

(OPEN ACCESS)

Role of benthic macrofauna in bioirrigation activities in Musa Bay, Persian Gulf

Neda Noorzaei¹, Mehdi Ghodrati Shojaei^{*2}, Rahil Nozarpour³

1. Ph.D. Student in Marine Biology, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Iran. E-mail: n_noorzaei@modares.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Marine Biology, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Iran. E-mail: mshojaei@modares.ac.ir
3. Ph.D. Graduate in Marine Biology, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Iran. E-mail: rahil.nozarpour@modares.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	The process of bioirrigation is one of the most important interactions between benthic invertebrates and marine sediments, which plays a fundamental role in biogeochemical cycles, nutrient exchange, and the stability of coastal ecosystems. We investigated the role of benthic invertebrates in bioirrigation process as well as its relationship with biodiversity and functional traits of the benthic species. Sampling was conducted in winter 2023 in the Musa Bay in the northwest of the Persian Gulf. Samples were collected from three transects which included two habitats namely mangrove habitats and surrounding mudflats. A total of 404 samples belonging to 13 species were identified. The bioirrigation was calculated using the biomass, abundance, burrow type, feeding type and injection depth of the species. The results showed that Shannon-Wiener, Simpson and species evenness indices in the mangrove habitat were significantly higher than that of the surrounding mudflat habitat. The complex structure of mangrove roots and the influx of organic matter from the tide provide favorable conditions which increases bio-irrigation rates in mangrove habitats. Results showed that detritivore were the most dominant group at both habitats. In addition, U and Y shape burrows and blind ended burrows were the dominant burrow type in mangrove and mudflats, respectively. Burrow depth and feeding type are key factors in exchange of water and dissolved substances between sediments and water column. A detailed understanding of the role of benthic invertebrates in bioirrigation can help assess the resilience of ecosystems and design of conservation and management strategies to maintain biodiversity and ecological services in mangrove ecosystems.
Article history: Received: 12.22.2025 Revised: 01.14.2026 Accepted: 02.01.2026	
Keywords: Benthic invertebrates, Bioirrigation, Mangrove, Mudflat, Persian Gulf	

Cite this article: Noorzaei, Neda, Ghodrati Shojaei, Mehdi, Nozarpour, Rahil. 2026. Role of benthic macrofauna in bioirrigation activities in Musa Bay, Persian Gulf. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 15 (2), 269-281.



© The Author(s).

Doi: 10.22069/japu.2026.24415.1998

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نقش بی‌مهرگان کفزی در ایجاد آبرسانی زیستی در خور موسی، خلیج فارس

ندا نورزائی^۱، مهدی قدرتی شجاعی^{۲*}، راحیل نودرپور^۳

۱. دانشجوی دکتری زیست‌شناسی دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران. رایانامه: n_noorzaei@modares.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه زیست‌شناسی دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران. رایانامه: mshojaei@modares.ac.ir
۳. دانش‌آموخته دکتری زیست‌شناسی دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران. رایانامه: rahil.nozarpour@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲ واژه‌های کلیدی: آبرسانی زیستی، بی‌مهرگان کفزی، پهنه گلی، خلیج فارس، مانگرو	فرآیند آبرسانی زیستی یکی از مهم‌ترین تعاملات بین بی‌مهرگان کفزی و رسوبات دریایی است که نقشی اساسی در چرخه‌های بیوژئوشیمیایی، تبادل مواد مغذی و پایداری اکوسیستم‌های ساحلی ایفا می‌کند. پژوهش حاضر به بررسی نقش بی‌مهرگان کفزی در ایجاد آبرسانی زیستی و ارتباط آن با تنوع زیستی و صفات کارکردی گونه‌ها پرداخته است. نمونه‌برداری در یک دوره از سه ایستگاه شامل زیستگاه‌های مانگرو و پهنه‌های گلی با سه تکرار در فصل زمستان سال ۱۴۰۲ در اطراف خور موسی در شمال غرب خلیج فارس، انجام شد. در مجموع ۴۰۴ نمونه متعلق به ۱۳ گونه شناسایی گردید. مدل نرخ آبرسانی زیستی با استفاده از شاخص‌های زیست‌توده، فراوانی، نوع حفره، نوع تغذیه و عمق نقب محاسبه شد. شاخص تنوع شانون-وینر و شاخص سیمپسون در زیستگاه مانگرو به طور معنی‌داری بیش‌تر از پهنه‌های گلی اطراف بود. نتایج نشان داد که نرخ فعالیت آبرسانی زیستی در زیستگاه مانگرو به علت پیچیدگی ساختاری ریشه‌ها بالاتر از زیستگاه پهنه گلی اطراف است. در بررسی صفات نوع تغذیه، صفت ذره‌خوار بیش‌ترین فراوانی را در هر دو زیستگاه به خود اختصاص داد. هم‌چنین نتایج حاصل از بررسی انواع ساختار نقب نشان داد که در زیستگاه مانگرو صفات نقب با انتهای باز و در زیستگاه پهنه گلی صفات نقب با انتهای بسته دارای بیش‌ترین فراوانی بودند. عمق حفره و نوع تغذیه از عوامل کلیدی در میزان تبادل آب و مواد محلول میان رسوبات و ستون آب هستند. در نهایت درک دقیق نقش بی‌مهرگان کفزی در آبرسانی زیستی می‌تواند به ارزیابی تاب‌آوری اکوسیستم‌ها و طراحی راهبردهای حفاظتی و مدیریتی برای حفظ تنوع زیستی و خدمات اکولوژیکی در اکوسیستم‌های حرا کمک کند.

استناد: نورزائی، ندا، قدرتی شجاعی، مهدی، نودرپور، راحیل (۱۴۰۵). نقش بی‌مهرگان کفزی در ایجاد آبرسانی زیستی در خور موسی، خلیج فارس. نشریه بهره‌برداری و پرورش آبزیان، ۱۵ (۲)، ۲۶۹-۲۸۱.

Doi: 10.22069/japu.2026.24415.1998



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

بی‌مهرگان کفزی نقش مهمی در سلامت و عملکرد اکوسیستم‌های دریایی دارند (۱). این موجودات در رسوبات موجود در بستر دریا زندگی می‌کنند و مسئول فرآیندهای مختلفی مانند آبرسانی زیستی^۱ هستند. فرآیند آبرسانی زیستی فرآیندی است که طی آن نقب‌های ایجاد شده توسط بی‌مهرگان کفزی با آبی که در سطح رسوبات قرار دارد پر می‌شوند (۲). طی آبرسانی زیستی مواد محلول در آب بین لایه‌های مختلف رسوبات نفوذ می‌کند که در تغییر ساختار بیوژئوشیمی دریاها بسیار مهم می‌باشد و باعث اکسیژن رسانی بیشتر و انتقال مواد غذایی بیشتر در رسوبات می‌شود (۳). میزان آبرسانی زیستی توسط بی‌مهرگان، به میزان توده بدن و نوع تغذیه آن‌ها بستگی دارد. آبرسانی زیستی عمدتاً توسط تهویه^۲ و معلق‌خواری^۳ گونه‌های دریایی انجام می‌شود. البته میزان عمق حفره ایجاد شده توسط بی‌مهرگان بر میزان حجم آب انتقالی تأثیر دارد. هر چه عمق حفره یا نقب بیش‌تر باشد، مقدار آب تبادل شده نیز بیش‌تر می‌شود (۳). در رسوبات عاری از بی‌مهرگان کفزی، حضور اکسیژن معمولاً به چند میلی‌متر بالایی از سطح رسوبات محدود می‌شود (۴). شدت تهویه حفره‌ای توسط بی‌مهرگان کفزی به هدف (مانند نیاز تنفسی، فیلتراسیون غذا، انتقال گامت، انتقال محرک‌های محیطی و حذف ضایعات متابولیک) بستگی دارد و مکانیسم‌ها در داخل و بین گروه‌های طبقه‌بندی متفاوت است. مطالعه آبرسانی زیستی در اکوسیستم‌های دریایی دارای اهمیت فراوانی است. بی‌مهرگان کفزی رسوبات را مخلوط کرده، مواد مغذی مدفون را به سطح می‌آورند و آن‌ها را در دسترس

موجودات دیگر قرار می‌دهند. این فرآیند باعث افزایش دسترسی به مواد مغذی می‌شود و بهره‌وری را ارتقا می‌دهد که برای عملکرد کلی اکوسیستم‌های دریایی ضروری است (۵). آبرسانی زیستی با تغییر ساختار زیستگاه و در دسترس قرار دادن منابع غذایی در لایه‌های مختلف رسوبات، بر تعامل گونه‌ها در اکوسیستم‌های دریایی تأثیر می‌گذارد. حفره‌های ایجاد شده توسط بی‌مهرگان کفزی، پناهگاهی برای گونه‌های دیگر، از جمله بی‌مهرگان کوچک و ماهی‌های نابالغ است که از آن‌ها به عنوان پناهگاه در برابر شکارچیان یا به عنوان محل تغذیه استفاده می‌کنند (۶). آبرسانی زیستی با افزایش دفن مواد آلی به ترسیب کربن کمک می‌کند. بی‌مهرگان کفزی مواد آلی را از ستون آب به رسوبات منتقل می‌کنند (۷). درک آبرسانی زیستی برای ارزیابی تاب‌آوری اکوسیستم در برابر اختلالات محیطی مانند آلودگی یا تغییرات اقلیم بسیار مهم است. بی‌مهرگان کفزی می‌توانند رفتار خود را در پاسخ به شرایط محیطی تغییر دهند و بر ویژگی‌های رسوب و شبکه غذایی تأثیر بگذارند. به‌طور کلی مطالعه آبرسانی زیستی در اکوسیستم‌های دریایی برای درک عملکرد و پویایی این اکوسیستم‌ها و همچنین برای اطلاع‌رسانی تلاش‌های حفاظتی و مدیریتی با هدف حفظ تنوع زیستی و خدمات اکولوژیکی آن‌ها مهم است (۸).

در مجموع، فرآیند آبرسانی زیستی تأثیرات قابل‌توجهی بر چرخه ماده مغذی، اکسیژن رسانی و پایداری کل رسوب دارد. با نگرانی فزاینده‌ای که در مورد اثرات فعالیت‌های انسانی بر بی‌مهرگان کفزی و زیستگاه‌های آن‌ها وجود دارد و همچنین با افزایش توسعه سواحل، آلودگی و تغییرات اقلیم، نیاز به درک این موضوع وجود دارد که چگونه این عوامل ممکن است بر بی‌مهرگان کفزی و نقش حیاتی آن‌ها مانند

1- Bioirrigation

2- Ventilation

3- Suspension feeding

آبرسانی زیستی در اکوسیستم‌های دریایی تأثیر بگذارد (۹). هدف از مطالعه فرآیند آبرسانی زیستی بررسی نقش بی‌مهرگان کفزی (مانند کرم‌ها، سخت‌پوستان و نرم‌تنان)، در جابجایی آب، اکسیژن و مواد محلول میان رسوبات و ستون آب است. این فرآیند تأثیر مستقیمی بر چرخه‌های بیوژئوشیمیایی، تبادل مواد مغذی، اکسیژن‌رسانی به رسوبات و تجزیه مواد آلی دارد و به درک بهتر تعاملات بین زیست‌موجودات و محیط فیزیکی‌شان کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه نمونه‌برداری: خور موسی در سواحل شمال غربی خلیج فارس در طول جغرافیایی ۴۰ تا ۴۸ درجه و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه واقع شده است. وسعت تقریبی این خور ۳۷ تا ۴۰ کیلومتر بوده و دهانه آن به پهنای ۴۰ کیلومتر و طول ۱۲۰ کیلومتر تا بندر ماهشهر می‌باشد. خور موسی شاخص‌ترین نمونه اکوسیستم ساحلی از نوع پهنه‌های گلی جزرومدی است که دارای میزان بالای جزرومد با دامنه ۴ متر می‌باشد و جزرومد آن از نوع نیم روزانه^۱ است. زمین‌های اطراف این خور گل‌زار هستند و ارتفاع آن از سطح دریا ۲ تا ۴ متر است. علی‌رغم این موضوع در دهه‌های گذشته در بخش‌های مختلف این خور کاشت درختان حرا گونه *Avicennia marina* به‌طور گسترده صورت گرفته است. ایجاد پوشش سبز به عنوان فضای سبز مورد تعهد شرکت‌های پتروشیمی، جلوگیری از تخریب و دست‌اندازی به خوریات و نیز جذب آلودگی‌های موجود در خور موسی از اهداف اولیه کاشت این گیاهان بوده است. با توجه به این شرایط دمایی متغیر، رشد درختان در این منطقه کم‌تر از جنگل‌های طبیعی به‌خصوص در منطقه قشم، خمیر و

نابیند است. با این وجود در برخی از مناطق خور موسی ارتفاع درختان به بیش از ۴ متر نیز رسیده است (۱۰).

نمونه‌برداری از جوامع بی‌مهرگان کفزی: در این پژوهش، در سال ۱۴۰۲، فصل زمستان، بهمن ماه برای نمونه‌برداری از بی‌مهرگان کفزی سه ایستگاه نمونه‌برداری به‌طور تصادفی انتخاب شده‌اند (شکل ۱). در هر ایستگاه دو پلات (یک پلات در منطقه دارای پوشش گیاهی مانگرو دست‌کاشت و پلات دیگر در پهنه‌های گلی اطراف آن بدون پوشش گیاهی) تعیین شد. پلات‌ها با فاصله حداقل حدود ۱۰ متر از لبه جنگل مورد نمونه‌برداری قرار گرفت. تعداد تکرارها در هر پلات نمونه‌برداری حداقل سه عدد بود. نمونه‌ها در هر ایستگاه توسط چهارگوش فلزی (سطح ۲۵×۲۵ سانتی‌متر و عمق ۲۰ سانتی‌متر) جمع‌آوری شدند. رسوبات حاوی بی‌مهرگان کفزی جهت شستشو روی الک ۰/۵ میلی‌متری به ساحل انتقال یافته و به کمک آب دریا شستشو شدند (۱۱). نمونه‌ها پس از جداسازی از رسوبات و ریشه‌های گیاهان در الک ۷۵٪ تثبیت شده و برای شناسایی به آزمایشگاه انتقال یافتند. در آزمایشگاه نمونه‌ها در سطح گونه شناسایی، شمارش و وزن شدند.



شکل ۱- نقشه ایستگاه‌های نمونه‌برداری در خور موسی (اقتباس از Google Map).

Figure 1. Map of sampling stations in Khor Musa (adapted from Google Map).

$$D_s = - \sum_{i=1}^s (p_i \ln p_i)$$

که، s تعداد کل گونه‌های جامعه است. p_i نسبت فراوانی افراد گونه i به فراوانی کل است. شاخص مارگالف بر خلاف شاخص شانون-وینر یکنواختی را شامل نمی‌شود، بلکه نسبت تعداد گونه را به تعداد کل افراد اکوسیستم بررسی می‌کند (۱۲).

$$D = (s - 1) / \ln N$$

که، s تعداد کل گونه‌های جامعه است. N تعداد کل افراد جامعه است.

مدل نرخ آبرسانی زیستی: رد و همکاران (۲۰۱۸) رابطه پتانسیل آشفستگی زیستی (BPC) سولان و همکاران (۲۰۰۴) را تغییر دادند و صفات مورد استفاده بی‌مهرگان در این رابطه را با صفاتی که رفتار آبرسانی زیستی درشت بی‌مهرگان کفزی و اثرات آن بر عملکرد اکوسیستم را مشخص می‌کنند، جایگزین کردند:

$$IP_c = \sum_{i=1}^n \left(\frac{B_i}{A_i} \right)^{0.75} * A_i * BT_i * FT_i * ID_i$$

شاخص‌های تنوع‌زیستی: برای بررسی تنوع‌زیستی دو فاکتور اصلی غنای گونه‌ای^۱ و یکنواختی گونه‌ای^۲ در نظر گرفته می‌شود. غنای گونه‌ای، به تعداد گونه‌های مختلف در یک آشیان اکولوژیکی گفته می‌شود. هر چه تعداد گونه‌ها درون یک آشیان اکولوژیکی بیشتر باشد، غنای گونه‌ای آن بیشتر است و برعکس. تنوع‌زیستی نه تنها به غنای گونه‌ای بلکه به فراوانی گونه‌ها در یک اکوسیستم نیز بستگی دارد. یکنواختی گونه‌ای، نحوه توزیع افراد جمعیت هر یک از گونه‌های موجود درون آشیان اکولوژیکی را نشان می‌دهد. در نتیجه وقتی هر دو مورد غنای گونه‌ای و یکنواختی گونه‌ای زیاد باشند، جامعه دارای تنوع‌زیستی زیاد است. در این پژوهش، تنوع جوامع درشت بی‌مهرگان با استفاده از تنوع شانون-وینر^۳ و غنای گونه‌ای مارگالف^۴ بررسی خواهد شد. شاخص شانون، غنای گونه‌ای و یکنواختی گونه‌ای را محاسبه می‌کند (۱۲). میزان عددی شاخص شانون-وینر بین صفر تا پنج است. هرچه این میزان به پنج نزدیک‌تر باشد، تنوع‌زیستی بیش‌تر است.

- 1- Species richness
- 2- Species evenness
- 3- Shannon diversity index
- 4- Margalef diversity index

مثال صفت رفتار تغذیه‌ای به چهار زیربخش با نام فیلتر کننده سطحی، فیلتر کننده زیرسطحی، شکارگر و ریزه‌خوار طبقه‌بندی می‌شود (۱۳). در این روش صفت‌هایی که موجود در بیش‌تر دوران زندگی از خود نشان می‌دهد دارای بیش‌ترین امتیاز و صفت‌هایی که موجود گاهی اوقات از خود نشان می‌دهد دارای کم‌ترین امتیاز هستند. در پژوهش حاضر اطلاعات صفت‌ها با استفاده از منابع مختلف مانند مقالات، کلیدهای شناسایی و پایگاه‌های اطلاعاتی آنلاین (مانند <http://www.marlin.ac.uk/biotic/>) و مشاوره‌های تخصصی شخصی جمع‌آوری شد (جدول ۱).

در این رابطه برای هر گونه B_i زیست‌توده (وزن خشک بدون خاکستر A_i فراوانی (بر حسب مترمربع) گونه در هر نمونه است. در این رابطه هم‌چنین صفات نوع لانه (BT_i)، نوع تغذیه (FT_i) و عمق حفره تزریق (ID_i) نیز در محاسبه آبرسانی زیستی نقش دارند. با پیروی از رویکرد سولان و همکاران (۲۰۰۴) صفات به دسته‌هایی تقسیم می‌شوند. به هر دسته یک امتیاز عددی توصیفی اختصاص داده شده است. امتیاز کم نشان‌دهنده آبرسانی زیستی کم و اثرات مرتبط با آن است در حالی که مقدار زیاد نشان‌دهنده آبرسانی زیستی بیش‌تر و اثرات مرتبط با آن است. به عنوان

جدول ۱- صفات نوع حفره، نوع تغذیه و عمق حفره که در محاسبه آبرسانی زیستی نقش دارند.

Table 1. The attributes of burrow type, feeding type, and Injection Depth that play a role in calculating bioirrigation.

ویژگی عملکردی Functional mode	طبقه‌بندی (فارسی)	Category (English)	امتیاز (Score)
نوع حفره Burrow type	درون‌زی، دارای آبرسانی زیستی داخلی	Infauanal with internal bioturbation/irrigation	1
	آبرسانی زیستی در حفره با انتهای باز (مانند حفره‌های U یا Y شکل)	Open-ended burrow irrigation (e.g., U- or Y-shaped burrows)	2
	آبرسانی زیستی در حفره با انتهای کور (مانند حفره‌های بسته، بدون سیستم آبرسانی)	Blind-ended burrows (e.g., closed burrows without irrigation systems)	3
نوع تغذیه Feeding mode	فیلتر کننده سطحی	Surface filter feeder	1
	تغذیه از ذرات غذایی معلق در ستون آب	Suspension feeder (feeding on suspended particles in the water column)	1
	شکارگر؛ تغذیه فعال از سایر جانداران (عموماً زئوپلانکتون‌های کوچک) یا لاشه‌خواری	Predator; active feeding on other organisms (mainly small zooplankton) or scavenging on animal remains	2
	ریزه‌خوار؛ تغذیه از مواد آلی رسوبی، فیتوپلانکتون‌ها و لاشبرگ‌های ته‌نشین شده	Deposit feeder; feeding on deposited organic matter, phytoplankton and detritus	3
	فیلترکننده زیرسطحی؛ تغذیه از ذرات معلق در زیر سطح رسوب	Subsurface filter feeder; feeding on suspended particles below the sediment surface	4
عمق حفره Burrow depth	۰-۲ سانتی‌متر	0-2 cm	1
	۲-۵ سانتی‌متر	2-5 cm	2
	۵-۱۰ سانتی‌متر	5-10 cm	3
	بیش‌تر از ۱۰ سانتی‌متر	>10 cm	4

در این پژوهش، برای تفکیک ساختار جوامع بی‌مهرگان کفزی از آزمون nMDS^۱ استفاده شد. این آزمون شباهت و یا تفاوت بین مناطق مختلف را در یک فضای دوبعدی نشان می‌دهد. احتمال و میزان معنی‌داری تفکیک جوامع بین مناطق مختلف به کمک آزمون ANOSIM^۲ بررسی شد. برای شناسایی گونه‌هایی که باعث شباهت و یا تفاوت بین ایستگاه‌ها، مناطق، زیستگاه‌ها و فصول می‌گردند نیز از آزمون SIMPER^۳ استفاده شد. اثرات عوامل محیطی مختلف بر ساختار جوامع به کمک آزمون BEST بررسی شد. روابط بین تنوع زیستی و نرخ آشفستگی زیستی و آبرسانی زیستی توسط آزمون RELATE سنجیده شد. در این پژوهش، برای انجام آزمون‌ها از نرم‌افزار PRIMER v7 استفاده شد.

نتایج و بحث

تنوع زیستی جوامع بی‌مهرگان کفزی: در پژوهش حاضر ۴۰۵ نمونه بی‌مهرگان کفزی متعلق به ۱۳ گونه در هردو زیستگاه مانگرو و پهنه‌های گلی اطراف مورد شناسایی قرار گرفت. در زیستگاه مانگرو، ۲۲۹ نمونه متعلق به ۱۱ گونه (نرم‌تنان ۷ گونه، سخت‌پوستان ۲ گونه و پرتاران ۲ گونه) مشاهده گردید. در زیستگاه پهنه‌های گلی اطراف ۲۰۵ نمونه متعلق به ۱۲ گونه (نرم‌تنان ۵ گونه، سخت‌پوستان ۵ گونه و پرتاران ۲ گونه) مشاهده گردید. علاوه بر این، از میان ۱۳ گونه، ۷ گونه بین هر دو زیستگاه مانگرو و پهنه‌های گلی اطراف مشترک بود. درحالی‌که ۲ گونه فقط در زیستگاه مانگرو و ۳ گونه فقط در زیستگاه پهنه‌های گلی اطراف مشاهده شد. بیش‌ترین فراوانی و غنای گونه‌ای بودند (شکل ۲). گونه *Perinella cingulata* از نرم‌تنان و گونه *Opusia indica* از سخت‌پوستان به ترتیب

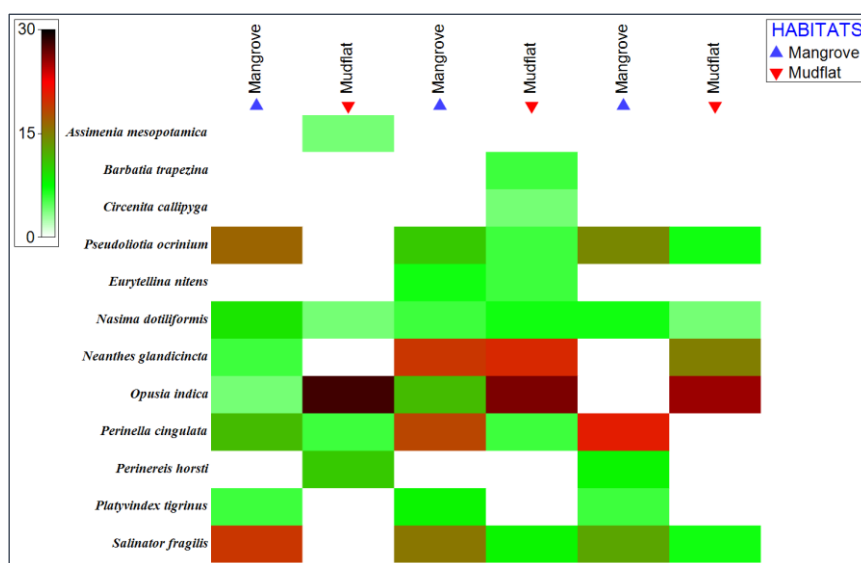
فراوان‌ترین گونه‌ها در زیستگاه مانگرو و زیستگاه پهنه‌های گلی بودند. در مطالعه دلفان و همکاران گونه‌های شناسایی شده بی‌مهرگان کفزی در بندر خمیر در زیستگاه مانگرو و پهنه‌های گلی اطراف، ۲۷ گونه بود (۱۴). هم‌چنین در پژوهشی دیگر تعداد ۸۵ گونه در جنگل‌های مانگرو در منطقه‌های مختلف سواحل شمالی خلیج فارس و خلیج عمان شناسایی شد (۱۵). دلایل مختلفی برای کم بودن غنای گونه‌ای در منطقه خور موسی است. یکی از دلایل اصلی این تفاوت آن است که مدت زمان نمونه‌برداری در مطالعه حاضر کم بوده و فقط در یک فصل نمونه‌برداری انجام شد. ممکن است اگر نمونه‌برداری در فصول دیگر هم انجام می‌شد تعداد گونه‌های شناسایی شده بیش‌تر می‌بود. از طرفی بوم‌سازگان حرای این منطقه طبیعی نیست و همه درختان این منطقه دست‌کاشت هستند. احتمالاً در این حالت اجتماعات بی‌مهرگان به خوبی تشکیل نمی‌شوند و در نتیجه تنوع کم‌تر است. هم‌چنین این اکوسیستم در گذشته به شدت تحت‌تأثیر خروجی پساب‌های صنعتی از پالایشگاه‌های مختلف بوده است، که می‌تواند بر غنای گونه‌ای تأثیر بگذارد. دلیل بعدی کم بودن تعداد و تنوع گونه‌ها در زیستگاه مانگرو در ماهشهر آن است که میزان تغییرات دمایی این بوم‌سازگان بسیار بالاست، به طوری که در تابستان دما به ۵۰ درجه و در زمستان به حدود صفر درجه می‌رسد. این تغییرات شدید دمایی باعث می‌شود که درخت حرا به شدت تحت تنش‌های محیطی باشد و میزان تولیدات اولیه آن کاهش پیدا کند. کمبود تولیدات اولیه درخت حرا بر میزان مواد آلی رسوب تأثیر می‌گذارد و در نتیجه ممکن است تنوع موجوداتی که در آن بوم‌سازگان زندگی می‌کنند کم‌تر شود. هم‌چنین زیاد بودن استرس دمایی و شوری نیز باعث کاهش تنوع زیستی نسبت به زیستگاه‌های مشابه شده است. ذکر این نکته دارای اهمیت است

1- Non-metric multidimensional scaling
2- Analysis of similarities
3- Similarity percentage

سیمپسون (1_lambda) و یکنواختی گونه‌ای پیلو (J') به‌طور معنی‌داری بین زیستگاه‌های مانگرو و پهنه‌های گلی اطراف تفاوت داشت (شکل ۳). شاخص تنوع شانون-وینر در زیستگاه مانگرو به‌طور معنی‌داری بیشتر از پهنه‌های گلی اطراف بود ($P < 0.05$).

که به‌طور عمومی در خلیج فارس تنها یک گونه گیاهی حرا *A. marina* وجود دارد و در نتیجه پیچیدگی ساختاری کم‌تری نسبت به مناطق با چندین گونه مانگرو وجود دارد. این امر می‌تواند یکی از دلایل کم بودن تنوع زیستی بی‌مهرگان نسبت به بوم‌سازگان حرای مناطق پربارش باشد (۱۶).

در مقایسه شاخص‌های تنوع زیستی نتایج نشان داد که شاخص تنوع شانون-وینر (H')، شاخص



شکل ۲- فراوانی گونه‌های بی‌مهرگان کفزی در ایستگاه‌های مختلف در زیستگاه‌های مانگرو و پهنه‌های گلی.

Figure 2. Abundance of benthic invertebrate species at different stations in mangrove habitats and mudflats.

زیستگاه بودند. گونه *Perinella cingulata* از نرم‌تنان و گونه *Opusia indica* از سخت‌پوستان دارای بیش‌ترین غنای گونه‌ای در هر یک از این گروه‌ها بودند. فراوانی نرم‌تنان در جنگل‌های مانگرو به دلیل فراوانی مواد غذایی است که در اثر جریانات جزر و مدی وارد زیستگاه‌های بوم‌سازگان مانگرو می‌شوند. در جنگل‌های مانگرو واقع در قشم و بندرخمیر خلیج فارس، نرم‌تنان گروه غالب و سپس سخت‌پوستان و پرتاران به ترتیب فراوان‌ترین بودند (۱۷). از طرف دیگر، پژوهشی در بوم‌سازگان حرای قشم و بندرخمیر نشان داد که سخت‌پوستان گروه غالب و سپس نرم‌تنان و پرتاران به ترتیب فراوان‌ترین

هم‌چنین شاخص سیمپسون در زیستگاه مانگرو به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از پهنه‌های گلی اطراف بود ($P < 0.05$) (جدول ۲).

علی‌رغم بالا بودن نسبی تنوع زیستی در زیستگاه مانگرو نسبت به پهنه‌های گلی اطراف نتایج نشان داد که در زیستگاه مانگرو و پهنه‌های گلی اطراف شاخص غنای گونه‌ای تفاوت معنی‌داری باهم نداشتند ($P > 0.05$) (جدول ۲). شاخص یکنواختی در زیستگاه مانگرو به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از پهنه‌های گلی بود ($P < 0.05$) (جدول ۲).

از نظر غنای گونه‌ای نرم‌تنان، سخت‌پوستان و کرم‌های پرتار به ترتیب گروه‌های غالب در هر دو

گروه بودند (۱۴). در پژوهش مشابه دیگری نیز میانگین فراوانی شکم‌پایان در زیستگاه مانگرو نسبت به زیستگاه پهنه‌های گلی ۱/۵ برابر بیشتر بود (۱۸). یکی از علت‌های این اختلاف، وجود ساختار پیچیده ریشه‌های درخت حرا است (۱۹). این ساختارها به‌عنوان مکانی برای سکونت و مخفی شدن گونه‌ها به شمار می‌آیند. به‌طور کلی زیستگاه‌هایی که دارای پیچیدگی ساختاری هستند، مانند زیستگاه‌های

علف‌های دریایی^۱، جنگل‌های مانگرو و مرداب‌ها^۲ در مقایسه با زیستگاه‌های پهنه‌های گلی اطراف از تراکم بالاتری از کفزیان برخوردارند. از طرفی تنها یک گونه از درختان مانگرو در این منطقه وجود دارد که در مقایسه با زیستگاه‌هایی که تعداد گونه‌های مانگروی آن‌ها زیاد باشد، پیچیدگی ساختاری کمی را ایجاد می‌کنند (۲۰).

جدول ۲- شاخص‌های تنوع زیستی گونه‌ها در جوامع بی‌مهرگان کفزی در زیستگاه‌های مانگرو و پهنه گلی.

Table 2. Species diversity in benthic invertebrate communities in mangrove and mudflat habitats.

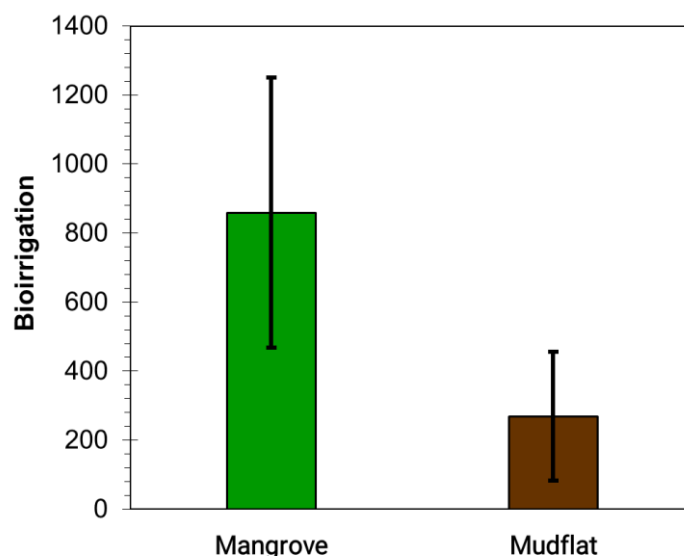
شاخص سیمپسون (Simpson, 1-λ)	شاخص شانون-وینر (Shannon-Wiener, H')	یکنواختی پیلو (Pielou evenness, J')	غنا مارگالف (Margalef richness, d)	فراوانی (Abundance)	تعداد گونه (Species richness)	زیستگاه (Habitat)
0.72	1.51	0.77	0.87	928	7	مانگرو (Mangrove)
0.80	1.80	0.86	0.97	1328	8	
0.70	1.44	0.80	0.72	944	6	
0.51	0.97	0.60	0.58	976	5	پهنه گلی (Mudflat)
0.31	0.66	0.41	0.58	960	5	
0.64	1.37	0.62	1.11	1344	9	

نمودار آبرسانی زیستی نشان می‌دهد که زیستگاه مانگرو عملکرد زیستی بالاتری نسبت به پهنه‌های گلی دارد. دامنه انحراف معیار گسترده‌تر در مانگروها بیانگر تنوع عملکردی بیشتر بی‌مهرگان کفزی در این زیستگاه است. این تفاوت عمدتاً ناشی از ساختار پیچیده ریشه‌های مانگرو، تراکم بالاتر زیست‌توده و حضور گونه‌های با رفتارهای تغذیه‌ای متنوع مانند شکارگرها و ریزه‌خوارهاست که موجب افزایش

تبادل آب، اکسیژن و مواد مغذی در رسوبات می‌شود. در مقابل، پهنه‌های گلی با ساختار ساده‌تر و تنوع عملکردی محدودتر، نرخ آبرسانی زیستی پایین‌تری دارند. این یافته‌ها اهمیت زیستگاه‌های مانگرو را در حفظ پویایی اکوسیستم‌های ساحلی و مقابله با اختلالات محیطی برجسته می‌سازد (شکل ۳).

1- Seagrass

2- Marsh



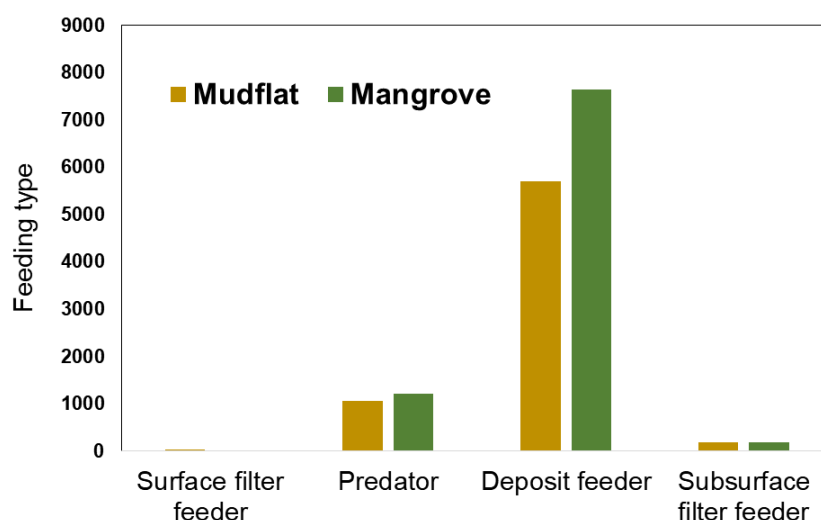
شکل ۳- فعالیت آبرسانی زیستی گونه‌ها در جوامع بی‌مهرگان کفزی در زیستگاه‌های مانگرو و پهنه گلی.

Figure 3. Bioirrigation activity of species in benthic invertebrate communities in mangrove and mudflat habitats.

فراوانی قابل توجهی دارند. این الگو بیانگر آن است که در زیستگاه مانگرو، زنجیره غذایی به‌طور عمده تحت سلطه گونه‌های با نوع تغذیه ریزه‌خوارها قرار دارد که ناشی از شرایط خاص مانند تراکم منابع غذایی، و ساختارهای پیچیده‌ی ریشه درختان حرا است که پناهگاه مناسبی برای شکارگران فراهم می‌آورد. در مقابل، زیستگاه پهنه گلی تنوع عملکردی بیشتری را نشان می‌دهد. در این زیستگاه، علاوه بر غالب بودن ریزه‌خوارها، شکارگرها نیز با فراوانی بالا نقش مهمی در چرخه تجزیه مواد آلی ایفا می‌کنند. مقایسه بین این دو زیستگاه نشان می‌دهد که پهنه‌های گلی از نظر تنوع عملکردی و هم‌زیستی گروه‌های اکولوژیک، ساختار پیچیده‌تری دارند و احتمالاً از ظرفیت بالاتری برای حفظ پایداری اکوسیستم برخوردارند. در مقابل، مانگروها با تمرکز عملکردی بر ریزه‌خوارها ممکن است در برابر اختلالات محیطی آسیب‌پذیرتر باشند، به‌ویژه اگر منابع غذایی یا شرایط زیستگاهی دچار تغییر شوند (شکل ۴).

بررسی صفات کارکردی: در بررسی صفات نوع تغذیه نتایج نشان داد که در زیستگاه مانگرو و پهنه‌های گلی اطراف بی‌مهرگان با صفت ریزه‌خوارها دارای بیش‌ترین فراوانی بودند. تنوع غذایی بالا برای ریزه‌خوارها باعث افزایش شانس بقا و رشد جمعیت آنها می‌شود. علاوه بر این بسترهای مانگرو و پهنه‌های گلی با ساختار پیچیده و مواد آلی فراوان، محیطی غنی برای تغذیه فراهم می‌کنند. این شرایط، ذره خوارها را قادر می‌سازد تا با کارایی بیش‌تری تغذیه کنند. حضور ریزه‌خوارها موجب تنظیم جمعیت شکارگرها و فیلترکننده‌ها می‌شود. این کنترل زیستی، فضای اکولوژیک بیش‌تری برای ریزه‌خوارها ایجاد کرده و بقای آنها را تضمین می‌کند.

هم‌چنین تغییرات کیفیت آب، ورود مواد آلی و پساب‌ها می‌تواند موجب افزایش تراکم گونه‌های مقاوم به آلودگی شود. بسیاری از ریزه‌خوارها در مقایسه با گروه‌های دیگر توانایی بیش‌تری در تحمل شرایط دارند. اما در زیستگاه پهنه گلی شکارگرها هم

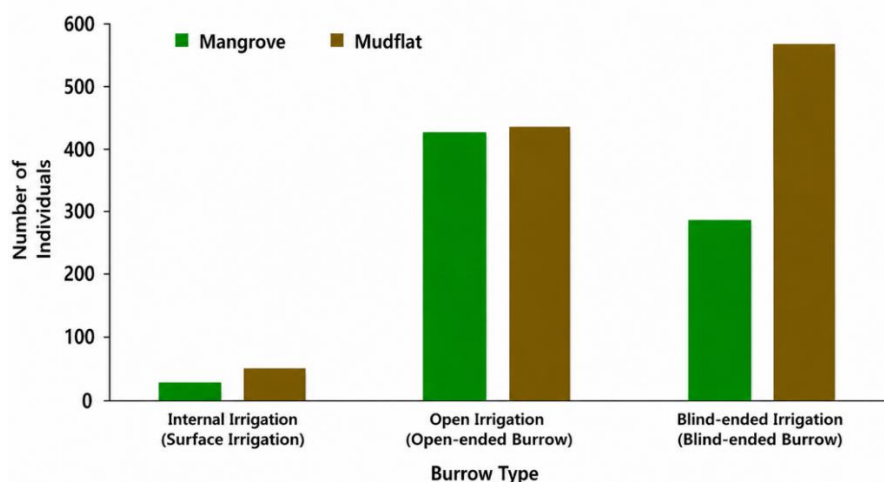


شکل ۴- بررسی صفات تغذیه در جوامع بی‌مهرگان کفزی در زیستگاه‌های مانگرو و پهنه گلی.

Figure 4. Study of feeding traits in benthic invertebrate communities in mangrove and mudflat habitats.

ویژگی‌های فیزیکی بستر گلی، ظرفیت نگهداری آب بیشتر، و نیاز به کنترل دقیق‌تر جریان آب در محیط‌های با نفوذپذیری کم‌تر باشد. هم‌چنین، آبرسانی سطحی در پهنه گلی نسبت به مانگروها اندکی بیشتر است، که ممکن است به دلیل شیب کم‌تر سطح و تجمع آب در لایه‌های بالایی رسوب باشد. نقب‌های باز بیشتر با گونه‌های شکارگر فعال مانند خرچنگ‌ها مرتبط‌اند، نقب‌های بسته معمولاً برای گونه‌های تجزیه‌کننده مانند کرم‌های پلی‌کیت کاربرد دارند و لانه‌های سطحی یا بدون نقب بیشتر در گونه‌های فیلترکننده مانند دوکفه‌ای‌ها دیده می‌شود. ارتباط مستقیم بین نوع لانه و نوع تغذیه وجود دارد، ساختار لانه به گونه امکان می‌دهد استراتژی تغذیه‌ای خود را بهینه کند (شکل ۵).

در بررسی فراوانی انواع روش‌های آبرسانی یا ساختار نقب در دو زیستگاه ساحلی پهنه گلی و مانگرو، نتایج حاصل نشان داد که در زیستگاه مانگرو صفات نقب با انتهای باز و در زیستگاه پهنه گلی صفات نقب با انتهای بسته دارای بیش‌ترین فراوانی بودند. در زیست‌بوم مانگرو، نقب با انتهای بسته نیز سهم قابل توجهی دارد، این الگو نشان می‌دهد که در مانگروها، ساختارهای زیرسطحی با قابلیت نفوذ و جریان کنترل‌شده، نقش اصلی را در تأمین رطوبت و انتقال مواد غذایی ایفا می‌کنند. احتمالاً پیچیدگی ساختار ریشه‌ای مانگروها و نیاز به پایداری در شرایط جزر و مد، استفاده از نقب‌های بسته را توجیه‌پذیر می‌سازد. در مقابل، در پهنه گلی، نقب با انتهای بسته با مقدار بالاتر نسبت به مانگروها، نقش غالب‌تری دارد. این افزایش می‌تواند ناشی از



شکل ۵- بررسی صفات انواع روش‌های آبرسانی یا ساختار نخب در جوامع بی‌مهرگان کفزی در زیستگاه‌های مانگرو و پهنه گلی.

Figure 5. Investigating the characteristics of various Bioirrigation methods or tunnel structures in benthic invertebrate communities in mangrove and mudflat habitats.

منابع

- Balderas, E. C. S., Grac, C., Berti-Equille, L., & Hernandez, M. A. A. (2016). Potential application of macroinvertebrates indices in bioassessment of Mexican streams. *Ecological Indicators*, 61, 558-567.
- Bremner, J., Rogers, S. I., & Frid, C. L. J. (2006). Methods for describing ecological functioning of marine benthic assemblages using biological traits analysis (BTA). *Ecological Indicators*, 6(3), 609-622.
- Delfan, N., Shojaei, M. G., & Naderloo, R. (2021). Patterns of structural and functional diversity of macrofaunal communities in a subtropical mangrove ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 107288.
- Ebadzadeh, H., Shojaei, M. G., & Seyfabadi, J. (2024). The effect of habitat structural complexity on gastropods in an arid mangrove wetland. *Wetlands Ecology and Management*, 32(1), 139-151.
- Farrell, E. M., Beermann, J., Neumann, A., & Wrede, A. (2023). The interplay of temperature and algal enrichment intensifies bioturbation of the intertidal amphipod *Corophium volutator*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 559, 151837.
- Frid, C. L. J. (2011). Temporal variability in the benthos: Does the sea floor function differently over time? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400(1-2), 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2011.02.024>.
- Shojaei, M. G., Naderloo, R., Delfan, N., Blooki Korandeh, M. (2021). Mangrove ecosystems of Iran; importance, current status and threats. *Iranian Journal of Biology*, 5 (9), 117-130.
- Hajializadeh, P., Safaie, M., Naderloo, R., Shojaei, M. G., Gammal, J., Villnäs, A., & Norkko, A. (2020). Species composition and functional traits of macrofauna in different mangrove habitats in the Persian Gulf. *Frontiers in Marine Science*, 7, 1-16.
- Hemmati, M. R., Shojaei, M. G., Taheri Mirghaed, A., Mashhadi Farahani, M., & Weigt, M. (2021). Food sources for camptandriid crabs in an arid mangrove ecosystem of the Persian Gulf: a stable isotope approach. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 1-13.
- Lacoste, É., Piot, A., Archambault, P., McKindsey, C. W., & Nozais, C. (2018). Bioturbation activity of three macrofaunal species and the presence of meiofauna affect the abundance and composition of

- benthic bacterial communities. *Marine Environmental Research*, 136, 62-70.
11. Mermillod-Blondin, F., & Rosenberg, R. (2006). Ecosystem engineering: The impact of bioturbation on biogeochemical processes in marine and freshwater benthic habitats. *Aquatic Sciences*, 68 (4), 434-442. <https://doi.org/10.1007/s00027-006-0858-x>.
 12. Neumann, A., van Beusekom, J. E., Eisele, A., Emeis, K. C., Friedrich, J., Kröncke, I., & Zettler, M. L. (2021). Macrofauna as a major driver of benthopelagic exchange in the southern North Sea. *Limnology and Oceanography*, 66(6), 2203-2217.
 13. Nozarpour, R., Shojaei, M. G., Naderloo, R., & Nasi, F. (2023). Crustaceans functional diversity in mangroves and adjacent mudflats of the Persian Gulf and Gulf of Oman. *Marine Environmental Research*, 105919. <https://doi.org/10.1016/J.MARENVR.ES.2023.105919>.
 14. Nordhaus, I., Hadipudjana, F. A., Janssen, R., & Pamungkas, J. (2009). Spatio-temporal variation of macrobenthic communities in the mangrove-fringed Segara Anakan lagoon, Indonesia, affected by anthropogenic activities. *Regional Environmental Change*, 9(4), 291-313.
 15. Shojaei, M. G., Gutow, L., Dannheim, J., Rachor, E., Schröder, A., & Brey, T. (2016). Common trends in German Bight benthic macrofaunal communities: Assessing temporal variability and the relative importance of environmental variables. *Journal of Sea Research*, 107, 25-33.
 16. Shojaei, M. G., Taheri, A., Mashhadi Farahani, M., Delfan, N., & Weigt, M. (2019). The role of mangrove primary production in the diet of *Thryssa setirostris* in Hara Biosphere Reserve using carbon and nitrogen isotopes. *Fisheries Science and Technology*, 8(3), 175-181.
 17. Vesal, S. E., Nasi, F., Auriemma, R., & Del Negro, P. (2023). Effects of Organic Enrichment on Bioturbation Attributes: How does the macrofauna community respond in two different sedimentary impacted areas? *Diversity*, 15(3), 449.
 18. Wang, S. V., Wrede, A., Tremblay, N., & Beermann, J. (2022). Low-frequency noise pollution impairs burrowing activities of marine benthic invertebrates. *Environmental Pollution*, 310, 119899.
 19. Wrede, A., Beermann, J., Dannheim, J., Gutow, L., & Brey, T. (2018). Organism functional traits and ecosystem supporting services—A novel approach to predict bioirrigation. *Ecological Indicators*, 91, 737-743.
 20. Zhang, Q., Li, J., Hu, G., & Zhang, Z. (2019). Bioturbation potential of a macrofaunal community in Bohai Bay, northern China. *Marine Pollution Bulletin*, 140, 281-286.

