



Monitoring of Copper and Zinc in bottom sediments and tissues of Tigertooth Croaker (*Otolithes ruber*) and assessment of ecological and consumer health risks in the Oman Sea

Ghazale Harati Mokhtari¹ | Parvin Sadeghi^{2✉} | Arash Shakouri³

1. Department of Marine Biology, Marine Science Faculty, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran. E-mail: ghazaleharati@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Marine Biology, Marine Science Faculty, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran. E-mail: parvin.sadeghi@gmail.com

3. Department of Marine Biology, Marine Science Faculty, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran. E-mail: shakouricmu@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 16 February 2026

Received in revised form 2

May 2026

Accepted 3 May 2026

Keywords:

Bioaccumulation,

Chabahar Bay,

Heavy metals,

Otolithes ruber,

Risk assessment,

Sediment.

ABSTRACT

Heavy metals are among the most important pollutants in aquatic ecosystems due to their high persistence, toxicity, and bioaccumulation potential, and they can seriously affect the health of aquatic organisms and humans. The aim of this study was to investigate the bioaccumulation of copper (Cu) and zinc (Zn) in liver and muscle tissues of tigertooth croaker (*Otolithes ruber*), to assess sediment contamination, and to evaluate ecological risk and non-carcinogenic health risks associated with the consumption of this species in Chabahar Bay and the Oman Sea. Sampling of *O. ruber* was conducted using gill nets, and surface sediments were collected using a Van Veen grab sampler from five stations—Tis, Ramin, Beris, Pasabandar, and Gowatr—during autumn 2015. After sample preparation and acid digestion, metal concentrations were determined using atomic absorption spectrophotometry. The results indicated that the mean concentrations of Cu and Zn in liver tissues were significantly higher than those in muscle tissues ($P < 0.05$). The highest bioaccumulation levels of both metals were observed in fish collected from the Beris station. Sediment contamination assessment using the contamination factor (CF) showed that Cu ranged from considerable to very high contamination levels, while Zn exhibited moderate to considerable contamination. Human health risk assessment revealed that the estimated daily intakes (EDI) and weekly intake (EWI) values of metals were less than the tolerable daily intake (TDI) of metals. Furthermore, the target hazard quotient (THQ) values for Cu and Zn were below the critical threshold of 1 at all stations, indicating no significant non-carcinogenic health risk for consumers of *O. ruber*. Nevertheless, the observed sediment contamination levels and metal accumulation patterns in fish tissues highlight the need for continuous monitoring of heavy metals and effective management of pollution sources in the study area.

Cite this article: Harati Mokhtari, G., Sadeghi, P., & Shakouri, A. (2026). Monitoring of Copper and Zinc in bottom sediments and tissues of Tigertooth Croaker (*Otolithes ruber*) and assessment of ecological and consumer health risks in the Oman Sea. *Journal of Natural Environment*, 79 (2), 267-285. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.411365.2894>



Introduction

Heavy metals are among the most persistent and potentially toxic pollutants in aquatic ecosystems due to their non-biodegradable nature, high environmental stability, and ability to bioaccumulate and biomagnify through food webs. Coastal and marine environments are particularly vulnerable to heavy metal contamination as a result of increasing anthropogenic activities such as industrial discharges, shipping traffic, aquaculture, urban wastewater, and oil-related operations. Although some metals such as copper (Cu) and zinc (Zn) are essential trace elements involved in enzymatic reactions and metabolic processes in aquatic organisms, excessive exposure can induce oxidative stress, tissue damage, and adverse ecological and human health effects. The Oman Sea and Chabahar Bay represent ecologically and economically important marine regions due to their high biodiversity and dependence of local communities on fisheries. *Otolithes ruber* (tigertooth croaker) is a commercially valuable and widely consumed coastal fish species in this region, making it a suitable bioindicator for assessing metal contamination and potential health risks. This study aimed to (i) determine the concentrations of Cu and Zn in liver and muscle tissues of *O. ruber*, (ii) assess the contamination status of surface sediments, (iii) evaluate ecological risk using contamination factor (CF), and (iv) estimate non-carcinogenic human health risks associated with fish consumption.

Material and Methods

Sampling was conducted during autumn 2015 at five coastal stations in the Oman Sea and Chabahar Bay, including Tis, Ramin, Beris, Pasabandar, and Gowatr. A total of 30 specimens of *O. ruber* were collected from each station using gill nets operated by local fishermen. Surface sediment samples (0–5 cm) were collected in triplicate using a Van Veen grab sampler. Fish biometric parameters (total length and weight) were recorded prior to dissection. Liver and dorsal muscle tissues were separated, oven-dried, homogenized, and digested using concentrated nitric acid. Sediment samples were dried, sieved (<63 µm), and digested with a mixture of nitric and perchloric acids. Concentrations of Cu and Zn were determined using flame atomic absorption spectrophotometry (AAS). Ecological risk was assessed using the contamination factor (CF), calculated by comparing measured sediment concentrations with background values. Human health risk assessment was performed by estimating daily intake (EDI), weekly intake (EWI), and the target hazard quotient (THQ) based on fish consumption rates and reference doses recommended by USEPA.

Results

The results showed that Cu and Zn concentrations were significantly higher in liver tissues compared to muscle tissues across all sampling stations ($P < 0.05$). The highest mean concentrations of both metals in fish tissues were observed at the Beris station, while the lowest values were recorded at Tis. Sediment analysis revealed elevated concentrations of Cu and Zn, particularly at Beris, Ramin, and Pasabandar stations. CF values indicated considerable to very high contamination for Cu and moderate to considerable contamination for Zn in most stations. Despite elevated metal concentrations in sediments and fish tissues, calculated EDI and EWI values for both metals were below the tolerable daily intake (TDI). Moreover, THQ values for Cu and Zn were less than 1 at all stations, suggesting no significant non-carcinogenic health risk from consuming *O. ruber*.

Discussion and Conclusion

The significantly higher accumulation of Cu and Zn in liver tissues reflects the physiological role of the liver as a primary organ for detoxification, storage, and redistribution of metals. The presence of metallothioneins and high metabolic activity enhances metal-binding capacity in this tissue (Mziray and Kimirei et al., 2016). Spatial variations in metal concentrations among stations are likely associated with differences in anthropogenic pressures, including fishing harbor activities, boat maintenance, fuel leakage, and coastal runoff. The strong correspondence between elevated sediment metal concentrations and higher bioaccumulation in fish tissues highlights the role of sediments as long-term reservoirs and secondary sources of metal pollution. Although Cu and Zn are essential elements, excessive levels may pose ecological stress to benthic organisms and fish populations over

time. This study demonstrates that *O. ruber* from the Oman Sea and Chabahar Bay accumulates considerable levels of Cu and Zn, particularly in liver tissues, reflecting both environmental contamination and physiological regulation mechanisms. Sediment contamination ranged from moderate to high, indicating ongoing anthropogenic impacts in the study area. However, human health risk assessment based on muscle consumption revealed that current exposure levels do not pose significant non-carcinogenic risks to consumers. Continuous monitoring and management strategies are nevertheless recommended to prevent future escalation of heavy metal pollution and to safeguard ecosystem and food safety in the region.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

پایش فلزات سنگین مس و روی در رسوبات بستر و بافت‌های ماهی شوریده (*Otolithes ruber*) و ارزیابی ریسک اکولوژیک و سلامت مصرف‌کنندگان در دریای عمان

غزاله هراتی مختاری^۱ | پروین صادقی^۲ | آرش شکوری^۳

۱. گروه زیست‌شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران. رایانامه: ghazaleharati@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه زیست‌شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران. رایانامه: parvin.sadeghi@gmail.com
۳. گروه زیست‌شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران. رایانامه: shakouricmu@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳ کلیدواژه‌ها: تجمع زیستی، خلیج چابهار، فلزات سنگین، ماهی شوریده، ارزیابی خطر، رسوب.	فلزات سنگین به دلیل پایداری بالا، سمیت و قابلیت تجمع زیستی، از مهم‌ترین آلاینده‌های بوم‌سازگان‌های آبی به‌شمار می‌روند و می‌توانند سلامت آبزیان و انسان را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار دهند. هدف از این مطالعه، بررسی میزان تجمع زیستی فلزات سنگین مس (Cu) و روی (Zn) در بافت‌های کبد و عضله ماهی شوریده (<i>Otolithes ruber</i>)، ارزیابی آلودگی رسوبات و تعیین ریسک اکولوژیک و خطرات غیرسرطان‌زایی ناشی از مصرف این گونه در خلیج چابهار و دریای عمان بود. نمونه‌برداری از ماهی شوریده با تور گوشگیر و رسوب سطحی با غرب ون-وین از پنج ایستگاه تیس، رمین، بريس، پسابندر و گواتر در پاییز سال ۱۳۹۴ انجام شد. پس از آماده‌سازی و هضم اسیدی نمونه‌ها، غلظت فلزات با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که میانگین غلظت فلزات مس و روی در بافت کبد به‌طور معنی‌داری بیشتر از بافت عضله است ($P < 0.05$). بیشترین مقادیر تجمع زیستی هر دو فلز در ماهیان صیدشده از ایستگاه بريس مشاهده شد. ارزیابی آلودگی رسوبات با استفاده از شاخص فاکتور آلودگی (CF) نشان داد که فلز مس در سطح آلودگی قابل توجه تا زیاد و فلز روی در سطح آلودگی متوسط تا قابل توجه قرار دارد. نتایج ارزیابی ریسک سلامت انسان نشان داد که مقادیر جذب روزانه (EDI) و هفتگی (EWI) فلزات کمتر از میزان جذب قابل تحمل روزانه فلزات (TDI) بود. همچنین شاخص پتانسیل خطر غیرسرطان‌زایی (THQ) برای مس و روی در تمامی ایستگاه‌ها کمتر از مقدار بحرانی یک بود که بیانگر عدم وجود خطر قابل توجه برای مصرف‌کنندگان ماهی شوریده می‌باشد. با این حال، سطوح آلودگی رسوبات و الگوی تجمع فلزات در بافت‌های ماهی، ضرورت پایش مستمر فلزات سنگین و مدیریت منابع آلاینده در منطقه مورد مطالعه را تأکید می‌کند.

استناد: ب هراتی مختاری، غزاله؛ صادقی، پروین، و شکوری، آرش (۱۴۰۵). پایش فلزات سنگین مس و روی در رسوبات بستر و بافت‌های ماهی شوریده (*Otolithes ruber*) و ارزیابی ریسک اکولوژیک و سلامت مصرف‌کنندگان در دریای عمان. محیط زیست طبیعی، ۷۹ (۲)، ۲۶۷-۲۸۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.411365.2894>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

امروزه، عناصر سمی مانند فلزات سنگین آلاینده‌های اصلی محیط‌زیست هستند و به مهم‌ترین نگرانی محیط‌زیستی جهانی برای سیستم‌های آبی مانند اقیانوس‌ها، دریاها و رودخانه‌ها تبدیل شده‌اند (Ustaoğlu et al., 2024). فلزات سنگین ترکیباتی سمی و غیرقابل تجزیه زیستی هستند که از منابع طبیعی و انسانی، از جمله فرآیندهای زمین‌شناختی، فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی، پساب‌های خانگی و منابع جوی منشأ می‌گیرند (Qin et al., 2021). به دلیل سمیت بالا، فراوانی، پایداری، قابلیت تجمع زیستی و بزرگنمایی زیستی، فلزات سنگین می‌توانند اثرات نامطلوبی بر حیات آبزیان داشته باشند (Han et al., 2021). فلزات سنگین در عین حال نقش‌های ضروری به عنوان کوفاکتور در بسیاری از واکنش‌های آنزیمی ایفا می‌کنند و برای انجام فعالیت‌های متابولیکی گوناگون در جانوران و انسان ضروری هستند (Almafrachi et al., 2025). فلز روی (Zn) برای واکنش‌های آنزیمی مختلف و فرآیندهای متابولیکی مهم است، زیرا نقش اساسی روی به دلیل حضور آن به عنوان جزء جدایی‌ناپذیر چندین متالوآنزیم و نیز به عنوان یک کاتالیزور در تنظیم فعالیت آنزیم‌ها اثبات شده است. همچنین روی به عملکرد سیستم ایمنی ماهی کمک می‌کند (Yap and Al-Mutairi, 2022). فلز مس (Cu) عنصر ضروری درگیر در چندین فرآیند زیستی، از جمله انتقال اکسیژن، تشکیل رنگدانه و عملکرد آنزیم است (Majed et al., 2019). مس برای استفاده مناسب از آهن در بدن ضروری است و به عنوان یک کوفاکتور در آنزیم‌های دخیل در متابولیسم گلوکز و سنتز هموگلوبین، بافت همبند و فسفولیپیدها نقش دارد (Yap and Al-Mutairi, 2022). در پایش آلاینده‌های فلزی در ماهیان خوراکی فلزات سنگین روی و مس معمولاً بیشترین اندازه‌گیری را در متون علمی به خود اختصاص داده‌اند، زیرا از جمله فلزات ضروری در سیستم زیستی محسوب می‌شوند. اما هر دو فلز در مقادیر زیاد سمی هستند و باعث استرس اکسیداتیو، تغییرات رفتاری، آسیب به آبشش‌ها، کبد و کلیه‌ها می‌شوند (Łuczyńska et al., 2018; Dorsey et al., 2021). از سوی دیگر، در صورت تجاوز دریافت غذایی آنها از آستانه‌های مجاز، می‌توانند به عنوان فلزات بالقوه سمی مطرح شوند و خطر بالقوه‌ای برای سلامت انسان ایجاد کنند (Blankson et al., 2024). آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (EPA) شاخص خطر (THQ) را به عنوان معیاری برای ارزیابی خطرات سلامت تعریف کرده است که می‌تواند خطرات بالقوه سلامت محیطی ناشی از مواجهه طولانی‌مدت با مواد سمی مضر را ارزیابی کند. این شاخص نه تنها دریافت روزانه فلزات، بلکه مقدار و مدت تماس، وزن بدن و دوز مرجع خوراکی (RfD) را نیز در نظر می‌گیرد (Anwarul Hasan et al., 2022).

رسوبات به عنوان مخازن بلندمدت فلزات سنگین نقش حیاتی ایفا می‌کنند و به تدریج این آلاینده‌ها را به ستون آب آزاد می‌سازند؛ فرآیندی که می‌تواند اثرات نامطلوبی بر جانداران آبی داشته باشد (Olwojuni et al., 2025). از جمله دلایلی که پایش آلاینده‌های تجمع‌یافته در رسوبات را پراهمیت می‌سازد این است که برخی از موجودات آبی بخش زیادی از زندگی خود را در درون بستر یا در سطح آن طی می‌کنند، بنابراین مواد ته‌نشین‌شده در رسوبات می‌تواند وارد بدن موجودات دیگر گردد و در نهایت از طریق بزرگ‌نمایی زیستی به بدن انسان منتقل شود (Liu et al., 2021).

دریای عمان به دلیل برخورداری از ذخایر گیاهی و جانوری و تنوع زیستی و تنوع ژنتیکی، یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های آبی در قاره آسیا می‌باشد که توجه پژوهشگران و محققان محیط‌زیست را به خود جلب کرده است. فعالیت‌هایی که در طی سالیان پی‌درپی توسط لنگ‌های صیادی صورت گرفته، باعث آلودگی رسوبات بستر اسکله‌های صیادی منطقه شده است (Sadeghi et al., 2019). از منابع ورود فلزات سنگین به دریای عمان و خلیج چابهار، صنایع آبی‌پروری، رواناب‌های سطحی، نشت نفت از طریق حمل‌ونقل و تردد کشتی‌ها، شستشوی تانکرها و تخلیه آب توازن کشتی‌ها و مراکز دفن پسماند در حاشیه دریا می‌باشند (Hamzeh et al., 2014; Sadeghi et al., 2021).

ماهی منبع ارزشمند و مهمی از مواد مغذی ضروری از جمله پروتئین، فسفولیپیدها، اسیدهای چرب غیراشباع، برخی مواد معدنی، ویتامین‌ها و اسیدهای چرب امگا-۳ برای انسان است (Kaleshkumar et al., 2022). از آنجا که ماهیان منبع اصلی پروتئین برای جمعیت‌های ساحلی محسوب می‌شوند، می‌توانند مقادیر قابل‌توجهی از فلزات سنگین را در بافت‌های خود انباشته کنند. در نتیجه، مواجهه مزمن با آبزیان آلوده می‌تواند منجر به بروز مشکلات متعددی برای سلامت انسان شود (Akila et al., 2022).

(2022). ماهی شوریده (*Otolithes ruber*, Bloch & Schneider, 1801) از خانواده شوریده ماهیان *Sciaenidae* و جزء ماهیان مهاجر کرانه‌ای محسوب می‌شود. این گونه در آب‌های ساحلی گرمسیری، عمدتاً در عمق ۱۰ تا ۵۰ متر (گاهی تا ۱۰۰ متر) یافت می‌شود. زیستگاه آن شامل بسترهای شنی، گلی و صخره‌ای در آب‌های دریایی و لب‌شور است. این گونه از شرق آفریقا تا چین جنوبی و کوئینزلند استرالیا، ویتنام شمالی، غرب اقیانوس آرام، خلیج فارس، دریای عمان، سواحل هند و پاکستان نیز پراکنش دارد (Eskandari et al., 2012; Eagderi et al., 2026). ماهی شوریده در مرحله جوانی عمدتاً از سخت‌پوستان پلانکتونی نزدیک سطح آب تغذیه می‌کنند و در مرحله بلوغ از نرم‌تنان، کرم‌ها، میگوها و ماهی‌های کوچک تغذیه می‌کند (Passoupathy and Natarajan, 1987). دوره تخم‌ریزی ماهی شوریده در سواحل سیستان و بلوچستان از آذر تا اواخر فروردین گزارش گردیده است (Taghavi Motlagh et al., 2004). تاکنون در مطالعات متعددی به بررسی تجمع فلزات سنگین در بافت‌های گونه‌های مختلف ماهیان دریایی مانند ماهی شوریده در خلیج فارس و دریای عمان پرداخته شده است (Khorasani et al., 2013; Sadeghi et al., 2019). اما نظر به اینکه ماهی شوریده ارزش غذایی و تجاری بالایی دارد، لزوم پایش مداوم میزان فلزات سنگین و آگاهی از مقدار آن در بافت‌های این گونه و همزمان رسوب منطقه حضور این ماهی، و بررسی خطرات ناشی از تجمع عناصر سنگین در بدن این گونه و ارزیابی ریسک خطر برای سلامت مصرف‌کنندگان این ماهی الزامی است. از این‌رو نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند از جهت سلامت و امنیت غذایی مصرف‌کنندگان ماهی شوریده حائز اهمیت باشد تا از بروز خطرهای انسانی نیز پیش‌گیری شود. بنابراین هدف از مطالعه حاضر اندازه‌گیری مقدار تجمع زیستی فلزات سنگین مس و روی در بافت‌های کبد و عضله ماهی شوریده و رسوب ایستگاه‌های مختلف در خلیج چابهار و دریای عمان و ارزیابی ریسک اکولوژیک رسوبات و پتانسیل خطر غیرسرطان‌زایی ناشی از مصرف ماهی شوریده در دریای عمان است.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه: براساس مطالعات قبلی که در زمینه آلودگی دریای عمان و خلیج چابهار انجام شده و افزایش میزان آلاینده‌هایی چون فلزات سنگین به این بوم‌سامانه را گزارش نموده بودند (Hamzeh et al., 2013; Sadeghi et al., 2015) و همچنین، مناطق حضور و زیست ماهی شوریده، تعداد ۵ ایستگاه انتخاب گردید که شامل اسکله‌های تیس، رمین، بريس، پسابندر و گواتر بودند. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری با استفاده از دستگاه GPS (مدل Garmin مدل MAP 64S ساخت آمریکا) ثبت گردید که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری در خلیج چابهار و دریای عمان

Table 1. Geographic coordinates of the sampling stations in Chabahar Bay and the Oman Sea

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
1	تیس	25°23'29" N	61°35'80" E
2	رمین	25°16'08" N	61°44'39" E
3	بریس	25°08'54" N	61°10'36" E
4	پسابندر	25°04'11" N	61°25'12" E
5	خلیج گواتر	25°54'06" N	61°29'02" E

در این پژوهش ۶ نمونه رسوب (۵ سانتی‌متر سطح رسوب با سه تکرار) و ۳۰ قطعه ماهی شوریده از هر ایستگاه در پاییز سال ۱۳۹۴ جمع‌آوری شد. نمونه‌های ماهی توسط صیادان محلی به‌وسیله تور گوشگیر صید شدند. نمونه‌های رسوب به‌وسیله گرب و ن‌وین برداشت شدند و در پلاستیک‌های زیپ‌کیپ کددار قرار گرفتند و با استفاده از یونولیت حاوی پودر یخ بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شدند. برای حذف آلودگی احتمالی، سطح بدن ماهی‌ها با آب مقطر شستشو داده شد. نمونه‌های رسوب و ماهی تا زمان انجام مراحل بعدی کار در فریزر با دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند (Hamzeh et al., 2013; Sadeghi et al., 2015).

آماده‌سازی بافت و سنجش فلزات سنگین در نمونه‌های بافتی ماهی شوریده: طول کل (سانتی‌متر) و وزن کل (گرم) ماهی به‌وسیله تخته زیست‌سنجی و ترازوی دیجیتال (AND مدل EK-۶۱۰I) با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. سپس هر نمونه ماهی به‌صورت مجزا تشریح گردید. ابتدا بافت کبد و سپس بافت عضله از عمق پوست و از قسمت پشت بدن ماهی جدا شد. بافت‌های تهیه شده، جهت خشک شدن در آون با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند. جهت همگن‌سازی، نمونه‌های خشک شده در هاون چینی پودر گردید. مقدار ۱ گرم از هر یک از بافت‌های پودر شده برای عمل هضم شیمیایی در لوله‌های هضم جداگانه ریخته شد. پس از آن ۱۰ میلی‌لیتر محلول اسید نیتریک غلیظ ۶۵ درصد به محتوی لوله‌ها اضافه شد. پس از گذشت حداقل ۳ ساعت جهت انجام عمل هضم مقدماتی در دمای اتاق، نمونه‌ها روی پلیت داغ و زیر هود در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت قرار گرفتند. پس از هضم کامل، نمونه‌ها در دمای اتاق سرد شدند و با کمک کاغذ صافی واتمن ۴۲ فیلتر و به بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتری منتقل گردیدند و با آب دوبار تقطیر به حجم رسانده شدند (Moopam, 1999). اندازه‌گیری غلظت فلزات مس و روی توسط دستگاه جذب اتمی (مدل Varian 240 ساخت استرالیا) انجام و برحسب میکروگرم بر گرم وزن خشک گزارش شد.

سنجش فلزات سنگین به روش هضم اسیدی در نمونه‌های رسوب ایستگاه‌های مورد مطالعه: به‌منظور اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین رسوبات ایستگاه‌های نمونه‌برداری، نمونه‌های رسوب در آون با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. رسوبات خشک شده در هاون چینی پودر شده و سپس از الک ۶۳ میکرون عبور داده شدند. ۱ گرم از هر نمونه رسوب با ۱۵ میلی‌لیتر اسید پرکلریک ۶۰ درصد و ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۶۵ درصد (نسبت ۳:۱) به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق و ۵-۴ ساعت در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد روی پلیت داغ و زیر هود هضم شدند. بعد از سرد شدن در دمای اتاق، هر نمونه با کمک کاغذ صافی واتمن ۴۲ فیلتر و با آب دوبار تقطیر به حجم نهایی ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد (Moopam, 1999; Sadeghi et al., 2021). غلظت فلزات سنگین مس و روی در نمونه‌های رسوب توسط دستگاه جذب اتمی (مدل Varian 240 ساخت استرالیا) اندازه‌گیری شد. داده‌ها برحسب میکروگرم بر گرم وزن خشک قرائت شدند.

ارزیابی ریسک اکولوژیک ناشی از آلودگی رسوبات ایستگاه‌های مورد مطالعه: جهت ارزیابی ریسک اکولوژیک رسوبات از شاخص فاکتور آلودگی (CF) طبق رابطه ۱ استفاده گردید (Hakanson, 1980). نسبت به‌دست آمده از تقسیم غلظت اندازه‌گیری شده هر فلز در رسوب بر مقدار پس‌زمینه همان فلز است، فاکتور آلودگی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Hakanson, 1980):

$$CF = \frac{C_i}{C_n} \quad \text{رابطه ۱:}$$

C_i و C_n به‌ترتیب غلظت عنصر در نمونه رسوب و پس‌زمینه همان عنصر هستند. مقادیر پس‌زمینه فلزات سنگین روی و مس به‌ترتیب ۹۵ و ۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد (Turekian et al., 1961). به‌منظور ارزیابی میزان آلودگی در رسوبات، شاخص فاکتور آلودگی به چهار سطح تقسیم شده است: $CF < 1$: آلودگی کم، $1 < CF < 3$: آلودگی متوسط، $3 < CF < 6$: آلودگی قابل توجه، $CF \geq 6$: آلودگی زیاد (Hakanson, 1980).

ارزیابی ریسک سلامت ناشی از مصرف ماهی شوریده

محاسبه میزان جذب روزانه و هفتگی: میزان جذب فلزات از طریق ماده غذایی در روز (EDI) و در هفته (EWI) به‌ازای هر کیلوگرم از وزن با استفاده از رابطه‌های ۲ و ۳ محاسبه شد (USEPA, 1989). مقادیر EDI با میزان جذب قابل تحمل روزانه (TDI) برای فلز روی و مس مقایسه گردید.

$$EDI = \frac{MC \times FDC}{BW} \quad \text{رابطه ۲:}$$

$$EWI = \frac{MC \times FWC}{BW} \quad \text{رابطه ۳:}$$

EDI = میزان جذب روزانه فلزات از طریق مصرف ماهی برحسب میکروگرم بر گرم وزن بدن در روز، EWI = میزان جذب هفتگی فلزات از طریق مصرف ماهی برحسب میکروگرم بر گرم وزن بدن در هفته، MC = غلظت فلز در بافت عضله ماهی برحسب میلی گرم بر کیلوگرم وزن تر، FDC = نرخ مصرف روزانه ماهی: برابر با ۲۵/۲ گرم در روز (IFO, 2015)، FWC = نرخ مصرف هفتگی ماهی: برابر با ۱۷۶/۴ گرم در روز (IFO, 2015) و BW = وزن بدن (بالغ ۷۰ کیلوگرم)

محاسبه پتانسیل خطر غیرسرطان زایی فلزات-شاخص خطر (THQ): نسبت دوز آلاینده مصرف شده به دوز مرجع (RfD) همان آلاینده، پتانسیل خطر است (Cooper et al., 1991). سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا برای محاسبه پتانسیل خطر غیرسرطان زایی فلزات (THQ)، رابطه ۴ را ارائه داده است (USEPA, 2000):

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times C \times CF}{RfD \times BW \times ATn} \times 10^{-3} \quad \text{رابطه ۴:}$$

EF = فرکانس مواجهه (۳۶۵ روز در سال)، ED = کل مدت زمان مواجهه (۷۰ سال)، FIR = نرخ مصرف ماهی (گرم در روز برای فرد)، C = دوز فلز مورد نظر در نمونه (میلی گرم بر کیلوگرم)، CF = فاکتور تبدیل وزن خشک به وزن تر (برابر با ۰/۲۲)، RfD = دوز مرجع (میلی گرم بر کیلوگرم در روز) که برای فلزات مورد بررسی عبارتند از: روی: ۰/۳ و مس: ۰/۰۴ (USEPA, ۲۰۱۰)، BW = وزن بدن (بالغ ۷۰ کیلوگرم) و ATn = زمان در معرض قرارگیری برای ترکیبات غیرسرطان زا (فرکانس مواجهه $\times$ کل مدت زمان مواجهه = ۳۶۵ روز $\times$ ۷۰ سال)

در محاسبه THQ دو نکته به صورت پیش فرض در نظر گرفته می شود: (USEPA, 1989; Cooper et al., 1991)

۱) میزان فلز جذب شده در بدن برابر با میزان فلز وارد شده به بدن است.

۲) حرارت دادن و پختن گوشت اثری روی آلاینده ها ندارد.

اگر شاخص خطر (THQ) کمتر از یک باشد احتمال ابتلا به بیماری های غیرسرطانی در اثر مصرف آبرزی آلوده به فلزات سنگین در طول زندگی انسان کم است و مصرف آن ضرری برای مصرف کننده ندارد. اگر THQ بیشتر از یک باشد مصرف آبرزی برای سلامتی انسان خطر بالقوه دارد (Cooper et al., 1991; USEPA, 2010; Yi et al., 2017).

کنترل کیفیت آزمایش: قبل از شروع آزمایش، تمامی تجهیزات آزمایشگاهی با اسید نیتریک ۱۰ درصد (۱۰٪) شستشو داده شده و سپس با آب مقطر آبکشی شده و در آون با دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد خشک شدند. نمونه های ماهی نیز جهت زدودن آلودگی سطحی ابتدا با آب مقطر شستشو داده شدند. به منظور بررسی تکرارپذیری آنالیز، نمونه ها در سه تکرار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. درصد بازیابی فلزات مورد بررسی ۹۵/۳ تا ۱۰۳/۶ درصد بود. کمترین حد تشخیص دستگاه (LOD) برای فلز مس ۰/۰۵ و برای فلز روی ۰/۰۱ میکروگرم بر گرم بود.

تحلیل آماری: تجزیه و تحلیل داده ها با کمک نرم افزار SPSS نسخه ۲۰ انجام شد. نرمال بودن داده ها از طریق آزمون شاپیرو ویلک بررسی شدند. برای مقایسه غلظت فلزات در بین بافت های مختلف و همچنین ایستگاه های مختلف از آنالیز واریانس یک طرفه ($One-Way ANOVA$) و در صورت وجود اختلاف معنی دار، برای جداسازی گروه های متفاوت از پس آزمون توکی استفاده شد. وجود یا عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P < ۰/۰۵$) تعیین شد. نتایج مربوط به سنجش غلظت فلزات مورد بررسی در نمونه های بافت و رسوب به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار بیان گردید. بررسی همبستگی بین فلزات با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون انجام شد. میزان فلزات سنگین مورد بررسی در بافت عضله ماهی شوریده با مقادیر

استاندارد بین‌المللی FAO/WHO (با محاسبه فاکتور تبدیل وزن خشک به وزن تر (برابر با ۰/۲۲ برای ماهی شوریده) مقایسه شد. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۶ رسم گردیدند.

یافته‌های پژوهش

تجمع زیستی فلزات سنگین مس و روی در بافت کبد و عضله ماهی شوریده: میانگین غلظت فلزات سنگین مس و روی در بافت‌های کبد و عضله ماهی شوریده با میانگین طول کل 30.7 ± 3.17 سانتی‌متر و وزن کل 287.4 ± 83.28 گرم، در ایستگاه‌های تیس، رمین، بریس، پسابندر و گواتر در جدول ۲ ارائه شده است. بیشترین و کمترین میانگین میزان تجمع فلز مس در بافت کبد ماهی شوریده به ترتیب مربوط به نمونه‌های ایستگاه‌های بریس ($40.2/85 \pm 6/0.8$ میکروگرم بر گرم وزن خشک) و تیس (159.35 ± 1.23) میکروگرم بر گرم وزن خشک) بودند. همچنین، بیشترین و کمترین میانگین فلز روی در بافت کبد ماهی شوریده مربوط به نمونه‌های ایستگاه‌های بریس و تیس بودند که به ترتیب برابر با 282.75 ± 1.65 و 196.85 ± 3.1 میکروگرم بر گرم وزن خشک محاسبه گردید. جدول ۲ نتایج حاصل از مقایسه میزان فلزات سنگین در بافت کبد و عضله گونه مورد مطالعه در ایستگاه‌های نمونه‌برداری با آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه را نشان می‌دهد. در صورت وجود اختلاف آماری معنی‌دار از پس‌آزمون توکی برای مقایسه دقیق‌تر بین ایستگاه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که بین میزان غلظت مس در بافت کبد ماهی شوریده صید شده از ایستگاه‌های تیس، رمین و گواتر اختلاف آماری معنی‌داری وجود ندارد، اما در نمونه‌های ایستگاه بریس اختلاف معنی‌داری با سایر ایستگاه‌ها وجود داشت ($P < 0.05$). میانگین غلظت فلز روی در بافت کبد در نمونه‌های صید شده از ایستگاه بریس با ایستگاه تیس اختلاف معنی‌دار داشت ($P < 0.05$)، اما با سایر ایستگاه‌ها اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد ($P > 0.05$). نتایج نشان داد که بیشترین میزان تجمع زیستی فلز مس در بافت عضله ماهی شوریده صید شده از ایستگاه بریس با میانگین 389.56 ± 0.03 میکروگرم بر گرم وزن خشک بود. از سوی دیگر کمترین میزان فلز مس در عضله نمونه‌های ایستگاه تیس (54.16 ± 5.9) میکروگرم بر گرم وزن خشک) ثبت گردید. همچنین، بیشترین و کمترین میانگین فلز روی در بافت عضله ماهی شوریده مربوط به ایستگاه‌های بریس و تیس ثبت شد که به ترتیب برابر با 190.48 ± 4.05 و 117.2 ± 0.09 میکروگرم بر گرم وزن خشک بودند. بررسی اختلاف آماری معنی‌دار میزان تجمع فلز مس در بافت عضله ماهی شوریده ایستگاه‌های رمین، پسابندر و گواتر با یکدیگر اختلاف آماری معنی‌داری نداشتند ($P > 0.05$). بررسی اختلاف آماری معنی‌دار میزان تجمع فلز روی در بافت عضله ماهی شوریده ایستگاه‌های رمین، پسابندر و گواتر نشان داد که بین دو ایستگاه پسابندر و بریس اختلاف آماری معنی‌دار مشاهده نشد ($P > 0.05$) اما بین این دو ایستگاه با سایر ایستگاه‌های مورد بررسی اختلاف معنی‌دار ثبت شد ($P < 0.05$).

جدول ۲- میانگین غلظت فلزات سنگین مس و روی (میکروگرم بر گرم وزن خشک) در بافت کبد و عضله ماهی شوریده در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 2. Mean concentrations of heavy metals copper and zinc ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight) in the liver and muscle tissues of *Otolithes ruber* from the studied sampling stations.

فلز سنگین	بافت	تیس	رمین	بریس	پسابندر	گواتر
مس (Cu)	کبد	159.35 ± 1.23^c	226.75 ± 3.18^{bc}	4.85 ± 6.08^a	2.58 ± 2.05^b	2.88 ± 0.06^{bc}
	عضله	54.16 ± 5.9^b	203.36 ± 0.15^b	389.56 ± 0.03^a	214.56 ± 0.2^b	65.98 ± 1.08^b
روی (Zn)	کبد	135.96 ± 2.48^b	196.85 ± 3.1^{ab}	282.75 ± 1.65^a	232.93 ± 1.64^{ab}	172.45 ± 0.32^{ab}
	عضله	104.25 ± 2.56^b	117.2 ± 0.09^b	190.48 ± 4.05^a	172.2 ± 3.35^a	110.36 ± 0.7^b

حروف انگلیسی غیرمشابه نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ می‌باشد ($P < 0.05$)

غلظت فلزات سنگین مس و روی در رسوبات ایستگاه‌های مورد مطالعه: بررسی میانگین غلظت فلز مس در رسوب ایستگاه‌های نمونه‌برداری نشان داد که بیشترین میزان تجمع این فلز در ایستگاه بریس و کمترین میزان آن در ایستگاه گواتر ثبت شده است. همچنین، بیشترین و کمترین مقادیر فلز روی به ترتیب در رسوب ایستگاه‌های پسابندر و تیس ثبت گردید (جدول

۳). آزمون آنالیز واریانس یک طرفه برای فلز مس و روی نشان داد که غلظت این فلزات در رسوب ایستگاه‌های مختلف با یکدیگر دارای اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشد ($P < 0.05$).

جدول ۳- غلظت فلزات سنگین مس و روی (میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در رسوب ایستگاه‌های مختلف
Table 3. Concentrations of the heavy metals copper and zinc (mg kg^{-1} dry weight) in sediment samples from the different sampling stations

ایستگاه	فلز سنگین				
	گوآتر	پسابندر	بریس	رمین	تیس
مس (Cu)	126.73±3.01 ^e	190.17±0.04 ^c	331.6±2.5 ^a	290.47±2.04 ^b	161.5 ±1.94 ^d
روی (Zn)	195.67±2.67 ^d	446.90±1.5 ^a	374.83±1.14 ^b	331.93±3.23 ^c	124.7 ±0.05 ^e

حروف انگلیسی غیرمشابه نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ می‌باشد ($P < 0.05$).

ارزیابی ریسک سلامت ناشی از مصرف ماهی شوریده در ایستگاه‌های مورد مطالعه: نتایج میزان جذب روزانه (EDI) و هفتگی (EWI) و پتانسیل خطر غیرسرطان‌زایی (THQ) فلزات سنگین مس و روی ناشی از مصرف عضله ماهی شوریده در ایستگاه‌های نمونه‌برداری، در جدول ۴ ارائه شده است. الگوی میزان جذب روزانه فلز مس و روی در ماهی شوریده در ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌صورت تیس > گوآتر > رمین > پسابندر > بریس بود. میانگین میزان جذب روزانه برای فلز مس و روی به‌ترتیب برابر با ۱۶/۶۹ و ۱۲/۵ میلی گرم بر گرم وزن بدن ثبت گردید. مقایسه جذب روزانه فلزات مس و روی در ماهی شوریده با میزان جذب قابل تحمل روزانه فلزات (TDI) نشان‌دهنده کمتر بودن EDI نسبت به TDI در همه ایستگاه‌ها بود. بیشترین و کمترین میزان جذب هفتگی فلز مس (میلی گرم بر گرم وزن بدن) به‌ترتیب در ماهی شوریده صیدشده از ایستگاه‌های بریس (۲۴۵/۱) و تیس (۳۴/۱۲) محاسبه شد. ایستگاه‌های بریس با میزان ۱۱۹/۹ و ایستگاه تیس با میزان ۶۵/۷ میلی گرم بر گرم وزن بدن به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان جذب هفتگی فلز روی بودند. بیشترین میزان پتانسیل خطر غیرسرطان‌زایی فلز مس (۰/۸۷۶) و روی (۰/۰۵۷) در ماهی شوریده صیدشده از ایستگاه بریس محاسبه شد. همچنین کمترین میزان این شاخص برای فلز مس و روی به‌ترتیب برابر با ۰/۱۲۲ و ۰/۰۳۱ مربوط به ایستگاه تیس بود. پتانسیل خطر غیرسرطان‌زایی برای فلزات مس و روی در ماهی شوریده در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه، کمتر از ۱ بود (جدول ۴).

جدول ۴- میزان جذب روزانه (EDI) و هفتگی (EWI) و مقایسه با میزان جذب قابل تحمل روزانه (TDI) بر حسب میلی گرم بر گرم وزن بدن و پتانسیل خطر غیرسرطان‌زایی (THQ) فلزات سنگین در ماهی شوریده دریای عمان

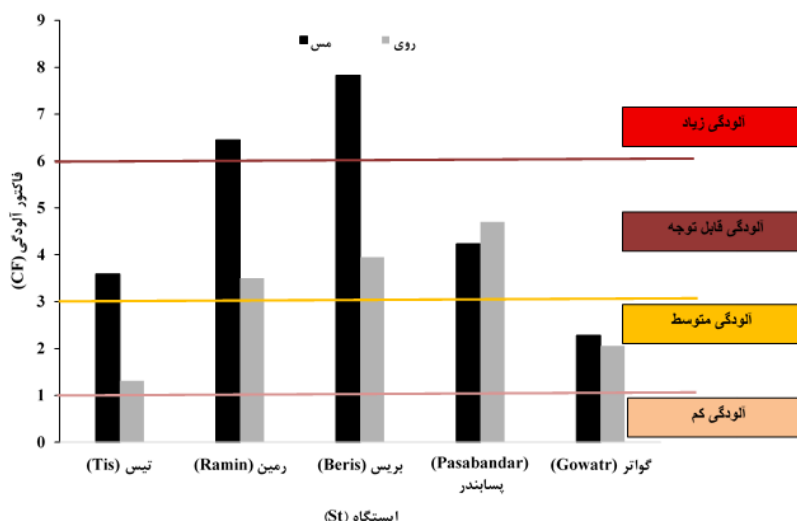
Table 4. Estimated daily intake (EDI), estimated weekly intake (EWI), comparison with the tolerable daily intake (TDI) (mg kg^{-1} body weight), and target hazard quotient (THQ) of heavy metals in *Otolithes ruber* from the Oman Sea

ایستگاه	میزان جذب روزانه (EDI)		میزان جذب هفتگی (EWI)		تانسیل خطر غیرسرطان‌زایی (THQ)	
	مس (Cu)	روی (Zn)	مس (Cu)	روی (Zn)	مس (Cu)	روی (Zn)
تیس	4.87	9.38	34.12	65.7	0.122	0.031
رمین	18.3	10.54	128.1	73.78	0.457	0.035
بریس	35.02	17.14	245.1	119.9	0.876	0.057
پسابندر	19.3	15.5	135.2	108.5	0.469	0.052
گوآتر	5.94	9.93	41.6	69.5	0.148	0.033
میانگین	16.69	12.5	116.82	87.5	0.414	0.042
*میزان جذب قابل تحمل روزانه (TDI)	500	300				

Varol et al., 2020*

ارزیابی ریسک اکولوژیک ناشی از آلودگی رسوبات ایستگاه‌های مورد مطالعه: نتایج شاخص فاکتور آلودگی فلزات سنگین مس و روی در رسوب ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۱ ارائه شده است. فاکتور آلودگی برای فلز مس در ایستگاه‌های

بریس (۷/۸۳) و رمین (۶/۴۵) بیشترین میزان را نشان داد. باتوجه به تقسیم‌بندی چهارگانه سطح آلودگی با استفاده از فاکتور آلودگی، دو ایستگاه مذکور برای فلز مس در سطح آلودگی زیاد قرار دارند. ایستگاه‌های تیس (۳/۵۹) و پسابندر (۴/۲۳) برای فلز مس دارای سطح آلودگی قابل توجه و ایستگاه گواتر دارای سطح آلودگی متوسط (۲/۸۲) بودند. بررسی فاکتور آلودگی برای فلز روی نشان داد که ایستگاه‌های تیس و گواتر با مقادیر ۱/۳۱ و ۲/۰۶ سطح آلودگی متوسط دارند. همچنین ایستگاه‌های رمین (۳/۵)، بریس (۳/۹۵) و پسابندر (۴/۷۰) دارای سطح آلودگی قابل توجه بودند. میانگین فاکتور آلودگی فلز مس و روی در ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌ترتیب برابر با ۴/۹۸ و ۳/۱۰ ثبت گردید که نشان‌دهنده سطح آلودگی قابل توجه برای فلزات مذکور است.



شکل ۱- مقادیر شاخص فاکتور آلودگی فلزات سنگین مس و روی در ایستگاه‌های مورد مطالعه
Figure 1. Contamination factor (CF) values of copper and zinc at the studied sampling stations

همبستگی شاخص‌های زیست‌سنجی با غلظت فلزات سنگین در بافت‌های کبد و عضله ماهی شوریده: نتایج حاصل از محاسبه ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های زیست‌سنجی طول کل و وزن کل بدن با غلظت فلزات سنگین مس و روی در دو بافت عضله و کبد ماهی شوریده در جدول ۵ نشان داد که بین طول کل بدن (سانتی متر) و وزن بدن (گرم) با تجمع عنصر مس در بافت عضله همبستگی معنی‌داری وجود دارد ($P < 0.01$). همچنین بین میزان تجمع فلز مس در بافت کبد و طول کل بدن همبستگی معنی‌داری ثبت گردید ($P < 0.05$). همچنین براساس نتایج مشاهده شد که بین طول کل ماهی شوریده با غلظت روی در بافت عضله همبستگی منفی معنی‌داری ($R = -0.390$) وجود دارد.

جدول ۵- ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های زیست‌سنجی و میزان تجمع فلزات سنگین در بافت‌های عضله و کبد ماهی شوریده
Table 5. Pearson correlation coefficients between biometric indices and heavy metal accumulation in the muscle and liver tissues of *Otolithes ruber*.

فلز سنگین	بافت	شاخص زیست‌سنجی	ضریب همبستگی	p-value
مس (Cu)	عضله	طول کل	0.554**	0.001
		وزن کل	0.610**	0.000
	کبد	طول کل	0.424*	0.020
		وزن کل	0.329	0.076
روی (Zn)	عضله	طول کل	-0.390*	0.033
		وزن کل	-0.347	0.060
	کبد	طول کل	-0.002	0.099
		وزن کل	0.113	0.552

* معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ ($P < 0.05$) ** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ ($P < 0.01$)

جدول ۶- ضریب همبستگی پیرسون بین فلزات سنگین در رسوب و بافت‌های عضله و کبد ماهی شوریده

Table 6. Pearson correlation coefficients between heavy metals in sediment and muscle and liver tissues of *Otolithes ruber*

عضله و کبد	عضله و رسوب	کبد و رسوب	فلزات سنگین
0.453	0.640	0.765	روی (Zn)
0.287	0.568	0.856	مس (Cu)

بحث

ورود فلزات سنگین با منشأ طبیعی و انسانی به بوم‌سازگان‌های آبی، می‌تواند به‌صورت مستقیم از طریق تخلیه عمده یا غیر مستقیم از طریق رسوبات جو و رواناب سطحی باشد (Bashir et al., 2020). ماهی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده در شبکه غذایی آبریان و شاخص زیستی مناسبی برای تغییرات محیطی و نظارت بر بوم‌سازگان‌های آبی است. ماهی‌ها فلزات سنگین را در بدن متابولیزه، سم‌زدایی و انباشته می‌کنند (Burgos-Aceves et al., 2019; Sula et al., 2020). جنبه‌های تغذیه‌ای و دارویی ماهی برای سلامت انسان منجر به افزایش تقاضای جهانی در دهه‌های اخیر شده است. ماهی سطوح بالایی از مواد معدنی ضروری، ویتامین‌ها، پروتئین و اسیدهای چرب غیراشباع مورد نیاز بدن را فراهم می‌کند (Anwarul Hasan et al., 2022). از این‌رو، پایش دوره‌ای وضعیت آلاینده‌ها در ماهیان پرمصرف مهم و ضروری است. نتایج پژوهش حاضر گویای این نکته بود که بیشترین میانگین میزان فلزات سنگین روی و مس در بافت کبد ماهی شوریده تجمع یافته است که تفاوت معنی‌داری با تجمع زیستی این فلزات در بافت عضله داشت ($P < 0.05$). Hosseini و همکاران (۲۰۱۶) تجمع زیستی فلزات سنگین سرب، روی و مس در عضله و کبد ماهی شانک زردباله (*Acanthopagrus latus*) در آب‌های سواحل دیلم، شمال خلیج فارس را بررسی و گزارش نمودند که بافت عضله، کمترین میزان تجمع فلزات را نسبت به بافت کبد داشته است که با نتایج بررسی حاضر مطابقت دارد. میزان تجمع زیستی فلزات سنگین روی، مس و سرب در بافت کبد سه گونه از تون‌ماهیان دریای عمان بالاتر از بافت عضله این گونه‌ها ثبت شده است (Sadeghi et al., 2020). Akila و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی تجمع زیستی فلزات سنگین در چند بافت گونه‌های مختلف ماهی در هند گزارش کردند که غلظت فلزات روی و مس در بافت کبد نسبت به بافت عضله بالاتر است که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. تجمع فلزات به‌دلیل وجود پروتئین‌های متصل‌شونده به فلز مانند متالوتیونین‌ها در اندام‌های متابولیکی مانند کبد، نسبت به اندام‌های دیگر ماهی به‌طور قابل‌توجهی متفاوت است (Siscar et al., 2014). گروه مرکاپتو در پروتئین متالوتیونین، به فلزاتی چون مس، کادمیوم و روی متصل می‌شوند و به کبد اجازه می‌دهند سطوح بالاتری از فلزات را نسبت به سایر اندام‌ها تجمع دهد. بنابراین، کبد ممکن است به‌دلیل این ویژگی، آلاینده‌های مختلفی را از محیط‌زیست دریافت کند (Mziray and Kimirei et al., 2016). همچنین، کبد ماهی، مانند اکثر جانوران، نقش مهمی در ذخیره، توزیع مجدد و سم‌زدایی یا تبدیل آلاینده‌ها ایفا می‌کند و به‌عنوان یک محل فعال برای اثرات پاتولوژیک ناشی از آلاینده‌ها عمل می‌کند. در نتیجه، فلزات تمایل به توزیع متفاوتی در کبد و عضله دارند (Weber et al., 2013). نقش فیزیولوژیک هر فلز نیز بر الگوی تجمع آن در بافت‌های مختلف اثرگذار است، به‌گونه‌ای که فلزات ضروری ترجیحاً در بافت‌های با فعالیت متابولیکی بالا نظیر کبد تجمع می‌یابند (Dinesh Kumar et al., 2025). در مطالعه حاضر، مقادیر روی در بافت عضله ماهی شوریده بین $104/25 \pm 2/56$ تا $190/48 \pm 4/05$ میکروگرم بر گرم متغیر بود. این میزان غلظت روی در بافت عضله با مقادیر گزارش شده قبلی برای ماهی شوریده مقایسه شد. در مطالعه Janadeleh و Jahangiri (۲۰۱۶) غلظت روی در بافت عضله ماهی شوریده صیدشده از شمال خلیج فارس $23/26$ میلی‌گرم بر کیلوگرم ثبت گردید که از نتایج پژوهش حاضر کمتر است. همچنین مقادیر نسبتاً کمتری برای روی در عضله ماهی شوریده بندر ماهشهر خلیج فارس در مطالعه Sahebi و همکاران (۲۰۱۸) گزارش شده است. تفاوت در مطالعه حاضر روی ماهی شوریده با مطالعات قبلی می‌تواند به دلایلی چون تغییرات محیطی در طول زمان، سن و اندازه نمونه‌های مورد بررسی، تحرک و مهاجرت ماهی به مناطق آلوده‌تر، تغییرات محیطی چون دما، شوری و میزان اکسیژن محلول و روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز باشد. از سوی دیگر، تجمع زیستی فلزات مختلف در

ماهی‌ها به ویژگی‌های جانور مانند نوع زیستگاه، گروه و عادات غذایی و متابولیسم بستگی دارد (Feng et al., 2021). مقادیر فلز روی در ماهی کوتر دم سیاه (*Sphyraena genie*) دریای عمان (Sadeghi et al., 2021) و ماهی طلال (*Rastrelliger kanagurta*) خلیج بنگال (Dinesh Kumar et al., 2025) کمتر از ماهی شوریده مطالعه حاضر گزارش شده است. Prasath و Khan (۲۰۰۸) سطح بالاتری از روی (۱۵۶/۷۸ میلی گرم بر کیلوگرم) را در عضله ماهی کفال خاکستری (*Mugil cephalus*) صید شده از آب‌های ساحلی جنوب هند در مقایسه با ماهی شوریده صیدشده در برخی از ایستگاه‌های مطالعه حاضر، گزارش کردند. نقش عادات غذایی بر میزان تفاوت تجمع فلزات ضروری و غیرضروری در بدن ماهی‌ها شناخته شده است به‌طوری‌که تجمع فلزاتی چون روی، مس، آلومینیوم و کادمیوم در ماهیان بنتوپلاژیک و پلاژیک-نریتیک که عمدتاً از پلانکتون و نکتون تغذیه می‌کنند نسبت به سایر فلزات بیشتر گزارش شده است (Samantara et al., 2023). در پژوهش حاضر، کمترین بیشترین غلظت مس ثبت شده در بافت عضله ماهی شوریده به ترتیب $54/16 \pm 5/9$ و $389/56 \pm 0/03$ میکروگرم بر گرم وزن خشک بود. بیشترین میزان فلز مس در بافت عضله ماهی شوریده صیدشده از ایستگاه بریس ثبت گردید که این میزان با مقدار تجمع فلز مس در رسوبات این ایستگاه همخوانی دارد. مقادیر مشاهده شده مس در عضله ماهی شوریده در این مطالعه نسبت به مقادیر گزارش شده پیشین برای سواحل خوزستان (Hosseini et al., 2015)، بندر ماهشهر خلیج فارس (Sahebi et al., 2018) و سواحل دریای عمان (Sadeghi et al., 2021) بالاتر بود. تفاوت در غلظت فلزات سنگین در بین گونه‌های مشابه ماهی می‌تواند تحت تأثیر تغییرات فصلی و مکان‌های نمونه‌برداری باشد (Sobihah et al., 2018). همچنین، تفاوت در سن، اندازه، جنسیت و وضعیت فیزیولوژیک ماهی به‌ویژه در دوره‌های تولیدمثلی، می‌تواند علت تفاوت در نتایج مطالعات مختلف روی یک گونه ماهی باشد. غلظت فلز مس در بافت عضله کفشک‌ماهی زبان گاوی (*Cynoglossus arel*) و سارم دهان‌بزرگ (*Scomberoides commersonianus*) در ایستگاه‌های کنارک، رمین و گواتر دریای عمان کمتر از ماهی شوریده مطالعه حاضر گزارش شده است (Loghmani et al., 2022). رفتار غذایی، سن، گونه، دقت دستگاه سنجش فلزات سنگین و فصل نمونه‌برداری را از دلایل تفاوت میزان فلزات سنگین در ماهیان مختلف می‌باشد (Mashoufi et al., 2023). در مجموع، می‌توان این‌گونه استنباط نمود که برهم‌کنش‌های پیچیده‌ای از عوامل زیستی و محیطی در کنار تفاوت‌های احتمالی در روش‌های نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی می‌تواند علت اختلاف در میزان نتایج تجمع زیستی فلزات سنگین در یک گونه ماهی و یا گونه‌های مختلف باشد.

میانگین غلظت فلزات روی و مس در بافت عضله نمونه‌های صید شده برحسب وزن تر نیز محاسبه و با مقادیر استاندارد بین‌المللی FAO/WHO مقایسه گردید. سطوح فلز روی در بافت عضله ماهی شوریده در همه ایستگاه‌ها به‌جز ایستگاه پسابندر و بریس کمتر از حد مجاز توصیه شده توسط FAO/WHO (۱۹۸۹)، (۴۰ میکروگرم بر گرم وزن تر) بود. مقایسه میزان تجمع فلز مس در گونه مورد نظر با میزان استاندارد بین‌المللی FAO/WHO بیانگر این نکته بود که میزان فلز مس در ماهی شوریده صیدشده از ایستگاه‌های رمین، بریس و پسابندر بیشتر و در ایستگاه‌های تیس و گواتر کمتر از حد مجاز تعیین شده (۳۰ میکروگرم بر گرم وزن تر) بود. ارزیابی خطرات سلامت انسان ناشی از آلودگی فلزات سنگین برای به‌حداقل رساندن عوارض جانبی سمیت این آلاینده‌ها مهم است (Simfukwe et al., 2025). میزان جذب روزانه و هفتگی و مقایسه با میزان جذب قابل تحمل روزانه به‌منظور توصیف سطوح ایمن فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر ارائه شده در این مطالعه براساس غلظت فلزات در وزن تر بافت عضله ماهی و نرخ مصرف روزانه ماهی و با در نظر گرفتن وزن متوسط فرد بالغ برابر با ۷۰ کیلوگرم، بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که هر دو شاخص میزان جذب روزانه و هفتگی برای نمونه‌های صیدشده در همه ایستگاه‌ها پایین‌تر از حدود میزان جذب قابل تحمل روزانه تعیین شده قرار دارند. نتایج مشابهی مبنی بر پایین بودن شاخص‌های میزان جذب روزانه و هفتگی توسط Sadeghi و همکاران (۲۰۱۹) در ماهی شوریده دریای عمان و Khawar و همکاران (۲۰۲۴) در ماهی شوریده سواحل گوادر پاکستان گزارش شده است. نتایج حاصل از مطالعه Sadeghi و همکاران (۲۰۲۰) بر روی میزان جذب روزانه فلزات مس، روی و سرب در سه گونه هورور مسقطی (*Katsuwonus pelamis*)، تن زردباله (*Euthynnus affinis*) و گیدر (*Thunnus albacares*) دریای عمان نشان داد که میزان جذب روزانه این فلزات کمتر از میزان جذب قابل تحمل روزانه است و مصرف این تون‌ماهیان برای سلامتی انسان بی‌ضرر است. نتایج مطالعه مذکور با نتایج مطالعه

حاضر همخوانی دارد. از آنجا که حدود فلزات روی و مس در بافت عضله ماهی شوریده از میزان جذب قابل تحمل روزانه بیشتر نشده است، مصرف این گونه ماهی صیدشده از ایستگاه‌های مورد مطالعه احتمالاً هیچ‌گونه خطری برای سلامت انسان به‌همراه ندارد.

بررسی مقادیر پتانسیل خطر غیرسرطان‌زایی (THQ) فلزات سنگین روی و مس ناشی از مصرف عضله ماهی شوریده در ۵ ایستگاه مورد مطالعه در دریای عمان نشان داد که شاخص THQ برای فلزات مذکور مورد بررسی در همه ایستگاه‌ها کمتر از ۱ بود و خطری سلامت مصرف‌کنندگان ماهی شوریده را در طول زندگی تهدید نمی‌کند. هنگامی که مقدار THQ بزرگ‌تر از ۱ باشد، هشدار از وجود نگرانی‌های بالقوه را نشان می‌دهد، در حالی که THQ کمتر از ۱ بیانگر آن است که میزان مواجهه پایین‌تر از دوز مرجع بوده و مصرف روزانه در این سطح به احتمال زیاد در طول عمر فرد اثر نامطلوبی بر سلامت ایجاد نخواهد کرد (USEPA, 2000; 2011). پتانسیل خطر غیرسرطان‌زایی فلزات سنگین (THQ) در پژوهش Islam و همکاران (۲۰۲۶) در ۱۸ گونه ماهی دریایی از جمله ماهی شوریده در خلیج بنگال کمتر از یک برای انسان گزارش شده است. همچنین در مطالعه Norouzi و Bagheri Tavani (۲۰۱۸) و Mortazavi و همکاران (۲۰۱۶) مقادیر پتانسیل خطر غیرسرطانی فلزات سنگین در ماهی شوریده در خلیج فارس کمتر از ۱ گزارش شده است و نشان‌دهنده عدم خطر مصرف این گونه است که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت فلز مس در رسوبات ۵ ایستگاه مورد مطالعه در دریای عمان نشان داد الگوی فراوانی این فلز در ایستگاه‌ها به‌صورت گواتر > تیس > پسابندر > رمین > بریس می‌باشد. همچنین این الگو برای فلز روی به‌صورت تیس > گواتر > رمین > بریس > پسابندر ثبت گردید. سه ایستگاه بریس، رمین و پسابندر دارای بیشترین میزان فلز سنگین روی و مس بودند. این مناطق از اسکله‌های اصلی صیادی دریای عمان محسوب می‌شوند، بنابراین رفت‌وآمد مداوم قایق‌ها و لنج‌های ماهیگیری، تعمیر و نگهداری آنها در منطقه و ریختن روغن موتور، سوخت و رنگ می‌تواند از دلایل بالا بودن فلزات مورد مطالعه در این ایستگاه‌ها باشد. فلزات روی و مس و سرب بیشتر در رنگ‌ها وجود دارند و تجمع آنها در بوم‌سامانه‌های دریایی به‌دلیل رنگ‌آمیزی بدنه کشتی‌ها در سواحل و ریزش این فلزات از رنگ بدنه شناورها می‌باشد (Al-Taani et al., 2015). ایستگاه بریس یکی از مناطق مهم گردشگری در سواحل استان سیستان و بلوچستان است که تعداد زیادی شناور تفریحی در این منطقه حضور دارند و نگهداری آنها در کنار شناورهای صیادی می‌تواند در افزایش بار آلودگی در این ایستگاه اثرگذار باشد. براساس نتایج، بین فلزات مس و روی در رسوب ایستگاه‌های مختلف اختلاف آماری معنی‌دار وجود داشت. علت این اختلاف معنی‌دار می‌تواند به‌دلیل تاثیر عوامل مختلف در رسوب‌گذاری، تفاوت در ویژگی‌های بافت رسوب و ساختار فیزیکی و شیمیایی آن، فاکتورهای فیزیووشیمیایی چون pH و دما باشد (Mna et al., 2021).

غلظت فلزات سنگین مس و روی در مطالعه De Mora و همکاران (۲۰۰۴) در رسوبات سواحل جنوبی دریای عمان کمتر از پژوهش حاضر بود. عملکرد امواج در فصل مانسون در سواحل شمالی دریای عمان سبب می‌شود بسیاری از عناصر فلزی که دارای وزن مخصوص بالایی هستند از رسوبات آلوده بستر دریا در نواحی جنوبی دریای عمان و اقیانوس هند به‌سمت سواحل شمالی دریای عمان رانده شوند و موجب افزایش غلظت فلزات سنگین در این مناطق گردند (Sadeghi et al., 2021). بندر گوادر پاکستان فاصله نزدیکی با ایران و ایستگاه گواتر دارد. این بندر یکی از بنادر صیادی پر تردد در پاکستان است که می‌تواند در بالا بودن سطح آلاینده‌ها در ایستگاه گواتر در فصول مانسون تأثیرگذار باشد و این مسئله می‌تواند در پژوهش‌های بعدی علاقمندان حوزه آلودگی مورد توجه قرار گیرد. همچنین وجود مزارع پرورش میگو در گواتر و پساب تولیدی این مزارع می‌تواند از علل بالا بودن سطح آلودگی فلزات سنگین در این منطقه باشد (Sadeghi et al., 2021).

در مطالعه حاضر شاخص فاکتور آلودگی برای فلز سنگین مس در رسوب ایستگاه‌های مورد مطالعه، در طبقه آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد قرار داشت. همچنین این شاخص برای فلز روی در رسوبات مورد بررسی در طبقه آلودگی متوسط تا آلودگی قابل توجه ثبت گردید. مطالعات ارزیابی ریسک اکولوژیک رسوبات بوم‌سازگان آبی می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری از میزان آلودگی و الگوی پراکنش فلزات سنگین نشان دهد (Olowojuni et al., 2025). در مطالعه Bessa و همکاران (۲۰۲۱)، فاکتور آلودگی

برای فلزات مس و روی در سواحل Limbe اقیانوس اطلس، در ردهٔ آلودگی متوسط بود که نسبت به میانگین این دو فلز در مطالعهٔ حاضر کمتر بود. در مطالعهٔ Olowojuni و همکاران (۲۰۲۵) شاخص فاکتور آلودگی فلزات مس و روی در رسوبات خلیج گونیا در نیجریه کمتر از ۱ و در طبقهٔ آلودگی کم گزارش شده است. شاخص فاکتور آلودگی فلزات سنگین مس و روی رسوبات بوشهر در تحقیق Haghshenas و همکاران (۲۰۱۸) در محدودهٔ آلودگی کم (۰/۸۱-۱/۳۱) قرار داشتند که نسبت به مطالعهٔ حاضر کمتر می‌باشد. فاکتور آلودگی در پژوهش Lipy و همکاران (۲۰۲۵) برای فلز مس در رسوبات سواحل بنگلادش در طبقهٔ آلودگی کم گزارش شد که کمتر از مطالعهٔ حاضر بود. تفاوت در این نتایج را می‌توان به دلیل تفاوت در منطقه، عمق و زمان نمونه‌برداری، منابع آلاینده و نوع جنس بستر عنوان کرد (Sadeghi et al., 2021).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مطالعهٔ حاضر نشان داد که فلزات سنگین مس و روی به‌طور گسترده در رسوبات و بافت‌های زیستی ماهی شوریده (*Otolithes ruber*) در ایستگاه‌های مختلف خلیج چابهار و دریای عمان حضور دارند. غلظت هر دو فلز در بافت کبد به‌طور معنی‌داری بالاتر از بافت عضله بود که این امر بیانگر نقش کلیدی کبد به‌عنوان اندام اصلی متابولیسم، ذخیره و سم‌زدایی فلزات و نیز حضور پروتئین‌های متصل‌شونده به فلزات نظیر متالوتیونین‌ها می‌باشد. این الگوی تجمع زیستی با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی داشته و نشان می‌دهد که بافت کبد می‌تواند به‌عنوان شاخص زیستی مناسبی برای پایش آلودگی فلزی در بوم‌سازگان‌های دریایی مورد استفاده قرار گیرد. در میان ایستگاه‌های مورد بررسی، ایستگاه بریس بیشترین میزان تجمع مس و روی را هم در رسوبات و هم در بافت‌های ماهی شوریده نشان داد که احتمالاً ناشی از تمرکز بالای فعالیت‌های صیادی، تردد شناورها، عملیات تعمیر و نگهداری لنج‌ها و ورود آلاینده‌های نفتی و رنگ‌های حاوی فلزات سنگین به محیط می‌باشد. ارزیابی ریسک اکولوژیک براساس شاخص فاکتور آلودگی (CF) بیانگر آن بود که رسوبات منطقه در بازهٔ آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد (برای مس) و آلودگی متوسط تا قابل توجه (برای روی) قرار دارند که هشدار جدی در خصوص نقش رسوبات به‌عنوان مخزن بلندمدت آلاینده‌ها و منبع بالقوهٔ بازآلودسازی فلزات به ستون آب محسوب می‌شود.

از منظر سلامت انسان، شاخص‌های ارزیابی ریسک سلامت شامل میزان جذب روزانه (EDI)، میزان جذب هفتگی (EWI) و پتانسیل خطر غیرسرطان‌زایی (THQ) برای هر دو فلز در تمامی ایستگاه‌ها کمتر از مقادیر مرجع تعیین‌شده بودند. این نتایج نشان می‌دهد که مصرف ماهی شوریده صیدشده از مناطق مورد مطالعه، در شرایط فعلی و با الگوی مصرف در نظر گرفته‌شده، به‌طور کلی خطر قابل توجهی برای سلامت مصرف‌کنندگان انسانی ایجاد نمی‌کند. با این حال، نزدیک بودن برخی مقادیر به آستانه‌های مجاز، به‌ویژه در ایستگاه‌های با فشار انسانی بالا، ضرورت احتیاط را برجسته می‌سازد. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش بر اهمیت پایش همزمان فلزات سنگین در رسوبات و گونه‌های ماهی خوراکی تأکید دارد و نشان می‌دهد که اگرچه در حال حاضر ریسک غیرسرطان‌زایی ناشی از مصرف ماهی شوریده پایین است، اما سطح آلودگی قابل توجه رسوبات می‌تواند در بلندمدت تهدیدی بالقوه برای سلامت اکوسیستم و امنیت غذایی منطقه باشد. از این‌رو، اجرای برنامه‌های پایش مستمر، مدیریت و کنترل منابع آلاینده، به‌ویژه در اسکله‌های صیادی پرتدد، و انجام مطالعات تکمیلی شامل سایر فلزات سنگین و شاخص‌های زیستی پیشرفته، برای حفاظت از بوم‌سازگان دریای عمان و تضمین سلامت مصرف‌کنندگان انسانی ضروری به‌نظر می‌رسد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار برای فراهم کردن شرایط انجام مطالعه حاضر در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد سپاسگزاری می‌گردد.

References

- Akila, M., Anbalagan, S., Lakshmisri, N.M., Janaki, V., Ramesh, T., Merlin, R.J., Kamala-Kannan, S., 2022. Heavy metal accumulation in selected fish species from Pulicat Lake, India, and health risk assessment. *Environmental Technology and Innovation* 27, 102744.
- Almafrachi, H.A.A., Gümüş, N.E., Çorak Öcal, İ., 2025. Heavy metal bioaccumulation in fish: Implications for human health risk assessment in ten commercial fish species from Konya, Türkiye. *International Journal of Environmental Science and Technology* 22, 4065-4074.
- Al-Taani, A.A., Batayneh, A.T., El-Radaideh, N., Ghrefat, H., Zumlot, T., Al-Rawabdeh, A.M., Taani, A., 2015. Spatial distribution and pollution assessment of trace metals in surface sediments of Ziqlab Reservoir, Jordan. *Environmental Monitoring and Assessment* 187(2), 1-14.
- Anwarul Hasan, G.M.M., Satter, M.A., Das, A.K., Asif, M.D., 2022. Detection of heavy metals in fish muscles and probabilistic health risk assessment. *Measurement: Food* 8, 100065.
- Bashir, I., Lone, F.A., Bhat, R.A., Mir, S.A., Dar, Z.A., Dar, S.A., 2020. Concerns and Threats of Contamination on Aquatic Ecosystems. In: Hakeem, K., Bhat, R., Qadri, H. (eds) *Bioremediation and Biotechnology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35691-0_1
- Bessa, A.Z.E., Nguetchoua, G., Janpou, A.K., El-Amier, Y.A., Nguetnga, O.A.N.N.M., Kayou, U.R.K., Armstrong-Altrin, J.S., 2021. Heavy metal contamination and its ecological risks in beach sediments along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon). *Earth Systems and Environment* 5(2), 433-444.
- Blankson, E.R., Ohene-Obeng, N.K.A., Awuah, B.A., Oduro, D., Ewool, J., Gbogbo, F., 2024. Heavy metal bioaccumulation in pelagic and benthic fish and associated health risk. *Biological Trace Element Research* 202(8), 3781-3788.
- Burgos-Aceves, M.A., Lionetti, L., Faggio, C., 2019. Multidisciplinary haematology as a prognostic device in environmental stress-induced responses in fish. *Science of the Total Environment* 670, 1170-1183.
- Cooper, C.B., Doyle, M.E., Kipp, K., 1991. Risk of consumption of contaminated seafood: The Quincy Bay case study. *Environmental Health Perspectives* 90, 133-140.
- De Mora, S., Fowler, S.W., Wyse, E., Azemard, S., 2004. Distribution of heavy metals in marine organisms and sediments in the Gulf and Gulf of Oman. *Marine Pollution Bulletin* 49(5-6), 410-424.
- Dinesh Kumar, R., Pandey, V., Jha, D.K., Rajakumar, S., Dharani, G., Ramakrishnan, B., 2025. Comparative evaluation of heavy metal concentration in commercially important fish: insights from organ-specific and interspecies variability. *Frontiers in Marine Science* 12, 1634855.
- Dorsey, A., Ingberman, L., Swarts, S., 2021. Toxicological profile for copper. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Available online: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp132.pdf> (Accessed on 15 December 2021).
- Eagderi, S., Mouludi-Saleh, A., Fricke, R., Alavi-Yeganeh, M.S., Mousavi-Sabet, H., Cicek, E., 2026. Fishes of the Sea of Oman. *Iranian Journal of Ichthyology* 13(Special Issue), 1-152.

- Eskandari, G., Savari, A., Kochanian, P., Taghavi Motlagh, A., 2012. Age and growth of *Otolithes ruber* in the Persian Gulf. Iranian Journal of Fisheries Sciences 11(1), 13-27.
- FAO/WHO., 1989. Evaluation of certain food additives and the contaminants mercury, lead and cadmium (WHO Technical Report Series No. 505). World Health Organization.
- Feng, W., Xu, H., Zhu, W., Zhang, H., Zhang, D., Wang, Z., 2021. Trace metal contamination and species-specific bioaccumulation in the Zhoushan Fishery, northwestern East China Sea. Environmental Science and Pollution Research 28, 34642-34654.
- Haghshenas, A., Hatami-Manesh, M., Sadeghi, M., Mirzaei, M., Mohammadi Bardkhashki, B., 2018. Assessment and ecological risk evaluation of heavy metals (lead, cadmium, copper, and zinc) in coastal sediments of Bushehr Province. Journal of Environmental Health Engineering 5(4), 359-374. (In Persian)
- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. Water Research 14(8), 975-1001.
- Hamzeh, M.A., Mahmoudi-Gharaei, M.H., Baskaleh, G.R., 2014. Geochemical investigation of sources and effects of heavy metal pollution in Ramin and Beris fishing harbors. Journal of Oceanography 11(17), 21-31. (In Persian)
- Hamzeh, M.A., Shah-Hosseini, M., Beni, A.N., 2013. Effect of fishing vessels on trace metal contamination in sediments of three harbors along Iranian Oman Sea coast. Environmental Monitoring and Assessment 185(2), 1791-1807.
- Han, J.L., Pan, X.D., Chen, Q., Huang, B.F., 2021. Health risk assessment of heavy metals in marine fish to the population in Zhejiang, China. Scientific Reports 11, 11079.
- Hosseini, A., Sanati, A. M., Tahmatan Moghadam, H., Namjoo, F., Khodadad, A., 2016. Bioaccumulation of heavy metals (lead, zinc, and copper) in muscle and liver of yellowfin seabream from the coastal waters of Deylam, northern Persian Gulf. Journal of Applied Ichthyological Research 4(1), 43-57. (In Persian)
- Hosseini, M., Nabavi, S.M., Nabavi, S.N., Pour, N.A., 2015. Heavy metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Fe, and Hg) content in four fish commonly consumed in Iran: risk assessment for the consumers. Environmental Monitoring and Assessment 187(5), 237.
- Iran Fisheries Organization (IFO)., 2015. Annual Iranian Fisheries Statistics 2014 and 2018. Fisheries Design and Program Office, Tehran, Iran, 33 p.
- Islam, M.S.M.M., Tuhin, U.H., Islam, M.A., Tamanna, L., Alam, M., Bakar, M. A., Kibria, M. M., Battacherjee, S. C., Arafeen, M. S., 2026. Trace Metal Contamination in Marine Fish Species: Implications for Food Safety and Human Health. Biological Trace Element Research 204, 3276-3291.
- Janadeleh Habib, H., Jahangiri, S., 2016. Investigation of contamination and risk assessment of heavy metals in tigertooth croaker (*Otolithes ruber*) and sediments of the Persian Gulf. Journal of Community Health Research 5(3), 169-181. (In Persian)
- Kaleshkumar, K., Rajaram, R., Paray, B.A., Ali, S., 2022. Are puffer fishes a viable source of nutritional value for human consumption—An investigation on recently commercialized marine puffer fishes (Tetraodontidae: Tetraodontiformes). Environmental Science and Pollution Research 29(31), 47350-47362.
- Khawar, M., Masood, Z., Ul Hasan, H., et al., 2024. Trace metals and nutrient analysis of marine fish species from the Gwadar coast. Scientific Reports 14, 6548.
- Khorasani, N., Hosseini, S.M., Pourbagher, H., Hosseini, S.V., Aflaki, F., 2013. Determination of some heavy metals in tigertooth croaker (*Otolithes ruber*): A case study of Mahshahr Port. Natural Environment (Natural Resources of Iran) 66(2), 181-190. (In Persian)
- Lipy, E.P., Rahman, M.T., Islam, S., 2025. Occurrence of heavy metals in fish species, water and sediments of the Pasur River in Bangladesh along with assessments of ecological and human health risks. Discover Environment 3, 49.
- Liu, Y., Kuang, W., Xu, J., Chen, J., Sun, X., Lin, C., Lin, H., 2022. Distribution, source and risk assessment of heavy metals in the seawater, sediments, and organisms of the Daya Bay, China. Marine Pollution Bulletin 174, 113297.

- Loghmani, M., Tootooni, M.M., Sharifian, S., 2022. Risk assessment of trace element accumulation in two species of edible commercial fish *Scomberoides commersonnianus* and *Cynoglossus arel* from the northern waters of the Oman Sea. *Marine Pollution Bulletin* 174, 113201.
- Łuczyńska, J., Paszczyk, B., Łuczyński, M.J., 2018. Fish as a bioindicator of heavy metals pollution in aquatic ecosystem of Pluszne Lake, Poland, and risk assessment for consumer's health. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 153, 60-67.
- Majed, N., Alam, M.K., Hossen Real, M.I., Khan, M.S., 2019. Accumulation of Copper and Zinc Metals from Water in *Anabus testudineus* Fish Species in Bangladesh. *Aquaculture Studies* 19(2), 91-102.
- Mashoufi, S., Mohammadi, M., Ghanbarifardi, M., Alimoradi, M.R., 2023. Determination of heavy metals (Cd, Zn, Pb, and Hg) content in *Capoeta fusca* from Lar wetland, Zahedan, Iran. *Iranian Journal of Ichthyology* 10(2), 102-113.
- Mna, H.B., Helali, M.A., Oueslati, W., Amri, S., Aleya, L., 2021. Spatial distribution, contamination assessment and potential ecological risk of some trace metals in the surface sediments of the Gulf of Tunis, North Tunisia. *Marine Pollution Bulletin* 170, 112608.
- Moopam., 1999. Manual of oceanographic observations and pollutant analyses methods. ROPME.
- Mziray, P., Kimirei, I.A., 2016. Bioaccumulation of heavy metals in marine fishes (*Siganus sutor*, *Lethrinus harak*, and *Rastrelliger kanagurta*) from Dar es Salaam Tanzania. *Regional Studies in Marine Science* 7, 72-80.
- Norouzi, M., Bagheri Tavani, M., 2018. Assessment of accumulation and consumption risk of five heavy metals in eleven fish species from the Persian Gulf waters (Khuzestan Province, Mahshahr Port). *Scientific-Research Quarterly of Fisheries Science and Technology* 7(4), 263-270. (In Persian)
- Olowojuni, O., Olaifa, F.E., Oyebola, O.O., 2025. Seasonal and spatial variations in water quality, heavy metal concentration in water, sediment and bioaccumulation in *Pseudolithus* species from the Gulf of Guinea, Ondo state, Nigeria. *Environmental Sciences Europe* 37, 181.
- Passoupathy, A., Natarajan, R., 1987. Food and feeding habit of *Kathala axillaris* Cuvier) and *Otolithes ruber* (Schneider). *Matsya* (12-13), 152-161.
- Prasath, P.M.D., Khan, T.H., 2008. Impact of tsunami on heavy metal accumulation in Water, Sediments and Fish at Poompuhar Coast, Southeast Coast of India. *E-Journal of Chemistry* 5(1), 16-22.
- Qin, G., Niu, Z., Yu, J., Li, Z., Ma, J., Xiang, P., 2021. Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology. *Chemosphere* 267, 129205.
- Sadeghi, P., Kazerouni, F., Savari, A., Movahedinia, A., Safahieh, A., Ajdari, D., 2015. Application of biomarkers in Epaulet grouper (*Epinephelus stoliczkae*) to assess chromium pollution in the Chabahar Bay and Gulf of Oman. *Science of the Total Environment* 518-519, 554-561.
- Sadeghi, P., Loghmani, M., Afsa, E., 2019. Trace element concentrations, ecological and health risk assessment in sediment and marine fish *Otolithes ruber* in Oman Sea, Iran. *Marine Pollution Bulletin* 140, 248-254.
- Sadeghi, P., Loghmani, M., Frokhzad, S., 2020. Human health risk assessment of heavy metals via consumption of commercial marine fish (*Thunnus albacares*, *Euthynnus affinis*, and *Katsuwonus pelamis*) in Oman Sea. *Environmental Science and Pollution Research* 27(13), 14944-14952.
- Sadeghi, P., Loghmani, M., Yousuf, D.J., Abadi, Z.T.R., 2021. Ecological and human health risk assessment of trace element pollution in sediments and five important commercial fishes of the Oman Sea. *Marine Pollution Bulletin* 173(Part A), 112962.
- Sahebi, Z., Emtiazjoo, M., Mohammad Shafiee, M.R., Sahebi, F., Ebrahimi Yazdan Abad, T., Kazemi, A., 2018. Examination of Relationship Between Mercury Rate with Zinc and Copper Changes in Muscle Tissue of *Otolithes Rubber* in Mahshahr Port—the Persian Gulf. *Journal of Water Chemistry and Technology* 40, 177-183.
- Samantara, M.K., Panigrahi, S., Mohanty, A.K., Sahu, G., Mishra, S. S., Palaniswami, K., Subramanian, V., Venkatraman, B., 2023. Heavy metal concentration in marine edible fishes and associated health risks: An assessment from Tamil Nadu coast, Bay of Bengal. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 5, 193-204.

- Simfukwe, K., Jere, W.W.L., Msukwa, A.V., 2025. Heavy metal contamination in riverine fish from the Lilongwe River, Malawi: Implications for human health risk. *Environmental Pollution and Management* 2, 163-171.
- Siscar, R., Torreblanca, A., Del Ramo, J., Solé, M., 2014. Modulation of metallothionein and metal partitioning in liver and kidney of *Solea senegalensis* after long-term acclimation to two environmental temperatures. *Environmental Research* 132, 197-205.
- Sobiha, N.N., Zaharin, A.A., Nizam, M.K., Juen, L.L., Kim, K.W., 2018. Bioaccumulation of heavy metals in maricultured fish *Lates calcarifer* (Barramudi), *Lutjanus campechanus* (red snapper) and *Lutjanus griseus* (grey snapper). *Chemosphere* 197, 318-324.
- Taghavi Motlagh, A., Ebtahi, B., Hosseini, H., 2004. Estimation of growth parameters of tigertooth croaker (*Otolithes ruber*) in the waters of Bushehr, Hormozgan, and Sistan and Baluchestan provinces. *Iranian Journal of Fisheries Sciences* 13(4), 15-28. (In Persian)
- Turekian, K.K., Wedepohl, K.H., 1961. Distribution of elements in the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin* 72(2), 175-192.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2000. Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisories, volume II. Risk Assessment and fish consumption limits. (EPA 823-B-00-008). United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2011. USEPA Regional Screening Level (RSL) Summary Table: November 2011. (Available at: <http://www.epa.gov/regshwmd/risk/human/Index.htm>).
- USEPA., 2010. Risk-Based Concentration Table. <http://www2.epa.gov/risk/risk-based-screening-table-generic-tables>.
- USEPA-503/8-89-002., 1989. US EPA Office of Marine and Estuarine Protection, Washington, DC. USEPA (Environmental Protection Agency). 1986. Subchronic (90-day) toxicity of thallium (I) sulfate in Sprague-Dawley rats. Prepared by the Midwest Research Institute, Kansas City, MO for the Office of Solid Waste, Washington, DC.
- Ustaoğlu, F., Kabir, M.H., Kormoker, T., et al., 2024. Appraisal of macro elements and trace metals in the edible fish from the Black Sea connecting coastal river, Türkiye: A preliminary study for health risk assessment. *Regional Studies in Marine Science* 71, 103406.
- Varol, M., Kaçar, E., Akın, H.K., 2020. Accumulation of trace elements in muscle, gill and liver of fish species (*Capoeta umbla* and *luciobarbus mystaceus*) in the Tigris River (Turkey), and health risk assessment. *Environmental Research* 186, 109570.
- Weber, P., Behr, E.R., Knorr, C.D.L., et al., 2013. Metals in the water, sediment, and tissues of two fish species from different trophic levels in a subtropical Brazilian river. *Microchemical Journal* 106, 61-66.
- Yap, C.K., Al-Mutairi, K.A., 2022. Copper and Zinc Levels in Commercial Marine Fish from Setiu, East Coast of Peninsular Malaysia. *Toxics* 10(2), 52.
- Yi, Y., Tang, C., Yi, T., Yang, Z., Zhang, S., 2017. Health risk assessment of heavy metals in fish and accumulation patterns in food web in the upper Yangtze River, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 145, 295-302.