



نانوفسیل‌های آهکی: شاهدهی بر رخداد گرمای حداکثری پالئوسن-ائوسن (PETM) در حوضه رسوبی زاگرس

آذین آهی‌فر^۱، انوشیروان کنی^{۲*} و حسن امیری بختیار^۳

^۱ دانشجوی دکتری چینه‌شناسی و فسیل‌شناسی، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
^۲ استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
^۳ شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱/۲۱

تاریخ دریافت: ۹۳/۱/۲۷

Calcareous Nannofossils as an Evidence of Paleocene-Eocene Thermal Maximum Event in Zagros Sedimentary Basin

Azin Ahifar,¹ Anoshiravan Kani^{2*}
& Hassan Amiri Bakhtiar³

¹ Ph.D. Student in Stratigraphy and Paleontology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran

² Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran

³ National Iranian Southern Oil-Field Company (NISOC), Ahwaz

Abstract

Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM) is a short-term climatic event that occurred about 56 million years ago, crucially affecting the global biological ecosystems, especially calcareous nannoplankton. Analysis of the fossilized remains of calcareous nannoplanktons in the sedimentary successions deposited during the said interval of time in Zagros Sedimentary Basin points to the presence of a rich nannofloral assemblage consisting of 112 species belonging to 31 genera. The observed distribution and calculated abundances of calcareous nannofossils confirm occurrence of PETM event in the area under investigation. The findings which point towards sudden release of carbon to the ocean-atmosphere system, indicate a decrease in pH of oceanic waters leading to shallowing of Carbonate Compensation Depth (CCD) and dissolution of limestones. This is reflected in the diversity and abundance of nannofloral assemblages due to the availability of carbon dioxide and increased rate of calcification process. The phenomenon also brought about a reduction in the oxygen content of atmosphere and global warming. Slower rate of carbon release during PETM as compared to that of present day, points to the possibility of a more catastrophic acidification of today's oceans. Moreover, expected release of about 2000 pg carbon during the next 200 years (based on current trends) will result in a 2000-4000 pg increase of additional carbon in the oceanic sediments which is much in excess of what happened during PETM, thus accelerating the rate of current global warming.

Keywords: Thermal maximum, Paleocene-Eocene boundary, calcareous nannoplankton, Zagros Basin.

چکیده

گرمای حداکثری پالئوسن-ائوسن (PETM) یک حادثه آب و هوایی کوتاه‌مدت است که در حدود ۵۶ میلیون سال قبل اثرات شدیدی بر اکوسیستم‌های زیستی جهانی بویژه نانوپلانکتون‌های آهکی داشته است. بررسی بقایای فسیلی نانوپلانکتون‌های آهکی در توالی‌های رسوبی نه‌نشین شده طی برهه مذکور در حوضه رسوبی زاگرس، حکایت از حضور مجموعه نانوفسیلی غنی متشکل از ۱۱۲ گونه متعلق به ۳۱ جنس دارد که ثبت پراکندگی و فراوانی آن‌ها در طول ستون سنگی حکایت از وقوع رخداد PETM در محل گذر پالئوسن-ائوسن در این حوضه رسوبی دارد. این حادثه که به دلیل آزادسازی ناگهانی کربن از سیستم اقیانوس-اتمسفر در نتیجه کاهش pH، کم‌شدن عمق موازنه کربنات (CCD) و انحلال سنگ‌های آهکی رخ داده، بر دسترسی کربن برای فتوسنتز و آهکی شدن کوکولیتوفورها تأثیرگذار بوده است. هم‌چنین گرچه اسیدی شدن اقیانوس (به علت بالا رفتن CO₂ اتمسفری) بر فیزیولوژی موجودات اقیانوسی آهک‌ساز مهم تأثیرگذار بوده لیکن نژادها و گونه‌های مختلف کوکولیتوفورها پاسخ‌های آهک‌سازی متفاوتی نسبت به آن نشان داده‌اند که در فراوانی و تنوع جوامع نانوفسیلی منعکس است. نرخ پائین‌تر آزادسازی کربن در طول PETM در مقایسه با امروز، اسیدی شدن شدیدتری را در اقیانوس‌های امروزی محتمل می‌سازد. به‌علاوه، آزادسازی ۲۰۰۰ Pg کربن به اتمسفر در دویمت سال آینده نهایتاً منجر به آزادسازی ۲۰۰۰-۴۰۰۰ Pg کربن اضافی از رسوبات اقیانوسی خواهد شد که به مراتب بیشتر از آن چه در PETM رخ داده، خواهد بود که می‌تواند به‌عنوان بازخوردی مثبت، گرم‌شدن زمین را شتاب بیشتری بخشد.

کلمات کلیدی: گرمای حداکثری، گذر پالئوسن-ائوسن، نانوپلانکتون‌های آهکی، حوضه زاگرس.

* Corresponding Author. E-mail Address: a-kani@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

۱-۱- حادثه PETM

گردیده که حدود ۲۰۰ هزار سال (در برخی منابع ۱۷۰ هزار سال [۲]؛ ۱۹۶ هزار سال [۳]؛ یا ۲۱۵ هزار سال [۴]) به طول انجامیده است.

گرمای حداکثری پالئوسن-ائوسن (شکل ۱) رخداد اقلیمی کوتاه‌مدت و فاجعه‌انگیزی است که در ۵۵/۵ میلیون سال قبل حادث شده است [۱]. این رخداد اقلیمی برهه زمانی بی‌نهایت گرم گلخانه‌ای را در سراسر جهان باعث

عصر/اشکوب	زیر دور	دور	دوره	دوران	ائون	Ma
اپیرزین	پیشین	ائوسن	پالئوژن	سنوزوئیک	فانروزوئیک	54
تانتین	پسین	پالئوسن				57

شکل ۱- مقیاس زمانی زمین‌شناسی (اقتباس از [5] Geologic Time Scale, 2012)

سطحی، بالا رفتن درجه حرارت حداقل 8°C در قطب‌ها و 5°C در نواحی گرمسیری مشخص می‌شود. به علاوه فراوانی گسترده کانی کاتولینیت در رسوبات اقیانوسی در طول برهه PETM در سراسر ناحیه تیتیس اشاره به آب و هوای گرم و مرطوب پالئوسن پسین-ائوسن پیشین (۴۸-۵۹ میلیون سال قبل) با بارندگی بالا دارد [۸]. مقدار CIE مقدار ایزوتوپ واقعی CO_2 اتمسفری در تعادل با اقیانوس را منعکس می‌کند. گرم شدن اولیه در مرز پالئوسن-ائوسن (۵۶ میلیون سال قبل) مقدم بر CIE بوده و تصور می‌شود که محرک گرم شدن جریانات اقیانوسی عمیق بوده باشد. این‌ها در واقع آغازگر ذوب کلاترات‌های متان یا «یخ» متان، منبع ایزوتوپ سبک کربن بودند. میزان کربن موجود در طول PETM احتمال وجود منبع دیگری علاوه بر آنچه از متان ناشی شده را محتمل می‌کند. دیگر منابع محتمل یا اضافی کربن عبارتند از: تجزیه کربن آلی خاک در لایه دائماً منجمد زمین (permafrost) در نواحی قاره‌ای قطب جنوب و اطراف قطب شمال و نیز نحوه پراکندگی مجدد کربن در سطح آزادسازی ناگهانی متان از هیدرات‌ها (کلاترات‌ها) مسئول تغییر آب و هوایی سریع است. متان در طول حاشیه قاره‌ای ذخیره می‌شود، جایی که پایداریش به‌عنوان هیدرات متان نیازمند فشار بالا و درجه حرارت نسبتاً کم است. اما زمانی که اقیانوس سریعاً گرم شود، ناپایدار می‌شود. بسیاری از

گذر پالئوسن-ائوسن (۵۶ میلیون سال قبل) با آشفستگی عظیم تبادلات کربن جهانی مشخص و منجر به پدیده‌های مختلفی می‌شود [۶] که عبارتند از:

۱. گرم شدن 5°C تا 7°C در یک چرخه اعتدالی؛
۲. انقراض جمعی (۳۵-۵۰٪) فرامینفرهای بنتیک؛
۳. سازماندهی مجدد مجموعه‌های ساکن آب‌های سطح؛
۴. مهاجرت سریع عمق موازنه کربنات به اعماق کمتر و؛
۵. تغییر منفی مشهود (۳-) در روند ایزوتوپ کربن (CIE).

در این مطالعه چشم‌انداز قدیمه تغییرات زیستی ناشی از نشر کربن در کوتاه‌مدت، با استفاده از باقیمانده‌های فسیل‌شده تولیدکنندگان اولیه (نانوفسیل‌های آهکی) مطرح می‌گردد که با تمرکز بر حادثه گرم شدن نسبتاً کوتاه‌مدت در گذر دورهای پالئوسن-ائوسن که در حدود ۵۶ میلیون سال قبل رخ داده صورت گرفته است.

۱-۲- اثرات PETM

PETM در واقع، شدیدترین حادثه هایپرترمال مطالعه شده، (Ma 5/55 میلیون سال قبل) [۷]، می‌باشد که طول زمانی آن حدود ۲۰۰ هزار سال تخمین زده شده است [۳]. PETM با انحراف ۳- در هزار در میزان ایزوتوپ کربن منفی (۲-) در هزار در کربن آلی اقیانوسی و ۶- در هزار در کربنات اقیانوسی) و با گرم شدن $3-4^{\circ}\text{C}$ در درجه حرارت آب‌های

رفتن پستانداران نخستین و سم‌داران [۱۱]. در واقع، پالتوسن (۶۶-۵۶ میلیون سال قبل) فضای لازم برای تکامل بسیاری از تاکسون‌های مختلف را فراهم آورد. مشهورترین مثال تکامل در دوره پالتوژن (۶۶-۲۳ میلیون سال قبل) انشعاب پستانداران جفت‌دار می‌باشد [۱۲]. با وجود آنکه این حوادث تکاملی بزرگ مقیاس تاریخیچه تحقیقاتی بسیار طولانی دارد، ارتباط تنگاتنگ آن‌ها با تغییرات آب و هوایی تنها در طول دو دهه اخیر آشکار شده است. بعلاوه، مجموع جایگزینی‌های زیستی نشان می‌دهد که بیوسفر زمین (از روی قاره‌ها گرفته تا اعماق اقیانوس‌ها) در اثر تغییرات آب و هوایی سریع دچار تحولاتی شده که نشانه‌های آن در روند الگوهای تکاملی بزرگ مقیاس بلندمدت قابل رؤیت است.

۱-۴- تاثیرپذیری نانوفسیل‌ها از PETM

جوامع پلانکتونی، جمعیت کاملی از میلیون‌ها فرد با تکثیر زیاد در مقیاس زمانی کوتاه هستند، که گروه‌های مختلفی از موجودات نظیر فرامینیفرها، کوكولیتوفورها و غیره در این زمره قرار می‌گیرند. کوكولیتوفورها -فیتوپلانکتون‌های آهکی تک سلولی- جز بنیادین اکوسیستم‌های اقیانوسی به حساب می‌آیند. آن‌ها دارای پوشش خارجی متشکل از صفحات CaCO_3 (به نام کوكولیت) هستند و به طور بیوژنیک تولید می‌شود. کوكولیتوفورها نقش مهمی در پمپ کربن بیوژنیک از طریق اثر مشترک فتوسنتز و کلسیتی شدن از طریق رسوبگذاری کوكولیت‌ها ایفا می‌کنند، و جز اصلی رسوبات آهکی اقیانوسی به حساب می‌آیند [۱۳]. از این رو نسبت به اسیدی شدن اقیانوس بسیار حساس بوده و به طور گسترده‌ای مطالعه شده‌اند.

جونز و همکاران معتقدند اسیدی شدن اقیانوس (به علت بالا رفتن CO_2 اتمسفری) بر فیزیولوژی موجودات اقیانوسی آهک‌ساز مهم تأثیر دارد، اما میزان این تغییر به درستی شناخته نشده است [۱۳]. در کوكولیتوفورها، نژادها و گونه‌های مختلف پاسخ‌های آهک‌سازی متفاوتی به اسیدی شدن اقیانوس نشان می‌دهند. تغییرات در شیمی کربنات آب‌های اقیانوسی (مستقیماً متأثر از افزایش pCO_2 اتمسفری) بر دسترسی کربن برای فتوسنتز و آهکی شدن کوكولیتوفورها تأثیرگذار است.

همانند امروز، کوكولیتوفورها در طول PETM تولیدکنندگان اصلی کربنات پلاژیک و اجزای قطعی اکوسیستم‌های اقیانوسی و چرخه‌های بیوژئوشیمیایی بودند.

فرضیه‌های دیگری که اخیراً توسط محققین مختلف برای بیان افزایش CO_2 اتمسفری پیشنهاد شده [۸] عبارتند از:

۱. سوختن گسترده رسوبات زغال و تورب پالتوسن (۶۶-۵۶ میلیون سال قبل) در ارتباط با دوره خشکی که در طول پالتوسن پسین (۵۹-۵۶ میلیون سال قبل) غالب بوده، اما هیچ نشانه‌ای از چنین فرایندی در مغزه‌های حفاری در اقیانوس اطلس و آرام یافت نشده است؛

۲. متان ترموژنیک، در ارتباط با تزریق سیالات گرمایی در رسوبات غنی از مواد آلی که منجر به آزادسازی انفجاری متان از گل‌سنگ کرتاسه-پالتوسن (۱۴۵-۵۶ میلیون سال قبل) در اقیانوس اطلس شمالی شده است؛ این مورد برای ناحیه تتیس، که در طول این دوره از نظر زمین‌ساختی پایدار است بعید به نظر می‌رسد؛

۳. خشک شدن دریا‌های اپی‌کانتیننتال مجزا شده، منجر به اکسیداسیون شدید ماده آلی شده است؛

۴. ذوب شدن لایه منجمد غنی از متان اعماق زمین. داده‌های حفاری عمیق اقیانوسی نشان می‌دهد که در این رخداد، درجه حرارت آب‌های سطحی اقیانوسی در عرض‌های بالای جغرافیایی در نیم‌کره شمالی 10°C تا 12°C ، در عرض‌های بالای جغرافیایی در نیم‌کره جنوبی 8°C و در موقعیت استوا حدود 4°C تا 5°C افزایش یافته است. به نظر می‌رسد درجه حرارت بخش‌های داخلی قاره‌ها در عرض‌های متوسط حدود 5°C و میانگین درجه حرارت اتمسفر جهانی بین 5°C تا 9°C بالا رفته باشد [۲]. این حادثه به‌طور گسترده به‌عنوان یکی از مثال‌های گرم شدن سریع ناشی از اثر گلخانه‌ای در تاریخ زمین پذیرفته شده است [۱].

۱-۳- تغییرات آب و هوایی و زیستی

الگوهای تغییرات زیستی و آب و هوایی جهانی در شواهد زمین‌شناسی مبنای ارزشمندی برای ارزیابی تغییرات تنوع زیستی در پاسخ به گرم شدن جهان فراهم می‌آورد. گرمای حداکثری پالتوسن-اوسن یکی از چشم‌گیرترین حوادث گرم شدن جهانی دوران سنوزویک (۶۶ میلیون سال قبل تا عهدحاضر) است که پس از برخورد چیکسولوب (۶۵/۵ میلیون سال قبل)، سومین حادثه انقراض جمعی بزرگ در مرز دوره‌های کرتاسه-پالتوژن به راه افتاد و با برخی جایگزینی‌های بسیار برجسته زیگان اقیانوسی و خشکی همراه بوده است نظیر انقراض ۶۰-۴۰٪ درصدی فرامینیفرهای بنتیک دریای عمیق [۹]، شروع تکثیر نومولیتیدا در امتداد فلات‌های کربناته تتیس [۱۰] و بالا

با توجه به آنچه ذکر شد و اهمیت رخداد گرمای حداکثری پالتوسن-ائوسن، بررسی این حادثه اقلیمی در سراسر جهان بسیار مورد توجه بوده و مطالعات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. یکی از مواردی که رخداد این حادثه را ثبت می نماید پاسخ زیستی نانوفسیل‌های آهکی به گرمای حداکثری است که در مناطق مختلف مشخص شده است. اما تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای در این خصوص در کشورمان صورت نگرفته است. از این رو در این نوشتار سعی شده تا با تأکید بر گذر پالتوسن-ائوسن (۵۶ میلیون سال قبل)، تغییرات زیستی این برهه بر مبنای نانوفسیل‌های آهکی مورد ارزیابی قرار گیرد تا بدان وسیله بتوان تغییرات احتمالی ناشی از گرم شدن جهانی آب و هوا را بر این گروه مهم از تولیدکنندگان اقیانوسی پیش‌بینی نمود.

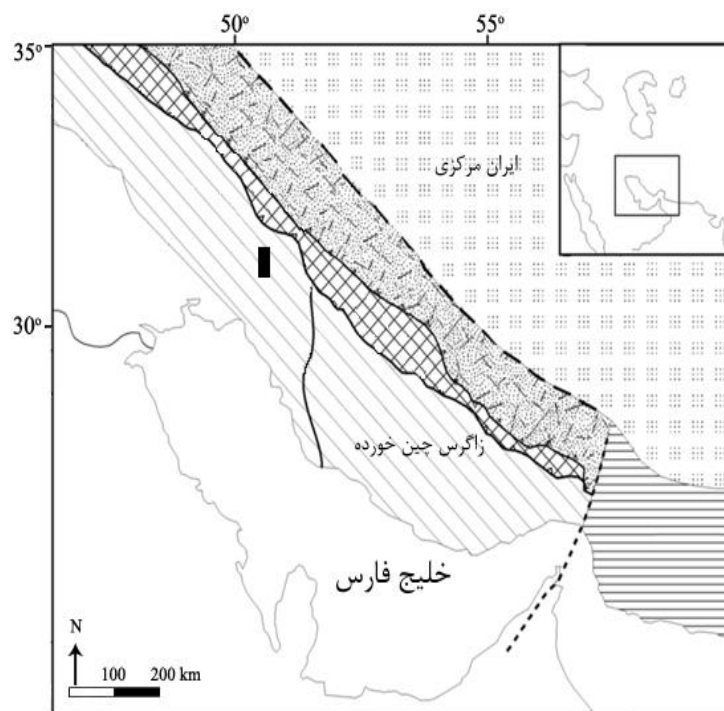
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

گذر پالتوسن-ائوسن در حوضه رسوبی زاگرس در رسوباتی که نام «واحد سنگی پابده» بدان اطلاق می‌گردد، واقع شده است. واحد سنگی پابده، نامش را از کوه پابده در استان خوزستان گرفته و در نواحی گسترده‌ای هم‌چون جنوب غرب لرستان، سرتاسر خوزستان، فارس ساحلی و نیمه‌ساحلی پراگندگی دارد. محدوده مورد مطالعه از واحد سنگی پابده در حوضه رسوبی زاگرس، در ناحیه ایذه واقع شده است (شکل ۲) و دسترسی به آن از طریق جاده ایذه به اصفهان، ۱۱ کیلومتری جنوب‌شرق ایذه، در روستای چهارده میسر می‌باشد. مختصات جغرافیایی قاعده برش مذکور "۲۴' ۴۷° ۳۱° عرض شمالی و "۲۶/۸' ۳' ۵۰° طول شرقی می‌باشد. بخشی از واحد سنگی پابده که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته از نظر سنگ شناسی شامل شیل‌های ارغوانی در تناوب با شیل‌های سبز می‌باشد که متعلق به بخش شیل ارغوانی (عضو غیررسمی) است. بخش شیل ارغوانی به طور همشیب بر روی شیل‌های خاکستری سازند گورپی در زیر قرار گرفته و با واحد متشکل از تناوب آهک و شیل پابده در بالا پوشیده می‌شود.

پاسخ نسبت‌های جمعیتی کوکولیتوفورها و دیگر نانوپلانکتون‌های فسیل‌شده حاکی از آن است که تغییرات درجه حرارت و آزادسازی مواد مغذی در طول PETM تغییرمکان بیوجرافیایی بزرگی را تحریک می‌کند که با جایگزینی تکاملی محدودی همراه است. در طول گرمای حداکثری پالتوسن-ائوسن، حدود ۵۶ میلیون سال پیش، غلظت CO₂ اتمسفری به‌سرعت افزایش یافت و اقیانوس‌ها اسیدی شدند، که این برهه را زمانی ایده‌آل برای بررسی واکنش کوکولیتوفورها به تغییرات محیطی ساخت [۱۴].

گرم شدن اقیانوس، احتمالاً همراه با تغییر جریان‌های سطحی، توسعه تاکسون‌های گرمادوست را در طول PETM تحریک کرده، به‌عبارت دیگر تا عرض‌های پایین‌تر باقی می‌ماند. انقراض نانوفسیل‌های آهکی برخلاف فرامینیفرهای پلانکتیک، همزمان با PETM تاحدی افزایش می‌یابد، به طوری که در شروع و در ۷۰ هزار سال اول رخداد، این میزان بسیار قابل توجه است که مربوط به حداقل ۱۲ جنس، نظیر *Prinsius* و *Fasciculithus Biscutum* می‌باشد. با این حال، انقراض در طول PETM در گونه‌های نادری وارد شده (<۱٪) فراوانی در مجموعه‌های پیش از (PETM) و بیان می‌دارد که این گونه‌ها نزدیک به محدوده‌های اکولوژیکی‌شان زندگی کرده‌اند. برخی جنس‌ها، نظیر جنس *Fasciculithus* که از فرم‌های بسیار مهم معمول پالتوسن است، در طول یک میلیون سال اول PETM کاملاً منقرض شدند. زیست‌بوم‌هایی که در طول PETM تهی شده بودند به‌سرعت با جنس‌های ائوسن پیشین (۵۶-۴۹ میلیون سال قبل) که جدیداً تکامل یافته و سپس معمول شدند نظیر *Blackites*، *Rhombaster/Tibrachiathus* و *Pontosphaera* اشباع شدند. مرحله اولیه PETM هم با چندین دیسکوآستر نامتقارن نظیر *D. araneus* و *D. anartios* مشخص می‌شود. مجموعه *Rhombaster-Discoaster araneus* حاصله گرچه از نظر کمی کوچک است، اما با مجموعه‌ای از تاکسون‌های استوائی مشخص می‌شود که منحصراً به PETM هستند. این مجموعه بویژه در ته‌نشست‌های نریتیک نهشته شده در طول PETM فراوان است [۱۵].



شکل ۲- موقعیت برش مورد مطالعه (—) در کمربند کوهزایی زاگرس.

۲-۲- برداشت نمونه و آماده‌سازی

به‌منظور بررسی گذر پالئوسن-ائوسن (۵۶ میلیون سال قبل) نمونه‌برداری صحرایی از سازند پابده به‌روش سیستماتیک انجام گردید. نمونه‌برداری صحرایی کار پیچیده‌ای نیست و شامل مراحل مختلف اندازه‌گیری برش، برداشت نمونه، گردآوری اطلاعات و ترسیم می‌شود که انجام مناسب نیازمند صرف زمان زیاد و تلاش مستمر است. برداشت نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق در ضخامت ۱۱۰ متری در امتداد گذر، در فواصل متغیر ۵۰ سانتی‌متر تا یک متر و به تعداد ۱۲۰ عدد، طی دو مرحله بازدید صحرایی صورت پذیرفته است. سنگ‌شناسی این بخش از سازند پابده شامل تناوبی از شیل‌های سبز و ارغوانی می‌باشد. از آنجایی که نانوفسیل‌ها در هر گرم نمونه فراوانی زیادی دارند (در حدود یک میلیون) بنابراین مقدار کمی از نمونه برای کار کافی است. یک نمونه‌ی حدود ۳ سانتی‌متر مکعبی، حتی امکان پاک‌سازی پیش از آماده‌سازی، و تکرار آزمایش (در صورت نیاز) را فراهم می‌آورد [۱۶].

گرچه فرآیند آماده‌سازی نانوفسیل‌ها سریع و ساده است، اما به‌دلیل کوچکی آن‌ها، آغشتگی و نابرجایی از جمله مشکلاتی است که نیازمند دقت و توجه بسیار است. نمونه‌های برداشت شده در آزمایشگاه به‌روش اسمیر^۷ فرآوری و برای مطالعات میکروسکوپی آماده گردیدند. اسمیر اسلاید از روش‌های استاندارد آماده‌سازی است. در این روش سطح

خارجی نمونه کاملاً پاک می‌شود و بخش کوچکی از رسوب بر روی لامل شیشه‌ای خراشیده می‌شود. سپس یک قطره آب مقطر اضافه شده و با استفاده از خلال دندان، تعلیق رسوبی ضخیمی ایجاد می‌شود. تعلیق حاصل به‌صورت لایه نازکی در طول سطح لامل با خلال دندان پهن شده و به‌سرعت بر روی یک صفحه داغ^۸ خشک می‌شود. لام شیشه‌ای میکروسکوپی شماره‌گذاری شده و لامل بر روی آن چسبانده می‌شود و پس از خشک شدن آماده مطالعه میکروسکوپی است. این روش آماده‌سازی برای مطالعات بیوستراتیگرافی مناسب است و هم‌چنین می‌تواند برای بررسی‌های شمارش فراوانی نیز به‌کار رود [۱۷].

مطالعه نانوفسیل‌ها نیازمند میکروسکپ با کیفیت بالا است که یک محدودیت تجهیزاتی مهم در مطالعه آن‌ها به‌شمار می‌رود. در مطالعه اسلایدهای تهیه شده از میکروسکوپ نوری Nikon مدل Optiphot II pol با بزرگنمایی ۱۲۵۰ برابر استفاده شد. پس از مطالعه اسلایدها و تعیین پراکندگی تاکسون‌های نانوفسیلی در طول ستون چینه‌شناسی، محدوده گسترش هر تاکسون بدست می‌آید که از ترسیم مجموعه پراکندگی تاکسونها نمودار گسترش آن‌ها در طول ستون چینه‌شناسی حاصل می‌شود. در نمودار گسترش، هر تاکسون دارای یک نقطه پدیدار شدن^۹، یک نقطه ناپدید شدن^{۱۰} و محدوده گسترش است.

پراکندگی و زوناسیون نانوفسیل‌های آهکی در محدوده مورد مطالعه براساس نتایج حاصل از این برنامه ترسیم شده است.

همچنین، به‌منظور بررسی آماری تاکسون‌های نانوفسیلی حاضر، فراوانی نسبی آن‌ها محاسبه گردید. ساده‌ترین راه برای بیان فراوانی نسبی شمارش تعداد ثابتی از تاکسون‌ها در هر نمونه است. روش معمول شمارش مجموع سیصد فرد (حداقل) است که مورد توافق همه محققین می‌باشد. در سطح اطمینان ۹۵٪، شمارش ۳۰۰ فرد حضور تاکسونی را که از فراوانی نسبی ۱٪ در کل جمعیت برخوردار است با اطمینان نشان می‌دهد [۱۶]. از اینرو، در تحقیق حاضر نیز تعداد ۳۰۰ فرد در هر نمونه شمارش و سپس درصد فراوانی نسبی آن‌ها محاسبه شد (شکل ۴). به‌منظور محاسبه و ترسیم فراوانی مطلق و نسبی از نرم‌افزار PAST^{۱۱} استفاده شد. در این برنامه، تعداد تمامی تاکسون‌های شمارش شده و موقعیتشان در ستون چینه‌شناسی به‌عنوان داده اولیه وارد شده و سپس نمودار فراوانی گونه‌های مورد نظر به تفکیک انتخاب و ترسیم می‌شود.

۳- نتایج و بحث

تشخیص گونه‌های مختلف از نانوفسیل‌های آهکی در گذر پالتوسن-ائوسن در سازند پابده، بر مبنای پرکنیلسن [۱۷] و مقالات متعددی که پس از آن انتشار یافتند، انجام گرفته است. بررسی و مطالعه اسلایدها، منجر به شناسایی تعداد ۱۱۲ گونه، متعلق به ۳۱ جنس، از ۱۸ خانواده و ۱۰ راسته نانوفسیلی گردید. فهرست الفبایی گونه‌های شناسایی شده در جدول ۱ آمده و گسترش آن‌ها در طول برش نیز در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است.

به‌منظور طبقه‌بندی بیوستراتیگرافی (بیوزوناسیون) ضخامت مورد مطالعه، از الگوی طبقه‌بندی NP منتسب به مارتینی [۱۹] استفاده شده است. گونه‌های شناسایی شده، منجر به تفکیک زون‌های نانوفسیلی NP8 تا NP12 در ضخامت رسوبی مورد مطالعه در سازند پابده گردیده‌اند.

مرز پالتوسن-ائوسن (۵۶ میلیون سال قبل) بر اساس نانوفسیل‌های آهکی معمولاً در رأس زون NP9 ترسیم می‌شود. چندین جنس در نزدیکی انتهای پالتوسن نظیر *Fasciculithus*، *Hornibrookina*، *Placozygus*، *Rhombaster* ناپدید می‌شوند. اولین حضور گونه *Tribrachiatius bramlettei* که شاخص قاعده زون NP10

به‌لحاظ تئوری، نقاط پدیدار شدن و ناپدید شدن هر تاکسون در طول ستون چینه‌شناسی می‌باید منطبق بر دو حادثه تکاملی ظهور و انقراض آن باشد. لیکن مهاجرت موجودات و زیست‌بوم‌ها در طول زمان، گسترش پراکنده موجودات زنده، و حفظ‌شدگی ناقص همگی باعث می‌شوند تا محدوده محلی یک تاکسون کوتاه‌تر از محدوده تکاملی (واقعی) آن ثبت شود. اختلاف بین محدوده محلی و تکاملی تاکسون‌ها مقدار ثابتی نیست و از مکانی به مکان دیگر تغییر می‌کند. به‌علاوه، عوامل زمین‌شناختی هم‌چون نرخ رسوبگذاری و فرسایش نیز باعث بروز اختلاف محدوده‌های ثبت شده در ردیف‌های رسوبی حفظ شده از محلی به محل دیگر می‌شود. از این‌رو لازم می‌نماید تا برای رفع مشکل تطابق و مرتب‌سازی داده‌های خام اولیه (یا همان نمودار گسترش) تصحیح شود که بدین منظور از روش‌های کمی استفاده می‌شود.

راه حل بنیادی برای مسئله تطابق و مرتب‌سازی در چینه‌شناسی استفاده از توالی حوادث قدیمی ثبت شده در رسوبات است که ترتیب رخداد خود (ظهور و انقراض‌های تاکسون‌های فسیلی) را حفظ کرده‌اند. این امر بدون در نظرگیری تصحیح مقیاس فواصل بینابینی حوادث انجام می‌شود.

در تحقیق حاضر به‌منظور رفع این مشکل از نرم‌افزار CONOP^{۱۱} استفاده شده است که توسط سادلر [۱۸] طراحی و چندین بار مورد بازنگری قرار گرفته است. برنامه CONOP فرضیات ساده‌سازی را به حداقل می‌رساند و انعطاف‌پذیری انتخاب مقادیر مناسب بین راه‌حل‌ها و داده‌ها را افزایش می‌دهد. CONOP از نسخه‌ای از الگوریتم simulated annealing استفاده می‌کند که مراحل اجرای آن به قرار زیر است:

۱. اختصاص شماره‌های متوالی به تاکسون‌ها
۲. ایجاد فایل ورودی مرتب شده با یک ثبت برای سطح چینه‌شناسی هر محدوده تاکسون در برش.
۳. انتخاب مقدار اولیه ترجیحی خطاها.
۴. انتخاب یک پروتکل جستجو متناسب با اندازه و پیچیدگی مجموعه داده‌ها.
۵. اجرای جستجوی اولیه.
۶. ادامه دادن جستجو برای دستیابی به نتایج بهینه.
۷. تکرار جستجو برای اطمینان از ثابت بودن نتایج.

از مرز به ثبت رسیده است. برهه زمانی زون‌های NP8-NP9، متعلق به پالتوسن پسین (تانتین: ۵۹-۵۶ میلیون سال قبل) می‌باشد.

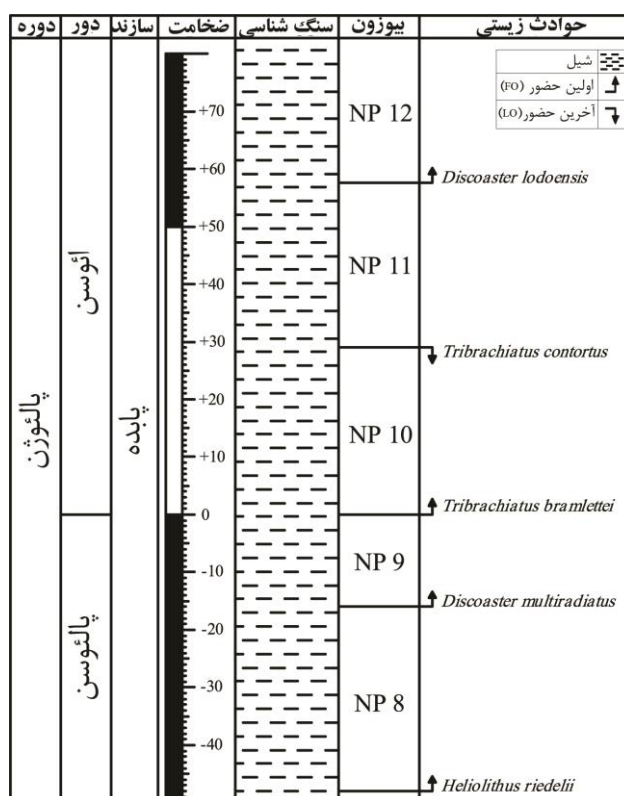
قاعده زون NP11 با آخرین حضور (LO) گونه *Tribrachiatu contortus* در ضخامت ۲۹+ از مرز واقع شده است. اولین حضور گونه *Discoaster lodoensis* مبین قاعده زون NP12 است که در ضخامت ۵/۵۷+ به ثبت رسیده است. زون‌های NP10-NP12 برهه زمانی ائوسن پیشین (ایپرزین: ۴۸-۵۶ میلیون سال قبل) را مشخص می‌نمایند.

می‌باشد در مرز پالتوسن-ائوسن (۵۶ میلیون سال قبل) واقع شده است که به‌عنوان مینا (مترای صفر) در نظر گرفته شده و موقعیت سایر نمونه‌ها در پایین (با علامت منفی) و بالا (با علامت مثبت) نسبت به آن ذکر شده است.

اولین حضور (FO) گونه *Heliolithus riedelii* که معرف قاعده زون NP8 می‌باشد در ضخامت ۴۸- متری از مرز پالتوسن-ائوسن (۵۶ میلیون سال قبل) در محدوده مورد مطالعه به ثبت رسیده است. قاعده زون NP9 با اولین حضور گونه *Discoaster multiradiatus* مشخص می‌شود که در ضخامت ۱۶- متری

جدول ۱- فهرست گونه‌های شناسایی شده در برش مورد مطالعه

<i>Bomolithus megastipus</i>	<i>Discoaster falcatus</i>	<i>Fasciculithus richardii</i>	<i>Rhombosphaera cuspidata</i>
<i>Campylosphaera dela</i>	<i>Discoaster kuetzingi</i>	<i>Fasciculithus schaubii</i>	<i>Scampanella bispinosa</i>
<i>Campylosphaera eodela</i>	<i>Discoaster lenticularis</i>	<i>Fasciculithus sp.</i>	<i>Sphenolithus acervus</i>
<i>Chiasmolithus bidens</i>	<i>Discoaster lodoensis</i>	<i>Fasciculithus tympaniformis</i>	<i>Sphenolithus anarhopus</i>
<i>Chiasmolithus consuetus</i>	<i>Discoaster mahmoudi</i>	<i>Fasciculithus ulii</i>	<i>Sphenolithus arthurii</i>
<i>Chiasmolithus modestus</i>	<i>Discoaster medius</i>	<i>Girgisia gammation</i>	<i>Sphenolithus editus</i>
<i>Chiasmolithus solitus</i>	<i>Discoaster mohleri</i>	<i>Helicosphaera seminulum</i>	<i>Sphenolithus moriformis</i>
<i>Coccolithus bownii</i>	<i>Discoaster multiradiatus</i>	<i>Heliolithus kleinpelli</i>	<i>Sphenolithus primus</i>
<i>Coccolithus cachaoi</i>	<i>Discoaster nobilis</i>	<i>Heliolithus riedelii</i>	<i>Sphenolithus radians</i>
<i>Coccolithus foraminis</i>	<i>Discoaster perpolitus</i>	<i>Ismolithus unipons</i>	<i>Sphenolithus sp.</i>
<i>Coccolithus formosus</i>	<i>Discoaster saipanensis</i>	<i>Neochiastozygus concinnus</i>	<i>Sphenolithus umbrellus</i>
<i>Coccolithus minimus</i>	<i>Discoaster salisburgensis</i>	<i>Neochiastozygus distentus</i>	<i>Syracosphaera sp.</i>
<i>Coccolithus pelagicus</i>	<i>Discoaster sp.</i>	<i>Neochiastozygus eosaepes</i>	<i>Thoracosphaera opercuata</i>
<i>Cribrosphaerella ehrenbergi</i>	<i>Ellipsolithus disticus</i>	<i>Neochiastozygus junctus</i>	<i>Thoracosphaera saxea</i>
<i>Cruciplacolithus asymmetricus</i>	<i>Ellipsolithus macellus</i>	<i>Neochiastozygus modestus</i>	<i>Thoracosphaera sp.</i>
<i>Cruciplacolithus edwardsii</i>	<i>Ellipsolithus subdisticus</i>	<i>Neochiastozygus perfectus</i>	<i>Toweius callosus</i>
<i>Cruciplacolithus intermedius</i>	<i>Ericsonia cava</i>	<i>Neochiastozygus saepes</i>	<i>Toweius crassus</i>
<i>Cruciplacolithus latipons</i>	<i>Ericsonia robusta</i>	<i>Neococcolithus dubius</i>	<i>Toweius craticulus</i>
<i>Cruciplacolithustenuis</i>	<i>Ericsonia subpervosa</i>	<i>Neococcolithus protenus</i>	<i>Toweius eminens</i>
<i>Cyclicargolithus luminis</i>	<i>Fasciculithus alanii</i>	<i>Neocrepidolithus cohenii</i>	<i>Toweius gammation</i>
<i>Cyclolithella robusta</i>	<i>Fasciculithus billi</i>	<i>Neocrepidolithus fossus</i>	<i>Toweius pertusus</i>
<i>Discoaster anartius</i>	<i>Fasciculithus bobii</i>	<i>Neocrepidolithus neocrassus</i>	<i>Toweius rotundus</i>
<i>Discoaster araneus</i>	<i>Fasciculithus clinatus</i>	<i>Placozygus sigmoides</i>	<i>Tribrachiatu bramlettei</i>
<i>Discoaster barbadiensis</i>	<i>Fasciculithus hayii</i>	<i>Pontosphaera versa</i>	<i>Tribrachiatu cf. orthostylus</i>
<i>Discoaster binodosus</i>	<i>Fasciculithus involutus</i>	<i>Prinsius bisulcus</i>	<i>Tribrachiatu contortus</i>
<i>Discoaster bramlettei</i>	<i>Fasciculithus magnicordis</i>	<i>Prinsius dimorphosus</i>	<i>Tribrachiatu orthostylus</i>
<i>Discoaster diastypus</i>	<i>Fasciculithus magnus</i>	<i>Prinsius martini</i>	<i>Zygodiscus sigmoides</i>
<i>Discoaster elegans</i>	<i>Fasciculithus pileatus</i>	<i>Rhabdosphaera moronium</i>	<i>Zygrhablithus bijugatus</i>



شکل ۳- زوناسیون نانوفسیل‌های آهکی در محدوده مورد مطالعه

در محدوده ۱۰- تا ۱۰+ متری از برش فراوانی نسبی این جنس در برهه رخداد گرمای حداکثری کاهش می‌یابد و حدکثر افت آن در مرز پالئوسن-ائوسن (۵۶ میلیون سال قبل) واقع می‌شود. رافی و همکاران معتقدند در این برهه، از تنوع جنس *Fasciculithus* به طور قابل توجهی کاسته می‌شود و در پایین‌ترین بخش ائوسن تنها *F. tympaniformis* و *F. involutus* حضور دارند [۶]. اما وفور مجموعه گونه‌های جنس *Fasciculithus* تا رخداد گرمای حداکثری پالئوسن-ائوسن (PETM): حدود ۵۶ میلیون سال قبل) ادامه می‌یابد و سپس بلافاصله پس از آن منقرض می‌شود [۲۰]. این امر با تکامل بعدی از *Rhombaster* به *Tribrachiatus bramlettei* (دنبال می‌شود. جنس اخیرالذکر متعاقباً (حدود یک میلیون سال بعد از رخداد) طی برهه زمانی‌ای که نشان‌دهنده گونه‌زایی در میان دیسکوآسترها (*D. diastypus*) و اسفنولیت‌ها (*S. radians*) است، منشعب می‌شود [۶]. مصداق آن را در توالی مورد مطالعه در محدوده ۱۰+ متری از مرز (شکل ۴-f, e) می‌توان مشاهده کرد. فراوانی نسبی *Discoaster* spp. افزایش ناگهانی (۵ درصدی) را در گذر پالئوسن-ائوسن (۵۶ میلیون سال قبل) نشان می‌دهد. در مورد فراوانی نسبی *Sphenolithus* spp. نیز از ۲۰- تا ۲۰+ متری توالی مورد

ماحصل مطالعات آماری صورت گرفته بر روی مجموعه نانوفسیل‌های آهکی در ضخامت مورد نظر از سازند پابده که مؤید موقعیت PETM می‌باشد، در شکل ۴ ترسیم شده که در ادامه به تفکیک تشریح می‌گردد:

- بررسی فراوانی مطلق گونه‌های نانوفسیلی در ضخامت مورد بررسی طی مطالعه حاضر (شکل ۴-a)، افت شدید این دسته از فسیل‌ها را در موقعیت مرزی پالئوسن-ائوسن (۵۶ میلیون سال قبل) نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از آزادسازی کربن در سیستم اقیانوس-اتمسفر بوده باشد و منجر به پایین آمدن سریع pH دریای عمیق و کم‌شدن عمق موازنه کربنات (CCD) شده و همچنین با تهی شدن اکسیژن و گرم شدن همراه شده است.

- تاکسون‌های معرف روند افت ایزوتوپی کربن یا مجموعه «*Rhombaster-Discoaster* RD» در محدوده ۰ تا ۳۰+ متری از برش به ثبت رسیده (شکل ۴-b) که معرف محدوده گرمای حداکثری پالئوسن-ائوسن است. حضور این مجموعه در محدوده مورد مطالعه تعلق حوضه رسوبی زاگرس را به دریاچه تیتیس، اقیانوس اطلس شمالی و جنوبی و پایین‌ترین قسمت اقیانوس هند محرز می‌نماید.

- از بررسی جنس *Fasciculithus* متعلق به پالئوسن در ضخامت رسوبی موردنظر (شکل ۴-c) چنین برمی‌آید که

حداکثری و بروز نوعی انحراف محلی از روند جهانی است و نیاز به بررسی بیشتری دارد.

موضوع گرم شدن جهانی و حادثه مضاعف^{۱۳} اسیدی‌شدن اقیانوس، اخیراً مبنای تحقیقات گسترده جوامع علمی گشته است. افزایش اقبال رسانه‌ها و بحث‌های عمومی به تغییرات آب و هوایی، بر سیاست، اقتصاد و زندگی روزمره تأثیر می‌گذارد [۲۱]. از آن جایی که اسیدی‌شدن اقیانوس به‌عنوان یک تهدید اصلی برای تنوع زیستی اقیانوسی مطرح شده، در سال‌های اخیر چندین تحقیق مقدماتی با تأکید بر آن آغاز شده که از آنجمله می‌توان به "European Project" "UKOcean on Ocean Acidification" (EPOCA) "Acidification Research Programme" (UKOARP) و "Biological Impacts of Ocean Acidification" (BIOACID) اشاره نمود.

همان‌طور که حجم عظیم مطالعات و تحقیقات نشان می‌دهند، اغلب و نه تمامی پنج حادثه انقراض جمعی جهانی زمین اثراتی از آشفتگی جهانی کربن گرم شدن جهانی، اسیدی‌شدن اقیانوس و کمبود اکسیژن در بافت‌های بدن^{۱۴} برجای گذاشته‌اند که به طور نگران‌کننده‌ای همگی در اقیانوس‌های امروز وجود دارند و از اینرو می‌توان آن‌ها را «مثلث مرگ» نامید. در واقع، آشفتگی کربن امروزی و اسیدی‌شدن اقیانوس مقارن آن در تاریخ زمین بی‌سابقه است و بسیار سریع‌تر از هر زمانی در ۵۵ میلیون سال گذشته یا حتی ۳۰۰ میلیون سال گذشته در حال وقوع است. مجموعه این عوامل به‌طور جدی عملکرد اقیانوس مولد و کارآمد را با تأثیر بر درجه حرارت اقیانوس، طبقه‌بندی سطح، تامین مواد مغذی، واژگونی اقیانوس و تامین اکسیژن عمق اقیانوس تحت الشعاع قرار می‌دهد. برآورد وقوع انقراض‌های جمعی در طول عمر بشر براساس مقیاس زمان زمین‌شناسی، ناگهان و به‌سرعت است، اما در مقیاس زمانی بشر به حدی است که ما حتی نمی‌توانیم بفهمیم آیا وارد چنین حادثه‌ای شده‌ایم یا خیر [۲۲].

وقوع اسیدی‌شدن اقیانوس در گذشته با توجه به اطمینان بالا از حوادث زمین‌شناسی مشخص شده است. گرمای حداکثری پالئوسن-اؤسن به‌عنوان بزرگترین آشفتگی در آب و هوا و چرخه کربن در طول ۱۶۰ میلیون سال گذشته مطرح می‌شود و از مشهودترین حوادث اسیدی‌شدن اقیانوس زمان‌های قدیم در تاریخ زمین است که تاکنون شناخته شده است می‌تواند به‌عنوان قیاسی برای تغییرات آب و هوایی در آینده مطرح شود [۲۳]. این حادثه هایپرترمال شباهت‌های بالقوه‌ای با تغییرات آب و هوایی

مطالعه، تغییر ۲۰ درصدی مشاهده می‌شود که از ۲۰- تا صفر روند این افزایش نسبتاً کند و با شیب تقریبی ۰/۱۶ صورت گرفته اما افزایش از صفر تا ۲۰+ با سرعت بیشتر (شیب ۰/۸۹) ادامه یافته است.

- در بررسی فراوانی نسبی گونه *Zygrhablithus bijugatus* (شکل ۴-d) مشاهده صورت گرفته حکایت از آغاز افزایش از حدود ۱۰- متری مرز (از ۴٪ تا ۲۸٪) دارد. سپس متعاقب افتی کوتاه در ضخامت ۳۰-۵۰ متری (از ۲۸٪ به ۶٪)، مجدداً شروع به افزایش می‌کند تا در ۵۸ متری به اوج خود (۶۰٪) می‌رسد. این ضخامت مقارن با برهه زمانی اؤسن پیشین (زون NP11) است. شروع روند افزایش در فراوانی گونه *Z. bijugatus* مقارن با شروع کاهش در فراوانی جنس *Fasciculithus* است. این واقعه (افزایش *Z. bijugatus* به‌همراه کاهش فراوانی‌هایی *Fasciculithus*) در برخی نواحی (نظیر ایستگاه‌های ۶۹۰، ۱۲۶۲ و ۱۲۶۳ حفاری اقیانوسی) به ثبت رسیده است [۶]. در واقع، فراوانی جنس *Zygrhablithus* (اساساً گونه *Z. bijugatus*) درون برهه رخداد گرمای حداکثری پالئوسن-اؤسن (PETM) اتفاق می‌افتد. این الگو در بسیاری از برش‌های اقیانوسی (نظیر ایستگاه‌های ۲۱۳، ۴۰۱ و ۶۹۰ حفاری اقیانوسی) و خشکی (همانند برش Alamedilla-جنوب اسپانیا) گزارش شده است اما حادثه‌ای جهانی نیست. در واقع درحالیکه کاهش و انقراض *Fasciculithus* حادثه‌ای جهانی به‌حساب می‌آید، افزایش جنس *Zygrhablithus* تنها در برخی نواحی گرمسیری، عرض‌های متوسط و بالای جغرافیایی گزارش شده و در دیگر نواحی استوایی و عرض‌های متوسط مشاهده نمی‌شود [۶، ۲۰]. به طوریکه از بررسی شکل ۴c و ۴d برمی‌آید، همانند تمامی نقاط جهان کاهش و انقراض *Fasciculithus* در محدوده PETM به ثبت رسیده است. در عین حال شروع افزایش *Zygrhablithus* پس از گذر پالئوسن-اؤسن (۵۶ میلیون سال قبل) احتمال حضور منطقه چهارده از حوضه زاگرس را در برهه زمانی مذکور در نواحی گرمسیری عرض‌های متوسط محرز می‌نماید.

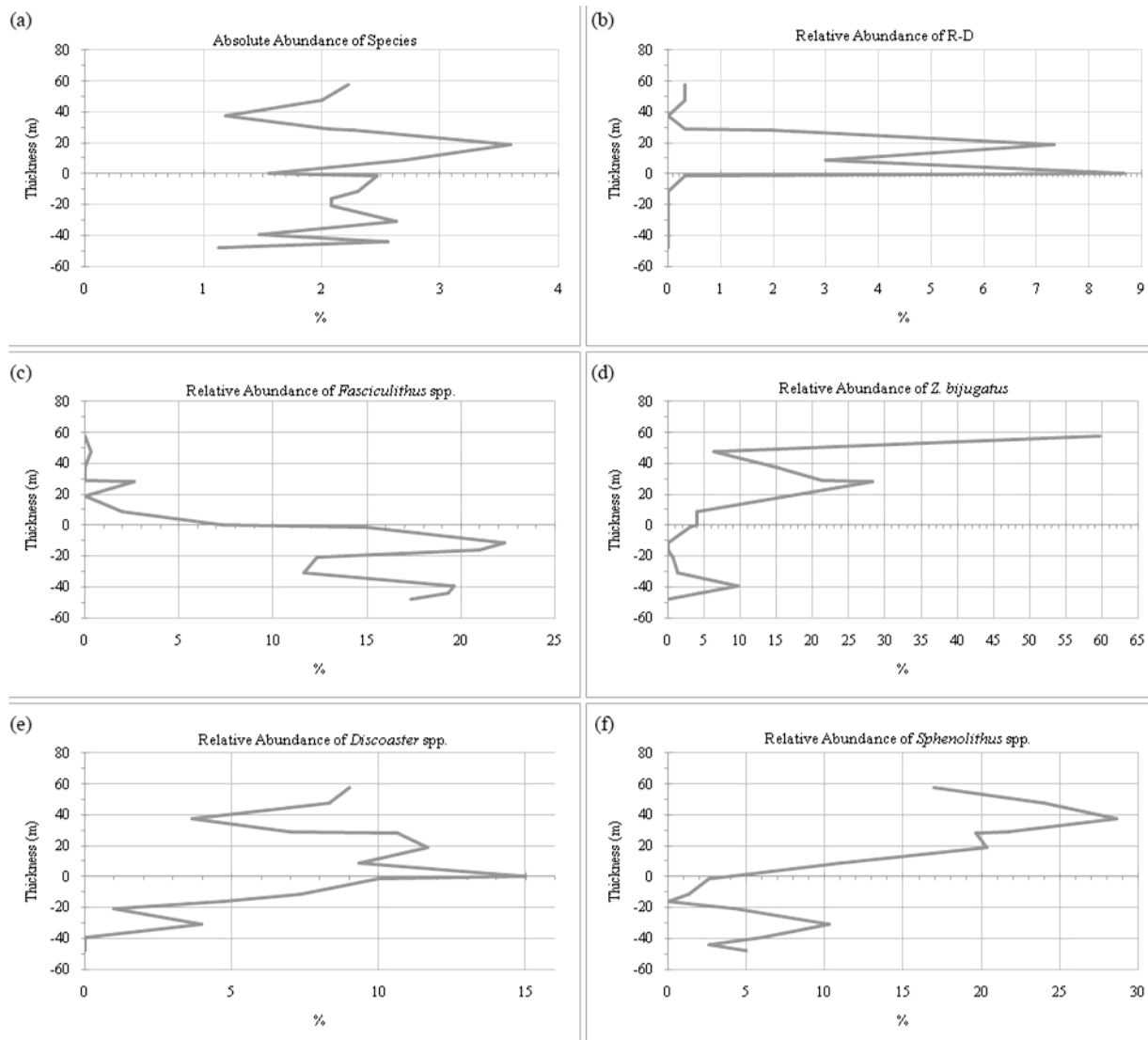
با وجود آن‌که *Sphenolithus* و *Discoaster* spp. به‌عنوان جنس‌های شاخص محیطی مطرح هستند [۲۰] اما بررسی فراوانی نسبی جنس‌های مذکور نشان از آن دارد که کاهش تنوع گونه‌ها در رخداد گرمای حداکثری پالئوسن-اؤسن (PETM) (شکل ۴-a)، با افزایش فراوانی نسبی آن‌ها (شکل ۴-e,f) مطابقت دارد که احتمالاً به‌دلیل تغییر شرایط محیطی در برهه رخداد گرمای

امروزه شرایط اقیانوس بسیار حادث‌تر از شرایطی است که حداقل ۵۵ میلیون سال پیش توسط اکوسیستم‌ها و موجودات اقیانوسی تجربه شده است. نسبت زمانی ورود کربن حاصل از فعالیت بشر بسیار کوتاه‌تر از آن است تا ظرفیت طبیعی ذخایر سطحی در جذب کربن تغییر یافته و حالت اشباع کلسیت اقیانوس سطحی (Ω_c)، در طی چند صدسال، از تقریباً $5/4$ به $2 <$ کاهش یابد. به نظر می‌رسد PETM شباهت زیادی به آینده‌ای که پیش‌بینی آن با استفاده از شواهد زمین‌شناسی میسر است، دارد [۲۶] که در برش چهارده در حوضه رسوبی زاگرس نیز به ثبت رسیده است. زمانی که نرخ افزایش CO_2 بین امروز و گذشته مقایسه می‌شود، درک آشفتگی‌های کربن در تاریخ زمین‌شناسی مهم است؛ اگرچه آرامتر از امروز بوده اما بیش از ده‌ها هزار سال طول کشیده است. درک ورود مقدار مشابه کربن در یک مقیاس زمانی کوتاه‌تر و به سبب آشفتگی سریع دو حالت مهم دیگر را اضافه می‌کند: ۱- این میزان بیش از ظرفیت سیستم زمین برای حفاظت از چنین تغییراتی است؛ ۲- ارگانیزم‌ها را در معرض فشار تکاملی بی‌سابقه قرار می‌دهد [۲۲].

در حال حاضر، با قطعیت بیان شده که میزان جذب CO_2 بدون اقیانوس از ظرفیت آن بیشتر است. اگر مسیر متداول آشفتگی کربن ادامه یابد، ما بایستی منتظر عواقب جدی تری برای اکوسیستم‌های دریایی نسبت به PETM به دلیل شدیدتر بودن اسیدی‌شدن و انحلال کربنات، در حال و آینده نزدیک باشیم. صرف‌نظر از اینکه در هر حال حادثه انقراضی شروع شده است، آشفتگی کربن متداول عوارض بزرگی برای بشر خواهد داشت. پیش‌گویی اینکه چگونه انقراض جمعی احتمالی بر جامعه اثر خواهد گذاشت مشکل است، اما آشفتگی کربن متداول می‌تواند چشمگیرترین چالشی باشد که با رشد نمایی جمعیت جهان از زمان تکامل بشر با آن مواجه شده است [۲۲].

جهانی مشاهده شده در عصر حاضر یا «آنتروپوسن»^{۱۵}، که با بالا رفتن CO_2 و غلظت متان در اتمسفر، هم‌زمان با اختراع موتور بخار در سال ۱۷۸۴ آغاز شده [۲۴]، دارد. هرچند شباهت‌هایی بین این حادثه‌هایبیرترمال در پالئوژن (به‌عنوان نمونه در برش مورد مطالعه در حوضه رسوبی زاگرس) و وضعیت امروزی وجود دارد، اما هیچ حادثه‌ای در گذشته از لحاظ برهم زدن تعادل شیمی کربنات‌های اقیانوسی دقیقاً مطابق با آنچه در آینده رخ خواهد داد، نبوده است.

برای اخیرترین حادثه انقراضی بزرگ- انقراض گرمای حداکثری پالئوسن-ائوسن، تخمین میزان آشفتگی کربن متغیر است، اما مقدار آن از $2/2-0/3$ گیگاتن CO_2 بر سال در طول مدت محدوده برآورد شده بیش از ۲۰۰۰۰ سال پیشنهاد شده است که در مقایسه با نشر تقریبی ۳۰ گیگاتن CO_2 بر سال امروزی ناچیز است. میزان معمول آزادسازی کربن حداقل ۱۰ برابر بیشتر از میزان آن در زمان آخرین انقراض اصلی گونه‌ها است. خروجی کربن در PETM به میزان $3000 Pg^{16}$ کربن در یک دوره حدود ۶۰۰۰ ساله مطرح شده، اما این خروجی برای آنتروپوسن به میزان Pg ۵۰۰۰ کربن در ۵۰۰ سال است. حادثه اسیدی‌شدن اقیانوس که به‌دست بشر به وقوع خواهد پیوست در گذشته زمین‌شناسی بی‌سابقه است [۲۵]. سرعت بالای آزادسازی کربن در سناریوی آنتروپوسن (۵۰۰ سال) بیشترین اختلاف را با سناریوی بسیار آرامتر PETM (۶۰۰۰ سال) نشان می‌دهد، چون حدود ۱۰۰۰ سال زمان برای انتقال CO_2 از آب‌های سطحی به دریای عمیق (جایی که رسوبات احتمالاً اسید اضافی را خنثی می‌کنند) نیاز است. آزادسازی $Pg \sim 2000$ کربن در اتمسفر در دو‌یست سال آینده نهایتاً منجر به آزادسازی $Pg 4000-2000$ کربن اضافی از رسوبات اقیانوسی خواهد شد، که تغییراتی پی در پی قابل مقایسه با آنچه در PETM مشاهده شده و بیش از ۱۰ برابر بزرگتر از آنچه در میلیون‌ها سال گذشته رخ داده است، را پدید می‌آورد. آزادسازی کربن اضافی می‌تواند به‌عنوان بازخوردی مثبت، گرم شدن زمین را شتاب بخشد [۲۳].



شکل ۴- نمایش فراوانی مطلق گونه‌های شناسایی شده (a) و برخی تاکسون‌های خاص (b-f) برهه رخداد گرمای حداکثری پالئوسن-اؤسن (PETM) در ضخامت رسوبی مورد بررسی از سازند پایده

۴- نتیجه‌گیری

ادامه دارد و چنانچه غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری طی قرن آتی از سطح امروزی به ۶۰۰-۴۵۰ ppmv افزایش یابد، میزان بارش در فصل خشک به شکل برگشت‌ناپذیری کاهش خواهد یافت [۲۷]. با عنایت به این موضوع که در هر حال حادثه انقراضی شروع شده است، پیش بینی اینکه چگونه این حادثه احتمالی بر جامعه اثر خواهد گذاشت مشکل است.

پی‌نوشت

- ¹ Paleocene-Eocene Thermal Maximum یا PETM
- ² Carbonate Compensation Depth یا CCD
- ³ Carbon Isotop Excursion یا CIE
- ⁴ Clathrates
- ⁵ Primates
- ⁶ Malformed
- ⁷ Smear slide
- ⁸ Hotplate

- [9] Thomas E. Cenozoic mass extinctions in the deep-sea: What disturbs the largest habitat on Earth? in *Large Ecosystem Perturbations: Causes and Consequences*. Geological Society of America special paper; 2007; 424: 1-24.
- [10] Gingerich P D. Environment and evolution through the Paleocene–Eocene Thermal Maximum. *Trends in Ecology & Evolution*; 2006; 21: 246–253.
- [11] Falkowski P G, Katz M E, Milligan A J, Fennel K, Cramer B S, Aubry M P, Berner R A, Novacek M J, Zapol W M. The rise of oxygen over the past 205 million years and the evolution of large placental mammals. *Science*; 2005; 309: 2202–2204.
- [12] Jones B M, Iglesias-Rodriguez M D, Skipp P J, Edwards R J, Greaves M J, Young J R, Elderfield H, O'Connor C D. Responses of the *Emiliana huxleyi* Proteome to Ocean Acidification. *PLOS ONE*; 2013; 8(4).
- [13] Gibbs S J, Poulton A J, Bown P R, Daniels C J, Hopkins J, Young J R, Jones H L, Thiemann G J, O'Dea S A, Newsam C. Species-specific growth response of coccolithophores to Palaeocene–Eocene environmental change. *Nature Geoscience*; 2013; 1-5.
- [14] Speijer R P, Scheibner C, Stassen P, Morsi A M. Response of marine ecosystems to deep-time global warming: a synthesis of biotic patterns across the Paleocene-Eocene thermal maximum (PETM). *Austrian Journal of Earth Sciences*; 2012; 105(1): 6-16.
- [15] Bown P R, Young J R. *Techniques In Calcareous Nannofossil Biostratigraphy*. London: British Micropalaeontol Soc, Chapman and Hall; 1998. 16-28.
- [16] Perch-Nielsen K. Cenozoic calcareous nannofossils In *Plankton Stratigraphy*. Cambridge: Cambridge University Press; 1985. 427–554.
- [17] Sadler P M. Constrained Optimization approaches to the paleobiologic correlation and seriation problems: Part one a user's guide to the CONOP program family. Department of Earth Sciences, University of California, Riverside, CA 92521; 1998-2006.
- [18] Martini E. Standard Tertiary and Quaternary calcareous nannoplankton zonation In *Proceedings of the Second Planktonic Conference, Roma, 1970*. Edizioni Tecnoscienza, Rome; 1971; 2: 739–785.
- [1] Jiang S, Wise S W. Surface-water chemistry and fertility variations in the tropical Atlantic across the Paleocene/Eocene Thermal Maximum as evidenced by calcareous nannoplankton from ODP Leg 207, Hole 1259B. *Revue de Micropaleontologie*; 2006; 49: 227-244.
- [2] Self-Trail J M, Powars D S, Watkins D K, Wandless G A. Calcareous nannofossil assemblage changes across the Paleocene–Eocene Thermal Maximum: Evidence from a shelf setting. *Marine Micropaleontology*; 2012; 92-93: 61–80.
- [3] Murphy B H, Farley K A, Zachos J C. An extraterrestrial ^3He -based timescale for the Paleocene-Eocene thermal maximum (PETM) from Walvis Ridge, IODP Site 1266. *Geochimica et Cosmochimica Acta*; 2010; 74: 5098-5108.
- [4] Kroon D, Zachos J C, Blum P. (2004). *Proc. Ocean Drill. Program, Initial Rep.*, vol. 208. Ocean Drilling Program, College Station, TX, 208.
- [5] Vandenberghe N, Hilgen F J, Speijer R P. The Paleogene Period, in *The Geological Time Scale 2012*. China, Elsevier; 2012. 855-921.
- [6] Raffi I, Backman J, Palike H. Changes in calcareous nannofossil assemblages across the Paleocene/Eocene transition from the paleo-equatorial Pacific Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*; 2005; 226: 93-126.
- [7] Zachos J C, Röhl U, Schellenberg S A, Sluijs A, Hodell D A, Kelly D C, Thomas E, Nicolo M, Raffi I, Lourens L J, McCarren H, Kroon D. Rapid acidification of the ocean during the Paleocene–Eocene thermal maximum. *Science*; 2005; 308: 1611-1615.
- [8] Khozyem H, Adatte T, Spangenberg J E, Tantawy A A, Keller G. Palaeoenvironmental and climatic changes during the Palaeocene–Eocene Thermal Maximum (PETM) at the Wadi Nukhul Section, Sinai, Egypt. *Journal of the Geological Society, London*; 2013; 170: 341-352.

منابع

- [23] Crutzen P. The Anthropocene. *Journal de Physique*;2002;12:1-5.
- [24] Zeebe R E. History of seawater carbonate chemistry, atmospheric CO₂, and ocean acidification. *Annual Review Earth Planetary Science*;2012;40:141-165.
- [25] Zeebe R E, Ridgwell A. Past changes of ocean carbonate chemistry. In *Ocean acidification*, Oxford, UK: Oxford University Press;2011. 21–40.
- [26] Solomon S, Plattner G K, Knutti R, Friedlingstein P. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*;2009;106:1704-1709.
- [19] Raffi I, Backman J, Zachos J C, Sluijs A. The response of calcareous nannofossil assemblages to the Paleocene Eocene Thermal Maximum at the Walvis Ridge in the South Atlantic. *Marine Micropaleontology*;2009;70:201–12.
- [20] Schellnhuber, H J, Hare W, Serdeczny O, Adams S, Schaeffer M, Schewe J, Wang X, Warszawski L. Turn Down the Heat: Wh a 4°C Warmer World must be Avoided. *The World Bank*, Washington DC;2012;p.106.
- [21] Bijma J, Pörtner H-O, Yesson C, Rogers A D. Climate change and the oceans – What does the future hold?. *Marine Pollution Bulletin*; 2013; in press.
- [22] Winguth A M E. The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: Feedbacks Between Climate Change and Biogeochemical Cycles. In *Climate Change-Geophysical Foundations and Ecological Effects*. In Tech.;2011;43-64.



