

کاربرد زنجیره مارکوف در تفسیر توالی‌های رسوبی، مطالعه موردی نهشته‌های کربناته سازند مبارک (البرز خاوری، شمال ایران)

یعقوب نصیری^۱، آرام بایت‌گل^۳، اسداله محبوبی^۱، سیدرضا موسوی حرمی^{۱*} و حسین مصدق^۴

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد

۳- دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان

۴- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران

نویسنده مسئول: moussavi@um.ac.ir

دریافت: ۹۷/۱۲/۱۲ پذیرش: ۹۸/۴/۵

چکیده

توالی‌های کربناته سازند مبارک، به سن می‌سی‌سی‌پی ان، واقع در البرز مرکزی و خاوری در دو برش تویه رودبار و کوه سیاهه، دارای مجموعه متنوعی از اثرفسیل‌ها هستند. در این پژوهش چرخه‌های مختلف واحدهای سنگی سازند مبارک با بهره‌گیری از روش مارکوف و مشاهدات میدانی بررسی شد و برپایه ارائه یک توالی ایده‌ال، محیط‌رسوبی آن تفسیر شد. برای انجام این کار، رسوبات این سازند به ۵ مجموعه رخساره‌ای تناوب سنگ‌آهک‌های آرژیلی و شیل‌های تیره‌رنگ دارای ایکنوفاسیس زئوفیکوس، سنگ‌آهک‌های نازک تا متوسط لایه دارای ایکنوفاسیس کروزیانا، سنگ‌آهک‌های دارای ایکنوفاسیس اسکولایتوس، سنگ‌آهک‌های متوسط تا ستر لایه دارای مخلوط ایکنوفاسیس کروزیانا و اسکولایتوس و تناوب سنگ‌آهک و شیل بدون تریس فسیل تقسیم شد. بررسی زنجیره مارکوف نشان می‌دهد که رسوبات سازند مبارک از چرخه‌های ستر شونده به سمت بالا تشکیل شده‌اند. یک چرخه کامل از قاعده به سمت بالا شامل تناوب سنگ آهک و شیل بدون تریس فسیل، سنگ‌آهک‌های آرژیلی و شیل‌های تیره‌رنگ دارای ایکنوفاسیس زئوفیکوس، کربنات‌های نازک تا متوسط لایه دارای ایکنوفاسیس کروزیانا، کربنات‌های دارای ایکنوفاسیس اسکولایتوس، کربنات‌های متوسط تا ستر لایه دارای مخلوط ایکنوفاسیس کروزیانا و اسکولایتوس است. گسترش چرخه‌های رسوبی دارای ایکنوفاسیس‌ها پاهماً توسط عوامل محیطی از جمله نوع رسوب، مواد غذایی در دسترس، میزان اکسیژن و سطح انرژی کنترل می‌شود. در این سازند، ۴ ایکنوفاسیس شناسایی شد که شامل ایکنوفاسیس کروزیانا، اسکولایتوس، زئوفیکوس و مخلوط کروزیانا-اسکولایتوس است. رسوبات رمپ درونی در این سازند، شامل عناصر اسکولایتوس با تنوع کم است. در نهشته‌های دیستال رمپ درونی و پروکسیمال رمپ میانی سازند مبارک، وجود اثرات زیستی جانوران رسوب تا معلق خوار (مخلوط کروزیانا-اسکولایتوس) نشان از فراوانی مواد غذایی در بستر و ستون آب می‌باشد. رسوبات رمپ میانی سازند مبارک، شامل مجموعه متنوعی از اثرفسیل‌ها در محیط کاملاً دریایی است، که وجود ساختارهای تغذیه کننده از رسوبات و گریزینگ (ایکنوفاسیس کروزیانا) نشانگر چنین محیطی است. رسوبات رمپ بیرونی سازند مبارک، دارای مجموعه‌ای از اثرفسیل‌ها است که وجود ساختارهای گریزینگ و استراحت (ایکنوفاسیس زئوفیکوس) چنین محیطی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سازند مبارک، زون البرز، ایکنوفاسیس، زنجیره مارکوف

پیشگفتار

۲۰۱۰؛ نصیری و همکاران، ۲۰۱۳). هدف از انجام این

مطالعه نیز بهره‌گیری از روش زنجیره مارکوف برای بررسی احتمال وجود واحدهای سنگی مختلف دارای اثرفسیل در سازند مبارک بر مبنای مشاهدات میدانی به منظور ارائه یک توالی ایده‌ال است که بتوان بر پایه آن یک مدل اثرشناسی را برای این سازند ارائه نمود. علاوه بر این با توجه به اینکه بخش‌هایی از این سازند اثرفسیل ندارد، با بهره‌گیری از این روش بتوان نوع اثرفسیل آن‌ها

زنجیره مارکوف یکی از روش‌های آماری است که با بهره‌گیری از آن می‌توان احتمال وقوع و تکرار هر یک از واحدهای سنگی را در زمان ته‌نشست بررسی کرده و بر پایه آن مدل رسوبی را پیشنهاد و تفسیر نمود. پژوهشگران متعددی از این روش برای ارائه توالی ایده‌ال رسوبی بهره‌گیری کرده‌اند برای نمونه (کار، ۱۹۸۲؛ هوتا و همکاران، ۲۰۰۳؛ هوتا و مائیمما، ۲۰۰۴؛ آلپایدین،

روش کار

از روش زنجیره مارکوف می‌توان برای ارزیابی احتمال رخداد سیستم‌های رسوب‌گذاری که به طور پیوسته یا ناپیوسته نسبت به زمان یا مکان و به طور تصادفی در حال تغییر هستند بهره‌گیری کرد (پاورس و استرلینگ، ۱۹۸۲؛ ناس و ساهو، ۲۰۰۹؛ نصیری و همکاران، ۲۰۱۳). اگر چه به طور کلی در روش مارکوف فضا و زمان را می‌توان به شکل پیوسته یا گسسته اعمال نمود اما در این مطالعه مکان و زمان به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود زیرا در یک توالی پیوسته رسوبی واحدهایی که به طور عمودی روی هم قرار می‌گیرند مربوط به محیط‌های رسوبی مجاور یکدیگرند. این حالت پیوستگی که از قانون والتر پیروی می‌کند زنجیره مارکوف نامیده می‌شود (بیلینتون، ۱۹۹۲؛ گالاگر و همکاران، ۲۰۰۹). دو برش از سازند مبارک در تویه رودبار و کوه سیاهه در البرز خاوری برداشت گردیدند (شکل ۱). در این برداشتها ستبرای نهشته‌ها، سطوح لایه‌بندی، ساختارهای رسوبی، اثرفسیل‌ها، میزان زیست‌آشفستگی، تغییرات اندازه دانه‌ها و همچنین ارتباط لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه نرم‌افزار *MATLAB* به منظور مدل‌سازی زنجیره مارکوف بکار گرفته شده است. با بهره‌گیری از این نرم‌افزار، برنامه فرمول‌های روش مارکوف تهیه و سپس با بهره‌گیری از داده‌های میدانی و این برنامه‌ها نتایج زیر به دست آمده است. داده‌های بهره‌گیری شده در این مقاله از دو برش بر پایه داده‌های میدانی برای تشکیل یک ماتریس شمارش انتقالی^۱ یا ماتریس فراوانی مشاهدات گردآوری شده است (شکل ۲)، آزمون مستقل احتمال انتقال^۲ توسط فرمول شماره ۱ و احتمال تصادف^۳ توسط فرمول شماره ۲ را پردازش کرده و ماتریس اختلافی^۴ توسط فرمول شماره ۳ با روش‌های مشخص شده توسط میال (۱۹۷۳) و کاشیپ (۱۹۷۵) بدست می‌آید. ماتریس احتمال انتقال مقدار انتقال رخساره‌ها در هر مرحله را مشخص می‌کند. اما در ماتریس تصادفی احتمال وقوع رخساره را در هر ردیف نشان می‌دهد. چرخه‌ای از حالت‌های رخساره‌ها (ویژگی مارکوفی) با روش‌های پیشنهاد شده توسط بیلینگ سلی (۱۹۶۱) و هاربو و

را پیش‌بینی کرد. آسرتو (۱۹۶۳) سنگ‌های آهکی فسیل‌دار کربنیفر پیشین بلندی‌های امامزاده هاشم در ناحیه مبارک‌آباد را سازند مبارک نام‌گذاری کرد (آقانیاتی، ۱۳۸۳). نام این سازند از روستای مبارک‌آباد در شمال خاوری تهران گرفته شده است. سازند مبارک با ۴۵۰ متر ستبراء، معرف سنگ‌های کربنیفر زیرین البرز است. اگرچه این واحد سنگی به مقدار زیاد توالی‌های کربنیفر البرز جنوبی را آشکار می‌کند، ولی گسترش آن در البرز شمالی نیز قابل‌توجه است و حتی در مقایسه با البرز جنوبی ستبرای بیش‌تری دارد (آسرتو، ۱۹۶۳). به گزارش آسرتو (۱۹۶۳) در محل بُرش الگو، سازند مبارک روی سازند میلا و در زیر سازند نسن (پرمین بالایی) قرار دارد. ولی در نواحی دیگر، سازند مبارک بیش‌تر سازند جیروود را می‌پوشاند و توالی‌های روی آن ممکن است به سنگ‌های گوناگون (پرمین، تریاس و ژوراسیک) باشد. بررسی ساختارهای زیستی جهت تحلیل اثررخساره‌ای و ارائه مدل رسوبی مربوطه اهمیت بسزایی دارد (باتیوس و مانگانو، ۱۹۹۵؛ فورزیش و همکاران، ۲۰۱۸؛ درادر و توار، ۲۰۱۸، توار و همکاران، ۲۰۱۹؛ نصیری و همکاران، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹). بررسی‌های میدانی در دو برش از سازند مبارک، منجر به تشخیص ۴ مجموعه رخساره ایکنولوژی گردید. برش تویه رودبار که قاعده آن به سازند خوش بیلاق ختم می‌شود، در ۵۰ کیلومتری شمال‌باختر دامغان و در شمال روستای تویه رودبار واقع شده و توسط جاده آسفالته دامغان- تویه رودبار، با پیمودن ۵۰ کیلومتر در جاده آسفالته به سمت بابا امان و سپس روستای تویه رودبار قابل دسترسی است. از لحاظ مختصات جغرافیایی قاعده این برش دارای طول جغرافیایی ۱۰" و ۵۶' و ۴۷° و خاوری و عرض جغرافیایی ۱۵" و ۲۴' و ۳۳° شمالی است (شکل ۱). برش سیاهه که قاعده آن به سازند خوش بیلاق ختم می‌شود، در ۳۰ کیلومتری خاور شاهرود و در شمال روستای سیاهه واقع شده و توسط جاده آسفالته شاهرود- بسطام با پیمودن ۳۰ کیلومتر جاده آسفالته به سمت بسطام قابل دسترسی است. از لحاظ مختصات جغرافیایی، قاعده این برش دارای طول جغرافیایی ۱۰" و ۵۶' و ۴۷° و خاوری و عرض جغرافیایی ۱۵" و ۲۴' و ۳۳° شمالی است (شکل ۱). هدف این مقاله مطالعه آثار متنوع اثرفسیل‌های نهشته‌های کربناته این سازند و ارائه مدل اثرشناسی توسط روش زنجیره مارکوف است.

¹ Transition count matrix, *fij*

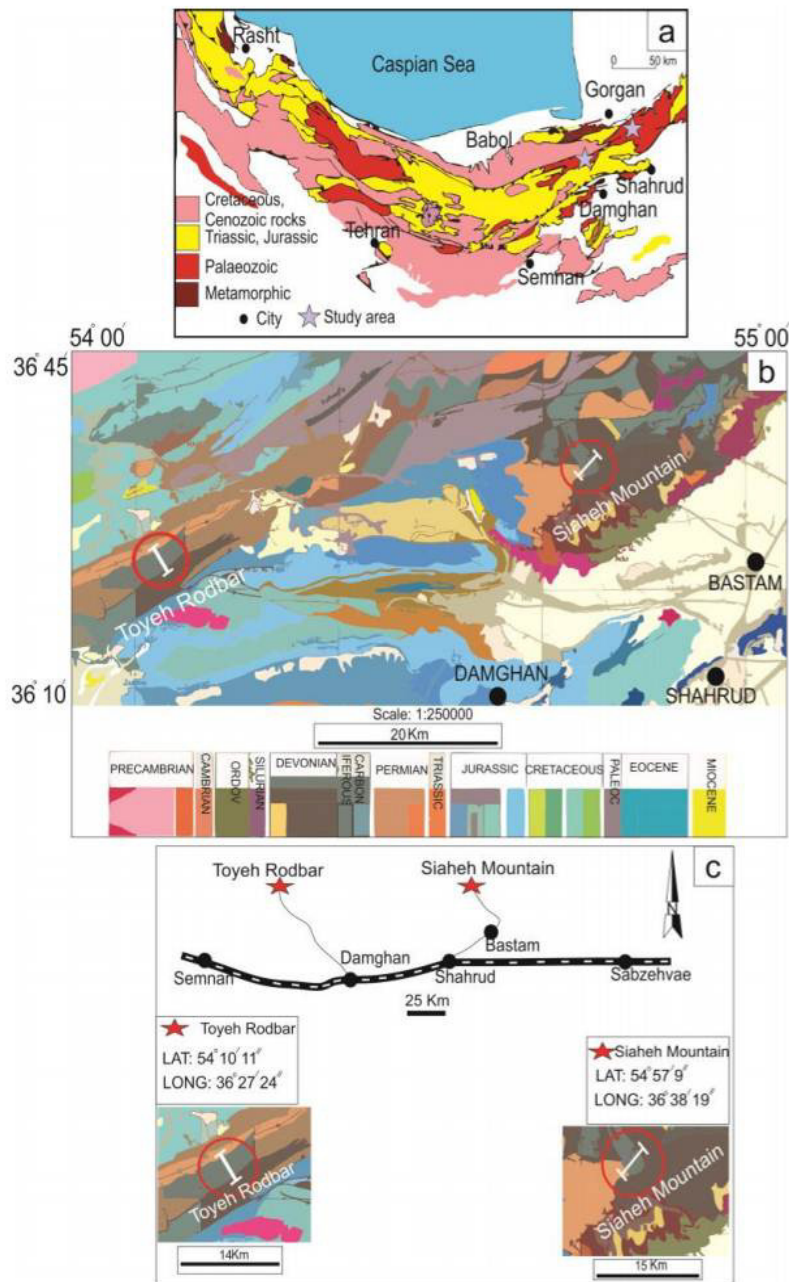
² Transition probability matrix, *pij*

³ Random probability matrix, *rij*

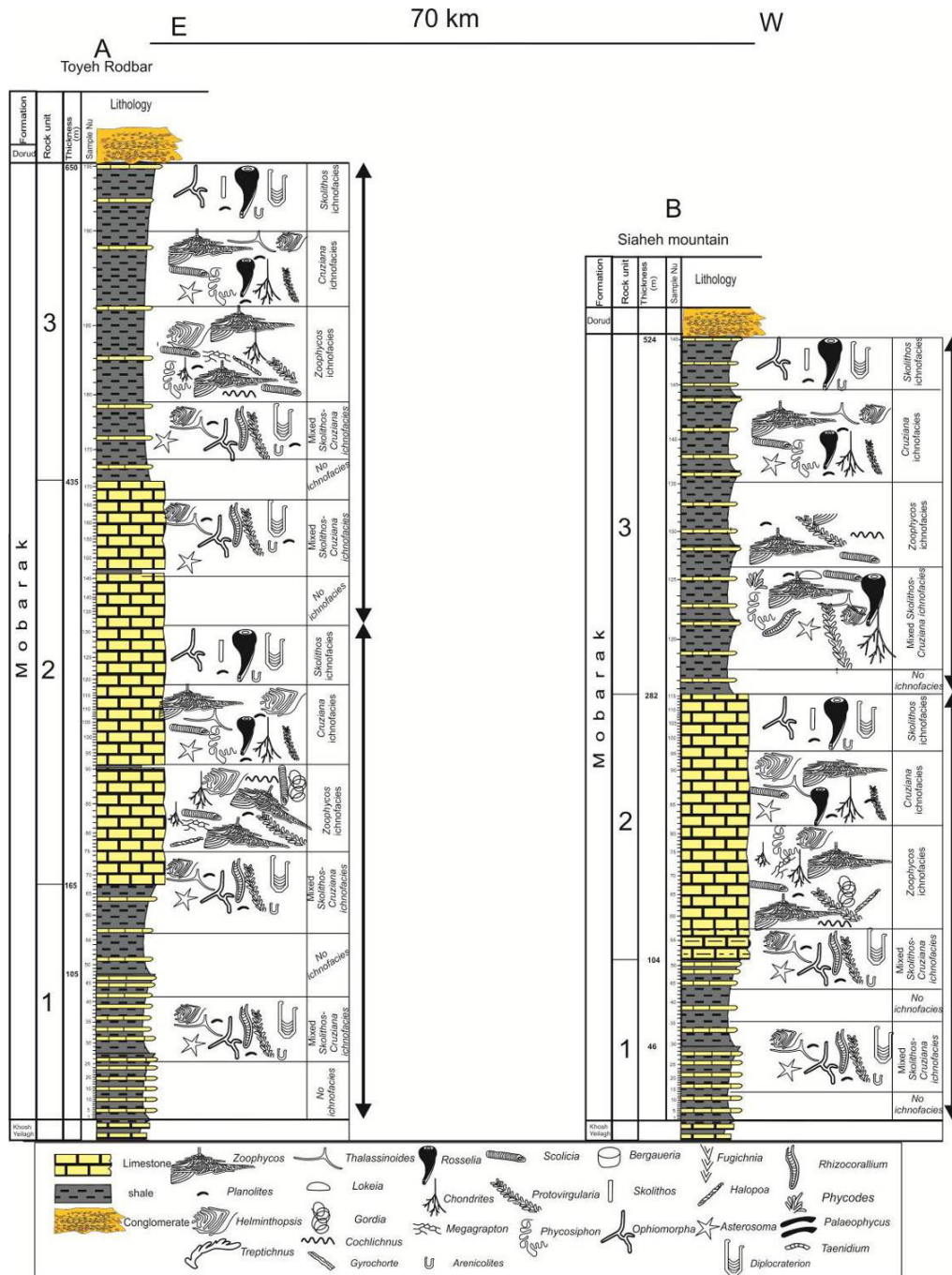
⁴ Difference matrix, *dij*

است. هم‌چنین در این پژوهش بر خلاف دیگر پژوهش‌ها (البایدین، ۲۰۱۰؛ هوتا و مائجم، ۲۰۰۴؛ هوتا و همکاران، ۲۰۰۳) احتمال گذر از یک رخساره به همان رخساره نیز در نظر گرفته شده است. یعنی ممکن است در هنگام برداشت، یک نوع واحد سنگی چندین مرتبه دیده شود.

بونهام کارتر (۱۹۷۰) مورد آزمایش قرار می‌گیرد. ستبرای کل لایه (x در متر)، تعداد چرخه‌ها (y) و ستبرای متوسط چرخه (z در متر) برای تمام دو برش محاسبه گردید. رید و دین (۱۹۶۷) کمینه ستبرای یک چینه را برای چرخه‌های مارکوف ۳۰ سانتی‌متر و کاشیپ (۱۹۷۵) ۱ متر پیشنهاد کرده‌اند. هم‌چنین در این پژوهش فاصله نمونه‌برداری ۱ متر برای چرخه‌های مارکوف به کار رفته



شکل ۱. (a) پهنه رسوبی ساختاری البرز با جایگاه برش‌های مورد بررسی. (b) بخشی از نقشه زمین‌شناسی گرگان با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ (صالحی‌راد و همکاران، ۱۳۶۹) که محل برش‌ها بر روی آن نشان داده شده است. (c) نمایی نزدیک از جایگاه برش‌ها در نقشه زمین‌شناسی و راه‌های دسترسی به همراه مختصات جغرافیایی برش‌های مورد بررسی



شکل ۲. ستون‌های چینه‌سنگی برش‌های مورد بررسی به همراه اکتینوفاسیس‌های شناسایی شده

بعد از رسوب‌گذاری لایه‌ها و سطوح چینه‌شناسی در نهشته‌های سازند مبارک مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب توصیف رخساره‌ها بر پایه ساخت‌های رسوبی فیزیکی و زیستی جهت شناخت الگوی برانبارش (ریدینگ، ۱۹۹۶)، در نهشته‌های سازند مبارک بکار برده شده است. برای سهولت کار و اجتناب از خطاهای موجود در محاسبات مارکوف (میل، ۱۹۷۳؛ کاشیپ، ۱۹۷۵)،

برای تفسیر واحدهای اثرشناسی، بررسی اثرفسیل‌ها در مجموعه‌های اثرشناسی (شامل انواع اثرفسیل‌ها موجود در یک لایه رسوبی) و ارتباط آن‌ها با یکدیگر (مکلوری، ۲۰۰۴) و درجه زیست‌آشفتنگی (BI) (تیلور و همکاران، ۲۰۰۳) همراه با تحلیل رخساره‌ای صورت گرفته است. با توصیف مجموعه‌های اثرشناسی بر پایه تجزیه و تحلیل اثرفسیل‌ها (مک‌ایچرن و همکاران، ۲۰۰۷)، شرایط قبل و

نمونه‌برداری از ضرب ماتریس احتمال در خودش بهره‌گیری می‌شود. به عنوان نمونه با یک بار عمل ضرب ماتریس احتمال در خودش درایه‌های ماتریس P^2 نشان‌دهنده احتمال رفتن به مرحله بعد (رخساره بعدی) می‌باشد. اصل گفته شده برای هر توانی از ماتریس P تعمیم‌پذیر می‌باشد و از این رو اجزای ماتریکس P^{ij} نمایانگر احتمالات حالت j ام در مرحله n ام می‌باشد. از آنجایی که حالت سیستم در شروع مشخص است ($p(0)$) (رخساره اول را برای فرمول تعریف می‌کنیم که چه رخساره‌ای باشد) ماتریس Pn باید با ضربی به نام بردار احتمال شرایط اولیه یا همان $P(0)$ که خود نمایانگر حالت اولیه است مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین به رابطه کلی زیر برای بدست آوردن احتمال حالت‌های مختلف در محله n ام دست می‌یابیم:

$$P(n) = p(0) \times P^n$$

به این منظور از یک رخساره خاص شروع کرده و با در نظر گرفتن سایر رخساره‌ها احتمال قرار گرفتن آن‌ها در روی هم در توالی ارزیابی شده است. به عنوان نمونه اگر از رخساره A شروع شود خواهیم داشت:

$$P(\cdot) = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

یعنی این که احتمال رخساره A در این مرحله ۱۰۰ درصد و سایر رخساره‌ها صفر است.

یا اگر احتمال رخساره‌های D و E مساوی و سایر رخساره‌ها صفر در نظر گرفته شود (این حالت از وقوع رخساره‌ها را برای فرمول مشخص می‌کنیم) به صورت زیر است:

$$P(\cdot) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.5 \quad 0.5]$$

به همین صورت برای حالت‌های مختلف $P(\cdot)$ را می‌توان محاسبه کرد.

نمودار روابط رخساره بر پایه نتایج ماتریس تفاوت برای رسیدن به انتقال به سمت بالای حالت‌های رخساره ارائه شده است.

چرخه‌ای بودن حالت‌های رخساره‌ها توسط ازمون X^2 تست شده است. یعنی یکی از گام‌های پایهی که می‌توان از نظریه زنجیره مارکف در مطالعات بهره‌گیری کرد، وابستگی حالت به همدیگر است، اثبات اینکه احتمال رخداد بعدی وابسته به وقوع و رخداد قبلی است. برای اثبات این امر از ازمون X^2 بهره‌گیری می‌شود

$$X^2 = \sum \frac{(o_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} \quad (\text{جدول شماره ۲}).$$

برداشت‌های انجام شده در صحرا از سازند مبارک به ۵ مجموعه رخساره‌ای شامل: A کربنات‌های دارای ایکنوفاسیس اسکولایتوس، B کربنات‌های نازک تا متوسط لایه دارای ایکنوفاسیس کروزیانا، C تناوب سنگ‌آهک‌های ارژیلی و شیل‌های تیره‌رنگ دارای ایکنوفاسیس زئوفیکوس، D کربنات‌های متوسط تا ستبر لایه دارای مخلوط ایکنوفاسیس کروزیانا و اسکولایتوس و E تناوب سنگ‌آهک و شیل بدون اثر فسیل تقسیم شده است. با توجه به مشاهدات میدانی، تعداد انتقالات هر یک از ۵ مجموعه رخساره‌های سنگی A تا E به صورت ماتریس فراوانی مشاهدات (ماتریس F) تنظیم شد (جدول ۱). در این ماتریس، عددها، شمار تکرار هر یک از رخساره‌ها را در روی یکدیگر نشان می‌دهند (به طور نمونه رخساره A ، ۱۶ مرتبه بر روی رخساره B مشاهده شد). اعداد صفر نشان می‌دهد که در مشاهدات میدانی هیچگاه این رخساره‌ها در تماس با یکدیگر نبوده‌اند. از ماتریس فراوانی مشاهدات f_{ij} ماتریس‌های احتمال انتقال، تصادف و تفاوت محاسبه شده است. برای محاسبه ماتریس احتمال انتقال از رابطه شماره ۱ بهره‌گیری شده است.

$$P_{ij} = \frac{f_{ij}}{s_i} \quad (1)$$

ماتریس احتمال تصادف توسط فرمول شماره ۲

$$r_{ij} = \frac{s_j}{T - s_j} \quad (2)$$

ماتریس اختلاف توسط فرمول شماره ۳

$$d_{ij} = p_{ij} - r_{ij} \quad (3)$$

در فرمول شماره ۲، T به روش زیر محاسبه می‌شود:

$$T = \sum_{i,j=1}^n f_{ij}$$

n (تعداد ردیف‌ها یا ستون‌ها را شامل می‌شود، که در این مقاله ۵ است)

در فرمول شماره ۱ f_{ij} درایه سطر i ام و ستون j ام ماتریس فراوانی مشاهدات و در فرمول شماره ۲ s_i جمع ردیف i ام و s_j جمع ردیف j ام از ماتریس فراوانی مشاهدات (f_{ij}) هستند. هم‌چنین با بهره‌گیری از فرمول بالا احتمال تعداد روی هم قرار گرفتن واحدهای سنگی مختلف، به دست آمده است. برای روی هم قرار گرفتن رخساره‌های مختلف پس از طی مراحل زمانی یا

جدول ۱. ماتریس‌های مارکوفی از حالت‌های رخساره‌های سازند مبارک

ماتریس فراوانی انتقالات (f_{ij}) (Transition count matrix)					
	A	B	C	D	E
A	۰	۱۵	۱۷	۴	۰
B	۷	۰	۳۷	۱۵	۰
C	۱۵	۳۲	۰	۱۶۱	۴
D	۱۴	۱۶	۱۶۳	۰	۳۴
E	۰	۰	۵	۳۳	۰

ماتریس احتمال انتقال (p_{ij}) (Transition probability matrix)					
	A	B	C	D	E
A	۰/۰۰	۰/۴۲	۰/۴۷	۰/۱۱	۰/۰۰
B	۰/۱۲	۰/۰۰	۰/۶۳	۰/۲۵	۰/۰۰
C	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۰۰	۰/۷۶	۰/۰۲
D	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۷۲	۰/۰۰	۰/۱۵
E	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۳	۰/۸۷	۰/۰۰

ماتریس احتمال تصادف (r_{ij}) (Random probability matrix)					
	A	B	C	D	E
A	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۴۰	۰/۴۳	۰/۰۷
B	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۴۱	۰/۴۴	۰/۰۷
C	۰/۱۰	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۶۳	۰/۱۱
D	۰/۱۰	۰/۱۷	۰/۶۲	۰/۰۰	۰/۱۱
E	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۴۰	۰/۴۲	۰/۰۰

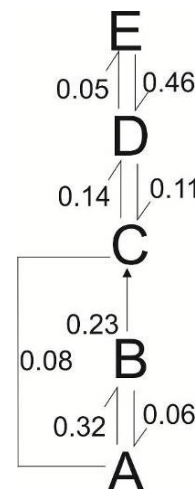
ماتریس تفاوت (d_{ij}) (Difference matrix)					
	A	B	C	D	E
A	۰/۰۰	۰/۳۱	۰/۰۷	- ۰/۳۱	- ۰/۰۷
B	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۲۲	- ۰/۱۹	- ۰/۰۷
C	- ۰/۰۳	- ۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۱۳	- ۰/۰۹
D	- ۰/۰۵	- ۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۵
E	- ۰/۰۷	- ۰/۱۱	- ۰/۲۷	۰/۴۵	۰/۰۰

جدول ۲. ارقام آزمون (X^2)

ازمون X^2	مقدار محاسبه شده از X^2	درجه آزادی	مقدار محدود کننده X^2 در ۰.۱٪ سطح اهمیت
Billingslay (1961)	۱۳۶/۵۴	۱۵	۳۷/۷۰
Harbaugh and Bonham-Carter (1970)	۳۷۶/۷۸	۱۶	۳۱/۳۶

یافته‌ها و گفتگو

مقدار فراوانی مشاهدات (f_{ij}) ، احتمال انتقال (p_{ij}) ، احتمال تصادف (r_{ij}) و تفاوت (d_{ij}) ماتریس‌ها به ۵ مجموعه رخساره‌ای (در بالا اشاره شد) از سازند مبارک در جدول ۱ خلاصه شده است. مقادیر محاسبه شده از مربع کی دو یا مجذور کای (X^2) که فراتر از مقدار مشخص شده در سطح ۰/۱٪ است، نشان دهنده حضور آرایش چرخه‌ای و مارکوفی حالت‌های رخساره‌ها است (بیلینگزلی، ۱۹۶۱؛ هاریگ و بونهام کارتر، ۱۹۷۰). نمودار ارتباط رخساره‌ها (شکل ۳) از تفاوت در نتایج ماتریس ایجاد شده است. این نمودار نشان می‌دهد که چرخه‌های سازند مبارک تقریباً از نوع نامتقارن به سمت بالا ریز شونده هستند. هر سیکل ایده‌آل بر پایه روش مارکوف با کرنات‌های دارای ایکنوفاسیس اسکولایتوس (رخساره A) شروع می‌شود و در ادامه به کرنات‌های نازک تا متوسط لایه دارای ایکنوفاسیس کروزیانا (رخساره B)، تناوب سنگ‌آهک‌های ارژیلی و شیل‌های تیره‌رنگ دارای ایکنوفاسیس زئوفیکوس (رخساره C) در قاعده شروع می‌شود و بطور متوالی توسط کرنات‌های متوسط تا سبتر لایه دارای مخلوط ایکنوفاسیس کروزیانا و اسکولایتوس (رخساره D)، و تناوب سنگ‌آهک و شیل بدون تریس فسیل (رخساره E) ادامه می‌یابد که در شکل ۲ نشان داده شد.



شکل ۳. نمودار ارتباط رخساره‌های سازند مبارک در برش‌های مورد بررسی

ناگهانی در لیتولوژی‌ها نشان می‌دهد که رسوب‌گذاری رسوبات سازند مبارک در بخش‌هایی بوسیله جریان‌های پر انرژی سریع تغییر می‌یابد. افزایش احتمال انتقال از A به B و B به A بیش از انتقال تصادفی به ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۰۶ است، که نشان‌دهنده احتمال بیش‌تر وقوع شرایط پرنرژی به همراه نرخ بالای رسوب‌گذاری و شرایط کم انرژی است که منجر به پوشیده شدن رخساره‌های دارای اسکولایتوس توسط ایکنوفاسیس کروزیانا می‌شود. افزایش بیش از حد هم‌پوشانی (تکرار) احتمال رسوبات دارای ایکنوفاسیس زئوفیکوس (رخساره C) بر روی رخساره‌های A و B و C به ترتیب ۰/۰۸ و ۰/۲۳ و ۰/۲۸ است که نشان‌دهنده فراوانی رخساره‌های زئوفیکوس‌دار است. این ویژگی معمولاً نشان‌دهنده شرایط بخش‌های عمیق‌تر حوضه است که این شرایط برای رسوب‌گذاری رسوبات دارای ایکنوفاسیس زئوفیکوس مناسب‌تر است. این شرایط در بخش‌های زیادی از سازند مبارک مشاهده می‌شود.

در بسیاری از موارد، چرخه‌ها با رخساره D در بالا پایان می‌یابند. در برخی موارد، شیل‌های تیره‌رنگ نازک لایه (رخساره E) در بالای چرخه‌ها وجود دارند. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که بسیاری از توالی‌های زنجیره مارکوفی در انتها دارای احتمال رخداد رسوب‌گذاری زیاد هستند.

ایکنولوژی سازند مبارک

سازند مبارک حاوی مجموعه متفاوتی از آثار فسیلی است که شرایط محیطی این سازند بیش‌ترین تاثیر را بر توزیع آثار فسیلی داشته است، که توالی‌های اثرشناسی و ارتباط آن‌ها با هم در طول برش‌های مورد بررسی با توجه به تغییرات رخساره‌ای و محیطی تایید کننده این مطلب می‌باشد (شکل ۲).

در مطالعات حاضر ۴ نوع ایکنوفاسیس در نهشته‌های سازند مبارک بر پایه اثر جنس‌های شناسایی شده تشخیص داده شدند. شامل کروزیانا، اسکولایتوس، ایکنوفاسیس مخلوط کروزیانا- اسکولایتوس و زئوفیکوس است.

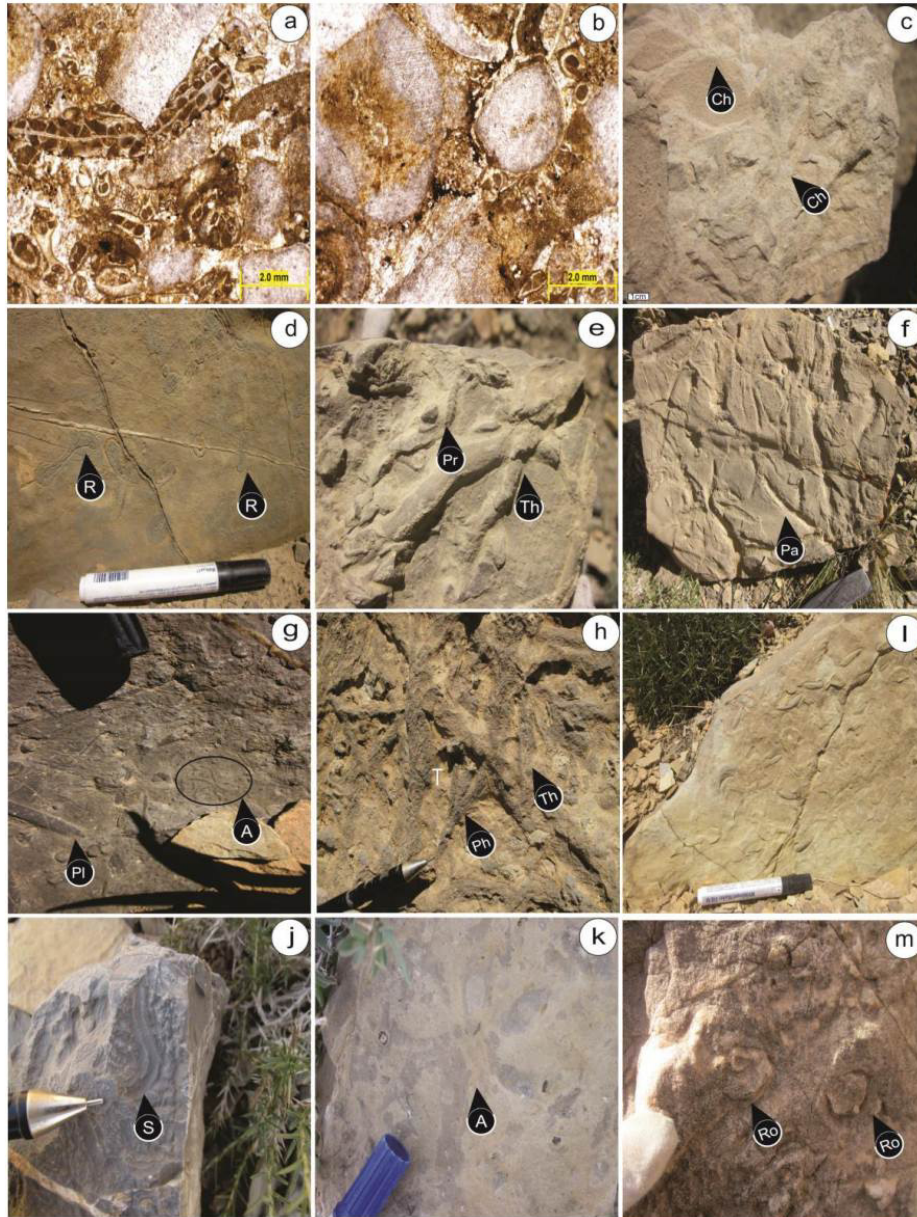
ایکنوفاسیس کروزیانا

توصیف: در نهشته‌های سازند مبارک این ایکنوفاسیس شامل مجموعه آثاری از ساختارهای زیستی افقی، قائم و

افزون بر این با توجه به داده‌های ماتریس احتمال وجود سیکل‌های ناقص دیگر نیز وجود دارد. برتری چرخه‌های به سمت بالا ریز شونده ناقص با بهره‌گیری از تغییرات

این نوع *Skolithos*، *Phycodes* است (شکل ۴). این نوع ایکنوفاسیس با میزان زیست آشفستگی (BI) بالا (۳ تا ۶) در لایه‌های کربناته نازک، متوسط تا سبتر لایه سازند مبارک که دارای طبقه‌بندی مورب مسطح، پشته‌ای، ترف و لامیناسیون موجی هستند دیده شده است. از شواهد فونای همراه ایکنوفاسیس کروزیانا، می‌توان به بریوزوا و کرینوپید اشاره کرد (شکل ۴).

انحدار با تنوع بالا و فراوانی کم است. این ایکنوفاسیس دارای آثاری است که بوسیله جانوران متحرک و خزنده ساخته شده‌اند و غالباً دارای علائم تغذیه‌ای، استراحت و گریزینگ جانوران رسوب‌خوار هستند. انواع آثارفسیلی شاخص ایکنوفاسیس کروزیانا به ترتیب از بیش‌ترین به کمترین فراوانی شامل: *Rhizocorallium*، *Thalassinoides*، *Bergaueria*، *Protovirgularia*، *Rosselia*، *Palaeophycus*، *Teichichnus*، *Planolites*، *Asterosoma*، *Lockeia*، *Arenicolites*، *Chondrites*



شکل ۴. تصویرهای ریزرخساره و تریس فسیل‌های سازند مبارک در ایکنوفاسیس کروزیانا: (a) رودستون کرینوپیدی بریوزوئردار، (b) فلوتستون رودستون کرینوپیدی. (c) *Chondrites* isp. (Ch) (d) *Rhizocorallium* isp. (R) (e) *Thalassinoides suevicus* (Th) (f) *Protovirgularia dichotoma* (Pr) (g) *Palaeophycus* isp. (pa) (h) *Asterosoma* isp. (A) (i) *Planolites* isp. (Pl) (j) *Scolicia strozzi* (S) (k) *Rosselia* isp. (Ro) (l) *Thalassinoides* (Th) (m) *Asterosoma* isp. (A)

این راستا نیز بسترهای رسوبی مشاهده شده از لحاظ ریز رخساره با کاهش ستبرای لایه و اندازه آلوکومها در زمینه‌ای از سیمان اسپارایتی همراه می‌باشند.

ایکونوفاسیس اسکولایتوس

توصیف: ایکونوفاسیس اسکولایتوس در نهشته‌های سازند مبارک به صورت سوراخ‌های حفر شده به وسیله موجات تغذیه‌کننده از مواد معلق در آب، موجودات شکارچی و لاشه‌خوارها هستند ولی گاهی اوقات بر روی سطح لایه‌بندی دیده می‌شوند (بروملی، ۱۹۹۶) و دارای آثار ناشی از فعالیت جانداران بصورت حفرات قائم، استوانه‌ای و U شکل است که دارای تنوع کم اما فراوانی بالای اثرفسیل‌ها است. انواع اثرفسیل‌ها شاخص ایکونوفاسیس اسکولایتوس در نهشته‌های سازند مبارک به ترتیب از بیش‌ترین به کمترین فراوانی شامل *Arenicolites*, *Rosselia*, *Diplocraterion*, *Skolithos* و *Bergaueria* است (شکل ۵). این نوع ایکونوفاسیس به صورت جانبی به حالت تدریجی به ایکونوفاسیس کروزیانا و مخلوط کروزیانا- اسکولایتوس تبدیل می‌شود (شکل ۲). ایکونوفاسیس اسکولایتوس در نهشته‌های سازند مبارک دارای میزان زیست‌آشفستگی کمتری است ($BI=1-2$). این ایکونوفاسیس در رخساره بالایی و میانی رمپ درونی با لامیناسیون موازی و طبقه‌بندی مورب مسطح دیده شده است. از آثار زیستی می‌توان به استراکود اشاره کرد (شکل ۵).

تفسیر: این ایکونوفاسیس نشان‌دهنده انرژی بالای امواج و جریان است و در محیط‌های پروکسیمال و میانی رمپ درونی که تغییرات ناگهانی در میزان رسوب‌گذاری، فرسایش و انتقال مجدد رسوبات متداول است، تشکیل می‌گردد (مک‌ایچرن و همکاران، ۲۰۰۷). شواهدی از قبیل سطوح فرسایشی، لایه‌بندی مورب و لامیناسیون موازی تهنشست در شرایط پرنرژی، حمل مجدد بواسطه امواج و انرژی بالای جریان (گینگراس و همکاران، ۲۰۱۱؛ فورزیش و همکاران، ۲۰۱۸؛ درادر و توار، ۲۰۱۸، توار و همکاران، ۲۰۱۹) را تایید می‌کنند. در چنین شرایطی بدلیل شرایط پرنرژی و وضعیت نامساعد بستر تنها تعداد کمی از جانوران توانایی سازگاری با چنین شرایط محیطی را دارند، به همین دلیل تنوع و فراوانی اثرجنس‌ها در این رخساره‌ها پایین و میزان زیست

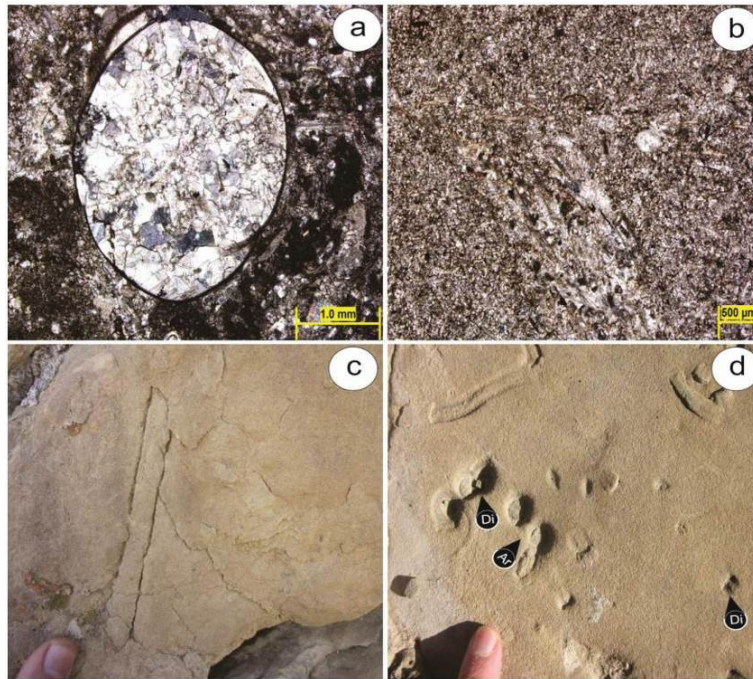
تفسیر: ایکونوفاسیس کروزیانا نشان‌دهنده فعالیت جانوران تغذیه‌کننده از رسوبات و شکارچی در محیط‌های قسمت‌های دیستال رمپ درونی و بخصوص رمپ میانی در حد بین موجسار هوای آرام و طوفانی در یک بستر نرم با نرخ رسوب‌گذاری بالا است (پمبرتون و همکاران، ۱۹۹۲، ۲۰۰۱؛ بایت‌گل و همکاران، ۲۰۱۸، a ، b ؛ فورزیش و همکاران، ۲۰۱۸؛ درادر و توار، ۲۰۱۸، نصیری و همکاران، ۲۰۱۹). شواهد الگوی رفتاری این ایکونوفاسیس این شرایط را نیز تایید می‌کنند. شاخص میزان زیست‌آشفستگی در محیط‌های دیستال رمپ درونی، بیش‌ترین مقدار ($BI=5-6$) و در بخش رمپ میانی به مقدار کمتر است ($BI=3-4$). وجود ایکونوفاسیس کروزیانا در بین رسوبات که در تناوب با واحدهای با طبقه‌بندی مورب مسطح، پشته‌ای، و ریپل‌های موجی تا لامیناسیون مسطح دلالت بر نوسانات نرخ بالای رسوب‌گذاری و تهنشست رسوبات در نهشته‌های سازند مبارک است. هم‌چنین تنوع بالا، اما با فراوانی کم اثر فسیل‌ها ایکونوفاسیس کروزیانا تشکیل اینگونه آثار را توسط مجموعه‌های بنتیک حساس به شرایط محیطی از جمله تغییرات در میزان رسوب‌گذاری به صورت فصلی یا نامنظم (پمبرتون و همکاران، ۱۹۹۲) در نهشته‌های سازند مبارک نشان می‌دهد.

بر پایه اثرجنس‌های موجود در رخساره‌های شناسایی شده سازند مبارک (شکل ۲) و ساخت‌های رسوبی آن‌ها، بخش‌های رمپ میانی منطبق با ایکونوفاسیس دیستال کروزیانا و بخش‌های پایینی رمپ درونی در حدوسط بین تبدیل رخساره‌های رمپ میانی به رمپ درونی منطبق بر ایکونوفاسیس پروکسیمال کروزیانا است. محتوای زیستی مشاهده شده در این مجموعه کرینوبید و بریوزوئرها درشت‌دانه در زمینه‌ای از سیمان اسپارایتی است که از شواهد محیط‌های رمپ میانی است. شواهد ریزرخساره‌ای شناسایی شده در این بخش که در تایید مطالعات ایکونوفاسیس این بخش می‌باشد شامل فلوتستون رودستون کرینوبیدی و رودستون کرینوبیدی بریوزوئردار است که در برخی مقاطع آشفستگی زیستی مشاهده می‌شود.

به سمت حوضه و در رخساره‌های دیستال با توجه به شرایط کاملاً آرام محیطی فراوانی آثار گریزینگ و استراحت در ایکونوفاسیس کروزیانا افزایش می‌یابد. در

حفرات قائم موجود در سازند مبارک موید این الگوی رفتاری است. محتوای زیستی مشاهده شده در این مجموعه به استراکود در زمینه ای از دولومیت و میکریت اشاره کرد که از شواهد محیط‌های رمپ درونی است و وضعیت نامساعد بستر را تایید می‌کند. شواهد ریزرخساره‌ای شناسایی شده در این بخش که در تایید مطالعات اکتیوفاسیس این بخش می‌باشد شامل مادستون استراکودی دولومیتی و مادستون وکستون دولومیتی دارای آشفستگی زیستی است که در برخی مقاطع آشفستگی زیستی مشاهده می‌شود.

آشفستگی نیز کم خواهد بود ($BI=I-2$). همچنین چون در چنین محیط‌های حمل مواد غذایی و رسوب، به صورت معلق انجام می‌گیرد، در نتیجه جانداران موجود در این رخساره‌ها از لحاظ الگوی رفتاری با ایجاد حفرات قائم در بستر یا سبک زندگی درون رسوب‌زی (پناهگاهی) در مقابل شرایط سخت محیطی و نوسانات شوری و اکسیژن، توانایی سازگاری بیش‌تری را با محیط رسوبی نسبت به ارگانسیم‌های سطح رسوب‌زی همچون کروزیانا، دارند (انگولا و باتیوس، ۲۰۱۲؛ بایت‌گل و همکاران، ۲۰۱۸، a, b ؛ نصیری و همکاران، ۲۰۱۹). آثار

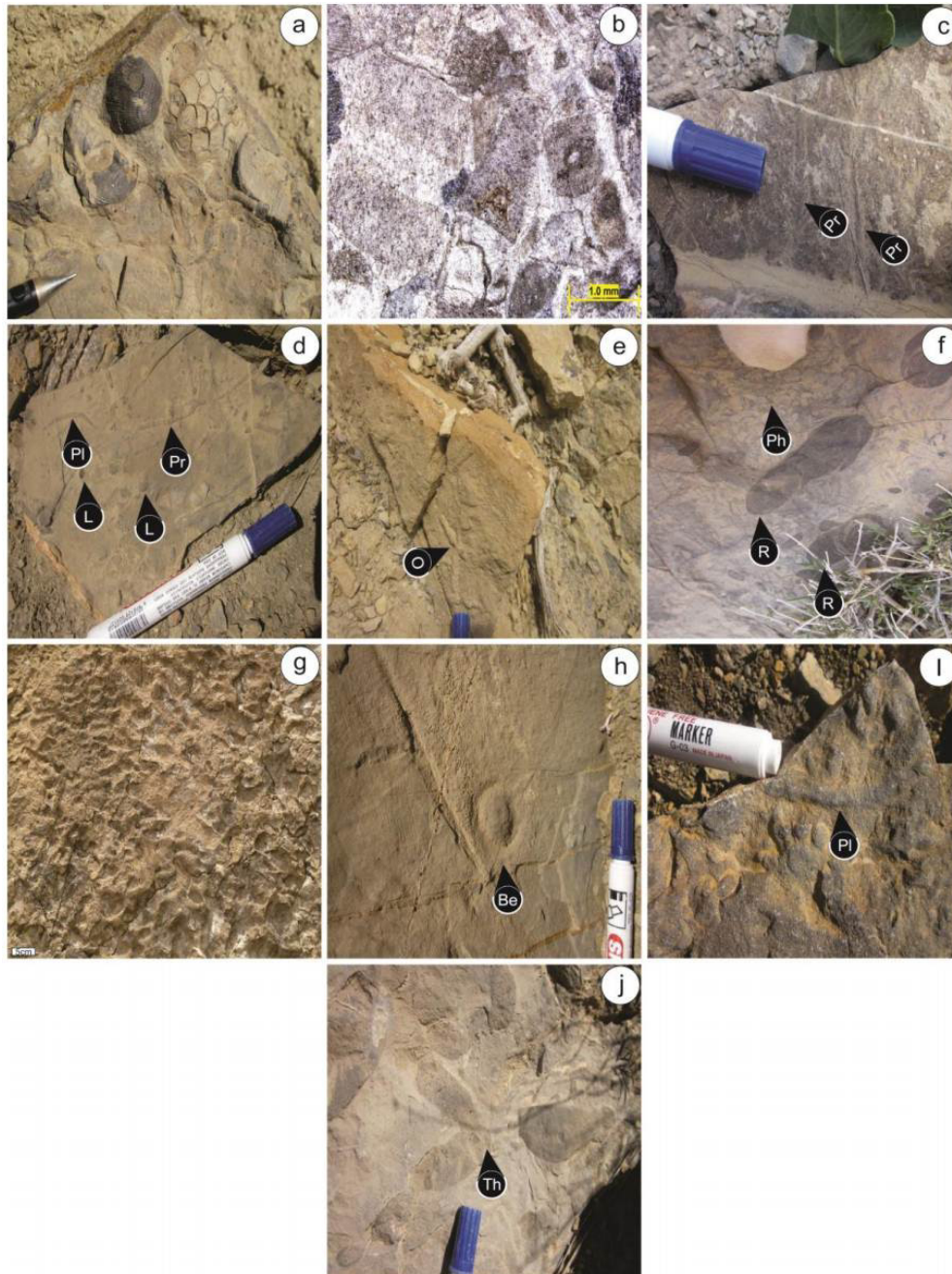


شکل ۵. تصویرهای ریزرخساره و تریس فسیل‌های سازند مبارک در اکتیوفاسیس اسکولایتوس: (a) مادستون استراکودی دولومیتی. (b) مادستون وکستون دولومیتی. (c) *Diplocraterion isp.* (d) *Skolithos*.

پشته‌ای، لامیناسیون‌های ریپلی موجی، دانه‌بندی تدریجی و تا حد کمتری طبقه‌بندی مورب ترف و مسطح یافت می‌شوند که در تناوب با طبقات دارای بستر نرم همچون مارل و شیل و طبقات آهکی وکستونی دیده می‌شوند. اکتیوفاسیس مخلوط کروزیانا- اسکولایتوس در نهشته‌های سازند مبارک دارای شاخص زیست‌آشفستگی متغییری است ($BI= 1-3$) و در محیط‌های دیستال رمپ درونی و پروکسیمال رمپ میانی دیده می‌شود. از آثار زیستی می‌توان به کرینوئید، براکیوپود و مرجان اشاره کرد (شکل ۶).

اکتیوفاسیس مخلوط کروزیانا- اسکولایتوس

توصیف: این نوع اکتیوفاسیس از اثر فسیل‌های موجودات تغذیه کننده از رسوب، مواد معلق در آب و موجودات شکارچی با تنوع گونه‌ای بالا و فراوانی کم بوجود آمده است که به تدریج به انواع دیگر اکتیوفاسیس‌ها تبدیل می‌شوند. انواع اثر فسیل‌ها این نوع اکتیوفاسیس به ترتیب از بیش‌ترین به کمترین فراوانی شامل: *Skolithos*, *Teichichnus*, *Diplocraterion*, *Palaeophycus*, *Asterosoma*, *Arenicolites*, *Lockeia*, *Planolites* و *Monocraterion*, *Rosselia* و *Thalassinoides* است. این نوع اکتیوفاسیس در کرنات‌های دارای طبقه‌بندی مورب



شکل ۶. تصویرهای ریزرخساره و تریس فسیل‌های سازند مبارک در ایکنوفاسیس مخلوط: (a) رودستون مرجانی پراکیوپوددار. (b) گرینستون رودستون کرینوبیدی. (c) *Protovirgularia dichotoma* (Pr), *Planolites* isp. (Pl), (d) *Protovirgularia dichotoma* (Pr), *Planolites* isp. (Pl), (e) *Lockeia* isp. (L), *Ophiomorpha* isp. (O), (f) *Ophiomorpha* isp. (O), *Phycosiphon* isp. (Ph), (g) *Rhizocorallium* isp. (R), *Thalassinoides* isp. (Th), (h) *Thalassinoides* isp. (Th), (i) *Bergaueria* isp. (Be), (j) *Planolites* isp. (Pl)

توار و همکاران، ۲۰۱۹). به طوریکه اثرجنس‌های با سبک زندگی حفره‌ای در هنگام بالا بودن انرژی محیطی، در هنگام کاهش انرژی محیط به اثرجنس‌های با سبک زندگی خزشی- استراحت تغییر می‌یابند (مک‌ایچرن و همکاران، ۲۰۰۷؛ فورزیش و همکاران، ۲۰۱۸؛ درادر و

تفسیر: وجود جریان‌ات متناوب طوفانی و عمل انتقال مجدد رسوبات باعث تغییر شرایط بستر موجودات و شرایط زیستی، تغییر الگوی رفتاری موجودات و تغییر اثرجنس‌های موجود می‌گردد (مک‌ایچرن و همکاران، ۲۰۰۷؛ فورزیش و همکاران، ۲۰۱۸؛ درادر و توار، ۲۰۱۸

گلی با الگوی تیرینگ عمیق، موجودات شکارچی و لاشخورها (بروملی، ۱۹۹۶) هستند. انواع اثرفسیل‌ها شاخص ایکنوفاسیس زئوفیکوس در نهشته‌های سازند مبارک به ترتیب از بیش‌ترین به کمترین فراوانی شامل *Zoophycos isp.* *Palaeophycus isp.* *Ophiomorpha isp.* *Helminthorhapha isp.* *Chondrites* و *Phycosiphon isp.* است (شکل ۷). ایکنوفاسیس زئوفیکوس در نهشته‌های سازند مبارک دارای میزان زیست‌آشفتگی بالا است ($BI=4-6$). این ایکنوفاسیس در رخساره رمپ بیرونی دیده شده است. از شواهد زیستی همراه ایکنوفاسیس زئوفیکوس اسپیکول اسفنج وجود فسفات پیریت و رنگ تیره مواد الی اشاره کرد. با افزایش عمق تنوع موجودات کاهش می‌یابد و رقابت شدیدی بین موجودات برای مصرف اکسیژن و ادامه حیات وجود ندارد و این موجودات با وجود کم بودن مقدار اکسیژن به فعالیت خود ادامه می‌دهند و موجب آشفتگی نسبتاً بالای رسوبات می‌شود.

تفسیر: ایکنوفاسیس زئوفیکوس به طور غالب در محدوده‌های با انرژی و نرخ رسوب‌گذاری پایین و اکسیژن کم و بستری گلی غنی از مواد ارگانیک وجود دارد (مک ایچرن و همکاران، ۲۰۰۷؛ هاردینگ و اکدال، ۲۰۱۸؛ کیکوچی و همکاران). وجود فراوانی بالایی اثرفسیل‌های با استراتژی همزیست شیمیایی و گریزینگ شامل *Chondrites* و *Phycosiphon* و هم‌چنین *Zoophycos* در زمینه رسوبی غالب دانه‌ریز از این نظر حمایت می‌کند. به سمت بخش‌های بالایی این رخساره به دلیل افزایش نوسانات موجسار هوای طوفانی میزان انرژی و شدت نرخ رسوب‌گذاری افزایش پیدا می‌کند که به انضمام آن نوع رسوب‌گذاری، ساختارهای فیزیکی و زیستی افزایش می‌یابند که با همراهی اثرفسیل‌های همزیست شیمیایی و گریزینگ و اثرات معلق‌خوار و لاشخور همچون *Ophiomorpha* و *Palaeophycus* مشخص می‌شود. وجود بسترهای تیره و غنی از مواد آلی از آهک تیره مادستونی و وکستونی سازند مبارک از شرایط تشکیل ایکنوفاسیس زئوفیکوس حمایت می‌کند. در این راستا نرخ پایین رسوب‌گذاری و تجمع آرام رسوبات گلی نیز باعث آشفتگی رسوبات می‌گردند. وجود چنین اثراتی با توجه به نتایج بالا دلالت بر محیط‌های فاقد اکسیژن و عمیق دریایی (زیر خط اثر امواج)، در بستری ارژیلی با

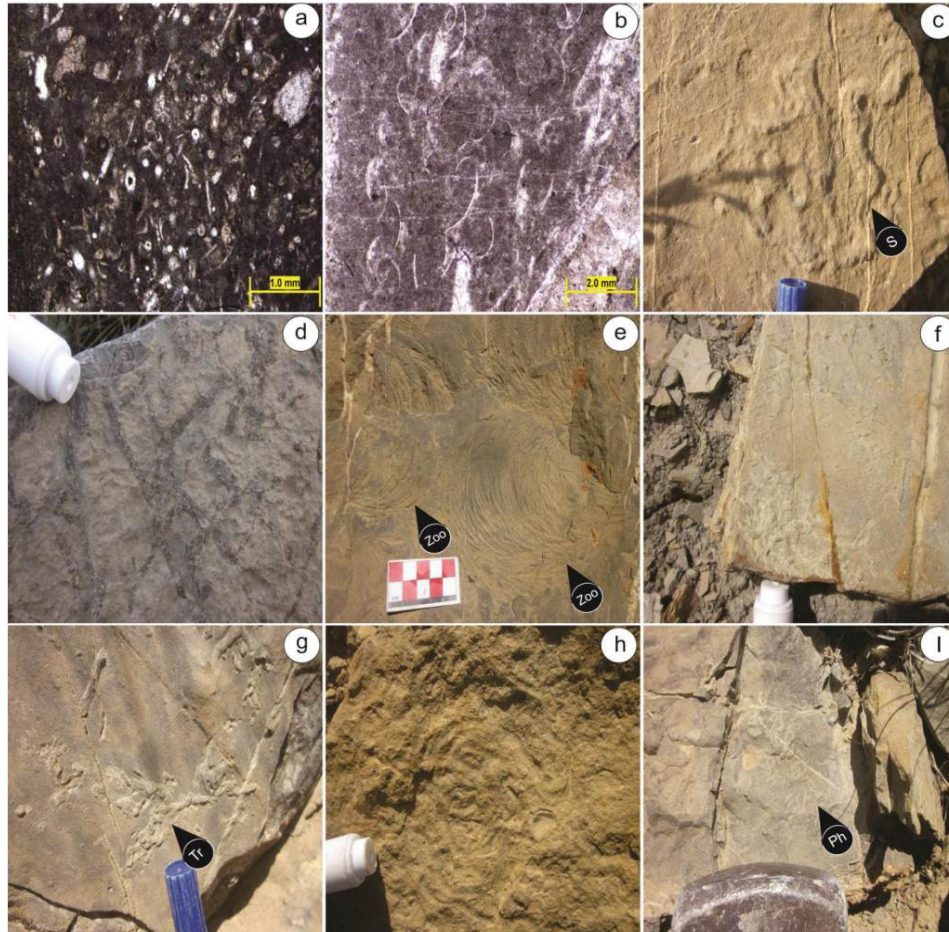
توار، ۲۰۱۸، هاردینگ و اکدال، ۲۰۱۸؛ کیکوچی و همکاران، ۲۰۱۸). تغییر شرایط بستر در چنین محیط‌هایی باعث ایجاد تناوب مکرر ایکنوفاسیس‌های کروزیانا و اسکولایتوس می‌شود به طوری که مجموعه اثرجنس‌های مرتبط با ایکنوفاسیس اسکولایتوس در شرایط پرانرژی و مجموعه اثرجنس‌های مرتبط با ایکنوفاسیس کروزیانا در شرایط کم انرژی‌تر ایجاد می‌شوند. چنین تناوبی از این نوع ایکنوفاسیس‌ها تحت عنوان ایکنوفاسیس مخلوط کروزیانا- اسکولایتوس شناخته شده است (پمبرتون و همکاران، ۲۰۰۱؛ نصیری و همکاران، ۲۰۱۹). میزان متفاوت شاخص زیست‌آشفتگی دلالت بر فعالیت موجودات در محیط‌های پرتنش قسمت‌های دیستال رمپ درونی و پروکسیمال رمپ میانی (تیلور و همکاران، ۲۰۰۳) با نوسانات بالای انرژی دارد. محتوای زیستی مشاهده شده در این مجموعه و شواهد ریزرخساره‌ای شناسایی شده در این بخش که در تایید مطالعات ایکنوفاسیس این بخش می‌باشد شامل گرینستون - رودستون کرینوییدی، رودستون مرجانی براکیوپوددار (شرایط پرانرژی) و وکستون بایوکلاستی (شرایط کم انرژی) است. نوسانات در میزان بار رسوبی وارده به محیط قسمت‌های دیستال رمپ درونی و پروکسیمال رمپ میانی سازند مبارک، باعث تغییرات در شرایط تافونومی، رسوبی و شوری محیط می‌شود. مواد غذایی در چنین محیط‌هایی توسط جانوران تغذیه کننده از رسوب در هنگام پایین بودن انرژی (ایکنوفاسیس کروزیانا) و بوسیله جانوران تغذیه کننده از مواد معلق در هنگام بالا بودن انرژی (ایکنوفاسیس اسکولایتوس) بدست می‌آید. در نتیجه مجموعه جانوران در چنین محیط‌هایی دارای سبک تغذیه‌ای متغییری هستند (دیویس و همکاران، ۲۰۰۷).

ایکنوفاسیس زئوفیکوس

در نهشته‌های سازند مبارک این ایکنوفاسیس شامل آثار ناشی از فعالیت جانداران بصورت حفرات مارپیچی دم خروسی لوبی شکل، در بین سنگ‌آهک‌های متوسط تا سبتر لایه تیره‌رنگ است، که دارای تنوع کم اما فراوانی بالایی اثرفسیل‌ها است. این آثار بر روی سطح بالای لایه‌بندی دیده می‌شوند ولی اغلب به صورت سوراخ‌های حفر شده به وسیله موجوات تغذیه کننده از بسترهای نرم

محیط احیایی باشد و اثر رخساره شناسایی شده را در یک مجموعه دریای باز و محیط ژرف همراه با آب آرام با شرایط انرژی پایین تایید می‌نماید. محتوای فونی مشاهده شده در این مجموعه و شواهد ریزرخساره‌ای شناسایی شده در این بخش که در تایید مطالعات ائینوفاسیس این بخش می‌باشد شامل مادستون و کستون بایوکلاستی دارای اسپیکول اسفنج و دوکفه‌ای نازک پلاژیک است.

میزان بالای مواد ارگانیکی است. چنین شرایط دلالت بر فعالیت جاندار موجود در این بستر بصورت همزیستی شیمیایی است. چنین شرایطی تاکید بر وجود ائینوفاسیس زئوفیکوس در این افق، بالا بودن سطح آب و وجود شرایط احیایی دارد (انگولا و باتیوس، ۲۰۱۲؛ نصیری و همکاران، ۲۰۱۹؛ هاردینگ و اكدال، ۲۰۱۸؛ کیکوچی و همکاران، ۲۰۱۸). وجود فسفات پیریت و رنگ تیره مواد آلی دلیلی بر وجود کاهش اکسیژن دیرینه و



شکل ۷. تصویرهای ریزرخساره و تریس فسیل‌های سازند مبارک در ائینوفاسیس زئوفیکوس: (a) وکستون بایوکلاستی دارای اسپیکول اسفنج. (b) مادستون وکستون بایوکلاستی. (c) Scolicia strozzi (S) (d) Chondrites isp. (e) Zoophycos isp. (Zoo) (f) Megagraption- (g) like or Multina minima? isp. Phycosiphon isp. (Ph) (h) Treptichnus isp. (Tr) (g) (i) Helminthorhaphe? isp, Nereites? Isp

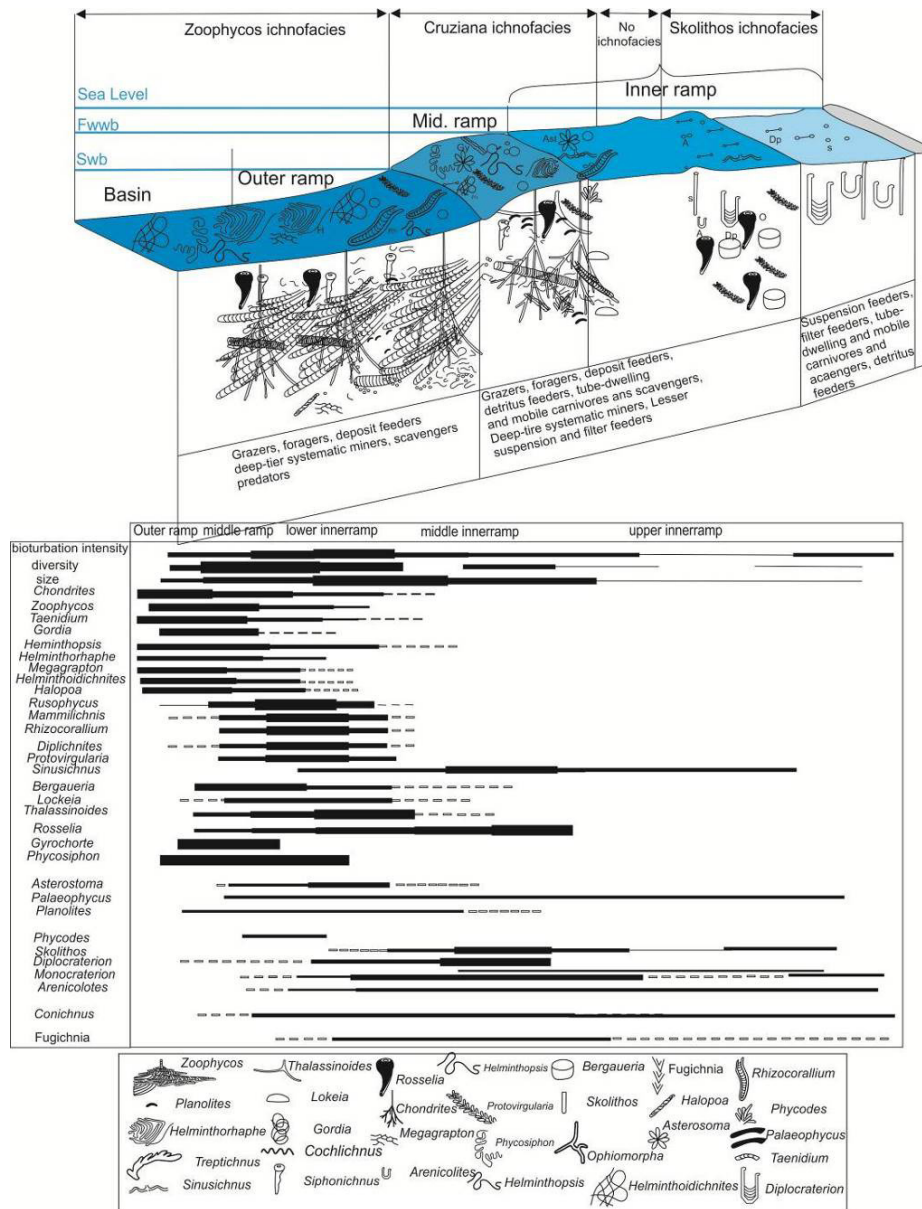
می‌باشد. هم‌چنین رخساره مخلوط کروزیانا- اسکولایتوس با وجود آثار فعالیت جانوران رسوب‌خوار و معلق‌خوار شامل *Diplocraterion*, *Palaeophycus*, *Skolithos*, *Arenicolites*, *Lockeia*, *Planolites*, *Bergaueria* و *Teichichnus*, *Rosselia*, *Asterosoma* و *Thalassinoides* شناخته شد که حاکی از تغییرات در فراوانی مواد غذایی در دسترس و سبک غذایی جانوران

مدل اثرشناسی نهشته‌های سازند مبارک

بر پایه اثرفسیل‌های شناسایی شده و نوع بستر ۴ نوع ائینوفاسیس در نهشته‌های سازند مبارک معرفی شدند. ائینوفاسیس‌های اسکولایتوس (رسوبات رمپ درونی) بوسیله مجموعه‌ای اثرفسیل‌ها با تنوع کم و فراوانی بالا شامل *Diplocraterion*, *Bergaueria*, *Skolithos*, *Lockeia*, *Planolites*, *Palaeophycus*, *Arenicolites*

که نشان می‌دهد ناحیه پروکسیمال کروزیانا منطبق بر رخساره بخش بالایی رمپ میانی می‌باشد. ایکنوفاسیس زئوفیکوس در نهشته‌های سازند مبارک شامل *Zoophycos isp.*, *Palaeophycus isp.*, *Ophiomorpha isp.*, *Helminthorhapha isp.* و *Chondrites* است (شکل ۷). با توجه به توزیع ایکنوجنس‌های اثرفسیل‌ها و مطالعه ساختارهای رسوبی غیرزیستی، مدل اثرشناسی نهشته‌های سازند مبارک در تصویر شکل ۸ ارائه شده است.

می‌باشد. ایکنوفاسیس کروزیانا بوسیله مجموعه متنوعی از ساختارهای تغذیه‌ای و گریزینگ *Rhizocorallium*, *Paleophycos*, *Protovirgularia*, *Bergaueria*, *Chondrites*, *Rosselia*, *Thalassinoides*, *Asterosoma*, *Lockeia*, *Planolites*, *Arenicolites* و *Skolithos* شناخته شد. در این ایکنوفاسیس اثرفسیل‌های محدوده دیستال رمپ میانی بیش‌تر از آثار گریزینگ است و موید این موضوع است که ناحیه دیستال کروزیانا منطبق بر رخساره دیستال رمپ میانی است. هم‌چنین اثرفسیل‌های محدوده بخش بالایی رمپ میانی بیش‌تر از آثار تغذیه کننده از رسوبات است



شکل ۸. مدل محیط رسوبی پیشنهادی برای رسوبات سازند مبارک بر پایه گسترش اثر فسیل‌ها

نتیجه‌گیری

۵ رخساره سنگی در سازند مبارک شامل: (A) کربنات‌های دارای ایکنوفاسیس اسکولایتوس، (B) کربنات‌های نازک تا متوسط لایه دارای ایکنوفاسیس کروزیانا، (C) تناوب سنگ‌آهک‌های آرژیلی و شیل‌های تیره‌رنگ دارای ایکنوفاسیس زئوفیکوس، (D) کربنات‌های متوسط تا ستبر لایه دارای مخلوط ایکنوفاسیس کروزیانا و اسکولایتوس و (E) تناوب سنگ‌آهک و شیل بدون تریس فسیل با بهره‌گیری از روش مارکوف مورد بررسی قرار گرفتند. براین پایه رخساره‌های A، B و C بیش‌ترین ستبرای توالی را نشان می‌دهند که با بررسی‌های میدانی و نیز روش مارکوف هم‌خوانی دارد. آنالیزهای زنجیره مارکوف نشان دهنده ترتیب رخساره‌های سازند مبارک در سیکل‌های نامتقارن ریز شونده به سمت بالا است. محاسبه احتمال وقوع هر یک از رخساره‌ها در هر مرحله از فرآیندهای رسوب‌گذاری با بهره‌گیری از روش زنجیره مارکوف، نشان می‌دهد احتمال‌های بدست آمده از این روش با مشاهدات میدانی هم‌خوانی دارد. بر پایه بازدیدهای میدانی و نتایج حاصل از روش مارکوف، سیکل ایده‌ال بر پایه روش مارکوف با تناوب سنگ‌آهک‌های آرژیلی و شیل‌های تیره‌رنگ دارای ایکنوفاسیس زئوفیکوس (رخساره C) در قاعده شروع می‌شود و بطور متوالی توسط کربنات‌های نازک تا متوسط لایه دارای ایکنوفاسیس کروزیانا (رخساره B)، کربنات‌های متوسط تا ستبر لایه دارای مخلوط ایکنوفاسیس کروزیانا و اسکولایتوس (رخساره D)، کربنات‌های دارای ایکنوفاسیس اسکولایتوس (رخساره A)، تناوب سنگ‌آهک و شیل بدون تریس فسیل (رخساره E) ادامه می‌یابد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که از روش زنجیره مارکوف می‌توان برای ارائه یک توالی ایده‌ال و نیز مدل رسوبی بهره‌گیری کرد. در نهشته‌های سازند مبارک، برپایه شناسایی مجموعه متنوعی از ایکنوجنس‌ها، محیط رسوبی شامل ۴ ایکنوفاسیس است. تغییرات شرایط محیطی در زمان تشکیل سازند مبارک از موقعیت دریای باز تا لاگونی همراه با کاهش تنوع، فراوانی و نوع اثر فسیل‌ها است. این کاهش به دلیل افزایش میزان رسوب‌گذاری، سطح انرژی آب، اندازه دانه‌های رسوب، شوری، آشفستگی آب و شرایط تافونومی می‌باشد که باعث تغییر الگوی زندگی و سبک تغذیه‌ای جانوران شده است.

منابع

- آقناباتی، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- صالحی‌راد، ر، علوی، ب.م، ژنی، ژ، استامپفلی، ژ، شهرابی، م (۱۳۶۹) نقشه زمین‌شناسی ایران، سری ۱: ۲۵۰۰۰۰، گرگان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- Alpaydin, E (2010) *Introduction to Machine Learning. Second Edition, the MIT Press, 361-384.*
- Angulo, S. and Buatois, L. A (2012) *Ichology of a Late Devonian–Early Carboniferous low-energy seaway: The Bakken Formation of subsurface Saskatchewan, Canada: Assessing paleoenvironmental controls and biotic responses. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 315: 46-60.*
- Asserto, R (1963) *The Paleozoic Formations in Central Alborz (Iran). (Preliminary Notr). Rivista Italian Dipaleontologia e Stratigrafia, 69: 503-543.*
- Bayet-Goll, A., Shirezadeh-Esfahani, F., Daraei, M., Monaco, P., Sharafi, M., Akbari Mohamadi, A (2018a) *Cyclostratigraphy across a Mississippian carbonate ramp in the Esfahan-Sirjan Basin, Iran: implications for the amplitudes and frequencies of sea-level fluctuations along the southern margin of the Paleotethys. International Journal of Earth Science, doi: 10.1007/s00531-018-1597-7.*
- Bayet-Goll, A., De Carvalho, C. N., Daraei, M., Monaco, P., Sharafi, M (2018b) *Sequence stratigraphic and sedimentologic significance of the trace fossil Rhizocorallium in the Upper Triassic Nayband Formation, Tabas Block, Central Iran. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 491: 196-217.*
- Billingsley, P (1961) *Statistical methods in chains, Arm. Math. Statist. 32: 12-40.*
- Billinton, R (1992) *Reliability Evaluation of Engineering Systems: concepts and techniques, Springer, 222: 260-277.*
- Buatois, L. A., and Mángano, M. G (1995) *The palaeoenvironmental and palaeoecological significance of the Mermia ichnofacies: an archetypal subaqueous non-marine trace fossil assemblage. Ichnos, 4: 151-161.*
- Bromley, R. G (1996) *Trace Fossils: Biology Taphonomy and Applications, 2nd ed. Chapman & Hall, London, 361p.*
- Carr, T (1982) *Log-Linear Models Markov chains and cyclic sedimentation. Journal of Sedimentary Petrology, 52: 905-912.*
- Casshyap, S. M (1975) *Cyclic characteristics of coal-bearing sediments in the Bochumer Formation (westphal A 2) Ruhrgebiet, Germany. Sedimentology, 22: 237-255.*

- Analysis. Special Publication of the Geological Society, London, 228: 1–490.*
- Miall, A. D (1973) Markov Chain analysis applied to an alluvial plain succession. *Sedimentology*, 20: 347-364.
- Nasiri, Y., Mahboubi, A., Moussavi-Harami, R., Yousefi, B (2013) Cyclic Sedimentation of the Amiran Formation for Subsurface Characterization in the Zagros fold–thrust belt (Application of Markov Chain Method in depositional sequences interpretation). *Journal of Tethys*, 1(2): 113-127
- Nasiri, Y., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Olivero, D., Mosaddegh, H (2018) Zoophycos ichnogenus distribution and paleoenvironmental analysis: examples from the Mississippian Mobarak formation (Alborz Basin, Iran). *Historical Biology*, <https://doi.org/10.1080/08912963.2018.1540614>.
- Nasiri, Y., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Mosaddegh, H (2019) Sequence stratigraphic significance of shell concentrations in the Mobarak Formation (Mississippian), Alborz Zone, Northern Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 2: 1-25.
- Nath, R. and Sahoo, M (2009) Cyclic Sedimentation of the Karharbari Formation (Damuda Group), Talchir Gondwana Basin, Orissa. *Geological Society of India*, 73: 469-478.
- Pemberton, S. G. and Wightman, D. M (1992) Ichnological characteristics of brackish water deposits. In: Pemberton, S.G. (ed.), *Applications of Ichnology to Petroleum Exploration. SEPM Core Workshop*, 17: 141–169.
- Pemberton, G. S., Spila, M., Pulham, A. J., Saunders, T., Robbins, D., Sinclair, I. K (2001) Ichnology and sedimentology of shallow to marginal marine systems. *Geological Association of Canada Short Course Volume 15*.
- Powers, D., and Easterling, R (1982) Improved Methodology for using Embedded Markov chains to describe cyclical sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52: 913-923.
- Reading, H. G (1996) *Sedimentary Environment. Third ed., Blackwell, Oxford*, 888p.
- Read, W. A. and Dean, J. M (1967) A quantitative study of a sequence of coal bearing cycles in the Namurian of Central Scotland. *Sedimentology*, 9: 137-156.
- Rodríguez-Tovar, F. G., Miguez-Salas, O., Dorador, J., Duarte, L. V (2019) Opportunistic behaviour after the Toarcian Oceanic Anoxic Event: The trace fossil *Halimedes*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 527: 1–11.
- Davies, N. S., Ivan, J. S., Guillermo, L. A., Ricardo, C (2007) Ichnology, palaeoecology and taphonomy of a Gondwanan early vertebrate habitat: Insights from the Ordovician Anzaldo Formation, Bolivia. *Palaeoecology*, 249: 18–35.
- Dorador, J. and Rodríguez-Tovar, F. J (2018) High-resolution image treatment in ichnological core analysis: initial steps, advances and prospects. *Earth Sciences Reviews*, 177: 553–567.
- Fürsich, F. T., Uchman, A., Alberti, M., Pandey, D. K (2018) Trace fossils of an amalgamated storm-bed succession from the Jurassic of the Kachchh Basin, India: The significance of time-averaging in ichnology. *Journal of Palaeogeography*, 7(1): 13-61.
- Gallagher, k., Charvin, K., Nielsen, S., Sambridge, S., Stephenson, J (2009) Markov chain Monte Carlo (MCMC) sampling methods to determine optimal models, model resolution and model choice for Earth Science problems. *Journal of Marine and Petroleum Geology*, 525-535.
- Gingras, M. K., MacEachern, J. A., Dashtgard, S. E (2011) Process ichnology and the elucidation of physico-chemical stress. *Sedimentary Geology*, 237: 115-134.
- Harbaugh, J. W., and Bonham-Carter, G (1970) *Computer simulation in Geology. Wiley Interscience, New York*, 575p.
- Harding, S. C., and Ekdale, A. A (1992) Trace fossils and glauconitic pellets provide insight into Cambrian siliciclastic marine environments. *Palaios*, 66: 523–532.
- Hota, R. N., and Maejima, W (2004) Comparative study of cyclicity of lithofacies in Lower Gondwana formations of Talchir basin, Orissa, India: A statistical analysis of subsurface logs. *Gondwana Research*, 7: 353–362.
- Hota, R. N., Pandya, k. l., Maejima, W (2003) Cyclic sedimentation and facies organization of the coal bearing Barakar Formation, Talchir Gondwana basin, Orissa, India: a statistical analysis of subsurface logs. *Journal of the Geological Society of India*, 46: 1-11.
- Kikichi, K., Naruse, H., Kotake, N (2019) Evaluation of ichnodiversity by image-resampling method to correct outcrop exposure bias. *Palaios*, 66(2): 523-517.
- MacEachern, J. A., Bann, K. L., Pemberton S. G., Gingras, M. K (2007) The ichnofacies paradigm: High-resolution paleoenvironmental interpretation of the rock record. In: McIlroy, D. (ed.), *The Application of Ichnology to Palaeoenvironmental and Stratigraphic Analysis, Geological Society, London, Special Publication*, 228: 179-212.
- McIlroy, D (2004) *The Application of Ichnology to Palaeoenvironmental and Stratigraphic*

Palaeoecology,
<https://doi.org/10.1213/j.palaeo.5212.21.263>.
Taylor, A. M., Goldring, R., Gowland, S (2003)
*Analysis and application of ichnofabrics. Earth
Science Reviews*, 60: 227–259.