Journal of Industrial Innovations 4(1) (2026) 53 – 65

Industrial Innovations

https://jii.araku.ac.ir

ISSN: 3092-7811

A Simulation-Based Optimization Approach for Container Feeder Transportation Services

Marzie Sarvi Hampa [a], Kowsar Mohammadi [b], Ahmad Hakimi [c] *

[a] Department of Industrial Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran. marzie.sarvi78@gmail.com
[b] Department of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology, Iran. k_mohammadi77@cmps2.iust.ac.ir
[c] Department of Industrial Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran. ahmad.hakimi2010@gmail.com

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: Sarvi Hampa M, Mohammadi K, Hakimi A. A Simulation-Based Optimization Approach for Container Feeder Transportation Services. Industrial Innovations. 2026; 4(1):53-65.

https://doi.org/10.66224/jii.4.1.53

KEYWORDS

Discrete Event Simulation;
Container Transportation;
Optimization.

ABSTRACT

Containerized transportation is widely acknowledged as one of the most efficient and cost-effective modes of freight movement in global supply chains. The adoption of containerization has substantially enhanced the efficiency of loading and unloading operations while streamlining international logistics processes. Furthermore, container-based transport contributes to reduced transit times, lower cargo handling costs, improved shipment security, minimized risk of unauthorized access from origin to destination, and more effective utilization of terminal and yard capacities. In this study, discrete-event simulation (DES) is employed as a robust modeling and analytical tool to simulate container transportation flows among the southern ports of Iran. The primary objective is to develop a statistically validated simulation model capable of accurately representing real-world operational dynamics. Additionally, the study seeks to optimize key operational processes in order to enhance system performance, improve resource utilization, and support data-driven decision-making within the container transport network.

Extended Abstract

1. Introduction

Container transportation has become one of the most critical components of global logistics and international trade. The widespread adoption of containerization has significantly improved operational efficiency in loading and unloading processes, reduced transportation costs, enhanced cargo security, and streamlined global supply chains. Today, a substantial share of international trade is conducted through containerized maritime transport, making port efficiency and logistics optimization key determinants of trade competitiveness and economic development.

Among various maritime logistics operations, feeder container transportation plays a crucial role in connecting smaller regional ports to major hub ports within a hub-and-spoke network structure. Feeder vessels transport containers between local ports and central hubs where cargo is consolidated or redistributed to ocean-going vessels. This process, known as transshipment, enhances network connectivity and improves overall system flexibility. Efficient feeder operations can significantly influence port performance, operational costs, vessel waiting times, and cargo dwell time.

Despite substantial investments in port infrastructure and equipment, many decision-making processes related to resource allocation in maritime logistics still lack systematic scientific support. Traditional approaches often rely on experience-based decisions rather than data-driven modeling and optimization methods, which may lead to inefficient resource utilization and operational bottlenecks. Therefore, the development of integrated decision-support models is essential to improve operational efficiency and optimize resource allocation in container transport systems.

* Corresponding author.
E-mail address: ahmad.hakimi2010@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.66224/jii.4.1.53
Received: February 22, 2026; Received in revised form: April 12, 2026; Accepted: May 14, 2026.
Article type: Research Paper

Discrete Event Simulation (DES) has emerged as a powerful analytical tool for modeling complex logistics systems due to its ability to capture stochastic behavior, dynamic interactions, and operational constraints. By combining simulation with optimization techniques, it becomes possible to evaluate system performance under various scenarios and identify optimal resource configurations.

This study aims to develop a simulation-based optimization framework for feeder container transportation services at Shahid Rajaee Port, one of the largest container hubs in the Middle East. The main objective is to construct a statistically validated DES model capable of accurately representing real operational conditions and to determine the optimal combination of feeder vessels under cost and operational constraints.

2. Methodology

The research adopts a simulation-optimization approach using Discrete Event Simulation implemented in Arena software. The case study focuses on feeder container transportation operations at Shahid Rajaee Port, which handles nearly half of Iran's maritime trade and has an annual container handling capacity exceeding three million TEUs.

Data required for the simulation model were collected through two main sources: time-study observations and expert knowledge from port operation specialists. Historical operational data covering a one-year period were analyzed using the Input Analyzer tool to determine appropriate probability distributions for key system processes, including vessel arrival intervals, loading and unloading operations, and feeder vessel service times. Statistical goodness-of-fit tests such as Chi-square and error metrics were used to validate distribution selection.

The logical simulation model represents a hub port, a feeder port, and four categories of feeder vessels differentiated by capacity levels. The model captures the operational flow of container handling, including liner vessel arrival, transshipment processes, feeder vessel allocation, and movement between ports.

Model validation was conducted through both qualitative and quantitative methods. Expert validation ensured the logical correctness of system representation, while statistical validation compared simulation outputs with real operational data using two-sample t-tests. The results confirmed the reliability and accuracy of the simulation model.

To optimize system performance, the OptQuest optimization module was integrated with the simulation model. The objective function was defined as minimizing the average container dwell time in the system, subject to constraints including budget limitations, resource availability, and acceptable waiting times. Multiple simulation runs and replications were conducted to ensure solution stability and robustness.

3. Results and Discussion

Simulation results indicate that the existing feeder transportation system operates with limited resource efficiency due to suboptimal allocation of feeder vessels. The optimization process identified the best combination of feeder vessel types within the defined budget constraints.

The findings demonstrate a significant improvement in system performance after optimization. Specifically, the average container dwell time in the system decreased from approximately 1468 minutes to about 999 minutes, representing an improvement of nearly 32 percent. This reduction reflects enhanced coordination between operational processes, improved resource utilization, and reduced congestion levels within the transport network.

Furthermore, the optimized configuration utilized only about 92.5 percent of the available budget, indicating that performance improvements can be achieved without fully exhausting financial resources. The results highlight the importance of balanced resource allocation rather than simply increasing the number of vessels or equipment.

The study also demonstrates the effectiveness of combining simulation and optimization techniques in addressing complex maritime logistics problems. The integrated approach provides decision-makers with a practical tool for evaluating alternative scenarios, understanding system dynamics, and making informed resource allocation decisions.

4. Conclusion

This research presents a comprehensive simulation-based optimization framework for feeder container transportation services. By developing and validating a detailed DES model, the study successfully captures the operational dynamics of feeder transport systems and identifies optimal resource allocation strategies.

The results confirm that simulation-optimization methods can significantly enhance system efficiency, reduce container dwell times, and support cost-effective decision-making in maritime logistics. The proposed approach provides a practical decision-support tool for port authorities and logistics planners seeking to improve operational performance and optimize resource utilization.

Future research may extend this work by incorporating real-time data, uncertainty analysis, and multi-objective optimization criteria such as environmental impacts and service reliability.

نوآوری‌های صنعتی

شاپا: ۷۸۱۱-۳۰۹۲

شبیه‌سازی خدمات حمل‌ونقل کانتینری (فیدرینگ) و بهینه‌سازی آن

مرضیه سروی همپا [الف]، کوثر محمدی[ب]، احمد حکیمی[ج*]

[الف] گروه مهندسی صنایع، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. marzie.sarvi78@gmail.com

[ب] گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران. k_mohammadi77@cmps2.iust.ac.ir

[ج] گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران. ahmad.hakimi2010@gmail.com

واژگان کلیدی

شبیه‌سازی گسسته پیشامد؛ حمل‌ونقل کانتینری؛ بهینه‌سازی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۴

چکیده

امروزه حمل‌ونقل کانتینری به‌عنوان یکی از سریع‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌های جابجایی کالا در سطح جهانی شناخته می‌شود. بهره‌گیری از کانتینر در حمل‌ونقل کالاها، فرآیندهای تخلیه و بارگیری را تسریع کرده و حمل بین‌المللی را ساده‌تر می‌کند، همچنین موجب صرفه‌جویی در زمان انتقال، کاهش هزینه‌های تخلیه و بارگیری، افزایش امنیت و کاهش ریسک باز شدن درب کانتینر از مبدأ تا مقصد و بهینه‌سازی استفاده از فضای موجود در محل‌های تخلیه و بارگیری می‌شود. در همین راستا هدف اصلی این شبیه‌سازی، طراحی یک مدل معتبر حمل‌ونقل کانتینری با اتکا بر آزمون‌های آماری و همچنین بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی مرتبط است. در این مطالعه، شبیه‌سازی گسسته پیشامد به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی مدل‌سازی برای شبیه‌سازی حمل‌ونقل کانتینری بین بنادر جنوبی ایران مورداستفاده قرار گرفته است. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که دستیابی به عملکرد مطلوب لزوماً نیازمند استفاده کامل از بودجه در دسترس نیست، بلکه توزیع متوازن و علمی منابع می‌تواند نقش مؤثرتری در افزایش بهره‌وری داشته باشد.

۱- مقدمه

حمل‌ونقل کانتینری امروزه به‌عنوان یکی از پایه‌های اصلی توسعه اقتصادی در سطح جهان شناخته می‌شود. چراکه بخش بزرگی از تجارت بین‌المللی کالاها از این طریق صورت می‌پذیرد و تأثیر مستقیم آن بر تولید، ایجاد اشتغال و دسترسی کشورهای مختلف به بازارهای جهانی مشهود است. بررسی‌ها و مطالعات انجام‌شده حاکی از آن است که پیشرفت فناوری درزمینه کانتینری‌سازی منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌های تجارت و افزایش قابل‌توجه حجم معاملات بین‌المللی گردیده است [۱]. همچنین شواهد تجربی بیانگر آن است که بهبود عملکرد بنادر نقش مهمی در تسهیل تجارت جهانی ایفا می‌کند. رشد اقتصادی در بسیاری از کشورهای درحال‌توسعه ارتباط نزدیکی با گسترش تجارت خارجی دارد و بخش عمده این تجارت از طریق حمل‌ونقل دریایی انجام می‌شود. در این میان، کارایی بنادر یکی از عوامل کلیدی تعیین‌کننده هزینه‌های حمل‌ونقل دریایی به شمار می‌رود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ناکارآمدی بندری می‌تواند هزینه‌های حمل‌ونقل را به‌طور معناداری افزایش داده و درنتیجه بر حجم تجارت اثر منفی بگذارد [۲]. علاوه بر این، ویژگی‌های زیرساختی و عملیاتی بنادر تأثیر مستقیمی بر هزینه‌های حمل‌ونقل دریایی دارند [۳].

هزینه‌هایی که در بنادر به صاحبان کشتی و فرستندگان یا دریافت‌کنندگان کالا تحمیل می‌شود، سهم قابل‌توجهی از

* نویسنده مسئول؛

آدرس پست الکترونیک: ahmad.hakimi2010@gmail.com

هزینه‌های کل حمل‌ونقل دریایی را تشکیل می‌دهد. در شرایطی که تراکم بندری و اختلالات لجستیکی افزایش می‌یابد، نرخ کرایه‌های کانتینری نیز دچار نوسان شده و هزینه‌های تجارت افزایش پیدا می‌کند [۴]. از سوی دیگر، بهبود کارایی عملیاتی بنادر، به‌ویژه در کشورهای با درآمد متوسط، می‌تواند نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها و ارتقای رقابت‌پذیری ایفا کند [۵]. کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل دریایی درنهایت به کاهش قیمت کالاهای وارداتی و صادراتی منجر شده و از طریق انتقال اثر هزینه به مصرف‌کننده و تولیدکننده، تجارت بین‌المللی را تقویت می‌کند [۶]. بنابراین، ارتقای زیرساخت‌های بندری، بهبود بهره‌وری عملیاتی و مدیریت مؤثر لجستیکی از مهم‌ترین سیاست‌های توسعه‌ای برای افزایش رشد اقتصادی و تقویت جایگاه کشورها در تجارت جهانی به شمار می‌روند.

سالانه مبالغ هنگفتی برای خرید تسهیلات بندری از سوی سازمان بنادر و دریانوردی و شرکت‌های خصوصی فعال در حوزه خدمات بندری صرف می‌شود، درحالی‌که چارچوب‌های تصمیم‌گیری علمی و بهینه برای تخصیص این تسهیلات به‌طور گسترده مورداستفاده قرار نمی‌گیرند. به‌عبارت‌دیگر، بسیاری از پروژه‌های تجهیز بندری بدون بهره‌گیری از مدل‌های تصمیم‌سازی چندمعیاره یا روش‌های بهینه‌سازی انجام می‌شود که می‌تواند منجر به تخصیص نادرست منابع و ناکارآمدی عملیاتی شود.

تجهیزات بندری از بخش‌های اساسی در عملکرد صحیح بنادر به شمار می‌آیند، زیرا نقش آن‌ها در کارایی عملیاتی پایانه‌های کانتینری حیاتی است و می‌تواند به‌طور مستقیم بر هزینه، زمان خدمات‌دهی و بهره‌وری کل بنادر اثر بگذارد [۷]. به‌همین دلیل، مدل‌سازی پیش‌بینی ترافیک بندری، تحلیل ابعاد شناورها و شبیه‌سازی نظام‌مند فرآیندهای بندری ازجمله ابزارهای ضروری در برنامه‌ریزی تجهیزاتی هستند تا بتوانند نیاز واقعی بندر را بهتر تعیین کرده و از منابع موجود استفاده بهینه کنند.

در پژوهش‌های اخیر، نیاز به توسعه مدل‌های تصمیم‌گیری یکپارچه برای تخصیص تجهیزات بندری مطرح‌شده است. برای مثال، یک مدل بهینه‌سازی تخصیص منابع در ترمینال‌های کانتینری با در نظر گرفتن تعادل بین هزینه و کارایی توسعه‌یافته است که نشان می‌دهد بیش‌ازحد تجهیز کردن یک نوع دستگاه بدون توجه به تعادل بین انواع مختلف آن می‌تواند باعث ازدحام و کاهش بهره‌وری در سیستم شود [۸]. این نوع مدل‌ها اغلب از روش‌های صف‌بندی و بهینه‌سازی ترکیبی برای یافتن توزیع بهینه تسهیلات استفاده می‌کنند که هدفشان کاهش هزینه عملیاتی و افزایش سرعت جابجایی بار است.

علاوه بر این، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) مانند PCA-TOPSIS نیز در ارزیابی عملکرد و رتبه‌بندی بنادر کانتینری به‌کاررفته‌اند تا تأثیر عوامل مختلف ازجمله تعداد جرثقیل‌های ساحلی، مساحت انبار، ظرفیت انجام عملیات و دیگر شاخص‌های عملیاتی بر عملکرد کلی بنادر بررسی شود [۷]. این رویکردها کمک می‌کنند تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند تجهیزات خود را بر اساس اولویت‌های عملیاتی و عملکرد واقعی پایانه‌ها تخصیص دهند، نه صرفاً بر اساس تجربه یا پیش‌فرض‌های سنتی.

تحقیقات دیگر نیز نشان داده‌اند که بهینه‌سازی مسیرها و زمان‌بندی عملیات داخلی ترمینال‌ها با تکنیک‌هایی مانند گراف‌تئوری و یادگیری تقویتی می‌تواند زمان انتظار جرثقیل‌ها و دیگر ماشین‌آلات را کاهش داده و بهره‌وری کلی را بهبود بخشد [۹]. این جهت‌گیری در تصمیم‌سازی نشان‌دهنده اهمیت استفاده از روش‌های داده‌محور و مدل‌های ریاضی پیشرفته در تخصیص تجهیزات بندری است، زیرا این ابزارها به‌طور مستقیم با عملکرد لجستیکی بنادر ارتباط دارند.

بنابراین، توسعه چارچوب‌های تصمیم‌گیری علمی و مدل‌های بهینه‌سازی تجهیزاتی که بتوانند به‌طور همزمان تعادل بین هزینه، ظرفیت عملیاتی، و کارایی را در نظر بگیرند، لازمه تحقق بهره‌وری پایدار در بنادر مدرن است.

در ادبیات پژوهشی تخصیص منابع در بنادر، بسیاری از مطالعات بر بهینه‌سازی تخصیص جرثقیل‌ها و تجهیزات برای کاهش زمان انتظار کشتی‌ها و افزایش بهره‌وری عملیاتی تأکید داشته‌اند. به طور خاص، مسئله تخصیص جرثقیل ساحلی به کشتی‌ها به‌عنوان بخشی از مدل‌های برنامه‌ریزی برای کاهش زمان توقف و زمان انتظار شناخته می‌شود [۱۰]. بااین‌حال، این مطالعات معمولاً به‌صورت جزئی و مستقل به عملکرد تک‌تک جرثقیل‌ها می‌پردازند و اثرات تجمیعی تجهیزات بر کارایی کلی بندر یا ارتباط بین تخصیص جرثقیل‌ها و دیگر منابع عملیاتی را مدنظر قرار نمی‌دهند [۱۱].

تحقیقات پیشین همچنین تلاش کرده‌اند تا زمان‌بندی و تخصیص منابع مختلف نظیر برنامه‌ریزی اسکله و تعیین تعداد

جرثقیل‌ها را در قالب مدل‌های ریاضیاتی حل کنند تا زمان سرویس‌دهی کشتی‌ها کاهش یابد. چنین مدل‌هایی در عمل نشان داده‌اند که افزایش تعداد جرثقیل به‌تنهایی لزوماً نمی‌تواند کارایی کل سیستم را بهبود بخشد، مگر آن‌که این افزایش در چارچوبی یکپارچه با دیگر منابع عملیاتی و محدودیت‌های زیرساختی برنامه‌ریزی شود [۱۲].

از سوی دیگر، استفاده از روش‌های مدل‌سازی پیشرفته مانند دیجیتال توئین و الگوریتم‌های بهینه‌سازی ترکیبی برای ترمینال‌های کانتینری به‌منظور حداقل‌کردن جابجایی‌های غیرضروری و بهبود بهره‌وری کلی موردتوجه قرار گرفته است [۱۱]. این رویکردها می‌توانند به مدیران کمک کنند تا تصمیمات تخصیص تجهیزات را در زمان واقعی و با توجه به عملکرد کل سیستم اتخاذ کنند، نه صرفاً بر اساس تخصیص تک‌به‌تک جرثقیل‌ها.

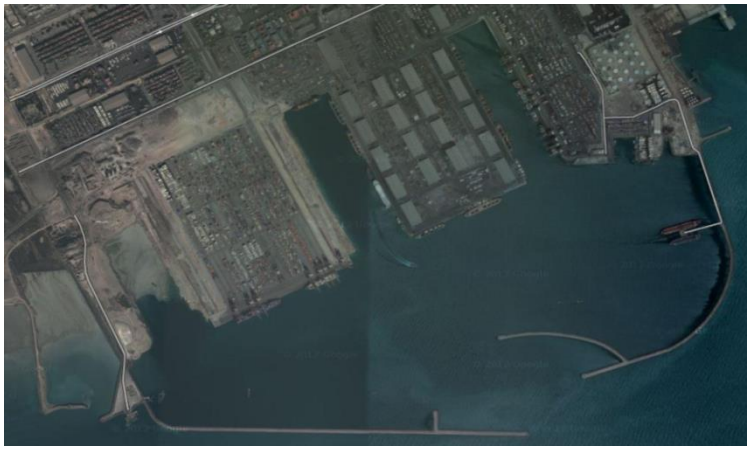
علاوه‌بر این، پژوهش‌های دیگری نشان داده‌اند که بهبود هماهنگی بین تجهیزات مختلف پایانه مانند جرثقیل‌های ساحلی، وسایل حمل‌ونقل داخلی و جرثقیل‌های انبار (YCs) می‌تواند راندمان عملیاتی را به شکل قابل‌توجهی افزایش دهد و هزینه‌ها و زمان توقف را کاهش دهد [۱۳]. این مطالعات بیان می‌کنند که نگاه سیستماتیک و یکپارچه به تخصیص منابع موجب بهره‌وری پایدارتر از بنادر می‌شود درحالی‌که روش‌های تصمیم‌گیری غیرمتمرکز نمی‌توانند تأثیر متقابل منابع را به‌درستی پیش‌بینی کنند [۱۰]. بنابراین، برای ارزیابی عملکرد تجمیعی تجهیزات در یک بندر—به‌ویژه در بنادری مانند بندر شهید رجایی که بخش اعظم عملیات کانتینری کشور در آن انجام می‌گیرد—استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی ترکیبی و شبیه‌سازی سیستم‌های یکپارچه عملیاتی ضروری است. چنین مدل‌هایی نه‌تنها زمان انتظار کشتی‌ها را بر اساس اندازه و نوع کشتی کاهش می‌دهند، بلکه به تخصیص بهینه تجهیزات در سطح ترمینال و کل بندر کمک می‌کنند [۱۱]. بنابراین، در این مطالعه، شبیه‌سازی گسسته پیشامد به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی مدل‌سازی برای شبیه‌سازی حمل‌ونقل کانتینری بین بنادر جنوبی ایران مورد استفاده قرار گرفته است.

بنابراین شکاف تحقیقاتی مطالعات گذشته در آن است که اگرچه بنادر بزرگی مانند شهید رجایی ازنظر حجم عملیات کانتینری اهمیت استراتژیک دارند، اما اغلب ارزیابی‌های عملکردی آن‌ها بر اساس مدل‌های سنتی و جزیره‌ای انجام می‌شود که پویایی‌های سیستمی را نادیده می‌گیرد. بنابراین، فقدان یک چارچوب تحلیلی یکپارچه که همزمان با به‌کارگیری مدل‌های بهینه‌سازی ترکیبی و شبیه‌سازی، نه‌تنها زمان انتظار کشتی‌ها را (با در نظر گرفتن تنوع ابعاد و انواع شناورها) کاهش دهد، بلکه تخصیص بهینه منابع و تجهیزات را در سطح کلان بندر و خرد ترمینال همزمان مدیریت کند، احساس می‌شود. این مطالعه با پر کردن این خلأ، تلاش دارد تا با گذر از روش‌های مجزا، به یک رویکرد جامع‌تر برای ارتقای کارایی و کاهش اتلاف‌های عملیاتی در چنین بنادر پیچیده‌ای دست یابد.

۲- توصیف سیستم

در این مقاله سعی شده است تا حمل‌ونقل کانتینری (فیدرینگ) بندر شهید رجایی به‌عنوان یکی از بزرگترین بنادر کانتینری خاورمیانه به‌عنوان مورد مطالعاتی به‌منظور شبیه‌سازی گسسته پیشامد موردتوجه قرار بگیرد. بندر شهید رجایی در ۲۳ کیلومتری غرب بندرعباس در شمال جزیره قشم و تنگه هرمز واقع شده است و با داشتن روابط دریایی و مبادله کالا با ۸۰ بندر شناخته‌شده بین‌المللی تقریباً نیمی از مبادلات تجاری ایران را بر عهده دارد. این بندر می‌تواند به‌عنوان یکی از بنادر کانونی (هاب[1]) در منطقه شناخته شود که به لحاظ قرارگیری در شرایط جغرافیایی منحصربه‌فرد می‌تواند ایفاکننده نقش بندر ورودی[2] به ایران و سایر کشورهای آسیا میانه باشد. بندر شهید رجایی با در اختیار داشتن بزرگترین و پیشرفته‌ترین ترمینال کانتینری ایران، ظرفیت جابه‌جایی بیش از ۳ میلیون تی ای یو [3]را دارا می‌باشد. تصویر هوایی مربوط به این بندر در شکل ۱ نشان داده شده است.

[1] Hub
[2] Gateway
[3] TEU



شکل ۱ تصویر هوایی از بندر شهید رجایی

حمل‌ونقل کانتینری (فیدرینگ) یکی از مهمترین بخش‌های بندر شهید رجایی محسوب می‌شود که موجب افزایش عملیات ترانشیپ در این بندر شده است. به جابه‌جایی (تخلیه و بارگیری) کانتینرها بین کشتی‌های کانتینری اقیانوس‌پیما و کشتی‌های فیدر (کشتی‌های کانتینری کوچکتر که از کشتی‌های (خطوط) لاینر پشتیبانی می‌کنند) که در بنادر کانونی (هاب) انجام می‌پذیرد عملیات ترانشیپ می‌گویند. کشتی‌های فیدر به کشتی‌های کانتینری کوچک (زیر ۱۰۰۰ تی ای یو) گفته می‌شود که در مسیرهای بین بنادر منطقه‌ای (بنادر اصلی و فرعی در یک منطقه جغرافیایی) کانتینرهای ترانشیپی را جابجا می‌کنند. از اینرو کشتی‌های فیدر محموله‌های کانتینری را که می‌بایست در بنادر کانونی بر روی کشتی اقیانوس‌پیما بارگیری شود، از بنادر فرعی منطقه به بندر کانونی انتقال می‌دهند و کانتینرهایی را نیز که کشتی اقیانوس‌پیما از مسیرهای دور (سایر قاره‌ها) با هدف ارسال به سایر بنادر فرعی حمل کرده است، پس از انجام عملیات ترانشیپ به سمت بنادر فرعی جابجا می‌کنند.

خدمات فیدرینگ به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی عملیات ترانشیپ کانتینر در شبکه‌های حمل‌ونقل دریایی شناخته می‌شود و نقش مهمی در اتصال بنادر کوچک و محلی به بنادر اصلی (هاب‌ها) ایفا می‌کند[۱۴]. در این خدمات، کشتی‌های فیدری با ظرفیت کمتر وظیفه حمل کانتینرها از بنادر فرعی به بنادر مرکز شبکه را بر عهده‌دارند که در آنجا بارها برای انتقال به کشتی‌های بزرگ‌تر یا مسیرهای دورتر تفکیک یا دوباره بارگیری می‌شوند، فرآیندی که به آن ترانشیپ گفته می‌شود [۱۵].

در ادبیات پژوهشی، معمولاً دو نوع اصلی خدمات فیدرینگ مطرح می‌شود؛ فیدرینگ اشتراکی و اختصاصی. در خدمات فیدرینگ اشتراکی، شرکت‌های مستقل یا شخص ثالث به‌عنوان خدمات‌دهندگان فیدر فعالیت می‌کنند و ناوگان آن‌ها لزوماً متعلق به اپراتورهای اصلی خطوط لاینر نیست، این نوع خدمات به افزایش انعطاف و پوشش شبکه کمک می‌کند. در مقابل، فیدرینگ اختصاصی زمانی رخ می‌دهد که اپراتور اصلی حمل‌ونقل و خدمات فیدری تحت مدیریت یک واحد قرار دارند و هدف عمده آن‌ها افزایش بهره‌وری عملیاتی و کاهش هزینه‌های شبکه است [۱۶].

تحقیقات اخیر نشان می‌دهند طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌های فیدر باید به‌صورتی انجام شود که امکان ترانشیپ اختیاری در مسیرها نیز فراهم باشد، زیرا این رویکرد می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهینه‌سازی استراتژی‌های مسیر حرکت شود [۱۷]. همچنین، در ساختار شبکه‌های فیدر، معماری هاب و اسپوک[1] بین بنادر دارای اهمیت اساسی است و شبکه‌های فیدر مؤثر می‌توانند نقش مهمی در افزایش دسترسی بنادر کوچک به مسیرهای تجاری جهانی ایفا کنند [۱۸].

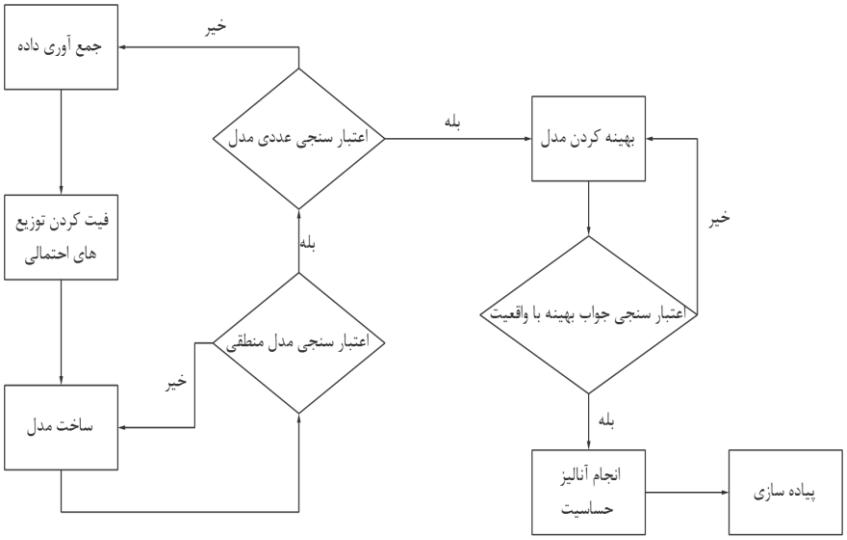
بنابراین، خدمات فیدرینگ می‌تواند به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از زنجیره حمل‌ونقل دریایی جهانی ترسیم شود که مستقیماً با افزایش اتصال، انعطاف‌پذیری و کارایی کلی شبکه‌های کانتینری در ارتباط است و برای عملکرد مؤثر بنادری نظیر بندر شهید رجایی در ایران که به‌عنوان هاب ترانشیپ بین بنادر داخلی و کشورهای منطقه عمل می‌کند اهمیت دارد [۱۶]. در همین راستا هدف اصلی این شبیه‌سازی، طراحی یک مدل معتبر حمل‌ونقل کانتینری با اتکا بر آزمون‌های آماری و همچنین بهینه‌سازی

[1] hub-and-spoke

فرآیندهای عملیاتی مرتبط است. در این مطالعه، شبیه‌سازی گسسته پیشامد به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی مدل‌سازی برای شبیه‌سازی حمل‌ونقل کانتینری بین بنادر جنوبی ایران مورد استفاده قرار گرفته است

۳- توصیف مدل شبیه‌سازی

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود فرآیندهای لازم برای مدل‌سازی و بهینه کردن مدل نشان داده‌شده است.



شکل ۲ فرآیندهای لازم به‌منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی

در این مقاله سعی شده است تا فرآیند مدل‌سازی و بهینه کردن خدمات حمل‌ونقل دریایی (فیدرینگ) مطابق با مراحل ذکرشده صورت پذیرد. همچنین موارد زیر باید لحاظ گردد:

- ✓ افق زمانی شبیه‌سازی: ۷۲۰ ساعت (۳۰ روز کاری عملیاتی)
- ✓ دوره گرم‌شدن :(Warm-up period) بر اساس تحلیل نمودار همگرایی تعیین شد.
- ✓ معیار توقف: پایداری خروجی‌ها با انحراف معیار کمتر از ۲٪ در سه تکرار متوالی.

۳-۱- جمع‌آوری داده‌ها

برای ساخت مدل شبیه‌سازی نیاز به جمع‌آوری داده‌های هر بخش می‌باشد که از دو طریق زیر انجام‌شده است:

الف) جمع‌آوری داده‌ها زمان‌سنجی به‌منظور تعیین توزیع احتمال مربوط به فرآیندهای مختلف درگیر در مدل شبیه‌سازی.

به‌منظور تعیین توزیع‌های احتمالی فرآیندهای مختلف از داده‌های مربوطه در یک دوره زمانی یکساله بهره گرفته‌شده است که به فایل‌های متنی تبدیل‌شده‌اند. این داده‌ها توسط ابزار Input Analyzer به‌منظور فیت کردن متناسب‌سازی توزیع مناسب با داده‌های جمع‌آوری‌شده مورد استفاده قرار گرفت.

ب) جمع‌آوری داده‌های مربوط به نحوه عملکرد هر بخش به کمک افراد خبره و مسئولین بخش‌ها.

به‌منظور طراحی مدل منطقی حمل‌ونقل دریایی از نظر ۱۰ نفر از افراد خبره و مسئولین بخش‌های مرتبط با آن کمک گرفته‌شده است تا استفاده از دانش و تجربه افراد درگیر در این فرآیند به مدل‌سازی هر چه بهتر و دقیق‌تر مدل منجر شود.

۳-۲- محاسبه تابع توزیع احتمالی

داده‌های جمع‌آوری‌شده بوسیله ابزار Input Analyzer نرم‌افزار Arena موردبررسی قرار گرفت و مناسب‌ترین تابع توزیع

احتمالی متناسب‌شده فیت شده انتخاب گردید. توزیع‌های احتمالی تقریبی برای هر بخش به تفکیک به همراه نتایج حاصل از آزمون نیکویی برازش (Chi Square) و Square error در جدول شماره ۱ آورده شده است.

جدول ۱ توزیع‌های احتمالی بخش‌های مختلف

فرآیند	توزیع احتمالی (ساعت)	Square Error	Chi-Square
زمان بین دو ورود متوالی کشتی‌های لاینر	Expo(72)	0.011087	Number of intervals = 3 Degrees of freedom = 1 Test Statistic = 0.698 Corresponding p-value = 0.43
تخلیه و بارگیری در بندر کانونی	Uniform (16.21,21.5)	0.021625	Number of intervals = 3 Degrees of freedom = 1 Test Statistic = 2.65 Corresponding p-value =0.0106
فرآیند فیدرینگ ۱ (کشتی‌های فیدر با ظرفیت کمتراز ۲۰۰ تی ای یو)	Normal (7,1.9)	0.002135	Number of intervals = 5 Degrees of freedom = 2 Test Statistic = 0.936 Corresponding p-value = 0.639
فرآیند فیدرینگ ۲ (کشتی‌های فیدر با ظرفیت ۲۰۰ تا ۵۰۰ تی ای یو)	Triangular (6,11,13)	0.002965	Number of intervals = 7 Degrees of freedom = 5 Test Statistic = 2.42 Corresponding p-value > 0.75
فرآیند فیدرینگ ۳ (کشتی‌های فیدر با ظرفیت ۵۰۰ تا ۷۰۰ تی ای یو)	13.8+Weib(1.17,3.87)	0.011153	Number of intervals = 5 Degrees of freedom = 2 Test Statistic = 5.05 Corresponding p-value = 0.0838
فرآیند فیدرینگ ۴ (کشتی‌های فیدر با ظرفیت ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ تی ای یو)	Normal (22.6,4.52)	0.003245	Number of intervals = 5 Degrees of freedom = 2 Test Statistic = 1.46 Corresponding p-value = 0.487
زمان تخلیه و بارگیری در بندر فرعی	Gamma (0.816,2.95)	0.003160	Number of intervals = 5 Degrees of freedom = 2 Test Statistic = 1.52 Corresponding p-value = 0.476

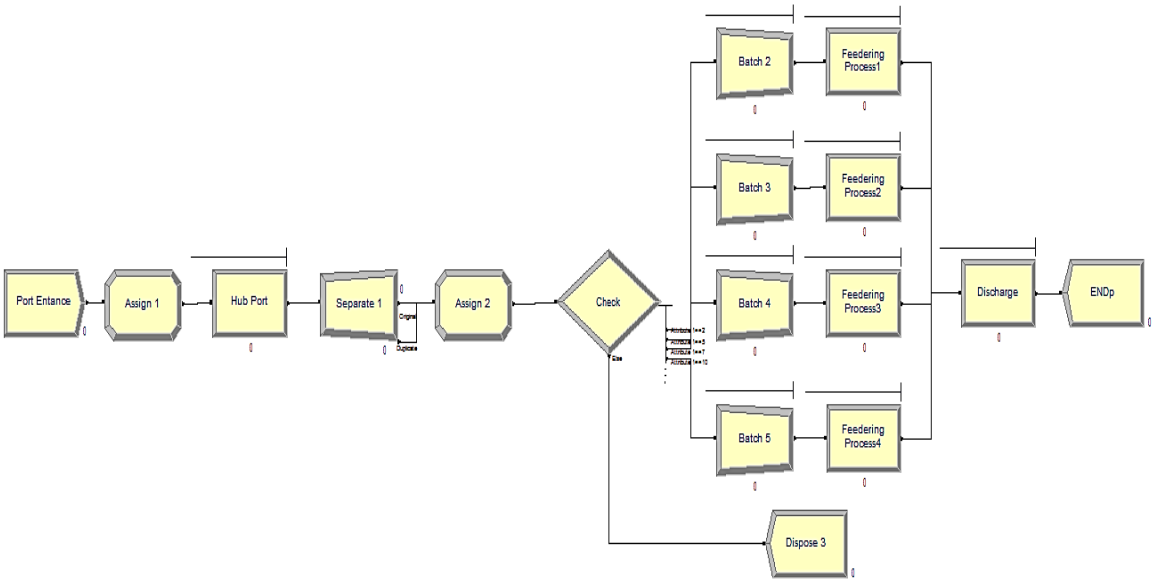
۴- شبیه سازی مدل

۴-۱-معرفی نرم‌افزار Arena

در این پژوهش به‌منظور شبیه‌سازی گسسته پیشامد حمل‌ونقل دریایی (فیدرینگ) از نرم‌افزار Arena استفاده‌شده است. نرم‌افزار Arena یک زبان شبیه‌سازی گرافیکی برای شبیه‌سازی فرآیندهای گسسته- پیشامد است.

۴-۲- ساخت و توسعه مدل

مدل منطقی حمل‌ونقل دریایی (فیدرینگ) در شکل ۳ نشان داده شده است. مدل ساخته‌شده شامل یک بندر کانونی، چهار نوع کشتی فیدر متفاوت ازلحاظ ظرفیت بارگیری و تخلیه و همچنین یک بندر فرعی می‌باشد. در قسمت ورودی کشتی‌های لاینر به‌منظور تخلیه و بارگیری کانتینرها وارد بندر شهید رجایی (به‌عنوان بندر کانونی) می‌شوند و با انجام عملیات تخلیه و بارگیری توسط کشتی‌های فیدر به سمت بندر فرعی حرکت می‌کنند.



شکل ۳ مدل منطقی حمل‌ونقل کانتینری (فیدرینگ)

۴-۳-اعتبارسنجی مدل منطقی

به‌منظور حصول اطمینان از صحت مدل منطقی، این مدل توسط فرد افراد خبره در حمل‌ونقل دریایی (فیدرینگ) با تحصیلات و تخصص و تجربه مرتبط مورد آزمایش قرار گرفت. بعد از تأیید مدل منطقی توسط افراد خبره، نتایج حاصله از مدل برای اعتبارسنجی به فرد خبره ارسال گردید که با تأیید وی همراه بود.

۴-۴-اعتبارسنجی عددی مدل

با توجه به تأیید مدل منطقی توسط فرد خبره بایستی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده در حالت‌های مختلف مورد آزمون آماری قرار گیرند. به این منظور از آزمون Two Sample T (با فرض نابرابری) بین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های واقعی بهره گرفته شده است. نتایج حاصله از آزمون آماری که به‌وسیله نرم‌افزار MINITAB نسخه ۱۵ محاسبه‌شده است در جدول ۲ قابل‌مشاهده می‌باشد.

جدول ۲ نتایج آزمون فرض آماری

شاخص مورد ارزیابی	مقدار P-Value
میانگین تعداد کشتی‌های ورودی در بازه یک‌ماهه	0.002
میانگین تعداد کشتی‌های خروجی در بازه یک‌ماهه	کمتر از 0.001
میانگین زمان خدمت‌دهی به کشتی‌های لاینر	0.004

۴-۵-بهینه‌سازی

شرایط کنونی سیستم حمل‌ونقل دریایی (فیدرینگ) به همراه هزینه خرید کشتی‌های فیدر (به دلیل سری بودن از واحد U استفاده شده است) در جدول ۳ ذکر شده است.

جدول ۳ اطلاعات مربوط به کشتی‌های فیدر

نوع کشتی فیدر	تعداد	هزینه خرید هر فروند
نوع اول	۱	۱.۲U
نوع دوم	۱	۱.۵U
نوع سوم	۱	۲U
نوع چهارم	۱	۲.۸U

جدول ۴ تعداد بهینه کشتی‌های فیدر

نوع کشتی فیدر	تعداد
نوع اول	۲
نوع دوم	۳
نوع سوم	۳
نوع چهارم	۲

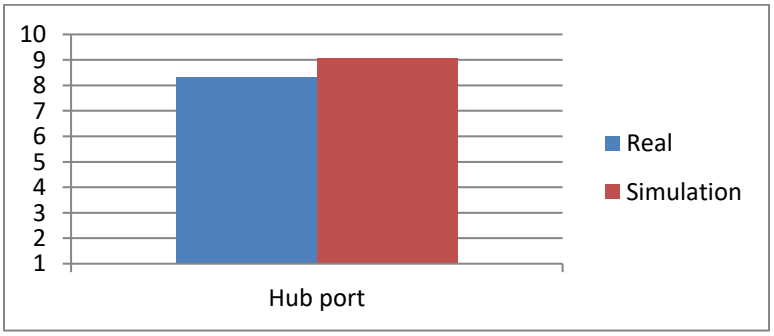
- ✓ هر ۱ U معادل ۱ میلیارد تومان سرمایه‌گذاری ثابت در نظر گرفته شد.
- ✓ مقدار ۲۰ U بر اساس میانگین بودجه سرمایه‌گذاری سه سال اخیر بندر تعیین‌شده است.

به‌منظور دست‌یابی به نقطه بهینه بایستی با توجه به محدودیت بودجه جدید تعریف‌شده (۲۰U) و همچنین بهترین ترکیب کشتی‌های فیدر صورت پذیرد تا سبب افزایش عملکرد سیستم حمل‌ونقل دریایی گردد.

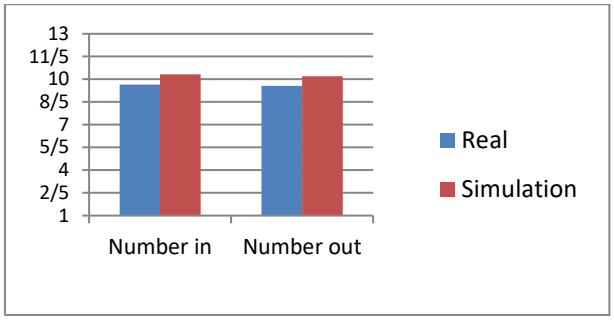
برای اجرای شبیه‌سازی و بدست آوردن جواب بهینه، مدل شبیه‌سازی ۵۰ بار اجرا که هر اجرا شامل ۲۰ تکرار (که زمان هر تکرار از قبل مشخص‌شده است) می‌باشد، که در نهایت نتایج زیر بدست آمده است:

میانگین زمان انتظار کانتینر نباید از ۱.۸ روز تجاوز کند. این مقدار بر اساس استاندارد عملکردی داخلی بندر تعیین‌شده و اکنون به‌صورت شفاف در مدل آمده است.

با توجه به نتایج حاصله میانگین زمان ماندگاری کانتینر در سیستم قبل از بهینه‌سازی برابر ۱۴۶۷.۹۹ دقیقه بوده است که بعد از بهینه‌سازی به مقدار ۹۹۸.۸۲۱ دقیقه رسیده است که نشان از بهبود عملکرد دارد.



شکل ۴ میانگین مدت‌زمان خدمت‌دهی بندر کانونی



شکل ۵ میانگین تعداد ورودی و خروجی در بازه یک‌ماهه

به‌منظور بهینه کردن مدل شبیه‌سازی تابع هدف به‌صورت کمینه کردن میانگین مدت ماندگاری کانتینر در سیستم به همراه محدودیت خطی هزینه، محدودیت غیرخطی حداکثر میانگین زمان انتظار کانتینر و محدودیت منابع در دسترس را در OPTQUEST [19] وارد کردیم. این بهینه‌سازی بر روی سیستمی با مشخصات RAM: 6 Gb و Processor: 3.40 GHz انجام‌شده است که به مدت ۱ دقیقه و ۱۵ ثانیه به طول انجامید. کمترین میانگین زمان ماندگاری کانتینر در سیستم برابر ۹۹۸.۸۲۱ دقیقه شد که بهبودی معادل ۳۲٪ را نشان می‌دهد که از U ۱۸.۵ بودجه تعیین‌شده که معادل ۹۲.۵٪ از بودجه جدید تعریف‌شده است استفاده می‌کند.

۴-۶- تحلیل حساسیت مدل

تحلیل دو سناریو از بابت افزایش و کاهش میزان بودجه بررسی شد که به‌صورت زیر است:

۱ سناریو U۱۵
۲ سناریو U۳۰

در واقع در سناریوی اول بودجه از ۲۰ به ۱۵ کاهش یافت و در سناریوی دوم از ۲۰ به ۳۰ افزایش داشت. که نتایج نشان داد افزایش بودجه به U۳۰ باعث بهبود بیشتر عملکرد می‌شود. و کاهش بودجه به U۱۵ منجر به افت عملکرد می‌گردد.

همچنین موارد زیر برای تحلیل حساسیت بیشتر بررسی شد که به‌صورت زیر می‌باشند:

۱ نرخ ورود کشتی‌ها ±۲۰٪ تغییر داده شد.
۲ ظرفیت جرثقیل‌های ساحلی تغییر داده شد.

تأثیر این تغییرات بر زمان ماند کانتینر بررسی گردید. که نتایج نشان داد:

- ✓ مدل نسبت به تغییرات متوسط ورودی پایدار است.
- ✓ در افزایش بیش از ۳۰٪ حجم ورود، گلوگاه سیستم جرثقیل‌های ساحلی است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سیستم حمل‌ونقل کانتینری فیدرینگ به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی زنجیره لجستیک دریایی مورد بررسی قرار گرفت و تلاش شد با بهره‌گیری از رویکرد یکپارچه شبیه‌سازی_ بهینه‌سازی، عملکرد این سیستم در یکی از مهم‌ترین بنادر کشور یعنی بندر شهید رجایی تحلیل و بهبود یابد. با توجه به نقش حیاتی خدمات فیدرینگ در اتصال بنادر فرعی به بنادر کانونی و تأثیر مستقیم آن بر کارایی عملیات ترانشیپ، بهینه‌سازی این بخش می‌تواند پیامدهای قابل‌توجهی در کاهش هزینه‌های لجستیکی و افزایش بهره‌وری شبکه حمل‌ونقل دریایی داشته باشد.

در این مطالعه، ابتدا با استفاده از روش شبیه‌سازی گسسته‌پیشامد، یک مدل واقع‌گرایانه از فرآیندهای عملیاتی حمل‌ونقل

کانتینری فیدرینگ طراحی و توسعه داده شد. این مدل بر پایه داده‌های واقعی، تحلیل‌های آماری و نظرات خبرگان حوزه حمل‌ونقل دریایی ایجاد گردید و از طریق اعتبارسنجی منطقی و عددی، دقت و قابلیت اتکای آن مورد تأیید قرار گرفت. نتایج آزمون‌های آماری نشان داد که خروجی‌های مدل شبیه‌سازی از نظر شاخص‌های عملکردی با داده‌های واقعی سیستم همخوانی قابل قبولی دارند، که این امر بیانگر توانایی مدل در بازنمایی صحیح شرایط عملیاتی سیستم است.

در ادامه، به‌منظور بهبود عملکرد سیستم، مسئله تعیین ترکیب بهینه کشتی‌های فیدر در چارچوب محدودیت‌های بودجه، زمان انتظار کانتینرها و منابع در دسترس موردبررسی قرار گرفت. با استفاده از ابزار بهینه‌سازی OPTQUEST و تعریف تابع هدف مبتنی بر حداقل‌سازی میانگین زمان ماندگاری کانتینر در سیستم، بهترین ترکیب کشتی‌های فیدر شناسایی شد. نتایج نشان داد که با اعمال ترکیب بهینه پیشنهادی، میانگین زمان ماندگاری کانتینرها از حدود ۱۴۶۸ دقیقه به حدود ۹۹۹ دقیقه کاهش‌یافته است که بیانگر بهبودی در حدود ۳۲ درصد در عملکرد سیستم می‌باشد. این میزان بهبود نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه تخصیص بهینه منابع بر کارایی عملیاتی شبکه حمل‌ونقل دریایی است.

از سوی دیگر، نتایج بهینه‌سازی نشان داد که دستیابی به عملکرد مطلوب لزوماً نیازمند استفاده کامل از بودجه در دسترس نیست، بلکه توزیع متوازن و علمی منابع می‌تواند نقش مؤثرتری در افزایش بهره‌وری و جلوگیری از هدر رفت منابع داشته باشد. این یافته اهمیت استفاده از رویکردهای داده‌محور و مدل‌های تصمیم‌سازی علمی در برنامه‌ریزی تجهیزاتی بنادر را برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری‌های سنتی مبتنی بر تجربه، ممکن است منجر به تخصیص غیربهینه منابع شود.

به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قدرتمند تصمیم‌یار در مدیریت سیستم‌های پیچیده لجستیکی مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد نه‌تنها امکان تحلیل سناریوهای مختلف و پیش‌بینی رفتار سیستم را فراهم می‌کند، بلکه به مدیران کمک می‌کند تا با در نظر گرفتن محدودیت‌های واقعی، بهترین تصمیمات عملیاتی را اتخاذ نمایند. بنابراین پیشنهاد می‌شود مدیران این مجموعه از رویکردهای علمی از جمله شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سیستم‌های لجستیکی در تصمیمات خود استفاده کنند و به‌عنوان مکملی برای دانش و تجربه عملی خود بکار گیرند.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، مدل ارائه‌شده با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تقاضا، شرایط پویای محیطی، تغییرات ترافیک بندری و معیارهای چندهدفه نظیر هزینه‌های زیست‌محیطی، قابلیت اطمینان خدمات و مصرف انرژی توسعه یابد و به تحلیل حساسیت نسبت به این پارامترها پرداخته شود. زیرا این پارامترها ازجمله پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار سیستم موردنظر است همچنین استفاده از داده‌های بلادرنگ و فناوری‌هایی نظیر دوقلوی دیجیتال می‌تواند دقت مدل‌های تصمیم‌سازی در حوزه حمل‌ونقل دریایی را بیش‌ازپیش افزایش دهد. در نهایت پیشنهاد می‌شود مدل این تحقیق در سایر بنادر نیز اجرا و پیاده شود و نتایج آن با نتایج سایر پژوهش‌ها مقایسه شده و اعتبارسنجی بیشتری شود.

۶- منابع

[1] Bernhofen D. M, El-Sahli Z, Kneller R. Estimating the effects of the container revolution on world trade. Journal of International Economics. 2018; 113*:* 36–50. https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2018.03.001

[2] Clark X, Dollar D, Micco A. Port efficiency, maritime transport costs, and bilateral trade. Journal of Development Economics. 2004; 75(2): 417–450. https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2004.06.005

[3] Wilmsmeier G, Hoffmann J, Sánchez R J. The impact of port characteristics on international maritime transport costs. Maritime Economics & Logistics. 2008; 10(3): 205–228. https://doi.org/10.1057/mel.2008.10.

[4] Su M, Bae S.-H, Park K.-S. Port congestion and container freight rate dynamics: Forecasting with an RBF neural network. Frontiers in Marine Science. 2025; 12*:* 1545471. https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1545471

[5] Danladi C, Tuck S, Tziogkidis P, Tang L. Efficiency analysis and benchmarking of container ports operating in lower-middle-income countries: A DEA approach. Journal of Shipping and Trade. 2024*; 9*: 7. https://doi.org/10.1186/s41072-024-00163-2

[6] Rusticelli E, MacLeod C. The impact of container shipping costs on import and consumer prices (OECD Economics Department Working Papers No. 1838). OECD Publishing. 2025. https://doi.org/10.1787/957f0c0c-en

[7] Pabón-Noguera A, Carrasco-García M. G, Ruíz-Aguilar J. J., Rodríguez-García M. I, Cerbán-Jimenez M, Turias Domínguez I. J. Multicriteria decision model for port evaluation and ranking: An analysis of container terminals in Latin America and the Caribbean using PCA-TOPSIS methodologies. Applied Sciences. 2024; 14(14): 6174.

[8] Zhang X, Li H., Wu M. Optimization of resource allocation in automated container terminals. Sustainability. 2022; 14(24): 16869

[9] Cheng S, Liu Q, Jin H, Zhang R, Ma L., Kwong C. F. Collaborative optimization of truck scheduling in container terminals using graph theory and DDQN. Scientific Reports. 2025; 15: 6950.

[10] Chargui K., Zouadi T, El Fallahi A, Reghioui M, Aouam T. Berth and quay crane allocation and scheduling with worker performance variability and yard truck deployment in container terminals. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2021 151: 102449. https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102449

[11] Amirifar S, Tavakoli Kashani A, Omidvarpanah Ahmadabadi A, Hassannayebi E. Simultaneous optimization for berth and quay crane scheduling in container terminals. Journal of Port Operations. *2025*. https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.102449

[12] Hussein A, Elkharbotly A, Ismail T. Berth allocation and quay crane assignment problem in continuous berth container terminals. Port Said Engineering Research Journal. 2022; 26*(*4): 15–28. https://doi.org/10.21608/pserj.2022.123456

[13] Mazloumi M, van Hassel E. Improvement of container terminal productivity with knowledge about future transport modes: A theoretical agent-based modelling approach. Sustainability. 2021; 13(17): 9702. https://doi.org/10.3390/su13179702

[14] Huang X, Chen H, Zhang J, Wang D, Chen J, Luo J X. Robust optimization model of container liner routes in feeder line network. Transport. 2024; 39(1): 13–24. https://doi.org/10.3846/transport.2024.20531

[15] Jin J G, Meng Q, Wang H. Feeder vessel routing and transshipment coordination at a congested hub port. Transportation Research Part B: Methodological. 2021; 151: 1–21. https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.07.002

[16] Guo L, Du J, Zheng J, He N. Integrated planning of feeder route selection, schedule design, and fleet allocation with multimodal transport path selection considered. Journal of Marine Science and Engineering. 2023; 11(7): 1445. https://doi.org/10.3390/jmse11071445

[17] Bergmann M. An adaptive heuristic for feeder network design with optional transshipment. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2023; 176: 103153. https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103153

[18] Qin Z, Zhang M, Wu Y. Hub-and-spoke network design for feeder shipping with uncertainty in container flows. Maritime Economics & Logistics. 2024; 26: 445–468. https://doi.org/10.1057/s41278-024-00381-9

[19] Bradley A; Arena OptQuest User's Guide, Publication Arenao-UM001E-EN-P,November. 2007.