https://jssr.ui.ac.ir/?lang=en
Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches
e-ISSN: 2423-8007
Vol. 43, Issue 1, No. 106, 2027, 87-110
Received: 01.05.2026 Accepted: 15.07.2026

Research Paper

Analysis of diagenetic systems of the carbonate deposits of the Ilam Formation (Khorramabad Anticline) based on elemental geochemistry

Yaghub Nasiri*
Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Gonabad, Gonabad, Iran
y.nasiri.1365@gmail.com
Samira Taghdisi Nikbakht
Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Gonabad, Gonabad, Iran
Mostafa Sedaghatnia
PhD Graduate, Central Laboratory Expert of Lorestan University, Khorramabad, Iran

Abstract
The aim of this study is to investigate the original mineralogy and the type of diagenetic systems in the carbonate units of the Ilam Formation (Cretaceous) in the Khorramabad Anticline. In this section, the Ilam Formation is 121 meters thick and consists of fine-grained argillaceous limestones. Its lower boundary with the Surgah Formation is disconformable and stained with iron oxide, while its upper boundary with the Gurpi Formation is conformable. In this study, 14 samples were analyzed using the EDX method. The trend of Sr versus Na and Mn variations shows that the studied samples fall within or adjacent to the field of Ordovician aragonitic limestones of Gordon, Tasmania, and follow a similar trend. The trend of Mn versus Sr variations in the studied samples indicates that these samples fall within the same field as the original aragonitic mineralogy of the Mozduran Formation limestones, whi ch provides evidence for an original aragonitic mineralogy of the Ilam Formation limestones in the studied section. The low Sr/Mn ratio (mean 18.4 ppm) and Sr/Ca ratio (mean 11.9ppm), the low Fe (mean 79.1ppm) and Mn (mean 39.4 ppm) values, the relatively high Sr concentration (mean 424.1- ppm) in the studied samples, and the plotting of Sr/Ca versus Mn, Mg, and Fe values indicate a closed to slightly open diagenetic system with low to medium water–rock exchange for the carbonates of the Ilam Formation.
Keywords: Ilam Formation, Geochemistry, Khorramabad Anticline, Lorestan

Introduction

The Albian–Campanian sedimentary succession, comprising the Kazhdumi, Sarvak, Surgah, and Ilam formations in the Zagros area, has been defined as the Bangestan Group, named after Bangestan Mountain north of Behbahan (James and Wynd 1965). The type section of the Ilam Formation was selected and measured in Tang-e Garab, located on the southwestern flank of Surgh Mountain, in the northwestern plunge of Kabir Kuh, 12 km south of Ilam city (James and Wynd 1965). In this section, the Ilam Formation consists of 190 m of grey, fine-grained, argillaceous pelagic limestones with regular bedding and thin shale interbeds, and is of Santonian–Campanian age (Motiei 2003). The lower contact of the Ilam Formation at the type section is with the Surgah Formation. The limestones at the base of the Ilam Formation in this contact are sandy and silty, and contain hematite nodules and cylinders, which may indicate the presence of an erosional unconformity. From Lorestan towards the southeastern areas, where the Surgah Formation pinches out, the Ilam Formation rests directly on the Sarvak Formation with an unconformity. In the Anaran Mountain area, located southwest of Lorestan, the Ilam succession from top to bottom consists of pelagic and neritic deposits overlying the Surgah Formation (Motiei 2003). The upper contact of the Ilam Formation is with the Gurpi Formation, which appears to be conformable. In general, the lower and upper boundaries of the Ilam Formation are sharp, although locally they may be gradational. Such a gradational contact occurs when carbonate beds are developed within the Gurpi and Surgah formations (Motiei 2003).

Geochemical analysis data provide important information on depositional environmental conditions and diagenetic changes affecting sediments through time. The aim of this study is to analyze the diagenetic systems of the carbonate deposits of the Ilam Formation (Khorramabad Anticline) based on elemental geochemistry. This topic is important because the Ilam Formation, as one of the key carbonate units in the Zagros Basin, provides a suitable archive for

*Corresponding author
Nasiri Y. Taghdisi Nikbakht S. and Sedaghatnia M. (2027). Analysis of diagenetic systems of the carbonate deposits of the Ilam Formation (Khorramabad Anticline) based on elemental geochemistry. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 43(1): 87-110. https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329

2423-8007 / © 2026 University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

reconstructing depositional conditions and post-depositional evolution. The study of its elemental geochemistry in the Khorramabad Anticline can help identify the original mineralogy and the type and intensity of diagenetic systems, including meteoric, marine, or closed diagenesis. The investigation of major and trace elements can yield detailed evidence of geochemical changes, fluid flow, and carbonate recrystallization. Moreover, such a study plays an important role in understanding the diagenetic history of the basin by clarifying the geochemical controls on the evolution of the Ilam Formation.

Materials & Methods

A total of 121 fresh, unweathered rock samples were collected from calcareous lithostratigraphic units. After being transferred to the laboratory, thin sections were prepared from the samples. Then the thin sections were studied using an OLYMPUS–BH2 petrographic microscope. Facies nomenclature follows the classification of Dunham (1965). From among these samples, 14 mudstone samples with less than 10% allochems were selected for the preparation of 1 cm-thick sections and were analyzed for elemental composition using EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy). The samples were analyzed for elemental composition (EDX) at Central Laboratory of Lorestan University. Major elements (Ca, Mg) are reported as weight percent, while trace elements (Sr, Mn, Fe, Na) are reported in ppm. Analytical precision is 0.5% for major elements and ±5 ppm for trace elements. To determine the original mineralogy of the Ilam Formation carbonates in the studied section, major elements (Ca, Mg) and trace elements (Sr, Na, Fe, Mn) were used, by plotting these values against each other and comparing them with the ranges proposed by various researchers for the original mineralogy of carbonates (Milliman et al. 1974; Adabi and Rao 1991; Rao 1991; Adabi and Asadi-Mehmandosti 2008).

Discussion of Results & Conclusions

The Ilam Formation deposits in the studied section have a thickness of 121 meters and consist of argillaceous limestone. Calcium (Ca) concentrations in the studied samples range from 21.3% to 48.5% (mean 36.3%). Magnesium (Mg) concentrations range from 0.2% to 3.7% (mean 1.7%). Iron (Fe) concentrations in the studied samples range from 37 to 111 ppm (mean 79.1 ppm). Manganese (Mn) concentrations range from 10 to 81 ppm (mean 39.4 ppm). Strontium (Sr) concentrations range from 150 to 981 ppm (mean 424.1 ppm). Sodium (Na) concentrations range from 22 to 210 ppm (mean 104.3 ppm).

Strontium (Sr) values in the studied samples from the Ilam Formation in the Khorramabad section range from 150 to 981 ppm (mean 424.1 ppm). The decrease in strontium values in the studied samples compared to Holocene values (8000 to 1000 ppm) can be attributed to Sr loss during meteoric diagenesis (Adabi and Rao 1991). The variations in Sr versus Na values in the Ilam Formation limestones from the Khorramabad Anticline section have been compared with the following fields: the Mozduran Formation limestones (Upper Jurassic) from shallow-water settings (Adabi and Rao 1991); aragonitic limestones of the Gordon Group, Tasmania (Ordovician) (Rao 1990); Holocene tropical aragonites (Milliman et al. 1974); Holocene temperate carbonates of Tasmania (Rao and Adabi 1992; Rao and Amini 1995); and the Telezang Formation type section and the limestones of the Ilam Formation (Adabi and Asadi-Mehmandosti 2008). Most samples plot within the field of Ordovician tropical Gordon Group limestones of Tasmania (aragonitic precursor) and the Ilam Formation carbonates (calcitic precursor). The relatively lower strontium values in these samples compared to their Holocene counterparts suggest a mixed aragonitic and calcitic precursor mineralogy for the studied samples. The trend of Mn versus Sr/Na has been plotted. The Sr/Na ratio in the studied samples ranges from 1.04 to 32.31 (mean 8.1). Due to mineralogical similarity, the studied samples plot within or near the field of Holocene warm, shallow-marine aragonitic carbonates, which points to an aragonitic original mineralogy for the Ilam Formation limestones in the studied section. Most of the limestone samples analyzed from the studied section show Sr/Na > 1, indicating a mixed aragonitic and calcitic original mineralogy. Despite reducing conditions, the low iron and manganese values in the Ilam Formation samples can be explained by post-depositional and diagenetic processes, such as the mobilization of these elements by fluids or their oxidation due to changes in redox potential, resulting in their leaching. Furthermore, the possible formation of sulfide minerals (e.g., pyrite) may have prevented the accumulation of high concentrations of these elements in the sediments, even if the depositional environment had the necessary reducing potential. The abundance of pyrite in the Ilam Formation deposits may account for the depletion of elements such as iron in the studied samples. Moreover, low Fe and Mn concentrations in carbonates indicate a low sedimentation rate and limited input of detrital material into the basin (Adabi 2012). This process is consistent with the deposition of the Ilam Formation in a deep marine environment away from any detrital input. The average Sr/Ca ratios and low manganese values in the Ilam Formation samples from the studied section suggest a relatively closed to slightly open diagenetic system with low to moderate water/rock interaction. The Sr/Mn ratio plotted against Mn content shows that the studied samples plot within the fields of the Ilam Formation limestones (Adabi and Asadi-Mehmandosti 2008), the Telezang Formation carbonates (Zohdi et al. 2007), and the Fahliyan Formation carbonates (Adabi et al. 2010), all characterized by aragonitic precursor mineralogy.

The trend of Sr versus Na plotted against Mn indicates that the studied samples fall within or close to the field of Holocene warm, shallow-marine aragonitic limestones, suggesting an originally aragonitic mineralogy. The dissolution of allochem shells and the subsequent filling of the resulting voids by sparry calcite cement indicate that the allochem shells were soluble and originally had an aragonitic mineralogy. Most of the studied samples plot within the fields of the Ordovician tropical Gordon Group limestones of Tasmania (aragonitic precursor) and the Ilam Formation carbonates (calcitic precursor). Therefore, the original mineralogy of the Ilam Formation in the studied area is interpreted as a mixture of aragonite and calcite. The relatively lower strontium values in these samples compared with their Holocene equivalents suggest a mixed aragonitic and calcitic precursor mineralogy for the studied samples. The low Sr/Mn ratio (mean 18.4 ppm), low Sr/Ca ratio (mean 11.9 ppm), low Fe (mean 79.1 ppm) and Mn (mean 39.4 ppm) concentrations, relatively high Sr concentration (mean 424.1 ppm) in the studied samples, together with the cross-plots of Sr/Ca versus Mn, Mg, and Fe, indicate a closed to slightly open diagenetic system with low to moderate water-rock interaction for the Ilam Formation carbonates.

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329

پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی
سال چهل و سوم، شماره پیاپی ۱۰۶، شماره اول ۱۴۰۶، ص۸۷-۱۱۰
تاریخ وصول: ۱۴۰۵/۰۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۴

مقاله پژوهشی

تحلیل سیستم‌های دیاژنزی نهشته‌های کربناته سازند ایلام (تاقدیس خرم‌آباد) بر پایهٔ زمین‌شیمی عنصری

یعقوب نصیری، * استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکدهٔ علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران
y.nasiri.1365@gmail.com
سمیرا تقدیسی نیک‌بخت، استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکدهٔ علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران
samirataghdisi@gmail.com
مصطفی صداقت‌نیا، دانش‌آموختهٔ مقطع دکتری، کارشناس آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
mostafasedaghatnia@gmail.com

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی کانی‌شناسی اولیه و نوع سیستم‌های دیاژنزی واحدهای کربناتهٔ سازند ایلام (تورونین میانی- کامپانین پیشین) در تاقدیس خرم‌آباد است. در این برش، سازند ایلام با ستبرای ۱۲۱، عمدتاً از تناوب یکنواخت سنگ‌آهک‌های نازک تا متوسط‌لایه تشکیل شده است که مرز پایینی آن با سازند سورگاه از نوع ناپیوستهٔ آغشته به اکسید آهن و مرز بالایی آن با سازند گورپی پیوسته است. سازند ایلام در برش مطالعه‌شده از سه ریزرخسارهٔ کربناتهٔ مادستون، وکستون و پکستون حاوی روزن‌داران پلانکتون تشکیل شده است. در این پژوهش، ۱۴ نمونه به روش آنالیز EDX مطالعه شدند. روند تغییرات عنصر Sr به Na در برابر Mn نشان داد نمونه‌های مطالعه‌شده در محدودهٔ سنگ‌آهک‌های آراگونیتی دریاهای گرم عهد حاضر و یا در مجاورت آن، اما با روندی مشابه قرار می‌گیرند. روند تغییرات عنصر Sr در برابر Na نمونه‌های مطالعه‌شده نشان داد که این نمونه‌ها در محدودهٔ مشابه کانی‌شناسی اولیهٔ کربنات‌های آراگونیتی سازند مزدوران و ترکیب کلسیتی سازند ایلام و یا در مجاورت آنها با روندی مشابه قرار دارند که دلیلی بر کانی‌شناسی اولیهٔ مخلوط آراگونیتی و کلسیتی سازند ایلام در برش مطالعه‌شده است. پایین‌بودن نسبت Sr/Mn (میانگین ۱۸/۴۲ پی‌پی‌ام) و Sr/Ca (میانگین ۱۱/۹۴پی‌پی‌ام)، مقادیر پایین عناصر Fe (میانگین ۷۹/۱۴ پی‌پی‌ام) و Mn (میانگین ۳۹/۴۳ پی‌پی‌ام)، تمرکز به نسبت بالای Sr (میانگین ۴۲۴/۱۴ پی‌پی‌ام) در نمونه‌های مطالعه‌شده و ترسیم مقادیر Sr/Ca در برابر عناصر Mn,Mg, Fe، بیانگر یک سیستم دیاژنزی بسته تا کمی باز با تبادل آب به سنگ پایین تا متوسط برای کربنات‌های سازند ایلام است.

واژگان کلیدی: سازند ایلام، زمین‌شیمی، کرتاسه، لرستان.

* نویسنده مسئول

نصیری، یعقوب؛ تقدیسی نیکبخت، سمیرا و صداقت نیا، مصطفی. (۱۴۰۶). تحلیل سیستم‌های دیاژنزی نهشته‌های کربناته سازند ایلام (تاقدیس خرم‌آباد) بر پایهٔ زمین‌شیمی عنصری. پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۴۳(۱)، ۸۷-۱۱۰. https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329

2423-8007 / © University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329

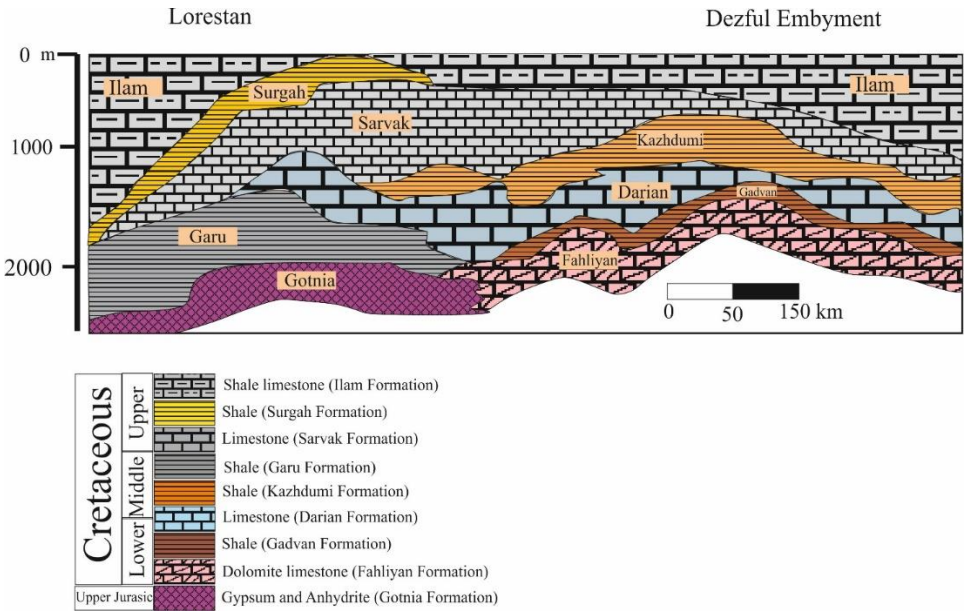
مقدمه

توالی رسوبات آلبین- کامپانین به نام سازندهای کژدمی، سروک، سورگاه و ایلام در گسترهٔ زاگرس با عنوان گروه بنگستان معرفی و نام آن از کوه بنگستان در شمال بهبهان گرفته شده است (James and Wynd 1965). برش نمونهٔ سازند ایلام در تنگ گراب واقع در یال جنوب باختری کوه سورگاه، در پلانج شمال باختری کبیرکوه و در ۱۲ کیلومتری جنوب شهرستان ایلام انتخاب و اندازه‌گیری شده است (James and Wynd 1965). در این برش، سازند ایلام شامل ۱۹۰ متر سنگ‌آهک‌های رسی دلنه‌ریز پلاژیک خاکستری‌رنگ با لایه‌بندی منظم و میان‌لایه‌های نازک شیل و سن سانتونین- کامپانین است (Motiei 2003). حد پایینی سازند ایلام در برش نمونه، به سازند سورگاه است. آهک‌های قاعدهٔ سازند ایلام در این حد، ماسه‌ای و سیلتی است و نودول‌ها و استوانه‌هایی از هماتیت نیز در آن یافت می‌شود و بیانگر وجود ناهمسازی فرسایشی است. از لرستان به‌سوی نواحی جنوب خاوری، که سازند سورگاه از بین می‌رود، سازند ایلام به‌صورت ناهمساز و مستقیم بر سازند سروک قرار می‌گیرد (شکل ۱). در حوالی کوه اناران واقع در جنوب باختری لرستان، ردیف ایلام از بالا به پایین شامل رسوبات پلاژیک و نریتیک است که بر سازند سورگاه قرار می‌گیرند (Motiei 2003). حد بالایی سازند ایلام، سازند گورپی است که ظاهراً همساز است. به‌طور کلی حد پایینی و بالایی سازند ایلام شارپ است؛ ولی گاهی هم ممکن است در محل‌هایی تدریجی باشد. چنین حالتی زمانی اتفاق می‌افتد که لایه‌های کربناتی در سازندهای گورپی و سورگاه توسعه یافته باشند (Motiei 2003). داده‌های آنالیز ژئوشیمی، اطلاعات مهمی را دربارهٔ شرایط محیط رسوبی و نیز تغییرات دیاژنتیکی مؤثر بر رسوبات در طی زمان فراهم می‌آورد (Armstrong-Altrin et al. 2009). در این میان، پژوهش‌هایی بر فرآیندهای دیاژنزی و زمین‌شیمی عنصری نهشته‌های سازند ایلام در حوضهٔ رسوبی لرستان و حوضه‌های رسوبی مجاور انجام شده است که در ادامه معرفی می‌شوند.

آدلبی و اسدی مهماندوستی (Adabi and Asadi-Mehmandosti 2005)، کانی‌شناسی اولیه و نوع سیستم‌های دیاژنزی سازند ایلام را در شمال ایذه مطالعه کردند. در این مطالعه، ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ سازند ایلام، آراگونیتی و محیط دیاژنزی بسته تشخیص داده شده است. زهدی و همکاران (Zohdi 2007) هم مطالعاتی در این زمینه دارند. اسدی مهماندوستی و همکاران (Asadi-Mehmandosti et al. 2019)، ویژگی‌های رسوبی – دیاژنزی و ژئوشیمیایی سازند ایلام را در کبیرکوه ایلام بررسی کردند. در این مطالعه، سیستم دیاژنزی سازند ایلام از نوع بسته تشخیص داده شده است. شوشتریان و همکاران (Shoshtarian et al. 2011)، کانی‌شناسی اولیهٔ سازند ایلام را در برش نمونه، تاقدیس پیون و مقطع تحت‌الارضی دانان در حوضهٔ رسوبی زاگرس بررسی کردند. در این مطالعه ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ سازند ایلام مخلوطی از آراگونیت و کلسیت تشخیص داده شده است که تحت تأثیر دیاژنز متئوریک قرار گرفته‌اند.

هدف از این پژوهش، تحلیل سیستم‌های دیاژنزی نهشته‌های کربناته سازند ایلام (تاقدیس خرم‌آباد) بر پایهٔ زمین‌شیمی عنصری است. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که سازند ایلام یکی از واحدهای کربناتهٔ شاخص در حوضهٔ زاگرس است، آرشیو مناسبی را برای بازسازی شرایط رسوب‌گذاری و تحولات پس‌رسوبی فراهم می‌کند و مطالعهٔ زمین‌شیمی عنصری آن در تاقدیس خرم‌آباد، به شناسایی کانی‌شناسی اولیه و نوع و شدت سیستم‌های دیاژنزی، ازجمله دیاژنز متئوریک، دریایی یا بسته، کمک می‌کند. بررسی عناصر اصلی و فرعی، شواهد دقیقی از تغییرات ژئوشیمیایی، جابه‌جایی سیالات و بازتبلور کربنات‌ها را ارائه می‌دهد. افزون بر این، چنین پژوهشی با روشن‌سازی کنترل‌های ژئوشیمیایی بر تکامل سازند ایلام، در فهم تاریخچهٔ دیاژنزی حوضه نقش مهمی دارد.

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329



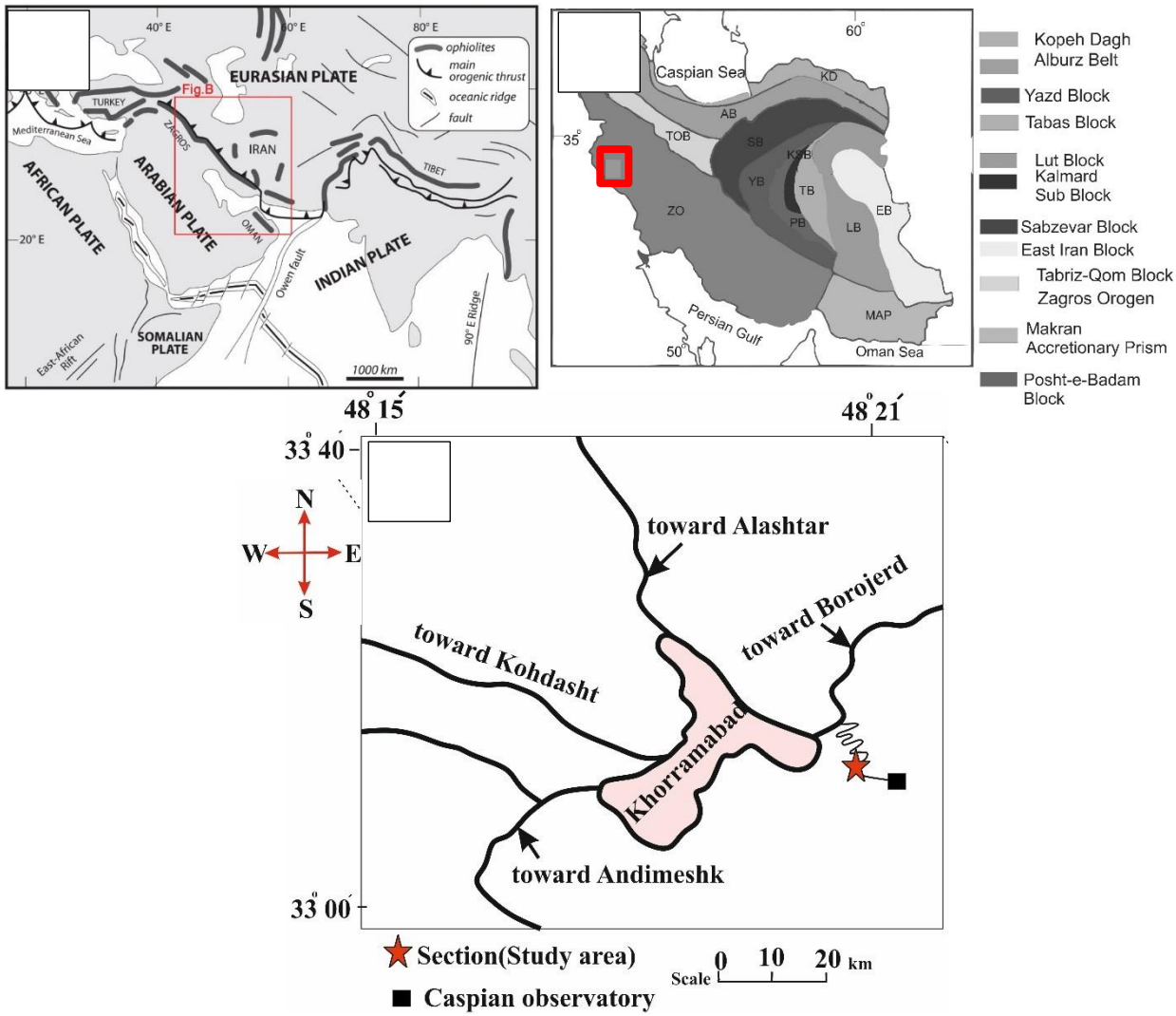
شکل ۱- واحدهای کرتاسهٔ زاگرس چین‌خورده برگرفته از (Motiei 2003) با اندکی تغییرات

Fig 1- Cretaceous units of the Folded Zagros. Slightly modified after Motiei (2003)

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقهٔ مطالعه‌شده

منطقهٔ مطالعه‌شده در تاقدیس خرم‌آباد و در ضلع شرقی شهرستان خرم‌آباد واقع شده است. مختصات جغرافیایی این منطقه ″۴۸ ′۳۵ °۳۳ عرض شمالی و ″۲۱ ′۲۰ °۴۸ طول خاوری است. این برش که در بام شهر خرم‌آباد (رصدخانهٔ کاسپین) قرار دارد، ازطریق جادهٔ آسفالتهٔ خرم‌آباد به بام شهر در دسترس است (شکل ۲). ناحیهٔ مطالعه‌شده براساس نقشهٔ پهنه‌های ساختاری حوضهٔ زاگرس در بخش چین‌خوردهٔ سادهٔ زاگرس و در پهنهٔ لرستان واقع شده است (Murris 1980; Ziegler 2001; Alavi 2004). کمربند چین‌خوردهٔ زاگرس به طولی بالغ بر ۲۰۰۰ کیلومتر از جنوب شرق ترکیه، سوریه و عراق به بخش‌های غربی و جنوب غربی ایران رسیده است و با توجه به ذخایر هیدروکربنی، یکی از مهم‌ترین ذخایر نفتی دنیاست (Alavi 2004). کمربند چین‌خورده و روراندهٔ زاگرس، حاصل تغییر شکل ساختمانی سیستم پروفورلند (Proforeland) زاگرس است و خلیج‌فارس و حوضه‌های قاره‌ای بخش‌هایی از آن‌اند (Ziegler 2001). براساس نقشهٔ زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شهرستان خرم‌آباد، واحدهای دوران دوم و سوم رخنمون دارند. واحدهای دوران دوم شامل سازندهای گرو، سروک، سورگاه، ایلام، گورپی، تاربور و امیران‌اند که سازند گرو هستهٔ تاقدیس خرم‌آباد را تشکیل داده است. واحدهای دوران سوم شامل سازندهای کشکان، آسماری، شهبازان و سازند گچساران‌اند (شکل ۳ و ٤). در منطقهٔ مطالعه‌شده، سازند گروه هستهٔ تاقدیس خرم‌آباد را تشکیل داده است (شکل ٤- a) و نهشته‌های صخره‌ساز سازند سروک بر سازند گرو قرار گرفته است (شکل ٤- a). نهشته‌های کربناته و شیلی تیره‌رنگ سازند سورگاه (شکل ٤- b) با ضخامت کم بر سازند سروک قرار گرفته و به‌وسیلهٔ کربنات‌های کرم‌رنگ با لایه‌بندی منظم سازند ایلام (شکل ٤- c) پوشیده شده است. نهشته‌های شیلی و مارنی سازند گورپی (شکل ٤- d) بر سازند ایلام قرار گرفته و این نهشته‌ها با سازند امیران (شکل ٤- e) پوشیده شده‌اند. جوان‌ترین نهشته‌های منطقهٔ مطالعه‌شده، نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر (شکل ٤- f) هستند که با ناپیوستگی فرسایشی بر نهشته‌های سازند گورپی قرار گرفته‌اند.

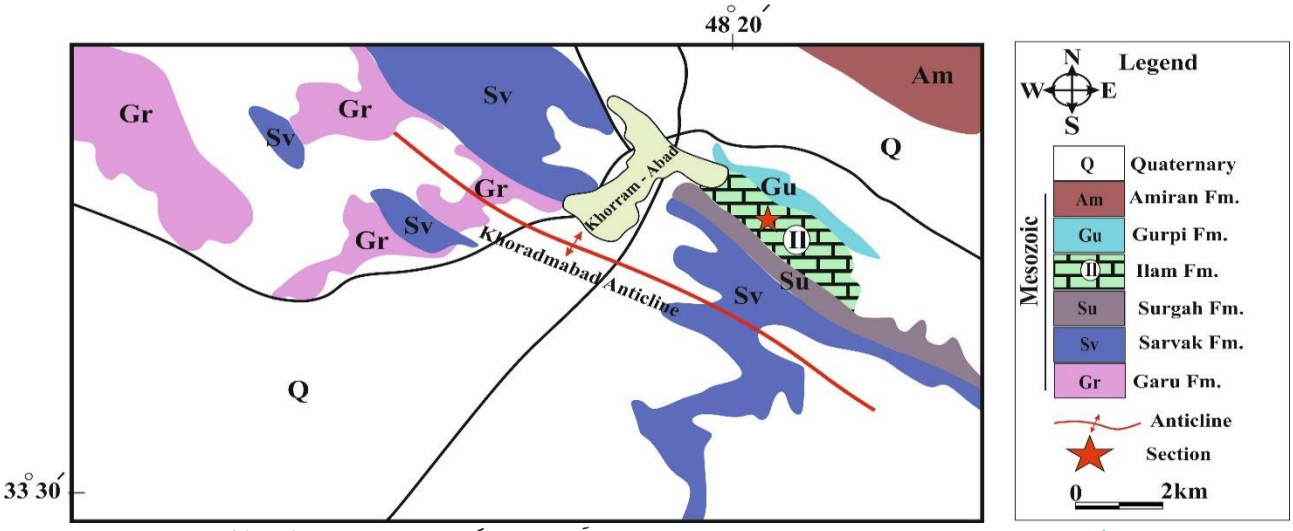
https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329



شکل ۲- **a**- پراکندگی بازمانده‌های قلمرو اقیانوسی تتیس در امتداد پهنهٔ برخوردی آلپ–هیمالیا برگرفته و تعدیل‌شده از روزتی و همکاران (Rossetti et al. 2014)؛ **b**- نمای پهنه‌های ساختاری بر نقشهٔ ایران، منطقهٔ مطالعه‌شده با مربع قرمز مشخص است؛ **c**- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به برش مطالعه‌شده که با علامت ستاره مشخص است.

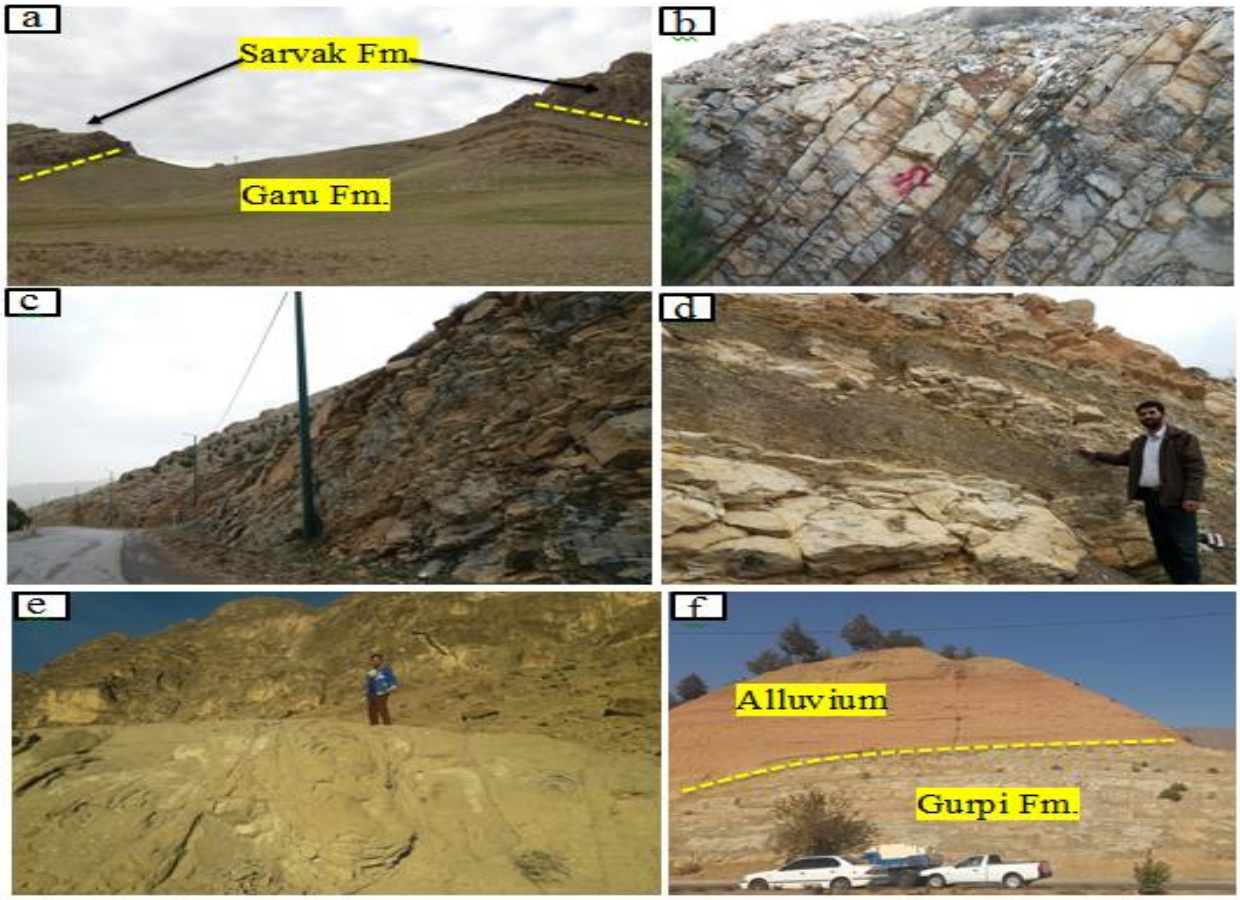
Fig 1- (a) Distribution of remnants of the Tethyan oceanic realm along Alpine-Himalayan convergence zone (modified and after Rossetti et al. 2014). **(b) View of structural zones on the map of Iran, The study area is marked by a red square. (c) Geographic location and access routes to the studied section, the studied section is marked by an asterisk.**

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329



شکل ۳- بخشی از نقشهٔ زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شهرستان خرم‌آباد به‌همراه گسترش سازندهای منطقهٔ مطالعه‌شده

Fig 3- A portion of the 1:100,000 geological map of the Khorramabad region, showing the extent of the formations in the studied area



شکل ٤- رخنمون سازندهای منطقهٔ مطالعه‌شده در تاقدیس خرم‌آباد **a**: سازند گرو (هستهٔ تاقدیس خرم‌آباد) و سازند سروک (دید به‌سمت شمال غرب)؛ **b**: سازند سورگاه؛ **c**: سازند ایلام؛ **d**: سازند گورپی؛ **e**: سازند امیران (دید به‌سمت شمال)؛ **f**: رسوبات آبرفتی دیرینه با ناپیوستگی سازند گورپی (دید به‌سمت شمال)

Fig 4- Outcrops of the formations in the studied area within the Khorramabad Anticline. a: The Garu Formation (core of the Khorramabad Anticline) and the Sarvak Formation (view toward the northwest). b: The Surgah Formation. c: The Ilam Formation. d: The Gurpi Formation. e: The Amiran Formation (view toward the north). f: Paleogene alluvial deposits with unconformity overlying the Gurpi Formation (view toward the north)

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329

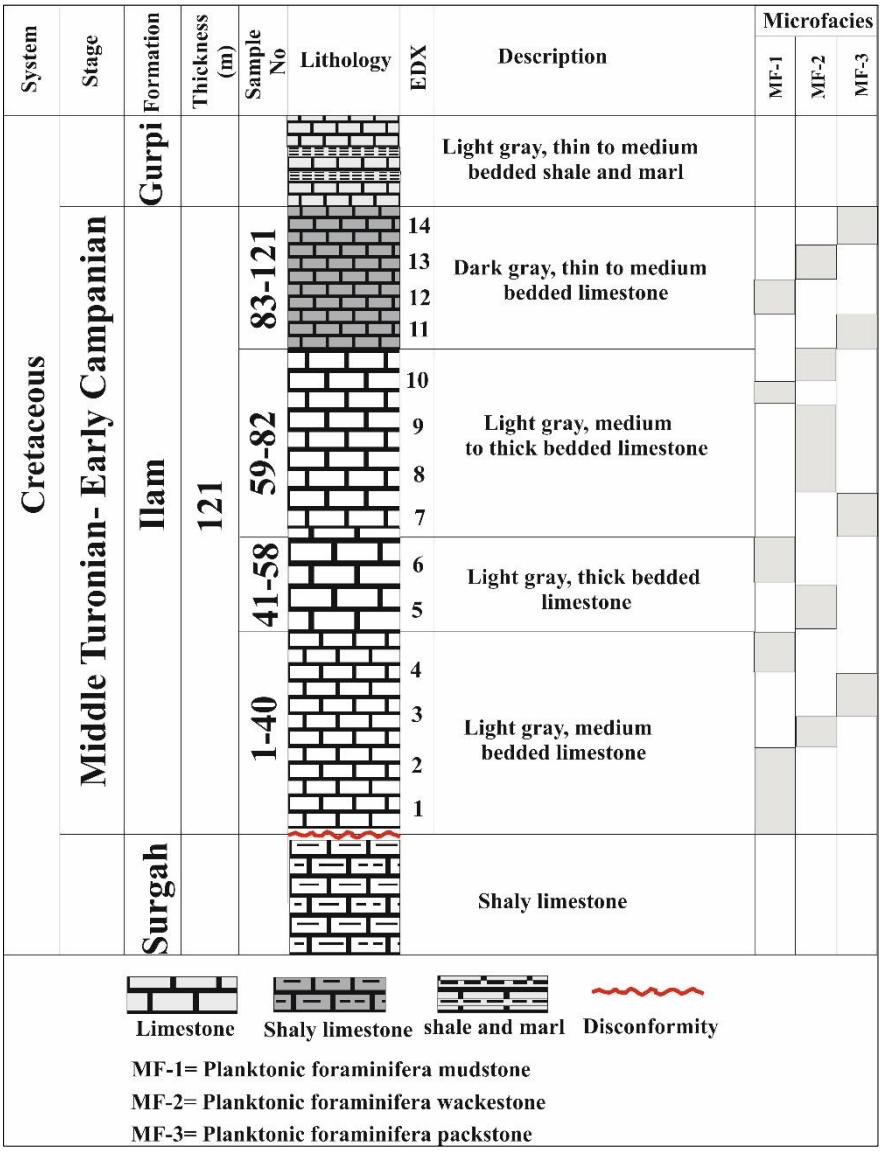
سنگ‌چینه‌نگاری سازند ایلام در برش مطالعه‌شده

سازند ایلام در برش مطالعه‌شده با ستبرای ۱۲۱ متر از واحدهای کربناته با لایه‌بندی منظم تشکیل شده است. چهار واحد سنگ‌چینه‌ای در نهشته‌های سازند ایلام و در برش مطالعه‌شده شناسایی شد که شامل سنگ‌آهک متوسط‌لایه به رنگ خاکستری روشن، سنگ‌آهک ضخیم‌لایه به رنگ خاکستری روشن، سنگ‌آهک متوسط تا ضخیم‌لایه به رنگ خاکستری روشن و سنگ‌آهک نازک تا متوسط‌لایه به رنگ خاکستری تیره است (شکل ۵- الف و ب). از ویژگی‌های بارز توالی سازند ایلام در برش مطالعه‌شده، به ندول‌های ریز و درشت پیریت، شکستگی‌های موازی و عمود بر لایه‌بندی و وجود استیلولیت‌های فراوان اشاره می‌شود (شکل ۵- ب). ریزرخساره‌های تشکیل‌دهندهٔ این سازند شامل مادستون، وکستون و پکستون حاوی روزن‌داران پلانکتونیک‌اند (شکل ۵- ج). بخش چشمگیری از آلوکم‌های تشکیل‌دهندهٔ این ریزرخساره‌ها را روزن‌داران پلانکتونیک تشکیل داده‌اند که در زمینهٔ گل آهکی (میکرایت) شناورند. آلوکم‌ها بیشتر دچار انحلال شده‌اند و فضای حاصل از انحلال را سیمان کلسیت اسپاری پر کرده است. حضور فراوان روزن‌داران پلانکتونیک در زمینهٔ گل آهکی، بیانگر رسوب‌گذاری در یک محیط آرام شلف خارجی است. سن سازند ایلام در تاقدیس خرم‌آباد، تورونین میانی تا کامپانین پیشین تعیین شده است (Kamalvand et al. 2017).

مواد و روش‌ها

تعداد ۱۲۱ نمونه سنگ به‌صورت دست‌نخورده و غیر هوازده از واحدهای سنگ‌چینه‌ای آهکی برداشت شد. این نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند و از آنها مقطع نازک پتروگرافی تهیه شد (مقاطع نازک با میکروسکوپ پتروگرافی نوع OLYMPUS – BH2 مطالعه شدند). نام‌گذاری رخساره‌ها براساس طبقه‌بندی دانهام (Dunham 1962) انجام شده است. از بین این نمونه‌ها، تعداد ١٤ نمونه از رخساره‌های مادستونی با آلوکم کمتر از ۱۰ درصد برش‌های یک سانتی‌متری تهیه و به روش EDX (طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس= Energy Dispersive X ray) ازلحاظ عنصری آنالیز شدند. نمونه‌ها در آزمایشگاه مرکزی شمارهٔ ۱ دانشگاه لرستان ازلحاظ عنصری (EDX) آنالیز شدند. شکل ٦ بخش‌های میکرایتی مورد آنالیز EDX و شکل ۷- الف و ب، نمونه‌ای از طیف‌های حاصل از آنالیز EDX و نقشهٔ رقومی‌شده، تمرکز عناصر اصلی و فرعی نمونه‌ها را نشان می‌دهند. عناصر اصلی (Ca, Mg) بر حسب درصد و عناصر (Sr, Mn, Fe, Na) بر حسب پی‌پی‌ام اندازه‌گیری شده‌اند. دقت آنالیزها برای عناصر اصلی ۰/۵درصد و برای عناصر فرعی ۵ ± پی‌پی‌ام بوده است. به‌منظور تعیین ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ کربنات‌های سازند ایلام در برش مطالعه‌شده از عناصر اصلی Ca و Mg و عناصر فرعی Fe, Sr, Na و Mn و رسم این مقادیر در برابر یکدیگر و مقایسهٔ آنها با محدوده‌های معرفی‌شده از سوی پژوهشگران مختلف برای کانی‌شناسی اولیهٔ کربنات‌ها استفاده شده است (Milliman et al. 1974; Adabi and Rao 1991; Rao 1991; Adabi and Asadi-Mehmandosti 2008).

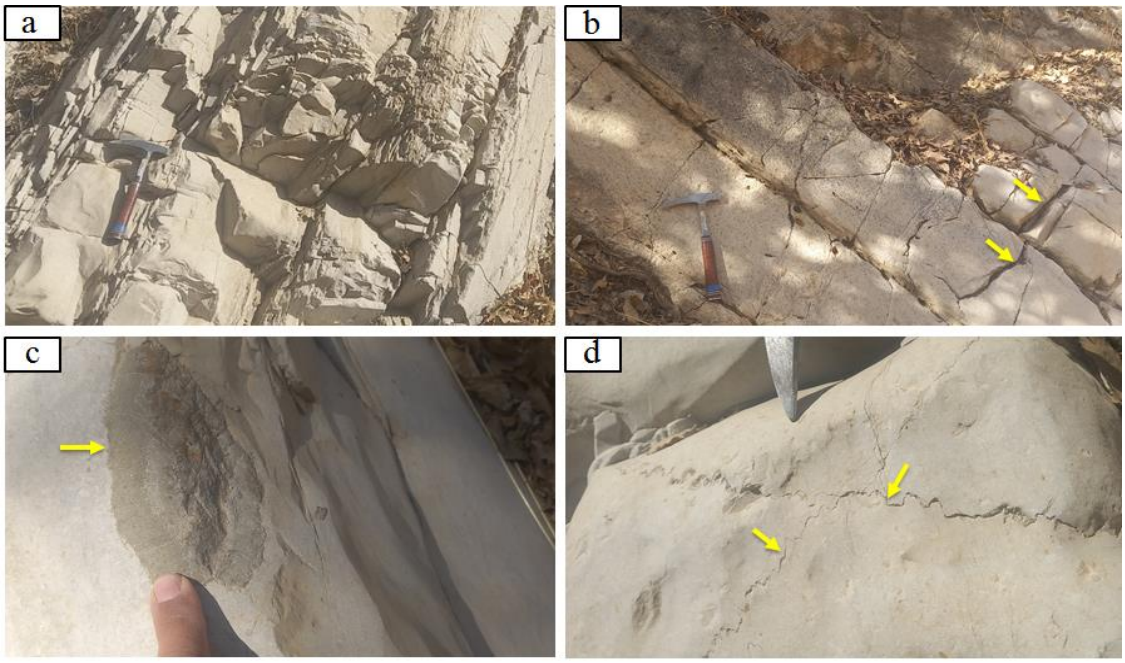
https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329



شکل ۵- الف: ستون سنگ‌چینه‌ای سازند ایلام در برش مطالعه‌شده

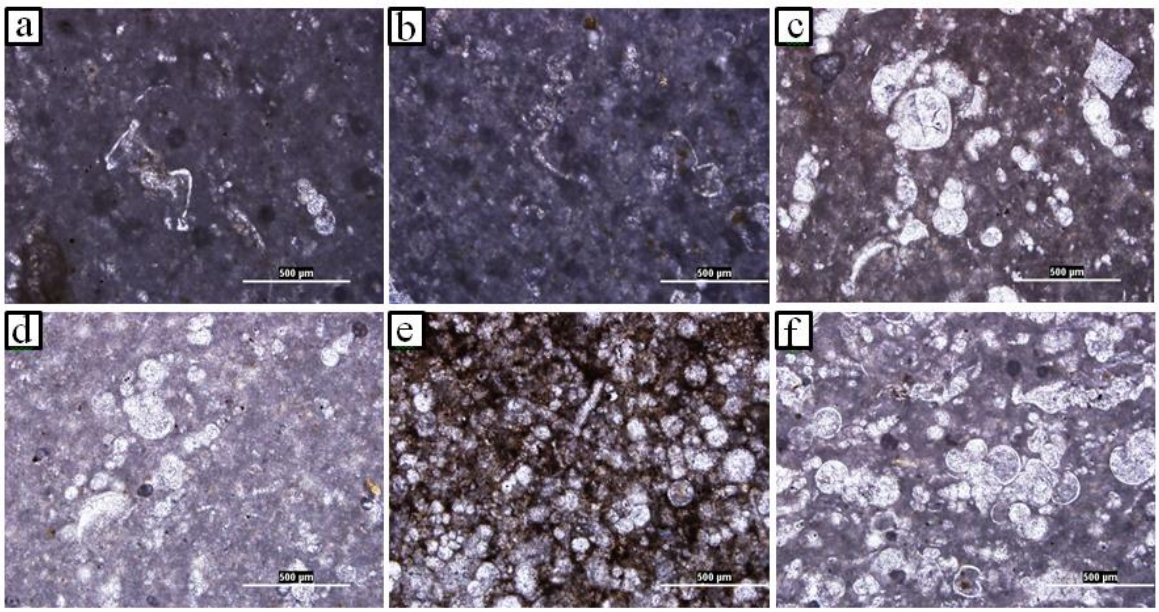
Fig 5- a: Lithostratigraphic column of the Ilam Formation in the studied section.

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329



شکل ۵- ب: واحدهای سنگ‌چینه‌ای سازند ایلام در برش مطالعه‌شده **a**: واحد سنگ‌آهک نازک تا متوسط‌لایه به رنگ خاکستری روشن؛ **b**: واحد سنگ‌آهک متوسط تا ضخیم‌لایهٔ خاکستری روشن. پیکان‌های زردرنگ، شکستی‌های عمود بر لایه‌بندی را نشان می‌دهند؛ **c**: واحد سنگ‌آهک متوسط‌لایهٔ خاکستری روشن دارای ندول پیریت (پیکان زردرنگ)؛ **d**: واحد سنگ‌آهک ضخیم‌لایهٔ خاکستری روشن. پیکان‌های زردرنگ دو دستهٔ استیلولیت را نشان می‌دهند که با زاویهٔ تقریباً ۹۰ درجه همدیگر را قطع کرده‌اند.

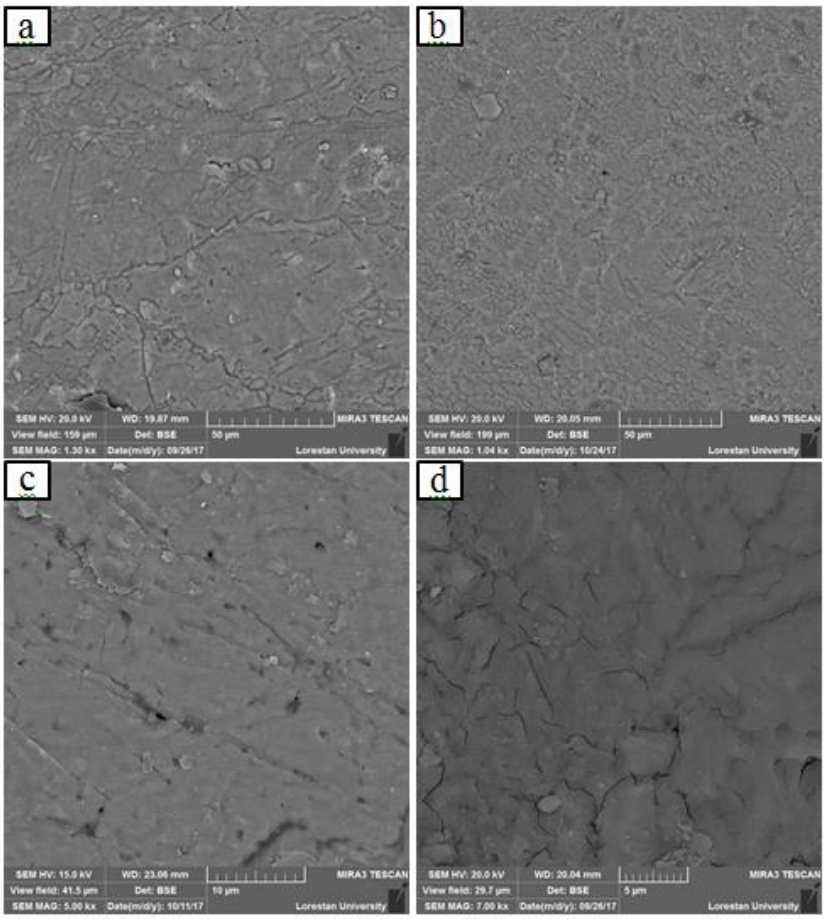
Fig 5-B: Lithostratigraphic units of the Ilam Formation in the studied section. a: Thin- to medium-bedded, light gray limestone unit. b: Medium- to thick-bedded, light gray limestone unit. Yellow arrows indicate fractures perpendicular to bedding. c: Medium-bedded, light gray limestone unit containing pyrite nodules (yellow arrow). d: Thick-bedded, light gray limestone unit. Yellow arrows show two sets of stylolites that intersect each other at approximately 90 degrees.



شکل ۵- ج: ریزرخساره‌های سازند ایلام در برش مطالعه‌شده **a** و **b**: ریزرخسارهٔ مادستون حاوی روزن‌داران پلانکتونیک؛ **c** و **d**: ریزرخسارهٔ وکستون حاوی روزن‌داران پلانکتونیک؛ **e** و **f**: ریزرخسارهٔ پکستون حاوی روزن‌داران پلانکتونیک

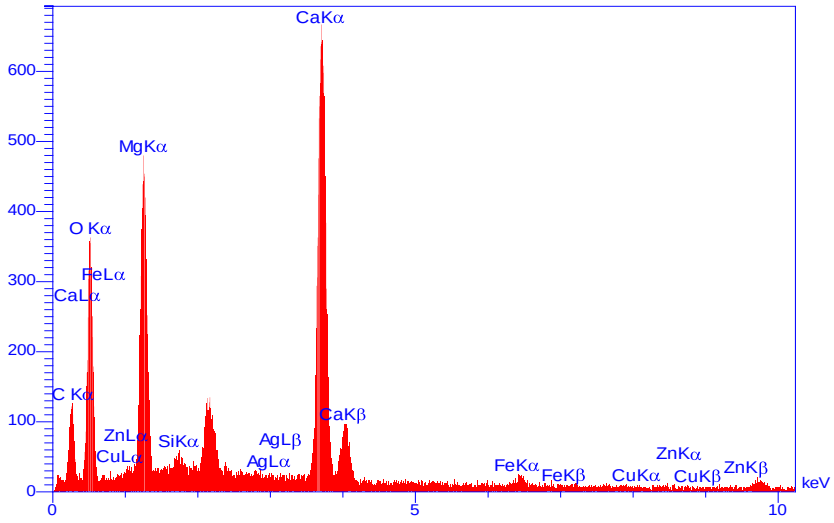
Fig 5-c: Microfacies of the Ilam Formation in the studied section. a and b: Mudstone microfacies containing planktonic foraminifera. c and d: Wackestone microfacies containing planktonic foraminifera. e and f: Packstone microfacies containing planktonic foraminifera.

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329



شکل ٦- a تا d بخش‌های میکرایتی مورد آنالیز EDX تحت میکروسکوپ نوع روبشی

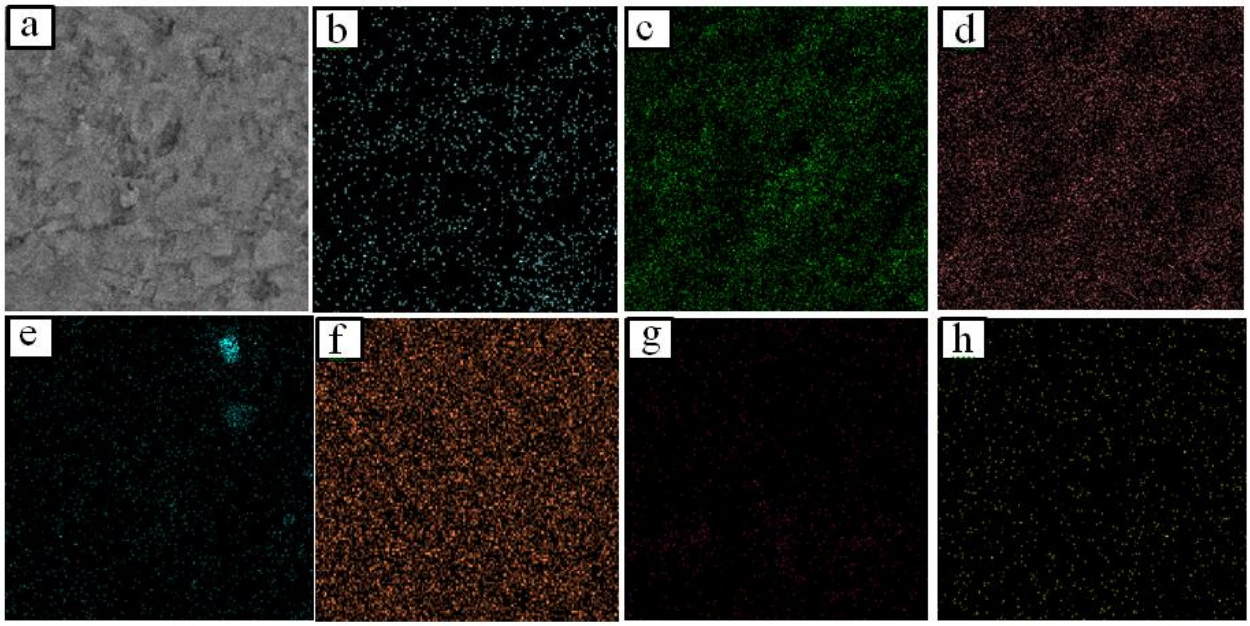
Fig 6- a to d: Micritic portions analyzed by EDX under a scanning electron microscope (SEM)



شکل ۷- الف- نمونه‌ای از یک طیف حاصل از آنالیز EDX در نمونه‌های مطالعه‌شده

Fig 7-a: An example of a spectrum obtained from EDX analysis of the studied samples

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329



شکل ۷- ب- نقشهٔ رقومی‌شدهٔ **(Digi maps)** تمرکز عناصر اصلی و فرعی در نمونه‌های**a** : بخش میکریتی آنالیزشده؛ **b**: نقشهٔ رقومی تمرکز عنصر منیزیم؛ **c**: نقشهٔ رقومی تمرکز عنصر کربن؛ **d**: نقشهٔ رقومی تمرکز عنصر اکسیژن؛ **e**: نقشهٔ رقومی تمرکز عنصر آهن؛ **f**: نقشهٔ رقومی تمرکز عنصر کلسیم؛ **g** : نقشهٔ رقومی تمرکز عنصر استرانسیم؛ **h**: نقشهٔ رقومی تمرکز عنصر منگنز

Fig 7-b: Digitized maps (Digi maps) of major and minor element concentrations in the samples. a: Micritic portion analyzed. b: Digitized map of magnesium concentration. c: Digitized map of carbon concentration. d: Digitized map of oxygen concentration. e: Digitized map of iron concentration. f: Digitized map of calcium concentration. g: Digitized map of strontium concentration. h: Digitized map of manganese concentration.

نتایج

نتایج آنالیز عنصری

ترکیب عنصری و ایزوتوپی سنگ‌های رسوبی با عوامل گوناگونی همچون سنگ‌شناسی، محیط‌های دیاژنزی و همچنین سیالات پس از رسوب‌گذاری و... کنترل می‌شود (Hood et al. 2018). در طی دیاژنز، کانی‌شناسی و ترکیب سنگ‌های کربناته پایدارتر و کانی‌های ناپایدار به فرم‌های پایدار تبدیل می‌شوند، به همین دلیل شناسایی دقیق فرایندها و محیط‌های دیاژنزی کربنات‌ها تنها براساس مطالعات پتروگرافی دقیق نخواهد بود (Javanbakht et al. 2018; Lan et al. 2020)؛ بنابراین شناسایی صحیح ماهیت سیالات و فرایندهای دیاژنزی با استفاده از آنالیزهای زمین‌شیمیایی و تعیین عناصر اصلی و فرعی و مطالعات ایزوتوپی ضروری به نظر می‌رسد (Hoseinabadi et al. 2016). بر این اساس در مطالعهٔ حاضر، از روش زمین‌شیمی عنصری (استفاده از عناصر اصلی و فرعی موجود در نمونه‌های کربناته) برای تعیین نوع کانی‌شناسی اولیه و نوع سیستم‌های دیاژنزی غالب سازند ایلام استفاده شده است. زمین‌شیمی عناصر اصلی و فرعی در سنگ‌های کربناته، ابزار مفیدی برای مطالعهٔ ویژگی‌های این سنگ‌هاست (Lan et al. 2020). کانی‌های اصلی که در آب دریا تشکیل می‌شوند، به‌طور عمده شامل آراگونیت (A)، کلسیت پر منیزیم (HMC) و کلسیت کم منیزیم (LMC) هستند. مطالعهٔ کانی‌شناسی اولیهٔ کربنات‌ها تنها براساس مطالعات پتروگرافی و به‌علت تأثیر فرآیندهای دیاژنزی، امری بسیار مشکل است؛ زیرا آراگونیت و کلسیت پر منیزیم به‌تدریج به کلسیت کم‌منیزیم تبدیل و باعث تغییر در ترکیب و بافت اولیهٔ سنگ می‌شوند. با استفاده از روش‌های زمین‌شیمیایی مانند تجزیه و تحلیل عنصری (کلسیم، منیزیم، آهن، سدیم، منگنز و استرانسیم)، ترکیب کانی‌شناسی اولیه و نوع سیستم‌های دیاژنزی تعیین می‌شود (Adabi and Rao 1991; Adabi and Asadi-Mehmandosti 2008; Adabi et al. 2010). نتایج آنالیزهای زمین‌شیمیایی عناصر اصلی و فرعی کربنات‌های سازند ایلام به روش EDX در برش مطالعه‌شده در جدول (۱) ارائه شده است. عناصر Ca و Mg برحسب درصد و عناصر Mn, Sr, Fe, Na برحسب پی‌پی‌ام گزارش شده‌اند.

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329

جدول ۱- نتایج آنالیز عنصری سازند ایلام در منطقهٔ مطالعه‌شده پارامترهای آماری میانگین، به‌صورت حداکثر و حداقل گزارش شده است.

Table 1- Results of elemental analysis of the Ilam Formation in the studied area. Statistical parameters including mean, maximum, and minimum are also reported.

Sample No.	Ca (%)	Mg (%)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Na (ppm)	Sr/Mn	Sr/Ca	Sr/Na	1000*Sr/Ca (wt%)
Il-01	41	3.5	97	68	375	25	5.5	9.1	15.0	0.91
Il-02	21.3	0.2	110	22	650	88	29.5	30.5	38.2	3.05
Il-03	29.7	1	97	59	180	96	3.1	6.1	1.9	0.61
Il-04	33.7	0.3	65	63	229	75	3.6	6.8	3.1	0.68
Il-05	48.5	2.7	39	25	981	38	39.2	20.2	25.8	2.02
Il-06	45.9	1.5	80	17	720	158	42.4	15.7	11.8	1.57
Il-07	33.8	0.7	111	41	310	96	7.6	9.2	3.2	0.92
Il-08	29.5	2.6	39	53	283	140	5.3	9.6	8.6	0.96
Il-09	37.6	1.9	66	38	333	29	8.8	8.9	17.5	0.89
Il-10	40.2	2.2	103	15	150	137	10.0	3.7	2.3	0.37
Il-11	41.6	0.5	75	16	276	150	17.3	6.6	7.5	0.66
Il-12	44.7	2.6	99	10	711	22	71.1	15.9	32.3	1.59
Il-13	31.7	1.3	37	81	220	210	2.7	6.9	3.4	0.69
Il-14	29.1	3.7	90	44	520	197	11.8	17.9	5.4	1.79
Max	48.5	3.7	111	81	981	210	71.10	30.52	32.32	3.05
Min	21.3	0.2	37	10	150	22	2.72	3.73	1.05	0.37
Average	36.31	1.76	79.14	39.43	424.14	104.36	18.42	11.94	8.10	1.19

عناصر اصلی

کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg)

تمرکز عنصر کلسیم (Ca) در نمونه‌های مطالعه‌شده، بین ۲۱/۳ تا ٤٨/٥درصد (میانگین ۳٦/۳۱درصد) و تمرکز عنصر منیزیم (Mg) بین ۰/۲ تا ۳/۷درصد (میانگین ۱/۷٦درصد) در تغییر است.

عناصر فرعی

آهن (Fe)، منگنز (Mn)، استرانسیم (Sr) و سدیم (Na)

تمرکز عنصر آهن (Fe) در نمونه‌های مطالعه‌شده بین ۳۷ تا ۱۱۱ پی‌پی‌ام (میانگین ۷۹/۱٤ پی‌پی‌ام) و تمرکز عنصر منگنز (Mn) بین ۱۰ تا ۸۱ پی‌پی‌ام (میانگین ۳۹/٤۳ پی‌پی‌ام) در تغییر است. همچنین تمرکز عنصر استرانسیم (Sr) در نمونه‌های مطالعه‌شده بین ۱۵۰ تا ۹۸۱ پی‌پی‌ام (میانگین ٤۲٤/۱٤ پی‌پی‌ام) و تمرکز عنصر سدیم (Na) بین ۲۲ تا ۲۱۰ پی‌پی‌ام (میانگین ۱۰٤/۳٦ پی‌پی‌ام) در تغییر است.

بحث

بررسی عناصر اصلی و فرعی در کربنات‌ها در شناسایی شرایط تشکیل، ترکیب کانی‌شناسی اولیه و نوع محیط دیاژنزی حاکم بر آنها، اهمیت دارد (Adabi and Asadi-Mehmandosti 2008)؛ از این رو با توجه به میزان عناصر اصلی و فرعی، محدودهٔ جغرافیایی آنها در زمان تشکیل شناسایی می‌شود (Higgins et al. 2018). بررسی رسوبات کربناتهٔ عهد حاضر، نشان‌دهندهٔ فراوانی آراگونیت در دریاهای حاره‌ای (Milliman et al. 1974) و کلسیت با منیزیم بالا در دریاهای معتدله (Adabi and Rao 1991) هستند که کلسیت کم‌منیزیم، فراوان‌ترین کانی مناطق قطبی‌اند (Rao 1990). تأثیر فرایندهای دیاژنزی پس از ته‌نشینی رسوبات، موجب تغییر ویژگی‌های اولیه ازلحاظ سنگ‌نگاری و ژئوشیمی می‌شود. همچنین بررسی شدت و ضعف تأثیرات دیاژنتیکی بر رسوبات، به آگاهی بیشتر از شرایط اولیهٔ حاکم بر محیط رسوبی منجر می‌شود. از نگاه دیگر نیز، تغییرات ایجادشده در طی فرایندهای دیاژنزی، سبب ایجاد ویژگی‌ها و پتانسیل‌های جدیدی در رسوبات می‌شود.

کانی‌شناسی اولیهٔ کربنات‌های سازند ایلام (برش تاقدیس خرم‌آباد)

تعیین کانی‌شناسی اولیهٔ کربنات‌ها براساس مطالعات سنگ‌نگاری به‌دلیل تأثیر فرایندهای دیاژنتیکی دقیق نخواهد بود؛ زیرا طی زمان با تبدیل آراگونیت و کلسیت پرمنیزیم به کلسیت کم منیزیم بافت، ترکیب اولیهٔ سنگ و ویژگی‌های عنصری تغییر می‌یابد، اگرچه در طی دیاژنز متئوریک و یا تدفینی، میزان Sr یا Na در سنگ‌آهک‌های دیرینه کاهش درخور توجهی می‌یابد، نسبت‌های Sr/Na معیاری برای تفکیک سنگ‌آهک‌هایی با کانی‌شناسی اولیهٔ آراگونیتی از معادل‌های کلسیتی است (Adabi et al. 2010) با تعیین

کانی‌شناسی اولیهٔ کربنات‌ها، تا حدودی دما، میزان Ca و Mg در محلول و درجهٔ شوری برآورد می‌شود.

عنصر استرانسیم (Sr)

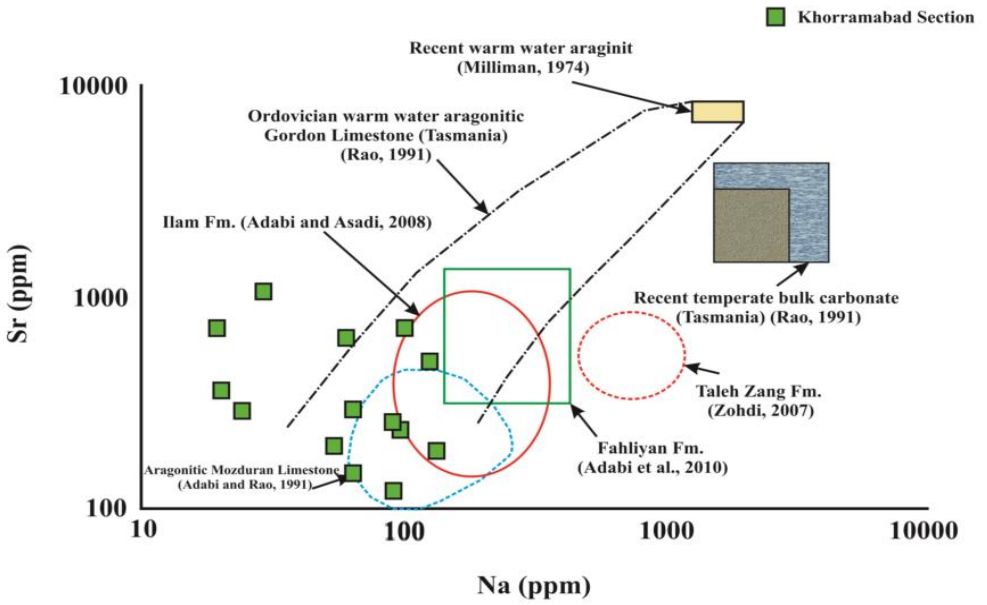
میزان Sr در نمونه‌های کل کربناتهٔ مناطق حاره‌ای عهد حاضر، بین ۸۰۰۰ تا ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام است (Milliman et al. 1974)؛ در حالی که این میزان در نمونه‌های کل کربناتهٔ مناطق معتدلهٔ عهد حاضر، محدودهٔ کمتری دارد و بین ۱۶۴۲ تا ۵۰۰۷ (میانگین ۳۲۷۰ پی‌پی‌ام) است (Rao and Adabi 1992; Rao and Amini 1995). تمرکز استرانسیم در آب‌های جوی کم و ضریب توزیع آن کمتر از ۱ است؛ بنابراین کلسیت دیاژنتیکی مقدار کمی استرانسیم خواهد داشت (Asadi-Mehmandosti et al. 2013). مقدار بیشینهٔ استرانسیم که در شبکهٔ کلسیت غیر بیوتیک قرار می‌گیرد، بیشینهٔ ۱۰۰۰ پی پی ام است (Veizer 1983). مقادیر استرانسیم با افزایش میزان آراگونیت افزایش و با افزایش میزان کلسیت، کاهش می‌یابد (Rao and Adabi 1992; Asadi-Mehmandosti and Adabi 2013; Adabi et al. 2015; Chen et al. 2026). مقادیر استرانسیم (Sr) در نمونه‌های مطالعه‌شده مربوط به سازند ایلام در برش مطالعه‌شده بین ۱۵۰ تا ۹۸۱ پی‌پی‌ام (میانگین ۴۲۴/۱۴ پی‌پی‌ام) متغیر است (شکل ۸ و ۹). کاهش مقادیر استرانسیم در نمونه‌های مطالعه‌شده نسبت‌به مقادیر عهد حاضر (۸۰۰۰ تا ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام)، به کاهش Sr در طی دیاژنز جوی مربوط می‌شود (Adabi and Rao 1991).

عنصر سدیم (Na)

میزان سدیم در سنگ‌آهک‌های سازند ایلام در برش مطالعه‌شده بین ۲۲ تا ۲۱۰ پی‌پی‌ام (میانگین ۱۰۴/۳۶ پی‌پی‌ام) در تغییر است. تمرکز عنصر Na در سنگ‌آهک‌های آراگونیتی غیربیوتیک حاره‌ای عهد حاضر بین ۱۵۰۰ تا ۲۷۰۰ پی‌پی ام (میانگین ۲۵۰۰ پی‌پی‌ام) است؛ در صورتی که این مقدار در کلسیت غیر بیوتیک، تقریباً ۲۷۰ پی‌پی‌ام است (Rao and Adabi 1992). تمرکز سدیم در سنگ‌های کربناته به درجهٔ شوری، ژرفای آب، تفریق بیولوژیکی، آثار جنبشی و کانی‌شناسی کربنات‌ها نسبت داده شده است. فرایندهای دیاژنتیکی به‌دلیل تفریق بیوشیمیایی یا تمرکز کم سدیم در آب‌های جوی، باعث کاهش این عنصر در سنگ‌های کربناتهٔ پس از دیاژنز می‌شود (Adabi and Rao 1991; Jamalian and Adabi 2014). مقدار نسبتاً پایین سدیم در نمونه‌های بررسی‌شده نسبت‌به معادل‌های عهد حاضر آنها نیز، دلیل دیگری بر تأثیر فرایندهای دیاژنزی جوی است (Adabi and Asadi-Mehmandosti 2008; Adabi and Rao 1991). سدیم، ضریب توزیع یا انباشتگی کمتر از یک دارد و تمرکز آن در آب‌های متئوریکی کم است (Adabi et al. 2015).

تغییرات مقادیر استرانسیم در برابر سدیم در سنگ‌آهک‌های سازند ایلام در برش تاقدیس خرم‌آباد با محدودهٔ سنگ‌آهک‌های سازند مزدوران مربوط به بخش کم‌عمق حوضه (به سن ژوراسیک بالایی) (Adabi and Rao 1991)، سنگ‌آهک‌های آراگونیتی گوردون تاسمانیا (به سن اردویسین) (Rao 1990)، محدودهٔ آرگونیت‌های حاره‌ای عهد حاضر (Milliman et al. 1974)، محدودهٔ کربنات‌های معتدلهٔ عهد حاضر تاسمانیا (Rao and Adabi 1992; Rao and Amini 1995)، سنگ‌آهک‌های سازند تله‌زنگ برش نمونه و تاقدیس کیالو سازند ایلام (Adabi and Asadi-Mehmandosti 2008) مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، بیشتر نمونه‌ها درون محدودهٔ سنگ‌آهک‌های حاره‌ای گوردون اردویسین تاسمانیا با ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ آراگونیتی و کربنات‌های سازند ایلام با ترکیب کانی‌شناسی کلسیتی قرار می‌گیرند. مقادیر به نسبت پایین‌تر عنصر استرانسیم در این نمونه‌ها نسبت‌به نمونه‌های معادل عهد حاضر، بیانگر ترکیب کانی‌شناسی مخلوط آراگونیتی و کلسیتی برای نمونه‌های مطالعه‌شده است.

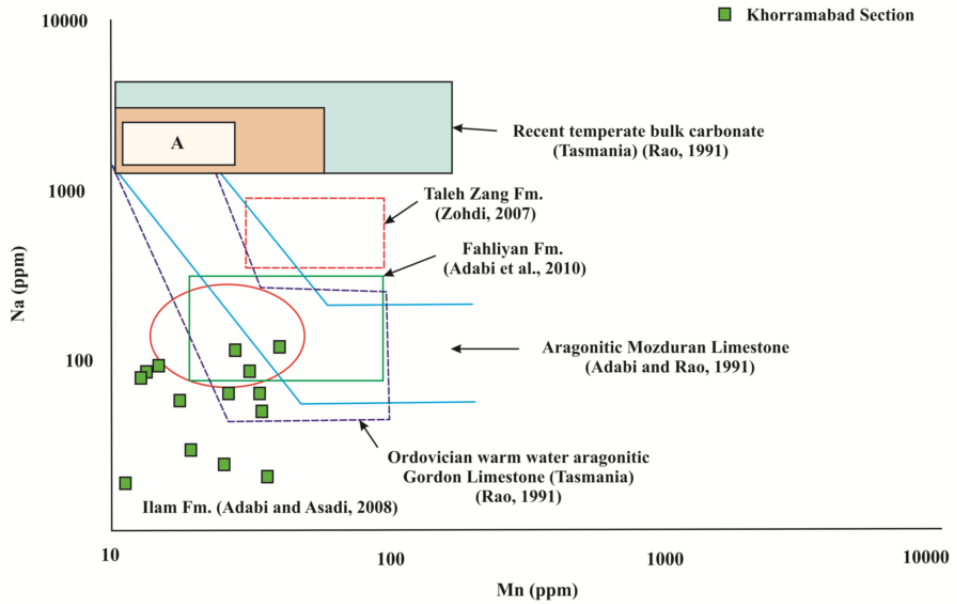
https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329



شکل ۸- تغییرات مقادیر استرانسیم در برابر سدیم در سنگ‌آهک‌های سازند ایلام در برش تاقدیس خرم‌آباد با محدودهٔ سنگ‌آهک‌های سازند مزدوران مربوط به بخش کم‌عمق حوضه (به سن ژوراسیک بالایی) (Adabi and Rao 1991)، سنگ‌آهک‌های آراگونیتی گوردون تاسمانیا (به سن اردویسین) (Rao 1990)، محدودهٔ آرگونیت‌های حاره‌ای عهد حاضر (Milliman et al. 1974)، محدودهٔ کربنات‌های معتدلهٔ عهد حاضر تاسمانیا (Rao & Adabi 1992; Rao & Amini 1995)، سنگ‌آهک‌های سازند تله‌زنگ برش نمونه و تاقدیس کیالو (Zohdi 2007)، سازند ایلام (Adabi & Asadi Mehmandousti 2008)، مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، بیشتر نمونه‌ها درون محدودهٔ سنگ‌آهک‌های حاره‌ای گوردون اردویسین تاسمانیا و یا نزدیک به محدودهٔ آن با ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ آراگونیتی قرار می‌گیرند. مقادیر عنصر استرانسیم در این نمونه‌ها نسبت‌به نمونه‌های معادل عهد حاضر کمتر است، این موضوع دلالت بر دیاژنز متئوریک دارد که سبب کاهش مقادیر استرانسیم می‌شود.

Fig 8- Comparison of strontium versus sodium variations in the limestones of the Ilam Formation in the Khorramabad Anticline section with the fields of the Mozduran Formation limestones from the shallow-water part of the basin (Upper Jurassic) (Adabi & Rao 1991)**, aragonitic limestones of Gordon, Tasmania (Ordovician)** (Rao 1990)**, the Holocene tropical aragonite field** (Milliman et al. 1974)**, the Holocene temperate carbonates of Tasmania** (Rao & Adabi, 1992; Rao & Amini 1995)**, the Telezang Formation limestones of the Sample section and the Kialu Anticline** (Zohdi 2007)**, and the Ilam Formation** (Adabi & Asadi Mehmandousti 2008)**. As can be seen from the figure, most of the samples fall within or close to the field of the Ordovician tropical limestones of Gordon, Tasmania, with an original aragonitic mineralogy. The strontium values in these samples are lower than those in their Holocene equivalents, which indicates meteoric diagenesis that caused the reduction in strontium content.**

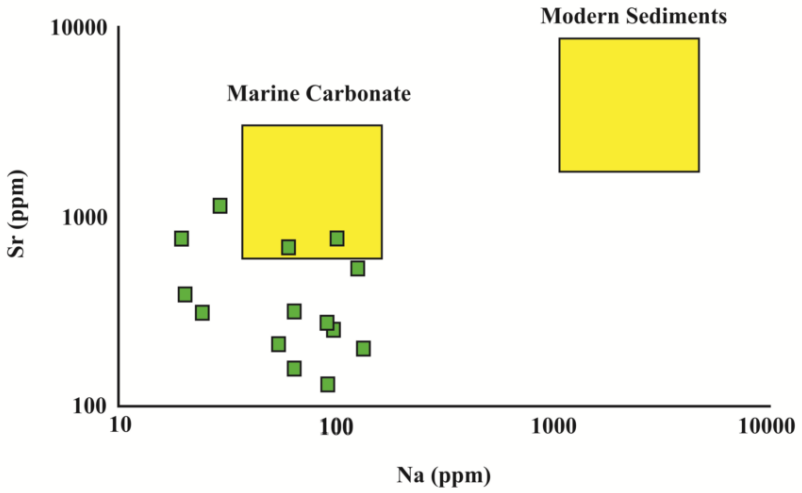
https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329



شکل ۹- ترسیم مقادیر سدیم در برابر منگنز در سنگ‌آهک‌های سازند ایلام در برش تاقدیس خرم‌آباد همان‌طور که مشاهده می‌شود، تقریباً بیشتر نمونه‌ها در محدودهٔ سنگ‌آهک‌های حاره‌ای گوردون اردویسین تاسمانیا و سنگ‌آهک‌های آراگونیتی مزدوران با ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ آراگونیتی و سازند ایلام با ترکیب کانی‌شناسی کلسیتی قرار می‌گیرند.

Fig 9- Plot of sodium versus manganese values in the limestones of the Ilam Formation in the Khorramabad Anticline section. As can be observed, almost all of the samples fall within the fields of the Ordovician tropical limestones of Gordon, Tasmania, and the aragonitic limestones of the Mozduran Formation, indicating an original aragonitic mineralogy.

روند تغییرات عنصر Sr در برابر عنصر Na، منشأ دریایی‌بودن کربنات‌های سازند ایلام را نشان می‌دهد (شکل ۱۰).



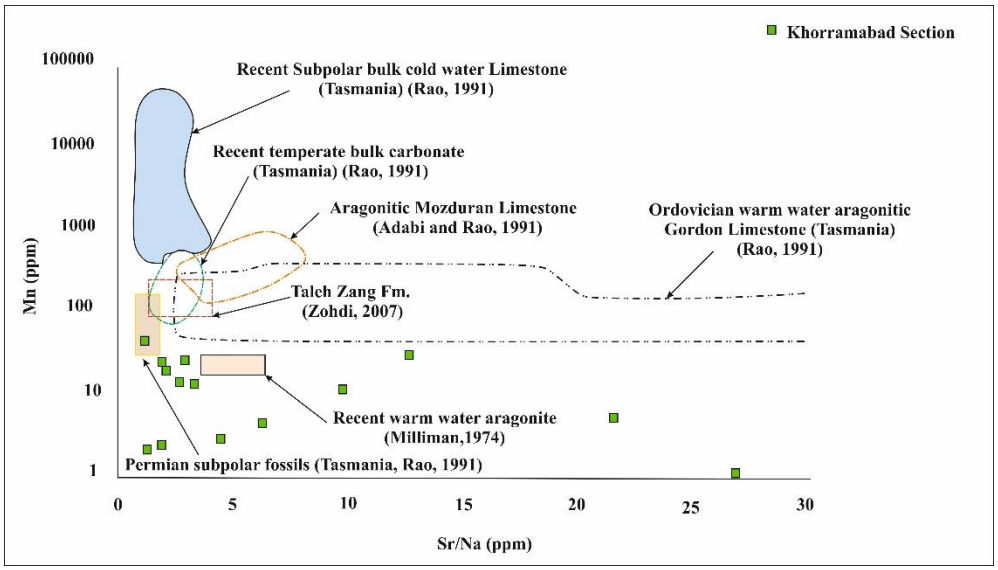
شکل ۱۰- روند تغییرات Sr در برابر Na دو مورد از نمونه‌ها در محدودهٔ کربنات‌های دریایی و مابقی نمونه‌ها نزدیک به محدودهٔ کربنات‌های دریایی و یا در مجاورت آنها قرار گرفته‌اند.

Fig 10- The trend of Sr versus Na variations indicates that the samples fall within the field of marine carbonates.

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329

عنصر منگنز (Mn)

مقدار منگنز در نمونه‌های آهکی سازند ایلام در برش مطالعه‌شده بین ۱۰ تا ۸۱ پی‌پی‌ام (میانگین ۳۹/٤۳ پی‌پی‌ام) در نوسان است. مقدار منگنز در نمونه‌های کربناتهٔ آراگونیتی دریاهای گرم و کم‌ژرفای عهد حاضر حدود ۳۰ پی‌پی‌ام است (Milliman et al. 1974)؛ در حالی که این مقدار در نمونه‌های کل کربناتهٔ مناطق معتدلهٔ عهد حاضر بیش از ۳۰۰ پی‌پی‌ام است (Rao and Adabi 1992; Rao and Amini 1995). برخی از پژوهشگران معتقدند مقدار منگنز با افزایش فرایندهای دیاژنز متئوریکی افزایش می‌یابد؛ زیرا ضریب توزیع منگنز در آب‌های متئوریکی زیاد است و به حدود ۱۵ می‌رسد (Rao 1991). در شرایط احیایی میزان این عنصر در سنگ‌های کربناته درخور توجه است؛ به‌گونه‌ای که در چنین شرایطی، مقدار منگنز به صد در صد نیز می‌رسد (Shanmugam and Benedict 1983). پایین‌بودن مقدار منگنز در کربنات‌ها به تبادل کمتر آب به سنگ (Water/rock interaction) نیز نسبت داده می‌شود (Adabi 2012). احتمالاً مقادیر پایین منگنز در نمونه‌های مطالعه‌شده، به‌سبب بسته‌بودن سیستم دیاژنزی است. همچنین مقادیر نسبت Mn/Sr تمامی نمونه‌های آهکی بررسی‌شده بین حداکثر ۰/۳٦ و حداقل ۰/۰۱ پی‌پی‌ام (میانگین ۰/۱٤ پی‌پی‌ام) در تغییر است که این گویای حفظ‌شدگی خوب ویژگی‌های زمین‌شیمیایی اولیهٔ آنهاست (Rao and Amini 1995). در شکل (۱۱) روند تغییرات عنصر Mn در برابر Sr/Na ترسیم شده است. مقدار تغییرات نسبت استرانسیم به سدیم در نمونه‌های مطالعه‌شده بین ۱/۰٤ تا ۳۲/۳۱ (میانگین ۸/۱۰ پی‌پی‌ام) است. به‌علت مشابهت کانی‌شناسی، نمونه‌های مطالعه‌شده درون محدودهٔ کربنات‌های آراگونیتی دریاهای گرم و کم‌ژرفای عهد حاضر و یا در مجاورت آنها قرار می‌گیرند که دلیلی بر آراگونیتی‌بودن کانی‌شناسی اولیهٔ سنگ‌آهک‌های سازند ایلام در برش مطالعه‌شده است. بیشتر نمونه‌های آهکی مطالعه‌شده از برش مطالعه‌شده دارای مقادیر (Sr/Na>1) هستند که گویای ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ آراگونیتی و کلسیتی هستند.



شکل ۱۱- تغییرات نسبت Mn در برابر Sr/Na همان‌طور که مشاهده می‌شوند نمونه‌های مطالعه‌شده مربوط به سازند ایلام، برش تاقدیس خرم‌آباد در محدودهٔ سنگ‌آهک‌های آراگونیتی دریایی گرم و کم‌ژرفای عهد حاضر و یا در مجاورت آنها قرار می‌گیرند. تمام نمونه‌های آهکی مطالعه‌شده از برش مطالعه‌شده دارای مقادیر (Sr/Na>1) هستند که گویای ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ آراگونیتی‌اند.

Fig 11- Variations of Mn versus Sr/Na ratios. As can be observed, the studied samples from the Ilam Formation in the Khorramabad Anticline section fall within the field of warm, shallow-marine aragonitic limestones and adjacent to the Gordon limestones of Tasmania, showing a similar trend. All of the studied limestone samples from the investigated section have Sr/Na > 1, indicating an original aragonitic mineralogy.

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329

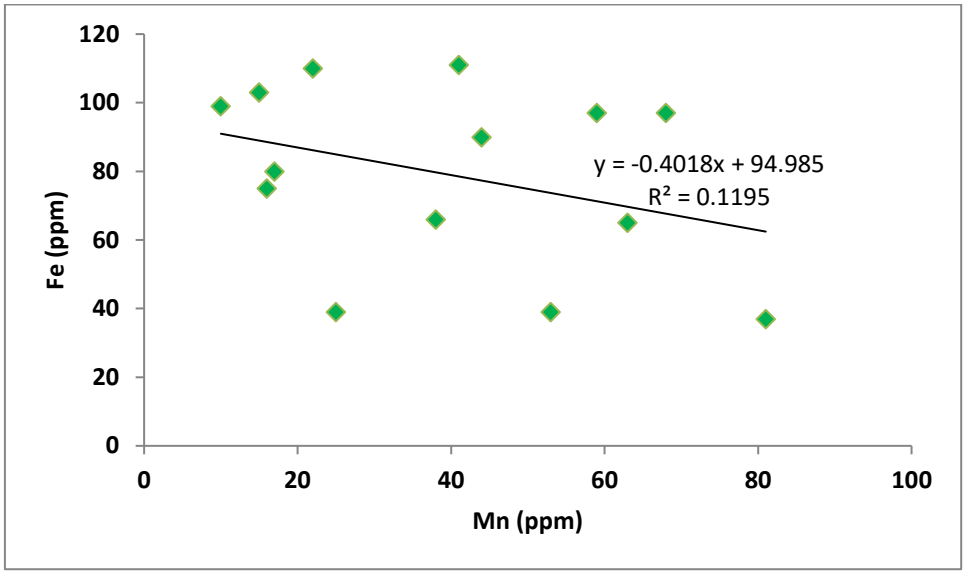
عنصر آهن (Fe)

تمرکز آهن در نمونه‌های آهکی سازند ایلام در برش مطالعه‌شده، بین ۳۷ تا ۱۱۱ پی‌پی‌ام (میانگین ۷۹/۱٤ پی‌پی‌ام) در تغییر است. تمرکز آهن با افزایش ژرفای آب، افزایش ورود مواد آواری، افزایش شرایط جوی و احیایی و همچنین افزایش مواد حل‌نشدنی در اسید، افزایش می‌یابد (Hoseinabadi et al. 2016). در مقابل، مقادیر پایین آهن و منگنز در کربنات‌ها، بیانگر سرعت پایین رسوب‌گذاری و ورود کم مواد تخریبی به حوضه است (Adabi 2012). مقدار آهن در رسوبات کربناتهٔ مناطق معتدله با افزایش درصد آراگونیت افزایش می‌یابد و مقدار آن به مراتب بیشتر از مقدار آهن در آراگونیت‌های آب‌های گرم مناطق حاره‌ای است (Rao and Adabi 1992). به‌دلیل تفریق بیولوژیکی، مقدار آهن در کلسیت و آراگونیت بیوتیک نسبت‌به کلسیت و آراگونیت غیربیوتیک افزایش چشمگیری نشان می‌دهد (شکل ۱۲) که این موضوع به تأثیر دیاژنز غیر دریایی و یا شرایط احیایی بر نمونه‌ها نسبت داده می‌شود. با افزایش تأثیر دیاژنز متائوریکی در محیط احیایی، مقدار آهن هم‌زمان با زیادشدن منگنز، افزایش می‌یابد (Adabi 2012). مقادیر آهن با افزایش تأثیر شرایط احیایی، بالا می‌رود (Anderson and Arthur 1983). در شرایط احیایی، عناصر منگنز و آهن به مقدار درخور توجهی در شبکهٔ کلسیت وارد می‌شوند (Mucci 1988).

علت پایین‌بودن مقادیر آهن و منگنز در نمونه‌های سازند ایلام، با وجود شرایط احیایی، ناشی از **فرآیندهای پس از رسوب‌گذاری و دیاژنزی** است؛ به‌طوری که جابه‌جایی این عناصر به‌وسیلهٔ سیالات یا اکسیدشدن آنها در اثر تغییر پتانسیل اکسایش–کاهش، به شست‌وشوی آنها منجر شده است. همچنین، احتمال **تشکیل کانی‌های سولفیدی (مانند پیریت)** مانع از تجمع غلظت بالای آنها در رسوبات می‌شود، حتی اگر محیط رسوبی پتانسیل لازم برای احیا را داشته باشد. وجود پیریت فراوان در نهشته‌های سازند ایلام، از دلایل کاهش عناصری نظیر آهن در نمونه‌های مطالعه‌شده است.از طرفی مقادیر پایین آهن و منگنز در کربنات‌ها، بیانگر سرعت پایین رسوب‌گذاری و ورود کم مواد تخریبی به حوضه است (Adabi 2012). این فرآیند با رسوب‌گذاری سازند ایلام در یک محیط دریایی عمیق و به دور از هرگونه مواد تخریبی همخوانی دارد.

در نمونه‌های مطالعه‌شدهٔ مربوط به سازند ایلام، سیستم دیاژنزی بیشتر از نوع بسته تشخیص داده شده است. علت پایین‌بودن مقادیر آهن و منگنز در نمونه‌های سازند ایلام، با وجود اینکه در شرایط احیا رسوب‌گذاری کرده است، به‌دلیل تشکیل کانی‌های سولفیدی (مانند پیریت) است که مانع از تجمع غلظت بالای آنها در رسوبات شده است، حتی اگر محیط رسوبی پتانسیل لازم برای احیا را داشته باشد. وجود پیریت فراوان در نهشته‌های سازند ایلام، از دلایل کاهش عناصری نظیر آهن و منگنز در نمونه‌های مطالعه‌شده است. حجم پیریت‌های تشکیل‌شده در مشاهدات صحرایی نیز بسیار چشمگیر است. از طرفی مقادیر پایین آهن و منگنز در کربنات‌ها، بیانگر سرعت پایین رسوب‌گذاری و ورود کم مواد تخریبی به حوضه است (Adabi 2012). این فرآیند با رسوب‌گذاری سازند ایلام در یک محیط دریایی عمیق و به دور از هرگونه مواد تخریبی همخوانی دارد؛ بنابراین در نمونه‌های سازند ایلام در برش مطالعه‌شده، کاهش عناصری نظیر آهن و منگنز به‌دلیل شرایط رسوب‌گذاری و تشکیل برخی کانی‌ها نظیر پیریت در شرایط احیاست و شرایط دیاژنزی، با توجه به بسته‌بودن سیستم دیاژنزی، تأثیری بر کاهش این عناصر نداشته است.

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329



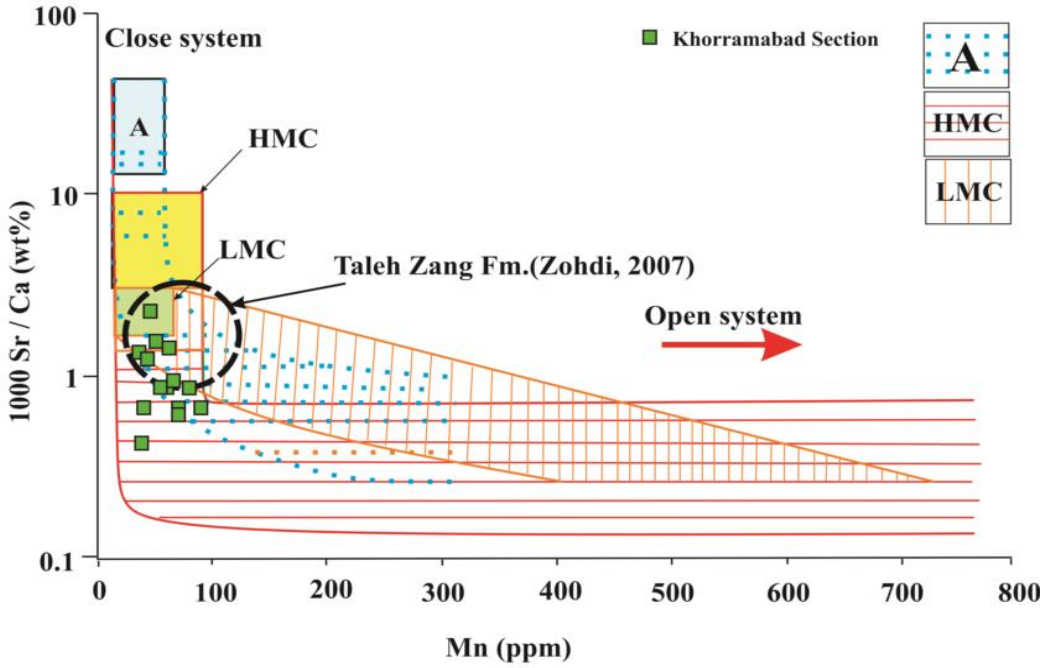
شکل ۱۲- رسم مقادیر آهن در برابر منگنز در نمونه‌های مطالعه‌شدهٔ مربوط به سازند ایلام برش تاقدیس خرم‌آباد (که بیانگر تأثیر فرایندهای دیاژنزی غیردریایی بر نمونه‌هاست)

Fig 12- Plot of iron versus manganese values in the studied samples from the Ilam Formation of the Khorramabad Anticline section, indicating the effect of non-marine diagenetic processes on the samples.

سیستم دیاژنزی سازند ایلام (برش تاقدیس خرم‌آباد)

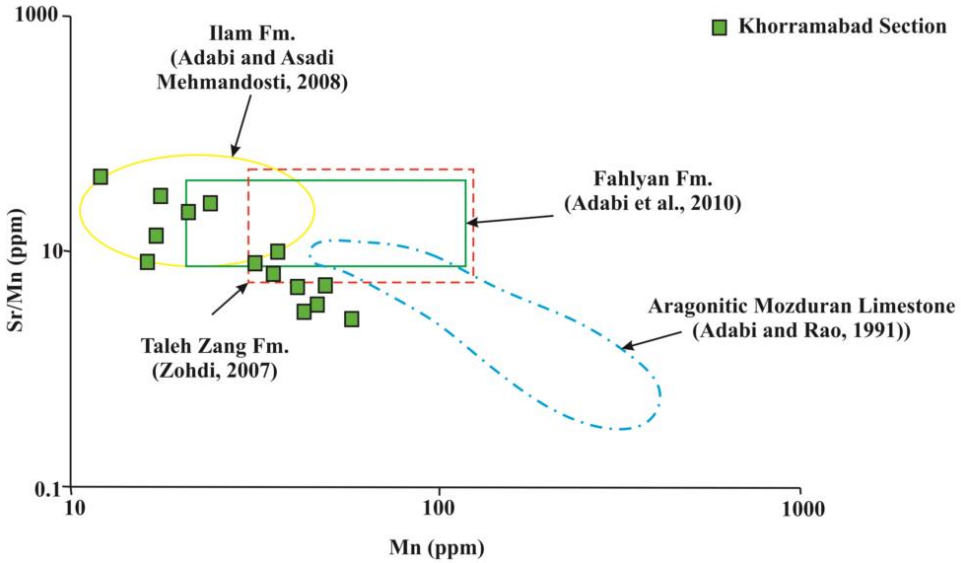
برند و وایزر (Brand and Veizer 1981) و برند و همکاران (Brand et al. 2006) محدوده‌هایی را برای روندهای دیاژنتیکی آراگونیت، کلسیت پر منیزیم و کلسیت کم منیزیم مشخص کرده‌اند. براساس ترسیم نسبت Sr/Ca در برابر Mn، روند دیاژنز در سیستم‌های باز و بسته مشخص می‌شود (Li et al. 2017). در سیستم دیاژنزی باز، با افزایش تبادل آب به سنگ water/rock (interaction) میزان نسبت استرانسیم به کلسیم کاهش می‌یابد؛ درنتیجه، میزان نسبت استرانسیوم به کلسیم فازهای دیاژنزی، کمتر از ترکیبات اولیه خواهد بود (Hoseinabadi et al. 2016). در سیستم‌های بسته و نیمه‌بسته که تبادل آب به سنگ کم است، نسبت استرانسیم به کلسیم فازهای دیاژنزی تغییرات محسوسی نسبت‌به ترکیبات اولیه نخواهد داشت (Adabi and Asadi-Mehmandosti 2008; Chirakal et al. 2026). مقادیر متوسط نسبت استرانسیم به کلسیم و پایین‌بودن مقادیر منگنز در نمونه‌های سازند ایلام در برش مطالعه‌شده، بیانگر یک سیستم دیاژنزی به نسبت بسته تا کمی باز با تبادل آب به سنگ پایین تا متوسط است (شکل ۱۳ و ۱٤). در شکل ۱٤، روند تغییرات نسبت Sr/Mn در برابر عنصر Mn ترسیم شده است. در این نمودار، نمونه‌های مطالعه‌شده در محدودهٔ سنگ‌آهک‌های سازند ایلام (Adabi and Asadi-Mehmandosti 2008)، کربنات‌های سازند تله‌زنگ (Zohdi et al. 2007) و کربنات‌های سازند فهلیان (Adabi et al. 2010) با ترکیب کانی‌شناسی آراگونیتی قرار گرفته‌اند.

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329



شکل ۱۳ - روند تغییرات نسبت **Sr/Ca** در برابر **Mn** مقادیر متوسط نسبت استرانسیم به کلسیم و پایین‌بودن مقادیر منگنز در نمونه‌های سازند ایلام در برش تاقدیس خرم‌آباد، بیانگر یک سیستم دیاژنزی به نسبت بسته تا کمی باز با تبادل آب به سنگ پایین تا متوسط است.

Fig 13- Trend of Sr/Ca ratio versus Mn. The average values of the strontium-to-calcium ratio and the low manganese values in the samples from the Ilam Formation in the Khorramabad Anticline section indicate a relatively closed to slightly open diagenetic system with low to medium water-to-rock exchange.

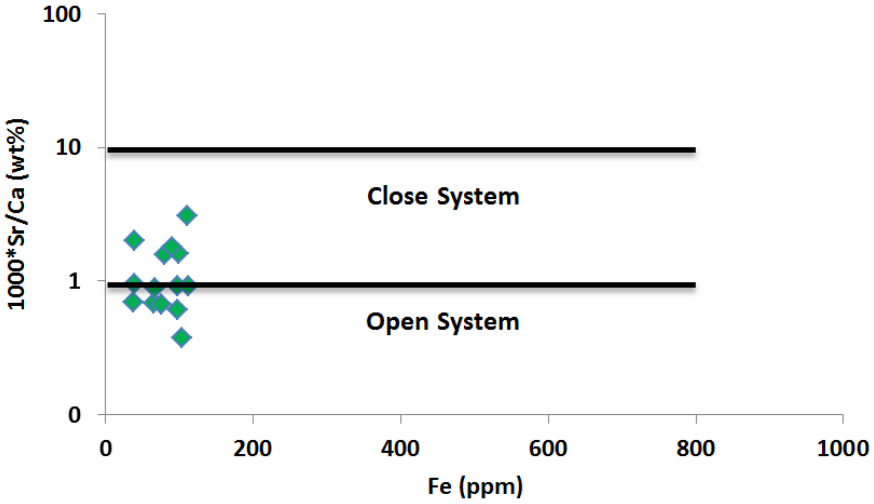


شکل ۱۴- نمودار تغییرات نسبت **Sr/Mn** در برابر **Mn** نسبت بالای **Sr/Mn** در نمونه‌های سازند ایلام در برش تاقدیس خرم‌آباد نسبت‌به سنگ‌آهک‌های مزدوران، بیانگر یک سیستم دیاژنزی به نسبت بسته تا کمی باز با تبادل آب به سنگ پایین تا متوسط است.

Fig 14- Plot of Sr/Mn ratio versus Mn. The high Sr/Mn ratio in the samples from the Ilam Formation in the Khorramabad Anticline section, relative to the Mozduran Formation limestones, indicates a relatively closed to slightly open diagenetic system with low to medium water–rock exchange.

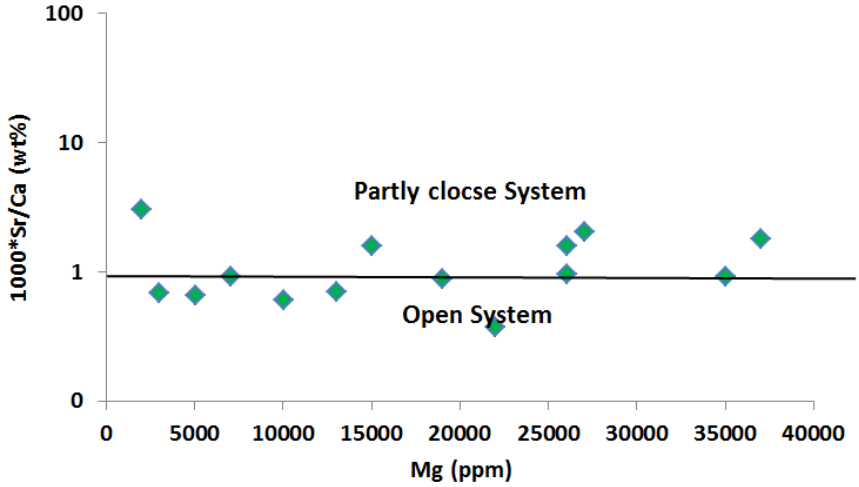
https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329

تغییرات نسبت Sr/Ca در برابر دو عنصر Mg و Fe نیز تأییدی بر بسته‌بودن سیستم دیاژنزی است (Asadi Mehmandosti et al. 2013). سازند ایلام در برش مطالعه‌شده براساس تغییرات نسبت Sr/Ca در برابر دو عنصر Mg و Fe، روند دیاژنزی بسته تا باز را نشان می‌دهد (شکل ۱۵ و ۱۶).



شکل ۱۵- تغییرات نسبت Sr/Ca در برابر عنصر Fe، تأییدکنندهٔ سیستم دیاژنزی بسته تا باز برای نمونه‌های سازند ایلام در برش مطالعه‌شده

Fig 15- Variations of Sr/Ca ratio versus Fe content confirm a closed to open diagenetic system for the samples of the Ilam Formation in the studied section.



شکل ۱۶- تغییرات نسبت Sr/Ca در برابر عنصر Mg، تأییدکنندهٔ سیستم دیاژنزی بسته تا باز برای نمونه‌های سازند ایلام در برش تاقدیس خرم‌آباد

Fig 16- Variations of the Sr/Ca ratio versus Mg content confirm a closed to open diagenetic system for the samples of the Ilam Formation in the Khorramabad Anticline section.

بالابودن نسبت استرانسیم به منگنز، استرانسیم به کلسیم، مقادیر پایین عنصر آهن و منگنز و نسبت بالای عنصر استرانسیم در نمونه‌های مطالعه‌شده و ترسیم مقادیر Sr/Ca در برابر عناصر Mn, Mg, Fe بیانگر یک سیستم دیاژنزی بسته تا

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329

کمی باز با تبادل آب به سنگ پایین تا متوسط (W/R) برای کربنات‌های سازند ایلام است (Lonsdale et al. 2026). نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شیمی عنصری نشان می‌دهد که سازند ایلام در این منطقه، از حوضهٔ رسوبی زاگرس در یک سیستم دیاژنزی بسته تا کمی باز با ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ غالب آراگونیتی است.

مقایسهٔ نهشته‌های مطالعه‌شده با دیگر برش‌های سازند ایلام

پژوهش‌های متعددی بر فرآیندهای دیاژنزی و ژئوشیمیایی نهشته‌های سازند ایلام در حوضهٔ رسوبی لرستان و مناطق مجاور انجام شده است. مطالعات اولیهٔ آدابی و اسدی مهماندوستی (Adabi and Asadi-Mehmandosti 2005) در شمال ایذه، کانی‌شناسی اولیهٔ سازند ایلام را عمدتاً آراگونیتی و محیط دیاژنزی آن را بسته معرفی کرده‌اند. اسدی مهماندوستی و همکاران (Asadi Mehmandosti et al. 2013) در تحقیقات بعدی خود در کبیرکوه ایلام، ویژگی‌های رسوبی، دیاژنزی و ژئوشیمیایی این سازند را بررسی و مجدداً بر بسته‌بودن سیستم دیاژنزی آن تأکید کردند. در پژوهشی دیگر، شوشتریان و همکاران (Shoshtarian et al. 2011) با مطالعهٔ برشی از تاقدیس پیون و مقطع تحت‌الارضی دانان در حوضهٔ زاگرس، ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ سازند ایلام را مخلوطی از آراگونیت و کلسیت گزارش کردند که تحت تأثیر دیاژنز جوی قرار گرفته‌اند. این تحقیقات گوناگون، درک جامعی از تحولات دیاژنزی و ترکیب کانی‌شناسی سازند ایلام را در مناطق مختلف ارائه می‌دهند. اگرچه شواهد کانی‌شناسی گویای آن است که سازند ایلام از ترکیب اولیهٔ کربناتهٔ آراگونیتی و کلسیتی برخوردار بوده‌اند، ناهمگونی در مسیرهای تکاملی دیاژنزی، نشان‌دهندهٔ ماهیت غیریکپارچهٔ این سازند در مقیاس حوضه‌ای است. درواقع، تاریخچهٔ دیاژنزی این نهشته‌ها تحت کنترل شدید عوامل محیطی و موقعیت مکانی (محدودیت‌های پالئوتوپوگرافیک و نرخ‌های متغیر تدفین) قرار داشته است؛ به‌طوری که تفکیک میان سیستم‌های دیاژنزی بسته (محصور در سیالات درون‌سازندی) و سیستم‌های متأثر از دیاژنز متئوریک (جوی)، تأکید می‌کند که ارائهٔ یک الگوی عام برای کل سازند ایلام امکان‌پذیر نیست و استنباط فرآیندهای پس‌رسوبی، نیازمند تدوین مدل‌های اختصاصی برای هر مقطع براساس برهم‌کنش ژئوشیمیایی میان فازهای کانیایی و سیالات درگیر است.

نتیجه

نهشته‌های سازند ایلام در برش مطالعه‌شده، با داشتن ضخامت ۱۲۱ متر از سنگ‌آهک تشکیل شده است. روند تغییرات عنصر Sr به Na در برابر Mn نشان داد نمونه‌های مطالعه‌شده در محدودهٔ سنگ‌آهک‌های آراگونیتی دریاهای گرم و کم‌ژرفای عهد حاضر و یا در مجاورت آنها با ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ آراگونیتی قرار می‌گیرند. انحلال پوسته آلوکم‌ها و پرشدن فضای حاصل از انحلال با سیمان کلسیت اسپاری، دلیلی بر انحلال‌پذیربودن پوستهٔ آلوکم‌ها با ترکیب کانی‌شناسی آراگونیتی است. بیشتر نمونه‌های مطالعه‌شده درون محدودهٔ سنگ‌آهک‌های حاره‌ای گوردون اردویسین تاسمانیا با ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ آراگونیتی و کربنات‌های سازند ایلام با ترکیب کانی‌شناسی کلسیتی قرار می‌گیرند؛ بنابراین، ترکیب کانی‌شناسی اولیهٔ سازند ایلام در منطقهٔ مطالعه‌شده، مخلوطی از آراگونیت و کلسیت است. مقادیر به نسبت پایین‌تر عنصر استرانسیم در این نمونه‌ها نسبت‌به نمونه‌های معادل عهد حاضر، دلالت بر ترکیب کانی‌شناسی مخلوط آراگویتی و کلسیتی برای نمونه‌های مطالعه‌شده دارد. پایین‌بودن نسبت Sr/Mn(میانگین ۱۸/٤۲ پی‌پی‌ام) و Sr/Ca (میانگین ۱۱/۹٤پی‌پی‌ام)، مقادیر پایین عناصر Fe (میانگین ۷۹/۱٤ پی‌پی‌ام) و Mn (میانگین ۳۹/٤۳ پی‌پی‌ام)، تمرکز به نسبت بالای Sr (میانگین ٤۲٤/۱٤ پی‌پی‌ام) در نمونه‌های مطالعه‌شده و ترسیم مقادیر Sr/Ca در برابر عناصر Mn, Mg, Fe، بیانگر یک سیستم دیاژنزی بسته تا کمی باز با تبادل آب به سنگ پایین تا متوسط برای کربنات‌های سازند ایلام است.

https://doi.org/10.22108/jssr.2026.148773.1329

References

Adabi M.H. 2012. Sedimentary Geochemistry. Arian Zamin Published, 503, p.

Adabi M.H. and Asadi-Mehmandosti E. 2005. Determitation of original carbonate mineralogy of Ilam Formation and recognition tween Ilam and Sarvak formations by geochemical data in the Peyon anticline, North of Izeh, Iranian Society of Crystalography and Mineralogy, 13(2): 229-244. https://ijcm.du.ac.ir/article_1131.html?lang=en

Adabi M.H. and Rao C.P. 1991. Petrographic and geochemical evidence for original aragonite mineralogy of Upper Jurassic carbonates (Mozduran Formation), Sarakhs area, Iran. Sedimentary Geology, 72, (3-4): 253-267. 10.1016/0037-0738(91)90014-5

Adabi M.H. and Asadi-Mehmandosti E. 2008. Microfacies and geochemistry of the Ilam Formation in the Tang-E Rashid area, Izeh, S.W. Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 33: 267-277. 10.1016/j.jseaes.2008.01.002

Adabi M.H. Kakemem U. and Sadeghi A. 2015. Sedimentary facies, depositional environment and sequence stratigraphy of Oligocene- Miocene shallow water carbonates from the Rig Mountain, Zagros basin (SW Iran). Carbonates and Evaporites, 31: 69-85. https://doi.org/10.1007/s13146-015-0242-9

Adabi M.H., Salehi M.A. and Ghabeishavi A. 2010. Depositional environment, and sequence stratigraphy and geochemistry of Lower Cretaceous carbonates (Fahliyan Formation), S.W. Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 39: 148-160. 10.1016/j.jseaes.2010.03.011

Alavi M. 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforland evolution. American Journal of Science, 304: 1-20. https://doi.org/10.2475/ajs.304.1.1

Anderson T.F. and Arthur M.A. 1983. Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenviromental problems. In: Stable isotope in sedimentary geology. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Short Course, 10: 1-151.

Armstrong-Altrin J.S. Lee Y.I. Verma, S.P. and Worden, R.H. 2009. Carbon, oxygen, and strontium isotope geochemistry of carbonate rocks of the Upper Miocene Kudankulam Formation, southern India: Implications for paleoenvironment and diagenesis: Geochemistry, 69(1): 45-60. 10.1016/j.chemer.2008.09.002

Asadi Mehmandosti E. Adabi M.H. and Woods A.D. 2013. Microfacies and geochemistry of the Middle Cretaceous Sarvak Formation in Zagros Basin, Izeh Zone, SW Iran. Sedimentary Geology, 293: 9–20. 10.1016/j.sedgeo.2013.04.005

Asadi Mehmandosti E. Daneshian J. and Mahmoud Panah M.F. 2019. Depositional – diagenetic and geochemical characteristics of the Ilam Formation in northwest of Abdanan, Kabirkoh. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 35 (4): 77-104. https://doi.org/10.22108/jssr.2019.118968.1117

Brand U. and Veizer J. 1981. Chemical diagenesis of multicomponent carbonate system, II: stable isotopes. Journal Sedimentary Petrology, 51: 987-997. https://doi.org/10.1306/212F7DF6-2B24-11D7-8648000102C1865D

Brand U. Azmy K. and Veizer J. 2006. Evaluation of the Salinic I tectonic, Cancañiri glacial and Ireviken biotic events: Biochemostratigraphy of the Lower Silurian succession in the Niagara Gorge area, Canada and USA: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.03.004.

Chen X. Zhou Y. Bowyer F. Mettam C. Zhang K. and Shields G.A. 2026. Evaluating the utility of rare earth elements as a redox proxy: a case study from the c. 1.57 Ga Gaoyuzhuang Formation, North China Craton. Journal of the Geological Society, https://doi.org/10.1144/jgs2025-183

Chirakal T. Messaoud J. H. Alibrahim A. Ibrahim K. Grélaud C. Kalifi A. Powell J. H. and van Buchem F. 2026. Integrated carbon isotope stratigraphy and biostratigraphy of Cenomanian to Turonian carbonates from Jordan – An updated age model and sequence stratigraphic correlations with Oman. Cretaceous Research, https://doi.org/10.1016/j.cretres.2025.106207

Dunham R. J. (1962) Classification of Carbonate rocks according to Dipositional texture. In: W. E. Ham(ed) Classification of carbonate rock: A symposium. Amarican Association Petroleum Geology Memoir. 108-121 p.

Higgins J.A. Blättler C. Lundstrom E. Santiago-Ramos D. Akhtar A. Ahm A.C. Bialik O. Holmden C. Bradbury H. and Murray S. 2018. Mineralogy, early marine diagenesis, and the chemistry of shallow-water carbonate sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta, 220: 512-534. 10.1016/j.gca.2017.09.046

Hood A.V.S. Planavsky N.J. Wallace M.W. and Wang X. 2018. The effects of diagenesis on geochemical paleoredox proxies in sedimentary carbonates. Geochimica et Cosmochimica Acta, 232: 265–287. https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.04.022 .

Hoseinabadi M. Mahboubi A. Shabestari G.M. and Motamed A. 2016. Depositional environment, diagenesis, and geochemistry of Devonian Bahram formation carbonates, Eastern Iran. Arabian Journal of Geosciences, 9(1): 1 -25. https://doi.org/10.1007/s12517-015- 2056-4.

Jamalian M. and Adabi M.H. 2014. Geochemistry, microfacies and diagenetic evidences for original aragonite mineralogy and open diagenetic system of Lower Cretaceous carbonates Fahliyan Formation (Kuh-e Siah area, Zagros Basin, South Iran). Carbonates and Evaporites, 30(1): 77–98. https://doi.org/10.1007/s13146-014-0211-8

James G. and Wynd J. 1965. Stratigraphic nomenclature

of Iranian oil consortium agreement area: AAPG Bulletin, 49(12): 2182-2245. DOI: https://doi.org/10.1306/A663388A-16C0-11D7-8645000102C1865D.

Javanbakht M. Wanas H.A. Jafarian A. Shahsavan N. and Sahraeyan M. 2018. Carbonate diagenesis in the Barremian-Aptian Tirgan Formation (Kopet-Dagh Basin, NE Iran): Petrographic, geochemical and reservoir quality constraints. Journal of African Earth Sciences, 144: 122–135. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.04.016.

Kamalvand S. Maghfouri- Moghaddam I. Emami-Meybodi S.M. and Darabi G.H. 2017. Micro-biostratigrapgy and paleobathymetry of the Ilam Formation in the Khorram- Abad anticline, Lorestan basin, The 10th National Geology Conference of Payam- Nour University.

Lan X. Liu H. Lü X. Yang Y. and Dong L. 2020. Geological and geochemical implications of the complicated carbonate diagenetic process in the Lower Ordovician buried hills of the eastern Tazhong Low Rise, NW China, using Well M1 as an example. Carbonates and Evaporites, 35(14): 15 p. https://doi.org/10.1007/s13146-019-00542-y .

Li Z. Goldstein R.H. and Franseen E.K. 2017. Meteoric calcite cementation: diagenetic response to relative fall in sea-level and effect on porosity and permeability, Las Negras area, southeastern Spain. Sedimentary Geology, 348: 1–18. 10.1016/j.sedgeo.2016.12.002

Lonsdale M.C. Ahm A.S. C. Nelson L.L. Thompson J.W. Higgins J.A. and Smith E. F. 2026. Carbon Isotope Trends of Precambrian-Cambrian Carbonates in Southwestern Laurentia Are Robust to Diagenetic Overprinting. American Journal of Science, https://doi.org/10.2475/001c.155346

Milliman J. Mueller G. and Foerstner U. 1974. Marine Carbonates. Recent Sedimentary Carbonates, Springer-Verlag, Berlin, p. 375.

Motiei H. 2003. Geology of Iran (Zagros stratigraphy), publication of the geological organization. 583p. [In Persian]

Murris R.J. 1980. Middle East stratigraphic evolution and oil habitat. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 64: 597–618.

Oluwajana O.A. Ehinola O.A. Ofiwe C.U. Akhayere E. and Egunjobi K. 2020. Depositional environment and diagenesis of Late Cretaceous-Early Paleogene carbonates on the Benin flank, southwestern Nigeria. Journal of African Earth Sciences, 163: 103762. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103762.

Mucci A. 1988. Manganese uptake during calcite precipitation from Seawater. conditions leading to the Formation of a pseudo kutnahorite: Geochimica et Cosmochimica Acta, 52: 1859-1868. 10.1016/0016-7037(88)90009-9

Rao C.P. 1990. Geochemical characteristics of cool-temperate carbonates, Tasmania, Australia. Carbonates and Evaporites, 5: 209-221. https://doi.org/10.1007/BF03174849

Rao C.P. 1991. Geochemical differences between subtropical (Ordovician), temperate (Recentand Pleistocene) subpolar (Permian) carbonates, Tasmania Australia. Carbonates and Evaporites, 6: 83-106. https://doi.org/10.1007/BF03175385

Rao C.P. and Adabi M.H. 1992. Carbonate minerals, major elements and oxygen and carbon isotopes and their variation with depth in cool, temperate carbonates, Western Tasmania, Australia. Marine Geology, 103: 249-272. https://doi.org/10.1016/0025-3227(92)90019-E

Rao C.P. and Amini Z.Z. 1995. Faunal relationship to grain-size, mineralogy and geochemistry in recent temperate shelf carbonates, Eastern Tasmania, Australia. Carbonates and Evaporites, 10: 114-123. https://doi.org/10.1007/BF03175247

Rossetti F. Theye T. Lucci F. Bouybaouenne M.L. Dini A. Gerdes A. Phillips M. and Cozzupoli D. 2014. From seafloor spreading to orogeny: The journey of the Neotethyan crust in the Lesser Caucasus (Armenia). Gondwana Research, 26(2), 605-618. DOI: 10.1016/j.gr.2013.07.019

Shanmugam G. and Benedict G.L. 1983. Manganese distribution in the carbonate fraction of shallow to deep marine lithofacies, Middle Ordovician, Eastern Tennessee. Sedimentary Geology, 35: 159-175. 10.1016/0037-0738(83)90036-2

Shoshtarian F.S. Adabi M.H. Sadeghi A. Hoseini-Barzi M. and Lotfpour M. 2011. Primary mineralogy of the Ilam Formation based on geochemical data in the type section, Peyon anticline and the subsurface section of Danan- a. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 27 (3), 39-68. 20.1001.1.20087888.1390.27.3.3.3

Veizer J. 1983a. Chemical diagenesis of carbonates: theory and application of trace element technique, Stable Isotopes in Sedimentary Geology. Society for Sedimentary Geology, 10: 3-100.

Veizer J. (1983). Chemical diagenesis of carbonates: Theory and application of trace element technique. In M. A. Arthur, T. F. Anderson, I. R. Kaplan, J. Veizer, & L. S. Land (Eds.), Stable Isotopes in Sedimentary Geology (SEPM Short Course Notes, Vol. 10, pp. 3-1–3-100). Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM).

Ziegler M. 2001. Late Permian to Holocene paleofacies evolution of the Arabian plate and its hydrocarbon implications. Geo Arabia, 6: 445-450.

Zohdi A. (2007). Geochemistry, diagenesis and sedimentary environment of the carbonate deposits of Tale Zang Formation in type section at Langar Anticline (Dezful) and comparison with surface Tale Zang section at Kialo Anticline (Dehluran). M.Sc. thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 154 p.