Journal of Marine Medicine
Autumn 2025, Volume 7, Issue 3
Pages: 163-173
10.30491/7.3.163

Development of an AI-Based Predictive Model for Assessing Genetic Vulnerability to Marine Toxins in Seafarers and Divers

Sakineh Khanamani Falahatipour [1], Amirreza Ghasemloo [2], Somayyeh Karami-Mohajeri [3], Zohreh Oghabian [3], Soudeh Khanamani Falahati-pour [4], Salimeh Khanamani Falahatipour [5], Motahareh Soltani [4] *

[1] Department of Comparative Biosciences, Faculty of Veterinary Medicine, University of Tehran, Tehran, Iran
[2] Faculty of Mathematical Sciences and Computer, Kharazmi University, Tehran, Iran
[3] Pharmaceutical Research Center, Institute of Neuropharmacology, Faculty of Pharmacy, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran
[4] Pistachio Safety Research Center, Rafsanjan University of Medical Sciences, Rafsanjan, Iran
[5] Computer Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

Received: 8 August 2025 **Accepted:** 19 November 2025

Abstract

Background and Aim: Marine chemical and biotoxin exposures pose substantial health risks to seafarers and divers, notably in the Persian Gulf and the Sea of Oman. Individual susceptibility varies with genetic polymorphisms (SNPs) in detoxification genes such as the CYP450 family. This study develops and specifies a conceptual AI-based framework to predict genetic vulnerability and defines its evaluation protocol. The key novelty is the multi-source integration of genetic and environmental data with optional links to telemedicine and real-time alerts.

Methods: The framework integrates: (1) genetic data from seafarers/divers (SNP profiles in toxin-metabolism genes), (2) environmental measurements from marine sensors and satellite imagery (e.g., ciguatoxin/saxitoxin/domoic-acid levels, water quality, temperature), and (3) toxin knowledge bases such as ToxCast and T3DB. Three model families -deep neural networks, random forests, and support vector machines- are considered. Evaluation follows train/validation/test splits with cross-validation; performance metrics include accuracy, precision, recall, and F1-score (AUC may be reported for binary setups). Target geographical scope for field data is the Persian Gulf and the Sea of Oman.

Results: This is a conceptual/framework study; no numerical or experimental results are reported at this stage. Main outputs are: (a) the model architecture and processing flowchart, (b) executable data specifications and sources (marine sensors, satellite, ToxCast/T3DB, genetic sampling), (c) a quantitative evaluation protocol with explicit metrics, and (d) a clear separation between innovation (genetic+environmental+AI integration) and applications (diving/occupational medicine, maritime assistance via telemedicine, harmful algal bloom early warnings). Key challenges (at-sea compute constraints, data quality/completeness, and genetic-data ethics) and their design implications are documented.

Conclusion: The proposed framework delineates a pragmatic path to implement and evaluate a personalized risk-prediction system, with potential to enhance occupational health, reduce hazardous exposures, and support remote clinical decisions. Empirical validation with real-world cohorts and formal reporting of quantitative metrics constitute the next research step.

Keywords: Genetic predisposition to disease, Marine toxins, Artificial intelligence, Seafarers, Health prediction

***Corresponding author:** Motahareh Soltani. **Email**: motahareh.soltani@gmail.com
Address: Pistachio Health Research Center, Rafsanjan University of Medical Sciences, Rafsanjan, Iran.

مجله طب دریا
دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴
صفحات: ۱۷۳-۱۶۳
10.30491/7.3.163

توسعه یک مدل پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی برای ارزیابی آسیب‌پذیری ژنتیکی به سموم دریایی در دریانوردان و غواصان

سکینه خنامانی فلاحتی پور[۱]، امیر رضا قاسملو[۲]، سمیه کرمی مهاجری[۳]، زهره عقابیان[۳]، سوده خنامانی فلاحتی پور[۴]، سلیمه خنامانی فلاحتی پور[۵]، مطهره سلطانی[۴*]

[۱] گروه علوم زیستی مقایسه ای، دانشکده دامپزشکی دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲] دانشکده علوم ریاضیات و کامپیوتر، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
[۳] مرکز تحقیقات فارماسیوتیکس، پژوهشکده نوروفارماکولوژی، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران
[۴] مرکز تحقیقات سلامت پسته، دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان، رفسنجان، ایران
[۵] گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷ **پذیرش مقاله:** ۱۴۰۴/۰۸/۲۸

چکیده

زمینه و هدف: سموم دریاییِ شیمیایی و زیستی تهدیدی جدی برای سلامت دریانوردان و غواصان، به‌ویژه در مناطق کلیدی خلیج فارس و دریای عمان، به‌شمار می‌روند. حساسیت فردی به این سموم با پلی‌مورفیسم‌های ژنتیکی (SNPs) در ژن‌های متابولیسم سم، مانند خانواده CYP450، تفاوت دارد. این مقاله تمرکز خود را بر توسعه و تشریح یک چارچوب/مدل مفهومی مبتنی بر هوش مصنوعی برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری ژنتیکی و تعریف پروتکل ارزیابی آن می‌گذارد؛ نوآوری اصلی، ادغام چندمنبعیِ داده‌های ژنتیکی و زیست‌محیطی با قابلیت پیوند به تله‌مدیسین و هشدارهای بلادرنگ است.

روش ها: چارچوب پیشنهادی شامل: (۱) داده‌های ژنتیکی دریانوردان و غواصان (پروفایل‌های SNP در ژن‌های مرتبط با متابولیسم سم)، (۲) داده‌های زیست‌محیطی از حسگرهای دریایی و تصاویر ماهواره‌ای (غلظت سموم جلبکی مانند سیگواتوکسین/ساکسی‌توکسین/دوموئیک اسید، کیفیت آب، دما)، و (۳) دانش‌پایه‌های سمی از پایگاه‌هایی نظیر ToxCast و T3DB است. سه رده الگوریتمیِ نامزد شامل شبکه‌های عصبی عمیق، جنگل‌های تصادفی و SVM برای مدل‌سازی ریسک به‌کار می‌روند. پروتکل ارزیابی از تقسیم آموزش/اعتبارسنجی/آزمون و اعتبارسنجی متقاطع پیروی کرده و معیارهای عملکرد شامل Accuracy، Precision، Recall و F1-score (با امکان گزارش AUC در صورت دودویی‌بودن برچسب‌ها) تعریف می‌شود. مقایسه بین‌مدلی و انتخاب بهترین مدل بر پایه این سنجه‌ها انجام خواهد شد .دامنه جغرافیایی داده‌های میدانیِ هدف، مسیرهای کشتیرانی و عملیات غواصی در خلیج فارس و دریای عمان است.

یافته‌ها: این مطالعه ماهیت مفهومی/چارچوبی دارد و در این مرحله نتایج عددی یا آزمایشی گزارش نمی‌کند .خروجی‌های اصلی شامل: (الف) طراحی معماری مدل و فلوچارت پردازش، (ب) مشخصات قابل‌اجرای داده و منابع آن (حسگرهای دریایی، ماهواره، ToxCast/T3DB، نمونه‌های ژنتیکی)، (ج) پروتکل ارزیابی با سنجه‌های کمی مشخص، و (د) تفکیک روشنِ نوآوری (ادغام ژنتیک+محیط+هوش مصنوعی) از کاربردها (پزشکی غواصی/طب کار، امداد دریایی با تله‌مدیسین، پایش شکوفه‌های مضر جلبکی و هشدار زودهنگام). همچنین، چالش‌های کلیدی (زیرساخت محاسباتی در دریا، کیفیت/کامل‌بودن داده، و الزامات اخلاقی داده‌های ژنتیکی) و پیامدهای آن‌ها بر طراحی سامانه مستند شده‌اند.

نتیجه‌گیری: چارچوب معرفی‌شده مسیر روشنی برای پیاده‌سازی و ارزیابی یک سامانه پیش‌بینی ریسکِ شخصی‌سازی‌شده فراهم می‌کند و ظرفیت آن را برای بهبود سلامت حرفه‌ای، کاهش مواجهه پرخطر و پشتیبانی از تصمیم‌های بالینی از راه دور نشان می‌دهد. اعتبارسنجی تجربی با نمونه‌های واقعی و گزارش سنجه‌های عددی، گام بعدی پژوهش است.

کلیدواژه‌ها: استعداد ژنتیکی، سموم دریایی، هوش مصنوعی، دریانوردان، پیش‌بینی سلامت.

*نویسنده مسئول: **مطهره سلطانی**. پست الکترونیک: motahareh.soltani@gmail.com
آدرس: مرکز تحقیقات سلامت پسته، دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان، رفسنجان، ایران.

مقدمه

سموم دریایی، شامل آلاینده‌های شیمیایی مانند هیدروکربن‌های نفتی و فلزات سنگین، و همچنین سموم زیستی تولیدشده توسط جانداران دریایی مانند عروس دریایی و باکتری‌های سمی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌های دریایی محسوب می‌شوند. این سموم در مناطق کلیدی مانند خلیج فارس، دریای خزر، و دریای عمان، که از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی اهمیت بالایی دارند، به‌طور خاص چالش‌برانگیز هستند [۱]. دریانوردان و غواصان، به دلیل مواجهه مداوم با این محیط‌ها، در معرض خطر بالای مسمومیت قرار دارند که می‌تواند به عوارض حاد و مزمن مانند اختلالات تنفسی، پوستی، و سیستمیک منجر شود [۲].

حساسیت افراد به این سموم تحت تأثیر عوامل ژنتیکی است و یکسان نیست. تفاوت‌های ژنتیکی، به‌ویژه پلی‌مورفیسم‌های تک‌نوکلئوتیدی (SNPs) در ژن‌های مرتبط با متابولیسم سموم مانند خانواده سیتوکروم P450 (CYP450)، نقش مهمی در چگونگی پاسخ بدن به سموم و دفع آنها ایفا می‌کنند [۳]. برای مثال، تغییرات در ژن CYP2D6 می‌توانند متابولیسم سموم را تحت تأثیر قرار داده و برخی افراد را در برابر عوارض آسیب‌پذیرتر کنند [۴]. این تنوع ژنتیکی نشان‌دهنده نیاز به ارزیابی‌های شخصی‌سازی‌شده برای پیش‌بینی دقیق‌تر خطرات است [۴].

هوش مصنوعی (AI) به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل داده‌های پیچیده ژنتیکی و زیست‌محیطی، پتانسیل بالایی در این زمینه دارد. الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مانند شبکه‌های عصبی و جنگل‌های تصادفی، قادر به شناسایی الگوهای پنهان در داده‌های بزرگ و ارائه پیش‌بینی‌های دقیق درباره آسیب‌پذیری به سموم هستند [۵]. این فناوری می‌تواند داده‌های ژنومی، پروتئومی، و محیطی را ادغام کرده و مدل‌های جامع‌تری ایجاد کند [۶].

با وجود این پیشرفت‌ها، مدل‌های شخصی‌سازی‌شده برای ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر سموم دریایی در گروه‌های پرخطر مانند دریانوردان و غواصان هنوز توسعه نیافته‌اند. تحقیقات موجود بیشتر بر جمعیت‌های عمومی یا مدل‌های حیوانی متمرکز بوده و ویژگی‌های خاص این گروه‌های شغلی را کمتر مورد توجه قرار داده‌اند [۱]. همچنین، محدودیت دسترسی به زیرساخت‌های پزشکی در محیط‌های دریایی، نیاز به ابزارهای پیش‌بینی‌کننده را بیش از پیش آشکار می‌کند [۷].

هدف این مقاله ارائه یک مدل مفهومی مبتنی بر هوش مصنوعی است که با استفاده از داده‌های ژنتیکی دریانوردان و غواصان و اطلاعات زیست‌محیطی، آسیب‌پذیری آنها در برابر سموم دریایی را پیش‌بینی کرده و راهکارهایی برای مدیریت و پیشگیری از خطرات ارائه دهد. این مدل می‌تواند به بهبود سلامت حرفه‌ای این گروه‌ها و حفاظت از اکوسیستم‌های دریایی کمک کند.

زمینه و نیاز به مدل پیشنهادی

سموم دریایی: انواع و اثرات

سموم دریایی به دو دسته اصلی شیمیایی و زیستی تقسیم می‌شوند که هر یک منابع و اثرات متفاوتی دارند.

سموم شیمیایی

سموم شیمیایی عمدتاً از فعالیت‌های انسانی مانند صنایع، نشت نفت و تخلیه زباله وارد اکوسیستم‌های دریایی می‌شوند. این دسته شامل موارد زیر است:

- **هیدروکربن‌های نفتی:** این ترکیبات که از نشت نفت و فعالیت‌های صنعتی ناشی می‌شوند، به‌ویژه در مناطقی مانند خلیج فارس شایع‌اند [۸]. این مواد می‌توانند از طریق استنشاق یا تماس پوستی باعث مسمومیت تنفسی، التهابات پوستی و حتی سرطان‌زایی شوند [۹].

فلزات سنگین

سرب: از تخلیه صنعتی و سوخت‌های فسیلی وارد آب می‌شود و به سیستم عصبی و خونی آسیب می‌رساند [۱۰].

جیوه: این فلز از فعالیت‌های معدنی و زباله‌های صنعتی منشأ می‌گیرد و با تجمع در بدن، به کلیه‌ها، سیستم عصبی و رشد جنین آسیب می‌زند [۱۰].

کادمیوم: از صنایع فلزی و باتری‌ها وارد محیط می‌شود و اثرات سمی آن شامل آسیب به کلیه‌ها، استخوان‌ها و سرطان‌زایی است [۱۱].

سموم زیستی

سموم زیستی توسط موجودات زنده دریایی تولید می‌شوند و اغلب اثرات حادتری دارند:

سموم عروس دریایی: این سموم که در گونه‌هایی مانند Chironex fleckeri یافت می‌شوند، می‌توانند التهاب شدید پوستی، درد حاد، شوک آنافیلاکتیک و حتی مرگ را به دنبال داشته باشند [۱۲].

سموم مرجان‌ها: مرجان‌های آتشین (Millepora spp) سمومی تولید می‌کنند که زخم‌های عمیق و التهاب پوستی ایجاد می‌کنند [۱۳].

سموم باکتریایی: باکتری‌هایی مانند Vibrio vulnificus و Vibrio parahaemolyticus عفونت‌های شدید پوستی و سیستمیک، به‌ویژه در افراد با نقص ایمنی، ایجاد می‌کنند [۱۴].

سموم جلبکی: جلبک‌هایی مانند Karenia brevis سمومی (مانند بروتوکسین) تولید می‌کنند که از طریق مصرف صدف‌های آلوده یا استنشاق آئروسل‌های دریایی، مسمومیت عصبی ایجاد می‌کنند [۱۵].

جدول ۱ اطلاعات کلیدی در مورد انواع سموم دریایی، منابع، اثرات و مناطق شایع را ارائه می‌دهد.

جدول-۱. انواع سموم دریایی و اثرات آن‌ها

نوع سم	منبع	اثرات بر سلامت	مناطق شایع
هیدروکربن‌های نفتی	نشت نفت، فعالیت‌های صنعتی	مسمومیت تنفسی، التهاب پوستی، سرطان‌زایی	خلیج فارس، دریای خزر
سرب	تخلیه صنعتی، سوخت‌های فسیلی	آسیب به سیستم عصبی، اختلالات خونی	جهانی
جیوه	فعالیت‌های معدنی، زباله‌های صنعتی	آسیب به کلیه، سیستم عصبی، اختلالات رشدی	جهانی
کادمیوم	صنایع فلزی، باتری‌ها	آسیب به کلیه، استخوان‌ها، سرطان‌زایی	جهانی
سم عروس دریایی	عروس دریایی (Chironex fleckeri)	التهاب پوستی، شوک آنافیلاکتیک، مرگ	مناطق گرمسیری
سم مرجان	مرجان‌های آتشین (Millepora spp.)	التهاب پوستی، زخم‌های عمیق	مناطق گرمسیری
Vibrio vulnificus	باکتری‌های دریایی	عفونت پوستی، سپسیس، مرگ در افراد با ایمنی ضعیف	مناطق گرمسیری
Vibrio parahaemolyticus	آب شور و غذاهای دریایی	گاستروانتریت، اسهال شدید	جهانی
بروتوکسین	جلبک Karenia brevis	مسمومیت عصبی، فلج عضلانی، مشکلات تنفسی	خلیج مکزیک، فلوریدا

آسیب‌پذیری ژنتیکی

پاسخ افراد به سموم دریایی تحت تأثیر عوامل ژنتیکی قرار دارد. ژن‌های متابولیسم سموم، به‌ویژه خانواده سیتوکروم P450 (CYP450)، نقش کلیدی در خنثی‌سازی و دفع سموم ایفا می‌کنند [۳].

پلی‌مورفیسم‌های ژنتیکی: تنوع در ژن‌هایی مانند CYP2D6، CYP1A1 و CYP3A4 می‌تواند توانایی متابولیسم سموم را تغییر دهد. برای مثال، افرادی با متابولیسم ضعیف CYP2D6 ممکن است در مواجهه با سموم شیمیایی یا زیستی دچار تجمع سمی و عوارض شدیدتری شوند [۳].

اثرات بالینی: مطالعات نشان داده‌اند که این تنوع ژنتیکی با شدت مسمومیت و پاسخ به درمان ارتباط دارد [۴]. برای نمونه، افرادی با پلی‌مورفیسم CYP1A1 ممکن است در برابر هیدروکربن‌های نفتی آسیب‌پذیرتر باشند [۱۶]. این یافته‌ها بر اهمیت رویکردهای شخصی‌سازی‌شده در پیش‌بینی و مدیریت سمیت تأکید دارند.

چالش‌های فعلی

پیش‌بینی و مدیریت سموم دریایی با چالش‌های متعددی مواجه است:

محدودیت‌های روش‌های سنتی: آزمایش‌های حیوانی و مدل‌های سلولی نمی‌توانند تنوع ژنتیکی و پیچیدگی اکوسیستم‌های دریایی را به‌خوبی شبیه‌سازی کنند [۱۷]. این روش‌ها اغلب نتایج غیرقابل تعمیمی ارائه می‌دهند [۱].

کمبود زیرساخت‌های پزشکی: در محیط‌های دریایی، مانند کشتی‌ها و سکوهای نفتی، دسترسی به امکانات پزشکی محدود است که مدیریت مسمومیت‌ها را دشوار می‌کند [۷].

نیاز به ابزارهای پیشرفته: هوش مصنوعی و مدل‌سازی کامپیوتری می‌توانند با تحلیل داده‌های ژنتیکی و محیطی، پیش‌بینی سمیت را بهبود بخشند [۵]. این ابزارها برای غلبه بر محدودیت‌های فعلی ضروری‌اند.

ارتباط با طب دریایی

طب دریایی به‌عنوان یک رشته تخصصی، به کاهش خطرات شغلی مرتبط با سموم دریایی کمک می‌کند.

خطرات شغلی: دریانوردان و غواصان به دلیل مواجهه مداوم با سموم شیمیایی و زیستی در معرض مسمومیت، عفونت و صدمات حرفه‌ای قرار دارند [۱۸].

مدل پیشنهادی: یک مدل مبتنی بر AI که داده‌های ژنتیکی و محیطی را تحلیل کند، می‌تواند راهکارهای شخصی‌سازی‌شده ارائه دهد و خطرات را کاهش دهد.

ادغام با تله‌مدیسین: این مدل با استفاده از تله‌مدیسین، امکان تشخیص و مدیریت سریع بحران‌های سمی را در محیط‌های دورافتاده فراهم می‌کند [5]. این رویکرد برای بهبود سلامت حرفه‌ای و کاهش هزینه‌های درمانی حیاتی است.

سموم دریایی، اعم از شیمیایی و زیستی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان هستند. تنوع ژنتیکی افراد بر پاسخ آن‌ها به این سموم تأثیر می‌گذارد و روش‌های سنتی پیش‌بینی سمیت با محدودیت‌هایی مواجه‌اند. استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند AI و تله‌مدیسین در چارچوب طب دریایی می‌تواند به کاهش خطرات شغلی و بهبود مدیریت سمیت کمک کند. تحقیقات آینده باید بر توسعه این ابزارها و زیرساخت‌های پزشکی در محیط‌های دریایی متمرکز شود.

مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری ژنتیکی دریانوردان و غواصان در برابر سموم دریایی، یک چارچوب نوآورانه است که از فناوری‌های پیشرفته هوش مصنوعی، داده‌های ژنتیکی، و سیستم‌های تله‌مدیسین بهره می‌برد. این مدل با هدف بهبود سلامت و ایمنی حرفه‌ای در مشاغل دریایی طراحی شده است و با استفاده از داده‌های زیست‌محیطی و ژنتیکی، خطرات مرتبط با قرار گرفتن در معرض سموم دریایی را پیش‌بینی می‌کند. ادغام این مدل با سیستم‌های تله‌مدیسین و نظارت بلادرنگ، امکان ارائه خدمات پزشکی سریع و اقدامات پیشگیرانه را در محیط‌های دریایی فراهم می‌کند. در ادامه، اجزای اصلی مدل، مراحل توسعه آن، و یک فلوچارت پیشنهادی برای نمایش فرآیند ارائه شده است.

اجزای مدل

جمع‌آوری داده‌ها

جمع‌آوری داده‌ها پایه و اساس این مدل است و شامل دو نوع داده اصلی است: زیست‌محیطی و ژنتیکی.

داده‌های زیست‌محیطی: این داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به غلظت سموم دریایی (مانند سیگواتوکسین، ساکسی‌توکسین، و دوموئیک اسید)، کیفیت آب، دما، و سایر عوامل محیطی است که بر تولید و توزیع سموم تأثیر می‌گذارند. منابع این داده‌ها شامل حسگرهای دریایی، تصاویر ماهواره‌ای، و پایگاه‌های داده مانند ToxCast و T3DB (Toxin and Toxin Target Database) است که اطلاعات جامعی در مورد خواص شیمیایی و سمیت سموم ارائه می‌دهند [19]. به عنوان مثال، حسگرهای دریایی می‌توانند غلظت سموم جلبکی را در زمان واقعی اندازه‌گیری کنند، که برای نظارت بر شکوفه‌های جلبکی مضر (HABs) حیاتی است [۲۰].

داده‌های ژنتیکی: این داده‌ها شامل پروفایل‌های تغییرات نوکلئوتیدی منفرد (SNPs) از دریانوردان و غواصان است که می‌توانند نشانگرهای ژنتیکی مرتبط با حساسیت به سموم را شناسایی کنند. این داده‌ها می‌توانند از طریق بانک‌های بیولوژیکی، آزمایش‌های ژنتیکی، یا پایگاه‌های داده ژنتیکی موجود جمع‌آوری شوند. اگرچه مطالعات خاص در مورد حساسیت ژنتیکی به سموم دریایی در دریانوردان محدود است، تحقیقات نشان داده‌اند که پلی‌مورفیسم‌های ژنتیکی می‌توانند بر پاسخ به سموم محیطی تأثیر بگذارند [۲۱]. برای مثال، ژن‌های مرتبط با متابولیسم سموم، مانند آنزیم‌های بیواکتیواسیون، می‌توانند در این مدل استفاده شوند [۶].

مدل‌سازی AI

مدل‌سازی هوش مصنوعی هسته اصلی این چارچوب است و از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری ژنتیکی به سموم دریایی استفاده می‌کند. الگوریتم‌های پیشنهادی شامل موارد زیر هستند:

شبکه‌های عصبی عمیق (Deep Neural Networks): این الگوریتم‌ها برای شناسایی الگوهای پیچیده در داده‌های ژنتیکی و زیست‌محیطی مناسب هستند و در پیش‌بینی سمیت با دقت بالا موفق بوده‌اند [۶].

جنگل‌های تصادفی (Random Forests): این روش به دلیل توانایی در مدیریت داده‌های با ابعاد بالا و مقاومت در برابر بیش‌برازش، برای پیش‌بینی سمیت مناسب است [۲۲].

ماشین‌های بردار پشتیبان (Support Vector Machines): این الگوریتم‌ها برای طبقه‌بندی داده‌های پیچیده، مانند پیش‌بینی سمیت شیمیایی، عملکرد خوبی دارند [۲۳].

این مدل‌ها با استفاده از داده‌های ترکیبی ژنتیکی و زیست‌محیطی آموزش داده می‌شوند تا احتمال عوارض سلامتی ناشی از قرار گرفتن در معرض سموم را پیش‌بینی کنند. به عنوان مثال، مدل می‌تواند پیش‌بینی کند که آیا یک دریانورد با پروفایل ژنتیکی خاص در معرض خطر مسمومیت عصبی ناشی از سیگواتوکسین قرار دارد یا خیر [۲۴].

تله‌مدیسین

ادغام مدل با سیستم‌های تله‌مدیسین امکان ارائه مشاوره‌های پزشکی سریع و پروتکل‌های درمانی را در محیط‌های دریایی فراهم می‌کند. سیستم‌های تله‌مدیسین دریایی، مانند Marine Doctor، از فناوری‌های ارتباطی مانند اینترنت ماهواره‌ای برای ارائه خدمات پزشکی از راه دور استفاده می‌کنند [۲۵]. این مدل می‌تواند پیش‌بینی‌های خود را به پزشکان مستقر در خشکی منتقل کند تا پروتکل‌های درمانی شخصی‌سازی‌شده‌ای برای دریانوردان در معرض خطر ارائه دهند. برای مثال، اگر مدل تشخیص دهد که یک دریانورد به دلیل پروفایل ژنتیکی خاص در معرض خطر بالای مسمومیت است، پزشک می‌تواند اقدامات پیشگیرانه مانند تغییر رژیم غذایی یا استفاده از تجهیزات محافظتی را توصیه کند.

هشدارهای بلادرنگ

این مدل از حسگرهای دریایی و داده‌های ماهواره‌ای برای نظارت پیوسته بر محیط استفاده می‌کند و در صورت تشخیص خطر بالای سموم، هشدارهایی صادر می‌کند. این هشدارها می‌توانند به عملیات نجات و اقدامات پیشگیرانه کمک کنند. به عنوان مثال، فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای نظارت بر شکوفه‌های جلبکی مضر توسعه یافته‌اند که می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای این سیستم استفاده شوند [۲۰]. این سیستم می‌تواند به کشتی‌ها هشدار دهد تا از مناطق آلوده دوری کنند یا اقدامات محافظتی را اجرا کنند.

مراحل توسعه مدل

جمع‌آوری داده‌ها

- **داده‌های زیست‌محیطی:** از حسگرهای دریایی، تصاویر ماهواره‌ای، و پایگاه‌های داده مانند ToxCast و T3DB

جمع‌آوری می‌شوند. این داده‌ها شامل غلظت سموم، دما، و کیفیت آب است [۱۹].

- **داده‌های ژنتیکی:** از طریق آزمایش‌های ژنتیکی یا بانک‌های بیولوژیکی جمع‌آوری می‌شوند، با رعایت اصول اخلاقی و حریم خصوصی [۲۱].
- **داده‌های تاریخی:** شامل سوابق حوادث مسمومیت با سموم دریایی برای بهبود دقت مدل.

۱. **پیش‌پردازش داده‌ها و انتخاب ویژگی‌ها:**

- داده‌ها تمیز و نرمال‌سازی می‌شوند تا کیفیت و یکپارچگی آن‌ها تضمین شود.
- ویژگی‌های کلیدی مانند SNPs مرتبط با متابولیسم سموم و پارامترهای زیست‌محیطی (مانند غلظت سموم) انتخاب می‌شوند.
- داده‌ها به مجموعه‌های آموزش، اعتبارسنجی، و آزمایش تقسیم می‌شوند.

آموزش مدل‌های AI

- الگوریتم‌های یادگیری ماشین (شبکه‌های عصبی، جنگل‌های تصادفی و..) با استفاده از داده‌های آموزشی آموزش داده می‌شوند.
- تنظیم پارامترها برای بهینه‌سازی عملکرد مدل انجام می‌شود.
- اعتبارسنجی با استفاده از مجموعه اعتبارسنجی برای جلوگیری از بیش‌برازش انجام می شود [۲۶].

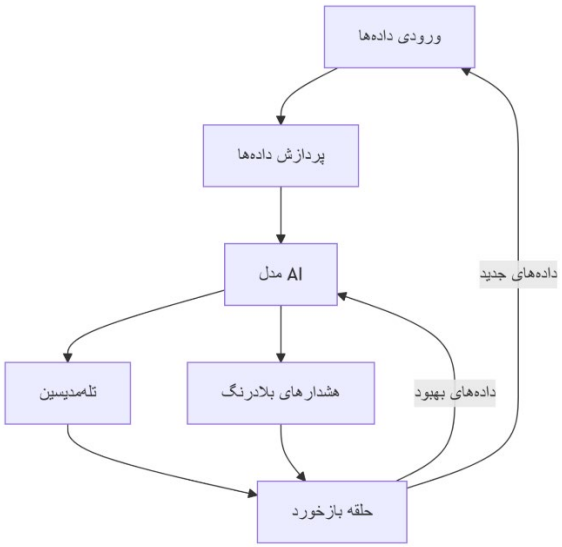
اعتبارسنجی مدل

- مدل با استفاده از مجموعه آزمایش ارزیابی می‌شود و معیارهایی مانند دقت، دقیق‌بودن (precision)، و حساسیت (recall) محاسبه می‌شوند.
- روش‌های اعتبارسنجی متقاطع (cross-validation) برای اطمینان از قابلیت تعمیم مدل استفاده می‌شوند.
- عملکرد مدل‌های مختلف مقایسه شده و بهترین مدل انتخاب می‌شود [۲۶].

ادغام با سیستم‌های تله‌مدیسین و حسگرهای دریایی

- رابطی برای تعامل مدل با سیستم‌های تله‌مدیسین توسعه داده می‌شود تا پیش‌بینی‌ها به پزشکان منتقل شوند [۲۷].
- سیستم‌های نظارتی برای جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای از حسگرها پیاده‌سازی می‌شوند [۲۰].

مدل پیشنهادی با ترکیب داده‌های زیست‌محیطی و ژنتیکی، استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی، و ادغام با سیستم‌های تله‌مدیسین و نظارت بلادرنگ، رویکردی نوآورانه برای محافظت از سلامت دریانوردان و غواصان ارائه می‌دهد. این مدل نه تنها به شناسایی افراد در معرض خطر کمک می‌کند، بلکه با ارائه هشدارهای زودهنگام و مشاوره‌های پزشکی سریع، می‌تواند از عوارض جدی جلوگیری کند. تحقیقات آینده باید بر جمع‌آوری داده‌های واقعی و اعتبارسنجی این مدل تمرکز کنند تا کاربرد عملی آن در محیط‌های دریایی تأیید شود.



شکل ۱. مراحل فلوچارت پیشنهادی برای مدل

کاربردها

مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری ژنتیکی در برابر سموم دریایی، کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف از جمله طب غواصی و طب کار، امداد دریایی، زیست‌شناسی دریایی، و فرصت‌سازی از تهدیدات دارد. این مدل با استفاده از داده‌های ژنتیکی و زیست‌محیطی و بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی، نه تنها به کاهش خطرات سلامتی برای دریانوردان و غواصان کمک می‌کند، بلکه به حفاظت از اکوسیستم‌های دریایی و پیشرفت علمی نیز یاری می‌رساند. در ادامه، هر یک از این کاربردها به طور مفصل بررسی می‌شود.

طب غواصی و طب کار

غواصان و دریانوردان به دلیل قرار گرفتن مداوم در معرض محیط‌های دریایی، در معرض خطر بالای مواجهه با سموم دریایی مانند سیگواتوکسین، ساکسی‌توکسین، و دوموئیک اسید قرار دارند. این سموم می‌توانند از طریق مصرف غذاهای دریایی آلوده، تماس پوستی، یا استنشاق وارد بدن شوند و عوارض جدی مانند مشکلات عصبی، گوارشی، یا حتی قلبی‌عروقی ایجاد کنند [۲۴]. مدل پیشنهادی با تحلیل پروفایل‌های ژنتیکی مانند پلی‌مورفیسم‌های تک‌نوکلئوتیدی یا SNPs و داده‌های زیست‌محیطی، می‌تواند افرادی را که به دلیل ساختار ژنتیکی خود در معرض خطر بیشتری هستند، شناسایی کند. این شناسایی زودهنگام امکان اجرای اقدامات پیشگیرانه مانند استفاده از تجهیزات حفاظتی اضافی، اجتناب از مناطق آلوده، یا تنظیم برنامه‌های کاری را فراهم می‌کند.

برای مثال، غواصانی که دارای پلی‌مورفیسم‌های خاصی در ژن‌های مرتبط با متابولیسم سموم هستند، ممکن است به مسمومیت‌های عصبی ناشی از سیگواتوکسین حساس‌تر باشند

[۲۱]. با استفاده از این مدل، پزشکان می‌توانند این افراد را قبل از شروع فعالیت‌های دریایی شناسایی کرده و توصیه‌های شخصی‌سازی‌شده‌ای ارائه دهند. این رویکرد با فعالیت‌های مراکز تخصصی مانند مرکز نروژی برای طب دریایی و غواصی هم‌راستا است، که بر ترویج سلامت و رفاه غواصان و دریانوردان تمرکز دارد [۲۸]. علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که ادغام هوش مصنوعی در طب دریایی می‌تواند با ارائه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده، تشخیص زودهنگام مشکلات سلامتی را بهبود بخشد و اقدامات ایمنی را تقویت کند [۲۹].

این کاربرد نه تنها به کاهش صدمات شغلی کمک می‌کند، بلکه با بهبود سلامت حرفه‌ای، هزینه‌های مرتبط با درمان و غرامت‌های شغلی را نیز کاهش می‌دهد. برای مثال، در نیروی دریایی ایالات متحده، استفاده از هوش مصنوعی برای نظارت بر کیفیت آب و ارائه اطلاعات بلادرنگ به غواصان، به کاهش بیماری‌های مرتبط با عوامل محیطی کمک کرده است [۳۰].

امداد دریایی (Maritime Assistance)

یکی از چالش‌های اصلی در محیط‌های دریایی، دسترسی محدود به خدمات پزشکی در هنگام بروز اورژانس‌های پزشکی است. مسمومیت‌های ناشی از سموم دریایی، مانند مسمومیت ماهی سیگواترا (CFP) یا مسمومیت صدفی فلج‌کننده (PSP)، می‌توانند به سرعت به شرایط تهدیدکننده حیات تبدیل شوند [31]. مدل پیشنهادی با ادغام در سیستم‌های تله‌مدیسین، امکان مدیریت سریع و هدفمند این مسمومیت‌ها را فراهم می‌کند. با استفاده از پیش‌بینی‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، این مدل می‌تواند اطلاعات مربوط به آسیب‌پذیری ژنتیکی یک فرد و سطح مواجهه با سموم را به پزشکان مستقر در خشکی منتقل کند، که این امر به آن‌ها اجازه می‌دهد تا پروتکل‌های درمانی شخصی‌سازی‌شده‌ای را در زمان واقعی ارائه دهند.

تله‌مدیسین در حال حاضر در محیط‌های دریایی به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. برای مثال، شرکت Aircare Access خدمات تله‌مدیسین ۷/۲۴ را برای حمایت از دریانوردان ارائه می‌دهد، که شامل پشتیبانی لجستیکی برای حوادث پزشکی در دریا است [۳۲]. همچنین، پروژه MERMAID، یک پروژه تله‌مدیسین دریایی با حمایت اتحادیه اروپا، نشان داده است که انتقال الکترونیکی داده‌های پزشکی از کشتی‌ها به مراکز ساحلی می‌تواند به مدیریت مؤثر اورژانس‌های پزشکی کمک کند [۳۳]. با ادغام مدل پیشنهادی در این سیستم‌ها، پزشکان می‌توانند بر اساس پیش‌بینی‌های مدل، مانند احتمال بروز عوارض عصبی در یک دریانورد خاص، تصمیمات سریع‌تری بگیرند. برای مثال، اگر مدل نشان دهد که یک فرد به دلیل ژن‌های خاص در معرض خطر بالای مسمومیت است، پزشک می‌تواند درمان‌های پیشگیرانه یا اقدامات فوری مانند تجویز داروهای ضدسم را توصیه کند.

علاوه بر این، نظرسنجی‌ها نشان می‌دهند که دریانوردان معتقدند افزایش دسترسی به تله‌مدیسین می‌تواند جان انسان‌ها را نجات دهد [۳۴]. این مدل با ارائه اطلاعات دقیق‌تر و سریع‌تر، می‌تواند تأثیر تله‌مدیسین را در مدیریت مسمومیت‌های دریایی تقویت کند.

زیست‌شناسی دریایی (Marine Biology)

در حوزه زیست‌شناسی دریایی، مدل پیشنهادی می‌تواند به شناسایی و مدیریت سموم زیستی نوپدید در اکوسیستم‌های دریایی کمک کند. سموم زیستی، مانند آن‌هایی که توسط جلبک‌های مضر (HABs) تولید می‌شوند، تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های دریایی و سلامت انسان هستند. این سموم می‌توانند در صدف‌ها و ماهی‌ها تجمع یابند و از طریق زنجیره غذایی به انسان منتقل شوند [2]. مدل پیشنهادی با ترکیب داده‌های ژنتیکی (مانند ژن‌های تولیدکننده سم در جلبک‌ها) و داده‌های زیست‌محیطی (مانند دما، شوری، و غلظت مواد مغذی)، می‌تواند شکوفه‌های جلبکی مضر را پیش‌بینی کرده و مناطق در معرض خطر را شناسایی کند.

تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در حال تبدیل شدن به ابزارهای کلیدی برای نظارت بر اکوسیستم‌های دریایی هستند. برای مثال، الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای شناسایی میکروارگانیسم‌ها، پیش‌بینی توزیع گونه‌ها، و مدیریت آلودگی‌های دریایی استفاده شده‌اند [۳۱]. علاوه بر این، فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای نظارت بلادرنگ بر آلودگی‌های دریایی، از جمله سموم زیستی، توسعه یافته‌اند [۲۰]. این مدل می‌تواند به‌عنوان بخشی از یک سیستم نظارتی گسترده‌تر عمل کند که داده‌های حسگرهای دریایی و تصاویر ماهواره‌ای را برای شناسایی زودهنگام تهدیدات سمی ترکیب می‌کند. این امر نه تنها به حفاظت از گونه‌های دریایی کمک می‌کند، بلکه از ورود سموم به زنجیره غذایی و تأثیر بر سلامت انسان جلوگیری می‌کند [۲۰].

فرصت‌سازی از تهدیدات

مطالعه سموم دریایی نه تنها به کاهش تهدیدات کمک می‌کند، بلکه فرصت‌هایی برای پیشرفت علمی و حفاظت از محیط زیست ایجاد می‌کند. یکی از مهم‌ترین فرصت‌ها، کشف داروهای جدید است. سموم دریایی به دلیل ساختارهای شیمیایی منحصربه فردشان، پتانسیل بالایی به‌عنوان پیش‌درآمدهای دارویی دارند. برای مثال، تحقیقات نشان داده است که برخی سموم دریایی، مانند سیگواتوکسین‌ها، می‌توانند در توسعه داروهای جدید برای درمان بیماری‌های عصبی یا قلبی‌عروقی مورد استفاده قرار گیرند [29]. این مدل با شناسایی الگوهای ژنتیکی مرتبط با حساسیت به سموم، می‌تواند به درک بهتر مکانیسم‌های زیستی این ترکیبات کمک کند و راه را برای تحقیقات دارویی هموار سازد.

علاوه بر این، پیش‌بینی و مدیریت سموم زیستی می‌تواند به بهبود سیاست‌های حفاظت از محیط زیست منجر شود. با شناسایی مناطق در معرض خطر شکوفه‌های جلبکی مضر، سیاست‌گذاران

می‌توانند اقدامات پیشگیرانه‌ای مانند محدودیت‌های ماهیگیری یا نظارت دقیق‌تر بر کیفیت آب را اجرا کنند. این امر به حفاظت از منابع دریایی و کاهش تأثیرات منفی بر سلامت عمومی کمک می‌کند [۲]. همچنین، درک عوامل ژنتیکی و محیطی مرتبط با تولید سموم می‌تواند به توسعه فناوری‌های جدید برای حذف یا کاهش این سموم از اکوسیستم‌های دریایی منجر شود، مانند روش‌های بیولوژیکی یا شیمیایی که در حال حاضر در حال بررسی هستند [۲۹].

جدول-۲ خلاصه‌ای از کاربردهای مدل پیشنهادی را ارائه می‌دهد.

جدول-۲. خلاصه کاربردهای مدل پیشنهادی

حوزه کاربرد	توضیحات	مزایا
طب غواصی و طب کار	شناسایی زودهنگام آسیب‌پذیری‌های ژنتیکی برای کاهش صدمات شغلی	بهبود سلامت حرفه‌ای، کاهش هزینه‌های درمانی
امداد دریایی	ادغام با تله‌مدیسین برای مدیریت سریع مسمومیت‌ها	افزایش سرعت و دقت در درمان‌های اورژانسی
زیست‌شناسی دریایی	پیش‌بینی و مدیریت سموم زیستی نوپدید	حفاظت از اکوسیستم‌ها و زنجیره غذایی
فرصت‌سازی از تهدیدات	کشف داروهای جدید و بهبود سیاست‌های زیست‌محیطی	پیشرفت علمی و حفاظت از محیط زیست

مدل پیشنهادی با استفاده از هوش مصنوعی برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری ژنتیکی به سموم دریایی، کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های طب غواصی و طب کار، امداد دریایی، زیست‌شناسی دریایی، و فرصت‌سازی از تهدیدات دارد. این مدل نه تنها به کاهش ریسک‌های سلامتی برای دریانوردان و غواصان کمک می‌کند، بلکه با حفاظت از اکوسیستم‌های دریایی و ایجاد فرصت‌های جدید برای تحقیقات دارویی و سیاست‌گذاری زیست‌محیطی، به پیشرفت علمی و اجتماعی یاری می‌رساند. تحقیقات آینده باید بر اعتبارسنجی این مدل با داده‌های واقعی و توسعه زیرساخت‌های لازم برای پیاده‌سازی آن تمرکز کنند.

چالش‌ها و محدودیت‌ها

مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری ژنتیکی دریانوردان و غواصان در برابر سموم دریایی با استفاده از هوش مصنوعی (AI)، اگرچه نوآورانه است، با چالش‌ها و محدودیت‌های متعددی مواجه است که می‌توانند بر توسعه و پیاده‌سازی آن تأثیر بگذارند. این چالش‌ها شامل محدودیت‌های زیرساختی محاسباتی، مشکلات کیفیت داده‌ها، مسائل اخلاقی مرتبط با داده‌های ژنتیکی، و پیچیدگی‌های فنی در مدل‌سازی هستند. در ادامه، هر یک از این موارد به طور مفصل بررسی شده و راهکارهای احتمالی برای غلبه بر آن‌ها پیشنهاد می‌شود.

چالش‌های زیرساختی محاسباتی

محیط‌های دریایی به دلیل شرایط خاص خود، مانند محدودیت‌های فیزیکی و ارتباطی، چالش‌های قابل‌توجهی را برای اجرای مدل‌های هوش مصنوعی ایجاد می‌کنند:

محدودیت‌های محاسباتی در دریا: کشتی‌ها و پلتفرم‌های دریایی معمولاً به سخت‌افزارهای محاسباتی پیشرفته دسترسی ندارند، که اجرای مدل‌های پیچیده AI مانند شبکه‌های عصبی عمیق را دشوار می‌کند. این مدل‌ها به قدرت پردازشی بالا و حافظه قابل‌توجهی نیاز دارند که در محیط‌های دریایی به دلیل محدودیت‌های فضا و انرژی به سختی قابل تأمین است [۳۵]. برای مثال، پردازش داده‌های ژنتیکی و زیست‌محیطی در مقیاس بزرگ نیازمند سرورهای قدرتمند است که معمولاً در خشکی مستقر هستند.

مشکلات ارتباطی: اتصال به اینترنت در مناطق دورافتاده دریا اغلب ناپایدار یا غیرقابل دسترس است، که انتقال داده‌ها به مراکز پردازش در خشکی یا استفاده از سرویس‌های ابری را با مشکل مواجه می‌کند [20]. این مسئله به‌ویژه برای کاربردهای بلادرنگ، مانند هشدارهای زودهنگام در مورد سموم زیستی، حیاتی است، زیرا تأخیر در انتقال داده‌ها می‌تواند اثربخشی مدل را کاهش دهد [20].

نیاز به پردازش بلادرنگ: بسیاری از کاربردهای این مدل، مانند شناسایی شکوفه‌های جلبکی مضر یا پیش‌بینی مسمومیت‌های ناشی از سموم، نیازمند پردازش داده‌ها در لحظه هستند. این امر به زیرساخت‌های محاسباتی سریع و قابل‌اعتماد نیاز دارد که در محیط‌های دریایی به دلیل محدودیت‌های ذکرشده چالش‌برانگیز است [۳۶].

مدیریت انرژی: منابع انرژی در کشتی‌ها محدود است، که استفاده از سیستم‌های محاسباتی پرمصرف را محدود می‌کند. این محدودیت نیاز به توسعه فناوری‌های محاسباتی کم‌مصرف، مانند محاسبات لبه‌ای (edge computing)، را برجسته می‌کند.

راهکارهای پیشنهادی: برای غلبه بر این چالش‌ها، می‌توان از فناوری‌های محاسبات لبه‌ای استفاده کرد که امکان پردازش داده‌ها را در محل فراهم می‌کنند. همچنین، بهبود زیرساخت‌های ارتباطی، مانند استفاده از ارتباطات ماهواره‌ای پیشرفته، می‌تواند انتقال داده‌ها را تسهیل کند. توسعه سخت‌افزارهای محاسباتی کم‌مصرف و مقاوم در برابر شرایط دریایی نیز می‌تواند به حل این مشکلات کمک کند.

چالش‌های کیفیت داده‌ها

کیفیت داده‌ها یکی از عوامل کلیدی در موفقیت مدل‌های هوش مصنوعی است، اما جمع‌آوری داده‌های باکیفیت در محیط‌های دریایی با موانع متعددی مواجه است:

ناسازگاری داده‌ها: داده‌های ژنتیکی و زیست‌محیطی از منابع مختلفی مانند حسگرهای دریایی، تصاویر ماهواره‌ای، و بانک‌های زیستی جمع‌آوری می‌شوند. این منابع ممکن است فرمت‌ها، استانداردها، و مقیاس‌های متفاوتی داشته باشند، که ادغام آن‌ها را دشوار می‌کند [۳۷]. برای مثال، داده‌های حسگرهای دریایی ممکن است با داده‌های ژنتیکی از نظر مقیاس زمانی یا مکانی همخوانی نداشته باشند.

نقصان و ناقص بودن داده‌ها: جمع‌آوری داده‌ها در دریا به دلیل شرایط آب و هوایی، خرابی تجهیزات، یا محدودیت‌های لجستیکی ممکن است ناقص باشد. به عنوان مثال، نمونه‌برداری ژنومی از دریانوردان و غواصان ممکن است به دلیل عدم دسترسی به تجهیزات پیشرفته یا تعداد محدود نمونه‌ها با مشکل مواجه شود [۳۸].

سر و صدای داده‌ها: حسگرهای دریایی ممکن است به دلیل عواملی مانند جریان‌های آب، بیوفولینگ (تجمع موجودات زنده روی حسگرها)، یا مشکلات کالیبراسیون، داده‌های نویزی تولید کنند. این نویزها می‌توانند دقت مدل‌های AI را کاهش دهند [۳۹].

کمبود داده‌های برچسب‌دار: الگوریتم‌های یادگیری نظارت‌شده، مانند شبکه‌های عصبی، به داده‌های برچسب‌دار برای آموزش نیاز دارند. برچسب‌زنی داده‌های ژنتیکی و زیست‌محیطی، به‌ویژه برای رویدادهای نادر مانند مسمومیت‌های ناشی از سموم دریایی، زمان‌بر و پرهزینه است [۳۷].

تازه‌بودن داده‌ها: برای کاربردهای بلادرنگ، مانند هشدارهای زودهنگام در مورد شکوفه‌های جلبکی مضر، داده‌ها باید به‌روز و تازه باشند. تأخیر در جمع‌آوری یا پردازش داده‌ها می‌تواند منجر به پیش‌بینی‌های نادرست شود [۲۰].

راهکارهای پیشنهادی: برای بهبود کیفیت داده‌ها، می‌توان از تکنیک‌های پیش‌پردازش داده مانند تمیز کردن، نرمال‌سازی، و استانداردسازی استفاده کرد. توسعه پروتکل‌های استاندارد برای جمع‌آوری داده‌های ژنتیکی و زیست‌محیطی نیز می‌تواند به کاهش ناسازگاری‌ها کمک کند. علاوه بر این، استفاده از داده‌های مصنوعی یا شبیه‌سازی‌شده می‌تواند کمبود داده‌های برچسب‌دار را جبران کند.

مسائل اخلاقی

استفاده از داده‌های ژنتیکی در مدل‌های AI، به‌ویژه در محیط‌های دریایی، مسائل اخلاقی مهمی را مطرح می‌کند که باید به دقت مدیریت شوند:

حریم خصوصی داده‌های ژنتیکی: داده‌های ژنتیکی اطلاعات بسیار حساس و شخصی هستند که در صورت سوءاستفاده می‌توانند به نقض حریم خصوصی منجر شوند. حتی اگر داده‌ها به صورت ناشناس جمع‌آوری شوند، پیشرفت‌های فناوری ممکن است امکان شناسایی مجدد افراد را فراهم کند. این مسئله در محیط‌های دریایی، که ممکن است شامل جمعیت‌های متنوعی از دریانوردان و غواصان باشد، اهمیت بیشتری دارد [40].

رضایت آگاهانه: کسب رضایت آگاهانه از دریانوردان و غواصان برای استفاده از داده‌های ژنتیکی آن‌ها ضروری است. این فرآیند باید شامل اطلاع‌رسانی کامل در مورد نحوه استفاده، ذخیره‌سازی، و اشتراک‌گذاری داده‌ها باشد. با توجه به تنوع فرهنگی و زبانی در میان دریانوردان، این فرآیند ممکن است پیچیده‌تر شود [۴۱].

عدالت و تبعیض: مدل‌های AI ممکن است تبعیضات موجود در داده‌های آموزشی را منعکس کنند، که می‌تواند منجر به نتایج ناعادلانه برای گروه‌های خاصی از افراد شود. برای مثال، اگر داده‌های ژنتیکی از جمعیت‌های خاصی جمع‌آوری شوند، مدل ممکن است برای سایر گروه‌ها دقت کمتری داشته باشد [۴۲].

شفافیت و مسئولیت‌پذیری: شفافیت در مورد نحوه استفاده از داده‌های ژنتیکی و مسئولیت‌پذیری در برابر هرگونه سوءاستفاده یا خطا از اهمیت بالایی برخوردار است. این امر به ویژه در محیط‌های دریایی، که ممکن است نظارت قانونی کمتری وجود داشته باشد، چالش‌برانگیز است [۴۳].

راهکارهای پیشنهادی: برای مدیریت مسائل اخلاقی، باید پروتکل‌های سخت‌گیرانه‌ای برای حفاظت از داده‌ها، مانند رمزنگاری و ذخیره‌سازی امن، پیاده‌سازی شود. همچنین، فرآیندهای رضایت آگاهانه باید ساده و قابل‌فهم باشند و به زبان‌های مختلف ارائه شوند. توسعه چارچوب‌های نظارتی بین‌المللی برای استفاده از داده‌های ژنتیکی در محیط‌های دریایی نیز می‌تواند به کاهش این نگرانی‌ها کمک کند.

پیچیدگی‌های مدل‌سازی

ادغام داده‌های ژنتیکی و زیست‌محیطی برای توسعه مدل‌های AI در محیط‌های دریایی با چالش‌های فنی متعددی همراه است:

تنوع و پیچیدگی داده‌ها: داده‌های ژنتیکی مانند پروفایل‌های (SNP) و زیست‌محیطی (مانند غلظت سموم، دما، و شوری) از نظر فرمت، مقیاس، و نوع بسیار متفاوت هستند. ادغام این داده‌ها نیازمند تکنیک‌های پیشرفته پیش‌پردازش و مهندسی ویژگی است [۳۹].

تعاملات غیرخطی: تعاملات بین عوامل ژنتیکی و زیست‌محیطی اغلب غیرخطی و پیچیده هستند. مدل‌سازی این تعاملات نیازمند الگوریتم‌های پیشرفته‌ای مانند شبکه‌های عصبی عمیق است که می‌توانند الگوهای پیچیده را شناسایی کنند [44].

نیاز به داده‌های برچسب‌دار: الگوریتم‌های یادگیری نظارت‌شده به داده‌های برچسب‌دار برای آموزش نیاز دارند. برچسب‌زنی داده‌های ژنتیکی و زیست‌محیطی، به‌ویژه برای رویدادهای نادر مانند مسمومیت‌های ناشی از سموم دریایی، دشوار و پرهزینه است [۳۷].

مقیاس‌پذیری مدل‌ها: با افزایش حجم داده‌ها، مدل‌های AI باید قادر به پردازش و تحلیل داده‌های بزرگ و متنوع باشند. این امر نیازمند توسعه الگوریتم‌های کارآمد و قابل‌مقیاس است که بتوانند در محیط‌های با منابع محدود عمل کنند [۳۵].

نیاز به همکاری بین‌رشته‌ای: توسعه این مدل‌ها نیازمند همکاری متخصصان در زمینه‌های ژنتیک، زیست‌شناسی دریایی، علوم کامپیوتر، و اقیانوس‌شناسی است. هماهنگی بین این رشته‌ها می‌تواند زمان‌بر و پیچیده باشد [۴۵].

راهکارهای پیشنهادی: برای غلبه بر پیچیدگی‌های مدل‌سازی، می‌توان از الگوریتم‌های یادگیری ماشین پیشرفته، مانند یادگیری عمیق، استفاده کرد که قادر به مدیریت داده‌های پیچیده هستند. همچنین، توسعه چارچوب‌های استاندارد برای ادغام داده‌ها و استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌شده می‌تواند به کاهش این چالش‌ها کمک کند. همکاری بین‌رشته‌ای و ایجاد تیم‌های تحقیقاتی چندرشته‌ای نیز برای موفقیت این مدل ضروری است.

مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری ژنتیکی به سموم دریایی با چالش‌های متعددی مواجه است که شامل محدودیت‌های زیرساختی محاسباتی، مشکلات کیفیت داده‌ها، مسائل اخلاقی، و پیچیدگی‌های مدل‌سازی می‌شوند. این چالش‌ها نیازمند راهکارهای نوآورانه‌ای مانند توسعه زیرساخت‌های محاسباتی کم‌مصرف، استانداردسازی داده‌ها، پروتکل‌های اخلاقی قوی، و الگوریتم‌های پیشرفته هستند. با وجود این محدودیت‌ها، این مدل پتانسیل بالایی برای بهبود سلامت حرفه‌ای دریانوردان و غواصان و حفاظت از اکوسیستم‌های دریایی دارد. تحقیقات آینده باید بر رفع این چالش‌ها و اعتبارسنجی مدل با داده‌های واقعی تمرکز کنند.

جدول ۴. خلاصه چالش‌ها و راهکارهای پیشنهادی برای مدل پیش‌بینی

چالش	توضیحات	راهکارهای پیشنهادی
زیرساخت‌های محاسباتی	محدودیت‌های سخت‌افزاری و ارتباطی در دریا	استفاده از محاسبات لبه‌ای، بهبود ارتباطات ماهواره‌ای
کیفیت داده‌ها	ناسازگاری، نویز، و کمبود داده‌های برچسب‌دار	پیش‌پردازش داده‌ها، استفاده از داده‌های مصنوعی
مسائل اخلاقی	حریم خصوصی، رضایت آگاهانه، تبعیض	رمزنگاری داده‌ها، پروتکل‌های رضایت ساده
پیچیدگی مدل‌سازی	تنوع داده‌ها، تعاملات غیرخطی	الگوریتم‌های پیشرفته، همکاری بین‌رشته‌ای

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، منابع علمی مختلفی برای پشتیبانی از چارچوب پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که شامل مطالعات حوزه‌های ژنتیک، هوش مصنوعی، پزشکی از راه دور (تله‌مدیسین) و علوم دریایی می‌شود. منابع ژنتیکی بر تحلیل تنوع ژنتیکی انسان و ارتباط آن با حساسیت به سموم تاکید دارند، در حالی که منابع مرتبط با هوش مصنوعی به کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی عمیق و جنگل‌های تصادفی در پیش‌بینی وضعیت سلامت اشاره دارند. مطالعات در زمینه تله‌مدیسین نیز نقش فناوری‌های ارتباطی را در ارائه خدمات پزشکی در مناطق دورافتاده بررسی کرده‌اند. همچنین، منابع زیست‌محیطی به اهمیت سنجش بلادرنگ آلودگی‌های دریایی با استفاده از حسگرهای هوشمند می‌پردازند. در مجموع، این منابع پایه‌ای علمی و فنی برای توسعه مدلی فراهم کرده‌اند که با ترکیب داده‌های چندمنبعی، به مدیریت بهتر خطرات سمی برای دریانوردان و غواصان کمک می‌کند.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مقاله از دانشگاه علوم پزشکی کرمان و دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان به دلیل فراهم آوردن امکانات پژوهشی و حمایت‌های علمی تشکر و قدردانی می‌کنند. همچنین از تمامی افرادی که در مراحل مختلف این مطالعه، از جمله جمع‌آوری داده‌ها و بررسی منابع، همکاری داشته‌اند، سپاسگزاریم.

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. Botana LM. Seafood and freshwater toxins: pharmacology, physiology, and detection. Boca Raton (FL): CRC Press; 2014
2. Visciano P, Schirone M, Berti M, Milanović V, Ferre N, Tofalo R, et al. Marine biotoxins: occurrence, toxicity, regulatory limits and reference methods. Front Microbiol. 2016;7:1051.
3. Ingelman-Sundberg M. Genetic polymorphisms of cytochrome P450 2D6 (CYP2D6): clinical consequences, evolutionary aspects and functional diversity. Pharmacogenomics J. 2005;5(1):6–13.
4. Zhou S-F, Liu J-P, Chowbay B. Polymorphism of human cytochrome P450 enzymes and its clinical impact. Drug Metab Rev. 2009;41(2):89–295.

5. Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. Nat Med. 2019;25(1):44–56.
6. Libbrecht MW, Noble WS. Machine learning applications in genetics and genomics. Nat Rev Genet. 2015;16(6):321–32.
7. Mair FS, May C, O'Donnell C, Finch T, Sullivan F, Murray E. Factors that promote or inhibit the implementation of e-health systems: an explanatory systematic review. Bull World Health Organ. 2012;90(5):357–64.
8. Tormoehlen L, Tekulve K, Nañagas K. Hydrocarbon toxicity: A review. Clin Toxicol (Phila). 2014;52(5):479–89.
9. Turner NR, Renegar DA. Petroleum hydrocarbon toxicity to corals: A review. Mar Pollut Bull. 2017;119(2):1–16.
10. Järup L. Hazards of heavy metal contamination. Br Med Bull. 2003;68(1):167–82.
11. Rezaei M, Hosseini SA, Shabankareh EA, Zarei M, Pahlavanhosseini A. Environmental assessment of heavy metal concentration and pollution in the Persian Gulf. Model Earth Syst Environ. 2021;7(2):983–1003.
12. Tibballs J. Australian venomous jellyfish, envenomation syndromes, toxins and therapy. Toxicon. 2006;48(7):830–59.
13. Wilkinson C. Status of coral reefs of the world: 2004. Townsville (AU): Australian Institute of Marine Science; 2004.
14. Strom MS, Paranjpye RN. Epidemiology and pathogenesis of Vibrio vulnificus. Microbes Infect. 2000;2(2):177–88.
15. Antilla K, Del Campo J, Karjalainen M, Kremp A, Le Tortorec AH, Murray S, et al. Climate Change and Marine and Freshwater Toxins. Berlin: De Gruyter; 2015.
16. Nebert DW, Wikvall K, Miller WL. Human cytochromes P450 in health and disease. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2013;368(1612):20120431.
17. Hartung T. Toxicology for the twenty-first century. Nature. 2009;460(7252):208–12.
18. Butt F, Hamid N. Monitoring of the Environmental Indicators in the Marine Ecosystem. In: Gholamzadeh M, Mohammadzadeh N, editors. Recent Trends in Marine Toxicological Assessment. Cham: Springer; 2025. p. 17–49.
19. Zielinski O, Busch JA, Cembella AD, Daly KL, Engelbrektsson J, Hannides AK, et al. Detecting marine hazardous substances and organisms: sensors for pollutants, toxins, and pathogens. Ocean Sci. 2009;5(3):329–49.
20. Prakash N, Zielinski O. AI-enhanced real-time monitoring of marine pollution: part 1-A state-of-the-art and scoping review. Front Mar Sci. 2025;12:1486615.
21. Christiani DC, Mehta AJ, Yu C-L. Genetic susceptibility to occupational exposures. Occup Environ Med. 2008;65(6):430–6.
22. Elsayad A, Ismail MM, Ahmed HK, El-Shahat A. Machine learning model for random forest acute oral toxicity prediction. Glob J Environ Sci Manag. 2025;11(1):21–38.
23. Govender P, Wingfield B, Swart R, Dhurmea KR, van der Poel CL. The application of machine learning to predict genetic relatedness using human mtDNA hypervariable region I sequences. PLoS One. 2022;17(2):e0263790.
24. Sobel J, Painter J. Illnesses caused by marine toxins. Clin Infect Dis. 2005;41(9):1290–6.
25. Mohammadzadeh N, Gholamzadeh M. Requirements, challenges, and key components to improve onboard medical care using maritime telemedicine: narrative review. Int J Telemed Appl. 2023;2023:9389286.
26. Cavasotto CN, Scardino V. Machine learning toxicity prediction: latest advances by toxicity end point. ACS Omega. 2022;7(51):47536–46.
27. Battineni G, Chintalapudi N, Amenta F. Maritime telemedicine: design and development of an advanced healthcare system called marine doctor. J Pers Med. 2022;12(5):832.
28. Horneland AM. Norwegian Centre for Maritime Medicine (NCMM). Int Marit Health. 2007;58(1–4):178–81.
29. Battineni G, Chintalapudi N, Amenta F, Khayyat M. Exploring the integration of artificial intelligence (AI) and augmented reality (AR) in maritime medicine. Artif Intell Rev. 2024;57(4):100.
30. Hogge SM. Robotic and artificial intelligence systems for the naval operational environment. Nav Eng J. 1987;99(4):74–86.
31. Gerssen A, Pol-Hofstad IE, Poelman M, Mulder PPJ, van den Top HJ, de Boer J. Marine toxins: Chemistry, toxicity, occurrence and detection, with special reference to the Dutch situation. Toxins. 2010;2(4):878–904.
32. Sagaro GG, Amenta F. Past, present, and future perspectives of telemedical assistance at sea: a systematic review. Int Marit Health. 2020;71(2):97–104.
33. Anogianakis G, Maglavera S, Pomportsis A. Relief for maritime medical emergencies through telematics. IEEE Trans Inf Technol Biomed. 2002;2(4):254–60.
34. Woldaregay AZ, Walderhaug S, Hartvigsen G. Telemedicine services for the Arctic: a systematic review. JMIR Med Inform. 2017;5(2):e6323.
35. Dong C, Loy CC, He K, Tang X. Recent developments in artificial intelligence in oceanography. Ocean-Land-Atmos Res. 2022;1:0001.
36. Pourzangbar A, Jalali M, Brocchini M. Machine learning application in modelling marine and coastal phenomena: a critical review. Front Environ Eng. 2023;2:1235557.
37. Ataman A. Data Quality in AI: Challenges, Importance & Best Practices. AIMultiple; 2023.
38. Zare A, Mohd Amin MF, Kakooei M, Hassan A, Rahimipour Anaraki M, Mostafaie A, et al. An update for various applications of Artificial Intelligence (AI) for detection and identification of marine environmental pollutions: A bibliometric analysis and systematic review. Mar Pollut Bull. 2024;206:116751.
39. Rubbens P, Brodie S, Cordier T, Destro Barcellos D, Devos P, Fernandes-Salvador JA, et al. Machine learning in marine ecology: an overview of techniques and applications. ICES J Mar Sci. 2023;80(7):1829–53.
40. Clayton EW, Evans BJ, Hazel JW, Rothstein MA. The law of genetic privacy: applications, implications, and limitations. J Law Biosci. 2019;6(1):1–36.
41. Howe EG 3rd, Elenberg F. Ethical challenges posed by big data. Innov Clin Neurosci. 2020;17(10-12):24–30.
42. Dara M, Azarpira N. Ethical Considerations Emerge from Artificial Intelligence (AI) in Biotechnology. Avicenna J Med Biotechnol. 2025;17(1):80–1.
43. Radanliev P. AI Ethics: Integrating Transparency, Fairness, and Privacy in AI Development. Appl Artif Intell. 2025;39(1):2463722.
44. Zhao T, Shi J, Hu T, Zhao L, Zhao W, Wang F, et al. Artificial intelligence for geoscience: Progress, challenges and perspectives. Innovation (Camb). 2024;5(3):100648.
45. Ditria EM, Connolly RM, Jinks EL, Lopez-Marcano S. Artificial intelligence and automated monitoring for assisting conservation of marine ecosystems: A perspective. Front Mar Sci. 2022;9:918104.