



University of Guilan with collaboration of Iranian Aquaculture Society



Aquatic Animals Nutrition

Vol. 11, No. 2, 2025, pages: 21-35
DOI: 10.22124/janb.2025.30345.1288

RESEARCH PAPER

OPEN ACCESS

Perspectives on chemical hazard contamination on aquatic feed resources by heavy metals

Reza Baeelashaki¹, Seyed Soheil Ghaemmaghani^{2*}

1- Department of Animal Feed Hygiene, Faculty of Veterinary Medicine, Azad University of Iran, Tehran, Iran

2- Institute of Agricultural Education and Extension, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received 21 April 2025

Revised 15 June 2025

Accepted 18 June 2025

Published online 09 November 2025

KEYWORDS

Aquaculture
Fish feed
Heavy metal
Contamination
Health

ABSTRACT

Introduction: Fish feeding is typically composed of various ingredients, some of which may be contaminated with chemical hazards, especially heavy metals, due to environmental pollution or poor processing practices. For instance, researchers demonstrated that the distribution of heavy metals in fish tissues is significantly influenced by the metal load present in water, sediment, and feedstuffs that contaminated final product. Many commercial feed producers fail to meet safety standards, leading to the incorporation of contaminated raw materials into fish feed. The feed used in aquaculture is crucial and has a significant impact on the health and quality of aquatic organisms, which in turn affects public health for humans. If the feed for aquatic animals is exposed to chemical contaminants, it poses risks not only to the health of the fish but also to the final consumers. Chemical hazards in aquaculture can lead to bioaccumulation in fish, ultimately affecting the end consumers of these products.

Description: Contaminants such as heavy metals, mycotoxins, persistent organic pollutants, and veterinary drug residues are prevalent in aqua feeds and can accumulate in fish tissues, leading to food safety concerns. For instance, researchers highlight the presence of metals such as mercury and cadmium in fish feeds, which can adversely affect the quality of aquaculture products. Mycotoxin contamination in plant-based feed ingredients can lead to significant health issues in fish and, consequently, in humans consuming these fish. The World Health Organization has reported that a significant percentage of diseases in human populations worldwide can be attributed to prolonged exposure to environmental pollutants, including heavy metals. This highlights the urgent

need to monitor and regulate heavy metal levels in aquatic environments to safeguard both fish health and public health. In communities where fish consumption is higher due to its nutritional value, the risk of exposure to heavy metals is also increased. Therefore, assessing the health risks associated with heavy metal exposure in fish consumption guidelines is essential for informing consumers about potential dangers. The bioaccumulation of heavy metals is influenced by several factors, including the fish species, the concentration of metals in the environment, and the duration of exposure. For instance, benthic fish species typically exhibit higher levels of heavy metals compared to pelagic species due to their feeding habits and exposure to sediments that are often rich in pollutants. This accumulation of heavy metals can result in biological residues, where larger fish, higher in the food chain, accumulate greater concentrations of these toxic substances, thereby increasing the health risks associated with the consumption of such fish. By understanding the pathways of contamination and implementing effective remediation and management practices, the aquaculture industry can work towards ensuring the safety and sustainability of fish farming practices. The transition from traditional fishmeal-based feeds to alternative protein sources, coupled with effective waste management and the use of probiotics, can significantly reduce the ecological footprint of aquaculture. By prioritizing sustainability in feed formulation and aquaculture practices, the industry can contribute to the conservation of marine resources, enhance food security, and promote the health of aquatic ecosystems.

Conclusion: In conclusion, the presence of contaminants in aquaculture feed sources is a multifaceted issue that poses significant risks to aquatic ecosystems and human health. Heavy metals, mycotoxins, and persistent organic pollutants are prevalent in aqua feeds and can lead to bioaccumulation in fish, ultimately affecting consumers. Addressing these challenges requires a concerted effort from producers, regulators, and researchers to ensure the safety and sustainability of aquaculture practices. Today, in light of the importance of reducing chemical pollutants and hazards in food for both humans and animals, it is crucial to implement control and monitoring measures for raw materials and complete feed for aquatic organisms within the commercial feed production chain in manufacturing facilities. To address this issue, permissible limits, also referred to as maximum tolerable levels, are established for these substances.

*Corresponding author: soheil_ghaem@yahoo.com





"مقاله مروری"

نگرشی بر مخاطرات شیمیایی منابع غذایی آبزیان با تأکید بر فلزات سنگین

رضا بابی لاشکی^۱، سید سهیل قائم مقامی^{۲*}

۱- گروه بهداشت خوراک دام، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران

۲- موسسه آموزش و ترویج کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، تهران، ایران

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

کلمات کلیدی

چکیده

مواد غذایی با منشأ آبزیان بخش مهمی از سفره غذایی انسان را تشکیل می‌دهند و آبی‌پروری یکی از اجزای مهم در امنیت غذایی جهان به حساب می‌آید. صنعت آبی‌پروری با چالش‌های متعددی در زمینه ایمنی خوراک مواجه است که می‌تواند بر سلامت موجودات آبی و ایمنی محصولات غذایی مشتق شده از آن‌ها تأثیر بگذارد. هدف این مقاله، بررسی چالش‌های چندوجهی مرتبط با ایمنی خوراک در آبی‌پروری و پیشنهاد راه‌حل‌های بالقوه با استفاده از طیف وسیعی از منابع علمی است. شیوه‌های آبی‌پروری به‌طور قابل‌توجهی در چند دهه گذشته به دلیل افزایش تقاضا برای ماهی و محصولات دریایی تکامل یافته است. با وجود این، این شیوه‌ها به‌ویژه در مورد آلودگی خوراک آبزیان بدون چالش نخواهند بود. آلودگی‌های شیمیایی در منابع اولیه و محصول نهایی خوراک آبزیان از ابعاد مختلفی از جمله سموم قارچی، فلزات سنگین و میکروپلاستیک‌ها بررسی می‌شوند که می‌توانند اثرات مضر بر روی موجودات آبی و سلامت انسان داشته باشد. تأثیر فلزات سنگین بر سلامت ماهی موضوعی است که در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. فلزات سنگین مانند جیوه، سرب، کادمیوم، آرسنیک و کروم آلاینده‌های محیطی پایداری هستند که می‌توانند در اکوسیستم‌های آبی انباشته شوند و از طریق مصرف ماهی‌های آلوده اثرات مضر بر سلامت ماهی و متعاقباً سلامت انسان داشته باشند. تجمع زیستی این فلزات در بافت‌های آبزیان خطرات جدی به همراه دارد، زیرا می‌توانند عملکردهای فیزیولوژیک و توانایی‌های تولیدمثلی را مختل کنند که متعاقباً منجر به اختلالات سلامتی هم در موجودات آبی و هم در انسان خواهند شد. همچنین باید در مراحل ساخت صنعتی و در فرآیندهای تولید خوراک در کارخانه‌های تولید خوراک آبزیان نکات نظارتی در غالب استانداردهای تولید بهداشتی اجرا شود.

مقدمه

معمولاً خوراک ماهی از مواد مختلفی تشکیل شده است که برخی از آن‌ها ممکن است به دلیل آلودگی محیطی یا در اثر منابع اولیه ناسالم در فرایند تولید خوراک آبزیان، به فلزات سنگین آلوده شوند. برای مثال، نشان داده شده است که تجمع فلزات سنگین در بافت ماهیان به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر بار اولیه فلزی موجود در منابع آبی، رسوبات خاکی و خوراک مصرفی است که نشان داده شده است خوراک آلوده نقش مهمی در تجمع فلزات سنگین در ماهی دارد (Hossain et al. 2023). این امر در بسیاری از تولیدکنندگان و کارخانه‌های تجاری تولید خوراک که از استانداردهای ایمنی پیروی نمی‌کنند، منجر به تهیه خوراک آبزیانی می‌شود که در ترکیبات آن مواد شیمیایی از طریق مواد خوراکی خام آلوده، در خوراک پایانی ماهی ایجاد می‌شود (Das et al. 2017).

تشخیص فلزات سنگین در مواد تشکیل‌دهنده خوراک آبزیان یک موضوع گسترده است که نیاز به مستندسازی و نظارت کامل بر ایمنی خوراک در شیوه‌های آبی‌پروری دارد (Ajiboye et al. 2011). ورود فلزات سنگین به آبی‌پروری می‌تواند از مسیرهای مختلفی از جمله استفاده از خوراک آلوده، پساب‌های مناطق شهری و یا رواناب‌های کشاورزی رخ دهد. این فلزات مانند سرب و کادمیوم، علاوه بر پایداری در محیط‌زیست می‌توانند در موجودات آبی تجمع پیدا کنند که منجر به اثرات سمی شده و سلامت و ایمنی آبزیان و همچنین جوامع انسانی را به خطر خواهند انداخت (Choi et al. 2016; Kumar et al. 2019; Abbas et al. 2021).

فلزات سنگین می‌توانند در بافت گونه‌های مختلف ماهیان تجمع یابند و در نتیجه اثرات نامطلوبی بر رشد و ظرفیت تولیدمثلی آن‌ها ایجاد، و توانایی آن‌ها برای گرفتن طعمه را مختل کنند (Malik and Maurya, 2014). امروزه افزایش آلودگی محیط‌های آبی با فلزات سنگین، عمدتاً به دلیل فعالیت‌های انسانی مانند گسترش صنایع و

فعالیت‌های کشاورزی است که مواد سمی را به اکوسیستم‌های آبی وارد می‌کند (Mercy, 2017). فلزات سنگین عمدتاً از طریق پساب‌های صنعتی، روان‌آب‌های کشاورزی و زباله‌های شهری وارد محیط‌های آبی می‌شوند که به آلودگی آب‌ها کمک می‌کنند. این آلودگی نه تنها بر روی سلامت و عملکرد آبزیان به‌ویژه ماهیان تأثیر می‌گذارد، بلکه برای سفره مصرف‌کنندگان انسانی که به ماهی به‌عنوان یک غذای اصلی متکی هستند، خطراتی را نیز به همراه دارد. همچنین نظارت و ارزیابی سطوح فلزات سنگین در کارگاه‌های آبی‌پروری به‌طور منظم ضروری است. این مهم را می‌توان از طریق برنامه‌های پایش محیطی جامع که کیفیت آب، ترکیبات رسوب و سلامت موجودات آبی را ارزیابی می‌کند، به‌دست آورد (Kumar, 2019; Hossain et al. 2022; Hossain et al. 2023). چنین ارزیابی‌هایی می‌تواند به شناسایی منابع آلودگی به مواد شیمیایی و اطلاع‌رسانی درباره شیوه‌های مدیریتی باهدف کاهش ورودی فلزات سنگین به آبی‌پروری کمک کند. باید توجه کرد که برنامه‌ریزی و اجرای برنامه‌های آموزشی با هدف اهمیت ایمنی خوراک، مدیریت مناسب خوراک و استفاده از مواد غذایی جایگزین می‌تواند منجر به اقدامات و نتایج بهتر در کنترل مخاطرات شیمیایی در خوراک آبزیان شود. علاوه بر این، تقویت همکاری بین محققان، ذی‌نفعان صنعت تولید خوراک و نهادهای اجرایی و نظارتی می‌تواند توسعه و اجرای راهبردهای مؤثر برای افزایش ایمنی خوراک در آبی‌پروری را تسهیل کند (Glencross et al. 2023).

خوراک مورد استفاده در آبی‌پروری بسیار مهم و بر سلامت و کیفیت آبزیان و متعاقباً از جنبه بهداشت عمومی بر انسان‌ها تأثیرگذار است. مخاطرات شیمیایی در آبی‌پروری می‌توانند منجر به تجمع زیستی مواد شیمیایی در آبزیان شوند و در نهایت مصرف‌کنندگان نهایی این محصولات را آلوده کنند که در جدول ۱ به‌طور مختصر به نقش و اهمیت این آلاینده‌ها در آبی‌پروری پرداخته شده است.

جدول ۱ گزیده‌ای از مطالب اصلی مخاطرات فلزات سنگین در خوراک آبزیان
 Table 1 Key points importance of heavy metals hazards in aquatic feed

Pollution results	Effects of contamination on the environment	References
Chemical hazard	Types of contamination: including heavy metals, mycotoxins, and veterinary drug residues Feed safety: The presence of these contaminants can lead to health complications and reduced quality of aquaculture products Common heavy metals in aquatic ecosystems: mercury, cadmium, lead and arsenic	Vardali et al. 2023 Justino et al. 2016
Common sources	Raw materials: raw materials used in the production of aquatic feed may be contaminated due to industrial and agricultural activities Aquaculture water: Significant levels of heavy metals have been reported in aquaculture farm water	Hossain et al. 2023; Hossain et al. 2022 Kumar, 2019; Justino et al. 2016
Human health	Dangers of consuming contaminated fish: The accumulation of heavy metals in fish tissues can lead to poisoning and the development of chronic diseases such as neurological disorders and cancer	Vardali et al. 2023 Justino et al. 2016
Environmental	Marine ecosystems: The accumulation of heavy metals in sediments can harm deep-sea organisms and disrupt marine ecosystems Biodiversity: Pollution can lead to a decline in marine populations and changes in the structure of ecosystems	Morata et al. 2013

۱- سموم قارچی

یکی از مخاطرات مهم شیمیایی خوراک آبزیان سموم قارچی در خوراک مصرفی است که از گذشته به‌عنوان یک نگرانی مهم خوراک مصرفی در آبی‌پروری مطرح هستند. وجود سموم قارچی یا میکوتوکسین‌ها در آبزیان از مناطق مختلف ثبت و گزارش شده است که نشان‌دهنده گستردگی مشکل منطقه‌ای تا جهانی آن است و نیاز به توجه تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان محصولات آبی در زنجیره چرخه تولید دارد (Gonçalves et al. 2016). یکی از مهم‌ترین جنبه‌های آلودگی خوراک در آبی‌پروری، شیوع سموم قارچی به‌ویژه آفلاتوکسین‌ها و زیرانون است. آفلاتوکسین بی ۱ (AFB₁) یکی از سموم قارچی اصلی است که خوراک آبزیان را در سطح جهان به‌ویژه در مناطق گرمسیری که در آن مواد غذایی گیاهی به‌طور گسترده استفاده می‌شود، را آلوده می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که سطوح آلودگی AFB₁ اگر از محدودیت‌های نظارتی فراتر رود، خطرات جدی سلامتی را برای گونه‌های آبی‌پروری ایجاد کند (Namulawa et al. 2020; Ahmed et al. 2020; Vasconcelos et al. 2020). وجود سموم قارچی در غذای مصرفی می‌تواند منجر به کاهش نرخ رشد، اختلال در پاسخ‌های ایمنی و افزایش مرگ‌ومیر در ماهیان شود. علاوه بر این، تغییر توصیه‌ها و جیره‌های تغذیه‌ای آبزیان به سمت مواد خوراکی با منشاء گیاهی که ناشی از

هزینه بالا و دسترسی محدود به پودر ماهی است، خطر آلودگی میکوتوکسین‌ها را تشدید کرده است (Gonçalves et al. 2016). جدا از این سموم قارچی، دیگر آلاینده‌های خوراک دام مانند فلزات سنگین تأثیر منفی شدیدی بر رشد و تولیدمثل دام و حتی در آبزیان و ماهیان زینتی نیز خواهند داشت (Baeelashaki et al. 2024).

۲- آلاینده‌های آلی پایدار

آلاینده‌های آلی پایدار (POPs) مانند بی‌فنیل‌های پلی‌کلرینه و دیوکسین، به‌عنوان یکی دیگر از مخاطرات شیمیایی در خوراک کلیه دام‌ها و به‌ویژه در آبی‌پروری شناسایی شده‌اند. این مواد به دلیل حضور طولانی‌مدت در محیط، توانایی تجمع زیستی در موجودات آبی را دارند (Cirillo et al. 2014). مصرف ماهی‌های آلوده به این آلاینده‌ها می‌تواند منجر به خطرات جدی برای سلامتی انسان مانند اختلالات غدد درون‌ریز و افزایش خطر سرطان شود (Cirillo et al. 2014). وجود چنین آلاینده‌هایی در خوراک مورد استفاده در آبی‌پروری، نیاز به نظارت و تنظیم دقیق مواد تشکیل‌دهنده خوراک را برای اطمینان از ایمنی و سلامت غذا برجسته می‌کند (Cirillo et al. 2014; Justino et al. 2016).

۳- آلودگی به میکروپلاستیک

امروزه آلودگی میکروپلاستیک یک نگرانی در حال ظهور در آبی‌پروری است، به‌ویژه از آنجا که استفاده از مواد غذایی که ممکن است حاوی میکروپلاستیک باشند، رایج‌تر می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند از طریق خوراک‌های آلوده وارد زنجیره غذایی آبزیان شوند و به‌طور بالقوه منجر به آسیب فیزیکی و شیمیایی شده و بر سلامت ماهی‌ها و دیگر موجودات آبی تأثیر بگذارند. با ادامه گسترش صنعت آبی‌پروری، پرداختن به موضوع آلودگی میکروپلاستیک برای تضمین پایداری شیوه‌های پرورش ماهی بسیار مهم خواهد بود (Alak, 2023). میکروپلاستیک‌ها در سرخرگ‌ها، ریه‌ها، مغز و حتی شیر انسان یافت شده‌اند و در سال ۲۰۲۵ انتظار می‌رود که حدود ۵۱۶ میلیون تن از این مواد به مصرف انسان‌ها برسد (UNDP, 2025). بنابراین، با رویکرد کاهش مصرف پلاستیک‌ها می‌توان به صنعت آبی‌پروری و بهداشت و سلامت انسان کمک کرد.

۴- داروهای دامپزشکی

استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها در خوراک آبزیان یکی دیگر از عوامل مؤثر در آلودگی خوراک است. آنتی‌بیوتیک‌ها اغلب برای جلوگیری از بیماری و یا تقویت رشد ماهی تجویز می‌شوند. با وجود این، استفاده از آن‌ها می‌تواند منجر به ایجاد باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک شده که خطرات قابل‌توجهی برای سلامت انسان به همراه دارد (Ogbonna and Inana, 2018). امروزه توجه به این امر نیاز به اجرای مقررات سخت‌گیرانه و نظارت بر استفاده صحیح از آنتی‌بیوتیک در آبی‌پروری برای کاهش خطرات بالقوه در سلامتی آبزیان و انسان دارد.

۵- فلزات سنگین

منابع آلودگی فلزات سنگین اغلب از مواد تشکیل‌دهنده مورد استفاده در تولید خوراک و همچنین عوامل محیطی مانند منابع آب آلوده ناشی می‌شود. تجمع این فلزات در ماهی می‌تواند تحت تأثیر بار فلزی در آب، رسوبات و خوراک قرار گیرد که موضوع ارتباط نزدیک بین روش‌های آبی‌پروری و سلامت محیط را نمایان می‌کند (Hossain et al. 2023).

فلزات سنگینی مانند جیوه، سرب و کادمیوم می‌توانند در ماهی انباشته شوند و خطراتی را برای سلامت ماهی و نیز مصرف‌کنندگان انسانی ایجاد کنند (Cirillo et al. 2023; Hossain et al. 2014). فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم و جیوه می‌توانند بر فیزیولوژی، رشد و تولیدمثل ماهی تأثیر منفی بگذارند و در نهایت پایداری آبی‌پروری را تهدید کنند (Emon, 2023). بررسی‌ها نشان داده است که برخی از فلزات سنگین می‌توانند فرآیندهای زیستی مختلف را در ماهی مختل کند و منجر به اثرات مضر بر سلامت و زنده‌مانی آن‌ها شود (Emon, 2023). علاوه بر این، تجمع زیستی این فلزات خطرات قابل‌توجهی برای سلامت انسان به همراه دارد، زیرا ماهی‌های آلوده منبع غذایی رایج پروتئین برای بسیاری از جمعیت‌ها هستند و می‌تواند منجر به مشکلات جدی سلامتی برای مصرف‌کنندگان شود. به‌ویژه زمانی که این ماهی‌ها به‌طور منظم مصرف شوند می‌توانند طیف وسیعی از اثرات سمی، از جمله پیامدهای سرطان‌زایی و غیره را ایجاد کنند. سازمان بهداشت جهانی گزارش داده است که درصد قابل‌توجهی از بیماری‌های جوامع انسانی در سطح جهان را می‌توان به قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض آلاینده‌های محیطی از جمله فلزات سنگین نسبت داد (Naz et al. 2022). این امر بر نیاز فوری به نظارت و تنظیم سطوح فلزات سنگین در محیط‌های آبی برای حفظ سلامت ماهی و سلامت عمومی تأکید می‌کند. در جوامعی که اغلب به دلیل ارزش غذایی مصرف ماهی بیشتری دارند، احتمال قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین نیز بیشتر است. بنابراین ارزیابی خطرات سلامتی انسان در دستورالعمل‌های مصرف ماهی برای آگاه کردن مصرف‌کنندگان در مورد خطرات بالقوه قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین امری ضروری است.

۵-۱ پیامدهای زیست‌محیطی فلزات سنگین

پیامدهای محیط زیستی قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین در آبی‌پروری فراتر از خود مصرف آبزیان و ماهی است. رسوبات در مزارع آبی‌پروری اغلب آن‌ها را به مخازن فلزات سنگین تبدیل می‌کند که در ادامه از طریق مسیرهای مختلف می‌تواند وارد زنجیره غذایی شود. رسوبات در مزارع پرورش ماهی می‌توانند سطوح بالایی از فلزات سنگین را انباشته کنند، که ممکن است متعاقباً بر

بوم‌سازگان و موجودات آبی اطراف تأثیر بگذارد. این تجمع می‌تواند منجر به ایجاد چرخه آلودگی شود که در این چرخه، موجودات کفزی این فلزات را می‌بلعند و آن‌ها را به زنجیره غذایی منتقل می‌کنند و در نهایت، بر شکارچیان بزرگ‌تر تأثیر خواهند گذاشت (Sultana et al. 2022). چهار عنصر جیوه، سرب، کادمیوم و آرسنیک فلزاتی هستند که به علت کاربرد گسترده و سمیت و توزیع وسیع آن‌ها بیشترین خطرات زیست‌محیطی را دارند. اگرچه این عناصر، آلاینده‌های آب و مواد غذایی هستند، ولی به‌طور عمده از مکانی به مکان دیگر از طریق هوا نیز منتقل می‌شوند و این انتقال عموماً به‌صورت جذب بر روی ذرات انجام می‌شود. برای مثال، بیش از نیمی از ورودی فلزات سنگین در دریاچه‌های بزرگ به دلیل رسوب کردن آن‌ها از هوا هست و همچنین، آلودگی خاک و آب با فلزات سنگین یکی از معضلات زیست‌محیطی عمده در جوامع بشری است که علاوه بر کاهش عملکرد و کیفیت محصولات تولیدی، پایداری تولیدات کشاورزی را نیز دچار مخاطره کرده و سلامتی افراد جامعه را نیز به خطر می‌اندازد.

کاهش جمعیت ماهی به دلیل فلزات سنگین می‌تواند شبکه‌های غذایی را مختل کند و منجر به از دست دادن تنوع زیستی شود که بر پایداری و انعطاف‌پذیری بوم‌سازگان تأثیر خواهد گذاشت. این آلودگی‌های مؤثر بر مواد مغذی خوراک آبزیان را نمی‌توان نادیده گرفت، زیرا مواد مغذی اضافی حاصل از خوراک خورده نشده و ضایعات ماهی می‌تواند منجر به غنی شدن پیکره آبی به‌وسیله مواد آلی ورودی و یا رواناب سطحی حاوی نیتрат و فسفات در آب‌های اطراف شود و در نتیجه، شکوفایی‌های مضر جلبکی و کاهش اکسیژن را به همراه داشته باشد (Kawasaki et al. 2016, Nathanailides et al. 2023). تخلیه زباله‌های حاصل از عملیات آبی‌پروری می‌تواند منجر به تخریب بوم‌سازگان آبی شود. بنابراین، اجرای راهبردهای تولید زباله کنترل‌شده از طریق فرمول‌بندی و مدیریت دقیق خوراک برای حفظ تعادل بوم‌شناختی در آبی‌پروری امری ضروری است (Almirola, 2011). شیوه‌های آبی‌پروری پایدار باید پیامدهای زیست‌محیطی استفاده از خوراک را در نظر بگیرند و در تلاش برای به حداقل رساندن ورود مواد مغذی به آب‌های مجاور باشند (Authman et al. 2015). با مکان‌یابی راهبردی عملیات آبی‌پروری در مناطق کم‌جمعیت دریایی، می‌توان اثرات زیست‌محیطی را

کاهش و درعین‌حال، بهره‌وری تولید را به حد بیشینه رساند. این رویکرد با اهداف گسترده‌تر توسعه پایدار و حفاظت از تنوع زیستی همسو بوده، زیرا امکان همزیستی آبی‌پروری با دیگر منابع دریایی را فراهم می‌کند (Stead, 2019). در این فرآیند نه تنها بهداشت و سلامت موجودات آبی تضمین می‌شود، بلکه نگرانی در مورد ایمنی غذا و سلامت عمومی جامعه انسانی را نیز کاهش خواهد داد. رابطه بین فلزات سنگین و مقاومت آنتی‌بیوتیکی در آبی‌پروری یکی دیگر از زمینه‌های مهم استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها در آبی‌پروری است، به‌ویژه در محیط‌هایی که قبلاً توسط فلزات سنگین تحت تأثیر قرار گرفته و منجر به ایجاد باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک شده باشد که این پدیده تهدیدی قابل‌توجه برای سلامت آبزیان است، زیرا باکتری‌های ایجادشده به‌عنوان گونه‌های مقاوم می‌توانند در محیط‌های آبی‌پروری تکثیر، و به‌طور بالقوه وارد منابع غذایی انسانی شوند. تعامل بین در معرض قرار گرفتن فلزات سنگین و مقاومت آنتی‌بیوتیکی پیچیدگی مدیریت خطرات سلامتی در آبی‌پروری را برجسته می‌کند (Adekanmbi et al. 2021).

۵-۲- تشدید آلودگی فلزات سنگین

تجمع فلزات سنگین در دستگاه‌های آبی‌پروری اغلب با شیوه‌های به کار گرفته‌شده برای آبی‌پروری در این محیط‌ها تشدید می‌شود. همچنین، در برخی از محیط‌های پرورش آبزیان ممکن است احتمال خطر آلودگی به فلزات سنگین زیاد باشد. در نتیجه، احتمال تجمع زیستی و خطرات بعدی سلامتی برای مصرف‌کنندگان نهایی افزایش می‌یابد. برای مثال، اتکای صرف به برخی منابع خوراکی که ممکن است به فلزات سنگین آلوده باشند به‌عنوان عامل مهمی در افزایش سطوح این آلاینده‌ها در ماهی‌های پرورشی شناسایی شده است (Das et al. 2017; Hossain et al. 2022). مطالعات نشان داده است که استخرهای آبی‌پروری می‌توانند غلظت فلزات سنگین را به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از آنچه در بدنه‌های آبی طبیعی یافت می‌شود، نشان دهند (Zhang et al. 2022). این امر به‌ویژه زمانی نگران‌کننده است که مصرف‌ماهی‌های این استخرها خطرات جدی برای بهداشت عمومی و مصرف‌کننده نهایی این ماهیان (انسان) ایجاد کند (Briffa et al. 2020; Abbas et al. 2021).

می‌توانند فلزات سنگین را جمع کنند، می‌توانند آن‌ها را دوباره به ستون آب آزاد کنند و بر حیات آبزیان اطراف تأثیر بگذارند و به طور بالقوه وارد زنجیره غذایی انسان شوند (Tang et al. 2014).

۳-۵ تأثیر فلزات سنگین بر سلامت انسان

فلزات سنگین ممکن است انباشتگی زیستی (bioaccumulation) ایجاد کنند. این تجمع زیستی فلزات سنگین متأثر از عوامل مختلفی از جمله گونه ماهی، غلظت فلزات در محیط و مدت زمان قرار گرفتن در معرض آن است. برای مثال، گونه‌های ماهی کفزی به دلیل عادات غذایی و در معرض بودن با رسوباتی که اغلب سرشار از آلاینده‌ها هستند، سطوح بالاتر فلزات سنگین را در مقایسه با گونه‌های سطح‌زی دارند. تجمع فلزات سنگین می‌تواند منجر به باقی‌مانده زیستی شود، جایی که در زنجیره غذایی ماهیان بزرگ‌تر و دارای سطوح تغذیه‌ای بالاتر، غلظت‌های بیشتری از این مواد سمی را تجربه کرده و خطرات سلامتی مرتبط با مصرف این ماهیان را تشدید می‌کند (Chalabis-Mazurek et al. 2021). در جدول ۲ به اثرات مهم‌ترین فلزات سنگین بر سلامتی انسان به صورت بیماری‌های حاد (کوتاه‌مدت) و یا مزمن (بلندمدت) پرداخته شده است.

تجمع فلزات سنگین در بوم‌سازگان آبی‌پروری از جنبه‌های مختلف بررسی شده است. بر اساس گزارش‌ها سازمان جهانی بهداشت، غلظت کادمیوم در رسوبات استخرهای پرورش میگو در مناطق آسیای جنوب شرقی به‌طور میانگین چندین برابر استاندارد مجاز است. در واقع، منشأ اصلی این آلودگی به نفوذ رواناب‌های کشاورزی حاوی ترکیبات فسفات‌دار با کادمیوم در خاک‌های زراعی هم‌جوار مرتبط تشخیص داده شده است.

همچنین در پاره‌ای از مطالعات نشان داده شده است که رسوبات زیر قفس‌های پرورش ماهی آزاد در نروژ دارای تجمع این فلزات است که منشأ آن استفاده از ترکیبات خاص در تورهای پرورشی برای جلوگیری از رشد جلبک‌ها است. همچنین در منطقه خلیج فارس به‌ویژه در محدوده آبی ایران و عربستان سعودی، سطوحی از فلز سنگین سرب ثبت شده که عمدتاً مرتبط با فعالیت‌های استخراج و پالایش نفت، تخلیه آب توازن کشتی‌ها و انتشار ذرات حاوی سرب از سوخت‌های فسیلی در صنعت کشتیرانی است.

این رسوبات می‌توانند در یک بازه زمانی فلزات سنگین را در خود انباشته، و منبع آلودگی دائمی ایجاد کنند که خود می‌تواند کل شبکه غذایی آبزیان را تحت تأثیر قرار دهد (Sultana et al. 2022; Hossain et al. 2023). مطالعات نشان داده‌اند که رسوبات هم به‌عنوان محل تجمع و هم به‌عنوان منبع فلزات سنگین عمل می‌کنند؛ درحالی‌که

جدول ۲ اثرات حاد و مزمن برخی از فلزات سنگین مهم بر سلامتی انسان

Table 2 Acute and chronic effects of some important heavy metals on the human health			
Element	Chronic effects	Acute effects	Origin
Arsenic (As)	Diabetes, hyperkeratosis, cancer	Cardiac arrhythmia, polyneuritis	Pesticides, fungicides, metal
Mercury (Hg)	Stomatitis, nephrotic syndrome, tremor	Diarrhea, fever, vomiting	Pesticides, batteries, paper industries
Cadmium (Cd)	Proteinuria, lung cancer, possible severe kidney damage	Inflammation of the lungs	Fertilizers, nickel-cadmium batteries,
Lead (Pb)	Anemia, foot drop	Encephalopathy, brain disorder	Paint, smoking, car pollution, mining
Chrome (Cr)	Pulmonary fibrosis, lung cancer	Gastrointestinal bleeding, renal failure	Mines, natural resources

از ریزموجودات برای سم‌زدایی فلزات سنگین استفاده می‌کنند، در کاهش آلودگی در محیط‌های آبی‌پروری نویدبخش بوده‌اند. استفاده از گونه‌های باکتریایی خاص که

۴-۵ کاهش آلودگی به فلزات سنگین

برای مقابله با چالش‌های ناشی از آلودگی فلزات سنگین، چندین راهبرد پیشنهاد شده است. فنون زیست‌پالایی که

(Justino et al. 2016). علاوه بر این، ایجاد چارچوب‌های نظارتی بر ترکیبات مواد اولیه مورد استفاده در خوراک آبزیان و اجرای دستورالعمل استانداردهای ایمنی غذای آبزیان می‌تواند به حداقل رساندن ورود مواد مضر به سازگان آبزی‌پروری را تضمین کند (Cirillo et al. 2014).

یک رویکرد امیدوارکننده برای مدیریت پایدار خوراک، ادغام منابع پروتئینی جایگزین، مانند خوراک‌های مبتنی بر حشرات است. استفاده از لارو مگس سرباز سیاه به دلیل توانایی آن‌ها در بازیافت زباله‌های آلی و تبدیل آن به پروتئین باکیفیت بالا برای آبزی‌پروری توجه یافته است. جستجو برای منابع پروتئینی جایگزین برای آبزی‌پروری پایدار امری حیاتی است. چالش مهم ایمنی خوراک در آبزی‌پروری، تکیه بر پودر ماهی و روغن ماهی است که ممکن است از ماهی‌هایی با آلودگی بالا به دست آید. تحقیقات نشان داده است که یک ماده غذایی جدید غنی از پروتئین مانند ریزجلبک‌ها و حشرات که مزایای تغذیه‌ای آن پذیرفته شده، می‌تواند جایگزین مناسبی برای خوراک‌های سنتی مبتنی بر پودر ماهیان باشد (Kosulaki et al. 2022). برای مثال، استفاده از لارو مگس سرباز سیاه (Ouko et al. 2022) نه تنها اثرات زیست‌محیطی مرتبط با مواد غذایی معمولی را کاهش می‌دهد، بلکه بازیافت ضایعات غذایی را نیز ارتقا می‌دهد. در نتیجه به اقتصاد خوراک چرخشی در آبزی‌پروری کمک می‌کند. فرمول‌بندی غذای آبزیان با استفاده از مواد اولیه گیاهی، راه دیگری برای افزایش پایداری است. تحقیقات نشان می‌دهد که تغییر از پودر ماهی و روغن آن به فراورده‌های جانبی با منشأ گیاهان می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه شود و درعین حال، نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با کاهش منابع دریایی را نیز برطرف کند (Shima, 2024). با وجود این، چالش در حصول اطمینان از اینکه این خوراک‌های گیاهی نیازهای تغذیه‌ای گونه‌های ماهی‌های گوشت‌خوار را برآورده می‌کنند، باقی می‌ماند که این امر مستلزم تحقیقات بیشتر برای بهینه‌سازی فرمول‌های خوراک است (Lal, 2024). علاوه بر این، توسعه منابع خوراک جایگزین، مانند فناوری بیوفلاک، ممکن است با کاهش اتکا به مواد غذایی سنتی و بهبود سلامت کلی دستگاه‌های آبزی‌پروری، راه‌حلی پایدار

می‌توانند به‌طور مؤثر غلظت فلزات سنگین را در سازگان آبی کاهش دهند (Emon, 2023) و یا رعایت استانداردهای آبزی‌پروری در به حداقل رساندن خطرات مرتبط با قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین کمک خواهد کرد (Phú et al. 2015). این شیوه‌ها نه تنها سلامت ماهی را افزایش می‌دهند، بلکه به پایداری کلی عملیات آبزی‌پروری نیز کمک می‌کنند. همچنین مطالعات نشان داده است که برخی از افزودنی‌های خوراک می‌توانند کیفیت آب را بهبود بخشند و غلظت فلزات سنگین را کاهش دهند و در نتیجه سلامتی بهتری را برای ماهی‌ها فراهم کنند (Khalil et al. 2014). این رویکرد بر اهمیت راهبردهای فرمول‌بندی نوین تغذیه در کاهش خطرات مرتبط با آلودگی فلزات سنگین در آبزی‌پروری تأکید می‌کند.

به‌کارگیری فنون پاک‌سازی زیستی که شامل استفاده از عوامل زیستی برای سم‌زدایی محیط‌های آلوده است، می‌تواند در مدیریت سطوح آلودگی نیز مفید باشد (Emon, 2023). برای مثال، سویه‌های میکروبی خاص توان جذب فلزات سنگین از سازگان آبی را نشان داده‌اند و در نتیجه، فراهمی زیستی و سمیت آن‌ها را کاهش می‌دهند (Cheng, 2021). آبزی‌پروری یکپارچه با کشاورزی یا همان آکواپونیک یکی دیگر از راهبردهای مؤثر، اجرای روش‌های یکپارچه آبزی‌پروری است که پرورش ماهی را با کشاورزی ترکیب می‌کند. این رویکرد نه تنها بهره‌وری را افزایش می‌دهد، بلکه امکان بازیافت مواد مغذی و کاهش ضایعات را نیز فراهم می‌کند، که می‌تواند به حداقل رساندن ورود فلزات سنگین به محیط‌های آبی کمک کند (Schenone and Cirelli, 2010). علاوه بر این، نشان داده شده است که استفاده از اصلاح‌کننده خاک در استخرهای آبزی‌پروری باعث بهبود کیفیت آب و کاهش غلظت فلزات سنگین، و در نتیجه، باعث رشد سریع‌تر ماهی می‌شود (Sorur et al. 2014).

۵-۵ خوراک بهداشتی در تجارت آبزیان

اجرای نظارت دقیق و فنون علمی برای شناسایی آلاینده‌ها در خوراک آبزی‌پروری ضروری است. پیشرفت‌ها در سنجش شیمیایی، ابزارهایی را برای تشخیص طیف وسیعی از آلاینده‌ها فراهم کرده است که تولیدکنندگان را قادر می‌کند تا از ایمنی خوراک اطمینان حاصل کنند

آبزی پروری نه تنها به نفع محیط زیست است، بلکه از دوام طولانی مدت صنعت نیز حمایت می کند. با ادامه رشد آبزی پروری، اجرای نظارت و اقدامات نظارتی دقیق برای اطمینان از ایمنی و پایداری شیوه های آبزی پروری ضروری است. این امر شامل ترویج استفاده از مواد غذایی با کیفیت بالا، کاهش اتکا به آنتی بیوتیک ها و رسیدگی به اثرات زیست محیطی مرتبط با آلودگی مواد مغذی و استفاده از منابع پروتئینی برای جایگزینی پودر ماهی است. با برداشتن این گام ها، صنعت آبزی پروری می تواند به سمت آینده ای پایدارتر که هم ایمنی غذا و هم سلامت محیط را در اولویت قرار می دهد، پیاده سازی کند. آلودگی خوراک ماهی به فلزات سنگین خطرات قابل توجهی را برای سلامت ماهی و مصرف کنندگان انسان به همراه دارد که نیازمند نظارت و راهبردهای مدیریتی جامع است.

امروزه با توجه به اهمیت کاهش آلودگی ها و مخاطرات شیمیایی در مواد غذایی انسان و دام برای کنترل و نظارت بر این امر برای مواد خام و خوراک کامل آبزیان در زنجیره تولید خوراک تجاری در کارخانه های تولید خوراک، میزان حد مجاز و یا همان بیشینه رو اداری در نظر گرفته می شود. در کشور ما در خصوص مواد اولیه و محصولات نهایی خوراک مصرفی آبزیان می توان به مصوبات استاندارد ملی به شماره ۱۲۹۶۸ با عنوان خوراک انسان و دام- بیشینه فلزات سنگین و روش های آزمون- که برای واردات مشمول مقررات استاندارد اجباری می باشد، اشاره کرد که تجدیدنظر اول این استاندارد در یک هزار و هشتصد و بیست و یکمین اجلاس کمیته ملی استاندارد خوراک و فرآورده های کشاورزی تصویب شده است.

۷- پیشنهادها

توجه بیشتر به فرایند جریان دانش در بخش آبزی پروری و اهمیت به نقش کلیدی آموزش بهره برداران، همگام با اجرای پژوهش های میدانی در مناطق مختلف آبزی پروری کشور، در راستای پایبندی بر استانداردهای بهداشتی و به کارگیری ابزارهای قانونی برای کنترل مواد اولیه و فرایند تولید خوراکی های آبزیان از جمله پیشنهادات متخصصین بهداشت خوراک دام در این مقاله است.

منابع

ارائه دهد (Amarenciano et al. 2011; Ahmed et al. 2017).

پروبیوتیک ها و پری بیوتیک ها در خوراک آبزی پروری باعث افزایش سلامت روده و جذب مواد مغذی می شود و به ایمنی و کیفیت کلی محصولات آبزی پروری کمک خواهد کرد (Oliva-Teles, 2012; Kaya et al. 2022). همچنین، ادغام افزودنی های خوراکی کاربردی می تواند نقش مهمی در بهبود کارایی خوراک و کاهش خروجی های زباله ایفا کند. راهبردهای تغذیه، از جمله دفعات و زمان، عوامل مهمی هستند که بر عملکرد رشد و سلامت ماهی های پرورشی تأثیر می گذارند. مطالعات نشان داده اند که بهینه سازی شیوه های تغذیه می تواند ضریب تبدیل خوراک را افزایش داده و با به حداقل رساندن تولید زباله، اثرات زیست محیطی آبزی پروری را کاهش دهد. برای مثال، تنظیم دفعات تغذیه می تواند منجر به بهبود ترکیب بدن و وضعیت سلامت کلی در ماهی شود و در نتیجه، به شیوه های پایدارتر آبزی پروری کمک می کند (Caradal et al. 2022). علاوه بر این، نشان داده شده است که استفاده از پروبیوتیک ها در خوراک آبزیان باعث افزایش سلامت روده و کاهش اتکا به آنتی بیوتیک ها می شود (Nathanailides et al. 2021). باید توجه کرد که بهینه سازی فرمول بندی خوراک آبزیان برای برآوردن نیازهای غذایی خاص گونه های مختلف ماهی ضروری است. این را می توان از طریق استفاده از روش های دقیق که ترکیبات خوراک را بر اساس مراحل رشد و وضعیت سلامت ماهیان تنظیم می کنند، به دست آورد (Bu, 2023).

۶- نتیجه گیری

وجود آلاینده ها در منابع خوراک آبزی پروری یک موضوع چندوجهی است که خطرات قابل توجهی برای بوم سازگان آبی و سلامت انسان به همراه دارد. آلاینده های موجود در منابع خوراک آبزی پروری خطرات قابل توجهی را هم برای موجودات آبزی و هم برای سلامت انسان به همراه دارند. پرداختن به این چالش ها مستلزم تلاشی هماهنگ از سوی تولیدکنندگان، تنظیم کنندگان و محققان برای اطمینان از ایمنی و پایداری شیوه های آبزی پروری است. با اجرای این راهبردها، می توان اثرات فلزات سنگین بر بوم سازگان آبی را کاهش داد و از ایمنی محصولات آبزی پروری برای مصرف انسان اطمینان حاصل کرد. ادغام شیوه های پایدار در

- Adekanmbi, A.O., Olawuni, O.G., Olaposi, A.V. 2021. Metal contamination and coexistence of metal and antibiotic resistance in *Vibrio* species recovered from aquaculture ponds with and without history of antibiotic usage in Southwest Nigeria. *Bulletin of the National Research Centre* 45: 122. DOI: 10.1186/s42269-021-00581-3.
- Ajiboye, O.O., Yakubu, A.F., Adams, T.E., Olaji, E.D., Nwogu, N.A. 2011. A review of the use of copepods in marine fish larviculture. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 21: 225-246. DOI: 10.1007/s11160-010-9169-3.
- Alak, G., Köktürk, M., Atamanalp, M., Kocaman, E.M., Ucar, A., Esenbuğa, N., Özcan, S., Parlak, V. 2023. Microplastic abundance in rainbow trout life cycle: step by step. *Sustainability* 15: 14255. DOI: 10.3390/su151914255.
- Amirkolaie, A.K. 2011. Reduction in the environmental impact of waste discharged by fish farms through feed and feeding. *Reviews in Aquaculture* 3: 19-26. DOI: 10.1111/j.1753-5131.2010.01040.x.
- Arru, B., Furesi, R., Gasco, L., Madau, F., Pulina, P. 2019. The introduction of insect meal into fish diet: the first economic analysis on European sea bass farming. *Sustainability* 11: 1697. DOI: 10.3390/su11061697.
- Authman, M.M., Zaki, M.S., Khallaf, E.A., Abbas, H.H. 2015. Use of fish as bio-indicator of the effects of heavy metals pollution. *Journal of Aquaculture Research & Development* 6: 1-13. DOI: 10.4172/2155-9546.1000328.
- Baelashaki, R., Ghaemmaghani, S. 2024. Investigating the effect of feed hygiene in aquatic animals. *Journal of Ornamental Aquatics* 11: 47-56. DOI: 10.22034/11.3.2.
- Barrett, L., Swearer, S., Dempster, T. 2018. Impacts of marine and freshwater aquaculture on wildlife: a global meta-analysis. *Reviews in Aquaculture* 11: 1022-1044. DOI: 10.1111/raq.12277.
- Boyd, C., McNevin, A., Davis, R. 2022. The contribution of fisheries and aquaculture to the global protein supply. *Food Security* 14: 805-827. DOI: 10.1007/s12571-021-01246-9.
- Briffa, J., Sinagra, E., Blundell, R. 2020. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon* 6: e04691. DOI: 10.1016/j.heliyon. 2020. e04691.
- Bu, X. 2023. Innovation and development of the aquaculture nutrition research and feed industry in China. *Reviews in Aquaculture* 16: 759-774. DOI: 10.1111/raq.12865.
- Bytyçi, P., Fetoshi, O., Durmishi, B., Zhushi-Etemi, F., Çadraku, H., Ismaili, M., Shala-Abazi, A. 2018. Status assessment of heavy metals in water of the Lepenci River basin, Kosovo. *Journal of Ecological Engineering* 19: 19-32. DOI: 10.12911/22998993/91273.
- Cai, Z., Zhou, L., Liu, L., Wang, D., Ren, W., Long, H., Xie, Z. 2021. Bacterial epiphyte and endophyte communities of seagrass *Thalassia hemprichii*: the impact of feed extract solution. *Environmental Microbiology Reports* 13: 757-772. DOI: 10.1111/1758-2229.13019.
- Cashion, T., Manach, F., Zeller, D., Pauly, D. 2017. Most fish destined for fishmeal production are food-grade fish. *Fish and Fisheries* 18: 837-844. DOI: 10.1111/faf.12209.
- Chałabis-Mazurek, A., Rechulicz, J., Pyz-Łukasik, R. 2021. A food-safety risk assessment of mercury, lead and cadmium in fish recreationally caught from three lakes in Poland. *Animals* 11: 3507. DOI: 10.3390/ani11123507.
- Cheng, J., Fan, H.C. 2021. Probiotic biosorption as a way to remove heavy metal in seawater. *Journal of Emerging Investigators*. 4: 1-4. DOI: 10.59720/21-029.
- Choi, J., Park, S., Kim, Y., Oh, S., Lim, E., Hong, Y., Kim, M. 2016. Pathogenic microorganisms, heavy metals, and

- antibiotic residues in seven Korean freshwater aquaculture species. *Food Science and Biotechnology* 25: 1469-1476. DOI: 10.1007/s10068-016-0228-y.
- Cirillo, T., Fasano, E., Esposito, F., Amorena, M., Cocchieri, R. 2014. Occurrence of NDL-PCBs, DL-PCBs, PCDD/FS, lead and cadmium in feed and in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) farmed in Italy. *Food Additives and Contaminants* 31A: 276-287. DOI: 10.1080/19440049.2013.865279.
- Das, P.R., Hossain, M.K., Sarker, B.S., Parvin, A., Das, S.S., Moniruzzaman, M., Saha, B. 2017. Heavy metals in farm sediments, feeds and bioaccumulation of some selected heavy metals in various tissues of farmed *Pangasius hypophthalmus* in Bangladesh. *Fisheries and Aquaculture Journal* 8: 1-9. DOI: 10.4172/2150-3508.1000218.
- Diye, R. 2024. Contamination of fish feed with pathogenic organisms: implications on fish diseases in aquaculture systems. *Ghana Journal of Science Technology and Development* 91: 77-94. DOI: 10.47881/283.967x.
- Dutta, J., Zaman, S., Thakur, T., Kaushik, S., Mitra, A., Singh, P., Datta, R. 2022. Assessment of the bioaccumulation pattern of Pb, Cd, Cr and Hg in edible fishes of East Kolkata wetlands, India. *Saudi Journal of Biological Sciences* 29: 758-766. DOI: 10.1016/j.sjbs.2021.09.039.
- Emerenciano, M., Ballester, E., Cavalli, R., Wasielesky, W. 2011. Biofloc technology application as a food source in a limited water exchange nursery system for pink shrimp *Farfantepenaeus brasiliensis* (Latreille, 1817). *Aquaculture Research* 43: 447-457. DOI: 10.1111/j.1365-2109.2011.02848.x.
- Emon, F. 2023. Bioaccumulation and bioremediation of heavy metals in fishes: a review. *Toxics* 11: 510. DOI: 10.3390/toxics11060510.
- Fang, J., Zhang, P., Fang, J., Jiang, Z., Gao, Y., Du, M. 2018. The growth and carbon allocation of abalone (*Haliotis discus* Hannai) of different sizes at different temperatures based on the abalone-kelp integrated multitrophic aquaculture model. *Aquaculture Research* 49: 2676-2683. DOI: 10.1111/are.13769.
- Garzón, C., Rey, M., Sarmiento, P., Cárdenas, J. 2016. Fisheries, fish pollution and biodiversity: choice experiments with fishermen, traders and consumers. *Economía Política* 33: 333-353. DOI: 10.1007/s40888-016-0041-3.
- Gephart, J., Golden, C., Asche, F., Belton, B., Brugere, C., Froehlich, H., Allison, E. 2020. Scenarios for global aquaculture and its role in human nutrition. *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture* 29: 122-138. DOI: 10.1080/23308249.2020.1782342.
- Glencross, B., Fracalossi, D., Hua, K., Izquierdo, M., Ma, K., Overland, M., Yakupityage, A. 2023. Harvesting the benefits of nutritional research to address global challenges in the 21st century. *Journal of the World Aquaculture Society* 54: 343-363. DOI: 10.1111/jwas.12948.
- Gonçalves, R., Naehrer, K., Santos, G. 2016. Occurrence of mycotoxins in commercial aquafeeds in Asia and Europe: a real risk to aquaculture. *Reviews in Aquaculture* 10: 263-280. DOI: 10.1111/raq.12159.
- Hossain, M., Miazie, M., Nur, A., Paul, S., Bakar, M., Paray, B., Arai, T. 2022. Assessment of metal contamination in water of freshwater aquaculture farms from a South Asian tropical coastal area. *Toxics* 10: 536. DOI: 10.3390/toxics10090536.
- Hossain, M.B., Sultana, J., Pingki, F.H., Nur, A.A.U., Mia, M.S., Bakar, M.A., Yu, J., Paray, B.A. and Arai, T., 2023. Accumulation and contamination assessment of heavy metals in sediments of commercial aquaculture farms from a coastal area along the northern Bay of Bengal. *Frontiers in Environmental Science* 11, p.1148360. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1148360.

- Ju, Y., Chen, C., Chen, C., Chuang, X., Dong, C. 2017. Assessment of heavy metals in aquaculture fishes collected from southwest coast of Taiwan and human consumption risk. *International Biodeterioration and Biodegradation* 124: 314-325. DOI: 10.1016/j.ibiod.2017.04.003.
- Justino, C.I., Duarte, K.R., Freitas, A.C., Panteleitchouk, T.S., Duarte, A.C., Rocha-Santos, T.A. 2016. Contaminants in aquaculture: Overview of analytical techniques for their determination. *Trends in Analytical Chemistry* 80: 293-310. DOI: 10.1016/j.trac.2015.07.014.
- Karadal, O., Mantoğlu, S., Güroy, D., Şimşek, O., Çelebi, K., Eroldoğan, O., Genc, E. 2022. The effects of feeding frequency on the growth performance, body composition, health status and histology of juvenile meagre (*Argyrosomus regius*). *Aquaculture Research* 53: 6855-6867. DOI: 10.1111/are.16151.
- Kawasaki, N., Rajuddin, M., Nagao, N., Yusoff, F., Imai, A. 2016. Release of nitrogen and phosphorus from aquaculture farms to Selangor River, Malaysia. *International Journal of Environmental Science and Development* 7: 113-116. DOI: 10.7763/ijesd.2016.v7.751.
- Kaya, D., Hersi, M., Genc, E. 2022. Symbiotic effect of *Bacillus clausii* and galacto-oligosaccharide on growth and survival rates in red cherry shrimp (*Neocaridina davidi*). *Marine and Life Sciences* 4: 146-151. DOI: 10.51756/marlife.1181522.
- Kousoulaki, K., Sveen, L., Norén, F., Espmark, Å., 2022. Atlantic salmon (*Salmo salar*) performance fed low trophic ingredients in a fish meal and fish oil free diet. *Frontiers in Physiology* 13: 884740. DOI: 10.3389/fphys.2022.884740.
- Kumar, R., Laskar, M.A., Hewaidy, I.F. 2019. Modified Adsorbents for Removal of Heavy Metals from Aqueous Environment: A Review. *Earth Systems and Environment* 3: 83-93. DOI: 10.1007/s41748-018-0085-3.
- Lal, J. 2024. Emerging innovations in aquaculture: navigating towards sustainable solutions. *International Journal of Environment and Climate Change* 14: 83-96. DOI: 10.9734/ijecc/2024/v14i74254.
- Lester, S.E., Stevens, J.M., Gentry, R.R., Kappel, C.V., Bell, T.W., Costello, C.J., Gaines, S.D., Kiefer, D.A., Maue, C.C., Rensel, J.E., Simons, R.D. 2018. Marine spatial planning makes room for offshore aquaculture in crowded coastal waters. *Nature Communications* 9: 945. DOI: 10.1038/s41467-018-03249-1.
- Łuszczek-Trojan, E., Sionkowski, J., Drag-Kozak, E., Popek, W. 2015. Copper and lead accumulation in common carp females during long-term dietary exposure to these metals in pond conditions. *Aquaculture Research* 47: 2334-2348. DOI: 10.1111/are.12689.
- Mercy, M. and Dhanalakshmi, B., 2017. Toxicological evaluation of heavy metals in tissues of freshwater fish *Oreochromis niloticus* collected from lakes of Coimbatore district, Tamilnadu, India. *International Research Journal of Pharmacy* 8: 41-45. DOI: 10.7897/2230-8407.08018.
- Maddusa, S.S., Asrifuddin, A., Mantjoro, E.M., 2022. Public health risk analysis due to consuming Tilapia (*Oreochromis niloticus*) containing heavy metals in Bakan village, Lolayan district, Bolaang Mongondow regency. *International Journal of Community Medicine and Public Health* 10: 45-51. DOI: 10.18203/2394-6040.ijcmph20223524.
- Malik, D.S., Maurya, P.K. 2014. Heavy metal concentration in water, sediment, and tissues of fish species (*Heteropneustis fossilis* and *Puntius ticto*) from Kali River, India. *Toxicological & Environmental Chemistry* 96: 1195-1206. DOI: 10.1080/02772248.2015.1015296.
- Namulawa, V.T., Mutiga, S., Musimbi, F., Akello, S., Ngángá, F., Kago, L., Kyallo,

- M., Harvey, J., Ghimire, S., 2020. Assessment of fungal contamination in fish feed from the Lake Victoria Basin, Uganda. *Toxins* 12: 233. DOI: 10.3390/toxins12040233.
- Nathanailides, C., Kolygas, M., Tsoumani, M., Gouva, E., Mavraganis, T., Karayanni, H. 2023. Addressing phosphorus waste in open flow freshwater fish farms: Challenges and solutions. *Fishes* 8: 442. DOI: 10.20944/preprints202307.0227.v2.
- Naz, S., Fazio, F., Habib, S., Nawaz, G., Attaullah, S., Ullah, M., Ahmed, I. 2022. Incidence of heavy metals in the application of fertilizers to crops (wheat and rice), a fish (common carp) pond and a human health risk assessment. *Sustainability* 14: 13441. DOI: 10.3390/su142013441.
- Nyarko, E., Boateng, C., Asamoah, O., Edusei, M., Mahu, E. 2023. Potential human health risks associated with ingestion of heavy metals through fish consumption in the Gulf. *Toxicology Reports* 10: 117-123. DOI: 10.1016/j.toxrep.2023.01.005.
- Obiero, K., Waidbacher, H., Nyawanda, B., Munguti, J., Manyala, J., Kaunda-Arara, B. 2019. Predicting uptake of aquaculture technologies among smallholder fish farmers in Kenya. *Aquaculture International* 27: 1689-1707. DOI: 10.1007/s10499-019-00423-0.
- Ogbonna, D., Inana, M. 2018. Characterization and multiple antibiotic resistance of bacterial isolates associated with fish aquaculture in ponds and rivers in Port Harcourt, Nigeria. *Journal of Advances in Microbiology* 10: 1-14. DOI: 10.9734/jamb/2018/41073.
- Oliva Teles, A. 2012. Nutrition and health of aquaculture fish. *Journal of Fish Diseases* 35: 83-108. DOI: 10.1111/j.1365-2761.2011.01333.x.
- Ouko, K.O., Mukhebi, A.W., Obiero, K.O., Opondo, F.A., Ngo'ng'a, C.A., Ongor, D.O. 2022. Stakeholders' perspectives on the use of black soldier fly larvae as an alternative sustainable feed ingredient in aquaculture, Kenya. *African Journal of Agricultural and Resource Economics* 17: 64-79. DOI: 10.53936/afjare.2022.17(1).4.
- Overland, M., Skrede, A. 2016. Yeast derived from lignocellulosic biomass as a sustainable feed resource for use in aquaculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 97: 733-742. DOI: 10.1002/jsfa.8007.
- Phú, T., Phuong, N., Dung, T., Hai, D., Son, V., Rico, A., Dalsgaard, A. 2015. An evaluation of fish health-management practices and occupational health hazards associated with *Pangasianodon hypophthalmus* aquaculture in the Mekong Delta, Vietnam. *Aquaculture Research* 47: 2778-2794. DOI: 10.1111/are.12728.
- Sanou, A., Coulibaly, S., Tanon, E., Baro, M., Meite, N., Guei, A., Atse, B. 2022. Contamination level of arsenic and cadmium in the water and sediments of a fish farm: application of contamination indices. *Agriculture, Forestry and Fisheries* 11: 90. DOI: 10.11648/j.aff.20221102.15.
- Schenone, N., Cirelli, A. 2010. Fish-farming water quality and environmental concerns in Argentina: a regional approach. *Aquaculture International* 19: 855-863. DOI: 10.1007/s10499-010-9404-x.
- Seiler, C., Berendonk, T.U. 2012. Heavy metal driven co-selection of antibiotic resistance in soil and water bodies impacted by agriculture and aquaculture. *Frontiers in Microbiology* 3: 399. DOI: 10.3389/fmicb.2012.00399.
- Shima, H., Asakura, T., Sakata, K., Koiso, M., Kikuchi, J. 2024. Feed Components and Timing to Improve the Feed Conversion Ratio for Sustainable Aquaculture Using Starch. *International Journal of Molecular Sciences* 25: 7921. DOI: 10.20944/preprints202406.1207.v1.
- Singh, A., Gupta, H., Srivastava, A., Srivastava, A., Joshi, R.C., Dutta, M.K.

2021. A novel pilot study on imaging-based identification of fish exposed to heavy metal (Hg) contamination. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45: 15571. DOI: 10.1111/jfpp.15571.
- Sorur, M., El-Baramawy, M., Sharkawey, G., Kord, I. 2014. Evaluation of biochar as a biofilter for application in commercial fish culture system. *Mediterranean Aquaculture Journal* 6: 30-39. DOI: 10.21608/maj.2014.4626.
- Stead, S. 2019. Using systems thinking and open innovation to strengthen aquaculture policy for the United Sustainable Development Goals. *Journal of Fish Biology* 94: 837-844. DOI: 10.1111/jfb.13970.
- Sultana, S., Hossain, M., Choudhury, T., Yu, J., Rana, M., Noman, M., Arai, T. 2022. Ecological and human health risk assessment of heavy metals in cultured shrimp and aquaculture sludge. *Toxics* 10: 175. DOI: 10.3390/toxics10040175.
- Tang, W., Shan, B., Zhang, W., Zhang, H., Wang, L., Ding, Y. 2014. Heavy metal pollution characteristics of surface sediments in different aquatic ecosystems in eastern China: a comprehensive understanding. *Plos One* 9: e108996. DOI: 10.1371/journal.pone.0108996.
- Vardali, S., Papadouli, C., Rigos, G., Nengas, I., Panagiotaki, P., Golomazou, E. 2023. Recent advances in mycotoxin determination in fish feed ingredients. *Molecules* 28: 2519. DOI: 10.3390/molecules28062519.
- Venkateswarlu, V., Venkatrayulu, C. 2020. Bioaccumulation of heavy metals in edible marine fish from coastal areas of Nellore, Andhra Pradesh, India. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences* 10: 18-24. DOI: 10.30574/gscbps.2020.10.1.0244.
- Vijayaram, S. 2024. Use of algae in aquaculture: A review. *Fishes* 9: 63. DOI: 10.3390/fishes9020063.
- Wei, Y., Bu, J., Long, H., Zhang, X., Cai, X., Huang, A., Ren, W., Xie, Z. 2021. Community structure of protease-producing bacteria cultivated from aquaculture systems: potential impact of a tropical environment. *Frontiers in Microbiology* 12: 638129. DOI: 10.3389/fmicb.2021.638129.
- Zhang, R., Zhao, J., Sheng, Q., Zhang, Y., Ye, J. 2022. Pollution evaluation and health risk assessment of trace metals in eleven tissues of *Mylopharyngodon piceus* collected from an aquaculture pond in Huzhou, near southern Taihu Lake. *Sustainability* 14: 11323. DOI: 10.3390/su141811323.