

Original Research Paper

Reconstruction and correlation of palaeo-seismic events in the West Makran using physical and biological properties of deep-sea cores from Oman Sea

Sedigheh Amjadi¹, Hamid Alizadeh-Lahijani², Mohammad Hosein Mahmudy-Gharaie^{1*}, Razieh Lak³, and Nick Marriner⁴

¹ Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Sciences (INIOAS), Tehran, Iran

³ Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

⁴ CNRS, ThÉMA, Université de Franche-Comté, Besançon, Cedex, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2023 March 18

Accepted: 2023 June 13

Available online: 2024 June 21

Keywords:

Palaeo-seismic events

Tsunami

Foraminifera

Makran Zone

Late Holocene

ABSTRACT

Despite the occurrence of the second deadliest Indian Ocean tsunami triggered by the Makran zone fault system, our knowledge of the number of tsunamis throughout the Holocene remains limited. In this study, we reconstructed the sedimentary environments and identified palaeo-tsunami events using deep-sea cores from the Gulf of Oman. We identified sedimentation trends and factors affecting seabed sediment transport by tsunami events based on sedimentological parameters, foraminifera shell identification, magnetic susceptibility changes, and palaeo-ocean current reconstructions. Our results show that evidence of seabed sediment transport due to strong earthquakes in the Gulf of Oman differed over time and location. Palaeoenvironmental studies and historical tsunami events suggest at least 5 significant submarine landslides over the last 2500 calendar years BP. The number of events has dramatically increased during the last thousand years. According to our results and historical data, at least 7 strong earthquakes occurred in the study area, and their traces are evident in our marine cores. Given the expansion of cities on the southeast coast of Iran and the increased number of earthquake events in the Makran zone, it is essential to adopt management plans to mitigate against potential tsunami damage.

1. Introduction

Over the past few decades, urbanization and infrastructure development in the southeast region of Iran have increased coastal vulnerability to natural hazards (Pourkerman *et al.*, 2022). The Makran zone is particularly susceptible to 3 main categories of

natural hazards: 1) climate change and strong storms leading to flooding and coastal erosion, 2) relative sea level rise, and 3) tsunamis.


The Makran subduction zone is a seismic area that is prone to


* Corresponding author: Mohammad Hosein Mahmudy-Gharaie; E-mail: mhmgharaie@um.ac.ir

Citation:

Amjadi, S., Alizadeh-Lahijani, H., Mahmudy-Gharaie, M. H., Lak, R., and Marriner, N., 2024. Reconstruction and correlation of palaeo-seismic events in the West Makran using physical and biological properties of deep-sea cores from Oman Sea. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 34(2), 132, 45-58. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.389392.2070>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2023.389392.2070

 dor: 20.1001.1.10237429.1403.34.2.3.9



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

large earthquakes with magnitudes ranging from 8.5 to 8.8 (Frohling and Szeliga, 2016). Since 1482, approximately 8 earthquakes with a magnitude of more than 7 on the moment magnitude (M_w) scale have occurred in the Makran zone (Byrne *et al.*, 1992; Fig 1). The last event occurred in 1946 with a magnitude of 8 to 8.3 M_w . As a result, numerous studies have been conducted to evaluate the socioeconomic impacts of tsunamis in the Makran zone (Payande *et al.*, 2015; Akbarpour Jannat *et al.*, 2017; Honarmand *et al.*, 2020; Akbarpour Jannat, 2021).

The Oman Sea bed is characterized by a relatively narrow continental plateau, steep continental slope, and deep valleys. Thick sediments are deposited on the edge of the continental plateau, which can move after a large earthquake and create a turbidity current. Therefore, studying marine sediment archives can provide insights into the mechanisms of sediment transport from the source to the sedimentation area. Additionally, climate variability and relative sea level changes can impact sediment deposition in both shallow and deep-sea environments. Our knowledge of palaeo-tsunamis throughout the Holocene period is limited. Thus, understanding the mechanisms of deep-sea sedimentation and identifying effective factors on depositional changes could help to elucidate abrupt events.

This study aims to identify seismic effects on sediment transportation and deposition in the Gulf of Oman deep sea environment during the last 2500 years using sedimentological, biological, and palaeo-climatic analyses.

2. Research methodology

Two gravity sediment cores, OM15 and OM30, were collected from the northern part of the Gulf of Oman during the Persian Gulf and Gulf of Oman Studies (PG-GOOS) cruise in December 2012. Magnetic susceptibility (MS) was measured at a 2 cm resolution, and subsampling was carried out according to the procedure described by Marriner and Morhange (2007). Wet sieving was employed to separate the >2 mm and <63 μm fractions. Organic matter (OM) and carbonate content were measured using loss-on-ignition (LOI) at 550°C and 950°C, respectively (Heiri *et al.*, 2001). For biostratigraphy, sub-samples were oven-dried at 50°C for 12 hours. Foraminifera were then handpicked from the >125 μm size fractions and placed on palaeontological slides for identification and counting (Marriner *et al.*, 2005). The chronology was established based on Miller's (2010) age-depth model, using calibrated ^{210}Pb dating for the first 20 cm and calibrated radiocarbon ages for the levels at 65, 120.5 and 148.5 cm. Historical earthquake data were obtained from the USGS database, and information was extracted for earthquakes with a magnitude of more than 3.5 M_w and a distance of up to 250 km from the current shoreline (Fig. 1).

3. Results

3.1. OM 30 core facies changes

The granulometry analyses showed that more than 94% of the sediment in the core OM 30 core was mud. However, the highest amount of sand was observed between 2200 and 1970 cal. yr BP, based on the age-depth model (Figs. 2 and 3). These sand grains were mostly made up of foraminifera shells, including *Globigerina rubra*, *Globigerina bulloides*, *Neogloboquadrina dutertrei* and *Cribronion asiaticum* (Fig. 4). While the abundance of the studied parameters was not homogeneous throughout the core, several oscillations were recorded. A positive correlation was observed between foraminifera abundance and magnetic susceptibility around 2100 cal. yr BP. Other significant changes were noted at 1970-1750, 1759-1880, 1750-1420, 1200-1100, 1000-200 cal. yr BP and 200 to present.

3.2. OM 15 core facies changes

The core OM 15 mainly consisted of muddy sediment, ranging from 97.5 to 99.2% since 1970 cal. yr BP. The most significant changes in the sediment texture were observed between 2140 and 1970 cal. yr BP, when the mud fraction fell to 76-78%. During this period, gravel and sand attained 8.4% and 8.8%, respectively, comprising bivalves, gastropods and snail shells (Fig. 5). Although the sediment grain size did not show significant changes after 1970 cal. yr BP, oscillations were recorded in the other studied parameters. Therefore, the most notable changes in the studied parameters were observed during 1970-1940, 1940-1700, 1700-1400, 1400-1100 cal. yr BP and 200 to present. Based on the lithostratigraphy, biostratigraphy, and MS, seven important facies were identified in the studied cores: A (2300-1970), B (1970-1750), C (1750-1420), D (1420-1270), E (1270-1120), F (1100-1700), G (700-200), and H (200 to present; Fig. 3).

4. Discussion

Facies A corresponds to a period of increasing basin nutrient abundance, probably due to aerosol import from the Sistan basin and local cold water upwelling driven by strong N Levar winds (Hamzeh *et al.*, 2016; Amjadi *et al.*, 2023). The presence of gravelly layers in this facies may be the result of sediment transportation from shallower waters following a seismic event. Concomitant boulder deposition has been observed on the eastern coast of Oman, supporting this interpretation (Hoffmann *et al.*, 2020).

Facies B is contemporaneous with a humid period characterized by tropical storm dominance in the northern Arabian Sea (Amjadi *et al.*, 2023). During this time, marine productivity decreased due to ocean current changes and reduced dust import to the Gulf of Oman. Facies C and D were influenced by summer monsoon intensity, resulting in upwelling along the eastern coast of Oman

and a decrease in the depth of warm and saline outflow water from the Persian Gulf (Pourkerman *et al.*, 2023). As a result, foraminifera abundance decreased significantly (Fig. 6).

Facies E corresponds to a period characterized by a tsunami on the Chabahar coast (Shah-Hosseni *et al.*, 2011) and a sudden increase in boulder deposits on the eastern coast of Oman (Hoffmann *et al.*, 2020). Similar evidence was observed for facies G and F. Finally, facies H represents an increase in summer monsoon wind intensity and the impact of Persian Gulf water outflow. When comparing our core's granulometric data with that of Lahijani *et al.* (2019), we found that the abundance of the sandy fraction increased concurrently with facies consistent with seismic events.

Seismic data from 1920 to 2020 suggest that the number of earthquake events with a magnitude greater than 3.5 Mw has increased dramatically since 1980 in the western Makran zone (Fig. 7). Maximum shallow focal depth earthquakes were recorded between 2010 and 2017. The eastern part of the Makran zone recorded the maximum shallow focal depths for the time intervals 1960-1980 and 2010-2020.

5. Conclusion

The late Holocene deep-sea sediment properties were influenced

by various factors including climate changes, ocean currents and seismic events. Sediment texture during the period of 2300 to 1270 cal. yr BP was mainly controlled by climate variability and oceanographic currents. The facies analysis revealed that seismic effects on the deep-sea sediments were observed during the periods 1200-1100, 900-750 and 400-200 cal. yr BP.

The occurrence of recent tsunamis in 1850, 1750, and 1940 suggests that the time period between tsunamis is getting shorter, which could pose a serious hazard for the southern east coast of Iran.

Overall, the study provides insights into the complex interactions between various environmental factors and their impact on deep-sea sediment properties. The findings have important implications for understanding past climate variability and for predicting potential natural hazards in the future. Further research is needed to better understand these interactions and their long-term consequences.

Acknowledgement

This study was conducted as part of the Ph.D. thesis research of the first author at the Ferdowsi University of Mashhad (#3/57576). This work has been mainly supported by the Centre for International Scientific Studies and Collaboration (CISSC), Ministry of Science, Research and Technology, Iran, through a research project, number 990148.

بازسازی و تطابق رخدادهای لرزه‌ای دیرینه باختر مکران با ویژگی‌های فیزیکی و زیستی مغزه‌های عمیق دریای عمان

صدیقه امجدی^۱، حمید علیزاده لاهیجانی^۲، محمد حسین محمودی قرائی^{۳*}، راضیه لک^۴ و نیک مارینر^۲

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

^۳ پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۴ مرکز ملی تحقیقات علمی، دانشگاه فرانچ-کنت، بسانسون، فرانسه

چکیده

اگرچه دومین سونامی مرگبار اقیانوس هند در ناحیه مکران رخ داده است، با این وجود، اطلاعات ما در زمینه تعداد رخدادهای سونامی در طول هولوسن بسیار اندک می‌باشد. به منظور بازسازی محیط رسوبی و سونامی دیرینه، مغزه‌های عمیق از بستر دریای عمان تهیه و مطالعه شده و همچنین بررسی عوامل موثر در جابه‌جایی رسوبات بستر در اثر رخداد سونامی، از طریق تعیین پارامترهای رسوب شناسی، شناسایی پوسته روزن‌داران، تغییر حساسیت مغناطیسی و بازسازی جریان‌ات اقیانوسی صورت گرفته است. یافته‌های این مطالعه نشان داد که آثار جابه‌جایی رسوبات بستر در طی زلزله‌های شدید در دوره‌های زمانی متفاوت و مکان‌های مختلف دریای عمان یکسان نیست. مطالعات محیط‌های دیرینه و بررسی تاریخی سونامی‌های رخ داده در دریای عمان نشان داد که حداقل ۵ رانش زمین، در ابعاد گسترده در ۲۵۰۰ سال پیش رخ داده است. تعداد این رخدادهای در هزار سال گذشته رشد چشمگیری داشته است. به استناد اطلاعات تاریخی ثبت شده حدود ۷ زمین‌لرزه بزرگ در این منطقه رخ داده است که نتایج این پژوهش هم شواهد آن را نشان می‌دهد. با توجه به گسترش شهرنشینی در سواحل جنوب خاوری ایران و افزایش تعداد زمین‌لرزه‌ها در ناحیه مکران، اتخاذ برنامه‌های مدیریتی برای کاهش خسارات سونامی احتمالی لازم و ضروری می‌باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:

رخدادهای لرزه‌ای

سونامی

روزن‌داران

ناحیه مکران

هولوسن پایانی

۱- پیش‌نوشتار

رسوبات را در سیستم‌های رسوب‌گذاری/فرسایشی کنترل کنند (Allen, 2008; Sømme et al., 2009). مخاطرات طبیعی در پهنه مکران را می‌توان در ۳ گروه اصلی طبقه‌بندی کرد: ۱- تغییرات اقلیم و افزایش رخدادهای ناشی از طوفان‌های شدید (سیل و فرسایش سواحل)، ۲- افزایش تراز نسبی آب دریا و ۳- سونامی. پهنه فرورانش مکران یک ناحیه لرزه‌خیز می‌باشد که توان ایجاد زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی لحظه‌ای (Mw) ۸/۵ تا ۸/۸ را دارد (Frohling and Szeliga, 2016). از سال ۸۶۱ هجری شمسی تا کنون تعداد ۸ زمین‌لرزه با بزرگی بیش از ۷ Mw در پهنه مکران رخ داده است (Byrne et al., 1992) (شکل ۱). زلزله ۸ Mw تا ۸/۳ سال ۱۳۲۴ در پهنه فرورانش مکران سبب ایجاد سونامی در ناحیه مکران شد که

در چند دهه اخیر به دنبال رشد گسترده شهرنشینی و گسترش زیرساخت‌های شهری و اقتصادی در جنوب خاور ایران، میزان آسیب‌پذیری سواحل در برابر مخاطرات طبیعی در این منطقه افزایش یافته است (Pourkerman et al., 2022). مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی میزان آسیب‌پذیری اقتصادی و اجتماعی در منطقه چابهار به دنبال ایجاد سونامی به انجام رسیده است (Payande et al., 2015; Akbarpour Jannat et al., 2017; Honarmand et al., 2020; Akbarpour Jannat., 2021). شرایط رسوب‌گذاری رسوبات در حوضه‌های رسوبی به فرایندهای دینامیکی و بازخورد سازوکارهای (مکانیسم‌های) حاصل از اثرات آلوتونیک (خارجی) و اتوتونیک (داخلی) وابسته است که این عوامل می‌توانند توزیع

* نویسنده مسئول: محمد حسین محمودی قرائی؛ E-mail: mhmgharaie@um.ac.ir

ماخذنگاری:

امجدی، ص.، علیزاده لاهیجانی، ح.، محمودی قرائی، م. ح.، لک، ر.، مارینر، ن.، ۱۴۰۳، بازسازی و تطابق رخدادهای لرزه‌ای دیرینه باختر مکران با ویژگی‌های فیزیکی و زیستی مغزه‌های عمیق دریای عمان. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۴(۲)، ۴۵-۵۸. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.389392.2070>

doi: 10.22071/gsj.2023.389392.2070



doi: 20.1001.1.10237429.1403.34.2.3.9

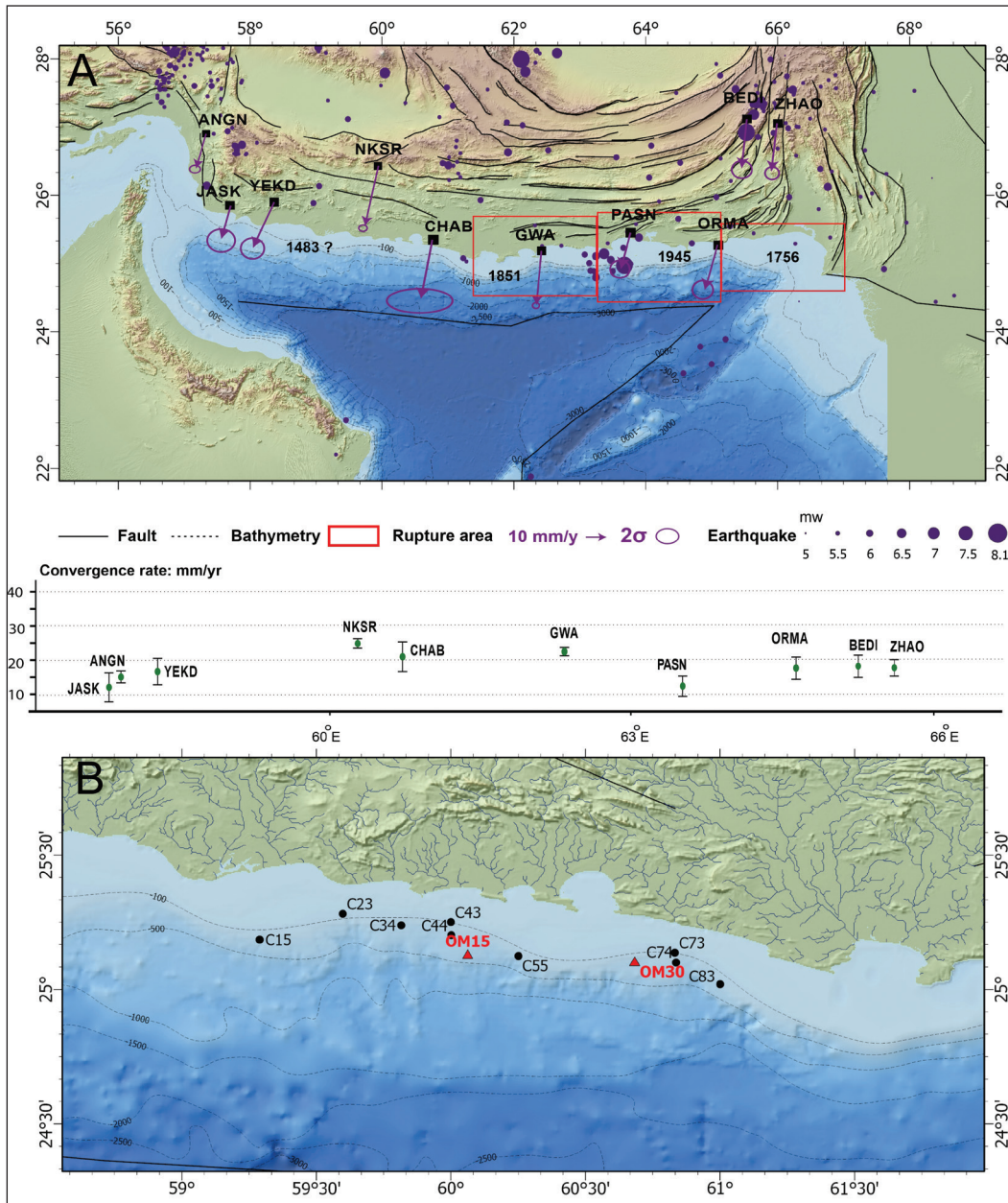
حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

امواج ناشی از آن به بیش از ۴ متر رسیده بود (Shah-Hosseini *et al.*, 2011). در سال ۱۳۹۲ در جنوب پاکستان زلزله‌ای به بزرگی ۷/۸ Mw به وقوع پیوست که به دنبال آن یک سونامی کوچک مقیاس در سواحل شمال کشور عمان ثبت گردید (Satake, 2014).

این سونامی به احتمال زیاد به دنبال ریزش رسوبات بستر دریای عمان به دنبال این رخداد لرزه‌ای ایجاد شده است (Heidarzadeh and Hoffmann *et al.*, 2014).



شکل ۱- موقعیت ناحیه مکران. (A) نقشه موقعیت گسل‌ها، سرعت جابه‌جایی با مرجع ثابت پوسته عربی و همچنین موقعیت زمین‌لرزه‌های رخ داده در ناحیه مکران. نیمرخ‌های (پروفایل‌های) شمالی-جنوبی نمایگر سرعت‌های همگرایی اندازه‌گیری شده با استفاده از GPS در ایستگاه‌های مطالعه شده توسط پنی و همکاران (Penney *et al.*, 2017). (B) نقشه موقعیت مغزه‌گیری در دریای عمان. دایره‌های سیاه‌رنگ موقعیت مغزه‌های مطالعه شده توسط لاهیجانی و همکاران (Lahijani *et al.*, 2019) و مثلث‌های قرمز موقعیت مغزه‌های برداشت شده برای این مطالعه می‌باشند.

Figure 1. Makran subduction zone, A) Map showing position of the faults, historical earthquakes and N-S profile represented GPS velocities with a fixed Arabian plate reference based on the compilation by Penney *et al.* (2017). B) Map of coring position at the Gulf of Oman. Black circles represented position of studied cores by Lahijani *et al.* (2019) and red triangles are position of the studied core.

روش، نمونه‌ها از فواصل ۲ سانتی‌متری برداشت گردیدند و در صورت تغییر در رخساره‌ها، نمونه‌برداری حتی از فواصل کوتاه‌تر نیز انجام شد. پس از نمونه برداری و خشک کردن در آن (۵۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت) نمونه‌ها به دو قسمت تقسیم شدند. قسمت اول برای محاسبه ماده آلی و کربنات کلسیم با استفاده از روش کوره مورد استفاده قرار گرفت (Heiri *et al.*, 2001)، قسمت دوم به منظور انجام دانه‌بندی و آماده‌سازی برای مطالعه پوسته‌های روزن‌داران استفاده شد. در ابتدا با استفاده از روش الک تر نمونه‌های رسوب با قطر کمتر از ۴۳ میکرون از نمونه‌ها جدا شده و نمونه‌های باقی مانده پس از خشک کردن رسوبات در آن با روش الک خشک با استفاده از سری استاندارد رسوب‌شناسی غربال شده‌اند. نمونه‌های بزرگ‌تر از ۱۲۵ میکرون برای مطالعات پوسته روزن‌داران مورد استفاده قرار گرفتند (Marriner *et al.*, 2005). نمونه‌های رسوب بر روی میکرواسلاید قرار گرفت و پوسته روزن‌داران کف‌زی و شناور جداسازی شده و گونه‌های آن‌ها شناسایی شدند. پس از شمارش و شناسایی پوسته‌های روزن‌داران، فراوانی آن‌ها بر اساس درصد بر روی نمودار رسم شد. داده‌های سن‌سنجی و مدل سن‌سنجی با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از مطالعات میلر (Miller *et al.*, 2016) بر روی مغزه‌های C73 (داده‌های ایزوتوپ کربن ۱۴) و C55 (داده‌های ایزوتوپ سرب) استخراج شده است (شکل ۱ و ۲). رسم نمودارها و مدل‌های خطی و چند فرمولی (polynomial) با استفاده از نرم‌افزار Ori-gin pro 2021 انجام شد. مغزه‌های اشاره شده در موقعیت نزدیکی از ایستگاه‌های نمونه برداری قرار دارند (شکل ۱- B). در ابتدا برای همسان‌سازی سنی مغزه‌ها، از روش تطابق رخساره‌ای استفاده شد و پس از بررسی دقیق رخساره‌ها، مدل عمقی-سنی برای مغزه‌های مورد مطالعه تهیه شد. در نهایت، روند تغییرات سنی در طول مغزه‌های مورد مطالعه برآورد گردید و میزان دقت مدل با استفاده از مدل‌های خطی و چند متغیره مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج به‌دست آمده از آثار رانش بستر دریا در مغزه‌های مورد مطالعه با داده‌های به‌دست آمده از مطالعات لاهیجانی و همکاران (Lahijani *et al.*, 2019) برای اعماق ۱۰۰ تا ۴۰۰ متری مورد مقایسه قرار گرفت. و در نهایت، داده‌های تاریخی زلزله‌های بزرگ‌تر از ۳/۵ Mw در فاصله ۲۵۰ کیلومتری از خط ساحلی برای بررسی روند رخدادهای لرزه‌ای و ژرفای کانونی آن‌ها در بازه زمانی ۱۹۲۰ تا ۲۰۲۰ استخراج گردید. اطلاعات زمین‌لرزه‌های تاریخی از پایگاه داده USGS/earthquake hazards به‌دست آمده است (شکل ۱).

۳- داده‌ها و اطلاعات

در این مطالعه، به بررسی روند تغییرات محیطی و شناسایی سونامی‌های دیرینه در دریای عمان با استفاده از پارامترهای رسوب‌شناسی و پوسته‌های روزن‌داران پرداخته شده است. پوسته روزن‌داران به عنوان ابزار بسیار دقیق، به‌طور گسترده‌ای برای بررسی تغییرات محیطی و جایه‌جایی رسوبات بستر دریا توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است (Quintela *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2021; Yhasnara *et al.*, 2023).

۳-۱- تغییرات رخساره‌های مغزه OM 30

نتایج آنالیز دانه‌بندی رسوبات در دو مغزه در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، رسوبات در مغزه OM 30 غالباً از ذرات گلی تشکیل شده‌اند (بیش از ۹۴ درصد) و فراوانی این ذرات در طول مغزه تغییرات چندانی نشان نمی‌دهند. بر اساس مدل عمقی افزایش فراوانی دانه‌های ماسه در بازه زمانی ۲۲۰۰ تا ۱۹۷۰ سال پیش قابل مشاهده است. ذرات ماسه متشکل از پوسته‌های روزن‌داران شناور بوده است، بر این اساس، گونه‌های *Globigerina rubra*، *Globigerina bulloides*، *Neoglobobquadrina dutertrei* و *Uvigerina peregrine* بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳).

بستر دریای عمان دارای فلات قاره نسبتاً باریک، شیب قاره زیاد به همراه دره‌های ژرف می‌باشد. بر روی لبه فلات قاره در مجاورت شیب قاره، رسوبات ستبری نهشته شده است که به دنبال زلزله‌های بزرگ حرکت کرده و جریان‌های آشفته را ایجاد می‌کنند (Nakagaki and Tanioka, 2020). موقعیت نهشته شدن رسوبات، سازوکار حمل رسوبات از منشا تا محیط رسوب‌گذاری و جریانات به موازات حاشیه قاره‌ها در حوضه‌های رسوبی را می‌توان از طریق مطالعات سیستم‌های توریدیتی مشخص کرد. از سوی دیگر، اثرات متقابل بین تغییرات آب و هوا، زمین‌ساخت، و پارامترهای فیزیکی و شیمیایی به شدت بر روی نرخ و زمان رسوب‌گذاری رسوبات در حوضه‌ها تأثیر می‌گذارند. برخی دانشمندان بر این باورند که تغییرات آب و هوایی نقش بسزایی در رشد سیستم‌های توریدیتی با اثرپذیری در تولید رسوب و جریانات رودخانه‌ای دارند. این تغییرات آب و هوایی شامل تأثیر دوره‌های یخچالی و بین یخچالی (Skene and Piper, 2003; Zaragosi *et al.*, 2006; Tripsanas *et al.*, 2007; Toucanne *et al.*, 2008)، و مانسون (Ducassou *et al.*, 2009) بر روی سیستم‌های توریدیتی در طول دوران پلیستوسن در حاشیه‌های غیر فعال دریایی می‌باشد. مانسون که از جمله مهم‌ترین سیستم‌های آب و هوایی در بارش‌های آسیا می‌باشد، ارتباط تنگاتنگی با ITCZ (Intertropical Convergence Zone) دارد. به‌گونه‌ای که موقعیت محور اصلی ITCZ تعیین‌کننده گسترش بارندگی‌های مانسون در آسیا می‌باشد (Fleitman *et al.*, 2007).

باد لوار ویژگی چیره هواشناسی و اقلیمی در خاور ایران است که از آسیای مرکزی تا سواحل شمالی دریای عرب می‌وزد. میانگین مدت وزش این باد در فصل تابستان ۱۲۰ روز است. این باد به دلیل قدرت وزش بالا مسئول طوفان‌های گرد و غبار عظیم در جنوب باختری آسیا است (Hamidianpour *et al.*, 2021). در طول هولوسن، همزمان با بالا آمدن تراز آب دریا و آب‌گیری خلیج فارس، نرخ رسوب‌گذاری در نواحی ژرف دریای عمان بیشتر توسط جریانات اقیانوسی و ورودی رسوبات بادی از حوضه سیستان و بلوچستان کنترل شده است (Amjadi *et al.*, 2023). از این رو، بیشترین نرخ رسوب‌گذاری در دوره‌های افزایش شدت بادهای لوار و بالاراندگی (upwelling) آب‌های سرد اقیانوسی صورت گرفت است. بنابراین با توجه به شناخت مناسب از سازوکار رسوب‌گذاری، بررسی روند تغییرات رسوبات نواحی ژرف دریا به دنبال اثرات فعالیت‌های زمین‌ساختی قابل شناخت و بررسی می‌باشد. هدف از این مطالعه T بررسی پارامترهای رسوب‌شناسی، زیستی و دیرینه اقلیمی به منظور بازسازی اثرات زمین‌ساختی بر روی تغییرات و جایه‌جایی رسوبات بستر می‌باشد.

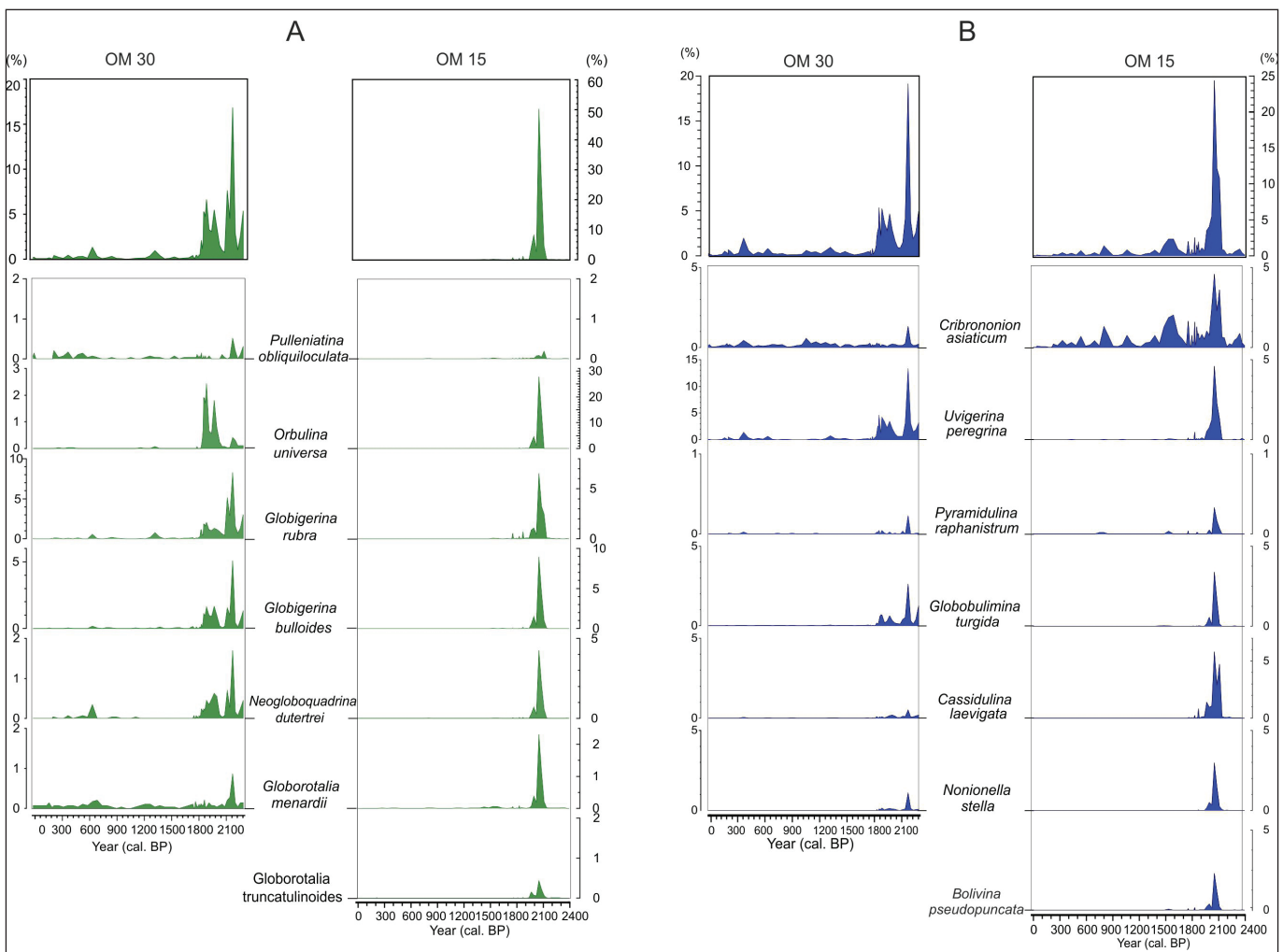
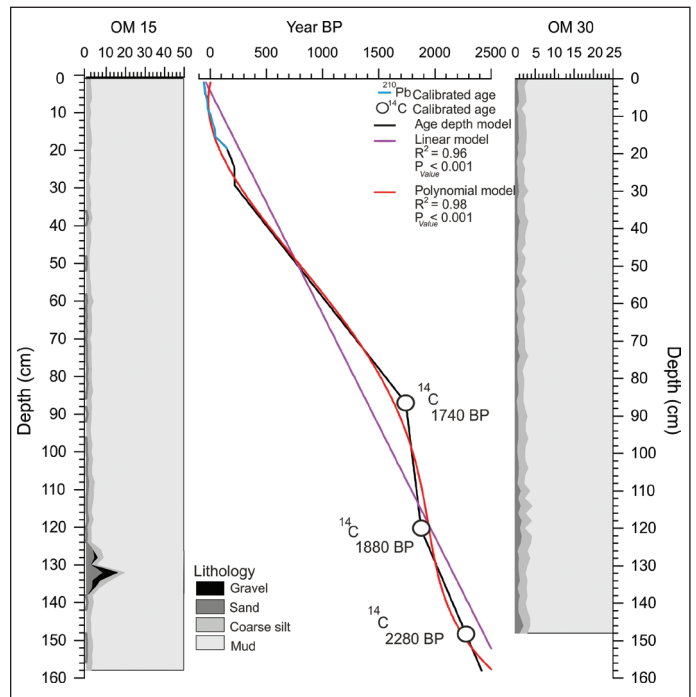
۳-۲- روش پژوهش

این پژوهش بر روی دو مغزه ژرف رسوبی که در سال ۱۳۹۲ از دریای عمان و با استفاده از دستگاه مغزه گیر وزنی در گشت دریایی مطالعات خلیج فارس و دریای عمان (PG-GOOS) برداشت شد، انجام شده است. موقعیت مغزه‌های برداشت شده در شکل ۱ نمایش داده شده است. محل جغرافیایی مغزه‌ها بر اساس موقعیت شیب حوضه تعیین شده است. بر این اساس، مغزه OM30 از ژرفای ۲۰۰ متری و مغزه OM15 از ژرفای ۳۰۰ متری آب به‌دست آمده‌اند و طول مغزه‌های برداشت شده به ترتیب ۱۵۷ و ۱۴۸ سانتی‌متر می‌باشد. مغزه‌های برداشت شده جهت انجام آنالیزهای آزمایشگاهی به آزمایشگاه زمین‌شناسی دریایی بوشهر انتقال داده شدند. آزمایشات انجام شده به دو صورت دست‌خورده و دست‌نخورده صورت گرفته است. آزمایش غیر تخریبی (non-destructive) حساسیت مغناطیسی‌سنجی با استفاده از دستگاه اسکن مغناطیسی مغزه‌های Bartington با سنسور ۱۰ سانتی‌متری و با آشکارساز MS2C انجام شد.

پس از اندازه‌گیری حساسیت مغناطیسی رسوبات، مغزه‌ها به دو نیم تقسیم شدند و نمونه‌برداری با استفاده از روش سیستماتیک با دقت بالا صورت گرفت. در این

شکل ۲- ویژگی‌های رسوب‌شناسی مغزه‌های OM30 و OM15 و مدل سنی با استفاده از داده‌های ایزوتوپ کربن و سرب استخراج شده از مطالعات میلر (Miller, 2010).

Figure 2. Sediment grain size changes through OM30 and OM15 cores and age-depth model based on Miller (2010) data.

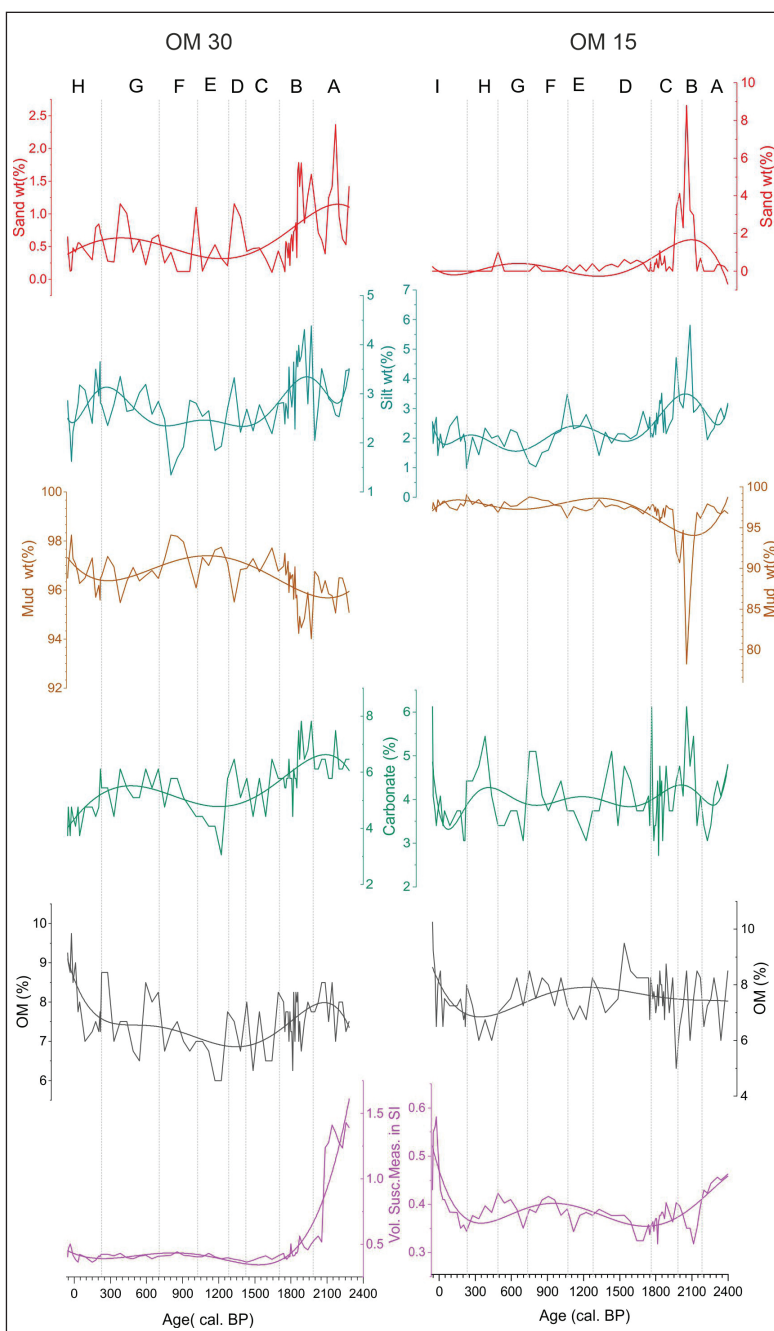


شکل ۳- فراوانی روزن‌داران شناور در شکل A و شکل B نشان‌دهنده روزن‌داران کفزی در طول مغزه‌های مورد مطالعه می‌باشد.

Figure 3. Foraminifera abundance changes through the studied: A) Planktonic, B) Benthic.

گویای آن است که گونه *Orbulina universa* افزایش چشمگیر و گونه *Uvigerina peregrina* یک روند افزایش را در رسوبات ثبت کرده‌اند. در مدت زمان یاد شده در دو مرحله (۱۸۶۰ و ۱۸۱۵ سال پیش) کاهش شدیدی در فراوانی ماسه، کربنات کلسیم و حساسیت مغناطیسی در رسوبات مورد مطالعه به ثبت رسیده است. همزمان با این روند کاهشی، شاهد افزایش میزان ماده آلی و گل در رسوبات مغزه بوده‌ایم. در ۱۷۵۰-۱۴۲۰ سال پیش تمامی پارامترهای مورد مطالعه نشان‌دهنده یک روند کاهشی با نوسانات کم می‌باشند (شکل ۴). همچنین، فراوانی روزن‌داران به شدت کاهش داشته است و تنها ۳ گونه *Pulleniatina obliquiloculata*، *Globorotalia menardii* و *Cribronion asiaticum* به میزان کم در رسوبات مشاهده شده‌اند (شکل ۳).

در طول این مدت، روند افزایش ذرات ماسه به صورت یکنواخت نبوده است بلکه در ۲۲۸۵ سال پیش یک کاهش ناگهانی در اندازه ذرات رسوبات رخ داده است و قطر ذرات در ۲۱۷۰ سال پیش افزایش مجددی را از خود نشان داده است. در این بازه زمانی ارتباط مستقیمی بین حساسیت مغناطیسی و کربنات کلسیم با فراوانی دانه‌های ماسه نیز مشاهده شد. ماده آلی و گل نیز دامنه تغییراتی را بین ۷ تا ۸ درصد و ۹۴-۹۶ درصد را به ترتیب از خود نشان می‌دهند. در محدوده سنی ۱۹۷۰-۱۷۵۰ سال پیش، نوسانات شدیدی در تمامی پارامترهای مورد مطالعه قابل مشاهده است. در ۱۹۴۰ سال پیش، فراوانی کربنات و ماسه سیر نزولی را نشان می‌دهند. این روند در بازه زمانی ۱۸۸۰ تا ۱۷۵۰ سال پیش افزایش نشان می‌دهد. داده‌های زیستی در این بازه زمانی همچنین



شکل ۴- روند تغییرات پارامترهای رسوب شناسی و حساسیت مغناطیسی در طول مغزه‌های مورد مطالعه. خطوط نقطه چین نمایانگر تغییرات رخساره‌ای در طول مغزه‌های OM30 و OM15 می‌باشد.

Figure 4. Sedimentological parameter and MS changes along the studied cores. The dashed line represented defined facies for the OM 30 and OM 15 cores.

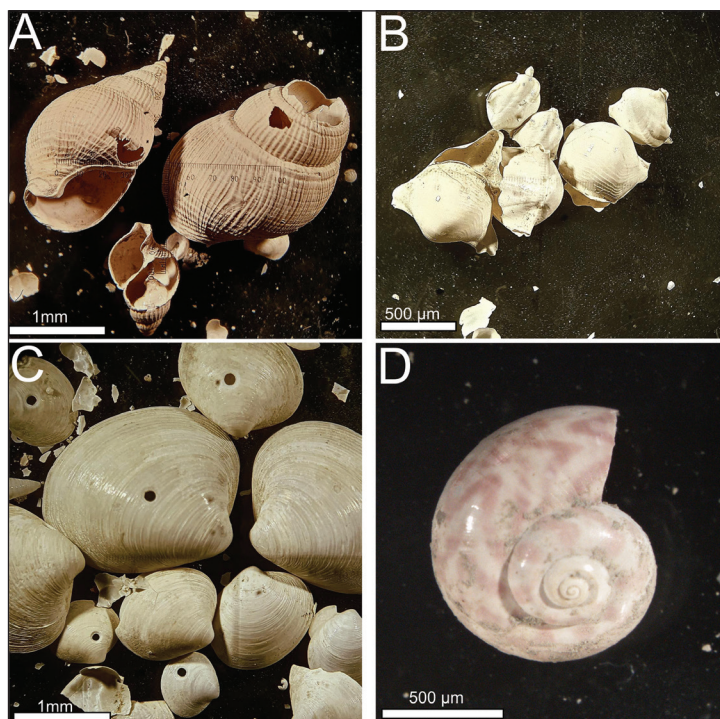
داده‌اند. تمامی ذرات درشت را پوسته روزن‌داران و قطعات سالم/خرد شده پوسته دوکفه‌ای، شکم‌پا، صدف حلزون (کف‌زی) و پروانه دریایی (شناور) تشکیل داده‌اند. مطالعات میکروسکوپی نشان‌دهنده آن است که تمامی گونه‌های روزن‌داران در این بازه زمانی افزایش چشمگیری نشان می‌دهند. در این میان بیشترین فراوانی مربوط به *Orbulina universa* است که بیش از ۳۰ درصد پوسته‌ها را به خود اختصاص داده است، سپس به ترتیب *Globigerina bulloides* و *Globigerina rubra* در رده دوم و سوم، بیشترین فراوانی قرار دارند (شکل ۳). این در حالی است که پوسته روزن‌داران کف‌زی اگرچه نشان‌دهنده افزایش فراوانی هستند، اما درصد آن‌ها در نمونه‌های رسوبی به کمتر از ۵ درصد می‌رسد. فراوانی بالای پوسته روزن‌داران شناور و همچنین وجود حفرات بر روی پوسته‌های دوکفه‌ای نشان‌دهنده فرایند آشفستگی زیستی به دنبال افزایش مواد مغذی و اکسیژن محلول در آب دریا بوده است (شکل ۵).

فراوانی ذرات گلی یک روند افزایشی را تا حدود ۲۰۰۰ سال پیش از خود نشان داده است. در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۱۹۹۰ سال پیش، قطر ذرات رسوب یک روند افزایشی را ثبت کرده‌اند (به سمت بالا درشت‌شونده). این افزایش در قطر دانه‌های ماسه به دنبال افزایش فراوانی روزن‌داران در نمونه‌های مورد مطالعه بود است. در مدت زمان ۲۱۰۰ تا ۱۹۷۰ سال پیش ارتباط ضعیفی بین حساسیت مغناطیسی و ذرات درشت‌دانه مشاهده شده است که این نشان از فراوانی پوسته جانداران دریایی در رسوبات بستر بوده است. در طی بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۱۹۴۰ سال پیش یک سیگنال کاهشی برای تمامی پارامترهای رسوب‌شناسی مورد مطالعه به ثبت رسیده است (شکل ۴). به دنبال آن، در طی ۱۹۴۰-۱۷۰۰ سال پیش فراوانی گل و ماده آلی روند افزایشی را از خود نشان داده‌اند. در بازه زمانی ۱۷۰۰ تا ۱۴۰۰ روند کاهشی ذرات درشت‌دانه با افزایش ناگهانی کربنات کلسیم همراه بوده است در حالی که تغییراتی در حساسیت مغناطیسی رسوبات مشاهده نمی‌شود.

در ۱۳۲۰ سال پیش روند افزایشی در فراوانی ماسه، ماده آلی و کربنات مشاهده شده است که همزمان افزایش در فراوانی گونه *Globigerina rubra* در این مغزه قابل مشاهده است. همچنین، حساسیت مغناطیسی تغییرات آشکاری را از خود نشان نداده است. فراوانی گل در رسوبات مورد مطالعه پس از کاهش در ۱۲۰۰ سال پیش یک روند افزایشی را تا ۱۱۰۰ سال پیش به نمایش گذاشته است. در این بازه زمانی، حساسیت مغناطیسی رسوبات بدون تغییر بوده است و فراوانی گونه‌های روزن‌داران کاهش یافته است. در طول مدت زمانی ۱۱۰۰ تا ۲۰۰ سال پیش یک روند افزایشی برای کربنات، ماده آلی و ماسه مشاهده شده است که این پدیده به دنبال افزایش درصد روزن‌داران به‌ویژه گونه‌های *Neogloboquadrina dutertrei* و *Pulleniatina obliquiloculata* بوده است. از حدود ۲۰۰ سال پیش تا کنون کاهش درصد کربنات در نمونه‌های رسوبی قابل مشاهده است که این امر می‌تواند در ارتباط با کاهش در فراوانی پوسته‌های روزن‌داران در نمونه‌های رسوب باشد.

۳-۲- تغییرات رخساره‌های مغزه OM 15

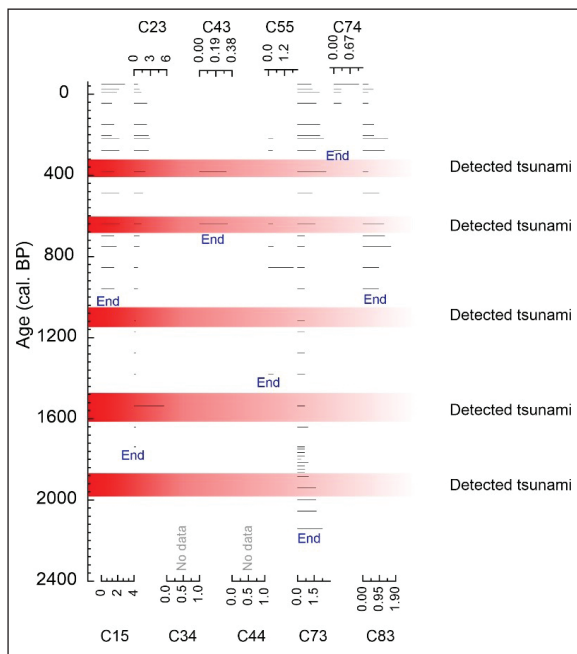
فراوانی اندازه ذرات در مغزه OM 15 غالباً یکنواخت بوده و حدود ۹۷/۵ تا ۹۹/۲ درصد از ذرات رسوبی در محدوده زمانی ۱۹۷۰ سال پیش تا عهد حاضر از گل تشکیل شده‌اند. در قسمت انتهایی مغزه و در بازه زمانی ۲۲۸۰ تا ۲۱۹۰ سال پیش رخساره‌های رسوبی یک روند کاهشی را در فراوانی ذرات دانه درشت (ماسه، سیلت درشت) و کربنات نشان می‌دهند. همچنین روند افزایشی در فراوانی ذرات گلی به همراه ماده آلی دیده می‌شود. در طول بازه زمانی ۲۱۴۰ تا ۱۹۷۰ سال پیش تغییرات گسترده‌ای در بافت رسوبی مغزه مشاهده شد. در این محدوده زمانی، فراوانی گل به کمترین میزان خود رسیده است (۸۶ تا ۷۸ درصد) در صورتی که ذرات گراول، ماسه و سیل درشت به ترتیب ۸/۴، ۸/۸ و ۵/۸ درصد از فراوانی رسوبات را به خود اختصاص



شکل ۵- ذرات درشت‌تر از ماسه در مغزه OM15. A) خرده‌های صدف (*Taranidaphne amphitrites*), B) *Calvolinia tridentate*, C) *Protapes gallus*, and D) *Umbonium Vestiarium*.

Figure 5. Observed gravelly portions in the core OM 15. A) shell fragments of *Taranidaphne amphitrites*, B) *Calvolinia tridentate*, C) *Protapes gallus*, and D) *Umbonium Vestiarium*.

شده از دریای عمان در تایید جابه‌جایی رسوبات بستر دریای عمان موثر است (شکل ۶).



شکل ۶- روند تغییرات فراوانی ماسه (درصد) در طول مغزه‌های برداشت شده از دریای عمان (Lahijani et al., 2019) و رخدادهای سونامی مشخص شده از مغزه‌های مورد مطالعه. کلمه End نشان دهنده قسمت انتهایی هر مغزه می‌باشد.

Figure 6. Abundance of sand portion changes (in percent) through the studied cores by Lahijani et al., (2019) in the Gulf of Oman. End represent base of each core.

در رخساره E تمامی پارامترها به غیر از ماده آلی و کربنات کلسیم کاهش شدیدی را از خود به نمایش گذاشته‌اند. همچنین در این بازه زمانی تعداد بولدرهای ایجاد شده در سواحل خاوری کشور عمان افزایش چشمگیری یافته است. این پدیده همچنین می‌تواند در پی رخداد لرزه‌ای و ایجاد سونامی ایجاد شده باشد. مطالعه شاه‌حسینی و همکاران (Shah-Hosseini et al., 2011) نیز تایید کننده اثرات رخداد سونامی در سواحل ایران بوده است. در رخساره F و G وجود سیگنال‌های افزایش کربنات کلسیم (به‌ویژه در مغزه عمیق‌تر) به همراه کاهش شدید دانه‌های ماسه و وجود رشد چشمگیر قطعات بولدر در سواحل عمان گواهی از جابه‌جایی رسوبات بستر دریا و ایجاد امواج قدرتمند بوده است. در نهایت در رخساره H شاهد افزایش تدریجی قدرت باد مانسون تابستانه و افزایش اثرات آب‌های گرم و شور خروجی از دریا عمان بوده‌ایم.

مقایسه نتایج به‌دست آمده از این مطالعه با داده‌های مغزه‌های برداشت شده از دریای عمان در ژرفای ۱۰۰ تا ۴۰۰ متری نشان داده است که فراوانی دانه‌های ماسه در هنگام رخدادهای لرزه‌ای به بیشینه مقدار خود رسیده‌اند. طولانی‌ترین این مغزه‌ها مربوط به مغزه شماره C73 بوده است که سن این مغزه به ۲۲۰۰ سال می‌رسد. در این بازه زمانی افزایش دانه‌های ماسه در زمان وقوع سونامی می‌تواند ناشی از جابه‌جایی

ماده آلی و کربنات کلسیم نمایانگر یک روند کاهش بین ۱۴۰۰-۱۱۰۰ سال پیش بوده‌اند که در این بازه زمانی فراوانی گل تغییر ناچیزی داشته است. در طول مدت زمان ۱۱۰۰ تا ۲۰۰ سال پیش شاهد افزایش ناگهانی فراوانی کربنات کلسیم در بازه‌های زمانی ۷۵۰-۹۰۰ و ۴۰۰-۲۰۰ سال پیش بوده‌ایم که همزمان با افزایش درصد گل در نمونه‌های رسوبی مورد مطالعه بوده است. در حدود ۵۰۰ سال پیش افزایش ناگهانی در میزان درصد ماسه مشاهده می‌شود که با افزایش حساسیت مغناطیسی و کاهش کربنات در نمونه‌های رسوبی همزمان بوده است که این امر گواهی افزایش بار آواری در محیط رسوبی بوده است. از ۲۰۰ سال پیش تا کنون یک روند افزایشی در ماده آلی، کربنات و حساسیت مغناطیسی در رسوبات مشاهده شده است. این موضوع گویای افزایش رسوبات درون‌حوضه‌ای، افزایش سطح آب دریا و کاهش ذرات آواری است. نتایج حاصل از این بخش نشان‌دهنده آن است که فراوانی کربنات کلسیم از ۱۷۵۰ سال تا عهد حاضر کمتر تحت تاثیر وجود روزن‌داران بوده است. بر اساس ویژگی‌های رسوب‌شناسی ۷ رخساره اصلی در مغزه‌های مورد مطالعه قابل تشخیص هستند که عبارتند از: A (۱۹۷۰-۲۳۰۰)، B (۱۷۵۰-۱۹۷۰)، C (۱۷۵۰-۱۴۲۰)، D (۱۲۷۰-۱۴۲۰)، E (۱۱۲۰-۱۲۷۰)، F (۷۰۰-۱۱۰۰)، G (۲۰۰-۷۰۰) و H (۲۰۰ تا کنون) (شکل ۴).

۴- بحث

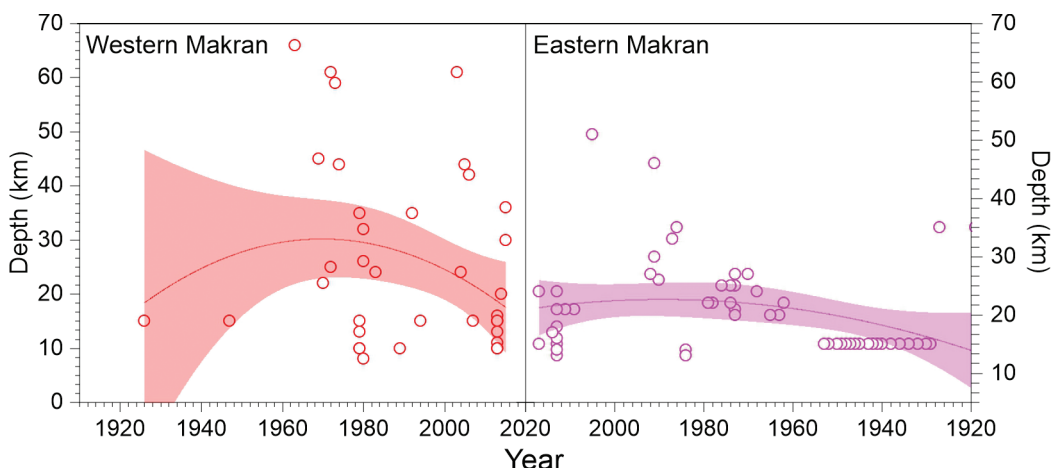
استفاده از پوسته روزن‌داران برای شناسایی رخدادهای سونامی دیرینه در سواحل ایران و عمان نشان داده است که این پوسته‌ها قابلیت بالایی را برای ثبت تغییرات ناگهانی در حوضه رسوبی دریای عمان دارند (Vaziri et al., 2019; Pilarczyk and Reinhardt, 2012). از این‌رو، در این مطالعه سعی گردیده تا با استفاده از فراوانی پوسته روزن‌داران و دیگر شاخص‌های رسوب‌شناختی، روند تغییرات محیطی و زمین‌ساختی بر روی رسوبات مشخص و اثرات آن‌ها از یکدیگر تفکیک شوند.

رخساره A بیانگر بالا بودن مواد غذایی و سطح اکسیژن محلول در محیط رسوب‌گذاری و افزایش تولیدات زیستی بوده است. در این دوره افزایش خشکسالی در حوضه سیستان و افزایش قدرت باد لوار منجر به افزایش تعداد طوفان‌های شن در حوضه سیستان و در نتیجه گسترش جریان‌ات پادساعت‌گرد در دریای عمان شده است (Amjadi et al., 2023; Hamzeh et al., 2016). افزایش ورودی ریزگردها به داخل آب دریا و همچنین بالاراندگی آب دریا به دنبال جریان‌ات Ekman باعث رشد تولیدات زیستی در دریا شده است. در رخساره A افزایش ناگهانی گل در نمونه‌های رسوبی و همچنین وجود پوسته‌های صدف‌های دریایی محیط کم عمق دریا در عمق ۳۰۰ متری می‌تواند شواهدی بر جابه‌جایی رسوبات در بستر حوضه باشد. این روند می‌تواند به دنبال ایجاد یک رخداد لرزه‌ای به‌وجود آمده باشد. همچنین در نواحی ساحلی خاور کشور عمان اثراتی از نهشته شدن بولدر در این محدوده زمانی نشان‌دهنده وقوع یک سونامی در پی رخداد لرزه‌ای شدید بوده است (Hoffmann et al., 2020).

رخساره B نشان‌دهنده کاهش شدت باد لوار و افزایش تعداد طوفان‌های حاره‌ای بوده است (Amjadi et al., 2023). در این بازه زمانی از قدرت جریان‌ات Ekman کاسته شده است و کاهش ورودی غبار به داخل حوضه و کاهش شدت بالاراندگی آب دریا سبب کاهش در تولیدات زیستی بوده است. در رخساره C و D اثرات افزایش قدرت بادهای مانسون تابستانه در رسوبات مشاهده می‌شود. در طی این دوره به خاطر افزایش شدت بالاراندگی آب دریا در سواحل خاوری کشور عمان، خروج آب خلیج فارس از ژرفای کمتری صورت می‌گیرد و جریان آب در دریای عمان به شکل ساعت‌گرد تغییر می‌کند (Pourkerman et al., 2023). از این‌رو، تعداد روزن‌داران در دریای عمان به شدت کاهش می‌یابد. از طرفی فراوانی روزن‌داران در نمونه‌های رسوبی در دریای عمان به‌صورت مکانی تغییر می‌کند. از این‌رو، نتایج تغییرات ذرات ماسه (غالباً تخریبی) در طول مغزه‌های برداشت

رخدادهای لرزه‌ای با ژرفای کم در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ رشد چشمگیری را داشته است. همچنین این بررسی‌ها در قسمت خاوری مکران نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی لرزه‌های کم ژرفا در بازه‌های زمانی ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ و همچنین ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ صورت گرفته است.

ذرات درشت دانه از نواحی کم ژرفا به ژرف تر باشد. بررسی‌های آماری داده‌های لرزه‌ای در بازه زمانی ۱۹۲۰ تا ۲۰۲۰ نشان دهنده آن است که تعداد رخدادهای لرزه‌ای در قسمت باختری مکران به طور قابل ملاحظه‌ای از سال ۱۹۸۰ افزایش داشته است. شکل شماره ۷ نشان‌دهنده آن است که تعداد



شکل ۷- بررسی روند تغییرات لرزه‌های بزرگ‌تر از ۳/۵ Mw در باختر و خاور مکران در بازه زمانی ۱۹۲۰-۲۰۲۰.

Figure 7. The graphs represented depth of earthquakes greater than 3.5 Richter in the western and eastern Makran zone for the period of 1920 to 2020.

۵- نتیجه‌گیری

برداشت شده از دریای عمان به دلیل جابه‌جایی رسوبات مناطق کم ژرفای قاره‌ای به داخل رسوبات ریزدانه ناحیه ژرف شده است. با احتساب آخرین رخدادهای شدید سونامی‌ها در سال‌های ۱۷۵۰، ۱۸۵۰، و ۱۹۴۰ می‌توان نتیجه گرفت که فواصل زمانی رخدادهای سونامی در سده‌های اخیر رو به کاهش است. این امر می‌تواند تهدیدی جدی برای ساکنان نواحی ساحلی مکران و خاور کشور عمان باشد.

سپاسگزاری

این مطالعه به عنوان بخشی از پایان‌نامه دکتری نویسنده اول در دانشگاه فردوسی مشهد (شماره #۳/۵۷۵۷۶) می‌باشد. در این پژوهش از مرکز مطالعات همکاری‌های علمی بین‌المللی (CISSC) وزارت علوم، تحقیقات و فناوری ایران (پروژه تحقیقاتی به شماره ۹۹۰۱۴۸)، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی و به سبب حمایت‌های مادی و معنوی قدردانی می‌شود.

نتایج این مطالعه نشان داد که گسترش رسوبات بستر دریای عمان تحت تاثیر عواملی چون: (۱) تغییرات اقلیمی مانند سرعت باد و انتقال ریزگرد به داخل آب دریا، (۲) پارامترهای اقیانوس‌شناسی به‌ویژه جریان چیره اقیانوسی و تاثیرات آب‌های خروجی خلیج فارس و (۳) رخدادهای لرزه‌ای و جابه‌جایی رسوبات بستر دریا بوده است. نتایج بررسی‌های دقیق رسوبات دو مغزه گویای آن است که در طول بازه زمانی ۲۳۰۰ تا ۱۲۵۰ سال پیش، فرایندهای اقلیمی و اقیانوس‌شناختی بیشتری تاثیر را در گسترش رسوبات بستر دریای عمان داشته‌اند. در بازه‌های زمانی ۱۹۷۰ تا ۱۹۴۰ و همچنین ۱۸۵۰ و ۱۸۰۰ اثراتی از جابه‌جایی در رسوبات بستر دریا دیده شده است که بیشترین اثرات مشاهده شده، مربوط به فرایندهای لرزه‌ای از ۱۲۰۰ سال گذشته بوده است. نتایج داده‌های رخصاره‌ای نشان می‌دهند که تعداد دوره‌های سونامی ثبت شده در رسوبات در بازه‌های زمانی ۱۲۰۰-۱۱۰۰، ۷۵۰-۹۰۰ و ۲۰۰-۴۰۰ بوده است. در بازه‌های زمانی یاد شده، رخدادهای لرزه باعث افزایش میزان ماسه در طول مغزه‌های

References

- Akbarpour Jannat, M. R., Rastgoftar, E., and Asano, T., 2017. Tsunami Assessment for Inundation Risk Management at Chabahar Bay Facilities in Iran. *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, 1(2), 27-39. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.ijcoe.1.2.27>.
- Akbarpour Jannat, M.R., 2021. Tsunami modeling in the Chabahar Bay-Iran from worst-case Makran seismic scenarios: new insights into spectral characterization, separation of the continental shelf, and topography effects. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, pp.1-21. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06449-0>.
- Allen, G.P., 2008. Time scales of tectonic landscapes and their sediment routing systems. In: Gallagher, K., Jones, S.J., Wainwright, J. (Eds.), *Landscape, Evolution: Denudation, Climate and Tectonics Over Different Time and Space Scales: Geological Society of London Special Publication*, pp. 7–28. <https://doi.org/10.1144/SP296.2>.
- Amjadi, S., Gharaie, M.H.M., Lahijani, H.A.K., Kaniewski, D., Lak, R., Pourkerman, M., Shah-Hosseini, M., Hamzeh, M.A., and Marriner, N., 2023. Summer monsoon belt displacement and precipitation sources in the Northern Arabian Sea: A multi-proxy palaeoenvironmental reconstruction for Late Holocene. (accepted in *Caspian Journal of Environmental Sciences (CJES)*).
- Byrne, D. E., Sykes, L. R., and Davis, D. M., 1992. Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B1), 449-478. <https://doi.org/10.1029/91JB02165>.
- Costa, P. J. M., Feist, L., Dawson, A. G., Stewart, I., Reicherter, K., and Andrade, C., 2021. An overview on offshore tsunami deposits. *Tsunamiites*, 183-192. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823939-1.00011-2>.
- Ducassou, E., Migeon, S., Mulder, T., Murat, A., Capotondi, L., Bernasconi, S.M., and Mascle, J., 2009. Evolution of the Nile Deep-Sea turbidite system during the Late Quaternary: influence of climate change on fan sedimentation. *Sedimentology* 56, 2061–2090. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01070>.
- Fleitmann, D., Burns, S. J., Mangini, A., Mudelsee, M., Kramers, J., Villa, I., and Matter, A., 2007. Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). *Quaternary Science Reviews*, 26(1), 170-188. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.04.012>.
- Frohling, E., and Szeliga, W., 2016. GPS constraints on interplate locking within the Makran subduction zone. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 205(1), 67-76. doi.org/10.1093/gji/ggw001.
- Hamidianpour, M., Jahanshahi, S. M. A., Kaskaoutis, D. G., Rashki, A., and Nastos, P. G. 2021. Climatology of the Sistan Levar wind: Atmospheric dynamics driving its onset, duration and withdrawal. *Atmospheric Research*, 260, 105711. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105711>.
- Hamzeh, M.A., Gharaie, M.H.M., Lahijani, H.A.K., Djamali, M., Harami, R.M., and Beni, A.N., 2016. Holocene hydrological changes in SE Iran, a key region between Indian Summer Monsoon and Mediterranean winter precipitation zones, as revealed from a lacustrine sequence from Lake Hamoun. *Quaternary International*, 408, pp.25-39. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.011>.
- Heidarzadeh, M., and Satake, K., 2014. Possible sources of the tsunami observed in the northwestern Indian Ocean following the 2013 September 24 M w 7.7 Pakistan inland earthquake. *Geophysical Journal International*, 199(2), 752-766. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu297>.
- Heiri, O., Lotter, A.F., and Lemcke, G., 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of paleolimnology*, 25, pp.101-110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>.
- Hoffmann, G., Al-Yahyai, S., Naeem, G., Kociok, M., and Grützner, C., 2014. An Indian Ocean tsunami triggered remotely by an onshore earthquake in Balochistan, Pakistan. *Geology*, 42(10), 883-886. <https://doi.org/10.1130/G35756.1>.
- Hoffmann, G., Grützner, C., Schneider, B., Preusser, F., and Reicherter, K., 2020. Large Holocene tsunamis in the northern Arabian Sea. *Marine Geology*, 419, 106068. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106068>.
- Honarmand, M., Shanehsazzadeh, A., and Zandi, S. M., 2020. 3D numerical simulation of tsunami generation and propagation, case study: Makran tsunami generation and penetrating in Chabahar Bay. *Ocean Engineering*, 218, 108109. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108109>.

- org/10.1016/j.oceaneng.2020.108109.
- Lahijani, H.A.K., Amjadi, S., Pourkerman, M., Naderi, A., Hosseindoost, M. and Habibi, P., 2019. Makran continental margin sedimentation during the Late Holocene. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 56(6), pp.629-636. <https://doi.org/10.1139/cjes-2018-0087>.
- Marriner, N., & Morhange, C. 2007. Geoscience of ancient Mediterranean harbours. *Earth-Science Reviews*, 80(3-4), 137-194. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.10.003>.
- Marriner, N., Morhange, C., Boudagher-Fadel, M., Bourcier, M., and Carbonel, P., 2005. Geoarchaeology of Tyre's ancient northern harbour, Phoenicia. *Journal of Archaeological Science*, 32(9), 1302-1327. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.03.019>.
- Miller, C. S., 2010. A multi-proxy palaeoenvironmental reconstruction from sediment cores, offshore Iran-Natural hazards and climatic change within the Late Holocene (Doctoral dissertation, Brunel University Institute for the Environment MPhil Theses).
- Miller, C. S., Leroy, S. A., Collins, P. E., and Lahijani, H. A., 2016. Late Holocene vegetation and ocean variability in the Gulf of Oman. *Quaternary Science Reviews*, 143, 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.05.010>.
- Nakagaki, T., and Tanioka, Y., 2020. Numerical Simulation of Submarine Landslide Tsunami due to the 1929 Grand Banks Earthquake. In Japan Geoscience Union.
- Payande, A. R., Niksokhan, M. H., and Naserian, H., 2015. Tsunami hazard assessment of Chabahar bay related to megathrust seismogenic potential of the Makran subduction zone. *Natural hazards*, 76(1), 161-176. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1476-x>.
- Penney, C., Tavakoli, F., Saadat, A., Nankali, H. R., Sedighi, M., Khorrami, F., Sobouti, F., Rafi, Z., Copley, A., Jackson, J., Priestley, K. 2017. Megathrust and accretionary wedge properties and behaviour in the Makran subduction zone. *Geophysical Journal International*, 209(3), 1800-1830. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx126>.
- Pilarczyk, J.E., and Reinhardt, E.G., 2012. Testing foraminiferal taphonomy as a tsunami indicator in a shallow arid system lagoon: Sur, Sultanate of Oman. *Marine Micropaleontology* 295-298, 128-13. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.12.002>.
- Pourkerman, M., Marriner, N., Amjadi, S., Lak, R., Hamzeh, M., Mohammadpor, G., Lahijani, H., Tavakoli, M., Morhange, C., and Shah-Hosseini, M., 2023. The impacts of Persian Gulf water and ocean-atmosphere interactions on tropical cyclone intensification in the Arabian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 188, p.114553. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114553>.
- Pourkerman, M., Marriner, N., Hamzeh, M.A., Lahijani, H., Morhange, C., Amjadi, S., Vacchi, M., Maghsoudi, M., Shah-Hosseini, M., and Afarin, M., 2022. Socioeconomic impacts of environmental risks in the western Makran zone (Chabahar, Iran). *Natural Hazards*, 112(2), pp.1823-1849. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05230-0>.
- Quintela, M., Costa, P. J., Fatela, F., Drago, T., Hoska, N., Andrade, C., and Freitas, M. C., 2016. The AD 1755 tsunami deposits onshore and offshore of Algarve (south Portugal): Sediment transport interpretations based on the study of Foraminifera assemblages. *Quaternary international*, 408, 123-138. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.029>.
- Shah-Hosseini, M., Morhange, C., Beni, A. N., Marriner, N., Lahijani, H., Hamzeh, M., and Sabatier, F., 2011. Coastal boulders as evidence for high-energy waves on the Iranian coast of Makran. *Marine Geology*, 290(1-4), 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.10.003>.
- Skene, K.I., and Piper, D.J.W., 2003. Late Quaternary stratigraphy of Laurentian Fan: a record of events off the eastern Canadian continental margin during the last deglacial period. *Quaternary International* 99-10, 135-152. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00116-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00116-7).
- Sømme, T.O., Helland-Hansen, W., Martinsen, O.J., and Thurmond, J.B., 2009. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source-to-sink systems: a basis for predicting semi-quantitative characteristics in subsurface systems. *Basin Research* 21 (4), 361-387. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2009.00397.x>.
- Toucanne, S., Zaragosi, S., Bourillet, J.F., Naughton, F., Cremer, M., Eynaud, F., and Dennielou, B., 2008. Activity of the turbidite levees of the Celtic-Armorican margin (Bay of Biscay) during the last 30,000 years: imprints of the last European deglaciation and Heinrich events. *Marine Geology*, 247(1-2), pp.84-103. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.08.006>.
- Tripsanas, E. K., Bryant, W.R., Slowey, N.C., Bouma, A.H., and Berti, D., 2007. Sedimentological history of Bryant Canyon area,

- northwest Gulf of Mexico, during the last 135 kyr (Marine Isotope Stages 1–6): a proxy record of Mississippi River discharge. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 246 (1), 137–161. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.10.032>.
- Vaziri, S.H., Reinhart, E.G., and Pilarczyk, J.E., 2019. Coastal foraminifera from the Iranian coast of Makran, Oman Sea (Chabahar Bay to Gawater Bay) as an indicator of tsunamis. *Geopersia*, 9 (1), pp. 43-63. Doi:10.22059/GEOPE.2018.255122.648378.
- Yhasnara, M., Costa, P. J., Dourado, F., Martins, M. V. A., Feist, L., Bellanova, P., and Reicherter, K., 2023. Microtextural signatures in quartz grains and foraminifera from tsunami deposits of the Portuguese shelf. *Geo-Marine Letters*, 43(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s00367-023-00747-0>.
- Zaragosi, S., Bourillet, J.F., Eynaud, F., Toucanne, S., Denhard, B., Van Toer, A., and Lanfumey, V., 2006. The impact of the last European deglaciation on the deep-sea turbidite systems of the Celtic–Armorican margin (Bay of Biscay). *Geo-Marine Letters* 26, 317–329.. <https://doi.org/10.1007/s00367-006-0048-9>.