



Sharif University of Technology

<https://sjie.journals.sharif.edu/>



Research Article

An Integrated Problem of Handling Equipment Scheduling and Storage Space Allocation for Inbound Containers at Container Terminal

Zahra Sadat Fani Sadrabadi and Mehdi Alinaghian*

Department of Industrial and Systems Engineering Isfahan University of Technology, Iran.

* corresponding author: (alinaghian@iut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 1 October 2024

Revised: 14 December 2024

Accepted: 12 January 2025

Keywords:

Quay crane scheduling problem,
yard truck scheduling problem,
yard crane scheduling problem,
valid inequalities.

Abstract

The increasing growth of container transportation has led container terminals, as the primary hubs of cargo transfer in the global supply chain, to continuously improve their efficiency and operations to be successful in this competitive industry. Various problems have arisen in the maritime logistics field owing to the division of container terminals into two sections, quayside and yardside. This study examines the integration of problems on the quayside and the yardside. Specifically, it simultaneously investigates the quay crane scheduling problem as a quayside problem, along with the yard truck scheduling problem, yard crane scheduling problem, and storage space allocation problem as part of the yardside problems. A new integer linear programming model has been presented for the integrated problem of equipment handling scheduling and storage location allocation. This problem aims to minimize the time required to complete containers and operational costs. These operational costs include unloading containers from vessels using a quay crane, moving them to the yard via yard trucks, and loading them using a yard crane. The integrated problem is classified under the category of NP-hard problems in terms of computational complexity. Furthermore, they were introduced and added to the model according to the problem structure to expedite the resolution of constraints under valid inequalities. To validate the model's accuracy, instances were designed, implemented in GAMS software, and executed using the CPLEX solver. The computational results demonstrate that the incorporation of valid inequalities across all instances reduces computational time. Furthermore, in instances involving larger problems, where the mathematical model was unable to determine the optimal solution within a reasonable time, the addition of valid inequalities yielded solutions with an average gap of 1.78% from the lower bound. By contrast, the proposed model without the inclusion of valid inequalities achieved solutions with a gap of 3.08% from the lower bound.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Fani Sadrabadi, Z.S. and Alinaghian, M. 2026. An integrated problem of handling equipment scheduling and storage space allocation for inbound containers at container terminal, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(2), pp.31-43. <https://doi.org/10.24200/j65.2025.65278.2413>



مسئله یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی برای کانتینرهای ورودی در پایانه‌های کانتینری

زهره السادات فانی صدرآبادی و مهدی علینقیان*

گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.

*نویسنده مسئول (alinaghian@iut.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر، مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل اسکله به‌عنوان مهم‌ترین مسئله‌ی کنار اسکله با مسائل زمان‌بندی کامیون‌ها، جرثقیل محوطه، و تخصیص مکان ذخیره‌سازی به‌عنوان مسائل مطرح در محوطه به‌صورت یکپارچه بررسی شده است. یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح جدید با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی زمانی تکمیل کانتینرها و هزینه‌ی عملیاتی، شامل: هزینه‌ی تخلیه‌ی کانتینرها از کشتی، حمل آن‌ها به محوطه، و بارگذاری آن‌ها در محوطه ارائه شده است. مسئله‌ی اخیر از نظر پیچیدگی محاسباتی در دسته‌ی مسائل NP-hard قرار می‌گیرد. برای افزایش سرعت حل مدل، قیدهایی با عنوان نامعادله‌های معتبر معرفی و به مدل اضافه شده‌اند. به‌منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، ۲۱ نمونه مسئله‌ی طراحی‌شده در نرم‌افزار گمز پیاده‌سازی و با حل‌کننده‌ی CPLEX اجرا شده‌اند. نتایج محاسباتی نشان داده‌اند که قیدهای مذکور موجب کاهش زمان حل شده‌اند. همچنین، در مسائل بزرگ‌تر، نامعادله‌های اخیر، میانگین درصد انحراف را از ۳/۰۸ به ۱/۷۸ درصد نسبت به حد پایین کاهش داده‌اند.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

واژگان کلیدی:

مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل اسکله،

مسئله‌ی زمان‌بندی کامیون محوطه،

مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل محوطه،

تخصیص مکان ذخیره‌سازی، نامعادله‌های معتبر.

۱. مقدمه

بالاتر کشتی‌ها و محموله‌ها و همچنین برنامه‌ریزی و مدیریت کارآمدتر، خود را از دیگران متمایز سازند؛ که این امر فقط با هماهنگی مناسب بین بخش‌های مختلف پایانه‌های کانتینری صورت می‌گیرد. به‌منظور افزایش کارایی پایانه‌های کانتینری، مسائل متنوعی براساس تقسیم‌بندی پایانه‌های کانتینری به دو بخش کناراسکله^۱ و محوطه^۲ مطرح می‌شوند. مسائل تخصیص اسکله^۳ و تخصیص زمان‌بندی جرثقیل اسکله^۴ به‌عنوان مسائل کناراسکله و مسائل استقرار/ زمان‌بندی جرثقیل محوطه^۵، زمان‌بندی کامیون محوطه^۶، مسیریابی وسائط نقلیه^۷، کنترل ترافیک^۸، و تخصیص مکان ذخیره‌سازی^۹ به‌عنوان مسائل محوطه مطرح می‌شوند.

در پایانه‌های کانتینری عملیات جابجایی کانتینرهای ورودی بدین صورت است

پایانه‌های کانتینری، قطب مهم انتقال محموله در زنجیره‌ی تأمین جهانی هستند.^[۱] از این رو، پایانه‌های کانتینری در سراسر جهان تلاش می‌کنند تا با افزایش حجم ترافیک کانتینرها همگام شوند. در نتیجه، بهبود کارایی پایانه‌های کانتینری برای رسیدگی به جریان فزاینده‌ی کانتینرها ضروری است.^[۲] از طرفی، پایانه‌های کانتینری به‌دنبال تکمیل عملیات کشتی در سریع‌ترین زمان ممکن هستند؛ چرا که منجر به افزایش استفاده از منابع، افزایش گردش مالی کشتی، کاهش زمان انتظار کشتی، و افزایش رضایت مشتری می‌شود.^[۳] افزایش تعداد پایانه‌های کانتینری در سراسر جهان باعث افزایش رقابت بین آن‌ها شده است. مشتریان جذب پایانه‌ای می‌شوند که تقاضای مشتریان را در سریع‌ترین زمان ممکن پاسخ دهد. این امر باعث شده است بنادر دریایی با جذب حجم

⁶ yard truck scheduling problem

⁷ vehicle routing problem

⁸ traffic control

⁹ storage space allocation problem

¹ quayside

² yard

³ berth allocation problem

⁴ quay crane assignment/scheduling problem

⁵ yard crane deployment/scheduling problem

استناد به این مقاله:

فانی صدرآبادی، زهره السادات و علینقیان، مهدی، ۱۴۰۴. مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی برای کانتینرهای ورودی در پایانه‌های کانتینری.

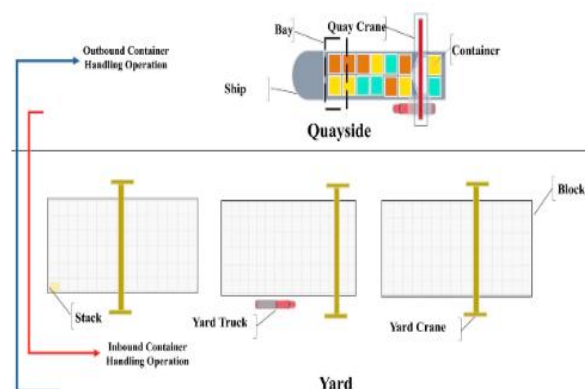
مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۱(۲)، صص. ۳۱-۴۳. <https://doi.org/10.24200/ij65.2025.65278.2413>



مکان ذخیره سازی در توالی و زمان بندی جرثقیل های محوطه و مسافت طی شده ی کامیون در محوطه نیز اثرگذار است.

۲. مرور ادبیات

مسائل متنوعی برای افزایش کارایی پایانه های کانتینری بررسی شده اند؛ اما برخی از زیرمسئله های مذکور، اهمیت بالاتری دارند. لذا، برخی از آن ها تعریف و ادبیات مربوط به آن ها بررسی شده است. تخصیص/ زمان بندی جرثقیل اسکله، یکی از مهم ترین زیرمسئله های مطرح در حوزه ی لجستیک دریایی است، که پژوهشگران آن ها را بسیار مطالعه می کنند. بیرورث و مایزل^۱ (۲۰۱۵)، طرحی را برای طبقه بندی مدل های زمان بندی جرثقیل اسکله مطرح کرده اند، که مدل ها براساس ویژگی هایی که دارند، به چهار گروه تقسیم می شوند، که عبارت اند از: (۱) ویژگی کار (وظیفه)، (۲) ویژگی جرثقیل، (۳) ویژگی تداخل، (۴) معیار عملکرد. ویژگی کار، به دسته بندی کانتینرهای موجود در کشتی برای رسیدگی توسط جرثقیل های اسکله اشاره دارد. مدت زمان آماده سازی، زمان سفر، پنجره ی زمانی، و موقعیت اولیه ی جرثقیل ها مربوط به دسته ی ویژگی های جرثقیل است. همچنین ویژگی تداخل، امکان عبور یا عدم عبور جرثقیل ها و فاصله ی ایمنی بین آن ها را مطرح می کند. در نهایت، توابع هدف بررسی شده در زیرمسئله ی مذکور به عنوان معیار عملکرد در نظر گرفته می شود، که یکی از متداول ترین معیارهای عملکرد، کمینه سازی زمان تکمیل کانتینرها (C_{max}) است. این دسته از مسائل برای نخستین بار توسط داگانزو^۲ (۱۹۸۹)، مطرح شده اند. پس از آن پترکوفسکی^۳ و داگانزو (۱۹۹۰)، برای حل مدل در ابعاد بزرگ، از روش شاخه و کران (B&B)^۴ استفاده کرده اند. کیم و پارک (۲۰۰۴)، یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط (MIP)^۵ را برای مسئله ی زمان بندی جرثقیل های اسکله با یک کشتی ارائه داده اند، که کارها به صورت گروهی و محدودیت های عدم عبور جرثقیل ها در آن در نظر گرفته شده اند. هدف از مطالعه ی اخیر، کمینه سازی مجموع وزنی بیشینه ی زمان تکمیل کانتینرها و زمان تکمیل عملیات جرثقیل های اسکله بوده است. پژوهش ایشان مورد توجه پژوهشگران بعدی قرار گرفت، به طوری که توکلی مقدم و همکاران (۲۰۰۸)، مدل ارائه شده ی کیم و پارک (۲۰۰۴)، را برای چند کشتی توسعه داده و برای پایانه ی کانتینری شهید رجایی با هدف کمینه سازی هزینه ها (هزینه های ثابت و متغیر تخصیص جرثقیل اسکله، هزینه ی خروج دیر هنگام یا زود هنگام کشتی) اعمال کرده اند. در مدل پیشنهادی ابوظاهر و دیابات^۶ (۲۰۲۰)، هر بخش^۷ کشتی فقط با یک جرثقیل اسکله خدمت دهی شده است؛ همچنین محدودیت های عدم عبور جرثقیل ها از یکدیگر و فاصله ی ایمنی بین جرثقیل ها نیز لحاظ شده و برای حل مسئله به توسعه ی الگوریتم ژنتیک (GA) پرداخته شده است. الظاهری^۸ و همکاران (۲۰۱۶)، به ارائه ی یک مدل جدید با در نظر گرفتن محدودیت های مربوط به پایداری کشتی، محدودیت های عملی نظیر عدم عبور جرثقیل ها از یکدیگر، فاصله ی ایمنی بین آن ها، و زمان سفر جرثقیل ها پرداخته اند. سان^۹ و همکاران (۲۰۱۹)، برای حل مسئله ی زمان بندی جرثقیل اسکله از یک چارچوب حل تجزیه ی بندرز^{۱۰} (DB) مبتنی بر منطق استفاده کرده اند. لی و همکاران (۲۰۲۴)، یک مدل ریاضی دو مرحله ای را برای مسئله ی زمان بندی جرثقیل



شکل ۱. عملیات جابجایی کانتینرها در پایانه ی کانتینری.

که عملیات تخلیه ی کانتینرها از کشتی توسط جرثقیل اسکله، حمل آن ها به محوطه توسط کامیون و بارگذاری شان در محوطه توسط جرثقیل محوطه انجام می گیرد؛ اما عملیات جابجایی کانتینرهای خروجی در خلاف جهت عملیات جابجایی کانتینرهای ورودی است. عملیات جابجایی کانتینرهای ورودی و خروجی در شکل ۱ نشان داده شده است.

یکی از چالش های اساسی و مهم پایانه های کانتینری، هماهنگی بین تجهیزات جابجایی (جرثقیل اسکله، کامیون محوطه، و جرثقیل محوطه) است؛ زیرا عملکرد هر یک از آن ها در دیگری اثرگذار است و هماهنگی ضعیف شان موجب افزایش زمان انتظار هر یک از تجهیزات و تأخیر در عملیات تخلیه/ بارگیری کشتی می شود. همچنین با رشد روزافزون کانتینرها، مکان ذخیره سازی کانتینرها نیز با محدودیت روبه رو شده اند. در نتیجه در پژوهش حاضر، مسئله ی یکپارچه ی زمان بندی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره سازی برای کانتینرهای ورودی بررسی شده است. در مسئله ی زمان بندی تجهیزات جابجایی به سه مورد پاسخ داده می شود:

(۱) تخصیص هر تجهیز به کانتینر به منظور عملیات جابجایی (تخلیه، حمل، و بارگذاری)،

(۲) تعیین توالی تخلیه، حمل، و بارگذاری کانتینرها توسط هر یک از تجهیزات جابجایی،

(۳) تعیین زمان شروع و پایان عملیات تخلیه، حمل، و بارگذاری هر کانتینر.

همچنین مسئله ی تخصیص مکان ذخیره سازی نیز به تخصیص مناسب کانتینرها به مکان های ذخیره سازی می پردازد.

بررسی یکپارچه ی مسائل ذکر شده به چند دلیل ضروری است: کامیون محوطه به عنوان رابط بین بخش کناره اسکله و محوطه عمل می کند. لذا، تجهیز اخیر در زمان تکمیل عملیات تخلیه ی کانتینر توسط جرثقیل اسکله (تحويل کانتینر از جرثقیل اسکله و حمل آن به محوطه) و همچنین در زمان شروع عملیات بارگذاری کانتینر توسط جرثقیل محوطه (تحويل کانتینر به جرثقیل محوطه به منظور بارگذاری در مکان ذخیره سازی) تأثیر می گذارد. علاوه بر آن، تخصیص

⁶ Abou Kasm & Diabat

⁷ bay

⁸ Al-Dhaheri

⁹ Sun

¹⁰ Decomposition Benders

¹ Bierwirth & Meisel

² Daganzo

³ Peterkofsky

⁴ Branch and Bound

⁵ Mixed Integer Programming Model

رجایی پرداخته و انواع کانتینرها (معمولی، خالی، و یخچالی) را بررسی کرده‌اند. در پژوهش لین و همکاران (۲۰۱۷)^[۲۵] تعداد حرکت جرثقیل‌ها به میزان کمینه رسیده است. ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)^[۲۶] در پژوهش خود به دنبال تخصیص بهینه مکان‌های ذخیره‌سازی به منظور سریع‌تر شدن زمان تحویل سفارش مشتریان بوده‌اند؛ چرا که عملیات آماده‌سازی سفارش (فرآیند انتخاب و انتقال آن‌ها) یکی از زمان‌برترین عملیات است.

در سال‌های اخیر، به منظور افزایش هر چه بیشتر کارایی پایانه‌ی کانتینری، پژوهشگران به مطالعه‌ی یکپارچه‌ی مسائل پرداخته‌اند. در ادامه، مسئله‌ی یکپارچه‌ی جرثقیل اسکله و کامیون محوطه به عنوان اولین مسئله‌ی یکپارچه بررسی شده است. کائو^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۰)^[۲۷] و کاوشگر و هاین^{۱۵} (۲۰۱۵)^[۲۸] یک مدل MIP برای حل مسئله‌ی یکپارچه با هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل کانتینرهای ورودی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه داده‌اند. در مدل ارائه‌شده توسط تانگ^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۴)^[۲۹] هر بخش از کشتی فقط توسط یک جرثقیل اسکله می‌تواند تخلیه شود. همچنین، روابط تقدم کانتینرها و محدودیت‌های عدم عبور جرثقیل‌ها از یکدیگر نیز به صورت کارآمد لحاظ شده است. ایشان برای حل مدل به توسعه‌ی الگوریتم PSO پرداخته و با الگوریتم ژنتیک پژوهش لی و همکاران (۲۰۰۸)^[۳۰] مقایسه کرده‌اند. هپ^{۱۷} و همکاران (۲۰۲۱)^[۳۱] به توسعه‌ی مدل تانگ و همکاران (۲۰۱۴)^[۲۹] پرداخته‌اند. ژن و همکاران (2019)^[۳۲] به مطالعه‌ی مسئله‌ی یکپارچه با هدف کمینه‌سازی مجموع وزنی زمان تکمیل تخلیه‌ی کانتینرها و زمان تکمیل جرثقیل‌های اسکله پرداخته‌اند. شاف^{۱۸} و همکاران (۲۰۲۱)^[۳۳] مسئله‌ی یکپارچه را با تک جرثقیل اسکله برای بندر طرابلس- لبنان با استفاده از الگوریتم شمارش دقیق و ژنتیک بررسی کرده‌اند.

مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی جرثقیل اسکله، کامیون محوطه، و جرثقیل محوطه به عنوان دومین مسئله‌ی یکپارچه مطرح شده است. کین^{۱۹} و همکاران (۲۰۲۰)^[۳۴] براساس جریان کارگاهی ترکیبی با دو رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و برنامه‌ریزی محدودیت^{۲۰} برای کانتینرهای ورودی، امکان عبور جرثقیل‌ها از یکدیگر، رعایت فاصله‌ی ایمنی، و زمان آماده‌سازی وابسته به توالی را در نظر گرفته‌اند.

هسو^{۲۱} و همکاران (۲۰۲۱)^[۳۵] و هسو و همکاران (۲۰۲۲)^[۳۶] نیز مسئله‌ی یکپارچه‌ی اخیر را براساس طرح ذخیره‌سازی کشتی (VSP)^{۲۲} و طرح ذخیره‌سازی محوطه (YSP)^{۲۳} با هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل کانتینرها مطالعه کرده‌اند. با توجه به ماهیت NP-hard بودن مسئله‌ی یکپارچه، در هر دو مطالعه‌ی مذکور برای حل مسئله از رویکردهای مبتنی بر شبیه‌سازی استفاده شده است.

می‌توان به مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی به عنوان چهارمین مسئله‌ی یکپارچه اشاره کرد. کیزیلا^{۲۴} و همکاران (۲۰۱۸)^[۳۷] برای دستیابی به افزایش بهره‌وری و هماهنگی بین

اسکله ارائه کرده‌اند. ایشان زمان تخلیه‌ی کانتینرها را از بخش‌های کشتی غیرقطعی در نظر گرفته و برای حل مدل، یک الگوریتم دقیق مبتنی بر الگوریتم تجزیه‌ی بندرز تولید ستون و محدودیت ارائه کرده‌اند. سان و همکاران (۲۰۲۴)^[۱۳] مسئله‌ی اخیر را برای هر دو عملیات تخلیه و بارگیری کانتینرها با هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل کانتینرها مطالعه کرده‌اند. همچنین، حرکت جرثقیل‌های اسکله را تحت شرایطی که امکان تغییر یا عدم تغییر جهت حرکت وجود داشته باشد، بررسی کرده‌اند.

مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل محوطه به عنوان دومین زیرمسئله‌ی مهم به‌شمار می‌رود. ویژگی‌های مطرح در فرمول‌بندی مسائل جرثقیل اسکله در مسائل جرثقیل محوطه نیز مطرح می‌شوند. انجی^{۱۱} (۲۰۰۵)^[۱۴] و ۱۵ مسئله‌ی اخیر را با هدف کمینه‌سازی زمان انتظار کانتینرها برای پردازش توسط جرثقیل محوطه مطالعه کرده است. در همان سال، انجی و مک^{۱۶} مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل محوطه را با در نظر گرفتن محدودیت عدم تداخل جرثقیل‌ها با یکدیگر بررسی کرده و از یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا برای حل مدل بهره برده‌اند. لی و همکاران (۲۰۰۹)^[۱۷] و هی و همکاران (۲۰۱۰)^[۱۸] هر دو برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل محوطه از روش افق غلتان استفاده کرده‌اند. هی و همکاران (۲۰۱۵)^[۱۹] مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل محوطه را با هدف کارایی پایانه‌های کانتینری از طریق زمان‌بندی مناسب جرثقیل‌های محوطه و صرفه‌جویی در مصرف انرژی مطالعه کرده‌اند. پس از آن هی و همکاران (۲۰۲۰)^[۲۰] به مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل محوطه در شرایط عدم قطعیت (غیرقطعی بودن زمان تحویل کانتینرها به جرثقیل محوطه و تعداد کانتینرها) با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی ناشی از تأخیر تکمیل گروه کانتینرها در شرایط قطعی و هزینه‌های زبان در شرایط عدم قطعیت پرداخته‌اند. در پژوهش لیانگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۴)^[۲۱] به منظور کاهش دفعه‌های بازایی کانتینرها، کانتینرها با ویژگی‌های یکسان در یک مکان ذخیره‌سازی انباشته شده و به منظور حل مسئله از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند. در مطالعه‌ی لیو و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۲] برخلاف سایر پژوهش‌ها، جرثقیل‌های محوطه بین بلوک‌های مختلف به اشتراک گذاشته شده‌اند؛ که به‌طور قابل توجهی در کارایی پایانه‌ی کانتینری تأثیرگذار بوده است.

سومین زیرمسئله‌ی مهم، مسئله‌ی تخصیص مکان ذخیره‌سازی است، که به تخصیص موقت کانتینرهای ورودی (خروجی) به بلوک‌های ذخیره‌سازی در هر دوره‌ی زمانی می‌پردازد؛ که هدف آن متعادل کردن بار کاری بین بلوک‌ها به منظور کمینه‌سازی زمان بارگذاری (بازایی) کانتینرهاست، که در نهایت باعث کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود. ژانگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۰۳)^[۲۴] این مسئله را با استفاده از رویکرد افق غلتان حل کرده‌اند. برای هر افق برنامه‌ریزی، مسئله به دو سطح تجزیه می‌شود. سطح اول، به منظور تعادل بارکاری بین بلوک‌ها، و سطح دوم به منظور کمینه‌سازی فاصله‌ی جابجایی بین بلوک‌های ذخیره‌سازی و مکان پهلوگیری کشتی بوده است. بزازی و همکاران (۲۰۰۹)^[۲۳] به توسعه‌ی مدل ژانگ و همکاران (۲۰۰۳)^[۲۴] برای پایانه‌ی کانتینری شهید

¹⁸ Skaf

¹⁹ Qin

²⁰ Programming Constraints

²¹ Hsu

²² Vessel Stowage Plan

²³ Yard Storage Plan

²⁴ Kizilay

¹¹ Ng

¹² Liang

¹³ Zhang

¹⁴ Cao

¹⁵ Kavehgar & Huynh

¹⁶ Tang

¹⁷ Hop

تجهیزات جابجایی و استفاده‌ی مؤثرتر از فضا، به ادغام مسئله‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و مسئله‌ی مکان ذخیره‌سازی کانتینرهای ورودی و خروجی با هدف کمینه‌سازی دامنه‌ی عملیات پرداخته و محدودیت‌هایی برای عدم عبور جرثقیل‌ها نیز در نظر گرفته‌اند. همچنین ایشان (۲۰۲۰،^[۳۸] در توسعه‌ی پژوهش قبلی خود، برای حل مسئله‌ی یکپارچه، چندین مدل CP پیشنهاد داده‌اند.

با توجه به مرور ادبیات صورت‌گرفته مشخص است که مسئله‌ی یکپارچه‌ی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی به‌ندرت بررسی شده است. در نظر گرفتن مسئله‌ی تخصیص مکان ذخیره‌سازی بدون در نظر گرفتن سایر تجهیزات جابجایی منجر به افزایش زمان عملیات بارگذاری و بازبایی کانتینرها می‌شود، زیرا تخصیص نامناسب مکان ذخیره‌سازی، منجر به طی مسافت بیشتر و در پی آن افزایش زمان عملیات می‌شود. لذا، مسئله‌ی تخصیص مکان ذخیره‌سازی در عملیات سایر تجهیزات جابجایی (جرثقیل اسکله، کامیون محوطه، و جرثقیل محوطه) تأثیر می‌گذارد. همچنین مسئله‌ی مذکور در میزان تردد تجهیزات جابجایی و در نهایت، در زمان گردش کشتی نیز تأثیر مستقیم دارد. در نتیجه، ادغام مسئله‌ی تخصیص مکان ذخیره‌سازی و مسئله‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی علاوه بر سریع تر شدن عملیات جابجایی کانتینرها باعث کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود، که به‌عنوان یک عامل کلیدی برای ارزیابی عملکرد اقتصادی پایانه‌های کانتینری و همچنین شرکت‌های حمل‌ونقل به‌شمار می‌رود. لذا، در پژوهش حاضر سعی شده است تا حد امکان، شکاف مطالعاتی پوشش داده شود. در جدول ۱، مقایسه‌ای بین پژوهش حاضر و مرتبط‌ترین پژوهش‌های پیشین ارائه شده است.

۳. مدل‌سازی ریاضی مسئله

۳.۱. تعریف مسئله

در پژوهش حاضر، مسئله‌ی یکپارچه‌ی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی به‌صورت یکپارچه بررسی شده است. همچنین در آن، به‌منظور

تخلیه‌ی کانتینرها از کشتی و بارگذاری آن‌ها در محوطه، از مجموعه‌ای از جرثقیل‌های اسکله برای تخلیه‌ی کانتینرها از کشتی و تحویل آن‌ها به کامیون محوطه و همچنین از مجموعه‌ای از کامیون‌های محوطه برای حمل کانتینرها از کنارسکله به محوطه و تحویل آن‌ها به جرثقیل محوطه و نیز از مجموعه‌ای از جرثقیل‌های محوطه برای بارگذاری کانتینرها در محوطه استفاده شده است. همچنین مجموعه‌ای از بلوک‌های ذخیره‌سازی وجود دارند که هر بلوک از تعدادی پشته تشکیل شده است، که به‌عنوان مکان‌هایی موقت برای ذخیره‌سازی کانتینرها در نظر گرفته شده است. مسئله‌ی موردنظر به دنبال یافتن تخصیص بهینه‌ی هر کانتینر به تجهیزات جابجایی به‌منظور تخلیه، حمل، و بارگذاری، همچنین توالی بهینه و زمان‌بندی مناسب کانتینرها و تجهیزات جابجایی است؛ به‌طوری‌که تخصیص هر کانتینر به مکان ذخیره‌سازی به‌گونه‌ای صورت گیرد که علاوه بر رعایت ظرفیت خالی هر پشته، باعث افزایش سرعت فرآیند تخلیه و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل نیز شود. به‌طوری‌که تخصیص کانتینر به هر یک از تجهیزات جابجایی به‌گونه‌ای صورت گیرد که هر یک از تجهیزات، مدت زمان کمتری را برای تخلیه‌ی کانتینر، حمل، و بارگذاری آن سپری کنند. همچنین در مسئله‌ی حاضر مشخص شده است که توالی تخلیه، حمل، و بارگذاری کانتینرها به چه صورت انجام شود تا تجهیزات مدت زمان انتظار کمتری برای خدمت‌دهی به یکدیگر صرف کنند. در شکل ۱، بخش‌های مختلف پایانه‌ی کانتینری، تجهیزات جابجایی، و محوطه‌ی ذخیره‌سازی مشخص شده‌اند.

۳.۲. مفروضات مسئله

- مکان پهلوگیری هر کشتی از قبل تعیین شده است.
- مکان هر کانتینر در کشتی مشخص است (هر کانتینر در کدام بخش از کشتی واقع شده است).
- هر کانتینر فقط توسط یک جرثقیل اسکله، کامیون محوطه، و جرثقیل محوطه می‌تواند خدمت‌دهی شود.

جدول ۱. مروری بر ادبیات موضوع.

Ref.	Year	Equipment			Storage Space Allocation	Objective Function	
		QC	YT	YC		Minimize Makespan	Minimize Equipment Operating Cost
Al-Dhaheiri et al. ^[110]	2016	✓				✓	
Sun et al. ^[111]	2019	✓				✓	
Tang et al. ^[29]	2014	✓	✓			✓	
Kaveshgar & Huynh ^[28]	2015	✓	✓			✓	
Kizilay et al. ^[37]	2018	✓		✓	✓	✓	
Zhen et al. ^[32]	2019	✓	✓			✓	
Qin et al. ^[34]	2020	✓	✓	✓		✓	
Hop et al. ^[31]	2021	✓	✓			✓	
Skaf et al. ^[33]	2021	✓	✓			✓	
Hsu et al. ^[36]	2022	✓	✓	✓		✓	
Sun et al. ^[13]	2024	✓				✓	
Present Study	2024	✓	✓	✓	✓	✓	✓

متغیرهای تصمیم

O_{iq} : اگر کانتینر i به جرثقیل اسکله‌ی q برای تخلیه تخصیص داده شود، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت، صفر است.

X_{idb} : اگر کانتینر i توسط کامیون محوطه‌ی d به بلوک b حمل شود، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت، صفر است.

K_{iyz} : اگر کانتینر i توسط جرثقیل محوطه‌ی y در مکان ذخیره‌سازی z بارگذاری شود، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت، صفر است.

$F_{ii'}$: اگر تخلیه‌ی کانتینر i قبل از کانتینر i' باشد، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت، صفر است.

$G_{ii'}$: اگر حمل کانتینر i قبل از کانتینر i' باشد، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت، صفر است.

$H_{ii'}$: اگر بارگذاری کانتینر i قبل از کانتینر i' باشد، مقدار آن ۱ و در غیر این صورت، صفر است.

STQ_i : زمان شروع تخلیه‌ی کانتینر i .

STD_i : زمان شروع حمل کانتینر i .

STY_i : زمان شروع بارگذاری کانتینر i .

C_{max} : بیشینه‌ی زمان تخلیه‌ی کانتینرها.

۴.۳. تابع هدف و محدودیت‌ها

$$\text{Min } V = \lambda C_{max} + \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} CQ_{iq} O_{iq} + \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{b \in B} CD_{idb} X_{idb} + \sum_{i \in I} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} CY_{iyz} K_{iyz} \quad (1)$$

$$\sum_{q \in Q} O_{iq} = 1 \quad \forall (i \in I) \quad (2)$$

$$STQ_{i'} \geq STQ_i + PQ_{iq} - (3 - O_{iq} - O_{i'q} - F_{ii'})M \quad \forall (q \in Q, (i, i') \in I, i \neq i') \quad (3)$$

$$STQ_i \geq STQ_{i'} + PQ_{i'q} - (2 - O_{iq} - O_{i'q} + F_{ii'})M \quad \forall (q \in Q, (i, i') \in I, i \neq i') \quad (4)$$

$$STQ_i \geq STQ_{i'} + \sum_{q \in Q} PQ_{i'q} O_{i'q} M \quad \forall ((i, i') \in \Psi) \quad (5)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{b \in B} X_{idb} = 1 \quad \forall (i \in I) \quad (6)$$

$$STD_{i'} \geq STD_i + PD_{idb} - (3 - x_{idb} - x_{i'db'} - G_{ii'})M \quad \forall (q \in Q, (i, i') \in I, i \neq i') \quad (7)$$

$$STD_i \geq STD_{i'} + PD_{i'db} - (2 - x_{idb} - x_{i'db'} + G_{ii'})M \quad \forall (q \in Q, (i, i') \in I, i \neq i') \quad (8)$$

• تجهیزات جابجایی به‌طور هم‌زمان نمی‌توانند دو کانتینر را جابجا کنند.

• ظرفیت مکان ذخیره‌سازی کانتینرها از قبل مشخص است.

• زمان پردازش هر یک از کانتینرها توسط تجهیزات جابجایی مشخص و قطعی است.

• در مسئله‌ی حاضر از تداخل جرثقیل‌ها با یکدیگر صرف‌نظر شده است.

۳.۳. نمادها

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

I : مجموعه‌ی کانتینرها (با i اندیس‌گذاری شده است).

E : مجموعه‌ی بخش‌های کشتی (با e اندیس‌گذاری شده است).

Q : مجموعه‌ی جرثقیل‌های اسکله (با q اندیس‌گذاری شده است).

D : مجموعه‌ی کامیون‌های محوطه (با d اندیس‌گذاری شده است).

Y : مجموعه‌ی جرثقیل‌های محوطه (با y اندیس‌گذاری شده است).

B : مجموعه‌ی بلوک‌ها (با b اندیس‌گذاری شده است).

Z : مجموعه‌ی مکان‌های ذخیره‌سازی (با z اندیس‌گذاری شده است).

Ψ : مجموعه‌ی روابط تقدم بین کانتینرها.

Z_b : مکان‌های ذخیره‌سازی متعلق به بلوک b .

B_y : بلوک‌های تحت مسئولیت جرثقیل محوطه‌ی y .

I_e : بخشی از کشتی که کانتینر i در آن قرار دارد.

پارامترها

PQ_{iq} : زمان موردنیاز برای تخلیه‌ی کانتینر i .

PD_{idb} : زمان موردنیاز برای حمل کانتینر i .

PY_{iyz} : زمان موردنیاز برای بارگذاری کانتینر i .

$PR_{yyz'}$: زمان موردنیاز برای حرکت از مکان ذخیره‌سازی z به مکان ذخیره‌سازی z' (اگر مکان‌های ذخیره‌سازی z و z' متعلق به بلوک یکسان باشند و توسط جرثقیل محوطه، یکسان بارگیری شوند، $PR_{yyz'} = 0$).

cap_z : ظرفیت هر مکان ذخیره‌سازی z .

CQ_{iq} : هزینه‌ی تخلیه‌ی کانتینر i توسط جرثقیل اسکله‌ی q .

CD_{idb} : هزینه‌ی حمل کانتینر i به بلوک b توسط کامیون محوطه‌ی d .

CY_{iyz} : هزینه‌ی بارگذاری کانتینر i در مکان ذخیره‌سازی z توسط جرثقیل محوطه‌ی y .

λ : ضریب تبدیل بیشترین زمان تکمیل (C_{max}) به هزینه.

M : عددی بزرگ.

کانتینر به یک جرثقیل اسکله تخصیص یابد. محدودیت‌های ۳ و ۴، زمان شروع و پایان تخلیه‌ی دو کانتینر توسط جرثقیل اسکله‌ی یکسان را نشان می‌دهند ($O_{iq}=1, O_{i'q}=1$). اگر تخلیه‌ی کانتینر i' بعد از کانتینر i باشد، محدودیت ۳ فعال می‌شود؛ در غیر این صورت، محدودیت ۴ فعال می‌شود. زمان شروع و پایان تخلیه‌ی کانتینرها با روابط تقدمی در محدودیت ۵ بیان می‌شود. محدودیت ۶ تضمین می‌کند هر کانتینر به یک کامیون محوطه برای حمل به بلوک b تخصیص یابد. محدودیت‌های ۷ و ۸، زمان شروع و پایان حمل دو کانتینر را توسط کامیون محوطه‌ی یکسان نشان می‌دهند (مطابق با توضیحات محدودیت‌های ۴ و ۵). محدودیت ۹، زمان تکمیل مرحله‌ی تخلیه‌ی هر کانتینر (زمان شروع مرحله‌ی حمل) را مشخص می‌کند. محدودیت ۱۰ بیان می‌کند در صورت تخصیص یک کانتینر به یک مکان ذخیره‌سازی، جرثقیل تحت مسئولیت آن مکان فعال شود. محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲، مربوط به کنترل ظرفیت مکان‌های ذخیره‌سازی هستند. محدودیت ۱۳ تضمین می‌کند هر کانتینر باید به یک جرثقیل محوطه برای بارگذاری در مکان ذخیره‌سازی Z تخصیص یابد. محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵، زمان شروع و پایان بارگذاری کانتینرها را نشان می‌دهند. محدودیت ۱۶، زمان تکمیل مرحله‌ی حمل (زمان شروع مرحله‌ی بارگذاری) را مشخص می‌کند. دیرترین زمان تکمیل تخلیه‌ی کانتینرها (یعنی زمانی که آخرین کانتینر توسط جرثقیل محوطه بارگذاری می‌شود)، به‌عنوان C_{max} در محدودیت ۱۷ محاسبه می‌شود. درنهایت، در محدودیت ۱۸، دامنه‌ی تغییرات متغیرها مشخص شده است.

۴. نامعادله‌های معتبر^{۲۵}

با توجه به اینکه مسئله‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی به‌عنوان یک مسئله‌ی NP-hard شناخته می‌شود،^[۳۳] در نتیجه در نظر گرفتن مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات و تخصیص مکان ذخیره‌سازی کانتینرها از درجه‌ی سختی مسئله نمی‌کاهد. ممکن است به‌دلیل پیچیدگی مسئله، سرعت حل مدل در به‌دست آوردن جواب بهینه کاهش یابد. در نتیجه، اضافه کردن قیدهایی با عنوان نامعادله‌های معتبر منجر به کاهش فضای جستجو می‌شود. در این صورت ممکن است منجر به کاهش زمان حل مسئله شود. با توجه به مدل پیشنهادی می‌توان نامعادله‌های ۱۹ الی ۲۴ را به مدل اضافه کرد:

$$F_{ii'} + F_{i'i} \leq 1 \quad \forall ((i, i') \in I, i \neq i') \quad (19)$$

$$F_{ii''} \geq F_{ii'} + F_{i'i''} - 1 \quad \forall ((i, i', i'') \in I, i \neq i', i \neq i'') \quad (20)$$

$$G_{ii'} + G_{i'i} \leq 1 \quad \forall ((i, i') \in I, i \neq i') \quad (21)$$

$$G_{ii''} \geq G_{ii'} + G_{i'i''} - 1 \quad \forall ((i, i', i'') \in I, i \neq i', i \neq i'') \quad (22)$$

$$H_{ii'} + H_{i'i} \leq 1 \quad \forall ((i, i') \in I, i \neq i') \quad (23)$$

$$H_{ii''} \geq H_{ii'} + H_{i'i''} - 1 \quad \forall ((i, i', i'') \in I, i \neq i', i \neq i'') \quad (24)$$

محدودیت ۱۹ نشان می‌دهد اگر تخلیه‌ی کانتینر i قبل از کانتینر i' باشد ($F_{ii'} = 1$)، آنگاه دیگر تخلیه‌ی کانتینر i' نمی‌تواند قبل از کانتینر i باشد

$$STD_i \geq STQ_i + \sum_{q \in Q} PQ_{iq} O_{iq} \quad \forall (i \in I) \quad (9)$$

$$\sum_{z \in Z_b} \sum_{i \in I} K_{izy} = 0 \quad \forall (y \in Y, b \in B_y) \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{d \in D} X_{idb} \leq \sum_{z \in Z_b} cap_z \quad \forall (b \in B) \quad (11)$$

$$\sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} K_{izy} \leq \sum_{z \in Z} cap_z \quad \forall (z \in Z) \quad (12)$$

$$\sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z_b} K_{izy} = 1 \quad \forall (i \in I, b \notin B_y) \quad (13)$$

$$STY_{i'} \geq STY_i + PY_{iz} + PR_{zz'y} - (3 - K_{izy} - K_{i'zy} - H_{ii'})M \quad \forall (q \in Q, (i, i') \in I, i \neq i') \quad (14)$$

$$STY_i \geq STY_{i'} + PY_{i'z} + PR_{zz'y} - (2 - K_{i'zy} - K_{i'zy} + H_{ii'})M \quad \forall (q \in Q, (i, i') \in I, i \neq i') \quad (15)$$

$$STY_i \geq STD_i + \sum_{d \in D} \sum_{b \in B} PD_{idb} X_{idb} \quad \forall (i \in I) \quad (16)$$

$$C_{max} \geq STY_i + \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} PY_{iz} K_{izy} \quad \forall (i \in I) \quad (17)$$

$$O_{iq} \in \{0, 1\} \quad \forall (i \in I, q \in Q) \quad (18)$$

$$X_{idb} \in \{0, 1\} \quad \forall (i \in I, d \in D, b \in B_y)$$

$$K_{izy} \in \{0, 1\} \quad \forall (i \in I, z \in Z, y \in Y)$$

$$F_{ii'} \in \{0, 1\} \quad \forall ((i, i') \in I)$$

$$G_{ii'} \in \{0, 1\} \quad \forall ((i, i') \in I)$$

$$H_{ii'} \in \{0, 1\} \quad \forall ((i, i') \in I)$$

$$STQ_i \quad \forall (i \in I)$$

$$STD_i \geq 0 \quad \forall (i \in I)$$

$$STY_i \geq 0 \quad \forall (i \in I)$$

$$C_{max} \geq 0$$

در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، محدودیت ۱، تابع هدف را نشان می‌دهد که شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها (هزینه‌ی زمانی تکمیل کانتینرها و هزینه‌ی عملیاتی (تخلیه، حمل، و بارگذاری)) است. محدودیت ۲، تضمین می‌کند هر

- با بهره‌گیری از اطلاعات پژوهش لو^{۲۶} و همکاران (۲۰۱۶)، مدت زمان تخلیه‌ی هر کانتینر توسط جرثقیل‌های اسکله به صورت تصادفی در بازه یکنواخت [۵۰، ۱۰۰]، مدت زمان مورد نیاز برای حمل هر کانتینر به مکان تحویل بلوک مرتبط توسط کامیون محوطه به صورت تصادفی در بازه ی [۱۰۰، ۳۰۰]، و مدت زمان بارگذاری کانتینر در پشتی تخصیص داده شده توسط جرثقیل محوطه به صورت تصادفی در بازه ی [۲۵، ۵۰] تولید می‌شود.
- هزینه‌ی تخلیه‌ی هر کانتینر توسط جرثقیل اسکله به صورت تصادفی در بازه ی [۵۰، ۱۰۰]، هزینه‌ی حمل هر کانتینر توسط کامیون محوطه به صورت

$F_{ii'} = 0$ (یا ممکن است دو کانتینر هیچ ارتباطی با یکدیگر نداشته باشند) $(F_{ii'} = 0 \text{ و } F_{i'i} = 0)$. محدودیت ۲۰ بیان می‌کند در صورتی که تخلیه‌ی کانتینر i قبل از کانتینر i' باشد $(F_{ii'} = 1)$ و تخلیه‌ی کانتینر i' نیز قبل از کانتینر i'' باشد $(F_{i'i''} = 1)$ ؛ آنگاه تخلیه‌ی کانتینر i حتماً قبل از کانتینر i'' است $(F_{ii''} = 1)$. به طور مشابه، برای مرحله‌ی حمل توسط کامیون محوطه و بارگذاری توسط جرثقیل محوطه نیز می‌توان محدودیت‌های ۲۱ الی ۲۴ را در نظر گرفت.

۵. نتایج محاسباتی

۱.۵. مثال عددی

در بخش کنونی، به بررسی یک مطالعه‌ی عددی با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده در جدول ۲ پرداخته شده است. نمونه‌ی مسئله با ۷ کانتینر، یک جرثقیل اسکله، دو کامیون محوطه، دو بلوک ذخیره‌سازی تحت مسئولیت جرثقیل‌های ۱ و ۲ با سه مکان ذخیره‌سازی منتخب بررسی شده‌اند. نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی برای نمونه‌ی مذکور در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

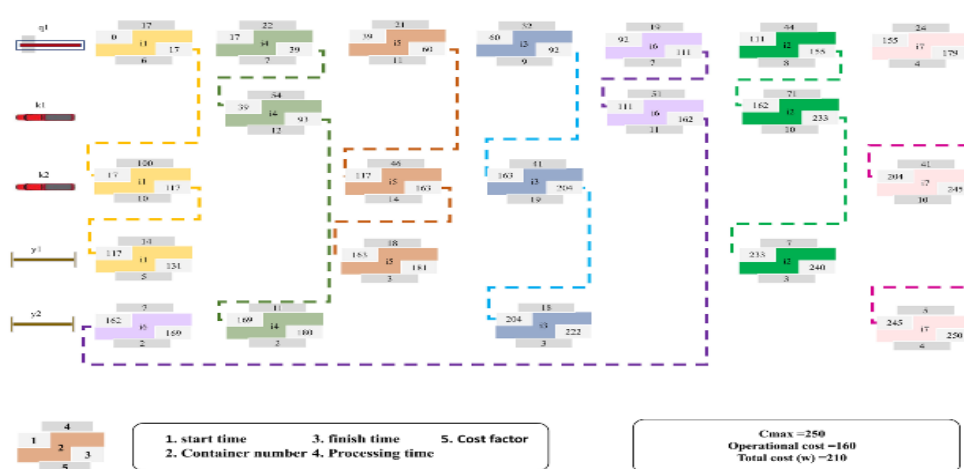
در شکل ۲، تخصیص کانتینرها به هریک از تجهیزات جابجایی، توالی، و زمان‌بندی (زمان‌های شروع و پایان) هر کانتینر و تجهیزات جابجایی، ضرایب هزینه‌ی هر یک از عملیات تخلیه، حمل، و بارگذاری هر کانتینر، بیشینه‌ی زمان تکمیل کانتینرها (C_{max})، هزینه‌ی عملیاتی (شامل هزینه‌ی عملیات تخلیه، بارگیری، و بارگذاری کانتینر توسط هر یک از تجهیزات جابجایی) و هزینه‌ی کل (شامل هزینه‌ی زمانی تکمیل کانتینرها و هزینه‌ی عملیاتی) مشاهده می‌شود. همچنین مقادیر بهینه‌ی حاصل از نمونه‌ی مذکور در پیوست‌های ۱ الی ۵ ارائه شده‌اند. این تذکر لازم است که فقط در صورتی عملیات کانتینر توسط تجهیز جابجایی جدید شروع می‌شود که عملیات مرحله‌ی قبل آن توسط تجهیز دیگر تکمیل شده باشد. همچنین تجهیز جابجایی جدید نیز در حال خدمت‌دهی به کانتینر دیگر نباشد.

۲.۵. تولید نمونه

- تمامی نمونه‌ها براساس چیدمان ارائه شده در شکل ۱ هستند. همچنین اساس تولید آن‌ها براساس اطلاعات مطرح در ادبیات موضوع با توجه به ساختار مسئله بوده است، تا شرایط شدنی بودن مسئله برقرار باشد.

جدول ۲. داده‌های ورودی مدل پیشنهادی (مجموعه/ پارامترهای تعریف شده برای نمونه‌ی مسئله‌ی مورد نظر).

Set/parameter	value
I	7
E	2
Q	1
D	2
B	2
Z	2
Y	2
Z_{b_1}	2
Z_{b_2}	1
cap_{z_1}	5
cap_{z_2}	6
cap_{z_3}	7
λ	0.2



شکل ۲. نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی.

جدول ۳. نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی.

No.	c	q/d/y/b/z	Model with Valid Inequalities				Model with Valid Inequalities			
			Obj. Val.	LB	CPU Time	GAP 1 (%)	Obj. Val.	LB	CPU Time	GAP 2 (%)
1	5	3/1/1/1/1	205.6	205.6	1	0	205.6	205.6	1	0
2	5	4/2/1/2/1	153.8	153.8	1	0	153.8	153.8	<0	0
3	5	3/2/1/3/1	159.4	159.4	2	0	159.4	159.4	1	0
4	6	3/1/1/1/1	308.6	308.6	1	0	308.6	308.6	<0	0
5	6	4/2/1/2/1	202.2	202.2	6	0	202.2	202.2	4	0
6	6	3/2/1/3/1	197	197	5	0	197	197	4	0
7	7	3/1/1/1/1	340.6	340.6	10	0	340.6	340.6	4	0
8	7	4/2/1/2/1	231.4	231.4	11	0	231.4	231.4	8	0
9	7	3/2/1/3/1	227	227	7	0	227	227	6	0
10	8	3/2/1/1/1	307.13	307.13	346	0	307.13	307.13	187	0
11	8	4/2/1/2/1	282.43	282.43	11	0	282.43	282.43	8	0
12	8	3/2/2/3/1	269.11	269.11	89	0	269.11	269.11	73	0
13	9	3/2/2/2/1	296.6	296.6	402	0	296.6	296.6	352	0
14	9	3/2/2/3/1	262.8	262.8	126	0	262.8	262.8	60	0
15	9	4/2/2/4/1	290.2	290.2	57	0	290.2	290.2	71	0
16	10	4/2/2/3/2	294.8	294.8	412	0	294.8	294.8	150	0
17	10	5/3/2/4/2	283.1	283.1	56	0	283.1	283.1	51	0
18	10	6/3/2/5/2	285.5	285.5	125	0	285.5	285.5	83	0
19	15	5/3/2/3/2	405.4	394.42	3600	2.69	398.8	391.58	3600	1.81
20	15	6/3/3/4/3	383.8	372.8	3600	2.86	376.7	371.6	3600	1.35
21	15	7/3/3/5/3	379.4	365.3	3600	3.71	371.4	363.2	3600	2.2
Average						3.08	1.78			

Note: Obj. Val. = Objective Function Value;

LB: Lower Bound;

CPU Time = Computational Time

تعداد جرثقیل‌های محوطه‌ی فعال (y) در بازه‌ی [۱, ۲]، تعداد بلوک‌های ذخیره‌سازی (b) در بازه‌ی [۲, ۴]، و تعداد مکان‌های ذخیره‌سازی (l) در بازه‌ی [۳, ۷] در نظر گرفته شده‌اند. همچنین سایر پارامترهای پیشنهادی براساس توضیحات بخش ۲.۵ تنظیم شده‌اند.

نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن نامعادله‌های معتبر و بدون در نظر گرفتن نامعادله‌های معتبر در جدول ۳ ارائه شده است؛ که در آن، به ترتیب اطلاعات ورودی هر نمونه، حد پائین، مقدار تابع هدف، مدت زمان

تصادفی در بازه‌ی [۱۰۰, ۳۰]، و هزینه‌ی بارگذاری هر کانتینر به صورت تصادفی در بازه‌ی [۲۵, ۵] با الهام از اطلاعات پژوهش توکلی مقدم و همکاران (۲۰۰۹)^[۸] تولید می‌شود.

۳.۵. نتایج عددی

برای حل مسائل، تعداد کانتینرها (i) در بازه‌ی [۷, ۱۰]، تعداد جرثقیل‌های اسکله (q) در بازه‌ی [۱, ۳]، تعداد کامیون‌های محوطه (d) در بازه‌ی [۲, ۷]،

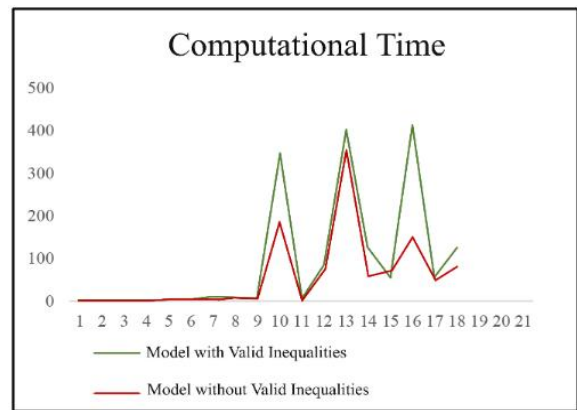
عملیاتی خطوط کشتیرانی و پایانه‌های کانتینری مطرح می‌کند. تجهیزات جابجایی (جرثقیل اسکله، کامیون محوطه، و جرثقیل محوطه) از منابع اصلی در پایانه‌های کانتینری هستند، که عملکرد آن‌ها در یکدیگر تأثیر متقابل دارد و برنامه‌ریزی نامناسب هر یک از آن‌ها در برنامه‌ریزی سایرین، تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین با رشد روزافزون تعداد کانتینرها، محوطه‌ی ذخیره‌سازی کانتینرها نیز با محدودیت ظرفیت روبه‌رو هستند. از طرفی مکان ذخیره‌سازی کانتینرها در مدت‌زمان خدمت‌دهی سایر تجهیزات نیز اثرگذار است. در نتیجه، به‌منظور افزایش کارایی عملیات تخلیه‌ی کانتینرها از کشتی، حمل آن‌ها به محوطه و در نهایت، ذخیره‌سازی آن‌ها در محوطه به ادغام اصلی‌ترین مسائل کنارسکله و محوطه پرداخته شده است، که منجر به نزدیک‌تر شدن به واقعیت نیز شده است. با توجه به مفروضات مطرح‌شده، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح جدید برای مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی ارائه شده است. در مدل ذکرشده تخصیص کانتینرها به مکان‌های ذخیره‌سازی و همچنین تخصیص آن‌ها به هر یک از تجهیزات جابجایی به‌گونه‌ای انجام شده است که در سریع‌ترین زمان ممکن، کانتینرها از کشتی تخلیه و در محوطه بارگذاری شوند و کمترین هزینه‌ی عملیاتی را در پی داشته باشند. به‌منظور ارزیابی مدل پیشنهادی، نمونه‌های طراحی‌شده در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS پیاده‌سازی و با حل‌کننده‌ی CPLEX اجرا شده‌اند. همچنین با توجه به پیچیدگی مسئله‌ی یکپارچه و تسریع روند حل، نامعادله‌های معتبر متناسب با ساختار مسئله، معرفی و به مدل اضافه شده‌اند. نتایج محاسباتی بیانگر کارایی مدل پیشنهادی در دستیابی به جواب بهینه است. همچنین اضافه‌کردن نامعادله‌های معتبر منجر به تسریع روند حل شده و در نمونه‌ی مسائلی که CPLEX در بازه‌ی زمانی مشخص، قادر به دستیابی به جواب بهینه نبوده است، اضافه‌شدن نامعادله‌های معتبر منجر به دستیابی به جواب‌هایی با میانگین درصد خطای کمتری نسبت به حالتی که نامعادله‌های معتبر اضافه نشده‌اند، شده است. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر، پیشنهادهایی برای مطالعه‌های آتی مطرح شده‌اند، که عبارت‌اند از:

۱) برای یکپارچه‌سازی هر چه بیشتر مسئله‌ی پیشنهادی و نزدیک‌تر شدن آن به واقعیت، علاوه‌بر عملیات تخلیه، عملیات بارگیری کشتی نیز در نظر گرفته شود.

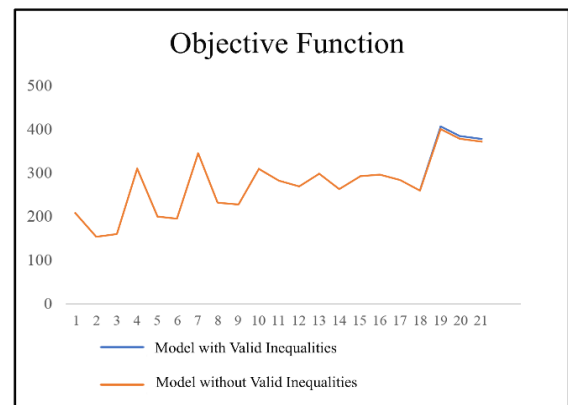
۲) در مسئله‌ی حاضر از تداخل جرثقیل‌های اسکله صرف‌نظر شده است، اما در عمل فاصله‌های ایمنی بین جرثقیل‌ها باید رعایت شود، که این فرض نیز می‌تواند به مسئله اضافه شود.

۳) برای کاهش پیچیدگی مسئله، هر تجهیز فقط در یک واحد زمانی می‌تواند به یک کانتینر خدمت‌دهی کند؛ در حالی که با در نظر گرفتن جرثقیل‌های اسکله‌ی دوبازویی یا تریلرهای چندگانه، می‌توان به بیش از یک کانتینر در آن واحد خدمت‌دهی کرد.

۴) می‌توان مسئله‌ی پیشنهادی را در حوزه‌ی سبز با تابع هدف کمینه‌سازی کاهش سوخت مصرفی کامیون‌های محوطه و کاهش انتشار آلاینده‌های گلخانه‌ای مطرح کرد.



شکل ۳. مقایسه‌ی زمان محاسباتی مدل بدون در نظر گرفتن و با در نظر گرفتن نامعادله‌های معتبر.



شکل ۴. مقایسه‌ی تابع هدف مدل بدون در نظر گرفتن و با در نظر گرفتن نامعادله‌های معتبر.

محاسباتی بر حسب ثانیه، و درصد انحراف (GAP) جواب به‌دست‌آمده از حد پائین ارائه شده است. نتایج حاصل از جدول ۳ نشان می‌دهند که در نظر گرفتن نامعادله‌های معتبر منجر به افزایش سرعت حل مسئله برای دستیابی به جواب بهینه شده است (شکل ۳). همچنین براساس نتایج جدول اخیر که در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود، در ۱۷ نمونه، مسئله‌ی اول جواب‌های حاصل از مدل با در نظر گرفتن نامعادله‌های معتبر منطبق بر جواب‌های حاصل از مدل بدون در نظر گرفتن نامعادله‌های معتبر است. از طرفی در نمونه‌ی مسئله‌های ۲۱-۱۸ مدل پیشنهادی در بازه‌ی زمانی ۱ ساعته قادر به دستیابی به جواب بهینه نبوده است. مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن نامعادله‌های معتبر به جوابی با میانگین $1/78\%$ نسبت به حد پائین به‌دست‌آمده از مدل به جواب رسیده است. این در حالی است که مدل پیشنهادی بدون در نظر گرفتن نامعادله‌های معتبر به جوابی با میانگین انحراف $3/08\%$ نسبت به حد پایین، به جواب دست پیدا کرده است. لذا جواب‌های به‌دست‌آمده از مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن نامعادله‌های معتبر، کیفیت بالاتری داشته‌اند.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

پایانه‌ی کانتینری، قطب مهم انتقال محموله در زنجیره‌ی تأمین جهانی است. امروزه، رشد مستمر حمل‌ونقل کانتینری، الزام‌های بیشتری را برای کارایی

References - منابع

- Li, S., Jia, S., Tao, Y. and Lin, X., 2024. Gate appointment design in a container terminal: A robust optimization approach. *Transportation Research Part E: Logistics And Transportation Review*, 184, pp.103495.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103495>
- Statista, 2022. Size of container ship fleet 2022, by nationality of operator. Statista. Available at: <https://www.statista.com/statistics/263858/container> (Accessed: 11 February 2026).
- Azevedo, A.T., de Salles Neto, L.L., Chaves, A.A. and Moretti, A.C., 2018. Solving the 3D stowage planning problem integrated with the quay crane scheduling problem by representation by rules and genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, 65, pp.495–516.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.01.006>
- Bierwirth, C. and Meisel, F., 2015. A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal Of Operational Research*, 244(3), pp.675–689.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.030>
- Daganzo, C.F., 1989. The crane scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 23(3), pp.159–175.
[https://doi.org/10.1016/0191-2615\(89\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0191-2615(89)90001-5)
- Peterkofsky, R.I. and Daganzo, C.F., 1990. A branch and bound solution method for the crane scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 24(3), pp.159–172.
[https://doi.org/10.1016/0191-2615\(90\)90014-P](https://doi.org/10.1016/0191-2615(90)90014-P)
- Kim, K.H. and Park, Y.-M., 2004. A crane scheduling method for port container terminals. *European Journal Of Operational Research*, 156(3), pp.752–768.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00133-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00133-4)
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Makui, A., Salahi, S., Bazzazi, M. and Taheri, F., 2009. An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container ports. *Computers & Industrial Engineering*, 56(1), pp.241–248.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.05.011>
- Abou Kasm, O. and Diabat, A., 2020. Next-generation quay crane scheduling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114, pp.694–715.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.015>
- Al-Dhaheri, N., Jebali, A. and Diabat, A., 2016. The quay crane scheduling problem with nonzero crane repositioning time and vessel stability constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 94, pp.230–244.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.011>
- Sun, D., Tang, L. and Baldacci, R., 2019. A Benders decomposition-based framework for solving quay crane scheduling problems. *European Journal Of Operational Research*, 273(2), pp.504–515.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.009>
- Li, Y., Li, X., Zhang, C. and Wu, T., 2024. Decomposition algorithms for the robust unidirectional quay crane scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 167, pp.106670.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106670>
- Sun, D., Tang, L., Baldacci, R. and Chen, Z., 2024. A decomposition method for the group-based quay crane scheduling problem. *INFORMS Journal On Computing*, 36, pp.543–570.
<https://doi.org/10.1287/ijoc.2022.0298>
- Ng, W., 2005. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference. *European Journal Of Operational Research*, 164(1), pp.64–78.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.025>
- Ng, W., 2005. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference. *European Journal Of Operational Research*, 164(1), pp.64–78.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.025>
- Ng, W. and Mak, K., 2005. Yard crane scheduling in port container terminals. *Applied Mathematical Modeling*, 29, pp.263–276.
- Li, W., Wu, Y., Petering, M.E., Goh, M. and De Souza, R., 2009. Discrete-time model and algorithms for container yard crane scheduling. *European Journal Of Operational Research*, 198(1), pp.165–172.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.08.019>
- He, J., Chang, D., Mi, W. and Yan, W., 2010. A hybrid parallel genetic algorithm for yard crane scheduling. *Transportation Research Part E: Logistics And Transportation Review*, 46(1), pp.136–155.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.07.002>
- He, J., Huang, Y. and Yan, W., 2015. Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption. *Advanced Engineering Informatics*, 29(1), pp.59–75.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.09.003>
- He, J., Tan, C. and Zhang, Y., 2019. Yard crane scheduling problem in a container terminal considering risk caused by uncertainty. *Advanced Engineering Informatics*, 39, pp.14–24.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.11.004>
- Liang, C.-J., Chen, M., Gen, M. and Jo, J., 2014. A multi-objective genetic algorithm for yard crane

- scheduling problem with multiple work lines. *Journal Of Intelligent Manufacturing*, 25, pp.1013–1024. <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0792-4>
22. Liu, W., Zhu, X., Wang, L., Yan, B. and Zhang, X., 2021. Optimization approach for yard crane scheduling problem with uncertain parameters in container terminals. *Journal Of Advanced Transportation*, pp.1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/5537114>
23. Bazzazi, M., Safaei, N. and Javadian, N., 2009. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal. *Computers & Industrial Engineering*, 56(1), pp.44–52. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.03.012>
24. Zhang, C., Liu, J., Wan, Y.-W., Murty, K.G. and Linn, R.J., 2003. Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(10), pp.883–903. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(02\)00089-9](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(02)00089-9)
25. Lin, D.- and Chiang, C.-W., 2017. The storage space allocation problem at a container terminal. *Maritime Policy & Management*, 44(6), pp.685–704. <https://doi.org/10.1080/03088839.2017.1335897>
26. Zhang, R.-Q., Wang, M. and Pan, X., 2019. New model of the storage location assignment problem considering demand correlation pattern. *Computers & Industrial Engineering*, 129, pp.210–219. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.027>
27. Cao, J., Shi, Q. and Lee, D.-H., 2010. Integrated quay crane and yard truck schedule problem in container terminals. *Tsinghua Science & Technology*, 15(4), pp.467–474. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(10\)70089-4](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(10)70089-4)
28. Kaveshgar, N. and Huynh, N., 2015. Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers. *International Journal Of Production Economics*, 159, pp.168–177. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.09.028>
29. Tang, L., Zhao, J. and Liu, J., 2014. Modeling and solution of the joint quay crane and truck scheduling problem. *European Journal Of Operational Research*, 236(3), pp.978–990. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.050>
30. Lee, D.-H., Wang, H.Q. and Miao, L., 2008. Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics And Transportation Review*, 44(1), pp.124–135. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.08.001>
31. Hop, D.C., Van Hop, N. and Anh, T.T.M., 2021. Adaptive particle swarm optimization for integrated quay crane and yard truck scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 153, pp.107075. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107075>
32. Zhen, L., Yu, S., Wang, S. and Sun, Z., 2019. Scheduling quay cranes and yard trucks for unloading operations in container ports. *Annals Of Operations Research*, pp.455–478. <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2335-9>
33. Skaf, A., Lamrous, S., Hammoudan, Z. and Manier, M.-A., 2021. Integrated quay crane and yard truck scheduling problem at the port of Tripoli-Lebanon. *Computers & Industrial Engineering*, 159, pp.107448. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107448>
34. Qin, T., Du, Y., Chen, J.H. and Sha, M., 2020. Combining mixed integer programming and constraint programming to solve the integrated scheduling problem of container handling operations of a single vessel. *European Journal Of Operational Research*, 285(3), pp.884–901. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.02.021>
35. Hsu, H.-P., Wang, C.-N., Fu, H.-P. and Dang, T.-T., 2021. Joint scheduling of yard crane, yard truck, and quay crane for container terminal considering vessel stowage plan: An integrated simulation-based optimization approach. *Mathematics*, 9(18), pp.22–<https://doi.org/10.3390/math9182236>
36. Hsu, H.-P., Chou, C.-C. and Wang, C.-N., 2022. Heuristic/metaheuristic-based simulation optimization approaches for integrated scheduling of yard crane, yard truck, and quay crane considering import and export containers. *IEEE Access*, 10, pp.64650–64670. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3180752>
37. Kizilay, D., Eliyi, D.T. and Van Hentenryck, P., 2018. Constraint and mathematical programming models for integrated port container terminal operations. In: W.J. van Hoes (ed.) *Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research - 15th International Conference, CPAIOR 2018, Delft, The Netherlands, June 26–29, 2018, Proceedings*, pp.344–360. Springer, Lecture Notes in Computer Science, 10848. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93031-2_25
38. Kizilay, D., Van Hentenryck, P. and Eliyi, D.T., 2020. Constraint programming models for integrated container terminal operations. *European Journal Of Operational Research*, 286(3), pp.945–962. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.025>
39. Luo, J., Wu, Y. and Bergsten Mendes, A., 2016. Modelling of integrated vehicle scheduling and container storage problems in unloading process at an automated container terminal. *Computers & Industrial Engineering*, 94, pp.32–44. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.010>

"پیوست‌ها"

پیوست ۱- مقادیر بهینه تخصیص هر کانتینر به کامیون محوطه برای حمل به بلوک ذخیره‌سازی (X_{idb}) توسط CPLEX.

X_{idb}	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
d_1	b_1	1					
	b_2			1		1	
d_2	b_1		1				1
	b_2	1			1		

پیوست ۲- مقادیر بهینه تخصیص هر کانتینر به جرثقیل محوطه برای بارگذاری در مکان ذخیره‌سازی (K_{iyz}) توسط CPLEX.

K_{iyz}	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
z_1		1			1		
y_1	z_2	1					
	z_3						
	z_1						
y_2	z_2						
	z_3		1	1		1	1

پیوست ۳- مقادیر بهینه توالی تخلیه کانتینرها ($F_{ii'}$) توسط

CPLEX

$F_{ii'}$	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
i_1			1		1		1
i_2							
i_3							1
i_4			1			1	
i_5				1			1
i_6							
i_7			1				

پیوست ۴. مقادیر بهینه‌ی توالی حمل کانتینرها ($G_{ii'}$) توسط CPLEX.

$G_{ii'}$	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
i_1			1		1		1
i_2							
i_3							1
i_4		1				1	
i_5			1				1
i_6							
i_7		1					

پیوست ۵. مقادیر بهینه‌ی توالی حمل کانتینرها ($H_{ii'}$) توسط CPLEX.

$H_{ii'}$	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
i_1		1			1		
i_2							
i_3							1
i_4							1
i_5			1				1
i_6				1	1		1
i_7	1	1					