازک لایه با آثار رپیلی در سطح آن‌ها می‌باشد که همراهی این واحدهای آواری با واحدهای تبخیری در منطقه حاکی از محیط رسوبگذاری کم‌عمق برای سازند گچساران در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

جنوبی‌تر، رسوبات قاره‌ای آجاجاری در محیط‌هایی چون رودخانه‌های مئاندری، دشت‌سیلابی و دلتایی در مناطق شمالی‌تر، چون لرستان و نواحی شمالی نسبت به آن فروافتادگی، رسوب‌گذاری شده‌اند. با پسروری دریای میشان رسوبات قاره‌ای غلبه یافته و رسوبات میشان را پوشانده است (قربانی، ۲۰۱۵). در ناحیه مورد مطالعه سنگ‌شناسی غالب سازند گچساران شامل واحدهای تبخیری می‌باشد ولی واحدهای کربناته‌ای تشکیل شده در این سازند نیز قابل توجه بوده که بخش عمده این واحدها دولومیتی شده است. این واحدها به صورت دولومیت‌های نازک تا ضخیم‌لایه سفید تا شیری‌رنگ در منطقه رخنمون دارند که پتروگرافی، زمین‌شیمی عنصری و منشأ سیالات دولومیت‌ساز این



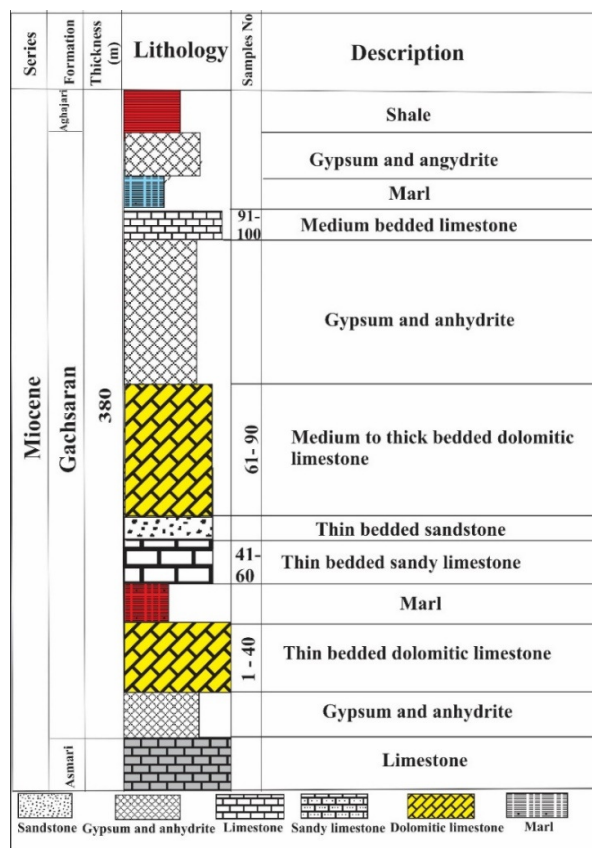
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به برش مورد مطالعه. برش مورد مطالعه با علامت ستاره مشخص شده است.

Fig. 1. Geographical location and access routes to the studied section. The studied section is marked with a star.



شکل ۲. بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شهرستان خرم‌آباد که موقعیت ناودیس افرینه را نشان می‌دهد. (اقتباس از فخاری، ۱۹۸۵ با اندکی تغییرات).

Fig. 2. A part of the 1:100,000 geological map of Khorramabad city showing the location of the Afrineh syncline. (Adapted from Fakhari, 1985 with slight modifications).



شکل ۳. ستون سنگ‌چینه‌ای سازند گچساران در ناحیه مورد مطالعه.

Fig. 3. Stratigraphic column of Gachsaran Formation in the study area.

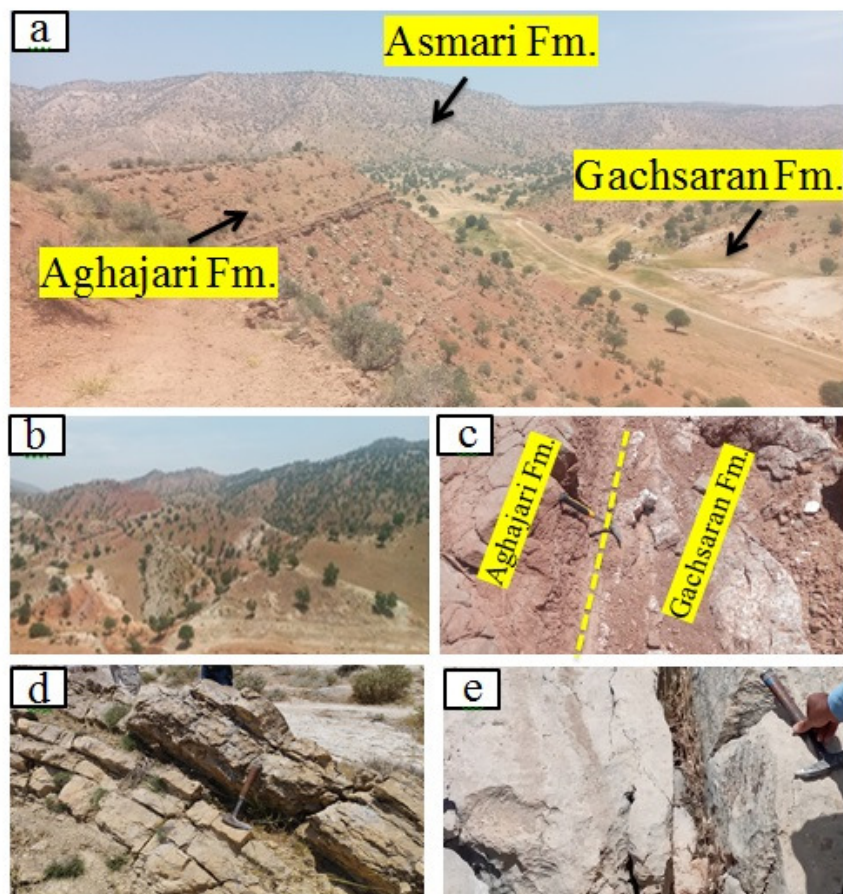
۳- روش مطالعه

در این پژوهش، به منظور درک مدل دولومیتی شدن سازند گچساران از تلفیق مطالعات میدانی، سنگ‌نگاری و روش‌های ژئوشیمیایی، مانند عناصر اصلی و فرعی استفاده شده است. مرحله اول: شامل مطالعات میدانی به منظور بررسی برش مورد مطالعه، تعیین ضخامت و نمونه‌برداری از این برش می‌باشد. در این مطالعه، تعداد ۱۰۰ نمونه از توالی‌های کربناته مورد نظر برداشت شده است به گونه‌ای که کل توالی را پوشش داده است. مرحله دوم: شامل تهیه مقاطع نازک سنگ‌شناسی از نمونه‌های برداشت شده و مطالعه و تشریح میکروسکوپی مقاطع نازک می‌باشد که توسط میکروسکوپ پلاریزان Olympus- BH2 صورت گرفته است (مقاطع نازک در دانشگاه گناباد تهیه و مورد مطالعه قرار گرفتند). مرحله سوم: شامل مطالعات ژئوشیمیایی می‌باشد که بر روی عناصر اصلی و فرعی دولومیت‌های برش مورد مطالعه صورت گرفته است. در این مرحله از نمونه‌های برداشت شده تعداد ۱۷ نمونه سنگ

انتخاب و از بخش‌های میکرایتی آن‌ها و به دور از هرگونه آلودگی، هوازدگی، شکستگی، رگه، درزه، شکاف و فسیل، مقدار ۱۵ گرم با مته دندانپزشکی جدا شده و پس از پودر کردن و همگن کردن آن‌ها در آسیاب سیاره‌ای، به روش EDX (طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس = Energy Dispersive X ray) مورد آنالیز عنصری قرار گرفتند. نمونه‌ها در آزمایشگاه مرکزی شماره ۱ دانشگاه لرستان مورد آنالیز عنصری (EDX) قرار گرفتند. عناصر اصلی (Ca, Mg) بر حسب درصد و عناصر (Sr, Mn, Fe, Na) بر حسب پی‌پی‌ام اندازه‌گیری شده‌اند. دقت آنالیزها برای عناصر اصلی ۰/۵ درصد و برای عناصر فرعی ± 5 پی‌پی‌ام بوده است. دیاگرام‌های داده‌های ژئوشیمیایی توسط نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۲ ترسیم شد. در این مرحله از دولومیت‌های مورد مطالعه تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) نیز صورت گرفته است. مقاطع نازک به روش دیکسون (۱۹۶۵) توسط محلول آلزارین قرمز (ARS) برای تشخیص کانی‌های کلسیت از

دولومیت و محلول فروسیانید پتاسیم برای تشخیص دولومیت‌های آهن‌دار رنگ‌آمیزی شده است. نام‌گذاری دولومیت‌ها بر پایه تلفیقی از رده‌بندی بافتی سیلی و گرک (۱۹۶۵) و آدابی (۲۰۰۹) استفاده شد.

دولومیت و محلول فروسیانید پتاسیم برای تشخیص دولومیت‌های آهن‌دار رنگ‌آمیزی شده است. نام‌گذاری دولومیت‌ها بر پایه تلفیقی از رده‌بندی بافتی سیلی و گرک (۱۹۶۵) و آدابی (۲۰۰۹) استفاده شد.



شکل ۴. تصاویر صحرایی سازندهای موجود در منطقه مورد مطالعه (ناودیس افرینه). a: سازندهای آسماری، گچساران و آغاجاری. b: گسترش سازند گچساران در منطقه مورد مطالعه c: مرز واضح بین سازند گچساران و سازند آغاجاری در منطقه مورد مطالعه (دید به سمت شمال شرق). d: واحدهای کربناته دولومیتی شده نازک‌لایه در تناوب با واحدهای تبخیری. e: واحدهای ضخیم‌لایه کربناته‌های دولومیتی شده

Fig. 4. Field photographs of the Formations present in the study area (Afrineh syncline). (a): Asmari, Gachsaran and Aghajari formations. (b): The extension of the Gachsaran Formation in the study area (view toward the northeast). (c): the sharp boundary between the Gachsaran Formation and the Aghajari Formation in the study area. (d): Thin-bedded dolomitized carbonate units alternating with evaporite units. (e): Thick-bedded dolomitized carbonate units.

۴- بحث

۴-۱- سنگ‌شناسی دولومیت‌های برش مورد مطالعه

مطالعات سنگ‌شناسی بر روی ۱۰۰ مقطع نازک از واحدهای کربناته سازند گچساران در منطقه مورد مطالعه منجر به شناسایی ۴ نوع دولومیت گردید. این دولومیت‌ها شامل دولومیت‌های نوع اول (ریزبلور، D1)، نوع دوم (متوسط‌بلور، D2)، نوع سوم (درشت‌بلور، D3) و نوع چهارم (خیلی درشت‌بلور نوع زین‌اسبی پرکننده شکستگی‌ها، D4) می‌باشند. از نظر فراوانی، دولومیت‌های نوع اول ۲۰ درصد، نوع دوم و سوم هرکدام ۳۵ درصد و نوع چهارم ۱۰ درصد

از توالی‌های کربناته سازند گچساران را در منطقه مورد مطالعه در بر گرفته‌اند (شکل ۵).

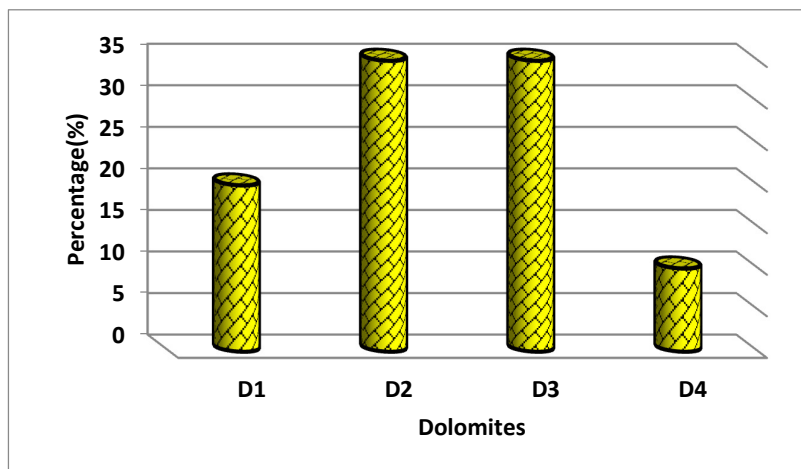
الف) دولومیت‌های نوع اول (D1)

توصیف: این نوع از دولومیت‌ها به عنوان دولومیت همزمان با رسوب‌گذاری یا دولومیت‌های اولیه در نظر گرفته می‌شوند. از نظر بافتی این نوع دولومیت‌ها ریزبلور می‌باشند و پتروگرافی آن‌ها اغلب توسط میکروسکوپ نوع الکترونی (رویشی) صورت می‌گیرد. از نظر اندازه این دولومیت‌ها اغلب کمتر از ۱۰ میکرون می‌باشند و بافت موزاییکی و بی‌شکل تا شکل‌دار دارند. در برش مورد مطالعه این نوع از

۲۰۰۹). این نوع دولومیت‌ها احتمالاً همزمان با رسوبگذاری یا در مراحل اولیه دیاژنز در محیط بالای جزرومدی یا بین جزرومدی تشکیل شده‌است (گرگ و شلتون، ۱۹۹۰؛ آدابی، ۲۰۰۹؛ جان‌جوهان و آلانسری، ۲۰۲۰). همچنین نبود فسیل در این نوع از دولومیت‌ها می‌توان اظهار داشت که دولومیت نوع اول تحت شرایط سطحی و دمای پایین از آب دریا (لند ۱۹۸۵) و یا محلول‌های بین‌ذره‌ای غنی از منیزیم (Mg) تشکیل شده‌است (آدابی، ۱۳۹۰؛ آدابی، ۲۰۰۹؛ فنگ و یو، ۲۰۲۲). وجود حفرات فنسترال در رخساره‌های دولومیتی ریزدانه (شکل ۷-د) بیانگر تشکیل آن‌ها به وسیله فعالیت‌های میکروبیالیتی است (بونتوگنالی و همکاران، ۲۰۱۴؛ سوارز-گنزالز و همکاران، ۲۰۱۹).

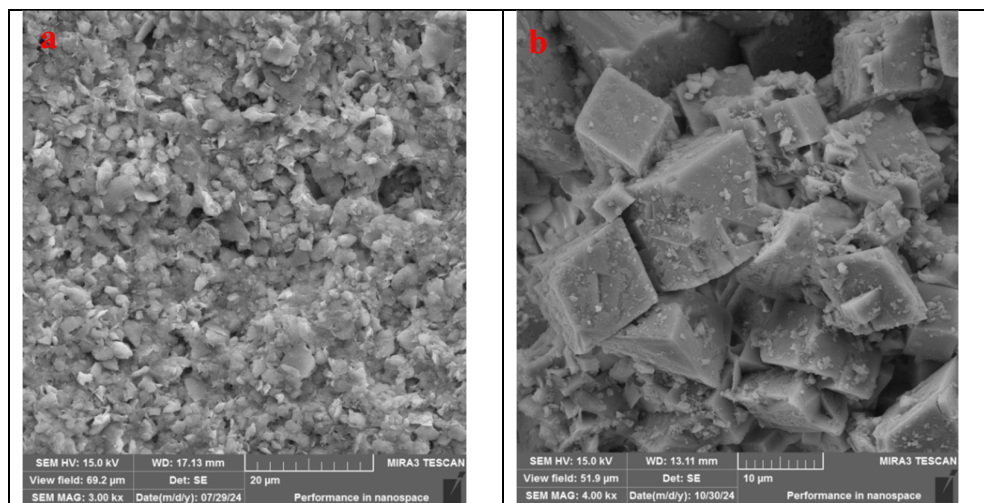
دولومیت‌ها با فراوانی حدود ۲۰ درصد اغلب در اندازه کمتر از ۱۰ میکرون با بافت موزاییکی اغلب بی‌شکل (شکل ۶-ا) و شکل‌دار (شکل ۶-ب) دیده می‌شوند. از دیگر ویژگی‌های این نوع از دولومیت‌ها وجود فابریک متراکم، تیره‌رنگ و فقدان فسیل، وجود لامینه‌های جلبکی و فابریک فنسترال اشاره کرد (شکل ۷). این بافت دولومیتی معادل بافت Planar-S مازالو (۱۹۹۲) و سیبلی و گرگ (۱۹۸۷) و بافت ایدیوتوپیک Idiopic-S گرگ و سیبلی (۱۹۸۴) است (آدابی، ۱۳۹۰).

تفسیر: این نوع از دولومیت‌ها با توجه به ویژگی‌های ذکر شده تحت شرایط سطحی و دمای پایین تشکیل شده‌اند (گرگ و شلتون ۱۹۹۰، آل-آسام و پاکارد ۲۰۰۰، آدابی،



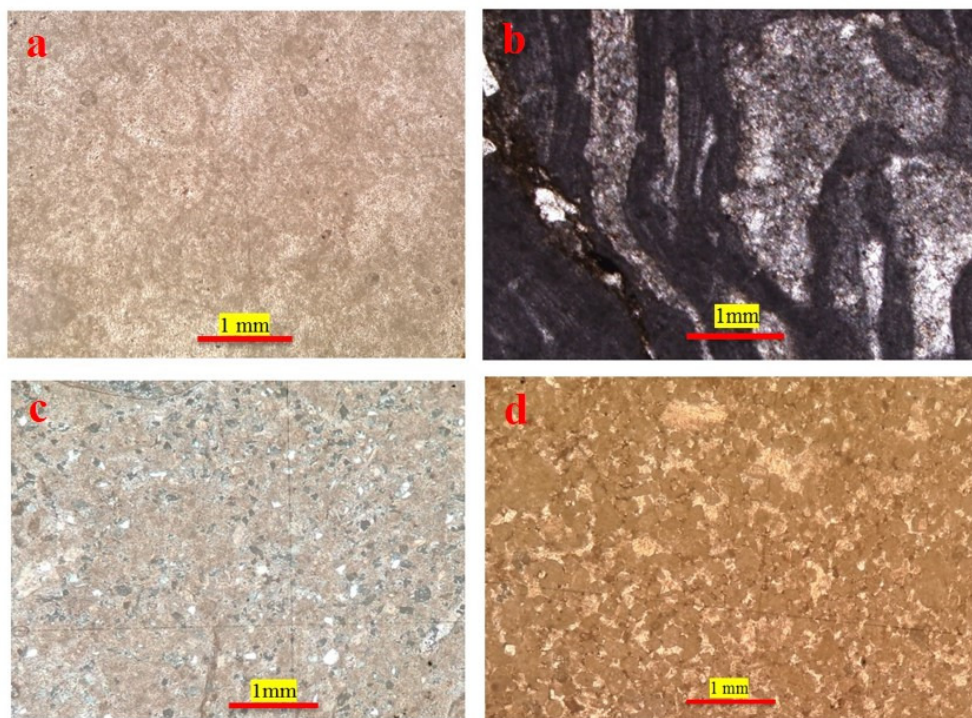
شکل ۵. هیستوگرام فراوانی انواع دولومیت‌های گسترش یافته در سازند گچساران (ناودیس افرینه)

Fig. 5. Histogram showing the frequency of dolomite types developed in the Gachsaran Formation (Afrineh syncline).



شکل ۶. a: دولومیت‌های نوع اول بی‌شکل تحت میکروسکوپ الکترونی. b: دولومیت‌های نوع اول شکل‌دار تحت میکروسکوپ الکترونی

Fig. 6. a: xenotopic first type dolomites under electron microscope. b: Euhedral first type Dolomites under the electron microscope.



شکل ۷. شواهد رسوبی دولومیت‌های نوع اول. a: فابریک متراکم و فاقد فسیل دولومیت نوع اول. b: لامینه‌های جلبکی در رخساره دولومیت ریزبلور. c: قطعات پراکنده آواری کوارتز در رخساره دولومیت ریزبلور. d: فابریک تخلخل فنسترال در رخساره دولومیت ریزبلور

Fig. 7. Sedimentary evidence of first-type dolomites: a: Dense and fossil-free fabric of the first-type dolomite. b: Algal lamina in the microcrystalline dolomite facies. c: Scattered fragments of quartz in microcrystalline dolomite microfacies. d: Fenestral porosity fabric in microcrystalline dolomite facies.

ب) دولومیت‌های نوع دوم (D2)

توصیف: این نوع از دولومیت‌ها به عنوان دولومیت‌های متوسط بلور بصورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در اندازه‌های بین ۱۰ تا ۴۰ میکرون در مقاطع مورد مطالعه شناسایی گردید (شکل ۸). این دولومیت‌ها از تبلور مجدد دولومیت‌های نوع اول به وجود می‌آیند (شکل ۹).

تفسیر: این نوع از دولومیت معادل فابریک Idiopic - P - گرگ و سیبلی (۱۹۸۴)، گرگ و همکاران (۲۰۱۵) و دولومیت‌های Planar - P مازالو (۱۹۹۲) می‌باشد (آدابی، ۱۳۹۰). دولومیت‌های متوسط بلور معمولاً از تبلور مجدد دولومیت‌های ریز بلور نوع اول ایجاد می‌شوند (آدابی، ۱۳۹۰). وجود لکه‌هایی از دولومیت‌های ریزبلور در بین دولومیت‌های متوسط بلور تأییدی بر این نظریه است (آدابی و رآو، ۱۹۹۶). بر اساس نظریه سیبلی و گرگ (۱۹۸۷) فابریک نیمه‌مسطح شکل‌دار در این نوع از دولومیت‌ها نتیجه رشد آرام بلورها تحت جریان پیوسته‌ای از سیالات دولومیت‌ساز در دمای پایین می‌باشد. بنابراین با توجه به ویژگی‌های بافتی و اندازه بلورها، احتمالاً این دولومیت‌ها در

مرحله تدفین کم‌عمق به صورت جان‌نشینی تشکیل شده‌اند (ویتاکر و همکاران، ۲۰۰۴؛ پینا و همکاران، ۲۰۲۰).

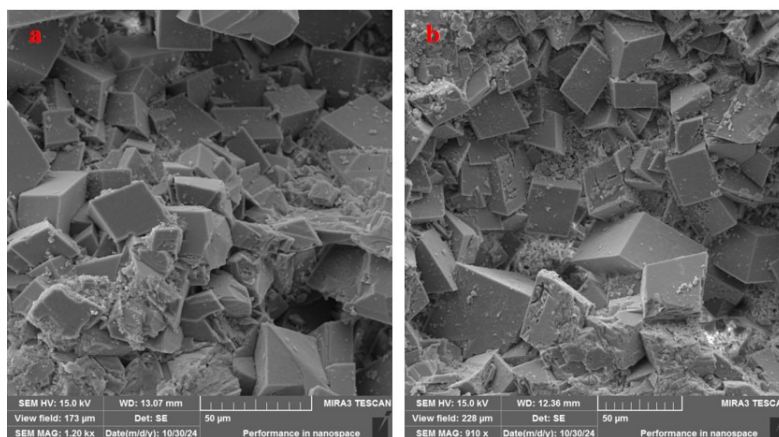
ج) دولومیت‌های نوع سوم (D3)

توصیف: دولومیت‌های نوع سوم موسوم به دولومیت‌های درشت‌بلور به صورت موزائیک‌های نیمه‌شکل‌دار و شکل‌دار و در اندازه‌های بین ۴۰ تا ۱۰۰ میکرون در مقاطع مورد مطالعه شناسایی گردید (شکل ۱۰). این نوع از دولومیت‌ها عمدتاً به صورت موزائیک‌های هم‌اندازه با مرزهای مشترک بین بلوری مستقیم بوده و در مواردی فصل مشترک سطوح کریستالی به خوبی حفظ شده است. این نوع از دولومیت‌ها در مقاطع مورد مطالعه به دو صورت مشاهده شده‌اند: الف: به صورت سیمان فضای حاصل از شکستگی‌ها و تخلخل سنگ را پر کرده‌اند (شکل ۱۱-a)، این نوع از دولومیت‌ها به رنگ آبی فیروزه‌ای دیده می‌شوند که حاکی از وجود عنصر آهن در شبکه خود می‌باشند. ب: به صورت بلورهای خودشکل و شناور در زمینه سنگ (شکل ۱۱-b).

تفسیر: این نوع دولومیت معادل فابریک Idiopic - S - گرگ و سیبلی (۱۹۸۴) و دولومیت‌های Planar - P مازالو

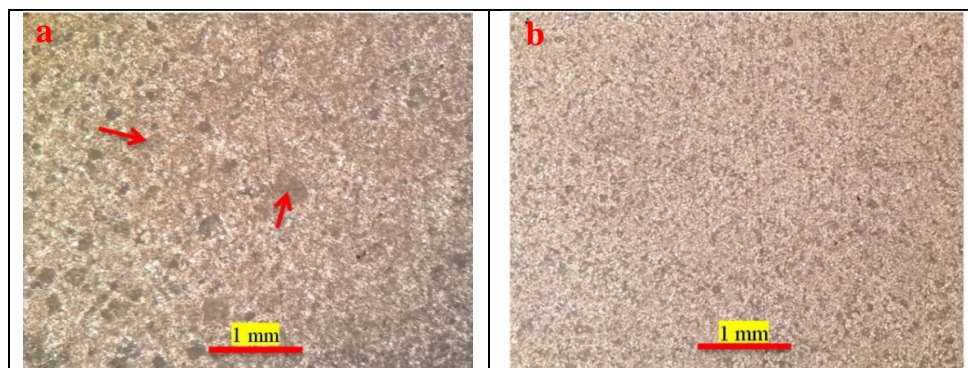
سانتی‌گراد) می‌باشند (آدابی، ۱۳۹۰؛ گرگ و شلتون، ۱۹۹۰؛ مزالو، ۱۹۹۲ و آدابی، ۲۰۰۹).

(۱۹۹۲) می‌باشد. دولومیت‌های نوع سوم بیانگر جانشینی دیاژنتیکی سنگ‌آهک‌های قبلی و یا تبلور مجدد دولومیت‌های اولیه زیر دمای بحرانی (کمتر از ۶۰ درجه



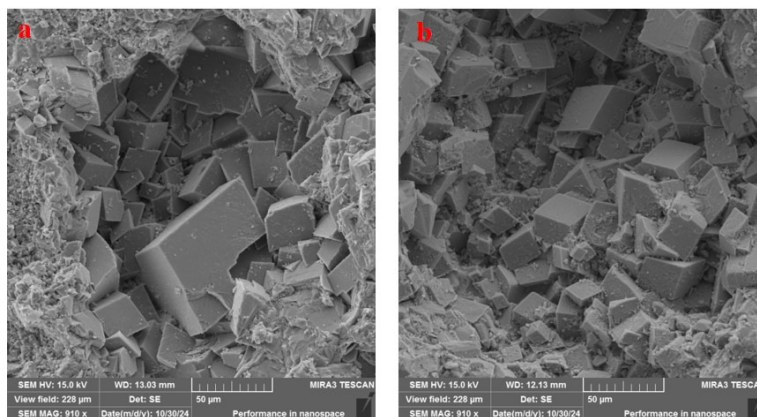
شکل ۸. a و b: تصویر میکروسکوپ الکترونی از دولومیت‌های نوع دوم (متوسط بلور)

Fig. 8. a and b: Scanning electron microscope (SEM) image of second-type dolomites (medium-crystalline).



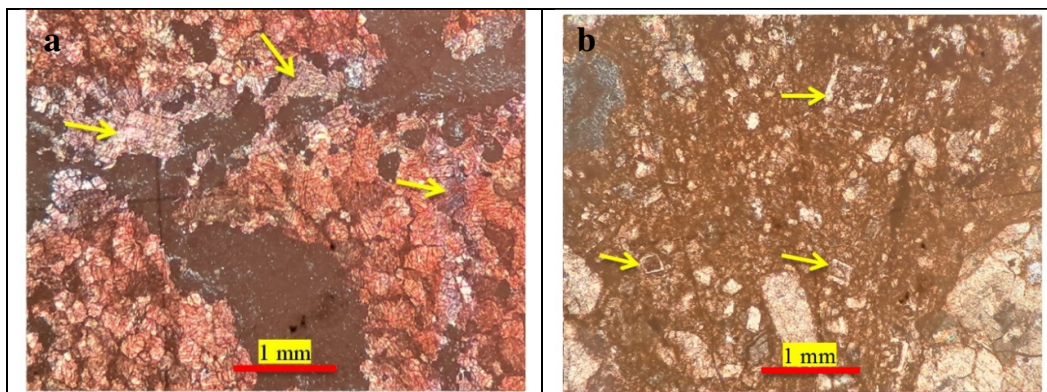
شکل ۹. a و b: دولومیت‌های نوع دوم (متوسط بلور) حاصل تبلور مجدد دولومیت‌های ریز بلور. پیکان‌های قرمز بافت اولیه (دولومیت ریز بلور) را نشان می‌دهند.

Fig. 9. a and b: The second-type dolomites (medium-crystalline) are the result of recrystallization of fine-crystalline dolomites. The red arrows indicate the primary texture (microcrystalline dolomite).



شکل ۱۰. a و b: دولومیت‌های نوع سوم (درشت بلور) تحت میکروسکوپ الکترونی (رویشی). هر دو تصویر دولومیت‌های درشت بلوری را نشان می‌دهد که فضای حاصل از تخلخل را اشغال کرده‌اند.

Fig. 10. a and b: Third-type dolomites (coarse-crystalline) under scanning electron microscope (SEM). Both images show the coarse crystalline dolomites that occupy the pore space.



شکل ۱۱. a: سیمان دولومیت آهن‌دار تشکیل شده در فضای حاصل از تخلخل. مقطع با آلیزارین قرمز و فروسیانید پتاسیم رنگ آمیزی شده است. b: دولومیت‌های درشت بلور شناور در زمینه سنگ

Fig. 11. a: Iron-bearing dolomite cement formed in the pore space. The section is stained with alizarin red and potassium ferrocyanide. b: Coarse crystalline dolomites floating in the rock matrix.

صورت اتفاق می‌افتد که با افزایش عمق و بالارفتن دما نسبت منیزیم (Mg) لازم برای تشکیل دولومیت افزایش پیدا می‌کند (تاکر و رایت، ۱۹۹۰؛ جورجینیو و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین رنگ‌آمیزی این نوع از دولومیت‌های شناسایی شده با محلول فروسیانید پتاسیم نشان داد که دولومیت‌های تدفینی نسبتاً عمیق دارای آهن (Fe) در ترکیب خود می‌باشند که این موضوع می‌تواند به دلیل احیا بودن محیط دیاژنتیکی باشد.

۲-۴- زمین‌شیمی عنصری دولومیت‌های برش مورد مطالعه

دولومیت‌های شناسایی شده در نمونه‌های مورد مطالعه به دو گروه دولومیت‌های اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. دولومیت نوع اول (D1) به عنوان دولومیت‌های اولیه و سایر دولومیت‌ها (D2, D3, D4) به عنوان دولومیت ثانویه می‌باشند. تعداد ۱۷ نمونه آنالیز EDX از دولومیت‌های برش مورد مطالعه صورت گرفته است که نتایج آن در جدول ۱ ذکر شده است. با استفاده از آنالیز زمین‌شیمی عنصری بر روی دولومیت‌ها می‌توان پی به محیط‌های دیاژنزی آن‌ها برد (آدابی و رآو، ۱۹۹۶؛ آدابی، ۲۰۰۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ پینا و همکاران، ۲۰۲۰؛ احمد و همکاران، ۲۰۲۲).

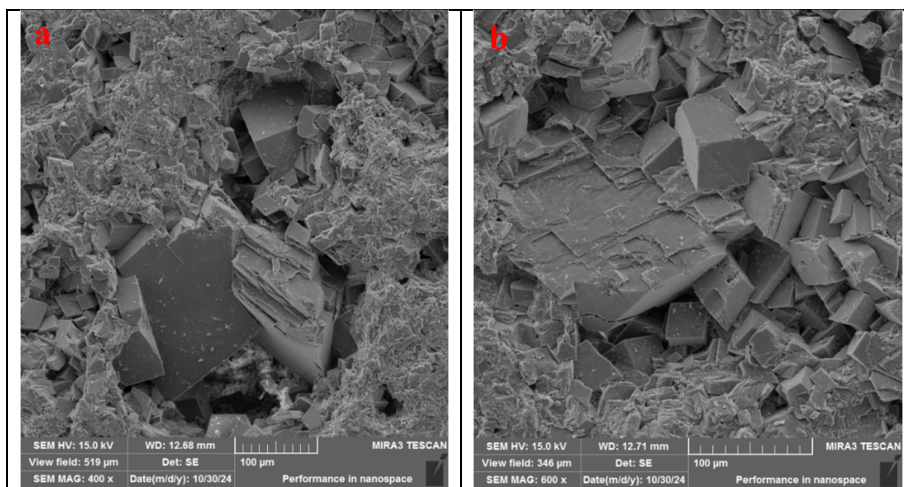
عناصر اصلی (کلسیم و منیزیم)

میانگین تمرکز عناصر کلسیم و منیزیم در دولومیت‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ذکر شده است. شکل ۱۴ هیستوگرام فراوانی عناصر اصلی را در دولومیت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

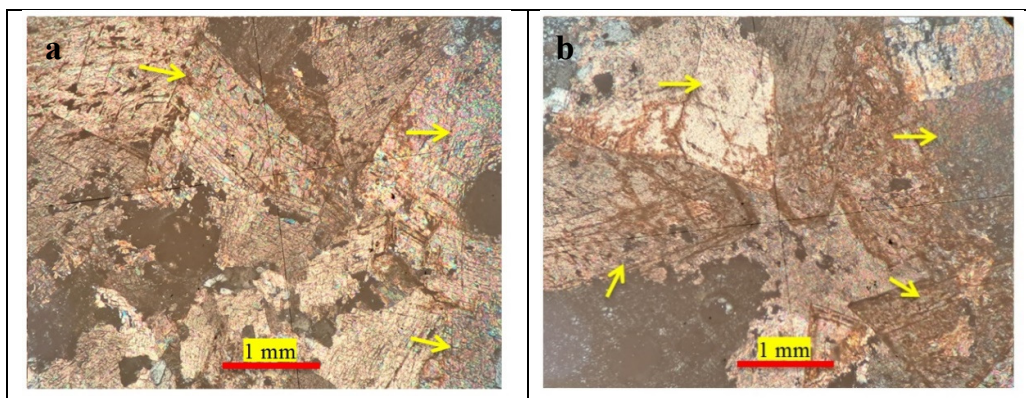
د) دولومیت‌های نوع چهارم (D4)

توصیف: در مقاطع مورد مطالعه این نوع از دولومیت‌ها به صورت بی‌شکل، نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار و در اندازه‌های چندین بلور (بزرگ‌تر از ۱۰۰ میکرون و در اندازه چندین میلی‌متر) به صورت پراکنده شکستگی‌ها و حفرات سنگ مشاهده گردید (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). نوع خاصی از این دولومیت‌ها دولومیت نوع زین‌اسبی (باروک) است. از مشخصات بلورشناسی آن‌ها وجود شبکه بلورین انحنادار است که موجب شده است تا سطوح بلورین آن انحنا داشته باشند. همچنین سطوح کلیواژها نیز انحنادار بوده و خاموشی آن در نور پلاریزه موجی (جارویی) است (شکل ۱۳ a و b).

تفسیر: این نوع از دولومیت‌ها حاصل مراحل آخر فرایندهای دیاژنتیکی می‌باشند و باعث کاهش تخلخل می‌شوند. دولومیت پراکنده شکستگی‌ها که به صورت سیمان تدفینی و یا به صورت جانشینی عمل می‌کند در اعماق متوسط تا نسبتاً زیاد و بعد از فرآیند انحلال تشکیل می‌شوند (گانو و همکاران، ۲۰۱۶؛ دیلورتو و همکاران، ۲۰۲۱). دولومیت‌های تشکیل شده در شرایط تدفینی عمیق به طور معمول می‌توانند ابعاد بلوری متفاوت و فابریک‌های متنوعی داشته باشند که این موضوع بستگی به اندازه فضاهای خالی سنگ دارد (ویلسون و همکاران، ۲۰۰۷). در حالت پراکنده حفره‌ها این نوع دولومیت اغلب دارای بافت زنونوپیک با مرزهای بلورین نامنظم است ولی بلورها به سمت فضای خالی دارای انتهای انحنادار خنجر مانند هستند. دولومیتی شدن در محیط‌های تدفینی به این



شکل ۱۲. a و b نمونه‌ای دولومیت‌های بسیار درشت‌بلور پرکننده حفرات سنگ تحت میکروسکوپ الکترونی (روشی)
Fig. 12. a and b: examples of very coarse-crystalline dolomites filling rock cavities under scanning electron microscope (SEM).



شکل ۱۳. a: دولومیت‌های بسیار درشت‌بلور آهن‌دار طی دیانژن تدفینی عمیق. مقطع با آلزارین قرمز و فروسیانید پتاسیم رنگ‌آمیزی شده است. رنگ آبی فیروزه‌ای بلورهای دولومیت دلالت بر وجود عنصر آهن در شبکه آنهاست. b: دولومیت‌های درشت‌بلور نوع باروک (زین اسبی) تشکیل شده در طی دیانژن تدفینی عمیق.

Fig. 13. a: Very coarse iron-bearing dolomites during deep burial diagenesis. The thin- section is stained with alizarin red and potassium ferrocyanide. The turquoise blue color of dolomite crystals indicates the presence of iron element in their lattice. b: the very coarse-crystalline dolomite (baroque type/saddle) is formed during deep-burial diagenesis.

جدول ۱. نتایج آنالیز EDX نمونه دولومیت‌های برش مورد مطالعه

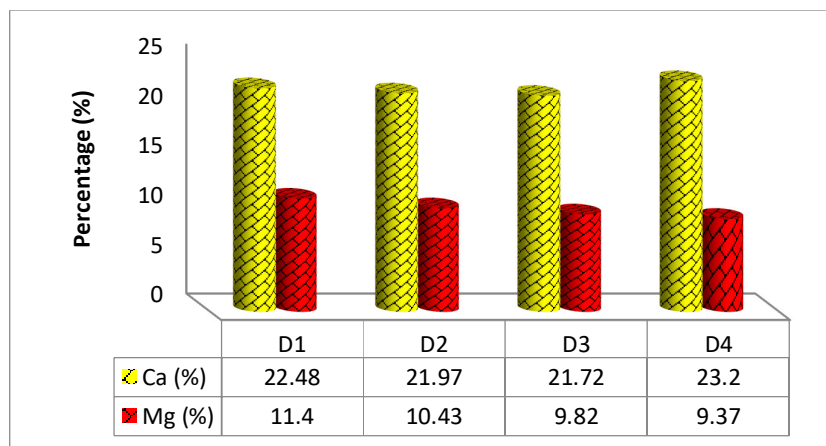
Table 1. EDX analysis results of the dolomite samples in the studied section

	Sample No.	Ca (%)	Mg (%)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Na (ppm)	C (%)	O (%)	Mg/Ca (%)
Dolomicrite (D1)	GS-1	24.6	12.5	2000	1000	9000	2000	41.5	19.9	0.51
	GS-2	20.3	11.2	6000	100	11000	4000	40.4	25.9	0.55
	GS-3	23.8	9.8	1000	2000	7000	1000	42.6	22.6	0.41
	GS-4	21	10.5	8000	1000	3000	500	26	41.2	0.50
	GS-5	22.7	11.7	2000	200	8000	6000	23	40.9	0.52
Dolomicrosparite (D2)	GS-6	22.5	11.3	6000	100	4000	2000	40.5	24.3	0.50
	GS-7	23.1	10.5	1000	2000	8000	4000	40.8	23.9	0.45
	GS-8	20.6	9.8	5000	4000	1000	1000	20.4	48	0.48
	GS-9	21.7	10.1	7000	3000	2000	3000	39.7	26.9	0.47
Dolosparite (D3)	GS-10	22	9.5	11000	2000	100	1000	40.5	26.4	0.43
	GS-11	21.6	10.5	5000	4000	100	2000	44	22.6	0.49
	GS-12	20.8	10.3	9000	1000	1000	1000	45.7	21.9	0.50
	GS-13	21.5	9.8	8000	5000	2000	1000	25.9	40.9	0.46
	GS-14	22.7	9	12000	2000	1000	3000	22.9	43.5	0.40
Saddle dolomite (D4)	GS-15	25	9.5	15000	6000	1000	1000	21.4	41.6	0.38
	GS-16	23.2	8.9	9000	4000	200	2000	40.7	25.5	0.38
	GS-17	21.4	9.7	11000	5000	100	1000	45.1	22	0.45

جدول ۲. میانگین مقادیر عناصر کلسیم و منیزیم در دولومیت‌های منطقه مورد مطالعه

Table 2. Average values of calcium and magnesium elements in the dolomites of the study area

Dolomite Type	Ca (%)	Mg (%)
D1	22.48	11.14
D2	21.97	10.43
D3	21.72	9.82
D4	23.20	9.37



شکل ۱۴. هیستوگرام فراوانی عناصر اصلی (کلسیم و منیزیم) در دولومیت‌های مورد مطالعه

Fig. 14. Histogram of the frequency of major elements (calcium and magnesium) in the studied dolomites.

برابر ۱/۶ می‌باشد این نسبت برای فازهای مختلف آنالیز شده برای دولومیت‌های مورد مطالعه به ترتیب برای دولومیت‌های D1 برابر ۲/۰۱ درصد، دولومیت‌های D2 برابر ۲/۱۰ درصد، دولومیت‌های D3 برابر ۲/۲۱ درصد و دولومیت‌های D4 برابر ۲/۴۷ درصد می‌باشد. همانطور که مشخص است هر سه نوع دولومیت غیراستوکیومتری (فاقد نظم بلوری) هستند، این روند را با توجه به سن سازند گچساران در برش مورد مطالعه می‌توان توجیه نمود.

عناصر فرعی (استرانسیم، سدیم، آهن و منگنز)

میانگین تمرکز عناصر استرانسیم، سدیم، آهن و منگنز در دولومیت‌های مورد مطالعه در جدول ۳ ذکر شده است. شکل ۱۶ هیستوگرام فراوانی عناصر فرعی را در دولومیت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. دولومیت‌های اولیه مقدار استرانسیم بیشتری از دولومیت‌های ثانویه یا دیانژنی دارند (لوکوزسکی و همکاران، ۲۰۱۸؛ شانلی و همکاران ۲۰۱۸). به طور کلی مقادیر Sr در دولومیت‌های مورد مطالعه از دولومیت‌های نوع اول (D1) به سمت دولومیت‌های نوع چهارم (D4) کاهش پیدا می‌کند (شکل ۱۷). دولومیت‌های اولیه ریزبلور به دلیل داشتن شبکه بلوری با نظم کمتر (غیراستوکیومتری) دارای مقادیر بیشتری استرانسیم نسبت به دولومیت‌های درشت بلور

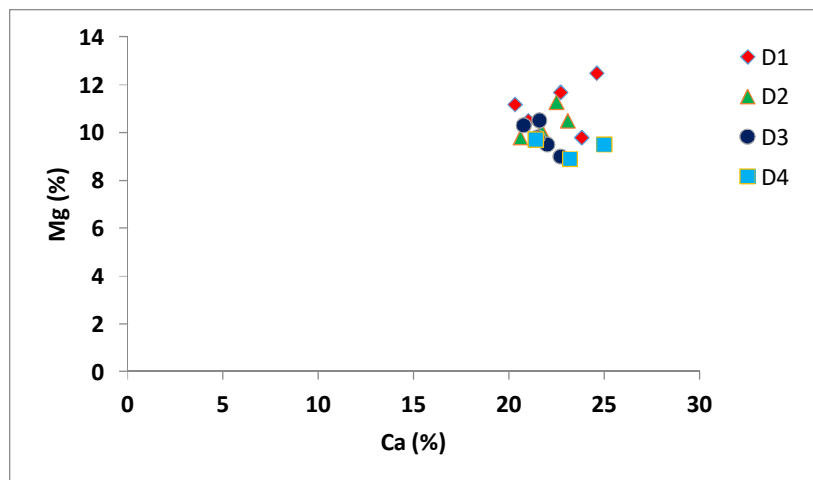
به طور کلی میانگین میزان کلسیم (Ca) در دولومیت‌های برش مورد مطالعه از ۲۱/۷۲ درصد تا ۲۳/۲۰ درصد تغییر می‌کند. میانگین میزان منیزیم (Mg) در این دولومیت‌ها از ۹/۳۷ تا ۱۱/۱۴ درصد در تغییر است.

از آنجایی که نسبت (Mg/Ca) در دولومیت‌های خالص حدود ۶۵ درصد می‌باشد، کاهش اندک مقادیر Mg از ۱۱/۱۴ به ۹/۳۷ درصد می‌تواند به علت دگرسانی جزئی این دولومیت‌ها می‌باشد (بالت و همکاران، ۱۹۸۰؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۹؛ کل - دووستین و همکاران، ۲۰۱۹؛ دانیل و میستر، ۲۰۲۰). از طرفی با توجه به اینکه در طی فرآیند دولومیتی شدن مقادیر Mg/Ca به دلیل تشکیل دولومیت کاهش پیدا می‌کند (آدابی، ۱۳۹۰؛ کل - دووستین و همکاران، ۲۰۱۹)، بنابراین مقدار Mg در دولومیت‌های درشت بلور کمتر از سایر دولومیت‌هاست، به گونه‌ای که دولواسپارایت‌ها (دولومیت‌های نوع D3 و D4) نسبت به دولومیکرایت‌ها و دولومیکرواسپارایت‌ها (دولومیت‌های نوع D1 و D2) مقدار Mg کمتری دارند (شکل ۱۵).

بیشترین میزان Mg در دولومیت‌های خالص ۱۳ درصد می‌باشد (بالت و همکاران، ۱۹۸۰؛ دانیل و میستر، ۲۰۲۰؛ پینا و همکاران، ۲۰۲۰؛ زائو و همکاران، ۲۰۲۵؛ نی و همکاران، ۲۰۲۵). نسبت Ca/Mg در دولومیت‌های ایده‌آل

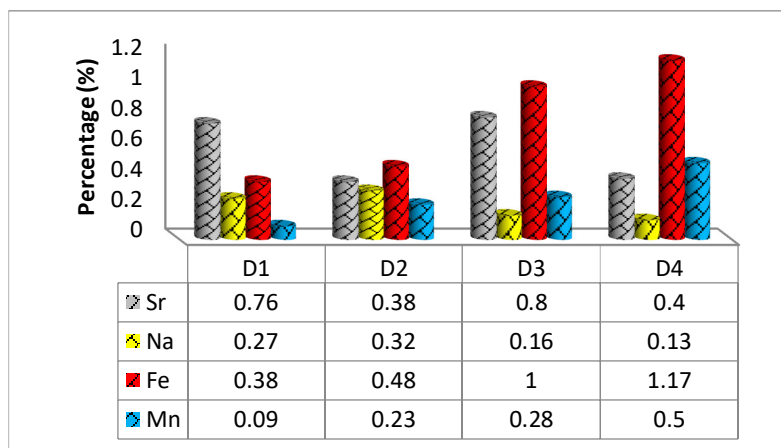
همکاران، ۲۰۱۲؛ هو و همکاران، ۲۰۱۶؛ شوستر و همکاران، ۲۰۱۸؛ رئونینگ و همکاران، ۲۰۲۲). تمرکز بالای استرانسیم در دولومیکرایت‌ها می‌تواند به دلیل فرایندهای دیاژنزی باشد که بر روی پوسته‌های آراگونیتی برخی دوکفه‌ای‌ها، فرامینیفراهای بنتیک، برخی جلبک‌های سبز و دانه‌های ایید در نمونه‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شود (رئونینگ و همکاران، ۲۰۲۲).

حاصل از دیاژنز تاخیری هستند (کیرماسی، ۲۰۰۸؛ لوکوزسکی و همکاران، ۲۰۱۸؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۹؛ زائو و همکاران، ۲۰۲۵؛ نی و همکاران، ۲۰۲۵). در دولومیت‌های نوع سوم و چهارم (درشت بلور) مقدار استرانسیم به دلیل رسیدن به حالت ایده‌آل در شبکه بلوری کاهش یافته است (لیانگ و همکاران، ۲۰۲۳). توسعه فرآیند دولومیتی شده به طور کلی سبب کاهش میزان عنصر استرانسیم در شبکه بلورها می‌گردد (ژسک و



شکل ۱۵. ترسیم مقادیر منیزیم در برابر کلسیم. دولومیت‌های درشت‌بلورتر میزان منیزیم کمتری دارند.

Fig. 15. Plot of magnesium versus calcium values. Coarser crystalline dolomites have less magnesium content.



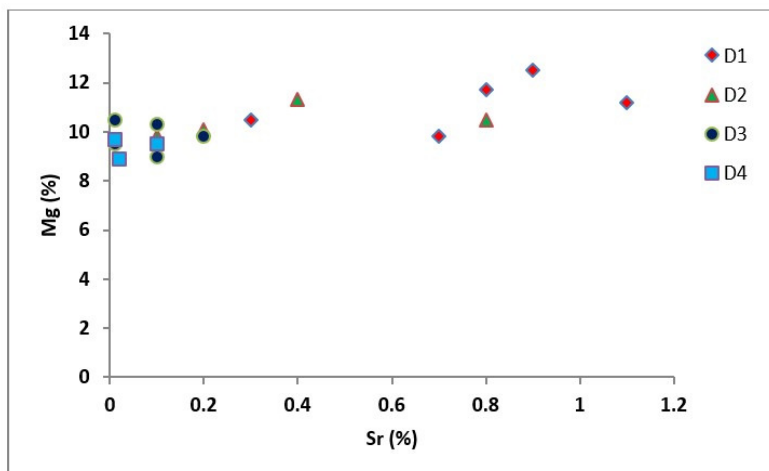
شکل ۱۶. هیستوگرام فراوانی عناصر فرعی (استرانسیم، سدیم، آهن و منگنز) در دولومیت‌های مورد مطالعه

Fig. 16. Histogram of the frequency of trace elements (strontium, sodium, iron, and manganese) in the studied dolomites.

جدول ۳. میانگین مقادیر عناصر فرعی در دولومیت‌های منطقه مورد مطالعه

Table 3. Average values of trace elements in the dolomites of the study area

Dolomite Type	Sr (%)	Na (%)	Fe (%)	Mn (%)
D1	0.76	0.27	0.38	0.09
D2	0.38	0.32	0.48	0.23
D3	0.8	0.16	1.00	0.28
D4	0.4	0.13	1.17	0.50



شکل ۱۷. رسم مقادیر Sr و Mg در انواع مختلف دولومیت‌های برش مورد مطالعه. تمرکز Sr در دولومیت‌های نوع اول (D1) بیشتر از سایر دولومیت‌هاست.

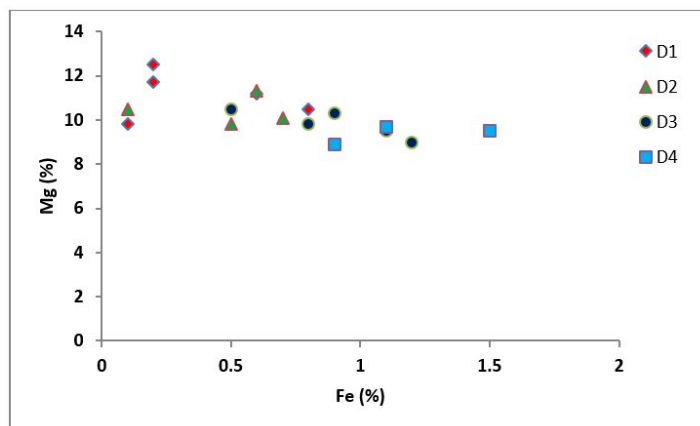
Fig. 17. Plot of Sr and Mg values in different types of dolomites in the studied section. The concentration of Sr in the first type dolomites (D1) is higher than in other dolomites.

دولومیت‌های سازند گچساران در اعماق کم تا متوسط تدفین تشکیل شده‌اند، مقادیر بالاتر (Mn) و (Fe) در آن‌ها قابل توجه است. فراوان‌ترین کاتیون آب دریا سدیم است که تمرکز آن در دولومیت‌ها درجه شوری سیالات دولومیت-ساز را نشان می‌دهد (وارن، ۲۰۰۰). رسم نمودار Na در برابر Mg دولومیت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که تمرکز Na با افزایش مقادیر Mg افزایش می‌یابد که می‌تواند شاهی برای غیراستوکیومتری بودن بلورهای دولومیت باشد (شکل ۲۰). مقدار Na همانند Sr در دولومیت‌های غیراستوکیومتری (فاقد نظم بلوری) بیشتر می‌باشد (آدابی، ۲۰۰۹؛ گابلون و ویتاکر، ۲۰۱۶) در نتیجه می‌توان گفت دولومیت‌های برش مورد مطالعه هنوز به نظم بلوری (استوکیومتری) نرسیده‌اند. تمرکز نسبتا بالای Na در انواع مختلف دولومیت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که احتمالا این نوع از دولومیت‌ها متأثر از شورابه‌های کف حوضه‌ای می‌باشند.

۵- مدل دولومیتی‌شدن سازند گچساران در برش افرینه

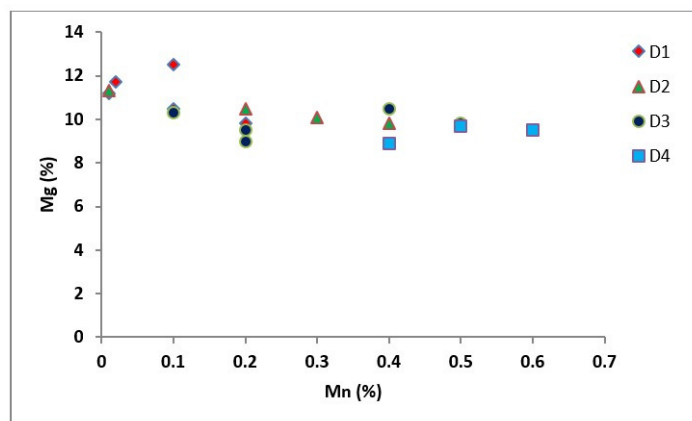
به طور کلی چهار نوع دولومیت در سازند گچساران تحت عنوان دولومیت‌های اولیه (دولومیکرایت‌ها) و دولومیت‌های ثانویه (دولومیکرواسپارایت‌ها، دولواسپارایت‌ها و دولومیت‌های بسیار درشت بلور پرکننده حفرات و شکستگی‌ها) تشخیص داده شد.

از آنجایی که مقادیر آهن و منیزیم در آب دریا بسیار پایین‌تر از آب درون سازندی است، یک محیط کاهشی برای آهن و منگنز با کلسیم و منیزیم در شبکه دولومیت به صورت جانشینی را مساعد می‌سازد. در مقایسه با استرانسیم و سدیم، مقادیر آهن و منگنز در دولومیت‌های دیاژنتیکی بالاتر از دولومیت‌های اولیه است (ینگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ شانلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ دیلورتو و همکاران، ۲۰۲۱) (شکل‌های ۱۸ و ۱۹). توزیع عناصر آهن (Fe) و منگنز (Mn) در دولومیت‌ها وابسته تغییرات Ph و Eh سیال است. در سیالات اکسیدان با Eh مثبت، Fe^{+2} و Mn^{+2} بیشتر به صورت اکسید می‌باشند و برای مشارکت در ساختار کربنات‌ها (سیدریت‌ها) حضور ندارند (تاکر و رایت، ۱۹۹۱). میزان Fe و Mn در طی تبلور مجدد به تناوب افزایش می‌یابند (تاکر و رایت، ۱۹۹۱؛ دیلورتو و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجایی که آهن (Fe) و منگنز (Mn) در دولومیت‌ها معمولاً جایگزین منیزیم (Mg) می‌شوند، بنابراین مقادیر بالاتر (Mn) و (Fe) به دلیل فراوانی منیزیم (Mg) در دولومیت نسبت به سنگ‌آهک است. مقادیر بالای (Mn) و (Fe) در دولومیت‌های سازند گچساران نیز می‌تواند به دلیل شرایط احیایی حاکم بر محیط باشد (لند، ۱۹۸۵؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ دیلورتو و همکاران، ۲۰۲۱؛ لی و همکاران، ۲۰۲۴؛ بی‌بی و همکاران، ۲۰۲۵؛ زانو و همکاران، ۲۰۲۵؛ نی و همکاران، ۲۰۲۵). معمولاً شرایط احیایی با افزایش عمق تدفین افزایش می‌یابد. از آنجایی که بیشتر



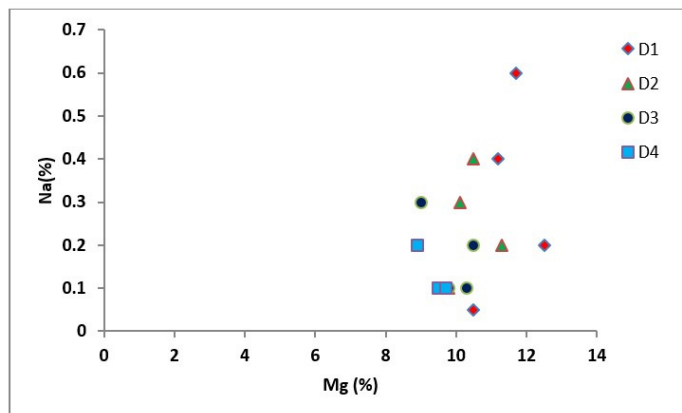
شکل ۱۸. رسم مقادیر Fe و Mg در انواع مختلف دولومیت‌های برش مورد مطالعه. تمرکز Fe در دولومیت‌های نوع سوم و چهارم (D3, D4) بیشتر از سایر دولومیت‌هاست.

Fig. 18. Plot of Fe and Mg values in different types of dolomites in the studied section. The concentration of Fe in third and fourth type dolomites (D3, D4) is higher than other dolomites



شکل ۱۹. رسم مقادیر Mn و Mg در انواع مختلف دولومیت‌های برش مورد مطالعه. تمرکز Mn در دولومیت‌های نوع سوم و چهارم (D3, D4) بیشتر از سایر دولومیت‌هاست.

Fig. 19. Plot of Mn and Mg values in different types of dolomites in the studied section. The concentration of Mn in the third and fourth type dolomites (D3, D4) is higher than other dolomites.



شکل ۲۰. رسم مقادیر Na در برابر Mg برای انواع دولومیت‌های منطقه مورد مطالعه (تمرکز عنصر Na با افزایش مقادیر عنصر Mg افزایش می‌یابد).

Fig. 20. Plot of Na versus Mg values for all types of dolomites in the study area (the concentration of Na increases with higher values of Mg).

مدل دولومیتی‌شدن دولومیت‌های اولیه (D1): با

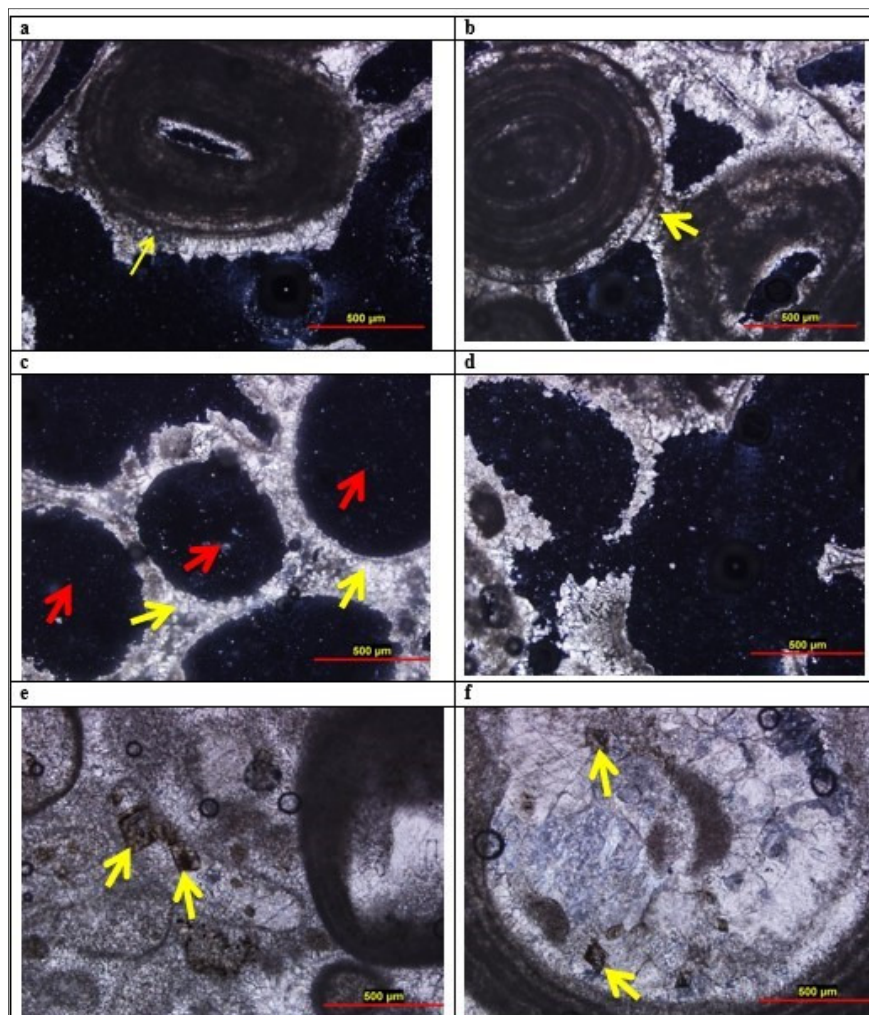
توجه به فابریک و اندازه خیلی ریزبلورهای دولومیت، حفظ بافت‌های اولیه رسوبی، نظیر اینتراکلیست‌ها، لامینه‌های جلبیکی و فابریک فنسترال، عدم فسیل و کانی‌های تبخیری و همچنین نبود شواهدی که نشان‌دهنده تشکیل آن‌ها تحت تأثیر فرایندهای دیاژنتیکی تأخیری باشد به نظر می‌رسد که دولومیت‌های نوع اول (دولومیکرایت‌ها) تحت شرایط سطحی، دمای پایین و در محیط بین جزرومدی تشکیل شده باشند (رجوع شود به شکل‌های ۶ و ۷) (وارن ۲۰۰۰؛ گرگ و شلتون ۱۹۹۰؛ دیلورتو و همکاران، ۲۰۱۹؛ لیانگ و همکاران، ۲۰۲۳؛ زائو و همکاران، ۲۰۲۵؛ نی و همکاران، ۲۰۲۵). به نظر می‌رسد که برای دولومیت شدن اولیه و یا همزمان با رسوب‌گذاری، تنها منشأ منیزیم، آب دریا است (لند، ۱۹۸۵). این منشأ تنها برای دولومیت‌های نوع ۱ در نظر گرفته می‌شوند که در نزدیک سطح و تحت شرایط دمای پایین در یک پهنه جزرومدی و احتمالاً در اثر پمپاژ آب دریا به این پهنه تشکیل شده‌اند (آدابیف، ۲۰۰۹؛ دیلورتو و همکاران، ۲۰۱۹؛ احمد و همکاران، ۲۰۲۲؛ لی و همکاران، ۲۰۲۴؛ بی‌بی و همکاران، ۲۰۲۵). از نظر شواهد زمین‌شیمی عنصری، دولومیت‌های اولیه دارای تمرکز بیشتری از عناصر استرانسیم (Sr) نسبت به دولومیت‌های ثانویه می‌باشند که این موضوع به دلیل تغییر در فابریک بلورهای دولومیت می‌باشد. همچنین در دولومیت‌های اولیه تمرکز عناصر سدیم (Na) و منیزیم (Mg) نسبت به دولومیت‌های ثانویه بیشتر است (به جدول ۱ رجوع شود).

مدل دولومیتی‌شدن دولومیت‌های ثانویه (D2, D3, D4):

دولومیت‌های نوع دوم (D2) و سوم (D3) مربوط به پهنه مخلوط آب شور و آب جوی می‌باشند. وجود تخلخل قالبی گسترده، سیمان‌های کلسیت هم‌بعد آب شیرین، سیمان‌های محیط وادوز آب شیرین، دولومیت‌های دانه‌شکری منظم و روشن و همچنین دولومیت‌های متوسط‌بلور (دولومیکرواسپارایت‌ها) طی تدفین کم‌عمق از شواهد مدل دولومیتی‌شدن نوع مخلوط در نهشته‌های سازند گچسازان می‌باشند (شکل ۲۱). این مدل مربوط به دولومیکرواسپارایت‌ها^۱ و دولواسپارایت‌ها^۲ می‌باشد. در این مدل سیالات دولومیت‌ساز از آمیختگی آب دریا با آب‌های جوی زیرسطحی نتیجه شده‌اند (هندشاو و همکاران،

۱۹۷۱؛ بدیع‌الزمانی، ۱۹۷۳؛ رحیمی و همکاران، ۲۰۱۶؛ رحیمی و آدابی، ۲۰۱۶؛ پتراش و همکاران، ۲۰۲۱؛ زائو و همکاران، ۲۰۲۵؛ نی و همکاران، ۲۰۲۵). آب‌های زیرزمینی جوی اشباع از CO_2 با آب دریا مخلوط می‌شوند و محلول حاصل از دید CaCO_3 حالت غیر اشباع و از دید دولومیت حالت فوق اشباع دارد (آدابی، ۱۳۹۰؛ پتراش و همکاران، ۲۰۲۱؛ جان‌جوهان و همکاران، ۲۰۲۱). در تشخیص دولومیت‌های پهنه مخلوط با توجه به بافت‌ها و ساخت‌های سنگ‌شناسی می‌توان به انحلال گسترده و ایجاد تخلخل قالبی تشکیل سیمان کلسیتی هم‌بعد آب شیرین و سیمان‌های خاص محیط وادوز و تشکیل دولومیت‌ها در رخساره الیید گرینستون اشاره کرد (شکل ۲۱). مدل دولومیتی شدن مخلوط آب شور و شیرین (مدل دورگ) در نزدیکی سطح و در سنگ‌های کربناته که با تبخیری‌ها همراه نیستند صورت می‌گیرد. مخلوط شدن آب‌های زیرزمینی متئوریک با حداکثر ۳۰ درصد آب دریا سبب تحت اشباع شدن محلول نسبت به فاز کلسیت شده ولی برای فاز دولومیت اشباع‌شدگی افزایش می‌یابد. بنابراین دولومیتی شدن برای مناطق مخلوط آب دریا با آب متئوریک، جایی که درجه شوری کاهش می‌یابد و لیکن نسبت Mg/Ca ثابت می‌ماند پیش‌بینی می‌شود (بدیع‌الزمانی، ۱۹۷۳). در این مدل Mg^{+2} از آب دریا مشتق می‌شود و حرکت آب زیرزمینی، سیال‌های سازنده‌ی دولومیت را به داخل سنگ‌های آهکی پمپاژ می‌کند و سبب شکل‌گیری دولومیت‌های زون مخلوط می‌شود. مدل دولومیتی شدن دولومیکرواسپارایت‌ها و دولومیت‌های دانه شکری به این مدل نسبت داده می‌شود (آدابی، ۲۰۰۹؛ رحیمی و آدابی، ۲۰۱۶؛ رحیمی و همکاران، ۲۰۱۶). منشأ اصلی منیزیم در این مدل آب دریا است (بدیع‌الزمانی، ۱۹۷۳؛ گابلون و ویتاکر، ۲۰۱۶؛ احمد و همکاران، ۲۰۲۲). از نظر شواهد زمین‌شیمی عنصری، دولومیت‌های ثانویه دارای تمرکز بیشتری از عناصر آهن (Fe) و منگنز (Mn) نسبت به دولومیت‌های اولیه می‌باشند که این موضوع به دلیل شرایط احیاء (تدفینی) برای دولومیت‌های ثانویه است. همچنین در دولومیت‌های ثانویه تمرکز عناصر استرانسیم (Sr) و منیزیم (Mg) نسبت به دولومیت‌های اولیه کمتر است (به جدول ۱ رجوع شود).

^۲ Dolosparite^۱ Dolomicrosparite



شکل ۲۱. شواهد انحلال و توسعه سیمان‌ها در محیط وادوز آب شیرین. a: تشکیل سیمان آویزه‌ای در زیر دانه الیید. b: تشکیل سیمان هاله‌ای بین دانه‌ها. c: انحلال در دانه‌های الیید آراگونیتی (پیکان‌های قرمز) و تشکیل سیمان کلسیت متئوریک در بین دانه‌ها (پیکان‌های زرد). d: انحلال گسترده در ریزر خساره گرینستون الییدی. e و f: دولومیت‌های گسترش یافته در ریزر خساره الیید گرینستون را نشان می‌دهند (پیکان‌های زرد رنگ).

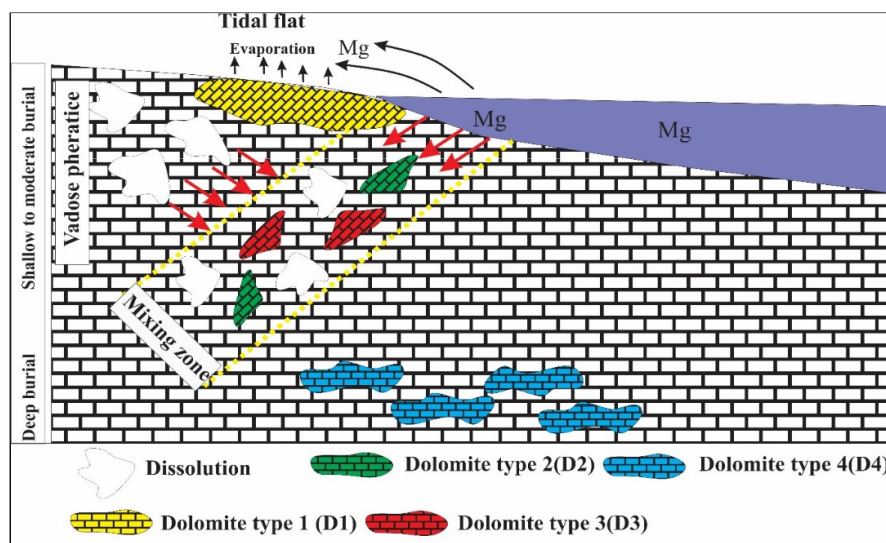
Fig. 21. Evidence of dissolution and development of cements in fresh water vadose environment. a: The formation of pendant cement under the grain. b: The formation of meniscus cement between grains. c: dissolution in aragonite ooides grains (red arrows) and formation of meteoric calcite cement between the grains (yellow arrows). d: Extensive dissolution in the ooid grainstone microfacies. E and f show dolomites extending into the grainstone ooids microfacies (yellow arrows).

به محیط‌های دیاژنزی دیگر دارد (وستفال، ۲۰۰۶؛ ون‌بوچم و همکاران، ۲۰۱۰؛ رئونینگ و همکاران، ۲۰۲۲). نوع تخلخل قالبی نتیجه‌ای از حذف انتخابی، عمدتاً توسط انحلال، دانه‌ها به عنوان مثال فسیل‌ها یا الییدها می‌باشد که بطور ثانویه در طی دیاژنوز جوی و تدفینی ایجاد می‌شود (فلوگل، ۲۰۱۰؛ رئونینگ و همکاران، ۲۰۲۲). در نمونه‌های مورد مطالعه پدیده انحلال و گسترش تخلخل در رخساره‌های مربوط به محیط وادوز به فراوانی دیده می‌شود و لذا می‌توان گفت مهم‌ترین پدیده غالب دیاژنزی در محیط

از مهم‌ترین فرآیندهای تاثیرگذار بر روی جریان سیال، مقادیر تراوایی و ویژگی‌های فیزیک سنگ می‌باشد (لانگمن، ۱۹۸۰؛ هالیس و همکاران، ۲۰۱۷؛ اسدی و همکاران، ۲۰۱۸؛ سالی‌فو و همکاران، ۲۰۲۱؛ زائو و همکاران، ۲۰۲۵؛ نی و همکاران، ۲۰۲۵). فرآیند انحلال در محیط‌های دیاژنزی متئوریک وادوز و محیط فریاتیک، زون مخلوط، محیط‌های دیاژنزی دفنی و در اثر انحلال فشاری نیز رخ می‌دهد (لانگمن، ۱۹۸۰؛ مور، ۱۹۸۹) ولی در محیط‌های دیاژنزی وادوز متئوریکی، به‌مراتب گسترش بیشتر نسبت

می‌شوند می‌توانند به طور موضعی بلورهای موزاییکی شکل‌دار با مرزهای مسطح تشکیل دهند (مازالو، ۱۹۹۲). دولومیت‌های نوع چهارم به مدل دیاژنز تدفینی نسبت داده می‌شوند (احمد و همکاران، ۲۰۲۲). این نوع از دولومیت‌ها آخرین نسل از دولومیت‌هایی هستند که در سازند گچساران تشکیل شده‌اند و با توجه به تشکیل آن‌ها در شرایط احیاء در شبکه بلورین خود مقادیر آهن (Fe) و منگنز (Mn) بیشتری نسبت به سایر دولومیت‌ها دارند (دیلورتو و همکاران، ۲۰۲۱). در نهایت با توجه به شواهد پتروگرافی و ژئوشیمیایی، دولومیت‌های سازند گچساران را می‌توان از مدل جزرومدی، مخلوط و سپس دفن کم عمق تا متوسط و عمیق در نظر گرفت (شکل ۲۲).

وادوز انحلال گسترده و توسعه تخلخل می‌باشد (شکل ۲۱ - c و d). به نظر می‌رسد دولومیت‌های نوع چهارم (D4) از نظر زمانی آخرین نسل از دولومیت‌ها باشند که در نمونه‌های سازند گچساران شکل گرفته‌اند و به صورت سیمان دولومیتی تخلخل حاصل از شکستگی‌ها را پر کرده‌اند. نمونه بارز این نوع از دولومیت‌ها نوع زین‌اسبی (باروک) بوده که بافت غیرمسطح، سطوح و کلیواژ منحنی و خاموشی موجی نشان می‌دهند (رجوع شود به اشکال ۱۲ و ۱۳) که حاکی از تشکیل آن‌ها در دمای بیش از ۶۰ درجه سانتی‌گراد است (گرگ و شلتون، ۱۹۹۰؛ آدابی، ۲۰۰۹؛ دیلورتو و همکاران، ۲۰۲۱؛ زائو و همکاران، ۲۰۲۵؛ نی و همکاران، ۲۰۲۵). در برخی موارد سیمان‌های دولومیتی حفره پرکن که در دمای بالاتر از حد بحرانی تشکیل



شکل ۲۲. مدل دولومیتی‌شدن سازند گچساران در منطقه مورد مطالعه (بدون مقیاس).

Fig. 22. Dolomitization model of Gachsaran Formation in the study area (no scale)

۶- نتیجه‌گیری

سیمان‌های محیط وادوز آب شیرین (مانند سیمان‌های آویزه‌ای و هلاله‌ای)، دولومیت‌های دانه‌شکری منظم و روشن و همچنین دولومیت‌های متوسط‌بلور (دولومیکرواسپارایت-ها) طی تدفین کم‌عمق از شواهد مدل دولومیتی شدن نوع مخلوط (دورگ) در نهشته‌های سازند گچساران می‌باشند. حفظ بافت‌های اولیه رسوبی، نظیر اینتراکلیست‌ها، لامینه‌های جلبیکی و فابریک فنسترال، عدم فسیل و کانی‌های تبخیری، تمرکز بالایی از عناصر Sr و Mg و کاهش تمرکز غلظت عناصر Fe و Mn بیانگر تشکیل دولومیت‌های نوع اول در محیط جزرومدی است. دولومیت‌های درشت‌بلور با تمرکز بالایی از Fe و Mn و کاهش مقادیر Sr و Mg در آن‌ها

بر اساس شواهد پتروگرافی و آنالیز عنصری نمونه‌های یک برش از سازند گچساران در ناودیس افرینه چهار گروه از دولومیت‌ها شناسایی شدند (دولومیت‌های ریزبلور (نوع اول)، متوسط‌بلور (نوع دوم)، درشت‌بلور (نوع سوم) و خیلی درشت‌بلور نوع باروک پرکننده شکستگی‌ها (نوع چهارم). مکانیسم دولومیتی‌شدن برای دولومیت‌های نوع اول به محیط جزرومدی، دولومیت‌های نوع دوم و سوم پهنه مخلوط آب شور و آب شیرین (جوی) و دولومیت‌های نوع چهارم مدل تدفینی در نظر گرفته می‌شود. وجود تخلخل قالبی گسترده، سیمان‌های کلسیت هم‌بعد آب شیرین،

- Bahroudi, A., Koyi, H. A. (2004) Tectono-sedimentary framework of the Gachsaran Formation in the Zagros foreland basin. *Marine and Petroleum Geology*, 21: 1295–1310.
- Bathurst, R. G. C. (1975) Carbonate Sediments and their Diagenesis: Developments in Sedimentology. 2nd Edition, Elsevier, Amsterdam, 12: 658 p.
- Bibi, I., Amin, A., Haese, R. R., Niazi, N. K. (2025) Unraveling dolomite dissolution stoichiometry in circumneutral to alkaline pH environments. *Acta Geochim.* <https://doi.org/10.1007/s11631-025-00758-x>.
- Blatt, H., Middleton, G. V., Murray, R. C. (1980) *Origin of Sedimentary Rocks*: 2nd ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. P: 514.
- Bontognali, T. R. R., McKenzie, J. A., Warthmann, R. J., Vasconcelos, C. (2014) Microbially influenced formation of Mg-calcite and Ca-dolomite in the presence of exopolymers produced by sulphate-reducing bacteria. *Terra Nova*, 26: 72–77.
- Borgomano, J., Lanteaume, C., Leonide, P., Fournier, F., Montaggioni, L. F., Masse, J. P. (2020) Quantitative carbonate sequence stratigraphy: Insights from stratigraphic forward models. *AAPG Bulletin*, 104(5): 1115–1142.
- Callen, J. M. (2016) In Situ Geochemistry of Middle Ordovician Dolomites of the Upper Mississippi Valley: Evaluation of the Dorag Model and New Implications for Dolomitizing Fluids: Master dissertation, Louisiana State University, 88 p.
- Choquette, P. W., James, N. P. (1990) Limestones: the burial diagenetic environment. In: McIlreath, I.A., & Morrow, D.W. (eds.), *Diagenesis*. Geological Association of Canada, Geoscience Canada, Reprint Series, 4: 75–111.
- Daniel, G., Meister, R. P. (2020) Authigenic formation of Ca–Mg carbonates in the shallow alkaline Lake Neusiedl, Austria. *Biogeosciences*, 17: 2085–2106.
- Dickson, J. A. D. (1965) A modified staining technique for carbonate in the thin section: *Nature*, 205: 587.
- Diloreto, Z. A., Bontognali, T. R. R., Al Disi, Z. A., Al-Kuwari, H. A. S., Williford, K. H., Strohmenger, C. J., Sadooni, F., Palermo, C., Rivers, J. M., McKenzie, J. A., Tuite, M., Dittrich, M. (2019) Microbial community composition and dolomite formation in the hypersaline microbial mats of the Khor Al-Adaid sabkhas, Qatar. *Extremophiles*, 23: 201–218.
- Diloreto, Z. A., Garg, S., Bontognali, T. R. R., Dittrich, M. (2021) Modern dolomite formation caused by seasonal cycling of oxygenic phototrophs and anoxygenic phototrophs in a hypersaline sabkha. *Science Reports*, 11: 4170.
- Emami, H. (2008) Foreland Propagation of Folding and Structure of the Mountain Front Flexure in the Push t-E-Kuh Arc (Zagros, Iran). University at de Barcelona, Barcelona.
- Fang, Y., Xu, H. (2022) Dissolved silica-catalyzed disordered dolomite precipitation. *Am. Mineral.*, 107: 443–452.

بیانگر تشکیل این دولومیت‌ها در طی دیاژنز تدفینی و شرایط احیاء می‌باشد به گونه‌ای که پس از رنگ‌آمیزی با آلزارین قرمز و فروسیانید پتاسیم به رنگ آبی فیروزه‌ای ظاهر شده‌اند. این گروه از دولومیت‌ها (درشت بلور نوع باروک) آخرین نسل از دولومیت‌ها می‌باشند که در سازند گچساران در منطقه مورد مطالعه تشکیل شده‌اند.

References

- Adabi, M. H. (2009) Multistage dolomitization of upper Jurassic Muzduran Formation, Kopet-Dagh basin, N.E. Iran: Carbonate Evaporates, 24: 16–32.
- Adabi, M. H. (2011) Sedimentary geochemistry. Arian Zamin publication. Second edition. 503p. (in Persian)
- Adabi, M. H., Rao, C. P. (1996) Petrographic, element and isotopic criteria for Central Iran: Iranian Petroleum Institute, 15: 561–574.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B., Wortel, R. (2011) Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine*, 148: 692–725.
- Ahmad, I., Shah, M. M., Janjuhah, H. T., Trave, A., Antonarakou, A., Kontakiotis, G. (2022) Multiphase Diagenetic Processes and Their Impact on Reservoir Character of the Late Triassic (Rhaetian) Kingriali Formation, Upper Indus Basin, Pakistan. *Minerals*, 12: 1049.
- Al-Aasm, I. S., Packard, J. J. (2000) Stabilization of early-formed dolomite, a tale of divergence from two Mississippian dolomites: *Sedimentary Geology*, 131: 97–108.
- Amiri-Bakhtiar, H., Nouraei-Nezhad, M. R. (2022) Stratigraphy of Zagros. Publication of the National Iranian South Oil Company. 390p. (in Persian)
- Assadi, A., Honarmand, J., Moallemi, S. A., Abdollahie-Fard, I. (2016) Depositional environments and sequence stratigraphy of the Sarvak Formation in an oil field in the Abadan Plain, SW Iran. *Facies*, 62(4): 1–22.
- Assadi, A., Rahimpour-Bonab, H., Kadkhodaie-Ilkhchi, R. (2018) Integrated rock typing of the grainstone facies in a sequence framework: a case from the Jurassic Arab formation in the Persian Gulf. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 92(4): 1432–1450.
- Azmy, K., Veizer, J., Misi, A., de Oliveira, T. F., Sanches, A. L., Dardenne, M. A. (2001) Dolomitization and isotope stratigraphy of the Vazante formation, São Francisco Basin, Brazil: *Precambrian Research*, 112(3): 303–329.
- Azomani, E., Azmy, K., Blamey, N., Brand, U., Al-Aasm, I. (2013) Origin of Lower Ordovician dolomites in eastern Laurentia: Controls on porosity and implications from geochemistry: *Marine and Petroleum Geology*, 40: 99–114.
- Badiozamani, K. (1973) The dorag dolomitization model- application to the middle Ordovician of Wisconsin. *J. Sedimentology*, 965–984.

- Flügel, E. (2010) *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis Interpretation and Application*. Springer-Verlag, Berlin, 976p.
- Folk, R. L. (1965) Some aspects of recrystallization in ancient limestones. In: Pray, L.C. and Murray, R. C. (eds.): *Dolomitization and limestone diagenesis*. Society of Economic Paleontologist and Mineralogists. Special Publication, 13: 14-48.
- Gabellone, T., Whitaker, F. (2016) Secular variations in seawater chemistry controlling dolomitization in shallow reflux systems: Insights from reactive transport modelling. *Sedimentology*, 63(5): 1233-1259. <https://doi.org/10.1111/sed.12259>.
- Geske, A., Zorlu, J., Richter, D. K., Buhl, D., Niedermayr, A. and 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, *Chemical Geology*, 332-333: 45-64.
- Ghorbani, M. (2015) *Stratigraphy of Iran*. Arian Zamin Publication, 330 pp. (in Persian).
- Gill, W. D., Ala, M. A. (1972) *Sedimentology of Gachsaran Formation (lower Fars series)*, Southwest Iran. *AAPG Bulletin*, 56: 1965-1975.
- Giorgioni, M., Iannace, A., Damore, M., Dati, F., Galluccio, L., Guerriero, V. (2016) Impact of early dolomitization on multi-scale petrophysical heterogeneities and fracture intensity of low-porosity platform carbonates (Albian-Cenomanian, southern Apennines, Italy). *Marine and Petroleum Geology*, 73: 462-478.
- Gregg, J. M., Shelton, K. L. (1990) Dolomitization and Dolomite Neomorphism in the Back Reef Facies of the Bonnetterre and Davis Formations (Cambrian), Southeastern Missouri. *Journal of Sedimentary Research*, 60: 549-562.
- Gregg, J. M., Sibley, D. F. (1984) Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture: *Journal of Sedimentary Petrology*, 54: 908-931.
- Gregg, J. M., Bish, D. L., Kaczmarek, S. E., Machel, H. G. (2015) Mineralogy, nucleation and growth of dolomite in the laboratory and sedimentary environment: a review. *Sedimentology*, 62: 1749-1769.
- Guo, C., Chen, D., Qing, H., Dong, S., Li, G., Wang, D. (2016) Multiple dolomitization and later hydrothermal alteration on the Upper Cambrian-Lower Ordovician carbonates in the northern Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 72: 295-316.
- Handshow, B. B., Back, W., Deik, R. G. (1971) A geochemical hypothesis of dolomitization by ground water. *Economic Geology*, 66: 710-724.
- Hollis, C., Lawrence, D. A., de Periere, M. D., Al Darmaki, F. (2017) Controls on porosity preservation within a Jurassic oolitic reservoir complex, UAE. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 888-906.
- Hou, Y., Azmy, K., Berra, F., Jadoul, F., Blamey, N. J. F., Gleeson, S. A., Brand, U. (2016) Origin of the Breno and Esino dolomites in the western southern Alps (Italy): implications for a volcanic influence: *Marine and Petroleum Geology*, 69: 38-52.
- Hu, W., Chen, Q., Wang, X., Cao, J. (2010) REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs: *Oil Gas Geology*, 31(6): 810-818.
- James, N. P., Jones, B. (2015) *Origin of Carbonate Sedimentary Rocks*, Wiley, American Geophysical Union, 464 p.
- Janjuhah, H. T., Kontakiotis, G., Wahid, A., Khan, D. M., Zarkogiannis, S. D., Antonarakou, A. (2021) Integrated Porosity Classification and Quantification Scheme for Enhanced Carbonate Reservoir Quality: Implications from the Miocene Malaysian Carbonates. *J. Marine Science Engineering*, 9: 1410.
- Janjuhah, H. T., Alansari, A. (2020) Offshore carbonate facies characterization and reservoir quality of Miocene rocks in the southern margin of South China Sea. *Acta Geologica Sienica-England. Edition*.
- Jones, R. W., Racey, A. (1994) Cenozoic stratigraphy of the Arabian Peninsula and Gulf. In: Simmons, M. D. (Ed.), *Micropaleontology and Hydrocarbon Exploration in the Middle East*. Chapman and Hall, London, 273-303.
- Kirmaci, M. Z. (2008) Dolomitization of the late Cretaceous-Paleocene platform carbonates, Golkoy (Ordu), eastern Pontides, NE Turkey: *Sedimentary Geology*, 203: 289-306.
- Kell-Duivesteyn, I. J., Baldermann, A., Mavromatis, V., Dietzel, M. (2019) Controls of temperature, alkalinity and calcium carbonate reactant on the evolution of dolomite and magnesite stoichiometry and dolomite cation ordering degree—an experimental approach. *Chemical Geology* 529: 119292.
- Land, L. S. (1985) The origin of massive dolomite: *Journal of Geological Education*, 33: 112-125.
- Liaghat, M., Adabi, M. H., Nuraei Nezhad, M. R., Eghbalpour, E. (2020) Structural interpretation, diagenesis and depositional environment of the Gachsaran Formation with emphasized on member 1 in Gachsaran oil field, south Dezful embayment. *Applied Sedimentology*, 8(16): 68-92.
- Liang, P., Bao, Z. A., Yang, W. Q., Zong, C. L., Chen, K. Y., Zhang, Y., Yuan, H. L. (2023) A natural calcite reference material for microbeam Sr isotope analysis. *J. Anal. At. Spectrom*, 38: 414-421.
- Li, X., Zhang, Q., Chen, A., Wang, X. (2024) CO₂ bubble formation on dolomite surface and its

- influence on surface wettability and flotation of dolomite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 60(3): 190254. [https://doi: 10.37190/ppmp/190254](https://doi.org/10.37190/ppmp/190254).
- Liu, D., Xu, Y., Papineau, D., Yu, N., Fan, Q., Qiu, X., Wang, H. (2019) Experimental evidence for abiotic formation of low-temperature protodolomite facilitated by clay minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 247: 83–95.
- Longman, M. W. (1980) Carbonate diagenetic textures from nearsurfacediagenetic environments. *AAPG Bulletin*, 64: 461–487.
- Lukoczki, G., Haas, J., Gregg, J. M., Machel, H. G., Kele, S., John, M. C. (2018) 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.
- Mazzollo, S. J. (1992) Geochemical and neomorphic alteration of dolomite: a review: Carbonates and Evaporites, 7: 21–37.
- Moore, C. H. (1989) Carbonate Diagenesis and porosity. Elsevier, Amsterdam. 338pp. *Sediment.* 9 No, 26: 511p. Black well Science Oxford.
- Motiei, H. (2003) Geology of Iran (Zagros stratigraphy), publication of the geological organization, 583 P. (in Persian).
- Ni, L., Lv, J., Lingyu Kong, L., Qin, L. (2025) Effects of Sodium Silicate on Flotation Separation of Sphalerite and Dolomite and Its Mechanism. *Minerals*, 15(1): 82; <https://doi.org/10.3390/min15010082>.
- Petrash, D. A., Bialik, O. M., Staudigel, P. T., Konhauser, K. O., Budd, D. A. (2021) biogeochemical reappraisal of the freshwater–seawater mixing-zone diagenetic model. *Sedimentology*, 68: 1797–1830.
- Pina, C. M., Pimentel, C., Crespo, A. (2020) Dolomite cation order in the geological record. *Chemical Geology*, 547: 119667.
- Pina, C. M., Pimentel, C., Crespo, A. (2022) The dolomite problem: a matter of time. *ACS Earth Space Chem.*, 6: 1468–1471.
- Pirouz, M., Simpson, G., Chiaradia, M. (2015) Constraint on foreland basin migration in the Zagros mountain belt using Sr isotope stratigraphy. *Basin Res.*, 27: 714–728.
- Rahimi, A., 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.
- Rahimi, A., Adabi, M. H., Aghanabati, A., Majidifard, M. R., 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.
- Reuning, L., Deik, H., Petrick, B., Auer, G., Takayanagi, H., Iryu, Y., Courtillot, M., Bassetti, M. A. (2022) Contrasting intensity of aragonite dissolution and dolomite cementation in glacial versus interglacial intervals of a subtropical carbonate succession. *Sedimentology*, 69: 2131–2150.
- Salifou, I. A. M., Zhang, H. Boukari, I. O., Harouna, M., Cai, Z. (2021) New vuggy porosity models-based interpretation methodology for reliable pore system characterization, Ordovician carbonate reservoirs in Tahe Oilfield, North Tarim Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, (196): 63–79.
- Salari sargaro, S. H., Rezaei, P. (2015) Study of the lithology and depositional environment of the Gachsaran Formation west of Banda Abbas (Khamir salt mountain section). *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 31(2): 21–34.
- Sibley, D. F., Gregg, J. M. (1987) Classification of dolomite rock textures. *J. Sediment. Petrol.*, 57: 967–975.
- Shunli, Z., Zhengxiang, L. V., Yi, W., Sibing, L. (2018) Origins and Geochemistry of Dolomites and Their Dissolution in the Middle Triassic Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin, China. *Mineral*, 8: 289. [https://doi:10.3390/min8070289](https://doi.org/10.3390/min8070289).
- Shuster, A., Wallace, M., Hood, A., Jiang, G. (2018) The Tonian Beck Spring Dolomite: Marine dolomitization in a shallow, anoxic sea. *Sedimentary Geology*, 368: 83–104.
- Suarez-Gonzalez, P., Benito, M. I., Quijada, I. E., Mas, R., Campos-Soto, S. (2019) "Trapping and binding": a review of the factors controlling the development of fossil agglutinated microbialites and their distribution in space and time. *Earth-Science Reviews*, 194: 182–215.
- Taghdisi Nikbakht, S., Nasiri, Y., Sedaghatnia, M. (2024) Petrography and initial mineralogy of carbonate units of the Gachsaran Formation based on elemental geochemistry (Lorestan sedimentary basin, south of the Khorramabad). *Iranian journal of Crystallography and Mineralogy*, 33: (102).
- Tucker, M. E., Wright, V. P. (1990) Carbonate Sedimentology: Blackwell, Oxford, 482 p.
- Tucker, M. E., Wright, V. P. (1991) Carbonate Sedimentology. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 482p.
- Van Buchem, F. S. P., Allan, T., Lausen, G. V., Lotfpour, M., Moallemi, A., Monibi, S., Motiei, H., Pickard, N., Tahmasbi, A. R., Vedrenne, V., Vincent, B. (2010) Regional stratigraphic architecture and reservoir types of the Oligo-Miocene deposits in the Dezful Embayment (Asmari and Pabdeh Formations) SW Iran, 329.

- Geology Society, London. Special Publication, 219-263.
- Verges, J., Emami, H., Garces, M., Beamud, E., Homke, S., Skott, P. (2019) Zagros foreland fold belt timing across Lurestan to constrain Arabia-Iran collision. In: Saein, A. (Ed.), Tectonic and Structural Framework of the Zagros Fold-Thrust Belt. Elsevier, 29-52.
- Wang, G., Li, P., Hao, F., Zou, H., Yu, X. (2015) Dolomitization process and its implications for porosity development in dolostones: A case study from the Lower Triassic Feixianguan Formation, Jiannan area, Eastern Sichuan Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 131: 184-199. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.04.011>.
- Warren, J. K. (2000) Dolomite: occurrence, evolution and economically important association: *Earth Science Reviews*, 52: 1-81.
- Westphal, H. (2006) Limestone – Marl alternation as environmental archives and the role of early diagenesis: a critical review. *International Journal of Science (Geology Rundsch)*, 95: 947-961.
- Whitaker, F. F., Smart, P. L., Jones, G. (2004) Dolomitization From conceptual to numerical models: Geological Society, London, Special Publications, 235(1): 99-139.
- Ying, R., Dakang, Z., Chonglong, G., Queqi, Y., Rui, X., Langbo, J., Yangjinfeng, J., Ningcong, Z. (2017) Dolomite geochemistry of the Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Sichuan Basin: Implication for dolomitization and reservoir prediction. *Petroleum Research*, 2: 64-76.
- Zhang, X., Hu, W., Jin, Z., Zhang, J., Qian, Y., Zhu, J., Zhu, D., Wang, X., Xie, X. (2008) REE compositions of Lower Ordovician dolomites in Central and North Tarim Basin, NW China: A potential REE proxy for ancient seawater: *Geology Sinica*, 82(3): 610-621.
- Zhao, Y. Y., Wei, X. Y., Gao, X., Guo, N., Li, J., Hu, K. M., Han, C., Wang, Q. Y., Han, Z. Z. (2025) A comparison of the proto-dolomite induced by cyanobacteria and halophilic bacteria: implications for dolomite-inducing microbe identification. *Journal of Palaeogeography*, 14(1): 277-290.
- Zhao, C., Yu, B., Zhang, C., Chen, Y., Qi, X. (2012) A discussion on the formation mechanism of dolomite associated with hydrothermal solution in Tazhong area: *Petrology and Mineralogy*, 31(2): 164-172.