

Comprehensive model of operations management in ports using artificial intelligence

Latifeh Pourmohammad Bagher¹  

1. Assistant Professor, Department of Mathematics, Statistics and Computer Science, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran. Email: l_pmb@atu.ac.ir

ARTICLE INFO

Abstract

Article type:
Research Paper

Article history:
Submission Date: April 4, 2025
Revision Date: July 4, 2025
Acceptance Date: September 5, 2025
Publication Date: December 24, 2025

Keywords:
Artificial Intelligence
Smart Ports
Smart Management Port
Operations Optimization
Smart Shipping

In the present era, smart ports play a key role in increasing their productivity, sustainability, and security. Today, many countries are trying to move towards smart ports and create regional central ports with the emergence of fifth-generation technologies and technological advances, the use of algorithms and methods based on artificial intelligence, and inspiration from successful port examples in the world. In this way, they are trying to accelerate their economic growth by developing new service markets and creating digital transformation in the maritime and port industry. This research examines the capacities of artificial intelligence in improving the performance of Iranian ports and presents a model for simulating processes and operations in ports by applying artificial intelligence in logistics management, ships, maintenance, and technical management of port infrastructure. By studying related articles and examining smart ports around the world, as well as identifying opportunities and challenges, this research examines the solutions offered for optimizing cargo flow and tracking, demand forecasting and transportation planning, optimizing berth allocation, automated berth management and reducing ship downtime, as well as document management and port operations coordination. Implementing AI-based solutions in Iranian ports can increase productivity and sustainability and strengthen Iran's position as an important maritime transportation hub. These developments will help facilitate trade relations and strengthen Iran's economic diplomacy by improving logistics processes and reducing costs.

How to cite: Pourmohammad Bagher, L. (2025). Comprehensive model of operations management in ports using artificial intelligence. *Geography and Regional Planning*, 15 (61), 420-438.
<https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.572599.4410>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights
DOI: <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.572599.4410>

Publisher: Qeshm Institute of Higher Education

Introduction

The increasing adoption of artificial intelligence (AI) technologies in port operations presents a significant opportunity to enhance logistics efficiency, transparency, and productivity. As evidenced by successful ports like Shanghai, AI applications in areas such as quay allocation, yard optimization, and landside operations can substantially improve terminal performance. However, the approaches to implementing these smart technologies vary across ports, creating challenges in achieving integrated and systematic digitalization. This situation underscores a critical research problem: identifying and selecting the most appropriate AI-driven solutions to address specific operational challenges—such as improving efficiency, security, or supply chain management—in a way that fosters stakeholder engagement and facilitates the broader digital transformation of ports. For nations with strategic maritime ambitions, particularly Iran, effectively leveraging AI is not merely an operational upgrade but a crucial step toward strengthening economic growth and securing a competitive position in global trade.

Methodology

Based on a review of relevant literature and an examination of smart ports worldwide, this research aims to identify and analyze the key opportunities and challenges associated with implementing AI in port operations. The study employs a multi-method research approach. It begins with a systematic review of academic and industry publications to establish a theoretical foundation and identify current applications and gaps. Subsequently, a comparative case study analysis of leading smart ports (e.g., Shanghai, Singapore) is conducted to extract best practices and contextual success factors. Finally, the research will synthesize these findings to develop and propose a structured framework of actionable strategies. These strategies are designed to guide stakeholders—particularly in emerging maritime economies like Iran—in selecting and deploying appropriate AI solutions to overcome specific operational

challenges, thereby facilitating effective digital integration and enhancing overall port competitiveness.

Results and Discussion

This comprehensive review of AI applications in smart ports reveals significant advancements and diverse solutions across port operations. The findings demonstrate that AI is fundamentally transforming maritime logistics, with successful implementations in leading global ports like Shanghai and Rotterdam serving as benchmarks. Key application areas include intelligent vessel traffic management and route optimization, where AI algorithms leverage real-time data on weather, currents, and traffic to enhance safety and fuel efficiency. Autonomous technologies are prominent, encompassing not only self-driving vehicles (AGVs) and Automated Stacking Cranes (ASCs) in container yards but also the progressive development of autonomous ships, which promise to reduce human error and operational costs.

At the quayside, AI-driven optimization addresses complex problems in berth allocation and quay crane scheduling, significantly improving vessel turnaround times. In the yard, smart stacking algorithms optimize container placement to minimize reshuffling. Furthermore, the digitalization extends to administrative and strategic domains through Port Community Systems (PCS) for document management, AI-powered predictive analytics for security and maintenance, and smart energy management integrating renewable sources. The economic and diplomatic implications are substantial, with smart port infrastructure acting as a catalyst for national trade competitiveness and enabling more efficient international logistics coordination.

The technological implementation relies on a suite of AI methodologies. Machine Learning, particularly ensemble methods and neural networks, is used for predictive tasks like forecasting delays or energy patterns. For complex combinatorial optimization problems—such as scheduling and resource allocation—heuristic and metaheuristic algorithms like Genetic Algorithms (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), and Variable Neighborhood Search (VNS) are

extensively applied to find near-optimal solutions within feasible timeframes. The synthesis of these applications indicates that a successful smart port model is an integrated system. The proposed 13-layer model encapsulates this, spanning from core physical operations (smart berthing, yard management) to supporting layers (smart energy, security, economy, and diplomacy), all harmonized by AI and real-time data analytics. The overarching finding is that AI adoption in ports is not a singular intervention but a holistic digital transformation that drives efficiency, safety, sustainability, and economic growth.

Conclusion

The present research aimed to investigate the role of artificial intelligence in Iran's maritime industry and to provide a comprehensive model for port smartification. The findings of this study indicate that port smartification using AI is an undeniable necessity for enhancing productivity and competitiveness in the maritime sector. The proposed model of this research, comprising thirteen components, offers an integrated and systematic approach to managing port operations. This model, by leveraging advanced AI algorithms and data analytics, enables the optimization of all port processes. The implementation of this model can lead to a significant reduction in operational costs, increased safety, decreased human error,

improved operational efficiency and speed, and a diminished environmental footprint. Furthermore, the model facilitates optimal resource management and enhanced transparency in processes by creating integration among all operational sections of the port. Despite challenges such as high initial implementation costs, the need for advanced technical infrastructure, and the necessity of training specialized human resources, the long-term benefits of this model can justify investment in this domain. For the successful implementation of this model, it is suggested that Iranian ports adopt a gradual and phased approach. This includes targeted investment in smart infrastructure, collaboration with leading ports for knowledge transfer, development of specialized human capital, and the establishment of necessary legal frameworks and standards. Implementing this model can play a significant role in strengthening Iran's position as a key maritime transportation hub in the region and contribute to facilitating trade relations and reinforcing the country's economic diplomacy.

Ultimately, success in smartifying Iran's ports requires long-term commitment, precise planning, and the collaboration of all stakeholders. The proposed model of this research can serve as a roadmap for this digital transformation and pave the way towards the smart ports of the future.

Ethical considerations

Following the principles of research ethics

The authors have observed the principles of ethics in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

First author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and

interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Ethical Considerations

The authors affirm that they have adhered to ethical research practices, avoiding plagiarism, misconduct, data fabrication or falsification, and have provided their consent for this article's publication.

Funding

This research was conducted without any financial support from Payam Noor University.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



انجمن ژئوپلیتیک ایران

فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای

شاپا چاپی: ۶۴۶۲-۲۲۲۸ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۲۱۱۲

Homepage: <https://www.jgeoqeshm.ir/>



مدل جامع مدیریت عملیات در بنادر با استفاده از هوش مصنوعی

لطیفه پورمحمدباقر^۱

۱. عضو هیات علمی، دانشکده آمار ریاضی و رایانه، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران. رایانامه: l_pmb@atu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳ کلیدواژه‌ها: هوش مصنوعی بنادر هوشمند مدیریت هوشمند بهینه سازی عملیات بنادر کشتیرانی هوشمند	در عصر حاضر هوشمندسازی بنادر، نقشی کلیدی در افزایش بهره‌وری، پایداری و امنیت آن‌ها ایفا می‌کند. امروزه بسیاری از کشورها در تلاش‌اند با ظهور فناوری‌های نسل پنجم و پیشرفت‌های تکنولوژیک، بکارگیری الگوریتم‌ها و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و الهام از نمونه‌های موفق بنادر در جهان، به سمت هوشمندسازی حرکت کنند و بنادر مرکزی منطقه‌ای ایجاد کنند. از این طریق در تلاشند رشد اقتصادی خود را با توسعه بازارهای خدماتی نوین تسریع کنند و تحول دیجیتال را در صنعت دریایی و بندری ایجاد کنند. این پژوهش به بررسی ظرفیت‌های هوش مصنوعی در بهبود عملکرد بنادر ایران می‌پردازد و مدلی جهت شبیه سازی فرآیندها و عملیات در بنادر با بکارگیری هوش مصنوعی در مدیریت لجستیک، کشتی‌ها، نگهداری و مدیریت فنی زیرساخت‌های بنادر ارائه می‌دهد. با مطالعه مقالات مرتبط و بررسی بنادر هوشمند جهان، همچنین با شناسایی فرصت‌ها و چالش‌ها، این پژوهش به بررسی راهکارهای ارائه شده برای بهینه‌سازی جریان بار و ردیابی محموله‌ها، پیش‌بینی تقاضا و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، بهینه‌سازی تخصیص اسکله‌ها، مدیریت خودکار پهلوگیری و کاهش زمان توقف کشتی‌ها، همچنین مدیریت اسناد و هماهنگی عملیات بنادر می‌پردازد. پیاده‌سازی راهکارهای مبتنی بر هوش مصنوعی در بنادر ایران می‌تواند بهره‌وری و پایداری را افزایش دهد و جایگاه ایران را به عنوان یک مرکز مهم حمل‌ونقل دریایی تقویت کند. این تحولات به تسهیل روابط تجاری و تقویت دیپلماسی اقتصادی ایران از طریق بهبود فرآیندهای لجستیک و کاهش هزینه‌ها کمک خواهد کرد.

استناد: پورمحمدباقر، لطیفه. (۱۴۰۴). مدل جامع مدیریت عملیات در بنادر با استفاده از هوش مصنوعی. *جغرافیا و برنامه‌ریزی منطقه‌ای*، ۱۵ (۶۱)، ۴۳۸-۴۲۰.

DOI: 10.22034/jgeoq.2026.572599.4410



© نویسندگان.

ناشر: موسسه آموزش عالی قشم

۱. مقدمه

بنادر به عنوان مراکز اصلی در زنجیره لجستیک با استفاده از فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی می‌توانند عملیات لجستیکی را ساده‌تر، شفاف‌تر و کارآمدتر کنند. این امر که برای شرکت‌های کشتیرانی، مقامات محلی، شرکت‌های حمل‌ونقل، کارکنان پایانه‌ها و گمرک‌ها بسیار مفید است باعث بهبود بهره‌وری و کارایی در روابط سیستماتیک می‌شود. (D'Amico, Szopik-Depczyńska et al. 2021, Elnabawi 2023). در دهه گذشته، علاقه به کاربردهای هوش مصنوعی در بخش‌های دریایی و انرژی، به ویژه در کاربردهای شبکه‌های هوشمند، به سرعت رشد کرده است (Irmirina Durlik 2024). چرا که پلتفرم‌های هوش مصنوعی در استدلال، حل مسئله و تصمیم‌گیری مهارت دارند و در فرآیندهایی مانند مدیریت بار، چارچوب‌های ناوبری و روش‌های نگهداری تأثیرگذار هستند (Elnabawi 2023). بنادر مختلف در استفاده از فناوری‌های نوین، رویکردهای متفاوتی دارند. به همین دلیل، برای ایجاد یکپارچگی در روند هوشمند سازی بنادر، اقداماتی مانند اتصال اولیه ذینفعان و همکاری بین بنادر ضروری است (Jović, Kavran et al. 2019).

در یک ترمینال کانتینری، سه منطقه قابل تشخیص وجود دارد (اسکله، محوطه کانتینری و مناطق زمینی) که در هر یک از آن‌ها مسائل پیچیده بهینه‌سازی مختلفی وجود دارد. به عنوان مثال، تخصیص اسکله یا برنامه‌ریزی بارچینی به منطقه اسکله مربوط می‌شوند؛ مسئله بازاریابی یا بهینه‌سازی حمل‌ونقل به محوطه کانتینری مربوط است؛ و برنامه‌ریزی و زمان‌بندی عملیات پس‌کرانه‌ای مربوط به قطارها و کامیون‌ها به منطقه زمینی مرتبط است (Pham 2023 و Mario Rodriguez-Molins 2012). پیاده‌سازی یک راه‌حل مناسب مبتنی بر هوش مصنوعی در مناطق بندری می‌تواند سطح دیجیتالی شدن را برای ذینفعان بندر افزایش دهد. با انتخاب فناوری هوش مصنوعی مناسب برای رفع چالش‌های خاص مانند بهبود کارایی عملیاتی، ارتقای امنیت یا بهینه‌سازی مدیریت زنجیره تأمین، ذینفعان بندر می‌توانند درک بهتری از پتانسیل فناوری‌های دیجیتال پیدا کنند و راحت‌تر از این نوع فناوری‌ها استفاده کنند (Farzadmehr, Carlan et al. 2023).

۲. کاربردهای هوش مصنوعی در بنادر هوشمند

با به پایان رسیدن سال ۲۰۲۴ بندر شانگهای برای اولین بار توانست حجم بار سالانه خود را به بیش از ۵۰ میلیون کانتینر در سال برساند و یک رکورد جهانی جدید در تاریخ حمل و نقل کانتینری بندری ثبت کنند. یکی از عوامل رسیدن توانایی پردازش این حجم بالای بار، استفاده از هوش مصنوعی و خودکارسازی فرایندهای بندری است (SIPG 2024). امروزه بسیاری از کشورها در تلاش‌اند با الهام از نمونه‌های موفق بنادر همچون سنگاپور، چین، آلمان، هنگ‌کنگ و امارات متحده عربی، بنادر مرکزی منطقه‌ای ایجاد کنند و از این طریق، رشد اقتصادی خود را با توسعه بازارهای خدماتی نوین تسریع کنند (Munim and Schramm 2018). کشورهایی با حمل‌ونقل دریایی قوی قادر به بهره‌برداری از فرصت‌های بیشتری برای تقویت رشد اقتصادی خود هستند، چرا که دسترسی به بازارهای جهانی و تسهیل تجارت را فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، کشورهای با حمل‌ونقل دریایی ضعیف با تهدیدات بیشتری مواجه هستند که ممکن است رشد اقتصادی آن‌ها را تحت تأثیر منفی قرار دهد، زیرا وابستگی آن‌ها به سیستم‌های حمل‌ونقل دیگر (مانند حمل‌ونقل جاده‌ای یا ریلی) می‌تواند محدودیت‌های قابل توجهی ایجاد کند (Akbulaev and Bayramli 2020). در نهایت، برای ایران نیز ضروری است که به‌عنوان یکی از کشورهای کلیدی در حوزه بنادر و حمل و نقل دریایی، در راستای پیشرفت و توسعه اقتصادی خود پیشرو شود. یکی از راه‌های موثر برای دستیابی به این هدف، بهره‌برداری از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی است. بنابراین، ایران باید به‌طور جدی بر توسعه و استفاده از این فناوری‌ها تمرکز کند تا علاوه بر تقویت حمل‌ونقل دریایی و رشد اقتصادی، موقعیت رقابتی خود را در سطح جهانی ارتقاء دهد و از مزایای هوش مصنوعی برای بهره‌برداری از منابع دریایی و توسعه پایدار استفاده کند.

۳. هوشمند سازی پیشی بینی در بنادر

۱.۳. داده‌های حوادث ترافیک

حوادث دریایی و نیاز به عملیات جستجو و نجات^۱ همواره از چالش‌های بزرگ در حوزه حمل‌ونقل دریایی بوده‌اند. با افزایش حجم تجارت دریایی و گسترش مناطق تحت پوشش، کارایی عملیات نجات در مناطق دورافتاده و جزایر به‌ویژه در موارد اضطراری، به مسئله مهمی تبدیل شده است. بنابراین هنگام وقوع حادثه در مناطق دور از ساحل، توزیع منابع نجات زمان‌بر است. در این راستا، تخصیص بهینه منابع

^۱ Search and Rescue (SAR)

جستجو و نجات می‌تواند زمان جستجو را کاهش داده و کارایی عملیات نجات را افزایش دهد (Munim, Dushenko et al. 2020).

۲.۳. نظارت

در حالی که نظارت مبتنی بر ماهواره قابلیت نظارت مقرون به صرفه‌ای را بر روی مناطق بسیار وسیع فراهم می‌کند، خدمات هواپیماهای بدون سرنشین^۱ اطلاعات زنده و با وضوح بسیار بالا را بر روی مسافت‌های طولانی همراه با قابلیت ماندن در محل در صورت وقوع یک رویداد خاص در دریا (جستجو و نجات، شناسایی، تحقیقات و غیره) فراهم می‌کند. این اطلاعات منحصر به فرد به طور قابل توجهی تصویر دریایی را بهبود می‌بخشد و اطلاعات مورد نیاز را فراهم می‌کند (EMSA 2022 - 2024).

۳.۳. استفاده از دیتابیس‌های پیشرفته و سیستم‌های اطلاعاتی دریایی

آژانس ایمنی دریایی اروپا^۲ دیتابیس‌هایی را برای افزایش ایمنی و بهره‌وری حمل‌ونقل دریایی توسعه داده و پشتیبانی و میزبانی می‌کند. هر یک از این دیتابیس‌ها کاربردها و اهداف خاص خود را دارند. برای مثال می‌توان به EMCIP, theMEDDB, THETIS, ... اشاره کرد. EMCIP برای جمع‌آوری و تحلیل اطلاعات مربوط به حوادث و تصادفات دریایی طراحی شده و هدف آن افزایش ایمنی دریایی و جلوگیری از وقوع حوادث مشابه است. TheMEDDB به عنوان مرجع مرکزی برای اطلاعات مربوط به تجهیزات دریایی تایید شده عمل می‌کند و استانداردها و تأییدیه‌های تجهیزات دریایی را فراهم می‌کند. THETIS و مازول‌های آن یک سیستم اطلاعاتی است که برای پشتیبانی از نظارت بر کشتی‌ها و اعمال قوانین بین‌المللی دریایی استفاده می‌شود، با مازول‌هایی که شامل سیستم‌های نظارت بر آلودگی، ایمنی کشتی‌ها و انطباق با قوانین زیست‌محیطی می‌شوند. این دیتابیس‌ها به EMSA و نهادهای دریایی کمک می‌کنند تا اطلاعات حیاتی مربوط به ایمنی، تجهیزات و رعایت قوانین دریایی را جمع‌آوری، تحلیل و مدیریت کنند و به بهبود ایمنی و کارایی عملیات دریایی در اروپا کمک می‌کنند. (EMSA 2022 - 2024) (EMSA 2025).

۴.۳. مدیریت هوشمند مسیرهای حمل و نقل دریایی

الگوریتم‌های هوش مصنوعی با تحلیل و پردازش حجم وسیعی از داده‌ها، نقشی کلیدی در بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل دریایی ایفا می‌کنند و به طور قابل توجهی ایمنی و کارایی عملیات دریایی را ارتقا می‌بخشند. این الگوریتم‌ها با استفاده از داده‌های متنوعی نظیر الگوهای لحظه‌ای آب‌وهوا، جریان‌های اقیانوسی، ترافیک زنده کشتی‌ها و مسیرهای ناوبری تاریخی، امکان شناسایی بهینه‌ترین و ایمن‌ترین مسیرهای دریایی را برای کشتی‌ها فراهم می‌آورند. علاوه بر این، با به‌روزرسانی مداوم مسیرها بر اساس داده‌های جدید، هوش مصنوعی به کشتی‌ها کمک می‌کند تا از شرایط پرخطر نظیر وضعیت‌های جوی نامساعد، مناطق پرترافیک و موانع ناوبری اجتناب کنند. این قابلیت‌ها نه تنها منجر به بهبود فرایند انتخاب مسیرها و بنادر می‌شود، بلکه دقت پیش‌بینی زمان رسیدن به بندر^۳ را نیز بهبود می‌بخشد و موجب افزایش کارایی کل سیستم حمل‌ونقل دریایی می‌گردد (Durlík, Miller et al. 2024).

هوش مصنوعی با خودکارسازی و بهینه‌سازی عملیات در صنعت کشتیرانی، به‌ویژه در زمینه مصرف سوخت، می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد. مطالعه‌ای نشان می‌دهد که ۴۸ درصد از ناوگان کشتی‌های کانتینری با تأخیر حداقل ۱۲ ساعته در رسیدن به بنادر مواجه هستند، که این امر منجر به افزایش قابل توجه مصرف سوخت و کاهش بهره‌وری در استفاده از منابع ترمینال می‌گردد. سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته در مسیریابی بهینه، قادر به کاهش چشمگیر این تأخیرها و به تبع آن، کاهش مصرف سوخت و هزینه‌های عملیاتی می‌باشند. این بهینه‌سازی نه تنها از منظر اقتصادی حائز اهمیت است، بلکه در راستای کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت کشتیرانی نیز گامی مؤثر محسوب می‌شود (Yau, Peng et al. 2020).

۵.۳. مدیریت هوشمند کشتی‌های خودران

پیشرفت‌های سریع در فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، داده‌های کلان و اینترنت اشیا، امکان توسعه کشتی‌های هوشمند را فراهم کرده است. به طور کلی، چهار نوع کشتی خودران وجود دارد (Munim 2019):

¹ Remotely Piloted Aircraft Systems Services

² European Maritime Safety Agency

³ Estimated Time of Arrival (ETA)

(۱) کشتی‌های سنتی با سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری خودکار: این کشتی‌ها به سیستم‌های پیشرفته‌ای مانند سیستم جلوگیری از تصادف مجهز هستند که به اپراتورهای انسانی در فرآیندهای ناوبری و تصمیم‌گیری کمک می‌کند.

(۲) کشتی‌های دوره‌ای خودران: این کشتی‌ها تحت شرایط خاصی مانند شب، دریاها یا آب‌وهوای مطلوب به‌صورت خودکار عمل می‌کنند.

(۳) کشتی‌های کاملاً خودران با امکان حضور خدمه برای عملیات در بندر: این کشتی‌ها در طول مسیر به‌صورت خودران عمل می‌کنند، اما امکاناتی برای حضور خدمه جهت مدیریت ورود و خروج از بندر دارند.

(۴) کشتی‌های کاملاً خودران بدون امکانات برای خدمه: این کشتی‌ها کاملاً بدون خدمه و به‌طور کامل بر اساس اتوماسیون پیشرفته و مدیریت از راه دور فعالیت می‌کنند.

یکی از معیارهای مهم برای کشتی‌های خودران این است که آن‌ها باید حداقل به اندازه پیشرفته‌ترین کشتی‌های با خدمه، ایمن باشند (de Vos, Hekkenberg et al. 2021). افزایش ایمنی در ناوبری و بهبود کارایی کشتی‌ها از طریق نظارت لحظه‌ای، ناوبری خودکار و جلوگیری از تصادفات به‌صورت هوشمند با استفاده از حسگرها، رادارها و دستگاه‌های ارتباطی روی کشتی‌ها قابل اجرا هستند (Xiao, Wang et al. 2024). علاوه بر این، کشتی‌های خودران که به‌طور عمده از هوش مصنوعی برای ناوبری، اجتناب از تصادفات و مدیریت عملیات استفاده می‌کنند، قادر به عملکرد با حداقل مداخله انسانی هستند که این امر به‌طور چشمگیری خطر اشتباهات انسانی را کاهش داده و ایمنی را افزایش می‌دهد. (Durlík, Miller et al. 2024)

بررسی حوادث دریایی طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ نشان می‌دهد که بیشترین خسارات و تلفات جانی مربوط به حوادثی است که در آن کشتی دچار ورود آب (غرق شدن یا برخورد) یا آتش‌سوزی شده است. همچنین، کشتی‌های کوچک‌تر از ۱۲۰ متر بیشترین سهم را در تعداد کشتی‌های از دست‌رفته و جان‌های از دست‌رفته دارند. در مورد کشتی‌های خودران، بیشترین تأثیر مثبت بر ایمنی مربوط به کشتی‌های باری کوچک است. این کشتی‌ها به دلیل نیاز به هزینه کمتر برای خودکارسازی و بالا بودن نسبت خدمه به هزینه عملیاتی، از راحت‌ترین گزینه‌ها برای تبدیل شدن به کشتی‌های بدون خدمه هستند (de Vos, Hekkenberg et al. 2021). سناریوهای مختلف نشان می‌دهند که کشتی‌های خودران می‌توانند ایمنی دریایی را از دو طریق کاهش تعداد خدمه (در نتیجه کاهش تلفات جانی در حوادث) و کاهش حوادث مرتبط با ناوبری، مانند برخوردها و به گل نشستن افزایش دهند (de Vos, Hekkenberg et al. 2021). این کشتی‌ها می‌توانند مسیرها و عملیات خود را بر اساس داده‌های لحظه‌ای به‌طور مداوم بهینه‌سازی کنند که نتیجه آن صرفه‌جویی چشمگیر در سوخت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است (Durlík, Miller et al. 2024).

۶.۳. هوشمند سازی اسکله

۱.۶.۳. مدیریت هوشمند تخصیص جرثقیل‌های اسکله

برای پاسخگویی به جریان کانتینری فزاینده ورودی و خروجی بنادر، دو عامل حائز اهمیت هستند: جرثقیل‌های اسکله و تخصیص اسکله. جرثقیل‌های اسکله نقش حیاتی در بارگیری و تخلیه سریع کانتینرها دارند و تخصیص مناسب اسکله‌ها باعث کاهش تأخیر و افزایش بهره‌وری می‌شود. توجه به این دو نکته، مدیریت بهینه فرایندهای بندری را تضمین می‌کند. همانطور که اشاره شد، اختصاص جرثقیل‌های اسکله برای جابه‌جایی کانتینرها از چالش‌های بزرگ مدیریت بنادر است. این مشکل شامل تخصیص جرثقیل‌ها به نواحی مختلف کشتی‌ها به گونه‌ای است که عملیات بارگیری و تخلیه بهینه و بدون تأخیر انجام شود. مشکلاتی مانند بارگذاری نابرابر جرثقیل‌ها، تأخیر در بارگیری و تخلیه و هزینه‌های اضافی از جمله چالش‌های این مسأله هستند که با به‌کارگیری الگوریتم‌ها و روش‌های مختص هوش مصنوعی می‌توان از سد این چالش‌ها عبور کرد.

۲.۶.۳. هوشمند سازی تخصیص اسکله

زمانی که کشتی‌های کانتینری به مرور زمان وارد بنادر می‌شوند، اپراتورهای ترمینال به دنبال اختصاص اسکله‌ها هستند تا کشتی‌ها در اسرع وقت سرویس‌دهی شوند و بندر را ترک کنند. شرکت‌های حمل و نقل دو هدف مهم دارند: (الف) به حداقل رساندن مصرف سوخت و (ب) حفظ یکپارچگی برنامه خود (به عنوان مثال، به حداقل رساندن تأخیر خروج) (Mihalís M 2009). یکی از روش‌های کاهش مصرف سوخت بهینه‌سازی سرعت حرکت کشتی‌ها بین بنادر است. این بهینه‌سازی با گسسته‌سازی سرعت‌ها و انتخاب سرعت بهینه برای کاهش هزینه‌های سوخت انجام می‌شود. مشابه روشی که در (Giada Venturini 2017) پیاده‌سازی شده است. زمان‌های ورود،

زمان‌های پهلوگیری و موقعیت‌های پهلوگیری برای هر کشتی در هر بندر نیز از اهمیت بالایی برخوردار هستند. این بررسی به تفاوت بین نسخه‌های گسسته و پیوسته مسئله تخصیص اسکله توجه دارد و تعیین زمان ورود کشتی‌ها برای مسئله تخصیص اسکله چندبندری را مورد بررسی قرار می‌دهد. به طور کلی، روش به کاهش هزینه‌های سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند و بهینه‌سازی تصمیمات پهلوگیری را فراهم می‌کند.

۷.۳. هوشمندسازی جرثقیل‌های انبار خودکار^۱

به طور کلی کارایی پایانه‌های کانتینری دریایی به عملیات انبار آن بستگی دارد (ROYSET 2009). امروزه، در سراسر جهان، فرایند اتوماسیون بنادر برای اطمینان یافتن از هزینه عملیاتی کم، در دسترس بودن بالا و استفاده زیاد از ظرفیت محوطه مورد استقبال بیش‌تری قرار می‌گیرد. (Hans Cederqvist 2010)

در محوطه‌های ذخیره‌سازی بنادر سه نوع اصلی از جرثقیل‌ها شامل جرثقیل دروازه‌ای لاستیکی (می‌توانند بین بلوک‌ها حرکت کنند)، جرثقیل‌های دروازه‌ای ریلی (روی ریل‌ها در یک بلوک خاص حرکت می‌کنند و به ندرت بین بلوک‌ها حرکت می‌کنند)، جرثقیل‌های انبار خودکار (روی ریل‌ها در یک بلوک خاص حرکت می‌کنند و کاملاً خودکار هستند) وجود دارند. (ROYSET 2009) بر خلاف جرثقیل دروازه‌ای لاستیکی^۲ که به یک اپراتور انسانی نیاز دارند، تمامی حرکات جرثقیل انبار خودکار در محوطه، بالاتر از ارتفاع معینی بر روی خطوط مسیر کاملاً به صورت خودکار انجام می‌شود. به طوری که هر ۴ تا ۶ جرثقیل تنها به یک ناظر نیاز دارد. همچنین با این که جرثقیل‌های انبار خودکار قابلیت حرکات آزادانه را ندارند، اما با حرکات ساده، نگهداری و مرتب‌سازی^۳ می‌توانند به صورت مداوم و کاملاً خودکار به انتقال محموله‌ها مشغول باشند. نرخ اشغال بلوک در اوج فعالیت این جرثقیل‌ها حدود ۸۰ تا ۸۵ درصد است، در حالی که این رقم برای یک جرثقیل دروازه‌ای لاستیکی حدود ۶۵ تا ۷۰ درصد باقی می‌ماند (Hans Cederqvist 2010). مزیت انعطاف‌پذیری جرثقیل دروازه‌ای لاستیکی با این واقعیت جبران می‌شود که جرثقیل انبار خودکار علاوه بر این که می‌تواند نگهداری و مرتب‌سازی خودکار را انجام دهد، زمان چرخه کوتاه‌تری هم دارد و به دلیل سرعت دروازه‌ای بالاتر، می‌تواند سریع‌تر موقعیت خود را تغییر دهد. (Hans Cederqvist 2010).

۸.۳. مدیریت هوشمند خودروهای هدایت‌شونده خودکار^۴

امروزه خودروهای هدایت‌شونده خودکار شامل تکنولوژی‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری هستند. این وسیله نقلیه بدون راننده برای جابجایی خودکار مواد، کالاها و کانتینرها در بنادر و سیستم‌های تولیدی بسیار محبوب می‌باشد و راه‌حل‌های کارآمدتر و انعطاف‌پذیرتری را برای سیستم‌های تولید و حمل‌ونقل ارائه می‌دهند. یکی از مزایای استفاده از این خودروها این است که برخلاف انسان‌ها خسته نمی‌شوند و نیازی به استراحت ندارند. دقت کاری بالاتری دارند و می‌توان آن‌ها را برای انجام کارهای تکراری که می‌تواند منجر به آسیب یا خطرات برای انسان شود، تنظیم کرد. تطبیق‌پذیری بالای این خودروها در محیط‌های مختلف، از جمله محیط‌هایی با شرایط دمایی سخت، همچنین توانایی حمل بارهای سنگین، از ویژگی‌های بارز این دستگاه‌هاست که ریسک آسیب‌دیدگی کارکنان را به حداقل رسانده و ایمنی را افزایش می‌دهد (Rashidi, Matinfar et al. 2021). در نهایت، به کمک هوش مصنوعی، این خودروها می‌توانند عملیات حمل‌ونقل را به صورت هوشمند و بهینه انجام دهند و موجب افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها در بنادر شوند.

۹.۳. انباشت هوشمند

انباشت هوشمند کانتینر در بنادر با بهره‌گیری از داده‌های واقعی و مدیریت بلادرنگ^۵، به بهینه‌سازی محل ذخیره‌سازی کانتینرها می‌پردازد. مسئله انباشت کانتینر^۶ یکی از چالش‌های کلیدی در مدیریت محوطه ترمینال‌های کانتینری است. این مسئله به تخصیص بهینه مکان‌های ذخیره‌سازی کانتینرهای ورودی، شامل کانتینرهای تخلیه‌شده و آماده تحویل، در میان فضاهای خالی موجود می‌پردازد. هدف اصلی این مسئله، به حداقل رساندن جابه‌جایی‌های غیرضروری و افزایش کارایی در عملیات بارگیری و تحویل کانتینرها است. راهکارهای موجود برای حل مسئله انباشت کانتینر به دو دسته اصلی روش‌های بهینه‌سازی و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی تقسیم می‌شوند که هر یک

¹ Automated Stacking Crane (ASC)

² Rubber-Tired Gantry Cranes

³ Housekeeping Moves

⁴ Automated Guided Vehicles (AGVs)

⁵ Real-time

⁶ Container Stacking Problem (CSP)

بسته به نوع مسئله و شرایط کاربردی به کار گرفته می‌شوند. این راهکارها با کاهش هزینه‌های جابه‌جایی، توزیع بهینه بار در محوطه‌ها و کاهش مصرف انرژی، بهره‌وری عملیات بندری را افزایش داده و جایگاه دقیق کانتینرها را تعیین می‌کنند (Gunawardhana, Perera et al. 2021).

۱.۳. مدیریت هوشمند اسناد در بنادر

استفاده از اسناد الکترونیکی به عنوان جایگزینی برای اسناد کاغذی و پیش‌پردازش اسناد از راه‌حل‌هایی است که می‌تواند مدت زمان ماندگاری کالاها را کاهش دهد. در حال حاضر اسناد گمرکی به صورت کاغذی تولید و به اشتراک گذاشته می‌شوند و تنها تعداد کمی از بنادر از ابزارهای مدیریت اسناد اطلاعاتی مانند سیستم اجتماعی بندر^۱ استفاده می‌کنند. سیستم اجتماعی بندر یک پلتفرم الکترونیکی است که سیستم‌های مختلف شرکت‌ها و نهادهای دخیل در فرآیندهای بندر را به هم متصل می‌کند و وظیفه اصلی آن دیجیتالی کردن عملیات بندری است (Caldeirinha, Felício et al. 2020). قبل از دیجیتالی کردن اسناد بنادر، زمان ماندگاری کالاها در بنادر ایتالیا برای واردات بین ۵ تا ۱۲ روز و برای صادرات بین ۴ تا ۵ روز بود. اما پس از دیجیتالی شدن آن، این زمان‌ها به ترتیب به ۳ تا ۶ روز برای واردات و حدود ۲ تا ۳ روز برای صادرات کاهش یافته است. در بنادر شمال اروپا نیز پیش از هوشمندسازی، زمان ماندگاری کالاها برای واردات بین ۳ تا ۷ روز و برای صادرات بین ۲ تا ۴ روز بود، که پس از دیجیتالی شدن به ۱ تا ۳ روز برای واردات و حدود ۱ روز برای صادرات کاهش یافته است (Lupi, Conte et al. 2024). در حال حاضر، سیستم‌های اجتماعی بندر پیشرفته توسط شرکت‌های نوپا و خصوصی جدید با نوآوری‌های پیشرفته ترویج شده‌اند و همراه با توسعه برنامه‌های کاربردی هوش مصنوعی، رباتیک و تحلیل کلان‌داده‌های بندری هستند. این نوآوری‌ها به شفافیت، اتوماسیون و بهینه‌سازی فرآیندها کمک کرده و ارزش افزوده‌ای به زنجیره‌های لجستیک مدرن اضافه می‌کنند. مدیران بندر با استفاده از هوش مصنوعی می‌توانند شبکه‌ای از شرکا ایجاد کنند که به اشتراک‌گذاری اطلاعات کشتی و کالا و همکاری برای اهداف مشترک کمک می‌کند، و در نتیجه عملکرد و کارایی بنادر را بهبود می‌بخشد (Caldeirinha, Felício et al. 2020).

۱.۳. امنیت هوشمند در بنادر و کشتی‌ها

در هوشمندسازی بنادر، با وجود افزایش بهره‌وری، خطرات امنیت سایبری جدیدی ایجاد می‌شود که به دلیل پیچیدگی این سیستم‌ها، نیازمند تدابیر امنیتی قوی‌تر هستند. استفاده از قدرت هوش مصنوعی می‌تواند امنیت را ارتقا داده و حملات احتمالی را پیش‌بینی کند. با این حال، برای کاهش این خطرات، طراحی و اجرای قوانین مناسب و بهره‌گیری از هوش مصنوعی ضروری است تا امنیت این سیستم‌ها تضمین شود (Yau, Peng et al. 2020). استفاده از هوش مصنوعی در مدل پیش‌بینی توقف کشتی‌ها به بهینه‌سازی فرآیند بازرسی کمک می‌کند و از طریق تحلیل داده‌های تاریخی و عوامل مختلف کشتی، شناسایی کشتی‌های با خطر بالا را تسریع می‌کند. این فناوری با توانایی پردازش داده‌های بزرگ و شبیه‌سازی وضعیت‌های مختلف، به افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و بهبود ایمنی دریایی کمک کرده و از بروز خطرات بالقوه جلوگیری می‌کند (Yan, Wang et al. 2021).

۱.۳. مدیریت هوشمند انرژی در بندر

بنادر به عنوان دروازه‌های تجاری کشورها، نقش مهمی در اقتصاد جهانی ایفا می‌کنند. با توجه به اهمیت پایداری محیط زیست و اقتصادی، تأمین انرژی در بنادر به سمت استفاده از منابع پاک و تجدیدپذیر در حرکت است. انرژی خورشیدی و بادی به عنوان گزینه‌های اصلی برای تأمین انرژی بنادر، علاوه بر کاهش هزینه‌های انرژی در بلندمدت، می‌توانند به ایجاد اشتغال و توسعه اقتصادی مناطق نیز کمک کنند. با این حال، برای بهره‌برداری کامل از این منابع، نیاز به سرمایه‌گذاری‌های اولیه و ایجاد زیرساخت‌های مناسب است (Sadiq, Ali et al. 2021). اتحادیه اروپا یکی از پیشگامان جهانی در بخش انرژی، به‌ویژه انرژی تجدیدپذیر است. هدف اصلی سیاست‌های انرژی در این اتحادیه، ترویج استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است (Serban and Lytras 2020). بندر کیتاکوشو و روتردام در ژاپن و هلند به‌عنوان نمونه‌هایی از بنداری هستند که از توربین‌های بادی برای تولید انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌کنند. بندر کیمبلا در استرالیا از انرژی امواج برای تولید برق بهره‌برداری می‌کند. پنل‌های خورشیدی نیز به‌طور گسترده‌ای در بنادر مختلف برای تولید انرژی پاک استفاده می‌شوند. به عنوان مثال در بندر هامبورگ آلمان، پنل‌های خورشیدی بر روی سقف انبارهای بزرگ متعلق به سازمان بندری هامبورگ نصب شده است (Sadiq, Ali et al. 2021). هوش مصنوعی در بخش انرژی به‌ویژه در انرژی تجدیدپذیر بسیار مورد نیاز است، زیرا

¹ Port Community System (PCS)

این بخش با حجم زیادی از داده‌ها و سیستم‌های پیچیده روبه‌رو است. هوش مصنوعی می‌تواند از طریق نظارت، عملیات، نگهداری و ذخیره‌سازی بهتر انرژی تجدیدپذیر، و همچنین انجام عملیات و کنترل به‌موقع سیستم، به بهبود عملکرد این بخش کمک کند.

۱.۳.۳. اقتصاد هوشمند در بنادر

حمل‌ونقل دریایی که ۹۰ درصد از حجم محموله‌های جهان را تشکیل می‌دهد، نقشی کلیدی در اقتصاد ملی دارد. بنادر، به‌عنوان زیرساخت‌های اساسی حمل‌ونقل دریایی، نمایانگر امکاناتی هستند که ارتباط مستقیمی با رقابت‌پذیری ملی دارند. کشورهای توسعه‌یافته با درک اهمیت بنادر هوشمند، به‌طور فعال در توسعه فناوری‌های مرتبط و به‌کارگیری آن‌ها در مناطق بندری سنتی سرمایه‌گذاری کرده‌اند. با وجود مطالعات متعدد در زمینه تأثیرات اقتصادی صنعت کشتی‌رانی و بندری بر اقتصاد ملی، پژوهش‌های کمی به بررسی بنادر هوشمند از منظر اقتصادی پرداخته‌اند. مطالعه (Jun, Lee et al. 2018) به تحلیل اقتصادی تجارت بندری پرداخته و اهمیت آن را در بهبود ضرایب القای تولید، ارزش افزوده و اشتغال‌زایی در صنایع مختلف مانند حمل‌ونقل، پتروشیمی، ماشین‌آلات، تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی، ساخت‌وساز و غیره بررسی کرده است. این تحلیل در چهار دسته گسترده، محدود، همبسته و پیچیده نشان داده است که هوشمندسازی بنادر علاوه بر تأثیر مستقیم بر اقتصاد کشتی‌رانی، به‌طور غیرمستقیم موجب بهبود وضعیت اقتصادی سایر صنایع نیز می‌شود. برنامه مدیریت دارایی^۱ بندر نیز به عنوان ابزاری ضروری برای مدیران بندر معرفی شده است. هرگونه اختلال در عملکرد یک تأسیسات بندری می‌تواند به‌سرعت بر کارایی کل بندر و در نتیجه بر زنجیره حمل‌ونقل تأثیر منفی بگذارد. مطالعه‌ای توسط (Mohammadi 2018) به بررسی این موضوع پرداخته و تأکید کرده است که سرمایه‌گذاری در بهبود کیفیت زیرساخت‌های بندری می‌تواند تأثیرات مثبتی بر عملکرد لجستیکی داشته باشد. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر توسط (Munim and Schramm 2018) کیفیت زیرساخت‌های بندری و عملکرد لجستیکی در ۹۱ کشور بررسی شده است. بررسی‌ها بیان می‌کند که سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های بندری منجر به افزایش تجارت دریایی و رشد اقتصادی قابل توجهی می‌شود. بنابراین، توسعه زیرساخت‌های بندری و هوشمندسازی آن‌ها، تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم گسترده‌ای بر رشد اقتصادی دارند.

۱.۴.۳. دیپلماسی در بنادر هوشمند

دیپلماسی هوشمند در بنادر به معنای استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای تقویت روابط بین‌المللی و تسهیل همکاری‌های تجاری و سیاسی است. سیستم‌های هوشمند با ارائه داده‌های شفاف و دقیق به سازمان‌های بین‌المللی و دولت‌ها، اعتماد را افزایش می‌دهند (Sánchez, Hoffmann et al. 2003). همچنین، پلتفرم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و بلاک‌چین امکان تبادل اطلاعات و توافقات تجاری را با سرعت و امنیت بالا فراهم می‌کنند. این تکنولوژی‌ها نقش مهمی در توسعه شبکه‌های لجستیکی جهانی و افزایش سهم بندرها در تجارت بین‌المللی ایفا می‌کنند. بهبود خدمات حمل‌ونقل بین‌المللی یکی از ویژگی‌های اصلی جهانی شدن اقتصادی است (Hong, Jeon et al. 2021). تحلیل داده‌های تاریخی با استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند به شناسایی الگوها و روندهای پیچیده در هزینه‌های گمرکی کمک کند. اتوماتیک‌سازی فرآیندها از طریق الگوریتم‌های هوش مصنوعی، فرآیندهای دستی و زمان‌بر محاسبه هزینه‌های گمرکی را خودکار کرده و بهره‌وری را افزایش می‌دهد. همچنین، تحلیل داده‌های تجاری و اقتصادی با بهره‌گیری از هوش مصنوعی، می‌تواند تأثیر عوامل مختلفی همچون نرخ ارز، تورم، و سیاست‌های تجاری را بر هزینه‌های گمرکی پیش‌بینی کرده و به شرکت‌ها در تعیین قیمت‌های دقیق‌تر و بهینه‌تر کمک کند. این سه کاربرد می‌توانند به‌طور قابل توجهی دقت و کارایی فرآیندهای گمرکی را بهبود بخشند.

۱.۱.۴.۳. بنادر هوشمند جهان

بنادر هوشمند جهان با استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند اینترنت اشیا، حسگرها، هوش مصنوعی و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، کارایی خود را افزایش داده و هزینه‌ها را کاهش می‌دهند. این فناوری‌ها به بهینه‌سازی عملیات بندری، حمل‌ونقل خودکار، تعمیرات پیش‌بینانه و پیش‌بینی الگوهای عملیاتی کمک می‌کنند. همچنین، این بنادر خدماتی چون ترخیص کالا، مدیریت بار و انبارداری را به‌صورت الکترونیکی ارائه داده و در جهت ایمنی و حفاظت از محیط زیست از فناوری‌های مانند تشخیص چهره و پهپادها برای شناسایی تهدیدات و نظارت بر فعالیت‌ها استفاده می‌کنند (PourMohammadBagher 2023).

در (Notteboom, Pallis et al. 2022) دسته‌بندی بنادر بر اساس چندین معیار انجام شده است که شامل مقیاس (اندازه و اهمیت اقتصادی بندر)، ویژگی‌های جغرافیایی (موقعیت مکانی و شرایط طبیعی بندر)، تنظیمات حکومتی و نهادی (شرایط مالکیت و مدیریت بندر)،

¹ Asset Management Plan (AMP)

عملکردهای بندری (خدمات ارائه شده توسط بندر) و تخصص (نوع بار حمل شده و صنایع مرتبط) می‌شود. این دسته‌بندی‌ها به تحلیل و درک بهتر تنوع و عملکرد بنادر کمک می‌کنند و تأثیر قابل توجهی بر بهبود کارایی و بهره‌وری بنادر دارند.

برخی از بزرگترین و مهمترین بنادر هوشمند جهان شامل شانگهای، سنگاپور، روتردام، هامبورگ، بارسلونا، لس‌آنجلس و دبی از هوش مصنوعی و الگوریتم‌های پیشرفته برای بهبود کارایی و بهره‌وری خود استفاده می‌کنند. بندر شانگهای در مدیریت ترافیک و بار، سنگاپور در عملیات بارگیری و تخلیه، روتردام در مدیریت ترافیک دریایی، هامبورگ در مدیریت ترمینال، بارسلونا در بهینه‌سازی فرآیندهای لجستیکی، لس‌آنجلس در مدیریت ترافیک کانتینری و دبی در اتوماسیون عملیات بارگیری و تخلیه از تکنولوژی‌های پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده می‌کنند (Notteboom, Pallis et al. 2022).

۱. مدل سازی به کارگیری هوش مصنوعی در بنادر

چارچوب اس‌دبلیو‌اوتی یک ابزار پذیرفته شده و مؤثر در ترسیم استراتژیک است. این چارچوب یک نقشه راه برای ارزیابی عوامل تأثیرگذار در داخل و خارج از سازمان ارائه می‌دهد که ممکن است به طور قابل توجهی موفقیت یک سرمایه‌گذاری، شرکت یا برنامه را تعیین کند (Elnabawi 2023). تحلیل اس‌دبلیو‌اوتی به اتخاذ تصمیمات هوشمندانه و ایجاد استراتژی‌های مؤثر کمک می‌کند. این تحلیل به محققان کمک می‌کند تا نقاط قوت را تقویت کنند، نقاط ضعف را برطرف کنند، فرصت‌ها را به دست آورند (Elnabawi 2023) و در نهایت با استفاده از آن محصول ادغام هوش مصنوعی در بنادر را پیش‌بینی کنند.



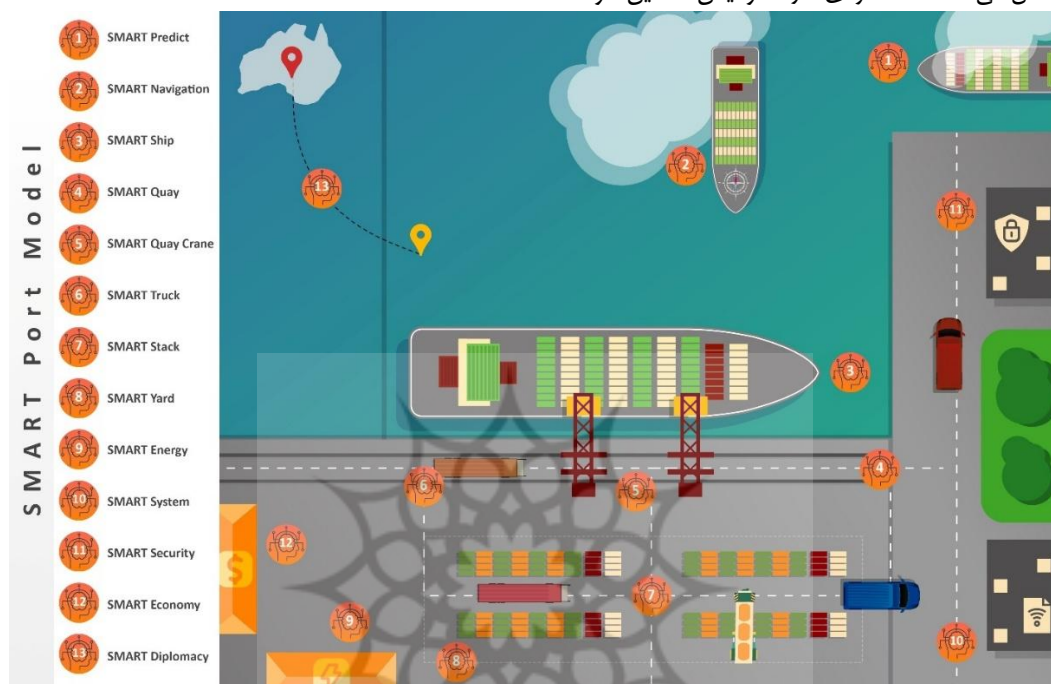
تصویر ۱. چارچوب SWOT استفاده از هوش مصنوعی در بنادر

هوش مصنوعی با ارائه الگوریتم‌های پیچیده و مدل‌های یادگیری ماشین^۱ توانایی پردازش سریع‌تر و دقیق‌تر داده‌های حجیم را دارد. مدل‌های یادگیری ماشین در طول زمان با پردازش داده‌ها رفته رفته بهتر شده و تصمیمات دقیق‌تری می‌گیرند و حاشیه خطای انسانی را به حداقل می‌رسانند. علاوه بر آن تجزیه و تحلیل بلادرنگ ارائه شده توسط فناوری‌های هوش مصنوعی می‌تواند خطرات احتمالی را در بندر و محیط دریایی شناسایی و پیش‌بینی کند. بنادر دریایی با شناسایی زود هنگام ایرادات یا نقص می‌توانند اقدامات احتیاطی لازم را برای جلوگیری از بروز و حوادث انجام دهند و در نتیجه اقدامات ایمنی و امنیتی را افزایش دهند. اما با این وجود سیستم‌های هوش مصنوعی با چالش‌های متعددی مواجه هستند، از جمله هزینه‌های بالای پیاده‌سازی و نگهداری، نیاز به تخصص فنی و مسائل امنیتی. این سیستم‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجه، نیروی کار متخصص و تدابیر امنیتی قوی برای حفاظت از داده‌ها هستند علاوه بر این، مسائل اخلاقی مربوط به تصمیم‌گیری‌های هوش مصنوعی، مانند حفظ حریم خصوصی و شفافیت، از دیگر چالش‌های مهم هستند که توجه به هر یک از این مسائل برای بهره‌وری بهتر از هوش مصنوعی ضروری است. استفاده از هوش مصنوعی در بنادر ایران فرصت‌های بی‌شماری را فراهم می‌کند. این فناوری می‌تواند به پیشرفت تکنولوژی و رشد اقتصادی کمک کند، فرآیندها را بهینه‌سازی و کارایی را افزایش دهد. همچنین،

^۱ Machine Learning

هوش مصنوعی می‌تواند ظرفیت عملیاتی بنادر را افزایش داده و مدیریت منابع و فضای بندری را بهبود بخشد. با ارائه خدمات دقیق‌تر و بهتر به مشتریان، کاهش زمان‌های انتظار و افزایش دقت در مدیریت بار و مسافران، رضایت مشتریان به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در تصویر شماره ۲ مشاهده می‌کنید، مدل پیشنهادی ما برای مدیریت عملیات بندر، بر پایه استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته هوش مصنوعی و تحلیل داده‌ها طراحی شده است. این مدل شامل بخش‌های کلیدی نظیر پیش‌بینی شرایط آب‌وهوایی و ترافیک دریایی، مسیریابی هوشمند کشتی‌ها و خودروهای خودران، تخصیص بهینه اسکله، سیستم‌های هوشمند انباشت و بارگیری، مدیریت انرژی، اقتصاد و دیپلماسی هوشمند می‌باشد. این مدل رویکردی جامع و مدرن برای مدیریت هوشمند بندر ارائه می‌دهد که تمام اجزای آن به صورت هماهنگ عمل می‌کنند تا عملکردی کارآمد و ایمن تضمین شود.



تصویر ۲. مدل پیشنهادی برای مدیریت عملیات بندر

در مدل پیشنهادی، سیستم‌های مختلف به شرح زیر با استفاده از هوش مصنوعی عمل می‌کنند:

- ۱. پیش‌بینی هوشمند:** در این بخش از مدل، با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی، پیش‌بینی شرایط آب‌وهوایی و حجم ترافیک کشتی‌ها انجام می‌شود. این سیستم با تحلیل داده‌ها، زمان‌بندی بهینه برای ورود و خروج کشتی‌ها را تضمین کرده و عملیات جستجو و نجات در مواقع اضطراری را مدیریت می‌کند.
- ۲. مسیریابی هوشمند:** در این بخش، سیستم‌های هوشمند با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته مسیریابی و داده‌های لحظه‌ای مانند وضعیت ترافیک دریایی و شرایط آب‌وهوایی، بهترین مسیرها را برای کشتی‌ها تعیین می‌کنند.
- ۳. کشتی‌های هوشمند:** در این بخش، کشتی‌های خودران با استفاده از هوش مصنوعی و داده‌های لحظه‌ای، توانایی تصمیم‌گیری خودکار در مواجهه با شرایط متغیر را دارند و با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مصرف سوخت خود را بهینه می‌کنند.
- ۴. تخصیص هوشمند اسکله:** سیستم با تحلیل داده‌های مرتبط با ترافیک دریایی و ظرفیت اسکله‌ها، زمان و مکان مناسب برای پهلوگیری هر کشتی را تعیین می‌کند و تخصیص‌ها را به صورت پویا تنظیم می‌کند.
- ۵. جرثقیل هوشمند:** جرثقیل‌های هوشمند در هماهنگی کامل با سیستم‌های کشتی‌های خودران، عملیات بارگیری را به صورت خودکار انجام می‌دهند و با تحلیل داده‌های پیشرفته، زمان مناسب تخلیه بار را تعیین می‌کنند.
- ۶. خودروهای هوشمند:** خودروهای هدایت‌شونده خودکار با تحلیل داده‌های لحظه‌ای مانند ترافیک محوطه و ظرفیت مسیرها، بهترین مسیر را برای انتقال کانتینرها انتخاب می‌کنند و با تعامل با سایر سیستم‌ها، بهره‌وری عملیات را به حداکثر می‌رسانند.

۷. **انباشت هوشمند:** انباشت کانتینرها در بنادر با استفاده از هوش مصنوعی و تحلیل داده‌های واقعی، به بهینه‌سازی تخصیص فضاهای ذخیره‌سازی کانتینرها در محوطه‌های انبار می‌پردازد. این فرآیند به‌طور خودکار و بر اساس نیازهای موجود و برنامه‌زمانی تعیین‌شده، کانتینرها را در بهترین محل ممکن قرار می‌دهد.

۸. **محوطه ترمینال هوشمند:** سیستم‌های خودکار، توزیع کانتینرها را در پارک‌های توزیع مدیریت می‌کنند و این فرآیند را برای بارهای ورودی و خروجی بندر انجام می‌دهند.

۹. **انرژی هوشمند:** سیستم‌های هوشمند، مصرف انرژی در تمام بخش‌های بندر از جمله جرثقیل‌ها، خودروهای خودکار و زیرساخت‌های برقی را بهینه‌سازی می‌کنند.

۱۰. **مدیریت هوشمند اسناد:** در این بخش، سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، مدیریت اسناد و مدارک را به صورت خودکار و دیجیتالی انجام می‌دهند و بهینه‌ترین روش‌ها برای ذخیره و بازیابی داده‌ها را ارائه می‌دهند.

۱۱. **امنیت هوشمند:** مدل با استفاده از هوش مصنوعی برای تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی خطرات، ایمنی سیستم‌ها را ارتقا داده و تهدیدات بالقوه را شناسایی می‌کند. این فناوری امنیت را تقویت کرده و از بروز حوادث پیشگیری می‌کند.

۱۲. **اقتصاد هوشمند:** در بخش اقتصادی مدل، با استفاده از هوش مصنوعی و تحلیل داده‌ها به بهینه‌سازی هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری اقتصادی پرداخته می‌شود.

۱۳. **دیپلماسی هوشمند:** در لایه دیپلماسی مدل، پلتفرم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، امکان تبادل اطلاعات و توافقات تجاری را با سرعت و امنیت بالا فراهم می‌کنند.

در این مدل‌سازی، هدف اصلی ایجاد یک سیستم کاملاً خودکار و بهینه متکی بر هوش مصنوعی برای مدیریت بنادر است که می‌تواند بهره‌وری بندر را افزایش دهد. این سیزده لایه با یکپارچه‌سازی در مدل، یک سیستم هوشمند و کارآمد برای مدیریت بندر ایجاد می‌کنند که به افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و توسعه پایدار بندر کمک می‌کند. این مدل علاوه بر افزایش بهره‌وری، نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها، افزایش ایمنی و اثرات زیست‌محیطی بندر ایفا می‌کند.

۲. الگوریتم‌های هوش مصنوعی در عملیات بنادر

هوش مصنوعی می‌تواند نقش بسیار مهمی در بهینه‌سازی فرآیندها و کاهش تأثیرات منفی در محیط بنادر ایفا کند. هوش مصنوعی با تقسیم‌بندی به دو دسته اصلی، می‌تواند به‌طور خاص در بنادر به موارد زیر کمک کند:

۱. **استدلال و تصمیم‌گیری:** در بنادر، هوش مصنوعی می‌تواند برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی و تخصیص منابع استفاده شود.

برای مثال، در تخصیص اسکله‌ها به کشتی‌ها و مدیریت ترافیک درون بندر، تصمیم‌گیری‌های هوشمند می‌توانند به کاهش زمان توقف کشتی‌ها و کاهش آلودگی ناشی از جابجایی‌ها کمک کنند. همچنین، می‌توان از هوش مصنوعی برای بهبود فرآیندهای حمل‌ونقل ترکیبی^۱ بین دریا و خشکی استفاده کرد و در نهایت باعث کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی شد.

۲. **یادگیری:** یادگیری خودکار در بنادر می‌تواند به بهبود پیش‌بینی‌ها و واکنش به شرایط تغییرپذیر کمک کند. برای مثال، استفاده

از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی تقاضا برای جابجایی کالا و مدیریت حجم بار می‌تواند کمک کند تا سیستم‌ها به‌طور خودکار و بر اساس داده‌های تاریخی و شرایط موجود تصمیم‌گیری کنند. این کار می‌تواند در راستای کاهش مصرف انرژی و آلاینده‌های حاصل از عملیات بندری مؤثر باشد. همچنین، یادگیری تقویتی^۲ می‌تواند در بهبود سیستم‌های خودران و مدیریت ترمینال‌ها کاربرد داشته باشد تا عملیات بندری به‌صورت بهینه‌تر و پایدارتر انجام شود (Mansoursamaei, Moradi et al. 2023).

یادگیری ماشین و شبکه عصبی

^۱ Intermodal

^۲ Reinforcement Learning

در بررسی (Ding 2020)، از روش یادگیری جمعی^۱ برای تحلیل عوامل تأثیرگذار و همبستگی زمان‌بندی منابع جرثقیل‌های اسکله بر اساس داده‌های تاریخی با استفاده از یک مدل تخمین یادگیری جمعی چندعاملی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم AdaBoost بهترین دقت پیش‌بینی را با خطای ۱۲.۷۲٪ دارد. در مقایسه، خطای روش تجربی ۱۳.۸۶٪ است که منجر به تأخیر در خدمات‌دهی به کشتی‌ها و افزایش هزینه‌ها و مصرف انرژی می‌شود.

از کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت انرژی شامل استفاده از شبکه‌های عصبی محاسباتی برای بهینه‌سازی انرژی، یکپارچه‌سازی آن با اینترنت اشیا و شبکه‌های 5G و کمک به مدل‌سازی الگوها و سیستم‌های توصیه برای انرژی و سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر است.

الگوریتم‌های هیوریستیک و متاهیوریستیک^۲

در بررسی (Mario Rodriguez-Molins 2012) کارایی الگوریتم ژنتیک^۳ برای زمان‌بندی کشتی‌ها و جرثقیل‌ها در بندر را نشان می‌دهد. الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی تصادفی است که بر اساس اصول تکامل طبیعی و ژنتیک عمل می‌کند. الگوریتم‌های ژنتیک معمولاً شامل کروموزوم، ژن، مجموعه‌ای از جمعیت، تناسب، تابع تناسب، تولید مثل، جهش و انتخاب^۴ باشند (Rahul Malhotra 2011). در بررسی صورت گرفته، یک ژن به شکل یک جفت (i, q_i) در نظر گرفته شده که در آن i شماره کشتی و q_i تعداد جرثقیل‌ها است. کروموزوم‌ها شامل لیستی از این ژن‌ها هستند که ترتیب و تعداد جرثقیل‌ها را برای هر کشتی نشان می‌دهند. برای تولید مثل یا همان ترکیب کروموزوم‌ها از عملگر تقاطع موقعیت عمومی^۵ استفاده شده و به نحوی طراحی شده است که ترتیب ژن‌ها در کروموزوم‌ها حفظ شود. برای جهش، زیررشته‌ای تصادفی از کروموزوم جابجا می‌شود. جمعیت اولیه تصادفی تولید شده و شرایط خاتمه الگوریتم شامل تعداد نسل‌ها، محدودیت زمانی یا تعداد ارزیابی‌ها است. و در نهایت تکرار این الگوریتم منجر به بهینه‌گی ترتیب زمان‌بندی کشتی‌ها و تخصیص جرثقیل‌ها می‌شود (Mario Rodriguez-Molins 2012).

برای بهینه‌سازی مسیر کشتی‌ها در مطالعه‌ای به الگوریتم‌های هیوریستیک پرداخته شده است. عوامل کلیدی مانند سرعت کشتی، فاصله بین بنادر و هزینه سوخت در هر بندر برای بهینه‌سازی مسیرها در نظر گرفته شدند. در (Sirait, Gunawan et al. 2023) از الگوریتم‌های هیوریستیک ژنتیک و کلونی مورچه‌ها^۶ برای کاهش هزینه‌های سوخت استفاده شده است. نتایج این دو الگوریتم نشان می‌دهد با توجه به شرایط مختلف، این الگوریتم‌ها توانسته‌اند مسیرهای بهینه‌ای مختلفی برای کشتی‌ها انتخاب کنند که هزینه سوخت را به حداقل برساند. در راستای برنامه‌ریزی مسیر کشتی‌ها و کنترل دقیق‌تر جرثقیل‌ها در بنادر در مطالعه دیگری مجدداً از الگوریتم ژنتیک و همچنین از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۷ استفاده شده است که نشان می‌دهد که این روش‌ها می‌توانند به بهینه‌سازی مصرف انرژی در حمل‌ونقل دریایی کمک کنند (Munim, Dushenko et al. 2020).

در (Sun, Ling et al. 2022) به بررسی نحوه بهینه‌سازی تخصیص منابع جستجو و نجات دریایی با استفاده از مدل بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشرفته پرداخته است. هدف اصلی آن، شبیه‌سازی استراتژی بهینه استقرار ایستگاه‌های نجات با کشتی‌ها و هواپیماها در مناطق مختلف برای کاهش زمان و هزینه عملیات جستجو و نجات است.

(Yalong Song 2024) به بررسی یک مدل جدید برای تخصیص اسکله چند بندری با بهینه‌سازی سرعت کشتی‌ها ارائه می‌دهد و یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر^۸ را برای حل مسئله معرفی می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر می‌تواند به طور کارآمد و قابل اعتماد، مسائل با اندازه‌ها و پیچیدگی‌های مختلف را حل کند. سپس بر اساس داده‌های واقعی ارائه شده از یک گروه بندری ضرورت در نظر گرفتن پنجره زمانی خدمات کشتی و نقش مهم بهینه‌سازی سرعت کشتی را نشان می‌دهد. یکی دیگر از روش‌هایی که اخیراً در مدیریت بنادر و لجستیک به ویژه در مسائل بهینه‌سازی تخصیص جرثقیل اسکله و اسکله توجه زیادی را به خود جلب کرده است، روش‌ها فرااکتشافی یا همان متاهیوریستیک است (Cho 2022).

برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی

¹ Ensemble Learning

² Heuristic Algorithms, Metaheuristic Algorithms

³ Genetic Algorithm (GA)

⁴ Fitness Function, Breeding, Mutation, Selection

⁵ General Position Crossover

⁶ Ant Colony (ACO)

⁷ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁸ Variable Neighborhood Search (VNS)

بیشتر بنادر از روش‌های تجربی برای تخمین چگونگی تخصیص جرثقیل‌ها استفاده می‌کنند (Ding 2020). درحالی‌که با استفاده از هوش مصنوعی می‌توان مسئله پیچیده تخصیص جرثقیل‌های اسکله به قسمت بارهای کشتی^۱ را به یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط، ساده کرد و به یک جواب بهینه دست یافت (Diabat 2015). مسئله شامل مجموعه‌ای از انبارها و جرثقیل‌های بندری است که باید به نحوی بهینه تخصیص داده شوند تا حجم کاری^۲ بین انبارها به حداقل برسد و بهره‌وری عملیات بارگیری و تخلیه افزایش یابد. با تعریف تابع هدف به نوعی که به دنبال کاهش اختلاف حجم کاری بین انبارها و استفاده بهینه از منابع جرثقیل‌ها باشد و تعریف محدودیت‌ها به گونه‌ای که اطمینان دهند که در هر لحظه هر جرثقیل به یک انبار و در هر انبار یک جرثقیل مشغول بارگیری باشد و با رعایت حاشیه ایمنی بین جرثقیل‌ها، این مدل با توجه به شرایط مختلف عملیاتی و نرخ اپراتورهای جرثقیل‌ها راه حل مناسب و بهینه مدیریت مؤثر تخصیص جرثقیل‌ها را معرفی می‌کند. همچنین (Zyngiridis 2009) با استفاده از هوش مصنوعی به توسعه مسیرهای جرثقیل‌های انبارسازی خودکار با اندازه برابر در یک بلوک واحد که با حامل‌های استرادل برای بارگیری و تخلیه کانتینرها کار می‌کنند، پرداخته است. این پژوهش شامل تعیین مسیرهای یک و دو جرثقیل به صورت همزمان می‌باشد. در جدول ۱، پژوهش‌های مرتبط با بنادر و الگوریتم‌های مورد استفاده در آن‌ها به‌طور خلاصه و جمع‌بندی شده آورده شده است. هدف آن نمایش تنوع روش‌های مورد استفاده و ارائه راهنمایی برای انتخاب الگوریتم‌های مناسب جهت هوشمندسازی بنادر است.

جدول ۱. الگوریتم‌های هوش مصنوعی در عملیات بنادر

ردیف	نویسنده، سال	کاربرد هوش مصنوعی مورد بررسی	الگوریتم‌های هوش مصنوعی
یادگیری ماشین			
۱	(Wang and Ding 2020)	تحلیل عوامل تأثیرگذار و همبستگی زمان‌بندی منابع جرثقیل‌های اسکله	AdaBoost
۲	Cammin, Sarhani et al.) (2020	برنامه‌ریزی برای پهلوگیری کشتی‌ها	SVM ^۳
۳	(Hong, Jeon et al. 2021)	پیش‌بینی کیفیت هوای بندر	LSTM RNN ^۴
شبکه عصبی			
۴	(Peng, Liu et al. 2020)	پیش‌بینی مصرف انرژی در تخلیه کشتی	NN (BP) ^۵
۵	(Peng, Liu et al. 2020)	زمان‌های ورود و خروج برنامه‌ریزی شده، تعداد کانتینرها	NN (BP)
۶	(Hong, Jeon et al. 2021)	داده‌های هواشناسی، کیفیت هوا و فعالیت‌های حمل‌ونقل	LSTM RNN
الگوریتم‌های هیوریستیک و متاهوریستیک			
۷	Sirait, Gunawan et al.) (2023	بهینه‌سازی مسیر کشتی‌ها با در نظر گرفتن سرعت کشتی، فاصله بنادر و کاهش هزینه سوخت	GA ACO

^۱ Bays

^۲ Workload

^۳ Support Vector Machine

^۴ Long Short-Term Memory (LSTM) , Recurrent Neural Network (RNN)

^۵ Neural Network with Backpropagation

GA PSO	برنامه ریزی مسیر کشتی و کنترل دقیق تر جرثقیل ها	Munim, Dushenko et al.) (2020	۸
EPSO	بهینه سازی تخصیص منابع جستجو و نجات دریایی	(Sun, Ling et al. 2022)	۹
GA	زمانبندی کشتی ها و تخصیص جرثقیل ها	Rodriguez-Molins, Barber) (et al. 2012	۱۰
VNS	بهینه سازی سرعت کشتی ها و تخصیص اسکله	(Song, Ji et al. 2024)	۱۱
Metaheuristics Algorithm	مدیریت بنادر و لجستیک، بهینه سازی تخصیص جرثقیل اسکله و اسکله ها	(Chatterjee and Cho 2022)	۱۲
GA SA ¹	بهینه سازی مشکل انباشت کانتینر در ترمینال های کانتینری	(Yang, Zhu et al. 2019)	۱۳
برنامه ریزی و بهینه سازی			
MILP ²	تخصیص جرثقیل های اسکله به قسمت بارهای کشتی	Al-Dhaheri and Diabat) (2015	۱۴
ILP	توسعه مسیرهای جرثقیل های انبارسازی خودکار	(Royset, Dell et al. 2009)	۱۵

۳. نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش هوش مصنوعی در صنعت دریایی ایران و ارائه مدلی جامع برای هوشمندسازی بنادر انجام شده است. یافته های این مطالعه نشان می دهد که هوشمندسازی بنادر با استفاده از هوش مصنوعی یک ضرورت انکارناپذیر برای افزایش بهره وری و رقابت پذیری در صنعت دریایی است. مدل پیشنهادی این پژوهش که شامل سیزده بخش است، یک رویکرد یکپارچه و سیستماتیک برای مدیریت عملیات بندری ارائه می دهد. این مدل با بهره گیری از الگوریتم های پیشرفته هوش مصنوعی و تحلیل داده ها، امکان بهینه سازی تمامی فرآیندهای بندری را فراهم می کند.

بکارگیری و پیاده سازی این مدل می تواند منجر به کاهش چشمگیر هزینه های عملیاتی، افزایش ایمنی، کاهش خطای انسانی، بهبود کارایی و سرعت عملیات، و کاهش اثرات زیست محیطی شود. همچنین، این مدل با ایجاد یکپارچگی بین تمام بخش های عملیاتی بندر، امکان مدیریت بهینه منابع و افزایش شفافیت در فرآیندها را فراهم می آورد. علی رغم چالش هایی همچون هزینه های بالای پیاده سازی اولیه، نیاز به زیرساخت های فنی پیشرفته و ضرورت آموزش نیروی انسانی متخصص، مزایای بلندمدت این مدل می تواند توجیه کننده سرمایه گذاری در این حوزه باشد.

برای پیاده سازی موفق این مدل، پیشنهاد می شود که بنادر ایران یک رویکرد تدریجی و مرحله ای را در پیش گیرند. این امر شامل سرمایه گذاری هدفمند در زیرساخت های هوشمند، همکاری با بنادر پیشرو جهت انتقال تجربیات، توسعه نیروی انسانی متخصص و ایجاد چارچوب های قانونی و استانداردهای لازم است. پیاده سازی این مدل می تواند نقش مهمی در تقویت جایگاه ایران به عنوان یک مرکز مهم حمل و نقل دریایی در منطقه ایفا کند و به تسهیل روابط تجاری و تقویت دیپلماسی اقتصادی کشور کمک نماید.

در نهایت، موفقیت در هوشمندسازی بنادر ایران مستلزم تعهد بلندمدت، برنامه ریزی دقیق و همکاری تمامی ذینفعان است. مدل پیشنهادی این پژوهش می تواند به عنوان نقشه راهی برای این تحول دیجیتال عمل کند و مسیر حرکت به سمت بنادر هوشمند آینده را هموار سازد.

References

- Akbulaev, N. and G. Bayramli (2020). "Maritime transport and economic growth: Interconnection and influence (an example of the countries in the Caspian sea coast; Russia, Azerbaijan, Turkmenistan, Kazakhstan and Iran)." *Marine Policy* 118: 104005.
- Al-Dhaheri, N. and A. Diabat (2015). "The quay crane scheduling problem." *Journal of Manufacturing Systems* 36: 87-94.

¹ Simulated Annealing

² Mixed-Integer Linear Programming

- Caldeirinha, V., et al. (2020). "The impact of port community systems (PCS) characteristics on performance." *Research in Transportation Economics* 80: 100818.
- Cammin, P., et al. (2020). Applications of real-time data to reduce air emissions in maritime ports. *International Conference on Human-Computer Interaction*, Springer.
- Chatterjee, I. and G. Cho (2022). "Port Container Terminal Quay Crane Allocation Based on Simulation and Machine Learning Method." *Sensors & Materials* 34.
- Cho, I. C. a. G. (2022). "Port Container Terminal Quay Crane Allocation Based on Simulation and Machine Learning Method." *Sensors and Materials* 34.
- D'Amico, G., et al. (2021). "Smart and sustainable logistics of Port cities: A framework for comprehending enabling factors, domains and goals." *Sustainable Cities and Society* 69: 102801.
- de Vos, J., et al. (2021). "The impact of autonomous ships on safety at sea—a statistical analysis." *Reliability Engineering & System Safety* 210: 107558.
- Diabat, N. A.-D. A. (2015). "The Quay Crane Scheduling Problem." *Journal of Manufacturing Systems* 36: 87-94.
- Ding, G. W. Y. (2020). "Research on the Prediction of Quay Crane Resource Hour based on Ensemble Learning." *Journal of Management Science & Engineering Research* 03.
- Durlik, I., et al. (2024). "Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications." *Applied Sciences* 14(18): 8420.
- Elnabawi, H. E. B. A. a. M. N. (2023). "The Transformative Potential of Artificial Intelligence in the Maritime Transport and its Impact on Port Industry." *Maritime Research and Technology*.
- EMSA (2025). "<https://www.emsa.europa.eu/>"
- EMSA, E. M. S. A. (2022 - 2024). "EMSA Single Programming Document".
- Farzadmehr, M., et al. (2023). "Contemporary challenges and AI solutions in port operations: applying Gale–Shapley algorithm to find best matches." *Journal of Shipping and Trade* 8(1): 27.
- Giada Venturini, Ç. I., Allan Larsen (2017). "The multi-port berth allocation problem with speed optimization and emission considerations." *Transportation Research Part D Transport and Environment*
- Gunawardhana, J. A., et al. (2021). "Rule-based dynamic container stacking to optimize yard operations at port terminals." *Maritime Transport Research* 2: 100034.
- Hans Cederqvist, C. H. (2010). "Investment vs. operating costs: a comparison of automatic stacking cranes and RTGs." www.abb.com.
- Hong, H., et al. (2021). "Incorporation of shipping activity data in recurrent neural networks and long short-term memory models to improve air quality predictions around busan port." *Atmosphere* 12(9): 1172.
- Irmira Durlik, T. M., Ewelina Kostecka, Adrianna Łobodzinska, Tomasz Kostecki (2024). "Harnessing AI for Sustainable Shipping and Green Ports: Challenges and Opportunities." *applied sciences*
- Jim Dai, W. L., Rajeeva Moorthy, Chung-Piaw Teo (2004). "Berth Allocation Planning Optimization in Container Terminals".
- Jović, M., et al. (2019). The transition of Croatian seaports into smart ports. 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), IEEE.

- Jun, W. K., et al. (2018). "Impact of the smart port industry on the Korean national economy using input-output analysis." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 118: 480-493.
- Lupi, M., et al. (2024). "Design and Development of a New Web Platform for the Management of Physical Flows and Customs Documents at Port Terminals." *Logistics* 9(1): 4.
- Mansoursamaei, M., et al. (2023). "Machine learning for promoting environmental sustainability in ports." *Journal of Advanced Transportation* 2023(1): 2144733.
- Mario Rodriguez-Molins, F. B., María R. Sierra, Jorge Puente, and Miguel A. Salido (2012). "A genetic algorithm for berth allocation and quay crane assignment." project MICINN TIN2010-20976-C02-01.
- Mihalis M, G., Georgios K, Saharidis , Maria Boile , Sotirios Theofanis and Marianthi G. Ierapetritou (2009). "The berth allocation problem: Optimizing vessel arrival time".
- Mohammadi, A. (2018). Critical infrastructure management: ports. *Proceedings of the Canadian Transportation Research Forum 53rd Annual Conference—The Future of Canada's Transportation System/L'avenir du Système de Transport du Canada*, Gatineau, QC, Canada.
- Munim, Z. H. (2019). *Autonomous ships: a review, innovative applications and future maritime business models*. Supply Chain Forum: An International Journal, Taylor & Francis.
- Munim, Z. H., et al. (2020). "Big data and artificial intelligence in the maritime industry: a bibliometric review and future research directions." *Maritime Policy & Management* 47(5): 577-597.
- Munim, Z. H. and H.-J. Schramm (2018). "The impacts of port infrastructure and logistics performance on economic growth: the mediating role of seaborne trade." *Journal of Shipping and Trade* 3(1): 1-19.
- Notteboom, T., et al. (2022). *Port economics, management and policy*, Routledge.
- Peng, Y., et al. (2020). "Machine learning method for energy consumption prediction of ships in port considering green ports." *Journal of Cleaner Production* 264: 121564.
- Pham, T. Y. (2023). "A smart port development: Systematic literature and bibliometric analysis." *The Asian Journal of Shipping and Logistics*.
- PourMohammadBagher, L. (2023). "The Road Map of Smartening Ports." *Marine and port services* 1(1): 99-134.
- Rahul Malhotra, N. S. Y. S. (2011). "Genetic Algorithms: Concepts, Design for Optimization of Process Controllers." *Computer and Information Science* 4.
- Rashidi, H., et al. (2021). "Automated guided vehicles-a review on applications, problem modeling and solutions." *International journal of transportation engineering* 8(3): 261-278.
- Rodriguez-Molins, M., et al. (2012). A genetic algorithm for berth allocation and quay crane assignment. *Advances in Artificial Intelligence—IBERAMIA 2012: 13th Ibero-American Conference on AI*, Cartagena de Indias, Colombia, November 13-16, 2012. *Proceedings* 13, Springer.
- Royset, J. O., et al. (2009). "Optimizing container movements using one and two automated stacking cranes." *MANAGEMENT* 5.(۲)
- ROYSET, R. F. D. A. J. (2009). "OPTIMIZING CONTAINER MOVEMENTS USING ONE AND TWO AUTOMATED STACKING CRANES." *JOURNAL OF INDUSTRIAL AND MANAGEMENT OPTIMIZATION* 5.

- Sadiq, M., et al. (2021). "Future greener seaports: A review of new infrastructure, challenges, and energy efficiency measures." *Ieee Access* 9: 75568-75587.
- Sánchez, R. J., et al. (2003). "Port Efficiency and International Trade: Port Efficiency as a Determinant of Maritime Transport Costs." *Maritime Economics & Logistics* 5(2): 199-218.
- Şerban, A. C. and M. D. Lytras (2020). "Artificial intelligence for smart renewable energy sector in europe—smart energy infrastructures for next generation smart cities." *Ieee Access* 8: 77364-77377.
- SIPG (2024). "<https://en.portshanghai.com.cn/>
- Sirait, J. M. B., et al. (2023). "Selection Of The Best Ship Route For Container Shipping Optimization Models Using Heuristic Algorithms." *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan* 20(2): 224-237.
- Song, Y., et al. (2024). "Variable Neighborhood Search for Multi-Port Berth Allocation with Vessel Speed Optimization." *Journal of Marine Science and Engineering* 12(4): 688.
- Sun, Y., et al. (2022). "Exploring maritime search and rescue resource allocation via an enhanced particle swarm optimization method." *Journal of Marine Science and Engineering* 10(7): 906.
- Wang, G. and Y. Ding (2020). "Research on the Prediction of Quay Crane Resource Hour based on Ensemble Learning." *Journal of Management Science & Engineering research* 3(2): 31-38
- Xiao, G., et al. (2024). "Sustainable maritime transport: A review of intelligent shipping technology and green port construction applications." *Journal of Marine Science and Engineering* 12(10): 1728.
- Yalong Song , B. J., and Samson S. Yu (2024). "Variable Neighborhood Search for Multi-Port Berth Allocation with Vessel Speed Optimization." *Marine Science and Engineering*.
- Yan, R., et al. (2021). "An artificial intelligence model considering data imbalance for ship selection in port state control based on detention probabilities." *Journal of Computational Science* 48: 101257.
- Yang, Y., et al. (2019). "Multiple equipment integrated scheduling and storage space allocation in rail–water intermodal container terminals considering energy efficiency." *Transportation Research Record* 2673(3): 199-209.
- Yau, K.-L. A., et al. (2020). "Towards smart port infrastructures: Enhancing port activities using information and communications technology." *Ieee Access* 8: 83387-83404.
- Zyngiridis, I. (2009). "Optimizing container movements using one and two automated stacking cranes".