

Original Research Paper

Investigation of environmental conditions governing the formation of microbialites at the base of the Aghchagil Formation, Gonbad-Kavoos area, Golestan Province

Hossein Mohajer Soltani¹, Behrouz Rafiei^{1*}, Hasan Mohseni¹, Farid Taati², and Maryam Zafari²

¹ Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Bu- Ali Sina University, Hamedan, Iran

² Khazar Exploration and Production Company (KEPCO), National Iranian Oil Company, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2025 May 19

Accepted: 2025 July 30

Available online: 2025 September 23

Keywords:

Microbialite

Aghchagil Formation

Aghband Area

Darreh Azadegan

South Caspian Basin

ABSTRACT

In this research, the sedimentological characteristics of microbialites at the base of the Aghchagil Formation were investigated to determine environmental conditions and reservoir properties. Facies analysis and sequence stratigraphy were employed to reconstruct the environmental settings, and the results were then compared with data obtained from X-ray nanotomography to analyze reservoir characteristics. The findings indicate that the microbialites developed in environments ranging from high-energy Subtidal to Supratidal settings. Under these conditions, the growth rate and distribution of microbialites were controlled by relative sea-level changes and wave energy, with two key processes—microbial trapping and binding—playing important roles in the aggradation of these deposits. They mainly formed during the late transgressions and early regressions sequences, which generally led to the formation of potential reservoirs. The X-ray nanotomography results also confirmed the presence of beneficial and interconnected porosities with significant permeability in the microbial microstructures, indicating that microbialites with thrombolitic mesofabrics possess more favorable reservoir properties.

1. Introduction

Microbialites, i.e., lithified benthic microbial mats, emerged between approximately 3.7 and 3.4 billion years ago (Ga) and are remnants of Earth's oldest known complex ecosystems (Allwood et al., 2006; Nutman et al., 2016, 2019). The biogeochemical reactions mediated by microbial communities within mats have played a primary role in the evolution of Earth's surface, as noted by Des Marais


(2000), Arp et al. (2001), and Aloisi (2008). Lithifying microbial mats have been a major biological carbonate factory during Earth's history and may have contributed to the unique sedimentary record of microbialites, offering an exceptional opportunity to explore the evolution of biological and environmental conditions through time.


* Corresponding author: Behrouz Rafiei; E-mail: b_rafiei@basu.ac.ir

Citation:

Mohajer Soltani, H., Rafiei, B., Mohseni, H., Taati, F., and Zafari, M., 2025. Investigation of environmental conditions governing the formation of microbialites at the base of the Aghchagil Formation, Gonbad-Kavoos area, Golestan Province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 35(3), 137, 19-40. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.524791.2199>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2025.524791.2199

 dor: 20.1001.1.10237429.1404.35.3.2.7



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

The Aghchagil succession is recognized as a shallow-water carbonate platform system that developed in the southern Caspian Basin of the northeastern regions of Golestan Province during the Upper Pliocene. This succession has been transgressively deposited over the Kopet Dagh units (Figs. 2, 3). The base of the Aghchagil succession exhibits abundant and morphologically diverse microbialites, representing an excellent case study for fossils. Due to their preservation and the excellent quality of outcrops in the Darreh Azadegan area, microbialites of the base of the Aghchagil Formation have been used as an analogue for predicting subsurface microbialite carbonate reservoirs. Therefore, this research has been carried out, considering the importance of the Aghchagil Formation in hydrocarbon reservoirs and the necessity of conducting supplementary studies.

2. Research methodology

In this research, the environmental characteristics of microbial mats within the Aghchagil Formation were examined across eight vertical sections from the Darreh Azadegan outcrop (Fig. 1). Samples were collected from most of the microbial mats, and their dimensions were measured in situ. Then, they were examined at four different scales: (1) the macrofabric corresponded both to the macroscopic geometry (hemispheroid, column, etc.) and to the occurrence mode (stacked or linked) of the microbial buildups. (2) The mesofabric was the internal organization of the microbialite defined macroscopically. Two mesofabrics were recognized: stromatolites showed a laminated structure, while thrombolites showed a clotted structure. (3) The microfabric was the internal structure of the microbialite, defined on thin sections. The classification of microfabrics established in this work was based on texture and composition, specifically whether the components were precipitated in situ or trapped and bound. The cement, peloids, micrite, organic matter particles, clastic grains, ooids, fecal pellets, and bioclasts have been studied during this process. In this context, samples were prepared as thin sections measuring 0.25 micrometers in thickness and subsequently examined under a microscope (Leica Polarizing Microscope, Zeiss Group) at the Khazar exploration and production Company (KEPCO). (4) Microstructural scale: At this scale, microscopic microstructures were examined as the smallest organized components detectable using X-ray nanotomography. Accordingly, one of the microbialite samples underwent three-dimensional imaging via a LOTUS-NDT micro-CT scanner at the Behin Negareh Company. During this process, 444 images (each 1497×1542 pixels in 16-bit format) were obtained over a 180-degree rotation. The parameters related to porosity and permeability in this microbialite sample were evaluated using this method, allowing for comparison with the sequence stratigraphy findings. This comparison enabled examination of the reservoir

conditions of the microbialites in the studied area. Finally, to investigate the reservoir characteristics of the Aghchagil Formation microbialites, high-order sequence patterns were identified using surface gamma-ray log data and integrated with facies studies. The results were then compared with petrophysical findings obtained from X-ray nanotomography.

3. Results and Discussions

By integrating the results obtained from the field observations (Fig. 5) (macroscopic and mesoscopic fabrics) and microscopic analyses (Figs. 6, 7), five facies were identified in the microbialite mats of the Aghchagil Formation. These facies are associated with two facies belts: the supratidal to upper intertidal and lower intertidal to subtidal subenvironments. The lower intertidal to subtidal subenvironment includes facies of thrombolite boundstone (Fig. 8), thrombolite-stromatolite boundstone (Fig. 9), crinkly stromatolite boundstone (Fig. 10), and the supratidal to upper intertidal subenvironment comprises facies of stromatolite boundstone with fenestral fabric (Fig. 11), thrombolite crust. The results are shown in Table 1.

The structure and composition of sediments trapped within and around microbialites indicate a shallow water and high-energy environment characterized by continuous and intense sediment transport. Wave energy stands out as a crucial hydrodynamic factor in the region examined and has played a significant role in shaping the growth and spread of microbialites in the Aghchagil Formation. Under certain conditions, accumulations of growth structures and columnar forms develop atop oolitic sandstone in shallow water. Low relief ridges develop in low accommodation areas with frequent, but shorter periods of burial by sands, while several meter-high columns are characteristic of a higher water level with rare, but longer periods of burial. The predominant vertical accretion in high-energy microbialites was interpreted as preventing the formation of long-term sand dunes (Andres and Pamela Reid, 2006). These characteristics align well with the model proposed by Bourillot et al. (2020) regarding microbialites in high-energy environments, ranging from the subtidal to the supratidal facies belt. This facies belt is deposited as deepening-upward cycles. In the shoreface subenvironment, thrombolite boundstone, thrombolite-stromatolite boundstone, and crinkly stromatolite boundstone are present, while in the foreshore subenvironment, stromatolite boundstone with fenestral fabric and thrombolite crust have been deposited.

The microbialite mat in the Darreh Azadegan section was deposited within a high-order sequence on a carbonate platform, as revealed by surface gamma ray analyses. These mats developed over substrata exposed to strong wave action during the third to fourth late transgressions and early regressions (Fig. 14); however,

at the smaller depositional scale, they correspond to the early transgression and late regression stage (Fig. 15). Ideal hydrocarbon reservoirs are usually formed under such conditions. The findings from X-ray nanotomography on a selected microbialite sample from the research area support this topic. The assessment of porosity and permeability in the two microbialite intervals indicates that this sample possesses favorable reservoir characteristics (Figs. 12, 13).

4. Conclusion

A regional sedimentological and stratigraphic study of the microbialite mats of the Aghchagil Formation demonstrated the potential impact of sedimentary dynamics on the fabrics and composition of fossil microbial buildups. These microbialites were composed of disconnected, high-relief forms, preventing burial by growing rapidly in wave-dominated ooid shoals, where sediment motion was permanent and intense. Since microbial structures form on hardground surfaces, their growth rate is controlled by changes in the water level and is not affected by changes in accommodation

space related to the instability of the basin floor.

Analyzing the facies of the microbialites in the Aghchagil succession also confirms that they developed in a high-energy marine setting, situated between the supratidal and subtidal zones. These accumulations, formed during upward-deepening sedimentary cycles, have created suitable reservoir potentials. The stacking pattern and the distribution of these microbialites during high-order cycles depend on their depositional environment. In many instances, these cycles are recognized as a prograding depositional sequence originating from the subtidal environment, characterized by thrombolitic mesofabrics and crinkle stromatolites, which progress to the supratidal environment, featuring planar stromatolites alongside fenestral fabric. This suggests the lateral progradation of subtidal to lower intertidal belt facies over upper intertidal to supratidal belt facies due to relative sea-level changes. Under these conditions, the depositional cycles develop from late transgression and early regression, providing primary reservoir conditions.

بررسی شرایط محیطی حاکم بر تشکیل میکروبیالیت‌های قاعده سازند آقچاگیل، منطقه گنبد کاووس، استان گلستان

حسین مهاجرسلطانی^۱، بهروز رفیعی^{۱*}، حسن محسنی^۱، فرید طاعتی^۲ و مریم ظفری^۲

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲ اداره زمین‌شناسی، شرکت نفت خزر، شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش ویژگی‌های رسوب‌شناختی میکروبیالیت‌های قاعده سازند آقچاگیل با هدف بررسی شرایط محیطی و تعیین ویژگی‌های مخزنی مورد مطالعه قرار گرفت. در این خصوص، با بهره‌گیری از آنالیز رخساره‌ای و چینه‌نگاری سکانتی شرایط محیطی بازسازی گردید و سپس جهت تحلیل ویژگی‌های مخزنی، نتایج با داده‌های حاصل از روش نانو توموگرافی پرتو ایکس مقایسه گردید. یافته‌ها نشان می‌دهند که میکروبیالیت‌های مورد اشاره در دو کمربند رخساره‌ای فراکشندی (فراجزرومدی) تا میان‌کشندی (بین جزرومدی) کم‌ژرفا و کم‌رند رخساره‌ای میان‌کشندی ژرف تا زیرکشندی گسترش یافته‌اند. در این شرایط میزان رشد و نحوه توزیع میکروبیالیت‌ها توسط تغییرات سطح نسبی آب و انرژی امواج کنترل گردیده است و دو فرایند به دام انداختن و رسوب‌گذاری جانداران میکروبی نقش مهمی در افزایش این توده‌ها ایفا نموده‌اند. آن‌ها به‌طور عمده در خلال سکانتس‌های پیش‌رونده پایانی تا پس‌رونده آغازین تشکیل شده‌اند که معمولاً به تشکیل مخازن بالقوه می‌انجامد. نتایج به دست آمده از نانو توموگرافی پرتو ایکس نیز گویای تخلخل‌های مفید و به هم پیوسته با میزان تراوایی قابل توجه در ریز ساختارهای میکروبیالی است که نشان می‌دهد میکروبیالیت‌های با مزوفابریک ترومبولیتی از ویژگی‌های مخزنی مناسب‌تر برخوردارند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

میکروبیالیت

سازند آقچاگیل

منطقه آق‌بند

دره آزادگان

حوضه خزر جنوبی

۱- پیش‌نوشتار

سازند آقچاگیل با سن پلیوسن بالایی تا پلیوستوسن (Khranov, 1960) خزری نقش مهمی در سیستم هیدروکربنی آن ایفا می‌نماید به گونه‌ای که به دلیل تنوع رخساره‌ای، تشکیل هر یک از عناصر سیستم هیدروکربنی در آن ممکن گردیده است (Vincent et al., 2010؛ مهاجرسلطانی و همکاران، ۱۴۰۲). این توالی در نواحی شمال خاوری استان گلستان در یک سکوی (پلاتفرم) کربناته کم‌ژرفا نهشته شده که در قاعده آن میکروبیالیت‌های فراوان و متنوع از نظر ریخت‌شناختی حضور دارند و به این ترتیب یک مطالعه موردی بسیار خوب در زمینه بررسی شرایط محیط رسوب‌گذاری نهشته‌های پلیوسن بالایی در حوضه خزر جنوبی را فراهم می‌آورد. به سبب حفظ‌شدگی میکروبیالیت‌های موجود در این ناحیه و کیفیت بالایی رخمون آن‌ها، می‌توان از آن به عنوان داده‌ای آنالوگ در بررسی مخازن زیر سطحی

میکروبیالیت‌ها به توده‌های میکروبی کف‌زی (بنتیک) گفته می‌شوند که از حدود ۳/۷ - ۳/۴ میلیارد سال پیش بر روی کره زمین پدیدار شدند و خود از بقایای کهن‌ترین بوم‌سازگان (اکوسیستم‌های) پیچیده شناخته شده بر روی زمین هستند (Allwood et al., 2006; Nutman et al., 2016, 2019). واکنش‌های بیوژئوشیمیایی که توسط جوامع میکروبی درون لایه‌ای صورت می‌پذیرد، از آن زمان نقش اصلی در تکامل سطح کره زمین ایفا نموده است (Des Marais, 2000; Arp et al., 2001; Aloisi, 2008). توده‌های میکروبی سنگ‌ساز در بیشتر تاریخ زمین به عنوان یک کارخانه مهم کربنات‌سازی عمل نموده‌اند و در مقیاس بزرگ در جذب و ذخیره‌سازی کربن از طریق فرایند فسیلی نمودن میکروب‌ها مشارکت داشته‌اند (Riding, 2006). از این رو، مطالعه جامع میکروبیالیت‌هایی که در خلال دوره‌های مختلف زمین‌شناسی حفظ گردیده‌اند، درک صحیحی از اطلاعات محیط رسوبی و زیست‌شناختی محفوظ در آن‌ها ارائه می‌دهد.

* نویسنده مسئول: بهروز رفیعی؛ E-mail: b_rafiei@basu.ac.irm

ماخذنگاری:

مهاجرسلطانی، ح.، رفیعی، ب.، محسنی، ح.، طاعتی، ف.، ظفری، م.، ۱۴۰۴، بررسی شرایط محیطی حاکم بر تشکیل میکروبیالیت‌های قاعده سازند آقچاگیل، منطقه گنبد کاووس، استان گلستان. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۵(۳)، ۱۳۷-۱۹-۴۰. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.524791.2199>

doi: 10.22071/gsj.2025.524791.2199



doi: 20.1001.1.10237429.1404.35.3.2.7

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

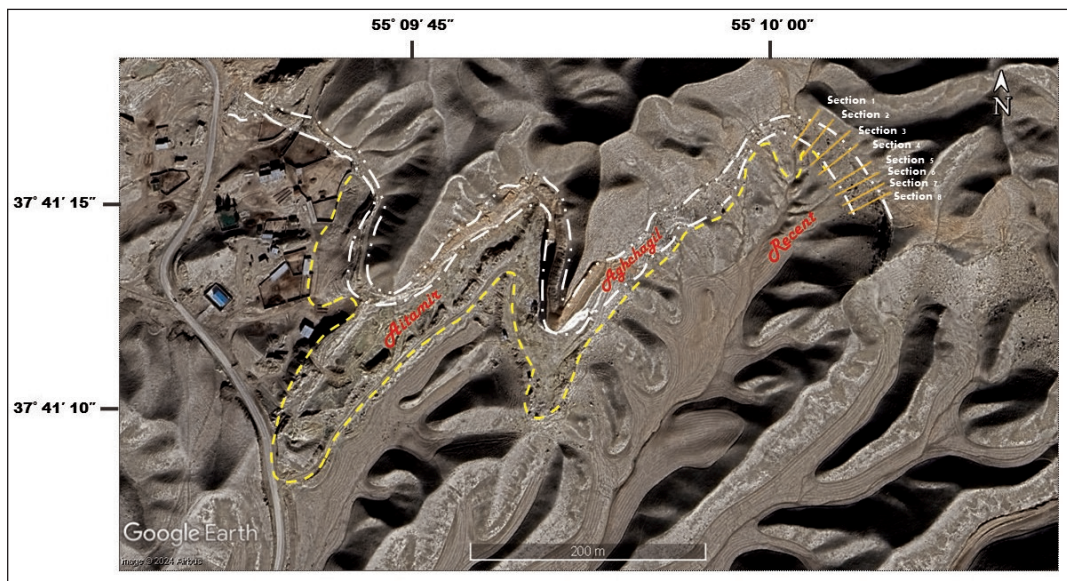
و ترکیب (اجزای سقوط کرده در مقابل اجزای به دام افتاده) است که در جریان این فرایند اجزای سیسمانی، پلوئید، میکریت، مواد آلی، دانه‌های آواری، آئیدها، پلت‌های مدفوعی و قطعات بایو کلاستی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این خصوص از نمونه‌ها مقطع نازک با ضخامت ۰/۲۵ میکرومتر تهیه گردید و سپس در زیر میکروسکوپ (پلاریزان لایکا، گروه زایس) در شرکت نفت خزر تحلیل گردید. (۴) مقیاس ریزساختار: در این مقیاس ریزساختارهای میکروسکوپی به عنوان کوچک‌ترین اجزای سازمان یافته قابل تشخیص با استفاده از نانو توموگرافی پرتو ایکس مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، یک عدد از نمونه‌های میکروبیالیتی توسط دستگاه میکروسی تی اسکن مدل LOTUS-NDT در شرکت بهین نگاره مورد تصویربرداری سه بعدی قرار گرفت. در طی این فرایند، ۴۴۴ تصویر ۱۵۴۲×۱۴۹۷ پیکسل ۱۶ بیتی در چرخش ۱۸۰ درجه به دست آمد. سپس با استفاده از نرم‌افزار ©AVIZO (Thermo Fisher, Waltham, MA, USA) آنالیزهای تصویری متشکل از بخش‌بندی و تفسیر سه بعدی تصاویر صورت پذیرفت. در طی این روش، پارامترهای مرتبط با تخلخل و نفوذپذیری در این نمونه میکروبیالیتی ارزیابی گردیده تا با مقایسه آن با یافته‌های سکansı امکان بررسی شرایط مخزنی میکروبیالیت‌های منطقه مورد مطالعه فراهم گردد. در پایان نیز به منظور بررسی ویژگی‌های مخزنی میکروبیالیت‌های قاعده سازند آقچاگیل، الگوهای سکansı مرتبه بالا (Catuneanu, 2007) با بهره‌گیری از برداشت پرتوی گامای سطحی و تلفیق آن با مطالعات رخساره‌ای مشخص گردیده و نتایج با یافته‌های پتروفیزیکی حاصل از نانو توموگرافی ایکس مقایسه گردید.

میکروبیالیت‌های کربناته آلیتی استفاده نمود. از این رو، با توجه به اهمیت این سازند در اکتشاف ذخایر هیدروکربنی و ضرورت انجام مطالعات تکمیلی بر روی توالی زمانی سازند مورد اشاره، این پژوهش صورت پذیرفته است.

۲- روش پژوهش

در این پژوهش شرایط محیط رسوب گذاری میکروبیالیت‌های قاعده سازند آقچاگیل و نقش آن در سیستم هیدروکربوری احتمالی منطقه از طریق تطابق ۸ برش عمودی که مقطع عرضی سکو (پلاتفرم) را در امتداد ۱۵۰ متر برونزد مشخص نموده است، مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱).

از بیشتر بستره‌های میکروبیالیتی نمونه‌برداری و ابعاد آن‌ها بر روی سطح بستر اندازه‌گیری شد. سپس به منظور تحلیل شرایط محیطی حاکم بر میکروبیالیت‌های مورد اشاره، آن‌ها بر مبنای الگوی به‌کار گرفته شده توسط بوریلوت و همکاران (Bourillot et al., 2020) در ۴ مقیاس مورد بررسی قرار گرفتند: (۱) مقیاس ماکروفابریک: که هم به اشکال هندسی ماکروسکوپی (گنبدی، ستونی، چینه‌ای، پوسته‌ای، لامینه‌ای - موجی) و هم به نحوه ایجاد (انباشته یا متصل) سازندگان میکروبی آن دلالت دارد. (۲) مقیاس مزوفابریک: در این مقیاس ساختمان درونی میکروبیالیت‌ها به صورت ماکروسکوپی بیان گردیده است. (۳) مقیاس میکروفابریک: در این مقیاس ساختمان داخلی میکروبیالیت بر روی مقاطع نازک میکروسکوپی مطالعه گردیده است. مبنای طبقه‌بندی میکروفابریک‌های این نوشتار بر اساس بافت



شکل ۱- گستره مورد مطالعه در تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث. طول مقیاس افقی مندرج در این تصویر ۲۰۰ متر است.

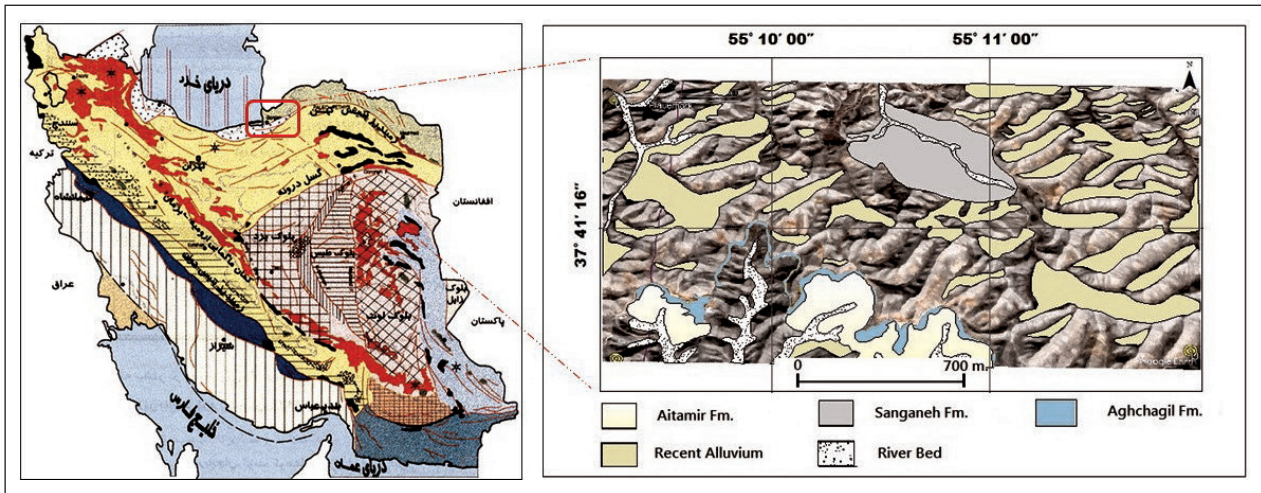
Figure 1. Study area over Google Earth satellite image. The horizontal scale length in this image is 200 m.

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

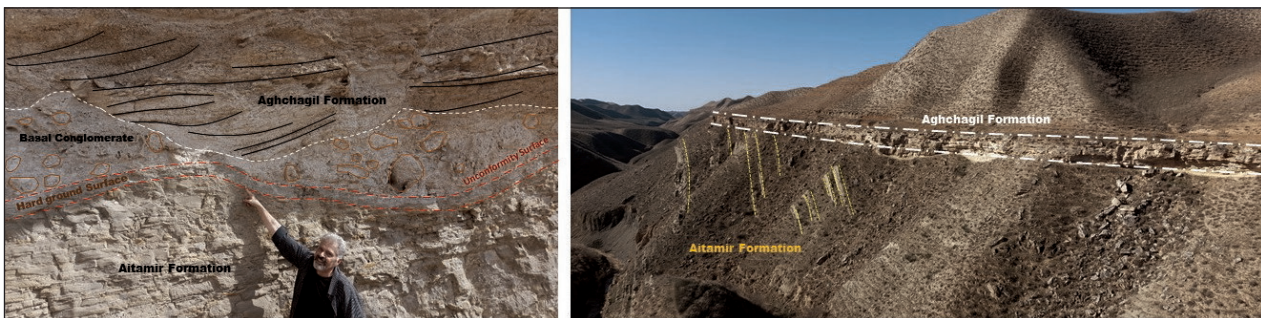
و حوضه رسوبی خزر جنوبی قرار گرفته است (شکل ۲) به گونه‌ای که در این ناحیه توالی کربناته و پیش‌رونده آقچاگیل (مرتبط با حوضه خزر جنوبی) با یک ناپوستگی فرسایشی بر روی ماسه‌سنگ‌های گلو کونیت‌دار سازند آیتامیر (مرتبط با حوضه کپه‌داغ باختری) قرار گرفته است (شکل ۳). بستره میکروبیالی موجود در قاعده این سازند بر روی سطوح سخت گسترش یافته و از طریق فرایند به دام انداختن، تجمعات جانوری غنی از گونه‌های ماکترایدی و کاردیدي را در درون و راس آن ایجاد کرده است.

میکروبیالیت‌های سازند آقچاگیل در منطقه دره آزادگان واقع در بخش باختری روستای آق‌بند از توابع گنبد کاووس قرار گرفته‌اند. این منطقه در محدوده‌ای با مختصات جغرافیایی $37^{\circ} 41' 25''$ تا $37^{\circ} 41' 29''$ عرض شمالی و $55^{\circ} 10' 27''$ تا $55^{\circ} 10' 30''$ طول خاوری واقع گردیده است. با استناد به پهنه‌های ساختاری - رسوبی ایران (آق‌باتی، ۱۳۸۳)، منطقه مورد اشاره در حدفاصل پهنه ساختاری کپه‌داغ



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی برش دره آزادگان (سمت راست) و موقعیت آن بر روی پهنه ساختاری ایران (سمت چپ).

Figure 2. Geological map of the Darreh Azadegan section (right) and its location on the Iranian structural zone (left).



شکل ۳- نحوه قرارگیری توالی سنگ‌چینه‌ای آچاگیل بر روی نهشته‌های سازند آیتامیر، موقعیت برش دره آزادگان در تصویر سمت چپ و موقعیت رخنمون ماسان کوب در تصویر سمت راست نمایش داده شده است.

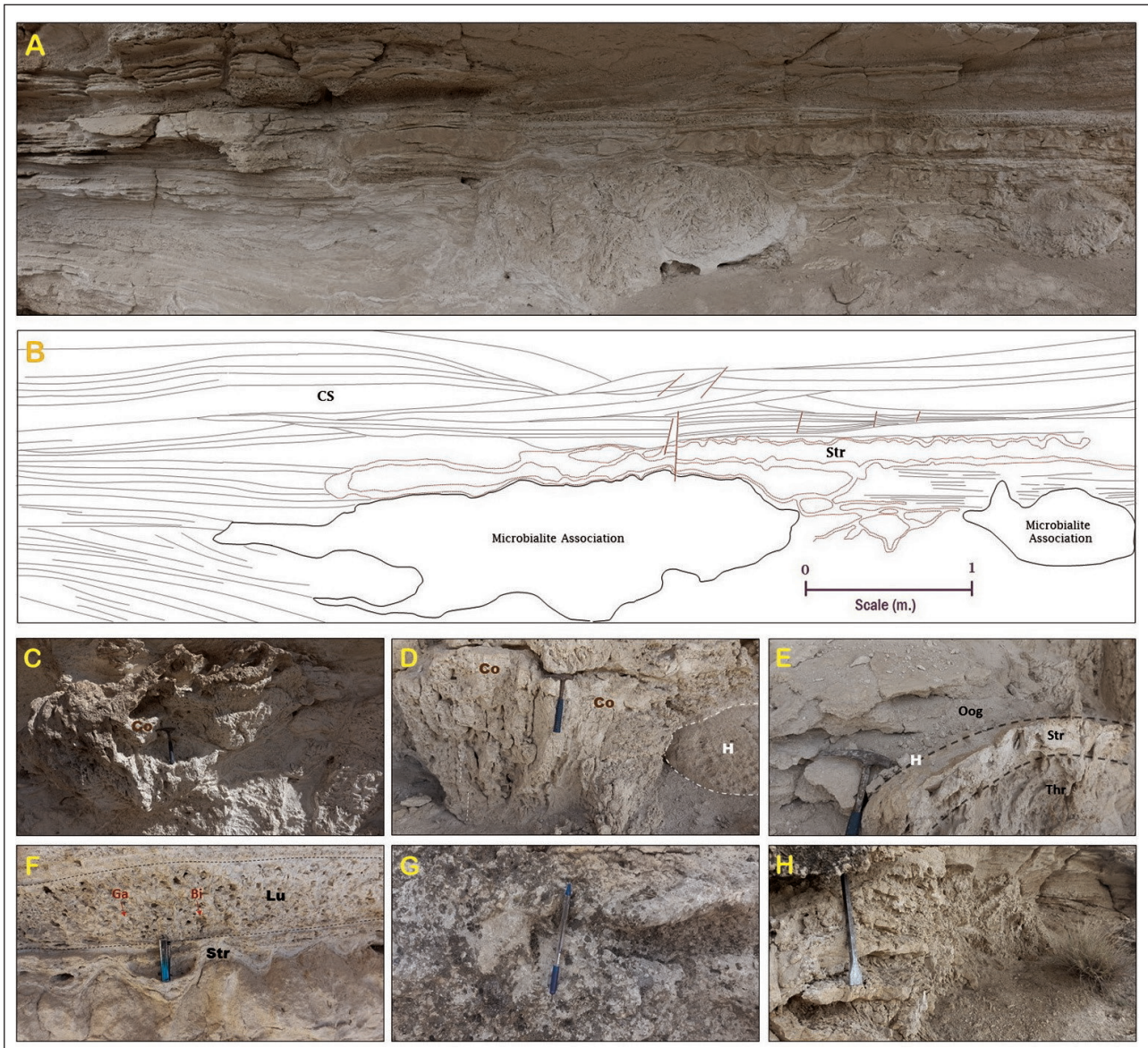
Figure 3. The position of Aghchagil succession on the Aitamir Formation at the location of Darreh Azadegan section (left) and Masan Kop section (right).

و از شکل‌های کشیده و باریک تا کوتاه و پهن (شکل C-۴) و همچنین قارچی شکل (شکل D-۴) برخوردارند. شکل‌های گنبدی مانند غالباً از یک هسته ترومبولیتی با پوشش استروماتولیتی (شکل E-۴) تشکیل یافته‌اند. همچنین گونه‌های استروماتولیتی کوچک با ارتفاع سانتی‌متر تا دسی‌متر و ترکیب مادستون تا پکستون پلوییدی در این سازندگان مشاهده می‌گردند (شکل F-۴) و توالی پیچیده‌ای از حفرات و موجوداتی که با یکدیگر مرتبطند، در بالا و یا کنار آنها تشکیل شده‌اند. شکم‌پا (گاستروپود)، دوکفه‌ای و استراکود به ترتیب متداول‌ترین گروه‌های جانوری برای تشکیل کلونی و فرسایش زیستی در این تجمعات به‌شمار می‌روند و در برخی موارد نیز میان‌لا‌ه‌های کربناته غنی از گل (مادستون تا وکستون) فواصل میان سازندگان میکروبیالیتی و این تجمعات جانوری را پر نموده است (شکل F-۴). استروماتولیت‌های موجی و چینه‌ای (شکل G-۴) از دیگر سازندگان تجمعات میکروبیالیتی محسوب می‌شوند که در قاعده و راس ستون‌های ترومبولیتی بزرگ ایجاد شده‌اند. همچنین شواهدی از پوسته‌های میکروبیالیتی در بخش‌هایی از تجمعات میکروبیالیت دره آزادگان مشاهده می‌شود. (شکل H-۴) که با لایه‌بندی ضعیف در ماکروفا‌بریک‌های گنبدی این ناحیه حضور دارند.

شایان ذکر است پیشینه ستبرای سازند آچاگیل ۷۵۰ متر در بخش ژرف حوضه خزر ارزیابی گردیده است در حالی که به سمت حاشیه حوضه بسیار نازک‌تر (۱۰-۵/۰ متر) می‌شود (Van Baak et al., 2013). از آن جا که رخنمون مورد مطالعه نیز در حاشیه این حوضه قرار گرفته است، از ستبرای بسیار کمی برخوردار است (در حدود ۱۰ متر ارزیابی گردید).

۳-۲- فابریک‌های ماکروسکوپی و مزوسکوپی

توده‌های میکروبیالیتی موجود در قاعده سازند آچاگیل از اشکال ستونی، گنبدی، چینه‌ای و لامینه‌ای-موجی برخوردارند (شکل ۴). آن‌ها با متوسط ارتفاع ۲ متر و متوسط پهنای ۵ متری گسترش یافته‌اند و با شیبی معادل ۵ درجه به صورت منفرد بر روی سطوح سخت بالای ناپیوستگی قرار گرفته‌اند که در بخش‌هایی از این سطوح فرسایش فیزیکی و انحلال مشاهده می‌گردد. همچنین ساختمان‌های رسوبی مانند طبقه‌بندی مورب یک‌جته و ترفانی در بالای فابریک‌های میکروبیالیتی حضور دارند (شکل‌های A-۴ و B). شکل‌های ستونی از فراوان‌ترین ساختمان‌های ماکروسکوپی در این تجمعات به‌شمار می‌روند. میکروبیالیت‌های ستونی دارای کناره‌های عمودی تا نیمه عمودی‌اند



شکل ۴- فابریک‌های ماکروسکوپی و مزوسکوپی مرتبط با توده‌های میکروبیالیتی برش دره آزادگان؛ (A) تصویری پانوراما از بخش‌هایی از قاعده توالی آقچاگیلین در برش دره آزادگان، (B) تفسیر رخساره‌ای نمادین از "شکل A" که در آن نوارهای استروماتولیتی (Str) با شبکه‌ای در هم تنیده دیگر سازندگان میکروبیالی را احاطه نموده‌اند. در این شرایط طبقات مورب (CS) بر روی توده‌های میکروبیالیتی مورد اشاره به صورت آلتپ قرار گرفته‌اند. (C) ماکروفابریک ستونی (Co) که عمدتاً با مزوفابریک ترومبولیتی همراه است، به‌طور عموم ارتفاع این فابریک‌ها به ۱/۵ متر می‌رسد. (D) نمایی از فابریک‌های ماکروسکوپی گنبدی (H) و ستونی (Co) مانند در توده‌های میکروبیالیتی دره آزادگان، طول چکش زمین‌شناسی موجود در تصویر ۳۰ سانتی‌متر است. (E) ماکروفابریک گنبدی با هسته‌ای ترومبولیتی (Thr) و پوشش استروماتولیتی (Str) که معمولاً در توالی‌های بالایی آن گریستون‌های ائیدی (Oog) به چشم می‌خورد. (F) باندستون استروماتولیتی (Str) با شبکه‌ای در هم تنیده که تجمعات جانوری (Lu) بومی حوضه (غالباً دوکفه‌ای‌ها و گاستروپودها) را به دام انداخته است، طول فندک موجود در تصویر ۱۰ سانتی‌متر است. (G) استروماتولیت چینه‌ای که از اشکال گنبدی مانند کوچک مقیاس تشکیل شده است. (H) شواهدی از پوسته‌های میکروبیالیتی در منطقه مورد مطالعه، طول شی موجود در تصویر ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد.

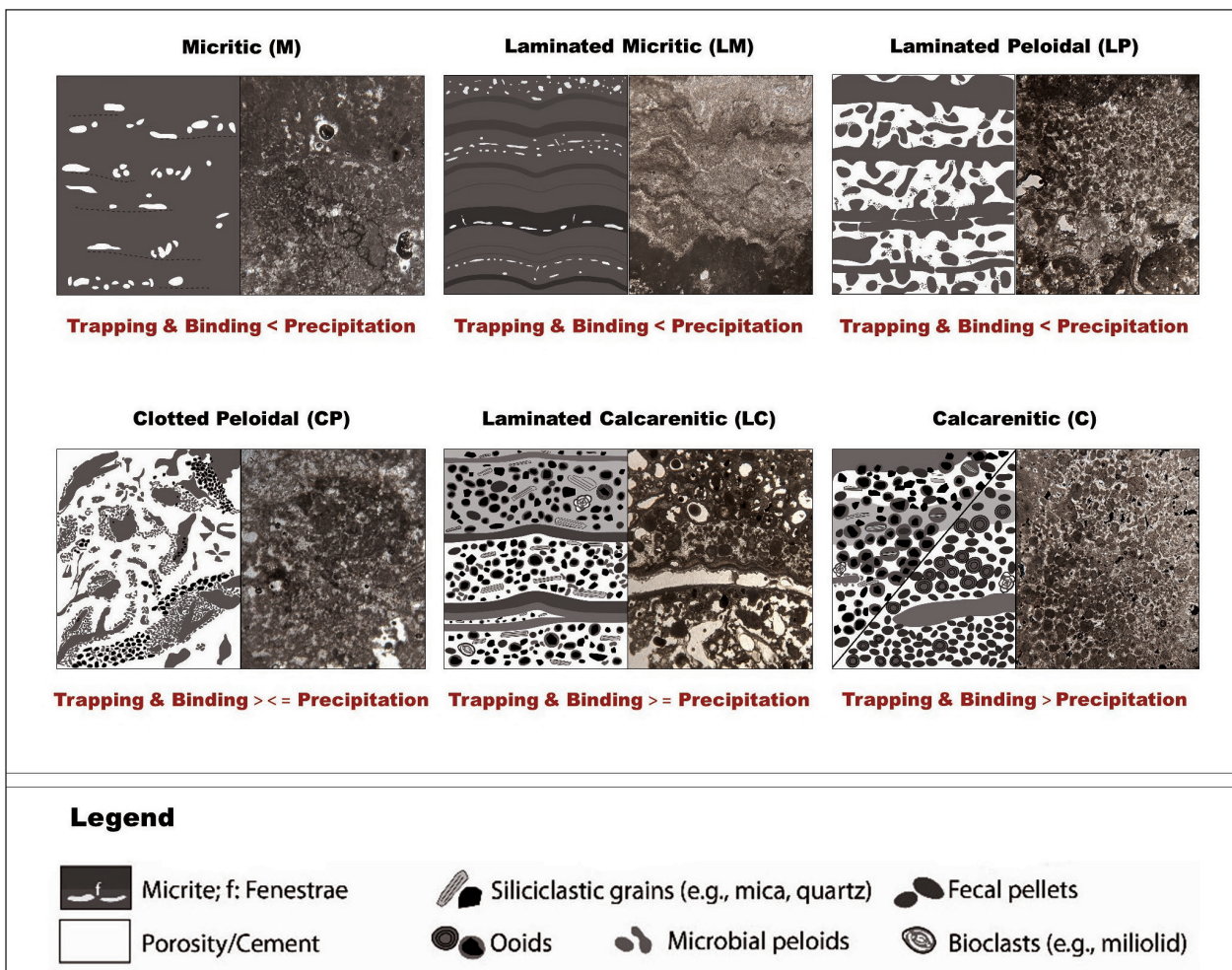
Figure 4. Macro and meso fabric of microbialite association in the Darreh Azadegan section. A) Panoramic image of basal Aghchagil succession in the Darreh Azadegan section. B) Schematic illustration of the facies interpretation (Fig. A) where stromatolite boundstone (Str) surrounds other microbial mat with an interwoven network. Crossbed stratification overlapped on the microbial mat. C) Columnar macrofabric (Co) is associated chiefly with thrombolitic mesofabric, generally reaching a height of 1.5 m. D) Close-up view of hemispheroids (H) and columnar (Co) fabrics in Darreh Azadegan microbial mat. The hammer is 40 cm in length. E) A hemispheroid macrofabric with thrombolitic core (Thr) and stromatolite envelope (Str), usually containing ooid grainstone (Oog) in its upper succession. F) stromatolite boundstone (Str) with an interwoven network that has trapped locally lumachel (Lu) of the basin (mostly bivalves and gastropods). The length of the lighter shown in the picture is 10 cm. G) Crinkly stromatolite composed of small-scale dome-like forms. H) Evidence of microbialite crust in the study area; the length of the object in the image is 20 cm long.

۳-۳- فابریک‌های میکروسکوپی

فابریک‌های میکروسکوپی موجود در میکروبیالیته‌ها انعکاسی از دو پارامتر به دام انداختن و اتصال دانه در مقابل ته‌نشست میکروبی است (Dupraz et al., 2004, 2009; Vennin et al., 2015; Bayet-Goll and Daraei, 2020; Bayet-Goll et al., 2022). در این خصوص، بوریلوت و همکاران (Bourillot et al., 2020) شش ساخت میکروسکوپی برای توده‌های میکروبیالیته‌ی تعریف نمودند که بر این اساس، هر یک از آن‌ها با نمونه میکروسکوپی متناظر با خود در منطقه مورد مطالعه مطابقت داده شدند (شکل ۵).

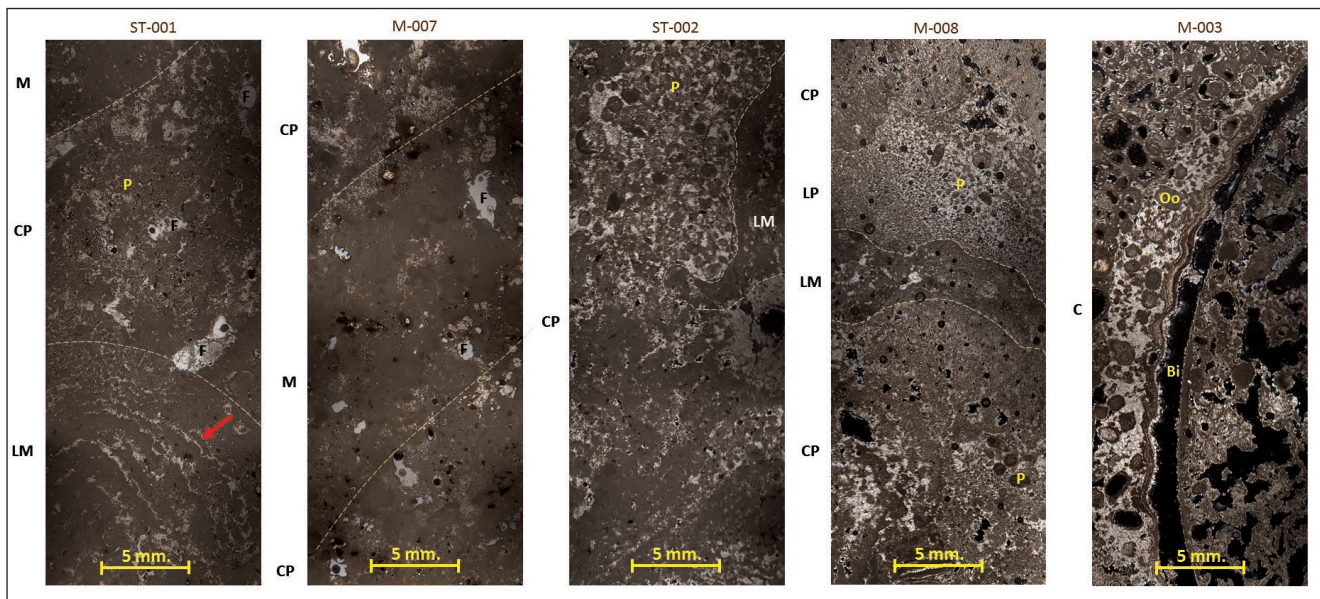
ساخت‌های مورد اشاره که با رخساره‌های میکروسکوپی منطقه مورد مطالعه نیز مطابقت داده شدند (شکل ۶)، عبارتند از ۱) ساخت میکریتی (M): این فابریک میکروسکوپی از میکریته بدون لامیناسیون یا به شدت گسسته با تخلخل فنسترال تشکیل شده است و آثار رشته‌های سیانوباکتری در بخش‌های محدودی از آن وجود دارد. ممکن است بعضی استروماتولیت‌هایی که از لایه‌بندی ماکروسکوپی نسبتاً خوبی برخوردارند، در زیر میکروسکوپ ساخت بدون لایه نشان دهند.

۲) ساخت میکریته لامینه‌ای (LM): این ساخت از لامیناسیون‌های میکریتی تشکیل یافته است. میزان ستبرای لامینه‌ها از کمتر از ۱۰ میکرون تا کمتر از ۱ میلی‌متر است و تخلخل فنسترال جانبی گاهی در میان لامینه‌ها حفظ گردیده است (۳) ساخت پلویید لامینه‌ای (LP): این ساخت از ده‌ها تا صدها میکرون لایه متراکم میکریتی تشکیل یافته که در تناوب با لامیناسیون‌های ستبرتر پلوییدی قرار گرفته‌اند (۴) ساخت پلویید لخته‌ای (CP): این ساخت از ده‌ها تا صدها میکرون تجمعات پلوییدی گرد شده بدون لامیناسیون و یا با لایه‌بندی کم تشکیل شده است. (۵) ساخت کالک‌ارنایت لامینه‌ای (LC): این فابریک میکروسکوپی از تناوب لایه‌های میکریتی (با ستبرای ده‌ها تا صدها میکرون) با لایه‌های غنی از دانه‌های درشت‌تر (تا چند میلی‌متر) تشکیل شده است. دانه‌ها مرتبط با آلوکم‌های کربناته (آلیید، پلت مدفوعی، بیشتر پلویید و به‌ندرت بایوکلاست) و یا ذرات سیلیسی آواری است. پلوییدها نیز در لایه‌های پر از دانه مشاهده می‌گردند. (۶) ساخت کالک‌ارنایتی (C): این فابریک نیز عمدتاً از آلوکم‌ها و قطعات سیلیسی آواری (همان نوع LC) تشکیل یافته است و در تناوب با لامینه‌های ریز مقیاس میکریتی است.



شکل ۵- انواع فابریک میکروبیالیته‌ی مورد استفاده در این پژوهش، برگرفته از بوریلوت و همکاران (Bourillot et al., 2020).

Figure 5. The types of microbial fabrics used in this research, (Bourillot et al., 2020).



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی برگزیده از رخساره‌های میکروبیالیتی برش دره آزادگان؛ حروف اختصاری عبارتند از LM: میکریٹ لامینه‌ای، LP: بافت پلوئید لامینه‌ای، M: بافت میکریٹ، CP: بافت پلوئید لخته‌ای، P: پلت، Oo: اُئید، Bi: دوکفه‌ای پیکان قرمز رنگ گویای سیمان اسپارایتی است که به صورت متناوب با نوارهای تیره رنگ پکتون پلتی در یک استروماتولیت چینه‌ای مشاهده می‌گردد. همه تصاویر میکروسکوپی موجود در PPL عکس برداری و با تکنیک‌های نرم افزاری به صورت پانوراما ارائه گردیده است.

Figure 6. Selected microscopic images of microbialite facies from Darreh Azadegan section; abbreviations are as follows: LM: Laminated Micrite, LP: Laminated Peloidal, M: Micritic, CP: Clotted Peloidal, P: Peloid, Oo: Ooid, Bi: Bivalve; The red arrow indicates sparry cement, which is observed alternately with dark peloid packstone in a crinkly stromatolite. All microscopic images available in PPL have been photographed and then transformed into a panoramic image using software techniques.

تنوع ساخت‌های میکروسکوپی مورد اشاره، منعکس کننده تفاوت‌هایی در شدت نسبی به دام انداختن و اتصال دانه در مقابل ته‌نشست‌های میکروبی است. انواع ساخت میکروسکوپی با برتری چیره میکریٹ و پلوئید (M، LM، LP) عمدتاً با سازوکارهای (مکانیسم‌های) رسوب میکروبی و یا به دام انداختن ثانویه مرتبط است، ولی در ساخت‌های میکروسکوپی دانه‌پشتیبان (C یا LC) پارامتر به دام انداختن و اتصال دانه مساوی و یا بیشتر از رسوب میکروبی است. در منطقه مورد مطالعه، توده‌های میکروبیالیتی با اشکال ستونی عمدتاً دارای ساخت دانه‌پشتیبان LC و CP می‌باشند. پوسته‌های ترومبولیتی بیشتر از فابریک LP پیروی می‌نماید و ساختمان‌های گنبدی شکل نیز غالباً از فابریک C یا LP در هسته و C یا LC و LP در حاشیه‌ها تشکیل شده‌اند. پلت‌ها از جمله آلوم‌هایی است که در میکروفابریک‌های ترومبولیتی مشاهده می‌گردند. پلت‌ها تخم مرغی شکل بوده و حاشیه‌های تیزی دارند و به‌طور معمول طولشان به بیش از ۱ میلی‌متر می‌رسد. به نظر می‌رسد دو عامل به دام انداختن و ته‌نشست میکروبی از فرایندهای تشکیل توده‌های میکروبیالیتی در منطقه مورد مطالعه به‌شمار می‌روند. در این توده‌ها، شکل‌های ستونی از پلت‌های مدفوعی و اُئیدها نشأت گرفته‌اند. میکروفابریک لایه‌ای نیز در میکروبیالیت‌های انشعابی مشاهده می‌گردد و گاهی توسط پلت‌های مدفوعی به دام افتاده قطع گردیده‌اند که به عنوان نتیجه فرایندهای ته‌نشست میکروبی (به‌طور چیره)، به دام انداختن دانه و اتصال تفسیر می‌شوند.

۳-۴-۱- کمربند رخساره ای میان‌کشنی ژرف نا زیرکشنی

– رخساره باندستون ترومبولیتی (FA-01)

توصیف: واژه ترومبولیت برای توصیف میکروبیالیت‌هایی به کار می‌رود که فاقد لایه‌بندی بوده و از فابریک لخته‌ای تشکیل شده‌اند. این فابریک از ویژگی‌های اصلی ترومبولیت‌ها به‌شمار می‌رود که به رنگ تیره و با لبه‌های مشخص و نامنظم مشاهده می‌گردد (Aitken, 1967) و از میکریٹ یا دولومیکریٹ تشکیل شده است. ترومبولیت‌های موجود در قاعده سازند آقچاگیل به فرم‌های ستونی و گنبدی شکل بر روی سطوح سخت بالای ناپیوستگی قرار گرفته‌اند. آن‌ها از ابعاد به‌نسبت بزرگی برخوردارند و توالی رسوبی بالای آن‌ها از طبقات مورب ترافی حاوی گریستن‌های پلتی – اُئیدی تشکیل شده‌اند. در درون حجرات و فضای به شدت متخلخل آن‌ها گونه‌هایی از صدف‌های دوکفه‌ای و شکم‌پا مشاهده می‌گردد. بافت میکروسکوپی آن‌ها بیشتر لخته‌ای و یا لامینه‌ای پلوئیدی است. زمینه آن میکریٹ است و در بخش‌هایی از آن رشته‌های سیانوباکتریایی تشکیل شده است. آلوم غیراسکلتی در بعضی موارد شامل پلت است (شکل ۷).

تفسیر: بیشتر پژوهشگران اتفاق نظر دارند که ترومبولیت‌ها نوع متمایزی از میکروبیالیت‌ها را نشان می‌دهند که در اثر افزایش سطح آب دریا و گسترش جوامع میکروبی و تعامل آن‌ها با محیط زیست تولید می‌شوند (Shapiro, 2000; Riding, 2000, 2006; Tang et al., 2013). به‌طور کلی انرژی و میزان گردش آب، ریخت‌شناسی رشد ماکروسکوپی و مزوسکوپی میکروبیالیت‌ها را کنترل می‌نماید. با

سپس با استناد به منابع مرتبط در این خصوص (Osleger and Read, 1991; Lee and

۳-۴-۲- رخساره‌های رسوبی


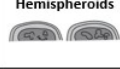


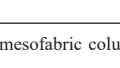
با ادغام نتایج حاصل از مشاهدات صحرایی (فابریک‌های ماکروسکوپی و مزوسکوپی) و تحلیل فابریک‌های میکروسکوپی، در مجموع ۵ رخساره در توده‌های میکروبیالیتی سازند آقچاگیل شناسایی شد (جدول ۱).

گروه‌های خاص میکروبیی نداشته باشد، اما با استناد به پژوهشی مشابه در خصوص میکروبیالیت‌های سازند نجمه (عیسی نژاد و همکاران، ۱۴۰۱) محیط نسبتاً ژرف تر و آرام تر برای تشکیل ترومبولیت‌ها در قاعده سازند آقچاگیل مطلوب تر است.

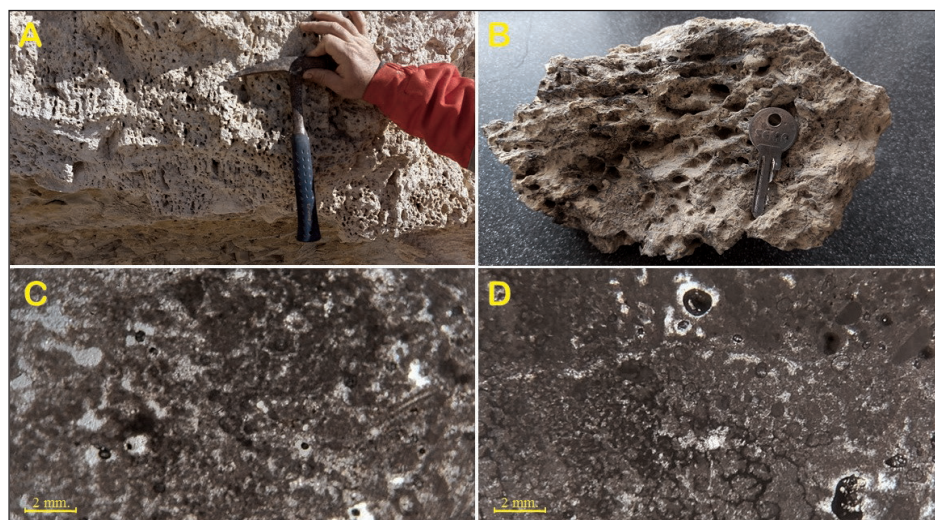
توجه به ابعاد میکروبیالیت‌های منطقه مورد مطالعه و تجمعات جانوری همراه با آن به نظر می‌رسد آن‌ها در رخساره‌های زیرکشدنی سازند مورد مطالعه تشکیل گردیده‌اند. اگرچه ممکن است تشکیل ترومبولیت‌ها در محیط ژرف تر ارتباط مستقیمی با

جدول ۱- ویژگی فابریک‌های موجود در میکروبیالیت‌های قاعده سازند آقچاگیل. X = میکروفابریک چیره؛ x = میکروفابریک ثانویه

Table 1. Interpretation and environmental characteristics in the microbialites of the Aghchagil Formation.

Palaeoenvironment	Macrofabric	Mesofabric	Microfabric						Stratal Pattern	Sedimentary Features	Geological Setting	Facies No.
			1	2	3	4	5	6				
Lower intertidal to subtidal	Co-Columns 	a-T b-S/T	-	x	x	X	x	X	Ind size: Min. 1.1*0.8 m., Max. 4*3.5 m Stratal geometry: Tabular, Shoal Stratal Dimensions: Thick:1-4 m., wide: 10 sm – 100 sm	Develop within cross bedded ooid and/or pellet pack to grainstone	Subtidal; High energy Shoreface to foreshore	FA-01
	SH-Stacked Hemispheroids 	T-S	-	x	X	-	X	x	Ind size: Min. 1.25*3 m., Max. 3* 5 m Stratal geometry: Shoal Stratal Dimensions: Thick:1.75-5 m., wide: 10 sm – 100 sm	Desiccation cracks, may develop within Cross bedded ooid pack to grainstone	Subtidal to intertidal; High energy Shoreface to foreshore	FA-02
	Cr-Crinkles 	S	-	X	X	-	x	x	Ind size: Min. 0.035*0.015 m., Max. 0.5* 0.3 m Stratal geometry: Tabular, lense Stratal Dimensions: Thick:0.035-0.8 m., wide: ms- 10 sm	Desiccation cracks, gypsum Pseudomorphs	Shallow subtidal to supratidal (?); Protected lagoon / salt lake	FA-03
Supratidal to upper intertidal	Cr-Crusts 	T	x	x	x	X	-	X	Ind size: Height: 0.1-1 m Stratal geometry: Tabular, Shoal Stratal Dimensions: Thick: 0.1-1 m., wide: ms-10 sm	May develop within cross bedded ooid and/or pellet pack to grainstone	Subtidal to intertidal; High energy Shoreface to foreshore or Protected lagoon/salt lake	FA-04
	W-Wavy 	S	x	x	X	-	x	-	Ind size: undefined Stratal geometry: Tabular, lense Stratal Dimensions: Thick: 0.1-1.5 m., wide: ms-10 sm	Desiccation cracks, box work structure; may pass laterally to Cross bedded ooid pack to grainstone & gastropod floatstone	Intertidal to supratidal High energy foreshore or protected lagoon/salt lake	FA-05

In the mesofabric column, S = stromatolitic; T = thrombolitic; T-S = thrombolitic at the base, stromatolitic at the top; T/S = thrombolitic passing laterally to or alternating with stromatolitic. Microfabrics: X = dominant microfabric; x = secondary microfabric; - = absent. Individual dimensions (Ind. Size; height _ width) are given for a single buildup.



شکل ۷- نمایی از رخساره باندستون ترومبولیتی، تصویر صحرایی از رخساره باندستون ترومبولیتی در رخمن دره آزادگان. (B) تصویر نمونه دستی از رخساره باندستون ترومبولیتی با فضایی به شدت متخلخل که گاهی در حجرات آن بایوکلاست‌های دوکفه‌ای مشاهده می‌گردد. طول کلید موجود در تصویر ۶ سانتی‌متر است. (C) نمایی میکروسکوپی از بافت لخته‌ای و آثار رشته‌های سیانوباکتری در رخساره باندستون ترومبولیت (PPL). (D) نمایی از میکریت با بافت لخته‌ای در زیر میکروسکوپ (PPL).

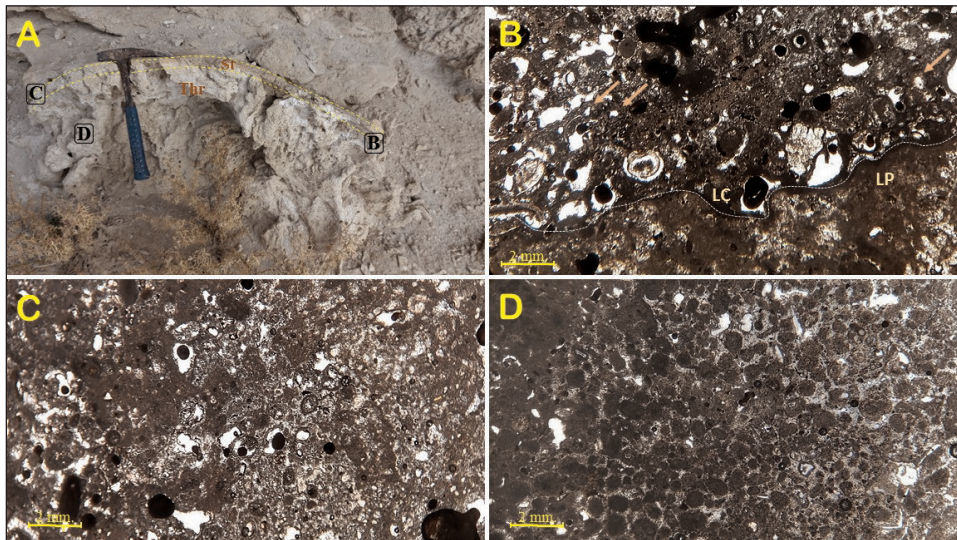
Figure 7. View of the thrombolite boundstone facies, A) Field photograph of the thrombolite boundstone in Darreh Azadegan outcrop. B) Macroscopic Sample of this facies showing a highly porous space, in which bivalve bioclasts are occasionally observed in the cells, The length of the key is 6 cm. C) Microscopic view of clotted texture and cyanobacterial filaments in the thrombolite boundstone (PPL), D) View of micrite with clotted texture under the polarized microscope (PPL).

–رخساره باندستون ترومبولیتی – استروماتولیتی (FA-02)

توصیف: این رخساره با ساختمانی مرکب از میکروبیال‌های گنبدی در قاعده و لامینه‌های استروماتولیتی در راس خود تشکیل شده و ساختارهایی با هسته ترومبولیتی و پوشش استروماتولیتی ایجاد نموده است. آن‌ها در منطقه مورد مطالعه از ابعاد به نسبت کوچکی برخوردارند و معمولاً به صورت توده‌های مجزا از یکدیگر مشاهده می‌گردند. در این میان، هسته‌های ترومبولیتی عموماً از فابریک میکروسکوپی لامینه‌های پلوییدی (LP) و پوشش‌های استروماتولیتی از فابریک میکروسکوپی لامینه‌های کالک‌ارنایتی (LC) تشکیل شده‌اند (شکل ۸).

تفسیر: حضور همزمان مزوفابریک‌های ترومبولیتی و استروماتولیتی در یک مجموعه میکروبیالی را می‌توان به نوسان آب، انرژی محیطی و شرایط رسوب‌گذاری نسبت داد. در این میان، ماکروفابریک گنبدی با هسته ترومبولیتی و پوشش استروماتولیتی نشان‌دهنده تعامل پیچیده میان عوامل هیدرودینامیکی و فرایندهای رسوبی است که به تشکیل بافت‌های درونی و بیرونی منحصربه‌فرد انجامیده است

(Warren and Stickley, 1997; Grotzinger, 2000). به طور مشخص، در شرایط محیطی کم‌ژرفا، رسوبات حاصل از تجمعات میکروبی به شکل استروماتولیت‌های لامینه‌ای با مزوفابریک‌های منظم مشاهده می‌گردند که نشان‌دهنده رسوب‌گذاری میکروبی در یک شرایط رسوبی به نسبت آرام و پایدار است. در این خصوص طرح بر انباشت به صورت لایه‌ای تظاهر می‌نماید. در مقابل با افزایش ژرفای آب و کاهش انرژی محیطی؛ ممکن است در بعضی مواقع نوسانات دوره‌ای (ناشی از جزرومد) شرایط فیزیکی محیط را به گونه‌ای تغییر دهد که ساختارهای ترومبولیتی با مزوفابریک‌های نامنظم و لخته‌ای تشکیل گردند (Riding, 2000). در این وضعیت، رسوب‌گذاری میکروبی تغییر یافته و ساختمان‌های لایه‌ای به ساختارهای ریزدانه و درهم‌تنیده‌ای تبدیل می‌شوند که ناشی از افزایش نوسان آب به دلیل ناپایداری انرژی و آشفتنگی آب در محیط رسوب‌گذاری است. از این رو، همجواری مزوفابریک ترومبولیتی با استروماتولیتی گویای یک منطقه انتقالی است که در حداصل محیط میان‌کشنده‌ی تا زیر جزری قرار دارد.



شکل ۸- نمایی از رخساره باندستون ترومبولیتی – استروماتولیتی؛ A) فرم گنبدی با پوشش استروماتولیتی (St) و هسته ترومبولیتی (Thr) در برش دره آزادگان. B، C، D و مندرج در تصویر A گویای نقاط نمونه‌برداری و تصویربرداری میکروسکوپی می‌باشد. B) مرز جدا کننده (نقطه چین سفید) پوشش استروماتولیتی (بافت لامینه‌های کالک‌ارنایتی = LC) از هسته ترومبولیتی (بافت لامینه‌های پلوییدی = LP) را به تصویر می‌کشد؛ پیکان‌های صورتی رنگ گویای موقعیت برخی از فابریک‌های فنسترال در بخش استروماتولیتی می‌باشند. C) تصویری از بافت کال‌کارنایتی همراه با فابریک فنسترال از بخش استروماتولیتی، بیشتر حفرات توسط سیمان کلسیتی پر شده است. D) تصویر بافت لامینه‌های پلوییدی که در بعضی بخش‌ها فابریک لخته‌ای نشان می‌دهد. همه تصاویر میکروسکوپی در PPL عکس‌برداری شده‌اند.

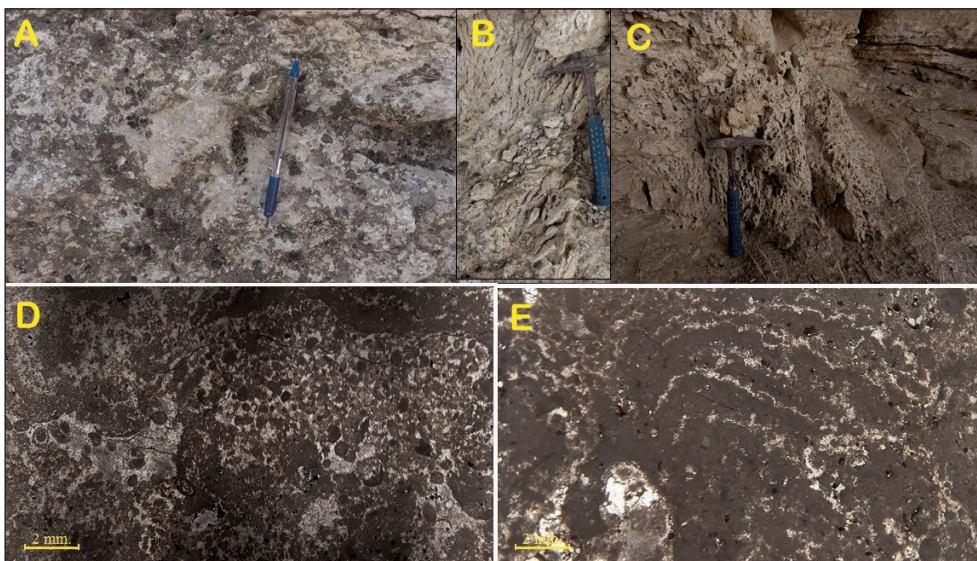
Figure 8. View of the thrombolite-stromatolite boundstone facies, A) View of the hemispheroid shape with stromatolite envelope (St) and thrombolitic core (Thr) in Darreh Azadegan section. The texts inscribed on the image confirm sampling and microscopic imaging points. B) The separating boundary (white dotted line) represents a stromatolitic envelope (LC: laminated calcarenitic) over a thrombolitic core (LP: Laminated Peloidal). The pink arrow indicates the positions of some fenestral fabrics in the stromatolitic section. C) An image of calcarenite texture accompanied by fenestral fabric from the stromatolitic section; Most porous areas are filled with calcite cement. D) The image shows the laminated peloidal texture, which in some areas displays clotted fabric. All microscopic images were captured under PPL.

۳-۴-۲- کمربند رخساره ای فراکشنی ژرف تا زیرکشنی کم ژرفا

توصیف: این پوسته‌ها غالباً از برجستگی کمی برخوردارند و معمولاً در

توصیف: استروماتولیت‌های چینه‌ای از میکروبیالیت‌های گنبدی و ستونی کوچک مقیاس با ابعاد ۲ تا ۸ سانتی‌متر تشکیل شده‌اند و با انواع ساختارهای ریپلی مانند ارتباط نزدیکی دارند. ترکیب لامیناسیون‌های موجود در لایه‌های چینه‌ای به مانند بایوهرم‌های استروماتولیتی بزرگ مقیاس است با این تفاوت که توالی‌های میکریتی - پلوئیدی در آن بهتر حفظ شده‌اند (Peri et al., 2013). این رخساره در بخش‌های مرکزی توالی میکروبیالیتی در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌گردد و به صورت ساختارهای میکروبی چینه‌ای و در بعضی موارد به صورت استروماتولیت‌های جدا از هم دیده می‌شوند. رخساره‌های چینه‌ای در زیر میکروسکوپ به‌طور چیره از تناوب میکریتهای لامینه‌ای با سیمان کلسیتی تشکیل یافته‌اند و در مقاطعی از آن آثار حفاری موجودات مشاهده می‌گردد (شکل ۹).

تفسیر: بر مبنای مطالعات صحرایی، استروماتولیت‌های چینه‌ای در زیر محیط میان‌کشنی ژرف گسترش می‌یابند (Andres and Lago, 2015; Bayet-Gol et al., 2018). آن‌ها در منطقه مورد مطالعه در قاعده چرخه‌های رسوبی کم ژرفا شونده قرار دارند به گونه‌ای که در زیر استروماتولیت‌های با ماکروفابریک موجی یا مسطح مشاهده می‌شوند. حضور میکرایت لامینه‌ای در رخساره میکروسکوپی استروماتولیت‌های چینه‌ای نشان می‌دهد که آن‌ها تحت تاثیر عمل به دام انداختن و چسباندن توسط فعالیت‌های میکروبیالی در یک محیط کشنی ژرف تشکیل شده‌اند. در این شرایط، میکرایت در یک محیط رسوب گذاری آرام نهشت می‌نماید ضمن آنکه حفظ‌شدگی خوب لامینه‌های میکرایتی گویای شرایط ژرف و کم انرژی محیطی است که در آن فعالیت میکروبی موثر بیشتر به صورت رسوب گذاری به حالت معلق می‌باشد (Vennin et al., 2015).



شکل ۹- نمای از رخساره استروماتولیت باندستون چینه‌ای؛ (A) تصویری از میکروبیالیت‌های کروی مانند کوچک مقیاس در برش سطحی. (B) و (C) دو نمای مختلف از میکروبیالیت‌های ستونی کوچک مقیاس در برش دره آزادگان. (D) تناوب لامینه‌های میکریتی تیره با لامینه‌های کالک‌ارنایتی روشن در همراهی با بافت لخته‌ای، در بعضی قسمت‌ها آلوم‌های پلتی مشاهده می‌گردد. (E) میکروفابریک چینه‌ای متشکل از نوارهای روشن (سیمان اسپارایتی) و تیره (پکستون پلوئیدی) در اشکال گنبدی مانند.

Figure 9. View of the crinkly stromatolite boundstone facies, A) An image of small-scale spherical microbialite in the surface sample, (B) and (C) Two different views of small-scale columnar microbialites in the Darreh Azadegan section, D) Alternation of dark laminated micritic with light laminated calcarenitic in association with clotted fabric. Peloidal Allochems are observed in some parts. E) The image of the crinkly microfabric is composed of alternating light (sparite cement) and dark (peloid packstone) layers in dome-like shapes.

۳-۴-۳- کمربند رخساره‌های ترومبولیتی - میکروبیالی (FA-04)

توصیف: این پوسته‌ها غالباً از برجستگی کمی برخوردارند و معمولاً در میکروبیالیت‌های ستونی مانند مشاهده می‌گردند. آن‌ها در برخی بخش‌ها لایه‌بندی ضعیفی دارند و در تناوب با پوسته‌های استروماتولیتی قرار گرفته‌اند. ساخت میکروسکوپی چیره در آن‌ها از نوع لامینه‌ای - پلوئیدی (LP) است.

تفسیر: پوسته‌های ترومبولیتی در نواحی کم ژرفا با فضای رسوب گذاری کم و فرسایش محیطی بیشتر گسترش می‌یابند. همجواری آن‌ها با پوسته‌های استروماتولیتی

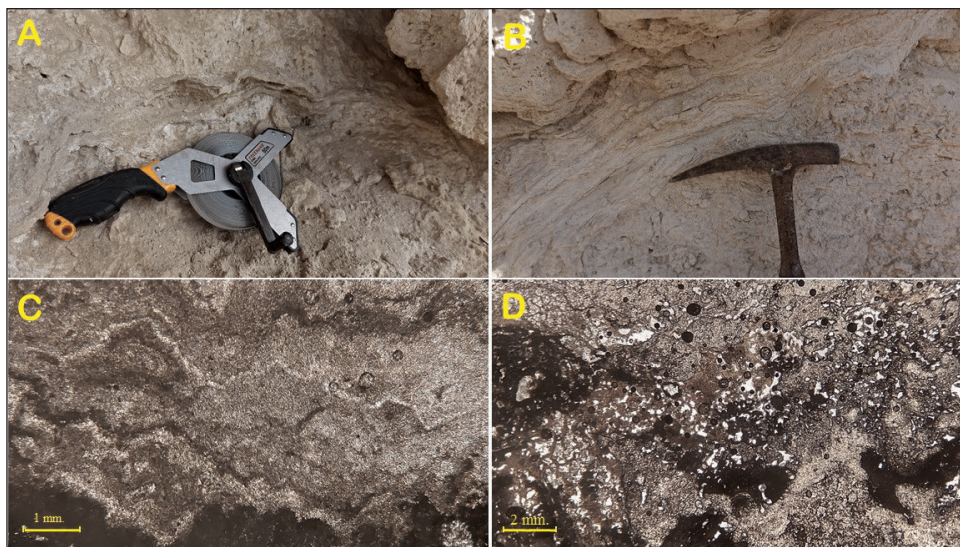
ممکن است به دلیل نوسانات فصلی و یا آشفستگی آب روی دهد. همچنین کمبود و یا حفظ ضعیف لامیناسیون در پوسته‌های میکروبیالی احتمالاً به توسعه گروه‌های جانوری کف‌پوش و حفار مرتبط است به گونه‌ای که آن‌ها در محیط‌های دریایی با به هم ریختگی بستر سنگی خود به از بین رفتن و یا تشکیل لامیناسیون ضعیف می‌انجامند. در این خصوص زیای (فونا) جانوری موجود در توالی آقچاگیل متشکل از دو کفه‌ای‌ها و شکم‌پایان همین نقش را ایفا می‌نماید. این رخساره در کمربند فراکشنی تا میان‌کشنی کم ژرفا تشکیل می‌شود.

دریایی توسعه داشته‌اند و معمولا منشأ میکروبی دارند (Grotzinger and Knoll, 1999). استروماتولیت‌های موج بیشتر در گستره محیط‌های هیدرودینامیکی با شرایط کم‌انرژی کشندی تا پرنرژی فراکشندی تشکیل می‌شوند. با توجه به وضعیت قرارگیری این رخساره بر روی نهشته‌های ترومبولیتی مرتبط با مناطق ژرف تر به نظر می‌رسد فضای رسوب‌گذاری با یک روند کاهنده همراه بوده که در طی آن شرایط تشکیل استروماتولیت‌های موج در یک محیط بسیار کم‌ژرفا فراهم گردیده است. از سوی دیگر، حضور فابریک فنسترال به همراه فضاهای خالی قالبی بیانگر خروج مکرر محیط رسوب‌گذاری از آب در منطقه فراکشندی است (Flügel, 2004). از این رو، با توجه به شواهد مورد اشاره و پیشینه موجود در سایر پژوهش‌های مشابه (Bourillot et al., 2020؛ عیسی نژاد و همکاران، ۱۴۰۱) این رخساره در پیوند با کمربند فراکشندی تا میان کشندی کم‌ژرفا در نظر گرفته شد.

— رخساره استروماتولیت باندستون با فابریک فنسترال (FA-05)

توصیف: نوارهای استروماتولیتی با لایه‌بندی مسطح تا موج بر روی نهشته‌های ترومبولیتی توالی زیرین خود قرار گرفته‌اند و به صورت شبکه‌ای پیچیده در طول منطقه مورد پژوهش گسترش یافته‌اند. آن‌ها به صورت نازک تا متوسط لایه با ساختاری چندلایه به رنگ‌های زرد نخودی تا خاکستری قابل مشاهده‌اند و غالباً در بخش بالایی چرخه‌های کم‌ژرفا شونده توالی آقچاگیل قرار گرفته‌اند. در برخی قسمت‌ها خرده‌های دوکفه‌ای از گونه‌های ماکترایدی و کاردیدی در فواصل میان شبکه استروماتولیتی به دام افتاده‌اند. در مطالعات میکروسکوپی نوارهای استروماتولیتی به صورت لامینه‌های متناوب تیره و روشن دیده می‌شوند که در بخش‌هایی از آن فابریک فنسترال به همراه فضای خالی قالبی مشاهده می‌گردد (شکل ۱۰).

تفسیر: استروماتولیت‌ها رسوبات کربناته چند لایه هستند که در محیط‌های کم‌ژرفای



شکل ۱۰- نمایی از رخساره استروماتولیت باندستون؛ (A) و (B) تصاویر صحرایی از رخساره استروماتولیت باندستون در رخنمون دره آزادگان، (C) نمای میکروسکوپی از نوارهای متناوب اسپارایتی و میکریتی در رخساره استروماتولیت باندستون. (D) نمای میکروسکوپی از فابریک فنسترال، سیمان کلسیتی بعضی از حفرات ایجاد شده توسط فابریک فنسترال را پر نموده است.

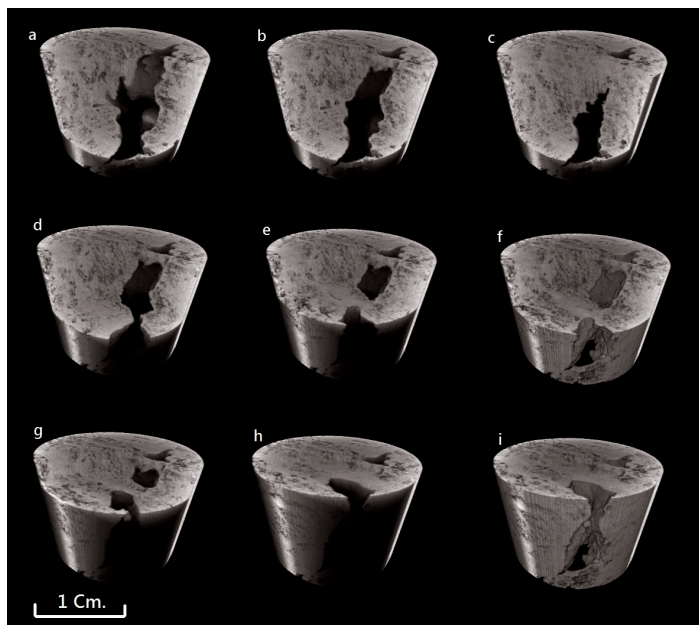
Figure 10. View of the stromatolite boundstone facies, (A) and (B) Field photograph of the stromatolite boundstone in the Darreh Azadegan section. C) Microscopic view of alternating sprite and micrite laminations in the stromatolite boundstone facies. D) Microscopic view of the fenestral fabric. The calcite cement has filled some pores in the fenestral fabric.

از انجام این فرایند که در طی آن دو بخش با ویژگی‌های تصویری متفاوت به شرح زیر شناسایی گردید.

— **اینتروال ترومبولیتی:** از بیشترین تخلخل موجود در شبکه‌های منفذی متصل به هم برخوردار است و با بافت کوآنتیک و نرخ رشد رو به بالا مشخص می‌گردد. شبکه‌های منفذی در محل اتصال کانال‌ها به یکدیگر تقویت می‌گردد و معمولا توسط گلوگاه‌های چند انشعابه یافت می‌شوند. شایان ذکر است منافذ ایجاد شده از نظر هندسی نامنظم و بدون جهت‌بندی ترجیحی می‌باشند. در این اینتروال مقادیر تخلخل و نفوذپذیری نمونه میکروبیالیتی به ترتیب ۴۶/۶ درصد و ۶/۹ داری برآورد گردید. مقدار بالای نفوذپذیری به همراه تراکم پایین و سیمان‌شدگی گاه ضعیف سبب گردیده بافت رسوبی حاصل از آن دارای شبکه منفذی خوب با فضای متخلخل مرتبط به هم باشد (شکل ۱۱).

۳-۵- بررسی ریزساختارهای میکروبیالی و تعیین ویژگی‌های پتروفیزیکی

میکروبیالیت‌ها متشکل از شبکه‌های منفذی پیچیده‌ای هستند که بر اثر پارامترهای زیست‌شناختی ایجاد گردیده و بعدها با فرایندهای دیاژنتیکی تکامل یافته‌اند. ارزیابی ویژگی‌های منفذی و نحوه بررسی تکاملی آن‌ها در میکروبیالیت‌ها برای توصیف ویژگی‌های مخزنی استفاده می‌شود. اگرچه روش‌های متداول سنگ‌شناسی برای تعیین ناهمگونی هندسه منافذ در سازندگان میکروبیالی ناکافی است ولی روش نانوتوموگرافی پرتو ایکس امکان ارزیابی بهتری برای این پارامترها فراهم می‌آورد به گونه‌ای که با تلفیق این یافته‌ها با ویژگی‌های چینه‌شناسی، نحوه اتصال شبکه‌های منفذی در میکروبیالیت‌ها بازسازی می‌گردد (Ahr, 2008). از این رو، به منظور بررسی ریزساختارهای میکروبیالی در این پژوهش، یک نمونه سنگی از قاعده سازند آقچاگیل انتخاب گردیده و تحت آنالیز نانوتوموگرافی پرتو ایکس قرار گرفت. پس

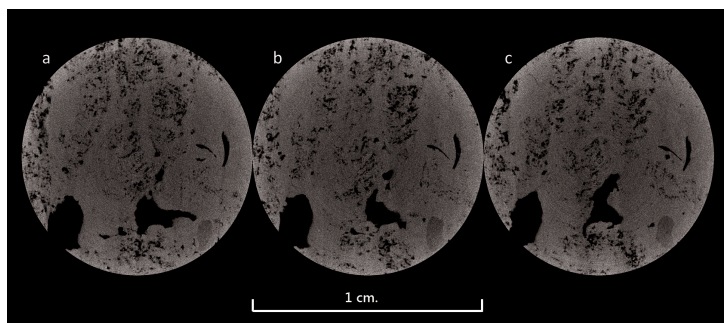


شکل ۱۱- تصویر سه بعدی از یک نمونه تیوب ترومبولیتی به همراه ریزساختارهای زیست شناختی (بیولوژیکی)، همان گونه که در تصویر مشخص است مراحل تکوین منافذ و گلوگاه‌های چند انشعابه به ترتیب از a تا i توسط نرم افزار Avizo بازسازی گردیده است.

Figure 11. 3D image of a thrombolite tube sample along with biological microstructures, as shown in the image, the stages of development of pores and multi-branched throats from a to i have been reconstructed by Avizo software

است. مقدار پارامترهای تخلخل و نفوذپذیری در بخش استروماتولیتی به ترتیب ۹/۱ درصد و ۹۲/۱ میلی داری برآورد گردید. این اینتروال بخش بسیار کوچکی از قاعده نمونه میکروبیالیتی را به خود تخصیص داده است به گونه‌ای که امکان مشاهده آن در تصویرسازی سه بعدی فراهم نیست. از این رو، به منظور به تصویر کشیدن آن در این پژوهش از تصاویر دو بعدی آن استفاده گردیده است (شکل ۱۲).

– اینتروال استروماتولیتی: فواصل استروماتولیتی با حجم هندسی از منافذ افقی ساده که به فضای متخلخل عمودی متصل است، مشخص می گردد. منافذ به صورت جانبی گسترش یافته، پراکنده کمی دارند و برخلاف ترومبولیت‌ها از گلوگاه‌های باریکی تشکیل شده‌اند. از این رو، حفرات با اندازه کوچک به همراه گلوگاه‌های باریک در آن‌ها سبب ایجاد فضای منفذی کمتر نسبت به سایر بافت‌های میکروبیالی گردیده



شکل ۱۲- تصویر دو بعدی از اینتروال استروماتولیتی به همراه ریزساختارهای زیست شناختی، همان گونه که در تصویر مشخص است مراحل تکوین منافذ و گلوگاه‌های چند انشعابه به ترتیب از a تا c توسط نرم‌افزار Avizo بازسازی گردیده است.

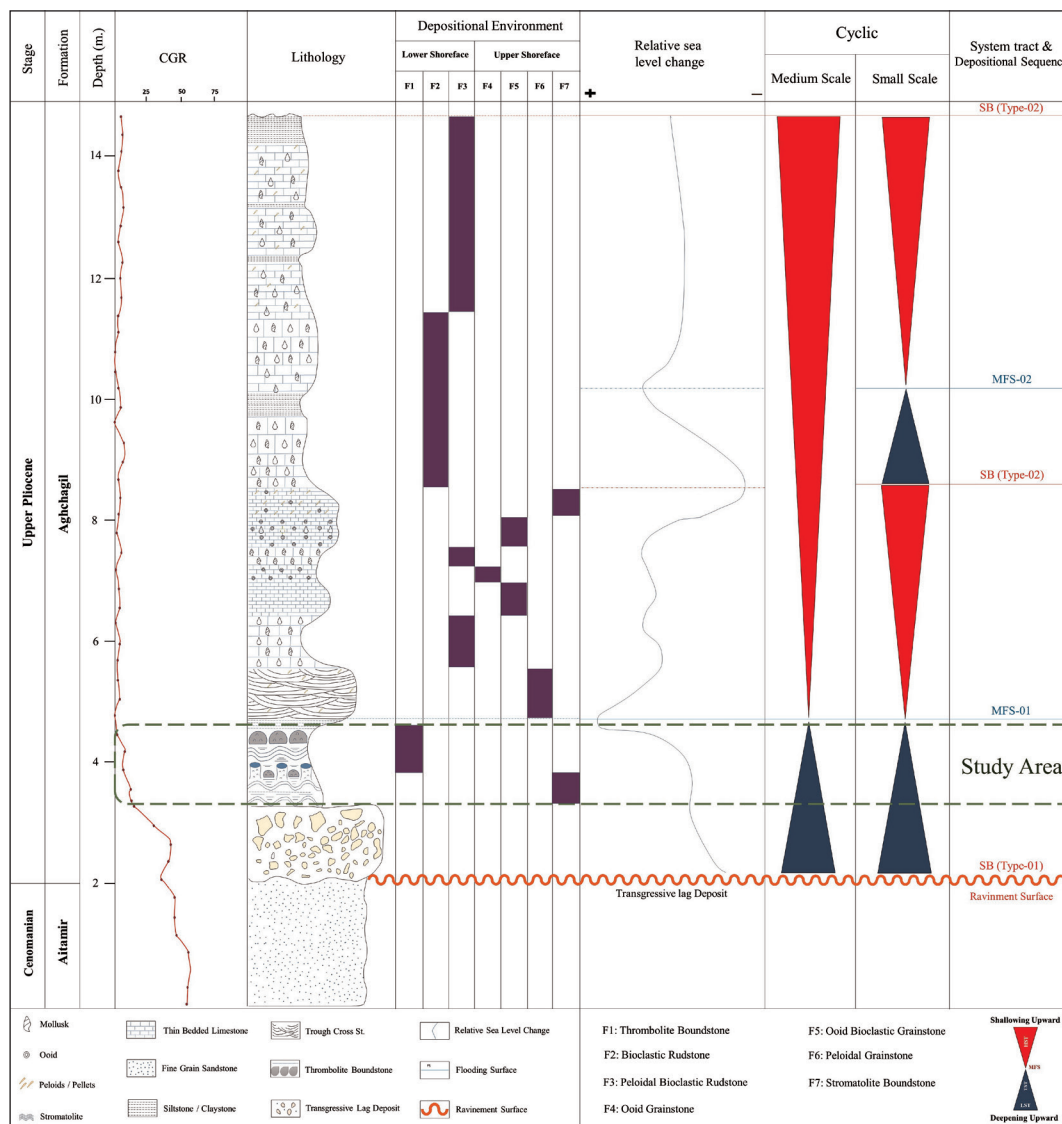
Figure 12. 2D image of a thrombolite interval along with biological microstructures, as shown in the image, the stages of development of pores and multi-branched throats from a to c have been reconstructed by Avizo software .

و همچنین تغییرات نمودار پرتوی گامای سطحی قابل شناسایی است به گونه‌ای که بر مبنای مطالعات رخساره‌ای، روند تغییرات سطح آب در هر چرخه رسوبی (در یک بازه ژرف‌شوندگی تا کم‌ژرفا شوندگی) مشخص می‌گردد و در مواقع خروج از آب، تغییرات رخساره‌ای با استفاده از شواهدی مانند برش‌های کارستی و حفرات انحلالی مشخص می‌گردد. ثبت پرتو گاما در یک توالی پیوسته و با وضوح بالا نیز به عنوان ابزاری موثر در طبقه‌بندی توالی سکانشی قلمداد می‌گردد (Peng et al., 2021). در این خصوص افزایش مقادیر پرتوی گامای طبیعی گویای افزایش محتوای رسی در یک توالی رسوبی است که آن را به کاهش انرژی و افزایش ژرفای محیط رسوب گذاری نسبت می‌دهند. از سوی دیگر، کاهش مقادیر پرتوی گاما نشان‌دهنده کاهش محتوای رسی، افزایش انرژی و کاهش ژرفای محیط رسوبی است که بیشینه انحراف آن در طی یک روند کاهشی به عنوان مرز سکانشی در نظر گرفته می‌شود (Krassay, 1998). به طور کلی میکروبیالیت‌های منطقه مورد پژوهش بر روی یک سطح ناپیوستگی قرار گرفته‌اند که به عنوان مرز سکانشی نوع اول شناخته می‌شود. مرز سکانشی بالایی نیز با بهره‌گیری از تغییرات رخساره‌ای در پایین طبقات مورب آهکی انتخاب گردید که معرف مرز سکانشی نوع دوم است. (شکل ۱۳).

با توجه به ارزیابی‌های انجام شده از دو اینتروال میکروبیالیتی در نمونه مورد اشاره، متوسط تخلخل حدود ۳۰ درصد ارزیابی گردید. این مقدار شامل تخلخل‌های منفذی، کانالی (گلوگاه‌ها) و حفرات مرتبط با قطعات بایوکلاستی است که از طریق فرایند به دام انداختن در نمونه میکروبیالیتی قرار گرفته‌اند. اگرچه فواصل ترمبولیتی از تخلخل بیشتر با فضای منفذی بزرگ و متصل به هم برخوردار بودند اما به تنهایی نمی‌توانند برآوردی از کل حجم سنگ را نشان دهند. ضمن آن که بافت استروماتولیتی این میزان از تخلخل را کاهش داده و به دلیل اتصال ضعیف بین منفذی احتمالاً میانگین نفوذپذیری برای کل نمونه را نیز کاهش می‌دهد.

۳-۶- بررسی توالی میکروبیالیتی در چرخه‌های رسوبی سازند آقچاگیل

بررسی‌های رسوب‌شناختی و محیط دیرینه میکروبیالیت‌ها در طی چرخه‌های رسوبی به بازسازی ویژگی‌های مخزنی کمک شایانی می‌نماید. چرخه‌های رسوبی به پاسخ‌های رسوبی مرتبط با تغییرات نسبی در سطح اساس آب نسبت داده می‌شوند (Haq et al., 1987). از این رو، چرخه‌های رسوبی به عنوان توالی‌های رسوبی محدود شده توسط سطوح ناپیوستگی با تغییرات شایان توجه در روند رسوب گذاری قابل شناسایی است. در این شرایط مرزهای سکانشی با استفاده از تغییرات رخساره رسوبی

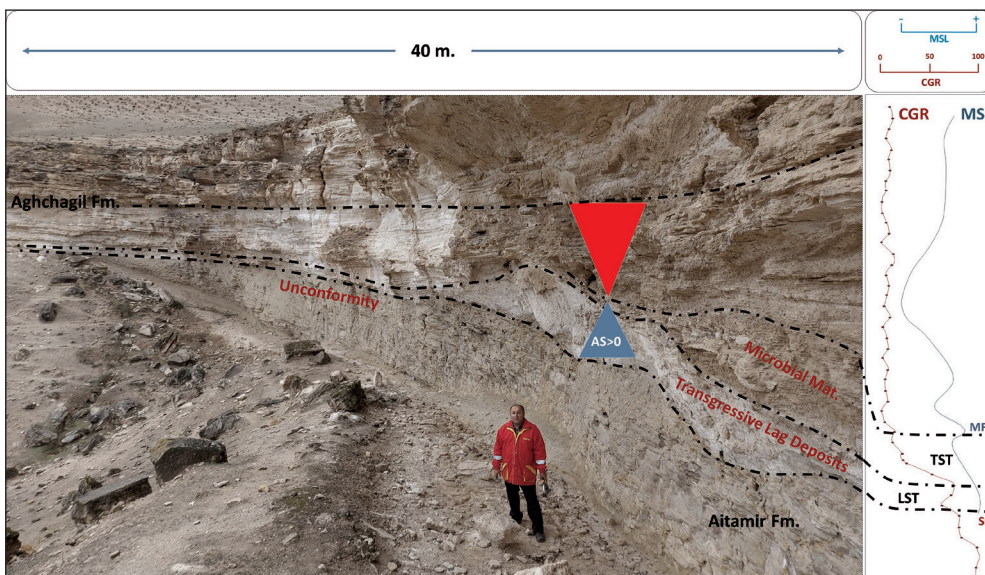


شکل ۱۳- ستون چینه‌شناسی برش دره آژادگان؛ موقعیت توالی میکروبیالی منطقه مورد مطالعه با خط چین سبز مشخص گردیده است.

Figure 13. Stratigraphy column of the Darreh Azadegan section. The location of microbial sequence in the study area is marked with a green dashed line.

زمین‌شناسی میان‌کشدی ژرف تا زیرکشدی تشکیل می‌گردد. در پایان، رخساره آئیدگرینستون با چینه‌بندی متقاطع بر روی آن‌ها قرار گرفته است. گلدشتاین و همکاران (Goldstein et al., 2013) عنوان نمودند که ترومبولیت‌ها در موقعیت‌های زمین‌شناسی ژرف‌تر گسترش می‌یابند در حالی که آئیدگرینستون‌ها با چینه‌بندی متقاطع در مناطق کم ژرف‌تر تشکیل می‌شوند. از این رو، در طی سکانس‌های مرتبه سوم و چهارم در منطقه مورد مطالعه، ترومبولیت‌ها در انتهای دسته رخساره‌های پیش‌رونده (معادل بیشینه سطح غرقابی) و گرینستون‌ها در ابتدای دسته رخساره‌های تراز بالا قرار می‌گیرند. (شکل ۱۴).

تغییرات رخساره‌ای در توالی میکروبیالی برش دره آزادگان بیانگر تغییر رو به بالای محیطی از کمربند فراکشدی به سمت کمربند زیرکشدی در سکانس‌های مرتبه سوم و چهارم است که با معکوس‌شدگی تدریجی این روند در سکانس‌های کوچک مقیاس‌تر دنبال می‌گردد. در یک روند کلی در منطقه مورد پژوهش، لامینه‌های استروماتولیت مسطح با فابریک فنترال در بخش قاعده مشاهده می‌گردند که گویای شکل‌گیری آن‌ها در محیط‌های فراکشدی تا میان‌کشدی کم‌ژرفا است. در ادامه، با افزایش فضای رسوب‌گذاری رخساره باندستون ترومبولیتی به فرم‌های ستونی و گنبدی مشاهده می‌گردد که در جایگاه



شکل ۱۴- نمای کلی از چرخه رسوبی مرتبط با میکروبیالیت‌های سازند آقچاگیل در برش دره آزادگان. این توالی سکانسی یک چرخه رسوبی مرتبه سوم است که سطح ناپوستگی فرسایشی در قاعده آن مشاهده می‌گردد. در بالای این سطح، نهشته‌های برجای مانده پیش‌رونده یک سیستم تراکت تراز پایین را تشکیل داده است و توده‌های میکروبیالی به ایجاد یک سیستم تراکت پیش‌رونده انجامیده که با تغییر روند مقادیر گامای سطحی نیز همراه گردیده است. حروف اختصاری شامل SB: مرز سکانسی، LST: سیستم تراکت تراز پایین، TST: سیستم تراکت پیش‌رونده، MFS: بیشینه سطح غرقابی، MSL: متوسط سطح تراز آب و CGR: اشعه گامای اصلاح شده.

Figure 14. An overview of the sedimentary cycle related to microbialites of the Aghchagil Formation in the Darreh Azadegan section. This succession represents a third order cycle characterized by an erosional unconformity surface at its base. Above this surface, the transgressive lag deposits have formed the lowstand system tract, and microbial mats have contributed to developing a transgressive system tract, which has also accompanied a change in the trend of surface gamma-ray values. Abbreviations are as follows: SB: Sequence Boundary, LST: Lowstand System Tract, TST: Transgressive System Tract, MFS: Maximum Flooding Surface, MSL: Mean Sea Level, CGR: Corrected Gamma Ray.

چرخه‌های رسوبی پیشین از روند معکوس‌شدگی برخوردار است. در این شرایط الگوی رخساره‌ای از دو چرخه کم‌ژرفا شونده تشکیل گردیده است که با تغییرات مقادیر گاما انطباق دارد (شکل ۱۵).

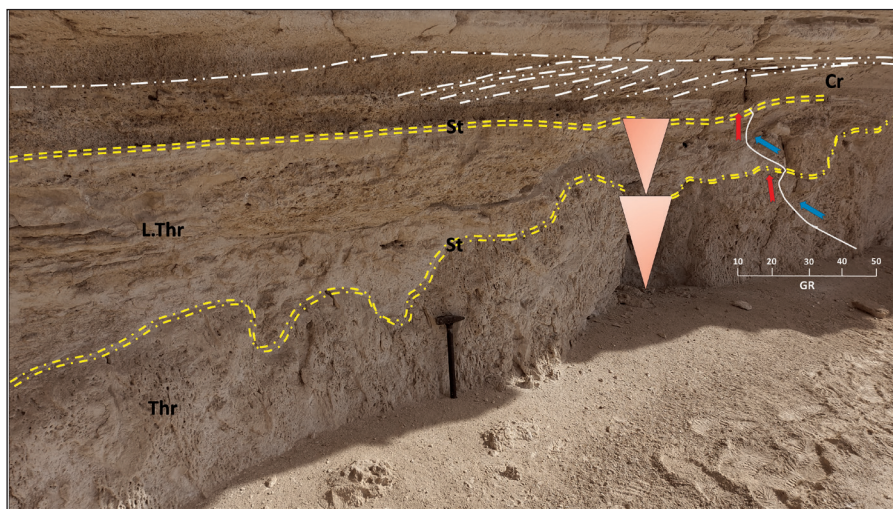
پس از بررسی‌های میدانی بر روی ۸ برش عمودی و تلفیق آن با نتایج آزمایشگاهی، ۴ الگوی رخساره‌ای مرتبط با چرخه‌های رسوبی مرتبه بالا در میکروبیالیت‌های منطقه مورد پژوهش شناسایی گردید (شکل ۱۶). پژوهش‌های صورت پذیرفته بر روی چرخه‌های رسوبی مرتبه بالا در مقیاس سکو (پلتفرم) گویای این است که میکروبیالیت‌های تشکیل شده در اواخر مرحله پس‌رونده پایانی تا ابتدای مرحله پیش‌رونده بعدی از بهترین اهداف اکتشاف هیدروکربوری به‌شمار می‌روند

لازم به توضیح است مقادیر پرتوی گامای سطحی در میکروبیالیت‌های منطقه مورد مطالعه پایین است ($<30\text{API}$) و نمودار کلی آن به شکل مضرسی با روندی کاهنده به سمت بالا مشاهده می‌گردد. با این حال در فواصل میان‌لایه‌ای، شکست مقادیر گاما ساطع شده در انطباق خوبی با مرزهای سکانسی ریز مقیاس‌تر قرار گرفته‌اند. از این رو، با توجه به شواهد ارائه شده به نظر می‌رسد این میکروبیالیت در طی یک چرخه رسوبی کلی به صورت توالی‌های پیش‌رونده پایانی و یا پس‌رونده ابتدایی در مناطق پر انرژی نزدیک به ساحل تشکیل گردیده‌اند.

بررسی‌های سکانسی در مقیاس‌های کوچک‌تر با شناسایی الگوی سکانسی مرتبط با توالی‌های پس‌رونده پایانی / پیش‌رونده ابتدایی همراه گردیده است که نسبت به

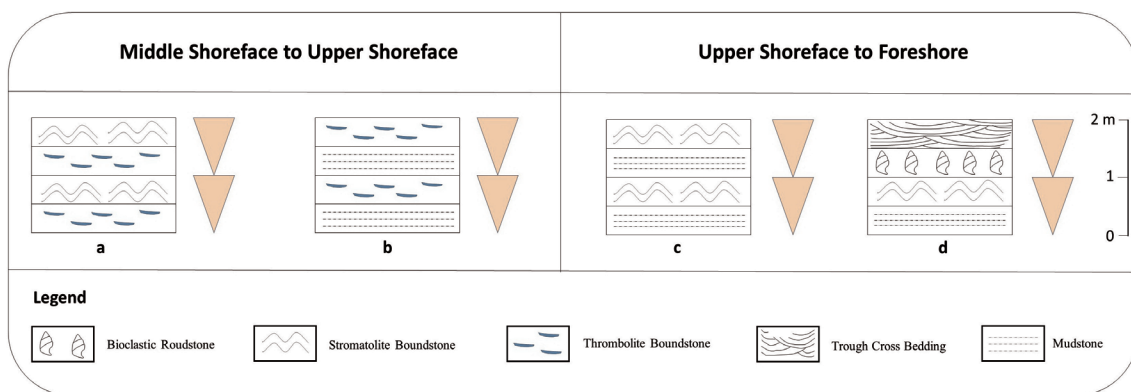
ویژگی‌های مخزنی در نظر گرفت (بخش ۴-۴) که خود به صورت میان لایه‌هایی در توالی‌های سکانسی بزرگ‌تر پیش‌رونده پایانی تا پس‌رونده ابتدایی قرار گرفته‌اند.

(Zhou and Li, 2023). از این رو، به نظر می‌رسد توالی‌های سکانسی مرتبه بالا که در انجام این پژوهش مشخص گردیده است را می‌توان به عنوان بسته‌های رسوبی با



شکل ۱۵- نمایی از چرخه‌های رسوبی مرتبط با میکروبیالیت‌های سازند آقچاگیل در رخنمون دره آزادگان (مقطع عرضی شماره ۴)، در این تصویر دو توالی سکانسی مرتبه بالا مشاهده می‌گردد که برمبنای ویژگی‌های رخنساره‌ای و روند تغییر مقادیر گامای سطحی تفکیک گردیده است. نخستین توالی سکانسی متشکل از رخنساره ترومبولیتی (Thr) و لایینه‌های استروماتولیتی مسطح (St) با روند تغییرات مقادیر گامای مثبت (پیکان آبی) تا منفی (پیکان قرمز) مشاهده می‌گردد. دومین توالی سکانسی متشکل از رخنساره ترومبولیت لایه‌ای (L.Thr) و لایینه‌های استروماتولیتی مسطح (St) است که در بخش بالایی آن طبقات چینه‌ای مورب (Cr) مشاهده می‌گردد و روند تغییرات مقادیر گامای آن نیز مشابه توالی سکانسی پیشین است. طول پنکک موجود در تصویر ۴۰ سانتی‌متر است.

Figure 15. An overview of the sedimentary cycle related to microbialites of the Aghchagil Formation in the Darreh Azadegan section (cross-section, No. 4). In this image, two high-order cycles are observed, differentiated based on facies characteristics and variations of gamma-ray values. The first sequence is composed of thrombolite facies (Thr) and stromatolite laminae (St), which change with a trend of positive (blue arrow) to negative (red arrow) gamma-ray values. The second sequence is composed of a thrombolytic layer (L.Thr) and planar stromatolite (St), with cross-stratified layers (Cr) observed in its upper part. The trend of gamma-ray values is similar to that of the first sequence. The hammer is 40 cm long.



شکل ۱۶- تصویر نمادین از رخنساره‌های میکروبیالی در چرخه‌های رسوبی مرتبه بالا، (a) توالی مرکب از توده‌های ترومبولیتی - لایینه‌های استروماتولیتی که در مقاطع عرضی ۳ و ۴ مشاهده گردیده است. (b) توالی مرکب از توده‌های میکروبیالیتی با میان لایه‌های گلی که در مقاطع عرضی ۵ و ۶ مشاهده گردید. (c) توالی مرکب از لایه‌های استروماتولیتی با میان لایه‌های گلی که در مقاطع عرضی ۱ و ۶ مشاهده گردید. (d) توالی مرکب از لایه‌های استروماتولیتی با میان لایه‌های گلی که بر روی آن طبقه بندی مورب ترافی قرار گرفته است و در مقاطع عرضی ۲ و ۵ مشاهده گردیده است.

Figure 16. Schematic image of microbial facies in high-order sedimentary cycle: a) The sequence composed of thrombolitic mass – stromatolitic laminae observed in cross-sections 3 and 4, b) The sequence composed of microbial mats with clay interbeds was observed in cross-sections 5 and 6. c) The sequence composed of stromatolitic laminae with clay interbeds was observed in cross-sections 1 and 6. d) The sequence composed of stromatolitic laminae with clay interbeds, upon which diagonal trough cross-stratification is superimposed, has been observed in cross-sections 2 and 5.

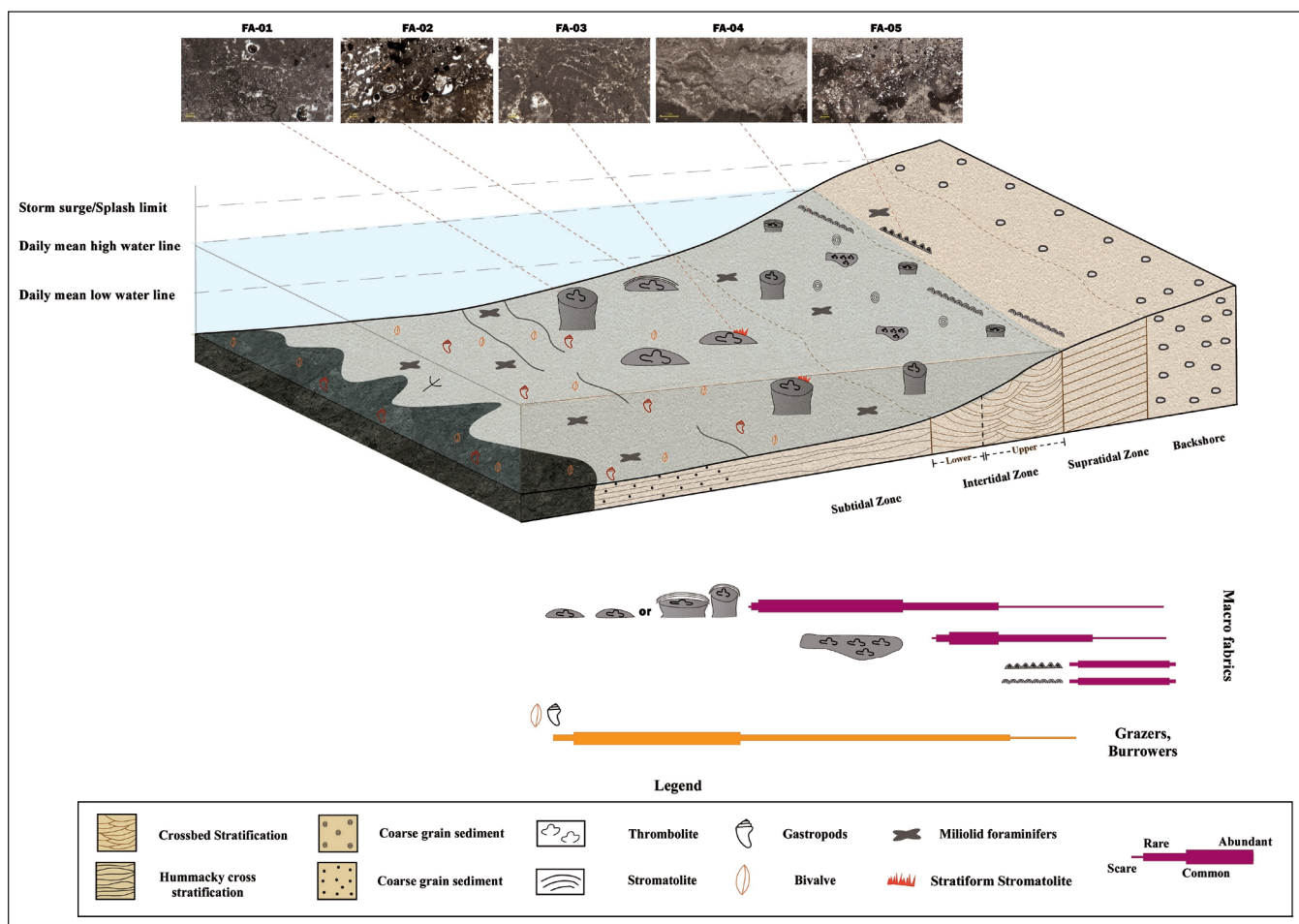
۴- بحث

همچنین برافزایش عمودی چهره در میکروبیالیت‌های پراثرژی به عنوان روشی برای جلوگیری از تدفین‌های ماسه‌ای طولانی مدت تفسیر می‌شوند. ویژگی‌های مورد اشاره با مدل ارائه شده توسط بوریلوت و همکاران (Bourillot et al., 2020) در خصوص میکروبیالیت‌های محیط‌های پراثرژی در فواصل کمربند رخساره‌ای فراکشنندی تا زیرکشنندی هم‌خوانی خوبی دارند. این کمربند رخساره‌ای در یک روند کلی به صورت چرخه‌های ژرف‌شونده به سمت بالا نهشته شده‌اند. در نواحی فراکشنندی تا میان‌کشنندی کم‌ژرفا، رخساره‌های استروماتولیت باندستون با فابریک فنسترال، برش استروماتولیتی و پوسته‌های میکروبیالی و در مناطق میان‌کشنندی ژرف تا زیرکشنندی رخساره‌های استروماتولیت باندستون‌های مسطح و باندستون ترومبولیتی - میکروبیالی رسوب‌گذاری نموده است (شکل ۱۷).

توده‌های میکروبیالیتی برش دره آزادگان در یک توالی سکانشی مرتبه سوم بر روی سکوی کربناته نهشته شده‌اند. این توده‌ها در چرخه رسوبی مرتبه سوم از روند سکانشی پیش‌رونده پایانی تا پس‌رونده ابتدایی پیروی می‌نمایند، درحالی‌که مطالعات سکانشی با مقیاس‌های کوچک‌تر گویای چرخه‌های رسوبی اواخر مرحله پس‌رونده پایانی تا ابتدای مرحله پیش‌رونده بعدی می‌باشند که به‌طور معمول در چنین شرایطی مخازن ایده‌آلی تشکیل می‌گردند (Zhou and Li, 2023). در این خصوص نتایج حاصل از نانوتوموگرافی پرتو ایکس بر روی یک نمونه میکروبیالیتی انتخابی از منطقه مورد پژوهش این موضوع را تایید می‌نماید. به‌گونه‌ای که ارزیابی حاصل از تخلخل و نفوذ پذیری دو اینتروال میکروبیالی گویای ویژگی‌های مخزنی مناسب برای این نمونه انتخابی است.

دو رویداد مهم آب‌شناختی (هیدرولوژیکی) دیرینه در حوضه خزر جنوبی مشتمل بر «بالآمدگی سطح آب» و «پیشروی دریای آقچاگیل» به افزایش پنج برابری سطح آب خزر در پلیوسن بالایی انجامید (Lazarev et al., 2021). در این میان، بزرگ‌ترین پیشروی خزر به سمت ساحل رخ داد که به موجب آن روزن‌بران دریایی به حوضه خزر جنوبی منتقل شدند (Krijgsman et al., 2019). اثرات این پیشروی در بخش‌هایی از نیمه شمال خاوری ایران واقع در استان گلستان نیز به ثبت رسیده به طوری که توالی کربناته و پیش‌رونده آقچاگیل در قالب یک سکوی کربناته، لبه‌های حوضه دریای خزر در زمان نهشت این سازند را در منطقه تشکیل داده است (مهاجرسلطانی و همکاران، ۱۴۰۲). در این شرایط، سطوح سخت قدیمه موجود در قاعده این سکو به تشکیل سنگ بستری پایدار انجامیده که بستری مناسب برای استقرار توده‌های میکروبیالی در منطقه مورد پژوهش فراهم آورده است.

ساختار و ترکیب رسوبات به دام افتاده در درون و پیرامون میکروبیالیت‌ها گویای محیطی کم‌ژرفا و پراثرژی است که با حمل و نقل دائمی و شدید رسوبات همراه بوده است. در این میان، انرژی امواج از عوامل کنترل‌کننده هیدرودینامیکی در منطقه مورد مطالعه به‌شمار رفته و نحوه گسترش و توزیع میکروبیالیت‌های قاعده سازند آقچاگیل را تحت تاثیر قرار داده است. در چنین شرایطی، توده‌هایی از ساختمان‌های برافراشته و شکل‌های ستونی در بالای ماسه‌های آئیدی مناطق کم‌ژرفا رشد می‌نمایند. پشته‌های ماسه‌ای با برجستگی کم در مناطق با فضای رسوب‌گذاری پایین و دوره‌های تدفین مکرر ولی کوتاه مدت ایجاد می‌شوند. در حالی که فابریک‌های ستونی مرتفع‌تر در مناطقی با سطح آب بالاتر و دوره‌های تدفین نادر ولی طولانی مدت ایجاد می‌شوند



شکل ۱۷- الگوی محیط رسوبی توده‌های میکروبیالی در ناحیه مورد مطالعه.

Figure 17. The depositional environment model of microbial mats in the studied area.

دیگر، میزان رشد توده‌های میکروبیالیتهی نتیجه تعامل و تطبیق‌پذیری این سازندگان با شرایط محیطی حاکم بر نوسانات سطح آب است. در این خصوص ارتفاع به‌نسبت زیاد شکل‌های ستونی گویای یک برافزایش عمودی قوی است که (۱) به فضای رسوب‌گذاری زیاد با ژرفای چند متری دلالت داشته و (۲) از مدفون شدن آن‌ها در زیر دون‌های ماسه‌ای متحرک جلوگیری نموده است. از سوی دیگر، انرژی امواج نقش غیر قابل انکار در توزیع چینه‌های میکروبیالیته‌ها به دنبال داشته است به گونه‌ای که پیوستگی‌های ناحیه‌ای در نهشته‌های پیرامون میکروبیالیته‌ها و حضور قطعات میکروبیالیتهی در آن‌ها ممکن است به دوره‌های سایش و فرسایش توسط جریان‌های دریایی مرتبط باشد. اجزای انشعابی به صورت دراز و کشیده، چند لایه و حاوی پلویدهای به دام افتاده می‌باشند درحالی‌که شکل‌های ستونی عموماً پهن، ترومبولیتی و به‌طور چیره غنی از دانه هستند. از این رو، فرض بر این است که ساختارهای انشعابی در محیط‌های با انرژی کمتر توسعه یافته‌اند، در حالی‌که شکل‌های ستونی در معرض امواج قرار داشته‌اند. پوسته‌های ترومبولیتی که برجستگی کمتری دارند نیز احتمالاً در نواحی کم‌ژرفا با فضای رسوب‌گذاری کم و یا فرسایش محیطی بیشتر توسعه یافته‌اند. بنابراین، با استناد به موارد مورد اشاره به نظر می‌رسد میزان رشد و نحوه توزیع چینه‌های میکروبیالیته‌ها توسط تغییرات سطح آب کنترل می‌گردد ولی ماهیت و شکل هندسی آن‌ها تابع لایه‌های زیر بسترشان است.

مطالعات رخساره‌ای بر روی میکروبیالیتهای قاعده سازند آقچاگیل نیز گویای شرایط تشکیل آن‌ها در یک محیط دریایی با انرژی بالا است که در حد فاصل مناطق فراکشندی تا زیرکشندی واقع گردیده است. این توده‌ها در خلال چرخه‌های رسوبی مرتبه بالا پتانسیل‌های مخزنی مناسبی ایجاد نموده‌اند. در این شرایط ترومبولیت‌ها و استروماتولیت‌های لایه‌ای ریز اندازه که غالباً در مناطق فراکشندی تا میان‌کشندی کم‌ژرفا استقرار یافته ظرفیت‌های مخزنی بالقوه‌ای ایجاد نموده‌اند. ولی مزوفابریک‌های ترومبولیتی بزرگ اندازه که عمدتاً در مناطق میان‌کشندی ژرف تا زیرکشندی شناسایی گردیدند از ظرفیت‌های مخزنی ایده‌آل‌تری برخوردارند به گونه‌ای که با انجام مطالعات نانوتوموگرافی پرتو ایکس، تخلخل‌های مفید و به‌هم پیوسته با میزان تراوایی شایان توجه در ریز ساختارهای این میکروبیالیته‌ها شناسایی گردید.

همچنین بررسی‌های اسکانسسی نشان می‌دهند که الگوی برانبارش و توزیع میکروبیالیتهای مورد پژوهش در طی چرخه‌های رسوبی مرتبه سوم و چهارم وابسته به محیط رسوب‌گذاری آن‌ها است. این چرخه‌ها در بیشتر موارد به صورت طرح برانبارش پیش‌رونده از مناطق زیرکشندی با مزوفابریک‌های ترومبولیتی و استروماتولیت‌های گنبدی به مناطق فراکشندی با استروماتولیت‌های مسطح در همراهی فابریک فنسترال شناسایی گردیده است. در پایان، طبقات مورب آهکی مناطق کم‌ژرفا بر روی تجمعات میکروبیالیتهی مورد پژوهش قرار می‌گیرند. در این شرایط طیفی از دسته رخساره‌های انتهایی مرحله پیش‌رونده تا دسته رخساره‌های تراز بالای آغازین توسعه یافته و شرایط مخزنی اولیه‌ای فراهم می‌نماید.

سیاسگزارى

این پژوهش با حمایت‌های دانشگاه بوعلی و شرکت نفت خزر صورت پذیرفته است. از این رو نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از سازمان‌های ذیربط به‌عمل آورند. همچنین از زحمات جناب آقای داوود عموزاد خلیلی، کارشناس ارشد شرکت نفت خزر، که در طول برداشت‌های میدانی در این پژوهش نهایت همکاری را داشتند تقدیر و تشکر می‌گردد.

رسوب‌گذاری میکروبی و به دام انداختن از فرایندهای اصلی در تشکیل ماکروفابریک‌های میکروبیالیتهی به‌شمار می‌رود. ماهیت ذرات به دام افتاده متغیر است و به شدت به تامین‌کننده‌های محلی بستگی دارد. در این خصوص آلومک‌های پلوییدی، آئیدی و قطعات بایو کلاستی با زبای جانوری دو کفه‌ای، شکم‌پا و استراکودا مشاهده می‌گردند. اگرچه فراوانی بالا و دامنه محدود بایو کلاست‌های موجود در سازند آقچاگیل به نوعی به شرایط محیطی دریاچه‌ای برای این نهشته‌ها دلالت دارد، ولی پژوهش‌های صورت پذیرفته بر روی رسوبات پلیوسن بالایی تا کواترنری در حوضه خزر جنوبی و حوضه‌های رسوبی مجاور آن (Krijgsman et al., 2019) یافته‌های جدیدی رابه اثبات رسانیده است به طوری که تکامل حوضه‌های پلیو-کواترنری در دریای سیاه و خزر را متأثر از تغییرات سطح آب دریا/دریاچه می‌داند. آن‌ها ممکن است توسط عوامل خارجی مانند باز و بسته شدن مجاری انتقال آب دریای مدیترانه و منجمد شمالی و یا مولفه‌های داخلی مانند تغییرات آب‌شناختی و اقلیمی ناشی از چرخه‌های یخچالی - بین یخچالی اتصال متناوب بین حوضه‌های ایجاد کرده باشند (Badertscher et al., 2011; Yanina, 2014). یک سناریوی ساده‌سازی شده این است که این حوضه‌ها در طی چرخه‌های تراز پایین (زمانی که سطح آب، شرایط محیطی و ترکیب جانوری توسط چرخه‌های آب‌شناختی درون حوضه تعیین می‌شود) از یکدیگر جدا شده باشند. همچنین آن‌ها در طول چرخه‌های تراز بالای دریای خزر به یکدیگر متصل گردیده‌اند. در چنین دوره‌هایی بر اثر سرریز آب خزر امکان تبادل زبای جانوری معدودی از طریق مجاری عبوری در شمال قفقاز بزرگ فراهم گردیده است (Krijgsman et al., 2019). از آنجا که ارتباط بین دو حوضه به دلیل اختلاف ارتفاع آن‌ها تنها در زمان‌هایی امکان‌پذیر بوده که سطح ایوستاتیک جهانی بالاتر از کمینه ارتفاع مسیر اتصال‌دهنده ورودی باشد، از این رو، ممکن است امکان تبادل کامل زبای جانوری بین دو حوضه فراهم نگردیده باشد. از سوی دیگر، شوری آقچاگیلین حوضه خزری (از درجات بالای مزوهایلین تا پلی‌هایلین) بیش از شرایط شوری نهشته‌های معادل زمانی آن در دریای سیاه (الیگوهایلین تا درجات پایین مزوهایلین) بوده، بنابراین ممکن است در هنگام اتصال متناوب سایر مناطق مورد اشاره با یکدیگر، امکان زیست گونه‌های آقچاگیلین سازگار با شرایط شوری پایین در حوضه خزر جنوبی فراهم نشده باشد. از این رو، پراکنندگی زبای جانوری (معمولاً نرم‌تنان) در طی نهشت سازند آقچاگیل به‌طور عمده بر مبنای توزیع زبای بومی در هر حوضه به صورت مجزا صورت پذیرفته است (Yanina, 2014) ولی مجموع اتفاقات رخ داده سبب تبادل و پیدایش روزن‌بران دریایی در این حوضه گردیده است (Krijgsman et al., 2019). از این رو، نهشته‌های سازند آقچاگیل در حوضه خزر جنوبی را منتسب به محیط دریایی می‌دانند که با یک رویداد پیش‌رونده بزرگ مقیاس به وقوع پیوسته و با تغییر زبای جانوری در تجمعات زئوپلانکتونی و فیتوپلانکتونی و افزایش شوری در مقایسه با لایه‌های بالایی و پایینی خود مشخص می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شرایط محیطی حاکم بر تشکیل میکروبیالیتهای قاعده سازند آقچاگیل مورد مطالعه قرار گرفت. تغییرات سطح آب و انرژی امواج به عنوان دو عامل کنترل‌کننده مهم هیدرودینامیکی در میزان رشد و نحوه توزیع میکروبیالیتهای مورد اشاره ایفای نقش نموده‌اند. از آنجا که ساختمان‌های میکروبیالیتهی بر روی سطوح سخت تشکیل شده‌اند، میزان رشد آن‌ها توسط تغییرات سطح آب کنترل گردیده و متأثر از تغییر فضای انباشت در ارتباط با ناپایداری کف حوضه نمی‌باشند. به بیان

کتابنگاری

آفانباتی، ع.، ۱۳۸۹، زمین‌شناسی ایران. چاپ سوم، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۵۸۶ ص.
عیسی‌نژاد، م.، دارایی، م.، بایت گل، ا.، ایمانی سقین سر، م.، زهدی، ا.، ربانی، ج.، ۱۴۰۱، بازسازی محیط رسوبگذاری نهشته های میکروبیالی سازند نجمه به سن ژوراسیک بالایی در منطقه پاوه کرمانشاه، رسوب شناسی کاربردی، پاییز و زمستان ۱۴۰۱، دوره ۱۰، شماره ۲۰، ص ۵۴-۷۲.
مهاجرسلطانی، ح.، رفیعی، ب.، محسنی، ح.، طاعتی، ف. و ظفری، م.، ۱۴۰۲، بررسی محیط رسوبی و چینه‌نگاری سکانسی سازند آقچاگیل در برش دشت آزادگان، هشتمین همایش ملی انجمن رسوب شناسی ایران، بهمن ۱۴۰۲، ص ۶۵۱-۶۵۸.

References

- Aghanabati, A., 2010. *Geology of Iran. 3rd Edition, Geological Survey of Iran, 586 p. (In Persian)*.
- Ahr, W. M., 2008. *Geology of carbonate reservoirs: The identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks*, Hoboken. Wiley, 277 p.
- Aitken, J. D., 1967. Classification and environmental significance of cryptalgal limestones and dolomites, with illustrations from the Cambrian and Ordovician of southwestern Alberta. *Journal of Sedimentary Research*, 37(4): 1163–1178. <https://doi.org/10.1306/74D7185C-2B21-11D7-8648000102C1865D>.
- Allwood, A.C., Walter, M.R., Kamber, B.S., Marshall, C.P., and Burch, I.W., 2006. Stromatolite reef from the early Archaean era of Australia, *Nature* 2006, 441: 714–718. <https://doi.org/10.1038/nature04764>.
- Aloisi, G., 2008. The calcium carbonate saturation state in cyanobacterial mats throughout Earth's history, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 72: 6037–6060. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.10.007>.
- Andrés, G. M. P., and Lago, B. B., 2015. Sedimentary factors controlling thickness of stratiform stromatolites, from laminae to metre-thick packages (Sinemurian, Iberian Basin). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 28: 2.
- Andres, M. S., and Pamela Reid, R., 2006. Growth morphologies of modern marine stromatolites: A case study from Highborne Cay, Bahamas, *Sedimentary Geology*, 185 (3-4): 319-328. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.12.020>.
- Arp, G., Reimer, A., and Reitner, J., 2001. Photosynthesis-induced biofilm calcification and calcium concentrations in phanerozoic oceans, *Science*, 292: 1701–1704. <https://doi.org/10.1126/science.1057204>.
- Badertscher, S., Fleitmann, D., Cheng, H., Edwards, R.L., Göktürk, O.M., Zumbühl, A., Leuenberger, M., and Tüysüz, O., 2011. Pleistocene water intrusions from the Mediterranean and Caspian seas into the Black Sea, *Nat. Geosci.* 4: 236–239. <https://doi.org/10.1038/ngeo1106>.
- Bayet-Goll, A., and Daraei, M., 2020. Palaeoecological, sedimentological and stratigraphical insights into microbially induced sedimentary structures of the lower Cambrian successions of Iran. *Sedimentology*, 67 (6): 3199-3235.
- Bayet-Goll, A., Daraei, M., and Seginsara, M. I., 2022. Palaeogeographic reconstruction and sequence architecture of the middle-upper Jurassic successions of Hawraman Basin (NW Iran): Implications for tectono-depositional processes of the northeastern passive margin of the Arabian Plate. *Geological Journal*, 57: 2058–2093.
- Bayet-Goll, A., Geyer, G., Wilmsen, M., Mahboubi, A., and Moussavi-Harami, R., 2014. Facies architecture, depositional environments and sequence stratigraphy of the Middle Cambrian Fasham and Deh-Sufiyan formations in the central Alborz, Iran. *Facies*, 60 (3): 815-841. [10.1007/s10347-014-0401-9](https://doi.org/10.1007/s10347-014-0401-9).
- Bayet-Goll, A., Shirezadeh-Esfahani, F., Daraei, M., Monaco, P., Sharafi, M., and Akbari Mohamadi, A., 2018. Cyclostratigraphy across a Mississippian carbonate ramp in the Esfahan-Sirjan Basin, Iran: implications for the amplitudes and frequencies of sealevel fluctuations along the southern margin of the Paleotethys. *International Journal of Earth Sciences*, 107: 2233–2263.
- Bourillot, M., Vennin, E., Dupraz, C., Pace, A., Foubert, A., Rouchy, J., M., Patrier, P., Blanc, P., Bernard, D., Lasseur, J., and Visscher, P. T., 2020. The Record of Environmental and Microbial Signatures in Ancient Microbialites: The Terminal Carbonate Complex from the Neogene Basins of Southeastern Spain, *Minerals*, 10: 1-50. <https://doi.org/10.3390/min10030276>.
- Catuneanu, O., 2007. Sequence stratigraphic context of microbial mat features, In: *Atlas of microbial mat features preserved within the clastic rock record*; Schieber, J., Bose, P.K., Eriksson, P.G., Banerjee, S., Sarkar, S., Altermann, W., and Catuneanu, O, Eds., Elsevier, pp. 276-283.
- Des Marais, D.J., 2000. Evolution- When did photosynthesis emerge on Earth? *Science*, 289: 1703–1705.
- Dupraz, C., Reid, R.P., Braissant, O., Decho, A.W., Norman, R.S., and Visscher, P.T., 2009. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth Sci. Rev.* 2009, 96: 141–162. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.005>.
- Dupraz, C., Visscher, P. T., Baumgartner, L. K., and Reid, R. P., 2004. Microbe–mineral interactions: early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas). *Sedimentology*, 51(4): 745-765.
- Flügel, E., 2004. *Microfacies analysis of limestones: Analysis, Interpretation and Application*, Springer, Berlin, Heidelberg. 976p.
- Goldstein, R.H., Franseen, E.K., Lipinski, C.J., 2013. Topographic and sea level controls on oolite-microbialite-coralgal reef sequences: The terminal carbonate complex of southeast Spain, *AAPG Bull.*, 97: 1997–2034. <https://doi.org/10.1306/06191312170>.

- Grotzinger, J. P., 2000. Facies and palaeoenvironmental setting of Thrombolite-Stromatolite Reefs, Terminal Proterozoic Nama Group (ca. 550-543 Ma), central and southern Namibia, *Communs geol. Surv. Namibia*, 12:251-264.
- Grotzinger, J. P., and Knoll, A. H. 1999. Stromatolites in Precambrian carbonates: evolutionary mileposts or environmental dipsticks, *Annual review of earth and planetary sciences*, 27(1): 313-358.
- Haq, B., Hardenbol, J., and Vail, P., 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic, *Science* 235. 4793: 1156–1167. doi:10.1126/science.235.4793.1156.
- Isanejad, M., Daraie, M., Bayet-Gol, A., Imani Seginsara, M., Zohdi, A., and Rabbani, J., 2022. *Reconstructing the depositional environment of microbial deposits of the upper Jurassic Najmah formation in the Paveh region, Kermanshah, Applied Sedimentology*, 10 (20): 54-72. (In Persian).
- Khravov, A.N., 1960. Paleomagnetism and Stratigraphic correlation, *Geophysical Journal International*, 3(3): 377-378. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1960.tb01712.x>.
- Krassay, A.A., 1998. Outcrop and drill core gamma ray logging integrated with Sequence stratigraphy: 3 examples from Proterozoic sedimentary Successions of northern Australia. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(4), 285-299.
- Krijgsman, W., Tesakov, A., Yanina, T., Lazarev, S., Danukalova, G., Van Baak, C.G.C., Agusti, J., Alçiçek, M.C., Aliyeva, E., Bista, D., Bruch, A., Büyükeriç, Y., Bukhsianidze, M., Flecker, R., Frolov, P., Hoyle, T.M., Jorissen, E.L., Kirschner, U., Korichen, S.A., Kroonenberg, S.B., Lordkipanidze, D., Omsp, O., Rausch, L., Singarayer, J., Stoica, M., Van de Velder, S., Titov, V.V., and Wesselingh F.P., 2019. Quaternary time scales for the Pontocaspian domain: Interbasinal connectivity and faunal evolution, *Earth-Science Reviews*, 188: 1–40. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.10.013.
- Lazarev, S. Kuiper, K. F., Oms, O., Bukhsianidze, M., Vasilyan, D., Jorissen, E. L., Bouwmeester, M. J., Aghayeva, V., Van Amerongen, A. J., Agustí, J., Lordkipanidze, V., and Krijgsman, W., 2021. Five-fold expansion of the Caspian Sea in the late Pliocene: New and revised magnetostratigraphic and ⁴⁰Ar/³⁹Ar age constraints on the Akchagylian Stage, *Global and Planetary Change*, 206: 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103624>.
- Lee H.S., and Chough S.K., 2011. Depositional processes of the Zhushadong and Mantou formations (Early to Middle Cambrian), Shandong Province, China: roles of archipelago and mixed carbonate–siliciclastic sedimentation on cycle genesis during initial flooding of the North China platform. *Sedimentology*, 58:1530–1572.
- Mohajer Soltani, M., Rafiei, B., Mohseni, H., Taati, F., and Zafari, M., 2024. *Depositional environment and Sequence stratigraphy of Aghchagil Formation in Dasht-e Azadegan section, In: 8th Symposium of Sedimentological Society of Iran, 651-657. (In Persian)*.
- Nutman, A.P., Bennett, V.C., Friend, C.R.L., Van Kranendonk, M.J., and Chivas, A.R., 2016. Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures, *Nature*, 537: 535–538. <https://doi.org/10.1038/nature19355>.
- Nutman, A.P., Bennett, V.C., Friend, C.R.L., Van Kranendonk, M.J., Rothacker, L., and Chivas, A.R., 2019. Cross-examining Earth's oldest stromatolites: Seeing through the effects of heterogeneous deformation, metamorphism and metamorphism affecting Isua (Greenland) - 3700 Ma sedimentary rocks, *Precambrian Res.*, 331: 105347. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105347>.
- Osleger, D., and Read, J.F., 1991. Relation of eustasy to stacking patterns of meter-scale carbonate cycles, Late Cambrian, USA. *J Sediment Petrol* 61:1225–1252.
- Peng, H., Ma, K., Zhang, X., Wen, L., Wang, Y., and Tian, X., 2021. Sequence stratigraphic characteristics and sedimentary evolution model of the late Ediacaran in the Sichuan Basin, *Acta Sedimentol. Sin.* 39 (6):1440–1450. (in Chinese with English abstract). <http://dx.doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2021.119>.
- Perri, E., Tucker, M.E., and Mawson, M., 2013. Biotic and abiotic processes in the formation and diagenesis of Permian dolomitic stromatolites (Zechstein Group, NE England), *J. Sediment. Res.*, 83: 896–914. <http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2013.65>.
- Riding R., 2006. Microbial carbonate abundance compared with fluctuations in metazoan diversity over geological time, *Sediment. Geol.*, 185: 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.12.015>.
- Riding, R., 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial–algal mats and biofilms, *Sedimentology*, 47: 179 – 214. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00003.x>.
- Shapiro, R. S., 2000. A comment on the systematic confusion of thrombolites. *Palaios*, 15(2): 166 -169. <https://doi.org/10.2307/3515503>.
- Tang, D., Shi, X., Jiang, G., and Zhang, W., 2013. Microfabrics in Mesoproterozoic microdigitate stromatolites: evidence of biogenicity and organomineralization at micron and nanometer scales. *Palaios*, 28(3): 178 –194. <https://doi.org/10.2110/palo.2012.p12-113r>.
- Trubikhin, V. M., 1977. Paleomagnetizm and stratigraphy of Akchagylian deposits of Western Turkmenia. *Transactions of the Geological Institute. Nauka Press, Moscow*, pp, 1-79 (in Russian).
- Van Baak, C.G.C., Vasiliev, I., Stoica, M., Kuiper, K.F., Forte, A.M., Aliyeva, E., and Krijgsman, W., 2013. A magnetostratigraphic time frame for Plio-Pleistocene transgressions in the South Caspian Basin, Azerbaijan. *Glob. Planet. Change*, 103: 119–134. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.05.004>.

- Vennin, E., Olivier, N., Brayard, A., Bour, I., Thomazo, C., Escarguel, G., and Hofmann, R., 2015. Microbial deposits in the aftermath of the end-Permian mass extinction: A diverging case from the Mineral Mountains (Utah, USA), *Sedimentology*, 62(3): 753 –792. <https://doi.org/10.1111/sed.12166>.
- Vennin, E., Olivier, N., Brayard, A., Bour, I., Thomazo, C., Escarguel, G., and Hofmann, R., 2015. Microbial deposits in the aftermath of the end-Permian mass extinction: A diverging case from the Mineral Mountains (Utah, USA), *Sedimentology*, 62(3): 753 –792. <https://doi.org/10.1111/sed.12166>.
- Vincent, S.J., Davies, C.E., Richards, K., and Aliyeva, E., 2010. Contrasting Pliocene fluvial depositional systems within the rapidly subsiding South Caspian Basin; a case study of the palaeo-Volga and palaeo-Kura river systems in the Surakhany Suite, Upper Productive Series, onshore Azerbaijan. *Mar. Pet. Geol.* 27, 2079–2106.
- Warren, L.V., and Stickley, D.M., 1997. Environmental controls on the formation of stromatolites and thrombolites. *Sedimentary Geology*, 109(1-4): 295-307.
- Yanina, T.A., 2014. The Ponto-Caspian region: Environmental consequences of climate change during the Late Pleistocene, *Quat. Int.*, 345: 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.01.045>.
- Zhou, Y., and Li, Z., 2023. Terminal Ediacaran microbialite lithofacies associations with paleoenvironmental constraints in a high-frequency sequence stratigraphic framework of Sichuan Basin, SW China, *Earth Sci.*, 11:1085313. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1085313>.