

مسئله یکپارچه زمان بندی تجهیزات جابه جایی و تخصیص مکان ذخیره سازی برای کانتینرهای ورودی در پایانه های کانتینری

زهرالسادات فانی صدرآبادی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران z.fanisadrabadi@in.iut.ac.ir

مهدی علینقیان^۱

دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران alinaghian@iut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، مسئله زمان بندی جرثقیل اسکله به عنوان مهم ترین مسئله کنار اسکله با مسائل زمان بندی کامیون ها، جرثقیل محوطه و تخصیص مکان ذخیره سازی به عنوان مسائل مطرح در محوطه، به صورت یکپارچه بررسی شده است. یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح جدید با هدف کمینه سازی هزینه زمانی تکمیل کانتینرها و هزینه عملیاتی شامل هزینه تخلیه کانتینرها از کشتی، حمل آنها به محوطه و بارگذاری آنها در محوطه، ارائه شده است. این مسئله از نظر پیچیدگی محاسباتی در دسته مسائل NP-hard قرار می گیرد. برای افزایش سرعت حل مدل، قیدهایی تحت عنوان نامعادلات معتبر معرفی و به مدل اضافه شده اند. به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، ۲۱ نمونه مسئله طراحی شده در نرم افزار گمز پیاده سازی و با حل کننده CPLEX اجرا شده اند. نتایج محاسباتی نشان می دهد که این قیدها موجب کاهش زمان حل شده اند. همچنین، در مسائل بزرگ تر، این نامعادلات میانگین درصد انحراف را از ۳/۰۸ درصد به ۱/۷۸ درصد نسبت به حد پایین کاهش داده اند.

واژگان کلیدی: مسئله زمان بندی جرثقیل اسکله، مسئله زمان بندی کامیون محوطه، مسئله زمان بندی جرثقیل محوطه، تخصیص مکان ذخیره سازی، نامعادلات معتبر

^۱ نویسنده مسئول

An integrated problem of handling equipment scheduling and storage space allocation for inbound containers at container terminal

Z. Fani Sadrabadi, (corresponding author), z.fanisadrabadi@in.iut.ac.ir

Msc student, Dept. of Industrial and Systems Engineering Isfahan University of Technology, Iran

M. Alinaghian, alinaghian@iut.ac.ir

Assoc. Prof. Dept. of Industrial and Systems Engineering Isfahan University of Technology, Iran

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.

Keywords: quay crane scheduling problem, yard truck scheduling problem, yard crane scheduling problem, valid inequalities

در محوطه توسط جرثقیل محوطه انجام می‌گیرد اما عملیات جابه‌جایی کانتینرهای خروجی در خلاف جهت عملیات جابه‌جایی کانتینرهای ورودی است. عملیات جابه‌جایی کانتینرهای ورودی و خروجی در شکل ۱ نشان داده شده است.

یکی از چالش‌های اساسی و مهم پایانه‌های کانتینری، هماهنگی بین تجهیزات جابه‌جایی (جرثقیل اسکله، کامیون محوطه و جرثقیل محوطه) است؛ زیرا عملکرد هر یک از این تجهیزات بر دیگری اثرگذار است و هماهنگی ضعیف آنها موجب افزایش زمان انتظار هریک از تجهیزات و تأخیر در عملیات تخلیه/بارگیری کشتی می‌گردد. همچنین با رشد روزافزون کانتینرها، مکان ذخیره‌سازی کانتینرها نیز با محدودیت روبه‌رو شده‌اند. در نتیجه در این پژوهش، مسئله یکپارچه زمان‌بندی تجهیزات جابه‌جایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی برای کانتینرهای ورودی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مسئله زمان‌بندی تجهیزات جابه‌جایی به سه مورد پاسخ داده می‌شود: (۱) تخصیص هر تجهیز به کانتینر به‌منظور عملیات جابه‌جایی (تخلیه، حمل و بارگذاری)، (۲) تعیین توالی تخلیه، حمل و بارگذاری کانتینرها توسط هر یک از تجهیزات جابه‌جایی و (۳) تعیین زمان شروع و پایان عملیات تخلیه، حمل و بارگذاری هر کانتینر. همچنین مسئله تخصیص مکان ذخیره‌سازی نیز به تخصیص مناسب کانتینرها به مکان‌های ذخیره‌سازی می‌پردازد.

بررسی یکپارچه این مسائل به چند دلیل ضروری است: کامیون محوطه به‌عنوان رابط بین بخش کنار اسکله و محوطه عمل می‌کند. از این‌رو، این تجهیز بر زمان تکمیل عملیات تخلیه کانتینر توسط جرثقیل اسکله (تحویل کانتینر از جرثقیل اسکله و حمل آن به محوطه) و همچنین بر زمان شروع عملیات بارگذاری کانتینر توسط جرثقیل محوطه (تحویل کانتینر به جرثقیل محوطه به‌منظور

پایانه‌های کانتینری، قطب مهم انتقال محموله در زنجیرمتامین جهانی هستند [۱]. از این‌رو، 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 فزاینده 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 می‌گردد [۳]. افزایش تعداد پایانه‌های کانتینری در سراسر جهان باعث افزایش رقابت بین آنها شده‌است. مشتریان جذب پایانه‌ای می‌شوند که تقاضای مشتریان را در سریع‌ترین زمان ممکن پاسخ دهد. این امر باعث شده‌است بنادر دریایی با جذب حجم بالاتر کشتی‌ها و محموله‌ها و همچنین برنامه‌ریزی و مدیریت کارآمدتر، خود را از دیگران متمایز کنند که این امر تنها با هماهنگی مناسب بین بخش‌های مختلف پایانه‌های کانتینری صورت می‌گیرد. به‌منظور افزایش کارایی پایانه‌های کانتینری، مسائل متنوعی براساس تقسیم‌بندی پایانه‌های کانتینری به دو بخش کنار اسکله^۱ و محوطه^۲ مطرح می‌شوند. مسائل تخصیص اسکله^۳ و تخصیص/زمان‌بندی جرثقیل اسکله^۴ به‌عنوان مسائل کنار اسکله و مسائل استقرار/زمان‌بندی جرثقیل محوطه^۵، زمان‌بندی کامیون محوطه^۶، مسیریابی وسایل نقلیه^۷، کنترل ترافیک^۸ و تخصیص مکان ذخیره‌سازی^۹ به‌عنوان مسائل محوطه مطرح می‌گردند.

در پایانه‌های کانتینری عملیات جابه‌جایی کانتینرهای ورودی بدین صورت است که عملیات تخلیه کانتینرها از کشتی توسط جرثقیل اسکله، حمل آنها به محوطه توسط کامیون و بارگذاری آنها

1 quayside

2 yard

3 berth allocation problem

4 quay crane assignment/scheduling problem

5 yard crane deployment/scheduling problem

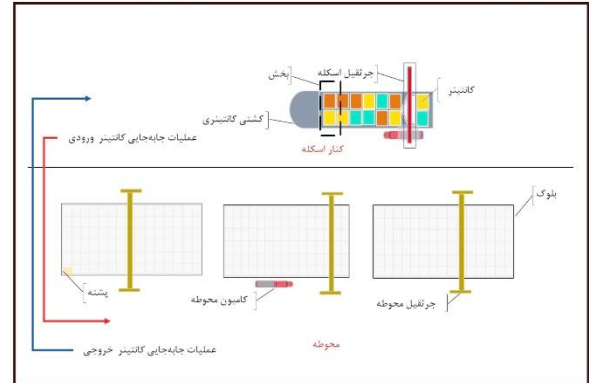
6 yard truck scheduling problem

7 vehicle routing problem

8 traffic control

9 storage space allocation problem

بارگذاری در مکان ذخیره‌سازی) تأثیر می‌گذارد. علاوه بر آن، تخصیص مکان ذخیره‌سازی بر توالی و زمان‌بندی جرثقیل‌های محوطه و مسافت طی‌شده کامیون در محوطه نیز اثرگذار است.



شکل ۱- عملیات جابه‌جایی کانتینرها در پایانه کانتینری

۲- مرور ادبیات

مسائل متنوعی برای افزایش کارایی پایانه‌های کانتینری مورد بررسی قرار گرفته‌اند اما برخی از این زیر مسئله‌ها از اهمیت بالاتری برخوردارند. از این‌رو، برخی از آنها تعریف و ادبیات مربوط به آنها بررسی خواهد شد. تخصیص/ زمان‌بندی جرثقیل اسکله یکی از مهم‌ترین زیر مسئله‌های مطرح در حوزه لجستیک دریایی می‌باشد که بسیار مورد مطالعه محققین قرار گرفته است. مایزل و همکاران [۴] طرحی را برای طبقه‌بندی مدل‌های زمان‌بندی جرثقیل اسکله مطرح نمودند که مدل‌ها بر اساس ویژگی‌هایی که دارند، به چهار گروه تقسیم می‌شوند که عبارتند از: ویژگی کار(وظیفه)، ویژگی جرثقیل، ویژگی تداخل و معیار عملکرد. ویژگی کار به دسته‌بندی کانتینرهای موجود در کشتی برای رسیدگی توسط جرثقیل‌های اسکله اشاره دارد. مدت زمان آماده‌سازی، زمان سفر، پنجره زمانی و موقعیت اولیه جرثقیل‌ها مربوط به دسته ویژگی‌های جرثقیل است. همچنین ویژگی تداخل امکان عبور یا عدم عبور جرثقیل‌ها و فاصله ایمنی بین آنها را مطرح می‌کند. در نهایت، توابع هدف مورد بررسی در این زیر مسئله به‌عنوان معیار عملکرد در نظر گرفته می‌شود که

یکی از متداول‌ترین معیارهای عملکرد، حداقل کردن زمان تکمیل کانتینرها (C_{max}) می‌باشد. این دسته از مسائل برای نخستین بار در سال ۱۹۸۹ توسط داگانزو [۵] مطرح گردید. پس از آن پترکوفسکی و داگانزو [۶] برای حل مدل در ابعاد بزرگ، از روش شاخه‌وکران ($B\&B^1$) استفاده کرده‌اند. در سال ۲۰۰۴ کیم و پارک [۷] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP^2) را برای مسئله زمان‌بندی جرثقیل‌های اسکله با یک کشتی ارائه دادند که کارها به‌صورت گروهی و محدودیت‌های عدم عبور جرثقیل‌ها در آن در نظر گرفته شده‌اند. هدف از این مطالعه حداقل کردن مجموع وزنی حداکثر زمان تکمیل کانتینرها و زمان تکمیل عملیات جرثقیل‌های اسکله بوده‌است. پژوهش آنها مورد توجه محققین بعدی قرار گرفت به‌طوری که در سال ۲۰۰۸ توکلی مقدم و همکاران [۸] مدل ارائه‌شده در پژوهش کیم و پارک [۷] را برای چند کشتی توسعه دادند و برای پایانه کانتینری شهید رجایی با هدف به حداقل رساندن هزینه‌ها (هزینه‌های ثابت و متغیر تخصیص جرثقیل اسکله، هزینه خروج دیرنگام یا زودنگام کشتی)، اعمال کردند. در مدل پیشنهادی ابوکاظم و دیابات [۹]، هر بخش^۳ کشتی تنها با یک جرثقیل اسکله خدمت‌دهی می‌شود و محدودیت‌های عدم عبور جرثقیل‌ها از یکدیگر و فاصله ایمنی بین جرثقیل‌ها نیز لحاظ کرده است. برای حل مسئله به توسعه الگوریتم ژنتیک (GA) پرداختند. الظاهری و همکاران [۱۰] به ارائه یک مدل جدید با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به پایداری کشتی، محدودیت‌های عملی نظیر عدم عبور جرثقیل‌ها از یکدیگر، فاصله ایمنی بین آنها و زمان سفر جرثقیل‌ها پرداختند. سان و همکاران [۱۱] برای حل مسئله زمان‌بندی جرثقیل اسکله از یک چارچوب حل تجزیه بندرز (DB^4) مبتنی بر منطق استفاده کرده‌اند. لی و همکاران [۱۲] یک مدل ریاضی دو مرحله‌ای را برای مسئله زمان‌بندی جرثقیل اسکله ارائه کردند. در پژوهش آنها زمان تخلیه کانتینرها از بخش‌های کشتی غیرقطعی در نظر گرفته شده است. برای حل مدل یک الگوریتم دقیق مبتنی بر الگوریتم تجزیه بندرز تولید ستون و محدودیت ارائه کرده‌اند. سان و همکاران [۱۳] این مسئله را برای هر دو عملیات تخلیه و بارگیری کانتینرها با هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل کانتینرها مورد مطالعه

12 bay

⁴13 Decomposition Benders

10 Branch and Bound

11 Mixed Integer Programming Model

قرار داده‌اند. در این مطالعه حرکت جرثقیل‌های اسکله تحت شرایطی که امکان تغییر یا عدم تغییر جهت حرکت وجود داشته باشد، مورد بررسی قرار داده‌اند.

مسئله زمان‌بندی جرثقیل محوطه به‌عنوان دومین زیر مسئله مهم به‌شمار می‌رود. ویژگی‌های مطرح در فرمول‌بندی مسائل جرثقیل اسکله در مسائل جرثقیل محوطه نیز مطرح می‌گردند. در سال ۲۰۰۵، انجی [۱۴] این مسئله را با هدف حداقل کردن زمان انتظار کانتینرها برای پردازش توسط جرثقیل محوطه مورد مطالعه قرار داد. در همان سال، انجی و مک [۱۵] مسئله زمان‌بندی جرثقیل محوطه را با در نظر گرفتن محدودیت عدم تداخل جرثقیل‌ها با یکدیگر، مورد بررسی قرار دادند. آنها از یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا برای حل مدل بهره بردند. لی و همکاران [۱۶] و هی و همکاران [۱۷] هر دو برای حل مسئله زمان‌بندی جرثقیل محوطه از تکنیک افق غلتان استفاده کرده‌اند. هی و همکاران [۱۸] مسئله زمان‌بندی جرثقیل محوطه را با هدف کارایی پایانه‌های کانتینری از طریق زمان‌بندی مناسب جرثقیل‌های محوطه و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، مورد مطالعه قرار داده‌اند. پس از آن هی و همکاران [۱۹] به مسئله زمان‌بندی جرثقیل محوطه در شرایط عدم قطعیت (غیر قطعی بودن زمان تحویل کانتینرها به جرثقیل محوطه و تعداد کانتینرها) با هدف کمینه‌سازی هزینه ناشی از تأخیر تکمیل گروه کانتینرها در شرایط قطعی و هزینه‌های زیان در شرایط عدم قطعیت پرداختند. در پژوهش لیانگ و همکاران [۲۰] به‌منظور کاهش دفعات بازیابی کانتینرها، کانتینرها با ویژگی‌های یکسان در یک مکان ذخیره‌سازی انباشته می‌شوند. به‌منظور حل مسئله از الگوریتم ژنتیک استفاده شده‌است. در مطالعه لیو و همکاران [۲۱] بر خلاف سایر پژوهش‌ها، جرثقیل‌های محوطه بین بلوک‌های مختلف به اشتراک گذاشته می‌شوند که به‌طور قابل‌توجهی روی کارایی پایانه کانتینری تأثیرگذار بوده است.

سومین زیر مسئله مهم، مسئله تخصیص مکان ذخیره‌سازی است که به تخصیص موقت کانتینرهای ورودی (خروجی) به بلوک‌های ذخیره‌سازی در هر دوره زمانی می‌پردازد. هدف این مسئله متعادل کردن بار کاری بین بلوک‌ها به‌منظور به‌حداقل‌رساندن زمان بارگذاری (بازیابی) کانتینرها است که در نهایت باعث کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌گردد [۲۲]. زانگ و همکاران [۲۳] این

مسئله را با استفاده از رویکرد افق غلتان حل کرده‌اند. برای هر افق برنامه‌ریزی، مسئله به دو سطح تجزیه می‌شود. سطح اول، به‌منظور تعادل بارکاری بین بلوک‌ها و سطح دوم به‌منظور حداقل کردن فاصله جابه‌جایی بین بلوک‌های ذخیره‌سازی و مکان پهلوگیری کشتی، بوده است. بزازی و همکاران [۲۴] به توسعه مدل زانگ و همکاران [۲۳] برای پایانه کانتینری شهید رجایی پرداختند. در مدل آن‌ها به نوع کانتینرها توجه شده‌است و کانتینرهای معمولی، خالی و یخچالی مورد بررسی قرار گرفته‌است. در پژوهش لین و همکاران [۲۵]، تعداد حرکت جرثقیل‌ها به حداقل رسیده‌است. زانگ و همکاران [۲۶] در پژوهش خود به‌دنبال تخصیص بهینه مکان‌های ذخیره‌سازی به‌منظور 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 به‌منظور افزایش هر چه بیشتر کارایی پایانه کانتینری، پژوهشگران به مطالعه یکپارچه مسائل می‌پردازند. در ادامه، مسئله یکپارچه جرثقیل اسکله و کامیون محوطه به‌عنوان اولین مسئله یکپارچه مورد بررسی قرار می‌گیرد. کائو و همکاران [۲۷] و کاوشگر و هاین [۲۸] یک مدل MIP برای حل مسئله یکپارچه با هدف حداقل‌سازی زمان تکمیل کانتینرهای ورودی ارائه دادند. در هر دو پژوهش از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در مدل ارائه‌شده توسط تانگ و همکاران [۲۹] هر بخش از کشتی تنها توسط یک جرثقیل اسکله می‌تواند تخلیه گردد. همچنین، روابط تقدم کانتینرها و محدودیت‌های عدم عبور جرثقیل‌ها از یکدیگر نیز به‌صورت کارآمد لحاظ گردیده‌است. آنها برای حل مدل به توسعه الگوریتم PSO پرداخته و با الگوریتم ژنتیک پژوهش لی و همکاران [۳۰] مقایسه نموده‌اند. هپ و همکاران [۳۱] به توسعه مدل تانگ و همکاران [۲۹] پرداختند. ژن و همکاران [۳۲] به مطالعه مسئله یکپارچه با هدف کمینه‌سازی مجموع وزنی زمان تکمیل تخلیه کانتینرها و زمان تکمیل جرثقیل‌های اسکله، پرداختند. شاف و همکاران [۳۳] مسئله یکپارچه را با تک جرثقیل اسکله برای بندر طرابلس-لبنان اعمال نمودند. در این پژوهش از الگوریتم شمارش دقیق و ژنتیک استفاده کرده‌اند.

تخصیص مکان ذخیره‌سازی روی عملیات سایر تجهیزات جابه‌جایی (جرثقیل اسکله، کامیون محوطه و جرثقیل محوطه) تأثیر می‌گذارد. همچنین مسئله بیان‌شده بر میزان تردد تجهیزات جابه‌جایی و در نهایت روی زمان گردش کشتی نیز تأثیر مستقیم دارد. در نتیجه ادغام مسئله تخصیص مکان ذخیره‌سازی و مسئله زمان‌بندی تجهیزات جابه‌جایی علاوه بر سریع‌تر شدن عملیات جابه‌جایی کانتینرها باعث کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌گردد که به‌عنوان یک عامل کلیدی برای ارزیابی عملکرد اقتصادی پایانه‌های کانتینری و همچنین شرکت‌های حمل‌ونقل به‌شمار می‌رود. از این‌رو، در این پژوهش سعی شده است تا حدامکان، شکاف تحقیقاتی پوشش داده شود. در جدول ۱ مقایسه‌ای بین کار حاضر و مرتبط‌ترین پژوهش‌های گذشته، آورده شده است.

۳- مدل‌سازی ریاضی مسئله

۳-۱ تعریف مسئله

در این پژوهش، مسئله یکپارچه تجهیزات جابه‌جایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی به‌صورت یکپارچه مورد بررسی قرار گرفته است. در مسئله یکپارچه در نظر گرفته شده، به‌منظور تخلیه کانتینرها از کشتی و بارگذاری آنها در محوطه، مجموعه‌ای از جرثقیل‌های اسکله برای تخلیه کانتینرها از کشتی و تحویل آنها به کامیون محوطه، مجموعه‌ای از کامیون‌های محوطه برای حمل کانتینرها از کنارسکله به محوطه و تحویل آنها به جرثقیل محوطه و مجموعه‌ای از جرثقیل‌های محوطه برای بارگذاری کانتینرها در محوطه وجود دارند. 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. مسئله مورد نظر به دنبال یافتن تخصیص بهینه هر کانتینر به تجهیزات جابه‌جایی به‌منظور تخلیه، حمل و بارگذاری، همچنین توالی بهینه و زمان‌بندی مناسب کانتینرها و تجهیزات جابه‌جایی است به‌طوری‌که تخصیص هر کانتینر به مکان ذخیره‌سازی به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که علاوه بر رعایت ظرفیت خالی هر پشته باعث

مسئله یکپارچه زمان‌بندی جرثقیل اسکله، کامیون محوطه و جرثقیل محوطه به‌عنوان دومین مسئله یکپارچه مطرح می‌گردد. مسئله پیشنهادی کین و همکاران [۳۴] براساس جریان کارگاهی ترکیبی با دو رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و برنامه‌ریزی محدودیت^۱ برای کانتینرهای ورودی ارائه گردیده است. در مطالعه آنها امکان عبور جرثقیل‌ها از یکدیگر، رعایت فاصله ایمنی و زمان آماده‌سازی وابسته به توالی در نظر گرفته شده است. هسو و همکاران [۳۵] و هسو و همکاران [۳۶] نیز این مسئله یکپارچه را بر اساس طرح ذخیره‌سازی کشتی (VSP^2) و طرح ذخیره‌سازی محوطه (YSP^3) با هدف حداقل کردن زمان تکمیل کانتینرها مورد مطالعه قرار داده‌اند. با توجه به ماهیت NP-hard بودن مسئله یکپارچه، هر دو مطالعه برای حل مسئله از رویکردهای مبتنی بر شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند.

می‌توان به مسئله یکپارچه زمان‌بندی تجهیزات جابه‌جایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی به‌عنوان چهارمین مسئله یکپارچه اشاره کرد. کیزیلا و همکاران [۳۷] برای دستیابی به افزایش بهره‌وری و هماهنگی بین تجهیزات جابه‌جایی و استفاده مؤثرتر از فضا، به ادغام مسئله زمان‌بندی تجهیزات جابه‌جایی و مسئله مکان ذخیره‌سازی کانتینرهای ورودی و خروجی با هدف حداقل کردن دامنه عملیات پرداخته‌اند. در مدل پیشنهادی آنها محدودیت‌های عدم عبور جرثقیل‌ها نیز در نظر گرفته شده است. کیزیلا و همکاران [۳۸] به توسعه پژوهش قبلی خود پرداخته‌اند. به‌طوری‌که در این پژوهش برای حل مسئله یکپارچه، چندین مدل CP پیشنهاد می‌شود.

با توجه به مرور ادبیات صورت گرفته مشخص است که مسئله یکپارچه تجهیزات جابه‌جایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. در نظر گرفتن مسئله تخصیص مکان ذخیره‌سازی بدون در نظر گرفتن سایر تجهیزات جابه‌جایی منجر به افزایش زمان عملیات بارگذاری و بازایی کانتینرها می‌گردد زیرا تخصیص نامناسب مکان ذخیره‌سازی، منجر به طی مسافت بیشتر و در پی آن افزایش زمان عملیات می‌گردد. از این‌رو، مسئله

افزایش سرعت فرآیند تخلیه و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل نیز می‌گردد. به‌طوریکه تخصیص کانتینر به هریک از تجهیزات جابه‌جایی به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که هریک از تجهیزات مدت زمان کمتری را برای تخلیه کانتینر، حمل و بارگذاری آن سپری کنند. همچنین در این مسئله مشخص می‌گردد که توالی تخلیه،

جدول ۱- مروری بر ادبیات موضوع

تابع هدف		تجهیز	جابه‌جایی تجهیز			سال	منبع
حد اقل کردن هزینه عملیاتی تخصیص تجهیزات به کانتینرها	حد اقل کردن دامنه عملیات		برقیقل محوطه	کامیون محوطه	برقیقل اسکله		
	✓				✓	۲۰۱۶	الظاهری و همکاران [۳۸]
	✓				✓	۲۰۱۹	سان و همکاران [۳۹]
	✓			✓	✓	۲۰۱۴	تانگ و همکاران [۶۳]
	✓			✓	✓	۲۰۱۵	کاوشگر و هاین [۶۲]
	✓	✓	✓		✓	۲۰۱۸	کیزیلائی و همکاران [۷۲]
	✓			✓	✓	۲۰۱۹	ژن و همکاران [۶۹]
	✓		✓	✓	✓	۲۰۲۰	کین و همکاران [۶۹]
	✓			✓	✓	۲۰۲۱	هاپ و همکاران [۶۵]
	✓			✓	✓	۲۰۲۱	شاف و همکاران [۶۸]
	✓		✓	✓	✓	۲۰۲۲	هسو و همکاران [۲۸]
	✓				✓	۲۰۲۴	سان و همکاران [۱۳]
✓	✓	✓	✓	✓	✓	۱۴۰۳	پژوهش حاضر

پارامترها:

PQ_{iq} : زمان مورد نیاز برای تخلیه کانتینر i

PD_{idb} : زمان مورد نیاز برای حمل کانتینر i

PY_{iz} : زمان مورد نیاز برای بارگذاری کانتینر i

$PR_{yzz'}$: زمان مورد نیاز برای حرکت از مکان ذخیره سازی Z به مکان ذخیره سازی Z' (اگر مکان ذخیره سازی Z و مکان ذخیره سازی Z' متعلق به بلوک یکسان باشند و توسط جرثقیل محوطه یکسان بارگیری شوند، آنگاه $PR_{yzz'}=0$)

cap_z : ظرفیت هر مکان ذخیره سازی Z

CQ_{iq} : هزینه تخلیه کانتینر i توسط جرثقیل اسکله q

CD_{idb} : هزینه حمل کانتینر i به بلوک b توسط کامیون محوطه d

CY_{iyz} : هزینه بارگذاری کانتینر i در مکان ذخیره سازی Z توسط جرثقیل محوطه y

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

M : عددی بزرگ

متغیرهای تصمیم:

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

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

k_{iyz} : اگر کانتینر i توسط جرثقیل محوطه y در مکان ذخیره سازی Z بارگذاری شود، مقدار آن یک در غیر این صورت صفر است.

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

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

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

۲-۳ 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 تنها توسط یک جرثقیل اسکله، کامیون محوطه و جرثقیل محوطه می تواند خدمت دهی شود.
- تجهیزات جابه جایی به طور همزمان نمی توانند دو کانتینر را جابه جا کنند.
- ظرفیت مکان ذخیره سازی کانتینرها از قبل مشخص است.
- زمان پردازش هر یک از کانتینرها توسط تجهیزات جابه جایی مشخص و قطعی است.
- در این مسئله از تداخل جرثقیل ها با یکدیگر صرف نظر شده است.

۳-۳ نمادها

مجموعه ها و اندیس ها:

- I : مجموعه کانتینرها (با i اندیس گذاری شده است)
- E : مجموعه بخش های کشتی (با e اندیس گذاری شده است)
- Q : مجموعه جرثقیل های اسکله (با q اندیس گذاری شده است)
- D : مجموعه کامیون های محوطه (با d اندیس گذاری شده است)
- Y : مجموعه جرثقیل های محوطه (با y اندیس گذاری شده است)
- B : مجموعه بلوک ها (با b اندیس گذاری شده است)
- Z : مجموعه مکان های ذخیره سازی (با Z اندیس گذاری شده است)

Ψ : مجموعه روابط تقدم بین کانتینرها

Z_b : مکان های ذخیره سازی متعلق به بلوک b

B_y : بلوک های تحت مسئولیت جرثقیل محوطه y

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

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

STQ_i: زمان شروع تخلیه کانتینر i

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

STD_i: زمان شروع حمل کانتینر i

STY_i: زمان شروع بارگذاری کانتینر i

C_{max}: حداکثر زمان تخلیه کانتینرها

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

۳-۳ تابع هدف و محدودیتها

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

$$Min V = \lambda C_{max} \quad (1)$$

$$STY_{i'} \geq STY_i + PY_{iz} + PR_{zy} - (3 - K_{izy} - K_{i'zy} - H_{ii'})M \quad (14)$$

$$\forall (q \in Q, (i, i') \in I, i \neq i')$$

$$+ \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} CQ_{iq} O_{iq}$$

$$+ \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{b \in B} CD_{idb} x_{idb}$$

$$+ \sum_{i \in I} \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} CY_{iz} K_{iyz}$$

$$STY_i \geq STY_{i'} + PY_{i'z} + PR_{zy} - (2 - K_{izy} - K_{i'zy} + H_{ii'})M \quad (15)$$

$$\forall (q \in Q, (i, i') \in I, i \neq i')$$

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

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

$$STQ_{i'} \geq STQ_i + PQ_{iq} - (3 - O_{iq} - O_{i'q} - F_{ii'})M \quad (3)$$

$$\forall (q \in Q, (i, i') \in I, i \neq i')$$

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

$$STQ_i \geq STQ_{i'} + PQ_{i'q} - (2 - O_{iq} - O_{i'q} + F_{ii'})M \quad (4)$$

$$\forall (q \in Q, (i, i') \in I, i \neq i')$$

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

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

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

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

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

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

$$STD_{i'} \geq STD_i + PD_{idb} - (3 - x_{idb} - x_{i'db'} - G_{ii'})M \quad (7)$$

$$\forall (q \in Q, (i, i') \in I, i \neq i')$$

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

$$STD_i \geq STD_{i'} + PD_{i'db} - (2 - x_{idb} - x_{i'db'} + G_{ii'})M \quad (8)$$

$$\forall (q \in Q, (i, i') \in I, i \neq i')$$

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

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

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

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

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

$$C_{max} \geq 0$$

در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، محدودیت (۱) تابع هدف را نشان می‌دهد که شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها (هزینه زمانی تکمیل کانتینرها و هزینه عملیاتی (تخلیه، حمل و بارگذاری)) است. محدودیت (۲) تضمین می‌کند هر کانتینر به یک جرثقیل اسکله تخصیص یابد. محدودیت (۳) و محدودیت (۴) زمان شروع و پایان تخلیه دو کانتینر توسط جرثقیل اسکله یکسان را نشان می‌دهد ($O_{iq}=1, O_{i'q}=1$). اگر تخلیه کانتینر i' بعد از کانتینر i باشد، محدودیت (۳) فعال می‌گردد در غیر این صورت، محدودیت (۴) فعال می‌شود. زمان شروع و پایان تخلیه کانتینرها با روابط تقدیمی در محدودیت (۵)، بیان می‌گردد. محدودیت (۶) تضمین می‌کند هر کانتینر به یک کامیون محوطه برای حمل به بلوک b تخصیص یابد. محدودیت (۷) و محدودیت (۸) زمان شروع و پایان حمل دو کانتینر را توسط کامیون محوطه یکسان نشان می‌دهد (مطابق با توضیحات محدودیت‌های (۴) و (۵)). محدودیت (۹) زمان تکمیل مرحله تخلیه هر کانتینر (زمان شروع مرحله حمل) را مشخص می‌کند. محدودیت (۱۰) بیان می‌کند در صورت تخصیص یک کانتینر به یک مکان ذخیره‌سازی، جرثقیل تحت مسئولیت آن مکان فعال شود. محدودیت (۱۱) و محدودیت (۱۲) مربوط به کنترل ظرفیت مکان‌های ذخیره‌سازی است. محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند هر کانتینر باید به یک جرثقیل محوطه برای بارگذاری در مکان ذخیره‌سازی z تخصیص یابد. محدودیت (۱۴) و محدودیت (۱۵) زمان شروع و پایان بارگذاری کانتینرها را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۶) زمان تکمیل مرحله حمل (زمان شروع مرحله بارگذاری) را مشخص می‌کند. دیرترین زمان تکمیل تخلیه کانتینرها (یعنی زمانی که آخرین کانتینر توسط جرثقیل محوطه بارگذاری می‌شود) به عنوان C_{max} در محدودیت (۱۷) محاسبه می‌شود. در نهایت، در محدودیت (۱۸) دامنه تغییرات متغیرها مشخص گردیده است.

۴- نامعادلات معتبر^۱

باتوجه به اینکه مسئله زمان‌بندی تجهیزات جابه‌جایی به‌عنوان یک مسئله NP-hard شناخته می‌شود [۳۳] در نتیجه در نظر گرفتن مسئله یکپارچه زمان‌بندی تجهیزات و تخصیص مکان ذخیره‌سازی کانتینرها، از درجه سختی مسئله نمی‌کاهد. ممکن است به دلیل پیچیدگی مسئله، سرعت حل مدل در به‌دست آوردن جواب بهینه کاهش یابد. در نتیجه اضافه کردن قیدهایی تحت عنوان نامعادلات معتبر منجر به کاهش فضای جست‌وجو می‌گردد. در این صورت ممکن است منجر به کاهش زمان حل مسئله شود. با توجه به مدل پیشنهادی می‌توان نامعادلات زیر را به مدل اضافه نمود:

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

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

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

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

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

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

قید (۱۹) نشان می‌دهد اگر تخلیه کانتینر i قبل از کانتینر i' باشد ($F_{ii'} = 1$) آنگاه دیگر تخلیه کانتینر i' نمی‌تواند قبل از کانتینر i باشد ($F_{i'i} = 0$) یا ممکن است دو کانتینر هیچ

ارتباطی با یکدیگر نداشته باشند ($F_{ii'} = 0$ و $F_{ii''} = 0$). قید (۲۰) بیان می‌کند در صورتی که تخلیه کانتینر i قبل از کانتینر i' باشد ($F_{ii'} = 1$) و تخلیه کانتینر i' نیز قبل از کانتینر i'' باشد

($F_{ii''} = 1$) آنگاه تخلیه کانتینر i حتما قبل از کانتینر i'' است ($F_{ii''} = 1$). به‌طور مشابه برای مرحله حمل توسط کامیون محوطه و بارگذاری توسط جرثقیل محوطه نیز می‌توان این دو محدودیت را در نظر گرفت (محدودیت‌های (۲۴) - (۲۱)).

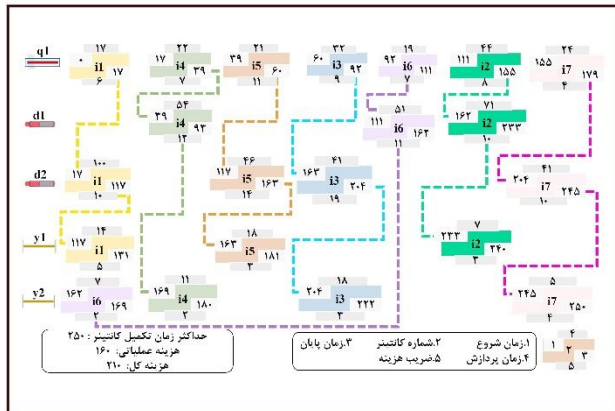
جدول ۲- داده‌های ورودی مدل پیشنهادی (مجموعه/ پارامترهای تعریف‌شده برای نمونه مسئله موردنظر)

مجموعه/پارامتر	مقدار
I	7
E	2
Q	1
D	2
B	2
Z	3
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

۵- نتایج محاسباتی

۵-۱ مثال عددی

در این بخش به بررسی یک مطالعه عددی با استفاده از داده های جمع‌آوری شده در جدول ۲، خواهیم پرداخت. نمونه مسئله با هفت کانتینر، یک جرثقیل اسکله، دو کامیون محوطه، دو بلوک ذخیره‌سازی تحت مسئولیت جرثقیل‌های ۱ و ۲ با سه مکان ذخیره‌سازی منتخب مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی برای نمونه مدنظر در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی

در شکل ۲ تخصیص کانتینرها به هریک از تجهیزات جابه‌جایی، توالی و زمان‌بندی (زمان‌های شروع و پایان) هر کانتینر و تجهیزات جابه‌جایی، ضرایب هزینه هریک از عملیات تخلیه، حمل و بارگذاری هر کانتینر، حداکثر زمان تکمیل کانتینرها (C_{max})، هزینه عملیاتی (شامل هزینه عملیات تخلیه، بارگیری و بارگذاری کانتینر توسط هر یک از تجهیزات جابه‌جایی) و هزینه کل (شامل هزینه زمانی تکمیل کانتینرها و هزینه عملیاتی) نشان داده شده است. همچنین مقادیر بهینه حاصل از این نمونه در پیوست ۱ تا پیوست ۵ آورده شده است. لازم به ذکر است تنها در صورتی عملیات کانتینر توسط تجهیز

جابه‌جایی جدید شروع می‌گردد که عملیات مرحله قبل آن توسط تجهیز دیگر، تکمیل شده باشد. همچنین تجهیز جابه‌جایی جدید نیز در حال خدمت‌دهی به کانتینر دیگر نباشد.

۵-۲ تولید نمونه

- تمامی نمونه‌ها بر اساس چیدمان ارائه‌شده در شکل ۱ می‌باشند. همچنین اساس تولید این نمونه‌ها براساس اطلاعات مطرح در ادبیات موضوع با توجه به ساختار مسئله بوده است تا شرایط شدنی بودن مسئله برقرار باشد.
- با بهره‌گیری از اطلاعات پژوهش لو و همکاران [۳۹]، مدت‌زمان تخلیه هر کانتینر توسط جرثقیل‌های اسکله به‌صورت تصادفی در بازه $[۱۰, ۵۰]$ ، مدت‌زمان موردنیاز برای حمل هر کانتینر به مکان تحویل بلوک مربوطه توسط کامیون محوطه به‌صورت تصادفی در بازه $[۳۰, ۱۰۰]$ و مدت‌زمان بارگذاری کانتینر در پشت‌تختخص داده‌شده توسط جرثقیل محوطه به‌صورت تصادفی در بازه $[۵, ۲۵]$ تولید می‌گردد.
- هزینه تخلیه هر کانتینر توسط جرثقیل اسکله به‌صورت تصادفی در بازه $[۱۰, ۵۰]$ ، هزینه حمل هر کانتینر توسط کامیون محوطه به‌صورت تصادفی در بازه $[۳۰, ۱۰۰]$ و هزینه بارگذاری هر کانتینر به‌صورت تصادفی در بازه $[۵, ۲۵]$ با الهام از اطلاعات پژوهش توکلی مقدم و همکاران [۸]، تولید می‌شود.

۵-۳ نتایج عددی

برای حل مسائل تعداد کانتینرها (i) در بازه (۷-۱۰)، تعداد جرثقیل‌های اسکله (q) در بازه (۱-۳)، تعداد کامیون‌های محوطه (d) در بازه (۲-۷)، تعداد جرثقیل‌های محوطه فعال (y) در بازه (۱-۲)، تعداد بلوک‌های ذخیره‌سازی (b) در بازه (۲-۴) و تعداد مکان‌های ذخیره‌سازی (l) در بازه (۳-۷) در نظر گرفته می‌شود. همچنین سایر پارامترهای پیشنهادی براساس توضیحات بخش ۵-۲ تنظیم گردیده‌است.

نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن نامعادلات معتبر و بدون در نظر گرفتن نامعادلات معتبر در جدول ۳ آورده شده‌است. در این جدول به‌ترتیب اطلاعات ورودی هر نمونه، حد پائین، مقدار تابع هدف، مدت‌زمان محاسباتی بر حسب ثانیه و درصد انحراف (GAP) جواب به‌دست‌آمده از حد پائین، نشان داده شده است. نتایج حاصل از جدول ۳

نشان می‌دهد که در نظر گرفتن نامعادلات معتبر منجر به افزایش سرعت حل مسئله برای دست‌یابی به جواب بهینه گردیده است. در شکل ۳ نیز این امر مشخص است. همچنین براساس نتایج این جدول که در شکل ۴ نیز نشان داده شده است، در ۱۷ نمونه مسئله اول جواب‌های حاصل از مدل با در نظر گرفتن نامعادلات معتبر منطبق بر جواب‌های حاصل از مدل بدون در نظر گرفتن نامعادلات معتبر است. از طرفی در نمونه مسئله‌های ۱۸-۲۱ مدل پیشنهادی در بازه زمانی یک‌ساعته قادر به دست‌یابی به جواب بهینه نبوده است. مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن نامعادلات معتبر به جوابی با میانگین درصد ۱.۷۸% نسبت به حد پائین به دست‌آمده از مدل به جواب رسیده است این درحالیست که مدل پیشنهادی بدون در نظر گرفتن نامعادلات معتبر به جوابی با میانگین درصد انحراف ۳.۰۸% نسبت به حد پائین، به جواب دست پیدا کرده است. از این‌رو، جواب‌های به‌دست‌آمده از مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن نامعادلات معتبر از کیفیت بالاتری برخوردار بوده‌اند.

جدول ۳- نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی

مدل ریاضی بدون در نظر گرفتن نامعادلات معتبر				مدل ریاضی با در نظر گرفتن نامعادلات معتبر			
ردیف	c	q/d/y/b/z	زمان محاسباتی (s)	GAP 1 (%)	زمان محاسباتی	ردیف	GAP 2 (%)
۱	۵	۱/۱/۱/۱/۳	۲۰۵/۶	۲۰۵/۶	۲۰۵/۶	۱	۲۰۵/۶
۲	۵	۱/۲/۱/۲/۴	۱۵۳/۸	۱۵۳/۸	۱۵۳/۸	<۰	۱۵۳/۸
۳	۵	۱/۳/۱/۲/۳	۱۵۹/۴	۱۵۹/۴	۱۵۹/۴	۱	۱۵۹/۴
۴	۶	۱/۱/۱/۱/۳	۳۰۸/۶	۳۰۸/۶	۳۰۸/۶	<۰	۳۰۸/۶
۵	۶	۱/۲/۱/۲/۴	۲۰۲/۲	۲۰۲/۲	۲۰۲/۲	۴	۲۰۲/۲
۶	۶	۱/۳/۱/۲/۳	۱۹۷	۱۹۷	۱۹۷	۴	۱۹۷
۷	۷	۱/۱/۱/۱/۳	۳۴۰/۶	۳۴۰/۶	۳۴۰/۶	۴	۳۴۰/۶
۸	۷	۱/۲/۱/۲/۴	۲۳۱/۴	۲۳۱/۴	۲۳۱/۴	۸	۲۳۱/۴
۹	۷	۱/۳/۱/۲/۳	۲۲۷	۲۲۷	۲۲۷	۶	۲۲۷
۱۰	۸	۱/۱/۱/۲/۳	۳۰۷/۱۳	۳۰۷/۱۳	۳۰۷/۱۳	۱۸۷	۳۰۷/۱۳
۱۱	۸	۱/۲/۱/۲/۴	۲۸۲/۴۳	۲۸۲/۴۳	۲۸۲/۴۳	۸	۲۸۲/۴۳
۱۲	۸	۱/۳/۲/۲/۳	۲۶۹/۱۱	۲۶۹/۱۱	۲۶۹/۱۱	۷۳	۲۶۹/۱۱
۱۳	۹	۱/۲/۲/۲/۳	۲۹۶/۶	۲۹۶/۶	۲۹۶/۶	۳۵۲	۲۹۶/۶
۱۴	۹	۱/۳/۲/۲/۳	۲۶۲/۸	۲۶۲/۸	۲۶۲/۸	۶۰	۲۶۲/۸
۱۵	۹	۱/۴/۲/۲/۴	۲۹۰/۲	۲۹۰/۲	۲۹۰/۲	۷۱	۲۹۰/۲
۱۶	۱۰	۲/۳/۲/۲/۴	۲۹۴/۸	۲۹۴/۸	۲۹۴/۸	۱۵۰	۲۹۴/۸
۱۷	۱۰	۲/۴/۲/۳/۵	۲۸۳/۱	۲۸۳/۱	۲۸۳/۱	۵۱	۲۸۳/۱
۱۸	۱۰	۲/۵/۲/۳/۶	۲۵۸/۵	۲۵۸/۵	۲۵۸/۵	۸۳	۲۵۸/۵
۱۹	۱۵	۲/۳/۲/۳/۵	۴۰۵/۴	۳۹۴/۴۲	۳۶۰/۰	۲/۶۹	۳۹۸/۸
۲۰	۱۵	۳/۴/۳/۳/۶	۳۸۳/۸	۳۷۲/۸	۳۶۰/۰	۲/۸۶	۳۷۶/۷
۲۱	۱۵	۳/۵/۳/۳/۷	۳۷۹/۴	۳۶۵/۳	۳۶۰/۰	۳/۷۱	۳۷۱/۴
میانگین				۳/۰۸	۱/۷۸		

هدف حداقل کردن کاهش سوخت مصرفی کامیون‌های محوطه و کاهش انتشار آلاینده‌های گلخانه‌ای مطرح کرد.

۷- پیوست‌ها

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

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

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

i_7	i_6	i_5	i_4	i_3	i_2	i_1	K_{iyz}
							Z_1
							Z_2
							y_1
							Z_3
							Z_1
							Z_2
							y_2
							Z_3

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

CPLEX

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

پیوست ۴- مقادیر بهینه توالی حمل کانتینرها ($G_{ii'}$) توسط

CPLEX

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

پیوست ۵- مقادیر بهینه توالی حمل کانتینرها ($H_{ii'}$) توسط

CPLEX

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

۸- منابع

1. Li S, Jia S, Tao Y, Lin X., 2024. Gate appointment design in a container terminal: A robust optimization approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*; 184: 103-495. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103495>
2. Size of container ship fleet 2022, by nationality of operator. <https://www.statista.com/statistics/263858/container-ship-fleets-size-by-nationality-of-shipowners/>

10. Al-Dhaheri N, Jebali A, Diabat A., 2016. The quay crane scheduling problem with nonzero crane repositioning time and vessel stability constraints. *Computers & Industrial Engineering*; 94: 230-244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.011>
11. Sun D, Tang L, Baldacci R., 2019. A benders decomposition-based framework for solving quay crane scheduling problems. *European Journal of Operational Research*; 273(2):504-515. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.009>
12. LI Y, LI X, ZHANG C, WU T. 2024. Decomposition algorithms for the robust unidirectional quay crane scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 167, 106670. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106670>
13. SUN D, TANG L, BALDACCI, R. & CHEN, Z. 2024. A Decomposition Method for the Group-Based Quay Crane Scheduling Problem. *INFORMS Journal on Computing*, 36, 543-570. doi: <https://doi.org/10.1287/ijoc.2022.0298>
14. Ng W., 2005. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference. *European Journal of Operational Research*; 164(1): 64-78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.025>
15. Ng W., 2005. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference. *European Journal of Operational Research*; 164(1): 64-78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.025>
16. Ng, W., and Mak, K., "Yard crane scheduling in port container terminals", *Applied mathematical modeling*, Vol. 29, pp. 263-276, 2005.
17. Li W, Wu Y, Petering ME, Goh M, De Souza R., 2009. Discrete-time model and algorithms for container yard crane scheduling. *European Journal of Operational Research*; 198(1): 165-172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.08.019>
18. He J, Chang D, Mi W, Yan W., 2010. A hybrid parallel genetic algorithm for yard crane
3. Azevedo AT, de Salles Neto LL, Chaves AA, Moretti AC., 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: 495-516. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.01.006>
4. Bierwirth Ch, 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): 675-689. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.030>
5. Daganzo CF., 1989. The crane scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*; 23(3): 175-159. doi: [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(89\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0191-2615(89)90001-5)
6. Peterkofsky RI, and Daganzo, CF., 1990. A branch and bound solution method for the crane scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*; 24(3): 159-172. doi: [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(90\)90014-P](https://doi.org/10.1016/0191-2615(90)90014-P)
7. Kim KH, Park Y-M., 2004. A crane scheduling method for port container terminals. *European Journal of Operational Research*; 156(3):752-768. doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00133-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00133-4)
8. Tavakkoli-Moghaddam R, Makui A, Salahi S, Bazzazi M, 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): 241-248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.05.011>
9. Abou Kasm O, Diabat A., 2020. Next-generation quay crane scheduling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*; 114:694-715. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.015>

- <https://doi.org/10.1080/03088839.2017.1335897>
26. Zhang R-Q, Wang M, Pan X., 2019. New model of the storage location assignment problem considering demand correlation pattern. *Computers & Industrial Engineering*; 129: 210-219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.027>
 27. Cao J, Shi Q, Lee D-H., 2010. Integrated quay crane and yard truck schedule problem in container terminals. *Tsinghua Science & Technology*; 15(4): 467-474. doi: [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(10\)70089-4](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(10)70089-4)
 28. Kaveshgar N, Huynh N., 2015. Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers. *International Journal of Production Economics*; 159: 168-177. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.09.028>
 29. Tang L, Zhao J, Liu J., 2014. Modeling and solution of the joint quay crane and truck scheduling problem. *European Journal of Operational Research*; 236(3): 978-990. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.050>
 30. Lee D-H, Wang HQ, Miao L., 2008. Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*; 44(1): 124-135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.08.001>
 31. Hop DC, Van Hop N, Anh TTM., 2021. Adaptive particle swarm optimization for integrated quay crane and yard truck scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*; 153: 107075. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107075>
 32. Zhen L, Yu S, Wang S, Sun Z., 2019. Scheduling quay cranes and yard trucks for unloading operations in container ports. *Annals of Operations Research*; 273: 455-478. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2335-9>
 33. Skaf A, Lamrous S, Hammoudan Z, Manier M-A., 2021. Integrated quay crane and yard truck scheduling problem at the port of Tripoli-Lebanon. *Computers & Industrial Engineering*; scheduling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*; 46(1): 136-155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.07.002>
 19. He J, Huang Y, Yan W., 2015. Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption. *Advanced Engineering Informatics*; 29(1): 59-75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.09.003>
 20. He J, Tan C, Zhang Y., 2019. Yard crane scheduling problem in a container terminal considering risk caused by uncertainty. *Advanced Engineering Informatics*; 39:14-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.11.004>
 21. Liang C-J, Chen M, Gen M, Jo J., 2014. A multi-objective genetic algorithm for yard crane scheduling problem with multiple work lines. *Journal of Intelligent Manufacturing*; 25: 1013-1024. doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0792-4>
 22. Liu W, Zhu X, Wang L, Yan B, Zhang X., 2021. Optimization Approach for Yard Crane Scheduling Problem with Uncertain Parameters in Container Terminals. *Journal of Advanced Transportation*; 1-15. doi: <https://doi.org/10.1155/2021/5537114>
 23. Bazzazi M, Safaei N, Javadian N., 2009. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal. *Computers & Industrial Engineering*; 56(1): 44-52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.03.012>
 24. Zhang C, Liu J, Wan Y-w, Murty KG, Linn RJ., 2003. Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research Part B: Methodological*; 37(10):883-903. doi: [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(02\)00089-9](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(02)00089-9)
 25. Lin D-, Chiang C-W., 2017. The storage space allocation problem at a container terminal. *Maritime Policy & Management*; 44(6): 685-704. doi:

& *Industrial Engineering*; 94: 32-44. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.010>

- 159: 107-448. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107448>
34. Qin T, Du Y, Chen JH, 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): 884-901. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.02.021>
 35. Hsu H-P, Wang C-N, Fu H-P, 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): 22-36. doi: <https://doi.org/10.3390/math9182236>
 36. Hsu H-P, Chou C-C, 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: 64650 - 64670. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3180752
 37. Kizilay D, Eliiyi DT, & Hentenryck PV., (2018). Constraint and mathematical programming models for integrated port container terminal operations. In W. J. van Hoesve (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 volume 10848 of Lecture Notes in Computer Science. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93031-2_25
 38. Kizilay D, Van Hentenryck, P, Eliiyi DT., 2020. Constraint programming models for integrated container terminal operations. *European Journal of Operational Research*; 286(3): 945-962. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.025>
 39. Luo J, Wu Y, Bergsten Mendes, A., 2016. Modelling of integrated vehicle scheduling and container storage problems in unloading process at an automated container terminal. *Computers*