



Investigating water-to-rock exchanges (W/R) in carbonate system Using Petrographic and Elemental Geochemistry Evidence (An example of the Asmari Formation, Southwestern Lorestan)

Lefteh Kabizadeh Arab¹, Mohsen Allameh^{2*} and Ramin Mokfi³

1- M.Sc. Student, Dept. of Petroleum Engineering, Ma. C., Islamic Azad University, Mashhad, Iran

2- Dept. of Petroleum Engineering, Mining and Geology, Ma. C., Islamic Azad University, Mashhad, Iran

3- National Iranian Drilling Company, Iran

ARTICLE INFO

Article type:

Original Research

Article history:

Received: 2025 July 5

Accepted: 2025 September 16

Keywords:

Asmari formation

Diagenetic system

Elemental

Geochemistry

Zagros

Lorestan

ABSTRACT

In order to investigate water-to-rock exchanges and subsequent to the diagenetic systems and the primary mineralogy of the carbonate units of the Asmari Formation, a 131-meter-thick surface stratigraphic section located in the Rit anticline (southwestern Lorestan) was selected and sampled. The lithology of this formation comprises alternating layers of carbonate and dolomitic carbonate rocks. In this study, 23 samples were analyzed using elemental EDX analysis to determine the major and trace element composition and interpret the diagenetic systems and original mineralogy. Elemental geochemical evidence indicates that the studied samples fall within the compositional range of aragonitic limestones from Gordon, Tasmania, and aragonitic carbonates of the Mozduran Formation. This supports the interpretation that the original mineralogy of the Asmari limestones in the studied section was aragonitic. Plotting Sr/Ca ratios against Mn contents reveals a predominantly closed to slightly open diagenetic system, characterized by weak water-rock interaction (W/R), for the Asmari carbonates in the Rit anticline section. The presence of primary aragonitic mineralogy, the lack of significant discontinuities, the prevailing climatic conditions, and intrinsic rock properties such as permeability, original mineralogy, and diagenetic potential appear to have played key roles in controlling the water-to-rock ratio. These factors contributed to the limited impact of meteoric diagenesis in the upper part of the sequence, as evidenced by the scarcity of meteoric cement and the partial dissolution of bioclasts in the studied samples. Thus, it can be concluded that the diagenetic system within the carbonate succession of the Asmari Formation at the Rit anticline is dominantly closed, becoming weakly open towards the top of the sequence.

DOI: <https://doi.org/10.22084/nfag.2025.31382.1687>

Corresponding author: Mohsen Allameh, E-mail: mohsenallameh@iau.ac.ir

Cite this article: Lefteh Kabizadeh Arab, Mohsen Allameh and Ramin Mokfi (2026). Investigating water-to-rock exchanges (W/R) in carbonate system Using Petrographic and Elemental Geochemistry Evidence (An example of the Asmari Formation, Southwestern Lorestan), New Findings of Applied Geology, Vol. 20, No. 39, pp: 277-299.



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

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

Extended Abstract

Introduction

Carbonate rocks continue to be the main focus of many studies due to their importance as carbonate reservoirs (Adabi et al., 2016; Jafarian et al., 2017). The Asmari Formation, dated to the Oligocene–Miocene, is the youngest and most significant oil reservoir formation in the Zagros Basin. Consequently, extensive research has been conducted on the petrographic characteristics of this formation. The deposits of the Asmari Formation can be considered the last major marine transgression in the Zagros (Motée'i, 2003). This formation was first studied at Tang-e-Gol Torsh in the Asmari Mountain (Richardson, 1939). Based on extensive studies, its age ranges from the Oligocene (Rupelian) to the Lower Miocene (Burdigalian) (Richardson, 1939; Thomas, 1948; Ehrenberg et al., 2007). In the type section, the Asmari Formation, with a thickness of 314 meters, consists of resistant, cream to brown limestones with orogenic morphology, interbedded with minor shale layers and notable for abundant fracturing (Motée'i, 2003). Various researchers such as Adams and Burgess (1967); Ehrenberg et al. (2007); Van Buchem et al. (2010); Vaziri Moghadam et al. (2010); Sirafian et al. (2011); Zabihi Zouram et al. (2013); Lorestani et al. (2016); Adabi et al. (2016); Mohseni et al. (2016); Farshi et al. (2019); Manjazi et al. (2019); Qarahchalous et al. (2020); Kamalifar et al. (2020); Karami et al. (2020); and Omidpour et al. (2021) have investigated various aspects including facies variations, depositional environments, sequence stratigraphy, diagenetic processes, and reservoir quality in different parts of the folded Zagros. The transformation of carbonate sediments can occur in three diagenetic realms: marine, meteoric, and burial. Although the processes and products seem complex, they are identifiable throughout geological history (Bathurst, 1975; Tucker and Wright, 1990; Moore, 2001; Flügel, 2004; James and Jones, 2015; Asadi et al., 2016; Bargomanou et al., 2020; Salifu et al., 2021). Analysis of major and trace elements in carbonates is crucial for identifying depositional conditions, primary mineralogy, and the prevailing diagenetic environment (Milliman et al., 1974; Rao, 1990; Adabi, 1991; Adabi and Asadi Mihmandoust, 2008; Higgins et al., 2018).

Geochemical data provide valuable information about sedimentary environment conditions and diagenetic alterations over time (Armstrong-Altrin et al., 2009). Therefore, the concentration of major and trace elements can be used to determine their paleogeographic setting at the time of deposition (Higgins et al., 2018). Studies of modern carbonate sediments show the abundance of aragonite in tropical seas (Milliman et al., 1974), high-magnesium calcite in temperate seas (Adabi, 1991), and low-magnesium calcite as the dominant mineral in polar regions (Rao, 1990). Since diagenetic processes alter the primary characteristics of sediments in terms of petrography and geochemistry after deposition, investigating the intensity of diagenetic effects provides deeper understanding of the initial depositional conditions. Furthermore, changes induced by diagenesis can create new features and potentials within the sediments. Accordingly, the aim of this study is to investigate and analyze the mineralogy, elemental geochemistry, and diagenetic systems of the carbonate units of the Asmari Formation, a formation with reservoir potential. It is hoped that these studies, alongside sequence stratigraphic and facies analyses, will aid in correlating reservoir characteristics at local and regional scales in adjacent areas. The studied section is located 65 kilometers southwest of Khorramabad city and 10 kilometers north of Korki village. Its geographic coordinates are 33°04'25" N latitude and 48°15'20" E longitude.

Materials and Methods

Based on the geological map of Poldokhtar-Balarud County at a scale of 1:100,000, the studied section was selected, surveyed, and sampled. The section was chosen to ensure easy accessibility, maximum thickness, greatest lithological variability, and minimal surface cover. A total of 82 samples were collected from the 131-meter thickness of the formation based on lithological variations, of which 23 samples were selected for EDX analysis. For petrographic studies, thin sections of all collected samples were prepared at Ferdowsi University of Mashhad. Petrographic examinations were carried out using an Olympus BH2 polarized light microscope under both plane-polarized light

(PPL) and cross-polarized light (XPL). Carbonate rocks were classified according to Dunham (1962). Samples selected for EDX analysis were taken from micritic parts of the rock, avoiding any signs of weathering, alteration, fractures, veins, joints, cracks, and fossils. Approximately 15 grams of each sample were powdered using a planetary ball mill and analyzed by Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX). The analyses were conducted at Central Laboratory No. 1, Lorestan University. Major elements (Ca, Mg) were measured in weight percent (%), while trace elements (Sr, Mn, Fe, Na) were measured in parts per million (ppm). The precision of the analyses was $\pm 0.5\%$ for major elements and ± 5 ppm for trace elements. The stratigraphic positions of the samples are shown on the regional stratigraphic column (Figure 4). To distinguish calcite from dolomite and to identify dolomite types (ferroan and non-ferroan), thin sections were stained using alizarin red and potassium ferrocyanide following Dixon's method (1965). Electron microscopy imaging of some fine-crystalline dolomites was performed at Lorestan University.

Discussion

Various researchers have conducted studies on the Asmari Formation in the Lorestan sedimentary basin and adjacent areas (Adams and Burgess, 1967; Ehrenberg et al., 2007; Van Buchem et al., 2010; Vaziri Moghadam et al., 2010; Sirafian et al., 2011; Zabihi Zouram et al., 2013; Lorestani et al., 2016; Adabi et al., 2016; Mohseni et al., 2016; Farshi et al., 2019; Manjazi et al., 2019; Qarahchalous et al., 2020; Kamalifar et al., 2020; Karami et al., 2020; Omidpour et al., 2021; Kahandel et al., 2025). These studies have addressed various aspects including facies variations and depositional environments, sequence stratigraphy, diagenetic processes, and reservoir quality assessments in different parts of the folded Zagros. Petrographic investigations of the carbonate facies of the Asmari Formation in the studied section led to identification of several diagenetic processes such as micritization, dissolution and porosity development, cementation, neomorphism, physical and chemical compaction, and replacement. These processes occurred in four environments: marine, freshwater, burial, and

uplift, passing through three diagenetic stages—early (eogenesis), middle (mesogenesis), and late (telogenesis). In the Rit anticline, the diagenetic processes, paragenetic sequences, and the dolomitization model of the Asmari Formation have been examined by Kahandel et al. (2025). Elemental geochemistry, petrography, and diagenetic system analyses of the Tele-Zang Formation in the same anticline were studied by Maghfori Moghadam and Sedaghatnia (2023), who interpreted the diagenetic systems as closed to semi-open with low water-rock interaction. High Sr/Mn and Sr/Ca ratios, low Fe and Mn contents, and elevated Sr concentrations in the studied samples, along with plots of Sr/Ca against Mn, Mg, and Fe, indicate a predominantly closed to slightly open diagenetic system with limited water-rock interaction (W/R) for the Asmari carbonates. Integration of petrographic and elemental geochemical data suggests that the Asmari Formation in this part of the Zagros sedimentary basin experienced a dominantly closed and weakly semi-open diagenetic system with a primary mineralogy dominated by aragonite. The prevalent diagenetic system was closed with restricted water-rock exchange. Factors such as limited and short-lived discontinuities, climatic conditions, and intrinsic rock controls including permeability, original mineralogy, and diagenetic potential, which are important in controlling water-to-rock ratios, resulted in the upper part of the succession being influenced by very weak meteoric diagenesis. This created a weakly open diagenetic system. Bioclast components in the succession were slightly affected by dissolution due to meteoric diagenesis; these bioclasts were mainly aragonitic, making them more susceptible to dissolution. Moreover, the scarcity of freshwater cements also supports the interpretation of a predominantly closed to slightly open diagenetic system in the studied succession.

Conclusion

Petrographic studies on the examined sequences led to the identification of several diagenetic processes occurring within four diagenetic environments: marine, freshwater, burial, and uplift. Elemental geochemistry (major and trace elements) was employed to analyze the primary mineralogy and diagenetic systems of the Asmari Formation

in the Rit anticline section. Based on elemental geochemical evidence, the studied samples fall within the compositional range of aragonitic limestones from Gordon, Tasmania, and aragonitic carbonates of the Mozduran Formation, confirming the original aragonitic mineralogy of the Asmari limestones in the studied section. Plots of Sr/Ca ratios versus Mn, Mg, and Fe demonstrate a dominantly closed to weakly open diagenetic system with limited water-to-rock interaction (W/R) for the Asmari carbonates in the Rit anticline section. The upper part of these sequences was subjected to very weak meteoric diagenesis, supported by the limited presence of meteoric cements and partial dissolution of bioclasts in the studied samples. Additionally, variations in Sr/Ca ratios relative to Mg and Fe further confirm

the closed nature of the diagenetic system. Therefore, it can be concluded that the diagenetic system within the carbonate sequences of the Asmari Formation in the Rit anticline section is predominantly closed and weakly open toward the top of the succession. Factors such as limited and short-lived discontinuities, climatic conditions, and intrinsic rock controls—including permeability, primary mineralogy, and diagenetic potential—likely played important roles in controlling the water-to-rock ratio. This led to a slightly open diagenetic system at the Asmari-Gachsaran formation boundary at the top of the Asmari Formation.



بررسی تبادلات آب به سنگ (W/R) در سیستم‌های کربناته با استفاده از شواهد سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی عنصری (مثالی از سازند آسماری، جنوب باختری لرستان)

لفته کعبی‌زاده عرب^۱، محسن علامه^{۲*} و رامین مکفی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی نفت، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۲- گروه مهندسی نفت، معدن و زمین‌شناسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۳- شرکت ملی حفاری ایران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	به‌منظور بررسی تبادلات آب به سنگ و به دنبال آن تحلیل سیستم‌های دیاژنزی و کانی‌شناسی اولیه واحدهای کربناته سازند آسماری، یک برش چینه‌شناسی سطح‌الارضی واقع در تقادیس ریت (جنوب‌باختری لرستان) به ضخامت ۱۳۱ متر انتخاب و مورد نمونه‌برداری قرار گرفته است. سنگ‌شناسی این سازند تناوبی از سنگ‌های آهکی و آهکی دولومیتی می‌باشد. در این پژوهش تعداد ۲۳ نمونه به روش تجزیه عنصری EDX مورد آنالیز قرار گرفته و عناصر اصلی و فرعی در آن‌ها جهت تفسیر سیستم‌های دیاژنزی و کانی‌شناسی اولیه استفاده شده است. شواهد زمین‌شیمی عنصری نشان داد نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده سنگ‌آهک‌های آراگونیتی گوردون تاسامانیا و کربنات‌های آراگونیتی سازند مزدوران قرار دارند که دلیلی بر آراگونیتی بودن کانی‌شناسی اولیه سنگ‌آهک‌های سازند آسماری در برش مورد مطالعه دارد. ترسیم مقادیر St/Ca در برابر Mn بیانگر یک سیستم دیاژنزی غالب بسته تا کمی باز به صورت ضعیف و با تبادل آب به سنگ پایین (W/R) برای کربنات‌های سازند آسماری در برش تقادیس ریت می‌باشد. وجود کانی‌شناسی اولیه آراگونیتی، ناپیوستگی نه‌چندان شدید و طولانی مدت، آب و هوا و کنترل‌کننده‌های ذاتی سنگ مانند تراوایی، کانی‌شناسی اولیه و پتانسیل دیاژنزی می‌تواند کنترل‌کننده مهمی در میزان نسبت آب به سنگ باشد. این عوامل در رأس سازند آسماری سبب شده‌اند که بخش بالایی این توالی تحت تأثیر دیاژنز جوی بسیار ضعیف قرار گیرد؛ محدود بودن سیمان‌های دیاژنز جوی در نمونه‌های مورد مطالعه و انحلال جزئی اجزای زیستی در این سازند، می‌تواند شاهی بر این موضوع باشد. بنابراین می‌توان گفت سیستم دیاژنزی در توالی‌های سازند کربناته آسماری در برش تقادیس ریت یک سیستم دیاژنزی غالباً بسته بوده و به سمت بالای توالی به صورت ضعیف باز می‌باشد.
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۲۵	
کلیدواژه‌ها: سازند آسماری سیستم دیاژنزی زمین‌شیمی عنصری زاگرس لرستان	

DOI: <https://doi.org/10.22084/nfag.2025.31382.1687>

* نویسنده مسئول: محسن علامه، mohsenallameh@iau.ac.ir E-mail:

استناد: لفته کعبی‌زاده عرب، محسن علامه و رامین مکفی (۱۴۰۵). بررسی تبادلات آب به سنگ (W/R) در سیستم‌های کربناته با استفاده از شواهد سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی عنصری (مثالی از سازند آسماری، جنوب باختری لرستان)، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۲۰، شماره ۳۹، صفحه ۲۷۷ تا ۲۹۹.

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.

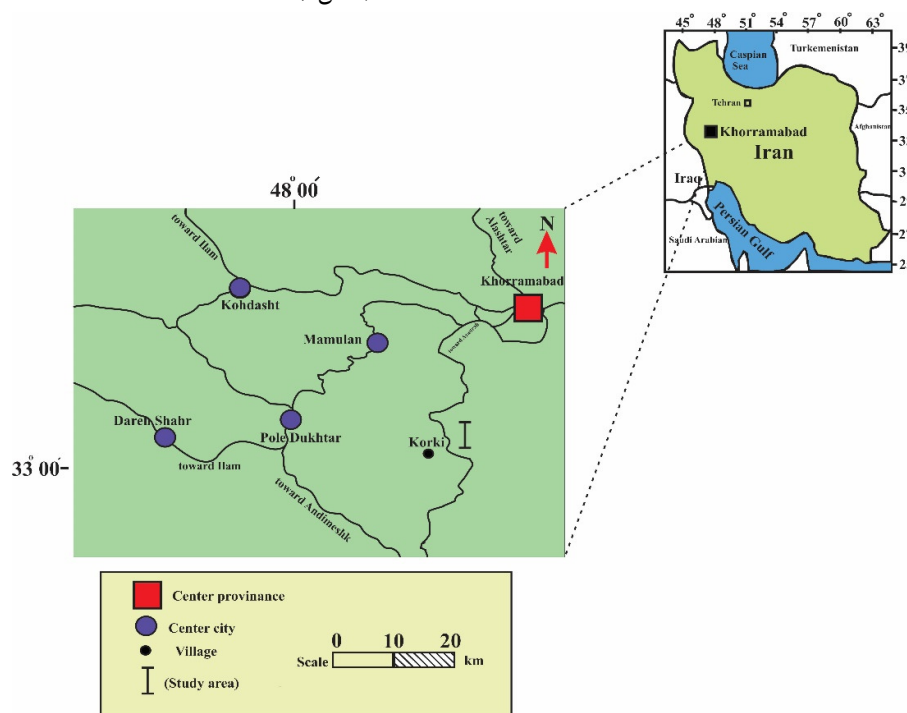


آدرس وبسایت نشریه: <https://nfag.basu.ac.ir> | ایمیل نشریه: nfag@basu.ac.ir

۱- پیشگفتار

سنگ‌های کربناته به دلیل اهمیت آن‌ها به‌عنوان مخازن کربناته، هنوز هم در بسیاری از مطالعات موضوع اصلی محسوب می‌شوند (پتی‌جان، ۱۹۷۵؛ حیدری، ۲۰۰۸؛ کاسیح و همکاران، ۲۰۰۸؛ آدابی و همکاران، ۲۰۱۶؛ جعفریان و همکاران، ۲۰۱۷). سازند آسماری با سن الیگوسن-میوسن، جوان‌ترین و مهم‌ترین سنگ مخزن نفت در حوضه زاگرس است و به همین دلیل، مطالعات گسترده-ای بر روی خواص سنگ‌چینه‌ای این سازند انجام شده است. پژوهشگران مختلفی همچون (آدامز و بورگز، ۱۹۶۷؛ اهرنبرگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ ون بوخم و همکاران، ۲۰۱۰؛ وزیری‌مقدم و همکاران، ۲۰۱۰؛ صیرفی‌ان و همکاران، ۲۰۱۱؛ ذبیحی زوئرام و همکاران، ۲۰۱۳؛ لرستانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ آدابی و همکاران، ۲۰۱۶؛ محسنی و همکاران، ۲۰۱۶؛ فرشی و همکاران، ۲۰۱۹؛ منجزی و همکاران، ۲۰۱۹؛ قره‌چلو و همکاران، ۲۰۲۰؛ کمالی‌فر و همکاران، ۲۰۲۰؛ کرمی و همکاران، ۲۰۲۰؛ امیدپور و همکاران، ۲۰۲۱)، جنبه‌های مختلف شامل تغییرات رخساره‌ای و محیط‌رسوبی، چینه‌نگاری سکانشی، بررسی فرایندهای دیاژنزی و مطالعات کیفیت مخزنی در بخش‌های مختلف زاگرس چین‌خورده مطالعه و بررسی کرده‌اند.

تغییر و تبدیل رسوبات کربناته می‌تواند در سه قلمرو دیاژنزی دریایی، جوی و دفنی رخ دهد که فرآیندها و محصولات آن‌ها گرچه پیچیده به نظر می‌رسند، اما در سراسر تاریخ زمین‌شناسی قابل شناسایی هستند (بترست، ۱۹۷۵؛ تاکر و رایت، ۱۹۹۰؛ مور، ۲۰۰۱؛ فلوگل، ۲۰۱۰؛ جیمز و جونز، ۲۰۱۵؛ اسدی و همکاران، ۲۰۱۶؛ بارگومانو و همکاران، ۲۰۲۰؛ سالی‌فو و همکاران، ۲۰۲۱). بررسی عناصر اصلی و فرعی در کربنات‌ها در شناسایی شرایط تشکیل، ترکیب کانی‌شناسی اولیه و نوع محیط دیاژنزی حاکم بر آن‌ها اهمیت دارد (می‌لی‌مان و همکاران، ۱۹۷۴؛ رآو، ۱۹۹۰؛ آدابی، ۱۹۹۱؛ آدابی و اسدی مهماندوستی، ۲۰۰۸؛ هایگینس و همکاران، ۲۰۱۸). بازسازی شرایط دیاژنزی پس از رسوب‌گذاری، اقلیم دیرینه و جغرافیای دیرینه هدف اصلی این پژوهش است و لذا این مطالعات در کنار مطالعات چینه‌نگاری سکانشی و مطالعات رخساره‌ای می‌تواند در انطباق ویژگی‌های مخزنی در مقیاس محلی و ناحیه‌ای این سازند در مناطق مجاور مورد استفاده قرار گیرد. برش مورد مطالعه در ۶۵ کیلومتری جنوب باختری شهرستان خرم‌آباد و در ۱۰ کیلومتری شمال روستای کرکی واقع شده است. این برش دارای مختصات جغرافیایی طول خاوری "E 48° 15' 20" و عرض شمالی "N 33° 04' 25" است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به برش مورد مطالعه.

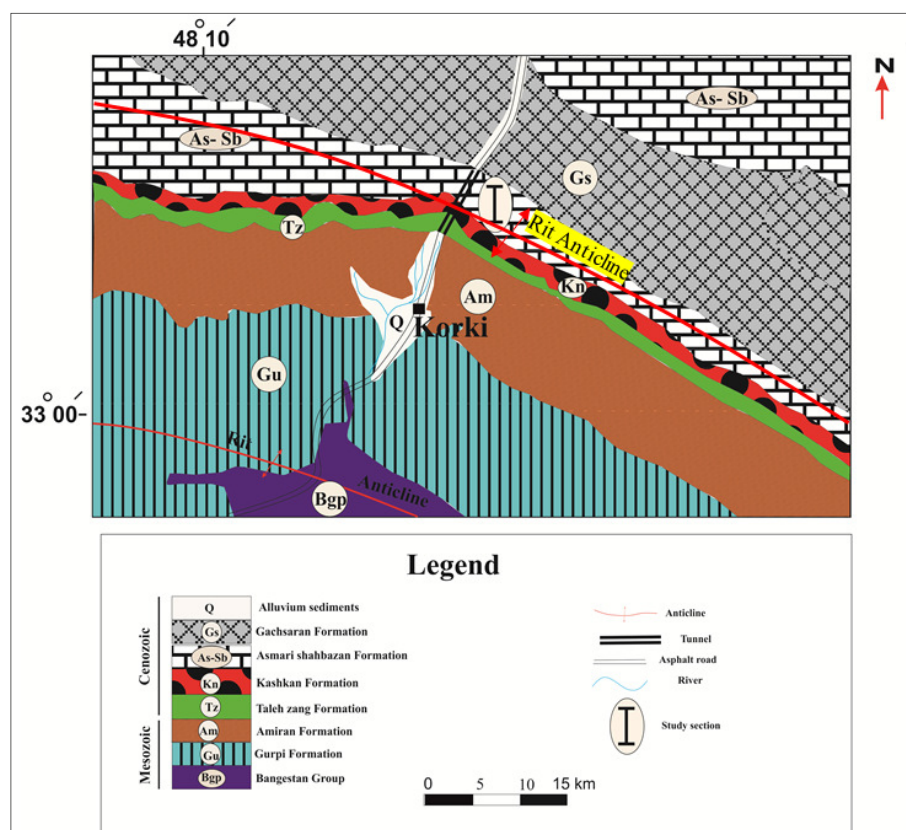
Fig. 1. Geographical location and ways of access to the section under study.

۲- زمین‌شناسی و سنگ‌چینه‌نگاری منطقه مورد

مطالعه

زون زمین‌شناسی زاگرس، بخش شمالی و چین‌خورده صفحه عربی و بخشی از سیستم آلپ- هیمالیاست که از شمال غربی تا جنوب شرقی ایران تا تنگه‌ی هرمز امتداد دارد (حیدری، ۲۰۰۸). در حوضه رسوبی زاگرس (پالئوسن پسین تا ائوسن)، رسوبات این حوضه در یک پیش گودال باقیمانده در امتداد حاشیه شرقی صفحه عربی نهشته شده‌اند (علوی، ۲۰۰۴). منطقه مورد مطالعه بر اساس نقشه پهنه‌های ساختاری حوضه زاگرس، در زون زاگرس چین‌خورده واقع شده است (اسرافیلی- دیزجی و کیانی هرچگانی، ۲۰۱۱). بر اساس نقشه زمین‌شناسی

۱:۱۰۰۰۰۰ شهرستان پلدختر-بالارود به ترتیب زمانی سازندهای سروک، سورگاه، ایلام، امیران، گورپی، تله‌زنگ، سازند آواری قرمز رنگ کشکان، سازندهای آسماری و شهبازان و سازند گچساران رخنمون دارند. در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه و در شکل ۳ رخنمون صحرایی سازندها نشان داده شده است. سازند کربناته آسماری در تقادیس ریت با ستبرای ۱۳۱ متر بر روی سازند دولومیتی شهبازان به صورت ناپیوستگی پیوسته‌نما (پاراکانفورمیتی) قرار گرفته و مرز بالایی آن با سازند تبخیری گچساران به صورت تند و ناگهانی می‌باشد. در برش مورد مطالعه، سازند آسماری از ۸ واحد سنگ‌چینه‌ای تشکیل شده است (شکل ۴).



شکل ۲. گسترش سازندهای منطقه مورد مطالعه بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرستان پلدختر- بالارود.

Fig. 2. Expansion of formations in the studied area based on geological map 1:100000 of Poldokhtar- Balaroud.

۳- مواد و روش‌ها

بر اساس نقشه زمین‌شناسی شهرستان پلدختر- بالارود با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، برش مورد نظر انتخاب و مورد پیمایش و نمونه‌برداری قرار گرفته است. این برش به نحوی انتخاب گردید که دارای راه دسترسی ساده، بیشترین

ضخامت، بیشترین تغییرات سنگ‌شناسی و کمترین پوشیدگی باشد. براساس تغییرات سنگ‌شناسی، تعداد ۸۲ نمونه از ضخامت ۱۳۱ متری این سازند برداشت شد که از این تعداد، ۲۳ نمونه جهت تجزیه EDX انتخاب شده است. به منظور مطالعات سنگ‌شناسی، از تمام نمونه‌های برداشت

اصلی (Ca, Mg) بر حسب درصد وزنی 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. موقعیت این نمونه‌ها روی ستون چین‌شناسی منطقه نشان داده شده است (شکل ۴). همچنین جهت تشخیص کانی کلسیت از دولومیت و نوع دولومیت‌ها (آهن‌دار و بدون آهن) از رنگ‌آمیزی مقاطع به‌وسیله آلزارین قرمز و فروسیانیدپتاسیم به روش دیکسون (۱۹۶۵) استفاده شده است. از برخی دولومیت‌های ریزبلور تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در دانشگاه لرستان انجام شده است.

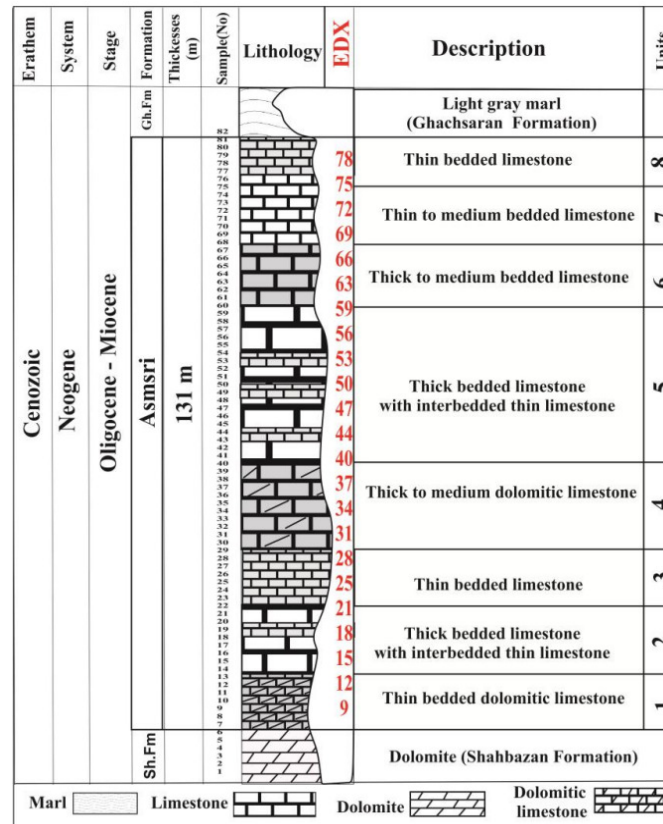
شده مقطع نازک سنگ‌شناسی در دانشگاه لرستان تهیه شده است. مطالعات سنگ‌شناسی به‌وسیله میکروسکوپ پلاریزان نوع Olympus- BH2 با نور XPL و PPL صورت گرفت. نام‌گذاری سنگ‌های کربناته به روش دانهام ۱۹۶۲ صورت گرفته است. نمونه‌های انتخاب شده جهت تجزیه EDX از بخش‌های میکرایتی سنگ و به‌دور از هرگونه هوازدگی، آلتراسیون، شکستگی، رگه، درزه، شکاف و فسیل برداشت شده است و در نهایت مقدار ۱۵ گرم از هر نمونه انتخاب و پس از پودر کردن آن‌ها با آسیاب سیاره‌ای (گلوله‌ای)، به روش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) در آزمایشگاه مرکزی شماره ۱ دانشگاه لرستان مورد تجزیه عنصری قرار گرفتند. عناصر



Fig. 3. a: Overview of the Asmari Formation and other outcropping formations in the study area (view to the northeast). b. Closes up view of Amiran Formation. c. Closes up view of Talehzang Formation. d. Closes up view of Kashkan Formation. e. Closes up view of Shahbazan Formation. f. Closes up view of Asmari Formation. g. closes up view of Gachsaran Formation. h: Erosional disconformity between Asmari and Gachsaran formation in the study area.

^۲ Scanning electron microscope

^۱ Energy Dispersive X ray



شکل ۴. واحدهای سنگ‌چینه‌ای سازند آسماری در برش تاقدیس ریت. اعداد قرمز رنگ نمونه‌های انتخاب شده جهت تجزیه EDX می‌باشند.
Fig. 4. Stratigraphic units of the Asmari Formation in the section of Rit anticline. The red numbers are the samples selected of EDX analysis.

۴- نتایج

۴-۱- سنگ‌شناسی

فرآیندهای دیاژنزی شناسایی شده در برش مورد مطالعه شامل میکریتی شدن، نوریکتی (نئومورفیسم)، سیمانی شدن، فشردگی، انحلال و تخلخل و جانشینی می‌باشد که در ادامه به توصیف و تفسیر این فرآیندها پرداخته شده است. این فرآیندها در چهار محیط دیاژنزی (دریایی، آب شیرین، تدفینی و بالاآمدگی) رخ داده است.

الف) فرآیندهای دیاژنزی در محیط دریایی

فرآیندهای دیاژنزی در محیط‌های دریایی شامل میکریتی شدن، نوریکتی کاهشی، تشکیل سیمان حاشیه‌ای هم ضخامت و تشکیل دولومیت اولیه می‌باشند که در مقاطع مورد مطالعه شناسایی گردید. از ویژگی‌های این محیط می‌توان به انرژی پایین و رکود آب، چرخش سیال در رسوبات رسوب‌گذاری شده، سیالات اشباع با HCO_3 و CO_2 اشاره کرد (فلوگل، ۲۰۱۰).

میکریتی شدن: میکریتی شدن از جمله فرآیندهای دیاژنزی اولیه می‌باشد که در محیط فرباتیک آب دریا رخ می‌دهد. این پوشش از شکل دانه تبعیت کرده و اغلب سبب حفظ شکل اولیه دانه می‌شود (شکل ۵-ا).

تفسیر: تشکیل پوشش میکریتی اشاره به فعالیت ارگانسیم‌ها از جمله سیانوباکتری‌ها، جلبک‌ها و قارچ‌ها دارد که بر سطح دانه‌ها انجام می‌گیرد (مسادی و همکاران، ۲۰۱۸؛ گارسیا-پیشل، ۲۰۰۶؛ بترست، ۱۹۷۵؛ تاکر، ۲۰۰۱؛ تاکر و رایت، ۱۹۹۰؛ ال-سای و اوردن، ۲۰۰۷؛ بارگومانو و همکاران، ۲۰۲۰؛ سالی‌فو و همکاران، ۲۰۲۱؛ لبرک و همکاران، ۲۰۲۴).

سیمان حاشیه‌ای هم‌ضخامت: این نسل از سیمان با بلورهای بسیار ظریف اطراف آلوکم‌ها (دانه‌ها) دیده می‌شود (شکل ۵-ب).

تفسیر: سیمان حاشیه‌ای هم‌ضخامت معمولاً اولین نسل از سیمان‌ها به‌شمار می‌روند که در محیط‌های دریایی آرام با نرخ رسوب‌گذاری پایین، در اطراف دانه‌ها و فضای خالی

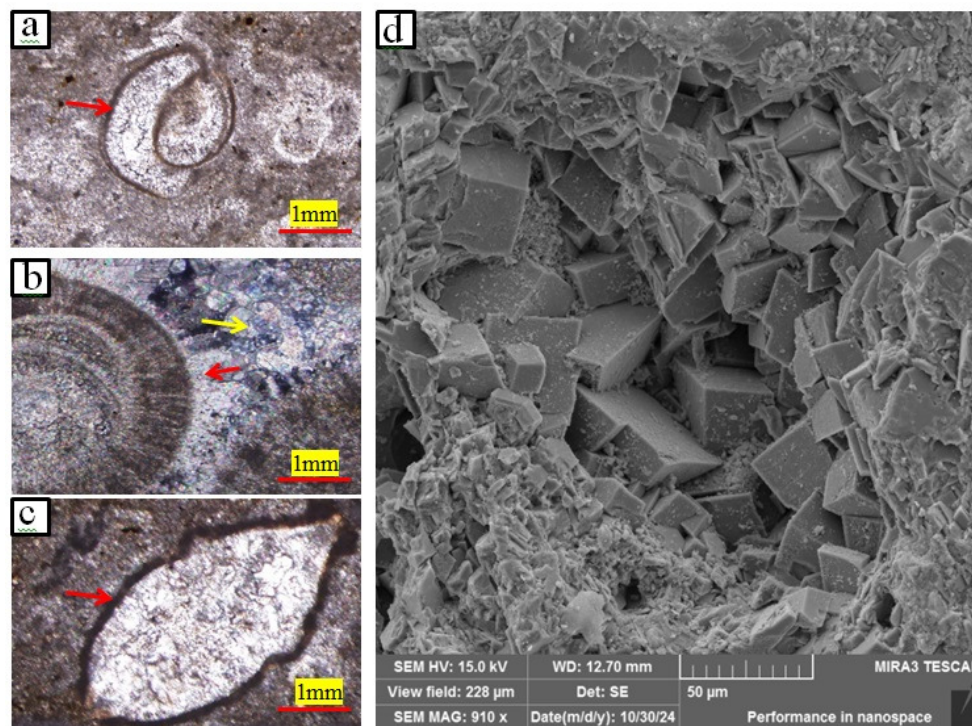
بافت موزائیکی و اغلب بی‌شکل در اندازه‌های بین ۴ تا ۵۰ میکرون در مقاطع شناسایی گردید (شکل ۵-d). این بافت دولومیتی معادل بافت Planar-S مازالو (۱۹۹۲) و سیبیلی و گرگ (۱۹۸۷) و بافت ایدیوتوپیک Idiopic-S گرگ و سیبیلی (۱۹۸۴) و آدابی (۲۰۰۹) است. فابریک متراکم، تیره رنگ و فاقد فسیل این نوع از دولومیت‌ها و وجود شواهد بافتی رسوبی اولیه نظیر لامیناسیون جلبکی و فابریک فنسترال در آن‌ها به نظر می‌رسد تحت شرایط سطحی و دمای پایین و احتمالاً همزمان با رسوب‌گذاری یا در مراحل اولیه دیاژنز در محیط بالای جزرومدی یا بین جزرومدی تشکیل شده‌اند (لند، ۱۹۸۵؛ گرگ و شلتون ۱۹۹۰؛ آدابی، ۲۰۰۹؛ سالی‌فو و همکاران، ۲۰۲۱).

سنگ تشکیل می‌شوند و در ادامه به‌وسیله سایر سیمان‌ها دنبال می‌گردند (بارگومانو و همکاران، ۲۰۲۰؛ سالی‌فو و همکاران، ۲۰۲۱؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ فولک، ۱۹۷۴؛ لانگمن، ۱۹۸۰؛ تاکر، ۲۰۰۱؛ لبرک و همکاران، ۲۰۲۴).

نوریختی کاهشی: در نمونه‌های مورد مطالعه، نوریختی کاهشی در پوسته آلوم‌ها دیده می‌شود که نوعی فرآیند میکریتی شدن می‌باشد (شکل ۵-c).

تفسیر: نوریختی (نئومورفیسم) کاهشی که توأم با میکریتی شدن است، در نمونه‌ها دیده شد و باعث کوچک‌تر شدن اندازه دانه‌ها می‌شود (سالی‌فو و همکاران، ۲۰۲۱).

دولومیت نوع اول یا دولومیکریته‌ها (دولومیت‌های خیلی ریز بلور): در مقاطع مورد مطالعه، این نوع از دولومیت‌ها با



شکل ۵. فرآیندهای دیاژنزی محیط دریایی. a: ایجاد پوشش نازک میکریتی اطراف یک قطعه آلوم. b: تشکیل سیمان حاشیه‌ای هم‌ضخامت دورتادور دانه (پیکان قرمز رنگ)، این سیمان توسط سیمان‌های نسل بعدی دنبال می‌شود (پیکان زرد رنگ). c: ایجاد پوشش نازک میکریتی اطراف یک صدف بایوکستی که به عنوان نوعی نوریختی کاهشی محسوب می‌شود. d: تصویر SEM از دولومیت‌های ریزبلور (دولومیکرایت)

Fig. 5. Diagenetic processes in the marine environment. a: Formation of a thin micritic coating around an allochem. b: Development of a uniform circumgranular rim cement (red arrow), followed by subsequent generations of cement (yellow arrow). c: Formation of a thin micritic coating around a bioclastic shell, considered a type of neomorphism by reduction. d: Fine-crystalline dolomites (dolomicrite) under SEM.

مطالعه شناسایی گردید (شکل ۶-a). در رخساره‌های کربناته مورد مطالعه این نوع سیمان اغلب به‌صورت سیمان درون دانه‌ای، بین دانه‌ای و به‌صورت سیمان درون شکستگی‌ها تشکیل شده است.

ب) فرآیندهای دیاژنزی در محیط آب شیرین

این فرآیندها در برش مورد مطالعه در بخش بالایی سازند آسماری رخ داده‌اند (نمونه‌های شماره ۵۹ تا ۷۸).

سیمان موزائیکی کلسیتی هم‌بعد: این سیمان به صورت بلورهای هم‌بعد و هم‌اندازه می‌باشد که در مقاطع مورد

حفره‌ای، کانالی و درون‌دانه‌ای می‌باشند (شکل ۶- c تا f). انحلال در دانه‌های الیید با ترکیب آراگونیتی سبب تشکیل تخلخل درون‌دانه‌ای شده است (شکل ۶- f).
تفسیر: فرآیند انحلال نزدیک به سطح زمین و به دلیل تأثیر سیالات دیاژنزی جوی رخ می‌دهد ولی طی دفن عمیق نیز ممکن است ایجاد شود (تا کر ۲۰۰۱؛ ون بوخم و همکاران، ۲۰۱۰؛ بارگومانو و همکاران، ۲۰۲۰؛ سالی‌فو و همکاران، ۲۰۲۱).

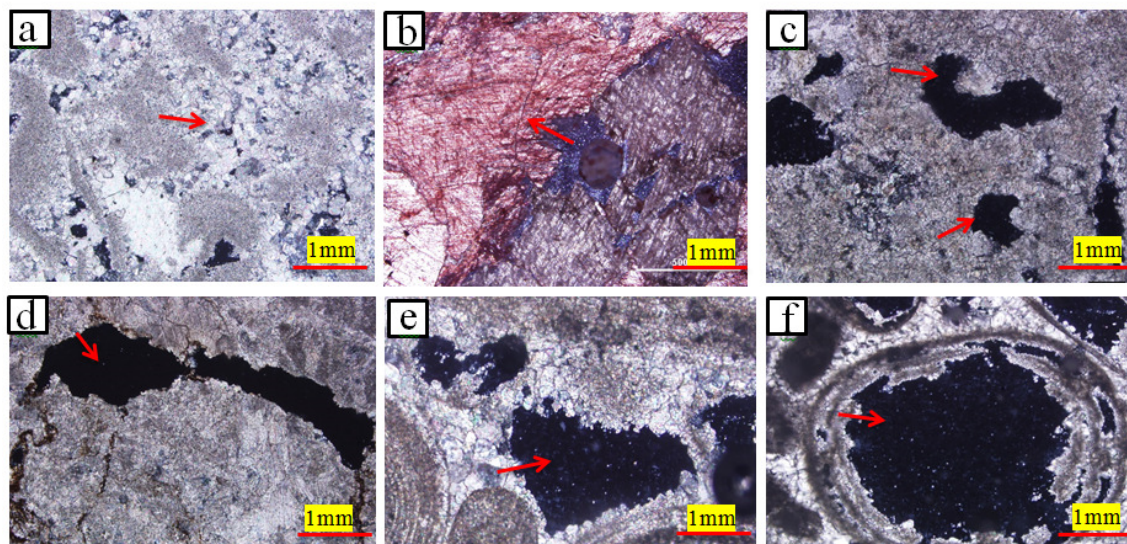
ج) فرآیندهای دیاژنزی در محیط‌های تدفینی

فرآیندهای دیاژنزی در محیط‌های دیاژنزی تدفینی شامل فشردگی نوریختی افزایشی، فیزیکی و شیمیایی، تشکیل سیمان‌های بلوکی، فراگیرنده و دروزی و دولومیت‌های ثانویه می‌باشند که در مقاطع مورد مطالعه شناسایی گردید. سیمان‌های تشکیل شده در محیط دیاژنزی تدفینی اغلب آهن‌دار بوده زیرا در شرایط نسبتاً احیایی تشکیل می‌شوند و اغلب در کنار این سیمان‌ها عوارض ناشی از فرآیندهای دیاژنتیکی تدفینی مانند استیلولیت‌ها دیده می‌شوند در صورتی که سیمان‌های محیط دیاژنزی آب شیرین به دلیل وجود یون آهن سه‌ظرفیتی اغلب پس از رنگ‌آمیزی با آلزارین قرمز به رنگ صورتی تا قرمز ظاهر می‌شوند.

تفسیر: شفافیت در این سیمان دلالت بر غیردریایی بودن آن دارد (سیل و جیمز، ۲۰۱۷؛ ارلر و همکاران، ۲۰۱۸). این سیمان با بلورهای هم‌اندازه فضای درون شکستگی‌ها، درون‌دانه‌ها و بین‌دانه‌ها را پر کرده است و ریزدانه بودن، هم‌اندازه بودن و عدم شواهد دفن (نداشتن مرزهای منحنی) از دلایل محیط تحت جوی برای تشکیل این سیمان است (بارگومانو و همکاران، ۲۰۲۰).

سیمان بلوکی (قطعه‌ای): این نوع سیمان‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه پس از رنگ‌آمیزی با آلزارین قرمز به رنگ صورتی تا قرمز ظاهر شده‌اند و لذا بیانگر تشکیل تحت شرایط دیاژنزی جوی (آب شیرین) می‌باشند (شکل ۶- b).
تفسیر: سیمان کلسیت بلوکی عمدتاً در مراحل میانی تا پایانی دیاژنزی تدفینی، به‌ویژه در دماهای بین ۶۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، تشکیل می‌شود (تا کر، ۲۰۰۱؛ پورسر، ۱۹۷۸؛ فلوجل، ۲۰۱۰؛ سیل و جیمز، ۲۰۱۷؛ ارلر و همکاران، ۲۰۱۸؛ کراوز و همکاران، ۲۰۱۸). با افزایش دما و فشار، کلسیت موجود در پوسته یا اسکلت موجودات دریایی، یا حتی کلسیت ناشی از فرآیندهای بیولوژیکی اولیه، ممکن است در اثر انحلال جزئی، کلسیم و کربنات آزاد کند.

انحلال و توسعه تخلخل: تخلخل‌های ایجاد شده در رخساره‌های کربناته مورد مطالعه شامل تخلخل بین‌دانه‌ای،



شکل ۶. فرآیندهای دیاژنزی محیط آب شیرین. a: سیمان موزاییکی هم‌بعد. b: سیمان قطعه‌ای (بلوکی)، رنگ قرمز تا صورتی این سیمان دلالت بر محیط دیاژنزی آب شیرین دارد. c: تخلخل حفره‌ای در رخساره مادستون کربناته. d: تخلخل کانالی در رخساره وکستون بایوکلستی. e: تخلخل بین‌دانه‌ای در رخساره گرینوستون الییدی. f: تخلخل درون‌دانه‌ای در دانه‌های الیید.

Fig. 6. Diagenetic processes in the freshwater environment. a: Isopachous mosaic cement. b: Blocky (patchy) cement. The red to pink color in this cement indicate that formed in fresh water diagenesis c: Vuggy porosity in the carbonate mudstone facies. d: Channel porosity in the bioclastic wackestone facies. e: Intergranular porosity in the oolitic grainstone facies. f: Intragranular porosity in ooid grains.

انحلالی، استیلولیت‌ها و استیلوموتل‌ها قرار می‌گیرند (شکل ۷- e, f).

تفسیر: این ویژگی در محیط‌های دفنی متوسط تا عمیق با عمقی که معمولاً در حدود ۵۰۰ متری شروع می‌شود (بترست، ۱۹۸۷؛ ریلیسک، ۱۹۹۳؛ نیکولایدس و والاس، ۱۹۹۷) یا ممکن است به‌عنوان نتیجه‌ای از فشار تکتونیکی نیز تشکیل شوند (بترست، ۱۹۸۷؛ رونچی و همکاران، ۲۰۱۱؛ مادلن و ویلسون، ۲۰۱۳).

دولومیت‌های ثانویه: دولومیت‌های ثانویه (دیازنزی) گروهی از دولومیت‌ها هستند که با توجه به اندازه و زمان تشکیل آن‌ها به گروه‌های متوسط بلور و درشت‌بلور طبقه‌بندی می‌شوند.

دولومیت نوع دوم یا دولومیکرواسپارایت (دولومیت‌های متوسط بلور): دولومیت‌های متوسط بلور (نوع دوم) معمولاً از تبلور مجدد دولومیت‌های ریز بلور در طی تدفین ایجاد می‌شوند (راو و آدابی، ۱۹۹۶؛ ویتاکر و همکاران، ۲۰۰۴؛ آدابی، ۲۰۰۹). دولومیت‌های متوسط بلور به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در اندازه‌های بین ۵۰ تا ۱۰۰ میکرون در مقاطع مورد مطالعه شناسایی گردید (شکل ۸- a). این نوع از دولومیت‌ها معادل فابریک $\text{Idiotopic} - P$ سیبلی و گرگ (۱۹۸۷) و دولومیت‌های $\text{Planar} - P$ مازالو (۱۹۹۲) می‌باشد (آدابی، ۲۰۰۹).

دولومیت نوع سوم یا دولواسپارایت (دولومیت‌های درشت بلور): دولومیت‌های نوع سوم به‌صورت موزائیک‌های نیمه‌شکل‌دار و شکل‌دار و در اندازه‌های بیش از ۱۰۰ میکرون (در اندازه‌های میلی‌متری) در مقاطع مورد مطالعه شناسایی گردید (شکل ۸- b). این نوع دولومیت معادل فابریک $\text{Idiotopic} - S$ گرگ و سیبلی (۱۹۸۴) و دولومیت‌های $\text{Planar} - P$ مازالو (۱۹۹۲) می‌باشد. دولومیت‌های نوع سوم به دلیل جانشینی در سنگ آهک‌های قبلی و یا تبلور مجدد دولومیت‌های اولیه زیر دمای بحرانی (کمتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد) در طی تدفین تشکیل می‌شوند (آدابی، ۲۰۰۹؛ گرگ و شلتون، ۱۹۹۰؛ مازالو، ۱۹۹۲ و آدابی، ۲۰۰۹). این دولومیت‌ها پس از رنگ‌آمیزی با آلزارین قرمز و فروسیانیدپتاسیم به رنگ آبی فیروزه‌ای ظاهر شدند که بیانگر وجود عنصر آهن در شبکه خود می‌باشند. این دولومیت‌ها به دلیل وجود آهن در طی دیازنزد تدفینی و شرایط احیایی تشکیل شده‌اند (شکل ۸- c).

نوریختی افزایشی: این فرایند در مقاطع مورد مطالعه اغلب در زمینه سنگ مشاهده شده است (شکل ۷- a).

تفسیر: نوریختی افزایشی به تشکیل بلورهای درشت‌تر منجر می‌شود (تاکر، ۲۰۰۱؛ فلوگل، ۲۰۱۰؛ احمد و بهات، ۲۰۰۶) که می‌تواند در محیط‌های دیازنزی تدفینی، دریایی و حتی دیازنر آب شیرین نیز رخ دهد (فلوگل، ۲۰۱۰). **سیمان پوئیکلوتوپیک (فراگیرنده):** از نظر ریخت‌شناسی، این سیمان دارای بلورهای نسبتاً درشتی است که چندین دانه (آلوکم) را در برمی‌گیرد (شکل ۷- b).

تفسیر: این نوع سیمان حاصل رشد آهسته بلورهای کلسیت در محیط دیازنزی تدفینی است و از سیالات بین ذره‌ای که بیشتر از کربنات کلسیم اشباع هستند تشکیل می‌شود (تاکر و رایت، ۲۰۰۱؛ احمد و بهات، ۲۰۰۶؛ وارن، ۲۰۰۶؛ بارگومانو و همکاران، ۲۰۲۰؛ سالی‌فو و همکاران، ۲۰۲۱).

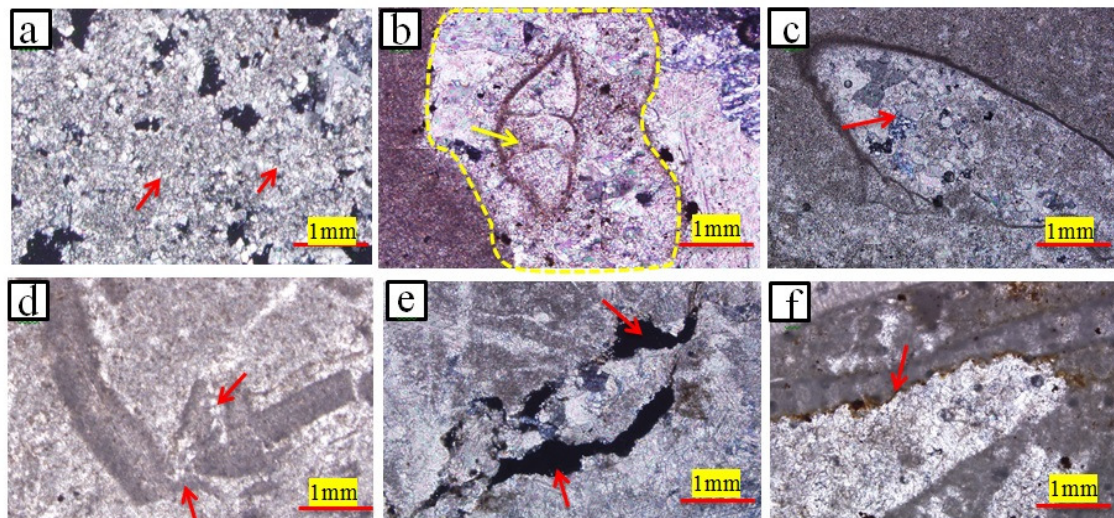
سیمان دروزی: این نوع از سیمان‌ها از نظر ریخت‌شناسی دارای افزایش اندازه بلورهای آن به سمت مرکز حفره یا فضای خالی ایجاد شده می‌باشد. این سیمان می‌تواند از حاشیه حفرات، حاشیه شکستگی‌ها و حاشیه دانه‌های انحلال یافته به سمت مرکز رشد کند (شکل ۷- c).

تفسیر: سیمان دروزی با ترکیب کلسیت کم‌منیزیم، بیشتر به‌عنوان سیمان نسل دوم، بعد از سیمان‌های نسل اول تشکیل می‌شوند (زاید، ۲۰۱۲؛ سیبل و جیمز، ۲۰۱۷). این نوع سیمان در محیط‌های دیازنزی فریاتیکی جوی و دریایی تا محیط دفنی کم‌عمق دیده می‌شود (آروسی و همکاران، ۲۰۱۵).

فشردگی فیزیکی: از عوارض فشردگی فیزیکی در نمونه‌های مورد مطالعه می‌توان به ایجاد فابریک دانه‌به‌دانه در دانه‌های آلوکم، شکستگی و له‌شدگی دانه‌ها و انواع تماس بین دانه‌ها اشاره کرد (شکل ۷- d).

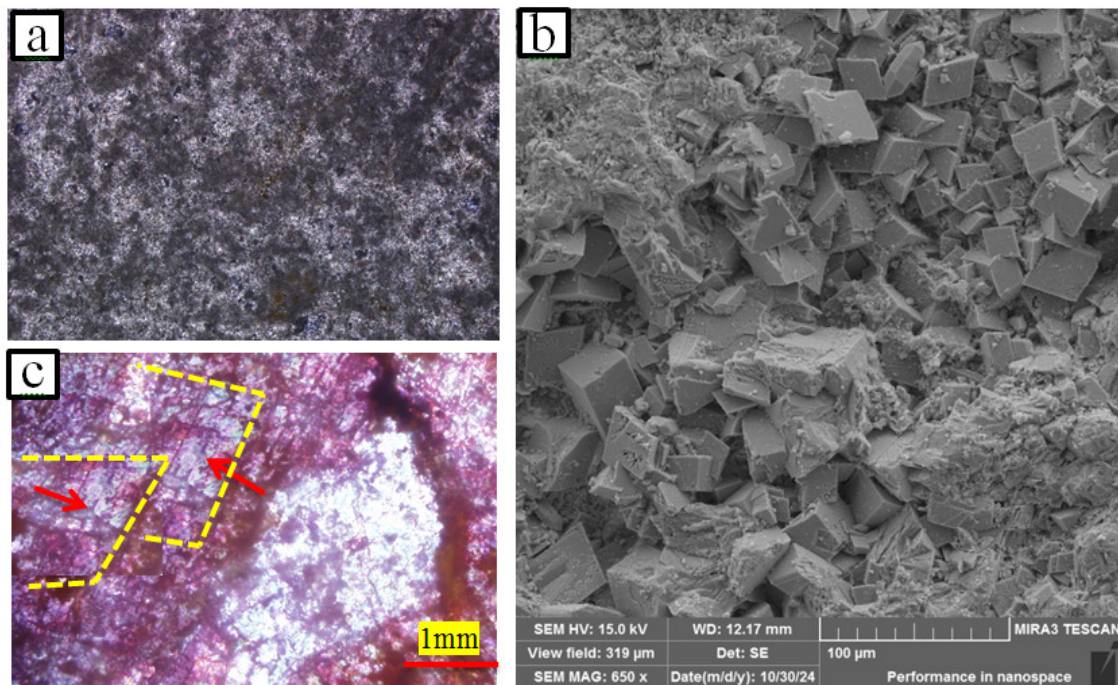
تفسیر: فشردگی به میزان رسوب‌گذاری، عمق تدفین و حجم رسوبات مربوط است (اینسل، ۲۰۰۰؛ اهرنبرگ و همکاران، ۲۰۰۲). تغییر شکل و آرایش نزدیک‌تر دانه‌های کربناته، پیش از سنگ‌شدگی رسوبات رخ می‌دهند (روگه و فابریسیوس، ۲۰۰۲؛ فابریسیوس و بور، ۲۰۰۷؛ رونچی و همکاران، ۲۰۱۱؛ مادلن و ویلسون، ۲۰۱۳).

فشردگی شیمیایی: عوارض ناشی از تراکم شیمیایی در رخساره‌های کربناته مورد مطالعه به صورت رگچه‌های



شکل ۷. فرآیندهای دیاژنزی محیط دیاژنزی تدفینی. a: نوریختی افزایشی در جهت پیکان‌های قرمز. b: سیمان فراگیرنده که یک بایوکلست را در بر گرفته است. c: سیمان دروزی (افزایش اندازه بلورها در جهت پیکان قرمز رنگ). d: شکستگی‌های ایجاد شده در قطعات جلبکی ناشی از تراکم فیزیکی. e: ایجاد استیلوموتل ناشی از تراکم شیمیایی. f: ایجاد استیلولیت ناشی از تراکم شیمیایی.

Fig. 7. Diagenetic processes in the burial diagenesis environment. a: Syntaxial overgrowth in the direction of red arrows. b: Enveloping cement surrounding a bioclast. c: Drusy cement (crystal size increase in the direction of the red arrow). d: Fractures formed in algal fragments due to physical compaction. e: Formation of stylolite caused by chemical compaction. f: Formation of stylolite caused by chemical compaction.



شکل ۸. فرآیندهای دیاژنزی محیط دیاژنزی تدفینی. a: دولومیکرواسپارایت تحت میکروسکوپ پلاریزان. b: تصویر SEM از بلورهای خودشکل دولومیکرواسپارایت. c: دولواسپارایت‌های درشت بلور آهن‌دار. مقطع با آلیزارین قرمز و فروسیانید پتاسیم رنگ آمیزی شده است و رنگ آبی فیروزه‌ای دولومیت‌ها بیانگر تشکیل طی دیاژنز تدفینی می‌باشد.

Fig. 8. Diagenetic processes in the burial diagenesis environment. a: Dolomicrosparite under polarized light microscope. b: Euhedral dolomicrosparite crystals under scanning electron microscope (SEM). c: Coarse-crystalline iron dolosparite. Thin section colored with Alizarin Red S and Ferrocyanide Potassium and turquoise color in dolomites indicate formed in burial diagenesis.

مربوط به دیاژنز تدفینی می‌باشد. مهاجرت نهایی هماتیت در اثر دیاژنز و جانشین شدن در رسوبات آهنی میزبان و سیمان‌های کلسیتی نیز معمول می‌باشد (تاکر، ۲۰۰۱).

فرآیند سیلیسی شدن: از جمله شواهد سیلیسی شدن در سنگ‌های کربناته می‌توان به آلوکمه‌هایی با پوسته کربناته اشاره کرد که کاملاً یا بخشی از پوسته آن‌ها سیلیسی شده است. در مقاطع مورد مطالعه، سیلیسی شدن اغلب در پوسته آلوکمه‌ها رخ داده است به گونه‌ای که سبب محو شدن ساختار داخلی آن‌ها شده است (شکل ۹- c).

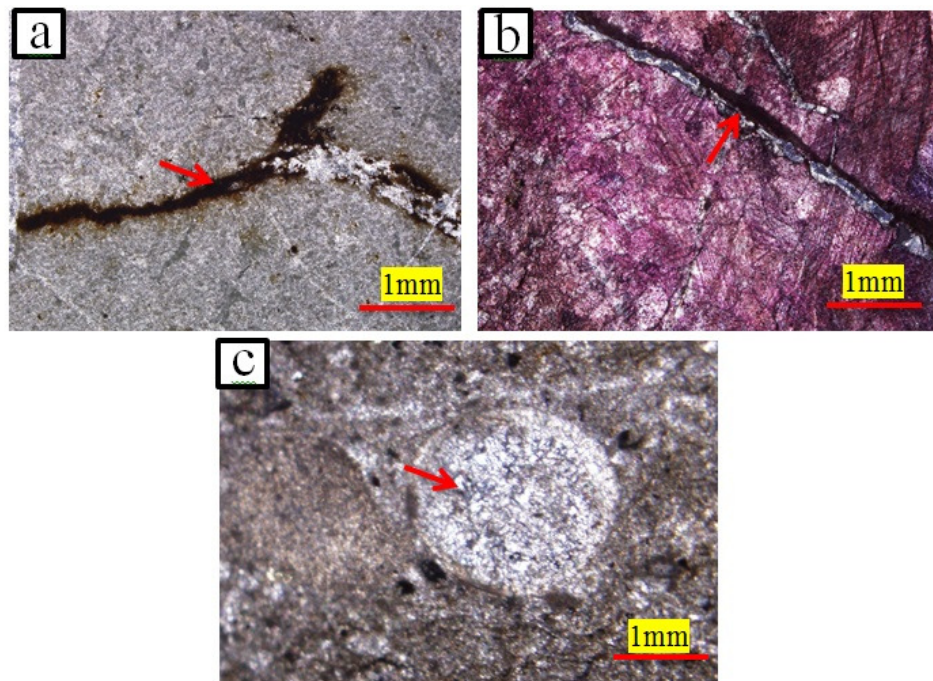
تفسیر: جانشینی سنگ‌های کربناته توسط سیلیس ممکن است قبل از سنگ شدن و محکم شدن رسوبات رخ دهد. در این حالت رسوبات جانشین شونده نسبتاً متخلخل و سیمان نشده می‌باشند. این نوع جانشینی را جانشینی دیاژنز اولیه می‌نامند (فلوگل، ۲۰۱۰). جانشینی توسط سیلیس ممکن است بعد از سنگ شدن رسوبات و بر روی مواد نسبتاً سخت و نامتخلخل صورت پذیرد. این نوع جانشینی را جانشینی دیاژنز تأخیری می‌نامند (فلوگل، ۲۰۱۰).

د) فرآیندهای دیاژنزی در محیط‌های بالاآمدگی (تلوژنیک)

فرآیندهای دیاژنزی در محیط‌های دیاژنزی بالاآمدگی (تلوژنیک) شامل ایجاد شکستگی‌ها، درزه‌ها و توسعه سیمان بلوکی درون شکستگی، توسعه سیمان آهن‌دار و سیلیسی شدن می‌باشد که در مقاطع مورد مطالعه شناسایی گردید. این مرحله با ایجاد شکستگی‌ها و درزه‌ها در سنگ همراه است (فلوگل، ۲۰۱۰).

فرآیند آهن‌دار شدن: فرآیند آهن‌دار شدن در مقاطع مورد مطالعه، به صورت سیمان اکسید آهن می‌باشد که در درون شکستگی‌های سنگ ایجاد شده است (شکل ۹- a و b).

تفسیر: ترکیبات آهن‌دار (هماتیتی و لیمونیتی) اغلب در زمینه سنگ، تخلخل‌های بین‌بلوری، میان بلورهای دولواسپارایت و دولومیکرواسپارها مشاهده می‌گردد که زمان آهن‌دار شدن را بعد از تشکیل دولومیت نشان می‌دهند. ترکیبات آهن‌دار همچنین در امتداد استیلولیت‌ها و در حجرات فسیل‌ها (اکثراً حجرات فرامینیفرها) و شکستگی‌های سنگ مشاهده می‌گردد. آهن‌دار شدن عموماً



شکل ۹. فرآیندهای دیاژنزی محیط بالاآمدگی (تلوژنیک). a: تشکیل سیمان اکسید آهن در امتداد استیلولیت‌ها. b: تشکیل سیمان اکسید آهن در امتداد استیلولیت‌ها. c: تشکیل سیمان اکسید آهن در امتداد شکستگی‌ها. مقطع با آلیزارین قرمز رنگ آمیزی شده است و رنگ صورتی تا قرمز بلورهای کلسیت بیانگر تشکیل آن‌ها در محیط بالاآمدگی است. c: فرآیند سیلیسی شدن درون قطعه آلوکم

Fig. 9. Diagenetic processes in the uplift environment (telogenic stage). a: Formation of iron oxide cement along stylolites. b: Formation of iron oxide cement along fractures. The section is stained with alizarin red; the pink to red coloration of calcite crystals indicates their formation in the uplift environment. c: Silicification process within the allochem.

آهن (بیشینه ۲۱۰ پی پی ام، کمینه ۱۲ پی پی ام و میانگین ۸۹/۴۷ پی پی ام) برای منگنز (بیشینه ۶۴ پی پی ام، کمینه ۰/۵ پی پی ام و میانگین ۲۵/۲۹ پی پی ام) برای استرانسیم (بیشینه ۱۶۱۰/۲۵ پی پی ام، کمینه ۲۹۸/۳۰ پی پی ام و میانگین ۷۲۵/۱۴ پی پی ام) و برای سدیم (بیشینه ۱۲۸ پی پی ام، کمینه ۱۲ پی پی ام و میانگین ۶۴/۱۴ پی پی ام) می باشد.

۵- بحث

کانی شناسی اولیه کربنات های سازند آسماری در برش مورد مطالعه

مطالعه کانی شناسی اولیه کربنات ها صرفاً بر اساس مطالعات سنگ شناسی به علت تأثیر فرآیندهای دیاژنزی امری بسیار مشکل است زیرا به مرور زمان آراگونیت و کلسیت پرمینیزیم به تدریج به کلسیت کم منیزیم تبدیل می شوند و باعث تغییر در ترکیب و بافت اولیه سنگ می شود. اگر چه در طی دیاژنز جوی و یا تدفینی میزان Sr و Na در سنگ آهک های دیرینه کاهش قابل توجهی می یابد، اما نسبت های Sr/Na می تواند معیاری برای تفکیک سنگ آهک هایی با کانی شناسی اولیه آراگونیتی از معادل های کلسیتی باشد (آدابی و همکاران، ۲۰۱۰). با تعیین کانی شناسی اولیه کربنات ها می توان تا حدودی دما، میزان Ca و Mg در محلول و درجه شوری را برآورد کرد. لذا با استفاده از روش های زمین شیمیایی مانند تجزیه و تحلیل عنصری (کلسیم، منیزیم، آهن، سدیم، منگنز و استرانسیم) می توان ترکیب کانی شناسی اولیه و نوع سیستم های دیاژنزی را تعیین کرد (آدابی و رآو، ۱۹۹۱؛ آدابی و اسدی مهماندوستی، ۲۰۰۸؛ وین سنت و همکاران، ۲۰۱۰؛ آدابی و همکاران، ۲۰۱۰).

نمودار استرانسیم در برابر سدیم (Sr/Na):

همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، بیشتر نمونه ها درون محدوده سنگ آهک های حاره ای گوردون اردوین تاسمانیا با ترکیب کانی شناسی اولیه آراگونیتی قرار می گیرند. مقادیر عنصر استرانسیم در این نمونه ها نسبت به نمونه های معادل عهد حاضر کمتر می باشد، این موضوع دلالت بر دیاژنز جوی دارد که سبب کاهش مقادیر استرانسیم می گردد. همچنین روند تغییرات Na در برابر Sr نمونه های مورد مطالعه حاکی از قرارگیری آن ها در محدوده

جایگزینی: جایگزینی توسط سیلیس در سنگ های کربناته می تواند به صورت چرت و ژاسپر و یا به صورت سیلیسی شدن فسیل ها دیده شود.

سیلیسی شدن می تواند در طول تمام مراحل دیاژنز رخ دهد (تا کر، ۲۰۰۱). در مراحل دیاژنز اولیه^۲ در نزدیکی سطح، سیلیسی شدن معمولاً توسط بقایای بیولوژیکی سیلیسی و در دماهای پایین تر (کمتر از ۶۰ درجه سانتی گراد) اتفاق می افتد و اغلب منجر به تشکیل اپال یا کلسدوئن می شود. در مرحله دیاژنز میانی و پایانی^۴ با افزایش عمق تدفین و دما، منابع سیلیس ممکن است تغییر کنند (به سمت انحلال مواد سیلیکاتی و سیالات مهاجر)، در این مراحل، کوارتز بلورین و چرت های دانه درشت تر غالب می شوند. دماهای بالاتر و سیالات گرم تر، حلالیت سیلیس را افزایش داده و امکان تشکیل حجم بیشتری از سیمان یا جایگزینی گسترده تر را فراهم می کنند (تا کر، ۲۰۰۱).

۴-۲- زمین شیمی عنصری

نتایج تجزیه زمین شیمی عناصر اصلی و فرعی ۲۳ نمونه از کربنات های سازند آسماری در برش تاق دیس ریت به روش EDX در جدول ۱ ارائه شده است. عناصر Ca و Mg بر حسب درصد وزنی و عناصر Mn, Sr, Fe, Na بر حسب پی پی ام گزارش شده اند. به منظور تعیین ترکیب کانی-شناسی اولیه کربنات های سازند آسماری در برش مورد مطالعه از عناصر اصلی Ca و Mg و عناصر فرعی Fe, Sr, Na و Mn و رسم این مقادیر در برابر یکدیگر و مقایسه آن ها با محدوده های معرفی شده توسط پژوهشگران مختلف برای کانی شناسی اولیه کربنات ها استفاده شده است (می-لی مان و همکاران، ۱۹۷۴؛ آدابی و رآو، ۱۹۹۱؛ رآو، ۱۹۹۱؛ آدابی و اسدی مهماندوستی، ۲۰۰۸؛ آدابی و همکاران، ۲۰۱۰).

عناصر اصلی (کلسیم و منیزیم): میزان عناصر اصلی کلسیم و منیزیم در نمونه های مورد مطالعه، به ترتیب برای کلسیم (بیشینه ۴۵/۵ درصد، کمینه ۲۰ درصد و میانگین ۳۱/۳۴ درصد) برای منیزیم (بیشینه ۲/۶۶ درصد، کمینه ۰/۲۲ درصد و میانگین ۱/۱۸ درصد) می باشد.

عناصر فرعی (آهن و منگنز، استرانسیم، سدیم): غلظت عناصر فرعی در نمونه های مورد مطالعه، به ترتیب برای

^۴ Middle- to Late Diagenesis

^۲ Early Diagenesis

می‌تواند دلیل دیگری بر تأثیر فرایندهای دیاژنزی جوی باشد (آدابی و اسدی مهماندوستی، ۲۰۰۸؛ آدابی و راو، ۱۹۹۱). سدیم ضریب توزیع یا انباشتگی کمتر از یک دارد و تمرکز آن در آب‌های جوی کم است (آدابی، ۱۹۹۶).

کربنات‌های دریایی است (آدابی و راو، ۱۹۹۱). همچنین تمرکز بالای عنصر استرانسیم در برخی از نمونه‌ها می‌تواند به دلیل ترکیب کانی‌شناسی آراگونیتی برخی از آلوکم‌ها در نظر گرفته شود. مقدار نسبتاً پایین سدیم در نمونه‌های مورد بررسی نسبت به معادل‌های عهد حاضر آن‌ها نیز

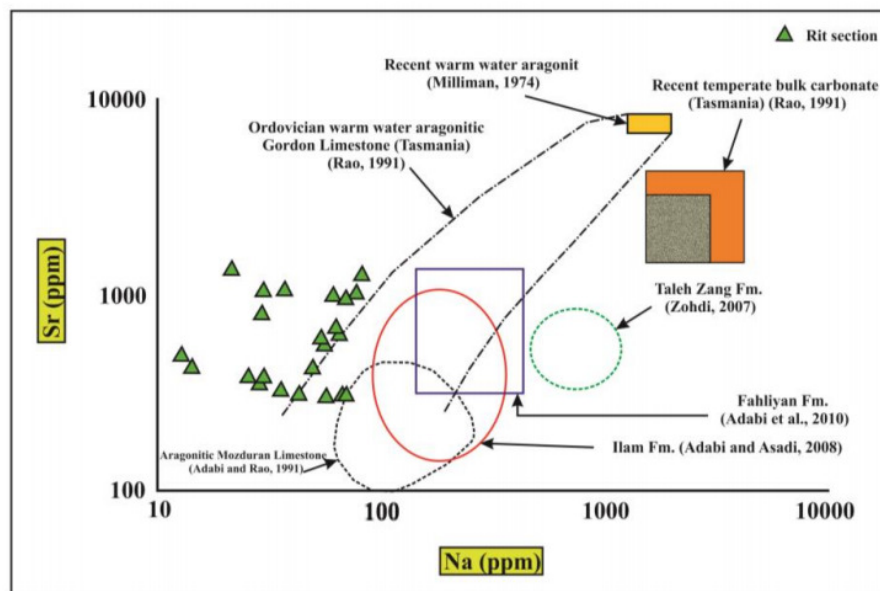
جدول ۱. نتایج تجزیه عنصری کربنات‌های سازند آسماری در برش تاقدیس ریت. پارامترهای آماری میانگین، حداکثر، حداقل نیز گزارش شده است. عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر فرعی بر حسب پی‌پی‌ام گزارش شده است.

Table 1. Elemental analysis results of the carbonates from the Asmari Formation in the Rit anticline section. Statistical parameters including mean, maximum, and minimum values are also reported. Major elements are presented in weight percent (%) and trace elements in parts per million (ppm).

Sample No.	Ca (wt%)	Mg (wt%)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Na (ppm)	Sr/Mn (ppm)	Mn/Sr (ppm)	Sr/Ca (wt%)	Sr/Na (ppm)	1000*Sr/Ca (wt%)
As (09)	20.00	0.22	65.00	12.00	1500.00	128.00	125.00	0.01	75.00	11.72	7.50
As (12)	33.20	0.50	175.50	21.00	350.80	33.60	16.70	0.06	10.57	10.44	1.06
As (15)	28.60	1.20	59.50	25.00	302.00	55.40	12.08	0.08	10.56	5.45	1.06
As (18)	35.10	2.66	71.20	11.00	380.60	27.60	34.60	0.03	10.84	13.79	1.08
As (21)	27.40	0.65	65.20	21.50	1150.60	90.80	53.52	0.02	41.99	12.67	4.20
As (25)	30.00	2.20	12.00	54.20	1200.10	110.30	22.14	0.05	40.00	10.88	4.00
As (28)	28.50	0.80	150.60	18.00	800.60	90.20	44.48	0.02	28.09	8.88	2.81
As (31)	31.60	0.25	33.70	22.30	370.65	33.00	16.62	0.06	11.73	11.23	1.17
As (34)	33.00	1.10	100.00	1.00	320.95	44.10	320.95	0.00	9.73	7.28	0.97
As (37)	41.60	2.20	98.60	12.50	450.70	65.40	36.06	0.03	10.83	6.89	1.08
As (40)	25.30	0.55	39.40	28.90	510.65	12.00	17.67	0.06	20.18	42.55	2.02
As (44)	27.10	2.30	68.20	64.00	880.50	33.85	13.76	0.07	32.49	26.01	3.25
As (47)	32.10	0.90	44.10	25.40	298.30	99.40	11.74	0.09	9.29	3.00	0.93
As (50)	25.80	2.30	167.50	0.50	610.70	80.30	1221.40	0.00	23.67	7.61	2.37
As (53)	30.00	0.30	150.10	18.60	1112.40	102.45	59.81	0.02	37.08	10.86	3.71
As (56)	29.50	0.55	210.00	35.00	450.10	13.60	12.86	0.08	15.26	33.10	1.53
As (59)	27.20	1.50	88.20	23.00	1236.50	45.20	53.76	0.02	45.46	27.36	4.55
As (63)	33.10	1.60	110.30	38.10	300.00	78.65	7.87	0.13	9.06	3.81	0.91
As (66)	35.60	0.85	77.40	23.40	680.60	90.30	29.09	0.03	19.12	7.54	1.91
As (69)	45.50	1.50	65.20	20.00	650.40	77.45	32.52	0.03	14.29	8.40	1.43
As (72)	29.40	0.65	99.70	33.50	1610.25	22.60	48.07	0.02	54.77	71.25	5.48
As (75)	33.50	1.80	66.75	45.10	1200.60	33.80	26.62	0.04	35.84	35.52	3.58
As (78)	37.70	0.66	39.70	27.60	310.30	107.25	11.24	0.09	8.23	2.89	0.82
Max	45.5	2.66	210.00	64.00	1610.25	128.00	1221.4	0.127	75	42.55	7.5
Min	20.00	0.22	12.00	0.50	298.30	12.00	7.874	0.001	9.06	3.00	0.9
Average	31.34	1.18	89.47	25.29	725.14	64.14	107.13	0.04	23.76	13.47	2.4

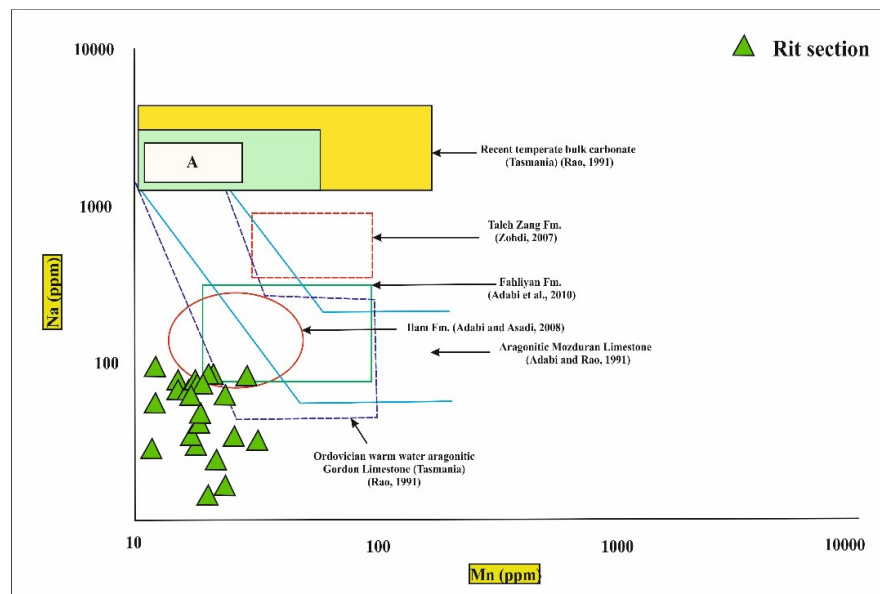
می‌باشد. در مواردی که مقدار منگنز در نمونه‌ها افزایش نسبی می‌یابد می‌توان به نقش سیالات جوی ناشی از ناپیوستگی در رأس سازند آسماری با سازند گچساران اشاره نمود. همچنین تمامی نمونه‌های آهکی مورد بررسی دارای نسبت Mn/Sr پایینی هستند (میانگین ۰/۰۴ درصد) که گویای حفظ شدگی خوب ویژگی‌های زمین‌شیمیایی اولیه آن‌ها است (هوا و همکاران، ۲۰۱۳).

نمودار سدیم در برابر منگنز (Na/Mn): ترسیم مقادیر سدیم در برابر منگنز در سنگ‌آهک‌های سازند آسماری در برش تاقدیس ریت نشان می‌دهد که تقریباً بیشتر نمونه‌ها در محدوده سنگ‌آهک‌های حاره‌ای گوردون اردوئین تاسمانیا با ترکیب کانی‌شناسی اولیه آراگونیتی قرار می‌گیرند (شکل ۱۱). مقادیر پایین منگنز در نمونه‌های مورد مطالعه احتمالاً به سبب بسته بودن سیستم دیاژنزی



شکل ۱۰. تغییرات مقادیر استرانسیم در برابر سدیم در سنگ آهک‌های سازند آسماری در برش تاقدیس ریت با سنگ آهک‌های آراگونیتی گوردون تاسمانیا (به سن اردوئیسین) (رآو، ۱۹۹۰)، محدوده آرگونیت‌های حاره‌ای عهد حاضر (می‌لی‌مان، ۱۹۷۴)، محدوده کربنات‌های معتدله عهد حاضر تاسمانیا (رآو و آدابی، ۱۹۹۲، رآو و جاباواردن، ۱۹۹۴، رآو و امینی، ۱۹۹۵)، سنگ آهک‌های سازند تله‌زنگ برش نمونه و تاقدیس کیالو (زه‌دی، ۱۳۸۶)، سازند ایلام (آدابی و اسدی میهماندوستی، ۲۰۰۸)، و محدوده سنگ آهک‌های سازند مزدوران مربوط به بخش کم عمق حوضه (به سن ژوراسیک بالایی) (آدابی و رآو، ۱۹۹۱)، مقایسه شده است. بیشتر نمونه‌ها درون محدوده‌ی سنگ آهک‌های حاره‌ای گوردون اردوئیسین تاسمانیا و یا نزدیک به محدوده آن با ترکیب کانی‌شناسی اولیه آراگونیتی قرار گرفته‌اند.

Fig. 10. Variations of strontium versus sodium in the limestones of the Asmari Formation from the Rit anticline section compared with aragonitic limestones of Gordon, Tasmania (Ordovician age) (Raub, 1990), modern tropical aragonites (Milliman, 1974), modern temperate carbonates of Tasmania (Raub & Adabi, 1992; Raub & Jayawardena, 1994; Raub & Amini, 1995), Tele-Zang Formation limestones from the Nomreh section and Kialo anticline (Zahdi, 2007), Ilam Formation (Adabi & Asadi-Mihmandosti, 2008), and shallow marine limestones of the Mozduran Formation (Upper Jurassic) (Adabi & Raub, 1991). Most samples fall within or near the range of tropical Ordovician Gordon limestones characterized by a primary aragonitic mineralogy.



شکل ۱۱. ترسیم مقادیر سدیم در برابر منگنز در سنگ آهک‌های سازند آسماری در برش تاقدیس ریت. همان طور که مشاهده می‌شود، تقریباً بیشتر نمونه‌ها در محدوده سنگ آهک‌های حاره‌ای گوردون اردوئیسین تاسمانیا با ترکیب کانی‌شناسی اولیه آراگونیتی قرار می‌گیرند.

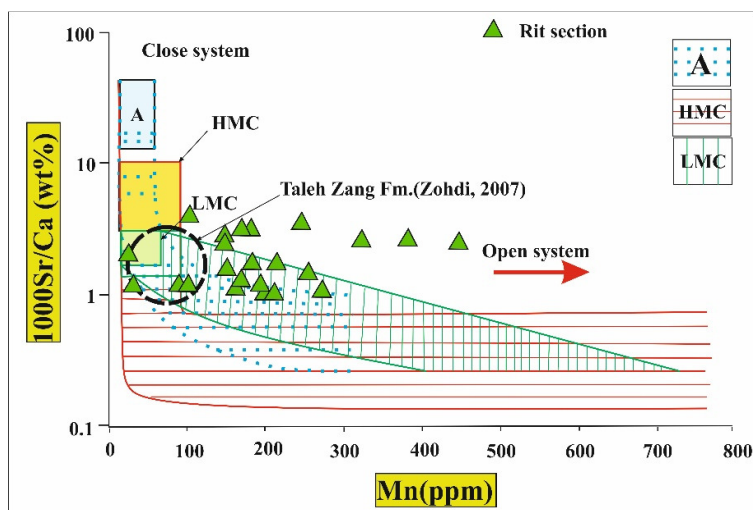
Fig. 11. Plot of sodium versus manganese concentrations in the limestones of the Asmari Formation from the Rit anticline section. As shown, most samples fall within the range of tropical Ordovician limestones from Gordon, Tasmania, which are characterized by a primary aragonitic mineralogy.

سیستم دیاژنزی سازند آسماری در برش مورد مطالعه نمودار تغییرات نسبت Sr/Ca در برابر Mn : برخی محدوده‌هایی برای روندهای دیاژنتیکی آراگونیت، کلسیت پرمیزیم و کلسیت کم‌میزیم توسط پژوهشگران متعددی (برند و وایزر، ۱۹۸۱؛ برند و همکاران، ۲۰۰۶) مشخص شده است. بر اساس ترسیم نسبت مقادیر Sr/Ca در برابر Mn می‌توان روند دیاژنز را در سیستم‌های باز و بسته مشخص نمود (لی و همکاران، ۲۰۱۷). مقادیر متوسط نسبت استرانسیم به کلسیم (Sr/Ca) و پایین بودن مقادیر منگنز در نمونه‌های سازند آسماری در برش مورد مطالعه بیانگر یک سیستم دیاژنزی غالباً بسته و به مقدار بسیار جزئی باز با تبادل آب به سنگ پایین می‌باشد (شکل ۱۲). مطالعات سنگ‌شناسی بر روی رخساره‌های کربناته سازند آسماری در برش مورد مطالعه منجر به شناسایی چندین فرآیند دیاژنزی از جمله میکریتی شدن، انحلال و تخلخل، سیمانی شدن، نوریختی، فشردگی فیزیکی و شیمیایی و جانشینی در این سازند شد. این فرآیندها در چهار محیط دریایی، آب شیرین، تدفینی و بالآمدگی شکل گرفته‌اند که سه مرحله دیاژنزی یعنی دیاژنز اولیه (ائوژنز)، دیاژنز میانی (مزوژنز) و دیاژنز نهایی (تلوژنز) را پشت سر گذاشته‌اند (شکل ۱۳). در این تاق‌دیس (ریت) فرآیندهای دیاژنزی و توالی‌های پاراژنزی به همراه مدل دولومیتی شدن سازند آسماری توسط کهن‌دل و همکاران (۱۴۰۴) مورد مطالعه قرار گرفته است. زمین‌شیمی عنصری، سنگ‌شناسی و تحلیل سیستم‌های دیاژنزی سازند تله‌زنگ در این تاق‌دیس نیز توسط مغفوری مقدم و صداقت‌نیا (۱۴۰۲) مورد مطالعه قرار گرفته است و سیستم‌های دیاژنزی این سازند را به سیستم‌های بسته تا نیمه باز با تبادل آب به سنگ پایین می‌دانند. تلفیق نتایج حاصل از مطالعات سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی عنصری نشان می‌دهد که سازند آسماری در این منطقه از حوضه رسوبی زاگرس در یک سیستم دیاژنزی غالب بسته و به صورت ضعیفی نیمه باز با ترکیب کانی‌شناسی اولیه غالب آراگونیتی می‌باشد.

وجود یک ناپیوستگی^۵ نشان‌دهنده دوره‌ای از عدم رسوب‌گذاری و اغلب فرسایش و خروج از محیط دریایی^۶ است. وجود ناپیوستگی نچندان شدید و طولانی مدت بیانگر آن است که مدت زمان مواجهه‌ی سنگ با شرایط جوی کوتاه بوده، یا فرآیندهای فرسایشی ملایم بوده‌اند. مواجهه‌ی

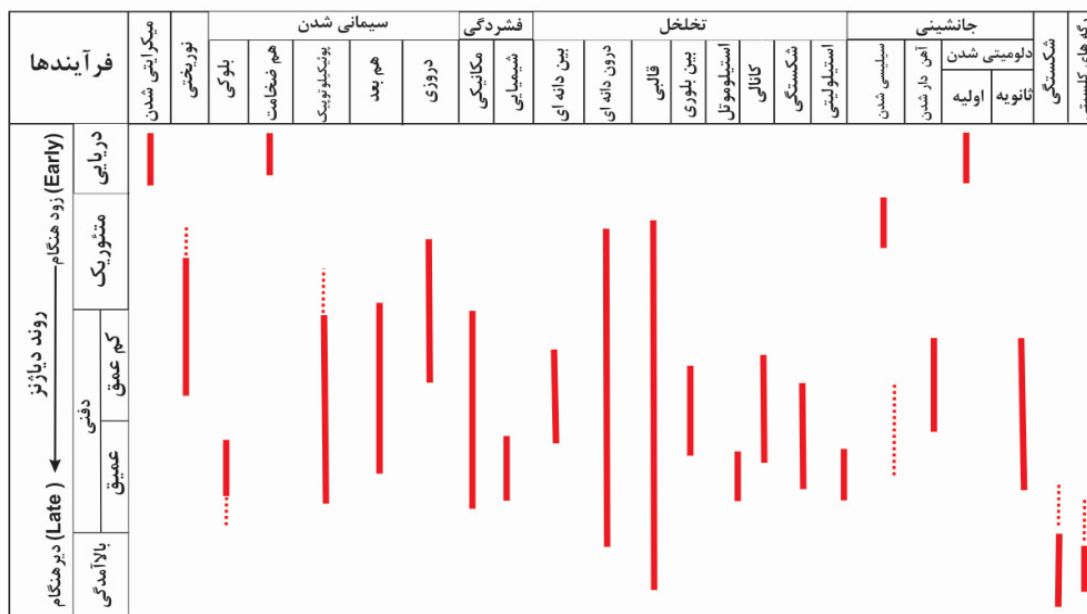
طولانی مدت با جو و سیالات آن (آب جوی، CO_2 , O_2) برای ایجاد دگرسانی‌های شیمیایی و دیاژنز شدید ضروری است. اگر تراوایی اولیه‌ی بخش بالایی سازند آسماری پایین بوده باشد (مثلاً به دلیل ماتریکس ریزدانه، سیمانی‌شدگی اولیه، یا فشردگی)، نفوذ و گردش سیالات جوی محدود شده است. این تراوایی پایین، مستقیماً به نسبت آب به سنگ مؤثر پایین منجر می‌شود. سنگ‌های کربناته (مانند سنگ آهک و دولومیت) که سازند آسماری عمدتاً از آن‌ها تشکیل شده، در مقایسه با سنگ‌های سیلیکاته، ممکن است مقاومت بیشتری در برابر هوازدهی داشته باشند، به خصوص اگر بلورینگی خوب و پایداری بالایی داشته باشند. کانی‌شناسی غنی از کلسیت یا دولومیت پایدار، با حداقل کانی‌های رسی واکنش‌پذیر، به طور طبیعی پتانسیل دیاژنتیکی پایین‌تری را نشان می‌دهد. پتانسیل دیاژنتیکی، این مفهوم شامل ظرفیت سنگ برای انجام تغییرات دیاژنتیکی بیشتر است. سنگی که قبلاً تحت دیاژنز اولیه قابل توجهی قرار گرفته (مانند سیمانی‌شدگی، فشردگی) یا بافت دیاژنتیکی پایداری دارد، ممکن است پتانسیل کمتری برای تغییرات بعدی هنگام مواجهه با شرایط سطحی داشته باشد. در مجموع، این شرایط منجر به وضعیتی می‌شود که حجم آبی که به طور مؤثر با توده‌ی سنگ برهم‌کنش می‌کند، در مقایسه با حجم سنگ، محدود شود. این نسبت آب به سنگ پایین به این معنی است که آب جوی نفوذیافته، احتمالاً به سرعت از یون‌های محلول (مانند کلسیم و کربنات از کربنات‌ها) اشباع می‌شود. پس از اشباع، ظرفیت آب برای ایجاد انحلال یا دگرسانی شیمیایی بیشتر، به شدت کاهش یافته و فرآیند دیاژنتیکی را متوقف یا به شدت محدود می‌کند. لذا، وجود ترکیب کانی‌شناسی اولیه آراگونیتی برای نهشته‌های سازند آسماری و تراوایی پایین ریزرخساره‌های آن از عواملی هستند که نشان‌دهنده سیستم دیاژنزی بسته برای این سازند می‌باشند ولی در رأس این سازند وجود سیمان‌های محدود آب شیرین و وجود ناپیوستگی فرسایشی در مرز بین دو سازند آسماری و گچساران سیستم دیاژنزی کمی باز را به وجود آورده است. وجود سیمان‌های کلسیت هم‌بعد و بلوکی آب شیرین و توسعه انحلال و تخلخل از عوامل تأثیرگذار دیاژنز جوی بر روی بخش بالایی سازند آسماری هستند که در مقاطع شماره ۵۹ تا ۷۸ مشاهده شده‌اند.

^۶ Sub aerial Exposure^۵ Unconformity



شکل ۱۲. روند تغییرات نسبت Sr/Ca () در برابر Mn . مقادیر متوسط نسبت استرانسیم به کلسیم و پایین بودن مقادیر منگنز در نمونه‌های سازند آسماری در برش تقادیس ریت بیانگر یک سیستم دیاژنزی بسته تا کمی باز با تبادل آب به سنگ پایین می‌باشد.

Fig. 12. Sr/Ca ratio versus Mn content trend. The moderate Sr/Ca ratios and low Mn values in the Asmari Formation samples from the Rit anticline section indicate a closed to slightly open diagenetic system with low water-rock interaction.



شکل ۱۳. توالی پاراژنتیکی سازند آسماری در برش مورد مطالعه. بخش قرمز رنگ فراوانی زیاد و خط چین فراوانی کمتر را نشان می‌دهد.

Fig. 13. Paragenetic sequence of Asmari Formation in the study area. The red part shows high frequency and the dashed line shows low frequency

۶- نتیجه‌گیری

استفاده شد. بر اساس شواهد زمین‌شیمی عنصری نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده سنگ‌آهک‌های آراگونیتی گوردون تاسامانیا و کرنات‌های آراگونیتی سازند مزدوران قرار دارند که دلیلی بر آراگونیتی بودن کانی‌شناسی اولیه سنگ‌آهک‌های سازند آسماری در برش مورد مطالعه دارد. ترسیم مقادیر Sr/Ca در برابر عناصر Mn وجود یک سیستم دیاژنزی غالب بسته تا کمی باز به صورت

مطالعات سنگ‌شناسی بر روی توالی‌های مورد بحث منجر به شناسایی چندین فرآیند دیاژنزی گردید که این فرآیندها در چهار محیط دیاژنزی دریایی، آب شیرین، تدفینی و بالاآمدگی رخ داده‌اند. جهت تحلیل کانی‌شناسی اولیه و تحلیل سیستم‌های دیاژنزی سازند آسماری در برش تقادیس ریت از زمین‌شیمی عنصری (عناصر اصلی و فرعی)

- Companies, Geological and Exploration Division, Report No. 1074: 6-11.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Mone, P., Meyer, B., Wortel, R. (2011) Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geol. Mag.*, 148: 692-725.
- Ahmad, A. H. M., Bhat, G. M. (2006) Petrofacies, provenance and diagenesis of the Dhosa sandstone member (Chari Formation) at Ler, Kachch Sub – basin, Western, India, *Journal of Asian Earth Science*, 27: 857- 872.
- Alavi, M. (2004) Regional Stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust Belt of Iran and Its Proforeland Evolution. *American Journal of Science*, 304: 1-20.
- Anderson, T. F., Arthur, M. A. (1983) Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems. In: *Stable isotope in sedimentary geology*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Short Course, 10: 1-151.
- Arosi, A. H., Wilson, M. E. J. (2015) Diagenesis and fracturing of a large-scale, syntectonic carbonate platform, *Sedimentary Geology*, 326: 109-134.
- Asadi Mehmandosti, E., and Adabi, M. H. (2013) Application of geochemical data as evidence of water-rock interaction in the Sarvak formation, Izeh Zone, Zagros, Iran. *Procedia Earth and Planetary Science*, 7: 31-35.
- 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.
- 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.
- Bathurst, R. G. C. (1975) Carbonate Sediments and their Diagenesis: Developments in Sedimentology. 2nd Edition, Elsevier, Amsterdam, 12: 658 p.
- Bathurst, R. G. C. (1987) "Diagenetically enhanced bedding in argillaceous platform limestones: stratified cementation and selective compaction", *Sedimentology*, 34(5): 749-778.
- Brand, U., Veizer, J. (1981) Chemical diagenesis of multicomponent carbonate system, II: stable isotopes: *Journal Sedimentary Petrology*, 51: 987-997.
- 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*.
- ضعیف و با تبادل آب به سنگ پایین (W/R) برای کربنات‌های سازند آسماری در برش تاقدیس ریت را به اثبات رساند. بخش بالایی این توالی‌ها تحت تأثیر دیاژنز جوی بسیار ضعیف قرار گیرد که محدودیت سیمان‌های دیاژنز جوی در نمونه‌های مورد مطالعه و انحلال جزئی اجزای زیستی در این سازند دلیلی بر این موضوع می‌تواند باشد. بنابراین می‌توان گفت سیستم دیاژنزی در توالی‌های سازند کربناته آسماری در برش تاقدیس ریت یک سیستم دیاژنزی غالباً بسته بوده و به سمت بالای توالی به صورت ضعیف باز می‌باشد. ناپیوستگی نچندان شدید و طولانی مدت، آب و هوا و کنترل‌کننده‌های ذاتی سنگ مانند تراوایی، کانی‌شناسی اولیه و پتانسیل دیاژنزی سازند می‌تواند کنترل‌کننده مهمی در میزان نسبت آب به سنگ بوده باشد که در رأس سازند آسماری با سازند گچساران سبب شده است که به صورت ضعیف در این مرز سیستم دیاژنزی کمی باز در نظر گرفته شود.

References

- 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
- 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
- Adabi, M. H. (2009) Multistage dolomitization of upper Jurassic Muzduran Formation, Kopet-Dagh basin, N.E. Iran: *Carbonate Evaporites*, 24: 16-32.
- 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.
- 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*, 23(2): 1-17.
- Adabi, M. H., Kakemem, U., Sadeghi, A. (2016) Sedimentary facies, depositional environment, and sequence stratigraphy of Oligocene-Miocene shallow water carbonate from the Rig Mountain, Zagros basin (SW Iran). *Carbonates and Evaporites*, 31 (1): 69-85.
- Adams, T. D., Bourgeois, F. (1967) *Asmari Biostratigraphy: Iranian Oil Operation*

- Cooke, M. L., Simo, J. A., Underwood, C. A., Rijken, P. (2006) Mechanical Stratigraphic controls on fracture.
- Dickson, J. A. D. (1965) A modified staining technique for carbonate in the thin section: *Nature*, 205: 587.
- Dunham, R. J. (1962) Classification of carbonate rock according to depositional texture, classification of carbonate rock. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 1: 108-121.
- Earler, D. V., Nothdurft, L., McNeil, M., Moras, C. A. (2018) Tracing nitrate sources using the isotopic composition of skeletal-bound organic matter from the calcareous green algae *Halimeda*. *Coral Reefs*, 37: 1003–1011.
- Einsele, G. (2000) *Sedimentary Basin Evolution, Facies and Sediment Budget*, 2nd Edition. Springer – Verlag, 297 p.
- Ehrenberg, S. N., Pickard, N. A. H., Oxtoby, T. A. (2002) Cement geochemistry of photozoan carbonate strata (Upper Carboniferous-Lower Permian), Finnmark Carbonate Platform, Brents Sea. *Journal Sedimentary Research*, 72: 95-115.
- Ehrenberg, S. N., Pickard, N. A. H., Laursen, G. V., Monibi, S., Mossadegh, Z. K., Svåná, T. A., Aqrawi, A. A. M., McArthur, J. M., Thirlwall, M. F. (2007) Strontium isotope stratigraphy of the Asmari Formation (Oligocene - Lower Miocene), SW Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 30(2): 107-128.
- EL – G hali, M. A. K., Tajoti, K. G., M., ansoorbeh, H., Ogle, N., Kalin, R. M. (2006) Origin and timing of sidelite cementation upper Ordovician glauconitic sandstone from the Murzuk basin, SW Libya. *Marine and Petroleum Geology*, 23: 459- 471.
- El-Saiy, A. K., Jordan, B. R. (2007) Diagenetic aspects of tertiary carbonates west of the Northern Oman Mountains, United Arab Emirates: *Journal of Asian Earth Sciences*, 3: 35–43.
- Fabricius, I. L., Borre, M (2007) Stylolites, Porosity, depositional texture, and silicates in Chalk facies sediments. *Ontony Jave Plateau – Gorm and Tyra fields, North Sea. Sedimentology*, 54: 183 – 205.
- Farshi, M., Moussavi-Harami, R, Mahboubi, A., Khanehbad, M., Golafshani, T. (2019) Reservoir rock typing using integrating geological and petrophysical properties for the Asmari Formation in the Gachsaran oil field, Zagros basin. *J Petrol Sci Eng*, 176: 161–171
- Flügel, E. (2010) *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis Interpretation and Application*. Springer-Verlag, Berlin, 976p.
- Folk, R. L., Land, L. S. (1974) Mg/Ca Ratio and Salinity: Two Controls over Crystallization of Dolomite. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 59: 60-68.
- Garcia – pichel, F. (2006) Plausible mechanisms for the boring on carbonates by microbial protorophs *Sedimentary Geology*, 125: 29-50.
- Gharechelou, S., Amini, A., Bohlooli, B., Swennen, R. (2020) Relationship between the sedimentary microfacies and geomechanical behavior of the Asmari Formation carbonates, southwestern Iran. *Mar Petrol Geol*, 116: 104306
- 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.*, 6: 549-562.
- Heydari, E. (2008) Tectonics versus eustatic control on supersequences of the Zagros Mountains of Iran. *Tectonophysics*, 451: 56–70.
- 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
- 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>.
- Hua, G., Yuansheng, D., Lian, Z., Jianghai, Y., Hu, H., Min, L., and Yuan, W. (2013) Trace and rare earth elemental geochemistry of carbonate succession in the Middle Gaoyuzhuang Formation, Pingquan Section: implications for Early Mesoproterozoic ocean redox conditions. *Journal of Palaeogeography*, 2: 209-221.
- Jafarian, A., Fallah-Baghtash, R., Mittern, F., Heubeck, C. H. (2017) Reservoir quality along a homoclinal carbonate ramp deposit: the Permian upper Dalan Formation, South Pars Field, Persian Gulf basin. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 587–604.
- Jamalian, M., 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.
- James, N. P., Jones, B. (2015) *Origin of Carbonate Sedimentary Rocks*, Wiley, American Geophysical Union, 464 p.
- Kamalifar, F., Aleali, M., Ahmadi, V., Mirzaiee, A. (2020) Facies distribution, paleoenvironment and sequence stratigraphy model of the Oligo-Miocene Asmari Formation (Fars Province, south of Iran). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 29(4).
- Karami, S., Ahmadi, V., Sarooee, H., Bahrami, M. (2020) Facies analysis and depositional environment of the Oligocene – Miocene Asmari

- Formation, in interior Fars (Zagros Basin, Iran). Carbonate and Evaporites, 35 (3).
- Kasih, G. A. A., Chiba, S., Yamagata, Y., Shimizu, Y., Haraguchi, K. (2008) Modelling early diagenesis of sediment in Ago Bay, Japan, A comparison of steady state and dynamic calculation. Ecological Modelling, 215: 40-54.
- Kohandel, R., Allameh, M., Sajadian, M. R. (2025) Interpretation of diagenesis history of carbonate rocks of the Asmari Formation (Oligocene-Miocene), southwestern of Lorestan. Applied Sedimentology, 13(25). (in Persian).
- Krause, S., Liebetrau, V., Loscher, C., Beohm, F., Gorb, S., Eisenhauer, A., Treude, T. (2018) Marine ammonification and carbonic anhydrase activity induce rapid calcium carbonate precipitation. Geochim. Cosmochim. Acta, 243: 116-132.
- Land, L. S. (1985) The origin of massive dolomite: Journal of Geological Education, 33: 112-125.
- Lebrec, U., Sharma, Sh., Watson, P. H., Riera, R., Joer, H., Beemer, R., Gaudin, C. H. (2024) A study of the effects of early diagenesis on the geotechnical properties of carbonate sediments (North West Shelf, Australia). Journal of Scientific Reports, (14): 1-19, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67207-2>.
- Li, Z., Goldstein, R. H., 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.
- Longman, M. W. (1980) Carbonate diagenetic textures from nearsurfacediagenetic environments. AAPG Bull., 64: 461-487.
- Lorestani, M., Kangazian, A., Safari, A., Noura, M. R., Nasehi, E. (2016) Microfacies, Sedimentary Environment and Sequence Stratigraphy of the Asmari Formation in Masjed-I-Soleyman Oil Field, Khuzestan Province, Southwest Iran. Open Journal of Geology, 6: 840-851.
- Madlen, R., Wilson, M. (2013) Diagenesis of a SE Asian Cenozoic carbonate platform margin and its adjacent basinal deposits, Sedimentary Geology, 286-287: 20-38.
- Maghfouri-Moghaddam, I., Sedaghatnia, M. (2023) Elemental geochemistry and petrography of Talehzang Formation (Northern edge of Rit anticline, southwest Lorestan) applied to analysis of diagenesis systems and primary mineralogical type. Applied sedimentology, 11(22): 76-107. (in Persian).
- Mazzollo, S. J. (1992) Geochemical and neomorphism alteration of dolomite: a review: Carbonates and Evaporites, 7: 21-37.
- Messadi, A. M., Mardassi, B., Ouali, J. A., Touri, J. (2018) Sedimentology, diagenesis, clay mineralogy and sequential analysis model of Upper Paleocene evaporite-carbonate ramp succession from Tamerza area (Gafsa Basin: Southern Tunisia): Journal of African Earth Sciences, 118: 205-230.
- Milliman, J. D. (1974) Marine Carbonates. Springer-Verlag, New York, 375p.
- Monjezi, N., Amirshahkarami, M., Bakhtiar, H. A., Shirazi, M. P. N., Mirzaee, A. (2019) Palaeoecology and microfacies correlation analysis of the Oligocene-Miocene Asmari formation, in the Gachsaran oil field, Dezful Embayment, Zagros Basin, Southwest Iran. Carbonates Evaporites, 34(4): 1551-1568.
- Moore, C. H. (2001) Carbonate Reservoirs, Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. Elsevier, Amsterdam, p. 444.
- Mohseni, H., Hassanvand, V., Homaie, M. (2016) Microfacies analysis, depositional environment, and diagenesis of the Asmari-Jahrum reservoir in Gulkhari oil field, Zagros basin, SW Iran. Arabian Journal of Geosciences, 9(2): 113.
- Nicolaides, S., Wallace, M. W. (1997) Submarine cementation and sub aerial exposure in Oligo-Miocene temperate carbonates, Torquay Basin, Australia. Journal of Sedimentary Research, 67(3): 397-410.
- Omidpour, A., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., and Rahimpour-Bonab, H. (2021) Application of stable isotopes, trace elements and spectral gamma-ray log in resolving high-frequency stratigraphic sequences of a mixed carbonate-siliciclastic reservoirs. Marine and Petroleum Geology, 104854.
- Pettijohn, F. J. (1975) Sedimentary Rocks. Harper & Row, New York. 628 pp.
- Piryaee, A., Feizi, A., Sofiani, H., Hemmat, S., Motamedi, B. (2014) Paleogeography of tertiary Zagros deposits. Internal report of oil exploration management. Number GR-2362, P 204. (in Persian)
- Purser, B. H. (1978) Early diagenesis and the preservation of porosity in Jurassic limestone. Journal of Petroleum Geology, 1: 83-94.
- Rao, C. P. (1990) Geochemical characteristics of cool-temperate carbonates, Tasmania, Australia. Carbonates and Evaporites, 5: 209-221.
- Rao, C. P. (1991) Geochemical differences between subtropical (Ordovician), temperate (Recent and Pleistocene) subpolar (Permian) carbonates, Tasmania Australia. Carbonates and Evaporites, 6: 83-106.
- Rao, C. P., Jayawardane, M. P. J. (1994) Major minerals, elemental and isotopic composition in modern temperate shelf carbonates, Eastern Tasmania, Australia, implications for the occurrence of extensive ancient non-tropical carbonates. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 107: 49-63.
- Rao, C. P., 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.
- Rao, C. P., Amini, Z. (1995) Faunal relationship to grain-size, mineralogy and geochemistry in recent temperate shelf carbonates, Eastern Tasmania, Australia. *Carbonates and Evaporites*, 10: 114-123.
- Railsback, L. B. (1993) Lithological controls on morphology of pressure-dissolution surfaces (stylolites and dissolution seams) in Paleozoic carbonate rocks from the Mideastern United States. *Journal of Sedimentary Research*, 63 (3): 513-522.
- Rogen, B., Fabricius, I. L. (2002) Influence of clay and silica on permeability and capillary entry pressure of chalk reservoirs in the North Sea. *Petroleum Geoscience*, 8: 287 - 293.
- Ronchi, P., Jadoul, F., Ceriani, A., Giulio, A. D., Scotti, P., Ortenzi, A., Massara, E. P. (2011) Multistage dolomitization and distribution of dolomitized bodies in Early Jurassic carbonate platforms (Southern Alps, Italy), *Sedimentology*, 58: 532-565.
- 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.
- Seibel, M. J., James, N. P. (2017) Diagenesis of Miocene, incised Valley – filling limestones: Provence Southern France. *Sedimentary Geology*, 347: 21 – 35.
- Seyrafian, A., Vaziri-Moghaddam, H., Arzani, N., Taheri, A. (2011) Facies analysis of the Asmari Formation in central and north-central Zagros basin, southwest Iran: Biostratigraphy, paleoecology and diagenesis. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(3): 439-458.
- Sibley, D. F., Gregg, J. M. (1987) Classification of dolomite rock textures. *J. Sediment. Petrol.*, 57: 967-975.
- Shanmugam, G., Benedict, G. L. (1983) Manganese distribution in the carbonate fraction of shallow to deep marine lithofacies, Middle Ordovician, Eastern Tennessee. *Sedimentary Geology*, 35: 165-175.
- Smith, J. V. (2000) Three – dimensional morphology and connectivity of Stylolite shape reactivated during veining. *Journal of Structural Geology*, 22: 59 – 64.
- Thomas, A. N. (1948) The Asmari limestone of southwest Iran. In *International Geological Congress, Report of the 18th Session, UK*, 6: 35-44.
- Tucker, M. E. (2001) *Sedimentary Petrology*. 3^d Edition, Blackwell, Oxford, 260 p.
- Tucker, M. E., Wright, V. P. (1990) *Carbonate Sedimentology*: Blackwell, Oxford, 482 p.
- Van Buchem, F. S. P., Allan, T. L., Laursen, G. V., Lotfpour, M., Moallemi, A., Monibi, S., Motiei, H., Pickard, N. A. H., 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. *Geological Society Special Publications*, 329 (1): 219-263.
- Vaziri-Moghaddam, H., Seyrafian, A., Taheri, A., Motiei, H. (2010) Oligocene-Miocene ramp system (Asmari Formation) in the NW of the Zagros basin, Iran: microfacies, paleoenvironment and depositional sequence. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27(1): 56-71.
- Vincent, B., van Buchem, F. S., Bulot, L. G., Immenhauser, A., Caron, M., Baghbani, D., and Huc, A. Y. (2010) Carbon-isotope stratigraphy, biostratigraphy and organic matter distribution in the Aptian-Lower Albian successions of southwest Iran (Dariyan and Kazhdumi formations): *Geo Arabia Special Publication*, 4 (1): 139-197.
- Warren, J. K. (2006) *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer, Berlin, 1036 p.
- 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.
- Yahyaie, E., Abbasi, R., Mehrabi, H., and Navidtalab, A. (2025) Controls of palaeoclimate condition on facies characteristics and diagenetic processes in the Cenomanian– Turonian sequences (upper Sarvak Formation) in the Abadan Plain, SW Iran. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 1- 28.
- Zabihi Zoeram, F., Vahidinia, M., Mahboubi, A., Amiri Bakhtiar, H. (2013) Facies analysis and sequence stratigraphy of the Asmari Formation in the northern area of Dezful Embayment, south-west Iran. *Studia UBB Geologia*, 58(1): 45-56.
- Zaid, S. M. (2012) Provenance, diagenesis, tectonic setting and geochemistry of Rudies sandstone (lower Miocene), Warda Field, Gulf of Suez, Egypt. *J. African Earth Sci*, 66: 56- 71.
- Zhang, H., Ding, L., Wang, X., Wang, L., Wang, Q. and Xia, G. (2006) Carbonate Diagenesis Controlled by Glacioeustatic Sea-Level Changes: A Case Study from the Carboniferous-Permian Boundary Section at Xikou, China. *J. China Univ. Geosci*, 17: 103- 114.