



The Role of Macrobenthic Indicator Species as Bioindicators for Assessing Marine Ecosystem Health

Ali Abbasi^{a*}, Mehran Loghmani^a

^aDepartment of Marine Biology, Faculty of Marine Sciences, Chabahar University of Maritime & Marine Sciences, Chabahar, Sistan & Baluchestan, Iran.

*Corresponding author: aliabbasi1376.2014@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-4934-0158>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/01/27
Received in revised form:
2026/02/19
Accepted 2026/02/29
Available online: 2026/03/06

Keywords:
Marine ecosystem,
Marine pollution,
Environmental monitoring,
Biodiversity,
Macrobenthic indicator
species.

ABSTRACT

Marine ecosystems are under increasing pressure from human activities & climate change, making effective monitoring more important than ever. Among the available tools, macrobenthic indicator species stand out as practical & reliable options for assessing environmental conditions in coastal & offshore waters. This review looks at what these organisms are, why they matter ecologically, & how they can be used in real-world monitoring programs. We cover the main taxonomic groups involved, including mollusks, crustaceans, annelids, echinoderms, & demersal fish, & discuss their specific roles in environmental assessment. Macrobenthic organisms work well as bioindicators for several reasons. They don't move around much, they live long enough to show cumulative effects, they respond clearly to environmental changes, & they build up pollutants in their tissues over time. These traits make them useful for judging habitat quality, tracking ecosystem health, & spotting potential problems before they get worse. Methods like IndVal, AMBI, & M-AMBI have helped make benthic assessments more reliable by adding quantitative rigor to what used to be mostly descriptive work. The literature shows that different groups serve different purposes. Polychaetes like *Capitella capitata* & *Heteromastus filiformis* are well known as signs of organic enrichment & sediment contamination. Filter-feeding bivalves are good for long-term heavy metal monitoring because they concentrate contaminants in their tissues. Amphipods respond quickly to sediment toxicity, while echinoderm larvae are sensitive to various stressors. Demersal fish add another layer by accumulating pollutants at higher positions in the food web. What makes this review different is that it brings together ecological perspectives on macrobenthic indicators while also pointing out how newer biotechnological tools could improve species identification & monitoring accuracy. Putting together regional databases of these species would make future work easier & help build more effective conservation strategies. The review also highlights that while these methods are widely used, there's still room for improvement in how species are selected & how results are interpreted across different regions.

Cite this article: Abbasi, A., & Loghmani, M. (2026). The Role of Macrobenthic Indicator Species as Bioindicators for Assessing Marine Ecosystem Health.. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 1(1), 41-59. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252593>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252593>

Introduction

Marine ecosystems are increasingly exposed to a wide range of anthropogenic pressures, including coastal development, industrial pollution, eutrophication, overfishing, habitat degradation, & climate change. These stressors have altered the structure & functioning of benthic habitats & have intensified the need for reliable environmental monitoring tools. Coastal & offshore marine environments provide essential ecosystem services, including nutrient cycling, carbon sequestration, food provision, & shoreline protection, all of which are critical for human well-being & economic development. However, the growing intensity & frequency of human activities in marine environments have led to unprecedented rates of biodiversity loss, habitat fragmentation, & ecosystem dysfunction, prompting urgent calls for effective monitoring & management strategies.

Among the available biological indicators, macrobenthic organisms have received considerable attention due to their ecological importance, relatively sedentary lifestyle, broad distribution, & high sensitivity to environmental disturbances. Benthic communities inhabit the seafloor & are directly exposed to contaminants, organic enrichment, & physical disturbances that accumulate in sediments. Their limited mobility prevents them from avoiding unfavorable conditions, making them reliable indicators of local environmental quality. Additionally, macrobenthic organisms exhibit a wide range of life-history traits, feeding strategies, & physiological tolerances, allowing them to reflect ecological conditions across different spatial & temporal scales. Benthic communities are also relatively easy to sample using standard grab or corer techniques, & their taxonomic identification is well-established for most major groups, facilitating standardized monitoring programs worldwide.

Macrobenthic indicator species can provide valuable information about ecosystem health by reflecting both short-term & long-term ecological changes. The presence, absence, abundance, & diversity of benthic species respond to variations in sediment characteristics, organic matter loading, oxygen availability, & contaminant concentrations. Opportunistic species often proliferate under disturbed conditions, while sensitive species decline or disappear, resulting in predictable shifts in community composition that can be quantified using ecological indices. This capacity to integrate ecological stressors over time makes macrobenthic indicators particularly valuable for assessing cumulative impacts & tracking recovery trajectories following management interventions.

The present review aimed to investigate the concept of macrobenthic indicator species, examine their ecological significance, identify major taxonomic groups used in marine environmental assessment, & evaluate their applications in monitoring marine ecosystem quality. Furthermore, this study highlights the advantages, limitations, & future prospects of using macrobenthic indicators in environmental management & conservation programs.

Method

This study was conducted as a comprehensive review of scientific literature related to macrobenthic indicator species & their applications in marine environmental monitoring. A systematic literature search was performed using major scientific databases, including Google Scholar, Scopus, Web of Science, & ResearchGate, to ensure broad coverage of peer-reviewed publications. The literature search was performed using keywords such as “indicator species,” “macrobenthos,” “marine ecosystem monitoring,” “ecological indicators,” & “benthic community structure.” Boolean operators were used to combine search terms & refine the results. The search was limited to English-language publications, & no specific time restrictions were applied to capture both foundational studies & recent advances. Studies were selected based on scientific quality, relevance to the research topic, publication in peer-reviewed journals, & contribution to ecological assessment & environmental monitoring. Preference was

given to studies that provided quantitative data, validated methodologies, & practical applications in different marine regions.

Information extracted from the selected studies was categorized & analyzed to identify common patterns, methodological approaches, major findings, & existing challenges. Particular attention was given to the ecological responses of macrobenthic communities to environmental stressors, the development of indicator-species methodologies, & the application of ecological indices such as Indicator Value Analysis (IndVal), AZTI Marine Biotic Index (AMBI), & Multivariate AMBI (M-AMBI). The extracted data were synthesized to develop a comprehensive overview of the current state of knowledge, identify methodological strengths & weaknesses, & propose directions for future research. The review also considered the geographic distribution of studies to assess the regional applicability of different indicator approaches & identify areas where knowledge is limited.

Results

The reviewed studies demonstrate that various macrobenthic groups, including polychaetes, mollusks, crustaceans, echinoderms, cnidarians, & demersal fishes, serve as effective indicators of environmental quality in marine ecosystems. Polychaete worms, particularly opportunistic species such as *Capitella capitata* & *Heteromastus filiformis*, are widely recognized as indicators of organic enrichment, sediment contamination, & hypoxic conditions. These species are often among the first to colonize disturbed sediments & can rapidly proliferate under high organic loading, making them sensitive indicators of eutrophication & wastewater discharge. Mollusks, especially filter-feeding bivalves, are capable of accumulating heavy metals & other pollutants, making them valuable biomonitors for long-term contamination assessment. Their sedentary nature & feeding behavior result in direct exposure to sediment-associated contaminants, allowing them to reflect bioavailable pollutant concentrations in the environment. Amphipod crustaceans are sensitive to sediment toxicity & organic pollution, whereas echinoderms exhibit strong responses to environmental stress during their larval stages & can indicate habitat deterioration. Demersal fish also contribute to environmental monitoring through the bioaccumulation of contaminants within higher trophic levels, providing an integrated measure of ecosystem-level contamination.

The findings further reveal that macrobenthic communities are strongly influenced by environmental variables such as sediment grain size, organic matter content, dissolved oxygen concentration, salinity, water depth, & hydrodynamic conditions. The loss of sensitive taxa & the proliferation of tolerant species lead to simplified community structures & reduced functional diversity, which can impair ecosystem functioning & resilience.

The review also highlights the growing application of quantitative methods for identifying indicator species. Approaches such as IndVal combine species abundance & frequency of occurrence to determine species-environment relationships & improve ecological assessments. Similarly, AMBI & M-AMBI have become widely used tools for evaluating ecological status based on benthic community composition. These indices assign species to ecological groups based on their sensitivity to disturbance & enable the classification of sites into quality classes ranging from undisturbed to heavily impacted.

Conclusions

The review confirms that macrobenthic indicators offer a practical & scientifically robust approach to marine environmental monitoring. Their ecological relevance, cost-effectiveness, & ability to integrate environmental conditions over time make them invaluable for detecting & quantifying anthropogenic impacts. However, successful implementation requires careful consideration of indicator selection, methodological standardization, & regional calibration. The development of comprehensive databases & continuous refinement of ecological indices will further strengthen the utility of macrobenthic indicators in environmental management.

Macrobenthic indicator species represent powerful & cost-effective tools for assessing marine environmental quality & ecosystem health. Their sensitivity to environmental changes, limited mobility, long life span, & capacity to integrate ecological conditions over time make them particularly suitable for monitoring anthropogenic impacts & climate-related disturbances. The use of indicator species can facilitate habitat assessment, early detection of environmental degradation, ecological risk evaluation, & the development of conservation strategies. However, improving the reliability of biological assessments requires careful species selection, incorporation of local ecological knowledge, long-term monitoring programs, & the application of advanced analytical & biotechnological techniques. The development of comprehensive regional & global databases for macrobenthic indicator species, together with the refinement of ecological indices, will significantly enhance future marine monitoring efforts & support sustainable management of marine ecosystems in the face of increasing environmental challenges. Future research should focus on integrating molecular & traditional taxonomic approaches to improve species.



نقش گونه های شاخص ماکروبنیتیک به عنوان ابزارهای زیستی در ارزیابی سلامت اکوسیستم های دریایی

علی عباسی^{a*}، مهران لقمانی^a

^aگروه زیست شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، سیستان و بلوچستان، ایران.

*نویسنده مسئول: علی عباسی aliabbasi1376.2014@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵

کلیدواژه ها:

اکوسیستم دریایی،

آلودگی دریایی،

پایش زیست محیطی،

تنوع زیستی،

گونه های شاخص ماکروبنیتیک.

اکوسیستم های دریایی روز به روز بیشتر تحت تأثیر فعالیت های انسانی و تغییرات اقلیمی قرار می گیرند و این موضوع نیاز به پایش دقیق تر را دوچندان کرده است. در این میان، گونه های شاخص ماکروبنیتیک به عنوان ابزارهایی حساس و قابل اعتماد برای ارزیابی شرایط زیست محیطی دریاها شناخته شده اند. این پژوهش با رویکرد مروری، مفهوم گونه های شاخص ماکروبنیتوز، گروه های اصلی آن ها شامل نرم تنان، سخت پوستان، کرم های حلقوی، خارپوستان و ماهی های کفزی را معرفی کرده و کاربردهای عملی آن ها را در پایش زیست محیطی بررسی می کند. ماکروبنیتوزها به دلایل متعددی شاخص های زیستی مناسبی به شمار می روند. تحرک پایین، طول عمر نسبتاً زیاد، حساسیت به تغییرات محیطی و توانایی انباشت آلاینده ها در بافت، از جمله ویژگی هایی است که آن ها را برای پایش بلندمدت مناسب می سازد. این موجودات می توانند در ارزیابی کیفیت زیستگاه، سنجش سلامت اکوسیستم و شناسایی تهدیدات بالقوه محیطی مفید واقع شوند. روش های کمی مانند آنالیز ارزش شاخص (IndVal)، شاخص AMBI و نسخه چند متغیره آن (M-AMBI) دقت ارزیابی های اکولوژیک را افزایش داده اند. بر اساس یافته ها، گروه های مختلف ماکروبنیتوز هر کدام کاربرد خاصی دارند. پرتاران مقاوم و فرصت طلب مانند *Capitella capitata* و *Heteromastus filiformis* با شرایط غنی سازی مواد آلی و آشفتگی رسوب مرتبط هستند و فراوانی فزاینده آنها می تواند به عنوان شاخصی از شرایط تنش زا مورد استفاده قرار گیرد. دوکفه ای های فیلترخوار به خاطر تجمع فلزات سنگین در بافت، برای پایش بلندمدت آلودگی فلزی مناسب اند. دوجورپایان به سمیت رسوبات حساس بوده و خارپوستان در مراحل لاروی پاسخ های واضحی به تنش های محیطی نشان می دهند. ماهیان کفزی نیز از طریق تجمع زیستی آلاینده ها در سطوح بالای زنجیره غذایی اطلاعات مفیدی ارائه می دهند. نکته قابل توجه در این مطالعه، نگاه چندبعدی به توانایی های زیست محیطی گونه های شاخص ماکروبنیتیک و اشاره به نقش روش های نوین بیوتکنولوژی در افزایش دقت شناسایی و پایش است. تهیه بانک اطلاعاتی جامع از این گونه ها می تواند پژوهش های آینده را تسهیل کرده و به مدیریت مؤثرتر اکوسیستم های دریایی کمک کند.

استناد به این مقاله: عباسی، علی و لقمانی، مهران. (۱۴۰۴). نقش گونه های شاخص ماکروبنیتیک به عنوان ابزارهای زیستی در ارزیابی سلامت اکوسیستم های دریایی. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۱(۱)، ۵۹-۴۱. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252593>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252593>.

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

با توسعه سریع جوامع بشری و افزایش فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی، تأثیرات منفی بر محیط‌زیست به‌ویژه در اکوسیستم‌های دریایی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. بر اساس مطالعات مختلف، تقریباً تمامی بوم‌سازگان‌های دریایی در حال حاضر تحت تأثیر مستقیم یا غیرمستقیم این فعالیت‌ها قرار دارند (Halpern et al., 2008). تقریباً نیمی از محیط دریایی با استرس‌های مختلفی مانند اسیدی شدن اقیانوس‌ها، آلودگی‌های مختلف، کم‌اکسیژنی دائمی یا فصلی، صید بی‌رویه و تخریب زیستگاه‌ها روبه‌رو است (Halpern et al., 2015). این فشارهای محیطی نه تنها به کاهش تنوع زیستی و اختلال در عملکرد اکوسیستم‌ها منجر شده، بلکه توانایی آن‌ها را برای مقابله با تغییرات اقلیمی نیز محدود کرده است. با افزایش نیاز به حفاظت از اکوسیستم‌های دریایی، پایش دقیق وضعیت محیطی آن‌ها اهمیت بیشتری یافته است. یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه، استفاده از گونه‌های شاخص ماکروبنطیک است که به دلیل حساسیت بالا به تغییرات فیزیکی و شیمیایی، می‌توانند تغییرات اکوسیستمی و اثرات آلاینده‌ها را بهتر از روش‌های شیمیایی نمایان سازند (Gislason et al., 2017). برخلاف ارزیابی‌های شیمیایی که تنها به سنجش غلظت آلاینده‌ها محدودند و قادر به شبیه‌سازی اثرات بلندمدت و ترکیبی نیستند (Coutellec & Barata, 2013)، ارزیابی زیستی با بهره‌گیری از این گونه‌ها می‌تواند کیفیت زیستگاه و وضعیت کلی اکوسیستم را در طول زمان منعکس کند. همچنین، از طریق بررسی تجمع زیستی و روندهای انباشت آلودگی، امکان پیش‌بینی تهدیدات آینده نیز فراهم می‌شود (Geng et al., 2019).

در میان گروه‌های مختلف موجودات دریایی، درشت‌کفزیان^۱ به دلیل تنوع زیستی بالا، فراوانی و حساسیت به تغییرات محیطی از جمله شاخص‌های بارز برای ارزیابی اکولوژیکی به‌شمار می‌آیند (De Cáceres et al., 2010; Bendtsen & Hansen, 2013). ماکروبنطوزها، گروهی از جانوران آبری هستند که در تمام یا بخشی از چرخه زندگی خود در بستر دریا یا رسوبات زیست می‌کنند. بر اساس یک تعریف رایج، آن دسته از موجوداتی که از توری با چشمه ۵/۰ میلی‌متر عبور نمی‌کنند، به عنوان ماکروبنطوز شناخته می‌شوند. این گروه بخشی کلیدی از اکوسیستم‌های دریایی محسوب می‌شوند، زیرا از طریق فعالیت‌هایی مانند تغذیه، حفر تونل و ساخت لوله‌ها، ساختار فیزیکی رسوبات را دگرگون می‌کنند. تولید مواد مخاطی و تغییر در زبری یا نرمی بستر باعث دگرگونی در توپوگرافی موضعی، ساختار اولیه رسوبات و ویژگی‌های زیستی میکروارگانیسم‌های همراه می‌شود که در نهایت ترکیب مواد مغذی محیط دریایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، جوامع ماکروبنطیک نقش مهمی در چرخه‌های ژئوشیمیایی عناصر کلیدی مانند کربن، نیتروژن و گوگرد ایفا می‌کنند. آن‌ها منبع اصلی تغذیه برای جانوران کفزی و حتی گونه‌های موجود در کل ستون آب هستند و از طریق فعالیت‌هایی مانند تغذیه و شکار، در ایجاد ساختار و عملکرد اکوسیستم دریایی مشارکت می‌کنند (Liu et al., 2007; Liu et al., 2009). برای نمونه، میانگین زی‌توده سالانه ماکروبنطوزها در دریای زرد شمالی به ۹۹/۶۶ گرم بر متر مربع می‌رسد که نشان‌دهنده میزان بالای تولید ثانویه و تنوع زیستی بالای آن‌ها است. در منطقه دریای زرد و دریای بوهای، تاکنون حداقل ۱۰ رده و ۸۰۰ گونه از ماکروبنطوزها شناسایی شده‌اند (Xu & Li, 2021).

این گونه‌ها به‌طور خاص در برابر تغییرات فیزیکی محیطی، مانند تغییرات در ترکیب بستر و شرایط اکسیژنی، واکنش‌های خاصی نشان می‌دهند که می‌تواند به‌طور مستقیم به تغییرات کیفیت محیط اشاره کند. بررسی پاسخ‌های آن‌ها در مراحل مختلف زندگی، از لاروهای پلانکتونی تا موجودات بالغ، می‌تواند به ما کمک کند تا تأثیرات سریع و بلندمدت تغییرات محیطی بر اکوسیستم‌های دریایی را شبیه‌سازی کنیم. به عنوان مثال، مرحله لاروی پلانکتونی که به‌شدت به شرایط هیدرودینامیکی و سطوح اکسیژن حساس است، می‌تواند اطلاعات مفیدی درباره پراکنش و استقرار موفقیت‌آمیز جمعیت‌ها و در نتیجه وضعیت عمومی اکوسیستم‌های دریایی فراهم کند (Bendtsen & Hansen, 2013). از سوی دیگر، مرحله بالغ این گونه‌ها نشان‌دهنده تغییرات بلندمدت در کیفیت زیستگاه‌ها و دسترسی به منابع محیطی است. به این معنا که تغییرات در توزیع و فراوانی درشت‌کفزیان می‌تواند نشانه‌هایی از تغییرات پایدار در کیفیت اکوسیستم‌ها باشد. این ویژگی‌ها موجب می‌شود که درشت‌کفزیان به عنوان ابزارهایی مهم برای پیش‌بینی و پایش وضعیت اکولوژیکی در دریاها مورد توجه قرار گیرند (Leonardsson et al., 2009). در

^۱ Macrobenthos

واقع، توجه به این ویژگی‌ها و ارزیابی‌های زیستی مبتنی بر گونه‌های شاخص می‌تواند در مدیریت بهتر منابع دریایی و حفاظت از این اکوسیستم‌ها مؤثر واقع شود.

حیات وحش ماکروبنیتیک به دلیل ایفای نقش‌های کلیدی در عملکرد اکوسیستم‌های دریایی، از جمله چرخه مواد مغذی، تجزیه و متابولیسم آلاینده‌ها، تولید زیست‌توده ثانویه، و همچنین نقش آن‌ها به عنوان حلقه‌ای مهم در زنجیره غذایی، از اهمیت بالایی برخوردار است (Wang et al., 2021). ساختار و تنوع این جوامع کفزی، به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی مانند اندازه ذرات رسوب، میزان مواد آلی، عمق و شوری قرار دارد، که هر یک به طور مستقیم می‌توانند پویایی جمعیت آن‌ها را در مقیاس‌های فضایی مختلف تغییر دهند (Ellis et al., 2017; Khedhri et al., 2016). با این حال، یکی از متغیرهای مهمی که در بسیاری از مطالعات مورد غفلت قرار گرفته، فشارهای انسان‌زاد است؛ عواملی مانند آلودگی، ساخت‌وساز ساحلی و بهره‌برداری بی‌رویه، که می‌توانند به طور مستقیم ترکیب، عملکرد و حتی مقاومت جوامع ماکروبنیتیک را تغییر دهند. درک بهتر این تأثیرات انسان‌زاد، به‌ویژه در کنار متغیرهای طبیعی، می‌تواند تصویر دقیق‌تری از وضعیت واقعی اکوسیستم‌های کفزی ارائه داده و در طراحی راهبردهای مدیریتی مؤثرتر برای حفاظت از تنوع زیستی دریایی مفید باشد (Alsaffar et al., 2019).

ماکروبنیتوز مانند کرم‌های پرتار، نرم‌تنان و سخت‌پوستان، به دلیل سکونت در بستر دریا و حساسیت بالا به تغییرات محیطی، از دیرباز به عنوان شاخص‌های زیستی برای پایش وضعیت اکولوژیکی دریاها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بیشتر این جانداران دارای زندگی کم‌تحرک یا ساکن هستند و به سرعت به آلودگی‌ها یا آشفته‌گی‌های محیطی پاسخ می‌دهند. تغییرات در تعداد و فراوانی این گونه‌ها می‌تواند اطلاعات دقیقی درباره میزان تخریب یا فشار وارده بر اکوسیستم کف دریا ارائه دهد (Martin et al., 2019).

تاریخچه استفاده از گونه‌های شاخص در ارزیابی زیست‌محیطی به اوایل قرن بیستم بازمی‌گردد؛ زمانی که Kolkwitz و Marsson مفهوم استفاده از حضور و فراوانی گونه‌ها برای ارزیابی آلودگی را مطرح کردند. این رویکرد به تدریج از ارزیابی کیفی حضور یا عدم حضور گونه‌ها به سمت تحلیل کمی پاسخ جوامع زیستی در برابر فشارهای محیطی توسعه یافت. در محیط‌های دریایی نیز استفاده از ماکروبنیتوزها، به‌ویژه پرتاران، برای ارزیابی غنی‌شدگی آلی و کیفیت رسوبات گسترش پیدا کرد. با پیشرفت روش‌های آماری، رویکردهای طبقه‌بندی و تحلیل گونه‌های شاخص توسعه یافتند و در نهایت روش تحلیل ارزش شاخص (IndVal) توسط Legendre و Dufrène (۱۹۹۷) چارچوبی کمی برای شناسایی گونه‌های مرتبط با گروه‌ها یا شرایط محیطی مشخص فراهم کرد. امروزه، این رویکردها در کنار شاخص‌های چندمتغیره‌ای مانند AMBI و M-AMBI برای ارزیابی کیفیت اکولوژیک و پایش تغییرات محیطی در اکوسیستم‌های دریایی به کار می‌روند. بنابراین، روند تاریخی این حوزه نشان‌دهنده گذار از استفاده ساده از گونه‌ها به سمت روش‌های کمی و چندمتغیره است که امکان ارزیابی دقیق‌تر پاسخ جوامع ماکروبنیتیک به فشارهای محیطی را فراهم می‌کنند.

استفاده از گونه‌های شاخص در ارزیابی آلودگی‌های محیطی به اوایل قرن بیستم بازمی‌گردد؛ زمانی که Kolkwitz و Marsson با تهیه فهرست‌هایی از گونه‌های مرتبط با آلودگی آب، حضور یا عدم حضور گونه‌ها را به عنوان معیاری برای ارزیابی کیفیت محیط پیشنهاد کردند (Kolkwitz & Marsson, 1908, 1909). این رویکرد به تدریج به توسعه سامانه‌های زیستی ارزیابی کیفیت آب و شکل‌گیری مفهوم «گونه‌های شاخص» منجر شد (Keup et al., 1967). متعاقباً، استفاده از گونه‌های حساس به آلودگی آلی و همچنین گونه‌های مقاوم و فرصت‌طلب، از جمله پرتاران جنس Capitella در محیط‌های دریایی، گسترش یافته است. در همین حال، افزایش فراوانی گونه‌های مقاوم و فرصت‌طلب مانند Capitella بیشتر به عنوان نشانه‌ای از غنی‌سازی آلی و اختلال محیطی تفسیر می‌شود و نباید به عنوان شاخص مستقیم سلامت اکوسیستم در نظر گرفته شود (Reish, 1985). با توسعه روش‌های ارزیابی زیستی، تمرکز از شناسایی کیفی گونه‌های حساس به سمت بررسی کمی فراوانی و وقوع گونه‌ها و مقایسه جوامع بین مناطق شاهد و تحت تأثیر تغییر یافت (Mearthur et al., 2010; Bustos-Baez & Frid, 2003). در این روند، روش TWINSpan در سال ۱۹۷۹ برای طبقه‌بندی جوامع زیستی توسعه یافت (Hill, 1979) و سپس روش تحلیل گونه‌های شاخص (ISA) و شاخص IndVal با ترکیب فراوانی و میزان وقوع گونه‌ها، چارچوبی کمی برای شناسایی گونه‌های شاخص فراهم کردند (Dufrene & Legendre, 1997). این تحول تاریخی نشان‌دهنده گذار از استفاده ساده از حضور

یا عدم حضور گونه‌ها به سوی روش‌های کمی و تحلیلی برای شناسایی گونه‌های شاخص و ارزیابی پاسخ جوامع زیستی به تغییرات محیطی است.

امروزه، گونه‌های شاخص در ارزیابی زیستگاه، پایش تغییرات محیطی و شناسایی زود هنگام اختلالات اکولوژیک کاربرد گسترده‌ای دارند و توجه علمی به این رویکرد نیز افزایش یافته است (Siddig et al., 2016; Gallo et al., 2014). با وجود این، محدودیت‌ها و مزایا و معایب کاربرد گونه‌های شاخص کمتر از جنبه‌های کاربردی آن بررسی شده است (Siddig et al., 2016). در میان گروه‌های زیستی، ماکروبن‌توزها به دلیل تحرک محدود، وابستگی به زیستگاه و پاسخ مستقیم به تغییرات محیطی، ابزار مناسبی برای پایش اکولوژیک محسوب می‌شوند و استفاده از جوامع بنتیک در برنامه‌های پایش محیطی و ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های ساحلی توسعه یافته است (ISO, 1979; Xu & Li, 2021).

علیرغم افزایش استفاده از ماکروبن‌توزها و گونه‌های شاخص در ارزیابی وضعیت اکولوژیکی محیط‌های دریایی، مطالعات قبلی عمدتاً بر روی یک گروه طبقه‌بندی واحد، یک نوع فشار محیطی، یک منطقه جغرافیایی یا یک شاخص بیولوژیکی خاص متمرکز بوده‌اند. به عنوان مثال، برخی از مطالعات بر پاسخ ماکروبن‌توزها به غنی‌سازی آلی و اوتریفیکاسیون، برخی بر تجمع فلزات سنگین در نرم‌تنان و برخی دیگر بر استفاده از شاخص‌هایی مانند AMBI و M-AMBI در ارزیابی کیفیت اکولوژیکی تمرکز کرده‌اند. اگرچه این مطالعات اطلاعات ارزشمندی ارائه داده‌اند، اما نتایج آنها به صورت پراکنده ارائه شده است و رابطه بین ویژگی‌های گونه‌های شاخص، نوع فشار محیطی، پاسخ جوامع ماکروبن‌توز و قابلیت استفاده از شاخص‌های بیولوژیکی در یک چارچوب منسجم کمتر به خوبی خلاصه شده است. همچنین، تفاوت در پاسخ گونه‌های شاخص در مناطق جغرافیایی مختلف و تأثیر عوامل طبیعی مانند دما، عمق، نوع رسوب و ویژگی‌های هیدرودینامیکی بر عملکرد شاخص‌های بیولوژیکی، نشان دهنده نیاز به بررسی و مقایسه همزمان مطالعات انجام شده است. بنابراین، شکاف اصلی، فقدان یک خلاصه یکپارچه از کاربرد گونه‌ها و جوامع شاخص ماکروبن‌توز، فشارهای محیطی مرتبط با آنها، شاخص‌های مورد استفاده، قابلیت‌ها و محدودیت‌های هر رویکرد و الزامات استفاده از این ابزارها در برنامه‌های پایش محیطی است.

بر این اساس، هدف این مطالعه بررسی و تحلیل مطالعات انجام شده در مورد استفاده از گونه‌ها و جوامع ماکروبن‌توز به عنوان شاخص‌های زیستی در ارزیابی و پایش وضعیت اکولوژیکی اکوسیستم‌های دریایی و ساحلی است. در این راستا، گروه‌های اصلی ماکروبن‌توز، شامل پرتاران، نرم‌تنان، سخت‌پوستان، خارپوستان و ماهیان کفزی، از نظر پاسخ آنها به فشارهای محیطی و کاربرد آنها در پایش محیطی بررسی می‌شوند. همچنین، مطالعات انجام شده در مورد استفاده از گونه‌های شاخص در شناسایی غنی‌سازی آلی، آلودگی فلزات سنگین، سمیت رسوبات، یوتریفیکاسیون، تغییرات در ساختار جوامع کفزی و سایر فشارهای انسانی بررسی و مقایسه می‌شوند. علاوه بر این، هدف از مطالعه حاضر، بررسی رویکردها و شاخص‌های مورد استفاده برای شناسایی و ارزیابی گونه‌های شاخص، از جمله AMBI، M-AMBI، IndVal و شناسایی مزایا، محدودیت‌ها و چالش‌های کاربرد آنها در پایش اکوسیستم‌های دریایی است. در نهایت، با جمع‌بندی یافته‌های مطالعات قبلی، تلاش شده است تا مهم‌ترین شکاف‌های تحقیقاتی و نیازهای موجود برای توسعه روش‌های دقیق‌تر، بومی‌سازی شاخص‌ها، ادغام داده‌های زیستی و محیطی و طراحی برنامه‌های پایش بلندمدت شناسایی شود. بر این اساس، این مقاله می‌تواند چارچوبی برای انتخاب و کاربرد مناسب گونه‌ها و جوامع ماکروبن‌توز در ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های دریایی ارائه دهد و جهت تحقیقات آینده را تعیین کند.

روش‌شناسی پژوهش

این مطالعه به صورت مروری انجام شده است و هدف آن بررسی و تحلیل مقالات و پژوهش‌های خارجی در زمینه کاربرد گونه‌های شاخص ماکروبن‌تیک در ارزیابی و پایش محیط‌های دریایی می‌باشد. برای این منظور، مقالات علمی منتشر شده در پایگاه‌های معتبر مانند Google Scholar، Scopus، Web of Science، ResearchGate بررسی شدند. معیارهای انتخاب مقالات شامل کیفیت علمی بالا، انتشار در مجلات معتبر با شاخص تأثیر بالا، و پوشش جامع در زمینه‌های بوم‌شناسی دریایی و ارزیابی سلامت اکوسیستم‌ها بود. فرایند جستجو از طریق استفاده از کلیدواژه‌های مرتبط مانند "indicator species"، "benthic community"، "macrobenthos"، "marine ecosystem monitoring"، "ecological indicators" و "benthic community" انجام شد.

structure" انجام گرفت. مقالاتی که بیشترین ارتباط با موضوع تحقیق داشته و در زمینه‌های ارزیابی اکولوژیکی و پایش تغییرات زیست‌محیطی براساس گونه‌های شاخص فعالیت کرده بودند، انتخاب شدند. پس از گردآوری مقالات مرتبط، اطلاعات استخراج شده و دسته‌بندی شدند تا روندهای اصلی و یافته‌های مشترک در این مطالعات شناسایی گردد. در نهایت، مقاله حاضر به منظور ایجاد یک بینش جامع و هماهنگ، نتایج بدست‌آمده از تحقیقات مختلف را تجزیه و تحلیل کرده و به بحث درباره چالش‌های موجود و فرصت‌های پیش‌رو در این حوزه پرداخته‌است. جست‌وجوی منابع، مطالعات منتشرشده از سال ۱۹۰۲ تا پایان سال ۲۰۲۵ را دربر گرفت و با هدف پوشش روند تاریخی شکل‌گیری مفهوم گونه‌های شاخص و همچنین جدیدترین پژوهش‌های مرتبط با کاربرد ماکروبنیتوزها در پایش زیست‌محیطی انجام شد. مطالعات انتخاب‌شده بر اساس گروه طبقه‌بندی، نوع فشار محیطی، پاسخ زیستی، منطقه جغرافیایی و شاخص یا روش مورد استفاده، بررسی و کدگذاری شدند. سپس، یافته‌ها با استفاده از رویکرد سنتز روایی و مقایسه کیفی-موضوعی، در محورهای اصلی کاربرد ماکروبنیتوزها در پایش و ارزیابی وضعیت اکولوژیکی، دسته‌بندی و تحلیل شدند. به دلیل ناهمگونی مطالعات، متاآنالیز آماری انجام نشد.

این مطالعه، یک مطالعه مروری با دامنه جغرافیایی بین‌المللی است و به بررسی و تحلیل مطالعات منتشر شده از مناطق مختلف دریایی و ساحلی جهان، بدون محدود شدن به یک منطقه جغرافیایی خاص، می‌پردازد. هدف از این رویکرد، مقایسه واکنش گونه‌ها و جوامع ماکروبنیتیک در شرایط محیطی و جغرافیایی مختلف و شناسایی الگوهای قابل تعمیم در کاربرد آنها به عنوان شاخص‌های زیستی است. در این میان، مطالعات انجام شده در مناطق مختلف از جمله دریای زرد، دریای بوهایی، دریای سیاه، سواحل اروپا و سایر مناطق ساحلی به عنوان مطالعات موردی در این بررسی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به اهمیت دریای عمان و خلیج فارس برای پایش محیط زیست در ایران، یافته‌های این مطالعات نیز در بخش پیشنهادات و مسیرهای تحقیقاتی آینده از منظر قابلیت بومی‌سازی و کاربرد منطقه‌ای مورد توجه قرار گرفته است.

یافته‌ها و بحث

بر اساس خلاصه مطالعات بررسی شده، انتخاب یک گونه یا جامعه شاخص ماکروبنیتوزی می‌تواند در قالب یک چارچوب چند معیاره در نظر گرفته شود. در این چارچوب، ابتدا باید رابطه گونه یا جامعه با فشار محیطی مورد نظر تعیین شود؛ سپس حساسیت یا تحمل آن به فشار، میزان پایداری پاسخ، فراوانی و قابلیت تشخیص آن و همچنین وابستگی پاسخ به شرایط طبیعی منطقه مانند نوع رسوب، عمق، دما، شوری و اکسیژن ارزیابی می‌شود. در مرحله بعد، توانایی استفاده از گونه یا جامعه مورد نظر برای تمایز شرایط مرجع از مناطق تحت تأثیر و سازگاری آن با شاخص‌های کمی مانند IndVal، AMBI و M-AMBI بررسی می‌شود. بنابراین، انتخاب یک گونه شاخص نباید صرفاً بر اساس فراوانی یا حضور یک گونه باشد، بلکه باید بر اساس ترکیبی از ویژگی‌های زیستی، پاسخ اکولوژیکی، شرایط محیطی و قابلیت کاربرد آن در برنامه پایش باشد.

روش‌های مبتنی بر گونه‌های شاخص می‌توانند ابزارهای مؤثری برای ارزیابی وضعیت اکولوژیکی اکوسیستم‌های دریایی باشند و امکان تجزیه و تحلیل رابطه بین گونه‌ها و شرایط محیطی را فراهم کنند. یکی از روش‌های مهم در این زمینه، روش IndVal است که برای شناسایی گونه‌هایی که رابطه خاصی با زیستگاه‌ها، شرایط محیطی یا گروه‌های مورد مطالعه دارند، استفاده می‌شود. این روش با ترکیب فراوانی نسبی و حضور گونه‌ها، میزان ارتباط یک گونه با یک شرایط یا گروه محیطی خاص را تعیین می‌کند (Dufrene & Legendre, 1997). بنابراین، شناسایی یک گونه توسط IndVal لزوماً به معنای آن نیست که آن یک "شاخص سلامت اکوسیستم" است، بلکه به این معنی است که حضور یا فراوانی آن با یک شرایط یا وضعیت محیطی خاص مرتبط است. به عنوان مثال، برخی مطالعات نشان داده‌اند که *Heteromastus filiformis* و *Capitella capitata* با محیط‌های غنی از مواد آلی و رسوبات تحت تنش مرتبط هستند. با توجه به تحمل آنها در برابر شرایط نامساعد و توانایی سازگاری با محیط‌های غنی از مواد آلی، این گونه‌ها اغلب به عنوان گونه‌های مقاوم یا فرصت‌طلب و نشانه‌ای از استرس یا اختلال محیطی تعبیر می‌شوند و نباید به عنوان شاخص مستقیم سلامت اکوسیستم در نظر گرفته شوند (Zhang et al., 2012). بنابراین، استفاده از IndVal باید با توجه به جهت و ماهیت پاسخ گونه و همراه با سایر اطلاعات بیولوژیکی و محیطی انجام شود تا از تفسیر نادرست یک گونه مقاوم یا فرصت‌طلب به عنوان شاخص سلامت اکوسیستم جلوگیری شود (Antonelli et al., 2016).

نتایج بررسی حاضر نشان می‌دهد که گروه‌های مختلف ماکروبن‌توز، از جمله پرتاران، خارپوستان، نرم‌تنان، سخت‌پوستان و ماهیان کفزی، به‌طور مؤثری به عنوان گونه‌های شاخص در پایش زیست‌محیطی دریاها مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از پرتاران، به ویژه گونه‌های مقاوم و فرصت‌طلب مانند *Capitella capitata* و *Heteromastus filiformis* با شرایط نامساعد و غنی‌سازی آلی رسوبات مرتبط هستند و افزایش فراوانی آنها می‌تواند نشان‌دهنده افزایش استرس یا آشفته‌گی محیطی باشد. بنابراین، این گونه‌ها نباید به عنوان شاخص‌های مستقیم سلامت اکوسیستم در نظر گرفته شوند، بلکه حضور یا افزایش فراوانی آنها به عنوان نشانه‌ای از شرایط استرس‌زا، آشفته‌گی یا آلودگی آلی تفسیر می‌شود (Dean, 2015; Ito et al., 2016; Nasi et al., 2018; Sobczyk et al., 2021). خارپوستان^۱ به‌ویژه در مراحل لاروی نسبت به تغییرات کیفی محیط زیست دریایی و آلاینده‌های مختلف بسیار حساس هستند. در مقابل، بسیاری از خارپوستان، و به ویژه مراحل لاروی آنها، به برخی از آلاینده‌ها و تغییرات محیطی حساس هستند؛ بنابراین، کاهش بقا، فراوانی یا موفقیت رشد آنها می‌تواند در برخی شرایط به عنوان نشانه‌ای از افزایش فشار محیطی یا کاهش کیفیت زیستگاه تفسیر شود (Rakaj et al., 2021). همچنین، مرجان‌سانان^۲ مانند شقایق‌های دریایی نیز به دلیل پاسخ‌دهی به آلاینده‌هایی نظیر هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) و فلزات سنگین، در پایش آلودگی و تغییرات کیفیت زیست‌محیطی اهمیت دارند (Gadelha et al., 2013). نرم‌تنان^۳، به‌ویژه دوکفه‌ای‌ها مانند صدف‌های سیاه و صدف‌های خوراکی، با توانایی تغذیه فیلتری و انباشت تدریجی آلاینده‌ها در بافت، ابزار مناسبی برای پایش بلندمدت آلودگی فلزات سنگین در محیط‌های دریایی محسوب می‌شوند. تغییرات در ساختار و تنوع جامعه این گروه اغلب به عنوان شاخصی از تخریب کیفیت آب و رسوبات در نظر گرفته می‌شود (Gérard & Lance, 2019; Liu et al., 2023). در میان سخت‌پوستان^۴، دوجورپایان^۵ به دلیل زیست کفزی، چرخه زندگی کوتاه و حساسیت بالا به آلاینده‌ها، شاخص‌های مفیدی برای ارزیابی سمیت رسوبات و آلودگی آلی شناخته شده‌اند. با این حال، اثربخشی آنها اغلب محدود به مناطقی است که اطلاعات کافی از تاکسونومی و بوم‌شناسی آنها در دسترس است (Podlesińska & Dąbrowska, 2019). ماهیان کفزی^۶ به دلیل قرارگیری در سطوح بالاتر زنجیره غذایی و توانایی تجمع زیستی آلاینده‌ها به‌ویژه فلزات سنگین، همچون روی در بافت‌هایی مانند کبد، برای پایش آلودگی زیست‌محیطی مفید هستند (de la Vega et al., 2023).

در کنار تحلیل گروه‌های زیستی، بررسی واژگان و مفاهیم به کار رفته برای گونه‌های شاخص نشان داد که اصطلاحاتی چون «نشانگر زیستی» و «پایشگر زیستی» گرچه به‌طور گسترده و گاه به‌جای یکدیگر به کار می‌روند، اما ممکن است تفاوت‌های مفهومی وابسته به بستر پژوهشی داشته باشند (Burger, 2006). این ابهام در کاربرد، بر اهمیت تعریف دقیق و هماهنگ این مفاهیم در مطالعات بعدی می‌افزاید.

گونه‌های شاخص ماکروبن‌تیک به‌دلیل ویژگی‌هایی چون تحرک محدود، طول عمر بالا، حساسیت محیطی و توانایی در تجمع زیستی آلاینده‌ها، ابزارهایی مؤثر برای پایش بلندمدت اکوسیستم‌های دریایی هستند. این گونه‌ها می‌توانند هم تغییرات ناگهانی و هم روندهای تدریجی تخریب زیستگاه را نمایان کنند. با این حال، چالش‌هایی مانند نبود معیارهای علمی برای انتخاب گونه‌ها، پیچیدگی‌های زیستی درون جامعه ماکروبن‌تیک، و دشواری تمایز میان تغییرات انسانی و طبیعی، ممکن است تحلیل‌ها را با خطا مواجه کند. برای افزایش دقت، استفاده از داده‌های محلی، فهرست‌های به‌روز و رویکردهای چندرشته‌ای ضروری است. در صورت طراحی صحیح، بهره‌گیری از این گونه‌ها می‌تواند چارچوبی علمی و کاربردی برای ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های دریایی و مدیریت آنها در برابر تهدیدات محیطی و تغییرات اقلیمی فراهم آورد (Carvalho et al., 2017; Bouchet et al., 2018). حفاظت از زیستگاه‌های طبیعی برای حفظ عملکرد و پایداری اکوسیستم‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. موفقیت برنامه‌های حفاظتی به‌شدت وابسته به شناسایی و حفاظت از زیستگاه‌هایی است که به‌عنوان مخازن تنوع زیستی عمل کرده و برای عملکرد اکوسیستم‌ها ضروری هستند. در این راستا، پس از شناسایی زیستگاه‌ها، می‌توان آنها را به‌منظور توسعه برنامه‌های پایش استفاده

¹ Echinoderms

² Cnidarians

³ Mollusks

⁴ Crustaceans

⁵ Amphipods

⁶ Demersal fish

کرد. یکی از چالش‌های عمده در تعریف زیستگاه‌ها، به‌ویژه در زیستگاه‌های نرم‌بستر دریایی، به دلیل تغییرات مستمر و دینامیک این محیط‌هاست. این چالش‌ها اغلب به ویژگی‌های رسوبی و محیط‌های بیولوژیکی مرتبط هستند و استفاده صرف از شاخص‌های غیرزیستی ممکن است به نتایج نادرستی منجر شود (Mearthur et al., 2010). بنابراین، در این گونه زیستگاه‌ها، تعاملات پیچیده گونه‌ها و محیط باید در نظر گرفته شود تا بتوان زیستگاه‌ها را به‌طور دقیق تعریف کرد (Fonseca & Gallucci, 2016). در این راستا، استفاده از گونه‌های شاخص می‌تواند به تسهیل برنامه‌های پایش کمک کند. از آنجایی که گونه‌های شاخص قادرند وضعیت زیستگاه‌ها را با دقت بیشتری نمایان کنند، شناسایی این گونه‌ها و تعیین روابط آن‌ها با ویژگی‌های زیست‌محیطی برای حفظ و مدیریت این اکوسیستم‌ها حائز اهمیت است. به‌منظور پایش و حفاظت مؤثر از زیستگاه‌های نرم‌بستر دریایی، چارچوبی ترکیبی از روش‌های آماری و رویکرد گونه‌های شاخص پیشنهاد شده است (Checon et al., 2018).

گونه‌های شاخص ماکروبنیتیک به دلیل حساسیت بالا به آلودگی، ابزار مؤثری در پایش محیط‌های دریایی هستند و می‌توانند تغییرات زیست‌محیطی را از طریق حضور یا غیاب خود نشان دهند. با این حال، انتخاب ناآگاهانه و بدون داده‌های بلندمدت از این گونه‌ها ممکن است به نتایج نادرست و تفسیرهای اشتباه منجر شود. واکنش گونه‌ها به آلودگی در مناطق مختلف می‌تواند متغیر باشد و تنها برخی گونه‌ها، مانند *Abra alba* و *Amphiura filiformis*، پیوستگی مشخصی با آلودگی دارند (Bustos-Baez & Frid, 2003). بنابراین، استفاده دقیق و مبتنی بر داده‌های محلی و به‌روز از گونه‌های شاخص برای دستیابی به ارزیابی‌های قابل‌اعتماد ضروری است. گونه‌های شاخص ماکروبنیتیک، مانند *Bellamya purificata* و *Radix auricularia*، به دلیل واکنش سریع و حساس به تغییرات زیست‌محیطی از جمله آلودگی و نوسانات دمایی، نقش کلیدی در پایش سلامت اکوسیستم‌های دریایی ایفا می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که فاکتورهایی مانند عمق آب، میزان رطوبت رسوبات و حضور گیاهان آبی بر رشد و پراکنش این گونه‌ها تأثیر می‌گذارند. به‌ویژه، گیاهان غوطه‌ور می‌توانند با فراهم‌سازی زیستگاه مناسب، به بهبود شرایط زیستی و افزایش تراکم گونه‌هایی نظیر *Radix auricularia* کمک کنند، در حالی که کاهش کیفیت ورودی آب می‌تواند باعث افت جمعیت گونه‌هایی مانند *Bellamya purificata* شود. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که احیای زیستگاه‌های آبی، به‌ویژه از طریق بازسازی پوشش گیاهی، نه تنها موجب ارتقاء تنوع زیستی می‌شود، بلکه ابزار مؤثری برای مدیریت و بهبود کیفیت اکولوژیکی دریاچه‌ها و رودخانه‌ها به شمار می‌آید (Yang et al., 2024).

در اکوسیستم‌های گرمسیری که با تنوع زیستی بالا و تهدیدات زیست‌محیطی گسترده روبه‌رو هستند، ماکروبنیتوزها به‌ویژه به عنوان شاخص‌های زیستی حساس برای پایش وضعیت اکوسیستم‌های آبی و دریایی اهمیت دارند. در این مناطق، گروه‌هایی مانند *Polychaeta*، *Gastropoda* و *Bivalvia* غالب‌اند و ترکیب و ساختار آن‌ها به شدت تحت تأثیر عواملی نظیر بافت رسوب، میزان شوری، و الگوهای جزر و مد قرار دارد. در نواحی بین‌مدی، زوناسیون گونه‌ای بر اساس ارتفاع جزر و مد مشخص می‌شود و تنوع گونه‌ای در مناطق پایین‌تر بیشتر است. بررسی‌ها نشان داده‌اند که فعالیت‌های انسانی و آلودگی‌های ناشی از شهرنشینی منجر به کاهش غنای زیستی و تغییر ترکیب جوامع زیستی شده‌اند. همچنین، در دوره‌های غیرموسمی تنوع و عملکرد ماکروبنیتیک بهبود می‌یابد. برخی خانواده‌ها مانند *Spionidae* و *Cossuridae* که توان تحمل شرایط هیپوکسی را دارند، در مناطق دچار کم‌اکسیژنی فراوانی بیشتری دارند و می‌توانند به عنوان نشانه‌هایی از اختلالات اکولوژیکی در این نواحی عمل کنند (Sukumaran et al., 2021).

توسعه استفاده از گونه‌های شاخص در ارزیابی وضعیت زیست‌محیطی، روندی را نشان می‌دهد که از مشاهده ساده حضور یا عدم حضور گونه‌ها در مکان‌های نمونه‌برداری به ابزارهای پیچیده‌تری مانند تحلیل‌های چند متغیره و شاخص‌های کمی گسترش یافته است. همانطور که در مطالعات مختلف اشاره شده است، گونه‌ها و جوامع ماکروبنیتوز می‌توانند به عنوان ابزارهای مفیدی برای ردیابی تغییرات زیست‌محیطی و اثرات آلودگی عمل کنند و پاسخ‌های آنها در مراحل مختلف چرخه زندگی، از مراحل لاروی تا بزرگسالی، می‌تواند اطلاعات متفاوتی در مورد شرایط محیطی کوتاه‌مدت و بلندمدت ارائه دهد. این فرآیند، به ویژه با استفاده از مدل‌های تحلیلی پیشرفته، بهبود یافته است و می‌تواند نقش مهمی در ارزیابی دقیق‌تر وضعیت اکولوژیکی داشته باشد. به طور خاص، استفاده از شاخص‌هایی مانند *IndVal*، با ترکیب اطلاعات مربوط به فراوانی و پراکندگی گونه‌ها، به شناسایی گونه‌های مرتبط با شرایط یا گروه‌های خاص محیطی کمک می‌کند (Han & Han, 2024).

توزیع فضایی ماکروبتوزها به شدت تحت تأثیر عواملی مانند عمق آب و ترکیب رسوبات است (Levin & Gage, 1998). مطالعات نشان می‌دهند که فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در نزدیکی سواحل، بنادر و مزارع پرورش آبزیان، منجر به تغییرات چشمگیر در ساختار و پراکنش جوامع ماکروبتوزی می‌شود. معمولاً تعداد گونه‌ها و فراوانی ماکروبتوزها در مناطق ساحلی کاهش و در نواحی دور از ساحل افزایش می‌یابد، که این روند منعکس‌کننده شدت فشارهای انسانی است. به‌ویژه، پرورش آبزیان با ایجاد اختلال در تبادل آب و افزایش آلودگی‌های آلی، می‌تواند کیفیت رسوبات و ساختار بستر دریا را تحت تأثیر قرار دهد. این تغییرات زیستی نشان‌دهنده تأثیر جدی این فعالیت‌ها بر سلامت اکوسیستم‌های دریایی است. بنابراین، لزوم پایش و مدیریت دقیق‌تر این نواحی برای جلوگیری از تخریب زیستگاه‌ها و حفظ تنوع زیستی ضروری است (Zhang et al., 2013; Liu et al., 2021).

در زمینه بررسی نقش گونه‌های شاخص ماکروبتیک در پایش زیست‌محیطی، در میان مطالعات بررسی‌شده، تحقیقات انجام‌شده در دریای بوهای و بخش شمالی دریای زرد نیز نمونه‌ای از کاربرد شاخص M-AMBI در ارزیابی وضعیت اکولوژیکی جوامع ماکروبتوزی است. در این مطالعات، تغییرات در ترکیب گونه‌ای، فراوانی و زیست‌توده جوامع ماکروبتوزی در رابطه با عواملی مانند عمق، دما، نوع بستر و اکسیژن محلول بررسی شده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ادغام داده‌های زیستی و محیطی می‌تواند در ارزیابی کیفیت اکولوژیکی مناطق ساحلی مؤثر باشد.

در بحث استفاده از گونه‌های شاخص ماکروبتیک در پایش زیست‌محیطی دریاها، مطالعه‌های مختلف نشان می‌دهند که این گونه‌ها به دلیل دقت بالا و هزینه پایین در پایش تغییرات اکولوژیکی، ابزارهای مؤثری هستند. اما انتخاب گونه‌های شاخص مناسب و برقراری روابط واضح میان آن‌ها و کاربردهای خاص همچنان یک چالش بزرگ محسوب می‌شود (Siddig et al., 2016). در این راستا، اهمیت انتخاب گروه‌های شاخص که به‌طور مؤثری نمایانگر وضعیت زیست‌محیطی باشند و همچنین درک روابط علت و معلولی میان این گونه‌ها و فرآیندهای بوم‌شناختی، برای افزایش دقت ارزیابی‌ها ضروری است. شاخص IndVal (Legendre, 1997). با این حال، کاربرد مؤثر گونه‌های شاخص نیازمند اتخاذ رویکردهای دقیق‌تری است که در آن‌ها معیارهای انتخاب گونه‌ها، حذف سوگیری‌ها در فرآیند انتخاب و استفاده از تحلیل‌های آماری پیشرفته لحاظ شود. همچنین، تدوین استراتژی‌های جامع پایش زیست‌محیطی دریایی با در نظر گرفتن تنوع طبیعی جمعیت‌ها و استفاده از قضاوت متخصصان برای کالیبراسیون شاخص‌ها در مناطق مختلف می‌تواند به بهبود دقت ارزیابی‌ها کمک کند (L&res et al., 1988; De Cáceres et al., 2010). به‌طور کلی، همان‌طور که مطالعه‌ها نشان می‌دهند، استفاده از گونه‌های شاخص در پایش زیست‌محیطی دریایی روندی رو به رشد دارد و همچنان نیاز به تحقیقات بیشتر و مرورهای سیستماتیک دارد تا نقش این گونه‌ها در پایش و ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های دریایی تقویت شود.

کاهش بیوماس و تغییر در گونه‌های غالب جوامع ماکروبتوزی، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی و تغییرات محیطی است و می‌تواند به‌عنوان شاخصی مؤثر در ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های دریایی به کار رود. این تغییرات اغلب ناشی از افزایش محتوای آلی و تولید اولیه در اثر فعالیت‌هایی مانند کشاورزی دریایی و آلودگی‌های ساحلی، به‌ویژه در نواحی ساحلی دریای بوهای، رخ می‌دهد. پایش ساختار این جوامع، ابزاری کارآمد برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی محسوب می‌شود. استفاده از گونه‌های شاخص ماکروبتیک نه تنها ارزیابی زیستی را ساده‌تر می‌کند، بلکه درک دقیق‌تری از روندهای محیطی و پیش‌بینی تغییرات آینده اکوسیستم‌های دریایی ارائه می‌دهد. برای مدیریت مؤثر و حفظ تنوع زیستی، بررسی مستمر این گونه‌ها ضروری است (Liu et al., 2014; Chen et al., 2016).

فعالیت‌های انسانی در نواحی ساحلی، به‌ویژه ورود مواد مغذی از طریق رواناب رودخانه‌ای، منجر به برهم خوردن تعادل نسبت نیتروژن به فسفر (N/P) و بروز پدیده یوتروفیکاسیون در آب‌های ساحلی شده است. این آلودگی عمدتاً ناشی از ورود فاضلاب خانگی و صنعتی است. چنین شرایطی منجر به کاهش تنوع گونه‌ای در جوامع بنتوزی می‌شود، به‌ویژه در نواحی دهانه رودخانه‌ها که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم این ورودی‌ها بر ساختار و عملکرد اکولوژیکی ماکروبتوزهاست. در این شرایط، استفاده از گونه‌های شاخص ماکروبتیک می‌تواند به شناسایی و ارزیابی دقیق‌تر اثرات آلودگی و یوتروفیکاسیون کمک کند. تغییر در تنوع و ترکیب گونه‌ای در چنین نواحی آلوده، می‌تواند به‌عنوان یک هشدار زودهنگام برای تغییرات اکولوژیکی محسوب شود. این موضوع اهمیت

انتخاب درست گونه‌های شاخص و تعیین حساسیت آن‌ها به تغییرات کیفیت آب و رسوب را دوچندان می‌کند (Sters, 1958). از سوی دیگر، ساختار جامعه ماکروبنطوزها ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های فیزیکی رسوبات دارد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ترکیب دانه‌بندی رسوبات (مانند نسبت ماسه، سیلت و رس) یکی از عوامل اصلی تعیین‌کننده در توزیع و فراوانی ماکروبنطوزهاست. یافته‌های تأیید می‌کند که، همبستگی مثبت معناداری بین میزان ماسه و فراوانی ماکروبنطوزها وجود دارد، در حالی که با افزایش سیلت و رس، فراوانی کاهش می‌یابد (Li et al., 2020). این نتایج بیانگر آن است که گونه‌های شاخص می‌توانند به طور خاص برای ارزیابی ویژگی‌های رسوبی نیز مورد استفاده قرار گیرند، چرا که برخی از آن‌ها نسبت به نوع بستر حساسیت مشخصی دارند. شاخص‌های AMBI و M-AMBI ابزارهای مهمی برای ارزیابی وضعیت اکولوژیکی جوامع ماکروبنطوزی در محیط‌های دریایی و ساحلی هستند. در شاخص AMBI، گونه‌های ماکروبنطوزی بر اساس حساسیت یا تحمل آن‌ها به افزایش غنی‌سازی آلی و فشار محیطی به پنج گروه اکولوژیکی (EG I تا EG V) طبقه‌بندی می‌شوند. گروه‌های EG I و EG II عمدتاً شامل گونه‌های حساس تر یا کم‌تحمل‌تر، EG III شامل گونه‌های نسبتاً مقاوم به غنی‌سازی آلی و EG IV و EG V شامل گونه‌های فرصت‌طلب با تحمل بالاتر هستند. نسبت فراوانی نسبی این گروه‌ها در جامعه ماکروبنطوزی برای محاسبه مقدار AMBI و ارزیابی وضعیت اکولوژیکی جامعه استفاده می‌شود (Borja et al., 2000). در جدول ۱ طبقه‌بندی اکولوژیک گروه‌های زیستی ماکروبنطیک در شاخص AMBI ارائه شده است.

جدول ۱. طبقه‌بندی اکولوژیک گروه‌های زیستی ماکروبنطیک در شاخص AMBI

Table 1. Ecological classification of macrobenthic biological groups in the AMBI index

گروه اکولوژیک	ویژگی گونه‌ها	پاسخ به افزایش غنی‌شدگی آلی
EG I	گونه‌های بسیار حساس به غنی‌شدگی آلی و معمولاً مرتبط با شرایط بدون اختلال	با افزایش فشار محیطی کاهش یافته یا حذف می‌شوند
EG II	گونه‌های نسبتاً بی‌تفاوت به غنی‌شدگی، معمولاً با فراوانی پایین و تغییرات محدود	در شرایط کم‌اختلال حضور دارند و تغییرات آن‌ها محدود است
EG III	گونه‌های مقاوم به افزایش مواد آلی	ممکن است در شرایط عادی حضور داشته باشند، اما با غنی‌شدگی آلی افزایش یابند
EG IV	گونه‌های فرصت‌طلب درجه دوم، عمدتاً برخی پرتاران کوچک‌جثه	در شرایط دارای اختلال متوسط تا شدید افزایش می‌یابند
EG V	گونه‌های فرصت‌طلب درجه اول و بسیار مقاوم	در شرایط شدیداً مختل و رسوبات احیایی می‌توانند غالب شوند

اما برای استفاده دقیق و مؤثر از این شاخص‌ها در شناسایی گونه‌های شاخص ماکروبنطیک، باید به دو عامل کلیدی توجه داشت: نخست، روش نمونه‌برداری تأثیر مستقیمی بر دقت این شاخص‌ها دارد. از آنجا که ماکروبنطوزها تحرک کمی دارند و نسبت به آلودگی‌های رسوبی حساس هستند، استفاده از تله‌های رسوبی برای نمونه‌برداری می‌تواند داده‌های دقیق‌تری فراهم آورد. در مقابل، روش‌هایی مانند تور ترال کفروب (مانند نمونه‌برداری Agassiz) ممکن است باعث کاهش دقت و بروز سوگیری در نتایج شود (Li et al., 2017). دوم، دقت شاخص AMBI وابسته به طبقه‌بندی دقیق گونه‌ها است. اگرچه فهرست گونه‌های AMBI تا سال ۲۰۲۰ به‌روزرسانی شده، اما این فهرست عمدتاً برای مناطق اروپایی تدوین شده است و بسیاری از گونه‌های موجود در سایر مناطق جهان هنوز طبقه‌بندی نشده‌اند یا در مناطق مختلف به شکل متفاوتی رده‌بندی می‌شوند (. این موضوع ضرورت توسعه فهرست جهانی گونه‌ها با همکاری متخصصان را نشان می‌دهد. برخی گروه‌های دیگر مانند آمفی‌پودها (به‌ویژه زیرراسته Gammaridea) نقش کلیدی در اکوسیستم دارند و با تسهیل فرآیندهای اکسایش و نیتریفیکاسیون، به عنوان نشانگرهای زیستی برای فرآیندهای بازسازی محیطی شناخته می‌شوند (Gómez-Gesteira & Dauvin, 2000). این نتایج نشان می‌دهد که نسبت فراوانی بین گونه‌های فرصت‌طلب و گونه‌های کلیدی، به‌ویژه در بین ماکروبنطوزها، می‌تواند به عنوان شاخص اکولوژیکی دقیق و مؤثر برای سنجش وضعیت آلودگی و بازسازی زیستی در مناطق دریایی مورد استفاده قرار گیرد. لذا انتخاب و کاربرد

هدفمند گونه‌های شاخص، با تکیه بر شاخص‌های AMBI و M-AMBI، یک ابزار راهبردی در بوم‌شناسی دریایی محسوب می‌شود.

جدول ۱. خلاصه مطالعات پژوهشی درباره کاربرد گونه‌ها و اجتماعات ماکروبنطیک به عنوان شاخص‌های زیستی در

ارزیابی و پایش زیست‌محیطی اکوسیستم‌های دریایی و ساحلی

Table 1. Summary of research studies on the use of macrobenthic species & communities as biological indicators in environmental assessment & monitoring of marine & coastal ecosystems.

مطالعه	عامل یا فشار محیطی	یافته اصلی، منطقه مورد مطالعه و کاربرد در پایش زیست‌محیطی
Amaral et al., (1998)	غنی‌شدگی آلی و آلودگی	در سواحل شمالی سائوپائولو، برزیل، <i>H. filiformis</i> و <i>C. capitata</i> در مناطق دارای شرایط نامناسب و غنی‌شدگی آلی فراوانی بیشتری داشتند. این یافته نشان می‌دهد که پرتاران فرصت‌طلب می‌توانند برای شناسایی غنی‌شدگی آلی و اختلال در رسوبات ساحلی به عنوان شاخص زیستی مورد استفاده قرار گیرند.
Castro et al. (2006)	سمیت و آلودگی رسوبات	در خور Ria de Aveiro، پرتغال، رشد و باروری <i>C. multisetosum</i> نسبت به بقا حساسیت بیشتری به شرایط نامطلوب رسوبات نشان داد. این پاسخ حساسیت، کاربرد دوجورپایان را در زیست‌سنجی سمیت و پایش کیفیت رسوبات نشان می‌دهد.
Yap et al. (2003)	Zn و Pb, Cd	در سواحل غربی مالزی، تجمع فلزات در بافت‌ها و رشته‌های بیسوس صدف بررسی شد و رشته‌های بیسوس به‌ویژه برای Zn قابلیت مناسبی برای زیست‌پایش نشان داد. بنابراین <i>P. viridis</i> و بافت‌های آن می‌توانند برای شناسایی آلودگی فلزات سنگین در محیط ساحلی استفاده شوند.
Wong et al. (2005)	فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی	در پایش شش‌ساله آب‌های ساحلی هنگ‌کنگ، الگوهای مکانی متفاوت آلاینده‌ها در بافت صدف مشاهده شد و برخی مناطق نزدیک منابع صنعتی غلظت بیشتری داشتند. این نتایج قابلیت <i>P. viridis</i> را برای پایش مکانی و زمانی آلودگی‌های ساحلی نشان می‌دهد.
Maanan (2007)	فلزات سنگین	در ساحل Safi مراکش، غلظت بالاتر برخی فلزات در ایستگاه‌های تحت تأثیر منابع صنعتی و شهری مشاهده شد. نتایج، کاربرد <i>M. galloprovincialis</i> را به عنوان زیست‌پایشگر آلودگی فلزات سنگین در مناطق ساحلی تأیید کرد.
Szefer et al. (2005)	فلزات سنگین	در سواحل دریای سیاه رومانی، غلظت فلزات در بافت‌های مختلف صدف بین مناطق متفاوت بود و تجمع فلزات در آبشش و توده احشایی قابل توجه بود. این نتایج استفاده از صدف را برای بررسی تجمع و پراکنش مکانی فلزات در محیط دریایی پشتیبانی می‌کند.
Fichet et al. (1998)	Pb, Cu, Cd و Zn	در مطالعه رسوبات بندار، مواجهه لاروها با رسوبات آلوده موجب افزایش تجمع برخی فلزات و اختلال در رشد و تکوین شد. بنابراین مراحل لاروی بی‌مهرگان دریایی می‌توانند برای ارزیابی زیست‌دسترسی و سمیت آلاینده‌های رسوبی استفاده شوند.
Radenac et al. (2001)	Pb, Cu, Cd و Zn	در شرایط آزمایشگاهی، جنین و لارو <i>P. lividus</i> توانایی تجمع فلزات را نشان دادند و افزایش غلظت برخی فلزات با افزایش تجمع آن‌ها همراه بود. این حساسیت، کاربرد مراحل جنینی و لاروی خارپوستان را در پایش سمیت و زیست‌دسترسی فلزات نشان می‌دهد.
Li et al. (2017)	فلزات سنگین و عوامل محیطی	در دلتای رود زرد چین، ارزیابی M-AMBI وضعیت نامطلوب اکولوژیک را نشان داد و فلزات سنگین، دما و عمق از عوامل مهم مرتبط با ساختار جامعه بودند. بنابراین اجتماعات ماکروبنطیک و M-AMBI می‌توانند برای ارزیابی سلامت اکولوژیک مناطق ساحلی تحت فشار انسانی استفاده شوند.
Yan et al. (2020)	یوتریفیکاسیون و فشارهای محیطی	در مجاورت مصب رود یانگ‌تسه چین، شاخص‌های AMBI، M-AMBI و BOPA وضعیت اکولوژیک را ارزیابی کردند و M-AMBI عملکرد مناسب‌تری در منطقه مطالعه داشت. این نتایج کاربرد شاخص‌های زیستی مبتنی بر ماکروبنطوز را در پایش یوتریفیکاسیون و فشارهای محیطی نشان می‌دهد.
Li et al. (2022)	کیفیت رسوب، اکسیژن محلول و فشارهای انسانی	در مناطق ساحلی شمال یانتای چین، ۱۵۳ گونه ثبت شد و ساختار جامعه با عمق، اکسیژن محلول و ویژگی‌های رسوب ارتباط داشت؛ مناطق نزدیک بندار و آبریز پروری کیفیت اکولوژیک پایین‌تری داشتند. این یافته‌ها استفاده از ساختار جامعه و M-AMBI را برای پایش کیفیت اکولوژیک آب‌های ساحلی پشتیبانی می‌کند.
Marujo Neves et al. (2025)	فلزات ردیابی، ماده آلی و فعالیت‌های انسانی	در یک سامانه خوری پرتغال، ارزیابی جامعه ماکروبنطیک با AMBI و M-AMBI در جاتی از اختلال اکولوژیک را نشان داد و نتایج به نحوه شناسایی گونه‌ها نیز وابسته بود. این یافته بر اهمیت شناسایی دقیق گونه‌ها و تلفیق داده‌های زیستی و شیمیایی در پایش کیفیت اکولوژیک تأکید می‌کند.

نتیجه‌گیری

مروری بر مطالعات نشان داد که گونه‌ها و جوامع ماکروبنیتیک می‌توانند ابزارهای مؤثری برای ارزیابی و پایش وضعیت اکولوژیکی اکوسیستم‌های دریایی باشند؛ با این حال، اثربخشی آنها به نوع استرس محیطی، ویژگی‌های بیولوژیکی گونه و شرایط اکولوژیکی منطقه بستگی دارد. تغییرات در ترکیب و فراوانی جوامع ماکروبنیتیک در رابطه با عواملی مانند یوتروفیکاسیون، تخریب زیستگاه، کیفیت رسوبات و تغییرات اکسیژن محلول می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد وضعیت محیط زیست ارائه دهد. بنابراین، انتخاب یک گونه یا جامعه شاخص نباید صرفاً بر اساس حضور یا فراوانی آن باشد، بلکه باید همزمان حساسیت و دامنه پاسخ گونه، ویژگی‌های زیستگاه، تنوع طبیعی و ارتباط آن با استرس مورد نظر را در نظر گرفت.

همچنین، مقایسه مطالعات مناطق مختلف نشان داد که تفاوت در دما، شوری، عمق، نوع رسوب و شدت فشارهای انسانی می‌تواند بر عملکرد شاخص‌ها تأثیر بگذارد؛ بنابراین، تعمیم نتایج بین مناطق مختلف بدون اعتبارسنجی و کالیبراسیون مناسب می‌تواند منجر به تفسیر نادرست شود. در این زمینه، استفاده از شاخص‌هایی مانند AMBI، M-AMBI و IndVal به همراه داده‌های محیطی می‌تواند چارچوب مناسب‌تری برای ارزیابی وضعیت اکولوژیکی فراهم کند. در نهایت، توسعه و اعتبارسنجی شاخص‌های متناسب با شرایط اکولوژیکی هر منطقه، به ویژه در خلیج فارس و دریای عمان، می‌تواند دقت پایش و قابلیت استفاده مدیریتی ماکروبنیتوزها را افزایش دهد.

بر اساس یافته‌های این بررسی، تحقیقات آینده در مورد استفاده از گونه‌ها و جوامع ماکروبنیتوز به عنوان شاخص‌های زیستی باید از شناسایی صرف گونه‌های شاخص به سمت توسعه و اعتبارسنجی شاخص‌های بومی، چند عاملی و قابل تعمیم حرکت کند. اول، با توجه به تفاوت در پاسخ‌های گونه‌های ماکروبنیتوز در مناطق جغرافیایی مختلف، مطالعات میدانی طولانی مدت برای شناسایی گونه‌های شاخص بومی و تعیین دامنه و آستانه پاسخ‌های آنها به عوامل مختلفی مانند غنی‌سازی آلی، کاهش اکسیژن، فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی و تغییرات دما مورد نیاز است. دوم، با توجه به اینکه اکثر مطالعات بررسی شده مربوط به سایر مناطق دریایی جهان است، یکی از اولویت‌های تحقیقاتی برای ایران، انجام مطالعات میدانی و بلندمدت در خلیج فارس و دریای عمان به منظور شناسایی گونه‌ها و جوامع شاخص ماکروبنیتوز، تعیین دامنه و آستانه پاسخ آنها به فشارهای محیطی و اعتبارسنجی شاخص‌هایی مانند AMBI، M-AMBI و IndVal است.

نتایج این مطالعات می‌تواند زمینه لازم را برای توسعه و بومی‌سازی ابزارهای زیستی متناسب با شرایط اکولوژیکی آب‌های جنوب ایران فراهم کند. سوم، استفاده همزمان از داده‌های زیستی، فیزیکی، شیمیایی و رسوب‌شناسی و ادغام آنها با روش‌های آماری چند متغیره و مدل‌های پیش‌بینی می‌تواند به تشخیص بهتر اثرات عوامل طبیعی از فشارهای انسانی کمک کند. همچنین، توسعه روش‌های جدید شناسایی مولکولی، از جمله بارکدگذاری DNA و eDNA، می‌تواند محدودیت‌های شناسایی مورفولوژیکی و کمبود اطلاعات طبقه‌بندی را کاهش دهد. از سوی دیگر، ایجاد یک پایگاه داده جامع و منطقه‌ای از گونه‌های ماکروبنیتوز، ویژگی‌های اکولوژیکی، گروه‌های حساسیت به آلودگی و پاسخ آنها به عوامل محیطی می‌تواند زمینه را برای استانداردسازی برنامه‌های پایش فراهم کند. در نهایت، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر طراحی برنامه‌های پایش بلندمدت و چند فشاری متمرکز شوند تا تغییرات ناشی از آلودگی، تغییرات اقلیمی، اوتروفیکاسیون و تخریب زیستگاه‌ها به طور همزمان ارزیابی شده و نقش گونه‌های شاخص در پیش‌بینی تغییرات آینده در اکوسیستم‌های دریایی با دقت بیشتری تعیین شود.

References

- Alsaffar, Z., Cúrdia, J., Borja, A., Irigoien, X., & Carvalho, S. (2019). Consistent variability in beta-diversity patterns contrasts with changes in alpha-diversity along an onshore to offshore environmental gradient: the case of Red Sea soft-bottom macrobenthos. *Marine Biodiversity*, 49, 247-262. DOI: 10.1007/s12526-017-0791-3
- Amaral, A. C., Morgado, E. H., & Salvador, L. B. (1998). Polychaetes as bioindicators of organic pollution on the beaches of São Paulo. *Revista brasileira de biologia*, 58(2), 307-316. 10.1016/j.ocecoaman.2023.106645
- Antonelli et al., 2016: Antonelli, L., Foata, J., Quilichini, Y., & March&, B. (2016). Influence of season & site location on European cultured sea bass parasites in Corsican fish farms using indicator

species analysis (IndVal). *Parasite Research*, 115(2), 561-568. <https://doi.org/10.1007/s00436-015-4772-9>

Bendtsen & Hansen, 2013: Bendtsen, J., & Hansen, J. L. S. (2013). A model of life cycle, connectivity & population stability of benthic macro-invertebrates in the North Sea/Baltic Sea transition zone. *Ecological Modelling*, 267, 54-65. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.07.012>

Bouchet, V. M. P., Telford, R. J., Rygg, B., Oug, E., & Alve, E. (2018). Can benthic foraminifera serve as proxies for changes in benthic macrofaunal community structure? Implications for the definition of reference conditions. *Marine Environmental Research*, 137, 24-36. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.02.023>

Burger, J. (2006). Bioindicators: Types, development, & use in ecological assessment & research. *Environmental Bioindicators*, 1(1), 22-39. <https://doi.org/10.1080/15555270590966483>

Bustos-Baez, S., & Frid, C. (2003). Using indicator species to assess the state of macrobenthic communities: Advances in polychaete research. *Hydrobiologia*, 496(1-3), 299-309. <https://doi.org/10.1023/A:1026169520547>

Carvalho, L. R. S., Loiola, M., & Barros, F. (2017). Manipulating habitat complexity to understand its influence on benthic macrofauna. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 489, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.01.014>

Castro, H., Ramalheira, F., Quintino, V., & Rodrigues, A. M. (2006). Amphipod acute & chronic sediment toxicity assessment in estuarine environmental monitoring: An example from Ria de Aveiro, NW Portugal. *Marine Pollution Bulletin*, 53(1-4), 91-99. [10.1016/j.marpolbul.2005.09.029](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.09.029)

Checon, H. H., Vieira, D. C., Corte, G. N., Sousa, E. C. P. M., Fonseca, G., & Amaral, A. C. Z. (2018). Defining soft bottom habitats & potential indicator species as tools for monitoring coastal systems: A case study in a subtropical bay. *Ocean & Coastal Management*, 164, 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.035>

Chen, L. L., Wang, Q. C., Li, X. J., Zhou, Z. Q., & Li, B. Q. (2016). Long-term trends of macrobenthos in southern Bohai Sea, China, in relation to environmental changes. *Scientia Sinica Vitae*, 46(9), 1121-1134. <https://doi.org/10.1360/N052016-00063>

Borja, A., Franco, J., & Pérez, V. (2000). A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine & coastal environments. *Marine pollution bulletin*, 40(12), 1100-1114. DOI: 10.1016/S0025-326X(00)00061-8

Chytrý, M., Tichý, L., Holt, J., & Botta-Dukát, Z. (2002). Determination of diagnostic species with statistical fidelity measures. *Journal of Vegetation Science*, 13(1), 79-90. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2002.tb02025.x>

Coutellec, M., & Barata, C. (2013). Special issue on long-term ecotoxicological effects: An introduction. *Ecotoxicology*, 22(5), 763-766. <https://doi.org/10.1007/s10646-013-1092-7>

De Cáceres, M., Legendre, P., & Moretti, M. (2010). Improving indicator species analysis by combining groups of sites. *Oikos*, 119(10), 1674-1684. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18334.x>Digital Object Identifier (DOI)

De la Vega, C., Paar, M., Köhler, L., von Dorrien, C., Kriegl, M., Oesterwind, D., & Schubert, H. (2023). Trophic redundancy in benthic fish food webs increases with scarcity of prey items, in the southern Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*, Article 1143792. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1143792>

Dean, H. K. (2015). The use of polychaetes (Annelida) as indicator species of marine pollution: A review. *Revista de Biología Tropical*, 56, 1-11. DOI:10.15517/RBT.V56I4.27162

Dufrêne, M., & Legendre, P. (1997). Species assemblages & indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 67(3), 345-366. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(1997\)067\[0345:SAAIST\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(1997)067[0345:SAAIST]2.0.CO;2)

Ellis, J., Anlauf, H., Kürten, S., Lozano-Cortés, D., Alsaffar, Z., Cúrdia, J., ... & Carvalho, S. (2017). Cross shelf benthic biodiversity patterns in the Southern Red Sea. *Scientific reports*, 7(1), 437. DOI: 10.1038/s41598-017-00507-y

Fichet, D., Radenac, M.-H., & Miramand, P. (1998). Experimental studies of impacts of harbour sediments resuspension to marine invertebrates larvae: Bioavailability of Cd, Cu, Pb & Zn & toxicity. *Marine Pollution Bulletin*, 36(7), 509-518. [10.1016/S0025-326X\(97\)00190-2](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(97)00190-2)

- Fonseca, G., & Gallucci, F. (2016). The need of hypothesis-driven designs & conceptual models in impact assessment studies: An example from the free-living marine nematodes. *Ecological Indicators*, 71, 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.051>
- Gadelha, J. R., Morgado, F., & Soares, A. M. V. M. (2013). Histology & histochemistry of sea anemones in environmental contamination studies. *Microscopy & Microanalysis*, 19(S4), 57-58. <https://doi.org/10.1017/S1431927613000901>
- Gallo, L., Corapi, A., Loppi, S., & Lucadamo, L. (2014). Element concentrations in the lichen *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf transplanted around a cement factory (Southern Italy). *Ecological Indicators*, 46, 566-574. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.029>
- Geng, N., Wu, Y., Zhang, M., Tsang, D. C., Rinklebe, J., Xia, Y., ... & Ok, Y. S. (2019). Bioaccumulation of potentially toxic elements by submerged plants & biofilms: A critical review. *Environment international*, 131, 105015. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105015
- Gérard, C., & Lance, E. (2019). Decline of freshwater gastropods exposed to recurrent interacting stressors implying cyanobacterial proliferations & droughts. *Aquatic Ecology*, 53(1), 79-96. <https://doi.org/10.1007/s10452-019-09674-8>
- Gesteira, J. G., & Dauvin, J. C. (2000). Amphipods are good bioindicators of the impact of oil spills on soft-bottom macrobenthic communities. *Marine Pollution Bulletin*, 40(11), 1017-1027. DOI: 10.1016/S0025-326X(00)00046-1
- Gislason, H., Bastardie, F., Dinesen, G. E., Egekvist, J., & Eigaard, O. R. (2017). Lost in translation? Multi-metric macrobenthos indicators & bottom trawling. *Ecological Indicators*, 82, 260-270. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.004>
- Halpern, B. S., Frazier, M., Potapenko, J., Casey, K. S., Koenig, K., Longo, C., ... & Walbridge, S. (2015). Spatial & temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean. *Nature communications*, 6(1), 7615. <https://www.nature.com/articles/ncomms8615>
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J. F., Casey, K. S., Ebert, C., Fox, H. E., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H. S., Madin, E. M. P., Perry, M. T., Selig, E. R., Spalding, M., Steneck, R., Watson, R. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319(5865), 948-952. <https://doi.org/10.1126/science.1149345>
- Han, W., & Han, Q. (2024). Macrobenthic indicator species: From concept to practical applications in marine ecology. *Global Ecology & Conservation*, e03262.
- Han, W., Yan, R., Peng, S., Zhou, W., Yang, Y., & Han, Q. (2025). Integrated macrobenthic TITAN, AMBI, & M-AMBI indices for assessment of marine ecological quality in the East China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 214, 117704. 10.1016/j.marpolbul.2025.117704
- Hill, M. O. (1979). Twinspan: A Fortran program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of individual & attributes. Cornell University Press.
- ISO. (1979). International Organisation for Standardisation (ISO) (1979). Assessment of the biological quality of rivers by a macroinvertebrate "score". ISO/TC 147/SC 5/WG 6/N5 (Geneva: International Organisation for Standardisation, ISO) 18.
- Ito, M., Ito, K., Ohta, K., Hano, T., Onduka, T., Mochida, K., & Fujii, K. (2016). Evaluation of bioremediation potential of three benthic annelids in organically polluted marine sediment. *Chemosphere*, 163, 392-399. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.046>
- Keup, L. E., Mackenthun, K. M., & Ingram, W. M. (1967). Biology of water pollution: A collection of selected papers on stream pollution, waste water, & water treatment. United States Department of the Interior, Federal Water Pollution Control Administration.
- Khedhri, I., Atoui, A., Ibrahim, M., Afli, A., & Aleya, L. (2016). Assessment of surface sediment dynamics & response of benthic macrofauna assemblages in Boughrara Lagoon (SW Mediterranean Sea). *Ecological Indicators*, 70, 77-88.
- Kolkwitz, R., & Marsson, M. (1908). Ecological plant saprobionts. *Bericht der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 26a, 505-519.
- Kolkwitz, R., & Marsson, M. (1909). Ecology of animal saprobionts. *International Review of Hydrobiology & Hydrography*, 2, 126-152.
- L&res, P. B., Verner, J., & Thomas, J. W. (1988). Ecological uses of vertebrate indicator species: a critique. *Conservation biology*, 2(4), 316-328.

- Leonardsson, K., Blomqvist, M., & Rosenberg, R. (2009). Theoretical & practical aspects on benthic quality assessment according to the EU Water Framework Directive – Examples from Swedish waters. *Marine Pollution Bulletin*, 58(9), 1286-1296. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.05.007>
- Levin, L. A., & Gage, J. D. (1998). Relationships between oxygen, organic matter & the diversity of bathyal macrofauna. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 45(1-3), 129-163.
- Li, B., Jiang, S., Lü, J., Chen, L., Yan, L., Liu, C., Li, X., Song, B., & Li, X. (2020). Species composition & long-term variation of macrobenthos in intertidal zone & offshore areas of the Yellow River Delta. *Biodiversity Science*, 28(12), 1511–1522. <https://doi.org/10.17520/biods.2020164>
- Li, B., Li, X., Bouma, T. J., Soissons, L. M., Cozzoli, F., Wang, Q., Zhou, Z., & Chen, L. (2017). Analysis of macrobenthic assemblages & ecological health of Yellow River Delta, China, using AMBI & M-AMBI assessment method. *Marine Pollution Bulletin*, 119(2), 23–32. [10.1016/j.marpolbul.2017.03.044](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.044)
- Li, B., Li, X., Bouma, T. J., Soissons, L. M., Cozzoli, F., Wang, Q., ... & Chen, L. (2017). Analysis of macrobenthic assemblages & ecological health of Yellow River Delta, China, using AMBI & M-AMBI assessment method. *Marine Pollution Bulletin*, 119(2), 23-32.
- Li, B., Wang, Q., & Li, B. (2013). Assessing the benthic ecological status in the stressed coastal waters of Yantai, Yellow Sea, using AMBI & M-AMBI. *Marine pollution bulletin*, 75(1-2), 53-61.
- Li, F., Ma, Y., Song, X., Li, S., Zhang, X., Wang, X., Wang, T., & Sun, Z. (2022). Community structure & ecological quality assessment of macrobenthos in the coastal sea areas of Northern Yantai, China. *Frontiers in Marine Science*, 9, 989034. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.989034>
- Liu, C., Xu, Q., Wang, Z., Jiang, X., Ding, G., Ren, Q., Song, J., & Liu, M. (2023). Community structure of benthic molluscs shaped by environmental & ecological variables in the coastal waters of Changle, Fujian Province, China. *Frontiers in Marine Science*, 10, Article 1045393. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1045393>
- Liu, L. S., Li, Z. Y., Meng, W., Zheng, B. H., & Hu, X. A. (2007). The community structure of zoobenthos & bioassessment of water quality in the lower reaches of the Songhua River. *Research of Environmental Sciences*, 20(3), 81-86.
- Liu, L. S., Meng, W., Li, X. Z., Li, Z. C., Zheng, B. H., Lei, K., & Li, Z. Y. (2009). Studies on macrobenthos in the northern waters of Liaodong Bay: II. Biodiversity & community structure. *Research of Environmental Sciences*, 22(2), 155-161.
- Liu, X. D., Wang, J. S., Sun, L. E., Cui, W. L., & Li, Z. (2021). Community structure & diversity of macrozoobenthos at Bohai Sea off Sh&ong. *Marine Environmental Science*, 40(6), 929-936.
- Liu, X. S., Zhao, R., Hua, E., Lu, L., & Zhang, Z. N. (2014). Macrofaunal community structure in the Laizhou Bay in summer & the comparison with historical data. *Mar. Sci. Bull*, 33(10).
- Luo, X. X., & Yang, J. Q. (2009). Progress in researches on benthic indices of assessing marine ecosystem health. *Marine Science Bulletin*, 28(3), 106-112.
- Maanan, M. (2007). Biomonitoring of heavy metals using *Mytilus galloprovincialis* in Safi coastal waters, Morocco. *Environmental Toxicology*, 22(5), 525–531. <https://doi.org/10.1002/tox.20301>
- Martin, J. P., Lizarralde, Z. I., Pittaluga, S., Sar, A. M., Perroni, M., & Torres, S. (2019). Macrobenthic assemblages of intertidal flats in Southern Patagonia, Argentina. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 35, 689-705.
- Marujo Neves, J., Martins, M., Adão, H., Mil-Homens, M., Costa, M. H., & Lobo-Arteaga, J. (2025). Ecological quality assessment of estuarine macrobenthic communities using an integrative approach. *Marine Pollution Bulletin*, 210, 117316.
- McArthur, M. A., Brooke, B. P., Przeslawski, R., Ryan, D. A., Lucieer, V. L., Nichol, S., McCallum, A. W., Mellin, C., Cresswell, I. D., Radke, L. C. (2010). On the use of abiotic surrogates to describe marine benthic biodiversity. *Estuarine, Coastal & Shelf Science*, 88(1), 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.03.003>
- Nasi, F., Nordström, M. C., Bonsdorff, E., Auriemma, R., Cibic, T., & Del Negro, P. (2018). Functional biodiversity of marine soft-sediment polychaetes from two Mediterranean coastal areas in relation to environmental stress. *Marine Environmental Research*, 137, 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.03.002>
- Podleśińska, W., & Dąbrowska, H. (2019). Amphipods in estuarine & marine quality assessment – a review. *Oceanologia*, 61(2), 179-196. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2018.09.002>

- Radenac, G.-H., Fichet, D., & Miramand, P. (2001). Bioaccumulation & toxicity of four dissolved metals in *Paracentrotus lividus* sea-urchin embryo. *Marine Environmental Research*, 51(2), 151–166. 10.1016/S0141-1136(00)00092-1
- Rakaj, A., Morroni, L., Grosso, L., Fianchini, A., Pensa, D., Pellegrini, D., & Regoli, F. (2021). Towards sea cucumbers as a new model in embryo-larval bioassays: *Holothuria tubulosa* as test species for the assessment of marine pollution. *Science of the Total Environment*, 787, Article 147593. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147593>
- Reish, D. I. (1985). A discussion of the importance of screen size in washing quantitative marine bottom samples. *Ecology*, 46(2), 307-309. <https://doi.org/10.2307/1930047>
- Somers, H. L. (1958). Benthic Studies in Buzzards Bay. I. Animal-Sediment Relationships 1. *Limnology & oceanography*, 3(3), 245-258.
- Siddig, A. A. H., Ellison, A. M., Ochs, A., Villar-Leeman, C., & Lau, M. K. (2016). How do ecologists select & use indicator species to monitor ecological change? Insights from 14 years of publication in ecological indicators. *Ecological Indicators*, 60, 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.036>
- Sobczyk, R., Czortek, P., Serigstad, B., & Pabis, K. (2021). Modelling of polychaete functional diversity: Large marine ecosystem response to multiple natural factors & human impacts on the West African continental margin. *Science of the Total Environment*, 792, Article 148075. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148075>
- Sukumaran, S., Vijapure, T., Mulik, J., & Ridha, H. (2021). Marine macrobenthos of North West India- Reviewing the known & unknown. *Frontiers in Marine Science*, 8, 671245.
- Szefer, P., Kim, B.-S., Kim, C.-K., Kim, E.-H., & Lee, C.-B. (2005). Biomonitoring of trace metals in the Black Sea (Romania) using mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Water Research*, 39(4), 596–604. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.09.026>
- Wang, Z., Wang, H., Fan, S., Xin, M., & Sun, X. (2021). Community structure & diversity of macrobenthos in Jiaozhou Bay. *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112781.
- Wong, C. K. C., Cheung, R. Y. H., & Wong, M. H. (2005). Biomonitoring of heavy metals & trace organics using the intertidal mussel *Perna viridis* in Hong Kong coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, 51(8–12), 857–875. 10.1016/j.marpolbul.2005.04.014
- Xu, Y., & Li, X. Z. (2021). Macrobenthos & offshore ecosystem health evaluation. *Science*, 73, 30-34.
- Yan, J., Sui, J., Xu, Y., Li, X., Wang, H., & Zhang, B. (2020). Assessment of the benthic ecological status in adjacent areas of the Yangtze River Estuary, China, using AMBI, M-AMBI & BOPA biotic indices. *Marine Pollution Bulletin*, 157, 111020. 10.1016/j.marpolbul.2020.111020
- Yang, C., Ding, S., Niu, Y., Zhang, X., & Li, J. (2024). Characteristics of Macrobenthic Communities & their Response to Environmental Changes in East Taihu Lake, China.
- Yap, C. K., Ismail, A., & Tan, S. G. (2003). Can the byssus of green-lipped mussel *Perna viridis* (Linnaeus) from the west coast of Peninsular Malaysia be a biomonitoring organ for Cd, Pb & Zn? Field & laboratory studies. *Environment International*, 29(4), 521–528. 10.1016/S0160-4120(03)00008-4
- Zhang, W., Liu, X., Cheng, H., Zang, J., & Xu, H. (2012). Distribution & community structure of macrobenthos in relation to environmental factors in the Yellow Sea. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 4050–4061
- Zhang, Y., Li, S. W., Lv, Z. B., Ma, Y. Q., Liu, Y. J., Wei, Z. H., & Chen, W. (2013). Application of polychaete in ecological environment evaluation of Laizhou Bay. *Acta Ecol. Sin.*, 33, 2522-2530.