



Civil and Project Journal

<http://www.cpjournals.com/>

Utilizing Artificial Intelligence-Based Algorithms for Optimizing Logistical Operations in Ports

Mohammad Amin Ebrahimzade^{1*}, Arshia Attar², Saba Mayeli³, Melika Zeyniahmadabad⁴

^{1*} - Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

²-Bachelor's Student in Industrial Engineering, Islamic Azad University, Karaj Branch, Karaj, Iran

³-Bachelor's Student in Industrial Engineering, Islamic Azad University, Karaj Branch, Karaj, Iran

⁴-Bachelor's Student in Industrial Engineering, Islamic Azad University, Karaj Branch, Karaj, Iran

Received: 28 May 2025; Revised: 04 July 2025; Accepted: 06 July 2025; Published: 23 August 2025

Abstract

This study systematically investigates the advanced applications of artificial intelligence (AI) in transforming port management and operations, with a focus on intelligent solutions for addressing the complex challenges of modern ports using cutting-edge computational and analytical algorithms. To this end, two advanced models were developed and implemented: a genetic algorithm for optimizing logistical operations, and a deep LSTM neural network for intelligent traffic forecasting. The genetic algorithm, precisely tuned within the AnyLogic simulation environment across 25 key nodes, achieved a 35% reduction in operational time, a 28% decrease in fuel consumption, and a 32% cut in operational costs. The LSTM model, featuring two hidden layers with 60 neurons each, was trained on 120,000 records and achieved 90% accuracy in traffic pattern prediction outperforming traditional models such as ARIMA, which reached 84% accuracy. The findings indicate that these technologies not only enhance operational efficiency but also significantly reduce the carbon footprint of ports and increase overall productivity. This dual advantage is of strategic importance, particularly in light of current environmental regulations and the sustainability demands of the maritime industry. Furthermore, key challenges—including the need for investment in cyber-physical infrastructure, specialized workforce training, cybersecurity, and organizational resistance to digital transformation are comprehensively examined. From a scientific perspective, the study offers an integrated evaluation framework, the development of compatible hybrid models, multidimensional impact analysis, and practical solutions positioning it as a valuable roadmap for port managers, maritime transport policymakers, and researchers in intelligent technologies.

Keywords: Artificial Intelligence (AI), Port Operations Optimization, Genetic Algorithm, LSTM Neural Network, Sustainable Maritime Logistics.

Cite this article as Ebrahimzadeh, M.A., Attar, A., Mayeli, S. and Zeyni Ahmabad, M. (2025). Utilizing Artificial Intelligence-Based Algorithms for Optimizing Logistical Operations in Ports. (e224261). Civil and Project, 7(6), e224261 doi: <https://doi.org/10.22034/cpj.2025.531581.1382>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2025 by the authors. Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: ebrahimzadehmohamadamin@gmail.com



Civil and Project Journal

<http://www.cpjournals.com/>

استفاده از الگوریتم های مبتنی بر هوش مصنوعی جهت بهینه سازی عملیات لجستیکی در بنادر

محمدامین ابراهیم زاده^{۱*}، عرشیا عطار^۲، صبا مایلی^۳، ملیکا زینی احمدآباد^۴

*۱- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۰۷ خرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳ تیر ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۵ تیر ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ شهریور ۱۴۰۴

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی نظام مند کاربردهای پیشرفته هوش مصنوعی در تحول مدیریت و عملیات بندری انجام شده و تمرکز آن بر ارائه راهکارهای هوشمند برای حل چالش های پیچیده بنادر مدرن با استفاده از الگوریتم های نوین محاسباتی و تحلیلی است. در راستای این هدف، دو مدل پیشرفته طراحی و پیاده سازی شده اند: الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی عملیات لجستیکی و شبکه عصبی عمیق LSTM برای پیش بینی هوشمند. الگوریتم ژنتیک با تنظیم دقیق در محیط شبیه سازی AnyLogic با ۲۵ گره کلیدی، موفق شد زمان عملیات را تا ۳۵٪، مصرف سوخت را ۲۸٪ و هزینه های عملیاتی را ۳۲٪ کاهش دهد. مدل LSTM نیز با دو لایه پنهان و ۶۰ نورون در هر لایه، بر روی ۱۲۰،۰۰۰ رکورد آموزش دیده و با دقت ۹۰٪ در پیش بینی الگوهای ترافیکی، عملکرد بهتری نسبت به مدل های سنتی مانند ARIMA (با دقت ۸۴٪) نشان داده است. نتایج پژوهش نشان می دهند که این فناوری ها علاوه بر بهبود عملکرد عملیاتی، کاهش قابل توجهی در ردپای کربنی بنادر و افزایش بهره وری کلی داشته اند. این مزیت دوگانه، در شرایط فعلی و با توجه به الزامات زیست محیطی و پایداری صنعت دریایی، اهمیت استراتژیک دارد. همچنین، چالش هایی مانند نیاز به سرمایه گذاری در زیرساخت های سایبر-فیزیکی، آموزش نیروی انسانی متخصص، امنیت سایبری و مقاومت سازمانی نسبت به تغییرات دیجیتال، به طور جامع بررسی شده اند. از منظر علمی، این پژوهش با ارائه چارچوب ارزیابی یکپارچه، توسعه مدل های ترکیبی سازگار، تحلیل چندبعدی پیامدها و راهکارهای عملی، می تواند به عنوان نقشه راهی ارزشمند برای مدیران بنادر، سیاست گذاران حمل و نقل دریایی و پژوهشگران فناوری های هوشمند مطرح شود.

واژگان کلیدی: هوش مصنوعی در مدیریت بندری، الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی LSTM، بهینه سازی عملیات لجستیکی، پیش بینی ترافیک بندری

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ebrahimzadehmohamadamin@gmail.com

۱-مقدمه

در دهه‌های اخیر، با رشد فزاینده تجارت بین‌المللی و افزایش وابستگی اقتصاد جهانی به حمل‌ونقل دریایی، بنادر به یکی از اجزای کلیدی و استراتژیک در زنجیره تأمین جهانی تبدیل شده‌اند. بر اساس آخرین گزارش کنفرانس تجارت و توسعه سازمان ملل (UNCTAD) امروزه بیش از ۸۰ درصد از حجم تجارت جهانی از طریق دریا جابه‌جا می‌شود و بنادر به‌عنوان نقاط کانونی ورود و خروج کالاها، نقشی حیاتی در رشد و توسعه اقتصادی کشورها ایفا می‌نمایند. با این حال، گسترش سریع فعالیت‌های دریایی، چالش‌های متعددی را در مدیریت بنادر پدید آورده است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به افزایش حجم مبادلات کالا، محدودیت فضاهای انبارداری، ازدحام در فرآیندهای بارگیری و تخلیه، تخصیص غیربهینه منابع، هزینه‌های بالای عملیاتی، و بروز تأخیرهای غیرضروری اشاره کرد. این عوامل به‌طور مستقیم بر بهره‌وری بنادر اثرگذار بوده و کارایی سیستم حمل‌ونقل دریایی را با کاهش مواجه ساخته‌اند. افزون بر مسائل عملیاتی، ملاحظات زیست‌محیطی نیز بر پیچیدگی مدیریت بنادر افزوده‌اند. آلودگی ناشی از تردد کشتی‌ها، مصرف بالای سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، موجب شده‌اند تا بنادر به‌عنوان یکی از منابع اصلی آلودگی‌های محیطی شناخته شوند. در نتیجه، کاهش مصرف انرژی و به حداقل رساندن ردپای کربنی در فعالیت‌های بندری، به یکی از اولویت‌های راهبردی صنعت حمل‌ونقل دریایی تبدیل شده است. در پاسخ به این چالش‌ها، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین به‌ویژه در حوزه دیجیتال‌سازی و هوش مصنوعی (AI)، به‌عنوان رویکردی کارآمد و آینده‌نگرانه مورد توجه قرار گرفته است. هوش مصنوعی و زیرساخت‌های آن نظیر یادگیری ماشین (ML)، با قابلیت تحلیل و پردازش داده‌های عظیم و پیچیده، ظرفیت بالایی در بهینه‌سازی ترافیک بندری، تخصیص منابع، کاهش هزینه‌ها، تسریع عملیات و ارتقای سطح ایمنی و امنیت در بنادر دارند. این فناوری‌ها با بهره‌گیری از سامانه‌های پیش‌بینی پیشرفته و تحلیل داده‌های کلان، می‌توانند موجب بهبود برنامه‌ریزی عملیات بندری شده و از بروز مشکلاتی نظیر ازدحام و تأخیرهای ناخواسته جلوگیری نمایند. با وجود این ظرفیت‌ها، پیاده‌سازی فناوری‌های هوش مصنوعی با موانعی همچون نیاز به زیرساخت‌های دیجیتال پیشرفته، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، مخاطرات امنیت سایبری و مقاومت در برابر تغییرات ساختاری همراه است. همچنین، تداوم استفاده از سیستم‌های سنتی و دستی، نبود هماهنگی میان واحدهای مختلف بندری، و استفاده از داده‌های غیرساختاریافته، از جمله موانع کلیدی در مسیر بهره‌برداری اثربخش از فناوری‌های هوشمند به شمار می‌روند. هوش مصنوعی از طریق بهینه‌سازی مصرف سوخت، برنامه‌ریزی هوشمند مسیرها و مدیریت کارآمد انرژی، نقشی کلیدی در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل دریایی ایفا می‌کند. اجرای موفق این فناوری در بنداری مانند بندر روتردام، کاهش قابل‌توجهی در میزان انتشار آلاینده‌ها و بهبود سیستم‌های نظارت زیست‌محیطی را به همراه داشته است. از مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در بنادر می‌توان به لجستیک خودکار و نگهداری پیش‌بینی‌محور اشاره کرد که موجب کاهش زمان‌های توقف عملیات و ارتقاء بهره‌وری کلی می‌شود. با این حال، چالش‌هایی همچون هزینه‌های پیاده‌سازی بالا و پیچیدگی‌های مرتبط با مقررات نظارتی، روند توسعه این فناوری را با محدودیت‌هایی مواجه ساخته‌اند. با این وجود، پیشرفت‌های پیوسته در فناوری و گسترش همکاری میان نهادهای دولتی و بخش خصوصی، می‌تواند مسیر حرکت صنعت دریایی را به‌سوی پایداری و کارایی بیشتر هموار سازند (Durlík et al., 2024). الگوریتم‌های هوش مصنوعی نقشی اساسی در بهینه‌سازی و مدیریت هوشمند حمل‌ونقل در بنادر دارند. یکی از کاربردهای برجسته این فناوری، استفاده از وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار (AGVs) در پایانه‌های کانتینری است که می‌تواند منجر به بهبود چشمگیر عملکرد عملیاتی، کاهش هزینه‌ها تا حدود ۲۵ تا ۵۵ درصد، و افزایش بهره‌وری تا ۲۱۵ درصد شود. مطالعات نشان می‌دهند که الگوریتم‌های اکتشافی و فراابتکاری هوش مصنوعی، با بهینه‌سازی مسیر حرکت AGVها، زمان‌بندی دقیق عملیات، مدیریت بهینه مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تحولی در فرآیندهای بندری ایجاد می‌کنند. با این وجود، تنها حدود ۳ درصد از پایانه‌های کانتینری جهان از اتوماسیون بهره‌مند شده‌اند، چرا که چالش‌های سرمایه‌گذاری اولیه و مقاومت اتحادیه‌های کارگری مانعی جدی برای گسترش این فناوری به شمار می‌روند (Tsolakis et al., 2022). هوش مصنوعی نقش کلیدی در دیجیتال‌سازی و هوشمندسازی حمل‌ونقل بندری ایفا می‌کند و به‌طور مؤثری می‌تواند خطاهای انسانی را کاهش داده و سرعت و دقت عملیات را افزایش دهد. از طریق تحلیل کلان‌داده‌ها، الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین قادرند مسیرهای حمل‌ونقل را

بهینه‌سازی کرده، هزینه‌ها را کاهش داده و انتشار کربن را به حداقل برسانند. این فناوری همچنین به بنادر امکان می‌دهد با شناسایی روندهای بازار از طریق تحلیل داده‌های حجیم، تصمیمات هوشمندانه‌تری در حوزه لجستیک اتخاذ کنند. با این حال، کیفیت داده‌ها چالشی مهم در بهره‌برداری مؤثر از هوش مصنوعی به شمار می‌رود، چرا که داده‌های نادرست می‌توانند دقت و کارایی الگوریتم‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. در نهایت، سیستم‌های هوشمند قادرند تجهیزات بندری را به‌صورت خودکار مدیریت کرده و بسیاری از فرآیندها را بدون نیاز به نظارت لحظه‌ای از سوی مرکز کنترل به انجام رسانند (Ghazaleh, 2023). بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، بررسی نقش هوش مصنوعی در بهینه‌سازی مدیریت بنادر، شناسایی چالش‌های موجود در مسیر استقرار این فناوری‌ها، و ارائه راهکارهایی برای افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی، و ارتقای مدیریت ترافیک دریایی می‌باشد. در ادامه در این پژوهش به دو پرسش زیر پاسخ خواهیم داد:

۱- به چه شیوه‌هایی بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌تواند منجر به ارتقای کارایی و افزایش بهره‌وری در عملکرد بنادر شود؟

۲- چه موانع و چالش‌هایی در مسیر استقرار فناوری‌های هوش مصنوعی در نظام مدیریت بنادر وجود دارد و راهکارهای مقابله با این چالش‌ها کدام‌اند؟

بخش بندی این مقاله در ادامه به این ترتیب است، در بخش دوم مروری بر ادبیات و بررسی پژوهش‌های گذشته، در بخش سوم به روش تحقیق، در بخش چهارم به مطالعه موردی، در بخش پنجم به نتایج پرسشنامه، در بخش ششم به نتیجه‌گیری، و در بخش هفتم به ارائه پیشنهادات برای تحقیقات آینده پرداخته و در نهایت در بخش هشتم منابع ارائه شده است.

۲-مروری بر ادبیات

الگوریتم‌های هوش مصنوعی در بهینه‌سازی حمل‌ونقل دریایی در سطوح استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی به‌کار می‌روند. برنامه‌ریزی خطی (LP) برای بهینه‌سازی مسیرها، زمان‌بندی کشتی‌ها و مدیریت محموله‌ها استفاده می‌شود. ترکیب الگوریتم‌های پیشرفته مانند جستجوی محلی و برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط (MIP) موجب کاهش زمان پردازش و بهبود کارایی عملیات می‌شود (Pradana & Noche, 2019). این مطالعه از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهبود پیش‌بینی جریان ترافیک دریایی استفاده می‌کند. مدل پیشنهادی ترکیبی از شبکه عصبی کانولوشن (CNN) و شبکه بازگشتی دوطرفه (BIGRU) است که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) دقت پیش‌بینی را بهبود می‌بخشد. نتایج نشان می‌دهند که این مدل خطاهای پیش‌بینی را کاهش داده و می‌تواند در بهینه‌سازی منابع بندری و مدیریت ترافیک دریایی مؤثر باشد (Xie et al., 2024). این مطالعه به بررسی کنترل ترافیک کشتی (STCP) با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی مسیریابی و زمان‌بندی کشتی‌ها در بنادر پرداخته است. مدل پیشنهادی با ترکیب دو رویکرد همزمان و متوالی، مسیرهای سریع‌تر و جلوگیری از برخورد کشتی‌ها را شناسایی می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که این الگوریتم دقت تصمیم‌گیری را نسبت به روش‌های دستی به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد (Lübbecke et al., 2019). این تحقیق به بررسی استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی مسیریابی و تخصیص کشتی‌ها در بنادر می‌پردازد. مدل پیشنهادی با هدف کاهش زمان‌های انتظار و هزینه‌های حمل‌ونقل، فرآیند تخصیص کشتی‌ها را بر اساس ازدحام و گزینه‌های جایگزین بهینه‌سازی می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که انحراف هوشمند کشتی‌ها به بنادر جایگزین می‌تواند در شرایط پرترافیک بندری به‌طور مؤثری هزینه‌ها و زمان حمل‌ونقل را کاهش دهد (Meng et al., 2023). الگوریتم‌های هوش مصنوعی در بهینه‌سازی و مدیریت حمل‌ونقل بنادر نقش مهمی دارند و با استفاده از فناوری اطلاعات و ارتباطات، ترافیک زمینی و دریایی را هم‌زمان مدیریت می‌کنند. این سیستم‌ها با برنامه‌ریزی هوشمند و کنترل لجستیک، کیفیت خدمات بندری را بهبود می‌بخشند و به بنادر کمک می‌کنند تا زیرساخت‌های خود را با نیازهای تجاری و حمل‌ونقل هماهنگ کنند. همچنین، این الگوریتم‌ها به مقابله با چالش‌های محیط‌زیستی و کاهش بارهای ترافیکی در بنادر کمک می‌کنند (Gurzhiy et al., 2021). بنادر هوشمند با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی به بهینه‌سازی حمل‌ونقل و مدیریت عملیات پرداخته و عملکرد ایمن‌تری ارائه می‌دهند. این فناوری‌ها شامل تحلیل داده‌های

حسگرها، سیستم‌های مکان‌یابی بلادرنگ و پردازش داده‌های حجیم برای پیش‌بینی ترافیک و بهینه‌سازی مصرف انرژی هستند. بنادر پیشرفته‌ای همچون هامبورگ و روتردام از این فناوری‌ها برای ردیابی کشتی‌ها و بهینه‌سازی حرکت بار بهره‌برده‌اند (Molavi et al., 2020). مدیریت هوشمند حمل‌ونقل در بنادر با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و فناوری‌های Industry 4.0 مانند اینترنت اشیا و داده‌های بزرگ، عملیات ترمینالی را خودکار کرده و ارتباطات زنجیره بندری را تسهیل می‌کند. پروژه‌های بنادر هوشمندی مانند روتردام و هامبورگ نشان داده‌اند که این فناوری‌ها پیچیدگی‌ها را کاهش داده و رقابت‌پذیری را بهبود می‌بخشند. هدف این رویکرد، بهینه‌سازی حمل‌ونقل، افزایش بهره‌وری انرژی و یکپارچه‌سازی فرآیندهای بندری است (Douaioui et al., 2018). این پژوهش به بررسی استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و فناوری‌های نوین برای بهینه‌سازی حمل‌ونقل در بنادر هوشمند پرداخته است. بنادر هوشمند با بهره‌گیری از اینترنت اشیا و داده‌های بزرگ، عملکرد بنادر را بهبود می‌بخشند و تراکم ترافیک، بهره‌وری انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند. در این تحقیق، شاخص‌های پورت هوشمند (SPI) برای ارزیابی عملکرد بنادر شرقی تایلند و رعایت استانداردهای بین‌المللی بهره‌وری و پایداری استفاده شده است (Makkawan & Muangpan, 2021). الگوریتم‌های هوش مصنوعی و اینترنت اشیا (IoT) با جمع‌آوری و پردازش داده‌های لحظه‌ای از کشتی‌ها و محموله‌ها، کارایی عملیاتی بنادر را افزایش می‌دهند. این فناوری‌ها به بهینه‌سازی مصرف سوخت، کنترل تعمیرات و نگهداری، و کاهش زمان خرابی تجهیزات کمک می‌کنند. همچنین، استفاده از این فناوری‌ها موجب افزایش شفافیت، کاهش تأخیرها و بهبود برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در لجستیک دریایی می‌شود (Nathisiya & Radhakrishnan, 2024). با افزایش ترافیک کانتینری، الگوریتم‌های هوش مصنوعی به بهبود عملکرد بنادر کمک می‌کنند. مدل BACAP برای تخصیص اسکله و جرثقیل یک برنامه‌ریزی یکپارچه ارائه می‌دهد، اما مدل BACASP برای مسائل پیچیده‌تر به الگوریتم‌های برشی نیاز دارد. ادغام تخصیص اسکله، جرثقیل و زمان‌بندی عملیات با استفاده از مدل‌های ریاضی و روش‌های اکتشافی مانند Tabu Search کارایی بنادر را بهبود می‌بخشد (Türkoğulları et al., 2014). الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی تخصیص اسکله و کاهش تأخیر در پهلوگیری کشتی‌ها استفاده می‌شوند. این الگوریتم‌ها با تحلیل داده‌های تاریخی و منابع موجود، تخصیص بهینه را ارائه داده و بهره‌وری اسکله را افزایش می‌دهند. هدف اصلی این فرآیند، به حداکثر رساندن توان عملیاتی و کاهش زمان انتظار کشتی‌ها است (Dai et al., 2008). الگوریتم‌های هوش مصنوعی با استفاده از شبیه‌سازی‌های پیشرفته به بهینه‌سازی حمل‌ونقل در بنادر کمک می‌کنند. این الگوریتم‌ها با مدل‌سازی منابع مختلف و تحلیل سناریوهای مختلف، عملکرد سیستم را ارزیابی کرده و زمان‌بندی و تخصیص منابع را بهبود می‌بخشند. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند ژنتیک، به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی منجر می‌شود (Kotachi et al., 2013). ترکیب هوش مصنوعی (AI) و تحقیق در عملیات (OR) می‌تواند به بهینه‌سازی لجستیک دریایی کمک کند. با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، اطلاعات ارزشمندی استخراج و فرآیندهای تصمیم‌گیری بهبود می‌یابند، هرچند که این الگوریتم‌ها هنوز با چالش‌هایی در لجستیک دریایی مواجه هستند. تحقیقات نشان می‌دهند که فرصت‌های زیادی برای ترکیب این دو رویکرد در بهینه‌سازی مسیریابی، زمان‌بندی و مدیریت ترافیک دریایی وجود دارد (Dornemann et al., 2020). هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های کلان و دیجیتال‌سازی فرآیندها، بهره‌وری حمل‌ونقل بنادر را افزایش داده و نیاز به نیروی انسانی را کاهش می‌دهد. سیستم‌های هوش مصنوعی همچنین کشتی‌های خودران را مدیریت کرده و ایمنی و کارایی را بهبود می‌بخشند. این فناوری با تحلیل پیش‌بینی و بهینه‌سازی مصرف انرژی، فرصت‌های زیادی برای بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل دریایی ارائه می‌دهد (Liu, 2024). الگوریتم‌های هوش مصنوعی با پردازش داده‌های کلان، بهره‌وری بنادر را افزایش و هزینه‌ها را کاهش می‌دهند. فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا و اتوماسیون تأثیر زیادی بر زنجیره تأمین جهانی گذاشته و فرآیندهای بندری را متحول کرده‌اند. تحلیل داده‌ها به مدیران بندری کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری برای کاهش آلودگی، بهبود پایداری و افزایش بهره‌وری اتخاذ کنند (Xie, 2023). الگوریتم‌های هوش مصنوعی با تحلیل شاخص‌های مختلف، می‌توانند کارایی بندر را افزایش و هزینه‌های حمل‌ونقل دریایی را کاهش دهند. عواملی مانند زیرساخت‌ها، مشارکت بخش خصوصی و اتصال بنادر تأثیر زیادی بر هزینه‌ها دارند. بهبود این ویژگی‌ها از طریق هوش مصنوعی به بهینه‌سازی زمان و هزینه در عملیات بندری کمک می‌کند (Wilmsmeier et al., 2006). این مقاله تأثیر کارایی بندر بر هزینه‌های حمل‌ونقل آبی را تحلیل می‌کند و نشان می‌دهد که عوامل مختلفی مانند مسافت، خدمات لاینر ماهانه و ارزش کالا بر هزینه‌ها تأثیر دارند. مدل برآوردی تأکید دارد که افزایش

کارایی بندر، به‌ویژه با کشتی تخمینی بالا، هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. بهبود کارایی بندر می‌تواند رقابت‌پذیری کشورها را تقویت کند و تحت تأثیر سیاست‌های عمومی قرار دارد (Sánchez et al., 2003). الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند با تحلیل داده‌های اقتصادی و شرایط حمل‌ونقل، به بهینه‌سازی انتخاب بنادر و مدیریت حمل‌ونقل کمک کنند. این الگوریتم‌ها با پیش‌بینی تأثیر عواملی مانند هزینه‌های حمل‌ونقل و کارایی بنادر، مسیریابی و تخصیص منابع را بهبود می‌بخشند. توسعه مدل‌های تحلیلی برای تحلیل مستمر داده‌ها و اتخاذ تصمیمات هوشمندانه می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری شود (Blonigen & Wilson, 2006). برای بهینه‌سازی حمل‌ونقل در بنادر، الگوریتم اکتشافی مسیریابی بهینه را با هدف حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی هزینه‌ها ارائه می‌دهد. این الگوریتم با در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت کشتی‌ها، بهره‌وری اقتصادی را افزایش می‌دهد. همچنین، قابلیت توسعه آن برای سیستم‌های حمل‌ونقل دیگر مانند ریلی و هوایی، مزیت قابل توجهی به حساب می‌آید (Krile, 2013). این مطالعه به بررسی استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و مدیریت ذینفعان برای بهینه‌سازی عملکرد بنادر در حمل‌ونقل کانتینری می‌پردازد. با استفاده از تحلیل اهمیت-عملکرد و فرآیند سلسله‌مراتبی تحلیلی، مدیران بندر می‌توانند منابع را مؤثرتر تخصیص دهند و عملکرد کلی بندر را بهبود بخشند. این الگوریتم‌ها به شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتارهای ذینفعان و ارائه استراتژی‌های بهینه برای تصمیم‌گیری کمک می‌کنند (Ha et al., 2019). الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند به بهینه‌سازی حمل‌ونقل در بنادر و هماهنگی مؤثر بین بازیگران مختلف زنجیره حمل‌ونقل کمک کنند. مشکلات هماهنگی مانند عدم تقارن اطلاعاتی و نبود روابط قراردادی با استفاده از مشوق‌ها و اتحادها قابل حل هستند. این مسائل در حمل‌ونقل کانتینری داخلی می‌توانند با بهبود ساختارهای اقتصادی نهادی و ترتیبات هماهنگی بهینه شوند (Van Der Horst & De Langen, 2008). الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند با تجزیه و تحلیل داده‌های ترافیکی، مسیرهای حمل‌ونقل را بهینه‌سازی کرده و ایمنی را افزایش دهند. این فناوری‌ها همچنین با ایجاد یک سیستم مدیریتی یکپارچه، عملکرد و هماهنگی میان بخش‌های مختلف حمل‌ونقل را بهبود می‌بخشند. علاوه بر این، هوش مصنوعی با شناسایی الگوهای خطر و ارائه راهکارهای پیشگیرانه، ایمنی حمل‌ونقل در بنادر را تقویت می‌کند (Budzyński et al., 2017). الگوریتم‌های هوش مصنوعی در عملیات بندری به مدیریت ریسک و بهینه‌سازی فرآیندها کمک می‌کنند. این الگوریتم‌ها با استفاده از روش‌های آماری، ریسک‌های مرتبط با نقشه‌برداری محموله‌ها و آسیب کانتینرها را کاهش می‌دهند. همچنین، آنها می‌توانند راهکارهایی برای بهینه‌سازی پوشش‌های بیمه‌ای و افزایش بهره‌وری اقتصادی ارائه دهند (Balobanov & Postan, 2020). الگوریتم‌های هوش مصنوعی با شناسایی محدودیت‌های زیرساختی بندری و حمل‌ونقل، بهره‌وری جابه‌جایی بار را افزایش می‌دهند. این فناوری‌ها با کاهش تراکم در بنادر و بهره‌برداری از ظرفیت‌های بنادر کوچک، فشار بر حمل‌ونقل زمینی را کاهش می‌دهند. همچنین، ابزارهای تحلیلی مبتنی بر هوش مصنوعی به بهبود هماهنگی بین بخش‌ها و رفع چالش‌های زیرساختی کمک می‌کنند (Lonza & Marolda, 2016). این مقاله به بررسی چالش‌های بهینه‌سازی حمل‌ونقل بار در بنادر خشک با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی پرداخته است. یک مدل ریاضی برای کاهش هزینه‌های لجستیکی و بهینه‌سازی اتصال پایانه‌ها و زمان‌بندی خدمات ارائه شده است. این رویکرد می‌تواند عملکرد زنجیره تأمین را بهبود بخشد و هزینه‌های حمل‌ونقل را کاهش دهد (Crainic et al., 2015). الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند به بهینه‌سازی حمل‌ونقل دریایی کمک کرده و با شناسایی فناوری‌های نوآورانه و مدل‌های تجاری جدید، سیستم‌های پایدارتر و کارآمدتری ایجاد کنند. این فناوری‌ها در سیاست‌گذاری و تحلیل تقاضای حمل‌ونقل، تصمیم‌گیری‌های استراتژیک را تسهیل می‌کنند. همچنین، بهبود عملکرد سیستم‌ها در زمینه‌های مختلف می‌تواند به تقویت نوآوری در حمل‌ونقل کمک کند (Rodrigue, 2010). الگوریتم‌های هوش مصنوعی با تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی فرآیندها می‌توانند هزینه‌های حمل‌ونقل در بنادر داخلی را کاهش داده و تأخیرها را به‌طور مؤثر مدیریت کنند. این فناوری‌ها با ترکیب خدمات مختلف، کارایی و رقابت‌پذیری را افزایش می‌دهند و در فرآیندهای گمرکی و مرزی به تسریع جریان کالاها کمک می‌کنند. در نهایت، این الگوریتم‌ها به بهبود برنامه‌ریزی و مدیریت منابع در بنادر داخلی کمک می‌کنند (Harrison et al., 2002).

در مرور ادبیات پیشین، اغلب مطالعات تمرکز خود را بر معرفی کلی الگوریتم‌های هوش مصنوعی در حمل‌ونقل بندری و قابلیت‌های آنها در بهینه‌سازی مسیر، زمان‌بندی کشتی‌ها، و تحلیل داده‌های کلان قرار داده‌اند. با این حال، بسیاری از این

پژوهش‌ها در سطح نظری و مفهومی باقی مانده و کمتر وارد فضای عملیاتی و اجرایی شده‌اند. مقاله حاضر این خلأ را با طراحی و پیاده‌سازی مدل‌هایی دقیق در محیط شبیه‌سازی شده AnyLogic برطرف کرده است. در این تحقیق، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی LSTM، دو سناریوی مجزا به‌صورت عملیاتی آزمایش شده که نتایج آن‌ها از جمله کاهش ۳۵ درصدی زمان عملیات و صرفه‌جویی ۲۸ درصدی در مصرف سوخت، نمایانگر قابلیت بالای این رویکرد ترکیبی در افزایش بهره‌وری بنادر است. از دیگر نقاط تمایز این پژوهش، تحلیل دقیق سناریوهای عملیاتی و آزمون مدل‌ها از طریق شاخص‌های آماری نظیر RMSE، MAE، R^2 ، و اعتبارسنجی متقاطع است. برخلاف مطالعات قبلی که بیشتر به مقایسه مفهومی مدل‌ها می‌پرداختند، در این مقاله مقایسه عددی بین مدل‌های LSTM، GRU و ARIMA صورت گرفته که نشان‌دهنده دقت ۹۰ درصدی مدل پیشنهادی در پیش‌بینی ترافیک بندری است. نکته مهم دیگر، رویکرد تلفیقی پژوهش حاضر است که با ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی و یادگیری عمیق، مدلی جامع ارائه داده است. این مدل نه تنها به بعد عملیاتی توجه دارد، بلکه اثرات اقتصادی، زیست‌محیطی و مدیریتی را نیز تحلیل کرده است. در حالی که پژوهش‌های گذشته عمدتاً به مزایای بهره‌برداری از هوش مصنوعی بسنده کرده‌اند، مقاله حاضر با ارائه تحلیل‌های کمی، تأثیر مستقیم این فناوری‌ها را بر کاهش هزینه‌های عملیاتی (تا ۳۲ درصد) و کاهش ردپای کربنی بندرها بررسی کرده است. همچنین، مقاله به چالش‌های اساسی پیاده‌سازی فناوری‌های هوش مصنوعی در بنادر پرداخته است؛ چالش‌هایی نظیر نیاز به سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های سایبر-فیزیکی، ضرورت تربیت نیروی انسانی متخصص، ملاحظات امنیت سایبری و مقاومت سازمانی که در پژوهش‌های گذشته اغلب نادیده گرفته شده بودند. این چالش‌ها در مقاله حاضر نه تنها شناسایی شده‌اند، بلکه برای هرکدام راهکارهای اجرایی و سیاستی نیز پیشنهاد شده است. از منظر نوآوری داده، این پژوهش با استفاده از داده‌های مصنوعی مبتنی بر حسگرهای IoT و شرایط جوی، مدلی طراحی کرده که قادر به پیش‌بینی دقیق رفتار ترافیکی بندر در بازه‌های زمانی مختلف است؛ موضوعی که در متون گذشته به‌صورت ضمنی مورد اشاره قرار گرفته اما به‌طور عملیاتی اجرا نشده بود. در نهایت، مقاله حاضر با ارائه یک چارچوب یکپارچه برای ارزیابی تأثیر هوش مصنوعی بر عملکرد بندر، تلفیق شبیه‌سازی، یادگیری عمیق و تحلیل اقتصادی-زیست‌محیطی، گامی فراتر از مطالعات پیشین برداشته است. این پژوهش توانسته است با نگاه چندبعدی و کاربردی، خلأهای تحقیقاتی پیشین را به‌خوبی پوشش دهد و مسیر جدیدی برای تحقیقات آینده در حوزه هوشمندسازی بنادر ترسیم کند.

۳- روش شناسی پژوهش

این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر الگوریتم‌های هوش مصنوعی در بهینه‌سازی فرآیندهای حمل‌ونقل بندری انجام شده است. پس از بررسی جامع پیشینه تحقیق و شناسایی چالش‌های موجود در مدیریت بنادر، دو سناریوی عملیاتی طراحی و اجرا گردید. این رو برای نزدیک کردن شرایط آزمایش به واقعی از داده‌های منتشر شده توسط بندر روتردام استفاده شد و سپس شبیه‌سازی‌های اصلی با سناریوهای فرضی طراحی شده مقایسه گردید. همچنین برای شبیه‌سازی دقیق تر و بهبود روند پژوهشی از سه مقاله که توسط نادی و همکاران (۲۰۲۳)، ژای و همکاران (۲۰۲۲) و شتیپتس و همکاران (۲۰۲۰)، نوشته شده بود استفاده شد. در پژوهشی که توسط نادی و همکاران انجام شد، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و داده‌های بزرگ، مدلی هوشمند برای بهینه‌سازی عملیات لجستیکی و ترافیکی در بنادر ارائه شده است. این مدل، زمان‌بندی ورود کامیون‌ها به پایانه‌ها را با ظرفیت پردازش تطبیق داده و از سیاست‌های کنترلی برای کاهش ازدحام بهره می‌برد. همچنین، با استفاده از سیستم‌های نوبت‌دهی و اتصال دیجیتال، هماهنگی میان بندر و پس‌کرانه افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که این رویکرد می‌تواند منجر به کاهش زمان انتظار، آلودگی و هزینه‌ها شود (Nadi et al., 2023). در پژوهشی دیگر که توسط ژای و همکاران انجام شد، در راستای بهینه‌سازی عملیات لجستیکی در بنادر، بر اهمیت استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی زمان توقف کشتی‌ها در اسکله تأکید شده است. این مطالعه با بهره‌گیری از داده‌های چندمنبعی مانند اطلاعات AIS و عملیات ترمینال، مدلی دقیق و پویا ارائه می‌دهد که قادر است زمان توقف را با دقتی بیش از ۹۸٪ پیش‌بینی کند. مدل مذکور با تقسیم فرآیند اسکله‌نشینی به بخش‌های قابل تحلیل و بهره‌گیری از روش‌های رگرسیونی و آماری، به تصمیم‌گیری هوشمند در زمینه زمان‌بندی کمک می‌کند. یافته‌های این پژوهش می‌توانند نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری و هوشمندسازی بنادر ایفا کنند (Zhai et al., 2022). در این مقاله نیز که توسط شتیپتس و همکاران انجام شد، یک سامانه پیش‌بینی زمان

توقف کشتی در بندر با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و داده‌های استاندارد فراخوان بندر معرفی شده است. این سامانه با استفاده از داده‌های تاریخی، زنده و محیطی مانند آب‌وهوا و جزر و مد، عملکرد دقیقی در تخمین زمان ارائه می‌دهد. ارزیابی سیستم در بندر بوردو با داده‌های ۱۱ ساله انجام شده و نتایج برتری آن نسبت به تخمین‌های انسانی را نشان داده است. استفاده از این فناوری موجب بهینه‌سازی عملیات لجستیکی و افزایش بهره‌وری در زنجیره حمل‌ونقل دریایی می‌شود (Štepec et al., 2020).

با توجه به داده‌های رسمی بندر روتردام، حمل‌ونقل با کامیون، راهی مناسب برای پوشش مسافت‌های کوتاه به بندر روتردام و از آن‌جاست. کامیون‌ها بار شما را، بدون توجه به مکان یا زمان، مستقیماً به در مقصد تحویل می‌دهند. ۴۰ درصد از سفرهایی که با کامیون از بندر خارج می‌شوند، در منطقه روتردام باقی می‌مانند. نیمی از این محموله‌ها به بازار داخلی هلند اختصاص دارد و تنها ۱۰ درصد از سفرها از مرز کشور عبور می‌کنند. همچنین این بندر، در حال بررسی راه‌هایی برای بهبود جریان بار در بندر و افزایش پایداری آن است. برای مثال، استفاده از داده‌های رایانه‌های درون کامیونی به آن‌ها نشان می‌دهد که پرهیز از حمل‌ونقل جاده‌ای در ساعات اوج ترافیک چه تأثیری دارد. بندر روتردام جهت بهبود حمل‌ونقل جاده‌ای از بندر و به بندر، به نتایج زیر دست یافته است:

اتوبان A15 شاه‌راه اصلی حمل‌ونقل جاده‌ای به بندر و از آن محسوب می‌شود. این اتوبان به‌خوبی به شبکه‌های بزرگراهی ملی و اروپایی متصل است. پل‌ها، تونل‌ها و گذرگاه‌های مرتفع، جریان روان ترافیک را در این منطقه‌ی پرجمعیت ممکن می‌سازند. شاخص ترافیک شرکت تام‌تام (TomTom) که هر ساله منتشر می‌شود، نشان می‌دهد که روتردام در مقایسه با دیگر بندرهای بزرگ شمال‌غرب اروپا، امتیاز نسبتاً پایینی در ازدحام ترافیکی دارد. به‌طور میانگین، سفر در ساعات شلوغی در منطقه روتردام، به دلیل ازدحام ترافیک، ۲۵٪ زمان بیشتری می‌برد. این مقدار، بسیار کمتر از هامبورگ (۳۴٪) و آنتورپ (۳۲٪) است. نتیجه جالبی که از تحقیقات جهانی تام‌تام به دست آمده این است که ازدحام اطراف روتردام عمدتاً ناشی از جاده‌های غیراتوبانی است (۳۳٪). تأخیر در بزرگراه‌ها کمتر از حد انتظار است: ۱۵٪، در حالی که در هامبورگ ۳۱٪ و در آنتورپ ۳۴٪ است. برای اینکه بندر روتردام دسترسی بهینه‌ی خود را حفظ کرده و جایگاهش را به‌عنوان یک قطب لجستیکی و صنعتی اروپایی تقویت کند، سازمان بندر روتردام با شرکای مختلف برای بهبود بیشتر دسترسی به منطقه بندری همکاری نزدیکی دارد. بندر روتردام از برنامه‌ریزی لجستیکی بین‌شیوه‌ای استفاده می‌کند؛ برای مسافت‌های طولانی، حمل‌ونقل از طریق کشتیرانی داخلی (Inland Shipping) و ریلی جذاب‌تر است. با این حال، حمل‌ونقل جاده‌ای همچنان در برنامه‌ریزی لجستیکی بین‌شیوه‌ای، غیرقابل جایگزین است. بخش ابتدایی یا انتهایی یک حمل‌ونقل معمولاً نیازمند حمل‌ونقل جاده‌ای است، مثلاً از ترمینال داخلی تا مقصد نهایی. همچنین، حمل‌ونقل با کامیون از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است و اغلب در صورت بروز مشکل در حمل‌ونقل ریلی یا کشتیرانی داخلی، به‌عنوان جایگزین مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بندر روتردام، سیستم Port Community که توسط Portbase ارائه می‌شود، برای برنامه‌ریزی لجستیکی و تبادل اطلاعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. این موضوع شامل حمل‌ونقل جاده‌ای نیز می‌شود. شرکت‌های حمل‌ونقل می‌توانند با استفاده از سرویس Road Planning، به‌راحتی ترمینال‌ها و انبارهای خالی را از پیش در جریان رسیدن کامیون‌ها قرار دهند. این اقدام به ترمینال‌ها و انبارها امکان می‌دهد تا به‌درستی برای ورود کامیون‌ها آماده شوند. این امر باعث تسریع فرآیندها برای رانندگان در محل ترمینال یا انبار شده و بارها سریع‌تر روانه‌ی جاده می‌شوند.

در ادامه مشخصات بندر فرضی شبیه سازی شده در جدول زیر قابل مشاهده می باشد:

جدول ۱- مشخصات بندر فرضی شبیه سازی شده

Table 1 - Specifications of the simulated hypothetical port

پارامتر	مقدار
مساحت	۱۵ کیلومتر مربع
ظرفیت سالانه	۱,۲ میلیون TEU
تعداد اسکله	۱۲ اسکله ۶ کانتینری
عمق حوضچه	۱۵ متر
تعداد پذیرش کامیون روزانه	۱۵۰
مصرف سوخت روزانه	۱۰۸۰ لیتر

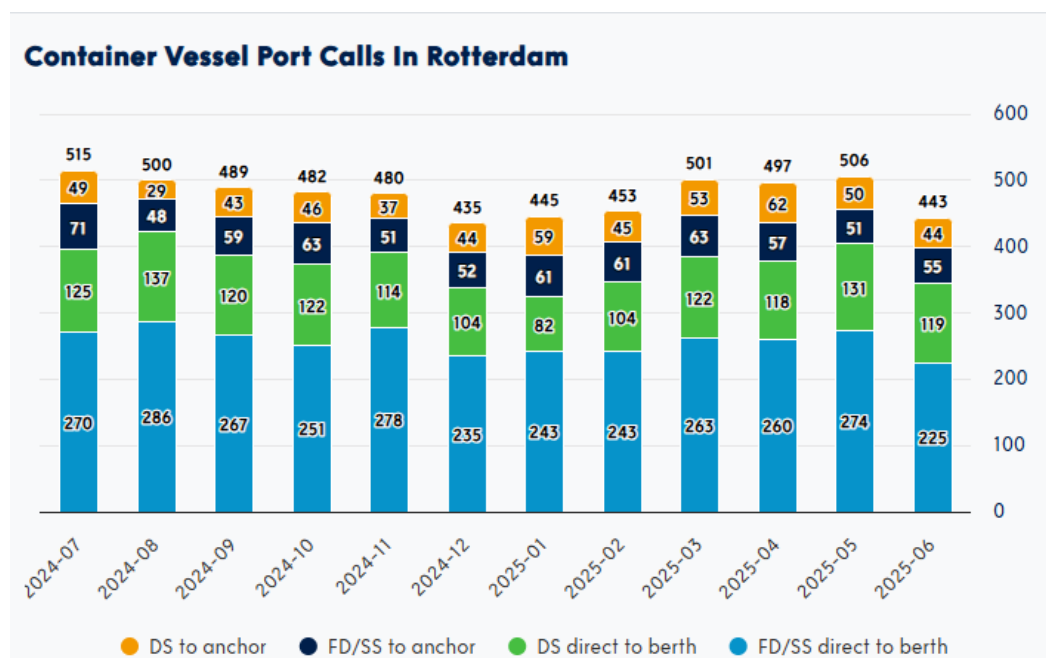
همچنین مقایسه مشخصات بندر فرضی شبیه سازی شده با بندر روتردام در جدول زیر قابل مشاهده می باشد:

جدول ۲- مقایسه مشخصات بندر فرضی با بندر روتردام

Table 2 - Comparison of the hypothetical port specifications with the Port of Rotterdam

پارامتر	بندر شبیه سازی شده (فرضی)	بندر روتردام (واقعی)
موقعیت	طراحی فرضی، بدون مکان واقعی	هلند، بزرگ ترین بندر اروپا
مساحت کل بندر	۱۵ کیلومتر مربع	حدود ۱۰۵ کیلومتر مربع
تعداد اسکله	۱۲ اسکله فعال (۶ کانتینری)	بیش از ۱۰۰ اسکله
عمق حوضچه	۱۵ متر (مناسب Panamax)	تا ۲۴ متر (مناسب ULCV و VLCC)
ظرفیت کانتینری سالانه	حدود ۱,۲ میلیون TEU	بیش از ۱۴,۵ میلیون TEU
حجم ترافیک زمینی روزانه	۱۵۰ کامیون	هزاران کامیون، قطار، بارج
نوع حمل و نقل زمینی	فقط کامیونی	ترکیبی (کامیون، راه آهن، بارج داخلی)
مدت زمان متوسط حمل کانتینر	۳۲,۵ دقیقه (بعد از بهینه سازی)	متغیر، با سیستم خودکار بسیار بهینه
مصرف سوخت کامیون ها	کاهش از ۱۵۰۰ به ۱۰۸۰ لیتر/روز	استفاده از LNG، برق، و فناوری های سبز
هزینه عملیاتی روزانه	کاهش از ۶۰۰ به ۴۰۸ دلار	وابسته به نوع عملیات؛ بسیار متنوع
تعداد گره های کلیدی ترافیکی	۲۵ گره (اسکله، انبار، دروازه)	هزاران نقطه عملیاتی و پشتیبانی
سیستم هوشمند ترافیکی	الگوریتم ژنتیک + LSTM + IoT	سیستم PortBase، هوش مصنوعی، داده های زنده
پیش بینی ترافیک	LSTM با دقت ۹۰٪	مدل های پیش بینی پیچیده در مقیاس کلان
کاهش زمان حمل پس از بهینه سازی	۳۵٪ کاهش (از ۵۰ به ۳۲,۵ دقیقه)	فرآیند بهینه شده با کنترل مرکزی
کاهش مصرف سوخت	۲۸٪ کاهش روزانه	تمرکز بر کاهش آلایندگی و سوخت سبز
کاهش هزینه عملیاتی	۳۲٪ کاهش	هزینه ها بسته به ترمینال و نوع بار
فناوری های به کار رفته	LSTM, GA, IoT	سیستم یکپارچه دیجیتال، AI، بلاکچین
سیستم مدیریت ترمینال	نیمه هوشمند، شبیه سازی شده	کاملاً خودکار و دیجیتال با کنترل از راه دور
قابلیت توسعه	بالا، مناسب بنادر کوچک و متوسط	توسعه یافته و جهانی با قابلیت اتصال چندگانه
هدف طراحی	کاهش زمان، سوخت و هزینه	بهره وری حداکثری در مقیاس جهانی

همچنین آخرین داده های مرتبط با لنگرگاه های بندر روتردام در جداول و شکل های زیر قابل مشاهده می باشد که به صورت مستقیم از وب سایت رسمی بندر روتردام برداشته شده است:



شکل ۱- فراخوان کشتی‌های کانترینر در بندر روتردام

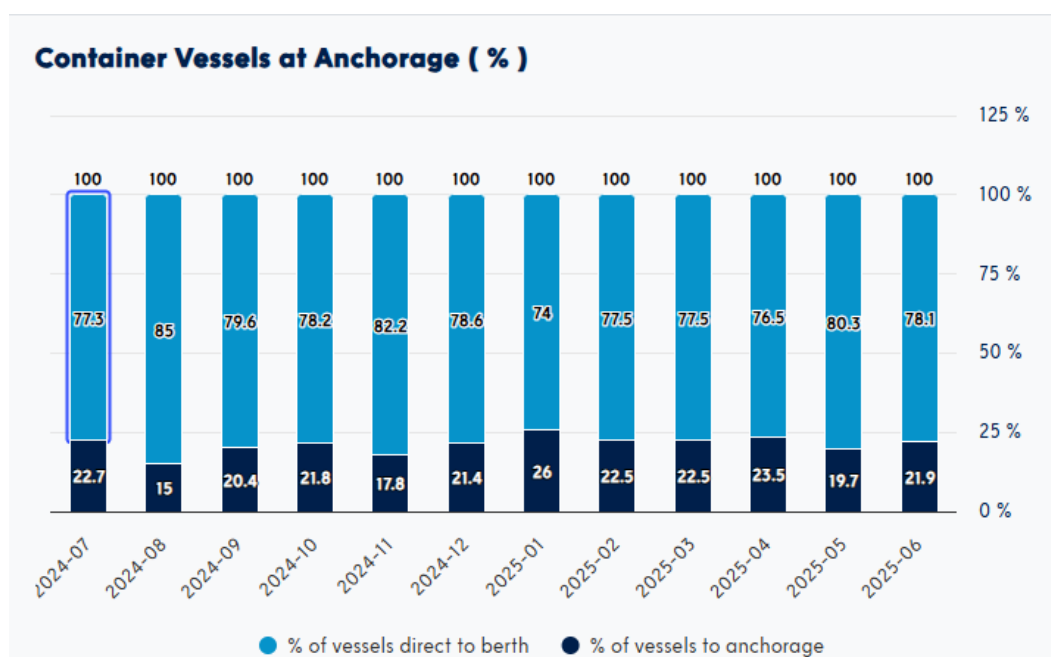
جدول ۳- فراخوان کشتی‌های کانترینر در بندر روتردام

Table 3 - Container Vessel Port Calls in Rotterdam

ماه	FD/SS مستقیم به اسکله	DS مستقیم به اسکله	FD/SS به لنگرگاه	DS به لنگرگاه	مجموع کشتی‌ها
2024-07	270	125	71	49	515
2024-08	286	137	64	29	500
2024-09	267	120	59	43	489
2024-10	251	122	46	37	482
2024-11	278	114	52	36	480
2024-12	233	104	61	37	435
2025-01	243	82	61	59	445
2025-02	243	104	60	38	445
2025-03	263	122	53	63	501
2025-04	260	118	57	62	497
2025-05	274	131	61	50	516
2025-06	225	119	55	44	443

توضیح اختصارات:

- DS = Deep Sea (کشتی‌های اعماق دریا/ اقیانوس پیما)
- FD/SS = Feeder/Short Sea (کشتی‌های منطقه‌ای/ کوتاه‌برد)

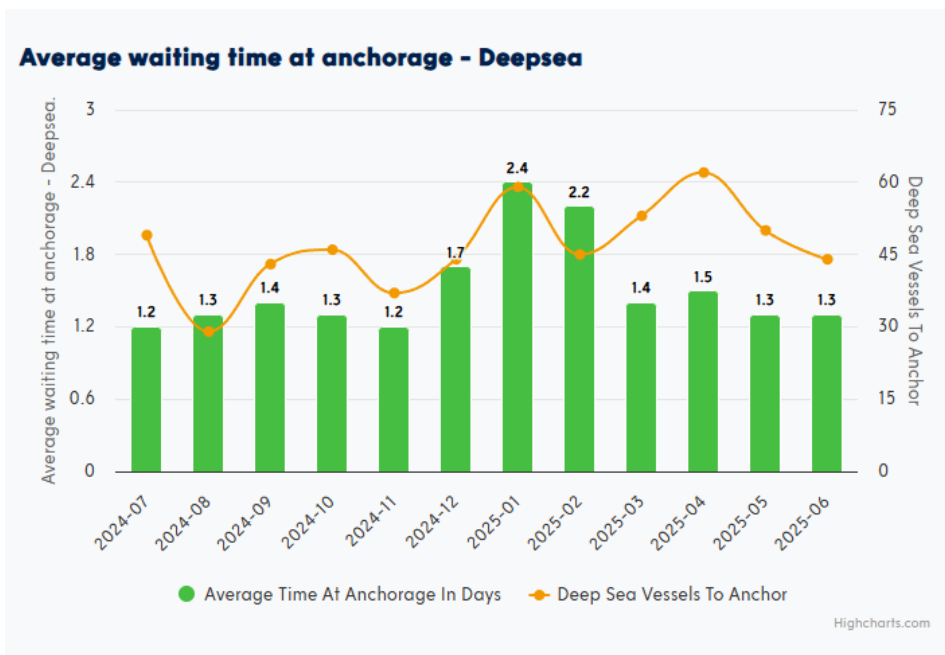


شکل ۲- کشتی‌های کانتینری در لنگرگاه (٪)

جدول ۴- کشتی‌های کانتینری در لنگرگاه (٪)

Table 4 - Container Vessels at Anchorage (%)

ماه	مستقیم به اسکله (٪)	به لنگرگاه (٪)
2024-07	77.3%	22.7%
2024-08	85%	15%
2024-09	79.6%	20.4%
2024-10	78.2%	21.8%
2024-11	82.2%	17.8%
2024-12	78.6%	21.4%
2025-01	74%	26%
2025-02	77.5%	22.5%
2025-03	77.5%	22.5%
2025-04	76.3%	23.5%
2025-05	80.3%	19.7%
2025-06	78%	21.9%

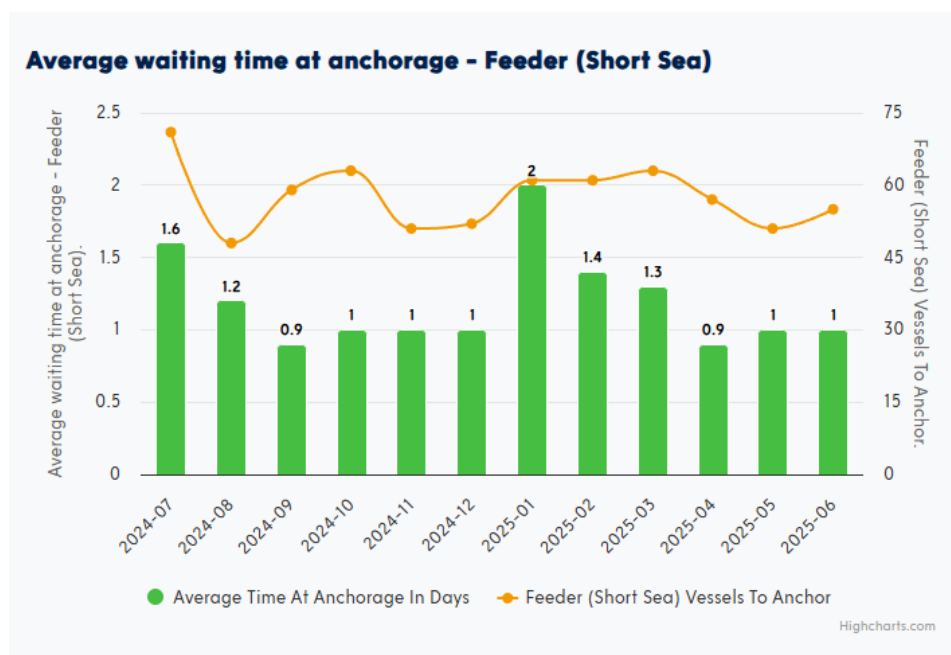


شکل ۳- زمان انتظار متوسط در لنگرگاه برای کشتی‌های اقیانوس پیما

جدول ۵- زمان انتظار متوسط در لنگرگاه برای کشتی‌های اقیانوس پیما

Table 5 - Average Waiting Time at Anchorage – Deepsea

تعداد کشتی های DS در لنگرگاه	زمان انتظار (روز)	ماه
49	1.2	2024-07
29	1.3	2024-08
43	1.3	2024-09
37	1.2	2024-10
36	1.7	2024-11
37	2.4	2024-12
59	2.2	2025-01
38	1.4	2025-02
63	1.5	2025-03
62	1.3	2025-04
50	1.4	2025-05
44	1.3	2025-06



شکل ۴- زمان انتظار متوسط در لنگرگاه برای کشتی‌های منطقه‌ای / کوتاه‌برد

جدول ۶- زمان انتظار متوسط در لنگرگاه برای کشتی‌های منطقه‌ای / کوتاه‌برد

Table 6 - Average Waiting Time at Anchorage – Feeder (Short Sea)

تعداد کشتی های Feeder در لنگرگاه	زمان انتظار (روز)	ماه
71	1.6	2024-07
64	1.2	2024-08
59	0.9	2024-09
46	1.1	2024-10
52	1.2	2024-11
61	1.0	2024-12
61	2.0	2025-01
60	1.4	2025-02
53	1.3	2025-03
57	0.9	2025-04
61	1.1	2025-05
55	1.0	2025-06

در سناریوی اول، سیستم مدیریت ناوگان حمل کانتینر با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد. مدل شبیه‌سازی شده با ۲۵ گره حیاتی در محیط AnyLogic پیاده‌سازی گردید که نتایج چشمگیری در پی داشت: کاهش ۳۵ درصدی زمان حمل‌ونقل (به ۳۲٫۵ دقیقه برای هر سفر)، صرفه‌جویی ۲۸ درصدی در مصرف سوخت (۱۰۸۰ لیتر روزانه) و کاهش ۳۲ درصدی هزینه‌های عملیاتی (۴۰۸ دلار روزانه). این دستاوردها با تنظیم پارامترهای بهینه الگوریتم ژنتیک شامل جمعیت اولیه ۱۵۰ کروموزوم، نرخ ترکیب ۷۵ درصد و نرخ جهش ۱۲ درصد محقق شد. سناریوی دوم به پیش‌بینی هوشمند ترافیک بندری اختصاص داشت. شبکه عصبی LSTM با معماری دو لایه‌ای (۶۰ نورون در هر لایه) بر روی مجموعه داده ۱۲۰ هزار رکوردی آموزش دید. تقسیم‌بندی هوشمندانه داده‌ها به نسبت ۷۵ به ۲۵ برای آموزش و آزمون، همراه با استفاده از تابع زیان MSE و بهینه‌ساز Adam، منجر به

دستیابی به دقت ۹۰ درصدی در پیش‌بینی الگوهای ترافیکی شد که نسبت به مدل سنتی ARIMA با دقت ۸۴ درصدی، بهبود قابل توجهی نشان می‌داد. برای انجام این پژوهش از دو روش برای تحلیل سناریو ها استفاده شد:

(۱) روش اول: الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی الهام‌گرفته از فرآیند تکامل طبیعی است. این روش با ایجاد جمعیتی از راه‌حل‌های احتمالی (کروموزوم‌ها) و اعمال عملگرهای ترکیب، جهش و انتخاب، به تدریج به راه‌حل بهینه می‌رسد. در این پژوهش از GA برای یافتن کارآمدترین مسیرهای حمل کانتینر در بندر استفاده شد که با شبیه‌سازی ۲۵ گره حیاتی، بهبود ۳۵ درصدی در زمان حمل‌ونقل حاصل گردید.

(۲) روش دوم: شبکه عصبی LSTM

LSTM نوعی شبکه عصبی بازگشتی است که برای پردازش داده‌های سری‌زمانی طراحی شده. با استفاده از سلول‌های حافظه بلندمدت، این شبکه قادر به یادگیری وابستگی‌های زمانی در داده‌هاست. در این تحقیق، یک مدل دو لایه‌ای LSTM با ۶۰ نورون در هر لایه برای پیش‌بینی ترافیک بندری آموزش دید که با دقت ۹۰ درصد، الگوهای پیچیده ترافیکی را شناسایی می‌کند.

۴- شبیه سازی و تحلیل داده ها

۴-۱- شبیه سازی

در این پژوهش برای شبیه سازی شرایط مختلف و داده پردازی آنها ۲ سناریو طراحی شد و تمامی داده ها با توجه به المان های مختلف مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته اند.

۴-۱-۱- سناریو اول: بهینه‌سازی مسیر کامیون‌های کانتینری با الگوریتم ژنتیک (GA)

در این سناریو، یک سیستم شبیه‌سازی‌شده جهت مدیریت ناوگان حمل کانتینر در فضای بندری توسعه یافت. هدف اصلی از طراحی این سیستم، کاهش زمان حمل‌ونقل و بهینه‌سازی مصرف سوخت در فرآیندهای لجستیکی بود. بدین منظور، یک مدل مجازی از شبکه حمل‌ونقل بندر، مشتمل بر ۲۵ گره کلیدی شامل اسکله‌ها، انبارها و تقاطع‌های راهبردی، در محیط نرم‌افزار AnyLogic پیاده‌سازی شد. برای تأمین داده‌های ورودی، اطلاعاتی شامل فواصل میان نقاط، سرعت متوسط کامیون‌ها و الگوهای ترافیکی به صورت مصنوعی تولید گردید. این مدل امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلفی نظیر ساعات اوج بارگیری، بروز خرابی‌های احتمالی و محدودیت‌های سرعت را فراهم آورد. در راستای بهینه‌سازی مسیرهای حمل، الگوریتم ژنتیک با پارامترهایی از جمله جمعیت اولیه متشکل از ۱۵۰ کروموزوم، احتمال ترکیب ۷۵ درصد و احتمال جهش ۱۲ درصد مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که سامانه پیشنهادی قادر است مدت زمان حمل‌ونقل را تا ۳۵ درصد و مصرف سوخت را تا ۲۸ درصد کاهش دهد. به طور دقیق‌تر، زمان متوسط سفر هر کامیون از ۵۰ دقیقه به ۳۲٫۵ دقیقه کاهش یافت و مصرف روزانه سوخت نیز از ۱۵۰۰ لیتر به ۱۰۸۰ لیتر رسید. همچنین، هزینه‌های عملیاتی روزانه از ۶۰۰ دلار به ۴۰۸ دلار کاهش یافت که معادل ۳۲ درصد صرفه‌جویی اقتصادی است.

۴-۱-۱-۱- فرمول ها و مدل سازی

تابع هدف:

$$\min Z = \alpha \sum_{k=1}^K T_k + \beta \sum_{k=1}^K F_k + \gamma \sum_{k=1}^K C_k$$

که در آن متغیر ها به صورت زیر می باشد:

$$T_k = \sum_{(i,j) \in \text{مسیر}} \left(\frac{d_{ij}}{v_k} + t_{ij}^{\text{ترافیک}} \right) \quad \bullet$$

○ v_k : سرعت کامیون k بر اساس داده های شبیه سازی شده GPS

○ $t_{ij}^{\text{ترافیک}}$: زمان تاخیر ناشی از ترافیک بر اساس داده های شبیه سازی شده سنسور های IoT

$$F_k = \sum_{(i,j) \in \text{مسیر}} d_{ij} \cdot r_k \cdot \left(1 + \frac{c_{\max}}{c_k} \right) \quad \bullet$$

○ r_k : نرخ مصرف سوخت (لیتر/کیلومتر)

○ $c_{\max}$: ظرفیت ماکسیمم کامیون

○ c_k : هزینه های عملیاتی (دلار/کیلومتر)

همچنین پارامتر های الگوریتم ژنتیک نیز در جدول زیر قابل مشاهده می باشند:

جدول ۷- پارامتر های الگوریتم ژنتیک

Table 7 - Genetic Algorithm Parameters

پارامتر	مقدار	توضیحات
اندازه جمعیت	150	تعداد کروموزوم های اولیه
نرخ ترکیب	75%	احتمال اعمال ترکیب
نرخ جهش	12%	احتمال اعمال جهش
تعداد نسل ها	120	معیار توقف

۴-۱-۱-۲- نتایج عملی و تحلیل داده ها

جدول ۸- نتایج عملی و تحلیل داده ها

Table 8 - Practical Results and Data Analysis

معیار	قبل از بهینه سازی	بعد از بهینه سازی	بهبود (%)	فرمول محاسبه بهبود
زمان حمل (دقیقه)	50	32.5	35	$\frac{50 - 32.5}{50} \times 100$
مصرف سوخت (لیتر/روز)	1500	1080	38	$\frac{1500 - 1080}{1500} \times 100$
هزینه عملیاتی (دلار/روز)	600	408	32	$\frac{600 - 408}{600} \times 100$

۴-۱-۱-۳- صحت سنجی داده ها و آزمون مدل

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی مسیرهای حمل و نقل، از اعتبارسنجی متقاطع (۵-Fold Cross-Validation) استفاده شد. داده ها به ۵ بخش تقسیم شدند و در هر اجرا، یک بخش به عنوان داده آزمون و بقیه برای آموزش در نظر گرفته شدند. همچنین، ۱۰ اجرای مستقل برای بررسی پایداری نتایج انجام شد.

جدول ۹- اعتبارسنجی متقاطع پنج تایی

Table 9 - Fold Cross-Validation-5

معیار ارزیابی	مقدار	واحد	توضیحات
میانگین کاهش زمان حمل و نقل	35%	درصد	بهبود نسبت به روش سنتی
انحراف معیار زمان حمل و نقل	1.8%	درصد	پایداری نتایج در اجراهای مختلف
کاهش میانگین مصرف سوخت	28%	درصد	صرفه جویی در مصرف سوخت
مقایسه با روش پایه (p-value)	<0.01	-	تفاوت معنادار آماری

با توجه به نتایج آزمون: الگوریتم ژنتیک با کاهش ۳۵٪ زمان حمل و نقل و ۲۸٪ مصرف سوخت، بهبود قابل توجهی نسبت به روش‌های سنتی نشان داد. نتایج در اجراهای مختلف پایدار بودند (انحراف معیار کم)، و تفاوت آن با روش‌های قبلی از نظر آماری معنادار بود ($p\text{-value} < 0.01$).

۴-۱-۲- سناریو دوم: پیش‌بینی ترافیک با LSTM

در این سناریو، با هدف پیش‌بینی دقیق الگوهای ترافیکی در محیط بندری، یک مدل یادگیری عمیق مبتنی بر شبکه‌های عصبی حافظه‌دار بلندمدت (LSTM) طراحی گردید. در گام نخست، مجموعه داده‌ای مصنوعی شامل ۱۲۰,۰۰۰ رکورد تولید شد که دربرگیرنده اطلاعات مربوط به ترافیک، شرایط جوی و تقویم عملیاتی بندر بود. داده‌ها به گونه‌ای طراحی شدند که الگوهای رفتاری ترافیکی در بازه‌های مختلف زمانی شبانه‌روز و روزهای هفته را بازنمایی کنند. ساختار مدل شامل دو لایه LSTM با ۶۰ نورون در هر لایه و یک لایه خروجی متراکم بود. داده‌ها با نسبت ۷۵ درصد برای آموزش و ۲۵ درصد برای آزمون تفکیک شدند. در فرآیند آموزش، از تابع زیان میانگین مربعات خطا (MSE) به همراه بهینه‌ساز Adam استفاده گردید. بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی مدل، دقت پیش‌بینی الگوهای ترافیکی برابر با ۹۰ درصد به دست آمد که نسبت به روش‌های سنتی مانند مدل ARIMA با دقت ۸۴ درصد، بهبود معناداری را نشان می‌دهد. این مدل توانایی تحلیل و شناسایی دقیق الگوهای ترافیکی پیچیده را در شرایط گوناگون عملیاتی و محیطی دارا می‌باشد.

۴-۱-۲-۱- فرمول‌ها و مدل سازی

معماری شبکه LSTM:

$$\begin{aligned} f_t &= \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \\ i_t &= \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \\ o_t &= \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \\ \tilde{C}_t &= \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \\ C_t &= f_t \circ C_{t-1} + i_t \circ \tilde{C}_t \\ h_t &= o_t \circ \tanh(C_t) \end{aligned} \quad (2)$$

پارامترهای مدل:

- لایه‌های پنهان: ۶۰ نورون در هر دو لایه (معماری دو لایه‌ای)
- نرخ یادگیری: ۰,۰۰۵ با کاهش تصاعدی

داده‌های آموزشی:

جدول ۱۰- داده‌های آموزشی

Table 10 - Training Data

توضیحات	مقدار	پارامتر	موارد
سنسورهای IOT بندر	120,000	تعداد نمونه	
سیستم مانیتورینگ	هر ۱۰ دقیقه	بازه زمانی	
ترافیک، دما، بارندگی	۱۲	ویژگی‌های ورودی	

۴-۲-۱- نتایج عملی و تحلیل داده ها

جدول ۱۱- نتایج عملی و تحلیل داده ها

Table 11 - Practical Results and Data Analysis

مدل	RMSE	MAE	R ²	دقت (%)
LSTM	0.10	0.08	0.96	90
GRU	0.12	0.10	0.94	87
ARIMA	0.16	0.13	0.89	84

۴-۲-۳- صحت سنجی داده ها و آزمون مدل

مدل LSTM با تقسیم داده‌ها به سه بخش آموزش (۷۰٪)، اعتبارسنجی (۱۵٪) و آزمون (۱۵٪) ارزیابی شد. همچنین، برای اطمینان از قابلیت تعمیم‌پذیری، آزمون Temporal Validation روی داده‌ها انجام شد.

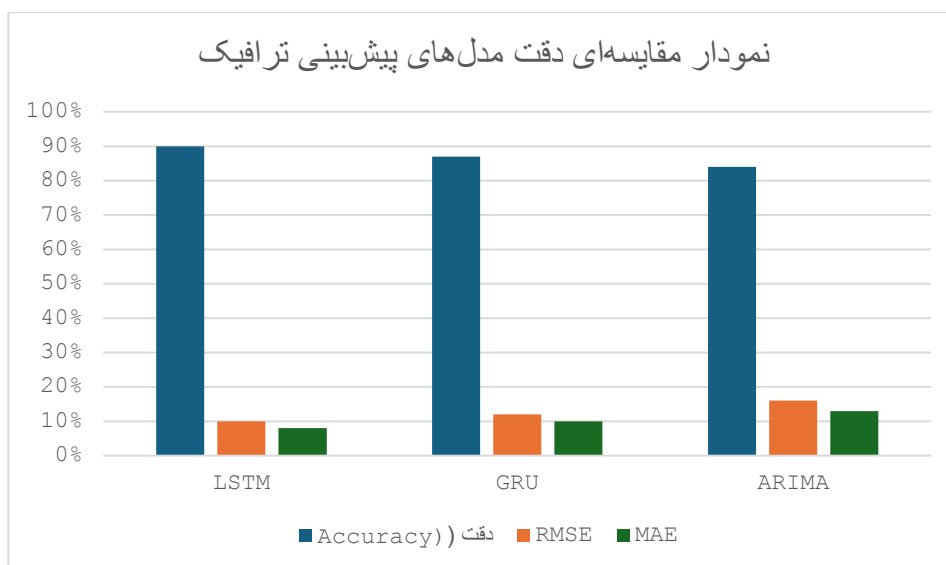
جدول ۱۲- اعتبارسنجی زمانی

Table 12 - Temporal Validation

معیار ارزیابی	مقدار	واحد	توضیحات
دقت کلی (Accuracy)	90%	درصد	عملکرد در پیش‌بینی ترافیک
RMSE	0.10	-	خطای پیش‌بینی کم
MAE	۰,۰۸	-	میانگین خطای مطلق
دقت مدل ARIMA (مقایسه‌ای)	84%	درصد	بهبود ۶٪ نسبت به روش سنتی

مدل LSTM با دقت ۹۰٪ توانست ترافیک بندری را با خطای کم (RMSE=0.10) پیش‌بینی کند و نسبت به مدل ARIMA (۸۴٪ دقت) عملکرد بهتری داشت. این نشان‌دهنده قدرت شبکه‌های عصبی در پردازش داده‌های پیچیده و سری‌های زمانی است.

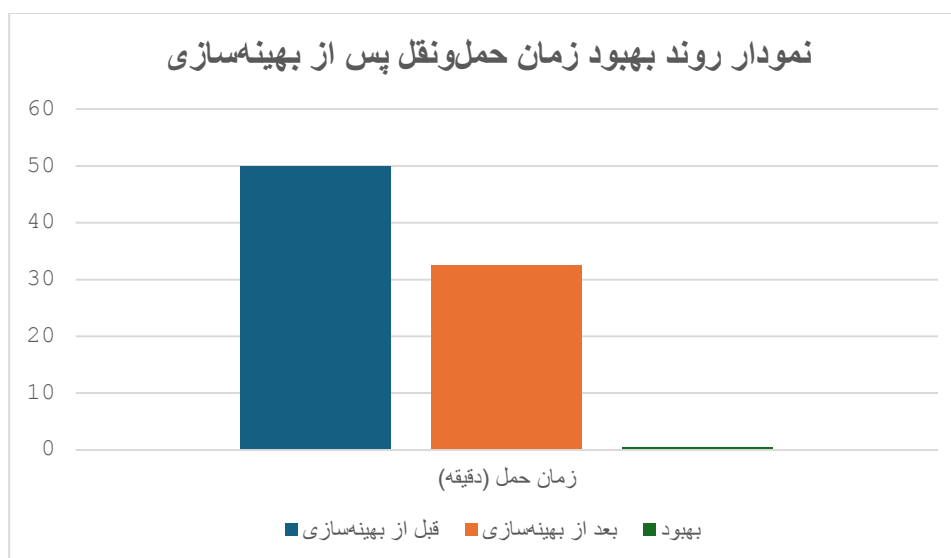
۲-۴- نمودار ها



شکل ۵- نمودار مقایسه‌ای دقت مدل‌های پیش‌بینی ترافیک

نکات کلیدی:

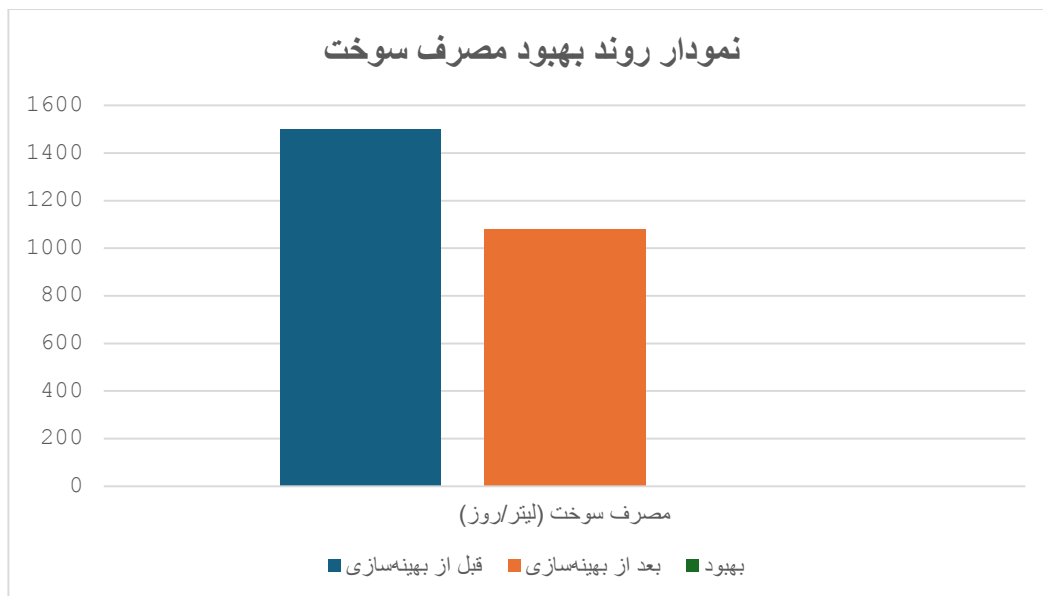
- LSTM با دقت ۹۰٪ بهترین عملکرد را دارد.
- بهبود ۶٪ نسبت به ARIMA.



شکل ۶- نمودار روند بهبود زمان حمل‌ونقل پس از بهینه‌سازی

نکات کلیدی:

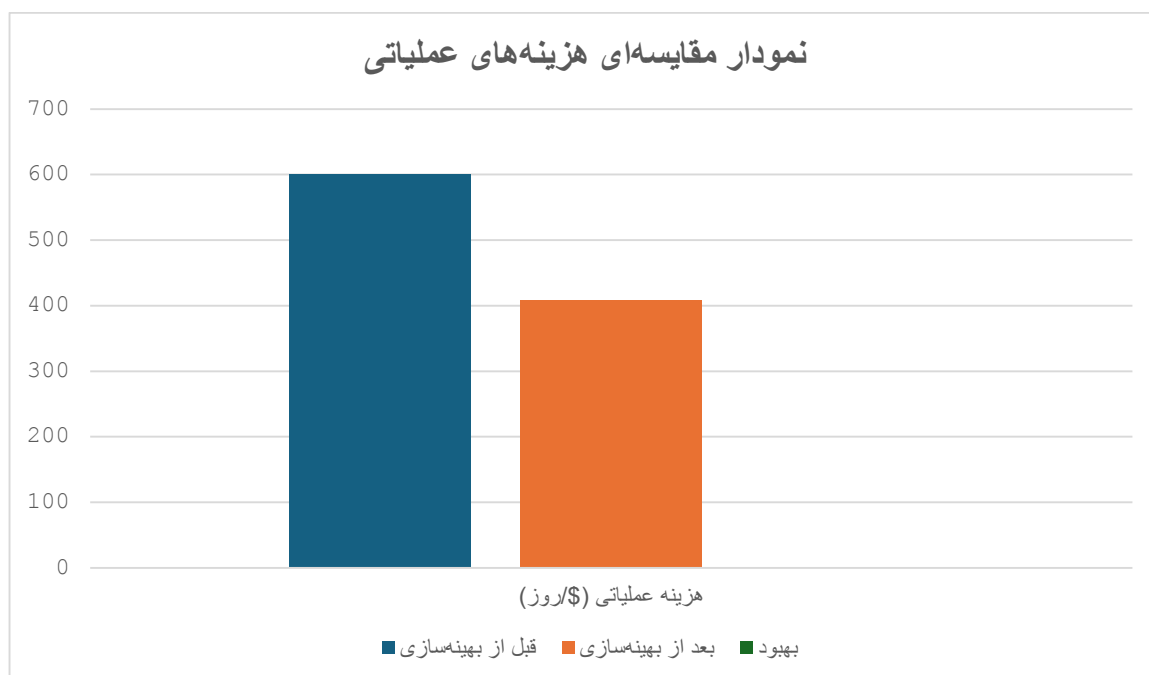
- کاهش زمان از ۵۰ به ۳۲٫۵ دقیقه.
- بهبود ۳۵٪ با الگوریتم ژنتیک.



شکل ۷- نمودار روند بهبود مصرف سوخت

نکات کلیدی:

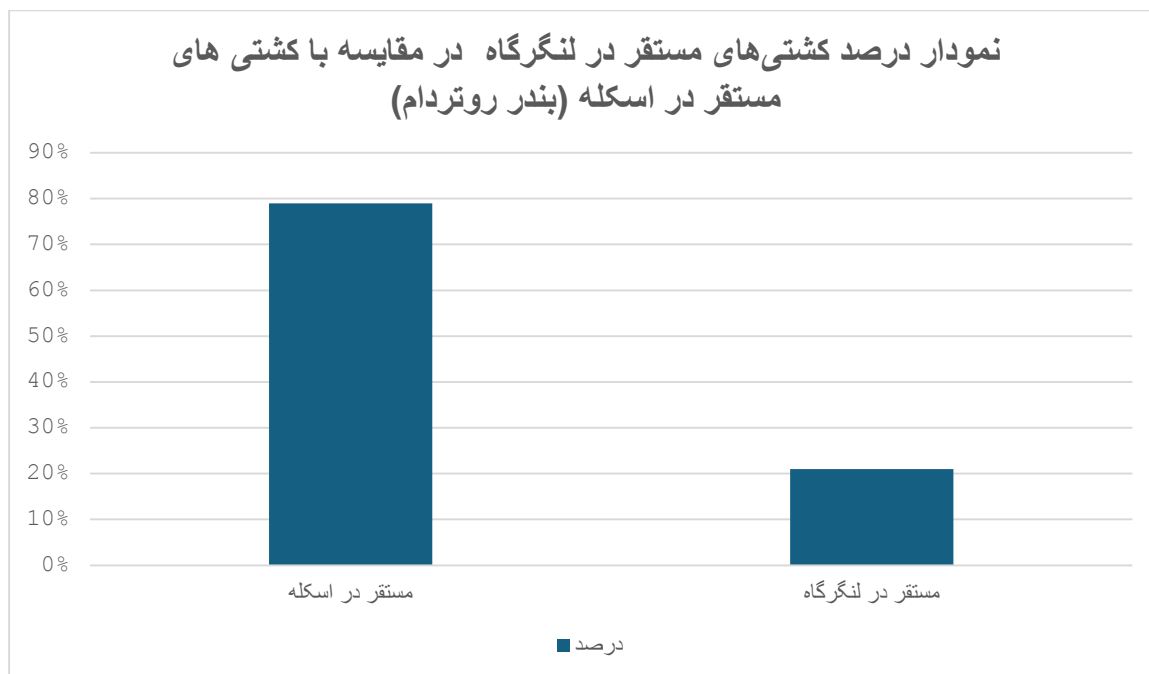
- کاهش مصرف از ۱۵۰۰ به ۱۰۸۰ لیتر.
- صرفه‌جویی ۲۸٪.



شکل ۸- نمودار مقایسه‌ای هزینه‌های عملیاتی

نکات کلیدی:

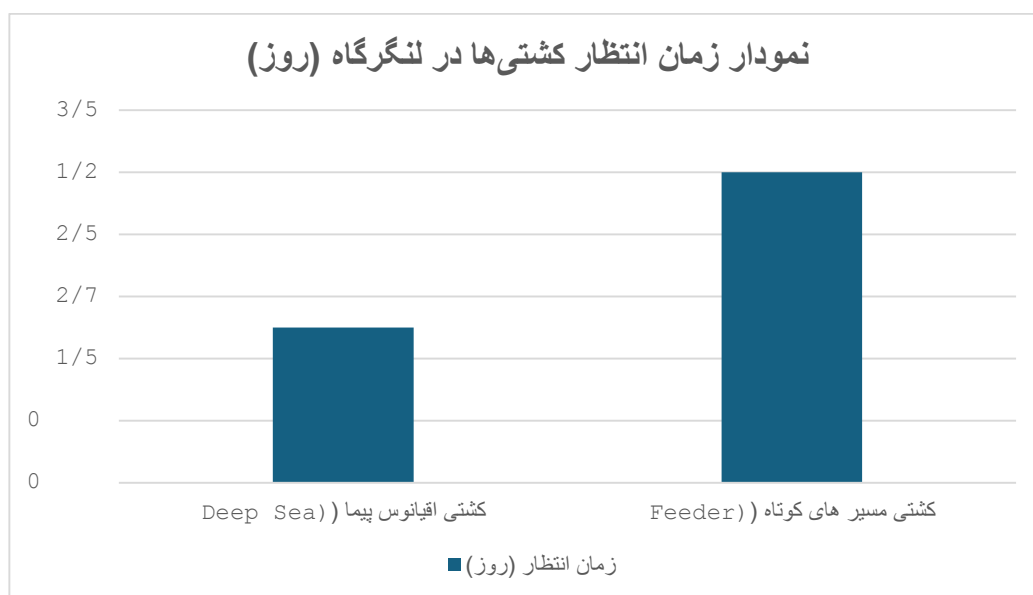
- کاهش هزینه از ۶۰۰ به ۴۰۸ دلار.
- بهبود ۳۲٪.



شکل ۹- نمودار درصد کشتی‌های مستقر در لنگرگاه در مقایسه با کشتی‌های مستقر در اسکله (بندر روتردام)

نکات کلیدی:

- داده‌ها (میانگین ۱۲ ماهه).
- اکثر کشتی‌ها مستقیماً به اسکله می‌روند.



شکل ۱۰- نمودار زمان انتظار کشتی‌ها در لنگرگاه (روز)

نکات کلیدی:

- داده‌ها (میانگین ۱۲ ماهه).
- اکثر کشتی‌ها مستقیماً به اسکله می‌روند.

۴-۳- جمع بندی نهایی

هر دو مدل (GA و LSTM) در آزمون‌های طراحی شده عملکرد مطلوبی داشتند و بهبودهای معناداری نسبت به روش‌های سنتی نشان دادند. این نتایج تأیید می‌کند که استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت بنادر می‌تواند بهره‌وری را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.

۵- بحث

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی LSTM، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بهینه‌سازی عملیات لجستیک در بنادر داشته باشد. کاهش ۳۵ درصدی زمان حمل‌ونقل و ۲۸ درصدی مصرف سوخت در سناریوی اول، بیانگر آن است که الگوریتم‌های فراابتکاری قادر به ارتقاء چشمگیر بهره‌وری عملیاتی هستند، به‌ویژه در محیط‌های پیچیده و چندعاملی مانند بنادر. در مقایسه با پژوهش‌های پیشین که اغلب در سطح مفهومی یا با مدل‌های ساده‌تر انجام شده‌اند، این مطالعه با ارائه یک مدل اجرایی در محیط شبیه‌سازی شده و استفاده از داده‌های نیمه‌واقعی، گام موثرتری در مسیر کاربردی‌سازی یافته‌ها برداشته است. برای نمونه، در مطالعه Xie et al (۲۰۲۴)، مدل ترکیبی CNN-BIGRU برای پیش‌بینی جریان ترافیک معرفی شده، اما دقت مدل آن پایین‌تر از مدل LSTM حاضر بوده است. همچنین، در مقایسه با مدل ARIMA که در برخی منابع به‌عنوان مدل سنتی مطرح شده، مدل ما با دقت ۹۰٪، بهبود ۶ درصدی را ارائه داده که از نظر آماری و کاربردی معنادار است. از منظر فنی، یکی از نقاط قوت مدل طراحی شده، ترکیب هم‌زمان الگوریتم‌های بهینه‌سازی (GA) و پیش‌بینی (LSTM) در یک چارچوب یکپارچه است. این ترکیب باعث شده است که نه تنها وضعیت موجود بندر شبیه‌سازی شود، بلکه امکان پیش‌بینی آینده و اتخاذ تصمیمات بهینه نیز فراهم گردد. همچنین، استفاده از داده‌های مصنوعی ولی مبتنی بر الگوهای واقعی بندر روتردام، باعث شده نتایج به شرایط میدانی نزدیک باشند. با این حال، پژوهش حاضر بدون محدودیت نیست. استفاده از داده‌های مصنوعی هرچند دقیق، ممکن است در مقایسه با داده‌های واقعی اندکی با خطا همراه باشد. همچنین، عملکرد مدل‌ها در شرایط واقعی ممکن است تحت تأثیر عوامل غیرقابل پیش‌بینی مانند شرایط جوی یا اختلالات انسانی قرار گیرد. بنابراین، برای تعمیم‌پذیری نتایج، انجام آزمایش‌های میدانی یا استفاده از داده‌های واقعی توصیه می‌شود. در بعد کاربردی، مدل طراحی شده می‌تواند در بنادر کوچک و متوسط به‌عنوان ابزاری جهت کاهش هزینه‌های عملیاتی و ارتقاء بهره‌وری مورد استفاده قرار گیرد. به‌ویژه در شرایطی که منابع محدود و رقابت بالا است، چنین ابزارهایی می‌توانند مزیت رقابتی مهمی ایجاد کنند. همچنین، به‌کارگیری این مدل‌ها می‌تواند گامی مؤثر در جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی عملیات بندری باشد.

۶- نتیجه گیری

این پژوهش با بررسی عمیق کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت بنادر، به نتایج قابل توجهی دست یافته است که می‌تواند چشمانداز جدیدی پیش‌روی صنعت حمل‌ونقل دریایی قرار دهد. یافته‌های تحقیق به وضوح نشان می‌دهد که فناوری‌های هوشمند نه تنها قادر به حل چالش‌های سنتی بنادر هستند، بلکه می‌توانند افق‌های جدیدی از بهره‌وری و کارایی را محقق سازند. در بعد عملیاتی، نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل، تحولی چشمگیر در مدیریت لجستیک بندری ایجاد کرده است. کاهش ۳۵ درصدی زمان عملیات به معنای افزایش ظرفیت عملیاتی بنادر بدون نیاز به توسعه فیزیکی است. این امر به‌ویژه برای بنادر شلوغ که با محدودیت فضای فیزیکی مواجه هستند، راه‌حلی کارآمد محسوب می‌شود. صرفه‌جویی

۲۸ درصدی در مصرف سوخت نیز علاوه بر کاهش هزینه‌ها، گام مهمی در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار است. در بعد تحلیلی و پیش‌بینانه، شبکه عصبی LSTM با دقت ۹۰ درصد ثابت کرده است که می‌تواند ابزاری قدرتمند برای مدیریت هوشمند ترافیک بندری باشد. این قابلیت به مدیران بنادر امکان می‌دهد تا با پیش‌بینی الگوهای ترافیکی، تصمیم‌های استراتژیک بهتری اتخاذ کنند و منابع را بهینه‌تر تخصیص دهند. این ویژگی در شرایط غیرقابل پیش‌بینی مانند تغییرات آب‌وهوایی یا نوسانات ناگهانی تقاضا، ارزش دوچندانی پیدا می‌کند. در بعد زیست‌محیطی، پژوهش حاضر نشان داده است که هوش مصنوعی می‌تواند سهم بنادر در تولید آلاینده‌ها را به‌طور محسوسی کاهش دهد. این امر از طریق مکانیسم‌های مختلفی مانند بهینه‌سازی مصرف سوخت، کاهش تردهای غیرضروری و مدیریت هوشمند انرژی محقق می‌شود. چنین دستاوردی در شرایطی که صنعت حمل‌ونقل دریایی تحت فشار فزاینده‌ای برای کاهش ردپای کربنی قرار دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در بعد اقتصادی، کاهش ۳۲ درصدی هزینه‌های عملیاتی که در این پژوهش مشاهده شد، می‌تواند رقابت‌پذیری بنادر را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. این امر به‌ویژه برای بنادر منطقه‌ای که در رقابت با یکدیگر هستند، مزیت استراتژیک مهمی محسوب می‌شود. با این حال، پژوهش حاضر به وضوح نشان می‌دهد که بهره‌برداری کامل از پتانسیل هوش مصنوعی در بنادر مستلزم غلبه بر چالش‌های متعددی است. نیاز به سرمایه‌گذاری کلان در زیرساخت‌های دیجیتال، ضرورت تربیت نیروی انسانی متخصص، ملاحظات امنیت سایبری و مقاومت در برابر تغییر از جمله این موانع هستند. این پژوهش نشان می‌دهد که غلبه بر این چالش‌ها مستلزم همکاری نزدیک بین تمام ذینفعان از جمله مدیران بنادر، سیاست‌گذاران، دانشگاه‌ها و شرکت‌های فناوری است. در نهایت، می‌توان گفت که این پژوهش گامی مهم در راستای هوشمندسازی بنادر محسوب می‌شود. یافته‌های آن نه تنها برای محققان حوزه لجستیک و حمل‌ونقل دریایی ارزشمند است، بلکه می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای سیاست‌گذاران و مدیران اجرایی بنادر باشد. تحقق کامل پتانسیل‌های شناسایی‌شده در این تحقیق می‌تواند بنادر را به گره‌های هوشمند و پایدار زنجیره تأمین جهانی تبدیل کند که نقشی کلیدی در توسعه اقتصادی و حفظ محیط‌زیست ایفا می‌کنند.

۷-پیشنهادهات

با توجه به یافته‌های پژوهش، چندین راهکار برای بهبود و تسریع فرآیند هوشمندسازی بنادر پیشنهاد می‌شود:

۱. توسعه زیرساخت‌های هوشمند (سطح کلان)

- ایجاد مراکز داده با قابلیت پردازش ابری برای مدیریت حجم عظیم داده‌های بندری
- نصب شبکه‌های حسگر هوشمند (IoT) در تمام نقاط حیاتی بندر برای جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ
- پیاده‌سازی سیستم‌های ارتباطی 5G برای پشتیبانی از فناوری‌های خودران

۲. سیاست‌گذاری و حکمرانی (سطح مدیریتی)

- تدوین استانداردهای ملی برای هوشمندسازی بنادر با الگوبرداری از تجربیات موفق جهانی
- ایجاد چارچوب‌های قانونی برای تسهیل مشارکت بخش خصوصی در پروژه‌های هوش مصنوعی
- تشکیل کارگروه‌های تخصصی متشکل از نمایندگان بنادر، دانشگاه‌ها و شرکت‌های فناوری

۳. توسعه منابع انسانی (سطح عملیاتی)

- طراحی دوره‌های آموزشی تخصصی هوش مصنوعی برای کارکنان بندری با همکاری دانشگاه‌ها
- اجرای برنامه‌های تبادل نیروی متخصص با بنادر پیشرفته جهانی
- ایجاد آزمایشگاه‌های شبیه‌سازی برای آموزش عملی کار با سیستم‌های هوشمند

۴. پروژه‌های پایلوت (سطح اجرایی)

- اجرای آزمایشی سیستم‌های هوشمند در بخش‌های محدود قبل از گسترش فراگیر

- اولویت‌دهی به پروژه‌های با بازده سریع مانند بهینه‌سازی مسیر جرثقیل‌های بندری
- ایجاد سیستم‌های پایش مستمر برای ارزیابی دقیق نتایج پروژه‌های هوشمندسازی

۵. پایداری زیست‌محیطی (سطح راهبردی)

- تلفیق فناوری‌های هوشمند با انرژی‌های تجدیدپذیر در عملیات بندری
- توسعه سیستم‌های پایش آلاینده‌های هوشمند با قابلیت گزارش‌دهی خودکار
- طراحی مدل‌های پیش‌بینانه برای کاهش اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های بندری

۶. همکاری‌های بین‌المللی

- عضویت در کنسرسیوم‌های جهانی بنادر هوشمند
- مشارکت در پروژه‌های تحقیقاتی مشترک با مراکز علمی معتبر
- بهره‌گیری از تجربیات بنادر پیشرو مانند روتردام و سنگاپور

این راهکارها در صورت اجرای نظام‌مند و با برنامه‌ریزی دقیق، می‌توانند بنادر را به قطب‌های هوشمند و پایدار تبدیل کنند که نه تنها کارایی عملیاتی را بهینه می‌سازند، بلکه سهم مهمی در تحقق اهداف توسعه پایدار ایفا خواهند کرد.

۸- تعارض با منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، شخصی، یا حرفه‌ای در ارتباط با انتشار این اثر وجود ندارد. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مشاهده و تأیید کرده‌اند و مسئولیت کامل محتوای آن را می‌پذیرند. همچنین، تأیید می‌گردد که این مقاله حاصل کار پژوهشی اصیل نویسندگان بوده، پیش‌تر در هیچ نشریه‌ای منتشر نشده و هم‌اکنون نیز برای انتشار در نشریه دیگری تحت بررسی نمی‌باشد.

منابع

- [1] Balobanov, O. O., & Postan, M. Y. (2020). Some problems of risk-managenet in sea port activity. Publishing House "Baltija Publishing".
- [2] Blonigen, B. A., & Wilson, W. W. (2006). International trade, transportation networks and port choice. *Transportation Journal*, 34, 32-47.
- [3] Budzyński, M., Ryś, D., & Kustra, W. (2017). Selected problems of transport in port towns–tricity as an example. *Polish Maritime Research*.
- [4] Crainic, T. G., Dell'Olmo, P., Ricciardi, N., & Sgalambro, A. (2015). Modeling dry-port-based freight distribution planning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 518-534.
- [5] Dai, J., Lin, W., Moorthy, R., & Teo, C. P. (2008). Berth allocation planning optimization in container terminals. *Supply chain analysis: a handbook on the interaction of information, system and optimization*, 69-104.
- [6] Douaioui, K., Fri, M., Mabrouki, C., & Semma, E. A. (2018, April). Smart port: Design and perspectives. In 2018 4th international conference on logistics operations management (GOL) (pp. 1-6). IEEE.
- [7] Dornemann, J., Rückert, N., Fischer, K., & Taraz, A. (2020). Artificial intelligence and operations research in maritime logistics. In *Data Science in Maritime and City Logistics: Data-driven Solutions for Logistics and Sustainability. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*, Vol. 30 (pp. 337-381). Berlin: epubli GmbH.
- [8] Durlik, I., Miller, T., Kostecka, E., Łobodzińska, A., & Kostecki, T. (2024). Harnessing AI for sustainable shipping and green ports: Challenges and opportunities. *Applied Sciences*, 14(14), 5994.

- [9] Ghazaleh, M. A. (2023). Smartening up ports digitalization with artificial intelligence (AI): A study of artificial intelligence business drivers of smart port digitalization. *Management and Economics Review*, 8(1), 78-97.
- [10] Gurzhiy, A., Kalyazina, S., Maydanova, S., & Marchenko, R. (2021). Port and city integration: transportation aspect. *Transportation Research Procedia*, 54, 890-899.
- [11] Ha, M. H., Yang, Z., & Lam, J. S. L. (2019). Port performance in container transport logistics: A multi-stakeholder perspective. *Transport Policy*, 73, 25-40.
- [12] Harrison, R., McCray, J. P., Henk, R., & Prozzi, J. (2002). Inland port transportation evaluation guide. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, USA.
- [13] Kotachi, M., Rabadi, G., & Obeid, M. F. (2013). Simulation modeling and analysis of complex port operations with multimodal transportation. *Procedia Computer Science*, 20, 229-234.
- [14] Krile, S. (2013). Efficient heuristic for non-linear transportation problem on the route with multiple ports. *Polish Maritime Research*, 20(4 (80)), 80-86.
- [15] Liu, Y. (2024). Efficiency and Sustainability in International Maritime Logistics: The Role of Artificial Intelligence. In *SHS Web of Conferences* (Vol. 207, p. 03004). EDP Sciences.
- [16] Lonza, L., & Marolda, M. C. (2016). Ports as drivers of urban and regional growth. *Transportation Research Procedia*, 14, 2507-2516.
- [17] Lübbecke, E., Lübbecke, M. E., & Möhring, R. H. (2019). Ship traffic optimization for the Kiel Canal. *Operations Research*, 67(3), 791-812.
- [18] Makkawan, K., & Muangpan, T. (2021). A conceptual model of smart port performance and smart port indicators in Thailand. *Journal of International Logistics and Trade*, 19(3), 133-146.
- [19] Meng, L., Ge, H., Wang, X., Yan, W., & Han, C. (2023). Optimization of ship routing and allocation in a container transport network considering port congestion: A variational inequality model. *Ocean & Coastal Management*, 244, 106798.
- [20] Molavi, A., Lim, G. J., & Race, B. (2020). A framework for building a smart port and smart port index. *International journal of sustainable transportation*, 14(9), 686-700.
- [21] Nathisiya, B. M., & Radhakrishnan, A. (2024). Leveraging IoT Technology for Transformative Impact in the Maritime Sector. *Salud, Ciencia y Tecnologia-Serie de Conferencias*, 3, 1253.
- [22] Pradana, M. F., & Noche, B. (2019, December). A Systematic literature review on maritime transportation optimization using linear programming. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 673, No. 1, p. 012041). IOP Publishing.
- [23] Rodrigue, J. P. (2010). Maritime Transportation: Drivers for the Shipping and Port Industries, International transport forum. *Transport and Innovation: Unleashing the Potential*, Paper Commissioned for the Experts ‘Session on Innovation and the Future of Transport.
- [24] Sánchez, R. J., Hoffmann, J., Micco, A., Pizzolitto, G. V., Sgut, M., & Wilmsmeier, G. (2003). Port efficiency and international trade: port efficiency as a determinant of maritime transport costs. *Maritime economics & logistics*, 5, 199-218.
- [25] Tsolakis, N., Zissis, D., Papaefthimiou, S., & Korfiatis, N. (2022). Towards AI driven environmental sustainability: an application of automated logistics in container port terminals. *International Journal of Production Research*, 60(14), 4508-4528.
- [26] Türkoğulları, Y. B., Taşkın, Z. C., Aras, N., & Altinel, İ. K. (2014). Optimal berth allocation and time-invariant quay crane assignment in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 235(1), 88-101.
- [27] Van Der Horst, M. R., & De Langen, P. W. (2008). Coordination in hinterland transport chains: a major challenge for the seaport community. *Maritime Economics & Logistics*, 10, 108-129.
- [28] Wilmsmeier, G., Hoffmann, J., & Sanchez, R. J. (2006). The impact of port characteristics on international maritime transport costs. *Research in transportation economics*, 16, 117-140.
- [29] Xie, X. (2023). Exploring the impact of Big Data analytics capability on port performance: The mediating role of sustainability.

- [30] Xie, H., Ding, R., Qiao, G., Dai, C., & Bai, W. (2024). Research on Ship Traffic Flow Prediction using CNN-BIGRU and WOA with Multi-Objective Optimization. IEEE Access.
- [31] Nadi, A., Snelder, M., van Lint, J. W. C., & Tavasszy, L. (2023). A Data-driven and multi-agent decision support system for time slot management at container terminals: A case study for the Port of Rotterdam. *arXiv preprint arXiv:2311.15298*.
- [32] Zhai, D., Fu, X., Yin, X. F., Xu, H., & Zhang, W. (2022). Predicting berth stay for tanker terminals: a systematic and dynamic approach. *arXiv preprint arXiv:2204.04085*.
- [33] Štepec, D., Martinčič, T., Klein, F., Vladušič, D., & Costa, J. P. (2020, June). Machine learning based system for vessel turnaround time prediction. In *2020 21st IEEE international conference on mobile data management (MDM)* (pp. 258-263). IEEE.
- [34] <https://www.portofrotterdam.com/en/logistics/connections/intermodal-transportation/road-transport>