Archive of SID.ir

(مقاله پژوهشی)

برنامه‌ریزی مجدد برنامه اولیه پهلوگاه در شرایط وقوع اختلال

علی امیدوارپناه احمدآبادی [۱]، عبدالرضا شیخ‌الاسامی کندلوس [۲]

Sheikh@iust.ac.ir

۱- کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، گرایش برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه علم‌وصنعت ایران
۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، گرایش برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه علم‌وصنعت ایران

چکیده

بندرها به‌عنوان مراکز مهمی محسوب می شوند که حمل‌ونقل دریایی را به سایر روش‌های حمل‌ونقل متصل می‌کنند. ازاین‌جهت، بندرها را زیرساخت‌های مهمی برای حمل‌ونقل کالا، تجارت و اقتصاد جهانی می‌دانند؛ بنابراین، بهینه‌سازی برنامه‌ها و عملیات بندر، نقش بسیار مهمی در هزینه‌های حمل کالا و درآمدهای بندر خواهد دا شت. برنامه‌ریزی پهلوگاه بخ شی از عملیات بندر می‌با شد که شامل دو م سئله تخ صیص پهلوگاه و تخ صیص جرثقیل ا سکله می شود که حل بهینه این دو م سئله می‌تواند بر روی سرعت و هزینه حمل کالا تأثیرگذار باشد. در این مقاله دو مسئله تخصیص پهلوگاه و تخصیص جرثقیل اسکله به‌صورت ادغامی مدل‌سازی و با استفاده از چهار الگوریتم فراابتکاری (GA, ICA, TS, ACO) حل می‌شوند. از آنجائی که برنامه‌ریزی پهلوگاه در یک محیط دارای اختلال قرار دارد و ممکن است اتفاقات پیش‌بینی‌نشده‌ای در حین اجرای برنامه رخ دهد و هزینه‌های مضاعفی را برای بندر دربر داشته باشند و یا حتی مانع از اجرای برنامه اولیه شوند، برنامه‌ریزی مجدد برنامه اولیه پهلوگاه در شرایط وقوع اختلال الزامی می‌باشد. این مقاله برای یافتن روش بهینه برنامه‌ریزی مجدد پهلوگاه، دو روش برنامه‌ریزی مجدد سرا سری و محلی را همراه با الگوریتم‌های فراابتکاری به کار گرفته ا ست. نتایج این مقاله عملکرد مناسب دو الگوریتم GA و ICA را در حل مدل برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه و برنامه‌ریزی مجدد سراسری نشان می‌دهد. تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان در کم‌ترین زمان ممکن، به بهترین پاسخ ممکن در روش برنامه‌ریزی مجدد محلی منتج می‌شود. ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها و روش‌های حل این مقاله با استفاده از داده‌های ورود و خروج کشتی‌ها در بندر شهید رجایی انجام می‌گیرد.

واژگان کلیدی: م سئله تخ صیص پهلوگاه، م سئله تخ صیص جرثقیل ا سکله، برنامه‌ریزی مجدد پهلوگاه، روش محلی، روش سراسری، مدیریت اختلال

CC BY NC

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۲
تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۰۷

DOI: ۱۰,۲۲۰۳٤/ijmt.۲۰۲۲,٥٤۱٥۲۰,۱۷۱٦

صص ۱۱۹-۱۰۱

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

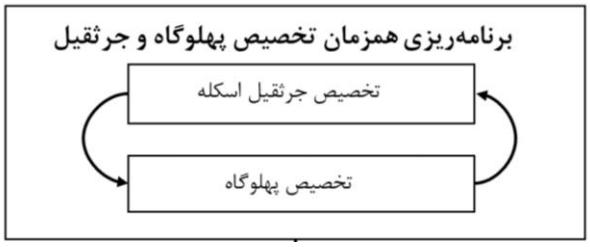
۱- مقدمه

حمل‌ونقل دریایی در تجارت بین‌الملل نقش پراهمیتی ایفا می‌کند؛ تا جایی که ازنظر حجمی حدود ۷۵ درصد و ازنظر ارزش بیش از ۶۰ درصد کالاها از طریق دریا حمل می‌شوند[۱]؛ بنابراین می‌توان حمل‌ونقل دریایی را یکی از مهم‌ترین رکن‌های زنجیره تأمین جهانی دانست. از طرفی، بندرها به‌عنوان مرکزهای مهمی محسوب می‌شوند که حمل‌ونقل دریایی را به سایر روش‌های حمل‌ونقل وصل می‌کنند. ازاین‌جهت، بندرها را زیرساخت‌های مهمی برای حمل‌ونقل کالا و تجارت بین‌الملل و اقتصاد جهانی می‌دانند. درنتیجه، بهینه‌سازی برنامه‌ها و رویه‌های روزانه بندر می‌تواند جابجایی کالاها در شبکه حمل‌ونقل را ساده‌تر کند و درعین‌حال تأخیر در تحویل کالا به خریداران را هم کاهش دهد. رشد پدیده کانتینری شدن حمل کالا، بندرها را به سمت ایجاد زیرساخت‌های پایانه‌های کانتینری هدایت کرده است.

پایانه‌های کانتینری را می‌توان به پنج بخش اصلی تقسیم کرد[۲]: پهلوگاه، اسکله، محوطه جابجایی کانتینرها، محوطه انبار و دروازه پایانه. ناحیه‌های پهلوگاه و اسکله اصطلاحاً به‌عنوان جانب دریا[۱] در نظر گرفته می‌شوند، درحالی‌که ناحیه‌های محوطه کانتینری و دروازه پایانه به‌عنوان جانب خشکی[۲] در نظر گرفته می‌شوند و محوطه جابجایی کانتینرها، در تقاطع بین این دو ناحیه قرار دارد. تمرکز این مقاله بر روی عملیاتی است که در ناحیه جانب دریا (پهلوگاه) رخ می‌دهند.

به‌طورکلی عملیات جانب دریا را شامل سه مسئله می‌دانند[۳, ۴]: مسئله تخصیص پهلوگاه (BAP)[۳]، مسئله تخصیص جرثقیل اسکله (QCAP)[۴] و مسئله برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله (QCSP)[۵]. مسئله تخصیص پهلوگاه زمان و مکان پهلوگیری کشتی‌ها را مشخص می‌کند. مسئله تخصیص جرثقیل اسکله تعداد جرثقیل‌های اسکله‌ای که در هر بازه زمانی بر روی کشتی‌ها فعالیت می‌کنند را مشخص می‌کند و مسئله برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله مشخص می‌کند کدام جرثقیل در هر بازه زمانی بر روی کشتی فعالیت کند.

در سال‌های گذشته مسائل جانب دریا به‌صورت جداگانه مدل‌سازی و حل می‌شدند؛ اما با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی ریاضی مسائل به‌هم‌پیوسته، توجه بیشتری به سمت بررسی هم‌زمان و یا به عبارت بهتر، ادغام مسائل عملیات جانب دریا سوق داده شد. بهینه‌سازی سلسله‌مراتبی در عملیات جانب دریا معایبی همچون پاسخ‌های ضعیف، غیر بهینه و یا حتی پاسخ‌های امکان‌ناپذیر دارد. این امر به این دلیل است که تصمیمات مراحل اولیه، بدون در نظر گرفتن اثرات دنباله‌دار این تصمیم‌ها در مراحل بعدی، اتخاذ می‌شود. به‌عنوان‌مثال هر چه تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده به کشتی کمتر باشد، کانتینرهای کشتی در مدت زمان بیشتری تخلیه/بارگیری می‌شوند و درنتیجه مدت زمان حضور کشتی در بندر طولانی‌تر می‌شود؛ بنابراین اگر مسئله تخصیص پهلوگاه و مسئله تخصیص جرثقیل اسکله به‌صورت جداگانه مدل‌سازی و حل شوند، ممکن است منجر به پاسخ‌های غیر بهینه و یا حتی امکان‌ناپذیر شود. به همین دلیل در مقاله حاضر دو مسئله تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله در قالب یک مدل ادغامی مدل‌سازی می‌کند و سپس با استفاده از الگوریتم‌های فرابتکاری به حل آن می‌پردازد. در برنامه‌ریزی ادغامی پهلوگاه، به نحوی دو مسئله حل می‌شوند که تأثیر پاسخ‌های آن‌ها بر روی یکدیگر نیز در نظر گرفته شود. شکل ۱ نمایی از برنامه‌ریزی ادغامی پهلوگاه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ابتدا مسئله تخصیص پهلوگاه حل می‌شود و با توجه به تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده به کشتی، مدت زمان حضور کشتی در



شکل (۱) نمایی از برنامه‌ریزی ادغامی پهلوگاه

بندر مشخص می‌شود. سپس مسئله تخصیص پهلوگاه حل می‌شود.

محیط برنامه‌ریزی پهلوگاه با عدم قطعیت‌های زیادی روبه‌رو است. برخی از این عدم قطعیت‌ها قابل پیش‌بینی هستند

[۱] Seaside
[۲] Landside
[۳] Berth Allocation Problem (BAP)
[۴] Quay Crane Assignment Problem (QCAP)
[۵] Quay Crane Scheduling Problem (QCSP)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

(مانند تأخیر در ورود کشتی‌ها) و می‌توان پیش از برنامه‌ریزی آن‌ها را در محاسبه کرد؛ اما برخی دیگر از این عدم قطعیت‌ها غیرقابل‌پیش‌بینی هستند و نمی‌توان پیش از برنامه‌ریزی، آن‌ها را در نظر گرفت (مانند خرابی تجهیزات، عدم دقت در اطلاعات کشتی‌ها، جزر و مد دریا و...). به دسته دوم عدم قطعیت‌ها، اختلال[۱] گفته می‌شود که وقوع آن‌ها هزینه‌هایی را به بندر تحمیل می‌کند و در برخی اوقات، اجرای برنامه اولیه را با مشکل مواجه می‌کند؛ به همین دلیل برنامه اولیه عملیات جانب دریا باید بازبینی شود تا هم قابل‌اجرا باشد و هم هزینه کمتری به بندر تحمیل کند. نمونه‌ای از این اختلال را می‌توان در تأخیر عملیات بندر شهید رجایی پس از حملات سایبری اسرائیل در اردیبهشت سال ۱۳۹۹ مشاهده کرد. طبق اخبار منتشر شده، این حمله سایبری موجب اختلال گسترده در عملیات بندر شهید رجایی شد به‌گونه‌ای که تعداد زیادی از کشتی‌ها در صف انتظار پهلوگیری در بندر شهید رجایی بودند [۵].

بازبینی برنامه اولیه پهلوگاه با دو روش کلی انجام می‌گیرد[۶]؛ برنامه‌ریزی مجدد سراسری[۲] و برنامه‌ریزی مجدد محلی[۳]. در برنامه‌ریزی مجدد سراسری تمام کشتی‌هایی که زمان پهلوگیری‌شان پس از وقوع اختلال بوده، موردتوجه قرار می‌گیرند. در برنامه‌ریزی مجدد محلی، فقط کشتی‌هایی موردتوجه قرار می‌گیرند که از پدیده اختلال تأثیر پذیرفته باشند. هدف اصلی این مقاله، انتخاب الگوریتم فراابتکاری مناسب برای هرکدام از این روش‌های برنامه‌ریزی مجدد است. تا آنجا که نویسندگان این مقاله جستجو کردند، تاکنون هیچ مقاله فارسی یا لاتین به بررسی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در روش‌های برنامه‌ریزی مجدد نپرداختند.

در ادامه این مقاله، ابتدا مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در رابطه با برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه و بازبینی آن، انجام می‌گیرد. در بخش سوم، مدل‌سازی ادغامی دو مسئله تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله انجام می‌شود. با استفاده از مدل تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله، برنامه اولیه پهلوگاه تدوین می‌شود. در بخش چهارم دو روش برنامه‌ریزی مجدد سراسری و محلی توضیح داده خواهند شد. در بخش پنجم تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فراابتکاری انجام می‌گیرد. در بخش ششم داده‌های استفاده شده در این مقاله شرح داده شدند. در دو بخش هفتم و هشتم با حل مدل‌های ریاضی، برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه و برنامه‌ریزی مجدد در شرایط وقوع اختلال انجام می‌گیرد. در بخش انتهایی، نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش به‌صورت خلاصه نوشته می‌شوند.

۲- مروری بر ادبیات پژوهش

در سال‌های اخیر، مطالعات و پژوهش‌های زیادی به بررسی برنامه‌ریزی پهلوگاه پرداختند. تابه‌حال سه مقاله مدل‌های برنامه‌ریزی پهلوگاه را مرور و دسته‌بندی کردند [۲-۴].

آقایان بایِرورث و مایسل در مقاله‌های [۳, ۴] مسائل برنامه‌ریزی پهلوگاه را بر اساس سه مشخصه دسته‌بندی کردند؛ پیکربندی پهلوگاه[۴]، زمان ورود کشتی[۵]، زمان تخلیه/بارگیری[۶].

- پیکربندی پهلوگاه به چهار دسته (گسسته[۷]، پیوسته[۸]، ترکیبی[۹] و تورفته[۱۰]) تقسیم می‌شود. در پهلوگاه‌های گسسته، طول پهلوگاه به قسمت‌های مجزایی تقسیم می‌شود و کشتی‌ها فقط می‌توانند در این قسمت‌ها پهلوگیری کنند. اگر کشتی‌ها بتوانند در هر مکانی از طول پهلوگاه قرار بگیرند و عملیات تخلیه/بارگیری‌شان را انجام دهند، پهلوگاه از نوع پیوسته خواهد بود. اگر ترکیبی از پهلوگاه‌های پیوسته و گسسته باشد، یعنی پهلوگاه به قسمت‌های مجزایی تقسیم شده باشد اما کشتی‌های بتوانند بیش از یک قسمت را اشغال کنند، نوع پهلوگاه ترکیبی می‌شود. نوع دیگری از پهلوگاه وجود دارند که مناسب کشتی‌های اقیانوس‌پیما با تعداد کانتینرهای بسیار زیاد است. در این نوع از پهلوگاه‌ها، جرثقیل‌های اسکله می‌توانند از هر دو سمت کشتی، عملیات تخلیه/بارگیری را انجام دهند و در نتیجه سرعت تخلیه/بارگیری کانتینرها افزایش پیدا می‌کند. این نوع از پهلوگاه‌ها را با عنوان پهلوگاه تورفته می‌شناسند.

[۱] Disruption
[۲] Global Rescheduling (GR)
[۳] Local Rescheduling (LR)
[۴] Berth Layouts
[۵] Vessel's Arrival Time
[۶] Handling Time
[۷] Discrete Berth
[۸] Continues Berth
[۹] Hybrid Berth
[۱۰] Indented Berth

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

- زمان ورود کشتی‌ها به دو صورت در نظر گرفته می‌شود؛ ایستا[۱] و پویا[۲]. در حالت ایستا فرض بر این است که همه کشتی‌ها در یک زمان وارد بندر می‌شوند؛ اما در حالت پویا زمان ورود کشتی‌ها شناور است و می‌توانند در هر زمانی که بخواهند وارد بندر شوند.
- زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها به دو روش ثابت و متغیر درنظر گرفته می‌شود. در روش متغیر، زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها وابسته به برنامه پهلوگاه می‌باشد؛ به‌عنوان‌مثال هر چه تعداد جرثقیل‌های اسکله تخصیص داده شده به کشتی‌ها بیشتر باشد، زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها کمتر می‌شود؛ اما در روش ثابت، فرض بر این است که تخلیه/بارگیری کشتی‌ها در مدت زمان ثابتی انجام می‌گیرد.

آقای لیانگ و همکارانش دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت ادغامی مدل‌سازی کردند. در مقاله آن‌ها پهلوگاه‌های گسسته با هدف کمینه کردن مجموع زمان عملیات تخلیه/بارگیری، زمان تأخیر و زمان انتظار کشتی‌ها مدل‌سازی شد. آن‌ها برای حل مدلشان از الگوریتم ژنتیک ترکیبی استفاده کردند [۷].

واکا و همکارانش برنامه‌ریزی پهلوگاه را در سطح تاکتیکی انجام دادند. در مقاله آن‌ها دو مسئله BAP و QCAP را در یک مدل ادغامی قرار گرفت و برای حل آن مدل، از روش حل دقیق (الگوریتم شاخه و قیمت) استفاده شد. واکا و همکارانش ادعا کردند که برای اولین بار از این الگوریتم برای حل دو مسئله BAP و QCAP استفاده می‌شود. نتایج مقاله آن‌ها نشان داد که استفاده از رویکرد مدل‌سازی ادغامی نسبت به رویکرد سنتی سلسله مراتبی (مدل‌سازی هر سه مسئله به‌صورت مجزا)، به نتایج بهتری منتج می‌شود؛ به عبارت بهتر، هم ازنظر کاهش هزینه‌ها و هم ازنظر استفاده بهینه از منابع، عملکرد بهتری دارد[۸].

لالا رویز و همکارانش، برنامه‌ریزی پهلوگاه را در سطح تاکتیکی مورد بررسی قرار دادند. در مقاله آن‌ها دو مسئله BAP و QCAP و با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از جابجایی کانتینرها بین کشتی‌ها در فرایند ترانسشیپمنت، مدل‌سازی ادغامی شدند. برای حل مدل از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. مقاله آن‌ها نشان داد که الگوریتم ژنتیک در زمان کمتر، به پاسخ‌های بهتری برای برنامه‌ریزی پهلوگاه می‌رسد [۹].

آقای ایلاتی و همکارانش یک مدل شبیه‌سازی برای تخصیص هم‌زمان پهلوگاه، کشتی یدک‌کش و جرثقیل اسکله مدل‌سازی کردند. در مدل پیشنهادی آن‌ها، زمان ورود کشتی‌ها به بندر از نوع پویا، پهلوگاه به‌صورت گسسته و عمق آبخور کشتی‌ها در نظر گرفته شد. آن‌ها ابتدا مسئله BAP، سپس مسئله تخصیص یدک‌کش و درنهایت مسئله QCAP را حل کردند [۱۰].

آقای هو دو مسئله BAP و QCAP را با در نظر گرفتن استفاده کارآمد از جرثقیل اسکله، ادغام کرد. همچنین برخی ملاحظات دنیای واقعی مانند پیوسته بودن پهلوگاه، جریمه ناشی از زودتر رسید کشتی و جریمه ناشی از تأخیر در خروج از بندر نیز در نظر گرفت [۱۱].

لی و همکارانش مسئله بازیابی برنامه تخصیص پهلوگاه (BAP) در پایانه‌های کانتینری را در حالتی بررسی کردند که برنامه اولیه به دلیل تأخیر در ورود کشتی، دچار اختلال شود. مدل پیشنهادی آن‌ها، ترتیب و موقعیت پهلوگیری کشتی‌ها را به‌منظور به حداقل رساندن هزینه بازیابی، بهینه‌سازی می‌کند. در مقاله آن‌ها از الگوریتم ژنتیک خود تطبیقی برای حل مدل استفاده شد. تابع هدف مدل آن‌ها، کمینه کردن هزینه ناشی از عدم پهلوگیری در مکان مناسب و هزینه ناشی از تأخیر در اعزام کشتی‌ها بوده است [۱۲].

لو و خی دو مسئله تخصیص پهلوگاه گسسته و تخصیص جرثقیل اسکله را در قالب یک مدل ادغامی، مدل‌سازی کردند. تابع هدف مدل پیشنهادی، کمینه‌سازی زمان تخلیه/بارگیری و زمان تأخیر کشتی بود. در مقاله آن‌ها برای در نظر گرفتن عدم قطعیت دو پارامتر زمان ورود کشتی و زمان تخلیه/بارگیری، از استراتژی پیش‌کنشی[۳] استفاده شد. در مدل پیشنهادی آن‌ها برای استفاده بیشتر از ظرفیت پایانه کانتینری، به جرثقیل‌ها اجازه داد شد که پیش از اتمام عملیات تخلیه/بارگیری کشتی‌ها، مجدداً به کشتی دیگری تخصیص پیدا کنند [۱۳].

ژِن و همکارانش مسئله تخصیص پهلوگاه را با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان ورود و زمان تخلیه/بارگیری مورد مطالعه قرار دادند. تابع هدف مدل پیشنهادی در مقاله آن‌ها،

[۱] Static Time Arrival

[۲] Dynamic Arrival Time

[۳] Proactive Strategy

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

کمینه‌سازی هزینه ناشی از زمان انتظار کشتی‌ها و عدم پهلوگیری در مکان بهینه‌شان بود. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل، از استراتژی واکنشی[۱] و مدل‌سازی دومرحله‌ای استفاده گردید. در مرحله اول یک برنامه اولیه برای تخصیص پهلوگاه مدل‌سازی و حل شد، در مرحله دوم یک مدل برای بازیابی برنامه اولیه تخصیص پهلوگاه مدل‌سازی شد. هدف نویسندگان مقاله از بازیابی برنامه پهلوگاه، کمینه کردن هزینه‌های انحراف از برنامه اولیه تخصیص پهلوگاه بود [۱۴].

زِنگ و همکارانش دو مدل برای حل هر سه مسئله عملیات جانب دریا مدل‌سازی کردند. ابتدا دو مسئله BAP و QCAP در قالب یک مدل ادغامی و در ادامه یک مدل برای حل مسئله QCSP مدل‌سازی کردند. هدف آن‌ها از برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه و جرثقیل اسکله، کمینه کردن هزینه‌های ناشی از تأخیر در اعزام کشتی، عدم پهلوگیری کشتی در مکان بهینه، تخلیه/بارگیری کانتینرها توسط جرثقیل‌های اسکله و هزینه ناشی از جابجایی جرثقیل‌های اسکله بین کشتی‌ها بود. در مقاله آن‌ها دو روش برای بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه معرفی شد؛ روش برنامه‌ریزی مجدد و مدیریت اختلال. آن‌ها صرفاً از روش مدیریت اختلال برای بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه استفاده کردند. حل مدل‌های ریاضی مقاله آن‌ها با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه انجام گرفت[۶].

مولینز و همکارانش یک رویکرد استوار با درنظر گرفتن زمان حائل بین تخلیه/بارگیری کشتی‌ها برای مسئله BAP و QCAP پیشنهاد دادند. در مدل پیشنهادی آن‌ها، پهلوگاه بدون دانش قبلی در مورد اختلال‌ها، برنامه‌ریزی می‌شود و عدم قطعیت محیط برنامه‌ریزی، با در نظر گرفتن استواری برنامه تخصیص پهلوگاه مدل‌سازی می‌گردد. مدل پیشنهادی آن‌ها دارای سه هدف کمینه کردن زمان کل تخلیه/بارگیری کشتی‌ها، بیشینه کردن زمان حائل بین کشتی‌ها و کمینه کردن انحراف معیار زمان حائل است [۱۵].

لی و همکارانش، بهینه‌سازی و بازیابی بلادرنگ مسئله ادغامی تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله در بندرهای کانتینری بررسی کردند. آن‌ها یک استراتژی واکنشی برای بازیابی برنامه اولیه پیشنهاد دادند که برای محل جدید پهلوگیری کشتی‌ها تصمیم‌گیری می‌کند و به جرثقیل‌های اسکله اجازه می‌دهد که پیش از اتمام عملیات تخلیه/بارگیری کشتی‌هایی که روی آن کار می‌کنند، به سمت دیگر کشتی‌ها حرکت کرده و بر روی کشتی‌های جدید کار کنند. هم‌چنین در مدل بازیابی آن‌ها، کشتی‌هایی که باید سریع‌تر اعزام شوند دارای اولویت بیشتری هستند. مدل آن‌ها، هم کیفیت خدمات را بیشینه و هم هزینه ناشی از بازیابی را کمینه می‌کند. شایان‌ذکر است که در مقاله آن‌ها، فرض شده است که یک برنامه اولیه از قبل موجود بوده و آن‌ها فقط مدل بازیابی برنامه پهلوگاه را پیشنهاد دادند. آن‌ها نشان دادند که سرعت تخلیه/بارگیری جرثقیل‌های اسکله می‌تواند به کاهش هزینه بازیابی برنامه پهلوگاه کمک زیادی کند [۱۶].

ژانگ و همکارانش یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهاد دادند که سطوح مختلف رضایت کلیه ذی‌نفعان درگیر در تخصیص پهلوگاه را در نظر می‌گیرد. تابع هدف مدل پیشنهادی ژانگ و همکارانش کمینه کردن هزینه‌های ناشی از عدم پهلوگیری در مکان بهینه، هزینه ناشی از تخلیه/بارگیری کشتی‌ها توسط جرثقیل‌های اسکله و هزینه ناشی از تأخیر در اعزام کشتی‌ها بوده است. هم‌چنین برای در نظر گرفتن مسئله بازیابی برنامه تخصیص پهلوگاه، کمینه کردن جریمه ناشی از پهلوگیری کشتی‌ها در مکانی غیر از مکان پهلوگیری در برنامه اولیه را در مدل تخصیص پهلوگاه در نظر گرفتند. آن‌ها کشتی‌ها را بر اساس معیارهای نوع شرکت کشتی‌رانی، حساسیت به تأخیر در اعزام کشتی‌های، میزان اهمیت برای متصدی بندر و مقدار جریمه ناشی از تأخیر، به سه گروه تقسیم کردند؛ کشتی‌های کلیدی، کشتی‌های خط‌پیما و کشتی‌های فیدر. در ادامه، مدلشان را در سه مرحله حل کردند و در هر مرحله، بازیابی برنامه پهلوگیری یک گروه از کشتی‌ها را انجام دادند. آن‌ها مدلشان را در دو حالت مدل‌سازی کردند؛ مدل تک هدفه و مدل چندهدفه. تجزیه‌وتحلیل عددی صورت گرفته توسط آن‌ها نشان داد که مدل چندهدفه، نتایج بهتری را به ارمغان می‌آورد [۱۷].

لیو و همکارانش بر روی یکی از منابع اختلال، یعنی اختلال ناشی از خرابی جرثقیل‌های اسکله در میانه اجرای برنامه، تمرکز کردند. هدف لئو و همکارانش از برنامه‌ریزی مجدد، کمینه‌سازی اثرات منفی اختلال به وجود آمده بود. آن‌ها ابتدا به مدل‌سازی مسئله تخصیص پهلوگاه و برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله پرداختند و در ادامه اختلال ناشی از خرابی جرثقیل

[۱] Reactive Strategy

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

اسکله را در نظر گرفتند و به‌منظور برنامه‌ریزی مجدد پهلوگاه تحت تأثیر این اختلال، یک مدل مجزا پیشنهاد دادند. ازآنجاکه سیاست برنامه‌ریزی مجدد در دنیای واقعی شامل سود برنامه‌ریزان بندر، صاحبان کشتی و متصدی جرثقیل اسکله می‌شود، آن‌ها درک رفتاری این افراد را در فرایند برنامه‌ریزی مجدد و اجرای آن، در نظر گرفتند. آن‌ها دو رویکرد متفاوت افراد را برای برنامه‌ریزی مجدد مقایسه کردند؛ رویکرد برنامه‌ریزی مجدد در سریع‌ترین زمان ممکن و رویکرد برنامه‌ریزی مجدد در دیرترین زمان ممکن. در رویکرد اول به‌محض شروع اختلال، برنامه‌ریزی مجدد انجام می‌شود اما در رویکرد دوم، پس از اتمام اختلال، برنامه‌ریزی مجدد انجام می‌شود. تحلیل و بررسی آن‌ها نشان داده است که رویکرد اول به نتایج بهتری ختم می‌شود [۱۸].

خیانگ و همکارانش تخصیص هم‌زمان پهلوگاه گسسته و جرثقیل اسکله را در محیط دارای عدم قطعیت بررسی کردند. استراتژی پیشنهادی آن‌ها برای کمینه کردن هزینه اضافی ناشی از اختلال برنامه پهلوگاه، استراتژی واکنشی بود. استراتژی واکنشی که توسط آن‌ها پیشنهاد شد، چهار نوع اختلال را در نظر گرفته است؛ انحراف در زمان ورود کشتی، خرابی جرثقیل‌های اسکله، انحراف در زمان تخلیه/بارگیری کشتی و ورود کشتی برنامه‌ریزی نشده به بندر. هم‌چنین ازآنجاکه مقدار هزینه نمی‌تواند انتخاب تصمیم‌گیران بندر را در شرایط اختلال شبیه‌سازی کند، آن‌ها مدل مدیریت اختلال مبتنی بر درک رفتار تصمیم گیران را پیشنهاد دادند تا تصمیم‌گیری در دنیای واقعی را بهتر شبیه‌سازی کنند. در مقاله آن‌ها دو استراتژی واکنشی و پیش‌کنشی مقایسه شدند. نتایج مقاله نشان داد که استراتژی واکنشی، در شرایطی که مقدار عدم قطعیت کم باشد، نتایج بهتری را نشان می‌دهد و در مقابل اگر مقدار عدم قطعیت زیاد باشد، استراتژی پیش‌کنشی به نتایج بهتری ختم خواهد شد [۱۹].

آقای ال‌وی و همکارانش به بازیابی مسئله تخصیص پهلوگاه در بندرهای ترانسشیپمنت و در محیط اختلال پرداختند و یک ابزار تصمیم‌گیری جدید برای مسئولان بندرهایی که با پدیده اختلال دست‌وپنجه نرم می‌کنند، ایجاد کرد. آن‌ها اتصال بین کشتی‌های بزرگ‌تر و کشتی‌های کوچک‌تر در فرایند ترانسشیپمنت را در مدلشان در نظر گرفتند. مدل پیشنهادی آن‌ها، یک مدل بعدِ اختلال است؛ به این معنی که ابتدا یک اختلال در برنامه اولیه ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از مدل پیشنهادی آن‌ها برنامه اولیه بازیابی می‌شود. به عبارت بهتر آن‌ها مدلی برای برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه پیشنهاد ندادند. تابع هدف مدل پیشنهادی آن‌ها کمینه‌سازی هزینه‌های عدم پهلوگیری کشتی در مکان برنامه‌ریزی‌شده اولیه، تأخیر در اعزام کشتی نسبت به برنامه اولیه و جریمه ناشی از تأخیر تراسنشیپمنت کانتینرها بین کشتی‌های بزرگ و کشتی‌های کوچک مرتبط به آن‌ها بوده است [۲۰].

ایریس و لام یک رویکرد بهینه‌سازی استوار قابل بازیابی را برای برنامه هفتگی تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله توسعه دادند. آن‌ها برای ایجاد یک استواری قابل بازیابی و نظام‌مند، یک برنامه پایه پیش‌کنشی با در نظر گرفتن هزینه بازیابی را پیشنهاد دادند. آن‌ها در مدلشان، عدم قطعیت را در دو پارامتر زمان ورود و مدت‌زمان عملیات تخلیه/بارگیری کشتی‌ها در نظر گرفتند. برنامه پایه در نظر گرفته‌شده توسط آن‌ها، زمان و مکان پهلوگیری کشتی‌ها و تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده به کشتی‌ها و هم‌چنین زمان حائل و جرثقیل‌های اسکله‌ای حائل را تعیین می‌کند. در مدل پیشنهادی آن‌ها، هزینه بازیابی احتمالی مدل هم قرارگرفته است. تابع هدف مدل آن‌ها کمینه‌سازی هزینه برنامه پایه، هزینه ناشی از بازیابی برنامه و هزینه حل سناریوهای مختلف عدم قطعیت بوده است. هزینه‌هایی که در مدل پایه در نظر گرفتند شامل سه هزینه مدت‌زمان انتظار، تأخیر در اعزام کشتی و هزینه تخلیه/بارگیری کانتینرها توسط جرثقیل‌های اسکله است. مطابق با نتایج گزارش‌شده در مقاله آن‌ها، هرچه تعداد کشتی‌های در برنامه‌ریزی بیشتر باشد، پهلوگاه و جرثقیل‌های اسکله با نرخ بالاتری در برنامه پایه به کار گرفته می‌شوند و مقدار زمان و تعداد جرثقیل حائل موردنیاز هم کاهش پیدا می‌کند. نتایج مقاله نشان داد هر چه تعداد کشتی‌ها بیشتر باشد، زمان حائل کمتر می‌شود و درنتیجه از منابع موجود استفاده بهتری صورت می‌گیرد [۲۱].

در جدول ۱، مقاله‌ها به‌صورت خلاصه مرور شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود تعداد اندکی از مقالات بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه را در شرایط وقوع اختلال درنظر گرفتند. به‌طور کلی در مقالات پیشین دو روش سراسری و محلی جهت بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه در شرایط وقوع اختلال معرفی شدند. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود هیچ‌کدام از مقالات برنامه‌ریزی مجدد برنامه اولیه پهلوگاه در شرایط وقوع

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول (۱) خلاصه مقالات مرور شده

مقاله	مسئله			روش حل							استراتژی				
	BAP	QCAP	QCSP	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم شبیه‌سازی تبرید	الگوریتم جستجوی ممنوعه	الگوریتم ابتکاری	روش حل دقیق	الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان	الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری	عدم قطعیت	برنامه‌ریزی مجدد	مدیریت اختلال	روش سراسری	روش محلی
لیانگ و همکارانش [۷]	*	*		*											
واکا و همکارانش [۸]	*	*						*							
لالا رویز و همکارانش [۹]	*	*		*											
ایلاتی و همکارانش [۱۰]	*	*					*								
هو [۱۱]	*	*					*								
لی و همکارانش [۱۲]	*			*									*	*	
لو و خی [۱۳]	*	*		*							*				
ژن و همکارانش [۱۴]	*				*								*	*	
زِنگ و همکارانش [۶]	*	*	*			*							*	*	*
مولینز و همکارانش [۱۵]	*	*		*							*				
لی و همکارانش [۱۶]	*	*					*						*	*	
ژانگ و همکارانش [۱۷]	*	*					*						*	*	
لیو و همکارانش [۱۸]	*	*	*				*						*	*	
خیانگ و همکارانش [۱۹]	*	*	*				*				*		*	*	
اِلوی و همکارانش [۲۲]	*	*					*						*	*	
آیریس و لام [۲۱]	*	*					*				*				
مقاله حاضر	*	*		*		*			*	*		*		*	*

اختلال را بررسی نکردند. هم‌چنین عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در برنامه‌ریزی مجدد برنامه اولیه پهلوگاه در هیچ‌کدام از مقالات جدول ۱ مورد بررسی قرار نگرفته است. این مقاله با پر کردن این شکاف پژوهشی، روش بهتر والگوریتم مناسب برای بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه را شناسایی می‌کند.

۳- مدل‌سازی ریاضی برنامه اولیه پهلوگاه

برنامه‌ریزی پهلوگاه شامل دو مسئله BAP و QCAP می‌شود. این مقاله رویکرد مدل‌سازی ادغامی را در پیش می‌گیرد؛ چراکه نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات پیشین، عملکرد بهتر این رویکرد را نسبت به رویکرد مدل‌سازی سلسله مراتبی نشان می‌دهد [۳]. در ادامه این بخش به مدل‌سازی مسئله تخصیص هم‌زمان پهلوگاه و جرثقیل اسکله ۶ (BAQCAP) پرداخته می‌شود.

۳-۱- فرض‌های مسئله

این مقاله، مدل‌سازی مسئله BAQCAP را بر اساس فرض‌های زیر انجام می‌دهد.

۱) هیچ محدودیت فیزیکی و فنی مانند عمق آبخور وجود ندارد.

۲) کشتی‌ها می‌توانند در هر محلی از طول پهلوگاه، پهلوگیری کنند.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۳) تخلیه/بارگیری کشتی‌ها به حداقل تعداد جرثقیل اسکله نیاز دارد و تا زمانی که تعداد جرثقیل‌های اسکله بیکار به تعداد حداقل جرثقیل کشتی نرسد، عملیات تخلیه/بارگیری کشتی شروع نمی‌شود.

۴) داده‌های ورودی برای برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه، قطعی هستند.

۳-۲- تعریف پارامترها

نمادها و علائمی که در این بخش استفاده می‌شوند به دو دسته تقسیم می‌شوند؛ نمادهای نشان‌دهنده اطلاعات کشتی و متغیرهای تصمیم مدل BAQCAP. این دو دسته از نمادها در جدول‌های ۲ و ۳ تعریف می‌شوند.

جدول (۲) نمادهای معرف اطلاعات کشتی

L	طول کل پهلوگاه که به قسمت‌های $\delta = 10$ متری تقسیم می‌شود.
N	تعداد کل کشتی‌ها
Q	تعداد کل جرثقیل‌های موجود در پایانه
T	مدت‌زمان افق برنامه‌ریزی. این پارامتر به قسمت‌های $\varepsilon = 1$ ساعتی تقسیم‌بندی می‌شود
a_i	زمان تخمین زده‌شده ورود کشتی i
l_i	طول کشتی i که به قسمت‌های $\delta = 10$ متری تقسیم می‌شود.
NC_i	تعداد کانتینرهای کشتی i که باید در این بندر تخلیه/بارگیری شوند.
d_i	موعد مقرر اعزام کشتی i از بندر
b_i	بهترین محل پهلوگیری برای کشتی i که بر اساس محلی که قرار است کانتینرهای کشتی i در آنجا بارچینی شوند و یا از آن محل بر روی کشتی i بارگیری شوند.
q_i^{min}	حداقل تعداد جرثقیل‌های موردنیاز برای خدمات‌رسانی به کشتی i
q_i^{max}	حداکثر تعداد جرثقیل‌هایی که می‌توانند به کشتی i خدمات‌رسانی کنند.
C_{1i}	هزینه اضافی حمل بر مبنای فاصله، ناشی از عدم پهلوگیری کشتی در بهترین محل پهلوگیری‌اش $\left(\frac{\text{واحد پول}}{\text{متر}}\right)$
C_{2i}	جریمه ناشی از اعزام شدن کشتی دیرتر از موعد مقرر $\left(\frac{\text{واحد پول}}{\text{ساعت}}\right)$
C_3	هزینه عملیات تخلیه/بارگیری کشتی توسط جرثقیل‌های اسکله در هر ساعت
w_i	تعداد جرثقیل-ساعت موردنیاز برای تخلیه/بارگیری کشتی i
M	عدد بزرگ

جدول (۳) نمادهای معرف متغیر تصمیم در مدل BAQCAP

x_i	محل پهلوگیری ابتدای کشتی i
B_i	محل پهلوگیری انتهای کشتی i $(B_i = x_i + l_i +$ فاصله ایمنی$)$
y_i	زمان شروع پهلوگیری کشتی i
e_i	زمان اتمام عملیات تخلیه/بارگیری کشتی i
z_{ij}^x	متغیر باینری. اگر در محور افقی ماتریس مکان-زمان، کشتی i قبل از کشتی j باشد برابر ۱ است، در غیر این صورت برابر ۰ است.
z_{ij}^y	متغیر باینری. اگر در محور عمودی ماتریس مکان-زمان، کشتی i قبل از کشتی j باشد برابر ۱ است، در غیر این صورت برابر ۰ است.
r_{it}	متغیر باینری. اگر حداقل یک جرثقیل اسکله بر روی کشتی i در زمان t کار کند، برابر ۱ است در غیر این صورت برابر ۰ است.
r_{itq}	متغیر باینری. اگر در زمان t بر روی کشتی i به تعداد q جرثقیل اسکله کار کند، برابر ۱ است در غیر این صورت برابر ۰ است.

۳-۳- مدل‌سازی BAQCAP

مدل مسئله BAQCAP که از مقاله آقای زِنگ و همکارانش[۶] اقتباس شده دارای یک تابع هدف و ۱۳ محدودیت می‌باشد.

تابع هدفی مدل پیشنهادی این مقاله، کمینه کردن هزینه‌هایی است که بندر بایستی پرداخت کند. این هزینه‌ها مجموع سه عبارت زیر هستند:

- هزینه ناشی از پهلوگیری کشتی‌ها در محل غیر بهینه؛ محل بهینه پهلوگیری برای هر کشتی، محلی است که در آن فاصله بین کشتی و محل انبار کردن کانتینرهایش کم‌ترین مقدار را داشته باشد.
- هزینه ناشی از تأخیر در خروج کشتی از بندر؛ کشتی‌ها بر مبنای برنامه زمانی خود یک موعد مقرر جهت خروج کشتی از بندر معرفی می‌کنند. اگر کشتی دیرتر از موعد مقرر پهلوگاه را ترک کند، هزینه‌ای به بندر متحمل می‌شود.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

- هزینه ناشی از انجام عملیات تخلیه/بارگیری کانتینرهای کشتی توسط جرثقیل‌های اسکله.
- روابط شماره ۱ تا ۱۴، مدل ریاضی BAQCAP را نشان می‌دهند. محدودیت‌های مدل BAQCAP را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد؛ محدودیت‌های مرتبط با مسئله QCAP و محدودیت‌های مرتبط با مسئله BAP.

$$\text{Min}\sum_{i}^{N}\left\{C_{1i}|x_i-b_i|+C_{2i}(e_i-d_i)+C_2\sum_{t=1}^{T}r_{it}\right\} \quad (1)$$

$$\sum_{t\epsilon T}\sum_{q=1}^{Q} q\times r_{itq}=\left\lceil\frac{NC_i}{MPH}\right\rceil,\forall\, i=1,2,\dots,N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{t\epsilon T} q\times r_{itq}\le Q,\forall\, t \quad (3)$$

$$q_i^{min}\le\sum_{q=1}^{Q} q\times r_{itq}\le q_i^{max},\forall i,t \quad (4)$$

$$\sum_{q=1}^{Q} r_{itq}=r_{it},\forall\, i,t \quad (5)$$

$$\sum_{t\epsilon T} r_{it}=e_i-y_i,\forall\, i \quad (6)$$

$$B_i\le x_j+M\left(1-Z_{ij}^{x}\right),\forall\, i,j=1,2,\dots,N\ i\ne j \quad (7)$$

$$e_i\le y_j+M\left(1-Z_{ij}^{y}\right),\forall\, i,j=1,2,\dots,N\ i\ne j \quad (8)$$

$$Z_{ij}^{x}+Z_{ji}^{x}+Z_{ij}^{y}+Z_{ji}^{y}\ge 1,\forall i,j=1,2,\dots,N\ i\ne j \quad (9)$$

$$y_i\ge a_i,\forall\, i=1,2,\dots,N \quad (10)$$

$$B_i\le L,\forall i=1,\dots,N \quad (11)$$

$$e_i\le T,\forall i=1,\dots,N \quad (12)$$

$$x_i\epsilon\{0,1,2,\dots,L-l_i\},\forall\, i \quad (13)$$

$$Z_{ij}^{x},Z_{ij}^{y},r_{itq},r_{it}=1\text{ or }0,\forall\, i,j,t\ i\ne j \quad (14)$$

دسته اول) محدودیت‌های مرتبط با مسئله QCAP (محدودیت (۲) تا (۶))

- محدودیت (۲) نحوه محاسبه متغیر r_{itq} را نشان می‌دهد. در مقاله آقای زِنگ و همکارانش فرض شده که کشتی‌ها پیش از رسیدن به بندر، تعداد جرثقیل-ساعت مورد نیاز خود را به بندر گزارش می‌دهند و بر اساس آن مسئولان بندر به محاسبه پارامتر r_{itq} می‌پردازند؛ اما در مدل پیشنهادی این مقاله، تعداد جرثقیل-ساعت مورد نیاز برای تخلیه-بارگیری کشتی در خود مدل محاسبه می‌شود.
- محدودیت (۳)، اطمینان می‌دهد که در هر اسلات زمانی، مجموع جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده به کشتی‌ها حداکثر به تعداد جرثقیل‌های موجود در بندر است.
- محدودیت (۴)، مرتبط با حداکثر و حداقل تعداد جرثقیل اسکله‌ای است که هر کشتی درخواست می‌کند.
- محدودیت (۵)، محاسبه پارامتر r_{it} را نشان می‌دهد.
- محدودیت (۶)، بیان می‌دارد که در تمام بازه زمانی که کشتی در پهلوگاه حضور دارد، باید حداقل یک جرثقیل اسکله عملیات تخلیه/بارگیری آن کشتی را انجام دهد. این محدودیت از نوع محدودیت نرم محسوب می‌شود.

دسته دوم) محدودیت‌های مرتبط با مسئله BAP (محدودیت (۷) تا (۱۳))

- محدودیت (۷) و (۸) نحوه محاسبه دو پارامتر Z_{ij}^{x}, Z_{ij}^{y} را نشان می‌دهد.
- محدودیت (۹) اطمینان می‌دهد برنامه زمانی و مکانی هیچ دو کشتی‌ای با یکدیگر تداخل ندارند.
- محدودیت (۱۰) اطمینان می‌دهد که مدل‌سازی انجام شده، از نوع مدل‌سازی پویا است.
- محدودیت (۱۱) اطمینان می‌دهد که محل پهلوگیری کشتی‌ها به‌گونه‌ای محاسبه‌شده است که طول کشتی از طول پهلوگاه بیرون نزند.
- محدودیت (۱۲)، اطمینان می‌دهد که تمام کشتی‌ها تا پیش از افق زمانی موردنظر برنامه‌ریزی‌شده‌اند. این محدودیت از نوع محدودیت نرم محسوب می‌شود و در صورت رعایت نشدن، کماکان برنامه قابل‌اجرا است.
- محدودیت (۱۳) و (۱۴) جنس متغیرها (باینری یا عدد صحیح بودن) را نشان می‌دهند.

۴- مدل ریاضی برنامه‌ریزی مجدد پهلوگاه

با حل مدل BAQCAP، می‌توان به یک برنامه اولیه برای پهلوگیری کشتی‌های دست‌یافت. مدل پیشنهادی BAQCAP با این فرض مدل‌سازی و حل می‌شود که تمام داده‌ها دارای قطعیت هستند و هیچ‌گونه عدم قطعیتی ندارند؛ به این معنی که همه کشتی‌ها دقیقاً در همان زمانی که اعلام کردند وارد بندر می‌شوند، تمام اطلاعاتی که کشتی‌ها گزارش

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

می‌دهند قطعی و بدون تغییر هستند و هیچ‌گونه خرابی یا شرایط پیش‌بینی نشده‌ای رخ نمی‌دهد؛ اما در زمان اجرای برنامه ممکن است اتفاقاتی رخ دهد که باعث انحراف از برنامه اولیه شود. این اتفاقات می‌تواند ناشی از عدم گزارش اطلاعات دقیق توسط شرکت‌های کشتی‌رانی، شرایط پیش‌بینی نشده آب‌وهوایی، خرابی تجهیزات بندر، پدیده جزر و مد و ... باشد. در این حالت نیاز است تا تصمیم‌گیران بندر، برنامه اولیه پهلوگاه را مورد بازبینی قرار دهند و کشتی‌های باقی‌مانده را برنامه‌ریزی مجدد کنند. برای برنامه‌ریزی مجدد کشتی‌ها از مدل BAQCAP استفاده می‌شود.

آقای زِنگ و همکارانش دو روش کلی برای برنامه‌ریزی مجدد پهلوگاه معرفی کردند [۶]:

- برنامه‌ریزی مجدد سراسری (GR)[۱]: در این روش تمام کشتی‌هایی که در برنامه اولیه باقی‌مانده‌اند، برنامه‌ریزی می‌شوند.
- برنامه‌ریزی مجدد محلی (LR)[۲]: در این روش، فقط کشتی‌هایی برنامه‌ریزی مجدد می‌شوند که از پدیده اختلال تأثیر می‌پذیرند.

. در روش بازیابی محلی ابتدا یک افق زمانی (t_e) مشخص می‌شود که تا آن افق زمانی باید کشتی‌های مختل شده مدیریت شوند. سپس تعداد به‌روزرسانی حد بالا و پایین پنجره‌های زمانی و مکانی را مشخص می‌کنند (n: تعداد به‌روزرسانی حد بالای زمانی؛ n' : تعداد به‌روزرسانی حدهای بالا و پایین مکانی). با در اختیار داشتن این پارامترها روند زیر انجام خواهد شد:

۱) حدهای پنجره زمانی و مکانی و دو پارامتر $i, i' (= ۱, i' = ۱)$ مقداردهی اولیه می‌شوند.

۲) برنامه اولیه کشتی‌های موجود در پنجره زمانی و مکانی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری و مدل مدیریت اختلال، بازیابی می‌شوند.

۳) اگر $i = n$ به مرحله ۵ مراجعه شود در غیر این صورت پارامتر i به‌روزرسانی $(i = i + ۱)$ و به مرحله ۴ مراجعه شود.

۴) پنجره زمانی به‌روزرسانی و به مرحله ۲ مراجعه شود.

۵) اگر $i' = n'$ به مرحله ۷ مراجعه شود در غیر این صورت پارامتر i' به‌روزرسانی $(i' = i' + ۱)$ و به مرحله ۶ مراجعه شود.

۶) پنجره مکانی به‌روزرسانی و به مرحله ۲ مراجعه شود.

۷) پایان

در مرحله ۵، پنجره زمانی و مکانی به‌روزرسانی می‌شود. نحوه به‌روزرسانی پنجره زمانی و مکانی به‌صورت روابط (۱۵) و (۱۶) انجام می‌گیرد.

$$TimeStep = \frac{t_e - t_c}{n}, t_i^u = t_i^u + TimeStep \qquad (۱۵)$$

$$SpaceStep = \frac{L - S_c}{n'}, S_{i'}^u = S_{i'}^u + SpaceStep \qquad (۱۶)$$

در روابط (۱۵) و (۱۶) پارامتر t_c زمان شروع اختلال، پارامتر S_c مکان شروع اختلال، پارامتر t_i^u حد بالای پنجره زمانی در تکرار i اُم و پارامتر $S_{i'}^u$ حد بالای پنجره مکانی در تکرار i'اُم را نشان می‌دهد.

۵- حل مدل ریاضی

در بخش قبل برنامه‌ریزی پهلوگاه در قالب یک مدل ریاضی ادغامی مدل‌سازی شد. ازآنجاکه مسئله تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله از نوع مسائل خیلی سخت (NP-Hard) محسوب می‌شود، حل آن با الگوریتم‌های فراابتکاری انجام می‌شود. ازاین‌رو، در این مقاله برای حل مدل ریاضی BAQCAP چهار الگوریتم فراابتکاری پیشنهاد می‌شود؛ الگوریتم ژنتیک (GA)[۳]، الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS)[۴]، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO)[۵] و الگوریتم رقابت استعماری (ICA)[۶].

معمولاً الگوریتم‌های فراابتکاری دارای پارامترهایی هستند که مقدار عددی آن‌ها بر روی پاسخ نهایی و مدت زمان اجرای الگوریتم تأثیر می‌گذارد. به همین جهت پیش از به کار بردن الگوریتم‌های فرا ابتکاری، بایستی مقدار بهینه آن پارامترها را اصطلاحاً تنظیم کرد. در این مقاله برای تنظیم پارامتر

[۱] Global Rescheduling (GR)
[۲] Local Rescheduling (LR)
[۳] Genetic Algorithm (GA)
[۴] Taboo Search (TS)
[۵] Ant Colony Optimization (ACO)
[۶] Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

الگوریتم‌های فرابتکاری از روش تاگوچی در طراحی آزمایش (DOE)[1] استفاده شده است.

۵-۱- تنظیم پارامتر الگوریتم ژنتیک (GA)

در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی سه پارامتر جمعیت اولیه، نرخ زادوولد و نرخ جهش نیاز به تنظیم کردن دارند. جدول ۴ مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم ژنتیک را که با روش تاگوچی محاسبه شدند را گزارش می‌کند. شایان ذکر است که شرط خاتمه الگوریتم ژنتیک در این مقاله، عدم تغییر در پاسخ نهایی الگوریتم پس از چند تکرار متوالی (تعداد تکرارهای متوالی بدون تغییر = تعداد کشتی‌ها) می‌باشد.

جدول (۴) مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم ژنتیک

تعداد کشتی	جمعیت اولیه	نرخ زادوولد	نرخ جهش
۲۰	۱۳۰	۰,۷	۰,۲۵
۲۵	۱۱۰	۰,۸۵	۰,۲۵
۳۰	۹۰	۰,۷	۰,۲
۳۵	۱۳۰	۰,۸	۰,۲۵
۴۰	۱۱۰	۰,۷	۰,۳

۵-۲- تنظیم پارامتر الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS)

در الگوریتم جستجوی ممنوعه پیشنهادی، پارامتری برای تنظیم کردن وجود ندارد. شرط خاتمه الگوریتم، عدم تغییر در پاسخ نهایی الگوریتم پس از چند تکرار متوالی (تعداد تکرارهای متوالی بدون تغییر = تعداد کشتی‌ها) می‌باشد.

۵-۳- تنظیم پارامتر الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO)

در الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگانی پیشنهادی، چهار پارامتر ضریب ثابت فرومون (Q)، وزن نمایی پخش فرومون (α)، نرخ تبخیر فرومون (ρ) و مقدار تخمینی پاسخ الگوریتم بایستی تنظیم شوند. جدول ۵، مقدار بهینه این چهار پارامتر را گزارش می‌کند. در الگوریتم ACO پیشنهادی، تعداد مورچه‌های اولیه برابر با تعداد کشتی‌هایی است که باید برنامه‌ریزی شوند (۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰). شرط خاتمه الگوریتم، عدم تغییر در پاسخ نهایی در ۲۰ تکرار متوالی است.

۵-۴- تنظیم پارامتر الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

شرط خاتمه الگوریتم پیشنهادی رقابت استعماری، عدم‌تغییر در پاسخ نهایی الگوریتم در ۲۰ تکرار متوالی قرار داده شد؛ بنابراین در الگوریتم رقابت استعماری پیشنهادی، ۵ پارامتر باید تنظیم شوند. این پارامترها تعداد کشورها، تعداد استعمارگرها، ضریب همسان‌سازی (β)، ضریب تأثیر مستعمره‌ها در قدرت امپراتوری‌ها (ξ) و احتمال انقلاب کشورها هستند. مقدار بهینه این پارامترها در جدول ۶ گزارش می‌شوند.

جدول (۵) مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان

تعداد کشتی	Q	α	ρ	مقدار تخمینی پاسخ الگوریتم
۲۰	۵	۱	۰,۱	۲۰۰,۰۰۰
۲۵	۱	۱	۳	۸۰۰,۰۰۰
۳۰	۳	۱	۰,۴	۶۰۰,۰۰۰
۳۵	۱	۱	۰,۱	۶۰۰,۰۰۰
۴۰	۳	۱	۰,۴	۶۰۰,۰۰۰

جدول (۶) مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری

تعداد کشتی	تعداد کشورها	نرخ استعمارگرها	β	ξ	احتمال انقلاب کشورها
۲۰	۱۱۰	۰,۰۸	۰.۴	۰,۱	۰,۲۵
۲۵	۱۳۰	۰,۰۸	۰.۵	۰,۱	۰,۲۵
۳۰	۱۳۰	۰,۱۲	۰.۶	۰,۱۲	۰,۲۵
۳۵	۱۳۰	۰,۱	۰.۶	۰,۱	۰,۱۵
۴۰	۱۳۰	۰,۰۸	۰.۷	۰,۱۵	۰,۱۵

[1] Design Of Experiment (DOE)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۶- داده‌های مورد استفاده

این مقاله برای برنامه‌ریزی پهلوگاه و ارزیابی روش‌های برنامه‌ریزی مجدد آن، از داده‌های واقعی ورود و خروج کشتی‌ها در بندر شهید رجایی استفاده می‌کند. بندر شهید رجایی دارای دو پایانه کانتینری می‌باشد که در جدول ۷ اطلاعات این دو پایانه کانتینری گزارش می‌شود. شکل ۲ جانمایی پایانه‌های کانتینری را در بندر شهید رجایی نمایش می‌دهد. این مقاله برای ایجاد تنوع در مجموعه داده‌ها و دقت بیشتر در نتایج به‌دست‌آمده، از داده‌های هر دو پایانه استفاده می‌کند به علت عدم دسترسی به برخی از داده‌ها، مقدار آن‌ها مطابق با دیگر مقالات فرض شدند. این داده‌ها در جدول ۸ گزارش شدند.

جدول (۷) اطلاعات پایانه‌های کانتینری بندر شهید رجایی

پایانه‌های کانتینری	طول پهلوگاه (متر)	تعداد جرثقیل اسکله
پایانه شماره ۱	۱۱۶۰	۱۰
پایانه شماره ۲	۱۱۱۰	۸

جدول (۸) داده‌های فرض شده

داده	داده تولیدشده
حداکثر تعداد جرثقیل اسکله	متناسب با طول کشتی، تعداد حداکثر جرثقیل اسکله محاسبه‌شده است. به ازای هر ۵۰ متر، یک جرثقیل اسکله می‌تواند پهلوگیری کند. $q_i^{max} = \frac{L}{۵۰}$
حداقل تعداد جرثقیل اسکله	حداقل تعداد جرثقیل اسکله برای همه کشتی‌ها برابر با ۱ در نظر گرفته‌شده است. $q_i^{max} = ۱$
فاصله ایمن بین کشتی‌ها	مقدار فاصله ایمن بین کشتی‌ها برابر با ۲۰ متر در نظر گرفته‌شده است.
موعد ترک کشتی از بندر	موعد ترک کشتی بر اساس زمان تخمینی ورود کشتی و حداکثر تعداد جرثقیل اسکله محاسبه‌شده است. با فرض اینکه به تعداد حداکثر جرثقیل اسکله به کشتی i تخصیص داده شود، موعد مقرر ترک کشتی از بندر محاسبه می‌شود. $d_i = a_i + \left\lceil \frac{C_i}{q_i^{max}} \right\rceil$
محل بهینه پهلوگیری کشتی	محل بهینه کشتی با استفاده از توزیع یکنواخت گسسته تولیدشده است. $b_i = U(۱, L)$
C_{1i}	$\frac{۱۰۰ l_i}{۲۳۰}$ (US$)
C_{2i}	$\frac{۲۰۰۰۰ l_i}{۲۳۰}$ (US$)
C_3	۲۰۰ US$
سرعت عملیات تخلیه/بارگیری کانتینرها	۳۰ $\frac{Movement}{Hour}$

۶-۱- استخراج داده از بانک داده‌ها

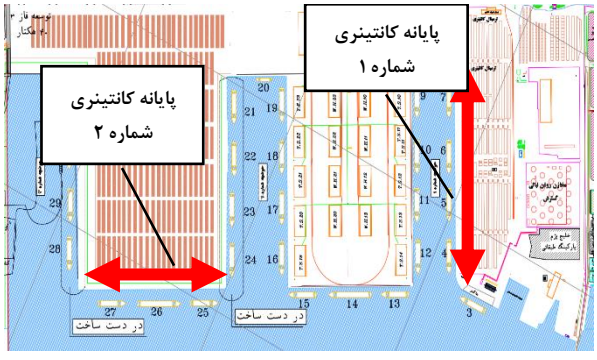
در برنامه‌ریزی پهلوگاه، هر چه تعداد کشتی‌هایی که باید برنامه‌ریزی شوند بیشتر شود، پیچیدگی حل مسئله هم بیشتر می‌شود. به همین دلیل داده‌های نمونه بر اساس تعداد کشتی‌ها (۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰) دسته‌بندی شدند. داده‌های بندر شهید رجایی از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱ در اختیار نویسندگان این مقاله قرار گرفت که از بین آن‌ها، داده‌هایی انتخاب شد که بیشترین پیچیدگی را در حل مدل‌های ریاضی داشته باشند؛ به عبارت بهتر سعی بر آن بوده است که مجموعه کشتی‌هایی متوالی‌ای انتخاب شوند که بیشترین تعداد کانتینر برای تخلیه/بارگیری داشته باشند.

۶-۲- کدبندی و کدگشایی

پاسخ‌های مدل BAQCAP، رشته‌ای از اعداد جایگشتی هستند که ترتیب برنامه‌ریزی کشتی‌ها را نشان می‌دهند. طول این رشته، برابر با تعداد کل کشتی‌هایی است که باید برنامه‌ریزی شوند. در شکل ۶، یک رشته به طول ۵ کشتی را نشان می‌دهد. مطابق با رشته نشان داده شده در شکل ۶، ابتدا کشتی شماره ۵ برنامه‌ریزی می‌شود، سپس کشتی‌های شماره ۳، ۲، ۴ و در نهایت کشتی شماره ۱ برنامه‌ریزی می‌شود.

۵	۳	۲	۴	۱

شکل (۶) رشته عددی حل مسئله BAQCAP



شکل (۶) جانمایی پایانه‌های کانتینری در بندر شهید رجایی

۶-۳- حل مدل BAQCAP

نتایج خام حل مدل BAQCAP برای هر دو پایانه کانتینری بندر شهید رجایی در پیوست شماره ۱ گزارش شدند. جهت

Archive of SID.ir

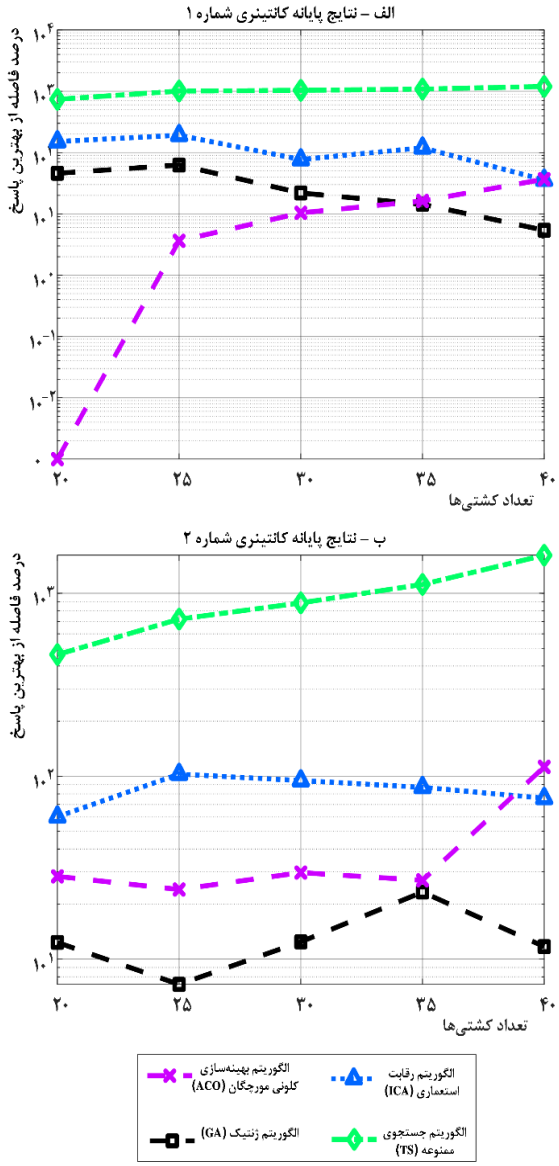
Archive of SID.ir

مقایسه عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مدل ریاضی BAQCAP، نتایج آن‌ها را با روش برنامه‌ریزی براساس زمان ورود کشتی‌ها (FCFS)[1] مقایسه می‌شوند. در روش برنامه‌ریزی براساس زمان ورود کشتی‌ها، کشتی‌ها به ترتیب ورودشان برنامه‌ریزی می‌شوند؛ به عبارت هر کشتی زودتر وارد بندر شود، زودتر پهلوگیری می‌کند.

برای مقایسه پاسخ الگوریتم‌ها، ابتدا باید آن‌ها را نرمال‌سازی کرد تا بتوان آن‌ها را با هم مقایسه کرد. برای نرمال‌سازی نتایج از رابطه در این مقاله از رابطه (۱۷) استفاده می‌شود. جدول ۹ و ۱۰، میانگین فاصله از بهترین پاسخ یافت شده بین الگوریتم‌ها را به ازای هر تعداد کشتی و برای هر دو پایانه کانتینری را گزارش می‌دهند. اعداد این دو جدول به درصد بیان می‌شوند. جدول ۹، پاسخ الگوریتم‌ها و جدول ۱۰ زمان اجرای الگوریتم‌ها را مقایسه می‌کند. در روش FCFS هیچ عملیات ریاضی‌ای برای یافتن پاسخ بهینه انجام نمی‌گیرد، درنتیجه زمان اجرای این روش بسیار ناچیز است (کمتر از یک ثانیه). به همین دلیل در جدول ۱۰ که زمان اجرای الگوریتم‌ها با هم مقایسه می‌شوند، زمان اجرای روش FCFS درنظر گرفته نشده است.

$$\text{فاصله از بهترین پاسخ} = \frac{\text{بهترین پاسخ} - \text{پاسخ الگوریتم}}{\text{بهترین پاسخ}} \times ۱۰۰ \qquad (۱۷)$$

در شکل‌های ۷ و ۸، نتایج الگوریتم‌ها فراابتکاری برای هر دو پایانه کانتینری و در قالب نمودار با هم مقایسه شدند. همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری پاسخ‌های مناسبی در هر دو پایانه ارائه می‌دهند. عملکرد هر چهار الگوریتم نسبت به روش FCFS بهتر است. از طرفی مشاهده می‌شود که هر چه تعداد کشتی‌ها بیشتر می‌شود، پاسخ‌های الگوریتم ACO از پاسخ بهینه فاصله بیشتری می‌گیرد. با توجه به فاصله زیاد زمان اجرای الگوریتم‌ها از مقدار بهینه، محور عمودی در شکل ۸ با مقیاس لگاریتمی ترسیم می‌شود. شکل ۸، عملکرد مناسب الگوریتم ژنتیک را ازنظر زمان اجرای الگوریتم هم نشان می‌دهد.



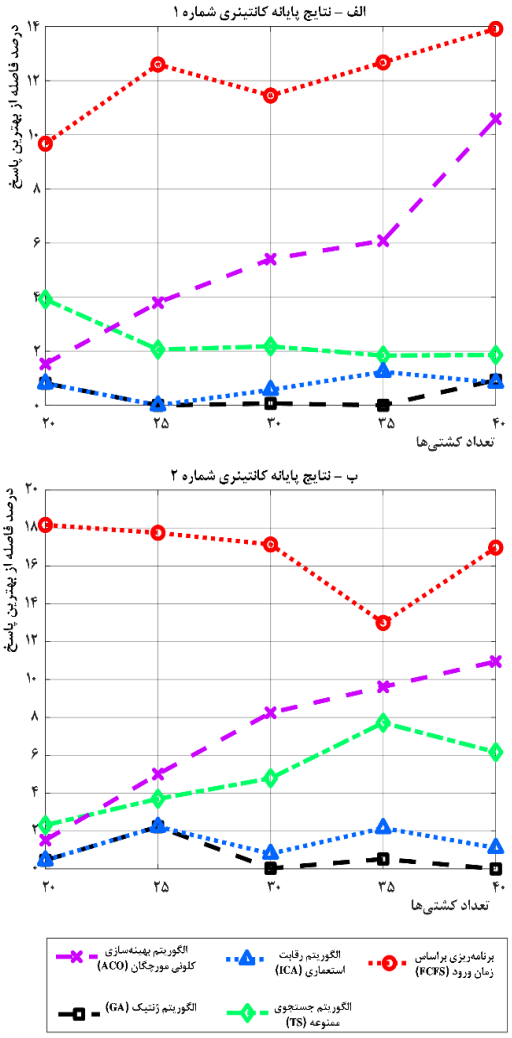
شکل (۸) مقایسه زمان الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مدل BAQCAP

۷- حل مدل ریاضی برنامه‌ریزی مجدد

[1] First Come First Service (FCFS)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل (۷) مقایسه پاسخ الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مدل BAQCAP

معمولاً در هنگام اجرای برنامه پهلوگاه، اتفاقات پیش‌بینی نشده‌ای رخ می‌دهند که برنامه اولیه را با چالش مواجه می‌کنند که به آن‌ها اصطلاحاً اختلال می‌گویند. اختلال‌ها می‌توانند هزینه‌هایی را به بندر تحمیل کنند و یا حتی اجرای برنامه اولیه را غیرممکن کنند. مطالعات جدیدی که اخیراً در حوزه برنامه‌ریزی پهلوگاه انجام می‌شود، بر روی برنامه‌ریزی مجدد پهلوگاه در شرایط وقوع اختلال متمرکز شدند. برنامه‌ریزی مجدد برنامه اولیه پهلوگاه با همان مدل BAQCAP انجام می‌گردد.

جهت مقایسه دو روش برنامه‌ریزی مجدد پهلوگاه (برنامه‌ریزی مجدد محلی و برنامه‌ریزی مجدد سراسری)، ابتدا باید یک اختلال ساختگی در برنامه اولیه ایجاد شود. به همین جهت ابتدا کشتی‌ها را براساس زمان پهلوگیری‌شان مرتب کرده و سپس کشتی‌های مضرب ۵ به‌عنوان کشتی‌های دارای اختلال انتخاب می‌شوند (کشتی‌های پنجم، دهم، پانزدهم و ...). زمان ورود این کشتی‌ها به‌مدت ۱۲ ساعت تأخیر داده می‌شوند تا یک اختلال در برنامه اولیه ایجاد شود. در ادامه، برنامه مختل شده کشتی‌های باقی‌مانده در برنامه اولیه پهلوگاه با استفاده دو روش سراسری و محلی، برنامه‌ریزی مجدد می‌شوند.

در جدول ۱۱ و ۱۲، نتایج روش برنامه‌ریزی مجدد سراسری برای هر دو پایانه کانتینری بندر شهید رجایی مقایسه شدند. جدول ۱۱، هزینه الگوریتم‌ها و جدول ۱۲ زمان الگوریتم‌ها با هم مقایسه می‌شوند. ستون اول این جداول، تعداد کشتی‌های باقی‌مانده در برنامه اولیه پهلوگاه پس از وقوع اختلال را نشان می‌دهد و اعداد جدول، فاصله از بهترین پاسخ پیدا شده را گزارش می‌دهد که با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می‌گردد. از آنجا که تنوع داده‌های استفاده شده در این مقاله زیاد بوده، برای مقایسه دو روش بازیابی، از میانگین اعداد محاسبه شده استفاده گردیده است؛ به‌عنوان مثال به ازای ۵ کشتی باقی‌مانده، از ۲۵ مجموعه داده استفاده گردیده و اعداد نشان داده شده در این جدول‌ها، میانگین نتایج این ۲۵ مجموعه داده را نشان می‌دهد.

دو جدول ۱۳ و ۱۴ مشابه با جدول‌های ۱۱ و ۱۲، پاسخ و زمان اجرای الگوریتم‌ها را در روش برنامه‌ریزی مجدد محلی و برای هر دو پایانه کانتینری مقایسه می‌کند.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول (۹) مقایسه پاسخ الگوریتم‌های فرااابتکاری

تعداد کشتی	پایانه شماره ۱					پایانه شماره ۱				
	FCFS	GA	TS	ICA	ACO	FCFS	GA	TS	ICA	ACO
۲۰	۹,۶۷٪	۰,۸۱٪	۳,۹۲٪	۰,۸۱٪	۱,۵۳٪	۱۸,۱۷٪	۰,۴۶٪	۲,۳۱٪	۰,۴۶٪	۱,۵۲٪
۲۵	۱۲,۶۰٪	۰,۰۰٪	۲,۰۶٪	۰,۰۰٪	۳,۸۰٪	۱۷,۷۵٪	۲,۲۳٪	۳,۷۰٪	۲,۲۳٪	۵,۰۱٪
۳۰	۱۱,۴۵٪	۰,۰۷٪	۲,۱۸٪	۰,۵۷٪	۵,۴۰٪	۱۷,۱۳٪	۰,۰۳٪	۴,۷۹٪	۰,۸۱٪	۸,۲۵٪
۳۵	۱۲,۶۸٪	۰,۰۰٪	۱,۸۴٪	۱,۲۴٪	۶,۰۹٪	۱۲,۹۹٪	۰,۵۲٪	۷,۷۲٪	۲,۱۶٪	۹,۶۱٪
۴۰	۱۳,۹۲٪	۰,۹۳٪	۱,۸۶٪	۰,۸۴٪	۱۰,۵۹٪	۱۶,۹۷٪	۰,۰۰٪	۶,۱۷٪	۱,۱۱٪	۱۰,۹۵٪

جدول (۱۰) مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌های فرااابتکاری

تعداد کشتی	پایانه شماره ۱				پایانه شماره ۲			
	GA	TS	ICA	ACO	GA	TS	ICA	ACO
۲۰	۴۵,۹۲٪	۷۳۸,۴۶٪	۱۵۱,۶۱٪	۰,۰۰٪	۱۲,۳۳٪	۴۶۲,۳۵٪	۶۰,۰۱٪	۲۸,۳۴٪
۲۵	۶۲,۶۶٪	۱۰۰۸,۷۷٪	۱۹۱,۸۲٪	۳,۶۴٪	۷,۲۷٪	۷۲۱,۹۲٪	۱۰۲,۶۵٪	۲۴,۰۲٪
۳۰	۲۱,۹۲٪	۱۰۳۵,۴۶٪	۷۶,۹۶٪	۱۰,۳۹٪	۱۲,۴۳٪	۸۸۵,۸۱٪	۹۴,۶۴٪	۲۹,۷۲٪
۳۵	۱۴,۳۴٪	۱۰۸۶,۲۲٪	۱۱۹,۷۳٪	۱۶,۲۶٪	۲۳,۲۶٪	۱۱۱۷,۸۹٪	۸۶,۹۷٪	۲۶,۹۶٪
۴۰	۵,۴۱٪	۱۱۹۷,۴۸٪	۳۵,۷۰٪	۳۶,۷۲٪	۱۱,۷۱٪	۱۶۱۳,۱۰٪	۷۵,۷۶٪	۱۱۲,۴۱٪

جدول (۱۰) مقایسه پاسخ الگوریتم‌ها در روش برنامه‌ریزی مجدد سراسری

تعداد کشتی‌های باقی مانده	پایانه شماره ۱				پایانه شماره ۲			
	GA	TS	ICA	ACO	GA	TS	ICA	ACO
۵	۰,۶۵٪	۰,۶۵٪	۰,۶۵٪	۰,۰۴٪	۲,۲۲٪	۲,۱۶٪	۲,۱۶٪	۰,۳۲٪
۱۰	۰,۵۵٪	۰,۵۴٪	۰,۴۳٪	۰,۲۷٪	۱,۵۶٪	۱,۴۹٪	۱,۵۶٪	۱,۲۹٪
۱۵	۰,۲۹٪	۰,۶۳٪	۰,۲۴٪	۰,۳۷٪	۰,۸۵٪	۱,۱۲٪	۰,۸۲٪	۱,۸۲٪
۲۰	۰,۰۸٪	۰,۳۶٪	۰,۱۷٪	۳,۳۹٪	۰,۱۵٪	۰,۹۷٪	۰,۱۳٪	۷,۴۹٪
۲۵	۰,۰۲٪	۰,۳۴٪	۰,۶۶٪	۵,۱۲٪	۰,۲۳٪	۱,۱۶٪	۱,۲۷٪	۱۲,۱۰٪
۳۰	۰,۵۵٪	۱,۰۸٪	۰,۲۰٪	۱۳,۳۰٪	۰,۹۱٪	۱,۱۸٪	۰,۵۵٪	۱۲,۹۶٪
۳۵	۰,۶۴٪	۰,۶۶٪	۰,۵۳٪	۱۱,۴۷٪	۱,۲۸٪	۰,۸۸٪	۰,۲۶٪	۱۴,۸۱٪

جدول (۱۱) مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌ها در روش برنامه‌ریزی مجدد سراسری

تعداد کشتی‌های باقی مانده	پایانه شماره ۱				پایانه شماره ۲			
	GA	TS	ICA	ACO	GA	TS	ICA	ACO
۵	۱۴۸,۴۳٪	۱۱۳,۷۳٪	۱۸۹۶,۵۳٪	۱,۰۹٪	۱۵۸,۱۴٪	۲۰۰,۰۰٪	۱۷۶۵,۶۷٪	۰,۰۰٪
۱۰	۱۳۰,۵۵٪	۴۸۸,۸۹٪	۸۰۱,۰۸٪	۰,۰۰٪	۱۶۷,۴۷٪	۵۵۷,۱۲٪	۸۴۱,۴۲٪	۰,۰۰٪
۱۵	۱۴۲,۷۹٪	۸۳۵,۳۶٪	۴۲۲,۰۱٪	۰,۰۰٪	۲۰۷,۶۴٪	۸۷۲,۰۶٪	۴۹۸,۰۳٪	۰,۰۶٪
۲۰	۱۹۹,۷۲٪	۱۰۷۶,۵۴٪	۳۰۸,۴۳٪	۷,۴۰٪	۲۳۷,۳۳٪	۱۲۷۷,۰۳٪	۴۳۴,۷۲٪	۰,۰۰٪
۲۵	۴۰۰,۹۲٪	۴۵۶۶,۸۴٪	۴۴۴,۹۴٪	۰,۰۰٪	۴۰۲,۸۵٪	۱۶۲۸,۵۵٪	۴۷۱,۲۰٪	۰,۰۰٪
۳۰	۳۳۷,۴۹٪	۱۹۵۱,۶۶٪	۳۴۹,۸۲٪	۰,۰۰٪	۳۳۱,۶۲٪	۲۱۳۳,۱۹٪	۴۵۰,۰۵٪	۰,۰۰٪
۳۵	۳۴۳,۱۰٪	۲۸۱۹,۶۱٪	۴۸۱,۱۲٪	۰,۰۰٪	۳۴۹,۶۴٪	۲۶۱۵,۳۵٪	۴۶۶,۵۷٪	۰,۰۰٪

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

شکل‌های ۹ و ۱۰، هزینه و زمان الگوریتم‌های فرابتکاری را در روش‌های برنامه‌ریزی مجدد سراسری و محلی مقایسه می‌کند. با توجه به دامنه گسترده اعداد و فاصله زیاد نتایج از یکدیگر و برای مشاهده بهتر جزئیات مقایسه الگوریتم‌ها، محور عمودی نمودارهای این دو شکل با مقیاس لگاریتمی ترسیم می‌شود. با دقت به این دو شکل، می‌توان موارد زیر را استنباط کرد:

- در روش برنامه‌ریزی مجدد سراسری هر چه تعداد کشتی‌های باقی‌مانده در برنامه اولیه کم‌تر باشد، الگوریتم ACO به پاسخ‌های بهتری مواجه می‌شود. در مثال‌های عددی این مقاله، اگر تعداد کشتی‌های باقی‌مانده کم‌تر از ۱۵ عدد باشد، الگوریتم ACO عملکرد بهتری دارد.
- همان‌طور که در برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه مشاهده شد، الگوریتم ACO با افزایش تعداد کشتی‌ها، از پاسخ بهینه مسئله فاصله بیشتری می‌گیرد. این رفتار در برنامه‌ریزی مجدد پهلوگاه به روش سراسری نیز قابل مشاهده است.
- دو الگوریتم ژنتیک و ICO مشابه با مرحله برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه، عملکرد مناسبی در تعداد بالای کشتی‌های باقی‌مانده دارد.
- ازنظر زمان اجرای الگوریتم، در همه موارد الگوریتم ACO عملکرد مناسبی دارد.
- الگوریتم ACO در روش برنامه‌ریزی مجدد محلی، عملکرد بسیار مناسبی دارد. در روش برنامه‌ریزی مجدد محلی و در هر دو پایانه، الگوریتم ACO در کم‌ترین زمان ممکن، بهترین پاسخ ممکن را گزارش می‌دهد.
- نکته قابل‌تأمل در شکل ۱۰، پاسخ‌های مشابه دو الگوریتم ژنتیک و ICA می‌باشد.
- در روش برنامه‌ریزی مجدد سراسری، الگوریتم TS بسیار دیر به پاسخ بهینه می‌رسد اما در روش برنامه‌ریزی محلی این‌گونه نیست و حتی در برخی موارد سریع‌تر از الگوریتم ACO به پاسخ بهینه می‌رسد.

جدول (۱۲) مقایسه پاسخ الگوریتم‌ها در روش برنامه‌ریزی مجدد محلی

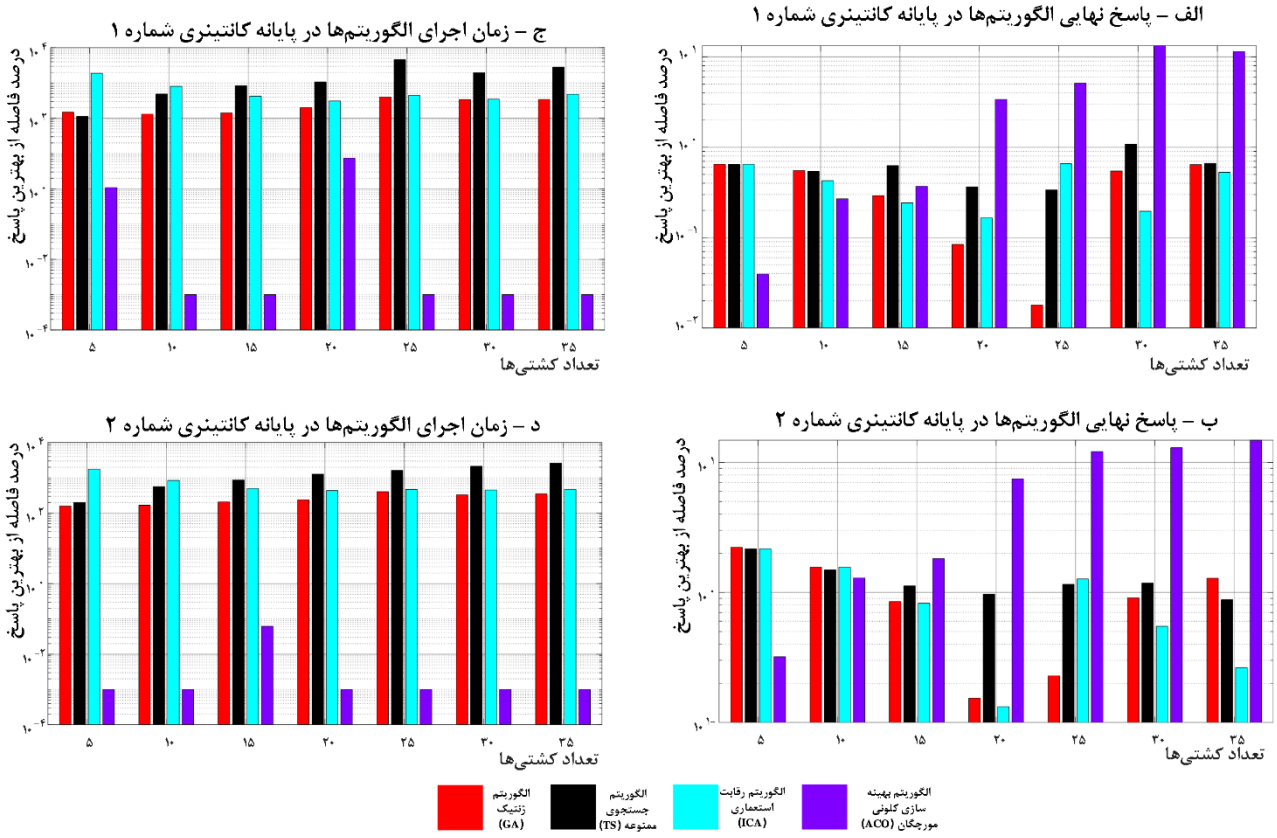
تعداد کشتی‌های باقی مانده	پایانه شماره ۱				پایانه شماره ۲			
	GA	TS	ICA	ACO	GA	TS	ICA	ACO
۵	۲,۶۲٪	۵,۴۵٪	۲,۶۲٪	۰,۰۰٪	۸,۵۶٪	۹,۱۶٪	۸,۵۶٪	۰,۰۰٪
۱۰	۲,۱۳٪	۴,۲۵٪	۲,۱۳٪	۰,۱۹٪	۹,۳۲٪	۹,۳۲٪	۹,۳۲٪	۰,۰۰٪
۱۵	۲,۶۳٪	۲,۳۹٪	۲,۶۳٪	۰,۱۲٪	۱,۴۵٪	۱,۴۵٪	۱,۴۵٪	۰,۰۰٪
۲۰	۳,۴۱٪	۴,۱۰٪	۳,۴۱٪	۰,۰۰٪	۴,۱۹٪	۴,۶۷٪	۴,۱۹٪	۰,۴۷٪
۲۵	۸,۶۵٪	۸,۷۰٪	۸,۶۵٪	۰,۰۰٪	۳,۴۵٪	۳,۴۵٪	۳,۴۵٪	۰,۰۰٪
۳۰	۹,۵۸٪	۱۲,۹۰٪	۸,۵۳٪	۱,۰۴٪	۱۵,۰۶٪	۱۵,۰۶٪	۱۵,۰۶٪	۰,۰۰٪
۳۵	۴,۳۴٪	۴,۳۴٪	۴,۳۴٪	۰,۶۹٪	۰,۷۷٪	۰,۷۷٪	۰,۷۷٪	۰,۰۰٪

جدول (۱۳) مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌ها در روش برنامه‌ریزی مجدد محلی

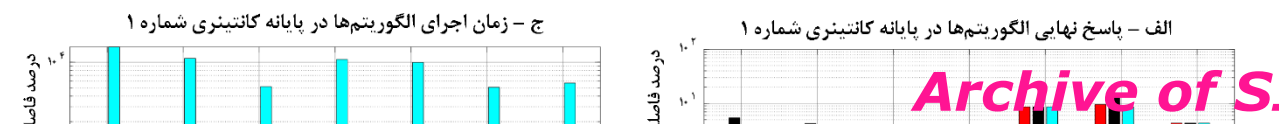
تعداد کشتی‌های باقی مانده	پایانه شماره ۱				پایانه شماره ۲			
	GA	TS	ICA	ACO	GA	TS	ICA	ACO
۵	۱۸۳۵,۷۶٪	۱۰۹,۶۳٪	۱۵۱۲۷,۵۱٪	۹۷,۳۴٪	۱۴۴۳,۰۴٪	۱۱۴,۵۳٪	۱۱۹۰۵,۵۸٪	۱۲۲,۶۸٪
۱۰	۱۲۹۹,۹۸٪	۵۱,۹۴٪	۱۱۱۰۱,۷۶٪	۱۰۶,۳۲٪	۵۰۱۸,۹۰٪	۳۱۲,۶۳٪	۳۸۷۰۴,۵۴٪	۱۲۵,۵۷٪
۱۵	۶۱۴,۷۳٪	۱۲,۸۳٪	۵۱۷۵,۰۹٪	۱۰۹,۵۲٪	۱۵۱۸,۰۵٪	۸۳,۰۷٪	۱۱۹۷۶,۷۷٪	۱۱۱,۹۸٪
۲۰	۱۲۵۵,۰۲٪	۲۰,۶۴٪	۱۰۷۷۷,۳۰٪	۱۰۹,۸۹٪	۱۳۲۵,۸۷٪	۶۴,۶۰٪	۱۰۴۵۶,۰۹٪	۹۹,۷۲٪
۲۵	۱۱۲۱,۴۰٪	۲۲,۲۱٪	۹۹۴۵,۷۵٪	۱۷۶,۷۲ ۱۱۶٪	۱۶۰۶,۹۸٪	۱۵۱,۷۵٪	۱۲۳۶۴,۶۹٪	۸۹,۳۳٪
۳۰	۶۳۵,۸۰٪	۳۷,۸۶٪	۵۰۷۴,۴۳٪	۹۴,۰۸٪	۳۴۹۷,۲۱٪	۸۹۹,۲۶٪	۲۱۹۰۸,۹۸٪	۹۷,۵۸٪
۳۵	۱۸۸,۷٪	۵۳,۰۱٪	۵۶۹۴,۳۲٪	۱۷۸,۰۵٪	۷۷۵,۹۳٪	۳۰,۱۳٪	۶۰۴۶,۵۴٪	۶۵,۳۲٪

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل (۹) مقایسه پاسخ و زمان اجرای الگوریتم‌ها در روش برنامه‌ریزی مجدد سراسری



Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۸- نتیجه‌گیری

برنامه‌ریزی پهلوگاه یکی از مسائل برنامه‌ریزی بندر می‌باشد که شامل دو زیر مسئله است؛ مسئله تخصیص پهلوگاه و مسئله تخصیص جرثقیل اسکله. برنامه‌ریزی پهلوگاه معمولاً با فرض صحت اطلاعات شرکت‌ها و عدم خرابی تجهیزات بندر و ... انجام می‌گیرد، اما در حین اجرای برنامه ممکن است اتفاقات پیش‌بینی نشده‌ای رخ دهند که اجرای برنامه را با چالش مواجه کنند. یکی از راه‌های مقابله با این چالش، برنامه ریزی مجدد پهلوگاه می‌باشد. مقاله حاضر با مدل‌سازی و حل مدل BAQCAP یک برنامه اولیه برای پهلوگاه برنامه‌ریزی می‌کند. سپس با ایجاد یک انحراف ساختگی در زمان ورود برخی از کشتی‌ها، برنامه اولیه را مختل شده و سپس با استفاده از دو روش برنامه‌ریزی مجدد سراسری و محلی، برنامه اولیه را مورد بازبینی قرار می‌دهد. ازآنجاکه مدل BAQCAP در دسته مسائل خیلی سخت قرار می‌گیرد، برای حل آن چهار الگوریتم فراابتکاری GA،ICA ، TS و ACO به کار گرفته شد. نتایج عددی این مقاله نشان می‌دهد که دو الگوریتم GA و ICA عملکرد مناسبی در حل مدل BAQCAP و روش برنامه‌ریزی مجدد سراسری دارند؛ اما برای روش برنامه‌ریزی مجدد محلی، عملکرد الگوریتم ACO مناسب است، به‌گونه‌ای که در کم‌ترین زمان ممکن بهترین پاسخ ممکن را گزارش می‌دهد. در مطالعات آینده می‌توان عملکرد الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری دیگر را هم بررسی کرد تا درنهایت بهترین الگوریتم برای حل مدل BAQCAP و روش‌های برنامه‌ریزی مجدد سراسری و محلی انتخاب شوند. مسائل برنامه‌ریزی پهلوگاه بخشی از مسائل عملیات جانب دریا می‌باشند که با اضافه کردن مسئله برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله تکمیل می‌شوند. در مطالعات آینده می‌توان یک مدل ادغامی برای هر سه مسئله تخصیص پهلوگاه، تخصیص جرثقیل اسکله و برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله مدل‌سازی و سپس عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری را برای حل و برنامه‌ریزی مجدد آن بررسی کرد.

۹- مراجع

[۱] C.-Y. Lee and D.-P. Song, "Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities," Transportation Research Part B: Methodological, vol. ۹۵, pp. ٤٤٢-٤٧٤, ۲۰۱۷.

[۲] H. J. Carlo, I. F. Vis, and K. J. Roodbergen, "Seaside operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions," Flexible Services and Manufacturing Journal, vol. ۲۷, no. ۲, pp. ۲۲٤-۲٦۲, ۲۰۱٥.

[۳] C. Bierwirth and F. Meisel, "A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals," European Journal of Operational Research, vol. ۲۰۲, no. ۳, pp. ٦۱٥-٦۲۷, ۲۰۱۰.

[٤] C. Bierwirth and F. Meisel, "A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals," European Journal of Operational Research, vol. ۲٤٤, no. ۳, pp. ٦۷٥-٦۸۹, ۲۰۱٥.

[٥] E. N. Joby Warrick. "Officials: Israel linked to a disruptive cyberattack on Iranian port facility." washington post. yun.ir/ms۹ph۱ (accessed.

[٦] Q. Zeng, Z. Yang, and X. Hu, "Disruption recovery model for berth and quay crane scheduling in container terminals," Engineering Optimization, vol. ٤۳, no. ۹, pp. ۹٦۷-۹۸۳, ۲۰۱۱.

[۷] C. Liang, Y. Huang, and Y. Yang, "A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning," Computers & Industrial Engineering, vol. ٥٦, no. ۳, pp. ۱۰۲۱-۱۰۲۸, ۲۰۰۹.

[۸] I. Vacca, M. Salani, and M. Bierlaire, "An exact algorithm for the integrated planning of berth allocation and quay crane assignment," Transportation Science, vol. ٤۷, no. ۲, pp. ۱٤۸-۱٦۱, ۲۰۱۳.

[۹] E. Lalla-Ruiz, J. L. González-Velarde, B. Melián-Batista, and J. M. Moreno-Vega, "Biased random key genetic algorithm for the tactical berth allocation problem," Applied Soft Computing, vol. ۲۲, pp. ٦۰-۷.۲۰۱٤ ,٦

[۱۰] G. Ilati, A. Sheikholeslami, and E. Hassannayebi, "A simulation-based optimization approach for integrated port resource allocation problem," PROMET-Traffic&Transportation, vol. ۲٦, no. ۳, pp. ۲٤۳-۲٥٥, ۲۰۱٤.

[۱۱] Z.-H. Hu, "Heuristics for solving continuous berth allocation problem considering periodic balancing utilization of cranes," Computers & Industrial Engineering, vol. ۸٥, pp. ۲۱٦-۲۲٦, ۲۰۱٥.

[۱۲] Q. Li, S. Tong, C. Yang, and N. Wang, "Optimization of operation scheme of container terminal based on disruption management," in

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

International Conference on Transportation Engineering ۲۰۰۹, ۲۰۰۹, pp. ۳٤۷۷-۳٤۸۲ .

[۱۳] Z.-q. Lu and L.-f. Xi, "A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time," European Journal of Operational Research, vol. ۲۰۷, no. ۳, pp. ۱۳۲۷-۱۳٤۰, ۲۰۱۰.

[۱٤] L. Zhen, L. H. Lee, and E. P. Chew, "A decision model for berth allocation under uncertainty," European Journal of Operational Research, vol. ۲۱۲, no ,۱ .pp. ٥٤-٦۸, ۲۰۱۱.

[۱٥] M. Rodriguez-Molins, M. Salido, and F. Barber, "Robust scheduling for berth allocation and quay crane assignment problem," Mathematical Problems in Engineering, vol. ۲۰۱٤, ۲۰۱٤.

[۱٦] M. Z. Li, J. G. Jin, and C. X. Lu, "Real-time disruption recovery for integrated berth allocation and crane assignment in container terminals," Transportation Research Record, vol. ۲٤۷۹, no. ۱, pp. ٤۹-٥۹, ۲۰۱٥.

[۱۷] Q. Zhang, Q. Zeng, and H. Yang, "A lexicographic optimization approach for berth schedule recovery problem in container terminals," Transport, vol. ۳۱, no. ۱, pp. ۷٦-۸۳, ۲۰۱٦.

[۱۸] C. Liu, L. Zheng, and C. Zhang, "Behavior perception-based disruption models for berth allocation and quay crane assignment problems," Computers & Industrial Engineering, vol. ۹۷, pp. ۲٥۸-۲۷٥, ۲۰۱٦.

[۱۹] X. Xiang, C. Liu, and L. Miao, "Reactive strategy for discrete berth allocation and quay crane assignment problems under uncertainty," Computers & Industrial Engineering, vol. ۱۲٦, pp. ۱۹٦-۲۱٦, ۲۰۱۸.

[۲۰] X. Lv ,J. G. Jin, and H. Hu, "Berth allocation recovery for container transshipment terminals," Maritime Policy & Management, pp. ۱-۱۷, ۲۰۲۰.

[۲۱] Ç. Iris and J. S. L. Lam, "Recoverable robustness in weekly berth and quay crane planning," Transportation Research Part B: Methodological, vol. ۱۲۲, pp. ۳٦٥-۳۸۹, ۲۰۱۹.

[۲۲] X. Lv, J. G. Jin, and H. Hu, "Berth allocation recovery for container transshipment terminals," Maritime Policy & Management, vol. ٤۷, no. ٤, pp. ٥٥۸-٥۷٤, ۲۰۲۰.

Archive of SID.ir