

حل یکپارچه مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی، مسئله تخصیص اسکله و مسئله استقرار جرثقیل محوطه

گلسا سروش نیا^{۱*}، مهدی علینقیان^۲

۱- دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- g.soroushnia@in.iut.ac.ir

۲- alinaghian@iut.ac.ir

چکیده:

در این پژوهش یک مدل یکپارچه برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به منظور بررسی مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی، مسئله تخصیص اسکله و مسئله استقرار جرثقیل محوطه با در نظر گرفتن تراکم ترافیک در افق برنامه‌ریزی روزانه ارائه شده است. حسب بررسی صورت گرفته، در این پژوهش برای اولین بار این سه مسئله با در نظر گرفتن عملیات محوطه مورد بررسی قرار گرفته است. تابع هدف این مدل ریاضی شامل کاهش هزینه‌های جابه‌جایی و عملیات جرثقیل محوطه، هزینه جابه‌جایی گروه‌های کانتینری بین اسکله و محوطه و هزینه تأخیر کشتی‌ها است. در مدل پیشنهادی ساختار اسکله به صورت گسسته در نظر گرفته شده است. به منظور جلوگیری از ایجاد ترافیک در خطوط عبوری محوطه ذخیره‌سازی، برای خطوط ظرفیتی از پیش تعیین شده است. همچنین ۵ نامعادله معتبر به منظور بهبود مدل ریاضی، تعریف و ارائه شده است. برای اعتبار سنجی مدل پیشنهادی ۳۲ نمونه بر اساس چارچوب تولید داده‌ها در ادبیات موضوع، تولید و نتایج حاصل از حل آنها ارائه شده است. نتایج بدست آمده حاکی از عملکرد مناسب مدل یکپارچه پیشنهادی است.

واژگان کلیدی:

حمل و نقل کانتینری، مسئله تخصیص اسکله، مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

* گلسا سروش نیا، دانشجو کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها- دانشگاه صنعتی اصفهان.
ایمیل: g.soroushnia@in.iut.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

An integrated solution of storage space assignment problem, berth allocation problem, and yard crane deployment problem

G. Soroushnia¹, M. Alinaghian²

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

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

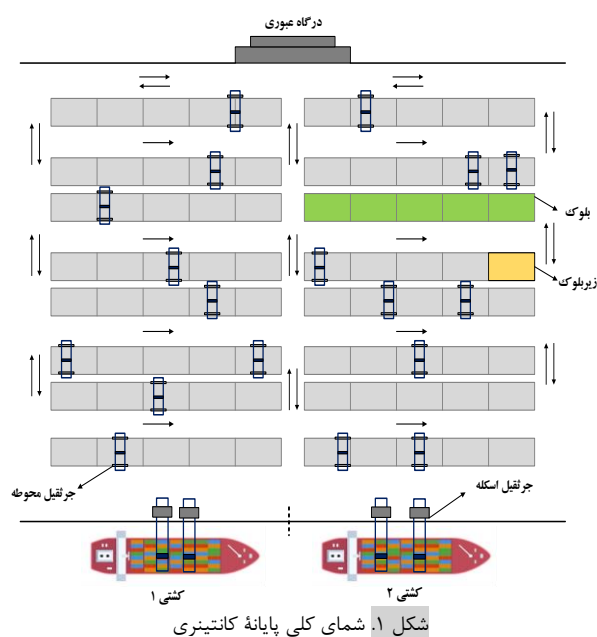
Abstract:

Today, maritime transportation has been grown due to decentralized production and increased communication between different countries. Container transportation has contributed a significant share of global transportation due to the possibility of moving a large volume of goods at a reasonable cost. With the expansion of container transportation, container terminals as a place to transport containers between land and sea play a pivotal role in the global transportation network. Container terminals are divided into seaside and landside. To better manage the terminals and reduce costs, the main problems at the seaside and the landside need to be addressed in an integrated manner. Literature review shows that despite the importance of the matter, the berth allocation problem, the storage space assignment problem, and the yard crane deployment problem have not been studied in an integrated manner.

In this research, an integrated mixed integer programming model has been provided to investigate the storage space assignment problem, the berth allocation problem, and the yard crane deployment with the traffic congestion at the passing lines consideration on the daily planning horizon. The objective function of this mathematical model includes minimizing the yard crane movement cost, the yard crane operating cost, the cost related to the route length of the container transportation between the berth and the yard, and the penalty cost caused by delaying the vessels. In the proposed model, the discrete berth layout has been considered. The movement capacity is determined to prevent traffic congestion in the passing lines. Also, 8 valid inequalities based on the concepts and assumptions of the problems are considered to improve the proposed integrated model. To validate the proposed model, 32 instances are generated based on the data production framework in the literature, and their results are presented. The results indicate the proper performance of the proposed integrated model.

Keywords: Container transportation, Berth allocation problem, Storage space assignment problem, Mixed integer programming model

محوطه می‌شوند و ممکن است در طول روز از محوطه خارج و یا تا دوره بعد به طور موقت در محوطه ذخیره‌سازی شوند. محوطه ذخیره‌سازی کانتینرها شامل چندین بلوک است. بلوک‌های محوطه به چند زیربلوک^۲ تقسیم می‌شوند. کوچکترین واحد برای استراتژی ذخیره‌سازی در مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی یک "زیربلوک" است [۵]. به عنوان مثال در شکل ۱ محوطه به ۱۶ بلوک و هر بلوک به پنج زیر بلوک تقسیم شده است. بین بلوک‌ها مسیرهایی تحت عنوان خطوط عبوری، برای عبور وسایل جابه‌جایی کانتینرها وجود دارد. الگوی اصلی محوطه بر اساس بندر سنگاپور ارائه شده است [۳].



تراکم ترافیک از دیگر مسائلی است که در پایانه‌های کانتینری رخ می‌دهد. تراکم ترافیک اغلب در محل‌هایی که کانتینرها در آنجا بازبایی و یا بارگذاری می‌شوند، اتفاق می‌افتد. یکی از راه‌های جلوگیری از ایجاد تراکم ترافیک در محوطه، برنامه‌ریزی مناسب عملیات جرثقیل محوطه است [۳].

در مسئله استقرار جرثقیل محوطه، تعداد جرثقیل‌های به کار گرفته شده در هر بلوک محوطه و جابجایی جرثقیل‌ها بین بلوک‌ها تعیین می‌شود [۳]. از آنجایی که جرثقیل‌ها تجهیزات گران قیمتی هستند، تأمین تعداد زیاد جرثقیل محوطه از نظر اقتصادی به صرفه نیست. به منظور به اتمام رساندن حجم کاری در کل محوطه ذخیره‌سازی نیاز است که در هر دوره پروفایل استقرار جرثقیل

در سال‌های اخیر با گسترش تجارت جهانی، حمل و نقل کالا بین کشورهای مختلف رشد روز افزونی داشته است. حمل و نقل دریایی به عنوان یکی از اصلی‌ترین روش‌های حمل و نقل جهانی نیز از این قاعده مستثنی نیست [۱]. بر اساس گزارشات در سال ۲۰۲۰، بیش از ۶۰ درصد کالاهای جهان توسط کشتی‌های کانتینری جابجا شدند [۲]. بنابراین با رشد حمل و نقل کانتینری ضرورت بررسی مسائل مطرح در این حوزه را بیش از پیش می‌کند.

به طور کلی پایانه‌های کانتینری به دو بخش دریا و بخش خشکی تقسیم می‌شوند [۳]. در بخش دریا، مسائلی از جمله تعیین زمان و مکان پهلوگیری کشتی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش خشکی به مسائلی از جمله تعیین محل ذخیره‌سازی کانتینرها در محوطه ذخیره‌سازی پرداخته می‌شود [۳]. افزایش حمل و نقل کانتینری و در پی آن افزایش حجم کار در فضای محدود پایانه‌های کانتینری، موجب ایجاد ترافیک کانتینری در پایانه‌ها شده است [۴]. به منظور دستیابی به یک جریان کانتینری پیوسته و بدون ایجاد گلوگاه در فرآیند عملیات پایانه‌ها نیاز است که مسائل اصلی مطرح در بخش دریا و بخش خشکی به صورت یکپارچه و در سطح عملیاتی مورد بررسی قرار گیرند.

مسئله تخصیص اسکله، مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی و مسئله استقرار جرثقیل محوطه، سه مسئله مهم در حوزه برنامه‌ریزی عملیات پایانه‌های کانتینری هستند. در مسئله تخصیص اسکله مکان پهلو گرفتن کشتی‌ها در اسکله‌ها با توجه به اولویت و زمان حضور آنها در بنادر تعیین می‌شود. در این مقاله الگوی اسکله‌ها به صورت گسسته در نظر گرفته شده است. در مسئله تخصیص اسکله با الگوی گسسته، بنادر به تعدادی اسکله با طول یکسان تقسیم‌بندی می‌شوند و در هر زمان تنها امکان پهلوگیری یک کشتی در هر اسکله وجود دارد.

در مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی مکان ذخیره‌سازی موقت کانتینرها در محوطه ذخیره‌سازی در افق برنامه‌ریزی روزانه تعیین می‌شود. در این مقاله گروه کانتینرهای عبوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. گروه کانتینرهای عبوری در طول افق برنامه‌ریزی وارد

² sub-block

محوطه^۲ مناسب برای هر جرثقیل انتخاب و همچنین جرثقیل‌های محوطه بین بلوک‌های محوطه ذخیره‌سازی جابجا شوند.

پروفایل استقرار جرثقیل محوطه، تعداد زیربلوک‌های یک بلوک که توسط یک جرثقیل در یک دوره پوشش داده می‌شود را مشخص می‌کند^[۳]. تعداد زیربلوک‌های یک بلوک که توسط هر جرثقیل پوشش داده می‌شود، تحت عنوان سطح دسترسی بیان می‌شود. مفهوم پروفایل استقرار جرثقیل محوطه برای اولین بار توسط جین و همکاران^[۴] ارائه شده‌است. تفاوت پروفایل‌های استقرار جرثقیل در سطح دسترسی و ظرفیت جابجایی آنها است. ظرفیت جابجایی هر پروفایل استقرار جرثقیل محوطه بر اساس تعداد جابجایی‌ها جهت بازیابی و بارگذاری گروه‌های کانتینری در هر دوره تعیین می‌شود. ۵ نوع پروفایل استقرار برای پوشش زیربلوک‌ها در یک دوره تعریف می‌شود. پروفایل استقرار مختلف شامل نوع A که در هر زمان ۱ زیر بلوک هر بلوک را پوشش می‌دهد تا نوع E که ۵ زیربلوک را در یک بلوک پوشش می‌دهد، وجود دارد. برای یک بلوک هر جرثقیل در یک دوره تنها یک پروفایل استقرار را اختیار می‌کند و در دوره‌های بعد این پروفایل استقرار می‌تواند تغییر کند.

در بیشتر پژوهش‌ها این مسائل به صورت ترتیبی مورد بررسی قرار می‌گیرند. بدین صورت که کشتی‌ها با توجه به زمان حضور در بنادر، در اسکله‌ها پهلو می‌گیرند و تنها با گذراندن مدت زمان عملیات بخش اسکله از پایانه‌ها خارج می‌شوند. این در حالی است که علاوه بر جرثقیل‌های اسکله، جرثقیل‌های محوطه نیز در زمان رفتن کشتی‌ها از پایانه‌های کانتینری تأثیرگذارند^[۲]. پس از تعیین زمان و مکان پهلوگیری کشتی‌ها، در رویکرد ترتیبی زمان ورود و خروج کانتینرها به و یا از محوطه ذخیره‌سازی تعیین می‌شوند. لازم به ذکر است که محل پهلوگیری کشتی‌ها و محل ذخیره‌سازی کانتینرهای مرتبط به آنها با یکدیگر رابطه‌ای متقابل دارند، که این امر در رویکرد ترتیبی در نظر گرفته نمی‌شود. رویکرد بیان شده مسائل بخش دریا و خشکی را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهد. علاوه بر این دو مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی و استقرار جرثقیل محوطه نیز معمولاً به صورت سلسله‌مراتبی در نظر گرفته می‌شوند. در این رویکرد در ابتدا مکان ذخیره‌سازی کانتینرها در محوطه تعیین می‌شود و پس از آن

با توجه به حجم کار تعیین شده در محوطه، استقرار و مسیریابی جرثقیل‌های محوطه مشخص می‌شود. در حالی که در تصمیم‌گیری برای محل ذخیره‌سازی کانتینرها می‌بایست عملکرد جرثقیل‌های محوطه نیز در نظر گرفته شود. در بعضی از موارد با تخصیص نامناسب محوطه ذخیره‌سازی و با وجود محدودیت تعداد جرثقیل‌های فعال در بلوک‌های محوطه، تأخیر در انجام حجم کار در محوطه رخ می‌دهد. عدم توجه به تأثیر هر یک از مسائل مطرح بر یکدیگر و عدم حل مسائل به صورت یکپارچه تأثیر به‌سازی در هزینه‌های بندر دارد و جواب‌های ناکارآمدی را ایجاد می‌کند. از این رو بررسی مسائل مطرح شده به صورت یکپارچه بر کاهش هزینه‌ها و ایجاد جریان کانتینری پیوسته در پایانه‌های کانتینری مؤثر است.

در این مقاله مسائل تخصیص محوطه ذخیره‌سازی، تخصیص اسکله و استقرار جرثقیل محوطه با در نظر گرفتن تراکم ترافیک در خطوط عبوری به صورت یکپارچه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مسائل بیان شده ضمن ارتباط، بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. در مسئله مورد نظر کشتی‌ها به عنوان مبدأ (هنگام ورود به محوطه) و مقصد (در هنگام خروج از محوطه) گروه کانتینرها هستند. بنابراین زمانی که کشتی‌های مبدأ گروه‌های کانتینری در اسکله پهلو می‌گیرند، گروه‌های کانتینری بازیابی شده از آنها با در نظر گرفتن هزینه‌های جابجایی باید در زیربلوک‌های مناسب ذخیره‌سازی شوند. همچنین کشتی‌های مقصد گروه‌های کانتینری نیز باید در اسکله‌ای با کمترین فاصله ممکن از زیربلوک‌هایی که گروه‌های کانتینری آنها ذخیره شده‌اند، پهلو بگیرند.

در تعیین محل ذخیره‌سازی گروه‌های کانتینری علاوه بر فاصله بیان شده، عواملی چون ظرفیت زیربلوک‌ها، تراکم ترافیک در خطوط عبوری محوطه و پروفایل استقرار جرثقیل محوطه نیز تأثیرگذار است. مکان ذخیره‌سازی گروه‌های کانتینری در محوطه بر توزیع حجم کاری جرثقیل‌های محوطه تأثیر می‌گذارد. همچنین زمان خروج کشتی‌ها به عملیات بازیابی و بارگذاری گروه‌های کانتینری آنها در محوطه وابسته است. بنابراین انتخاب پروفایل استقرار جرثقیل محوطه باید بر این اساس باشد که عملیات بارگذاری و بازیابی گروه‌های کانتینری مرتبط با کشتی‌هایی با اولویت بالاتر، در زودترین زمان ممکن انجام شود.

^۲ Yard crane deployment profile

در ادامه در بخش ۲ ادبیات موضوع مسائل مطرح مرور می‌شود. در بخش ۳ به تعریف مسئله مطرح پرداخته می‌شود و در ادامه در بخش ۴ مدل ریاضی یکپارچه ارائه می‌گردد. در بخش ۵ عملکرد مدل ریاضی بررسی و ارزیابی می‌شوند. در آخر در بخش ۶ به نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

۲ - مرور ادبیات

در این بخش به مرور پژوهش‌های مرتبط با مسائل مطرح در این مقاله، پرداخته می‌شود. مرور و تقسیم‌بندی مسائل مطرح در عملیات کانتینری در بخش دریا و خشکی پایانه‌ها در پژوهش‌های ویس و کاستر^[۶]، استیکن و همکاران^[۷]، استابلاک و ووب^[۸]، بیررایت و میسل^[۹]، کارلو و همکاران^[۱۰] مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی در دو سطح عملیاتی و تاکتیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی در سطح تاکتیکی تحت عنوان برنامه‌ریزی الگوی محوطه مطرح می‌شود^[۱۱]. به زعم بررسی نویسندگان مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی برای کانتینرها ورودی، خروجی و عبوری، اولین بار توسط ژانگ و همکاران^[۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است^[۱۳]. ژو و همکاران^[۱۴] دو مسئله تخصیص محوطه و تراکم در بلوک‌ها را با هدف کاهش زمان سفر هر کار مورد بررسی قرار دادند. چیونگ و همکاران^[۱۵]، لین و همکاران^[۱۶] و لین و ژانگ^[۱۷] هر کدام یک مدل ریاضی برای مسئله استقرار جرثقیل محوطه با هدف حداقل کردن حجم کار ناتمام در پایان هر دوره، ارائه کردند. جین و همکاران^[۱۸] به صورت یکپارچه مسئله تخصیص محوطه و مسئله استقرار جرثقیل محوطه را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش آنها بخش ذخیره‌سازی و همچنین زمان بازیابی و بارگذاری گروه‌های کانتینری در محوطه ذخیره‌سازی از پیش مشخص است. آنها یک الگوریتم ابتکاری بر پایه رویکرد حل تقسیم و غلبه^۴ به منظور حل مسئله، ارائه کردند. با توجه به نوع استقرار جرثقیل محوطه مفهومی تحت عنوان پروفایل‌های استقرار جرثقیل محوطه در مقاله جین و همکاران^[۱۹] معرفی شده است.

جیانگ و جین^[۱۷] نیز یک مدل ریاضی برای مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی و استقرار جرثقیل محوطه ارائه کردند.

مسئله تخصیص اسکله نیز در دو سطح عملیاتی و تاکتیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مسئله تخصیص اسکله در سطح تاکتیکی را برنامه‌ریزی الگوی اسکله می‌نامند^[۱۸]. تفاوت بین دو سطح عملیاتی و تاکتیکی در بازه زمانی برنامه‌ریزی و سطوح تصمیم‌گیری است^[۱۹]. حسب بررسی صورت گرفته ایمای و همکاران^[۲۰] در سال ۱۹۹۷ برای اولین بار مسئله تخصیص اسکله را برای بنادر تجاری مدل‌سازی کردند. بررسی دو مسئله تخصیص اسکله و تخصیص محوطه ذخیره‌سازی به صورت یکپارچه یکی از مسائلی است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در بیشتر مطالعاتی که در پیش رو بیان می‌شود، مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی در سطح تاکتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. ژن و همکاران^[۱۸] دو مسئله برنامه‌ریزی الگوی محوطه و الگوی اسکله را به صورت یکپارچه مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور آنها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هدف حداقل کردن انحراف از پنجره زمانی عملیات کشتی‌ها و مسافت طی شده بین اسکله و زیربلوک‌ها ارائه کردند. هندریکس و همکاران^[۲۱] یک مدل ریاضی یکپارچه با فرض مشخص بودن زمان ورود و خروج کشتی‌ها و با هدف کاهش مسافت طی شده بین اسکله و محوطه ذخیره‌سازی ارائه کردند. لی و جین^[۲۲] مدیریت کشتی‌های فیدر را در پایانه‌های عبوری مورد بررسی قرار دادند. آنها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مدیریت کشتی‌های فیدر ارائه کردند. جین و همکاران^[۲۳] نیز مدیریت کشتی‌های فیدر را در پایانه‌های عبوری مورد بررسی قرار داده و بدین منظور یک مدل پوشش مجموعه ارائه کردند. وانگ و همکاران^[۲۴] و لیو^[۲۵] سه مسئله تخصیص اسکله، تخصیص جرثقیل اسکله و تخصیص محوطه ذخیره‌سازی را به صورت یکپارچه مورد بررسی قرار دادند. گو و همکاران^[۲۶] دو مسئله تخصیص اسکله و تخصیص محوطه ذخیره‌سازی را به طور هم‌زمان برای کانتینرهای خروجی در نظر گرفتند.

به زعم بررسی نویسندگان و همچنین بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که پژوهش‌های کمی مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی و مسئله استقرار جرثقیل محوطه را به صورت یکپارچه

⁴ divide-and-conquer solution approach

مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین مسئله استقرار جرثقیل محوطه در پژوهش‌هایی که به صورت یکپارچه تخصیص محوطه ذخیره‌سازی و تخصیص اسکله را مورد مطالعه قرار دادند، در نظر گرفته نشده است. در این پژوهش مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی و استقرار جرثقیل محوطه با مسئله تخصیص اسکله به صورت یکپارچه و در سطح عملیاتی مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- مدل‌سازی مسئله

در این بخش با توجه به مسائل تعریف شده، نمادها، متغیرهای تصمیم مسئله و فرضیات حاکم بر این پژوهش بیان می‌شود. پس از آن یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط یکپارچه ارائه می‌شود.

۳-۱- مفروضات مسئله

فرضیات مسئله به صورت زیر است.

- در هر دوره به هر جرثقیل یک پروفایل استقرار تخصیص می‌یابد و در دوره‌های بعدی این پروفایل می‌تواند تغییر کند.
- ساختار اسکله به صورت گسسته در نظر گرفته می‌شود.
- در یک بلوک حداکثر دو جرثقیل تخصیص می‌یابد و پروفایل جرثقیل‌ها به گونه‌ای است که در بلوک تداخل ایجاد نشود.
- تخصیص گروه‌های کانتینری به کشتی‌ها از پیش معین است.
- در هر زمان تمامی اسکله‌ها آماده خدمت به کشتی‌ها هستند.
- عملیات بازبایی و یا بارگذاری هر گروه کانتینر در یک دوره به اتمام می‌رسد.
- امکان بارگذاری و بازبایی گروه‌های کانتینری مختلف بر روی یک کشتی وجود دارد.

۳-۲- مجموعه‌ها و اندیس‌ها

مجموعه‌های مدل ریاضی به شرح زیر است:

K : مجموعه گروه‌های کانتینری عبوری، با اندیس k

T : مجموعه دوره‌های زمانی، با اندیس t

P : مجموعه کشتی‌ها، با اندیس p

I : مجموعه بلوک‌های محوطه، با اندیس i

M : مجموعه زیربلوک‌های محوطه، با اندیس m

Ω : مجموعه پروفایل استقرار جرثقیل، با اندیس ω

B : مجموعه اسکله‌های در دسترس، با اندیس b

N : مجموعه خطوط عبوری، با اندیس n

پارامترهای مدل ریاضی بدین شرح است:

q_k : فضای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی گروه کانتینر $k \in K$ (بر حسب تعداد زیربلوک)

f_k : نرخ بازبایی/بارگذاری گروه کانتینر $k \in K$ (تعداد جابجایی‌ها در هر دوره)

DL_{imb} : طول مسیر از زیر بلوک $m \in M$ بلوک $i \in I$ به اسکله $b \in B$

C^0 : ضریب هزینه حمل و نقل کانتینرها در محوطه

C^1 : هزینه عملیات یک جرثقیل محوطه در هر دوره زمانی

C^2_p : ضریب هزینه تأخیر کشتی $p \in P$

C_{ij} : هزینه جابجایی یک جرثقیل محوطه از بلوک $i \in I$ به بلوک $j \in I$

d_i : تعداد جرثقیل‌های ابتدایی به کار گرفته شده در بلوک $i \in I$

d_{max} : اکثر تعداد جرثقیل‌های فعال که می‌توانند به طور هم‌زمان در یک بلوک به کار گرفته شوند

Q^1_{im} : ظرفیت زیر بلوک $m \in M$ بلوک $i \in I$

Q^2_{ω} : ظرفیت تخصیص یافته به پروفایل جرثقیل $\omega \in \Omega$

Q^3_n : ظرفیت خطوط عبوری $n \in N$ (تعداد جابجایی‌ها در هر دوره)

$\delta_{m\omega}$: اگر زیر بلوک $m \in M$ توسط چیدمان پروفایل جرثقیل $\omega \in \Omega$ پوشش داده شود یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

σ_{imn} : اگر خطوط عبوری $n \in N$ به زیر بلوک $m \in M$ بلوک $i \in I$ دسترسی داشته باشند یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

G_{kp} : اگر گروه کانتینر $k \in K$ از کشتی $p \in P$ بازبایی شود یک

و در غیر این صورت صفر می‌شود.

G'_{kp} : اگر گروه کانتینر $k \in K$ بر کشتی $p \in P$ بارگذاری یک

و در غیر این صورت صفر می‌شود.

I_p : زمان ورود کشتی $p \in P$ به بندر

BigM: مقدار بزرگ

متغیرهای مدل ریاضی به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Min } & c^1 \sum_{t \in T} \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{i \in I} y_{\omega i}^t + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{t \in T} c_{ij} z_{ij}^t + \sum_{p \in P} c_p^2 (FB_p - I_p) \\ & + c^0 \sum_{b \in B} \sum_{p \in P} \sum_{i \in M} \sum_{m \in M} \left[DL_{imb} \left(\sum_{k \in K} (x_{imk} W_{pb} G_{kp} + x_{imk} W_{pb} G'_{kp}) \right) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

x_{imk} : اگر زیر بلوک $m \in M$ بلوک $i \in I$ به گروه کانتینرهای $k \in K_1$ اختصاص یابد یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

$y_{\omega i}^t$: اگر پروفایل استقرار جرثقیل $\omega \in \Omega$ در زمان $t \in T$ در بلوک $i \in I$ به کار گرفته شوند یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

α_{kt} : اگر گروه کانتینر $k \in K$ در زمان $t \in T$ در محوطه باشند یک و در غیر صورت صفر می‌شود.

β_{kt} : اگر گروه کانتینر $k \in K$ در زمان $t \in T$ در محوطه در حالت بارگذاری باشد یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

β'_{kt} : اگر گروه کانتینر $k \in K$ در زمان $t \in T$ در محوطه در حالت بازیابی باشد یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

w_{pb} : اگر اسکله $b \in B$ به کشتی $p \in P$ اختصاص یابد یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

z_{ij}^t : تعداد جرثقیل‌های جابجا شده از بلوک $i \in I$ به بلوک $j \in I$ در زمان $t-1$ تا t

$\tau_{pp'b}$: اگر کشتی $p \in P$ قبل از کشتی $p' \in P$ در اسکله $b \in B$ پهلو بگیرد مقدار یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

μ_{pt} : اگر در زمان $t \in T$ عملیات کشتی $p \in P$ به پایان برسد یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

NB_{pt} : اگر در زمان $t \in T$ عملیات کشتی $p \in P$ آغاز شود یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

SA_p : زمان شروع عملیات کشتی $p \in P$

FB_p : زمان پایان عملیات کشتی $p \in P$

۳-۳-۳ مدل ریاضی

با توجه به مسئله تعریف شده، مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به شرح زیر است:

s.t.

$$\sum_{b \in B} W_{pb} = 1 \quad ; \quad \forall p \in P \quad (2)$$

$$FB_p + 1 \leq SA_{p'} + (1 - \tau_{pp'b}) BigM ; \quad (3)$$

$$\forall p, p' \in P, p \neq p', b \in B$$

$$\tau_{pp'b} + \tau_{p'pb} \leq W_{pb} ; \quad \forall p, p' \in P, p \neq p', b \in B \quad (4)$$

$$\tau_{pp'b} + \tau_{p'pb} \geq W_{pb} + W_{p'b} - 1 ; \quad (5)$$

$$\forall p, p' \in P, p \neq p', b \in B$$

$$I_p \leq SA_p \quad ; \quad \forall p \in P \quad (6)$$

$$\sum_{t \in T} \mu_{pt} = 1 \quad ; \quad \forall p \in P \quad (7)$$

$$\sum_{t \in T} t \times \mu_{pt} = FB_p ; \quad \forall p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{t \in T} NB_{pt} = 1 ; \quad \forall p \in P \quad (9)$$

$$\sum_{t \in T} t \times NB_{pt} = SA_p ; \quad \forall p \in P \quad (10)$$

$$\mu_{pt} \leq \sum_{t'=1, \dots, t-1} G_{kp} \beta_{kt'} ; \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T \quad (11)$$

$$\mu_{pt} \leq \sum_{t'=1, \dots, t-1} G'_{kp} \beta'_{kt'} ; \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T \quad (12)$$

$$\beta_{kt} \leq \sum_{t'=1, \dots, t-1} G_{kp} NB_{pt'} ; \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T \quad (13)$$

$$\beta'_{kt} \leq \sum_{t'=1, \dots, t-1} G'_{kp} NB_{pt'} ; \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T \quad (14)$$

$$\beta_{kt} \leq \alpha_{kt} \quad ; \quad \forall k \in K, t \in T \quad (15)$$

$$\alpha_{kt} \leq \sum_{t'=1, \dots, t-1} G_{kp} NB_{pt'} ; \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T \quad (16)$$

$$\alpha_{kt} - \sum_{t'=1, \dots, t} \beta'_{kt'} \leq \alpha_{k(t+1)} ; \quad \forall k \in K, t \in T \setminus \{[T]\} \quad (17)$$

دو کشتی به یک اسکله تخصیص یابند، زمان پایان عملیات کشتی ابتدایی باید پیش از زمان شروع عملیات کشتی بعد از آن باشد. محدودیت (۴) و (۵) تضمین می کنند اگر دو کشتی به یک اسکله تخصیص یابند، باید یک توالی برای استقرار دو کشتی در اسکله وجود داشته باشد. محدودیت (۶) نشان می دهد زمان شروع عملیات کشتی پس از زمان ورود کشتی به اسکله است. محدودیت (۷) بیان می کند پایان عملیات هر کشتی در یک دوره زمانی مشخص است. محدودیت (۸) نشان دهنده ارتباط بین دو متغیر زمان پایان عملیات کشتی است. محدودیت (۹) بیان می کند شروع عملیات هر کشتی در یک دوره زمانی مشخص است. محدودیت (۱۰) نشان دهنده ارتباط بین دو متغیر زمان شروع عملیات کشتی است.

محدودیت (۱۱) و (۱۲) تضمین می کنند زمانی کار یک کشتی به اتمام می رسد که تمامی گروه کانتینرهای مربوط به آن کشتی در محوطه بازیابی و یا بارگذاری شده باشند. محدودیت (۱۳) و (۱۴) نشان می دهند که عملیات بازیابی و بارگذاری گروه های کانتینری، پس از آغاز عملیات کشتی هایی است که از آن بازیابی و یا بر آنها بارگذاری می شوند. محدودیت (۱۵) نشان می دهد که گروه های کانتینری عبوری پس از حضور در محوطه، می توانند بارگذاری شوند. محدودیت (۱۶) بیان می کند گروه های کانتینری عبوری پس از آغاز عملیات کشتی های مبدأ خود، در محوطه حضور دارند. محدودیت (۱۷) نشان می دهد که گروه های کانتینری عبوری در فاصله بین عملیات بارگذاری و بازیابی در محوطه به طور موقت ذخیره می شوند. محدودیت (۱۸) تضمین می کند که زمان شروع عملیات کشتی هایی که گروه های کانتینری عبوری از آنها تخلیه می شوند باید قبل از زمان شروع عملیات کشتی هایی باشد که همان گروه های کانتینری بر آنها بارگذاری می شوند.

محدودیت (۱۹) تخصیص زیربلوک های مورد نیاز جهت ذخیره سازی گروه های کانتینری نشان می دهد. محدودیت (۲۰) تضمین می کند که حداکثر به اندازه ظرفیت زیربلوک ها، گروه های کانتینری در هر زیربلوک محوطه ذخیره می شوند. محدودیت (۲۱) نشان می دهد برای انجام عملیات بازیابی/بارگذاری هر گروه کانتینری در هر زیر بلوک در هر دوره زمانی باید حداقل یک جرثقیل با پروفایل ω وجود داشته باشد که آن زیربلوک را در آن دوره پوشش دهد. محدودیت (۲۲) تضمین می کند که اگر در یک زیربلوک عملیات

$$SA_p + 1 \leq SA_{p'} + \left(2 - (G_{kp} + G'_{kp'})\right) BigM; \quad (18)$$

$$\forall p, p' \in P, p \neq p', k \in K$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{imk} = q_k; \quad \forall k \in K \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} \alpha_{kt} x_{imk} \leq Q_{im}^1; \quad \forall m \in M, i \in I, t \in T \quad (20)$$

$$\sum_{k \in K} (\beta_{kt} + \beta'_{kt}) x_{imk} \leq \sum_{\omega \in \Omega} \delta_{m\omega} y_{\omega i}^t; \quad (21)$$

$$\forall m \in M, i \in I, t \in T$$

$$\sum_{m \in M} \left(\sum_{k \in K} f_k (\beta_{kt} + \beta'_{kt}) x_{imk} \right) \leq Q_{\omega}^2 + (1 - y_{\omega i}^t) BigM; \quad (22)$$

$$\forall \omega \in \Omega, i \in I, t \in T$$

$$\sum_{j \in I} z_{ij}^1 = d_i; \quad \forall i \in I \quad (23)$$

$$\sum_{j \in I} z_{ji}^t = \sum_{j \in I} z_{ij}^{t+1}; \quad \forall i \in I, t \in T \setminus \{T\} \quad (24)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} y_{\omega i}^t \leq \sum_{j \in I} z_{ji}^t; \quad \forall i \in I, t \in T \quad (25)$$

$$\sum_{j \in I} z_{ji}^t \leq d_{max}; \quad \forall i \in I, t \in T \quad (26)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} \delta_{m\omega} y_{\omega i}^t \leq 1; \quad \forall m \in M, t \in T, i \in I \quad (27)$$

$$\sum_{m \in M} \left(\sum_{k \in K} f_k (\beta_{kt} + \beta'_{kt}) x_{imk} \right) \leq Q_n^3; \quad \forall n \in N, t \in T \quad (28)$$

$$z_{ij}^t, SA_p, FB_p \geq 0 \text{ integer}; \quad \forall i, j \in I, t \in T, p \in P \quad (29)$$

$$x_{imk}, y_{\omega i}^t, \alpha_{kt}, \beta_{kt}, \beta'_{kt}, w_{pb}, \tau_{pp'b}, \mu_{pt}, NB_{pt} \in \{0, 1\}; \quad (30)$$

$$\forall p, p' \in P, p \neq p', b \in B, k \in K, i \in I, t \in T, \omega \in \Omega$$

تابع هدف (۱) کلیه هزینه ها را حداقل می کند، این هزینه ها شامل هزینه عملیات جرثقیل محوطه، هزینه جابجایی جرثقیل محوطه بین بلوک ها، هزینه تأخیر کشتی ها، هزینه جابجایی گروه کانتینرهای بازیابی/بارگذاری شده بین زیربلوک های محوطه و اسکله ها است. محدودیت (۲) نشان می دهد هر کشتی تنها به یک اسکله تخصیص می یابد. محدودیت (۳) بیان می کند در صورتی که

بازیابی/بارگذاری انجام شود و آن زیربلوک توسط پروفای ω پوشش داده شود، ظرفیت پروفایل جرثقیل باید رعایت شود. محدودیت (۲۳) بیان می‌کند که در دوره اول تعداد جرثقیل‌هایی که در هر بلوک مستقر هستند و می‌توانند در همان بلوک بمانند (انتقال مجازی) و یا به بلوک‌های دیگر بروند، برابر با d_i است. محدودیت (۲۴) نشان می‌دهد که در هر دوره مجموع تعداد جرثقیل‌های که در هر بلوک از خودش و یا دیگر بلوک‌ها به آن بلوک انتقال یافتند برابر با مجموع تعداد جرثقیل‌هایی است که در دوره بعد در همان بلوک می‌مانند و یا به بلوک‌های دیگر منتقل می‌شوند. محدودیت (۲۵) تضمین می‌کند که تعداد جرثقیل‌هایی که در هر دوره در هر بلوک به کار گرفته می‌شوند حداکثر به تعداد جرثقیل‌هایی است که از دوره قبل از همان بلوک و یا بلوک‌های دیگر به آن منتقل شده‌اند. محدودیت (۲۶) اطمینان حاصل می‌کند که در هر دوره زمانی در یک بلوک تعداد جرثقیل جابجا شده از همان بلوک و یا بلوک‌های دیگر نباید از حداکثر تعداد جرثقیل‌هایی که می‌توانند در یک بلوک به کار گرفته شوند، بیشتر باشد. محدودیت (۲۷) تضمین می‌کند که هر زیربلوک حداکثر توسط یک جرثقیل در هر زمان پوشش داده می‌شود. محدودیت (۲۸) محدودیت ظرفیت ترافیک برای خطوط دسترسی است. محدودیت‌های (۲۹) و (۳۰) دامنه متغیرها را تعریف می‌کند.

۳-۴ - خطی سازی

با توجه به اینکه مدل ریاضی ارائه شده غیرخطی است، در این بخش به خطی سازی این مدل می‌پردازیم. تابع هدف و محدودیت‌های (۲۰)، (۲۱)، (۲۲) و (۲۸) غیر خطی هستند که در ادامه با اضافه کردن متغیرها و محدودیت‌هایی مدل ریاضی مسئله، خطی شده است. به منظور خطی سازی تابع هدف، دو متغیر θ_{kimbp} و θ'_{kimbp} به شرح زیر تعریف می‌شوند. همچنین محدودیت‌های (۳۱) تا (۳۷) نیز به مدل ریاضی اضافه و رابطه (۳۸) جایگزین بخش چهارم تابع هدف می‌شود.

θ_{kimbp} : اگر گروه کانتینر $k \in K$ در زیر بلوک $m \in M$ بلوک $i \in I$ بارگذاری شود و کشتی $p \in P$ به عنوان مبدأ این گروه کانتینری در اسکله $b \in B$ پهلو بگیرد یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

$$\theta_{kimbp} \geq G_{kp} w_{pb} + x_{imk} - 1; \quad \forall k \in K, m \in M, i \in I, p \in P, b \in B \quad (31)$$

$$\theta_{kimbp} \leq G_{kp} w_{pb}; \quad \forall k \in K, m \in M, i \in I, p \in P, b \in B \quad (32)$$

$$\theta_{kimbp} \leq x_{imk}; \quad \forall k \in K, m \in M, i \in I, p \in P, b \in B \quad (33)$$

$$\theta'_{kimbp} \geq G'_{kp} w_{pb} + x_{imk} - 1; \quad \forall k \in K, m \in M, i \in I, p \in P, b \in B \quad (34)$$

$$\theta'_{kimbp} \leq G'_{kp} w_{pb}; \quad \forall k \in K, m \in M, i \in I, p \in P, b \in B \quad (35)$$

$$\theta'_{kimbp} \leq x_{imk}; \quad \forall k \in K, m \in M, i \in I, p \in P, b \in B \quad (36)$$

$$\theta_{kimbp}, \theta'_{kimbp} \in \{0,1\}; \quad \forall k \in K, m \in M, i \in I, p \in P, b \in B \quad (37)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{p \in P} \sum_{i \in M} \sum_{m \in M} \left[DL_{imb} \left(\sum_{k \in K} (\theta_{kimbp} + \theta'_{kimbp}) \right) \right] \quad (38)$$

برای خطی سازی محدودیت (۲۰) متغیر s_{imkt} تعریف می‌شود. محدودیت‌های (۳۹) تا (۴۲) به مدل ریاضی اضافه می‌شوند. محدودیت (۴۳) جایگزین محدودیت (۲۰) می‌شود.

s_{imkt} : اگر گروه کانتینر $k \in K$ در زمان $t \in T$ در زیربلوک $m \in M$ بلوک $i \in I$ باشد یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

$$s_{imkt} \geq \alpha_{kt} + x_{imk} - 1; \quad \forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T \quad (39)$$

$$s_{imkt} \leq \alpha_{kt}; \quad \forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T \quad (40)$$

$$s_{imkt} \leq x_{imk}; \quad \forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T \quad (41)$$

$$s_{imkt} \in \{0,1\}; \quad \forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T \quad (42)$$

$$\sum_{k \in K_1} s_{imkt} \leq Q_{im}^1; \quad \forall m \in M, i \in I, t \in T \quad (43)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{b \in B} \theta_{kimbp} \leq DL_{max}; \forall m \in M, i \in I, k \in K \quad (54)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{b \in B} \theta'_{kimbp} \leq DL_{max}; \forall m \in M, i \in I, k \in K \quad (55)$$

$$\sum_{t=1, \dots, I_p} G_{kp} \alpha_{kt} = 0; \forall k \in K, p \in P \quad (56)$$

$$\sum_{t=1, \dots, I_p} G_{kp} \beta_{kt} = 0; \forall k \in K, p \in P \quad (57)$$

$$\sum_{p \in P} NB_{pt} \leq |B|; \forall t \in T \quad (58)$$

نامعادلات (54) و (55) بیان می‌کنند که مسافت طی شده توسط هر گروه کانتینری که در محوطه ذخیره‌شده و یا از آن بازیابی می‌شود از اسکله محل پهلوگیری کشتی مبدأ و یا مقصد آن گروه کانتینری، از بیشترین فاصله بین تمامی اسکله‌ها و زیربلوک‌های محوطه کمتر است. DL_{max} پارامتری است که در هر نمونه بیشترین فاصله بین اسکله‌ها و زیربلوک‌های محوطه را نشان می‌دهد. معادلات (56) و (57) تضمین می‌کنند که پیش از زمان حضور کشتی‌ها در بنادر گروه‌های کانتینری آنها در محوطه بارگذاری نمی‌شوند و بنابراین در محوطه حضور ندارند. نامعادله (58) نشان می‌دهد که در هر زمان حداکثر به تعداد اسکله‌های بنادر، کشتی‌ها می‌توانند عملیات خود را آغاز کنند.

۴ - نتایج محاسباتی

در این بخش نتایج عددی به منظور ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی ارائه شده است. مدل ریاضی در نرم افزار GAMS 27.3.0 و کد شده و با استفاده از حل کننده GUROBI 8.1.1 حل شدند. نمونه‌ها در کامپیوتری با مشخصات 4 GHz Intel Core i7 CPU و 30 GB RAM اجرا شده‌اند. محدودیت زمانی برای تمامی نمونه‌ها ۳ ساعت (۱۰۸۰۰ ثانیه) است.

۴-۱ - تولید نمونه

برای بررسی صحت مدل پیشنهادی نمونه‌های آزمایشی بر اساس اطلاعات ارائه شده در ادبیات موضوع، تولید و ارائه می‌شوند. افق برنامه‌ریزی به صورت روزانه است، که این افق به ۱۲ دوره ۲ ساعته تقسیم می‌شود. هر زیر بلوک به طور متوسط ظرفیتی برابر با یک گروه کانتینری دارد. به طور کلی محوطه ذخیره‌سازی دارای

برای خطی‌سازی محدودیت‌های (21)، (22) و (28) دو متغیر Ψ_{imkt} و Ψ'_{imkt} به شرح زیر تعریف و محدودیت‌های (44) تا (50) به مدل ریاضی اضافه می‌شوند. محدودیت‌های محدودیت‌های (21)، (22) و (23) به ترتیب به صورت محدودیت‌های (51)، (52) و (53) بازنویسی می‌شوند.

Ψ_{imkt} : اگر گروه کانتینر $k \in K$ در زمان $t \in T$ در زیربلوک $m \in M$ بلوک $i \in I$ در حالت بارگذاری باشد یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

Ψ'_{imkt} : اگر گروه کانتینر $k \in K$ در زمان $t \in T$ در زیربلوک $m \in M$ بلوک $i \in I$ در حالت بازیابی باشد یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

$$\Psi_{imkt} \geq \beta_{kt} + x_{imk} - 1; \quad (44)$$

$$\forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T$$

$$\Psi_{imkt} \leq \beta_{kt}; \quad (45)$$

$$\forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T$$

$$\Psi_{imkt} \leq x_{imk}; \quad (46)$$

$$\forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T$$

$$\Psi'_{imkt} \geq \beta'_{kt} + x_{imk} - 1; \quad (47)$$

$$\forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T$$

$$\Psi'_{imkt} \leq \beta'_{kt}; \quad (48)$$

$$\forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T$$

$$\Psi'_{imkt} \leq x_{imk}; \quad (49)$$

$$\Psi_{imkt}, \Psi'_{imkt} \in \{0, 1\}; \quad (50)$$

$$\forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T$$

$$\sum_{k \in K} (\Psi_{imkt} + \Psi'_{imkt}) \leq \sum_{\omega \in \Omega} \delta_{m\omega} y_{\omega i}^t; \quad (51)$$

$$\sum_{m \in M} \left(\sum_{k \in K} f_k (\Psi_{imkt} + \Psi'_{imkt}) \right) \leq Q_{\omega}^2 + (1 - y_{\omega i}^t) BigM; \quad (52)$$

$$\sum_{m \in M} \left(\sum_{k \in K} f_k (\Psi_{imkt} + \Psi'_{imkt}) \right) \leq Q_n^3; \quad (53)$$

۳ - ۵ - نامعادلات معتبر

به منظور کاهش زمان حل و با توجه به فرضیات و ساختار مسئله، نامعادلات معتبری در ادامه ارائه می‌شود. نامعادلات (54) تا (58) به منظور کاهش فضای جواب به مسئله اصلی اضافه می‌شود.

۲۰۰۰ متر اسکله و ۷۲ بلوک (۳۶۰ زیربلوک) است و مختصات بلوک‌ها و اسکله‌ها مطابق با فواصل بیان شده در پژوهش ژن [۲۷] محاسبه شده است. به طور کلی ۵ اسکله با طول یکسان برای پهلوگرفتن کشتی‌ها وجود دارد. در این پژوهش حداکثر ۴۸ بلوک در نظر گرفته شده است. فاصله بین اسکله‌ها و زیربلوک‌های محوطه به صورت اقلیدسی از مختصات مرکز اسکله‌ها تا هر یک از زیربلوک‌ها در نظر گرفته شده است. ضریب هزینه حمل و نقل کانتینرها در محوطه 5×10^{-3} دلار به ازای هر کانتینر در هر متر جابجایی در محوطه است [۲۷]. در این پژوهش در هر جابجایی بین هر زیربلوک و اسکله به طور متوسط ۲۰۰ کانتینر در هر دوره جابجا می‌شود، بنابراین ضریب هزینه جابجایی کانتینرها در محوطه مقدار ۱ در نظر گرفته می‌شود.

ظرفیت پروفایل جرثقیل محوطه بین [۳۰,۵۰] حرکت در هر دوره تعیین شده است. نرخ بازیابی/بارگذاری هر گروه کانتینر به صورت یکنواخت در بازه [۱۰,۴۰] حرکت در هر دوره توزیع شده است [۳]. هزینه عملیات یک جرثقیل محوطه (C^1) برابر با ۳۰ در هر دوره در نظر گرفته شده است. به صورت یکنواخت هر گروه کانتینر بین ۱ تا ۳ زیربلوک فضا جهت ذخیره‌سازی (q_k) نیاز دارد [۳]. در ارتباط با توزیع اولیه جرثقیل‌های محوطه دو حالت A و B در نظر گرفته می‌شود. در حالت A به ازای هر دو بلوک، ۳ جرثقیل از ابتدای دوره در بلوک‌ها استقرار یافته است. در حالت B در هر بلوک یک جرثقیل از ابتدای هر دوره وجود دارد. هزینه جابجایی جرثقیل‌ها بین بلوک‌های محوطه بر اساس داده‌های ارائه شده در مقاله ژانگ و همکاران [۲۸] بین [۱۰,۷۵] تعیین شده است. باید به این نکته توجه شود که جرثقیل‌های محوطه تنها می‌توانند بین بلوک‌های ستون مجاور جابجا شوند [۳]. ظرفیت ترافیک تمامی خطوط عبوری ۲۰۰ جابجایی در هر دوره تعیین شده است [۳]. حد پایین، جواب بدست آمده از حل مدل ریاضی یکپارچه و مدت زمان حل بر حسب ثانیه به ترتیب در ستون‌های ۵، ۶ و ۷ آمده است. شکاف محاسباتی برای مدل ریاضی از مقایسه جواب بدست آمده با حد پایین حاصل می‌شود. بر اساس نتایج بدست آمده مدل ریاضی پیشنهادی از کارایی مناسبی در حل نمونه‌ها در ابعاد کوچک و متوسط برخوردار است و در مدت

زمان کمتر از ۳ ساعت به جواب بهینه دست می‌یابد. در نمونه‌هایی با ابعاد بزرگ مدل ریاضی با میانگین شکاف محاسباتی کمتر از ۵ درصد به جوابی نزدیک به جواب بهینه می‌رسد. ظرفیت زیر بلوک‌ها به صورت میانگین بین ۲۰۰ تا ۲۴۰ کانتینر در نظر گرفته شده است.

در مسئله تخصیص کشتی به اسکله، رفتار کشتی‌های متوسط در نظر گرفته شده است. ظرفیت کشتی متوسط در بازه [۷۲۰,۱۶۸۰] واحدهای معادل ۲۰ فوتی (TEU^۵) تعیین می‌شود [۲۹]. ضریب تأخیر کشتی متوسط به طور تصادفی در بازه [۶۰۰۰,۱۰۰۰۰] در نظر گرفته شده است [۳۰]. در این در مجموع ۴ مجموعه نمونه تولید شده است. پارامترهای هر مجموعه در جدول ۱ آمده است. پارامترهای ثابت هر مجموعه به ترتیب تعداد بلوک‌ها، تعداد کانتینرها، تعداد کشتی‌ها و تعداد اسکله‌ها است. هر مجموعه شامل ۴ نمونه است و تفاوت نمونه‌ها در تعداد کشتی‌ها، تعداد اسکله‌ها و توزیع اولیه جرثقیل‌های محوطه می‌باشد. تعداد کشتی‌ها و تعداد اسکله‌های هر نمونه در جدول نتایج محاسباتی (جدول ۲ تا ۵) آمده است.

جدول ۱. پارامترهای نمونه

	I	K	p	b
مجموعه ۱	۸	۱۰	[۳,۵]	[۱,۲]
مجموعه ۲	۱۶	۲۰	[۳,۷]	[۲,۳]
مجموعه ۳	۲۴	۳۰	[۶,۱۰]	[۳,۵]
مجموعه ۴	۴۸	۴۰	[۷,۱۲]	[۳,۵]

۴-۲- نتایج عددی

نتایج حاصل از حل نمونه‌های تولید شده توسط مدل ریاضی یکپارچه جدول ۲ تا ۵ ارائه شده است. نمونه‌ها نتایج عددی برای هر مجموعه از نمونه‌ها بر اساس دو حالت استقرار مختلف A و B است که در ستون دوم نتایج آمده است. تعداد کشتی‌ها و تعداد اسکله‌های هر نمونه در ستون‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

^۵ Twenty feet Equivalent Units

جدول ۲. نتایج حاصل از حل نمونه‌های مجموعه اول

GAP(%)		مدل ریاضی همراه با نامعادلات معتبر			مدل ریاضی بدون نامعادلات معتبر			b (۴)	p (۳)	حالت YC (۲)	نمونه (۱)
GAP2	GAP1	مدت زمان حل (S) (۱۰)	تابع هدف (۹)	حد پایین (۸)	مدت زمان حل (S) (۷)	تابع هدف (۶)	حد پایین (۵)				
۰/۰۰	۰/۰۰	۴۸	۱۹۱۷۶/۰۹۲	۱۹۱۷۶/۰۹۲	۵۰	۱۹۱۷۶/۰۹۲	۱۹۱۷۶/۰۹۲	۲	۳	A	set1-1
۰/۰۰	۰/۰۰	۵۲	۲۸۱۳۷/۸۳۷	۲۸۱۳۷/۸۳۷	۵۸	۲۸۱۳۷/۸۳۷	۲۸۱۳۷/۸۳۷	۲	۴	A	set1-2
۰/۰۰	۰/۰۰	۷۴	۳۷۵۴۹/۷۷۸	۳۷۵۴۹/۷۷۸	۱۴۲	۳۷۵۴۹/۷۷۸	۳۷۵۴۹/۷۷۸	۲	۵	A	set1-3
۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۵	۴۱۸۰۱/۰۴۸	۴۱۸۰۱/۰۴۸	۱۹۸	۴۱۸۰۱/۰۴۸	۴۱۸۰۱/۰۴۸	۳	۵	A	set1-4
۰/۰۰	۰/۰۰	۵۳	۱۹۱۸۰/۴۱۷	۱۹۱۸۰/۴۱۷	۵۴	۱۹۱۸۰/۴۱۷	۱۹۱۸۰/۴۱۷	۲	۳	B	set1-1
۰/۰۰	۰/۰۰	۵۸	۲۸۱۵۷/۸۳۳	۲۸۱۵۷/۸۳۳	۶۷	۲۸۱۵۷/۸۳۳	۲۸۱۵۷/۸۳۳	۲	۴	B	set1-2
۰/۰۰	۰/۰۰	۸۰	۳۷۵۶۹/۷۷۸	۳۷۵۶۹/۷۷۸	۸۸	۳۷۵۶۹/۷۷۸	۳۷۵۶۹/۷۷۸	۲	۵	B	set1-3
۰/۰۰	۰/۰۰	۶۵	۴۱۸۱۱/۰۴۸	۴۱۸۱۱/۰۴۸	۱۷۷	۴۱۸۱۱/۰۴۸	۴۱۸۱۱/۰۴۸	۳	۵	B	set1-4
۰/۰۰	۰/۰۰	۶۷			۱۰۵						میانگین

جدول ۳. نتایج حاصل از حل نمونه‌های مجموعه دوم

GAP(%)		مدل ریاضی همراه با نامعادلات معتبر			مدل ریاضی بدون نامعادلات معتبر			b (۴)	p (۳)	حالت YC (۲)	نمونه (۱)
GAP2	GAP1	مدت زمان حل (S) (۱۰)	تابع هدف (۹)	حد پایین (۸)	مدت زمان حل (S) (۷)	تابع هدف (۶)	حد پایین (۵)				
۰/۰۰	۰/۰۰	۵۸۲	۲۴۶۸۴/۶۰۲	۲۴۶۸۴/۶۰۲	۱۰۸۲	۲۴۶۸۴/۶۰۲	۲۴۶۸۴/۶۰۲	۲	۳	A	set2-1
۰/۰۰	۰/۰۰	۷۸۹	۲۶۸۲۳/۹۷۵	۲۶۸۲۳/۹۷۵	۱۴۱۰	۲۶۸۲۳/۹۷۵	۲۶۸۲۳/۹۷۵	۲	۴	A	set2-2
۰/۰۰	۰/۰۰	۸۹۲	۳۹۶۴۳/۵۶۳	۳۹۶۴۳/۵۶۳	۱۵۵۶	۳۹۶۴۳/۵۶۳	۳۹۶۴۳/۵۶۳	۳	۵	A	set2-3
۰/۰۰	۰/۰۰	۲۳۱۵	۵۷۴۳۸/۵۱۶	۵۷۴۳۸/۵۱۶	۳۱۴۸	۵۷۴۳۸/۵۱۶	۵۷۴۳۸/۵۱۶	۳	۷	A	set2-4
۰/۰۰	۰/۰۰	۹۶۳	۲۴۶۹۶/۰۹	۲۴۶۹۶/۰۹	۱۳۴۲	۲۴۶۹۶/۰۹	۲۴۶۹۶/۰۹	۲	۳	B	set2-1
۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۲۳	۲۶۸۷۶/۴۹۷	۲۶۸۷۶/۴۹۷	۱۵۵۲	۲۶۸۷۶/۴۹۷	۲۶۸۷۶/۴۹۷	۲	۴	B	set2-2
۰/۰۰	۰/۰۰	۱۱۹۶	۳۹۵۱۹/۹۲	۳۹۵۱۹/۹۲	۱۳۲۵	۳۹۵۱۹/۹۲	۳۹۵۱۹/۹۲	۳	۵	B	set2-3
۰/۰۰	۰/۰۰	۵۱۹۸	۵۷۲۷۷/۴۸۵	۵۷۲۷۷/۴۸۵	۶۰۱۳	۵۷۲۷۷/۴۸۵	۵۷۲۷۷/۴۸۵	۳	۷	B	set2-4
۰/۰۰	۰/۰۰	۱۶۲۰			۲۱۷۹						میانگین

جدول ۴. نتایج حاصل از حل نمونه‌های مجموعه سوم

GAP(%)		مدل ریاضی همراه با نامعادلات معتبر			مدل ریاضی بدون نامعادلات معتبر			b (۴)	p (۳)	حالت YC (۲)	نمونه (۱)
GAP2	GAP1	مدت زمان حل (S) (۱۰)	تابع هدف (۹)	حد پایین (۸)	مدت زمان حل (S) (۷)	تابع هدف (۶)	حد پایین (۵)				
۰/۰۰	۰/۵۶	۶۱۷۸	۵۰۰۵۱/۸۱۲	۵۰۰۵۱/۸۱۲	۱۰۸۰۰	۵۰۲۱۰/۰۲	۴۹۹۲۹/۸۱	۳	۶	A	set3-1
۰/۰۰	۰/۲۴	۶۳۱۲	۷۱۵۷۶/۸۷۲	۷۱۵۷۶/۸۷۲	۱۰۸۰۰	۷۱۵۹۹/۰۸	۷۱۴۲۳/۶۳۷	۴	۸	A	set3-2
۰/۰۰	۰/۴۴	۷۴۷۵	۷۳۶۰۲/۸	۷۳۶۰۲/۸	۱۰۸۰۰	۷۳۷۹۲/۰۱	۷۳۴۶۲/۵۶۴	۴	۹	A	set3-3
۰/۰۰	۰/۴۰	۷۸۶۷	۷۴۴۴۰/۸۱۴	۷۴۴۴۰/۸۱۴	۱۰۸۰۰	۷۴۵۹۴/۰۲	۷۴۲۹۴/۵۷۸	۵	۱۰	A	set3-4
۰/۰۰	۱/۳۶	۶۶۳۶	۵۰۰۷۵/۲۲	۵۰۰۷۵/۲۲	۱۰۸۰۰	۵۰۵۹۸/۴۳	۴۹۹۰۹/۹۸۴	۳	۶	B	set3-1
۰/۰۰	۰/۴۳	۶۸۴۷	۷۱۵۸۶/۳۶	۷۱۵۸۶/۳۶	۱۰۸۰۰	۷۱۷۳۱/۵۶	۷۱۴۲۱/۱۲۵	۴	۸	B	set3-2
۰/۰۰	۰/۳۴	۶۶۷۲	۷۳۶۲۱/۷۷۶	۷۳۶۲۱/۷۷۶	۱۰۸۰۰	۷۳۷۵۱/۹۹	۷۳۴۹۶/۵۴۱	۴	۹	B	set3-3
۰/۰۰	۰/۳۵	۱۰۱۵۶	۷۴۴۵۹/۷۹	۷۴۴۵۹/۷۹	۱۰۸۰۰	۷۴۵۹۵/۹۸	۷۴۳۲۷/۵۵۵	۵	۱۰	B	set3-4
۰/۰۰	۰/۵۲	۷۲۴۳									میانگین

جدول ۵. نتایج حاصل از حل نمونه‌های مجموعه چهارم

GAP(%)		مدل ریاضی همراه با نامعادلات معتبر			مدل ریاضی بدون نامعادلات معتبر			b (۴)	p (۳)	حالت YC (۲)	نمونه (۱)
GAP2	GAP1	مدت زمان حل (S) (۱۰)	تابع هدف (۹)	حد پایین (۸)	مدت زمان حل (S) (۷)	تابع هدف (۶)	حد پایین (۵)				
۰/۰۳	۰/۲۱	۱۰۸۰۰	۵۳۳۳۰/۵۴	۵۳۳۱۴/۸۹	۱۰۸۰۰	۵۳۴۱۴/۵۷	۵۳۳۰۲/۳۳	۳	۷	A	set4-1
۳/۸۶	۴/۳۳	۱۰۸۰۰	۷۳۶۲۸/۰۱	۷۶۵۹۰/۹۶	۱۰۸۰۰	۷۶۹۲۲/۹۶	۷۳۵۹۵/۷۹	۴	۱۰	A	set4-2
۳/۹۴	۴/۷۳	۱۰۸۰۰	۸۷۶۹۸/۱۸	۸۴۲۴۱/۹۵	۱۰۸۰۰	۸۸۰۲۱/۷۲	۸۳۸۵۶/۷۳	۵	۱۱	A	set4-3
۲/۴۳	۳/۲۱	۱۰۸۰۰	۱۰۱۶۷۸/۸	۹۹۲۰۴/۱۶	۱۰۸۰۰	۱۰۱۷۷۹/۱	۹۸۵۱۴/۹۴	۵	۱۲	A	set4-4
۰/۱۷	۰/۲۱	۱۰۸۰۰	۵۳۴۱۷/۵۷	۵۳۳۲۵/۶۶	۱۰۸۰۰	۵۳۴۱۸/۶۷	۵۳۳۰۱/۴۶	۳	۷	B	set4-1
۳/۲	۳/۶۳	۱۰۸۰۰	۷۶۶۸۵/۷۹	۷۴۲۳۰/۶۷	۱۰۸۰۰	۷۶۷۱۷/۶۷	۷۳۹۲۸/۳۴	۴	۱۰	B	set4-2
۳/۹۳	۴/۷	۱۰۸۰۰	۸۷۴۹۵/۳۱	۸۴۰۵۶/۳۸	۱۰۸۰۰	۸۷۷۲۶/۳۲	۸۳۶۰۴/۰۸	۵	۱۱	B	set4-3
۴/۷۶	۴/۹۷	۱۰۸۰۰	۱۰۳۵۱۷/۵	۹۸۵۸۸/۸۱	۱۰۸۰۰	۱۰۳۷۳۹/۵	۹۸۵۷۴/۵۸	۵	۱۲	B	set4-4
۲/۷۹	۳/۲۵										میانگین

تخصیص اسکله به صورت جداگانه حل می‌شود و سپس با توجه به نتایج حاصل از آن تخصیص کانتینرها به محوطه ذخیره‌سازی و همچنین استقرار جرثقیل‌های محوطه تعیین می‌شود.

در بخش اول سناریو دوم با حل مسئله تخصیص اسکله، مکان و زمان پهلوگرفتن کشتی‌ها در اسکله‌ها تعیین می‌شود و در نتیجه آن زمان ورود و خروج گروه‌های کانتینری آنها به و یا از محوطه ذخیره‌سازی مشخص می‌شود. با توجه به زمان ورود و خروج گروه‌های کانتینری، زمان عملیات بازیابی و بارگذاری و همچنین مدت زمان ذخیره‌سازی گروه‌های کانتینری در محوطه تعیین می‌شود.

با توجه به نتایج حاصل از مسئله تخصیص اسکله، مسائل تخصیص محوطه ذخیره‌سازی و استقرار جرثقیل محوطه را به صورت یکپارچه در بخش دوم سناریو دوم در نظر می‌گیریم. تابع هدف بخش دوم شامل هزینه‌های به کارگیری و جابه‌جایی جرثقیل‌های محوطه است. به منظور مقایسه دو سناریو ارائه شده، جمع کل هزینه‌ها در نظر گرفته می‌شود. در سناریو دوم هزینه جابه‌جایی بین اسکله‌ها و زیربلوک‌های محوطه با توجه به مکان پهلوگیری تعیین شده در بخش اول سناریو و محل ذخیره‌سازی گروه‌های کانتینری مرتبط با هر کشتی که در بخش دوم مشخص شده است، تعیین می‌شود. هزینه جابه‌جایی بین زیربلوک‌ها و اسکله‌ها در تابع هدف بخش اول و دوم سناریو غیریکپارچه بی‌تأثیر است و تنها جهت مقایسه هزینه کل

همچنین با توجه به نتایج بدست آمده مدل ریاضی پیشنهادی بدون نامعادلات معتبر از کارایی مناسبی در حل نمونه‌ها در ابعاد کوچک و متوسط برخوردار است و در مدت زمان کمتر از ۳ ساعت به جواب بهینه دست می‌یابد. در نمونه‌هایی با ابعاد بزرگ مدل ریاضی بدون نامعادلات معتبر با میانگین شکاف محاسباتی کمتر از ۵ درصد به جوابی نزدیک به جواب بهینه می‌رسد. همچنین مطابق با نتایج، مدل ریاضی با نامعادلات معتبر، در مجموعه نمونه‌های کوچک و متوسط در مدت زمان کمتری نسبت به مدل ریاضی بدون نامعادلات به جواب بهینه دست می‌یابد. همچنین در مجموعه نمونه‌های چهارم با میانگین شکاف کمتری به جوابی نزدیک بهینه دست می‌یابد.

۵ - بینش مدیریتی

همان‌طور که بیان شد مبحث اصلی این پژوهش، بررسی یکپارچه مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی، مسئله تخصیص اسکله و مسئله استقرار جرثقیل محوطه در افق برنامه‌ریزی روزانه است. نتایج عددی تأثیر در نظر گرفتن یکپارچه این مسائل را نسبت به بررسی جداگانه آنها نشان می‌دهد. به منظور بررسی تأثیر یکپارچه‌سازی دو سناریو را در نظر می‌گیریم: سناریو یکپارچه و سناریو غیریکپارچه. در مدل ریاضی این پایان‌نامه، سناریو یکپارچه مورد بررسی قرار گرفته است. برای سناریو غیریکپارچه، ابتدا مسئله

ذخیره‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. افق برنامه‌ریزی به صورت روزانه در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج مدل ریاضی از کارایی مناسبی برای حل نمونه‌ها برخوردار است. مطابق با نتایج بدست آمده، با یکپارچه در نظر گرفتن مسائل بیان شده، به طور میانگین ۱۴/۳۰۱ درصد بهبود در هزینه‌ها نسبت به حالت غیریکپارچه حاصل شده است. نتایج نشان داده شده و بهبود حاصل از یکپارچه در نظر گرفتن مسائل بیان شده در نمونه‌های مختلف، بر لزوم بررسی یکپارچه این مسائل نسبت به بررسی جداگانه و ترتیبی آنها تأکید می‌کند. در مطالعات آتی می‌توان از روش حل دقیق همچون الگوریتم تولید ستونی و یا الگوریتم تجزیه بندرز استفاده کرد. همچنین می‌توان با استفاده از ترکیب روش‌های ابتکاری و مدل ریاضی به منظور کاهش زمان حل نیز بهره برد. همچنین می‌توان مسئله تخصیص جرثقیل اسکله و یا زمان‌بندی کامیون‌های محوطه را نیز به صورت یکپارچه با مسائل بیان شده در نظر گرفت.

منابع

- Balakrishnan, A. & Karsten, C. V. "Container shipping service selection and cargo routing with transshipment limits". *European Journal of Operational Research* **263** (2), pp. 652-663, (2017).
- Ahmed, E., El-Abbasy, M. S., Zayed, T., Alfalah, G. & Alkass, S. "Synchronized scheduling model for container terminals using simulated double-cycling strategy". *Computers & Industrial Engineering* **154**, pp. 107118, (2021).
- Jin, J. G., Lee, D. H. & Cao, J. X. "Storage yard management in maritime container terminals". *Transportation Science* **50** (4), pp. 1300-1313, (2016).
- Han, Y., Lee, L. H., Chew, E. P. & Tan, K. C. "A yard storage strategy for minimizing traffic congestion in a marine container transshipment hub". *OR spectrum* **30** (4), pp. 697-720, (2008).
- Jiang, X., Lee, L. H., Chew, E. P., Han, Y. & Tan, K. C. "A container yard storage strategy

عملیات کانتینری سناریو غیریکپارچه با سناریو یکپارچه این هزینه محاسبه می‌شود. بنابراین هزینه کل در هر دو سناریو یکپارچه و غیریکپارچه شامل هزینه تأخیر کشتی‌ها، هزینه جابه‌جایی کانتینرها بین محوطه ذخیره‌سازی و اسکله‌ها و هزینه به‌کارگیری و جابه‌جایی جرثقیل‌های محوطه است. جدول ۶ مقایسه بین هزینه کل دو سناریو یکپارچه و غیریکپارچه برای ۱۰ مثال عددی تولید شده از نمونه set2-4-B نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در نمونه set2-4-B بین ۱۰/۸ درصد و ۱۷/۲ درصد بهبود در هزینه کل در سناریو یکپارچه حاصل شده است. نتایج ارائه شده حاصل از حل مدل ریاضی الی بدون در نظر گرفتن نامعادلات معتبر است.

جدول ۶. مقایسه بین هزینه کل دو سناریو یکپارچه و غیریکپارچه در نمونه set2-4-B

نمونه	شماره	هزینه کل در سناریو یکپارچه	هزینه کل در سناریو غیریکپارچه	بهبود (%)
	۱	۵۷۲۷۷/۴۸۵	۷۸۶۰۱۸/۹۲۷	۱۲/۷۲۳
	۲	۵۷۴۵۲/۶۵	۸۶۸۹۷۱/۳۲۸	۱۴/۱۲۵
	۳	۵۷۲۳۰/۱۹۴	۸۳۹۵۶۶/۹۴۵	۱۳/۶۷
	۴	۵۷۷۷۹/۰۱۲	۹۲۵۷۳۵/۳۲۶	۱۵/۰۲۲
	۵	۵۷۸۷۴/۴۵۷	۱۰۰۸۳۴۶/۶۶۷	۱۶/۴۲۳
set 2-4-B	۶	۵۷۹۸۱/۴۳۹	۶۸۴۹۹۲/۷۲۴	۱۰/۸۱۴
	۷	۵۷۱۹۹/۱۲۹	۸۴۲۰۸۵/۵۳۸	۱۳/۷۲۲
	۸	۵۷۴۰۷/۴۳۹	۸۶۴۴۴۱/۲۱۸	۱۴/۰۵۸
	۹	۵۶۵۲۰/۲۷۸	۹۱۸۶۸۰/۵۹۷	۱۵/۲۵۴
	۱۰	۵۶۷۲۸/۵۲۹	۱۰۳۲۴۵۹/۲۳۲	۱۷/۲
				۱۴/۳۰۱۱

۶ - نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر به دلیل رقابت زیاد بین پایانه‌های کانتینری، بهبود ارائه خدمات به مشتریان به یکی از مسائل مهم برای صاحبان پایانه‌های کانتینری تبدیل شده است. یکی از اصلی‌ترین معیارهایی که بر سرعت ارائه خدمات تأثیر می‌گذارد، مدت زمان پهلوگیری کشتی‌ها در اسکله است. زمان تخلیه و بارگذاری گروه‌های کانتینری از جمله عواملی است که بر مدت زمان پهلوگیری کشتی‌ها تأثیر می‌گذارد. به دلایلی از جمله بهبود ارائه خدمات در پایانه‌ها، در این مقاله سه مسئله تخصیص اسکله، تخصیص محوطه ذخیره‌سازی و استقرار جرثقیل محوطه با در نظر گرفتن تراکم ترافیک در محوطه

- Transportation Science* **36** (1),pp. 79-93, (2002).
15. Linn, R., Liu, J.-y., Wan, Y.-w., Zhang, C. & Murty, K. G. "Rubber tired gantry crane deployment for container yard operation". *Computers & Industrial Engineering* **45** (3),pp. 429-442, (2003).
 16. Linn, R. J. & Zhang, C.-Q. "A heuristic for dynamic yard crane deployment in a container terminal". *IIE transactions* **35** (2),pp. 161-174, (2003).
 17. Jiang, X. J. & Jin, J. G. "A branch-and-price method for integrated yard crane deployment and container allocation in transshipment yards". *Transportation Research Part B: Methodological* **98**,pp. 62-75, (2017).
 18. Zhen, L., Chew, E. P. & Lee, L. H. "An integrated model for berth template and yard template planning in transshipment hubs". *Transportation Science* **45** (4),pp. 483-504, (2011).
 19. Giallombardo, G., Moccia, L., Salani, M. & Vacca, I. "Modeling and solving the tactical berth allocation problem". *Transportation Research Part B: Methodological* **44** (2),pp. 232-245, (2010).
 20. Imai, A., Nagaiwa, K. I. & Tat, C. W. "Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia". *Journal of Advanced transportation* **31** (1),pp. 75-94, (1997).
 21. Hendriks, M., Lefeber, E. & Udding, J. T. "Simultaneous berth allocation and yard planning at tactical level". *OR spectrum* **35** (2),pp. 441-456, (2013).
 22. Lee, D.-H. & Jin, J. G. "Feeder vessel management at container transshipment terminals". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **49** (1),pp. 201-216, (2013).
 23. Jin, J. G., Lee, D.-H. & Hu, H. "Tactical berth and yard template design at container transshipment terminals: A column generation based approach". *Transportation Research* for improving land utilization and operation efficiency in a transshipment hub port". *European journal of operational research* **221** (1),pp. 64-73, (2012).
 6. Vis, I. F. A. & De Koster, R. "Transshipment of containers at a container terminal: An overview". *European Journal of Operational Research* **147** (1),pp. 1-16, (2003).
 7. Steenken, D., Voß, S. & Stahlbock, R. "Container terminal operation and operations research - A classification and literature review". *OR Spectrum* **26** (1),pp. 3-49, (2004).
 8. Stahlbock, R. & Voß, S. "Operations research at container terminals: a literature update". *OR spectrum* **30** (1),pp. 1-52, (2008).
 9. Bierwirth, C. & Meisel, F. "A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals". *European Journal of Operational Research* **202** (3),pp. 615-627, (2010).
 10. Carlo, H. J., Vis, I. F. A. & Roodbergen, K. J. "Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions". *European Journal of Operational Research* **235** (2),pp. 412-430, (2014).
 11. He, J. *et al.* "Two-stage stochastic programming model for generating container yard template under uncertainty and traffic congestion". *Advanced Engineering Informatics* **43**,pp. 101032, (2020).
 12. Zhang, C., Liu, J., Wan, Y. W., Murty, K. G. & Linn, R. J. "Storage space allocation in container terminals". *Transportation Research Part B: Methodological* **37** (10),pp. 883-903, (2003).
 13. Zhou, C., Zhao, Q. & Li, H. "Simulation optimization iteration approach on traffic integrated yard allocation problem in transshipment terminals". *Flexible Services and Manufacturing Journal*,pp. 1-26, (2020).
 14. Cheung, R. K., Li, C.-L. & Lin, W. "Interblock Crane Deployment in Container Terminals".

- Part E: Logistics and Transportation Review* **73**,pp. 168-184, (2015).
24. Wang, K., Zhen, L., Wang, S. & Laporte, G. "Column generation for the integrated berth allocation, quay crane assignment, and yard assignment problem". *Transportation Science* **52** (4),pp. 812-834, (2018).
 25. Liu, C. "Iterative heuristic for simultaneous allocations of berths, quay cranes, and yards under practical situations". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **133**,pp. 101814, (2020).
 26. Guo, W., Ji, M. & Zhu, H. "Collaborative Optimization of Berth Allocation and Yard Storage in Container Terminals". *Journal of Traffic and Transportation Engineering* **7**,pp. 56-70, (2019).
 27. Zhen, L. "Container yard template planning under uncertain maritime market". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **69**,pp. 199-217, (2014).
 28. Zhang, C., Wan, Y.-w., Liu, J. & Linn, R. J. "Dynamic crane deployment in container storage yards". *Transportation Research Part B: Methodological* **36** (6),pp. 537-555, (2002).
 29. Ma, H., Chung, S., Chan, H. & Cui, L. "An integrated model for berth and yard planning in container terminals with multi-continuous berth layout". *Annals of Operations Research* **273** (1-2),pp. 409-431, (2019).
 30. Meisel, F. & Bierwirth, C. "Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **45** (1),pp. 196-209, (2009).