https://jssr.ui.ac.ir/?lang=en
Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches
E-ISSN: 2423-8007
Vol. 42, Issue 1, No. 102, 2026, 1-14
Received: 07.06.2025 Accepted: 22.07.2025

Research Paper

Impact of the Paleocene–Eocene Thermal Maximum (PETM) on organic petrographic characteristics of the basal Pabdeh Formation at Kuh-e-Gurpi Anticline, SW Iran

Sasan Bakhtiary Nejad
M.Sc. Student Petroleum Geology, Department of Petroleum Geology and Sedimentary Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
sasanbakhtiary2000@gmail.com

Majid Alipour*
Assistant Professor, Department of Petroleum Geology and Sedimentary Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
alipour@scu.ac.ir

Narges Shokri
Assistant Professor, Department of Petroleum Geology and Sedimentary Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
n.shokri@scu.ac.ir

Abstract
This study investigates the impact of the Paleocene–Eocene Thermal Maximum (PETM) event on the organic petrographic characteristics of the base Pabdeh Formation in the Tang-e-Hati section, located at the Kuh-e-Gurpi Anticline, SW Iran. To delineate the Paleocene–Eocene boundary, nanofossil analyses were employed. Additionally, the collected samples from the studied section were investigated using organic petrographic methods under reflected white light. The nanofossil results indicate that the Paleocene–Eocene boundary is situated approximately 26.5 meters from the base of the Pabdeh Formation, specifically between subzones NP9a and NP9b, marked by the presence of the key species: *Discoaster araneus*, *Rhomboaster cuspis*, and *R. spineus*. Furthermore, the organic petrographic results suggest that the studied marls were deposited under oxidizing conditions. Results from this study are consistent with the presence of a grey marl with relatively darker color, lower fossil concentration, and higher organic matter concentrations compared to the lower and upper parts. Results from this study conclusively suggest that deposition of the grey marl was associated with a short-term relative sea-level fall, which in turn led to an increased sedimentation rate in the basin and a greater influx of terrestrial organic matter.
Keywords: Purple shale, Organic petrography, Paleocene–Eocene boundary, PETM incident, Tang-e-Hati

Introduction

Organic geochemistry, focusing on the study of organic compounds in sediments and their interactions with geological processes, plays a vital role in hydrocarbon exploration (Peters et al. 2005). One of the key analytical approaches in this field is organic petrography, which enables the identification of macerals, kerogen types, thermal maturity, and palaeo-depositional environments of potential source rocks (Hackley & Cardott 2016). The Paleocene–Eocene Thermal Maximum (PETM) was a short-lived but intense global warming event, associated with a 5–8 °C rise in global temperatures, ocean acidification, and major disruptions in the carbon cycle (Zachos et al. 2008).

In southwestern Iran, the Pabdeh Formation, with its continuous marl and purple shale strata, provides an excellent opportunity to assess variations in organic matter preservation across the PETM (Motiei 1993). Although numerous studies have investigated the geochemical properties of the Pabdeh Formation (Alizadeh et al. 2012; Safaei-Farouji et al. 2022; Hosseiny et al. 2024), little is known about its organic petrographic characteristics, particularly across the Paleocene–Eocene boundary. This study aims to

*Corresponding author
Bakhtiary Nejad S. Alipour M. and Shokri N. (2026). Impact of the Paleocene–Eocene Thermal Maximum (PETM) on organic petrographic characteristics of the basal Pabdeh Formation at Kuh-e-Gurpi Anticline, SW Iran. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 42(1): 1-14. https://doi.org/10.22108/jssr.2025.145497.1315

fill that gap by examining the organic matter variations and palaeo-depositional conditions during the PETM by means of organic petrography techniques.

Material & Methods

In this study, 24 samples were systematically collected from the base of the Pabdeh Formation at the Tang-e-Hati section (southern flank of the Kuh-e-Gurpi Anticline). Sampling intervals were generally less than 5 meters; however, in the vicinity of the Paleocene–Eocene boundary, the interval was reduced to approximately 1 meter or less to allow for a more detailed investigation of PETM-related changes. The collected samples, consisting of both consolidated and unconsolidated materials, were transferred to the laboratory for calcareous nannofossil and organic petrographic analyses. Calcareous nannofossils were prepared using the standard smear slide technique (Bown & Young, 1998), and examined under a polarized Olympus BX60 microscope at 1250× magnification. Species identification was carried out based on established references (Perch-Nielsen 1985; Agnini et al. 2014) and biozonation and boundary placement followed the schemes of Martini (1971), Romein (1971), and Aubry (1998). For organic petrographic studies, polished pellets were prepared from small fragments (approximately 1.5 × 1.5 cm) of the collected samples. These fragments were embedded in a 2:1 mixture of epoxy resin and hardener using standard protocols. After 24 hours, the samples were removed from the molds and polished according to the standard procedures (Bustin et al. 1985; Taylor et al. 1998). Petrographic observations were performed using a Zeiss Axioplan II microscope at 100× magnification under oil immersion.

Discussion of Results & Conclusions

In this study, the Paleocene–Eocene boundary was identified at approximately 26.5 meters above the base of the Pabdeh Formation, based on the recognition of nannofossil subzones NP9a and NP9b. Organic petrography revealed three distinct sections differing in organic matter content and color: i) a lower purple shale with low organic matter contents which was precipitated under oxidizing conditions, ii) a middle grey marl with higher organic content linked to the PETM event and increased water acidity, and iii) an upper purple shale with decreased organic content and a return to oxidizing conditions. Changes in color and organic matter content correspond to fluctuations in the relative sea level, sedimentation rate, and pH of the water. During deposition of the lower purple shale, higher sea levels and lower sedimentation rates favored good fossil preservation. During the PETM interval, sea level dropped, sedimentation rate increased, and water acidity increased, resulting in reduced fossil preservation and increased terrestrial organic matter input. After the PETM, sea level rose again, terrestrial organic matter input decreased, and fossil preservation improved. These results highlight the interplay of sea-level changes, sedimentation rates, and water pH in controlling the organic petrographic characteristics of the base Pabdeh Formation during the PETM, providing valuable insights for reconstructing palaeo-depositional environments in this part of the Zagros Basin.

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.145497.1315

پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی
سال چهل و دوم، شماره پیاپی ۱۰۲، شماره اول ۱۴۰۵، ص ۱۴-۱
تاریخ وصول: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱

مقاله پژوهشی

تأثیر رویداد حداکثر گرمایی پالئوسن-ائوسن (PETM) بر ویژگی‌های پتروگرافی آلی قاعدهٔ سازند پابده در تاقدیس کوه گورپی، جنوب غرب ایران

ساسان بختیاری‌نژاد، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی نفت و حوضه‌های رسوبی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز
sasanbakhtiary2000@gmail.com
مجید علیپور[*]، استادیار، گروه زمین‌شناسی نفت و حوضه‌های رسوبی، دانشکدهٔ علوم‌زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
alipour@scu.ac.ir
نرگس شکری، استادیار، گروه زمین‌شناسی نفت و حوضه‌های رسوبی، دانشکدهٔ علوم‌زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
n.shokri@scu.ac.ir

چکیده

این مطالعه، تأثیر رخداد حداکثر گرمایی پالئوسن-ائوسن (PETM) را بر ویژگی‌های پتروگرافی آلی قاعدهٔ سازند پابده در برش تنگ حتی، واقع در تاقدیس کوه گورپی در جنوب غرب ایران بررسی می‌کند. در همین راستا، به‌منظور تعیین مرز پالئوسن-ائوسن از روش‌های مطالعات نانوفسیلی بهره گرفته شد. همچنین نمونه‌های برداشته‌شده از برش مطالعه‌شده با استفاده از میکروسکوپ انعکاسی، ازلحاظ پتروگرافی آلی تجزیه و تحلیل شدند. نتایج حاصل از مطالعات نانوفسیلی نشان داد که مرز پالئوسن-ائوسن در محدودهٔ ۲۶.۵ متری از قاعدهٔ سازند پابده، بین زیرزون‌های NP9a و NP9b و با حضور گونه‌های شاخص *Discoaster araneus*، *Rhomboaster cuspis* و *R. spineus* قرار دارد. علاوه بر این، نتایج پتروگرافی آلی نشان داد که توالی مطالعه‌شده به‌طور کلی تحت شرایط اکسیدان ته‌نشین شده است. این مشاهدات حاکی از حضور یک بخش با رنگ نسبتاً تیره‌تر، تمرکز پایین فسیل‌ها و مقدار بالای مادهٔ آلی نسبت‌به بخش‌های پایینی و بالایی‌اند. با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، بخش‌های مذکور در نتیجهٔ افت محدود سطح آب ته‌نشین شده‌اند که به‌موجب آن حجم رسوبات ورودی به درون حوضه افزایش یافته و ورود مواد آلی گیاهی نیز، بیشتر شده است.

واژه‌های کلیدی: شیل ارغوانی، پتروگرافی آلی، مرز پالئوسن-ائوسن، رخداد PETM، تنگ حتی.

* نویسنده مسئول

بختیاری‌نژاد، ساسان، علیپور، مجید و شکری، نرگس. (۱۴۰۵). تأثیر رویداد حداکثر گرمایی پالئوسن-ائوسن (PETM) بر ویژگی‌های پتروگرافی آلی قاعدهٔ سازند پابده در تاقدیس کوه گورپی، جنوب غرب ایران. پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۴۲(۱): ۱-۱۴.
https://doi.org/10.22108/jssr.2025.145497.1315

مقدمه

ژئوشیمی آلی[1]، شاخه‌ای حیاتی از علوم زمین است که ترکیبات آلی را در سنگ‌ها و تعامل آنها را با فرآیندهای زمین‌شناسی مطالعه می‌کند. این علم را آلفرد تریبس در دهۀ ۱۹۳۰ میلادی با کشف پورفیرین‌ها [2] بنیان نهاد و امروزه به ابزار ضروری در فعالیت‌های اکتشاف و تولید نفت تبدیل شده است (Peters et al. 2005). در صنعت نفت، ژئوشیمی آلی نقش محوری در کاهش ریسک اکتشاف دارد؛ به‌طوری که با استفاده از روش‌هایی مانند سنجش کربن آلی کل (TOC)، پیرولیز راک-ایول [3] و بازتاب ویترینایت و تشخیص ماسرال‌ها توسط پتروگرافی آلی، کیفیت سنگ‌های منشأ ارزیابی و محیط رسوب‌گذاری دیرینه آشکار می‌شود (Alipour 2025b).

پتروگرافی آلی [4] با مطالعۀ ریزساختارهای آلی (ماسرال‌ها) در سنگ‌های منشأ، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی پتانسیل هیدروکربن‌زایی و درک تاریخچۀ حرارتی حوضه‌های رسوبی دارد (Hackley and Cardott 2016). این علم با به‌کارگیری میکروسکوپ نوری بازتابشی و فلورسانس، امکان شناسایی دقیق نوع کروژن، بلوغ حرارتی (با اندازه‌گیری بازتاب ویترینایت) و شرایط حاکم بر محیط رسوب‌گذاری دیرینۀ سنگ‌های منشأ را فراهم می‌کند (Amiri and Alipour 2023b; Ammari and Alipour 2024). پتروگرافی آلی، که بر مطالعۀ ویژگی‌های کروژن‌ها و ارزیابی بلوغ حرارتی سنگ‌ها استوار است، ابزار مکمل و حیاتی در کنار آزمون‌های ژئوشیمیایی به شمار می‌رود. این رویکرد، امکان ارزیابی دقیق‌تر و جامع‌تر سنگ‌های مادر غیرمتعارف[5] و فرآیندهای زایش و خروج هیدروکربن را در اعماق زمین فراهم می‌آورد (Alipour 2025a).

رخداد حداکثر گرمایی پالئوسن-ائوسن [6] یکی از بحران‌های اقلیمی کوتاه‌مدت، اما شدید در تاریخ زمین‌شناسی است که با افزایش ۵–۸ درجه‌ای دمای جهانی، اسیدی‌شدن اقیانوس‌ها و تغییرات چشمگیر در چرخۀ کربن همراه بوده است (Zachos et al. 2008). این رویداد نه‌تنها تأثیرات شگرفی بر تنوع زیستی و سیستم‌های رسوبی گذاشت، به‌عنوان الگویی برای درک پیامدهای تغییرات اقلیمی کنونی نیز، درخور توجه است (McInerney and Wing 2011). در حوضۀ زاگرس ایران، سازند پابده با توالی پیوستۀ شیل ارغوانی و مارن، پنجره‌ای بی‌نظیر برای بررسی رخداد PETM و آثار آن بر چگونگی حفظ مواد آلی در بخش‌های قاعده‌ای سازند پابده فراهم می‌کند. درک تغییرات مواد آلی در حین این رویداد، اطلاعات ارزشمندی دربارۀ شرایط محیط رسوبی دیرینه فراهم می‌کند.

هدف از مطالعۀ حاضر، ارزیابی مواد آلی سازند پابده و بررسی تغییرات آنها در مرز پالئوسن-ائوسن با استفاده از روش‌های پتروگرافی آلی است تا به این ترتیب تأثیرات رخداد PETM بر شرایط حوضه و محیط رسوب‌گذاری دیرینه بهتر بررسی شود. مطالعات گوناگونی در سال‌های اخیر، ژئوشیمیایی آلی و پتروگرافی آلی سنگ منشأ پابده را در حوضۀ زاگرس مطالعه کرده‌اند (Safaei-Farouji et al. 2021; Amiri and Alipour 2023a; Khazami and Alipour 2024, 2025). با وجود پژوهش‌های متعددی که بر خصوصیات ژئوشیمیایی سازند پابده انجام شده است، هیچ اطلاعاتی دربارۀ ویژگی‌های پتروگرافی آلی این سازند به‌ویژه در مرز پالئوسن-ائوسن در دسترس نیست. نتایج به دست آمده از این پژوهش در راستای پرکردن این شکاف اطلاعاتی است و به درک بهتر تغییرات رخسارۀ آلی و محیط رسوبی دیرینۀ سازند پابده در زمان وقوع حادثۀ PETM منجر می‌شود.

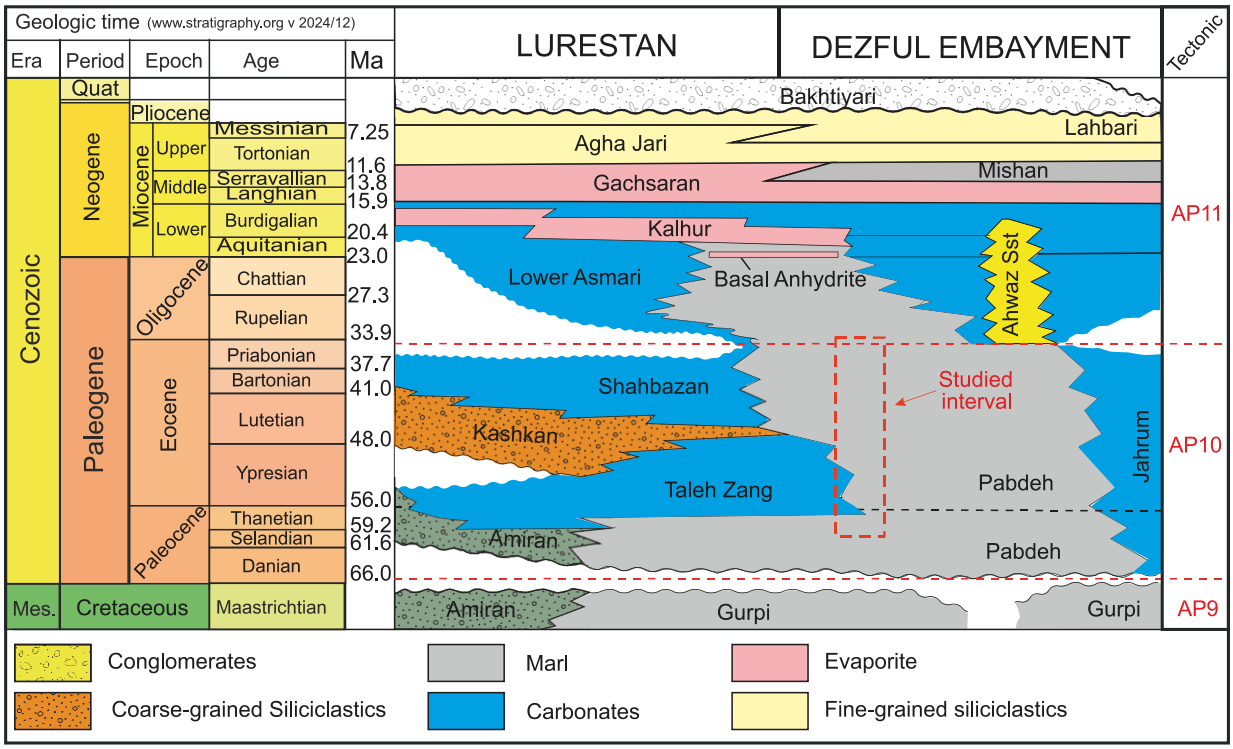
زمین‌شناسی منطقه

حوضۀ زاگرس، یک حوضۀ پیش‌بوم[7] شناخته می‌شود که در نتیجۀ برخورد صفحۀ عربی به صفحۀ ایران ایجاد شده است (Alavi 2004; Alipour 2023). این حوضه با ضخامت درخور توجهی از رسوبات مزوزوئیک تا سنوزوئیک شناخته می‌شود

[1] Organic Geochemistry
[2] Porphyrins
[3] Rock-Eval Pyrolysis
[4] Organic Petrography
[5] Unconventional Source Rocks
[6] Paleocene-Eocene Thermal Maximum; PETM
[7] Foreland basin

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.145497.1315

که در بر دارندهٔ سیستم‌های هیدروکربنی متعددی است (Bordenave 2014; Alipour 2024). فروافتادگی دزفول، زیر حوضه‌ای در بخش مرکزی زاگرس و یکی از غنی‌ترین مناطق هیدروکربنی جهان شناخته می‌شود. این فروافتادگی با داشتن سنگ‌های منشأ متعدد ازجمله سازندهای پابده، کژدمی، گرو و سرگلو در کنار سنگ مخزن‌های مهمی مانند آسماری، نقش کلیدی در تولید نفت در ایران دارد (Alipour 2022, 2025d, c). سازند پابده به سن پالئوسن–الیگوسن، جوان‌ترین سنگ منشأ در فروافتادگی دزفول شناخته شده است، که در بیشتر نواحی به درجهٔ پختگی کافی، برای زایش هیدروکربن نرسیده است (Alipour 2025d). سازند پابده از مارن، شیل ارغوانی–خاکستری روشن تا تیره با میان‌لایه‌های آهکی تشکیل شده است (James and Wynd 1965). مرز زیرین سازند پابده با سازند گورپی ناپیوسته و مرز بالایی آن با سازند آسماری پیوسته و تدریجی است (Motiei 1993) (شکل ۱). به‌طور کلی سازند پابده در طی مگاسکانس AP10 ته‌نشست یافته است و سه مرز سکانسی اصلی به نام‌های Pg10، Pg20، و Pg25 دارد (Sharland et al. 2001). مرز سکانسی Pg10 و Pg20 در نزدیکی بخش‌های زیرین سازند پابده قرار دارد؛ در حالی که مرز Pg25 در بخش‌های میانیِ این سازند واقع شده است و عمدتاً منطبق با رخساره‌های غنی از مواد آلی است (Piryaei and Davies 2024).



شکل ۱– ستون سنگ چینه‌شناسی کرتاسه و سنوزوئیک حوضهٔ زاگرس (برگرفته از Piryaei and Davies 2024)

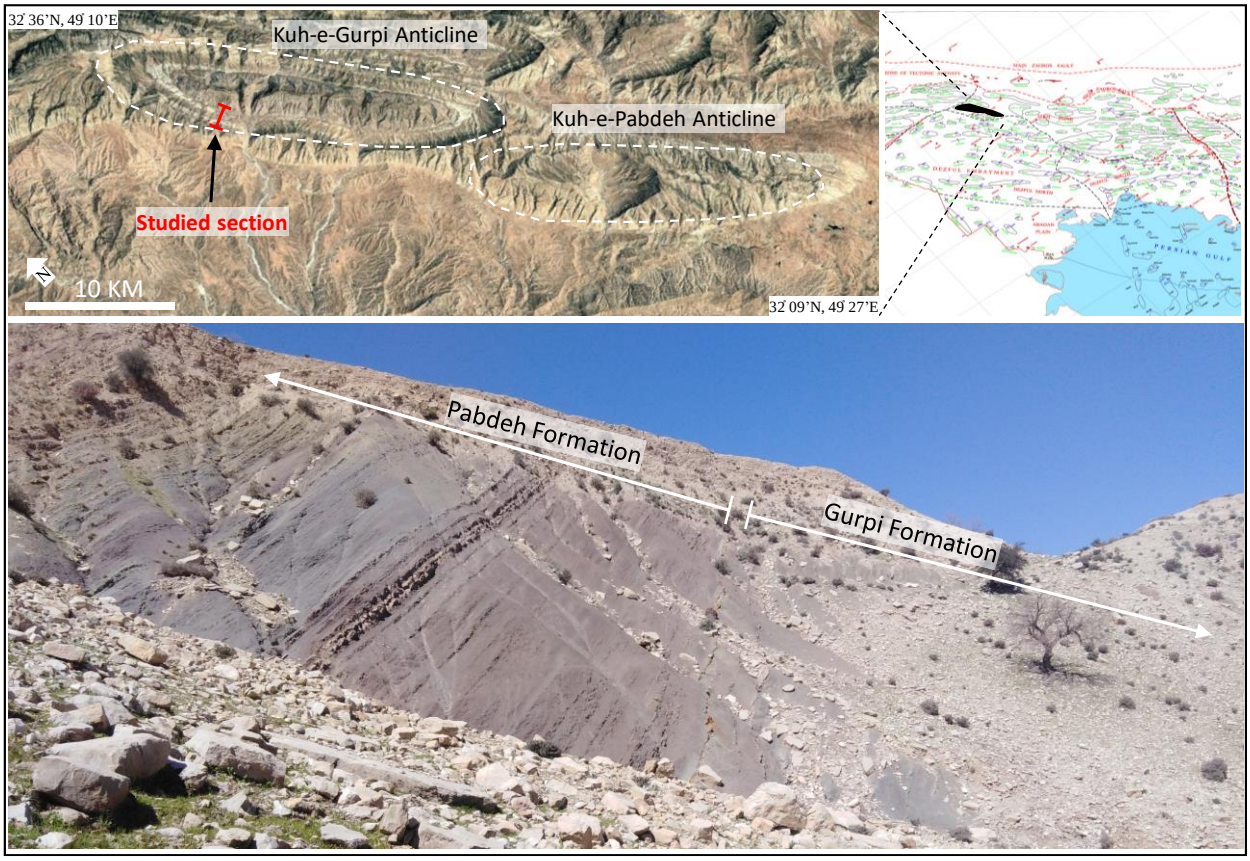
Fig 1 - Stratigraphic column of the Cretaceous and Cenozoic in the Zagros basin (modified after Piryaei and Davies 2024)

رخنمون سطحی بررسی‌شده در پژوهش حاضر، در تنگ حتی واقع شده است که در بخش جنوبی تاقدیس کوه گورپی و در فاصلهٔ تقریبی ۲٤ کیلومتری شمال شرقی شهرستان لالی در استان خوزستان قرار دارد. برای دسترسی به برش تنگ حتی می‌توان از جادهٔ لالی–پابده در شمال شهرستان لالی به‌سمت شهر تراز حرکت کرده و سپس ازطریق جادهٔ بابا روزبهان به محل مدنظر رسید. موقعیت جغرافیایی این برش، در طول شرقی ٤۹ درجه، ۱۰ دقیقه و ۲۲ ثانیه و عرض شمالی ۳۲ درجه، ۳۱ دقیقه و ۳۵ ثانیه ثبت شده است (شکل ۲).

محدودهٔ مطالعه‌شده در این پژوهش شامل ٤۷ متر از بخش

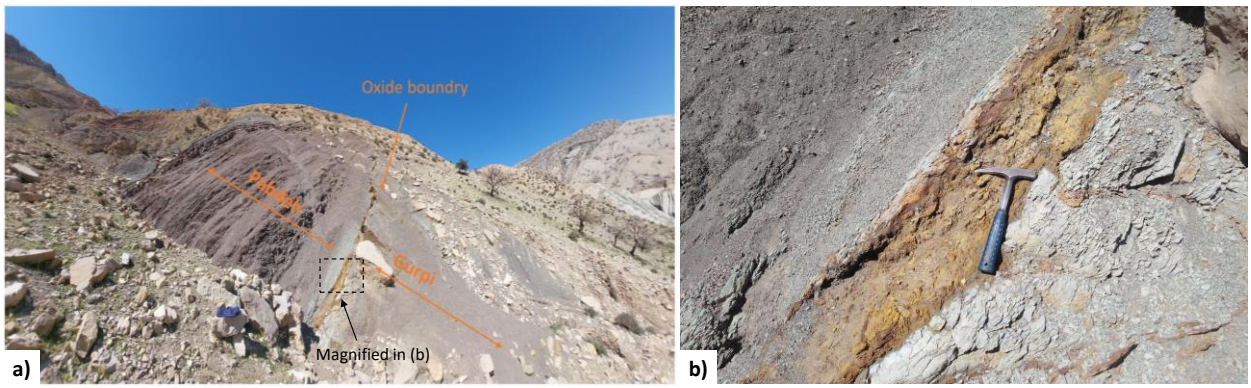
https://doi.org/10.22108/jssr.2025.145497.1315

قاعده‌ای سازند پابده است که به‌طور کلی از شیل‌های ارغوانی با میان‌لایه‌های مارن خاکستری تشکیل شده است (شکل ۲). سازندهای گورپی و پابده در این برش، با یک لایهٔ اکسید آهن به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر از یکدیگر جدا شده‌اند (شکل ۳). سازند پابده در برش تنگ حتی، بلافاصله بعد از لایهٔ اکسید آهن با تناوبی از شیل‌های ارغوانی آغاز می‌شود.



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی تاقدیس کوه گورپی در برش تنگ حتی (a)؛ عکس از رخنمون سطحی سازند پابده وگورپی در برش تنگ حتی (b)

Fig 2 - Geographical location of the Kuh-e-Gurpi anticline and Tang-e-Hati section (a), Photograph of the surface outcrop of the Pabdeh and Gurpi formations at the Tang-e-Hati section (b)



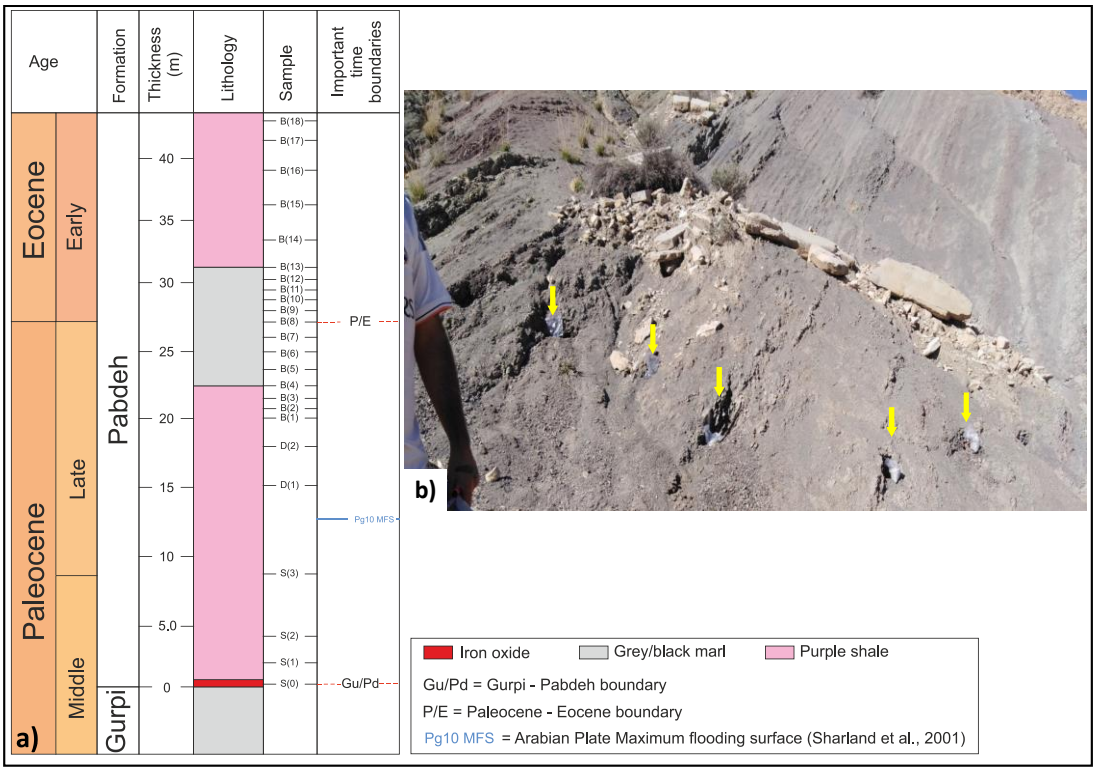
شکل ۳- لایهٔ اکسید آهن در مرز سازندهای گورپی و پابده (a) و نمای نزدیک از لایهٔ اکسید آهن (b)

Fig 3 - Oxide bed at the boundary of the Gurpi and Pabdeh formations (a), and magnified view of the oxide layer (b)

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.145497.1315

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ۲٤ نمونه از قاعدهٔ سازند پابده در رخنمون تنگهٔ حتی برداشت شد. نمونه‌برداری به‌طور منظم و با فواصل تقریبی کمتر از ۵ متر انجام شد؛ اما در محدودهٔ مرز پالئوسن-ائوسن به‌منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات رخداد PETM، فواصل نمونه‌برداری به حدود ۱ متر و کمتر کاهش یافت (شکل ٤).



شکل ٤- موقعیت نمونه‌های برداشت‌شده (a)؛ عکس از نمونه‌های برداشت‌شده در رخنمون سطحی سازند پابده (b)

Fig 4 - Location of collected samples (a), Photograph of samples collected from the surface outcrop of the Pabdeh Formation (b)

نمونه‌های برداشته‌شده که شامل نمونه‌های سخت سنگی و نیز نمونه‌های سست بودند، به‌منظور مطالعات پتروگرافی آلی و فسیل‌شناسی به آزمایشگاه منتقل شدند. آماده‌سازی نمونه‌های نانوفسیل آهکی در محیط آزمایشگاه، با استفاده از روش اسمیر اسلاید [1] انجام شد که یک تکنیک متداول و استاندارد برای آماده‌سازی نانوفسیل‌های آهکی [2] به شمار می‌رود (Bown and Young 1998). اسلایدهای حاصل با میکروسکوپ پلاریزان Olympus مدل BX60 تحت نور معمولی و پلاریزه و با بزرگنمایی ۱۲۵۰ مرتبه ارزیابی و تصویربرداری شدند (شکل ۵).

شناسایی گونه‌های مختلف با استناد به منابع علمی نظیر Perch-Nielsen (1985) و Agnini et al. (2014) انجام و برای تعیین زون‌های زیستی و موقعیت مرز پالئوسن-ائوسن از تقسیم‌بندی‌های ارائه‌شدهٔ Martini (1971) و Aubry (1998) بهره گرفته شد.

[1] Smear slide method

[2] calcareous nannofossils

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.145497.1315

شکل ۵- میکروسکوپ استفاده‌شده در انجام مطالعات نانوفسیلی (a) و عکس از اسلایدهای آماده‌شده به روش اسمیر اسلاید (b)

Fig 5 - Microscope used in performing nannofossil studies (a), Photo of slides prepared using the smear slide method (b)

به‌منظور انجام مطالعات پتروگرافی آلی، ابتدا اقدام به آماده‌سازی قرص‌های صیقلی[1] از نمونه‌های برداشته‌شده شد. قطعات کوچکی از نمونه‌های برداشته‌شده (به ابعاد ۱.۵ در ۱.۵ سانتی‌متر) در داخل قالب‌های مخصوص قرار داده و بر آنها مخلوطی از رزین و سخت‌کننده به نسبت دو به یک (چسب اپوکسی) ریخته شد. پس از گذشت ۱ روز و سخت‌شدن اپوکسی، نمونه‌ها از قالب خارج و براساس روش‌های استاندارد صیقل داده شدند تا برای انجام مطالعات پتروگرافی آلی آماده شوند (Bustin et al. 1985; Taylor et al. 1998). در این مطالعه، نمونه‌های آماده‌شده با استفاده از میکروسکوپ پتروگرافی آلی Zeiss Axioplan II با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر در حالت غرق‌شده در روغن ایمرسیون[2] بررسی شدند (شکل ٦).

شکل ٦- عکس از میکروسکوپ انعکاسی استفاده‌شده در انجام مطالعات پتروگرافی آلی (a)؛ عکس از قرص‌های صیقلی آماده‌شده از سازند پابده (b)

Fig 6 - Zeiss Axioplan-II microscope used for organic petrographic studies (a), Photo of the polished pellet prepared from the Pabdeh Formation (b)

نرخ رسوب‌گذاری در این مطالعه بر مبنای نسبت ضخامت (بر حسب متر) به بازهٔ زمانی (بر حسب میلیون سال) و براساس زون‌بندی نانوفسیلیِ انجام‌شده در هر بخش از برش مطالعه‌شده، محاسبه شده است؛ برای مثال، مدت‌زمان سپری‌شده در بازهٔ زمانی مربوط به دو زون نانوفسیلی، براساس داده‌های استاندارد (Agnini et al. 2014) محاسبه‌شدنی است. همچنین ضخامت رسوباتِ ته‌نشین‌شده در این مدت‌زمان از روی داده‌های پیمایش صحرایی در مطالعهٔ حاضر به‌آسانی محاسبه‌شدنی است. به این ترتیب، با تقسیم این ضخامت بر مدت‌زمان محاسبه‌شده، نرخ رسوب‌گذاری به‌صورت میانگین برای هر بازهٔ زمانی محاسبه شده است.

بحث و تحلیل یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از مطالعات نانوفسیلی

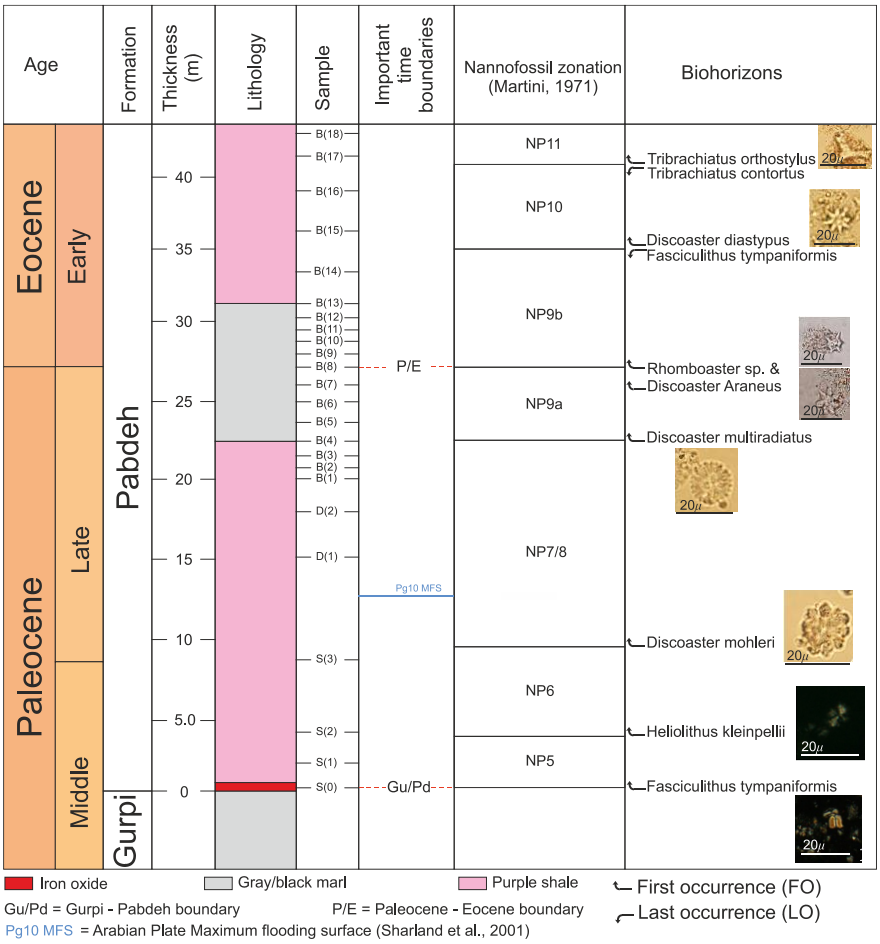
در بررسی نانوفسیل‌های آهکی به‌منظور دستیابی به موقعیت مرز پالئوسن-ائوسن، ۲٤ جنس و ۵۸ گونه در برش مطالعه‌شده شناسایی شد. بر مبنای نانوفسیل‌های آهکی شناسایی‌شده و گونه‌های شاخص موجود، زون‌های زیستی NP5، NP6، NP7/NP8، NP9a/NP9b، NP10، NP11 از یکدیگر تفکیک شدند. با در نظر گرفتن زون‌های زیستی تعیین‌شده و مجموعهٔ نانوفسیل‌های آهکی مشاهده‌شده در اسلایدها، زون‌های NP5 تا NP9a به بازهٔ زمانی پالئوسن پسین (معادل سلاندین-تانتین) و زون‌های NP9b، NP10 و NP11 به بازهٔ سنی ائوسن پیشین (معادل ایپرزین) نسبت داده می‌شوند؛ بنابراین مرز بین دورهای پالئوسن و ائوسن در میان زیرزون‌های زیستی NP9a و NP9b واقع شده است (شکل ۷)؛ به‌طوری که پایان زیرزون NP9a، پایان پالئوسن (پایان اشکوب تانتین) و آغاز زیرزون NP9b، شروع ائوسن (شروع اشکوب ایپرزین) را نشان می‌دهد. زیرزون NP9b در برش تنگ حتی با حضور گونه‌های Discoaster araneus، Rhomboaster cuspis و R. spineus مشخص می‌شود که در ضخامت ۲٦/۵ متری از قاعدهٔ سازند پابده (مرز پالئوسن-ائوسن) به ثبت می‌رسد و شروع ائوسن را نشان می‌دهد (شکل ۷). همچنین رویداد حداکثر گرمایش پالئوسن-ائوسن (PETM) که یک دورهٔ گرمایشی ناگهانی و شدید در تاریخ زمین محسوب

[1] Polished pellet

[2] Immersion Oil

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.145497.1315

می‌شود نیز، در این محدوده واقع شده است و با ظهور هم‌زمان گونه‌های خاصی از نانوفسیل‌های آهکی ازجمله Discoaster araneus و Rhomboaster spp. در سوابق زمین‌شناسی مشخص شده است (Kahn and Aubry 2004; Gibbs et al. 2006).

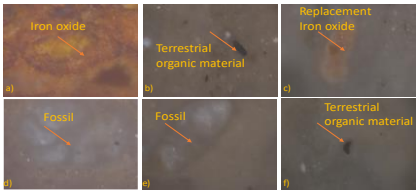


شکل ۷ – رویدادهای زیستی مهم نانوفسیل آهکی در محدودهٔ مطالعه‌شده از قاعدهٔ سازند پابده

Fig 7 - Significant calcareous nannofossil bioevents at the base of the Pabdeh Formation

نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی آلی

نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی آلی نمونه‌های استفاده‌شده در این پژوهش حاکی از حضور سه بخش مجزا هستند که ازنظر مقدار مواد آلی و رنگ رخساره باهم تفاوت دارند. در پایین‌ترین بخش از محدودهٔ مطالعه‌شده، یک توالی ۲۲ متری از شیل‌های ارغوانی حضور دارد که به‌طور مستقیم بر لایهٔ اکسید آهن واقع شده است. سن این بخش با توجه به نانوفسیل‌های موجود از پالئوسن میانی تا پالئوسن پسین است. در این بخش، میزان مادهٔ آلی بسیار اندک است و رنگ زمینهٔ نمونه‌ها از سرخ تا نارنجی متغیر و حاکی از تداوم شرایط اکسیدکننده در حوضهٔ رسوبی مطالعه‌شده است (شکل ۸).

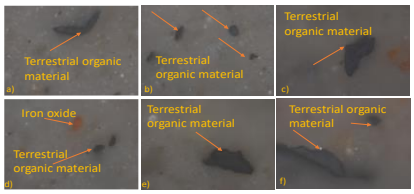


شکل ۸ – تصاویر میکروسکوپی گرفته‌شده از نمونه‌های مربوط به شیل ارغوانی واقع در پایین‌ترین بخش از سازند پابده

Fig 8 - Microscopic photomicrographs of samples from the lowermost parts of the Pabdeh Formation

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.145497.1315

در بخش فوقانی از شـــیل ارغوانی، یک توالی ۹ متری از مارن خاکستری با سن تقریبی پالئوسن پسین–ائوسن پیشین قرار گرفته اســـت. در این بخش، حفظ‌شـــدگی مادهٔ آلی در مقایســـه با شـــیل ارغوانی پایینی وضـــعیت بهتری دارد. رنگ خاکستری زمینه نشان‌دهندهٔ افزایش در ورود مواد آلی گیاهی به حوضه است (شکل ۹).



شکل ۹ – تصاویر میکروسکوپی گرفته‌شده از نمونه‌های مربوط به مارن خاکستری قرارگرفته بر بالای شیل ارغوانی زیرین از سازند پابده

Fig 9 - Microscopic photomicrographs of samples from the gray marl located above the lower purple shale of the Pabdeh Formation

بر بالای مارن‌های خاکســتری، مجدداً یک توالی ۱۶ متری از شیل‌های ارغوانی قرار داد که سن تقریبی آن ائوسن پیشین اســت. ازنظر محتوی مواد آلی در این بخش، مجدداً کاهش در مقدار مادهٔ آلی مشـاهده شـده و رنگ زمینه به‌سـمت سـرخ تا نارنجی تغییر یافته اســت (شـــکل ۱۰). این تغییرات نمایانگر بازگشت شرایط اکسیدان قبلی در حوضهٔ رسوبی است که با حفظ‌شدگی پایین مواد آلی گیاهی همراه بوده است.

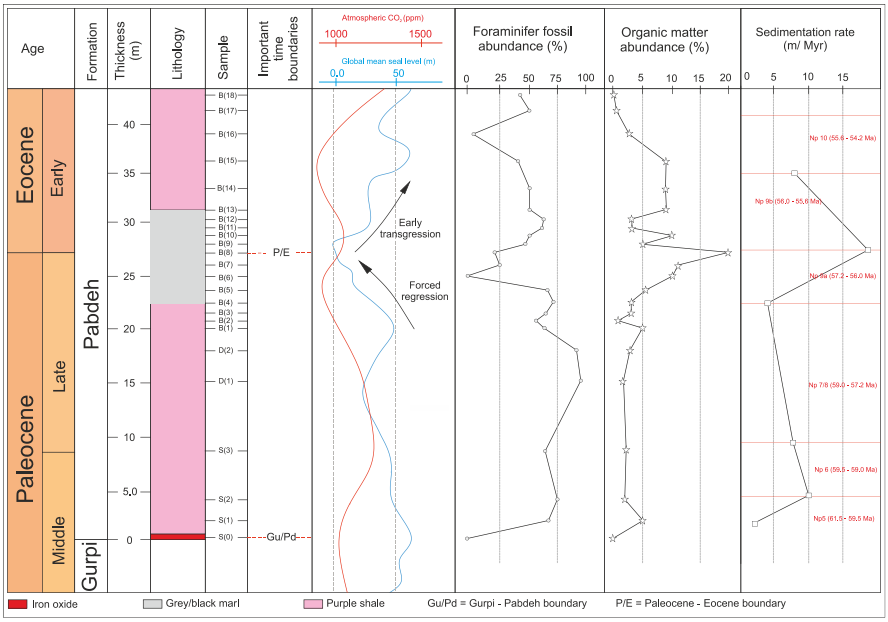
شکل ۱۰ – تصاویر میکروسکوپی گرفته‌شده از نمونه‌های مربوط به شـیل ارغوانی بالایی واقع در قاعدهٔ سازند پابده

Fig 10 - Microscopic photomicrographs of samples from the upper purple shale of the Pabdeh Formation

بحث

تغییرات در ویژگی‌های رخساره‌ای (رنگ و محتوی فسیلی) و ویژگی‌های مواد آلی در محدودهٔ مطالعه‌شـده از قاعدهٔ سـازند پابده، اطلاعات ارزشـمندی را دربارهٔ شـرایط محیط رسـوبی دیرینه فراهم می‌آورد. علاوه بر این بررســـی، این تغییرات در ارتباط با رخداد حداکثر گرمایش (PETM)، به درک بهتری از عوامل کنترل‌کنندهٔ تمرکز مواد آلی در رسوبات منجر می‌شود. احاطه‌شـدن مارن‌های تیره در مابین شـیل‌های ارغوانی انطباق درخور توجهی بـا تغییرات نرخ رســـوب‌گـذاری و محتوی فسـیلی نشـان می‌دهد. با توجه به این شـواهد، تغییرات سـطح آب دریـا مهم‌ترین عـامـل کنترل‌کننـدهٔ مقـدار مواد آلی و ویژگی‌های رخسـاره‌ای (رنگ و محتوی فسـیلی) در محدودهٔ مطالعه‌شده از قاعدهٔ سازند پابده بوده است (شکل ۱۱).

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.145497.1315



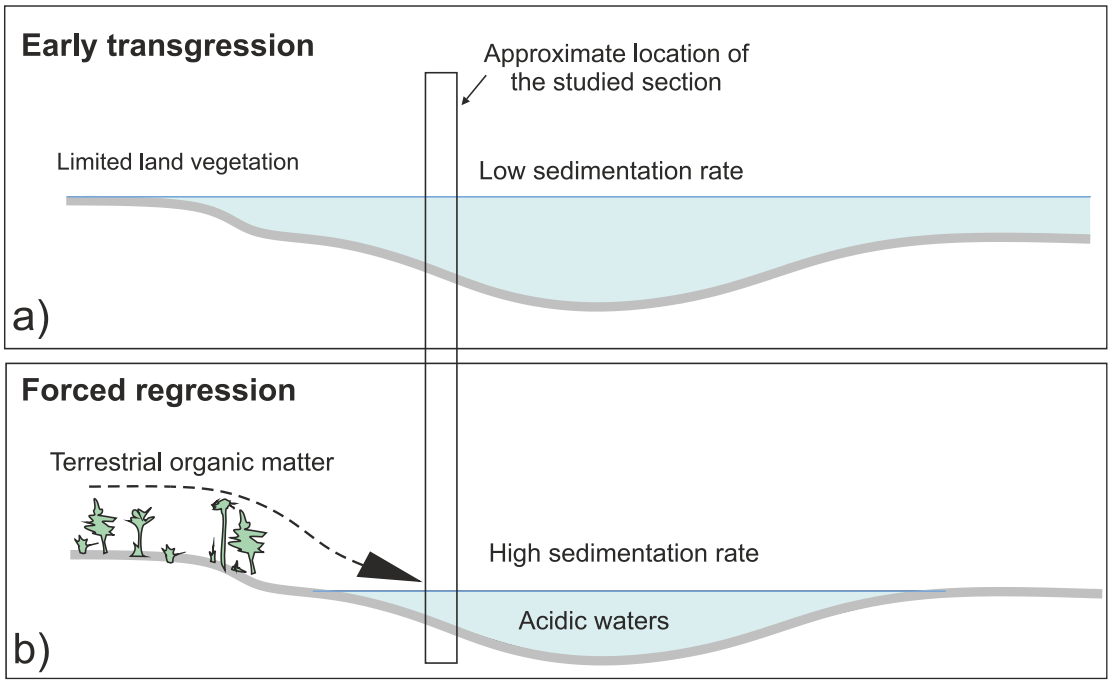
شکل ۱۱ – نمودارهای مقایسهٔ فراوانی فسیل، فراوانی مادهٔ آلی و نرخ رسوب‌گذاری در توالی مطالعه‌شده از قاعدهٔ سازند پابده در تنگ حتی. میزان کربن‌دی‌اکسید موجود در اتمسفر و تغییرات جهانی سطح آب دریا برگرفته از مطالعات پیشین (Miller et al. 2024) برگرفته شده است.

Fig 11 – Comparison charts of fossil abundance, organic matter abundance, and sedimentation rate for studied interval from the basal Pabdeh Formation in Tang-e-Hati. The atmospheric carbon dioxide and sea level changes are adopted from previous studies (Miller et al. 2024).

افزایش نرخ سطح آب جهانی در حین ته‌نشینی شیل ارغوانی پایینی، به کاهش نرخ رسوب‌گذاری و کاهش ورود مواد آلی گیاهی به حوضهٔ مطالعه‌شده منجر شده است (شکل ۱۱ و شکل ۱۲a). بر همین اساس، مقدار لندک مواد آلی واردشده به حوضه قادر به احیاکردن (حذف) آهن آواری نیست و به همین دلیل رنگ رسوبات از سرخ تا نارنجی دیده می‌شود. علاوه بر این، فراوانی چشمگیر آثار فسیلی مشاهده‌شده در نمونه‌های این محدوده، در ارتباط با پایین‌بودن میزان اسیدیته آب است (شکل ۱۱ و شکل ۱۲a).

در زمان ته‌نشینی مارن‌های خاکستری فراوانی فسیل‌ها، در مقایسه با شیل ارغوانی پایینی، کاهش درخور توجهی را نشان می‌دهد (شکل ۱۱). این مشاهده در ارتباط با بالابودن میزان کربن‌دی‌اکسید آزادشده در طی رخداد PETM است که به سهم خود موجب اسیدی‌شدن آب دریاها و کاهش توانایی حفظ‌شدگی فسیل‌های آهکی در محیط اسیدی شده است (شکل ۱۱ و شکل ۱۲b). با وقوع PETM سطح آب در حوضهٔ مطالعه‌شده به‌شدت کاهش یافته است، انرژی محیط افزایش پیدا کرده و فرصت برای ورود فزایندهٔ رسوبات قاره‌ای به بخش‌های عمیق‌تر حوضه فراهم شده است (شکل ۱۲b). این شرایط موجب ورود بیشتر مواد آلی گیاهی به حوضه شده است که درنتیجه، شیل‌های این بازه به‌دلیل تمرکز بالای مواد آلی، رنگ تیره‌تری پیدا می‌کنند (شکل ۹).

با عبور از فاز اولیهٔ PETM، سطح آب دریا مجدداً افزایش می‌یابد (شکل ۱۱) که احتمالاً ناشی از ذوب یخ‌ها به‌دلیل گرمای ایجادشده در این رخداد است. به همین ترتیب، کاهش ورود رسوبات قاره‌ای باعث کاهش ورود مواد آلی گیاهی به حوضه می‌شود و به‌تدریج رنگ رسوبات به رنگ ارغوانی سوق پیدا می‌کند. به احتمال زیاد این پدیده در اثر کاهش توان محیط در احیا (حذف) کردن آهن آواری موجود بوده است. همچنین با کاهش غلظت کربن‌دی‌اکسید محلول در آب دریاها، اسیدیتهٔ آب تعدیل و شرایط برای افزایش تعداد فسیل‌ها و بهبود حفظ‌شدگی آنها فراهم می‌شود. این نکته با فراوانی درخور توجه فسیل‌ها در شیل ارغوانی بالایی نیز تأیید می‌شود (شکل ۱۱).



شکل ۱۲ – شرایط محیط رسوبی دیرینه در هنگام وقوع رخداد بیشینهٔ گرمایی پالئوسن–ائوسن در حوضهٔ رسوبی پابده

Fig 12 – Paleo-depositional conditions during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM) event in the Pabdeh basin

نتیجه

در مطالعهٔ حاضر، بررسی نانوفسیل‌های آهکی، مرز پالئوسن–ائوسن را در عمق حدودی ۲۶.۵ متری از قاعده سازند پابده و در محدودهٔ زیرزون‌های NP9a و NP9b تعیین کرد. مطالعات پتروگرافی آلی نشان داد که تغییرات درخور توجهی در مقدار مواد آلی قاره‌ای در محدودهٔ مطالعه‌شده از قاعدهٔ سازند پابده وجود دارد؛ به‌طوری که یک توالی مارن خاکستری با مقدار بالای مواد آلی توسط شیل‌های ارغوانی با مقدار ناچیز مواد آلی احاطه شده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهند که ته‌نشینی مارن‌های خاکستری مرتبط با تغییرات سطح آب دریا بوده است که به سهم خود میزان ورود مواد آواری و آلی به حوضه را کنترل کرده است. در زمان ته‌نشینی شیل‌های ارغوانی زیرین، پایین‌بودن میزان کربن‌دی‌اکسید در جو باعث پایین‌بودن درجهٔ اسیدیتهٔ آب‌های دریایی و حفظ‌شدگی بهتر فسیل‌ها شده است. همچنین به‌دلیل پایین‌بودن نرخ رسوب‌گذاری و وورد مقادیر اندک مواد آلی، آهن آواری به‌صورت اکسید در داخل رسوبات قرار گرفته است. در مقابل، بخش‌های میانی سازند که تحت تأثیر رخداد PETM قرار گرفته‌اند، ورود مواد آواری قاره‌ای افزایش یافته و مواد آلی قاره‌ای با شدت بیشتری وارد حوضه شده‌اند؛ بنابراین رسوبات مربوط به این زمان رنگ تیره‌تری دارند. همچنین به‌دلیل بالابودن غلظت کربن‌دی‌اکسید در جو و اسیدی‌شدن آب‌ها، فراوانی فسیل‌ها در مارن‌های خاکستری کاهش چشمگیری داشته است. بالاآمدن سطح دریاها به‌دنبال رخداد گرمایشی باعث کاهش ورود مواد آلی و کاهش میزان ورود مواد آواری قاره‌ای به بخش‌های عمیق حوضه شده است. همچنین با کاهش غلظت کربن‌دی‌اکسید، میزان اسیدیتهٔ آب دریا پایین آمده و موجب فراوانی فسیل‌ها در شیل ارغوانی بالایی شده است. این نتایج، تأثیر متقابل بین تغییرات سطح آب، نرخ رسوب‌گذاری و pH آب را در کنترل ویژگی‌های پتروگرافی آلی سازند پابده در خلال رویداد PETM برجسته می‌کند. درک این روابط برای تفسیر دقیق‌تر تاریخچهٔ رسوبی حوضه‌های مشابه و ارزیابی شرایط محیط رسوبی دیرینه در حوضهٔ زاگرس راهگشاست.

https://doi.org/10.22108/jssr.2025.145497.1315

References

Agnini C. Fornaciari E. Raffi I. Catanzariti R. Palike H. Backman J. and Rio D. 2014. Biozonation and biochronology of Paleogene calcareous nannofossils from low and middle latitudes. Newsletters on Stratigraphy, 7(2): 131-181. https://doi.org/10.1127/nos/2014/0209

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

Alipour M. 2022. Organic facies and paleo-depositional environments of the Aptian–Albian Kazhdumi source rock in the Zagros basin of Iran. Marine and Petroleum Geology, 145:105887. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105887

Alipour M. 2023. Collision along irregular plate margin controlled the tectono-stratigraphic evolution of the Iranian Zagros fold and thrust belt. Marine and Petroleum Geology, 154:106311. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106311

Alipour M. 2024. Petroleum systems of the Iranian Zagros Fold and Thrust Belt: Results in Earth Sciences, 2: 100027. https://doi.org/10.1016/j.rines.2024.100027

Alipour M. 2025a. Hydrocarbon Generation/Expulsion and Migration in the ZFTB, in Alipour, M., ed., Basics of Petroleum Geochemistry, Springer, p. 93-110. https://doi.org/10.1007/978-3-031-86938-9_3

Alipour M. 2025b. Hydrocarbon Source Rocks, in Alipour, M., ed., Basics of Petroleum Geochemistry, Springer, p. 3-18. https://doi.org/10.1007/978-3-031-86938-9_1

Alipour M. 2025c. Petroleum Reservoirs and Seal Rocks of the ZFTB, in Alipour, M., ed., Basics of Petroleum Geochemistry, Springer, p. 77-92. https://doi.org/10.1007/978-3-031-86938-9_6

Alipour M. 2025d. Source Rocks of the Zagros Fold and Thrust Belt (ZFTB), in Alipour, M., ed., Basics of Petroleum Geochemistry, Springer, p. 57-76. https://doi.org/10.1007/978-3-031-86938-9_5

Amiri S. and Alipour M. 2023a. Organic facies and organic petrographic characteristics of the Pabdeh Formation in the Kilur-Karim Oilfield, SW Iran. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 39(3): 1-14. https://doi.org/10.22108/jssr.2023.139363.1270

Amiri S. and Alipour M. 2023b. Organic geochemical Evaluation of the Pabdeh Formation in the Siah-Makan Oilfield using Rock-Eval pyrolysis and organic petrographic methods. Advanced Applied Geology, 13(3):782-793. https://doi.org/10.22055/aag.2023.43214.2349

Ammari A. and Alipour M. 2024. Organic geochemistry and petrography of the early Cretaceous Garau Formation in the Kabir-Kuh Anticline, Ilam. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 40(3): 29-46. https://doi.org/10.22108/jssr.2024.142350.1294

Aubry M. 1998. Early Paleogene calcareous nannoplankton evolution: a tale of climatic amelioration, in Aubry, M., Lucas, S. G., and Berggren, W. A., eds., Late Paleocene–early Eocene Biotic and Climatic Events in the Marine and Terrestrial Records, Columbia University Press, p. 158-201.

Bordenave M. 2014. Petroleum systems and distribution of the oil and gas fields in the Iranian part of the Tethyan region. https://doi.org/10.1036/13431865M1063614

Bown P. R. and Young J. R. 1998. Techniques in Bown, P. R., ed., Calcareous Nannofossil Biostratigraphy: Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers, p. 16-28. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4902-0_2

Bustin R. M. Cameron A. R. Grieve D. A. and Kalkreuth W. D. 1985. Coal Petrology - its principles, methods, and applications, 250 p.

Gibbs S. J. Bralower T. J. Bown P. R. Zachos J. C. and Bybell L. M. 2006. Shelf and open-ocean calcareous phytoplankton assemblages across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. Implications for global productivity gradients. Geology, 34(4): 233-236. https://doi.org/10.1130/G22381.1

Hackley P. C. and Cardott B. J. 2016. Application of organic petrography in North American shale petroleum systems: A review. International Journal of Coal Geology, 163:8-51. http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2016.06.010

James G. and Wynd J. 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. AAPG bulletin, 49(12): 2182-2245. https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1306/A663388A-16C0-11D7-8645000102C1865D

Kahn A. and Aubry M.-P. 2004. Provincialism associated with the Paleocene/Eocene thermal maximum: temporal constraint. Marine Micropaleontology, 52(1-4): 117-131. https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2004.04.003

Khazami M. and Alipour M. 2024. Combining Rock-Eval pyrolysis and organic petrographic techniques to study the organic facies of the Pabdeh Formation in the Rag-e-Sefid Oilfield, SW Iran. Advanced Applied Geology, 14(1): 91-105. https://doi.org/10.22055/aag.2023.43221.2350

Khazami M. and Alipour M. 2025. Organic petrography and geochemistry of the Pabdeh Formation in Khaviz and Mansourabad anticlines, SW Iran. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 41(1): 79-97. https://doi.org/10.22108/jssr.2025.144148.1306

Martini E. 1971. Standard Tertiary and Quaternary calcareous nannoplankton zonation, in Proceedings 2nd International Conference on Planktonic Microfossils, Italy, p. 739-785

McInerney F. A. and Wing S. L. 2011. The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: A perturbation of carbon cycle, climate, and biosphere with implications for the future. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 39(1): 489-516. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040610-133431

Miller K. Schmelz W. Browning J. Rosenthal Y. Hess A. Kopp R. and Wright J. 2024. Global mean and relative sea-level changes over the past 66 Myr: implications for early Eocene ice sheets. Earth Science, Systems and Society, 4(1): 10091. https://doi.org/10.3389/esss.2023.10091

Motiei H, 1993. Stratigraphy of Zagros, in Hushmandzadeh, A., ed., Treatise of Geology of Iran, Volume 1: Tehran, Geological Survey of Iran, 536 p.

Perch-Nielsen K. 1985. Cenozoic calcareous nannofossils, in Bolli H. M. Saunders J. B. and Perch-Nielsen K. eds., Plankton Stratigraphy, Cambridge University Press, p. 427-554.

Peters K. E. Walters C. C. and Moldowan J. M. 2005. The biomarker guide, Cambridge university press, V. 1, 480 p

Piryaei A. and Davies R. B. 2024. Petroleum geology of the Cenozoic succession in the Zagros of SW Iran. A sequence stratigraphic approach. Journal of Petroleum Geology, 47(3): 1-56. https://doi.org/10.1111/jpg.12864

Safaei-Farouji M. Kamali M. R. and Hakimi M. H. 2021. Hydrocarbon source rocks in Kazhdumi and Pabdeh formations - A quick outlook in Gachsaran oilfield, SW Iran. Petroleum Exploration and Production Technology, 12:1489-1507. https://doi.org/10.1007/s13202-021-01413-w

Sharland P. R. Archer R. Casey D. M. Davies R. Hall S. H. Heward A. P. Horbury A. D. and Simmons M. 2001. Arabian plate sequence stratigraphy, Manama Bahrain, Gulf PetroLink, v. 4, 370 p.

Taylor G. H. Teichmüller M. Davis A. Diessel C. Littke R. and Robert P. 1998. Organic Petrology, Berlin, Stuttgart, Gebrüder Borntraeger, 704 p

Zachos J. C. Dickens G. R. and Zeebe R. E. 2008. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. Nature, 451(7176): 279-283. https://doi.org/10.1038/nature06588.