

ردیابی رخداد بی‌هوازی جهانی کاپیتانین (سری گوادالوپین) و تأثیر چرخه‌های میلانکوویچ بر توسعه آن در بخش‌های ساحلی و فراساحلی خلیج فارس

امید فلاحت‌خواه^۱، عباس قادری^{۲*}، علی کدخدایی^۳

۱- دانشجوی دکتری چینه‌نگاری و دیرینه‌شناسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*پست الکترونیک: aghaderi@um.ac.ir

چکیده

رخدادهای بی‌هوازی اقیانوسی یکی از حساس‌ترین و جالب‌ترین وقایع در تاریخچه زمین‌شناسی محسوب می‌شوند و بررسی آنها به روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است. در این مطالعه رخداد بی‌هوازی کاپیتانین (سری گوادالوپین) از عضو تبخیری نار سازند دالان در میدین سلمان و هما به کمک بررسی افزایش ناگهانی عنصر اورانیوم سنجیده شده است. با شناسایی چرخه‌های میلانکوویچ و بررسی شدت طیفی آن‌ها، مشخص شد شکوفایی رخداد بی‌هوازی کاپیتانین مصادف با شرایط آب و هوایی تحت تأثیر چرخه خروج از مرکز بوده است. این رخداد در بازه‌های شدت طیفی بالای چرخه خروج از مرکز و شدت طیفی پایین چرخه‌های انحرافی و تقدیمی توسعه یافته است. رابطه بین خروج از مرکز و رویدادهای بی‌هوازی شامل سازوکارهای بازخورد پیچیده می‌باشد. به عنوان مثال، تغییرات در گردش اقیانوس و دما می‌تواند بر باروری بوم‌سازگان دریایی تأثیر بگذارد. افزایش باروری می‌تواند به غرق شدن مواد آلی در کف اقیانوس منجر شود و وقتی این مواد آلی در شرایط کم اکسیژنی تجزیه شوند، می‌توانند سطح اکسیژن را بیشتر کاهش داده و به توسعه رخدادهای بی‌هوازی کمک کنند.

واژه‌های کلیدی: پالئوژئیک پسین، عضو تبخیری نار، چرخه‌های مداری، اورانیوم.

Tracing the Capitanian global anoxic event (Middle Permian) and the effect of Milankovitch cycles on its development in the coastal and offshore parts of the Persian Gulf

Omid Falahatkah¹, Abbas Ghaderi^{2*}, Ali Kadkhodaie³

1-Ph.D. student in Paleontology & Stratigraphy, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Professor, Department of Geology, Faculty of Natural Science, Tabriz University, Tabriz, Iran

Email: aghaderi@um.ac.ir

Abstract

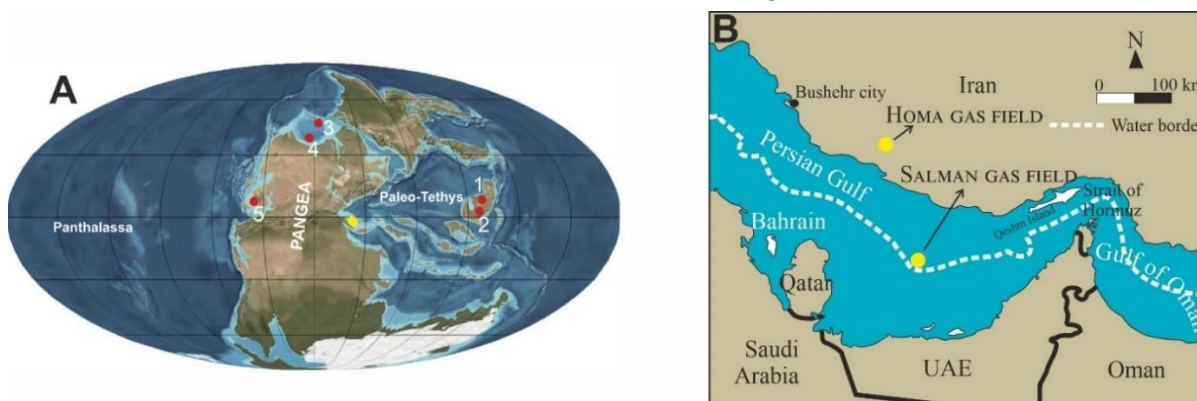
Oceanic anoxic events are highly significant and captivating occurrences in Earth's history. The Capitanian (Middle Permian) anoxic event from the Nar evaporitic member of the Dalan Formation in the Salman and Homa gas fields has been identified by the sudden rise in uranium element. The flourishing of Capitanian's anoxic event happened at the same time as a climate change forced by eccentricity, as identified by examining the spectral powers of Milankovitch cycles. This event occurs during the periods of maximum eccentricity and minimum obliquity and precession. The relationship between eccentricity and anoxic events has intricate feedback mechanisms. Ocean circulation and temperature changes can impact marine ecosystem fertility. More fertility can cause organic matter to sink and decompose under hypoxic conditions, reducing oxygen levels and contributing to anoxic event development.

Key words: Late Paleozoic, Nar evaporitic member, Orbital cycles, Uranium.

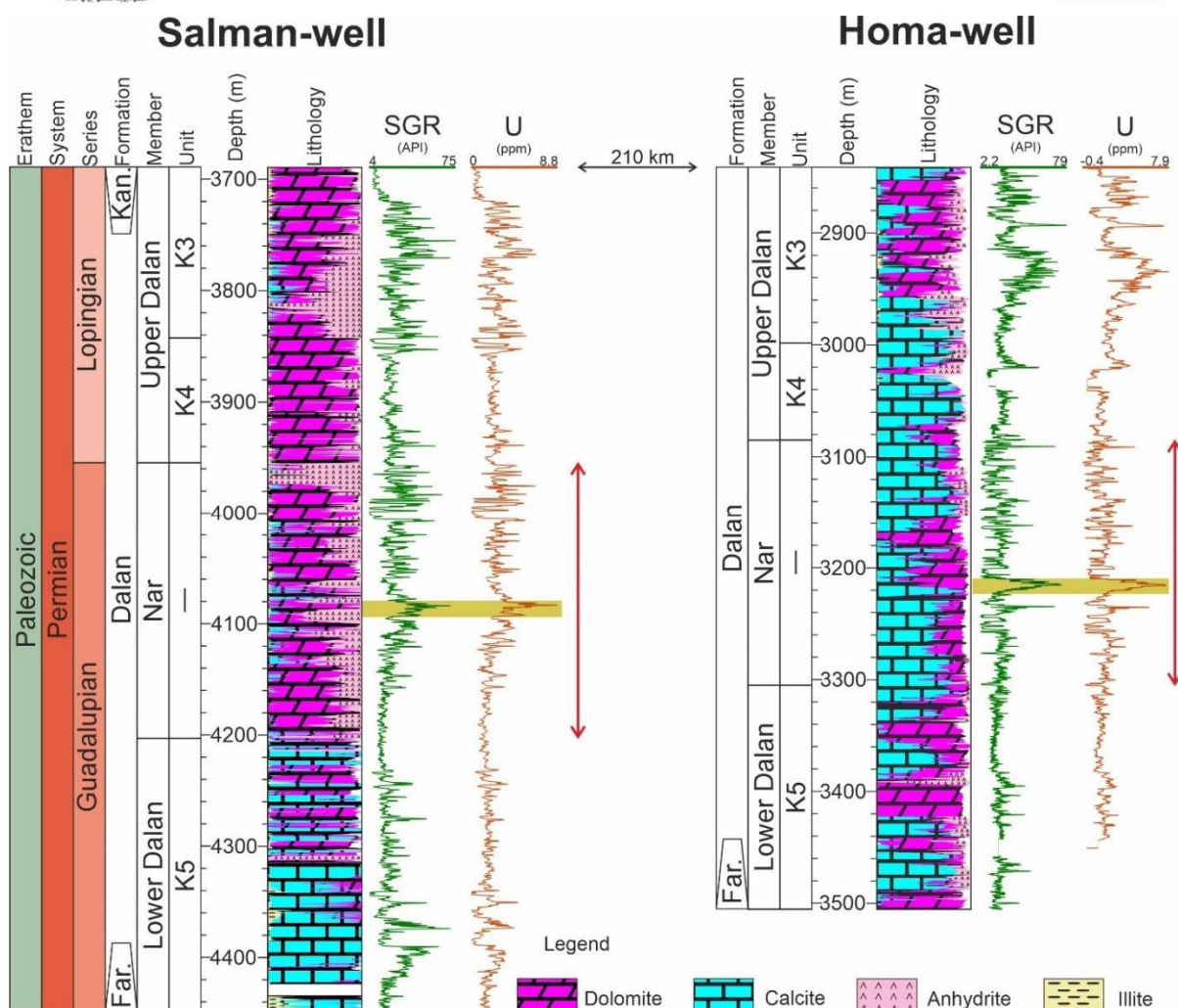
مقدمه

در اواخر اشکوب کاپیتانین از سری گوادالوپین (= پرمین میانی)، رویداد انقراضی گسترده‌ای به ویژه در عرض‌های جغرافیایی بالا گزارش شده است (Shen & Shi, 2009). پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که این رویداد انقراضی تحت تأثیر محرک‌هایی همچون فعالیت‌های آتش‌فشانی، رخدادهای بی‌هوازی اقیانوسی جهانی و اسیدی شدن گسترده زیست بوم موجودات اتفاق افتاده است (Bond *et al.*, 2020). رخداد بی‌هوازی کاپیتانین در چندین محل متفاوت از جمله جنوب چین، نروژ، کانادا و آمریکا (شکل ۱A) توسط نشانگرهای ژئوشیمیایی ثبت شده است (Song *et al.*, 2023). عنصر اورانیوم به طور معمول به عنوان یکی از نشانگرهای مهم آب و هوایی و رخدادهای بی‌هوازی در توالی‌های رسوبی محسوب می‌شود (Lau *et al.*, 2019). رسوبات پرمین در خلیج فارس و جنوب باختر ایران با سازندهای فراقان (سیشورالین) و دالان (گوادالوپین و لوپینگین) شناخته می‌شوند. سازند دالان که به لحاظ سنگ‌چینه‌نگاری به سه عضو زیرین، میانی (تبخیری نار) و بالایی تقسیم می‌شود، بر اساس محتوای روزن‌داران بزرگ خود به سن گوادالوپین - لوپینگین منتسب شده است به طوری که عضو زیرین دالان با سن وردین - کاپیتانین، عضو تبخیری نار با سن کلی کاپیتانین بالایی و عضو بالایی دالان با سن ووچاپینگین - چانگزینگین شناخته می‌شود (Insalaco *et al.*, 2006; Kolodka *et al.*, 2012).

در پژوهش‌های پیشین انجام شده بر روی سازند فراقان و عضو بالایی دالان، فرکانس چرخه‌های میلانکوویچ [حرکت خروج از مرکز محور زمین (Eccentricity)، حرکت انحرافی محور چرخش زمین (Obliquity) و حرکت تقدیمی محور زمین (Precession)] ثبت و گزارش شده است (Falahatkah *et al.*, 2021, 2023). چرخه‌های میلانکوویچ یا مداری یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر آب و هوا، محیط، انواع فرآیندهای زمین‌شناسی (شروع آتش‌فشان، سطح آب دریا، تبادل آب دریا با خشکی و غیره) و دیگر موارد می‌باشند. نمودارهای چاه یکی از بهترین پراکسی‌های آب و هوای دیرینه محسوب می‌شوند که از طریق انواع روش‌های تحلیل طیفی در آشکارسازی چرخه‌های مداری در رسوبات نقش ایفا می‌کنند (Falahatkah *et al.*, 2021, 2023). مطالعه حاضر بر عضو تبخیری نار تمرکز داشته و با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی در دو چاه مختلف از میدین گازی ساحلی (هما) و فراساحلی (سلمان)، تغییرات چرخه‌های میلانکوویچ و تأثیرات آن بر رخداد بی‌هوازی کاپیتانین را بررسی کرده است. عضو تبخیری نار که از انیدریت، دولومیت، سنگ‌آهک و مقداری شیل تشکیل شده است، در چاه سلمان و چاه هما به ترتیب ۲۴۸/۷ متر و ۲۱۹/۹ متر ستبرا دارد (شکل ۲).



شکل ۱: (A) نقشه جغرافیای دیرینه گوادالوپین (۲۶۲ میلیون سال پیش): دایره‌های قرمز رنگ (۱ و ۲: جنوب چین، ۳: نروژ، ۴: کانادا، ۵: آمریکا) و زرد رنگ (محل مورد مطالعه در این پژوهش)، محل‌هایی را نشان می‌دهند که رخداد بی‌هوازی از آن جا ثبت و گزارش شده است (با تغییرات اندک از Song *et al.*, 2023)؛ (B) نقشه چاه‌های مورد مطالعه در خلیج فارس (با تغییرات اندک از Falahatkah *et al.*, 2023).

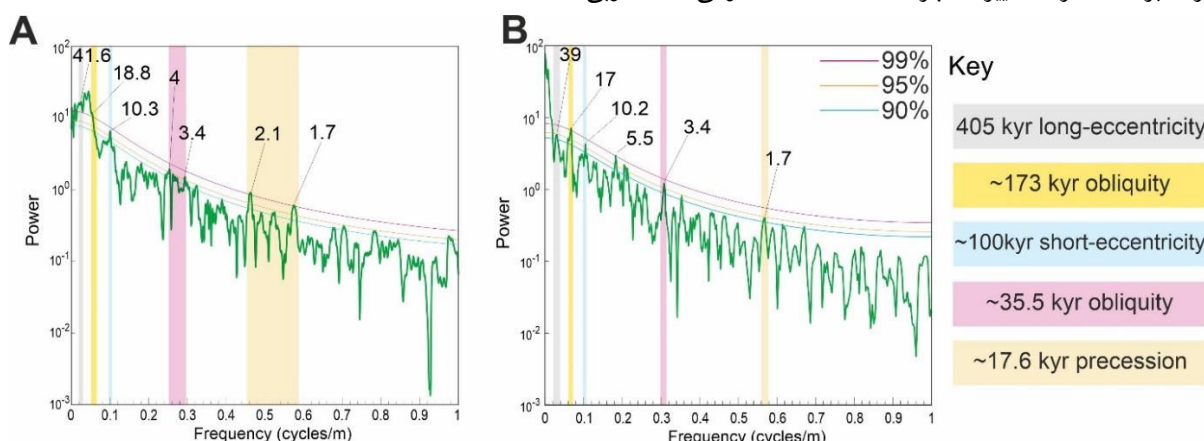


شکل ۲: چینه‌شناسی سازند دالان در دو چاه مورد مطالعه در میادین سلمان و هما؛ بازه‌ی زرد رنگ افزایش خاص اورانیوم و رخداد بی‌هوازی گوادالوپین را نشان می‌دهد. پیکان قرمز رنگ محدوده‌ی مورد مطالعه یعنی عضو تبخیری نار را نمایش می‌دهد.

روش مطالعه

چرخه‌های میلانکوویچ از طریق اعمال روش‌های تحلیل طیفی در نرم‌افزار (مبتنی بر مطلب) A-cycle (Li *et al.*, 2019) بر روی نمودارهای اورانیوم دو چاه مورد مطالعه شناسایی شده‌اند. ابتدا فرکانس این چرخه‌های مداری با روش دوره‌نگار چند کاهنده (Multi-tapper periodogram) آشکار و با مقایسه مطالعات قبلی (Falahatkah *et al.*, 2021, 2023) تفسیر شده است (شکل ۳). با بررسی نتایج دوره‌نگار چند کاهنده، یک کاهش در نرخ رسوب‌گذاری نار نسبت به عضو بالایی دالان محرز می‌گردد، طوری که چرخه بلند مدت خروج از مرکز محور زمین (چرخه ۴۰۵ هزار ساله) در فراقان و عضو بالایی دالان در دامنه حدود ۵۰ متر (نرخ رسوب‌گذاری = ۱۲/۵ سانتی‌متر در هر هزار سال) مشخص شده (Falahatkah *et al.*, 2021, 2023)، در حالی که در این جا همان چرخه در عضو نار در حدود دامنه ۴۰ متر (۱۰ سانتی‌متر در هر هزار سال) مشاهده می‌شود (شکل ۳). باقی چرخه‌ها نیز دقیقاً با چرخه‌هایی که از سازند فراقان گزارش شده همخوانی دارند و بدین ترتیب چرخه‌های ۱۸/۷ و ۱۷ متری به عنوان یکی از تغییرات بلندمدت چرخه انحرافی محور چرخش زمین (۱۷۳ هزار ساله)، چرخه‌های ۱۰ متری به عنوان چرخه کوتاه مدت خروج از مرکز محور زمین (چرخه ۱۰۰ هزار ساله)، چرخه‌های ۳ و ۴ متری به عنوان چرخه انحرافی محور چرخش زمین (۳۵/۵ هزار ساله) و چرخه ۱/۷ متری به عنوان تقدیمی محور زمین (۱۷/۶ هزار ساله) تفسیر می‌شوند (Falahatkah *et al.*, 2023). با استفاده از

عملکرد فیلترینگ چرخه‌های مداری (چرخه‌های ۴۰۵ هزار ساله و ۳۵/۵ هزار ساله) از منحنی اورانیوم استخراج شدند. سپس با ترکیب کردن (tuning) فیلتر چرخه‌های پایدار ۴۰۵ هزار ساله با نمودار اورانیوم، دامنه داده‌ها از عمق چینه‌شناسی به زمان نجومی تغییر داده شد. با این کار یک مقیاس زمان نجومی برای عضو تبخیری نار ایجاد شد. در ادامه به منظور بررسی تغییرات آب و هوایی تحت تأثیر چرخه‌های میلانکوویچ از روش تحلیل تجزیه شدت (Power decomposition analysis) استفاده شد. این روش در امتداد یک پنجره زمانی ۵۰۰ هزار ساله کشویی (sliding 500-kyr time window) بین دو بسامد منقطع (cutoff) انجام شده است. با این کار، دامنه تغییرات شدت هر یک از چرخه‌های مداری مشخص شد (شکل ۴). روش ذکر شده یکی از نوین‌ترین تحلیل‌ها برای برجسته کردن تغییرات چرخه‌های مداری در توالی‌های رسوبی است (Li et al., 2019).



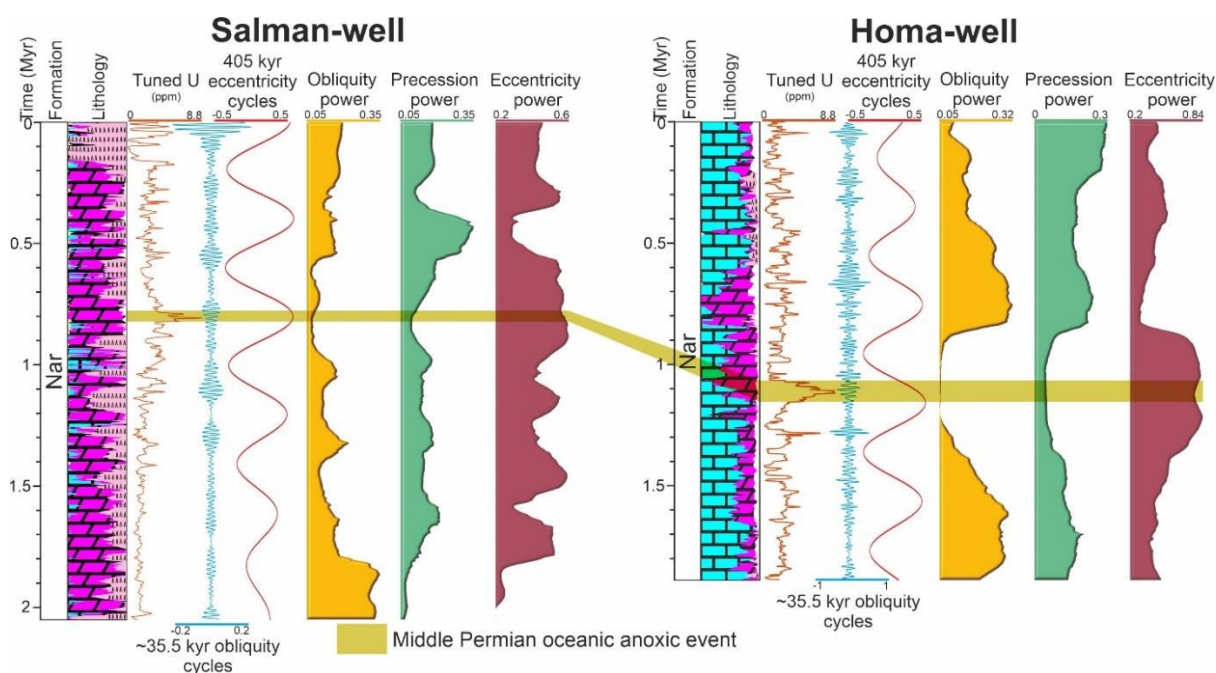
شکل ۳- نتایج روش دوره‌نگار چند کاهنده بر روی نمودار اورانیوم در دو چاه مورد مطالعه؛ (A) چاه سلمان. (B) چاه هما.

بحث

در یک توالی رسوبی این احتمال وجود دارد که تکراری از لایه‌های نازک لایه به یک باره تغییر یافته و به لایه‌های ستر لایه تبدیل شوند (یا برعکس). این تغییرات ممکن است مطابق با تغییرات آب و هوایی تحت تأثیر چرخه‌های مداری اتفاق افتاده باشد. به بیان دیگر، در یک بازه زمانی، ته‌نشست رسوبات تحت تأثیر چرخه ۳۵/۵ هزار ساله بوده و لایه‌های نازک حاصل شده‌اند؛ اما در ادامه با تغییر ناگهانی شرایط، ته‌نشست رسوبات تحت تأثیر چرخه‌های ۴۰۵ هزار ساله بوده و لایه‌هایی ستر در توالی رسوبی به وجود آمده‌اند. نمونه واقعی از این مورد، رسوبات اردوئیسین میانی حوضه تاریم در چین است (Fang et al., 2019). در چنین شرایطی، تغییرات آب و هوایی تحت تأثیر چرخه‌های مداری می‌تواند محرک انواع رویدادها و پدیده‌های دیگر همچون رخدادهای بی‌هوازی، سطوح خیزش یا افت سطح آب دریا، آغاز دوران یخچالی یا گلخانه‌ای و غیره باشد (Falathkha et al., 2023). در این پژوهش نیز رخداد بی‌هوازی اقیانوسی اشکوب کاپیتانین از سری گوادالوپین در عضو تبخیری نار با بیشینه مقادیر اورانیوم (۸/۷۵ ppm در چاه سلمان و ۷/۶۴ ppm در چاه هما) قابل ردیابی می‌باشد.

به طور جالبی، در هر دو چاه مورد مطالعه در هنگام شکوفایی رخداد بی‌هوازی کاپیتانین، شدت طیفی چرخه‌های خروج از مرکز در بیشینه‌ترین حالت و شدت طیفی چرخه‌های انحرافی و تقدیمی در کمینه‌ترین حالت خود هستند که این شرایط نشان می‌دهد که در زمان آغاز رخداد بی‌هوازی کاپیتانین، آب و هوا تحت تأثیر نیروهای مداری چرخه‌های خروج از مرکز بوده (eccentricity-) dominating است (شکل ۴). سیاره زمین اگر تحت تأثیر چرخه خروج از مرکز قرار بگیرد می‌تواند در دوره‌های بیشینه این چرخه، به تغییرات شدیدتر در فاصله زمین و خورشید منجر شود که این می‌تواند دمای کلی سیاره را تحت تأثیر قرار دهد. هنگامی که خروج از مرکز زیاد باشد، تفاوت بین دمای تابستان و زمستان بارزتر می‌شود و به طور بالقوه بر گردش و چینه‌بندی اقیانوس‌ها تأثیر می‌گذارد. همزمانی خروج از مرکز زیاد با رویدادهای بی‌هوازی نشان می‌دهد که تغییرات در گردش اقیانوس در طول دوره‌های خروج از مرکز زیاد، به توسعه شرایط بدون اکسیژن کمک کرده است. انحراف (obliquity) کم باعث کاهش تغییرات

فصلی دما می‌شود که این می‌تواند بر توزیع گرما در اقیانوس تأثیر بگذارد و به طور بالقوه به ایستایی در مناطق خاص منجر شده و به توسعه شرایط بی‌هوازی کمک کند. ترکیبی از این عوامل مداری نیز می‌تواند بر باروری بوم‌سازگان دریایی تأثیر بگذارد. انحراف کمتر ممکن است به کاهش فرآیندهای فراچاهش (upwelling) فصلی مواد مغذی منجر شود و بر باروری اولیه در اقیانوس‌ها تأثیر بگذارد که این می‌تواند در دسترس بودن مواد آلی و پتانسیل تجزیه بعدی آن در شرایط بدون اکسیژن را متأثر سازد (Thomas *et al.*, 2016). خروج از مرکز زیاد همچنین می‌تواند بر چرخه مواد مغذی در اقیانوس‌ها اثر کند. افزایش تغییرات دمایی و گردش اقیانوس نیز می‌تواند بر در دسترس بودن مواد مغذی برای موجودات دریایی تأثیر بگذارد. رویدادهای بی‌هوازی ممکن است با حداکثر خروج از مرکز همخوانی داشته باشند، زیرا این تغییرات چرخه مواد مغذی را مختل نموده و به طور بالقوه شرایطی را که به کاهش اکسیژن می‌انجامد، مطلوب می‌کنند (Houben *et al.*, 2013). رابطه بین خروج از مرکز و رویدادهای بی‌هوازی ممکن است شامل سازوکارهای بازخورد پیچیده باشد. به عنوان مثال، تغییرات در گردش اقیانوس و دما می‌تواند بر باروری بوم‌سازگان دریایی تأثیر گذارد. افزایش باروری می‌تواند به غرق شدن مواد آلی در کف اقیانوس منجر شود که وقتی در شرایط کم‌اکسیژنی تجزیه می‌شوند، سطح اکسیژن را بیشتر کاهش داده و به توسعه رخدادهای بی‌هوازی کمک کنند.



شکل ۴: بررسی شدت طیفی چرخه‌های میلانکوویچ در عضو نار در دو برش زیرسطحی متفاوت؛ در چاه سلمان، چرخه خروج از مرکز و چرخه انحرافی به ترتیب با باند گذرهای 0.02 ± 0.23 (cycles/kyr) و 0.1 ± 0.26 (cycles/kyr) از نمودار اورانیوم استخراج شده است. شدت طیفی چرخه‌های خروج از مرکز، انحرافی و تقدیمی به ترتیب با باند گذرهای 0.003 ± 0.020 ، 0.010 ± 0.24 و 0.02 ± 0.08 kyr⁻¹ حاصل شده است. در چاه هما نیز چرخه خروج از مرکز و چرخه انحرافی به ترتیب با باند گذرهای 0.02 ± 0.236 و 0.1 ± 0.24 از نمودار اورانیوم استخراج شده است. شدت طیفی چرخه‌های خروج از مرکز، انحرافی و تقدیمی به ترتیب با باند گذرهای 0.003 ± 0.021 ، 0.010 ± 0.23 و 0.02 ± 0.08 kyr⁻¹ حاصل شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش رخداد بی‌هوازی کاپیتانین در رسوبات ساحلی (میدان گازی هما) و فراساحلی (میدان گازی سلمان) خلیج فارس با استفاده تغییرات عنصر اورانیوم شناسایی شد. زمان شکوفایی این رخداد مصادف با شدت زیاد چرخه خروج از مرکز (۴۰۵ هزار ساله) و شدت کم چرخه‌های انحرافی (۳۵.۵ هزار ساله) و تقدیمی (۱۷.۶ هزار ساله) می‌باشد که این نشان می‌دهد احتمالاً آب و هوای تحت تأثیر چرخه ۴۰۵ هزار ساله در شکوفایی این رخداد نقش مهمی ایفا کرده است.

References

- Bond, D.P., Wignall, P.B., & Grasby, S.E., 2020. The Capitanian (Guadalupian, Middle Permian) mass extinction in NW Pangea (Borup Fiord, Arctic Canada): A global crisis driven by volcanism and anoxia. *GSA Bulletin*, 132 (5-6): 931-942.
- Falahatkhah, O., Kadmehdadi, A., Ciabeghods, A.A., & Wood, D.A., 2021. Astronomical forcing variations of the upper dalan member (late permian) in the South Pars gas field, Persian Gulf, Iran. *Journal of Asian Earth Science*, 209: 104689.
- Falahatkhah, O., Serajamani, M., Kadmehdadi, A., Aifa, T., Ebrahimi, S., Ciabeghods, A.A., Vahidinia, M., & Ghaderi, A., 2023. Orbital obliquity evolution during the late Paleozoic ice age across the northeastern gondwana: Implications for regional sea-level change trigger and reservoir quality assessment. *Marine and Petroleum Geology*, 153: 106312.
- Fang, Q., Wu, H., Wang, X., Yang, T., Li, H., & Zhang, S., 2019. An astronomically forced cooling event during the Middle Ordovician. *Global and Planetary Change*, 173: 96-108.
- Houben, A.J.P., Bijl, P.K., Pross, J., Bohaty, S.M., Passchier, S., C.E. Stickley, U. Röhl, Sugisaki, S., Tauxe, L., van de Flierdt, T., Olney, M., Sangiorgi, F., Sluijs, A., Escutia, C., Brinkhuis, H., & the Expedition 318 Scientists, 2013. Reorganization of Southern Ocean plankton ecosystem at the onset of Antarctic glaciation. *Science*, 340 (6130): 341-344.
- Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillot, J., Kamali, M., Moallemi, A., Lotfpour, M., & Monibi, S., 2006. Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture. *GeoArabia*, 11 (2): 75-176.
- Kolodka, C., Vennin, E., Vachard, D., Trocme, V., & Goodarzi, M.H., 2012. Timing and progression of the end-Guadalupian crisis in the Fars province (Dalan Formation, Kuh-e Gakhum, Iran) constrained by foraminifers and other carbonate microfossils. *Facies*, 58: 131-153.
- Lau, K.V., Romaniello, S.J., & Zhang, F., 2019. The Uranium Isotope Paleoredox Proxy. In: Lyons, T., Turchyn, A., & Reinhard, C., (eds.), *Cambridge Elements: Elements in Geochemical Tracers in Earth System Science*. Cambridge University Press, pp. 1-27.
- Li, M., Hinnov, L., & Kump, L., 2019. A-cycle: time-series analysis software for paleoclimate research and education. *Computers & Geosciences*, 127: 12-22.
- Shen, Sh.Zh., & Shi, G.R., 2009. Latest Guadalupian brachiopods from the Guadalupian/Lopingian boundary GSSP section at Penglitan in Laibin, Guangxi, South China and implications for the timing of the pre-Lopingian crisis. *Palaeoworld*, 18 (2-3): 152-161.
- Song, H., Algeo, T.J., Song, H., Tong, J., Wignall, P.B., Bond, D.P., Zheng, W., Chen, X., Romaniello, S.J., Wei, H., & Anbar, A.D., 2023. Global oceanic anoxia linked with the Capitanian (Middle Permian) marine mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 610: 118128.
- Thomas, E.K., Clemens, S.C., Sun, Y., Prell, W.L., Huang, Y., Gao, L., Loomis, Sh., Chen, G., & Liu, Zh. 2016. Heterodynes dominate precipitation isotopes in the East Asian monsoon region, reflecting interaction of multiple climate factors. *Earth and Planetary Science Letters*, 455: 196-206.