

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

گلسا سروش نیا (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مهدی علینقیان* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی صنایع و مدیریت شریف (تابستان ۱۴۰۳)
دوری ۳۰، شماره ۱، ص. ۱۵-۲۵، (پژوهشی)

در این پژوهش، یک مدل یکپارچه برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به‌منظور بررسی مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی، مسئله تخصیص اسکله و مسئله استقرار جرثقیل محوطه با در نظر گرفتن تراکم ترافیک در افق برنامه‌ریزی روزانه ارائه می‌شود. براساس بررسی انجام شده، در این پژوهش، برای اولین بار این سه مسئله را با در نظر گرفتن عملیات محوطه، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. 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 به‌صورت گسسته در نظر گرفته شده است. به‌منظور جاوگیری از ایجاد ترافیک در خطوط عبوری محوطه ذخیره‌سازی، برای خطوط ظرفیتی از پیش تعیین شده است. همچنین ۵ نامعادله معتبر به‌منظور بهبود مدل ریاضی، تعریف و ارائه شده است. برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی ۳۲ نمونه براساس چارچوب تولید داده‌ها در ادبیات موضوع، تولید و نتایج حاصل از حل آنها ارائه شده است. نتایج به‌دست 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.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر با گسترش تجارت جهانی، حمل و نقل کالا بین کشورهای مختلف رشد روزافزونی داشته است. حمل و نقل دریایی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین روش‌های حمل و نقل جهانی نیز از این قاعده مستثنی نیست.^[۱] براساس گزارش‌های ارائه شده در سال ۲۰۲۰، بیش از ۶۰ درصد کالاهای جهان توسط کشتی‌های کانتینری جابجا شدند.^[۱] بنابراین، با رشد حمل و نقل کانتینری ضرورت بررسی مسائل مطرح در این حوزه را بیش از پیش می‌کند.

به‌طور کلی پایانه‌های کانتینری به دو بخش دریا و بخش خشکی تقسیم می‌شوند.^[۲] 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] به‌منظور دستیابی به یک جریان کانتینری پیوسته و بدون ایجاد گلوگاه در فرآیند عملیات پایانه‌ها نیاز است که

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۲/۲۵، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۹، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۲

استناد به این مقاله:

سروش نیا، گلسا و علینقیان، مهدی، ۱۴۰۳. حل یکپارچه مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی، مسئله تخصیص اسکله و مسئله استقرار جرثقیل محوطه. مهندسی صنایع و مدیریت

شریف، ۴۰(۱)، صص. ۱۵-۲۵. DOI:10.24200/J65.2023.59538.2272

استقرار را اختیار می‌کند و در دوره‌های بعد این پروفایل استقرار می‌تواند تغییر کند.

در بیشتر پژوهش‌ها، این مسائل به‌صورت 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 درحالی است که علاوه بر جرتقیل‌های اسکله، جرتقیل‌های 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 به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهد. علاوه بر این دو مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی و استقرار جرتقیل محوطه نیز معمولاً به‌صورت سلسه مراتبی 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 جرتقیل‌های محوطه مشخص می‌شود. در حالی که در تصمیم‌گیری برای محل ذخیره‌سازی کانتینرها می‌بایست عملکرد جرتقیل‌های محوطه نیز در نظر گرفته شود. در بعضی از موارد با تخصیص نامناسب محوطه ذخیره‌سازی و با وجود محدودیت تعداد جرتقیل‌های 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 به‌صورت یکپارچه تأثیر بسزایی در هزینه‌های بندر دارد و جواب‌های ناکارامدی را ایجاد می‌کند. بنابراین بررسی مسائل مطرح شده به‌صورت 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 جرتقیل محوطه با در نظر گرفتن تراکم ترافیک در خطوط عبوری به‌صورت یکپارچه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مسائل بیان شده ضمن ارتباط، بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. در مسئله مورد نظر کشتی‌ها به‌عنوان 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 بازبایی 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 جرتقیل محوطه نیز تأثیرگذار است. مکان ذخیره‌سازی گروه‌های کانتینری در محوطه بر توزیع حجم کاری جرتقیل‌های محوطه تأثیر می‌گذارد. همچنین زمان خروج کشتی‌ها به عملیات بازبایی و بارگذاری گروه‌های کانتینری آنها در محوطه وابسته است. بنابراین انتخاب پروفایل استقرار جرتقیل محوطه باید بر این اساس باشد که عملیات بارگذاری و بازبایی گروه‌های کانتینری مرتبط با کشتی‌هایی با اولویت بالاتر، در زودترین زمان ممکن انجام شود.

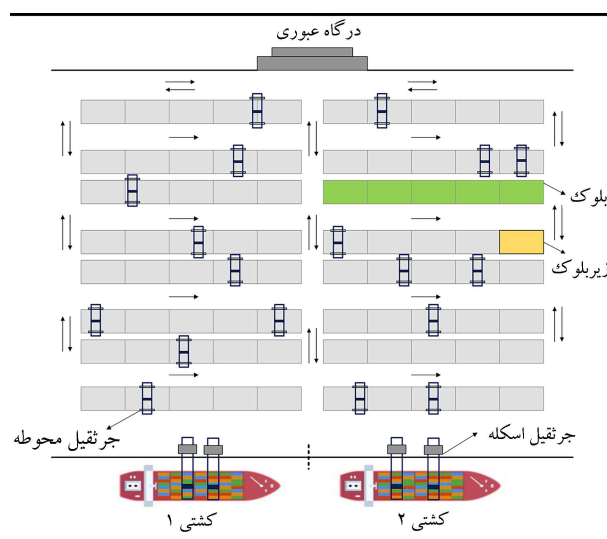
در ادامه، در بخش ۲، پیشینه پژوهشی موضوع مرور می‌شود. در بخش ۳، مسئله مربوطه تعریف و در بخش ۴ مدل ریاضی یکپارچه ارائه می‌گردد. در بخش ۵، عملکرد مدل ریاضی بررسی و ارزیابی و در بخش ۶، جمع بندی پایانی ارائه می‌شود.

محوطه ذخیره‌سازی کانتینرها شامل چندین بلوک است. بلوک‌های محوطه به چند زیربلوک^۱ تقسیم می‌شوند. کوچکترین واحد برای استراتژی ذخیره‌سازی در مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی یک «زیربلوک» است.^[۵] به‌عنوان 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.^[۴]

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 جرتقیل محوطه است.^[۳]

در مسئله استقرار جرتقیل محوطه، تعداد جرتقیل‌های به‌کارگرفته شده در هر بلوک محوطه و جابجایی جرتقیل‌ها بین بلوک‌ها تعیین می‌شود.^[۴] از آنجایی که جرتقیل‌ها تجهیزات گران‌قیمتی هستند، تأمین تعداد زیاد جرتقیل محوطه از نظر اقتصادی به‌صرفه نیست. به‌منظور به اتمام رساندن حجم کاری در کل محوطه ذخیره‌سازی نیاز است که در هر دوره پروفایل استقرار جرتقیل محوطه^۲ مناسب برای هر جرتقیل انتخاب و همچنین جرتقیل‌های محوطه بین بلوک‌های محوطه ذخیره‌سازی، جابجا شوند.

پروفایل استقرار جرتقیل محوطه، تعداد زیربلوک‌های یک بلوک که توسط یک جرتقیل در یک دوره پوشش داده می‌شود را مشخص می‌کند.^[۴] تعداد زیربلوک‌های یک بلوک که توسط هر جرتقیل پوشش داده می‌شود، تحت عنوان سطح دسترسی بیان می‌شود. مفهوم پروفایل استقرار جرتقیل محوطه، برای اولین بار توسط جین و همکاران^[۳] ارائه شده است. تفاوت پروفایل‌های استقرار جرتقیل در سطح دسترسی و ظرفیت جابجایی آنها است. ظرفیت جابجایی هر پروفایل استقرار جرتقیل محوطه براساس تعداد جابجایی‌ها جهت بازبایی 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، یک 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 جرتقیل در یک دوره تنها یک پروفایل



شکل ۱. نمای کلی پایانه کانتینری.

۲. مرور پیشینه پژوهشی

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] بر اساس بررسی نویسندگان مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی برای کانتینرها ورودی، خروجی و عبوری، اولین بار توسط ژانگ و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱۲] ژو و همکاران^[۱۳] دو مسئله تخصیص محوطه و تراکم در بلوک‌ها را با هدف کاهش زمان سفر هر کار مورد بررسی قرار دادند. چیونگ و همکاران.^[۱۴] لین و همکاران^[۱۵] و لین و ژانگ^[۱۶] 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^[۱۷] به صورت یکپارچه مسئله تخصیص محوطه و مسئله استقرار جرثقیل محوطه را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش آنها، بخش ذخیره‌سازی و همچنین زمان بازبایی و بارگذاری گروه‌های کانتینری در محوطه ذخیره‌سازی از پیش مشخص است. آنها یک الگوریتم ابتکاری بر پایه رویکرد حل تقسیم و غالبه^۲ 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^[۲] 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 سطح تصمیم‌گیری است.^[۱۹] طبق بررسی صورت گرفته، ایمای و همکاران^[۲۰] در سال ۱۹۹۷، برای اولین بار مسئله تخصیص اسکله را برای بتادر 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.

نتیجه حاصل از بررسی نویسندگان و بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که پژوهش‌های کمی مسئله تخصیص محوطه ذخیره‌سازی و مسئله استقرار جرثقیل محوطه را به صورت یکپارچه 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 عبارتند از:

- 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 به‌گونه‌ای 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)؛

۳.۳. مدل ریاضی

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

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

s.t.

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

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

$$\forall p, p' \in P, p \neq p', b \in B \quad (3)$$

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

$$\tau_{pp'b} + \tau_{p'pb} \geq w_{pb} + w_{p'b} - 1;$$

$$\forall p, p' \in P, p \neq p', b \in B \quad (5)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\alpha_{kt} - \sum_{t'=\{1, \dots, t\}} \beta'_{kt'} \leq \alpha_{k(t+1)};$$

$$\forall k \in K, t \in T \setminus \{T\} \quad (17)$$

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

$$\forall p, p' \in P, p \neq p', k \in K \quad (18)$$

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

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

f_k : نرخ بازیابی/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^1 : ضریب هزینه حمل و نقل کانتینرها در محوطه؛

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

c_p^1 : 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 به‌کارگرفته شده در بلوک $i \in I$ ؛

d_{max} : اکثر تعداد جرثقیل‌های فعال که می‌توانند به‌طور هم‌زمان در یک بلوک به‌کار گرفته شوند؛

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

Q_{Ω}^1 : ظرفیت تخصیص یافته به پروفایل جرثقیل $\omega \in \Omega$ ؛

Q_n^1 : ظرفیت خطوط عبوری $n \in N$ (تعداد جابجایی‌ها در هر دوره)؛

$\delta_{m\omega}$: اگر زیر بلوک $m \in M$ توسط چندمان 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 $p \in P$ بازیابی 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 به‌شرح زیر است:

x_{imk} : اگر زیر بلوک $m \in M$ بلوک $i \in I$ به گروه کانتینرهای $k \in K$ 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 $i \in I$ به‌کارگرفته 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 این 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 $p \in P$.

۱۸ تضمین می‌کند که زمان شروع عملیات کشتی‌هایی که گروه‌های کانتینری عبوری از آنها تخلیه می‌شوند باید قبل از زمان شروع عملیات کشتی‌هایی باشد که همان گروه‌های کانتینری بر آنها بارگذاری می‌شوند. محدودیت ۱۹ تخصیص زیر بلوک‌های مورد نیاز جهت ذخیره‌سازی گروه‌های کانتینری را نشان می‌دهد. محدودیت ۲۰ تضمین می‌کند که حداکثر به‌اندازه ظرفیت زیر بلوک‌ها، گروه‌های کانتینری در هر زیر بلوک محوطه ذخیره می‌شوند. محدودیت ۲۱ نشان می‌دهد برای انجام عملیات بازیابی/بارگذاری هر گروه کانتینری در هر زیر بلوک در هر دوره زمانی باید حداقل یک جرثقیل با پروفایل w وجود داشته باشد که آن زیر بلوک را در آن دوره پوشش دهد. محدودیت ۲۲ تضمین می‌کند که اگر در یک زیر بلوک عملیات بازیابی/بارگذاری انجام شود و آن زیر بلوک توسط پروفایل w 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_j 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 به‌کار 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 جایجا شده از همان بلوک و یا بلوک‌های دیگر نباید از حداکثر تعداد جرثقیل‌هایی که می‌توانند در یک بلوک به‌کار گرفته شوند، بیشتر باشد. محدودیت ۲۷ تضمین می‌کند که هر زیر بلوک 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.

۴.۳. خطی‌سازی

با توجه به اینکه مدل ریاضی ارائه شده غیرخطی است، در این بخش به خطی‌سازی 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. به‌منظور خطی‌سازی تابع هدف، دو متغیر θ'_{kimbp} و θ_{kimbp} به‌شرح 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 $m \in M$ بارگذاری شود و کشتی $p \in P$ به‌عنوان مبدأ این گروه کانتینری در اسکله $b \in B$ پهلو بگیرد یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

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

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

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

$$\theta_{kimbp} \leq x_{imk};$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\sum_{m \in M | \sigma_{mn} = 1} \left(\sum_{k \in K} f_k (\beta_{kt} + \beta'_{kt}) x_{imk} \right) \leq Q_n^t; \quad \forall n \in N, t \in T \quad (28)$$

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

$$x_{imk}, y_{\omega i}^t, \alpha_{kt}, \beta_{kt}, \beta'_{kt}, w_{pb}, \tau_{pp'b}, \mu_{pt}, NB_{pt} \in \{0, 1\} \\ \forall p, p' \in P, p \neq p', b \in B, k \in K, i \in I, t \in T, \omega \in \Omega \quad (30)$$

تابع هدف ۱ کلیه هزینه‌ها را حداقل می‌کند، این هزینه‌ها شامل هزینه عملیات جرثقیل محوطه، هزینه جایجایی جرثقیل محوطه بین بلوک‌ها، هزینه تأخیر کشتی‌ها، هزینه جایجایی گروه کانتینرهای بازیابی/بارگذاری شده بین زیر بلوک‌های محوطه و اسکله‌ها است. محدودیت ۲ نشان می‌دهد هر کشتی تنها به یک اسکله تخصیص می‌یابد. محدودیت ۳ بیانگر این مطلب است که اگر 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 می‌کنند اگر دو کشتی به یک اسکله تخصیص یابند، باید یک توالی برای استقرار دو کشتی در اسکله وجود داشته باشد. محدودیت ۶ نشان می‌دهد زمان شروع عملیات کشتی پس از زمان ورود کشتی به اسکله است. محدودیت ۷ بیانگر این مطلب است که 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 می‌کند 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 می‌کنند زمانی کار یک کشتی به‌تمام می‌رسد که تمامی گروه کانتینرهای مربوط به آن کشتی در محوطه بازیابی و یا بارگذاری شده باشند. محدودیت ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهند که عملیات بازیابی و بارگذاری گروه‌های کانتینری، پس از آغاز عملیات کشتی‌هایی است که از آن بازیابی و یا بر آنها بارگذاری می‌شوند. محدودیت ۱۵ نشان می‌دهد که گروه‌های کانتینری عبوری پس از حضور در محوطه، می‌توانند بارگذاری شوند. محدودیت ۱۶ بیانگر این «مطلب است که گروه‌های کانتینری عبوری پس از آغاز عملیات کشتی‌های مبدأ خود، در محوطه حضور دارند. محدودیت ۱۷ نشان می‌دهد که گروه‌های کانتینری عبوری در فاصله بین عملیات بارگذاری و بازیابی در محوطه به‌طور موقت ذخیره می‌شوند. محدودیت

$$\forall m \in M, i \in I, t \in T; \quad (51) \quad \forall k \in K, m \in M, i \in I, p \in P, b \in B \quad (33)$$

$$\sum_{m \in M | \delta_{m\omega} = 1} \left(\sum_{k \in K} f_k(\psi_{imkt} + \psi'_{imkt}) \right) \leq Q_{\omega}^r + (1 - y_{\omega}^t) \text{Big } M; \forall \omega \in \Omega, i \in I, t \in T \quad (52)$$

$$\theta'_{kimbp} \geq G'_{kp} w_{pb} + x_{imk} - 1; \quad (34)$$

$$\sum_{m \in M | \sigma_{mn} = 1} \left(\sum_{k \in K} f_k(\psi_{imkt} + \psi'_{imkt}) \right) \leq Q_n^r \quad \forall n \in N, t \in T \quad (53)$$

$$\theta'_{kimbp} \leq G'_{kp} w_{pb}; \quad (35)$$

$$\theta'_{kimbp} \leq x_{imk}; \quad (36)$$

$$\forall k \in K, m \in M, i \in I, p \in P, b \in B \quad (37)$$

$$\theta_{kimbp}, \theta'_{kimbp} \in \{0, 1\}; \quad (38)$$

$$\forall k \in K, m \in M, i \in I, p \in P, b \in B \quad (39)$$

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

برای خطی‌سازی محدودیت ۲۰ متغیر s_{imkt} تعریف، محدودیت‌های ۳۹ تا ۴۲ به مدل ریاضی اضافه و محدودیت ۴۳ جایگزین محدودیت ۲۰ می‌شود. s_{imkt} : اگر گروه کانتینر $k \in K$ در زمان $t \in T$ در زیر بلوک $m \in M$ بلوک $i \in I$ باشد یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

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

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

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

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

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

$$\sum_{k \in K} s_{imkt} \leq Q'_{im}; \forall m \in M, i \in I, t \in T \quad (43)$$

برای خطی‌سازی محدودیت‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۸ دو متغیر ψ_{imkt} و ψ'_{imkt} به شرح زیر تعریف و محدودیت‌های ۴۴ تا ۵۰ به مدل ریاضی اضافه و محدودیت‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ به ترتیب به صورت محدودیت‌های ۵۱، ۵۲ و ۵۳ بازنویسی می‌شوند. ψ_{imkt} : اگر گروه کانتینر $k \in K$ در زمان $t \in T$ در زیر بلوک $m \in M$ 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 زیر بلوک $m \in M$ بلوک $i \in I$ در حالت بازبایی باشد یک و در غیر این صورت صفر می‌شود.

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

$$\forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T \quad (45)$$

$$\psi_{imkt} \leq \beta_{kt}; \forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T \quad (46)$$

$$\psi_{imkt} \leq x_{imk}; \forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T \quad (47)$$

$$\psi'_{imkt} \geq \beta'_{kt} + x_{imk} - 1 \quad (48)$$

$$\forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T \quad (49)$$

$$\psi'_{imkt} \leq \beta'_{kt}; \forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T \quad (50)$$

$$\psi_{imkt}, \psi'_{imkt} \in \{0, 1\}; \forall m \in M, i \in I, k \in K, t \in T \quad (50)$$

$$\sum_{k \in K} (\psi_{imkt} + \psi'_{imkt}) \leq \sum_{\omega \in \Omega} \delta_{m\omega} y_{\omega}^t$$

۵.۳. نامعادلات معتبر

به منظور کاهش زمان حل و با توجه به فرضیات و ساختار مسئله، نامعادلات معتبری در ادامه ارائه می‌شود. نامعادلات ۵۴ تا ۵۸ به منظور کاهش فضای جواب به مسئله اصلی اضافه می‌شود.

۴. نتایج محاسباتی

در این بخش نتایج عددی به منظور ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی ارائه شده است. مدل ریاضی در نرم افزار GAMS ۲۷٫۳٫۰ و کد شده و با استفاده از حل کننده GUROBI ۸٫۱٫۱ حل شدند. نمونه‌ها در کامپیوتری با مشخصات ۴ GB RAM و ۳ GHz Intel Core i۷ CPU اجرا شده‌اند. محدودیت زمانی برای تمامی نمونه‌ها ۳ ساعت (۱۰۸۰۰ ثانیه) است.

۱.۴. تولید نمونه

برای بررسی صحت مدل پیشنهادی نمونه‌های آزمایشی براساس اطلاعات ارائه شده در ادبیات موضوع، تولید و ارائه می‌شوند. افق برنامه‌ریزی به صورت روزانه است که

جدول ۱. پارامترهای نمونه.

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

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.

همچنین، با توجه به نتایج به دست 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. در مجموعه نمونه‌های چهارم با میانگین شکاف کمتری به جوابی نزدیک جواب 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 بررسی می‌شود: سناریوی یکپارچه و سناریوی غیریکپارچه. در مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله، سناریوی یکپارچه مورد بررسی قرار گرفته است. برای سناریوی غیریکپارچه، ابتدا مسئله 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، سناریوی 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 سناریوی دوم در نظر می‌گیریم. تابع هدف بخش دوم، شامل هزینه‌های به‌کارگیری و جابه‌جایی جرثقیل‌های محوطه است. به منظور مقایسه دو سناریو ارائه شده، جمع کل هزینه‌ها در نظر گرفته می‌شود. در سناریوی دوم هزینه جابه‌جایی بین اسکله‌ها و زیربلاک‌های 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 زیربلاک‌ها و اسکله‌ها در تابع هدف بخش اول و دوم سناریوی غیریکپارچه بی‌تأثیر است و تنها جهت مقایسه هزینه کل عملیات کانتینری سناریوی غیریکپارچه با سناریوی یکپارچه

این افق به ۱۲ دوره ۲ ساعته تقسیم می‌شود. هر زیربلاک، به طور متوسط ظرفیتی برابر با یک گروه کانتینری دارد. به طور کلی، محوطه ذخیره‌سازی دارای ۲۰۰۰ متر اسکله و ۷۲ بلاک (۳۶۰ زیربلاک) است و مختصات بلاک‌ها و اسکله‌ها مطابق با فواصل بیان شده در پژوهش زن^[۲۷] محاسبه شده است. به طور کلی، ۵ اسکله با طول یکسان برای پهلو گرفتن کشتی‌ها وجود دارد. در این پژوهش، حداکثر ۴۸ بلاک در نظر گرفته شده است. فاصله بین اسکله‌ها و زیربلاک‌های محوطه به صورت اقلیدسی از مختصات مرکز اسکله‌ها تا هر یک از زیربلاک‌ها در نظر گرفته شده است. ضریب هزینه حمل و نقل کانتینرها در محوطه 5×10^{-3} دلار به ازای هر کانتینر در هر متر جابه‌جایی در محوطه است.^[۲۷] در این پژوهش، در هر جابه‌جایی بین هر زیربلاک و اسکله به طور متوسط ۲۰۰ کانتینر در هر دوره جابه‌جایی می‌شود. بنابراین ضریب هزینه جابه‌جایی کانتینرها در محوطه مقدار ۱ در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت پروفایل جرثقیل محوطه بین $[30, 50]$ حرکت در هر دوره تعیین شده است. نرخ بازیابی/بارگذاری هر گروه کانتینر به صورت یکنواخت در بازه $[10, 40]$ حرکت در هر دوره توزیع شده است.^[۲] 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 زیربلاک فضا جهت ذخیره‌سازی (q_k) نیاز دارد.^[۲] در ارتباط با توزیع اولیه جرثقیل‌های محوطه دو حالت A و B در نظر گرفته می‌شود. در حالت A به ازای هر دو بلاک، ۳ جرثقیل از ابتدای دوره در بلاک‌ها استقرار یافته است. در حالت B در هر بلاک یک جرثقیل از ابتدای هر دوره وجود دارد. هزینه جابه‌جایی جرثقیل‌ها بین بلاک‌های محوطه بر اساس داده‌های ارائه شده در مقاله ژانگ و همکاران^[۲۸] بین $[10, 75]$ تعیین شده است. باید به این نکته توجه شود که جرثقیل‌های محوطه تنها می‌توانند بین بلاک‌های ستون مجاور جابه‌جا شوند.^[۲] ظرفیت ترافیک تمامی خطوط عبوری ۲۰۰ جابه‌جایی در هر دوره تعیین شده است.^[۲] حد پایین، جواب به دست 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 به دست 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 زیربلاک‌ها 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 $[720, 1680]$ واحدهای معادل ۲۰ فوتی (TEUs)^۴ تعیین می‌شود.^[۲۹] ضریب تأخیر کشتی متوسط به طور تصادفی در بازه $[6000, 10000]$ در مجموع ۴ مجموعه نمونه، تولید شده است. پارامترهای هر مجموعه در جدول ۱ آمده است. پارامترهای ثابت هر مجموعه به ترتیب تعداد بلاک‌ها، تعداد کانتینرها، تعداد کشتی‌ها و تعداد اسکله‌ها می‌باشد. 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.

۲.۴. نتایج عددی

نتایج حاصل از حل نمونه‌های تولید شده توسط مدل ریاضی یکپارچه، جدول ۲ تا ۵ ارائه شده است. نتایج عددی برای هر مجموعه از نمونه‌ها بر اساس دو حالت

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	۳۷۵۴۹/۷۷۸	۳۷۵۴۹/۷۷۸	۸۸	۳۷۵۴۹/۷۷۸	۳۷۵۴۹/۷۷۸	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	۱۰۰۰	۵۳۳۳۰/۵۴	۵۳۳۱۴/۸۹	۱۰۰۰	۵۳۴۱۴/۵۷	۵۳۳۰۲/۳۳	۳	۷	A	set4-1
۳/۸۶	۴/۳۳	۱۰۰۰	۷۳۶۲۸/۰۱	۷۶۵۹۰/۹۶	۱۰۰۰	۷۶۹۲۲/۹۶	۷۳۵۹۵/۷۹	۴	۱۰	A	set4-2
۳/۹۴	۴/۷۳	۱۰۰۰	۸۷۶۹۸/۱۸	۸۴۲۴۱/۹۵	۱۰۰۰	۸۸۰۲۱/۷۲	۸۳۸۵۶/۷۳	۵	۱۱	A	set4-3
۲/۴۳	۳/۲۱	۱۰۰۰	۱۰۱۶۷۸/۸	۹۹۲۰۴/۱۶	۱۰۰۰	۱۰۱۷۷۹/۱	۹۸۵۱۴/۹۴	۵	۱۲	A	set4-4
۰/۱۷	۰/۲۱	۱۰۰۰	۵۳۴۱۷/۵۷	۵۳۳۲۵/۶۶	۱۰۰۰	۵۳۴۱۸/۶۷	۵۳۳۰۱/۴۶	۳	۷	B	set4-1
۳/۲	۳/۶۳	۱۰۰۰	۷۶۶۸۵/۷۹	۷۴۲۳۰/۶۷	۱۰۰۰	۷۶۷۱۷/۶۷	۷۳۹۲۸/۳۴	۴	۱۰	B	set4-2
۳/۹۳	۴/۷	۱۰۰۰	۸۷۶۹۵/۳۱	۸۴۰۵۶/۳۸	۱۰۰۰	۸۷۷۲۶/۳۲	۸۳۶۰۴/۰۸	۵	۱۱	B	set4-3
۴/۷۶	۴/۹۷	۱۰۰۰	۱۰۳۵۱۷/۵	۹۸۵۸۸/۸۱	۱۰۰۰	۱۰۳۷۳۹/۵	۹۸۵۷۴/۵۸	۵	۱۲	B	set4-4
۲/۷۹	۳/۲۵										میانگین

جدول ۶. مقایسه بین هزینه کل دو سناریوی یکپارچه و غیر یکپارچه در نمونه B - ۴ - set ۲.

نمونه	شماره	هزینه کل در سناریو		بهبود (%)
		یکپارچه	غیر یکپارچه	
set ۲ - ۴ - B	۱	۵۷۲۷۷,۴۸۵	۷۸۶۰۱۸,۹۲۷	۱۲,۷۲۳
	۲	۵۷۴۵۲,۶۵	۸۶۸۹۷۱,۳۲۸	۱۲,۱۲۵
	۳	۵۷۲۳۰,۱۹۴	۸۳۹۵۶۶,۹۴۵	۱۳,۶۷
	۴	۵۷۷۷۹,۰۱۲	۹۲۵۷۳۵,۳۲۶	۱۲,۰۲۲
	۵	۵۷۸۷۴,۴۵۷	۱۰۰۸۳۴۶,۶۶۷	۱۶,۴۲۳
	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
	میانگین			۱۴,۳۰۱۱

این هزینه محاسبه می‌شود. بنابراین، هزینه کل در هر دو سناریوی یکپارچه و غیر یکپارچه 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 سناریوی یکپارچه و غیر یکپارچه برای ۱۰ مثال عددی تولید شده از نمونه B - ۴ - set ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در نمونه B - ۴ - set ۲ بین ۱۰/۸ درصد و ۱۷/۲ درصد بهبود در هزینه کل در سناریوی یکپارچه حاصل شده است. نتایج ارائه شده حاصل از حل مدل ریاضی مربوطه بدون در نظر گرفتن نامعادلات معتبر است.

پهلویی‌گیری کشتی‌ها در اسکله است. زمان تخلیه و بارگذاری گروه‌های کانتینری از جمله عواملی است که بر مدت زمان پهلویی‌گیری کشتی‌ها تأثیر می‌گذارد. به‌دلایلی 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 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 به‌دست آمده، با یکپارچه در نظر گرفتن مسائل بیان شده، به‌طور میانگین ۱۴/۳۰ درصد بهبود در هزینه‌ها نسبت به حالت غیر یکپارچه 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 بعدی 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 به‌منظور کاهش زمان حل نیز بهره برد. همچنین، می‌توان مسئله تخصیص جرثقیل اسکله و یا زمان‌بندی کامیون‌های محوطه را نیز به‌صورت یکپارچه با مسائل بیان شده در نظر گرفت.

۶. نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، به‌دلیل 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

پانوشتها

1. Sub-Block
2. Yard Crane Deployment Profile
3. Divide-And-Conquer Solution Approach
4. Twenty Feet Equivalent Units

منابع (References)

1. Balakrishnan, A., Karsten, C.V., 2017. Container shipping service selection and cargo routing with transshipment limits. *European Journal of Operational Research*, 263(2), pp.652-663. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.031>.
2. Ahmed, E., El-Abbasy, M.S., Zayed, T., Alfalah, G. and Alkass, S., 2021. Synchronized scheduling model for container terminals using simulated double-cycling strategy. *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107118>.
3. Jin, J.G., Lee, D.H. and Cao, J.X., 2016. Storage yard management in maritime container terminals. *Transportation Science*, 50(4), pp.1300-1313. doi:10.1287/trsc.2014.0527.
4. Han, Y., Lee, L.H., Chew, E.P. and Tan, K.C., 2008. A yard storage strategy for minimizing traffic congestion in a marine container transshipment hub. *OR spectrum*, 30(4), pp.697-720. doi:10.1007/s00291-008-0127-6.
5. Jiang, X., Lee, L.H., Chew, E.P., Han, Y. and Tan, K.C., 2012. A container yard storage strategy for improving land utilization and operation efficiency in a transshipment hub port. *European Journal of Operational Research*, 221(1), pp.64-73. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.03.011>.
6. Vis IFA, De Koster R., 2003. Transshipment of containers at a container terminal: An overview. *European Journal of Operational Research*, 147(1), pp.1-16. doi:10.1016/S0377-2217(02)00293-X.
7. Steenken D, Voß, S. and Stahlbock, R., 2004. Container terminal operation and operations research - A classification and literature review. *OR Spectrum*, 26(1), pp.3-49. doi:10.1007/s00291-003-0157-z.
8. Stahlbock R, Voß, S., 2008. Operations research at container terminals: A literature update. *OR Spectrum*, 30(1), pp.1-52. doi:10.1007/s00291-007-0100-9.
9. Bierwirth, C. and Meisel, F., 2010. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 202(3), pp.615-627. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.031>.
10. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J., 2014. Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions. *European Journal of Operational Research*, 235(2), pp.412-430. doi:10.1016/j.ejor.2013.10.054.
11. He, J., Tan, C., Yan, W., Huang, W., Liu, M. and Yu, H., 2020. Two-stage stochastic programming model for generating container yard template under uncertainty and traffic congestion. *Advanced Engineering Informatics*, 43, 101032. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101032>.
12. Zhang, C., Liu, J., Wan, Y.W., Murty, K.G. and Linn, R.J., 2003. Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(10), pp.883-903. doi:10.1016/S0191-2615(02)00089-9.
13. Zhou, C., Zhao, Q. and Li, H., 2020. Simulation optimization iteration approach on traffic integrated yard allocation problem in transshipment terminals. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, pp.1-26. DOI:10.1007/s10696-020-09393-5.
14. Cheung, R.K., Li, C-L. and Lin, W., 2002. Interblock crane deployment in container terminals. *Transportation Science*, 36(1), pp.79-93. doi: 10.1287/trsc.36.1.79.568.
15. Linn, R., Liu, J-y., Wan, Y-w., Zhang, C. and Murty, K.G., 2003. Rubber tired gantry crane deployment for container yard operation. *Computers & Industrial Engineering*, 45(3), pp.429-442. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(03\)00046-9](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(03)00046-9).
16. Linn, R.J. and Zhang, C-Q., 2003. A heuristic for dynamic yard crane deployment in a container terminal. *IIE transactions*, 35(2), pp.161-174. doi:<https://doi.org/10.1080/07408170304384>.
17. Jiang, X.J. and Jin, J.G., 2017. 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.12.014>.
18. Zhen, L., Chew, E.P. and Lee, L.H., 2011. An integrated model for berth template and yard template planning in transshipment hubs. *Transportation Science*, 45(4), pp.483-504. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.1100.0364>.
19. Giallombardo, G., Moccia, L., Salani, M. and Vacca, I., 2010. Modeling and solving the tactical berth allocation problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(2), pp.232-245. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.07.003>.
20. Imai, A., Nagaiwa, K.I. and Tat, C.W., 1997. Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia. *Journal of Advanced transportation*, 31(1), pp.75-94. doi: <https://doi.org/10.1002/atr.5670310107>.
21. Hendriks, M., Lefeber, E. and Udding, J.T., 2013. Simultaneous berth allocation and yard planning at tactical level. *OR spectrum*, 35(2), pp.441-456. doi:10.1007/s00291-012-0305-4.
22. Lee, D.H. and Jin, J.G., 2013. Feeder vessel management at container transshipment terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), pp.201-216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2012.08.006>.
23. Jin, J.G., Lee, D.H. and Hu, H., 2015. Tactical berth and yard template design at container transshipment terminals: A column generation based approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 73, pp.168-184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.11.009>.
24. Wang, K., Zhen, L., Wang, S. and Laporte, G., 2018. Column generation for the integrated berth allocation, quay crane assignment, and yard assignment problem. *Transportation Science*, 52(4), pp.812-834. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0822>.

25. Liu, C., 2020. Iterative heuristic for simultaneous allocations of berths, quay cranes, and yards under practical situations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 133, p.101814. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.11.008>.
26. Guo, W., Ji, M. and Zhu, H., 2019. Collaborative optimization of berth allocation and yard storage in container terminals. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7, pp.56-70. doi:10.17265/2328-2142/2019.02.002.
27. Zhen, L., 2014. Container yard template planning under uncertain maritime market. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 69, pp.199-217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.06.011>.
28. Zhang, C., Wan, Y.w., Liu, J. and Linn, R.J., 2002. Dynamic crane deployment in container storage yards. *Transportation research Part B: Methodological*, 36(6), pp.537-555. doi: [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(01\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(01)00017-0).
29. Ma, H., Chung, S., Chan, H. and Cui, L., 2019. 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. doi: 10.1007/s10479-017-2577-1.
30. Meisel, F. and Bierwirth, C., 2009. 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.03.001>