Journal of Marine Medicine
Spring 2025, Volume 7, Issue 1
Pages: 10-16
10.30491/7.1.3

Artificial intelligence (AI) in Marine Toxicology: Automated Detection of Biotoxins in Seafood

Salimeh Khanamani Falahati-pour [1], Reza Hosseiniara [2*]

[1] *Computer Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran*
[2] *Spiritual Health Research Center, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran*

Received: 21 April 2025 **Accepted:** 7 June 2025

Abstract

Marine biotoxins, produced by harmful algal blooms, pose significant threats to public health and the seafood industry, necessitating advanced detection methods. Traditional approaches, such as mouse bioassays and chromatography, are often slow, costly, and ethically concerning. The integration of artificial intelligence (AI) with biosensor technology offers a transformative approach to enhance the speed, accuracy, and efficiency of detecting these toxins. This review explores the current state of biosensors for marine biotoxin detection and examines how AI can automate and optimize these systems. By leveraging machine learning and deep learning algorithms, AI enables rapid data analysis, pattern recognition, and predictive modeling, paving the way for real-time monitoring and early warning systems. Despite challenges such as the need for standardized datasets and regulatory approval, the integration of AI with biosensors holds immense promise for revolutionizing marine toxicology and ensuring safer seafood consumption. This article synthesizes recent advancements in biosensor technology and AI applications, providing a comprehensive overview of their potential impact on public health and food safety.

Keywords: Marine Biotoxins, Artificial Intelligence, Biosensors, Seafood Safety, Real-Time Monitoring

[*]**Corresponding author: Reza Hosseiniara**, **Email**: hosseiniara7@kaums.ac.ir
Address: Spiritual Health Research Center, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran.

مجله طب دریا
دوره ۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴
صفحات: ۱۶-۱۰
10.30491/7.1.3

هوش مصنوعی در سم‌شناسی دریایی: تشخیص خودکار بیوتوکسین‌ها در محصولات دریایی

سلیمه خنامانی فلاحتی پور[۱]، سید رضا حسینی آرا [۲] *

[۱] گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
[۲] مرکز تحقیقات سلامت معنوی، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱ **پذیرش مقاله:** ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

چکیده

بیوتوکسین‌های دریایی، که از شکوفایی جلبکی مضر به وجود می‌آیند، تهدیدی جدی برای سلامت عمومی و صنعت شیلات ایجاد می‌کنند و نیاز به روش‌های پیشرفته تشخیص را ضروری می‌سازند. روش‌های سنتی مانند سنجش‌های زیستی با موش و کروماتوگرافی، اغلب زمان‌بر، پرهزینه و از نظر اخلاقی چالش‌برانگیز هستند. ادغام هوش مصنوعی با حسگرهای زیستی، رویکردی نوآورانه برای افزایش سرعت، دقت و کارایی در تشخیص این سموم ارائه می‌دهد. این مطالعه مروری وضعیت کنونی حسگرهای زیستی برای شناسایی بیوتوکسین‌های دریایی را بررسی می‌کند و نقش هوش مصنوعی در خودکارسازی و بهینه‌سازی این سیستم‌ها را تحلیل می‌نماید. هوش مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی و یادگیری عمیق، تحلیل سریع داده‌ها، شناسایی الگوها و مدل‌سازی پیش‌بینی را ممکن می‌سازد و راه را برای پایش لحظه‌ای و سیستم‌های هشدار زودهنگام هموار می‌کند. با وجود موانعی مانند نیاز به داده‌های استاندارد و تأییدیه‌های قانونی، ترکیب هوش مصنوعی با حسگرهای زیستی پتانسیل بالایی برای تحول در سم‌شناسی دریایی و تضمین ایمنی محصولات دریایی دارد. این مطالعه با تلفیق پیشرفت‌های اخیر در فناوری حسگرهای زیستی و کاربردهای هوش مصنوعی، دیدگاهی جامع درباره تأثیر این فناوری‌ها بر سلامت عمومی و ایمنی غذایی ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: بیوتوکسین‌های دریایی، هوش مصنوعی، زیست‌حسگرها، ایمنی غذایی محصولات دریایی، پایش لحظه‌ای (زمان واقعی)

*نویسنده مسئول: **سید رضا حسینی آرا**. پست الکترونیک: hosseiniara7@kaums.ac.ir
آدرس: مرکز تحقیقات سلامت معنوی، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران.

مقدمه

بیوتوکسین‌های دریایی، که از متابولیت‌های ثانویه برخی میکروجلبک‌ها طی شکوفایی جلبکی مضر (HABs) تولید می‌شوند، به‌عنوان چالشی روبه‌رشد برای سلامت عمومی شناخته می‌شوند. این سموم در صدف‌ها و ماهی‌ها تجمع یافته و مصرف آن‌ها می‌تواند بیماری‌هایی از ناراحتی‌های گوارشی خفیف تا آسیب‌های عصبی شدید و حتی مرگ را به دنبال داشته باشد (۱). تغییرات اقلیمی و تغذیه‌گرایی، با افزایش دفعات و شدت شکوفایی جلبکی، نیاز به روش‌های تشخیص سریع و دقیق این سموم را بیش از پیش ضروری کرده است (۲). روش‌های سنتی مانند سنجش های زیستی در موش و کروماتوگرافی مایع–طیف‌سنجی جرمی (LC-MS/MS)، با وجود کاربرد گسترده، با مشکلاتی نظیر هزینه بالا، زمان‌بر بودن و نگرانی‌های اخلاقی مرتبط با استفاده از حیوانات مواجه هستند (۳, ۴).

اخیراً، حسگرهای زیستی به‌عنوان جایگزینی نوآورانه برای تشخیص بیوتوکسین‌های دریایی مطرح شده‌اند. این حسگرها با استفاده از عناصر زیستی مانند آنتی‌بادی‌ها، آنزیم‌ها یا آپتامرها، که با مبدل‌هایی ترکیب شده و برهم‌کنش‌های زیستی را به سیگنال‌های قابل اندازه‌گیری تبدیل می‌کنند، مزایایی چون سرعت بالا، قابلیت حمل و هزینه‌اثربخشی را ارائه می‌دهند (۵،۶). بااین‌حال، محدودیت‌هایی در تحلیل داده‌ها و خودکارسازی، مانع از بهره‌برداری کامل از ظرفیت این حسگرها شده است. در این راستا، هوش مصنوعی (AI) با بهره‌گیری از تکنیک‌های یادگیری ماشینی و یادگیری عمیق، توانایی پردازش داده‌های پیچیده، شناسایی الگوهای مرتبط با سموم و خودکارسازی فرآیند تشخیص را فراهم می‌کند. ادغام هوش مصنوعی با حسگرهای زیستی، امکان توسعه سیستم‌های هوشمند برای پایش لحظه ای و مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده را فراهم کرده و ایمنی محصولات دریایی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد (۷).

این مطالعه با هدف ارائه دیدگاهی جامع از نقش هوش مصنوعی در سم‌شناسی دریایی، به‌ویژه در خودکارسازی تشخیص بیوتوکسین‌های محصولات دریایی، تدوین شده است. در این راستا، انواع بیوتوکسین‌ها و اثرات بهداشتی آن‌ها، روش‌های سنتی تشخیص، فناوری حسگرهای زیستی و کاربردهای هوش مصنوعی در بهبود فرآیندهای تشخیص بررسی می‌شوند. این مطالعه با برجسته‌سازی پیشرفت‌های اخیر، شناسایی چالش‌ها و پیشنهاد جهت‌گیری‌های آینده، به توسعه پژوهش در حوزه ایمنی غذایی و سلامت عمومی کمک می‌کند.

بیوتوکسین‌های دریایی: انواع و تأثیرات بهداشتی

بیوتوکسین‌های دریایی ترکیباتی متنوع هستند که توسط میکروجلبک‌ها و برخی دیگر از موجودات دریایی تولید می‌شوند. این سموم بر اساس ساختار شیمیایی و نوع مسمومیت ایجادشده طبقه‌بندی می‌شوند (۸). گروه‌های اصلی این سموم عبارت‌اند از:

- سموم فلج‌کننده صدف‌ها (Paralytic Shellfish Toxins): مانند ساکسی‌توکسین، که با اثر بر کانال‌های سدیمی وابسته به ولتاژ، علائم عصبی ایجاد کرده و در موارد شدید به فلج تنفسی کشنده منجر می‌شوند (۹).
- سموم فراموشی‌زای صدف‌ها (Amnesic Shellfish Toxins): شامل اسید دوموئیک (domoic acid)، که به آسیب عصبی و اختلال در حافظه می‌انجامد (۱۰).
- سموم اسهالی صدف‌ها (Diarrheic Shellfish Toxins): مانند اسید اوکادائیک (okadaic acid)، که با مهار فسفاتازهای پروتئینی، ناراحتی‌های گوارشی ایجاد می‌کنند (۱۱).
- سموم عصبی صدف‌ها (Neurotoxic Shellfish Toxins): شامل بروتوکسین‌ها و سیگواتوکسین‌ها، که با تأثیر بر کانال‌های سدیمی، علائم عصبی به وجود می‌آورند (۱۲, ۱۳).

این سموم بیشتر در صدف‌های فیلترکننده مانند صدف‌های دوکفه‌ای، صدف خوراکی و اویستر تجمع می‌یابند و برای مصرف‌کنندگان خطرآفرین هستند (۲). مواجهه انسان با این سموم می‌تواند، بسته به نوع سم و میزان مواجهه، علائمی از ناراحتی‌های خفیف گوارشی تا آسیب‌های شدید عصبی و حتی مرگ ایجاد کند. علاوه بر این، بیوتوکسین‌های دریایی تأثیرات اقتصادی قابل‌توجهی دارند، از جمله تعطیلی مناطق برداشت صدف و فراخوان محصولات آلوده (۱).

روش‌های سنتی تشخیص

روش‌های سنتی تشخیص بیوتوکسین‌های دریایی شامل موارد زیر هستند:

- سنجش زیستی در موش (Mouse Bioassay): این روش، که پیش‌تر به‌عنوان استاندارد اصلی شناخته می‌شد، با تزریق عصاره‌های صدف به موش‌ها و بررسی علائم یا مرگ آن‌ها انجام می‌شود. بااین‌حال، این روش به دلیل مسائل اخلاقی، زمان‌بر بودن و دقت پایین با انتقاد مواجه است (۱۴).
- کروماتوگرافی و طیف‌سنجی جرمی: تکنیک‌هایی مانند کروماتوگرافی مایع–طیف‌سنجی جرمی (LC-MS/MS) از حساسیت و دقت بالایی برخوردارند، اما به تجهیزات گران‌قیمت و نیروی انسانی متخصص نیاز دارند (۱۵, ۱۶).
- سنجش‌های عملکردی: آزمایش‌های مبتنی بر سلول، مانند آزمایش زیستی نورو–a۲، اثرات سموم بر عملکرد سلولی را شناسایی می‌کنند. بااین‌حال، این روش‌ها پیچیده بوده و برای کاربردهای میدانی چندان مناسب نیستند (۱۲, ۱۷).

اگرچه این روش‌ها کارآمد هستند، اما محدودیت‌هایی مانند هزینه بالا، زمان‌بر بودن و دسترسی محدود، نیاز به روش‌های جایگزین را ضروری می‌سازد (۱۸).

حسگرهای زیستی (Biosensors) و روش‌های جایگزین

حسگرهای زیستی به‌عنوان جایگزینی نوآورانه برای تشخیص بیوتوکسین‌های دریایی، با ترکیب عناصر شناسایی زیستی (مانند آنزیم‌ها، آنتی‌بادی‌ها یا آپتامرها) و مبدل‌ها، سیگنال‌های قابل‌اندازه‌گیری تولید می‌کنند (۵، ۱۹). انواع اصلی این حسگرها عبارت‌اند از:

- حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی: این حسگرها از عناصر شناسایی زیستی و مبدل‌های الکتروشیمیایی برای تولید سیگنال استفاده می‌کنند. برای مثال، Park و همکاران (۲۰) حسگری الکتروشیمیایی با استفاده از آپتامر و نانوذرات پلاتین متخلخل برای تشخیص ساکسی‌توکسین طراحی کردند که حساسیت و انتخاب‌پذیری بالایی داشت. همچنین، Zeng و همکاران (۲۱) حسگری مبتنی بر آپتامر و نانوذرات نقره برای شناسایی ساکسی‌توکسین توسعه دادند که دقت بسیار بالایی نشان داد.
- حسگرهای زیستی نوری: این حسگرها بر تغییرات ویژگی‌های نور، مانند فلورسانس یا رزونانس پلاسمون سطحی (SPR)، متکی هستند. به‌عنوان نمونه، McNamee و همکاران (۲۲) حسگر SPR چندگانه‌ای برای تشخیص همزمان سموم فلج‌کننده صدف‌ها، اسید اوکادائیک و اسید دوموئیک ارائه کردند.
- ایمونوآزمایش‌ها: آزمایش‌های الایزا و ایمونوآزمایش‌های مبتنی بر فلورسانس به دلیل سادگی و حساسیت بالا کاربرد گسترده‌ای دارند. Ji و همکاران قابلیت ایمونوآزمایش‌ها را برای تشخیص میدانی بیوتوکسین‌های دریایی بررسی و پتانسیل بالای آن‌ها را تأیید کردند (۲۳).

حسگرهای زیستی با ویژگی‌هایی مانند سرعت بالا، قابلیت حمل و هزینه‌اثربخشی، برای پایش در محل مناسب هستند (۶). بااین‌حال، یکپارچه‌سازی آن‌ها با هوش مصنوعی و خودکارسازی می‌تواند عملکردشان را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد.

خودکارسازی و هوش مصنوعی در تشخیص

هوش مصنوعی (AI) با بهره‌گیری از خودکارسازی، تحلیل پیشرفته داده‌ها و مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده، فناوری حسگرهای زیستی را متحول کرده است. در تشخیص بیوتوکسین‌های دریایی، هوش مصنوعی دقت، کارایی و مقیاس‌پذیری حسگرها را ارتقا می‌دهد و به تضمین ایمنی محصولات دریایی و سلامت عمومی کمک می‌کند.

نقش هوش مصنوعی در حسگرهای زیستی

هوش مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی (ML) و یادگیری عمیق، داده‌های پیچیده حسگرهای زیستی (مانند حسگرهای الکتروشیمیایی، نوری و پیزوالکتریک) را پردازش و تحلیل می‌کند. این حسگرها هنگام تعامل با بیوتوکسین‌ها سیگنال‌هایی تولید می‌کنند که نیازمند تحلیل دقیق برای شناسایی نوع سم یا تعیین غلظت آن هستند. هوش مصنوعی در این زمینه از طریق موارد زیر مؤثر است:

- شناسایی الگو: الگوریتم‌هایی مانند ماشین‌های بردار پشتیبان (support vector machines)، و شبکه‌های عصبی، الگوهای سیگنال مرتبط با سموم خاص را شناسایی می‌کنند. برای مثال، در حسگرهای الکتروشیمیایی، هوش مصنوعی می‌تواند تغییرات ولتاژ یا جریان را تحلیل کرده و سمومی مانند ساکسی‌توکسین یا اسید اوکادائیک را با دقت بالا تشخیص دهد (۸). این قابلیت برای تمایز بین آنالوگ‌های سموم فلج‌کننده صدف‌ها با سطوح سمیت متفاوت حیاتی است.
- مدیریت داده‌ها و خودکارسازی: هوش مصنوعی پردازش داده‌های بزرگ را خودکار کرده و نیاز به دخالت انسانی را کاهش می‌دهد. این ویژگی در غربالگری گسترده، مانند پایش محصولات دریایی در مناطق مختلف، بسیار مفید است و امکان ارائه نتایج در زمان واقعی را فراهم می‌کند (۸).
- مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده: هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های تاریخی و عوامل محیطی (مانند دما، شوری و مواد مغذی)، وقوع شکوفایی جلبکی مضر را پیش‌بینی می‌کند و به توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام کمک می‌کند (۲۴). این پیش‌بینی‌ها برای مدیریت پیش‌فعال و کاهش خطرات آلودگی ضروری هستند.

هوش مصنوعی در آزمایش‌های مبتنی بر ماهی زبرا

ماهی زبرا (Danio rerio) به دلیل شباهت ژنتیکی به انسان، رشد سریع و شفافیت بدنی، به‌عنوان مدلی کلیدی در سم‌شناسی استفاده می‌شود (۹). در سم‌شناسی دریایی، لاروهای ماهی زبرا برای شناسایی بیوتوکسین‌هایی مانند سموم فلج‌کننده و فراموشی‌زا از طریق آزمایش‌های رفتاری به‌کار می‌روند. هوش مصنوعی کارایی این آزمایش‌ها را بهبود می‌بخشد:

- تحلیل تصویر و ویدئو: هوش مصنوعی با تحلیل تصاویر و ویدئوهای ماهی زبرا، تغییرات مورفولوژیکی و رفتاری ناشی از سموم را شناسایی می‌کند. برای مثال، مدل‌های یادگیری ماشینی می‌توانند الگوهای شنا یا ناهنجاری‌های رشدی را تشخیص دهند که نشان‌دهنده سمیت عصبی سمومی مانند ساکسی‌توکسین یا اسید دوموئیک هستند (۸، ۹).
- غربالگری با توان بالا: تکنیک‌های بینایی کامپیوتری امکان تحلیل سریع تعداد زیادی نمونه را فراهم می‌کنند. این قابلیت برای پایش محیط‌های دریایی گسترده، به‌ویژه در مواجهه با شکوفایی جلبکی مضر، ضروری است (۸).

هوش مصنوعی در طراحی و بهینه‌سازی حسگرهای زیستی

هوش مصنوعی نه‌تنها در تحلیل داده‌ها، بلکه در طراحی و بهبود حسگرهای زیستی نیز نقش دارد:

- انتخاب عنصر شناسایی زیستی: هوش مصنوعی می‌تواند ویژگی‌های پیوند آپتامرها را شبیه‌سازی کرده و انتخاب آن‌ها را تسریع کند. این امر برای تشخیص سموم پیچیده مانند سیگواتوکسین‌ها یا تترودوتوکسین‌ها مفید است (۲۵).
- بهینه‌سازی انتقال سیگنال: الگوریتم‌های یادگیری ماشینی طراحی مبدل‌ها را بهبود می‌بخشند، نسبت سیگنال به نویز را افزایش داده و حساسیت حسگرها را برای تشخیص غلظت‌های پایین سموم ارتقا می‌دهند (۲۶).
- تشخیص چندگانه: هوش مصنوعی امکان شناسایی همزمان چندین سم را با تحلیل الگوهای سیگنال منحصربه‌فرد فراهم می‌کند، که برای ارزیابی جامع ایمنی محصولات دریایی ضروری است (۲۶).

چالش‌ها و جهت‌گیری‌های آینده

ادغام هوش مصنوعی در تشخیص بیوتوکسین‌ها با چالش‌هایی مواجه است:

- دسترسی به داده‌ها: مدل‌های هوش مصنوعی به مجموعه‌داده‌های بزرگ و استاندارد نیاز دارند، اما تنوع سموم و شرایط محیطی، تهیه این داده‌ها را دشوار می‌کند (۸).
- تداخل و نویز: عوامل محیطی مانند شوری یا pH می‌توانند داده‌های حسگرها را تحت‌تأثیر قرار دهند. مدل‌های هوش مصنوعی باید برای تفکیک سیگنال‌های واقعی از نویز بهینه شوند (۲۶).
- تأییدیه نظارتی: روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی باید استانداردهای ایمنی غذایی را برآورده کنند، که نیازمند اعتبارسنجی گسترده است (۱).

بااین‌حال، آینده این حوزه امیدوارکننده است. فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا (IoT) و رایانش ابری می‌توانند پایش لحظه ای محیط‌های دریایی را تسهیل کنند. همچنین، حسگرهای زیستی قابل‌حمل و پوشیدنی، در ترکیب با هوش مصنوعی، امکان آزمایش در محل را فراهم می‌کنند (۲۴, ۲۶).

مطالعات موردی و پیشرفت‌های اخیر

ادغام هوش مصنوعی با حسگرهای زیستی و آزمایش‌های زیستی برای تشخیص بیوتوکسین‌های دریایی، حوزه‌ای در حال رشد است. در اینجا به بررسی مطالعات موردی و پیشرفت‌های اخیر پرداخته شده است که کاربردهای عملی هوش مصنوعی در این زمینه را نشان می‌دهند.

غربالگری با توان بالای ماهی زبرا با کمک هوش مصنوعی

مطالعه وانگ و همکاران (۸) نمونه‌ای برجسته از کاربرد هوش مصنوعی در غربالگری ماهی زبرا برای سم‌شناسی محیطی است. ماهی زبرا به دلیل رشد سریع، شباهت ژنتیکی به انسان و مناسب بودن برای آزمایش‌های گسترده، به‌عنوان مدل زیستی پرکاربرد شناخته می‌شود (۹). وانگ و همکاران (۸) نشان دادند که هوش مصنوعی می‌تواند تصاویر و ویدئوهای میکروسکوپی ماهی زبرا در معرض آلاینده‌ها را تحلیل کرده و ارزیابی سریع خطرات و مکانیسم‌های سمیت را ممکن سازد.

- کاربرد در بیوتوکسین‌های دریایی: از آنجا که ماهی زبرا برای تشخیص بیوتوکسین‌هایی مانند سموم فلج‌کننده و فراموشی‌زا استفاده می‌شود (۹)، رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند در این آزمایش‌ها به‌کار روند. برای مثال، مدل‌های یادگیری ماشینی با آموزش بر پاسخ‌های ماهی زبرا به سموم شناخته‌شده، می‌توانند تغییرات رفتاری یا مورفولوژیکی ناشی از سمومی مانند ساکسی‌توکسین یا اسید دوموئیک را به‌صورت خودکار شناسایی کنند.
- کارایی و مقیاس‌پذیری: هوش مصنوعی با خودکارسازی تحلیل داده‌ها، نیاز به مشاهده دستی را کاهش داده و امکان غربالگری سریع تعداد زیادی نمونه را فراهم می‌کند. این ویژگی برای پایش محیط‌های دریایی گسترده، که ممکن است تحت‌تأثیر شکوفایی جلبکی مضر قرار گیرند، بسیار ارزشمند است.

هوش مصنوعی در فناوری حسگرهای زیستی

پیشرفت‌های اخیر در حسگرهای زیستی با بهره‌گیری از هوش مصنوعی، روش‌های دقیق‌تر و حساس‌تری برای تشخیص بیوتوکسین‌های دریایی ارائه داده‌اند:

- حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی: Ullah و همکاران (۲۷) آپتاسنسوری الکتروشیمیایی برای تشخیص سموم دریایی توسعه دادند. ادغام هوش مصنوعی می‌تواند با بهینه‌سازی پردازش سیگنال و کاهش نتایج مثبت کاذب، دقت این حسگرها را افزایش دهد، به‌ویژه در تمایز بین آنالوگ‌های مختلف سموم.
- الایزا با کمک نانوزیم: Cho و همکاران (۲۸) روش الایزا مبتنی بر نانوزیم را برای تشخیص بیوتوکسین‌ها معرفی کردند. هوش مصنوعی می‌تواند با تحلیل سیگنال‌های رنگی این آزمایش، دقت و قابلیت اطمینان آن را بهبود بخشد، به‌طوری‌که غلظت سموم با دقت بالا اندازه‌گیری شود.
- Patch Clamp خودکار: Campàs و همکاران (۲۹) سیستمی خودکار برای تشخیص تترودوتوکسین در ماهی پف‌دار ارائه کردند. هوش مصنوعی می‌تواند با پردازش بلادرنگ داده‌های الکتروفیزیولوژیکی، سرعت و دقت این سیستم را افزایش داده و آن را برای غربالگری گسترده کارآمدتر کند.

تحلیل پیش‌بینی‌کننده برای شکوفایی جلبکی مضر

قابلیت پیش‌بینی هوش مصنوعی برای پایش شکوفایی جلبکی مضر (HABs)، که منبع اصلی بیوتوکسین‌های دریایی هستند، بسیار ارزشمند است. در مطالعه ای مشخص شد که مدل‌های یادگیری ماشینی می‌توانند با تحلیل داده‌های محیطی مانند دما، شوری و مواد مغذی، وقوع شکوفایی جلبکی را پیش‌بینی کنند (۲۴).

- سیستم‌های هشدار زودهنگام: ادغام داده‌های حسگرهای زیستی با مدل‌های پیش‌بینی‌کننده، امکان صدور هشدارهای زودهنگام را فراهم می‌کند تا از توزیع محصولات آلوده جلوگیری شود (۲۴).
- پایش محیطی: هوش مصنوعی با پردازش داده‌های حسگرهای از راه دور، پایش مداوم آب‌های ساحلی را ممکن ساخته و به تشخیص به‌موقع شکوفایی جلبکی کمک می‌کند.

حسگرهای زیستی هوشمند و دستگاه‌های قابل‌حمل

حسگرهای زیستی هوشمند مجهز به هوش مصنوعی، روند روبه‌رشدی در تشخیص بیوتوکسین‌ها هستند:

- حسگرهای زیستی پوشیدنی: فناوری‌های مشابه حسگرهای پوشیدنی در حوزه سلامت می‌توانند برای آزمایش میدانی محصولات دریایی سازگار شوند (۳۰). این دستگاه‌ها داده‌ها را در زمان واقعی تحلیل کرده و نتایج فوری ارائه می‌دهند.
- دستگاه‌های قابل‌حمل: حسگرهای دستی مجهز به هوش مصنوعی، آزمایش سریع در محل را بدون نیاز به آزمایشگاه ممکن می‌سازند. این قابلیت برای مناطق دورافتاده یا با منابع محدود بسیار مفید است (۳۰).

چشم‌اندازهای آینده و پژوهش‌های در حال انجام

پژوهش‌های جاری بر موارد زیر متمرکز است:

- تشخیص چندگانه: توسعه حسگرهایی برای شناسایی همزمان چندین بیوتوکسین با کمک هوش مصنوعی برای تمایز سموم (۳۰).
- یکپارچه‌سازی با اینترنت اشیا (IoT): ترکیب حسگرها با IoT برای پایش بلادرنگ و از راه دور (۲۴).
- استانداردسازی و اعتبارسنجی: ایجاد مجموعه‌داده‌های استاندارد و پروتکل‌های اعتبارسنجی برای اطمینان از قابلیت اطمینان مدل‌های هوش مصنوعی (۸).

نتیجه‌گیری

پیشرفت‌های اخیر در حسگرهای زیستی و آزمایش‌های زیستی مجهز به هوش مصنوعی، پتانسیل تحول‌آفرین آن‌ها را در تشخیص بیوتوکسین‌های دریایی نشان می‌دهد. از خودکارسازی آزمایش‌های ماهی زبرا تا بهبود حسگرها و پیش‌بینی شکوفایی جلبکی، هوش مصنوعی نقش کلیدی در تضمین ایمنی محصولات دریایی و حفاظت از سلامت عمومی ایفا می‌کند. با ادامه پژوهش‌ها، سیستم‌های پیشرفته‌تر و کارآمدتری برای مقابله با چالش‌های بیوتوکسین‌ها ظهور خواهند کرد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از مرکز تحقیقات سلامت معنوی، دانشگاه علوم پزشکی قم کمال تشکر و قدردانی را دارند.

نقش نویسندگان: همه نویسندگان در نگارش اولیه مقاله یا بازنگری آن سهیم بودند و همه با تایید نهایی مقاله حاضر، مسئولیت دقت و صحت مطالب مندرج در آن را می پذیرند.

تضاد منافع: نویسندگان تصریح می کنند که هیچ گونه تضاد منافعی در مطالعه حاضر وجود ندارد.

منابع

1. Nicolas J, Hoogenboom R, Hendriksen P, Bodero M, Bovee T, Rietjens I, et al. Marine biotoxins and associated outbreaks following seafood consumption: Prevention and surveillance in the 21st century. Global Food Security. 2017;15:11-21. doi:10.1016/j.gfs.2017.03.002
2. Mafra L, De Souza DA, Menezes M, Schramm M, Hoff R. Marine Biotoxins: latest advances and challenges towards seafood safety, using Brazil as a case study. Current Opinion in Food Science. 2023. doi:10.1016/j.cofs.2023.101078
3. Bodero M, Bovee T, Wang S, Hoogenboom R, Klijnstra M, Portier L, et al. Screening for the presence of lipophilic marine biotoxins in shellfish samples using the neuro-2a bioassay. Food Additives Contaminants: Part A. 2018;35:351-65. doi:10.1080/19440049.2017.1368720 PMid:28884655
4. Gerssen A, Klijnstra M. The Determination of Marine Biotoxins in Seafood. 2017:319-62. doi:10.1002/9781118992685.ch11
5. Campàs M, Prieto-Simón B, Marty J. Biosensors to detect marine toxins: Assessing seafood safety. Talanta. 2007;72 3:884-95. doi:10.1016/j.talanta.2006.12.036 PMid:19071702
6. Reverté L, Soliño L, Carnicer O, Diogène J, Campàs M. Alternative Methods for the Detection of Emerging Marine Toxins: Biosensors, Biochemical Assays and Cell-Based Assays. Marine Drugs. 2014;12:5719-63. doi:10.3390/md12125719 PMid:25431968 PMCid:PMC4278199
7. Inês A, Cosme F. Biosensors for Detecting Food Contaminants-An Overview. Processes. 2025;13(2). doi:10.3390/pr13020380
8. Wang Y, Javeed A, Jian C, Zeng Q, Han B. Precautions for seafood consumers: An updated review of toxicity, bioaccumulation, and rapid detection methods of marine biotoxins. Ecotoxicology and environmental safety. 2024; 274:116201. doi:10.1016/j.ecoenv.2024.116201 PMid:38489901
9. De La Paz J, Zambrano N, Ortiz F, Llanos-Rivera A. A New Bioassay for the Detection of Paralytic and

Amnesic Biotoxins Based on Motor Behavior Impairments of Zebrafish Larvae. International Journal of Molecular Sciences. 2023;24. doi:10.3390/ijms24087466 PMid:37108629 PMCid:PMC10144378
10. Juneja S, Zhang B, Nujhat N, Wang A. Quantitative Sensing of Domoic Acid from Shellfish Using Biological Photonic Crystal Enhanced SERS Substrates. Molecules. 2022;27. doi:10.3390/molecules27238364 PMid:36500455 PMCid:PMC9736055
11. Ji Y, Cai G, Liang C, Gao Z, Lin W-T, Ming Z, et al. A microfluidic immunosensor based on magnetic separation for rapid detection of okadaic acid in marine shellfish. Analytica chimica acta. 2023;1239:340737. doi:10.1016/j.aca.2022.340737 PMid:36628732
12. Loeffler C, Bodi D, Tartaglione L, Dell'Aversano C, Preiss-Weigert A. Improving in vitro ciguatoxin and brevetoxin detection: selecting neuroblastoma (Neuro-2a) cells with lower sensitivity to ouabain and veratridine (OV-LS). Harmful algae. 2021;103:101994. doi:10.1016/j.hal.2021.101994 PMid:33980434
13. Reverté J, Alkassar M, Diogène J, Campàs M. Detection of Ciguatoxins and Tetrodotoxins in Seafood with Biosensors and Other Smart Bioanalytical Systems. Foods. 2023;12. doi:10.3390/foods12102043 PMid:37238861 PMCid:PMC10217151
14. Bodero M, Gerssen A, Portier L, Klijnstra M, Hoogenboom R, Guzmán L, et al. A Strategy to Replace the Mouse Bioassay for Detecting and Identifying Lipophilic Marine Biotoxins by Combining the Neuro-2a Bioassay and LC-MS/MS Analysis. Marine Drugs. 2018;16. doi:10.3390/md16120501 PMid:30545061 PMCid:PMC6315780
15. Estévez P, Gago-Martínez A. Contribution of Mass Spectrometry to the Advances in Risk Characterization of Marine Biotoxins: Towards the Characterization of Metabolites Implied in Human Intoxications. Toxins. 2023;15. doi:10.3390/toxins15020103 PMid:36828418 PMCid:PMC9964301
16. Wu H, Guo M, Tan Z, Cheng H, Li Z, Zhai Y. Liquid chromatography quadrupole linear ion trap mass spectrometry for multiclass screening and identification of lipophilic marine biotoxins in bivalve mollusks. Journal of chromatography A. 2014;1358:172-80. doi:10.1016/j.chroma.2014.06.105 PMid:25086754
17. Viallon J, Chinain M, Darius H. Revisiting the Neuroblastoma Cell-Based Assay (CBA-N2a) for the Improved Detection of Marine Toxins Active on Voltage Gated Sodium Channels (VGSCs). Toxins. 2020;12. doi:10.3390/toxins12050281 PMid:32349302 PMCid:PMC7290318
18. Dillon M, Zaczek-Moczydlowska M, Edwards C, Turner A, Miller P, Moore H, et al. Current Trends and Challenges for Rapid SMART Diagnostics at Point-of-Site Testing for Marine Toxins. Sensors (Basel, Switzerland). 2021;21. doi:10.3390/s21072499 PMid:33916687 PMCid:PMC8038394
19. Wang Q, Yang Q, Wu W. Ensuring seafood safe to spoon: a brief review of biosensors for marine biotoxin monitoring. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2020;62:2495-507. doi:10.1080/10408398.2020.1854170 PMid:33287557
20. Park J, Kwon N, Park E, Kim Y, Jang H, Min J, et al. Electrochemical biosensor with aptamer/porous platinum nanoparticle on round-type micro-gap electrode for saxitoxin detection in fresh water. Biosensors & bioelectronics. 2022;210:114300. doi:10.1016/j.bios.2022.114300 PMid:35489276
21. Zeng W, Tang X, Wu T, Han B, Wu L. Development of a highly sensitive aptamer-based electrochemical sensor for detecting saxitoxin based on K3Fe(CN)6 regulated silver nanoparticles. Analytica chimica acta. 2024;1287:342134. doi:10.1016/j.aca.2023.342134 PMid:38182355
22. McNamee S, Elliott C, Delahaut P, Campbell K. Multiplex biotoxin surface plasmon resonance method for marine biotoxins in algal and seawater samples. Environmental Science and Pollution Research. 2013; 20:6794-807. doi:10.1007/s11356-012-1329-7 PMid:23250726
23. Ji Y, Wang R, Zhao H. Toward Sensitive and Reliable Immunoassays of Marine Biotoxins: From Rational Design to Food Analysis. Journal of agricultural and food chemistry. 2024. doi:10.1021/acs.jafc.4c01865 PMid:39010820
24. Prakash N, Zielinski O. AI-Enhanced Real-Time Monitoring of Marine Pollution: Part 2-A Spectral Analysis Approach. J Mar Sci Engin. 2025;13(4). doi:10.3390/jmse13040636
25. Tang X, Zuo J, Yang C, Jiang J, Zhang Q, Ping J, et al. Current trends in biosensors for biotoxins (mycotoxins, marine toxins, and bacterial food toxins):principles, application, and perspective. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2023. doi:10.1016/j.trac.2023.117144
26. Zhao C, Zhang Z, Li J, Lu Y, Fu Y, Wang Z, et al. Development of a Quick and Highly Sensitive Amplified Luminescent Proximity Homogeneous Assay for Detection of Saxitoxin in Shellfish. Toxins. 2024;16. doi:10.3390/toxins16080341 PMid:39195751 PMCid:PMC11360761
27. Ullah N, Chen W, Noureen B, Tian Y, Du L, Wu C, et al. An Electrochemical Ti3C2Tx Aptasensor for Sensitive and Label-Free Detection of Marine Biological Toxins. Sensors (Basel, Switzerland). 2021;21. doi:10.3390/s21144938 PMid:34300682 PMCid:PMC8309833
28. Cho CH, Kim JH, Padalkar N, Reddy Y, Park T, Park J, et al. Nanozyme-assisted molecularly imprinted polymer-based indirect competitive ELISA for the detection of marine biotoxin. Biosensors & bioelectronics. 2024; 255: 116269. doi:10.1016/j.bios.2024.116269 PMid:38579624
29. Campàs M, Reverté J, Tudó À, Alkassar M, Diogène J, Sureda F. Automated Patch Clamp for the Detection of Tetrodotoxin in Pufferfish Samples. Marine Drugs. 2024;22. doi:10.3390/md22040176 PMid:38667793 PMCid:PMC11050952
30. Zhao Y, Wang X, Pan S, Hong F, Lu P, Hu X, et al. Bimetallic nanozyme-bioenzyme hybrid material-mediated ultrasensitive and automatic immunoassay for the detection of aflatoxin B1 in food. Biosensors & bioelectronics. 2024;248:115992. doi:10.1016/j.bios.2023.115992 PMid:38184942