



# Sustainable Multi-Objective Optimization for Empty Container Balancing in Maritime Hub-and-Feeder Network

Elham Ziar<sup>a</sup>, Babak Amiri<sup>a\*</sup>, Hadi Sahebi<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

## Original Article

Use your device to scan and read the article online



**Citation:** Ziar E, Amiri B, Sahebi H. Sustainable Multi-Objective Optimization for Empty Container Balancing in Maritime Hub-and-Feeder Network. *Industrial Innovations*. 2024; 2(4):320-337.

 <https://doi.org/10.61882/jii.2.4.320>

## KEYWORDS

Empty container balance;  
Sustainability;  
Maritime logistics.

## ABSTRACT

The maritime transport industry, as the backbone of global trade, faces challenges such as container imbalance, environmental pollution, and operational inefficiencies in ports. This paper presents a multi-objective mathematical model aimed at optimizing three main goals simultaneously: economic profitability, reduction of empty container imbalance, and enhancement of environmental sustainability. The model comprehensively considers liner and feeder ships, sea routes, and the roles of hub, feeder, and satellite ports. To validate the model, a case study was conducted on a shipping route between selected ports in the Middle East and East Asia using GAMS software. The results show a significant reduction in container imbalance over three time periods, along with simultaneous improvements in economic and environmental indicators. Sensitivity analysis highlights the critical role of ship capacity in improving system performance, although it also reveals that this factor alone is insufficient; comprehensive management across multiple dimensions is essential.

## Extended Abstract

### 1. Introduction

Maritime transportation is one of the most efficient and economical modes of global trade, offering large capacity, safety, and lower environmental impact compared to other transport modes. As global shipping volumes continue to grow—projected at 2.4% annually between 2022 and 2026—the role of maritime logistics in the world economy becomes increasingly critical. However, this growth brings challenges such as the imbalance of empty containers, especially in hub and feeder ports, due to trade asymmetries and logistical inefficiencies. These imbalances lead to higher operational costs and decreased port efficiency. Additionally, maritime transport and port operations significantly contribute to greenhouse gas emissions, affecting air quality and public health in port cities. As a result, there is a growing focus on optimizing shipping routes, improving container repositioning strategies, and enhancing sustainability across the maritime sector.

### 2. Problem statement

This study addresses the critical issue of empty container imbalance in maritime logistics by developing an optimization model tailored for hub-and-feeder port networks. The model considers the real-world structure of shipping routes, where large liner vessels operate between hub ports and feeder vessels connect these hubs to smaller regional ports. Our approach incorporates key operational constraints, including ship capacities and service times, while aiming to minimize total costs

\* Corresponding author.

E-mail address: [Babakamiri@iust.ac.ir](mailto:Babakamiri@iust.ac.ir)

DOI: <https://doi.org/10.61882/jii.2.4.320>

Received: July 16, 2025; Received in revised form: September 28, 2025; Accepted: October 4, 2025.

Article type: Research Paper



related to container repositioning, demurrage, and CO<sub>2</sub> emissions. Unlike prior studies, this work integrates sustainability factors to enhance the efficiency and environmental performance of container distribution across the network.

### 3. Finding

The results of this study demonstrate that integrating hub-and-feeder port structures into the container shipping network significantly improves the efficiency of empty container repositioning. The proposed optimization model effectively balances container supply and demand across ports while reducing total operational costs. Incorporating sustainability measures such as CO<sub>2</sub> emission minimization and demurrage cost control further enhances overall system performance. The findings show that considering two separate fleets—liner and feeder vessels—provides more flexibility in route planning and leads to better utilization of port infrastructure. Additionally, the model helps identify optimal container flows and strategic decisions that can support both economic and environmental objectives in maritime logistics.

### 4. Conclusion

This paper presented an optimization model to address the imbalance of empty containers within a hub-and-feeder port network, reflecting real-world maritime logistics operations. The model incorporates two distinct vessel types—liners and feeders—as well as sustainability considerations, including CO<sub>2</sub> emissions from shipping and port operations, and demurrage costs. The structure of the model allows for realistic planning of container flows while accounting for ship capacities, port types, and service constraints.

Computational results show that the model effectively balances the distribution of empty containers across the network, significantly reducing the number of ports experiencing surplus or shortage. Additionally, by optimizing routing and scheduling, the model achieves noticeable reductions in total operational costs and CO<sub>2</sub> emissions. The findings also indicate that including demurrage cost as a decision factor leads to better vessel time management and reduces waiting times at ports.

Overall, the results highlight the model's capability to support both economic and environmental goals in maritime logistics. It provides a practical tool for shipping companies and port authorities to enhance efficiency in container repositioning. Future research can build on this work by incorporating uncertainty in demand, multi-modal transport options, or strategic decision-making among multiple operators to further increase the model's applicability.



## بهینه‌سازی چند هدفه برای توازن کانتینرهای خالی در شبکه بنادر هاب و فیدر با رویکرد پایداری در حمل و نقل دریایی

الهام زیار الف، بابک امیری ب\*، هادی صاحبی ج

الف گروه لجستیک و زنجیره تامین، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. [Elham\\_Ziar@ind.iust.ac.ir](mailto:Elham_Ziar@ind.iust.ac.ir)

ب گروه سیستم‌های هوشمند، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. [Babakamiri@iust.ac.ir](mailto:Babakamiri@iust.ac.ir)

ج گروه سیستم‌های هوشمند، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. [Hadi\\_Sahebi@iust.ac.ir](mailto:Hadi_Sahebi@iust.ac.ir)

واژگان کلیدی	چکیده
توازن کانتینرهای خالی؛ پایداری؛ لجستیک دریایی.	صنعت حمل‌ونقل دریایی، به‌عنوان ستون فقرات تجارت جهانی، با چالش‌هایی چون عدم تعادل کانتینرهای خالی، آلودگی زیست‌محیطی و ناکارآمدی عملیاتی در بنادر مواجه است. این مقاله با تمرکز بر شبکه حمل‌ونقل کانتینری مبتنی بر ساختار هاب و فیدر، یک مدل ریاضی ترکیبی را برای بهینه‌سازی همزمان سه هدف اصلی ارائه می‌دهد: سودآوری اقتصادی، کاهش عدم تعادل کانتینرهای خالی، و ارتقاء پایداری زیست‌محیطی. در این مدل، نقش کشتی‌های لاینر و فیدر، مسیرهای دریایی، و بنادر هاب، فیدر و واسط با جزئیات بررسی شده‌اند. برای اعتبارسنجی مدل، یک مطالعه موردی بر مسیر بنادر خاورمیانه و شرق آسیا با استفاده از نرم‌افزار GAMS انجام شد. نتایج نشان‌دهنده کاهش قابل توجه در عدم توازن کانتینرهای خالی در طی سه دوره زمانی و نیز بهینه‌سازی همزمان پارامترهای اقتصادی و زیست‌محیطی هستند. تحلیل حساسیت مدل نیز بیانگر نقش کلیدی ظرفیت کشتی در بهبود عملکرد سیستم است، اگرچه این عامل به‌تنهایی کافی نبوده و نیازمند مدیریت جامع در سطوح مختلف است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲	

### ۱- مقدمه

حمل‌ونقل دریایی به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های جابجایی کالا، نسبت به سایر شیوه‌ها مزایای بسیاری دارد. از جمله این مزایا، می‌توان به هزینه کمتر آن به‌ویژه در مقایسه با حمل‌ونقل هوایی اشاره کرد که عمدتاً به دلیل ظرفیت بالای کشتی‌هاست. این ظرفیت بالا باعث می‌شود هزینه‌های حمل‌ونقل دریایی بسیار منطقی و رقابتی باشند. همچنین، کشتی‌ها می‌توانند محموله‌هایی را حمل کنند که از طریق جاده یا هوا امکان‌پذیر نیست. ایمنی و امنیت نیز از دیگر مزایای این روش هستند؛ چراکه شرایط بد جوی تأثیر چندانی بر عملیات دریایی نمی‌گذارند و خسارات ناشی از حوادث نیز در این حوزه کمتر است. از منظر زیست‌محیطی نیز، حمل‌ونقل دریایی نسبت به سایر روش‌ها آلودگی کمتری ایجاد می‌کند.

بر اساس گزارش کنفرانس سازمان ملل در تجارت و توسعه (آنکتد)، پیش‌بینی می‌شود که حجم تجارت دریایی جهانی در بازه زمانی ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۶ سالانه ۲.۴ درصد رشد داشته باشد. این رشد، اهمیت روزافزون صنعت حمل‌ونقل دریایی در اقتصاد جهانی را نشان می‌دهد. با افزایش فعالیت‌های حمل‌ونقل در این حوزه، چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی نیز پررنگ‌تر شده و یافتن مسیرهای بهینه برای کشتی‌ها به مسئله‌ای حیاتی تبدیل شده است.

یکی از چالش‌های مهم در این صنعت، عدم تعادل در توزیع کانتینرهای خالی در بنادر هاب و فیدر است. این عدم تعادل معمولاً به دلیل تغییر در الگوهای تجاری، نوسانات فصلی تقاضا و ناکارآمدی‌های زنجیره تأمین رخ می‌دهد. بنادر فیدر، که نقش رابط میان بنادر اصلی و بازارهای منطقه‌ای را دارند، بیشتر تحت تأثیر این مشکل هستند. در این بنادر، انباشت کانتینرهای خالی باعث ایجاد گلوگاه‌های عملیاتی، افزایش هزینه‌های نگهداری و کاهش کارایی بندر می‌شود. در مقابل، بنادر هاب که حجم بالایی از ترانشیپمنت‌ها را مدیریت می‌کنند، نیز با چالش‌های مربوط به جابجایی کانتینرهای خالی مواجه هستند.

در کنار این موضوع، باید به نقش بنادر و حمل‌ونقل دریایی در تولید گازهای گلخانه‌ای نیز اشاره کرد. تجهیزات و فعالیت‌های بندری، مانند جرثقیل‌ها و کامیون‌های دیزلی، سهم قابل توجهی در آلودگی هوا دارند؛ موضوعی که با گسترش شهرها در اطراف بنادر، به تهدیدی برای سلامت عمومی تبدیل شده است.

با توجه به مساله تعریف‌شده در بنادر هاب و فیدر، بررسی جامعی از این بنادر در مقالات انجام شده است. برای درک بهتر در زمینه این موضوع، مرور مقالات در رابطه با جابجایی کانتینرهای خالی بر اساس استراتژی آن برای توازن کانتینرهای خالی ارائه شده است. موضوع مهم دیگری که دغدغه اصلی این مقاله است، موضوع پایداری در بنادر و کشتیرانی است. این موضوع نیز در این بخش به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۱-۱- بنادر هاب و فیدر

شبکه حمل‌ونقل کانتینری به‌طور کلی بر اساس ساختار هاب و اسپوک<sup>۱</sup> یا همان هاب و فیدر طراحی شده است. این مدل در طول پنج دهه گذشته از توسعه حمل‌ونقل کانتینری به‌خوبی تثبیت شده و مورد استفاده قرار گرفته است. ورود کشتی‌های بسیار بزرگ با ظرفیت‌های بالاتر از TEU ۱۴۰۰۰ باعث افزایش تراکم ترافیک در مسیرهای کلیدی دریایی مانند ترانس‌پاسیفیک و آسیا-اروپا شده است. در سال‌های اخیر، بنادر متعددی با نقش‌های متفاوت پدید آمده‌اند: هاب‌های دروازه‌ای<sup>۲</sup> مانند یانتین-شنژن و شانگهای، هاب‌های ترانشیپمنت مانند آلخسیراس، مالتا و تانجونگ پله پاس، و همچنین هاب‌های ترکیبی (که همزمان به‌عنوان دروازه و مرکز ترانشیپمنت فعالیت دارند) مانند دبی و پورت کلانگ، و البته بنادر هاب غالبی مانند سنگاپور که به یک سوپرهاب<sup>۳</sup> تبدیل شده است.

از سوی دیگر، بنادر فیدر به‌عنوان بنادر ثانویه عمل کرده و معمولاً ترکیبی از ترافیک فیدری و تجارت مستقیم منطقه‌ای یا قاره‌ای را مدیریت می‌کنند. این بنادر معمولاً پذیرای کشتی‌های اصلی مسیرهای بین‌قاره‌ای نیستند. در میان بنادر فیدر، تنوع گسترده‌ای وجود دارد؛ به‌طوری‌که ظرفیت سالانه آن‌ها از TEU ۱۰۰۰۰ تا بیش از ۱ میلیون TEU متغیر است [۱]. در این ساختار، کشتی‌های بزرگ<sup>۴</sup> بین بنادر هاب حرکت می‌کنند و کشتی‌های فیدر از برخی بنادر هاب (بندر واسط) به سمت بنادر فیدر تردد دارند. عملیات بارگیری و تخلیه برای تغییر ناوگان، در بنادر واسط انجام می‌شود.

اهمیت این ساختار باعث شده که در ادبیات علمی توجه زیادی به بنادر هاب و فیدر شود و موضوعاتی چون مسیریابی، زمان‌بندی، تخصیص اسکله، و مکان‌یابی در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یانگ و همکاران [۲] مسئله مکان‌یابی بندر هاب و طراحی مسیرها در یک شبکه فیدر تک‌هاب را معرفی کرده‌اند. هوانگ و همکاران [۳] با استفاده از ساختار هاب و اسپوک در لجستیک دریایی، مدلی بهینه‌سازی مقاوم برای مسیرهای کشتی‌های کانتینری در شبکه فیدر توسعه دادند. آن‌ها بهینه‌سازی مسیر و تجهیز کشتی‌ها را تحت شرایط عدم قطعیت و با در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت و زمان بررسی کردند. هومانگ و همکاران [۴] چارچوبی بر اساس مدل هاب و اسپوک همراه با پنجره‌های زمانی میلک ران<sup>۵</sup> برای افزایش کارایی هزینه و بهینه‌سازی یارانه‌های حمل‌ونقل دریایی ارائه کردند. استفاده از مفهوم هاب در مطالعات دیگری نیز از جمله تیکنی و همکاران [۵] مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش دیگری از مسائل هاب، گلمحمدی و عابدسلطان [۶] به ارائه یک مدل دو هدفه

<sup>۱</sup> Hub-and-Spoke

<sup>۲</sup> Gateway Hubs

<sup>۳</sup> Super Hub

<sup>۴</sup> Mega-ships

<sup>۵</sup> Milk Run

برای مسئله مکان‌یابی-مسیریابی وسایل نقلیه هاب با در نظر گرفتن پنجره زمانی سخت و متعادل‌سازی هزینه-وسيله نقلیه پرداخته‌اند. همچنین تیکنی و همکاران [۷] به ارائه الگوریتم‌های تکاملی ترکیبی و آزادسازی لاگرانژی برای مسئله هاب میانه چند دوره‌ای با در نظر گرفتن مسائل مالی و کیفیت خدمات پرداخته‌اند.

## ۲-۱- تغییر موقعیت کانتینرهای خالی

تغییر موقعیت کانتینرهای خالی، مسئله‌ای پیچیده و چندوجهی در زنجیره تأمین است که نیازمند بررسی دقیق و مشارکت همه‌جانبه ذی‌نفعان این زنجیره می‌باشد. ابعاد این معمای لجستیکی بسیار گسترده است؛ به گونه‌ای که هر ساله میلیون‌ها کانتینر خالی از طریق اقیانوس‌ها، جاده‌ها و خطوط ریلی در سراسر جهان جابه‌جا می‌شوند.

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه جای‌گذاری کانتینرهای خالی انجام شده است. در ادامه به برخی مطالعات مهم اشاره می‌شود:

لی و مون [۸] به‌منظور کاهش هزینه‌های تغییر موقعیت کانتینرهای خالی، مدلی بهینه و استوار پیشنهاد دادند که در آن از کانتینرهای تاشو استفاده شده و عدم قطعیت در تقاضا در نظر گرفته شده است. سانگ و دانگ [۹] مدلی ترکیبی از تغییر موقعیت کانتینر خالی و مسیریابی محموله را ارائه کردند که هدف آن کمینه‌سازی هزینه‌های کل شامل: هزینه حمل کانتینر خالی، هزینه‌های بارگیری و تخلیه، هزینه‌های دموژاژ، جریمه تأخیر در پاسخگویی به تقاضا و هزینه‌های موجودی کانتینر خالی بود. چن و همکاران [۱۰] با طراحی مدل‌هایی در قالب بازار انحصاری و انحصار دوقطبی، به بررسی استراتژی‌های قیمت‌گذاری خطوط کشتیرانی پرداختند. هدف آن‌ها متعادل‌سازی کانتینرهای خالی از طریق جابه‌جایی همراه با کالا و ضایعات بود. سانگ و شو [۱۱] روشی مبتنی بر فعالیت‌های عملیاتی ارائه دادند تا میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> ناشی از حمل‌ونقل کانتینری را برآورد کنند. آن‌ها ظرفیت عملیاتی بنادر و تأثیر جای‌گذاری کانتینرهای خالی بر شاخص‌های انتشار را نیز بررسی کردند. منگ و وانگ [۱۲] شبکه‌ای برای خدمات حمل‌ونقل کانتینری طراحی کردند که شامل جای‌گذاری کانتینرهای خالی، عملیات پهلوگیری در چند بندر و ساختار هاب-فیدر بود. آن‌ها برای حل این مسئله از مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط استفاده کردند. شینتانی و همکاران [۱۳] مدل جریان شبکه چندکالایی ارائه کردند که در آن اندازه‌ها ناوگان کانتینرهای استاندارد و قابل ترکیب و همچنین نحوه تخصیص و جای‌گذاری کانتینرهای خالی تعیین می‌شود. در پاسخ به عدم تعادل تجاری میان اروپا و چین، کوزمیکز و پش [۱۴] مدل‌ها و راهکارهای مختلفی برای حل مساله تغییر موقعیت کانتینرهای خالی در حمل‌ونقل اوراسیایی تحلیل کردند. لو و چانگ [۱۵] با استفاده از نظریه هماهنگی قرارداد، مسئله تغییر موقعیت و موجودی کانتینرهای خالی را مدل‌سازی کردند. در این مدل، تغییر در الگوی تقاضای مشتریان و حمل‌ونقل نیز در نظر گرفته شده است. عبدالشفی و همکاران [۱۶] مدلی برای حل مسئله تغییر موقعیت کانتینرهای خالی ارائه دادند که در آن از رویکرد مدل‌سازی عامل‌محور<sup>۱</sup> استفاده شده است. هدف مدل پیشنهادی آن‌ها، کمینه‌سازی هزینه کل تغییر موقعیت کانتینرهای خالی بود. وانگ و همکاران [۱۷] مدلی با هدف حل مسئله بهینه‌سازی مشارکتی تخصیص اسلات و تغییر موقعیت کانتینر خالی در خوشه‌های بندری تحت یک سیاست کنترل موجودی ترکیبی ارائه داده‌اند. فو و جی [۱۸] یک مدل از برنامه‌ریزی موجودی غیرقطعی از کانتینرهای خالی در حمل و نقل چندوجهی با در نظر گرفتن تراکم بندر ارائه داده‌اند. کای و همکاران [۱۹] یک روش بهینه‌سازی ترکیبی برای تغییر موقعیت کانتینرهای خالی در طی چند دوره با در نظر گرفتن کنترل موجودی ارائه داده‌اند که به محدودیت‌های تحقیقات موجود، مانند فقدان مکانیسم‌های همکاری پویای چند دوره‌ای می‌پردازد. لیانگ و همکاران [۲۰] یک مدل برنامه‌ریزی پویای تصادفی را برای بهینه‌سازی جا به جایی کانتینرهای خالی با هدف به حداکثر رساندن درآمد کل مورد انتظار در طول افق برنامه‌ریزی توسعه داده‌اند. فنگ و همکاران [۲۱] با استفاده از مفاهیم تاب‌آوری، کانتینری کردن محموله‌های فله و تغییر موقعیت کانتینرهای خالی را مورد بحث قرار داده‌اند. ژیانگ و همکاران [۲۲] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی با در نظر گرفتن زمان‌های نامشخص گردش کانتینر توسعه داده‌اند. این مدل، تصمیمات مربوط به استقرار کشتی و تغییر موقعیت کانتینر خالی را در چندین دوره برنامه‌ریزی از طریق یک فرآیند تصمیم‌گیری دو مرحله‌ای ادغام می‌کند و هدف آن به حداقل رساندن هزینه کل، شامل استقرار کشتی،

<sup>۱</sup> Agent-Based Modeling

اجاره کانتینر و هزینه‌های جریمه برای تقاضای برآورده نشده است. زیار و همکاران [۲۳] به بررسی تغییر موقعیت کانتینرهای خالی در بنادر استرالیا-آسیا پرداخته‌اند.

### ۳-۱- پایداری

حمل‌ونقل دریایی ستون فقرات تجارت جهانی است و حدود ۸۰٪ از کالاهای دنیا را جابه‌جا می‌کند. با این حال، این صنعت یکی از منابع عمده انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) است که چالش‌هایی در زمینه پایداری و حفاظت از محیط‌زیست ایجاد کرده است. مطالعات در زمینه پایداری در حمل‌ونقل دریایی و عملکرد بنادر، به بررسی استراتژی‌ها و فناوری‌هایی پرداخته‌اند که هدف آن‌ها کاهش آثار زیست‌محیطی و ارتقای بهره‌وری عملیاتی است. این اقدامات شامل:

- کاهش انتشار کربن، بهبود بهره‌وری سوخت و گذار به سوخت‌های پاک‌تر مانند گاز طبیعی مایع‌شده (LNG)، هیدروژن و آمونیاک؛

- دیجیتالی‌سازی فرآیندها، بهینه‌سازی زنجیره تأمین و طراحی بهتر کشتی‌ها برای ارتقاء عملکرد زیست‌محیطی؛

- الکتریکی‌سازی تجهیزات بندری برای کاهش انتشار هنگام پهلوگیری کشتی‌ها.

مطالعات نشان می‌دهند که حمل‌ونقل دریایی حدود ۲.۲٪ از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی را تشکیل می‌دهد که بخش زیادی از آن در نزدیکی سواحل و مناطق شهری اتفاق می‌افتد و می‌تواند بر کیفیت هوا و سلامت عمومی تأثیر منفی بگذارد ([۲۴، ۲۵]). برای مقابله با این چالش، روش‌های مختلفی از جمله استفاده از سوخت‌های پاک، اجرای سفر آهسته<sup>۱</sup>، و بهبود بهره‌وری انرژی پیشنهاد شده‌اند ([۲۶، ۲۷]). سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) هدف‌گذاری کرده که تا سال ۲۰۳۰ انتشار گازهای گلخانه‌ای را دست‌کم ۴۰٪ کاهش دهد، با هدف‌گذاری‌های بیشتر تا سال ۲۰۵۰.

دیجیتالی‌سازی نیز نقش مهمی در افزایش پایداری ایفا می‌کند. استفاده از فناوری‌هایی در این زمینه، یکپارچگی ذی‌نفعان را افزایش داده و باعث کاهش انتشار می‌شود ([۲۸، ۲۹]). همچنین، استفاده از دیجیتال توپین در بنادر<sup>۲</sup> با بهینه‌سازی عملیات، مدیریت منابع و زمان‌بندی، به کاهش اثرات کربنی کمک می‌کند [۳۰].

محرك‌های اقتصادی مانند قیمت‌گذاری کربن و یارانه‌های فناوری‌های سبز نیز می‌توانند شرکت‌ها را به سمت اقدامات پایدار سوق دهند [۳۱] البته، اجرای مؤثر این سیاست‌ها نیازمند چارچوب‌های قانونی و نظارتی دقیق است تا اطمینان حاصل شود که شرکت‌ها پاسخگوی عملکرد زیست‌محیطی خود هستند [۳۲]. پایداری بنادر نیز به‌شدت با سیستم کلی حمل‌ونقل دریایی در ارتباط است. اتخاذ سیستم‌های مدیریت انرژی بندری، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند خورشیدی و بادی)، و تجهیزات هوشمند می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش ردپای کربنی داشته باشد [۳۳]. از جمله دیگر مطالعات انجام شده در زمینه پایداری مربوط به پژوهش گل‌محمدی و همکاران [۳۴] است. آنها با ارائه الگوریتم سنجاقک چند هدفه به بهینه‌سازی زنجیره تأمین پایدار تحت شرایط اشتراک منابع پرداخته‌اند. همچنین زیار و همکاران [۳۵] به بررسی پایداری در بنادر خشک پرداخته‌اند.

در مجموع، دستیابی به پایداری در حمل‌ونقل دریایی مستلزم رویکردی چندجانبه شامل فناوری، اقتصاد، مقررات و همکاری ذی‌نفعان است.

<sup>1</sup> slow steaming

<sup>2</sup> port digital twin

جدول ۱ بررسی شکاف‌های تحقیقاتی

مطالعه موردی	دموراژ	شبکه هاب و فیدر	پایداری	متغیرها	تابع هدف	تعداد توابع هدف	نویسندگان
x	x	x	x	سطح موجودی- میزان کانتینرهای تاشو و غیر تاشو برای حمل	کاهش هزینه‌های عملیاتی	تک هدفه	لی و مون [۸]
✓	x	x	x	مسیریابی-موجودی-تقاضا	کاهش هزینه	تک هدفه	سانگ و دانگ [۹]
x	x	x	x	قیمت- تقاضا- تعداد کانتینر خالی	افزایش سود	تک هدفه	چن و همکاران [۱۰]
✓	x	✓	x	تعداد کانتینرهای تاشو و غیر تاشو در زمان تخلیه و بارگیری-تعداد کشتی	کاهش هزینه‌های عملیاتی	تک هدفه	منگ و وانگ [۱۲]
x	x	x	x	موجودی-تقاضا	افزایش سود	تک هدفه	لو و چانگ [۱۵]
✓	x	x	x	تعداد کانتینرهای خالی- تقاضا	کاهش هزینه‌های جابه جایی- افزایش سود	دو هدفه	عبدالشفی و همکاران [۱۶]
✓	✓	✓	✓	زمان ورود و انتظار کشتی- موجودی-تخصیص- کمبود یا مازاد کانتینر خالی در بنادر	کاهش عدم توازن کانتینرهای خالی- کاهش انتشار کرن- افزایش سود	سه هدفه	این تحقیق

در جمع‌بندی مرور ادبیات همان گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، می‌توان بیان کرد که اغلب تحقیقات پیشین هر یک تنها بر بخشی از مسئله تمرکز داشته‌اند؛ برخی صرفاً به کاهش هزینه‌های جابه‌جایی یا طراحی مسیر پرداخته‌اند، برخی دیگر به عدم قطعیت و بهینه‌سازی مقاوم، و گروهی نیز به ملاحظات زیست‌محیطی اشاره داشته‌اند. در مقابل، نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه یک مدل جامع چندهدفه است که سه بعد کلیدی شامل سودآوری اقتصادی، توازن کانتینرهای خالی و پایداری زیست‌محیطی را به طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد. علاوه بر این، تفکیک ناوگان به دو دسته لاینر و فیدر، لحاظ کردن هزینه دموراژ و انتشار آلاینده‌ها در بنادر، و استفاده از ساختار واقع‌گرایانه هاب-فیدر از دیگر وجوه تمایز این تحقیق نسبت به مطالعات پیشین به شمار می‌رود.

## ۲- مدل‌سازی و فرمول‌بندی

### ۲-۱- تعریف مساله

یکی از مسائل مهم در لجستیک دریایی، عدم تعادل کانتینرهای خالی در بنادر است. این مساله به دلایل مختلفی ایجاد می‌شود که مهم‌ترین آن عدم تعادل تقاضا در بنادر است. برای حل این مساله، این مقاله یک مدل ریاضی برای متعادل‌سازی کانتینرهای خالی در بنادر ارائه می‌دهد. یکی از بازیگران اصلی در این مساله، شرکت‌های کشتیرانی هستند. این شرکت‌ها مسئول حمل کانتینرها هستند. در این مساله برنامه و مسیر کشتی‌ها مشخص است. در این مقاله فرض بر این است که مالکیت کانتینرها فقط با شرکت‌های کشتیرانی است. این شرکت‌ها باید کالاها را طبق تقاضا در بنادر ارسال کنند و در عین حال تعادل کانتینرهای خالی در بنادر ایجاد شود.

شبکه کشتیرانی در دنیای واقعی از بنادر هاب و فیدر تشکیل شده است. کشتی‌های بزرگتر به نام لاینرها فقط در بنادر هاب بارگیری و تخلیه می‌کنند و کشتی‌های فیدر فقط می‌توانند در بنادر فیدر بارگیری و تخلیه کنند. برای نزدیک‌تر شدن به دنیای واقعی، شبکه‌ای متشکل از بنادر هاب و فیدر در نظر گرفته شده است. بنابراین، دو نوع کشتی، لاینر و فیدر، برای حمل‌ونقل در این شبکه وجود دارد. عملیات تخلیه و بارگیری در بندر واسط برای تغییر ناوگان انجام می‌شود.

انتخاب مدل ریاضی چندهدفه در این پژوهش ناشی از وجود تعارض میان اهداف اصلی مسئله است. از یک سو، افزایش سودآوری اقتصادی معمولاً با استفاده از کشتی‌های بزرگ‌تر و افزایش دفعات جابه‌جایی همراه است که می‌تواند منجر به افزایش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها گردد. از سوی دیگر، تلاش برای کاهش سریع عدم توازن کانتینرهای خالی ممکن است نیازمند حرکت‌های اضافی و هزینه‌های بالاتر باشد. در نتیجه، اهداف سودآوری، توازن کانتینرها و پایداری زیست‌محیطی در بسیاری شرایط با یکدیگر در تضاد قرار می‌گیرند. به همین دلیل، استفاده از یک چارچوب چندهدفه ضروری است تا امکان بهینه‌سازی هم‌زمان این اهداف و یافتن راه‌حل‌های متوازن و کارآمد برای تصمیم‌گیرندگان فراهم شود.

مفروضات اصلی این مطالعه به شرح زیر است:

- مالکیت کانتینرها بر عهده شرکت کشتیرانی است.
- تعدادی بندر هاب و بندر فیدر در شبکه مسئله وجود دارد.
- یک شرکت کشتیرانی به عنوان بازیگر اصلی این مسئله در نظر گرفته شده است.
- محدوده مسئله در شرایط قطعی قرار دارد.
- تمام کالاها از طریق دریا و توسط خطوط کشتیرانی لاینر و فیدر حمل می‌شوند.

## ۲-۲- مدل ریاضی

جدول ۲ اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها

اندیس‌ها	
مجموعه بنادر	$\mathcal{V}_a$
مجموعه بنادر هاب ( $\mathcal{V}_h \in \mathcal{V}_a$ )	$\mathcal{V}_h$
مجموعه بنادر فیدر ( $\mathcal{V}_f \in \mathcal{V}_a$ )	$\mathcal{V}_f$
بندر اول ( $\mathcal{V}_{start} \in \mathcal{V}_a$ )	$\mathcal{V}_{start}$
مجموعه بنادر واسط ( $\mathcal{V}_s \in \mathcal{V}_a$ )	$\mathcal{V}_s$
مجموعه ناوگان‌های کشتی‌های فیدر و لاینر ( $k \in \mathcal{K}$ )	$\mathcal{K}$
مجموعه ناوگان کشتی‌های لاینر ( $k_1 \in \mathcal{K}$ )	$k_1$
مجموعه ناوگان کشتی‌های فیدر ( $k_2 \in \mathcal{K}$ )	$k_2$
دوره زمانی ( $p \in \mathcal{P}$ )	$\mathcal{P}$
پارامترها	
ظرفیت کشتی $k$	$Cap^k$
پارامتر باینری که در صورتی مقدار ۱ می‌گیرد که کشتی $k$ در دوره زمانی $p$ از بندر $i$ به بندر $j$ برود.	$x_{ij}^{kp}$
عرضه/تقاضا بندر $i$ در دوره زمانی $p$	$Q_{ip}$
پارامتر باینری که در صورتی مقدار ۱ می‌گیرد که بندر $i$ به عنوان بندر عرضه در نظر گرفته شود.	$d_{ip}^+$
پارامتر باینری که در صورتی مقدار ۱ می‌گیرد که بندر $i$ به عنوان بندر تقاضا در نظر گرفته شود.	$d_{ip}^-$
حداکثر تعداد مجاز کانتینر خالی در بندر $i$ ، که فراتر از آن، بندر نامتعادل تلقی می‌شود.	$I_i^{max}$
حداقل تعداد مجاز کانتینر خالی در بندر $i$ ، که فراتر از آن، بندر نامتعادل تلقی می‌شود.	$I_i^{min}$
سطح موجودی کانتینر خالی در بندر $i$ در ابتدای افق زمانی	$I_i^0$
هزینه تخلف واحد برای تأخیر در ورود در زمان استاندارد	$C_i^{Violation}$
هزینه دموراژ در بندر $i$	$C_i^{Demurrage}$
زمان مجاز برای بارگیری و تخلیه بار کشتی $k$	$l_k$
مدت زمان خدمت در بندر $i$ برای هر کشتی	$SD_i$
حداکثر زمان مجاز برای رسیدن کشتی $k$ به بندر $i$	$T_i^k$
زمان سفر کشتی $k$ بین بندر $i$ و بندر $j$	$tt_{ij}^k$
درآمد حاصل از هر واحد (به ازای هر کانتینر) محموله	$P$

قیمت حمل و نقل برای حمل کالا از بندر $i$ به بندر $j$ با کشتی $k$ در دوره زمانی $p$	$CC_{ij}^{kp}$
میزان انتشار کربن در طول حمل و نقل (به ازای هر کانتینر)	$E_{CO2}^{sea}$
میزان انتشار کربن در بندر (به ازای هر کانتینر)	$E_{CO2}^{port}$
<b>متغیرهای تصمیم</b>	
متغیر باینری که برابر با 1 است اگر بندر $i$ در دوره $p$ کمبود کانتینر خالی داشته باشد ( $I_{ip} < I_i^{min}$ )	$LA_{ip}$
متغیر باینری که برابر با 1 است اگر بندر $i$ در دوره $p$ مازاد کانتینر خالی داشته باشد ( $I_{ip} > I_i^{min}$ )	$SA_{ip}$
تعداد کانتینرهای خالی حمل شده از بندر $i$ به بندر $j$ با کشتی $k$ در دوره $p$	$XA_{ij}^{kp}$
تعداد کانتینرهای پر حمل شده از بندر $i$ به بندر $j$ با کشتی $k$ در دوره $p$	$XA_{ij}^{k'p}$
متغیر باینری که برابر با 1 است اگر کانتینر بندر $i$ به کشتی $k$ در دوره $p$ اختصاص داده شود.	$XX_i^{kp}$
سطح موجودی کانتینر خالی در بندر $i$ در پایان دوره $p$	$I_{ip}$
زمان ورود کشتی $k$ به بندر $i$ در دوره $p$	$A_{ip}^k$
زمان انتظار کشتی $k$ در بندر $i$ در دوره $p$	$w_i^{kp}$

$$Max Z_1 = \sum_{i \in \mathcal{V}_a} \sum_{j \in \mathcal{V}_a} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{P}} P(XA_{ij}^{kp}) XX_i^{kp} \cdot Q_{ip} - \sum_{i \in \mathcal{V}_a} \sum_{j \in \mathcal{V}_a} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{P}} (CC_{ij}^{kp} \cdot XX_i^{kp}) X_{ij}^{kp} \cdot Q_{ip} - \sum_{i \in \mathcal{V}_a} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{k \in \mathcal{K}} C^{Violation} [Max(0, (T_i^k - A_{ip}^k))] - \sum_{i \in \mathcal{V}_s} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{P}} C_i^{Demurrage} [Max(0, ((w_i^{kp} + SD_i) - l_k))] \quad (1)$$

$$Min Z_2 = \sum_{i \in \mathcal{V}_a} \sum_{p \in \mathcal{P}} (LA_{ip} + SA_{ip}) \quad (2)$$

$$Min Z_3 = \sum_{i \in \mathcal{V}_a} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{k \in \mathcal{K}} E_{CO2}^{port} \cdot XX_i^{kp} \cdot Q_{ip} + \sum_{i \in \mathcal{V}_a} \sum_{j \in \mathcal{V}_a} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{P}} E_{CO2}^{sea} \cdot XA_{ij}^{kp} \quad (3)$$

s.t:

$$A_{ip}^{k_1} = 0 \quad \forall i \in \mathcal{V}_{start}, p \in \mathcal{P}, k_1 \in \mathcal{K} \quad (4)$$

$$A_{ip}^k + SD_i + tt_{ij}^k \leq A_{jp}^k + M(1 - X_{ij}^{kp}) \quad \forall i, j \in \mathcal{V}_a, k \in \mathcal{K}, p \in \mathcal{P} \quad (5)$$

$$A_{ip}^{k_1} + SD_i + w_i^{k_2p} + w_i^{k_1p} + tt_{ij}^{k_2} \leq A_{jp}^{k_2} + M(1 - X_{ij}^{k_2p}) \quad \forall i \in \mathcal{V}_s, j \in \mathcal{V}_f, k_1, k_2 \in \mathcal{K} \quad (6)$$

$$w_i^{k_2p} \geq A_{ip}^{k_1} - A_{ip}^{k_2} \quad \forall i \in \mathcal{V}_s, k_1, k_2 \in \mathcal{K} \quad (7)$$

$$w_i^{k_1p} \geq A_{ip}^{k_2} - A_{ip}^{k_1} \quad \forall i \in \mathcal{V}_s, k_1, k_2 \in \mathcal{K} \quad (8)$$

$$I_{ip} - I_i^{max} \leq M \cdot SA_{ip} \quad \forall i \in \mathcal{V}_a, p \in \mathcal{P} \quad (9)$$

$$I_i^{min} - I_{ip} \leq M \cdot LA_{ip} \quad \forall i \in \mathcal{V}_a, p \in \mathcal{P} \quad (10)$$

$$I_{ip} = I_i^0 - \sum_{j \in \mathcal{V}_a} \sum_{k \in \mathcal{K}} XX_i^{kp} \cdot X_{ij}^{kp} \cdot d_{ip}^+ \cdot Q_{ip} + \sum_{j \in \mathcal{V}_a} \sum_{k \in \mathcal{K}} XX_i^{kp} \cdot X_{ij}^{kp} \cdot d_{ip}^- \cdot Q_{ip} \quad \forall i \in \mathcal{V}_a, p \in \mathcal{P} \quad (11)$$

$$(XA_{ij}^{kp} + XA_{ij}^{k'p}) \cdot XX_i^{kp} \leq Cap^k X_{ij}^{kp} \quad \forall i, j \in \mathcal{V}_a, k \in \mathcal{K}, p \in \mathcal{P} \quad (12)$$

$$X_{ij}^{kp} \cdot ((XA_{ij}^{kp} + XA_{ij}^{k'p}) \cdot XX_i^{kp} + d_{ip}^+ Q_{ip} + d_{ip}^- Q_{ip} - (XA_{jl}^{kp} + XA_{jl}^{k'p}) \cdot XX_j^{kp}) = 0 \quad \forall i, j, l \in \mathcal{V}_a, k \in \mathcal{K}, p \in \mathcal{P} \quad (13)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{P}} XX_i^{kp} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{V}_a \quad (14)$$

$$\sum_{j \in V_a} X_{ij}^{kp} \leq XX_i^{kp} \quad \forall i \in V_a, k \in \mathcal{K}, p \in \mathcal{P} \quad (15)$$

$$XX_i^{kp}, LA_{ip}, SA_{ip} \in \{0,1\}, XA_{ij}^{kp}, XA'_{ij}{}^{kp}, I_{ip}, A_{ip}^k, w_i^{kp} \geq 0 \quad (16)$$

بیشینه‌سازی تابع هدف سود در معادله (۱) نشان داده شده است. عبارت اول کل درآمد شرکت لاینر، عبارت دوم هزینه حمل‌ونقل، عبارت بعدی هزینه نقض حداکثر زمان ورود کشتی به بندر و عبارت آخر در این تابع مربوط به هزینه‌های دموراژ است. تابع هدف دوم، کمینه‌سازی عدم تعادل کانتینر خالی در بنادر است که در معادله (۲) نشان داده شده است. معادله (۳) آخرین تابع هدف این مسئله را نشان می‌دهد. این تابع هدف مربوط به مسائل پایداری است و هدف آن کاهش انتشار گازهای  $CO_2$  در حین حمل‌ونقل دریایی و جابجایی محموله‌ها در بنادر است. معادله (۴) بیان می‌کند که زمان شروع حمل‌ونقل از نقطه شروع برابر با صفر است. معادله (۵) زمان‌بندی ورود کشتی‌ها به بندر را نشان می‌دهد. معادله (۶) زمان‌بندی ورود کشتی‌ها به یک بندر واسط را نشان می‌دهد. معادلات (۷) و (۸) زمان انتظار کشتی‌ها در بندر واسط را نشان می‌دهند. معادله (۷) و (۸) زمان انتظار کشتی را نشان می‌دهد. معادله (۹) و معادله (۱۰) مربوط به مازاد و کمبود کانتینرهای خالی در بنادر هستند. معادله (۱۱) سطح موجودی کانتینر خالی در بندر را نشان می‌دهد. معادله (۱۲) تضمین می‌کند که تعداد کانتینرهای خالی و پر جابجا شده توسط هر کشتی نباید از ظرفیت آن بیشتر باشد. معادله (۱۳) تعداد کانتینرهای خالی و پر متعادل بین بندر  $i$  و  $j$  را نشان می‌دهد. معادله (۱۴) تضمین می‌کند که کانتینرهای مربوط به هر بندر باید به یک کشتی از یک شرکت حمل‌ونقل اختصاص داده شوند. معادله (۱۵) بیان می‌کند که کانتینر بندر  $i$  را می‌توان به کشتی  $k$  اختصاص داد اگر یک مسیر کشتی از بندر  $i$  به بندر  $j$  وجود داشته باشد.

خطی‌سازی دو جمله آخر تابع هدف اول در معادله (۱) به شرح زیر است ( $N$  و  $\hat{N}$  متغیرهای پیوسته مثبت برای خطی‌سازی هستند):

$$N = \sum_{i \in V_a} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{P}} C^{Violation} [Max(0, (T_i^k - A_{ip}^k))] \quad (17)$$

$$\hat{N} = \sum_{i \in V_s} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{P}} C_i^{Demurrage} [Max(0, ((w_i^{kp} + SD_i) - l_k))] \quad (18)$$

$$N \geq \sum_{i \in V_a} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{P}} C^{Violation} (T_i^k - A_{ip}^k) \quad (19)$$

$$\hat{N} \geq \sum_{i \in V_s} \sum_k \sum_p C_i^{Demurrage} [(w_i^{kp} + SD_i) - l_k] \quad (20)$$

$$N, \hat{N} \geq 0 \quad (21)$$

همچنین، وجود دو عبارت  $XA_{ij}^{kp}$  و  $XA'_{ij}{}^{kp}$  در برخی از قسمت‌های مدل، از جمله تابع هدف اول و محدودیت‌ها، باعث غیرخطی شدن مدل شده است. بنابراین، خطی‌سازی این دو عبارت غیرخطی به صورت زیر است ( $\hat{D}$  و  $B, B', D$ ) متغیرهای پیوسته مثبت برای خطی‌سازی هستند):

$$B_{ij}^{kp} = XA_{ij}^{kp} \cdot XX_i^{kp} \quad \forall i, j \in V_a, K, P \quad (22)$$

$$\hat{B}_{ij}^{kp} = XA'_{ij}{}^{kp} \cdot XX_i^{kp} \quad \forall i, j \in V_a, K, P \quad (23)$$

$$D_{jl}^{kp} = XA_{jl}^{kp} \cdot XX_j^{kp} \quad \forall l, j \in V_a, K, P \quad (24)$$

$$\hat{D}_{jl}^{kp} = XA'_{jl}{}^{kp} \cdot XX_j^{kp} \quad \forall l, j \in V_a, K, P \quad (25)$$

$$B_{ij}^{kp} \leq XA_{ij}^{kp} \quad \forall i, j \in V_a, K, P \quad (26)$$

$$B_{ij}^{kp} \leq M \cdot XX_i^{kp} \quad \forall i, j \in V_a, K, P \quad (27)$$

$$B_{ij}^{kp} \geq XA_{ij}^{kp} - M(1 - XX_i^{kp}) \quad \forall i, j \in V_a, K, P \quad (28)$$

$$\hat{B}_{ij}^{kp} \leq XA'_{ij}{}^{kp} \quad \forall i, j \in V_a, K, P \quad (29)$$

$$\hat{B}_{ij}^{kp} \leq M.XX_i^{kp} \quad \forall i, j \in V_a, K, P \quad (30)$$

$$\hat{B}_{ij}^{kp} \geq XA_{ij}^{kp} - M(1 - XX_i^{kp}) \quad \forall i, j \in V_a, K, P \quad (31)$$

$$D_{jl}^{kp} \leq XA_{jl}^{kp} \quad \forall l, j \in V_a, K, P \quad (32)$$

$$D_{jl}^{kp} \leq M.XX_j^{kp} \quad \forall l, j \in V_a, K, P \quad (33)$$

$$D_{jl}^{kp} \geq XA_{jl}^{kp} - M(1 - XX_j^{kp}) \quad \forall l, j \in V_a, K, P \quad (34)$$

$$\hat{D}_{jl}^{kp} \leq XA_{jl}^{kp} \quad \forall l, j \in V_a, K, P \quad (35)$$

$$\hat{D}_{jl}^{kp} \leq M.XX_j^{kp} \quad \forall l, j \in V_a, K, P \quad (36)$$

$$\hat{D}_{jl}^{kp} \geq XA_{jl}^{kp} - M(1 - XX_j^{kp}) \quad \forall l, j \in V_a, K, P \quad (37)$$

### ۲-۳- روش ترابی-هسینی

در مدل هایی که دارای چند تابع هدف هستند، برای تبدیل توابع هدف به یک تابع هدف، از روش های مختلفی استفاده می شود. با بررسی مطالعات گذشته، رشیدیان [۳۶] از روش معیار جامع برای تبدیل توابع هدف به یک تابع هدف استفاده کرده است. همچنین سرآبادانی و همکاران [۳۷] از روش LP metric برای این موضوع استفاده کرده اند. با توجه به اینکه مدل ارائه شده چند هدفه است، برای تبدیل کردن آن به یک هدف از روش ترابی-هسینی استفاده شده است. این روش در ابتدا توسط ترابی و هسینی در سال ۲۰۰۸ ارائه گردید [۳۸] و یکی از روش های شناخته شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه است. در این روش با در نظر گرفتن ضرایبی در تابع هدف می توان حالات بدبینانه یا واقع بینانه بودن و یا حالت بین این دو را از منظر تصمیم گیر در نظر گرفت.

برای اجرای این روش ابتدا باید حل ایده آل مثبت (PIS) و ایده آل منفی (NIS) را برای هر یک از توابع هدف به صورت زیر به دست آورد:

$$\begin{aligned} Z_1^{PIS} &= \max Z_1 & Z_1^{NIS} &= \min Z_1 \\ Z_2^{PIS} &= \min Z_2 & Z_2^{NIS} &= \max Z_2 \\ Z_3^{PIS} &= \min Z_3 & Z_3^{NIS} &= \max Z_3 \end{aligned} \quad (38)$$

سپس برای هر تابع هدف یک تابع عضویت خطی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mu_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_1 > Z_1^{PIS} \\ \frac{Z_1 - Z_1^{NIS}}{Z_1^{PIS} - Z_1^{NIS}} & \text{if } Z_1^{NIS} < Z_1 < Z_1^{PIS} \\ 0 & \text{if } Z_1 < Z_1^{NIS} \end{cases} \quad (39)$$

$$\mu_2 = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_2 < Z_2^{PIS} \\ \frac{Z_2^{NIS} - Z_2}{Z_2^{NIS} - Z_2^{PIS}} & \text{if } Z_2^{PIS} < Z_2 < Z_2^{NIS} \\ 0 & \text{if } Z_2 > Z_2^{NIS} \end{cases} \quad (40)$$

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_3 < Z_3^{PIS} \\ \frac{Z_3^{NIS} - Z_3}{Z_3^{NIS} - Z_3^{PIS}} & \text{if } Z_3^{PIS} < Z_3 < Z_3^{NIS} \\ 0 & \text{if } Z_3 > Z_3^{NIS} \end{cases} \quad (41)$$

در نهایت با استفاده از رابطه ۴۲ مساله چند هدفه به یک مساله یک هدفه تبدیل می شود:

$$\max \lambda = \gamma \lambda_0 + (1 - \gamma) \sum_h \omega_h \mu_h$$

s. t:

$$\lambda_0 \leq \mu_h \quad h = 1, 2$$

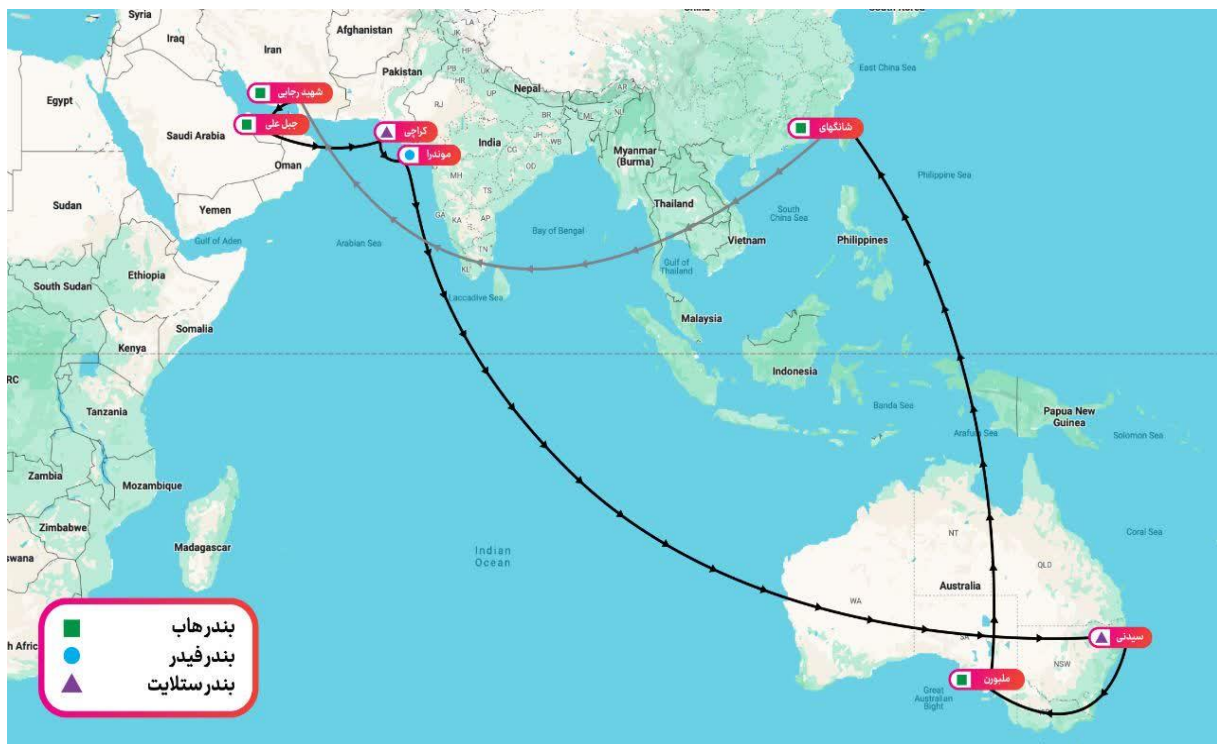
$$\lambda_0 \geq 0$$
(42)

در این رابطه  $\omega_h$  نشان دهنده اهمیت نسبی تابع هدف  $h$  و  $\gamma$  ضریب زیان است. هر چه  $\gamma$  بیشتر باشد جبران زیان سخت تر است.

### ۳- بررسی و محاسبات عددی

#### ۳-۱- مطالعه موردی

به منظور درک بهتر مدل ارائه شده در این مقاله، مطالعه موردی از کشتی فیدر و لاینر در مسیر بنادر هاب شهید رجایی، جبل علی، ملبورن و شانگهای مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مسیر بندر موندرا به عنوان بنادر فیدر در نظر گرفته شده است. همچنین بنادر کراچی و سیدنی به عنوان بندر واسط (Satellite Port) در نظر گرفته شده اند. در شکل ۱ مسیر این حمل و نقل در شبکه هاب و فیدر نمایش داده شده است.



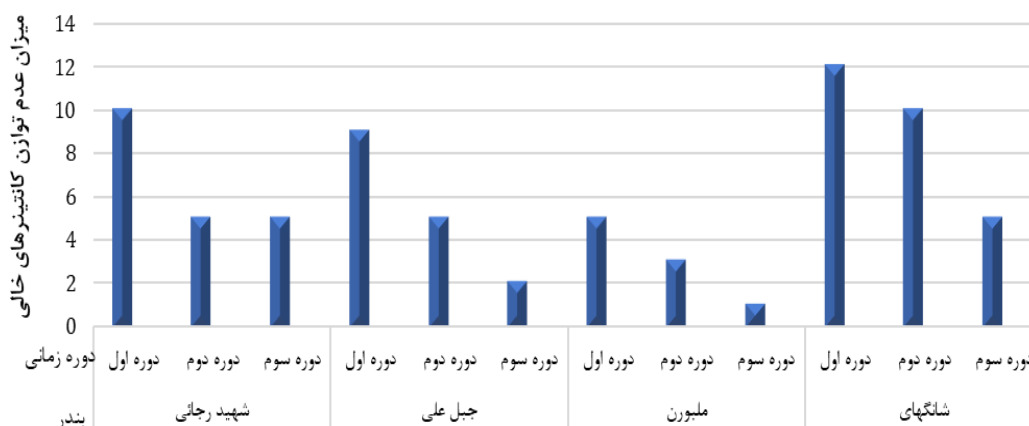
شکل ۱ مسیر انتخابی در مطالعه موردی

برای حل این مدل که یک برنامه ریزی خطی است، از نرم افزار گمز با حل کننده سیپلکس استفاده شده است. رایانه مورد استفاده دارای مشخصات پردازنده Intel® Core™i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.50GHz و ۶ گیگابایت رم اجرایی با سیستم عامل ویندوز ۱۰ است. در جدول ۳ برخی از نتایج مربوط به اجرای مدل ریاضی در گمز آورده شده است:

جدول ۳ نتایج حاصل از حل مدل

مقدار تابع هدف سوم	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	زمان حل سیپلکس در گمز (ثانیه)
۱۱۲۴	۴	۶۵۷۸۹۴۳	۵۴

همچنین مطابق نمودار شکل ۲ میزان عدم توازن کانتینرهای خالی در سه دوره متوالی در بندر هاب قابل مشاهده است. این نمودار نشان می‌دهد که با استفاده از مدل ارائه شده در این مقاله میزان عدم توازن کانتینرها در بندر در طی سه دوره زمانی به صورت کاهشی است.



شکل ۲ میزان عدم توازن کانتینرهای خالی در طی سه دوره زمانی

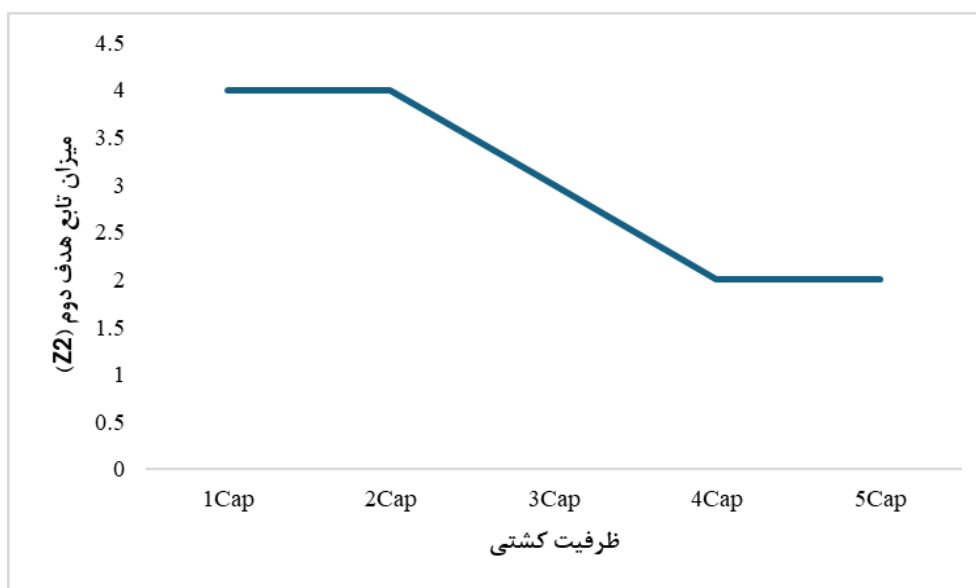
به منظور بررسی کارایی و اثربخشی مدل در ابعاد بزرگتر، با تولید داده‌هایی در ابعاد بزرگتر این موضوع بررسی شده است. جدول ۴ نتایج حاصل از حل مدل در شبکه‌هایی با تعداد ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ بندر متشکل از بندر فیدر و هاب را نشان می‌دهد.

جدول ۴ نتایج حاصل از حل مدل در ابعاد متفاوت

تعداد نقاط	مقدار تابع هدف سوم	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	زمان حل سیپلکس در گمز (ثانیه)
۸	۱۸۶۷	۵	۶۹۶۴۳۲۴	۹۸
۹	۲۴۳۵	۶	۷۴۵۶۴۳۲	۱۸۵
۱۰	۳۱۹۶	۶	۸۰۶۵۴۲۳	۳۴۵
۱۱	۳۷۹۵	۸	۸۵۳۴۱۳۴	۵۳۲
۱۲	۴۵۷۶	۹	۹۱۵۴۶۳۲	۸۷۴

### ۳-۲- تحلیل حساسیت

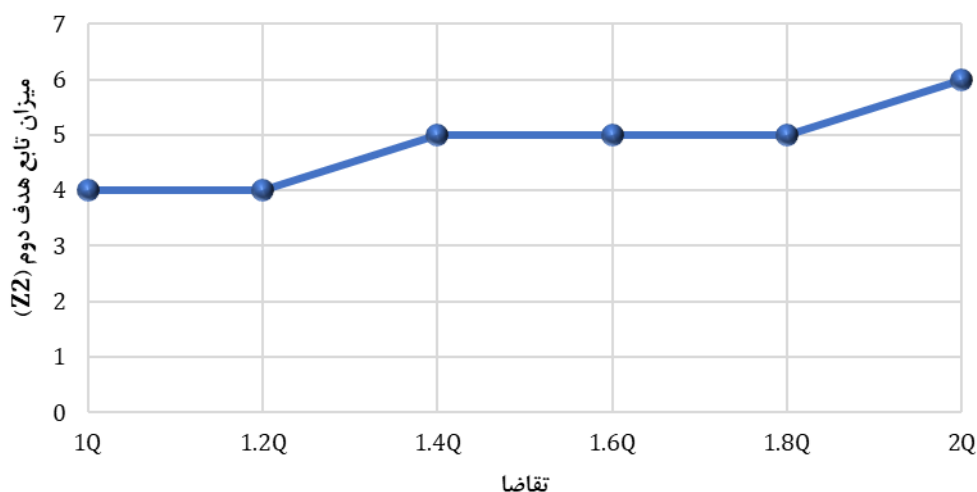
به منظور بررسی حساسیت تابع هدف دوم نسبت به تغییر ظرفیت کشتی، ظرفیت کشتی‌های لاینر و فیدر تا ۵ برابر افزایش داده شد تا تغییرات تابع هدف دوم مورد بررسی قرار گیرد. در شکل ۳ تغییرات این پارامتر بر روی میزان تغییرات در توازن کانتینرهای خالی قابل مشاهده است.



شکل ۳ تحلیل حساسیت افزایش ظرفیت کشتی

همان طور که از نمودار مشخص است، با وجود اینکه با افزایش ظرفیت کشتی‌ها میزان عدم توازن در بنادر کمتر خواهد شد، اما نباید تنها به این فاکتور در جهت کاهش عدم توازن در کانتینرهای خالی اکتفا کرد. زیرا استفاده از کشتی‌ها با ظرفیت بیشتر، هزینه‌های حمل را با توجه به مصرف بیشتر سوخت و فاکتورهای دیگر افزایش می‌دهد. لذا در کاهش عدم توازن کانتینرهای خالی در بنادر باید مدیریتی جامع و اصولی در تمامی ابعاد را اتخاذ کرد.

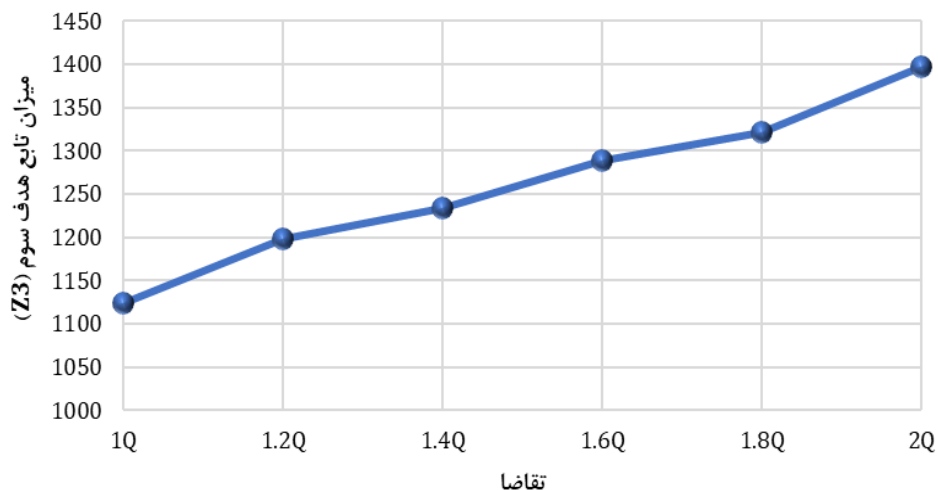
در برخی شرایط بحرانی نظیر سیل و زلزله، تقاضا در بنادر به صورت صعودی افزایش می‌یابد. برای بررسی اثربخشی مدل در این شرایط، تقاضا را در بنادر تا دو برابر افزایش داده‌ایم تا تأثیر آن را بر روی میزان عدم تعادل کانتینرهای خالی مشاهده کنیم.



شکل ۴ تحلیل حساسیت افزایش تقاضا بر روی میزان عدم تعادل کانتینرهای خالی

همان طور که در شکل ۴ مشخص است، تنها دو واحد افزایش در میزان عدم تعادل کانتینرها در بنادر با افزایش تقاضا مشاهده شده است. این نشان دهنده کارآمدی مدل ارائه‌شده در این پژوهش است.

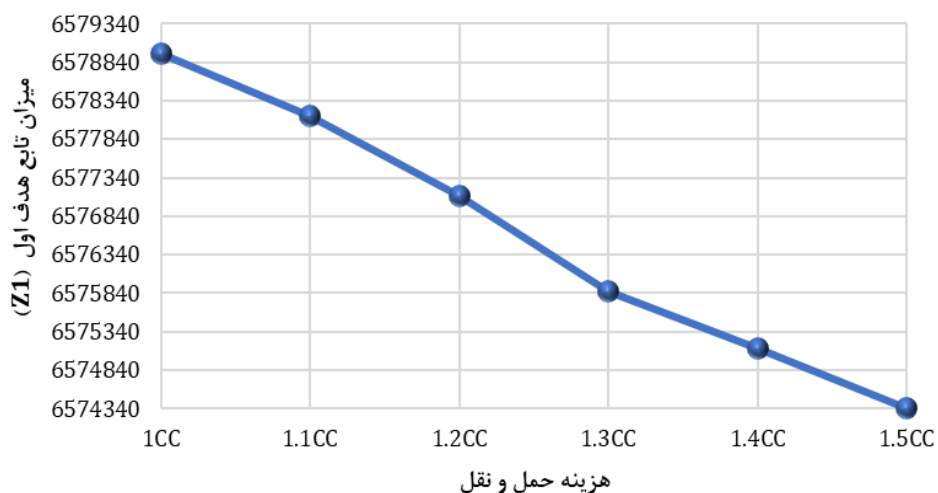
در همین راستا، با افزایش تقاضا حمل و نقل افزایش خواهد یافت. به منظور بررسی اثر افزایش تقاضا بر روی میزان انتشار کربن، نمودار ۵ طراحی شده است.



شکل ۵ تحلیل حساسیت افزایش تقاضا بر روی میزان انتشار کربن

همان طور که از نمودار ۵ مشخص است، با افزایش میزان تقاضا، میزان انتشار کربن افزایش می‌یابد. اما ذکر این نکته ضروری است که با افزایش دو برابری تقاضا، تنها ۲۴ درصد در افزایش میزان انتشار کربن مشاهده می‌شود که این نشان دهنده مؤثر بودن مدل ارائه شده است.

به منظور بررسی اثر تغییرات هزینه حمل‌ونقل بر روی سود، شکل ۶ ارائه شده است. این بخش اثر تغییرات هزینه حمل‌ونقل دریایی (قیمت سوخت و تعرفه‌های مرتبط) را بر عملکرد تابع هدف مربوط به سود بررسی می‌کند. با توجه به نوسانات قیمت سوخت و تعرفه‌های بین‌المللی، شناخت میزان حساسیت شاخص‌های کلیدی از جمله سود اقتصادی برای تصمیم‌گیران حیاتی است.

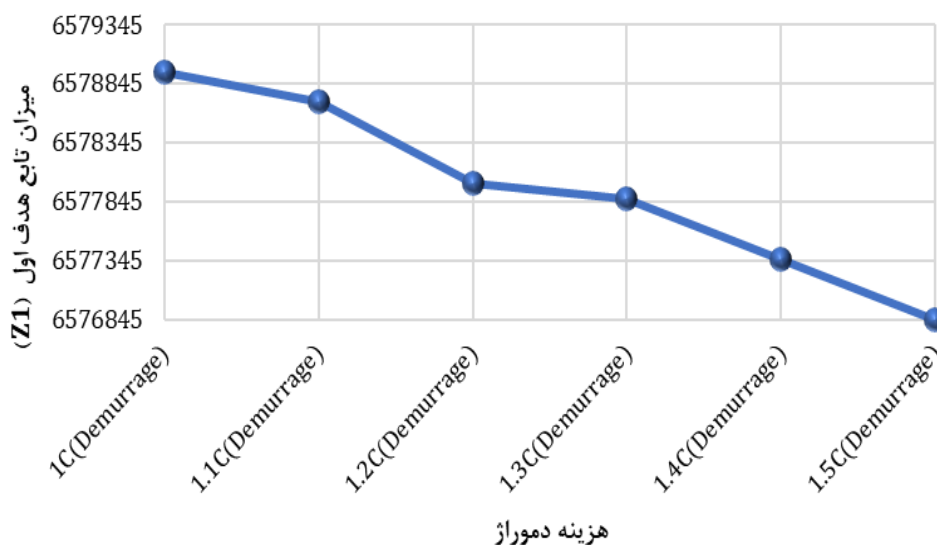


شکل ۶ تحلیل حساسیت افزایش هزینه حمل‌ونقل بر روی میزان سود

در سناریوی پایه، هزینه حمل‌ونقل مطابق داده‌های مطالعه موردی در نظر گرفته شد. سپس این هزینه نسبت به مقدار پایه افزایش یافت (ضرایب ۱.۱ تا ۱.۵). سایر پارامترها ثابت ماند تا اثر خالص افزایش هزینه حمل‌شناسایی شود. مدل برای هر سناریو در نرم‌افزار GAMS اجرا شد و نتایج استخراج گردید.

از دیگر تحلیل حساسیت‌های مهم در این بخش، حساسیت پاسخ مدل نسبت به افزایش هزینه دموراژ است. هدف این است

که مشخص شود چگونه تغییرات در نرخ دموراژ بر تابع هدف سود تجاری تأثیر می‌گذارد. برای این منظور، پارامتر پایه هزینه دموراژ در مجموعه داده مطالعه موردی به عنوان مرجع در نظر گرفته شد. مجموعه‌ای از سناریوها تعریف شد که در آن نرخ دموراژ به ترتیب با ضرایب ۱.۱ تا ۱.۵ نسبت به مقدار پایه تغییر می‌کند. برای هر سناریو مدل با همان سایر پارامترها (ثابت) در GAMS اجرا شد و مقادیر تابع هدف ثبت شد.



شکل ۷ تحلیل حساسیت افزایش هزینه دموراژ بر روی میزان سود

افزایش قیمت دموراژ به عنوان سیگنالی قوی برای کاهش زمان انتظار و بهبود مدیریت اسکله عمل می‌کند، ولی این سیاست دارای هزینه فرصت است. در سطح متوسط، دموراژ بالاتر منجر به انگیزه بهینه‌سازی زمان‌بندی و کاهش کمبود/مازاد کانتینر در برخی بنادر می‌شود. با این حال، اگر هزینه دموراژ بسیار زیاد شود، اپراتورها ممکن است راه‌حلهایی انتخاب کنند (مثل افزایش تحرک کانتینرهای خالی یا استفاده از کشتی‌های کوچک‌تر/بیشتر) که گرچه دموراژ را کاهش می‌دهد، اما هزینه حمل و انتشار را افزایش می‌دهد.

برای اطمینان از صحت و اعتبار مدل پیشنهادی، نتایج به دو شیوه مورد ارزیابی قرار گرفت. نخست، یک مطالعه موردی واقعی بر روی مسیر بنادر منتخب در خاورمیانه و شرق آسیا اجرا شد و الگوی جابجایی کانتینرهای خالی حاصل از مدل با شرایط عملیاتی این بنادر مقایسه گردید که نشان‌دهنده همخوانی منطقی میان خروجی مدل و واقعیت‌های موجود بود. دوم، تحلیل حساسیت بر ظرفیت ناوگان لاینر و فیدر انجام گرفت که پایداری و معقول بودن رفتار مدل را در شرایط تغییر پارامترهای کلیدی تأیید نمود. نتایج این دو سطح از ارزیابی نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته از انسجام محاسباتی و قابلیت کاربرد در محیط‌های واقعی برخوردار است.

### ۳-۳- پیشنهادات مدیریتی

در این قسمت با توجه به نتایج و یافته‌های مطالعه صورت گرفته، پیشنهادهایی برای سیاست‌گذاران، مدیران بنادر و شرکتهای کشتیرانی مطرح شده است.

#### برای سیاست‌گذاران:

- ایجاد مشوق‌های اقتصادی (مانند یارانه‌های سبز و قیمت‌گذاری کربن) برای ترغیب شرکتهای کشتیرانی به استفاده از ناوگان کم‌مصرف و مدیریت بهینه کانتینرهای خالی.

- حمایت از توسعه زیرساخت‌های دیجیتالی (مانند پلتفرم‌های اشتراک‌گذاری داده و دیجیتالی‌سازی توپین بندر) جهت هماهنگی بهتر بین ذی‌نفعان.

#### برای مدیران بنادر:

- استفاده از سیستم‌های مدیریت انرژی بندری و تجهیزات الکتریکی جهت کاهش انتشار آلاینده‌ها هنگام عملیات بارگیری/تخلیه.
- اتخاذ سیاست‌های انعطاف‌پذیر در تخصیص اسکله و منابع، متناسب با جریان‌های متغیر کانتینرهای خالی.

#### برای شرکت‌های کشتیرانی:

- برنامه‌ریزی ترکیبی برای ناوگان لاینر و فیدر جهت کاهش دموراژ و بهبود زمان‌بندی.
- استفاده از مدل‌های پیش‌بینی تقاضا و بهینه‌سازی چندهدفه برای کاهش هزینه‌های جابجایی کانتینر خالی در کنار ارتقاء پایداری زیست‌محیطی.

این پیشنهادها به مدیران و سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا از نتایج تحقیق حاضر در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و عملیاتی بهره‌مند شوند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این مقاله با ارائه مدلی جامع، سه چالش اصلی صنعت حمل‌ونقل دریایی یعنی سودآوری، توازن کانتینرهای خالی و پایداری زیست‌محیطی را به‌طور هم‌زمان هدف قرار داده است. مدل توسعه‌یافته با در نظر گرفتن ساختار واقع‌گرایانه شبکه‌های دریایی و محدودیت‌های عملیاتی، ابزار تصمیم‌گیری مؤثری برای شرکت‌های کشتیرانی فراهم می‌آورد. نتایج حاصل از مطالعه موردی نشان می‌دهد که استفاده از این مدل می‌تواند عدم توازن کانتینرهای خالی را در دوره‌های زمانی مختلف کاهش دهد و در عین حال انتشار کربن و هزینه‌های دموراژ را نیز مدیریت کند. تحلیل حساسیت نیز بر اهمیت انتخاب ظرفیت بهینه ناوگان تأکید می‌کند، اما در عین حال روشن می‌سازد که صرفاً افزایش ظرفیت، پاسخگوی چالش‌های این صنعت نخواهد بود. در نهایت، دستیابی به بهره‌وری و پایداری در حمل‌ونقل دریایی نیازمند اتخاذ رویکردهای ترکیبی و هوشمندانه در طراحی مسیرها، تخصیص منابع و سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی است. به‌طور کلی، نوآوری پژوهش حاضر در طراحی مدلی است که نه تنها اهداف اقتصادی و عملیاتی، بلکه الزامات زیست‌محیطی را نیز به‌صورت یکپارچه پوشش می‌دهد. برخلاف مطالعات گذشته که اغلب بر یک یا دو جنبه محدود متمرکز بودند، مدل پیشنهادی قادر است به‌طور هم‌زمان سه هدف اصلی را دنبال کند و در عین حال ویژگی‌های واقعی شبکه‌های دریایی از جمله وجود دو نوع ناوگان و نقش بنادر واسط را منعکس نماید. این ترکیب منحصربه‌فرد، جایگاه تحقیق حاضر را در ادبیات روشن می‌سازد و ارزش آن را برای تصمیم‌گیران صنعت حمل‌ونقل دریایی برجسته می‌کند. با وجود کارایی مدل پیشنهادی در بهبود سودآوری، توازن کانتینرهای خالی و ارتقاء پایداری زیست‌محیطی، توسعه‌های بیشتری برای پژوهش‌های آینده متصور است. از جمله می‌توان به گسترش مدل در شرایط عدم قطعیت، بررسی سناریوهای همکاری میان چند اپراتور و نیز ترکیب آن با حمل‌ونقل چندوجهی اشاره کرد. چنین توسعه‌هایی می‌تواند کاربرد مدل را در محیط‌های واقعی افزایش داده و به طراحی راهکارهای جامع‌تر برای مدیریت شبکه‌های حمل‌ونقل دریایی و زنجیره تأمین جهانی منجر شود.

## ۵- منابع

- [1] Lam L, Iskounen A. Feeder ports, Inland ports and Corridors-Time for a closer look. HTG Yearbook 2010. 2010:19-23.
- [2] Yang L, Zheng J, Wang J. Hub port location and routing for a single-hub feeder network: Effect of liner shipping network connectivity. *Transport Policy*. 2025;160:212-27.
- [3] Huang X, Chen H, Zhang J, Wang D, Chen J, Luo JX. Robust optimization model of container liner routes in feeder line network. *Transport*. 2024;39(1):13-24.
- [4] Humang WP, Utomo DP, Putra H, Arianto D, Pujiwat R, Upahita DP, Fitriana N, Salsabilla MA, Hendra YN, Nurhidayat AY, Putri MN. Hub-and-spoke network design to optimize government subsidy costs for maritime transportation in Indonesia. *Sustainable Futures*. 2025;9:100602.
- [5] Tikani H, Honarvar M, Mehrjerdi YZ. Joint optimization of star P-hub median problem and seat inventory control decisions considering a hybrid routing transportation system. *International Journal of Supply and Operations Management*. 2016;3(3):1.
- [6] Golmohammadi AM, Abedsoltan H. A Bi-objective Model of Many-To-Many Hub Vehicle Location-Routing Problem by Considering Hard Time Window and Vehicle-Cost Balancing. *Iranian Journal of Operations Research*. 2023;14(2):156-67.
- [7] Tikani H, Ramezani R, Setak M, Van Woensel T. Hybrid evolutionary algorithms and Lagrangian relaxation for multi-period star hub median problem considering financial and service quality issues. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2021;97:104056.
- [8] Lee S, Moon I. Robust empty container repositioning considering foldable containers. *European Journal of Operational Research*. 2020;280(3):909-25.
- [9] Song DP, Dong JX. Cargo routing and empty container repositioning in multiple shipping service routes. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2012;46(10):1556-75.
- [10] Chen R, Dong JX, Lee CY. Pricing and competition in a shipping market with waste shipments and empty container repositioning. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2016;85:32-55.
- [11] Song DP, Xu J. An operational activity-based method to estimate CO2 emissions from container shipping considering empty container repositioning. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2012;17(1):91-6.
- [12] Meng Q, Wang S. Liner shipping service network design with empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2011;47(5):695-708.
- [13] Shintani K, Konings R, Imai A. Combinable containers: A container innovation to save container fleet and empty container repositioning costs. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2019;130:248-72.
- [14] Kuzmicz KA, Pesch E. Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation. *Omega*. 2019;85:194-213.
- [15] Luo T, Chang D. Empty container repositioning strategy in intermodal transport with demand switching. *Advanced Engineering Informatics*. 2019;40:1-3.
- [16] Abdelshafie A, Rupnik B, Kramberger T. Simulated global empty containers repositioning using agent-based modelling. *Systems*. 2023;11(3):130.
- [17] Wang W, Diao C, He W, Jin Z, Yang Z. Collaborative Optimization of Container Liner Slot Allocation and Empty Container Repositioning Within Port Clusters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025;13(1):159.
- [18] Fu F, Ji M. Robust inventory planning of empty containers in intermodal transportation considering port congestion. *Computers & Industrial Engineering*. 2025:111233.
- [19] Cai J, Huang Y, Diao C, Jin Z. Joint Optimization of Multi-Period Empty Container Repositioning and Inventory Control Based on Adaptive Particle Swarm Algorithm. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025;13(6):1113.

- [20] Liang J, Ma Z, Wang S, Liu H, Tan Z. Dynamic container slot allocation with empty container repositioning under stochastic demand. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2024;187:103603.
- [21] Feng X, Wang Z, Wang Y, Yin W, Chao Y, Ye G. Improving resilience in an intermodal transport network via bulk cargo transport coordination and empty container repositioning. *Ocean & Coastal Management*. 2024;248:106970.
- [22] Xiang X, Wang Z, Gong L, Jia S, Liu X, Liu M. Integrated optimization of vessel dispatching and empty container repositioning considering turnover time uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*. 2024;197:110566.
- [23] Ziar E, Amiri B, Sahebi H, Bashiri M. Balancing empty containers at ports: A bi-level programming approach for sustainable maritime logistics. *Journal of Cleaner Production*. 2025:145649.
- [24] Wang S, Wang X, Han Y, Wang X, Jiang H, Duan J, Hua R, Zhang Z. Decarbonizing in maritime transportation: Challenges and opportunities. *Journal of Transportation Technologies*. 2023;13(2):301-25.
- [25] Russo M, Carvalho D, Jalkanen JP, Monteiro A. The future impact of shipping emissions on air quality in Europe under climate change. *Atmosphere*. 2023;14(7):1126.
- [26] Degiuli N, Farkas A, Martić I, Gospić I. GHG abatement potential due to the implementation of slow steaming. *Casopis Pomorskog Fakulteta Kotor-Journal of Maritime Sciences*. 2022;23(1):2022.
- [27] Livaniou S, Papadopoulos GA. Liquefied natural gas (LNG) as a transitional choice replacing marine conventional fuels (heavy fuel oil/marine diesel oil), towards the era of decarbonisation. *Sustainability*. 2022;14(24):16364.
- [28] Tijan E, Agatić A, Jović M, Aksentijević S. Maritime national single window—a prerequisite for sustainable seaport business. *Sustainability*, 11 (17), 4570 [Internet]. 2019
- [29] Pavlinović M, Račić M, Mišura A. The importance of digitalization for sustainable development of maritime industry. *Transactions on maritime science*. 2023;12(02).
- [30] Eom JO, Yoon JH, Yeon JH, Kim SW. Port digital twin development for decarbonization: A case study using the Pusan Newport International Terminal. *Journal of marine science and engineering*. 2023;11(9):1777.
- [31] Camargo-Díaz CP, Paipa-Sanabria E, Zapata-Cortes JA, Aguirre-Restrepo Y, Quiñones-Bolaños EE. A review of economic incentives to promote decarbonization alternatives in maritime and inland waterway transport modes. *Sustainability*. 2022;14(21):14405.
- [32] Christodoulou A, Cullinane K. Identifying the main opportunities and challenges from the implementation of a port energy management system: A SWOT/PESTLE analysis. *Sustainability*. 2019;11(21):6046.
- [33] Ekmekçioglu A, Ünlügençoglu K, Çelebi UB. Container ship emission estimation model for the concept of green port in Turkey. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2022;236(2):504-18.
- [34] Golmohammadi AM, Abedsoltan H, Goli A, Ali I. Multi-objective dragonfly algorithm for optimizing a sustainable supply chain under resource sharing conditions. *Computers & Industrial Engineering*. 2024;187:109837.
- [35] Ziar E, Seifbarghy M, Bashiri M, Tjahjono B. An efficient environmentally friendly transportation network design via dry ports: a bi-level programming approach. *Annals of Operations Research*. 2023;322(2):1143-66.
- [36] Rashidian F. A bi-objective integrated model for blood supply chain network design with a product quality improvement approach. *Industrial Innovations*. 2023;1(3):255-270. [In Persian]. doi:<https://doi.org/10.61186/jii.1.3.255>
- [37] Saraabadani F, Bazoukar R, Rashidian F. Development of a green supplier selection model with the objective of optimizing selection criteria and considering incremental discounts. *Industrial Innovations*. 2024;2(1):1-21. [In Persian]. doi:<https://doi.org/10.61186/jii.2.1.1>
- [38] Torabi SA, Hassini E. An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy sets and systems*. 2008;159(2):193-214.