Marine and Port Servicesch
Fall 2023, 1(1), 67-98
journalspmco.ir

Original research
Received: 15 October 2023 Review: 14 November 2023 Accepted: 14 November 2023

A Mathematical Model for Integrated Berth Allocation and Quay Crane Assignment Problem with Consideration of Collaboration Between Container Terminals of Shahid Rajaei Port

Leila Hashemi * Logistics and supply chain, Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Ebrahim Teimour Member of the academic staff of the University of Science and Technology

Mohammadreza Nasiri Graduated from Industrial Engineering University of Science and Technology

Abstract

Container terminals in seaports serve as the interface between maritime and land transportation in the global supply chain. Due to physical constraints in container terminals, their performance in container handling and transfer to other modes of transportation is crucial. Collaboration between terminals can be a way to maintain efficiency and cost savings, especially in large ports with multiple terminal operators. This paper presents a mixed integer linear model for the integrated berth and quay crane allocation problems with a focus on collaboration between container terminals in Shahid Rajaee Port. The model considers continuous berth design, dynamic vessel arrival times, and the operational window of quay cranes. To evaluate the proposed model, three demand levels are considered over a 5-day time horizon, and the parameters for ship arrivals are generated randomly and logically. The results show that collaboration leads to optimal utilization of port capacities and better service to shipping companies.

Keywords: Berth Allocation, quay Crane Assignment, Container Terminal, Collaboration, Integration Model.

*Corresponding Author: l_hashemi@ind.iust.ac.ir
How to Cite: Hashemi, L., Teimour, E., Nasiri, M. (2023). A Mathematical Model for Integrated Berth Allocation and Quay Crane Assignment Problem with Consideration of Collaboration Between Container Terminals of Shahid Rajaei Port. *Marine and Port Servicesch*, 1(1), 67-98.

ارائه یک مدل ریاضی برای مسئله یکپارچه تخصیص اسکله و جرثقیل اسکله‌ای با درنظرگرفتن همکاری بین ترمینال‌های کانتینری بندر شهید رجایی

لیلا هاشمی * دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

ابراهیم تیموری استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

محمدرضا نصیری دکتری مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

چکیده

پایانه‌های کانتینری در بنادر دریایی، نقطه تقابل بین حمل‌ونقل دریایی و زمینی کالاها در زنجیره تأمین جهانی محسوب می‌شوند. باتوجه به محدودیت‌های فیزیکی در ترمینال‌های کانتینری عملکرد آن‌ها در تخلیه و بارگیری کانتینرها و سپس انتقال محموله‌ها به سایر وجوه حمل‌ونقل بسیار مهم می‌باشد. ازآنجایی‌که در بنادر بزرگ، چندین ترمینال کانتینری وجود دارد و هر ترمینال نیز توسط شرکت مختلفی مدیریت می‌شود، رویکرد همکاری بین ترمینال‌ها می‌تواند راهی برای حفظ بهره‌وری و صرفه‌جویی در هزینه‌ها باشد. در این مقاله، یک مدل خطی عدد صحیح مختلط برای مسائل یکپارچه تخصیص اسکله و جرثقیل اسکله با رویکرد همکاری بین ترمینال‌های کانتینری در بندر شهید رجایی ارائه شده است. در این مدل طرح اسکله به‌صورت پیوسته، زمان ورود کشتی‌ها به‌صورت داینامیک و بازه حرکتی جرثقیل‌ها در نظر گرفته شده است. به‌منظور بررسی و ارزیابی مدل پیشنهادی سه سطح تقاضا در بازه زمانی ۵ روزه در نظر گرفته شده است و پارامترهای ورود کشتی‌ها به‌صورت تصادفی و منطقی تولید شده‌اند. نتایج حل نشان می‌دهند که رویکرد همکاری منجر به استفاده بهینه از ظرفیت‌های بندر و همچنین خدمت‌دهی بهتر به شرکت‌های کشتیرانی می‌شود.

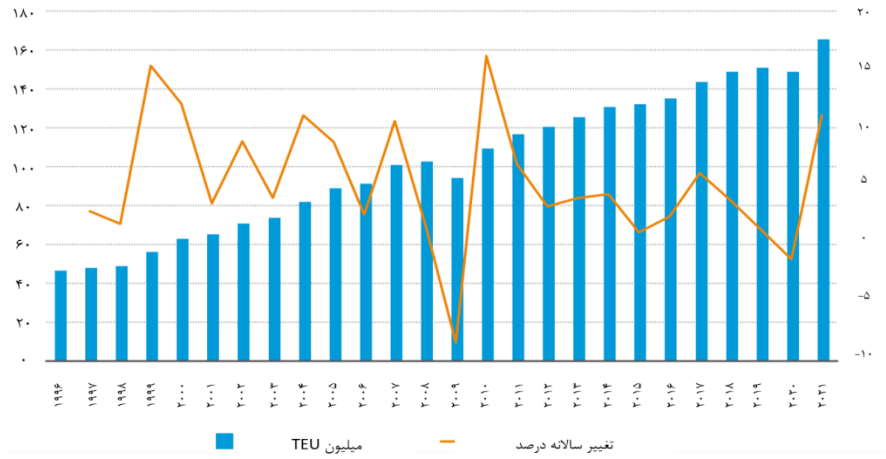
کلیدواژه‌ها: تخصیص اسکله، تخصیص جرثقیل اسکله‌ای، ترمینال کانتینری، مدل یکپارچه.

* نویسنده مسئول: l_hashemi@ind.iust.ac.ir

مقدمه

بر اساس گزارش سازمان ملل متحد، شکل ۱ حجم تجارت کانتینری در بیست سال گذشته بیش از دو برابر شده است و این روند صعودی با ساخت کشتی‌های کانتینری غول‌پیکر ادامه دارد. با توجه به این روند رو به رشد، افزایش ظرفیت پایانه‌های کانتینری در بنادر یک نکته مهم برای توسعه پایدار است (Unctad 2022: 9). افزایش ظرفیت پایانه‌های کانتینری از دو طریق امکان‌پذیر است. روش اول از طریق سرمایه‌گذاری در زیرساخت، شامل خرید زمین، تجهیزات و غیره می‌باشد که هزینه و زمان زیادی را باید صرف کرد. روش دوم از طریق بهبود و بهینه‌سازی عملیات و همچنین استفاده حداکثری از ظرفیت در دسترس، امکان‌پذیر است. در این مقاله رویکرد دوم مدنظر قرارگرفته است و به بهینه‌سازی عملیات پایانه‌های کانتینری پرداخته می‌شود.

شکل ۱: روند افزایش حمل‌ونقل کانتینری طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۱ (Unctad 2022: 9)

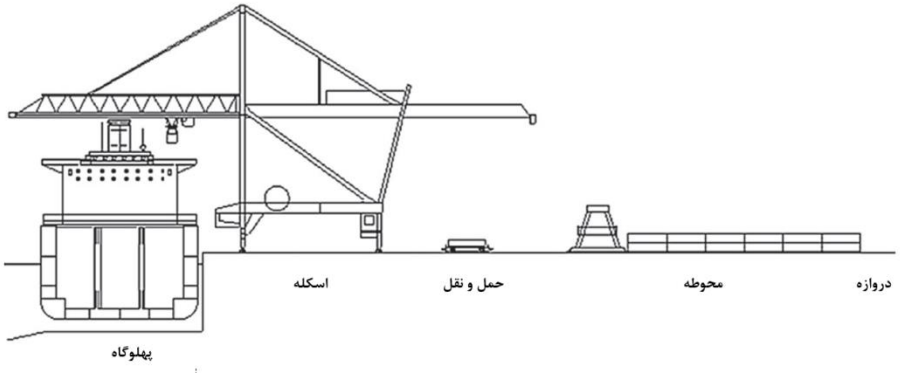


از مهم‌ترین مسائل عملیاتی که پایانه‌های کانتینری با آن مواجه هستند، برنامه‌ریزی تخصیص و زمان‌بندی کشتی‌ها می‌باشد. در حال حاضر این تصمیم‌گیری با توجه به ساختار صاحب‌خانه‌ای در بندر شهید رجایی، توسط اداره بندر انجام می‌گردد؛ بنابراین اداره بندر مسئول تخصیص کشتی‌های ورودی به ترمینال‌های کانتینری است و این کار را به‌صورت مساوی بین آن‌ها انجام می‌دهد. در این شرایط ترمینال‌های کانتینری دیگر انگیزه‌ای برای رقابت نداشته و از سود نهایی خود اطمینان دارند. در این پژوهش با درنظرگرفتن شرایط فعلی، مدلی ارائه داده شده است که هم‌زمان شرایط فعلی را درنظر گرفته و بینشی ایجاد می‌کند که ترمینال‌های کانتینری و همچنین بندر برای سوددهی بیشتر باهم همکاری کنند. در بخش اول این مقاله به تعریف مفاهیم اصلی و دسته‌بندی مسائل عملیاتی پرداخته می‌شود. بخش دوم، مرور ادبیات ویژه‌ای بر مسائل یکپارچه و همچنین مقالات با موضوع همکاری بین پایانه‌های کانتینری پرداخته شده است و تمایز این پژوهش با سایر تحقیقات نشان داده شده است. در قسمت سوم، به تعریف پارامترها و متغیرهای تصمیم برای مدل‌سازی رویکرد پیشنهادی پرداخته خواهد شد. در قسمت چهارم، نتایج حاصل از تحقیق آورده شده و در قسمت آخر به نتیجه‌گیری و پیشنهادها پرداخته شده است.

۱- ترمینال کانتینری

ترمینال‌های کانتینری مکان‌هایی هستند که در آن کشتی‌های کانتینری برای بارگیری و تخلیه کانتینرها، وارد اسکله و پهلوگاه‌ها می‌شوند. پایانه‌های کانتینری را می‌توان به پنج ناحیه تقسیم نمود. این نواحی عبارت‌اند از:
پهلوگاه، اسکله، نقل‌وانتقال، محوطه و دروازه. در شکل ۲ شمای کلی پایانه کانتینری نشان داده شده است.

شکل ۲: شمای کلی پایانه کانتینری (Carlo etal 2014: 413)



مطابق شکل، ناحیه پهلوگاه و اسکله به‌عنوان نواحی جانب دریا[1] و نواحی دروازه و محوطه کانتینری به‌عنوان نواحی جانب خشکی[2] و ناحیه انتقال به‌عنوان حدفاصل این دو ناحیه در نظر گرفته می‌شود.

۱-۱- انواع مسائل در ترمینال‌های کانتینری

مطابق با تقسیم‌بندی پایانه کانتینری در قسمت قبل، نواحی جانب دریا و جانب خشکی مسائل منحصربه‌فرد خود را دارند. البته مسائل یکپارچه‌ای برای هماهنگی این دو ناحیه نیز قابل طراحی می‌باشد. در این مقاله صرفاً به مسائل عملیات جانب دریا پرداخته شده است.

مسائل برنامه‌ریزی عملیات جانب دریا به سه مسئله که مرتبط با بهره‌برداری از منابع پایانه‌ای جانب دریا می‌باشند تفکیک می‌شوند. این مسائل تحت عناوین مسئله تخصیص اسکله/پهلوگاه اسکله [3](BAP)، مسئله تخصیص جرثقیل اسکله [4](QCAP) و مسئله توالی عملیات (زمان‌بندی) جرثقیل‌های اسکله [5](QCSP) مطرح می‌باشند که به تفکیک عبارت‌اند از:

BAP: در مسئله تخصیص پهلوگاه به تعیین زمان و موقعیت پهلوگیری برای هر شناوری که می‌بایست در خلال یک افق برنامه‌ریزی معین در اسکله خدمت‌رسانی شود، پرداخته می‌شود. هدف پهلودهی کشتی‌ها به اسکله‌ها به‌گونه‌ای است که به‌طور هم‌زمان هیچ‌کدام از آن‌ها طول مشترکی از اسکله را اشغال نکنند.

QCAP: در مسئله تخصیص جرثقیل اسکله حجم بارگیری و تخلیه کشتی و همچنین ظرفیت عملیاتی جرثقیل‌های اسکله در نظر گرفته می‌شود تا تخصیص بهینه‌ای از جرثقیل‌ها به کشتی‌ها انجام شود.

---

1 Seaside
2 Yardside
3 Berth Allocation Problem
4 Quay Crane Allocation Problem
5 Quay Crane Scheduling Problem

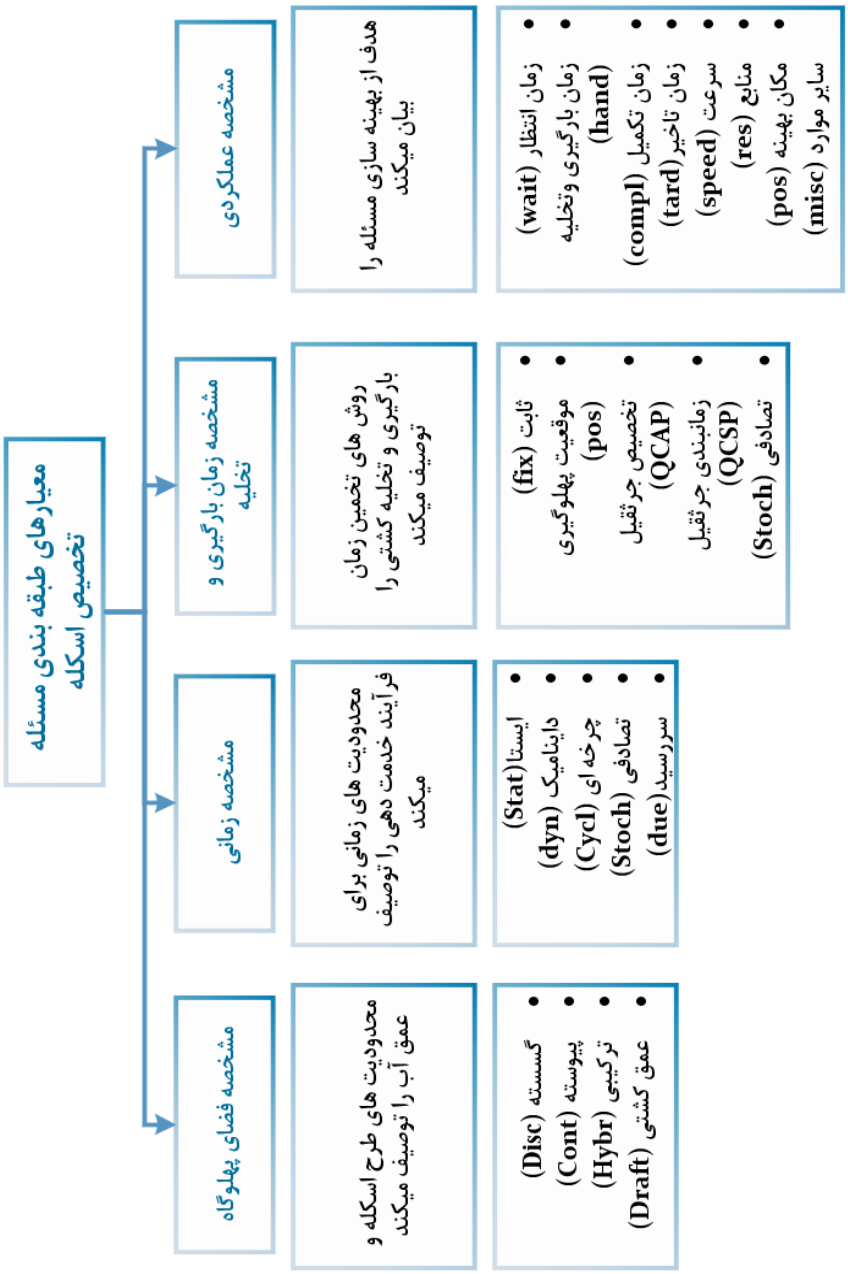
QCSP: در مسئله زمان‌بندی جرثقیل اسکله موقعیت قرارگیری کانتینرها در کشتی و همچنین جرثقیل‌ها در طول ترمینال مدنظر قرار داده می‌شود تا توالی بهینه‌ای از عملیات جرثقیل اسکله بر روی کشتی باهدف کاهش زمان تخلیه و بارگیری به دست آورده شود.

برای مدل‌سازی هرکدام از این مسائل بایستی مشخصه‌های عملیاتی ترمینال‌های کانتینری و تجهیزات مربوطه را در نظر گرفت. یک دسته‌بندی مرجع برای مشخصه‌های این مسائل توسط بیروث و مایسل در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ انجام‌شده که در ادامه به‌صورت خلاصه دسته‌بندی این مسائل آورده شده است. -(Meisel and Bierwirth 2010: 615-627) و (Meisel and Bierwirth 2015: 1-15)

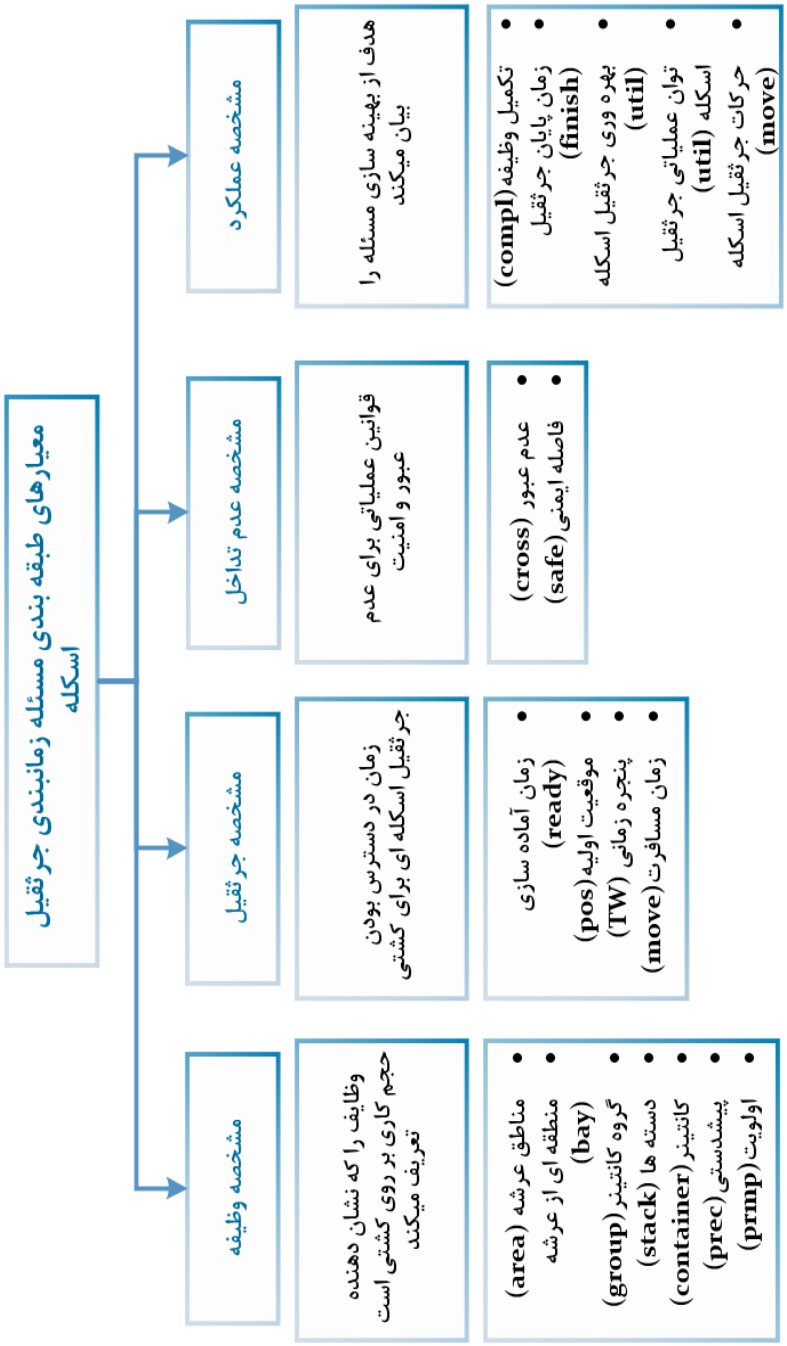
معیارهای دسته‌بندی برای مسئله تخصیص اسکله به ۴ مشخصه، فضای پهلوگاه، زمان ورود کشتی، زمان تخلیه و بارگیری و مشخصه تابع هدف تقسیم‌بندی می‌شود. (شکل ۳)

معیارهای دسته‌بندی برای مسئله زمان‌بندی جرثقیل اسکله به ۴ مشخصه، تعریف وظیفه، شرایط جرثقیل اسکله، شرایط ایمنی و مشخصه عملکرد که هدف از طرح مسئله را بیان می‌کند، تقسیم‌بندی می‌شود. (شکل ۴)

شکل ۳: دسته‌بندی مسئله تخصیص اسکله (Meisel and Bierwirth 2015:2)



شکل ٤: دسته‌بندی مسئله زمان‌بندی جرثقیل اسکله (Meisel and Bierwirth 2015:7)



در ادبیات موضوع، دسته‌بندی برای مشخصه‌های مسئله تخصیص جرثقیل اسکله همانند دو مسئله قبل بیان نگردیده است؛ اما یک دسته‌بندی مهم برای مسئله نحوه تخصیص جرثقیل اسکله می‌توان در نظر گرفت که عبارت است از:

۱- متغیر در زمان[6]: در این حالت، جرثقیل‌های اسکله تخصیص داده‌شده در طول عملیات تخلیه و بارگیری کشتی، می‌توانند

6. Time-variant

متغیر باشد. به‌عنوان‌مثال ابتدا عملیات تخلیه و بارگیری با دو جرثقیل شروع می‌شود و می‌تواند تا اتمام عملیات این تعداد جرثقیل کم یا زیاد شوند.

۲- ثابت در زمان[۷]: در این حالت، تعداد جرثقیل‌های اسکله تخصیص داده‌شده به کشتی در طول زمان عملیات تخلیه و بارگیری ثابت خواهند ماند (Meisel and Bierwirth 2010: 617).

اساساً تصمیمات تخصیص اسکله، تخصیص جرثقیل اسکله و زمان‌بندی جرثقیل اسکله می‌تواند به‌صورت پی‌درپی انجام شود. در شکل ۵، ورودی و خروجی‌های هرکدام از مسائل و همچنین زمان برنامه‌ریزی هرکدام نشان داده‌شده است. نکته‌ای که در این قسمت وجود دارد عدم قطعیت در داده‌های ورودی مسائل است. با گذشت زمان داده‌های در دسترس بیشتر شده و متعاقباً عدم قطعیت در برنامه‌ریزی کاهش می‌یابد. برای مثال، نمایندگان کشتیرانی بایستی حداقل ۶ ساعت قبل از ورود شناور، مانیفست تخلیه و بارگیری کشتی را ارسال کنند؛ بنابراین قبل از این زمان نمی‌توان برنامه‌ریزی دقیقی برای مسائل تخصیص جرثقیل اسکله و زمان‌بندی آن ارائه کرد.

برای یافتن راه‌حل دقیق و جامع در برنامه‌ریزی، ادغام این مسائل در ادبیات موردتوجه قرار گرفته است؛ و باتوجه به آن سه حالت بیان شده است:

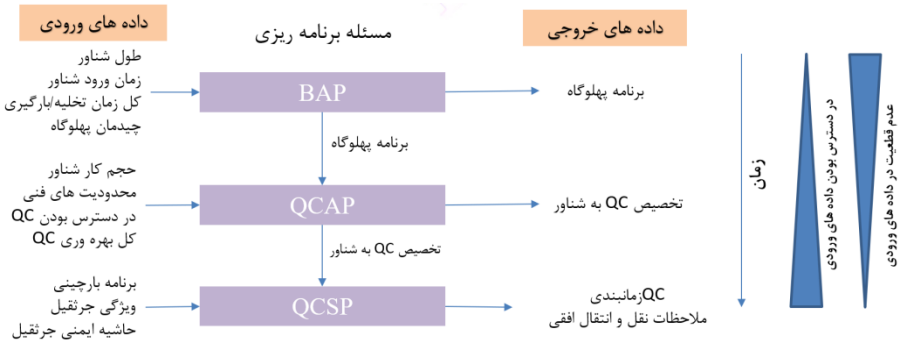
۱- ادغام مسئله تخصیص اسکله و جرثقیل اسکله‌ای[۸]

۲- ادغام مسئله تخصیص جرثقیل اسکله و زمان‌بندی جرثقیل اسکله[۹]

۳- ادغام هر سه مسئله[۱۰]

در ادامه به رویکردهای یکپارچگی این مسائل پرداخته می‌شود.

شکل ۵. مسائل یکپارچه عملیات جانب دریا (Meisel 2009: 48)



۳-۱- رویکردهای یکپارچگی

مطابق با مطالعات جوفرین در سال ۱۹۹۹، یکپارچگی دو مسئله می‌تواند به دوحالت، یکپارچگی عمیق[۱۱] یا یکپارچگی

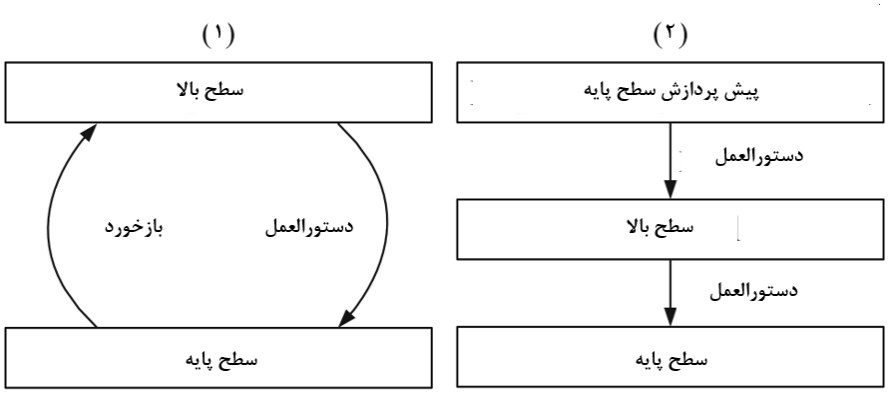
7. Time-invariant
8. Berth allocation and crane assignment problem (BACAP)
9. Berth allocation and crane assignment problem (BACAP)
10. Quay Crane Assignment and Scheduling Problem (QCASP)
11. Deep Integration

عملکردی[۱۲] صورت گیرد. (Geoffrion 1999: 10)

ادغام عمیق به معنی حل یک مدل واحد است که در آن وابستگی تصمیمات درگیر در راه‌حل با استفاده از مجموعه‌ای از محدودیت‌های یکپارچه در نظرگرفته می‌شود. بااین‌حال حل یک مدل یکپارچه می‌تواند یک حل واحد ایجاد کند اما اغلب این مدل‌ها به دلیل پیچیدگی زیاد برای حل سخت هستند. برای مقابله با این سختی ادغام دو مسئله اغلب عملی‌تر است.

در حالت یکپارچگی عملکردی، ادغام توسط یک دستور کار محاسباتی که توالی فرآیند حل را بین سطح پایه و سطح بالا تعریف می‌کند، شکل می‌گیرد. اساساً ادغام دو مسئله می‌تواند از دو روش صورت گیرد؛ ۱) چرخه بازخورد؛ در این حالت یک معیار خاتمه مشخصی که معمولاً رسیدن به یک راه‌حل ثابت از سطح بالا است تعریف می‌گردد و تا رسیدن به آن این چرخه تکرار می‌گردد. ۲) پیش‌پردازش؛ ایده به این صورت است که یکی از مسائل تحت شرایط ثابت حل شود و نتیجه آن به‌عنوان ورودی برای مسئله دیگر استفاده شود. (شکل ۶) (Meisel 2009: 49).

شکل ۶. ادغام عملکردی با ۱) چرخه بازخورد ۲) پیش‌پردازش (Meisel 2009: 49)



مهم‌ترین مزیت رویکرد ادغام عملکردی، انعطاف‌پذیری برای در نظر گرفتن مسائل کاربردی‌تر و عملکرد هر مسئله است؛ اما یکی از نقاط ضعف این رویکرد حساسیت زیاد به زمان بارگیری و تخلیه فرض شده در ابتدا مسئله است که موجب عدم همگرایی به حالت پایدار می‌شود.(karam and Eltawil 2016: 458-466)

۲- مروری بر پیشینه و ادبیات پژوهش

در این بخش مرور مختصری بر روی مطالعات در حوزه مسائل یکپارچه جانب دریا و همچنین موضوع همکاری بین پایانه‌های کانتینری صورت گرفته است. در جدول ۱، خلاصه‌ای از این تحقیقات آورده شده است.

بیروث و مایسل در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵، مطالعه مروری کاملی بر روی مسائل منحصربه‌فرد و همچنین یکپارچه عملیات جانب دریا انجام داده‌اند و تحقیقات انجام‌شده را به‌صورت مجزا دسته‌بندی و تفکیک کرده‌اند. آن‌ها اشاره کردند که ادغام مسائل عملیات جانب دریا در حال پیشرفت است و ادغام این مسائل با سایر حوزه‌های لجستیک دریایی در ابتدای راه است (Meisel and Bierwirth 2010: 615-627) و (Meisel and Bierwirth 2015: 1-15).

12. Functional Integration

کرم و التاوی در سال ۲۰۱۶، یک مدل یکپارچه از هر سه مسئله با رویکرد عملکردی ارائه نموده‌اند. طرح اسکله در مدل‌سازی به‌صورت گسسته، زمان ورود دینامیک و تخصیص جرثقیل به کشتی‌ها به‌صورت متغیر در زمان در نظر گرفته شد. آن‌ها نشان دادند که مدل آن‌ها عملکرد خوبی در رسیدن به سطح پایدار دارد و حساسیت به زمان بارگیری و تخلیه نشان نمی‌دهد؛ اما اعتبار مدلشان را نسبت به مدل‌های عمیق مقایسه نکردند (karam and Eltawil 2016: 458-466). آگرا و همکاران (۲۰۱۷)، یک مدل عدد صحیح مختلط از هر سه مسئله ارائه دادند. یک فرمول نویسی جدید بر اساس گسسته سازی پارامترهای زمان و مکان برای جلوگیری از تولید حدبالای نامطلوب پیشنهاد دادند. این مطالعه، ۲ موضوع را مورد خطاب قرار می‌دهد: ۱) نحوه به دست آوردن فرمول‌های عددصحیح مختلط خوب و ۲) چگونه حدهای بالا خوبی تولید کنیم. (Agra etal 2018: 138-148). کورچر و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل خطی عدد صحیح مختلط از مسئله BAQCAP ارائه دادند. برای حل مدل نیز از یک روش تکراری[13] استفاده کردند و برای برش‌های استفاده‌شده در روش تکراری از الگوریتم شاخه و برش استفاده کردند. (Correcher etal2018: 80-92) صلحی و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله BACASP ارائه کردند. طرح اسکله به‌صورت پیوسته، ورود کشتی‌ها دینامیک، تخصیص جرثقیل‌ها به‌صورت متغیر در زمان و مشخصه کار به‌صورت ردیف‌های کشتی در نظر گرفته شد. تابع هدف مسئله به کمینه کردن هزینه تأخیر در رهسپاری کشتی‌ها می‌پردازد. برای حل مدل در ابعاد کوچک از نرم‌افزار تجاری سیپلکس و برای حل در ابعاد بزرگ الگوریتم ژنتیک را طراحی کردند.(salhi etal 2019: 69-98) انارکی و همکاران (۲۰۲۰)، ۳ مسیر اصلی کشتی، شامل ۱) کانال دسترسی برای رسیدن به منطقه پهلوگیری، ۲) تخصیص اسکله و جرثقیل اسکله‌ای به شناور ۳) برنامه‌ریزی خروج کشتی از کانال را برنامه‌ریزی کردند. آن‌ها این مسئله را با مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی- ماشین‌های موازی نامرتبط شباهت دادند. به دنبال این نگرش، یک مدل ریاضی توسعه دادند و به دلیل پیچیدگی مسئله سه روش فراابتکاری متمایز به نام‌های الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تکامل تفاضلی گسسته و گرگ خاکستری را برای حل مدل توسعه دادند. (Anaraki etal 2020: 1-18)

رودریگه و آگرا (۲۰۲۲)، یک بررسی جامعی از آثار منتشرشده در ادبیات عملیات جانب دریا با رویکرد عدم قطعیت انجام دادند و دسته‌بندی خوبی برای انواع عدم قطعیت ارائه کردند برای مررو مفصل مدل‌های عدم قطعیت در عملیات جانب دریا به این منبع مراجعه شود.(Rodrigues and Agra 2022: 501-524) . ژیانگ و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط باهدف کاهش هزینه پایه برای مسئله BAQCAP ارائه کردند. هدف آن‌ها کاهش هزینه بازیابی از برنامه پایه در هنگام بروز اختلالاتی مانند زمان رسیدن، زمان بارگیری و تخلیه، خرابی جرثقیل‌ها و سایر موارد می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار هزینه نمی‌تواند انتخاب‌های تصمیم‌گیرندگان را در واقعیت شبیه‌سازی کند، یک مدل اختلال مبتنی بر ادراک رفتار[14] برای شبیه‌سازی مؤثر انتخاب‌های تصمیم‌گیرندگان ارائه نمودند.(Xiang etal 2018: 196-216) . نورمحمدزاده و استافن (۲۰۲۰) به مطالعه یکپارچه مسئله QCASP پرداختند. در مدل آن‌ها زمان ورود کشتی‌ها به‌صورت تصادفی در نظر گرفته شد و مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با ۳ تابع هدف که حداقل سازی انحراف از

13. Iterative
14. A behavior perception-based disruption model

موقعیت‌های پهلوگیری و زمان‌های تأخیر در ترک کشتی‌ها است، پرداختند. اولین روش حل ارائه شده روش حل دقیق اپسیلون کانسترنیت[15] بود، اما به دلیل ناتوانی در حل مقادیر بزرگ الگوریتم فراابتکاری پارتو شبیه‌سازی‌شده تبرید[16] ارائه کردند. (NourmohammadZadeh and Stafen 2020: 324-340). ونکوین همکاران (۲۰۲۰)، به مطالعه مسئله BAQCAP با در نظر گرفتن عدم قطعیت در زمان ورود و عملکرد جرثقیل‌های اسکله‌ای پرداختند. آن‌ها یک مدل عدد صحیح مختلط باهدف کاهش تأخیر در خروج کشتی، انحراف از موقعیت پهلوگیری و کل هزینه عملیات جرثقیل‌های اسکله‌ای ارائه و از روش برنامه‌ریزی استوار با رویکرد برتسیماس و سیم برای عدم قطعیت استفاده کردند. (Wenqian etal 2020: 111505).

در مرور ادبیات، به دو نوع از همکاری اشاره شده است، همکاری افقی و عمودی. همکاری عمودی زمانی رخ می‌دهد که یک شرکت به دنبال استقرار شراکت و ایجاد روابط با برخی از طرفین در سطوح مختلف زنجیره تأمین باشد. هدف در این همکاری، پرهیز از هزینه‌های لجستیکی غیرضروری می‌باشد (Zhou etal 2008: 161-169).

همکاری افقی، مرتبط با فعالیت‌های مشترک شرکت در یک سطح یکسان به‌منظور کاهش هزینه‌ها، بهبود خدمت‌دهی و عملکرد می‌باشد (Lozano etal 2013: 444-452). در ادامه به‌مرور مقالات با موضوع همکاری در عملیات جانب دریا می‌پردازیم.

بودیپیردیانو و همکاران (۲۰۱۷)، یک مطالعه شبیه‌سازی بر روی دو پایانه کانتینری در بندر تانجونگ جاکارتای اندونزی به نام‌های کوجا و جی‌آی‌سی‌تی که در نزدیکی یکدیگر قرار داشته و توسط دو اپراتور مختلف مدیریت می‌شوند انجام دادند. نویسندگان از شبیه‌سازی رویداد گسسته برای مدل‌سازی سیستم استفاده کردند و دو رویکرد همکاری و عدم همکاری را با دو شاخص زمان و توان عملیاتی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که همکاری افقی بین ترمینال‌های کانتینری می‌تواند یک راه‌حل جایگزین برای کاهش تراکم باشد (Budpriyanto etal 2017: 127-139) . کریمی و همکاران (۲۰۱۹)، به مطالعه مسئله BAQCAP در یک بندر با چند ترمینال فله پرداختند. آن‌ها یک سری دورهای زمانی برای عدم دسترسی در زمان تعمیرات پیشگیرانه برای جرثقیل‌ها در نظر گرفتند. یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط باهدف کمترین تأخیر در برنامه اسکله ارائه کردند، برای حل مدل در تعداد نمونه‌های کم و متوسط از روش دقیق استفاده کردند و برای حل در نمونه‌های بالاتر از روش افق غلطان استفاده کردند (karimi etal 2019: 577-591). ترکیان و همکاران (۲۰۲۰)، مسئله تخصیص اسکله را با در نظر گرفتن همکاری بین دو پایانه کانتینری در بندر شهید رجایی که در حال حاضر به‌صورت مجزا از یکدیگر کار می‌کنند، موردبررسی قرار دادند. یک مدل پویای گسسته جهت برنامه‌ریزی هم‌زمان پایانه‌های کانتینری باهدف کمینه‌سازی کل هزینه خدمت‌دهی به کشتی‌ها، هم‌زمان با کمینه‌سازی تعداد کشتی‌های هدایت‌شده به پایانه کمکی ارائه داد. (Torkian etal 2020: 87-104). جیانگ و همکاران (۲۰۲۲)، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای مسئله BAQCAP با در نظرگرفتن مکانیزم همکاری بین چندین ترمینال، فرمول نویسی کردند. تابع هدف شامل کاهش هزینه‌های عملیاتی جرثقیل‌های اسکله‌ای، هزینه تأخیر کشتی در پهلوگیری، هزینه ترنسشیپ کشتی‌ها بین دو ترمینال و همچنین هزینه‌های ناشی از تأخیر در ترک کشتی و انحراف از موقعیت بهینه پهلوگیری را در

15. 15 $\varepsilon - constraint$
16. Pareto simulated annealing

برگرفت. به دلیل ماهیت غیرقابل‌حل بودن مدل، از الگوریتم ژنتیک بهبودیافته که متشکل از مکانیزم تبرید شبیه‌سازی‌شده و استراتژی ساختار حریصانه است استفاده کردند. (Jiang etal 2022: 506).

جدول ۱. خلاصه مرور ادبیات

روش حل و توضیحات بیشتر	روش حل		نوع مدل	تابع هدف		یکپارچگی		تعداد ترمینال		تخصیص جرثقیل		طرح اسکله		برنامه‌ریزی عملیات جانب دریا			نویسندگان
	ابتکاری و فرا ابتکاری	دقیق		چندهدفه	تک هدفه	عملکردی	عمیق	چند ترمینال	تک ترمینال	متغیر	ثابت	پیوسته	گسسته	زمان‌بندی جرثقیل اسکله	تخصیص جرثقیل اسکله	تخصیص اسکله	
رویکرد یکپارچه‌سازی تابع حلقه بازخورد – سیپلکس		*	MINLP		*	*		*	*	*			*	*	*	*	کرم و التاوی ۲۰۱۶
رویکرد شاخه و برش – افق غلطان	*	*	MIP		*		*		*	*		*		*	*	*	آگرا و همکاران ۲۰۱۷
روش تکراری- الگوریتم شاخه و برش		*	MIP						*		*	*			*	*	کورچر و همکاران ۲۰۱۸
سیپلکس – الگوریتم ژنتیک	*	*	MIP		*		*		*	*		*		*	*	*	صلحی و همکاران ۲۰۱۹
سیپلکس-الگوریتم تکامل تفاضلی گسسته- گرگ خاکستری	*	*	MILP				*		*		*		*		*	*	انارکی و همکاران ۲۰۲۰
اپسیلون کانسترینت /تبرید شبیه‌سازی شده- تبرید شبیه‌سازی‌شده پارتو	*	*	MINLP	*			*		*		*	*			*	*	آبتین و استیفان ۲۰۲۰
الگوریتم جستجو همسایگی بزرگ تطبیق یافته	*	*	MIP		*		*		*	*		*			*	*	ونکوین و همکاران ۲۰۲۰
برنامه‌ریزی اختلال – الگوریتم افق غلطان	*		MIP		*		*		*		*		*		*	*	ژیانگ و همکاران ۲۰۱۸
شبیه‌سازی رویداد گسسته			-		*			*								*	بودیپیردیانو و همکاران ۲۰۱۷
ترمینال فله-الگوریتم افق غلطان	*	*	MIP		*		*	*		*		*			*	*	کریمی و همکاران ۲۰۱۹
سیپلکس		*	MINP		*		*	*					*			*	فرشته ترکیان ۲۰۲۰

روش حل و توضیحات بیشتر	روش حل		تابع هدف		یکپارچگی		تعداد ترمینال		تخصیص جرثقیل		طرح اسکله		برنامه‌ریزی عملیات جانب دریا			نویسندگان
	ابتکاری و فرا ابتکاری	دقیق	چندهدفه	تک هدفه	عملکردی	عمیق	چند ترمینال	تک ترمینال	متغیر	ثابت	پیوسته	گسسته	زمان‌بندی جرثقیل اسکله	تخصیص جرثقیل اسکله	تخصیص اسکله	
الگوریتم ژنتیک بهبودیافته	*			*		*	*			*	*			*	*	جیانگ و همکاران ۲۰۲۲
سیپلکس-افق غلطان- مطالعه موردی	*	*		*		*	*			*	*			*	*	پژوهش حاضر

۳-روش تحقیق

تصمیم‌گیری برای عملیات جانب دریا به بسیاری از عوامل وابسته می‌باشد که برنامه‌ریزی را پیچیده و دشوار می‌سازد. برای مثال:

- شرایط کشتی درخواست داده کننده، ازجمله نوع (فیدر یا لاینر)، عمق، طول، حجم بارگیری و تخلیه، حداقل و حداکثر جرثقیل موردنیاز و سایر موارد.
- شرایط ترمینال اعم از تعداد کشتی‌های در حال عملیات، طول و عمق ترمینال‌ها، تعداد کشتی‌های در انتظار برای پهلوگیری، تعداد جرثقیل‌های سالم و آماده‌به‌کار، شرایط محوطه و همچنین کامیون‌های داخل محوطه و بسیاری موارد دیگر.
- شرایط طبیعی مانند، آب‌وهوا، جذر و مد و غیره.

شرایط دنیای واقعی در مدل موردبررسی با توجه به مفروضات زیر در نظر گرفته‌شده است تا بتوان برنامه‌ریزی‌های استراتژیک و عملیاتی جامع و بهینه‌تر ارائه داد.

۳-۱- مفروضات مسئله

۱. مشخصه فضای پهلوگاه به‌صورت پیوسته و زمان ورود کشتی‌ها به‌صورت داینامیک در نظر گرفته شده است.
۲. کشتی‌ها دارای عمق، طول و حجم بارگیری و تخلیه متفاوتی هستند.
۳. هنگامی‌که بارگیری و تخلیه کشتی شروع می‌شود، بدون وقفه عملیات ادامه خواهد داشت.
۴. حداقل و حداکثر تعداد جرثقیل اسکله‌ای تخصیص‌یافته توسط طول کشتی محدود می‌شود.
۵. ضریب هزینه تأخیر برای تمام کشتی‌ها ثابت در نظر گرفته‌شده است و همچنین برای اولویت‌دهی به کشتی‌های لاینر و فیدر از حجم بارگیری و تخلیه آن‌ها استفاده شده است.
۶. بازه زمانی برای برنامه‌ریزی ۵ روز در نظر گرفته شده است.

۳-۲- مدل‌سازی ریاضی

بر اساس مفروضات بیان‌شده و مسئله تعریف‌شده، مجموعه، پارامترهای و متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله به شرح زیر ارائه می‌گردد:

مجموعه‌ها

T: مجموعه ترمینال‌ها $\{k, m = 1,2, \dots, T\}$

V: مجموعه کشتی‌ها $\{i, j = 1,2, \dots, V\}$

V_o: مجموعه کشتی‌هایی که در ابتدای افق برنامه‌ریزی خدمت‌دهی شدند. $\{n = 1,2, \dots . , V_O\}$

Q_m: مجموعه جرثقیل‌های اسکله‌ای در ترمینال m $\{q, a, b, c = 1,2,3, \dots, Q_m\}$

T: مجموعه ترمینال‌ها $\{k, m = 1,2, \dots, T\}$

V: مجموعه کشتی‌ها $\{i, j = 1,2, \dots, V\}$

V_o: مجموعه کشتی‌هایی که در ابتدای افق برنامه‌ریزی خدمت‌دهی شدند. $\{n = 1,2, \dots . , V_O\}$

Q_m: مجموعه جرثقیل‌های اسکله‌ای در ترمینال m $\{q, a, b, c = 1,2,3, \dots, Q_m\}$

پارامترهای مرتبط با ترمینال

L_T^m: طول اسکله در ترمینال m

s_q^m: حداقل فاصله موردنیاز برای جرثقیل اسکله‌ای qدر ترمینال m

e_q^m: حداکثر فاصله موردنیاز برای جرثقیل اسکله‌ای q در ترمینال m

dt_m: عمق ترمینال

EQ_m: کارآمدی عملیات جرثقیل‌ها در ترمینال

پارامترهای مرتبط با کشتی‌هایی که در ابتدای افق زمانی در ترمینال حضور دارند

L_o^n: طول کشتی پهلوگرفته، شامل فاصله اطمینان

X_o^n: موقعیت پهلوگیری کشتی پهلوگرفته

Z_o^{nm}: اگر کشتی در ترمینال m در ابتدای افق زمانی پهلوگرفته باشد برابر یک در غیر این صورت صفر

d_o^n: زمان ترک کشتی پهلوگرفته

θ_{nqm}^o: اگر جرثقیل q در ترمینال m کشتی پهلوگرفته سرویس‌دهی کند برابر با یک، در غیر این صورت صفر

پارامترهای مرتبط با کشتی‌هایی که زمان‌بندی می‌شوند

L_v^i: طول کشتی i، شامل فاصله اطمینان

z_{im}: اگر ترمینال از پیش تخصیص‌یافته کشتی i، m باشد برابر با یک، در غیراین‌صورت صفر

w_u^i: تعداد کانتینرهای صادراتی توسط کشتی i

w_D^i: تعداد کانتینرهای وارداتی توسط کشتی i

ETA_i: زمان رسیدن تقریبی کشتی i

ED_i: زمان مورد انتظار ترک کشتی i

C_i^{min}: حداقل تعداد جرثقیل‌های اسکله‌ای که می‌تواند به کشتی i تخصیص یابد

C_i^{max}: حداکثر تعداد جرثقیل‌های اسکله‌ای که می‌تواند به کشتی i تخصیص یابد

df_i: عمق کشتی i

دیگر پارامترها

c_{km}: هزینه ترانشیپ هر واحد از ترمینال k به ترمینال m

p_i : هزینه جریمه به ازای هر واحد، زمانی که زمان ترک واقعی کشتی i از زمان ترک مورد انتظار فراتر رود

M: عدد بسیار بزرگ

متغیرهای تصمیم

u_{im}: اگر کشتی i در ترمینال m پهلو بگیرد، برابر با یک، در غیراین‌صورت صفر

x_i : موقعیت پهلوگیری کشتی i

y_i : زمان پهلوگیری کشتی i

θ_{iqm}: اگر جرثقیل q در ترمینال m کشتی i را خدمت‌دهی کند برابر با یک در غیر این صورت صفر

متغیرهای تصمیم جانبی

c_i : تعداد جرثقیل‌های اسکله‌ای که به کشتی i خدمت‌دهی می‌کنند

d_i : زمان ترک زمان‌بندی‌شده کشتی i

δ_{ij}^y: اگر کشتی jبعد از ترک کشتی i پهلوگیری کند برابر با یک، در غیر این‌صورت صفر

δ_{ij}^x: اگر کشتی jدر سمت راست کشتی i پهلوگیری کند برابر با یک، در غیر این‌صورت صفر

ε_{ni}^y: اگر کشتی i بعد از ترک کشتی n پهلوگیری کند برابر با یک، در غیر این‌صورت صفر

ε_{ni}^r: اگر کشتی i در سمت راست کشتی n پهلوبگیرد برابر با یک، در غیر این‌صورت صفر

ε_{ni}^l: اگر کشتی i در سمت چپ کشتی n پهلوبگیرد برابر با یک، در غیر این‌صورت صفر

بر اساس نمادهای تعریف‌شده، مدل ریاضی غیرخطی به شرح زیر می‌باشد:

$$\boldsymbol{MINZ} = \sum_{\boldsymbol{i}\in\boldsymbol{V}} \sum_{\boldsymbol{k}\in\boldsymbol{T}} \sum_{\boldsymbol{m}\in\boldsymbol{T}} \boldsymbol{C_{km} Z_{ik} U_{im} W_U^i} + \sum_{\boldsymbol{i}\in\boldsymbol{v}} \left(\boldsymbol{p_i W_u^i (d_i - ED_i)^+}\right) \qquad (۱)$$

$$\sum_{m\in T} U_{im} = ١ \; \forall \; i \; \in V \tag{٢}$$

$$df_i \leq M\left(١ - U_{im}\right) + dt_m \; \forall \; i \; \in V, m \in T \tag{٣}$$

$$٠ \leq x_i \leq \sum_{m\in T} u_{im}\, L_T^m - L_V^i \qquad \forall \; i \; \in V \tag{٤}$$

$$x_j + M\left(١ - \delta_{ij}^x\right) \geq x_i + L_V^i \; \forall \; i,j \; \in V, i \neq j \tag{٥}$$

$$x_i + M\left(١ - \varepsilon_{ni}^r\right) \geq x_o^n + L_o^n \; \forall \; n \in v_o, i \in V \tag{٦}$$

$$x_o^n + M\left(١ - \varepsilon_{ni}^l\right) \geq x_i + L_v^i \; \forall \; n \in v_o, i \; \in V \tag{٧}$$

$$y_i \geq ETA_i \qquad \forall i \in V \tag{٨}$$

$$d_i \geq y_i + \frac{W_U^i + W_D^i}{EQ_m * C_i} - M\left(١ - u_{im}\right) \qquad \forall \; i \; \in V, m \in T \tag{٩}$$

$$y_j + M\left(١ - \delta_{ij}^y\right) \geq d_i \; \forall i,j \; \in V, i \neq j \tag{١٠}$$

$$y_i + M\left(١ - \varepsilon_{ni}^y\right) \geq d_o^n \; \forall n \in V_o, i \; \in v \tag{١١}$$

$$٢ + M\left(٢ - u_{im} - u_{jm}\right) \geq \delta_{ij}^x + \delta_{ji}^x + \delta_{ij}^y + \delta_{ji}^y \qquad \forall i,j \in V, i \; \neq j, m \in T \tag{١٢}$$

$$\delta_{ij}^x + \delta_{ji}^x + \delta_{ij}^y + \delta_{ji}^y \geq ١ - M\left(٢ - u_{im} - u_{jm}\right) \qquad \forall i,j \in V, i \; \neq j, m \; \in T \tag{١٣}$$

$$٢ + M\left(٢ - z_{nm}^o - u_{im}\right) \geq \varepsilon_{ni}^r + \varepsilon_{ni}^l + \varepsilon_{ni}^y \qquad \forall n \in V_o, i \; \in V, m \in T \tag{١٤}$$

$$\varepsilon_{ni}^r + \varepsilon_{ni}^l + \varepsilon_{ni}^y \quad \geq ١ - M\left(٢ - z_{nm}^o - u_{im}\right) \qquad \forall n \in V_o, i \; \in V, m \in T \tag{١٥}$$

$$C_i^{min} \leq C_i \leq C_i^{max} \qquad \forall i \; \in v \tag{١٦}$$

$$\sum_{q\in Q_m} \theta_{iqm} = c_i u_{im} \qquad \forall \; i \; \in V, m \in T \tag{١٧}$$

$$\theta_{iqm} + \theta_{jqm} \leq ١ + M\left(\delta_{ij}^y + \delta_{ji}^y\right) \qquad \forall i,j \in V, i \; \neq j, q \in Q_m, m \; \in T \tag{١٨}$$

$$\theta_{nqm}^o + \theta_{iqm} \leq ١ + M\varepsilon_{ni}^y \; \forall n \in V_o, q \in Q_m, i \; \in V, m \in T \tag{١٩}$$

$$\theta_{ibm} \geq \theta_{iam} + \theta_{icm} - ١ \; \forall i \in V, a,b,c \; \in Q_m, a < b < c \; , m \in T \tag{٢٠}$$

$$a \leq b + M\left(٣ - \delta_{ij}^x - \theta_{iam} - \theta_{jbm}\right) + M\left(\delta_{ij}^y + \delta_{ji}^y\right) \quad \forall i,j \in V, i \; \neq j, a,b \in Q_m, m \; \in T \tag{٢١}$$

$$a \geq b + M\left(٣ - \varepsilon_{ni}^r - \theta_{nam}^o - \theta_{ibm}\right) + M\varepsilon_{ni}^y \qquad \forall i \in V, n \in V_o, a,b \in Q_m, m \; \in T \tag{٢٢}$$

$$a \leq b + M\left(٣ - \varepsilon_{ni}^l - \theta_{nam}^o - \theta_{ibm}\right) + M\varepsilon_{ni}^y \qquad \forall \; n \; \in V_o, i \in V, a,b \in Q_m, m \; \in T \tag{٢٣}$$

$$x_i \leq M\left(١ - \theta_{iqm}\right) + e_q^m \; \forall i \in V, m \in T, q \in Q_m \tag{٢٤}$$

$$x_i \; + L_V^i \geq s_q^m - M\left(١ - \theta_{iqm}\right) \; \forall i \in V, m \in T, q \in Q_m \tag{٢٥}$$

$$x_i, y_i, d_i \geq ٠ \tag{٢٦}$$

$$u_{im}, \theta_{iqm}, \delta_{ij}^{y}, \delta_{ij}^{x}, \varepsilon_{ni}^{y}, \varepsilon_{ni}^{r}, \varepsilon_{ni}^{l} \in \{0,1\} \quad (۲۷)$$
$$C_i \in \mathbb{Z}$$

رابطه (۱) تابع هدف مدل پیشنهادی کمینه‌سازی کل هزینه خدمت‌دهی به کشتی است که شامل هزینه بازتخصیص کشتی به ترمینال همسایه و تأخیر در خروج کشتی می‌باشد. رابطه (۲)، تضمین می‌کند هر کشتی فقط توسط یک پهلوگاه خدمت‌دهی شود. رابطه (۳)، تضمین می‌کند پهلوگاه m عمق آبخور کافی برای پهلوگیری کشتی i را داشته باشد. رابطه (۴)، تضمین می‌کند ترمینال m که کشتی i در آن پهلوگیری می‌کند دارای طول کافی برای جای دادن کشتی مذکور باشد. رابطه (۵)، محدودیت مکانی برای کشتی‌هایی که در یک ترمینال پهلوگرفته‌اند را تعریف می‌کند. برای مثال، اگر کشتی j در سمت راست کشتی i پهلوگیری کند، آنگاه موقعیت پهلوگیری کشتی j بایستی بزرگ‌تر از موقعیت پهلوگیری کشتی i بعلاوه طول کشتی i باشد. رابطه (۶) و (۷)، محدودیت مکانی بین کشتی‌هایی که زمان‌بندی می‌شوند و کشتی‌هایی که در ابتدای افق زمانی پهلوگیری کرده‌اند را تعریف می‌کند. رابطه (۸) تضمین می‌کند که پهلوگیری کشتی‌ها بعد از زمان رسیدن آن‌ها می‌باشد. رابطه (۹)، زمان ترک کشتی را محاسبه می‌کند که برابر با زمان پهلوگیری کشتی بعلاوه زمان بارگیری و تخلیه با توجه به تعداد جرثقیل‌های اسکله‌ای تخصیص‌یافته به آن است. رابطه (۱۰) و (۱۱)، ارتباط بین زمان پهلوگیری و زمان ترک هر کشتی را بیان می‌کند. رابطه (۱۲) و (۱۳)، ارتباط بین کشتی‌ها را در دیاگرام زمان- فضا مشخص می‌کند. رابطه (۱۴) و (۱۵)، ارتباط بین کشتی‌های زمان‌بندی‌شده و کشتی‌هایی که در ابتدای افق برنامه‌ریزی سرویس‌دهی شده‌اند را در دیاگرام زمان- فضا مشخص می‌کند. رابطه (۱۶)، تضمین می‌کند که تعداد جرثقیل اسکله‌ای تخصیص‌یافته به کشتی بین حداقل و حداکثر جرثقیل اسکله‌ای ذکرشده می‌باشد. رابطه (۱۷)، ارتباط بین تعداد جرثقیل‌های تخصیص‌یافته و شماره جرثقیل مشخص را تعیین می‌کند و همچنین از خدمت‌رسانی یک جرثقیل به دو کشتی در یک زمان جلوگیری می‌کند.

رابطه (۱۸) و (۱۹)، تضمین می‌کند که یک جرثقیل اسکله‌ای دو کشتی را هم‌زمان خدمت‌دهی نکند. رابطه (۲۰)، شمارش جرثقیل‌های اسکله‌ای را بر روی اسکله حفظ می‌کند. رابطه (۲۱) تا (۲۳)، هنگامی‌که جرثقیل اسکله‌ای a کشتی i را خدمت‌دهی می‌کند، جرثقیل دیگری که در سمت راست جرثقیل a می‌باشد، نمی‌تواند کشتی که در سمت چپ کشتی i هست را خدمت‌دهی کند. رابطه (۲۴) و (۲۵)، تضمین می‌کند که کشتی در مکانی پهلوگیری می‌کند که جرثقیل بتواند به آن سرویس‌دهی کند. رابطه (۲۶)، (۲۷) و (۲۸)، نوع متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

٤- بحث اصلی و تحلیل یافته‌های پژوهش

بندر شهید رجایی یکی از مهم‌ترین بنادر جنوبی ایران است که بیشترین حجم مبادله کانتینری را به خود اختصاص داده است. بندر شهید رجایی در حال حاضر دارای دو ترمینال کانتینری به شرح شکل ۷ است. این ترمینال‌ها به‌عنوان ترمینال‌های شماره ۱ و ۲ شناخته می‌شوند. هم‌اکنون ترمینال کانتینری شماره یک بندر شهید رجایی شامل اسکله‌های ۴ تا ۸ (CY1) با ظرفیت یک‌میلیون و پانصد هزار TEU و تعداد ۱۰ دستگاه گنتری کرین و ضلع شرقی ترمینال کانتینری شماره دو این بندر، شامل اسکله‌های ۲۱ تا ۲۴ (CY2) با ظرفیت دو میلیون TEU و تعداد ۸ دستگاه گنتری کرین می‌باشد.

ترمینال کانتینری شماره دو بندر شهید رجایی، شامل اسکله‌های ۲۵ تا ۲۷ به طول ۱۰۹۰ متر و حداکثر عمق ۱۵ متر، با ۸ گنتری کرین (ضلع جنوبی) و ضلع غربی آن شامل اسکله‌های ۲۸ تا ۳۰، با ۴ دستگاه گنتری کرین و حداکثر عمق ۱۴٫۵ می‌باشد.

شکل ۷. نقشه اسکله‌های پایانه‌های کانیتنری شهید رجایی

با توجه به تحقیقات انجام‌شده بر روی طول عمر تجهیزات، تقریباً نصف طول عمر جرثقیل‌های اسکله‌ای در ترمینال ۱ بیش از ده سال است، درحالی‌که تجهیزات ترمینال کانتینری شماره ۲ طول عمر کمتری دارند. این امر منجر به کاهش ضریب آمادگی تجهیزات و درنتیجه کاهش بازده عملیاتی ترمینال ۱ شده است.

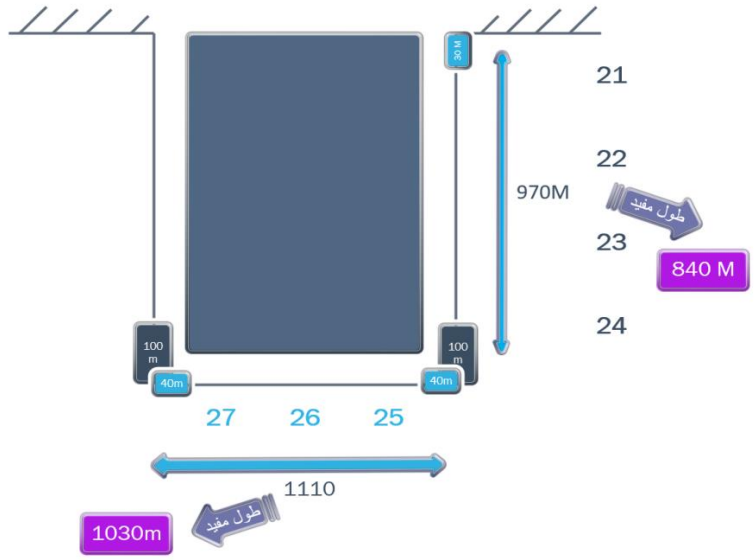
٤-١- توصیف داده‌ها و روش حل

داده‌های استفاده‌شده در این مقاله، مطابق با مشخصات فیزیکی ترمینال‌های کانتینری شهید رجایی می‌باشد. برای جلوگیری از پیچیدگی مسئله تنها ضلع شرقی ترمینال کانتینری شماره یک و ضلع جنوبی ترمینال کانتینری شماره دو در نظر گرفته شده است.

٤-٢- مشخصات فیزیکی ترمینال‌های کانتینری

با توجه به تحقیقات انجام‌شده، برای جلوگیری از برخورد جرثقیل‌ها بین دو ترمینال و همچنین برای پهلوگیری مناسب کشتی‌ها در ابتدای اسکله‌ها، بایستی یک فاصله اطمینان از ابتدا و انتهای اسکله کم کرد، با توجه به این شرایط، ابعاد ترمینال‌ها مطابق با شکل ۸ می‌باشد.

شکل ۸. شماتیک طول مفید اسکله‌های شرقی و جنوبی بندر شهید رجایی



٤-٣- نتایج مدل تحت حالت‌های همکاری و عدم همکاری

مدل ریاضی ارائه داده‌شده در قسمت قبل، با داده‌های جمع‌آوری‌شده از بندر و ترمینال‌های کانتینری توسط دو روش حل، دقیق و ابتکاری حل شد. تعداد نمونه‌های در نظرگرفته شده برای سه سطح تقاضا، کم- متوسط و زیاد، به ترتیب ۲۰،۱۰ و ۳۰ برای دوره برنامه‌ریزی ۵ روزه در نظر گرفته شده است.

در ادامه جداول بررسی دو حالت همکاری و عدم همکاری برای این سه سطح تقاضا آورده شده است.

جدول ۲: نتایج محاسباتی رویکرد همکاری و عدم همکاری برای تقاضا ۱۰ کشتی

رویکرد / قطعیت	غیرهمکاری		همکاری		انحراف ٪	
	تأخیر	هزینه	تأخیر	هزینه	تأخیر	هزینه
ترمینال ۱	۰	۰	۰	۰	٪۰	٪۰
ترمینال ۲	۰	۰	۰	۰	٪۰	٪۰
کل ترمینال	۰	-	۰	۰	۰	۰

جدول ۳: نتایج محاسباتی رویکرد همکاری و عدم همکاری برای تقاضا ۲۰ کشتی

رویکرد / قطعیت	غیرهمکاری		همکاری		انحراف ٪	
	تأخیر	هزینه	تأخیر	هزینه	تأخیر	هزینه
ترمینال ۱	۴۶,۵۳۷	۴۷,۲۲۹	۶.۱۷	۲۰,۴۴۴	۸۷%	۵۷%
ترمینال ۲	۵.۱۴	,۷۶۸	۴.۲۰۸	۸,۶۰۰	۱۸%	-۲۷%
کل ترمینال	۵۱.۶۷۷	۵۳,۹۹۶.۷۵	۱۰.۳۷۸	۲۹,۰۴۴.۰۰	۸۰%	۴۶%

جدول ٤: نتایج محاسباتی رویکرد همکاری و عدم همکاری برای تقاضا ۳۰ کشتی

رویکرد / قطعیت	غیرهمکاری		همکاری		انحراف ٪	
	تأخیر	هزینه	تأخیر	هزینه	تأخیر	هزینه

ترمینال ۱	۶۲.۷۲۹	۸۳,۳۴۴	۶۹.۸۸۹	۴۶,۰۱۹	-۱۱%	۴۵%
ترمینال ۲	۶۸.۷۳۳	۴۴,۴۳۳	۴۵.۸۱	۴۸,۸۲۶	۳۳%	-۱۰%
کل ترمینال	۱۳۱.۴۶۲	۱۲۷,۷۷۶.۴۰	۱۱۵.۶۹۹	۹۴,۸۴۵.۴۳	۱۲%	۲۶%

در این بخش به‌منظور ارزیابی تأثیر مدل پیشنهادی در کمینه‌سازی هزینه خدمت‌دهی به کشتی‌ها، نتایج حاصل از مدل پیشنهادی (همکاری بین پایانه‌های کانتینری) با نتایج حالت موجود مقایسه شده است. سه نمونه آماری برای دوره زمانی ۵ روزه به‌صورت تصادفی و برای سه سطح تقاضا ورود کشتی‌ها به ترمینال تولید شدند. تمامی پارمترهای موردنیاز مسئله به‌صورت منطقی تولید شدند. نتایج حل، به‌صورت جداول ۲،۳ و ۴ آورده شده است.

در جدول ۲، نتایج استراتژی همکاری و عدم همکاری برای تقاضا ۱۰ کشتی در دوره زمانی ۵ روزه نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت به دلیل تقاضای کم، هیچ‌گونه تأخیری در خروج کشتی‌ها اتفاق نمی‌افتد و هر ترمینال می تواند به‌صورت مستقل به سرویس‌دهی کشتی تخصیص‌یافته بپردازند.

در جدول ۳، نتایج استراتژی همکاری و عدم همکاری برای اندازه تقاضا ۲۰ کشتی آورده شده است، برای این اندازه نمونه و در حالت‌های مختلف می‌توان بهبودی به میزان ۸۰ و ۴۶ درصد به ترتیب در تأخیر و هزینه کشتی‌ها شاهد باشیم. نتایج این نمونه بیشترین بهبود در بین سه نمونه تقاضا بوده است.

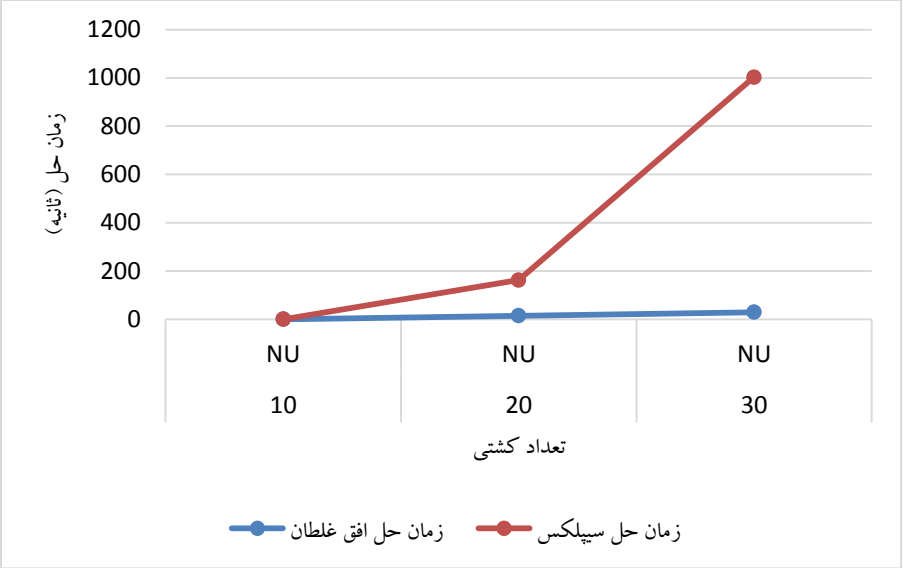
در جداول ۴، نتایج مطالعه برای حجم نمونه ۳۰ کشتی ارائه شده است که نشان‌دهنده بهبود ۱۲ و ۲۶ درصدی به ترتیب در تأخیر و هزینه کشتی‌ها می‌باشد.

٤-٤- نتایج حل مدل تحت روش حل دقیق و الگوریتم ابتکاری افق غلطان

در این بخش عملکرد روش حل را در ابعاد مختلف بررسی کرده‌ایم، همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ابعاد مسئله، الگوریتم ابتکاری افق غلطان بهبود برجسته‌ای در زمان حل ایجاد می‌کند.

جدول ۵. نتایج محاسباتی حاصل از حل مسئله با ابعاد مختلف و روش حل دقیق و ابتکاری

شماره	تعداد کشتی	روش حل دقیق-سیپلکس		روش حل ابتکاری- افق غلطان		انحراف	
		تابع هدف	زمان حل	تابع هدف	زمان حل	تابع هدف	زمان حل
۱	۱۰	۰	۱.۰۰۳	۰	۰.۸۵۵	۰%	۱۷%
۲ (۱۰۰۰s)	۲۰	۷۶۰۸.۴۰۶	۱۶۳.۴۷۲	۷۶۰۸.۴۰۶	۱۵.۲۰۶	۰%	۹۰%
۳ (۱۰۰۰s)	۳۰	۸۹۵۹۳.۱۶۵	۱۰۰۲.۷۴۶	۸۴۰۷۸.۹۵۲	۳۰.۲۰۳	۶%	۹۶%



نمودار ۱. تأثیر افزایش ابعاد مسئله بر زمان حل

نتیجه‌گیری

حمل‌ونقل دریایی نقش بسیار مهمی را برای تجارت جهانی ایفا می‌کند. میزان محموله‌های حمل شده توسط کشتی‌ها، سال‌به‌سال افزایش می‌یابد. با درنظر گرفتن گرایش‌های تجاری بین‌المللی دریایی، پایانه‌های کانتینری و شرکت‌های کشتیرانی باید کارایی عملیات را به‌منظور برآورده کردن تقاضای رو به رشد، بهبود بخشند. با توجه به هزینه‌های بالای توسعه و یا ارتقا تجهیزات موجود در پایانه‌ها، این پژوهش مدلی باتوجه به مشخصات فیزیکی و عملیاتی بندر شهید رجایی طراحی کرده و همکاری بین پایانه‌های کانتینری شماره یک و دو را در نظر گرفته است.

مدل پیشنهادی فرض می‌کند که پایانه‌های کانتینری برای به اشتراک گذاشتن امکانات خود ازجمله اسکله، جرثقیل و محوطه با یکدیگر همکاری می‌کنند. با این همکاری، کشتی‌ها برای اجتناب از انتظار طولانی به پایانه دیگر هدایت می‌شوند. سپس نتایج مدل تحت همکاری را با نتایج عدم همکاری مقایسه شد. هنگامی‌که تقاضای کشتی‌های ورودی به بندر کم می‌باشد، مدل همکاری همانند عدم همکاری پاسخ می‌دهد و همچنین زمانی که تقاضا در حالت بالا قرار دارد، استفاده از رویکرد همکاری تنها موجب بهبود ۱۲ درصدی در کاهش زمان تأخیر کشتی‌ها و ۲۶ درصد در کاهش هزینه ترمینال می‌شود؛ اما هنگامی‌که تقاضا در حالت متوسط قرار دارد، بهبود ۸۰ و ۴۶ درصدی به ترتیب برای تأخیر و هزینه خدمت‌دهی به کشتی‌ها را شاهد خواهیم بود که این میزان بیشترین میزان صرفه‌جویی برای رویکرد ارائه شده می‌باشد. نتایج مدل ریاضی تأیید می‌کند که همکاری پیشنهادی از رویکرد عدم همکاری در تمام جنبه‌ها بهتر عمل می‌کند. همکاری، تخصیص منابع و افزایش بهره‌وری را افزایش خواهد داد. علاوه بر این همکاری می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی کارایی زنجیره تأمین را بهبود بخشیده و کل هزینه‌های لجستیک را کاهش دهد. همچنین کاهش تأخیر خروج کشتی‌ها از بندر و یا به عبارتی کاهش زمان حضور کشتی‌ها در بندر می‌تواند به کاهش آلودگی هوا نیز کمک کند که این موضوع دغدغه تمام بنادر جهان می‌باشد. درنتیجه، مزایای مدل همکاری ارائه شده قابل‌توجه هستند.

References

1. Agra, A. and M. Oliveira, (2018), MIP approaches for the integrated berth allocation and quay crane assignment and scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 2018. 264(1): p. 138-148.
2. Bierwirth, C. and F. Meisel, (2015), A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals, *European Journal of Operational Research*, 244(3): p. 675-689.
3. Bierwirth, C. and F. Meisel, (2010), A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals, *European Journal of Operational Research*, 202(3): p. 615-627.
4. Budpriyanto, A., et al., (2017), A Simulation Study of Collaborative Approach to Berth Allocation Problem under Uncertainty, *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 33: p. 127-139.
5. Carlo, H.J., I.F.A. Vis, and K.J. (2014), Roodbergen, Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions. *European Journal of Operational Research*, 235(2): p. 412-430.
6. Correcher, J.F., R. Alvarez-Valdes, and J.M. Tamarit, (2019). New exact methods for the timeinvariant berth allocation and quay crane assignment problem. *European Journal of Operational Research*, 275(1): p. 80-92.
7. Fatemi-Anaraki, S., et al., (2020). Simultaneous waterway scheduling, berth allocation, and quay crane assignment: A novel matheuristic approach. *International Journal of Production Research*, 2020: p. 1-18.
8. Geoffrion A (1999). Structured modeling: survey and future research directions. Interactive Transactions of ORMS 1(2)
9. Jiang, M., et al., (2022). Integrated Berth and Crane Scheduling Problem Considering Crane Coverage in Multi-Terminal Tidal Ports under Uncertainty. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4): p. 506.
10. Karam, A. and A.B. Eltawil, (2016). Functional integration approach for the berth allocation, quay crane assignment and specific quay crane assignment problems. *Computers & Industrial Engineering*, 102: p. 458-466
11. Krimi, I., et al., (2019). A rolling horizon approach for the integrated multi-quays berth allocation and crane assignment problem for bulk ports. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, p. 577-591.
12. Liu, W., et al., (2022). *Rolling horizon based robust optimization method of quayside operations in maritime container ports*. Ocean Engineering, 256: p. 111505
13. Lozano, S., et al., (2013). Cooperative game theory approach to allocating benefits of horizontal cooperation. *European Journal of Operational Research*, 229(2): p. 444-452.
14. Meisel, F., (2009). *Seaside operations planning in container terminals.* Springer. 1-145.
15. Nourmohammadzadeh, A. and S. Voß. (2020). *A Pareto Simulated Annealing for the Integrated Problem of Berth and Quay Crane Scheduling at Maritime Container Terminals with Multiple Objectives and Stochastic Arrival Times of Vessels in Learning and Intelligent Optimization.* Cham: Springer International Publishing.p: 324-340
16. Review of Maritime Transport (2022). 2022. United Nations Publications.
17. Rodrigues, F. and A. Agra, (2020). Berth allocation and quay crane assignment/scheduling problem under uncertainty: A survey. *European Journal of Operational Research*, 303(2): p. 501-524
18. Salhi, A., G. Alsoufi, and X. Yang, (2019). An evolutionary approach to a combined mixed integer programming model of seaside operations as arise in container ports. *Annals of Operations Research*, 272(1-2): p. 69-98.
19. Torkian, F., S.F. Hoseini, and H. Askarpoor, (2020). A Berth Allocation Policy by Considering Collaboration between Adjacent Container Terminals. *Journal of Quality Engineering and Production Optimization*,5(2): p. 87-104.

20. Wirjodirdjo, B., (2014). Framework for Collaboration among Portstakeholders: Literature Review and Case Study, *International Conference on Operations and Supply Chain Management*,6: p 795-807
21. Xiang, X., C. Liu, and L. Miao, (2018). Reactive strategy for discrete berth allocation and quay crane assignment problems under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*,126: p. 196-216.
22. Zhou, P.-f. and H.-g. Kang, (2008) Study on Berth and Quay-crane Allocation under Stochastic Environments in Container Terminal. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 28(1): p. 161-169

استناد به این مقاله: هاشمی، لیلا.، تیموری، ابراهیم.، نصیری، محمدرضا. (۱۴۰۲). ارائه یک مدل ریاضی برای مسئله یکپارچه تخصیص اسکله و جرثقیل اسکله‌ای با درنظرگرفتن همکاری بین ترمینال‌های کانتینری بندر شهید رجایی، *فصلنامه خدمات دریایی و بندری*، ۱ (۱)، ۶۷-۹۸.

Marine and Port Servicesch Journalis licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License.