ششمین همایش ملی انجمن رسوب شناسی ایران
۱۳ الی ۱۵ بهمن ماه ۱۴۰۰
دانشگاه شهید چمران اهواز
Sponsored and Indexed by CIVILICA We Respect the Science
ISC 00210-59857

بررسی تغییرات ژئوشیمیایی رسوبات گذر آپتین/آلبین در سازند کژدمی (حوضه رسوبی زاگرس، جنوب غرب ایران)

هانیه قاینی، محمد حسین محمودی قرائی* ، جواد شریفی، سید رضا موسوی حرمی، محمد وحیدی نیا

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

- نویسنده مسئول: mhmgharaie@um.ac.ir

چکیده:

در آپتین-آلبین، کره زمین با شرایط بحرانی مانند افزایش شدید دما و حاکم شدن شرایط گلخانه ای همراه بود. این تغییرات اقلیمی در برخی سطوح منجربه افزایش نرخ ته نشست مواد آلی در دریاها شد که از پیامدهای رویداد OAE-1b بشمار می رود. در حوضه زاگرس واقع در بخش جنوبی اقیانوس نئوتتیس شرایط مشابهی بر گذر آپتین/آلبین حاکم بوده است که در رسوبات سازند کژدمی قابل مطالعه است. در این پژوهش سعی شده است با استفاده از پارامترهای ژئوشیمیایی TOC% و $CaCO_3$% برخی از تغییرات رخ داده در این بازه زمانی مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین تعداد ۶۰ نمونه از رسوبات در بردارنده گذر آپتین/آلبین سازند کژدمی به ضخامت ۴۵ متر، برای آنالیز TOC و $CaCO_3$ انتخاب و آماده سازی شد. منحنی مربوط به داده های TOC، نوسانات زیادی داشته اما تنها در یک لایه که در قاعده آلبین میباشد افزایش چشمگیری نشان می دهد (۵/۸٪) که با استفاده از اطلاعات بایواستراتیگرافی، میتوان آن را معادل شیل تیره Kilian و مرتبط با رویداد OAE-1b در نظر گرفت. همچنین نوسانات در منحنی $CaCO_3$ نیز زیاد بوده و دو روند عمده افزایش و کاهش را نشان می دهد که میتواند متاثر از تغییرات دمایی و اقیانوس شناسی مرز آپتین/آلبین باشد.

واژگان کلیدی: سازندکژدمی، فرامینیفر پلانکتون، آپتین/آلبین، شیل تیره، TOC

Geochemical variations across the Aptian/Albian transition of the Kazhdumi Formation

Haniyeh Ghayeni, M.H. Mahmudy Gharaie*, Javad Sharifi, Reza Mousavi Harami, Mohammad Vahidinia

Department of geology Faculty of sciences, Ferdowsi University of Mashhad

mhmgharaie@um.ac.ir*

Abstract

The Aptian/Albian (A/A) transition was coincides with drastic condition of high temperature and greenhouse in Earth's history. These condition led to deposition of high-organic sediments related to the OAE-1b event. During that time interval, the Zagros Basin in south of the Neo-Tethys suffered the same oceanographic conditions. The geochemical data including %TOC and %CaCO3 of 50 samples across the A/A transition in the Kazhdumi Formation are presented in this study. At the base of the Albian, a prominent black shale horizon is documented with sharp increase in TOC content to 5/8%, whereas the TOC values of other beds are rather constant and ranged between ~0.5% and ~2%. This bed has the appropriate age to correlate with the Early Albian world-wide "Kilian" black shale. Also, there are two major shifts in %CaCO3, and we suspect that the cause of these variations could be interpreted in terms of regional paleotemperature and paleoceanographic changes.

Keywords: Kazhdumi Formation, Planktonic foraminifera, Aptian/ Albian, Black shale, TOC

مقدمه:

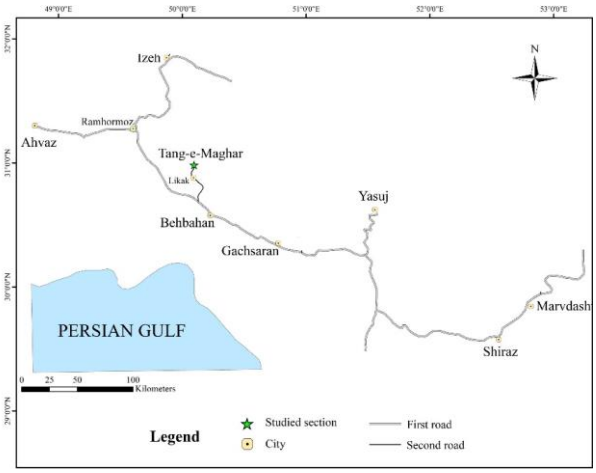
آب و هوای کره زمین در سرتاسر سیستم کرتاسه بصورت کلی منعکس کننده شرایط گرم و گلخانه ای بوده است که محققین زیادی علت این رخداد را مرتبط با فعالیت های آتشفشانی شدیدی میدانند که در این زمان و به دفعات رخ داده و به تشکیل

ایالت های بزرگ آذرین انجامید و باعث تزریق میزان بسیار زیادی گاز های گلخانه ای (CO_2 و CH_4) به اتمسفر و آب ها و در نتیجه گرم شدن آب و هوا شده است (e.g. Leckie et al., 2002). این تغییرات در مقیاس وسیع باعث کاهش بحرانی سطح اکسیژن در آب اقیانوس ها شده است که تحت عنوان رویدادهای OAEs (oceanic anoxic events) شناخته میشوند و در نتیجه آن خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی اقیانوس ها تغییر میکند (Leckie et al., 2002; Wilson et al., 2001). کاهش شدید سطح اکسیژن منجر به عدم تجزیه یا حفظ شدگی موثر ماده آلی در کف بستر اقیانوس ها و ته نشست گسترده این رسوبات شد که عمدتا بعنوان شیل های تیره (Black shales) شناخته میشوند. اقیانوس نئوتتیس در آپتین-آلبین نیز در اثر وجود همین شرایط پالئواکولوژیک، حاوی چندین افق شیل تیره است که در نتیجه تاثیرات رخداد OAE-1b بوجود آمده و توسط محققین بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است (Leckie et al., 2002; Herrle, 2004; Sabatino et al., 2015). فعالیت های تکتونیکی محلی و تغییرات آب و هوایی در اواخر آپتین سبب خشکی زایی در حاشیه شمال شرقی صفحه عربی شد که به همین دلیل رسوبات پیوسته دریایی مرز آپتین/آلبین منحصرا در بخش های عمیقتر حوضه دیده می شوند (e.g. van Buchem et al., 2010). یکی از این بخش های عمیق در حوضه رسوبی زاگرس و زیرزون فروافتادگی دزفول است، که در لایه های غنی از ماده آلی با سن آپتین-آلبین در سازند کژدمی شناسایی شده که یکی از مهم ترین سنگ منشاهای مواد هیدروکربوری بشمار می رود. توجه محققین به این سازند به دلیل وجود توالی پیوسته دریایی آپتین-آلبین ، بهمراه یک کنترل سنی مناسب باعث شد که مطالعات بایواستراتیگرافی و کمواستراتیگرافی زیادی بر روی این سازند انجام گیرد (Vincent et al., 2010; Maurer et al., 2013; Sharifi et al., 2021; Raisossadat et al., 2021; Mahanipour and Mutterlose, 2021). در این مطالعات برای اولین بار پراکندگی لایه های شیل تیره در برش تنگ ماغر (فروافتادگی دزفول) مورد بررسی قرار گرفت اما با توجه به تعداد کم نمونه ها و همچنین عدم کنترل سنی دقیق، مطالعات انجام شده نتایج کامل را به همرا نداشت. در این پژوهش ما سعی کرده ایم با کمک از جدیدترین پیشرفت های انجام گرفته در بایواستراتیگرافی رسوبات آپتین-آلبین در حوضه زاگرس، داده های دقیق تری از میزان و تغییرات TOC (total organic carbon) و همچنین تغییرات درصد کربنات ($CaCO_3$) ارائه داده، و به مطالعه عوامل و شرایطی که منجر به راسب شدن این مواد آلی شده بپردازیم.

زمین شناسی و چینه شناسی:

حوضه رسوبی زاگرس به دلیل دارا بودن مواد هیدروکربوری فراوان، از نظر تکتونیکی و چینه شناسی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است (e.g. Sherkati and Letouzey, 2004). از نظر جغرافیای دیرینه این منطقه در زمان آپتین-آلبین در حاشیه شرقی صفحه عربی و در مجاورت قسمت های جنوبی اقیانوس نئوتتیس واقع شده بوده و امروزه با توجه به ویژگی های تکتونیکی و رسوب شناسی به چهار زیرحوضه شامل، زون لرستان، فرافتادگی دزفول، زون ایذه و حوضه فارس تقسیم می شود که عموما بوسیله ی زون های گسلی از یکدیگر جدا شده اند (Motiei, 1994; Sherkati and Letouzey, 2004). برش چینه شناسی مورد مطالعه در این پژوهش برش تنگ ماغر بوده که در فروافتادگی دزفول واقع شده است و بدلیل جنبش های تکتونیکی محلی، نسبت به سایر زون های حوضه زاگرس در زمان آپتین-آلبین عمیقتر بوده است (Farzipour and Koyi, 2016). این برش در ۴۵ کیلومتری شمال شهر بهبهان و در نزدیکی روستای ماغر قرار دارد(شکل۱). تنوع لیتولوژی در این برش بسیار محدود بوده و شامل تناوبی از شیل و مارن های غنی از مواد آلی بهمراه آهک آرژیلیکی است (Vincent et al., 2010; Sharifi et al., 2021). توالی مورد بررسی شامل بخشی از رسوبات برش تنگ ماغر در مطالعه Sharifi et al. (2021)

میباشد که با لایه های گذر آپتین-آلبین به ضخامت ۴۵ متر مشخص میشوند و شامل تناوبی از شیل و مارن های خاکستری و آهک های آرژیلیکی مربوط به سازند کژدمی میباشد. عدم وجود اثرفسیل و ماکروفسیل ها و وجود رخساره های غنی از مواد آلی از جمله شواهد صحرایی در این قسمت از برش تنگ ماغر میباشند که میتوانند بیانگر یک محیط عمیق و کم اکسیژن باشند (Vincent et al., 2010; Sharifi et al., 2021).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

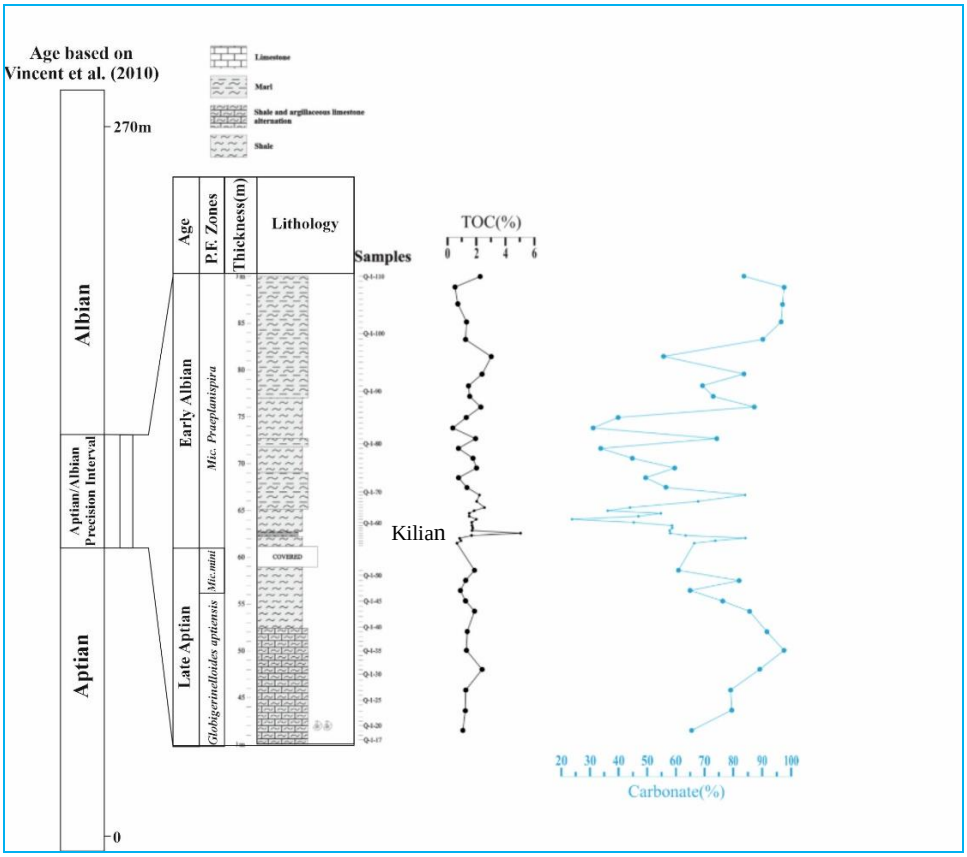
روش مطالعه:

به منظور بررسی محتوای ماده آلی (TOC) و همچنین تغییرات $CaCO_3$% در گذر آپتین/آلبین در برش تنگ ماغر، ۴۵ متر از این برش که در بردارنده مرز این دو آشکوب میباشد انتخاب و نمونه برداری شد. فاصله نمونه برداری، تقریبا ۵۰ سانتی متر بوده که در مرز آپتین/آلبین این فاصله به ۳۰ سانتی متر نیز کاهش یافته است. مجموعا ۵۰ نمونه برداشت شد که همه آنها برای آنالیز TOC و $CaCO_3$% مورد بررسی قرار گرفتند (شکل۲). آماده سازی نمونه ها برای آنالیز TOC به روش تیتراسیون انجام گرفت. به منظور آماده سازی نمونه ها برای اندازه گیری میزان کربنات کلسیم، پنج گرم از نمونه ای که کاملا پودر شده را در محلول اسید ضعیف حل نموده و پس از سانتریفیوژ نمونه ها، درصد کربنات کلسیم حل شده قابل اندازه گیری می باشد. تفسیر داده های TOC و $CaCO_3$% بر اساس مطالعات بایواستراتیگرافی انجام شده توسط Sharifi et al. (2021) صورت می گیرد.

تغییرات TOC% و $CaCO_3$%:

میزان TOC اندازه گیری شده در گذر آپتین/آلبین از Q-1-17 تا Q-1-110، بطور کلی بین ۰/۲ درصد تا ۳ درصد متغیر بوده که میانگین آن برابر با ۱/۷۵ درصد محاسبه شده است. تنها در نمونه Q-1-56 که در قاعده آشکوب آلبین قرار گرفته، میزان TOC بطور چشمگیری افزایش یافته و مقدار آن به ۵/۸ درصد می رسد که بعنوان تنها شیل تیره ثبت شده با ضخامت ۲۰ سانتی متر در گذر آپتین/آلبین شناخته میشود. نوسانات TOC در رسوبات آپتین بالایی، معادل زون های فرامینیفر *G. aptiensis* و *Mic. miniglobularis* از نمونه Q-1-17 تا Q-1-55 کم بوده و عموما بین ۰/۲ تا ۲ است. این در حالی است که میزان TOC از نمونه Q-1-56 تا انتهای برش (Q-1-110) نوسانات بیشتری داشته و میزان آن از ۰/۲ تا ۵/۸ درصد متغیر بوده

و تعداد افق های با میزان ماده آلی بالا نیز رو به افزایش است اما در گذر آپتین/آلبین تغییرات منجر به تشکیل شیل تیره شاخص دیگری بجز نمونه Q-1-56 نشده است. لازم به ذکر است افزایش تعداد افق های غنی از مواد آلی با توجه به ادامه روند افزایش دمای عمومی کره زمین و افزایش میزان گازهای گلخانه ای در آلبین سایر نقاط دنیا نیز گزارش شده است (see Leckie et al., 2002).



شکل۲: ستون چینه شناسی برش مورد مطالعه و منحنی تغییرات TOC% و $CaCo_3$%

در مورد داده های $CaCO_3$% بصورت کلی دو روند عمده در گذر آپتین/آلبین قابل مشاهده است. اول، در رسوبات آپتین بالایی و نزدیک مرز آپتین/آلبین یک روند کاهشی شدید در $CaCO_3$% از نمونه Q-1-35 به میزان ۹۸ درصد تا Q-1-61 به میزان ۲۵ درصد وجود دارد. این کاهش در میزان $CaCO_3$% میتواند متاثر از رخداد کوتاه مدت سرد شدگی انتهای آپتین باشد که هم در صفحه عربی (e.g. Maurer et al., 2013) و هم در سایر نقاط دنیا (e.g. Mutterlose, 2009) گزارش شده و قلمروهای پلاژیک و فونای پلانکتون را نیز تحت تاثیر قرار داده است. میزان نوسانات $CaCO_3$% در آلبین زیرین بیشتر از آپتین بالایی بوده اما بصورت کلی از نمونه Q-1-83 تا Q-1-93 یک روند افزایشی را دنبال می کند. میزان $CaCO_3$% در این قسمت بین بازه های ۲۵ درصد تا ۹۸ درصد متغیر است و میانگین درصد کربنات کلسیم در این قسمت حدود ۷۰ درصد محاسبه شده است.

بحث و نتایج:

چارچوب بایواستراتیگرافی

بازه زمانی آپتین/آلبین در سراسر دنیا با یک رویداد بحرانی در شرایط پالئواکولوژیک و همچنین کاهش شدید در تنوع و فراوانی موجودات شناخته میشود. انقراض گروهی بسیاری از مجموعه های پلانکتون و همچنین موجودات نکتون مانند آمونیت ها در این بازه زمانی رخ داده است. لذا تعیین سن و بایواستراتیگرافی این رسوبات همواره از مسائل چالش برانگیز و مهم بوده که مورد توجه محققیق بسیاری قرار گرفته است (Kennedy et al., 2014). در مورد سازند کژدمی و برش تنگ ماغر نیز محققان متعددی یک رخداد مهم زیستی را ثبت کرده اند که با کاهش شدید در فرامینیفرهای پلانکتون و آمونیت ها در نزدیکی مرز آپتین/آلبین شناخته میشود (Vincent et al., 2010; Sharifi et al., 2021). با توجه به عدم حضور آمونیت های شاخص در رسوبات گذر آپتین/آلبین، تفسیر سنی ارائه شده توسط Sharifi et al. (2021) صرفا بر اساس پراکندگی فرامینیفرهای پلانکتون انجام پذیرفته است و ما نیز در این پژوهش به منظور گزارش داده های %TOC و $\%CaCO_3$ از تعیین سن و الگوی بایواستراتیگرافی وی استفاده خواهیم کرد.

تطابق افق های شیل تیره در گذر آپتین/آلبین:

همانطور که در مقدمه ذکر شد با توجه به شرایط پالئواکولوژیک خاص در آپتین/آلبین که تقریبا بر تمام اقیانوس های جهان حاکم بوده، رخساره های غنی از مواد آلی در بسیاری از نقاط دنیا در نزدیکی مرز آپتین/آلبین راسب شده اند که از نظر سنی و جایگاه چینه شناسی قابل مقایسه و تطابق هستند (e.g. Sabatino et al., 2015). بررسی های دقیق بر روی این افق های چینه ای و مطالعه بر روی علل و عوامل تشکیل آنها میتواند اطلاعات ارزشمندی را در مورد شرایط آب و هوایی و اقیانوس شناسی آن زمان به دست بدهد. با توجه به سن و جایگاه چینه شناسی هر یک از این لایه های شیل تیره اسامی مختلفی برای آنها در نظر گرفته شده است (Kennedy et al., 2014). افق شیل تیره Kilian با سن آلبین زیرین یکی از این لایه ها میباشد که ابتدا از جنوب فرانسه گزارش شد (Kennedy et al., 2014) و سپس با توسعه مطالعات در سایر نواحی دنیا نیز به ثبت رسید. در حوضه زاگرس و برش تنگ ماغر نیز پیش از این یک افق شیل تیره در گذر آپتین/آلبین توسط Vincent et al. (2010) گزارش شده بود اما با توجه به فاصله زیاد نمونه برداری در این بازه زمانی و همچنین عدم وجود کنترل سنی مناسب، جایگاه چینه شناسی آن در هاله ای از ابهام قرار داشت و امکان تطابق دقیق آن با سایر افق های شیل تیره در سایر نواحی دنیا فراهم نبود. در این مطالعه برای اولین بار و با تکیه بر چارچوب بایواستراتیگرافی دقیق ارائه شده توسط Sharifi et al. (2021) نمونه شیل تیره شماره Q-1-56 که از نظر سنی در قاعده آشکوب آلبین قرار دارد را میتوان معادل محلی شیل تیره Kilian دانست که در همین زمان در بسیاری از حوضه های رسوبی اعم از آتلانتیک، نئوتتیس شمالی و جنوبی و همچنین اقیانوس هند گزارش شده است (Huber et al., 2011; Coccioni et al., 2014; Kennedy et al., 2017).

نتیجه گیری:

تعیین سن و مطالعات بایواستراتیگرافی رسوبات گذر آپتین/آلبین در برش چینه شناسی تنگ ماغر با بهره گیری از فرامینیفرهای پلانکتون انجام پذیرفته و بر این اساس گذر آپتین/آلبین با سه بایوزون *Globigerinelloides aptiensis* و *Microhedbergella miniglobularis* در آپتین فوقانی و *Microhedbergella praeplanispira* در آلبین زیرین تفکیک شده است. مرز آپتین/آلبین نیز منطبق بر اولین حضور *Microhedbergella praeplanispira* تعیین شده است. تغییرات %TOC نشان دهنده یک شیل تیره در قاعده آشکوب آلبین و در نمونه شماره Q-1-56 است که بر تطابق داده های بایواستراتیگرافی میتواند معادل شیل تیره Kilian باشد که از رسوبات آپتین/آلبین در سراسر دنیا گزارش شده است. تغییرات اقلیمی و ژئوشیمیایی در آپتین-آلبین نظیر افزایش دما و افزایش CO_2 ناشی از فعالیتهای ولکانیکی شدید، منجر به ایجاد یک شرایط

بحرانی برای موجودات زنده شد که در نهایت به انقراض گروهی موجودات پلانکتون و نکتون انجامید. تحت شرایط ذکر شده میزان ته نشینی و حفظ شدگی مواد آلی در رسوبات نیز بیشتر از پیش شد و سبب تشکیل افق هایی از شیل های تیره گردید. تغییرات $CaCO_3$% در ابتدای برش یک روند کاهشی را دنبال می کند که می تواند ناشی از رخداد سردشدگی در آپتین پسین باشد که در سایر نقاط دنیا نیز گزارش شده است اما پس از پایان آپتین و ورود به آشکوب آلبین پیشین، شاهد روند افزایشی $CaCo_3$% می باشیم.

References

Coccioni, R., Sabatino, N., Frontalini, F., Gardin, S., Sideri, M., Sprovieri, M., 2014. The neglected history of Oceanic Anoxic Event 1b: insights and new data from the Poggio le Guaine section (Umbria-Marche Basin). Stratigraphy 11, 245e282.

Farzipour-Saein, A., Koyi, H., 2016. Intermediate decollement activation in response to the basal friction variation and its effect on folding style in the Zagros fold-thrust belt, an analogue modeling approach. Cretaceous Research 687, 56e65

Herrle, J.O., Koßler, P., Friedrich, O., Erlenkeuser, H., Hemleben, C., 2004. High resolution carbon isotope records of the Aptian to lower Albian from SE France and the Mazagan Plateau (DSDP Site 545): a stratigraphic tool for paleoceanographic and paleobiologic reconstruction. Earth and Planetary Science Letters 218, 149e161.

Huber, B.T., Leckie, M., 2011. Planktic foraminiferal species turnover across deep sea Aptian/Albian boundary sections. Journal of Foraminiferal Research 41,53e95.

Kennedy, W.J., Gale, A.S., Huber, B.T., Petrizzo, M.R., Bown, P., Barchetta, A., Jenkyns, H.C., 2014. Integrated stratigraphy across the Aptian/Albian boundary at Col de Pr_e- Guittard (southeast France): a candidate Global Boundary Stratotype Section. Cretaceous Research 51, 248e259.

Kennedy,W.J., Gale, A.S., Huber, B.T., Petrizzo, M.R., Bown, P., Jenkyns, H.C., 2017. The Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Albian Stage, of the Cretaceous, the Col de Pre-Guittard section, Arnayon, Drome, France. Episodes 40, 177e188.

Leckie, R.M., Bralower, T.J., Cashman, R., 2002. Oceanic anoxic events and plankton evolution: biotic response to tectonic forcing during the mid-Cretaceous. Paleoceanography 17, 13e29.

Mahanipour, A., Mutterlose, J., Parandavar, M., 2021. Integrated bio- and chemostratigraphy of the Cretaceous – Paleogene boundary interval in the Zagros Basin (Iran, central Tethys). Cretaceous Research 587, 110785.

Maurer, F., van Buchem, S.P.F., Eberli, G.P., Pierson, B.J., Raven, M.J., Larsen, P.H., Al- Husseini, M.I., Vincent, B., 2013. Late Aptian long-lived glacio-eustatic lowstand recorded on the Arabian Plate. Terra Nova 25, 87e94.

Motiei, H., 1994. Stratigraphy of the Zagros, Treatise on the Geology of Iran. Geological survey of Iran (in Farsi).

Mutterlose, J., Pauly, S., Steuber, T., 2009. Temperature controlled deposition of early Cretaceous (Barremian–early Aptian) black shales in an epicontinental sea. Cretaceous Research 273, 330 e345.

Raisossadat, S.N., Latil, J.L., Hamdini, H., Jaillard, E., Amiribakhtiar, H., 2021. The Kazhdumi Formation (Lower Cretaceous, upper Aptian–upper Albian) in the Zagros Basin, Iran. Cretaceous Research 127, 104920.

Sabatino, N., Coccioni, R., Salvagio Manta, D., Baudin, F., Vallefuoco, M., Traina, A., Sprovieri, M., 2015. High-resolution chemostratigraphy of the late Aptian-early Albian oceanic anoxic event (OAE 1b) from the Poggio le Guaine section (Umbria-Marche Basin, central Italy). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 426, 319e333.

Sharifi, J., Vahidinia, M., Ando, A., Mahmudy-Gharaie, M.H., 2021. New biostratigraphic observations of planktonic foraminifera and ammonites on the Aptian Albian intrashelf succession, Zagros Basin, SW Iran. Cretaceous Research 128, 104996.

Sherkati, S., Letouzey, J., 2004. Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (Izeh zone and Dezful Embayment), Iran. Marine and Petroleum Geology 21, 535e554.

Vincent, B., Buchem, F.S.P. van, Bulot, L.G., Immenhauser, A., Caron, M., Baghbani, D., Huc, A.Y., 2010. Carbon-isotope stratigraphy, biostratigraphy and organic matter distribution in the Aptian e lower Albian successions of southwest Iran (Dariyan and Kazhdumi Formations). In: van Buchem, F.S.P., Al-Husseini, M.I., Maurer, F., Droste, H.J. (Eds.), BarremianeAptian Stratigraphy and Hydrocarbon Habitat of the Eastern Arabian Plate, vol. 2. GeoArabia, Gulf PetroLink, Bahrain, pp. 139e197. Special Publication 4.

van Buchem, F.S.P., Baghbani, D., Bulot, L.G., Caron, M., Gaumet, F., Hosseini, S.A., Keyvani, F., Schroeder, R., Swennen, R., Vedrenne, V., Vincent, B., 2010. Barremian- Lower Albian sequence-stratigraphy of southwest Iran (Gadvan, Dariyan and Kazhdumi formations) and its comparison with Oman, Qatar and the United Arab Emirates. In: van Buchem, F.S.P., Al-Husseini, M.I., Maurer, F. & Droste, H.J. (eds) Barremiane Aptian Stratigraphy and Hydrocarbon Habitat of the Eastern Arabian Plate. GeoArabia Special Publication 2, 503e548.

Wilson, P.A., Norris, R.D., 2001. Warm tropical ocean surface and global anoxia during the mid-Cretaceous period. Nature 412, 425e428.