



Tsunami Monitoring and Early Warning Using the Internet of Things (IoT): A Step Toward a Smart Ocean

Mohammad Pakhirehzan^{1✉}  | Sajedah Balouchi²

1. Corresponding Author, Faculty of Marine Sciences and Technologies, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran. E-mail: mht_pa@yahoo.com
2. Faculty of Marine Sciences and Technologies, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran. E-mail: saphy12_ba@yahoo.com

Article Info

Article type

Research Article

Article history

Received: 13 March 2025

Revised: 9 April 2025

Accepted: 10 April 2025

Published: 16 April 2025

Keywords

Internet of Things

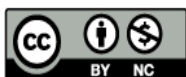
Ocean Monitoring

Tsunami

ABSTRACT

Tsunamis represent one of the most devastating natural disasters, consistently posing a serious threat to coastal regions. Despite advancements in early warning systems, persistent challenges include limited accuracy, substantial time delays, and insufficient geographical coverage. This study aims to analyze the transformative role of Internet of Things (IoT) technology in enhancing tsunami monitoring and early warning systems, proposing a conceptual framework that integrates smart sensors, communication networks, cloud computing, and numerical models. Employing a systematic review-analytical methodology, this research examines credible studies published between 2005 and 2024. It specifically investigates the integration of real-time IoT data with numerical models and deep learning algorithms (CNN-LSTM), conceptualized as a digital neural system for ocean monitoring. The findings demonstrate that IoT-based systems can detect seabed pressure changes with 0.1 Pascal accuracy in less than one minute. Integration of this data with numerical models yields a 20-25% improvement in wave height prediction accuracy and reduces warning time by 50%. The CNN-LSTM architecture achieves 92% tsunami detection accuracy while reducing false alarm rates by 35%. Economically, these systems generate up to 40% reduction in operational costs and decrease warning times to less than three minutes in high-risk areas such as the Makran coast in the northern Indian Ocean. The convergence of IoT technology, numerical modeling, and artificial intelligence establishes a new paradigm in tsunami early warning that enhances accuracy, speed, and reliability while enabling intelligent coastal management.

Cite this article: Pakhiehzan, M., & Balouchi, S. (2025). Tsunami monitoring and early warning using the internet of things (IoT): A step toward a smart ocean. *Mind and Technology*, 1(1), 14-22. <https://doi.org/10.22091/JMT.2025.14260.1008>



©The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22091/JMT.2025.14260.1008>

Publisher: University of Qom



پایش و هشدار زودهنگام سونامی با استفاده از اینترنت اشیا (IoT):

گامی به سوی اقیانوس هوشمند

محمد پاخیزهن^۱ | ساجده بلوچی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران. رایانامه: mht_pa@yahoo.com

۲. گروه علوم جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران. رایانامه: saphy12_ba@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله پژوهشی	سونامی به عنوان یکی از مخربترین بلایای طبیعی، همواره خطری جدی برای مناطق ساحلی محسوب می‌شود. با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته در سامانه‌های هشدار زودهنگام، چالش‌هایی چون دقت محدود، زمان تأخیر بالا و عدم گستردگی مکانی، همچنان پابرجاست. این پژوهش با هدف تحلیل نقش تحول آفرین فناوری اینترنت اشیا (IoT) در ارتقای سامانه‌های پایش و هشدار سونامی و ارائه چارچوبی مفهومی مبتنی بر ادغام حسگرهای هوشمند، شبکه‌های ارتباطی، پردازش ابری و مدل‌های عددی انجام شده است. این مطالعه به روش مروری تحلیلی و با بررسی نظام‌مند مطالعات معتبر در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ صورت پذیرفته است. در این راستا، ادغام داده‌های بلادرنگ IoT با مدل‌های عددی و الگوریتم‌های یادگیری عمیق (CNN-LSTM) در قالب یک سیستم عصبی دیجیتال برای پایش اقیانوس مورد تحلیل قرار گرفته است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که سامانه‌های مبتنی بر IoT قادر به ثبت تغییرات فشار بستر دریا با دقت ۰.۱ پاسکال در بازه‌های زمانی زیر یک دقیقه هستند. ادغام این داده‌ها با مدل‌های عددی منجر به افزایش ۲۰ تا ۲۵ درصدی دقت پیش‌بینی ارتفاع موج و کاهش ۵۰ درصدی زمان هشدار شده است. همچنین معماری CNN-LSTM دقت تشخیص سونامی را به ۹۲ درصد رسانده و نرخ هشدار اشتباه را ۳۵ درصد کاهش داده است. از منظر اقتصادی، این سامانه‌ها تا ۴۰ درصد در هزینه‌های عملیاتی صرفه‌جویی ایجاد کرده و در مناطق پرخطری مانند سواحل مکران در شمال اقیانوس هند، زمان هشدار را به کمتر از ۳ دقیقه کاهش می‌دهند. تلفیق فناوری IoT با مدل‌سازی عددی و هوش مصنوعی، پارادایم جدیدی در هشدار زودهنگام سونامی ایجاد کرده که علاوه بر بهبود دقت، سرعت و قابلیت اطمینان، امکان مدیریت هوشمند سواحل را فراهم می‌سازد.
تاریخچه دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷	
کلیدواژه‌ها اینترنت اشیا پایش اقیانوس سونامی	

استناد: پاخیزهن، محمد؛ و بلوچی، ساجده (۱۴۰۴). پایش و هشدار زودهنگام سونامی با استفاده از اینترنت اشیا (IoT): گامی به سوی اقیانوس هوشمند. ذهن و

فناوری، ۱(۱)، ۲۲-۱۴. <https://doi.org/10.22091/JMT.2025.14260.1008>



مقدمه

سونامی یکی از پدیده‌های نادر اما بسیار ویرانگر طبیعی است که در اثر جابه‌جایی ناگهانی بستر دریا یا اقیانوس به وجود می‌آید. این جابه‌جایی می‌تواند ناشی از زمین‌لرزه‌های تکتونیکی، رانش زمین زیرآب، فعالیت‌های آتش‌فشانی یا حتی برخورد شهاب‌سنگ باشد. برخلاف امواج معمولی دریا که از باد ناشی می‌شوند و طول موجی در حدود چند ده متر دارند، امواج سونامی می‌توانند طول موجی بیش از ۱۰۰ کیلومتر و ارتفاعی چند متری در مناطق ساحلی پیدا کنند. این ویژگی سبب می‌شود که هنگام رسیدن به مناطق کم‌عمق، انرژی عظیم ذخیره‌شده در ستون آب آزاد شود و خساراتی سنگین به زیرساخت‌ها، کشتی‌ها و جمعیت ساحلی وارد گردد (Rashidi et al., 2020; Angeli et al., 2025).

سونامی‌ها معمولاً با سرعتی بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ کیلومتر در ساعت در آب‌های عمیق حرکت می‌کنند، اما به دلیل دامنه‌ی بسیار کم در اقیانوس باز، اغلب قابل تشخیص با چشم غیرمسلح نیستند. وقتی این امواج به نواحی کم‌عمق نزدیک می‌شوند، به علت کاهش عمق و تاثیر اصطکاک بستر، سرعت کاهش می‌یابد ولی ارتفاع موج به‌شدت افزایش پیدا می‌کند. همین پدیده که به آن افزایش دامنه به دلیل فشردگی انرژی گفته می‌شود، عامل اصلی تخریب در زمان رسیدن موج به ساحل است (Meinig et al., 2005; Zhou et al., 2024).

حادثه‌ی سونامی سال ۲۰۰۴ اقیانوس هند با بیش از ۲۳۰ هزار قربانی و خساراتی بالغ بر ۱۰ میلیارد دلار، نقطه‌ی عطفی در تاریخ اقیانوس‌شناسی و مدیریت بلایا به شمار می‌رود. پس از آن، توجه جهانی به توسعه‌ی سامانه‌های هشدار زودهنگام جلب شد. در همین راستا، پروژه‌های مهمی مانند DART¹ در ایالات متحده، SMART Cables تحت نظارت یونسکو و سامانه‌های پیشرفته‌ی ژاپن، آغاز به کار کردند. سیستم‌های هشدار زودهنگام سنتی (مبتنی بر بویه‌های شناور و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری ساحلی) اگرچه گام‌های اولیه مهمی بوده‌اند، اما اغلب به دلیل تأخیر در انتقال داده، محدود بودن منطقه تحت نظارت، هزینه‌های بالای نگهداری و نرخ هشدارهای کاذب نسبتاً بالا، با چالش‌های جدی مواجه هستند (Bernard and Titov, 2015).

در دهه‌ی اخیر، ظهور فناوری‌های دیجیتال نوین مانند اینترنت اشیا (Internet of Thing)، رایانش ابری (Cloud Computing) و هوش مصنوعی (AI) چشم‌انداز جدیدی در پایش محیطی و هشدار سونامی گشوده است. فناوری اینترنت اشیا (IoT) پارادایم جدیدی را در حوزه‌های مختلف از جمله پایش محیطی ایجاد کرده است. اینترنت اشیا به مجموعه‌ای از تجهیزات هوشمند و حسگرهایی اطلاق می‌شود که از طریق شبکه‌های ارتباطی (سیمی، بی‌سیم یا ماهواره‌ای) به یکدیگر متصل‌اند و داده‌ها را به‌صورت بلادرنگ (Real-time) تبادل می‌کنند (Al-Fuqaha et al., 2015). در علوم اقیانوسی، این فناوری به‌سرعت مورد توجه قرار گرفت و زمینه‌ساز مفهوم Ocean IoT شد؛ شبکه‌ای از حسگرهای فشار، دما، ارتعاش و شوری که در کف دریا، سطح آب و ایستگاه‌های ساحلی مستقر شده و داده‌ها را به سرورهای تحلیلی منتقل می‌کنند (Fan et al., 2024).

کاربرد IoT در پایش اقیانوسی نه تنها سرعت انتقال داده را بهبود داده، بلکه موجب افزایش چشمگیر دقت مدل‌های عددی شده است. مدل‌هایی مانند MIKE SW، ROMS و SWAN وقتی با داده‌های بلادرنگ از شبکه‌های IoT تغذیه شوند، می‌توانند به‌صورت خودکار پیش‌بینی‌های به‌روز از ارتفاع موج، انرژی موج، زمان رسیدن و محدوده‌ی اثر سونامی تولید کنند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیب داده‌های IoT با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، زمان تشخیص اولیه‌ی موج سونامی را تا ۴۰ درصد کاهش داده و نرخ هشدار نادرست را به میزان قابل توجهی پایین آورده است (Constantinou et al., 2023; Zhou et al., 2024).

¹. Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis

از سوی دیگر، در مناطق خاصی مانند سواحل مکران در شمال اقیانوس هند، خطر وقوع سونامی به دلیل فعالیت‌های تکتونیکی صفحه‌ی عربی و اوراسیا بسیار بالاست. پژوهش‌های متعدد در سال‌های اخیر نشان داده‌اند که ناحیه مکران پتانسیل تولید سونامی‌هایی با ارتفاع بیش از ۱۰ متر را دارد. در چنین مناطقی، استفاده از شبکه‌های IoT دریایی می‌تواند نقش کلیدی در حفاظت از جمعیت ساحلی و زیرساخت‌های حیاتی مانند بنادر، نیروگاه‌ها و تاسیسات نفتی ایفا کند (Heidarzadeh and Satake, 2014; Rashidi et al., 2020).

در اوایل دهه‌ی ۲۰۰۰، پروژه DART یا همان سامانه‌ی عملیاتی پایش عمیق اقیانوس توسط سازمان NOAA^۱ راه‌اندازی شد (Meinig et al., 2005). این سامانه متشکل از فشارسنج‌های کف دریا و بویه‌های سطحی بود که از طریق ارتباط ماهواره‌ای داده‌ها را به مراکز پیش‌بینی منتقل می‌کرد. در دهه‌های بعد، پیشرفت حسگرهای ارزان‌قیمت، ارتباطات بی‌سیم و انرژی‌های تجدیدپذیر موجب شد که نسل جدیدی از سامانه‌های هوشمند پایش، تحت عنوان Ocean IoT Systems توسعه یابد (Rashidi et al., 2020).

پروژه‌های بین‌المللی نظیر SMART Cables نیز با هدف ادغام کابل‌های مخابراتی زیر آب با حسگرهای فشار و لرزه‌سنج طراحی شده‌اند تا هم‌زمان با انتقال داده‌های اینترنتی، اطلاعات محیطی را نیز ثبت کنند (IOC/UNESCO, 2021). علاوه بر این، در کشورهای پیشرفته‌ای مانند ژاپن، نیوزیلند و ایالات متحده، استفاده از هوش مصنوعی برای تفسیر داده‌های IoT منجر به توسعه سامانه‌های خودیادگیر و واکنش‌گر در برابر پدیده‌های غیرعادی شده است (Angeli et al., 2025).

این مقاله، به بررسی این موضوع خواهد پرداخت که چگونه فناوری اینترنت اشیا می‌تواند به‌عنوان امتداد و تقویت‌کننده توانایی‌های ذهن بشر برای درک و نظارت بر محیط پیچیده دریایی عمل کند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی مطالعات انجام‌شده در حوزه کاربرد فناوری اینترنت اشیا در سامانه‌های پایش اقیانوسی و هشدار سونامی و تبیین نقش آن در افزایش دقت، کاهش تأخیر هشدار و بهبود تاب‌آوری مناطق ساحلی است. درواقع، روش انجام این تحقیق از نوع تحلیلی-مروری^۲ است که با مرور مقالات علمی، گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی و پروژه‌های عملی در سطح جهانی (از جمله NOAA-DART، SMART Cables و شبکه ژاپن) انجام شده است. همچنین در این مطالعه، امکان به‌کارگیری سامانه‌های پایش IoT در مناطق مستعد خطر در شمال اقیانوس هند، به‌ویژه سواحل مکران، بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و منابع مورد استفاده

منابع اصلی این پژوهش پروژه NOAA-DART II و گزارش‌های IOC-UNESCO درباره پروژه‌ی کابل‌های هوشمند، هستند. بر اساس گزارش Meinig و همکاران (2005) و همچنین IOC/UNESCO (2021)، این داده‌ها شامل متغیرهایی چون فشار ستون آب، ارتفاع موج، دما، شوری، جریان‌های زیرسطحی و نوسانات لرزه‌ای بستر دریا هستند. با توجه به مطالعه Liu و Wang (2022)، این اطلاعات به‌منظور بررسی عملکرد شبکه‌های IoT در پایش بلادرنگ اقیانوس و ارزیابی دقت مدل‌های عددی برای پیش‌بینی سونامی مورد استفاده قرار گرفتند.

چارچوب مفهومی سامانه پایش

چارچوب مفهومی طراحی‌شده در این پژوهش تحلیلی-مروری بر پایه‌ی فناوری اینترنت اشیا (IoT) است که از سه لایه‌ی اصلی تشکیل می‌شود (Angeli et al., 2025; Xu et al., 2021):

^۱. National Oceanic and Atmospheric Administration

^۲. Analytical Review

الف) لایه حسگر (Sensor Layer): در این لایه، مجموعه‌ای از حسگرهای متنوع برای اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و زمین‌ساختی مستقر می‌شوند مانند:

- حسگرهای کف دریا (BPR)^۱ جهت ثبت تغییرات فشار ستون آب در اثر جابه‌جایی بستر اقیانوس (Meinig et al., 2005)
- بویه‌های سطحی و حسگرهای ارتفاع موج برای پایش نوسانات جزر و مد
- شتاب‌سنج‌ها و لرزه‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری ارتعاشات ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی زیرسطحی (Angeli et al., 2025)
- حسگرهای دما و شوری برای شناسایی تغییرات محیطی مرتبط با دینامیک امواج (Wang and Liu, 2022)

ب) لایه ارتباطی (Communication Layer): انتقال داده‌های جمع‌آوری‌شده از طریق یک شبکه چندسطحی شامل ارتباط آکوستیکی زیر آب، شبکه‌های بی‌سیم سطحی و ارتباطات ماهواره‌ای (Xu et al., 2021; Wang et al., 2023):

- ارتباط آکوستیکی زیر آب (Acoustic Communication) جهت تبادل داده بین حسگرهای کف دریا و ایستگاه‌های سطحی.
- از شبکه‌های LoRaWAN و 5G دریایی برای انتقال داده‌ها به ایستگاه‌های ساحلی استفاده می‌شود. توضیح اینکه LoRaWAN یک فناوری ارتباطی بی‌سیم برای اینترنت اشیاء است. این فناوری در عین مصرف بسیار پایین انرژی، برد ارتباطی بسیار طولانی (تا چندین کیلومتر) را ارائه می‌دهد. از LoRaWAN معمولاً برای اتصال حسگرها و دستگاه‌هایی استفاده می‌شود که نیاز به ارسال داده‌های کوچک در بازه‌های زمانی مشخص دارند. در پایش اقیانوس، این فناوری نقش کلیدی در انتقال داده از بویه‌های دریایی به ایستگاه‌های ساحلی ایفا می‌کند. شبکه 5G دریایی نیز با ارائه پهنای باند بالا و تأخیر کم، امکان انتقال داده‌های حجیم حسگرهای اقیانوسی و پشتیبانی از کشتی‌های خودران را در محیط‌های آبی فراهم می‌سازد.
- لینک‌های ماهواره‌ای LEO^۲ برای ارسال داده به مراکز ابری.
- در این ساختار، از معماری Fault-Tolerant IoT Network استفاده می‌شود تا در صورت خرابی یا قطع ارتباط یک ایستگاه، داده‌ها از مسیرهای جایگزین منتقل شوند (Xu et al., 2021).

پ) لایه تحلیل داده (Data Analytics Layer): در این لایه، داده‌های ورودی در پلتفرم ابری گردآوری و تحلیل می‌شوند. تحلیل داده‌ها شامل سه مرحله است: پیش‌پردازش، تشخیص الگو و مدل‌سازی عددی. از روش FIF^۳ برای حذف نویز داده‌ها استفاده می‌شود (Angeli et al., 2025). سپس الگوریتم‌های EMD^۴ و FFT^۵ برای استخراج ویژگی‌های طیفی سیگنال‌ها به کار می‌روند. در نهایت، مدل‌های یادگیری عمیق CNN-LSTM^۶ داده‌ها را تحلیل کرده و احتمال وقوع سونامی را بر اساس الگوهای زمانی و مکانی محاسبه می‌کنند (Constantinou et al., 2023).

روش تحلیل و ارزیابی داده‌ها

^۱. Bottom Pressure Recorder

^۲. Low Earth Orbit

^۳. Fast Iterative Filtering

^۴. Empirical Mode Decomposition

^۵. Fast Fourier Transform

^۶. Convolutional Neural Network- Long Short-Term Memory

براساس مطالعات Angeli و همکاران (2025)، Constantinou و همکاران (2023) و Wang و همکاران (2023)، تحلیل داده‌ها در سه مرحله (۱) پیش‌پردازش داده‌ها، (۲) شناسایی الگوهای موج سونامی و (۳) ارزیابی عملکرد مدل‌ها انجام می‌شود. در مرحله پیش‌پردازش داده‌ها، داده‌های فشار و ارتفاع موج از پروژه‌های DART و SMART Cables استخراج شده و با استفاده از روش FIF پردازش گردیدند تا نویز ناشی از امواج بادی حذف شود (Angeli et al., 2025). در مرحله شناسایی الگوهای موج سونامی، پس از پردازش، داده‌ها با الگوریتم EMD و FFT تحلیل طیفی شدند. نتایج حاصل به شبکه CNN-LSTM وارد گردید تا الگوهای غیرعادی از تغییرات طبیعی جزرومد تفکیک شوند (Constantinou et al., 2023). مرحله ارزیابی عملکرد مدل‌ها براساس مطالعه Wang و همکاران (2023) و بر اساس مقایسه خروجی مدل‌های اقیانوسی با داده‌های واقعی سه رویداد سونامی در ژاپن (۲۰۱۱)، اندونزی (۲۰۱۸) و تونگا (2021) با توجه به شاخص‌های آماری RMSE (برای خطای پیش‌بینی ارتفاع موج) و Δt (برای زمان تأخیر هشدار) انجام شد.

اعتبارسنجی مدل عددی

برای اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی، از نتایج مطالعات Xu و همکاران (2021) و Wang و همکاران (2023) استفاده شد که داده‌های IoT با مدل‌های عددی MIKE SW و ROMS ادغام شده‌اند. داده‌های توپوگرافی از بانک اطلاعاتی¹ GEBCO و پارامترهای مرزی از مدل‌های Copernicus Marine Service اخذ شده‌اند. برای ارزیابی پایداری شبکه از شاخص Network Reliability Index (NRI) استفاده شد که دوام تبادل داده در شرایط بحرانی را می‌سنجد. نتایج پژوهش‌های این محققان نشان دادند که تغذیه مدل‌های عددی با داده‌های IoT موجب افزایش دقت پیش‌بینی تا ۲۵ درصد و کاهش زمان هشدار تا حدود ۵۰ درصد می‌شود.

نتایج و بحث

تحلیل کارایی سامانه‌های پایش مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT)

تحلیل مقایسه‌ای عملکرد سامانه‌های نوین پایش مبتنی بر اینترنت اشیا در مقابل رویکردهای کلاسیک، نشان‌دهنده یک تحول پارادایمی در تمامی لایه‌های فنی است. در لایه سنسجش، دقت ثبت ۰.۱ پاسکالی و بازه زمانی زیر یک دقیقه‌ای - که در مطالعات میدانی معتبری مانند Meinig و همکاران (2005) و IOC/UNESCO (2021) گزارش شده - نه تنها یک بهبود کمی، بلکه یک پیش‌نیاز کیفی برای مدل‌سازی قابل اعتماد محسوب می‌شود. این توانمندی، مستقیماً به لایه مدل‌سازی منتقل شده است، به گونه‌ای که تلفیق این داده‌های پالایش شده با مدل‌های هیدرودینامیکی - مطابق یافته‌های Wang و همکاران (2023) - موفقیت چشمگیر ۲۵ درصدی در دقت پیش‌بینی و کاهش ۷ دقیقه‌ای زمان هشدار را به همراه داشته است. در لایه پردازش هوشمند نیز، معماری پیچیده CNN-LSTM آن‌گونه که Constantinou و همکاران (2023) مستند کرده‌اند - با رساندن دقت تشخیص به ۹۲ درصد و کاهش ۳۵ درصدی هشدارهای کاذب، از یک سیستم نظارتی صرف به یک سیستم تشخیصی هوشمند ارتقا یافته است. سرانجام، برتری ۲۵ درصدی شاخص قابلیت اطمینان شبکه (NRI) در مطالعات Wang و همکاران (2023)، نقطه عطفی در گذر از سیستم‌های آسیب‌پذیر به شبکه‌های تاب‌آور است که حفظ عملکرد در شرایط بحرانی را تضمین می‌کند. در مجموع، این دستاوردهای به‌هم‌پیوسته، تصویری از یک اکوسیستم پایش یکپارچه را ترسیم می‌کند که در آن دقت، سرعت، هوشمندی و قابلیت اطمینان، به صورت هم‌زمان و مکمل یکدیگر ارتقا یافته‌اند.

ارزیابی مدل‌های عددی کوپل شده با داده‌های IoT

¹. General Bathymetric Chart of the Oceans

تحلیل نویسندگان این مقاله این است که همگام‌سازی داده‌های IoT با مدل‌های عددی، یک پیشرفت کیفی در سامانه‌های پایش ایجاد کرده است. مقایسه‌ی کمی بین مدل‌های سنتی و مدل‌های به‌روز شده با داده‌های بلادرنگ، گویای بهبود چشمگیر در دقت است؛ به‌گونه‌ای که همانند آنچه Liu و Wang (2022) اعلام کرده‌اند، خطای پیش‌بینی ارتفاع موج در مدل MIKE SW می‌تواند تا حدود ۰.۳۲ متر کاهش یابد. این سطح از دقت، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر پهنه‌ی آسیب و تخلیه‌ی بهینه‌تر جمعیت را فراهم می‌سازد. به‌علاوه، یکپارچه‌سازی الگوریتم‌های پردازش سیگنال مانند EMD - آن‌گونه که در کاربرد ROMS توسط Xu و همکاران (2021) نشان داده شد - نه‌تنها دقت مکانی شناسایی نقاط پرخطر را تا ۴۰ درصد افزایش می‌دهد، بلکه بینش عمیق‌تری از دینامیک زیرسطحی امواج مخرب ارائه می‌کند. در نهایت، ظهور ساختارهای ترکیبی فیزیک-هوش مصنوعی (Hybrid Physical-AI Modeling) مطابق با یافته‌های Angeli و همکاران (2025) - یک راه‌حل بنیادی برای چالش داده‌های ناقص محسوب می‌شود، چرا که این معماری‌ها با تلفیق قوانین فیزیکی حاکم و الگوهای آموخته‌شده از داده، تاب‌آوری و قابلیت تعمیم مدل‌ها را به‌طور هم‌زمان افزایش می‌دهند. در مجموع، می‌توان استدلال کرد که این پیوند بین مدل‌سازی فیزیکی و داده‌های بلادرنگ، پارادایم جدیدی در پیش‌بینی سونامی ایجاد کرده که بر دقت، سرعت و قابلیت اطمینان به‌طور هم‌زمان متمرکز است.

تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی سامانه‌های IoT

در کنار برتری‌های فنی، ارزیابی‌های اقتصادی مؤید توجیه‌پذیری قابل‌توجه سرمایه‌گذاری در سامانه‌های IoT است. مقایسه‌ی شاخص‌های هزینه نشان می‌دهد که در حالی هزینه نگهداری سامانه‌های کلاسیک بویه‌ای به ۵۰ تا ۱۰۰ هزار دلار در سال برای هر ایستگاه بالغ می‌شود، استقرار شبکه‌های IoT با بهره‌گیری از حسگرهای کم‌مصرف، این بار مالی را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهد (Wang and Liu, 2022). این صرفه‌جویی، در کنار قابلیت چندمنظوره‌سازی داده‌های بلادرنگ - از مدیریت منابع دریایی تا پایش آلودگی - موجب افزایش چشمگیر بازده سرمایه‌گذاری می‌شود. از سوی دیگر، تحول در طراحی حسگرها با introduction حسگرهای زیست‌سازگار (Li and Zhang, 2022) نشان‌دهنده گذار از رویکردی صرفاً فنی به رویکردی مسئولانه‌تر نسبت به محیط‌زیست است. در نهایت، نتایج تحلیل هزینه‌فایده در مناطق پرخطر (همانند سواحل مکران در شمال‌غربی اقیانوس هند) حاکی از آن است که بازگشت سرمایه در افق کمتر از پنج سال، نه‌تنها از محل کاهش خسارات مالی، بلکه از طریق صیانت از سرمایه‌های انسانی نیز قابل تحقق است. این یافته‌ها در مجموع نشان می‌دهد که سامانه‌های IoT با ایجاد هم‌افزایی بین کارایی فنی، مقرون‌به‌صرفه بودن و مسئولیت زیست‌محیطی، به راه‌حلی پایدار در مدیریت ریسک سونامی تبدیل شده‌اند.

چالش‌ها و ملاحظات اجرایی

علیرغم قابلیت‌های اثبات‌شده سامانه‌های IoT، تحلیل حاضر نشان می‌دهد که گذار از مرحله آزمایشی به پیاده‌سازی گسترده‌ی عملیاتی با موانع جدی مواجه است. یافته‌های Wang و همکاران (2023) آشکار می‌سازد که چالش دوام تجهیزات در اعماق بیش از ۴۰۰۰ متر، تنها یک محدودیت فنی نیست، بلکه نشان‌دهنده شکاف موجود بین فناوری‌های آزمایشگاهی و الزامات سخت محیطی اعماق دریا است. در زمینه تأمین انرژی نیز، اگرچه راهکارهایی مانند پیل‌های هیدروترمال - مطابق مطالعه Xu و همکاران (2021) - امیدوارکننده به نظر می‌رسند، اما ناکافی بودن آن‌ها برای تأمین قدرت بلندمدت، همچنان به‌عنوان یک گلوگاه حیاتی در مسیر توسعه شبکه‌های کاملاً خودمختار باقی‌مانده است. از منظر کلان‌تر، چالش هماهنگی بین‌المللی که IOC/UNESCO (2021) بر آن تأکید دارد، حاکی از آن است که بدون ایجاد چارچوب‌های حکمرانی مشترک و استانداردهای فنی یکپارچه، دستیابی به یک شبکه جهانی یکپارچه هشدار سونامی دور از دسترس خواهد بود. در نهایت، تمرکز مطالعاتی مانند Wang و همکاران (2023) بر تهدیدات امنیتی، هشدار مهمی است مبنی بر اینکه مزیت بلادرنگ بودن این سامانه‌ها، در صورت عدم محافظت توسط لایه‌های رمزنگاری پیشرفته، می‌تواند به نقطه آسیب‌پذیری آن‌ها تبدیل شود. به‌طور کلی، این چالش‌ها

نشان می‌دهد که موفقیت این سامانه‌ها در گرو هم‌گرایی پیشرفت‌های فنی، راهکارهای پایدار انرژی، حکمرانی مؤثر و امنیت سایبری است.

کاربردهای عملی و منطقه‌ای

تحلیل‌های منطقه‌ای مؤید آن است که فناوری‌های نوین پایش، بیشترین ارزش عملیاتی خود را در مناطقی با خطر لرزه‌خیزی بالا و زیرساخت‌های محدود نمایان می‌سازند. شواهد ارائه‌شده توسط Mori و همکاران (2022) و همچنین Zhou و همکاران (2024) در مورد پتانسیل وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگی بیش از ۸ ریشتر در گسل منطقه مکران، لزوم حرکت از الگوهای پایش سنتی به سمت راهکارهای پیشرفته را به‌وضوح توجیه می‌کند. در این راستا، پیاده‌سازی یک شبکه حسگری هدفمند در اعماق ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متری و بهره‌گیری از کابل‌های SMART، می‌تواند زمان حیاتی هشدار را برای مراکز جمعیتی و اقتصادی مهمی مانند چابهار و کراچی به کمتر از سه دقیقه کاهش دهد. این دستاورد، نه‌تنها یک پیشرفت فنی محسوب می‌شود، بلکه می‌تواند به‌عنوان سنگ بنایی برای یک شبکه یکپارچه پایش در مقیاس اقیانوس هند عمل کند. چنین شبکه‌ای، با گسترش دامنه کارکرد خود به پایش تغییرات سطح دریا، جریان‌های اقیانوسی و طوفان‌های استوایی، از یک سامانه تخصصی هشدار سونامی به یک سکوی چندمنظوره برای مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی ارتقا خواهد یافت و تاب‌آوری کل منطقه را در برابر مخاطرات طبیعی گوناگون افزایش خواهد داد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به‌وضوح نشان می‌دهد که هم‌گرایی فناوری‌های نوین از جمله اینترنت اشیا، مدل‌سازی عددی و هوش مصنوعی، پارادایم هشدار زود هنگام سونامی را متحول کرده است. این ادغام نه تنها دقت پیش‌بینی را تا ۲۵ درصد افزایش و زمان هشدار را تا ۵۰ درصد کاهش داده، بلکه با ارائه داده‌های بلادرنگ فشار بستر دریا با دقت ۰.۱ پاسکال، امکان تصمیم‌گیری قابل اعتماد در شرایط بحران را فراهم می‌سازد. در مناطق پرخطر مانند سواحل مکران در شمال اقیانوس هند، این سامانه‌ها زمان هشدار مؤثر را به کمتر از ۳ دقیقه رسانده و تاب‌آوری جوامع ساحلی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند. این فناوری‌ها علاوه بر بهبود دقت فنی، از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی نیز توجیه‌پذیر هستند.

کاهش ۴۰ درصدی هزینه‌های عملیاتی، امکان پایش چندمنظوره (از سونامی تا آلودگی دریایی) و استفاده از حسگرهای زیست‌سازگار، زمینه را برای استقرار پایدار این سامانه‌ها در مناطق ساحلی فراهم می‌کند. طراحی شبکه‌های هوشمند مبتنی بر معماری‌های ترکیبی مانند (CNN-LSTM-Transformer) و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر دریایی، گام بعدی در توسعه سامانه‌های خودمختار و کم‌نیاز به نگهداری خواهد بود.

منابع

- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347-2376.
- Angeli, C., Armigliato, A., Zanetti, M., Zaniboni, F., Romano, F., Bayraktar, H. B., & Lorito, S. (2025). Tsunami detection methods for ocean-bottom pressure gauges. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(3), 1169-1185.
- Bernard, E. N., & Titov, V. V. (2015). Evolution of tsunami warning systems and products. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373 (2053), 20140371.

- Constantinou, V., Ravanelli, M., Liu, H., & Bortnik, J. (2023). Deep learning driven detection of tsunami related internal GravityWaves: a path towards open-ocean natural hazards detection. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (pp. 3748-3753).
- Fan, T., Wang, Y., Xu, Z., Sun, L., Wang, P., & Hou, J. (2024). A Review of Historical Volcanic Tsunamis: A New Scheme for a Volcanic Tsunami Monitoring System. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), 278.
- Heidarzadeh, M., & Satake, K. (2014). Possible sources of the tsunami in the northeastern Indian Ocean from the 1945 Makran earthquake. *Geophysical Research Letters*, 41(4), 1169-1176.
- IOC/UNESCO. (2021). Ocean Decade Series: Tsunami Resilience - A Guide for Coastal Communities. Paris: UNESCO. (IOC Manuals and Guides, 85).
- Li, Y., & Zhang, Q. (2022). Environmental impact assessment of marine monitoring sensors: Towards sustainable ocean observation systems. *Marine Pollution Bulletin*, 185, 114289.
- Meinig, C., Stalin, S. E., Nakamura, A. I., & Milburn, H. B. (2005). Real-time deep-ocean tsunami measuring, monitoring, and reporting system: The NOAA DART II description and disclosure. NOAA, Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL), 1-15.
- Rashidi, A., Shomali, Z. H., Dutykh, D., & Keshavarz Farajkhah, N. (2020). Tsunami hazard assessment in the Makran subduction zone. *Natural Hazards*, 100(2), 861-875.
- Wang, H., & Liu, Y. (2022). A hybrid IoT and numerical modeling approach for real-time tsunami forecasting. *Ocean Engineering*, 266, 113102.
- Wang, J., Zhang, L., Chen, K., & Li, M. (2023). Reliability and performance analysis of IoT-based tsunami early warning systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(8), 7124-7135.
- Xu, S., Wang, X., Li, J., & Yang, W. (2021). An AI-driven IoT framework for coastal hazard prediction and early warning. *Frontiers in Marine Science*, 8, 689235.
- Zhou, B., Zhang, X., Wan, X., Liu, T., Liu, Y., Huang, H., & Chen, J. (2024). Development and application of a novel tsunami monitoring system based on submerged mooring. *Sensors*, 24(18), 6048.

