فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱٤، شماره ۳، بهار ۱٤۰۲، ص. ۲٦۷٤-۲٦۵۱

مقاله علمی-پژوهشی

# بررسی عملکرد دو روش بازیابی محلی و سراسری در مدیریت اختلال برنامه اولیه پهلوگاه

علی امیدوارپناه احمدآبادی، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه علم و صنعت ایران

عبدالرضا شیخ‌الاسلامی کندلوس (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه علم و صنعت ایران

**E-mail: Sheikh@iust.ac.ir**

## چکیده

***دسته‌ای از مسائل برنامه‌ریزی بندرها که موردتوجه مقاله‌ها و پژوهش‌های زیادی قرارگرفته است، مسائل برنامه‌ریزی پهلوگاه است. برنامه‌ریزی پهلوگاه شامل دو زیر مسئله می‌شود؛ مسئله تخصیص پهلوگاه و مسئله تخصیص جرثقیل اسکله. این مقاله قصد دارد با ادغام این دو زیر مسئله در قالب یک مدل ریاضی، برنامه بهینه پهلوگاه را برنامه‌ریزی کند. برای حل مدل ریاضی برنامه‌ریزی پهلوگاه، از دو الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان و جستجوی ممنوعه استفاده می‌شود. از طرفی، برنامه پهلوگاه در یک محیط دارای اختلال قرار دارد؛ به این معنی که در حین اجرای برنامه ممکن است اتفاقات غیرقابل پیش‌بینی رخ دهد که اجرای برنامه اولیه پهلوگاه را با مشکل مواجه کند. این اتفاقات غیرقابل پیش‌بینی اصطلاحاً با عنوان اختلال شناخته می‌شوند که می‌توانند هزینه‌های مضاعفی را به بندر تحمیل کند و یا حتی برنامه اولیه پهلوگاه را غیرقابل اجرا کند. به همین دلیل تمرکز این مقاله بر روی بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه در شرایط وقوع اختلال قرار گرفته است. بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه با دو روش کلی انجام می‌گیرد؛ بازیابی سراسری و بازیابی محلی. در این مقاله دو روش بازیابی سراسری و محلی با هم مقایسه می‌شوند تا روشی که عملکرد بهینه در بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه دارد شناسایی شود. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که روش بازیابی محلی در مدت زمان کم‌تری به پاسخ‌های بهتری منتج می‌شود. در این مقاله برای اعتبار سنجی مدل‌ها و روش‌های بازیابی، از داده‌های ورود و خروج کشتی‌ها در بندر شهید رجایی استفاده می‌شود.***

**واژه‌های کلیدی:** بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه، بازیابی سراسری، بازیابی محلی، برنامه‌ریزی پهلوگاه، مدیریت اختلال

## ۱. مقدمه

برنامه‌ریزی پهلوگاه شامل ۲ مسئله می‌شود؛ مسئله تخصیص پهلوگاه (BAP)[۱]، مسئله تخصیص جرثقیل اسکله (QCAP)[۲]. در مسئله تخصیص پهلوگاه دو پارامتر زمان و مکان پهلوگیری کشتی‌ها تعیین می‌شود. مسئله تخصیص جرثقیل اسکله تعداد جرثقیل‌های اسکله‌ای که در هر بازه زمانی بر روی کشتی‌ها فعالیت می‌کنند را محاسبه می‌کند.

مسائل برنامه‌ریزی پهلوگاه کاملاً به هم مرتبط هستند. به‌عنوان‌مثال، حل مسئله QCAP تأثیر زیادی بر روی مدت‌زمان تخلیه/بارگیری می‌گذارد (هرچه تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده بیشتر باشد، عملیات تخلیه/بارگیری کشتی‌ها سریع‌تر انجام می‌شود). به همین دلیل رویکرد جدیدی برای مدل‌سازی مسائل عملیات جانب دریا توسط پژوهشگران پیشنهادشده که مسائل عملیات جانب دریا را به‌صورت به‌هم‌پیوسته و در قالب یک مدل، مدل‌سازی می‌کنند. به این نوع مدل‌ها، اصطلاحاً مدل ادغامی[۳] گفته می‌شود. در مدل‌سازی ادغامی، هر دو مسئله در قالب یک مدل، مدل‌سازی و حل می‌شوند. رویکرد دیگر برای مدل‌سازی این مسائل، رویکرد مدل‌سازی سلسله مراتبی است؛ یعنی دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت جداگانه و به ترتیب مدل‌سازی و حل شوند. پژوهش‌های گذشته، نشان می‌دهد که مدل‌سازی ادغامی اثر متقابل دو مسئله را بر روی یکدیگر در نظر می‌گیرد و درنتیجه به پاسخ‌های بهتری منتج می‌شود.

برنامه‌ریزی پهلوگاه در یک محیط دارای عدم قطعیت انجام می‌شود. لی و سنگ (Lee and Song 2017) عدم قطعیت‌ها به دو نوع کلی تقسیم شدند: عدم قطعیت‌های باقاعده[۴] و اختلال[۵]. آن دسته از وقایع و فعالیت‌های احتمالی که دائماً تکرار می‌شوند را عدم قطعیت‌های باقاعده می‌نامند. این دسته از عدم قطعیت‌ها را می‌توان در زمان برنامه‌ریزی در نظر گرفت. به آن دسته از وقایعی که به‌صورت گاه‌به‌گاه یا فقط یک‌بار رخ می‌دهند و اغلب غیرقابل‌پیش‌بینی هستند، اختلال می‌گویند. با توجه به نرخ وقوع اختلال‌ها، پیش‌بینی و در نظر گرفتن آن‌ها در زمان برنامه‌ریزی پیچیده است. وقوع این اختلال‌ها موجب انحراف از برنامه اولیه می‌شود؛ برخی اوقات مقدار انحراف به حدی زیاد است که اجرای برنامه اولیه را غیرممکن می‌کند. به بازیابی برنامه‌های اولیه پس از رخ دادن اختلال‌ها به‌گونه‌ای که کم‌ترین هزینه را به بندر تحمیل کند، اصطلاحاً مدیریت اختلال[۶] گفته می‌شود.

مدل مدیریت اختلال با دو روش قابل حل است؛ روش بازیابی سراسری[۷] و بازیابی محلی[۸]. در روش بازیابی سراسری، برنامه پهلوگیری همه کشتی‌هایی که زمان پهلوگیری‌شان پس از وقوع اختلال در برنامه اولیه است، بازیابی می‌شود؛ اما در روش بازیابی محلی، بازیابی برنامه اولیه برای کشتی‌هایی انجام می‌شود که از پدیده اختلال متأثر می‌شوند.

بیشتر مطالعات موجود که به بررسی مدل‌های عملیات جانب دریا پرداختند رویکرد قطعی در حل مسئله داشتند و تعدادی از مقالات هم عدم قطعیت را در نظر گرفتند؛ اما تعداد بسیار کمی از مقالات هستند که پدیده اختلال را موردبررسی قراردادند و با رویکرد مدیریت اختلال به حل مسئله پرداختند. در قسمت دوم همین مقاله این دسته از مطالعات به‌تفصیل موردبررسی قرار خواهند گرفت.

در ادامه این مقاله، ابتدا مروری بر پژوهش‌های انجام شده در رابطه با برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه و بازیابی آن، انجام می‌گیرد. در بخش سوم، مدل ادغامی تخصیص هم‌زمان پهلوگاه و جرثقیل اسکله مدل‌سازی ریاضی می‌شود تا به کمک آن به برنامه اولیه پهلوگاه دست پیدا کرد. مدل ادغامی مدیریت اختلال برنامه پهلوگاه در بخش چهارم مدل‌سازی می‌شود. در بخش پنجم با استفاده از داده‌های ورود و خروج کشتی‌ها در بندر شهید رجایی، به برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه و مدیریت اختلال آن در شرایط وقوع اختلال پرداخته می‌شود. در بخش انتهایی، نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش به‌صورت خلاصه جمع‌بندی می‌شوند.

## ۲. پیشینه پژوهش

تاکنون سه مقاله مروری جهت بررسی و دسته‌بندی مدل‌های برنامه‌ریزی پهلوگاه نگارش شده‌اند. برای اولین بار دسته‌بندی مدل‌های برنامه‌ریزی پهلوگاه توسط بایروِرث و مایسل در سال ۲۰۱۰ (Bierwirth and Meisel 2010) انجام گرفت. آن‌ها دسته‌بندی مدل‌های عملیات جانب دریا را با کمک ٤ معیار انجام دادند؛ معیار نوع پهلوگاه، معیار زمان، معیار زمان تخلیه/بارگیری و معیار تابع هدف.

- نوع پهلوگاه می‌تواند گسسته، پیوسته و یا ترکیبی باشد. در پهلوگاه گسسته، اسکله به پهلوگاه‌های مجزایی تقسیم می‌شود و در هرکدام از این پهلوگاه‌ها تنها می‌توان عملیات تخلیه/بارگیری یک کشتی را انجام داد. در پهلوگاه‌های پیوسته، یک کشتی می‌تواند در هر نقطه در امتداد اسکله پهلوگیری کند. در پهلوگاه‌های ترکیبی، اسکله به تعدادی پهلوگاه مجزا و گسسته تقسیم می‌شود، اما کشتی‌ها می‌توانند بیش از یک پهلوگاه را اشغال کنند. در مقاله مروری (Carlo, Vis et al. 2015) مدل‌هایی که پهلوگاه‌های تورفته را در نظر گرفتند را هم دسته‌بندی کردند.
- درنظرگرفتن زمان در انواع مدل‌های برنامه‌ریزی پهلوگاه می‌تواند سه نوع مختلف داشته باشد؛ ایستا، پویا و موعد مقرر. در حالتی که زمان ایستا در نظر گرفته می‌شود، فرض بر این است که همه کشتی‌ها در یک‌زمان وارد بندر می‌شوند و منتظر پهلوگیری در پهلوگاه هستند. در حالت پویا، کشتی‌ها در زمان‌های مختلف وارد بندر شده و منتظر پهلوگیری در بندر می‌شوند. در حالت موعد مقرر، فرض بر این است که هر کشتی باید در یک‌زمان مشخصی از بندر خارج شود. بایروِرث و مایسل در سال ۲۰۱۵ (Bierwirth and Meisel 2015) دو نوع دیگر مدل‌ها را معرفی کردند؛ دوره‌ای و تصادفی. در مدل‌هایی که زمان ورود کشتی‌ها به‌صورت دوره‌ای در نظر گرفته شدند، فرض بر این است که کشتی‌ها به‌صورت دوره‌ای (مثلاً هر هفته) و در زمان ثابتی وارد بندر می‌شوند. مدل‌هایی که عدم قطعیت‌های باقاعده در زمان ورود کشتی را در نظر می‌گیرند، در دسته مدل‌های تصادفی دسته‌بندی می‌شوند.
- زمان بارگیری/تخلیه کشتی‌ها به دو صورت در نظر گرفته می‌شود؛ ثابت، وابسته. زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها می‌تواند به تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده شده در هر بازه زمانی، محل پهلوگیری کشتی‌ها، تعداد کانتینرهای کشتی و ... وابسته باشد. در برخی از مقالات که مسئله BAP را به صورت جداگانه مدل‌سازی و حل کردند، زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها را ثابت فرض کردند. بایروِرث و مایسل در سال ۲۰۱۵ (Bierwirth and Meisel 2015) نوع دیگری از مدل‌ها را دسته‌بندی کردند که عدم قطعیت در زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها را نیز در نظر گرفته‌اند.
- برنامه‌ریزی پهلوگاه از جنس برنامه‌ریزی ریاضی است که در آن معمولاً به دنبال کمینه یا بیشینه کردن مقدارهای عددی هستند. تابع هدف نشان می‌دهد که با تغییر متغیرهای مسئله، برنامه تا چه اندازه به سمت بهینگی حرکت می‌کند. توابع هدفی که در مسائل عملیات جانب دریا به آن پرداخته می‌شود شامل مواردی از قبیل کمینه کردن زمان انتظار کشتی‌ها، کمینه کردن زمان تخلیه/بارگیری، کمینه کردن تأخیر در اعزام کشتی‌ها، کمینه کردن هزینه‌های عملیاتی بندر به‌وسیله استفاده بهینه از منابع بندر (جرثقیل، وسایل نقلیه، فضای پهلوگاه و نیروی انسانی)، کمینه کردن هزینه حمل کانتینرهای کشتی در بندر با کمک انتخاب مکان بهینه پهلوگیری و ... .

در ادامه این بخش مقالاتی که به برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه و بازیابی آن در شرایط وقوع اختلال پرداختند، مرور اجمالی خواهند شد.

ژو و کانگ (Zhou and Kang 2008) دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت هم‌زمان و با تصادفی درنظر گرفتن زمان ورود کشتی‌ها مدل‌سازی کردند. تابع هدف مدل آن‌ها کمینه کردن مجموع زمان انتظار کشتی‌ها در پایانه کانتینری بود. آن‌ها برای حل مدلشان از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند.

لو و خی (Lu and Xi 2010) دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت غیرخطی و استوار، ادغام و مدل‌سازی کردند. آن‌ها یک شبیه‌سازی بر مبنای الگوریتم ژنتیک انجام دادند تا محل پهلوگیری کشتی و تعداد جرثقیل تخصیص داده به کشتی را به‌صورت هم‌زمان به دست آورند. هم‌چنین به جرثقیل‌ها اجازه داده شد که پیش از اتمام عملیات تخلیه/بارگیری کشتی‌ها، مجدداً به کشتی دیگری تخصیص پیدا کنند. در مقاله آن‌ها عدم قطعیت دو پارامتر زمان ورود کشتی و زمان تخلیه/بارگیری، در نظر گرفته‌شده است.

لی و همکارانش (Li, Tong et al. 2009) مسئله بازیابی برنامه تخصیص پهلوگاه در حالتی که زمان ورود کشتی‌ها تأخیر داشته باشد را مطالعه کردند. آن‌ها مدلی برای مدیریت اختلال پیشنهاد دادند که هزینه بازیابی را کاهش می‌دهد و برای حل مدلشان از الگوریتم ژنتیک خود تطبیقی استفاده کردند.

ژن و همکارانش (Zhen, Lee et al. 2011) مسئله تخصیص پهلوگاه را با در نظر گرفتن عدم قطعیت در دو پارامتر زمان ورود و زمان تخلیه/بارگیری، مدل‌سازی کردند. آن‌ها عدم قطعیت را با استفاده از مدل‌سازی دومرحله‌ای مسئله، در نظر گرفتند؛ در مرحله اول یک برنامه اولیه برای تخصیص پهلوگاه مدل‌سازی و حل کردند، در مرحله دوم یک مدل برای بازیابی برنامه اولیه تخصیص پهلوگاه مدل‌سازی کردند. هدف آن‌ها از بازیابی برنامه پهلوگاه، کمینه کردن هزینه‌های ناشی از انحراف برنامه جدید از برنامه اولیه بود. آن‌ها برای حل مدلشان از الگوریتم فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید استفاده کردند.

زِنگ و همکارانش (Zeng, Yang et al. 2011) ابتدا دو مدل برای برنامه‌ریزی پهلوگاه و جرثقیل اسکله مدل‌سازی و حل کردند. آن‌ها برای اولین بار روش بازیابی محلی را در بازیابی عملیات جانب دریا پیشنهاد دادند. آن‌ها دو استراتژی برای بازیابی برنامه اولیه تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله پیشنهاد دادند؛ بازیابی برنامه جرثقیل‌های اسکله و بازیابی برنامه تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله. برای هرکدام از استراتژی‌های پیشنهادشده یک مدل مجزا پیشنهاد دادند و هرکدام از مدل‌ها را با روش بازیابی محلی حل کردند. هدف آن‌ها از مدل‌سازی بازیابی برنامه اولیه، کمینه کردن جریمه انحراف از برنامه اولیه بود. نتایج مطالعه زنگ و همکارانش نشان داد که روش بازیابی محلی، در زمان کمتری به پاسخ می‌رسد اما روش بازیابی سراسری، نتایج بهینه را گزارش می‌دهد.

مولینز و همکارانش (Rodriguez-Molins, Salido et al. 2014) یک رویکرد استوار برای دو مسئله BAP و QCAP پیشنهاد کردند. رویکرد پیشنهادی آن‌ها، در نظر گرفتن زمان حائل بین تخلیه/بارگیری کشتی‌ها است. آن‌ها با در نظر گرفتن استواری برنامه تخصیص پهلوگاه، عدم قطعیت و پویایی محیط برنامه‌ریزی را مدل‌سازی کردند. تابع هدف آن‌ها در مدل پیشنهادی‌شان کمینه کردن زمان کل تخلیه/بارگیری کشتی‌ها، بیشینه کردن زمان حائل بین کشتی‌ها و کمینه کردن انحراف معیار زمان حائل بوده است.

لی و همکارانش (Li, Jin et al. 2015) به بررسی بهینه‌سازی و بازیابی بلادرنگ مسئله ادغامی BAP و QCAP در شرایط اختلال پرداختند. در مدل آن‌ها به جرثقیل‌های اسکله اجازه داده شد 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 اولویت کشتی‌ها برای سریع‌تر اعزام شدن در نظر گرفته‌شده است. در مدل آن‌ها هم کیفیت خدمات بیشینه و هم هزینه ناشی از بازیابی کمینه می‌شود.

ژانگ و همکارانش (Zhang, Zeng et al. 2016) یک روش بهینه‌سازی لکسیکوگرافی برای بازیابی برنامه‌های پهلوگاه در پایانه‌های کانتینری ارائه دادند. آن‌ها یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهاد دادند که سطوح مختلف رضایت کلیه ذی‌نفعان را در نظر می‌گیرد. آن‌ها کشتی‌ها را 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 داده است که مدل چندهدفه، نتایج بهتری را به ارمغان آورده است.

لیو و همکارانش (Liu, Zheng et al. 2016) یکی از منابع اختلال، یعنی اختلال ناشی از خرابی جرثقیل‌های اسکله در میانه اجرای برنامه، بررسی کردند. هدف آن‌ها 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 اسکله را در نظر گرفتند و به‌منظور برنامه‌ریزی مجدد پهلوگاه تحت اثر این اختلال، یک مدل مجزا پیشنهاد دادند. 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.

خیانگ و همکارانش (Xiang, Liu et al. 2018) تخصیص هم‌زمان پهلوگاه گسسته و جرثقیل اسکله را در محیط دارای عدم قطعیت بررسی کردند. آن‌ها چهار نوع اختلال را در نظر گرفتند؛ انحراف در زمان ورود کشتی، خرابی جرثقیل‌های اسکله، انحراف در زمان تخلیه/بارگیری کشتی و ورود کشتی برنامه‌ریزی نشده به بندر برای پهلوگیری. در مقاله آن‌ها دو استراتژی واکنشی و پیش‌کنشی مقایسه شدند. در استراتژی واکنشی، برنامه‌ریزی اولیه با فرض قطعی بودن داده‌ها انجام می‌شود و در صورت وقوع اختلال، برنامه اولیه بازیابی می‌شود؛ اما در استراتژی پیش‌کنشی برنامه‌ریزی اولیه با درنظر گرفتن عدم قطعیت داده‌ها انجام می‌گیرد. نتایج مقاله آن‌ها 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.

آیریس و لام (Iris and Lam 2019) یک رویکرد بهینه‌سازی استوار قابل بازیابی برای برنامه هفتگی BAP و QCAP توسعه دادند. آن‌ها، 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 در نظر گرفته شده است. تابع هدف مدل آن‌ها کمینه‌سازی هزینه برنامه پایه، هزینه ناشی از بازیابی برنامه و هزینه حل سناریوهای مختلف عدم قطعیت بود. 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.

الِوی و همکارانش (Lv, Jin et al. 2020) بازیابی مسئله تخصیص پهلوگاه در بندرهای ترانسشیپمنت و در محیط اختلال را بررسی کردند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی برای کمینه کردن هزینه بازیابی برنامه اولیه بندر که شامل دو مسئله BAP و QCAP می‌شود ایجاد کردند. در مدل آن‌ها اتصال بین کشتی‌های بزرگ‌تر و کشتی‌های کوچک‌تر در فرایند ترانسشیپمنت در نظرگرفته شده است. 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. 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.

اسکِپلر و همکارانش (Schepler, Absi et al. 2019) مسئله BAP را به‌صورت گسسته و با درنظر گرفتن تصادفی بودن زمان ورود کشتی‌ها بررسی کردند. آن‌ها با هدف کمینه کردن زمان حضور کشتی در بندر، کشتی‌ها را برنامه‌ریزی کردند. آن‌ها سه روش واکنشی، پیش‌کنشی و واکنشی-پیش‌کنشی را برای درنظر گرفتن عدم قطعیت زمان ورود کشتی‌ها بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد در حالتی که عدم قطعیت کم باشد، روش واکنشی-پیش‌کنشی نتایج بهتری گزارش می‌دهد و اگر میزان عدم قطعیت زیاد باشد، روش واکنشی به نتایج بهتری منتج می‌شود.

کیم و همکارانش (Kim, Park et al. 2021) یک استراتژی برنامه‌ریزی مجدد پیشنهاد کردند که هزینه‌های ناشی از اختلال را کاهش می‌دهد. آن‌ها مدلشان را با داده‌های واقعی اعتبارسنجی کردند. نتایج مقاله آن‌ها نشان می‌دهد که تأخیر کل در روش پیشنهادی آن‌ها کاهش پیدا می‌کند.

لیو همکارانش (Liu, Xiang et al. 2020) مسئله BAP با درنظر گرفتن عدم قطعیت زمان ورود کشتی‌ها و زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها بررسی کردند. آن‌ها سه مدل دو مرحله‌ای بهینه‌سازی استوار برای BAP مدل‌سازی کردند که بدون نیاز به پارامترهای آماری، سناریوهای احتمالی را شرح می‌دهد. نتایج مقاله آن‌ها نشان می‌دهد که با کمی افزایش در هزینه‌های برنامه اولیه پهلوگاه، می‌توان مقدار استواری برنامه پهلوگاه را افزایش دهد.

یان و همکارانش (Yan, Lu et al. 2019) مدل پویای BAP را با درنظر گرفتن عدم قطعیت زمان ورود کشتی‌ها و انعطاف‌پذیر بودن فضای پهلوگاه مدل‌سازی و حل کردند. انعطاف‌پذیری فضای پهلوگاه با بلوکی در نظر گرفتن پهلوگاه انجام گرفت؛ به این معنی که فضای پهلوگاه به چندین قطعه و بلوک تقسیم شد. به کشتی‌های بزرگ می‌توان تعدادی از این بلوک‌ها را تخصیص داد اما هر بلوک نمی‌تواند به دو کشتی تخصیص پیدا کند. نتایج عددی، مؤثر و استوار بودن مدل انعطاف‌پذیر و مؤثر بودن مسئله تخصیص پهلوگاه را نشان داد.

رودریگز و آگرا (Rodrigues and Agra 2021) سه مسئله BAP، QCAP و برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله را با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان ورود کشتی‌ها مدل‌سازی و حل کردند. آن‌ها هر سه مسئله را به‌صورت استوار و در دو مرحله مدل‌سازی کردند؛ در مرحله اول مسئله BAP با در نظر گرفتن زمان ورود قطعی کشتی‌ها مدل‌سازی شد و مسئله تخصیص و برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله با زمان ورود کشتی حل شدند. آن‌ها جرثقیل‌های همگن و غیرهمگن را درنظر گرفتند. نتایج عددی، سخت‌تر شدن مسئله در حالتی که جرثقیل‌ها غیرهمگن هستند را نشان می‌دهند.

تاکنون مطالعات زیادی در حوزه برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه انجام گرفته است. همان‌گونه که در مقاله‌های مروری بایِروِرث و مایسل (Bierwirth and Meisel 2010, Bierwirth and Meisel 2015) قابل مشاهده است، تعداد کمی از پژوهشگران مسائل برنامه‌ریزی پهلوگاه را به‌صورت ادغامی مدل‌سازی و حل کردند. از طرفی دیگر، در دهه گذشته مدیریت اختلال در حوزه‌های مختلف برنامه‌ریزی (نظیر صنعت حمل‌ونقل هوایی، برنامه‌ریزی ماشین، برنامه‌ریزی لجستیک، برنامه‌ریزی تولید، برنامه‌ریزی پروژه و هماهنگی زنجیره تأمین) توجه زیادی را جلب کرده است. بااین‌حال، تعداد کمی از مقالات، مدیریت اختلال در صنعت کشتی‌رانی را بررسی کردند. تا آنجا که می‌دانیم برای اولین بار زِنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ (Zeng, Yang et al. 2011) روش بازیابی محلی در بازیابی برنامه پهلوگاه در شرایط وقوع اختلال استفاده شده است. آن‌ها صرفاً به معرفی روش بازیابی محلی پرداختند و عملکرد این روش را بررسی نکردند. از طرفی، برنامه‌ریزی نامناسب در زمان وقوع اختلال باعث افزایش تاخیرات و حتی باعث به وجود آمدن شرایط بحرانی شود. درنتیجه انتخاب روش بهینه از بین روش‌های موجود جهت مدیریت اختلال از ضرورت‌های علمی محسوب می‌شود (Hassannayebi, et al. 2018). به همین

دلیل این مقاله قصد دارد تا دو روش بازیابی محلی و سراسری را با هم مقایسه کند تا روشی که عملکرد بهتری دارد شناسایی شود.

## ۳. مدل‌سازی ریاضی برنامه اولیه پهلوگاه

برنامه‌ریزی پهلوگاه شامل دو مسئله می‌شود؛ BAP و QCAP. این مقاله، برای مدل‌سازی این دو مسئله از رویکرد مدل‌سازی ادغامی کمک می‌گیرد؛ چراکه نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات پیشین، عملکرد بهتر این رویکرد را نسبت به رویکرد مدل‌سازی سلسله مراتبی نشان می‌دهد. این بخش به مدل‌سازی مسئله تخصیص هم‌زمان پهلوگاه و جرثقیل اسکله (BAQCAP)[9] می‌پردازد.

### 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) برای هر کشتی بر اساس محل انبار کانتینرهایش در بندر، بهترین محل پهلوگیری وجود دارد.

۳) پهلوگاه پیوسته است و کشتی‌ها می‌توانند در هر محلی از پهلوگاه پهلوگیری کنند.

٤) 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.

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

٦) جرثقیل‌های اسکله می‌توانند پیش از اتمام عملیات تخلیه/بارگیری کشتی، به کشتی دیگری تخصیص یابند.

۷) تعداد جرثقیل‌های اسکله تخصیص داده‌شده به کشتی، می‌تواند در طول مدت‌زمان تخلیه/بارگیری تغییر کند.

### ۳-۲ تعریف پارامترها

نمادها و علائمی که در این بخش استفاده می‌شوند به دو دسته تقسیم می‌شوند؛ نمادهای نشان‌دهنده اطلاعات کشتی و نمادهای نشان‌دهنده متغیرهای تصمیم مدل BAQCAP. این دو دسته از نمادها در جدول‌های ۱ و ۲ تعریف می‌شوند.

$$Min \sum_{i}^{N}\left\{C_{1i}|x_i - b_i| + C_{2i}(e_i - d_i) + C_3\sum_{t=1}^{T} r_{it}\right\} \quad (۱)$$

$$\sum_{t\epsilon T}\sum_{q=1}^{Q} q \times r_{itq} = \left\lceil\frac{NC_i}{MPH}\right\rceil, \quad \forall\, i = 1,2,\dots,N \quad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{t\epsilon T} q \times r_{itq} \le Q, \quad \forall\, t \quad (۳)$$

$$q_i^{min} \le \sum_{q=1}^{Q} q \times r_{itq} \le q_i^{max}, \quad \forall i,t \quad (٤)$$

$$\sum_{q=1}^{Q} r_{itq} = r_{it}, \quad \forall\, i,t \quad (۵)$$

$$\sum_{t\epsilon T} r_{it} = e_i - y_i, \quad \forall\, i \quad (٦)$$

$$B_i \le x_j + M\left(1 - Z_{ij}^{x}\right), \quad \forall\, i,j = 1,2,\dots,N \quad i \ne j \quad (۷)$$

$$e_i \le y_j + M\left(1 - Z_{ij}^{y}\right), \quad \forall\, i,j = 1,2,\dots,N \quad i \ne j \quad (۸)$$

$$Z_{ij}^{x} + Z_{ji}^{x} + Z_{ij}^{y} + Z_{ji}^{y} \ge 1, \quad \forall i,j = 1,2,\dots,N \quad i \ne j \quad (۹)$$

$$y_i \ge a_i, \forall\, i = 1,2,\dots,N \quad (۱۰)$$

$$B_i \le L, \forall i = 1,\dots,N \quad (۱۱)$$

$$e_i \le T, \forall i = 1,\dots,N \quad (۱۲)$$

$$x_i \epsilon \{0,1,,2,\dots,L - l_i\}, \quad \forall\, i \quad (۱۳)$$

$$Z_{ij}^{x}, Z_{ij}^{y}, r_{itq}, r_{it} = 1\ or\ 0, \quad \forall\, i,j,t \quad i \ne j \quad (۱٤)$$

**جدول ۱. نمادهای معرف اطلاعات کشتی**

| | |
|---|---|
| طول کل پهلوگاه که به قسمت‌های $\delta = 10$ متری تقسیم می‌شود. | |
| تعداد کل کشتی‌ها | N |
| تعداد کل جرثقیل‌های موجود در پایانه | Q |
| مدت‌زمان افق برنامه‌ریزی. این پارامتر به قسمت‌های $\varepsilon = 1$ ساعتی تقسیم‌بندی می‌شود | T |
| زمان تخمین زده‌شده ورود کشتی $i$ | $a_i$ |

| | |
|---|---|
| $l_i$ | طول کشتی $i$ که به قسمت‌های $\delta = 10$ متری تقسیم می‌شود. |
| $NC_i$ | تعداد کانتینرهای کشتی $i$ که باید در 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. |
| $q_i^{mi}$ | حداقل تعداد جرثقیل موردنیاز برای خدمات‌رسانی به کشتی $i$ |
| $q_i^{ma}$ | حداکثر تعداد جرثقیلی که می‌تواند به کشتی $i$ خدمات‌رسانی کند. |
| $C_{1i}$ | هزینه اضافی حمل بر مبنای فاصله، ناشی از عدم پهلوگیری کشتی در بهترین محل پهلوگیری‌اش $(\frac{\text{واحد پول}}{\text{متر}})$ |
| $C_{2i}$ | جریمه ناشی از اعزام شدن کشتی دیرتر از موعد مقرر $(\frac{\text{واحد پول}}{\text{ساعت}})$ |
| $C_3$ | 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 |

## ۳-۳ مدل‌سازی BAQCAP

مدل مسئله BAQCAP که بدنه اصلی آن از مقاله (Zeng, Yang et al. 2011) اقتباس‌شده، 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 هستند؛ هزینه ناشی از پهلوگیری کشتی‌ها در محل غیر بهینه، هزینه تأخیر در اعزام کشتی و هزینه عملیات تخلیه/بارگیری توسط جرثقیل‌های اسکله.

روابط شماره ۱ تا ١٤، نشانگر مدل ریاضی BAQCAP هستند. مدل BAQCAP شامل دو دسته محدودیت است؛ محدودیت‌های مرتبط با مسئله QCAP (محدودیت (۲) تا (٦)) و محدودیت‌های مرتبط با مسئله BAP (محدودیت (۷) تا (۱۳)).

**جدول ۲. نمادهای معرف متغیر تصمیم در مدل BAQCAP**

| | |
|---|---|
| $x_i$ | محل پهلوگیری ابتدای کشتی $i$ |
| $B_i$ | محل پهلوگیری انتهای کشتی $i$ $\left(B_i = x_i + l_i + \text{فاصله ایمنی}\right)$ |
| $y_i$ | 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. |

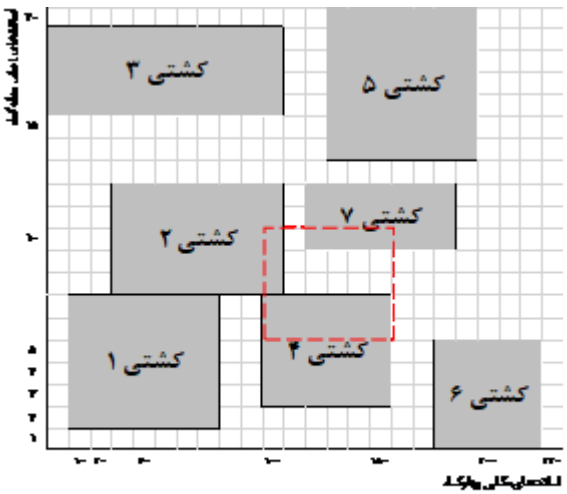
- محدودیت (۲) محاسبه متغیر $r_{itq}$ را نشان می‌دهد. در مقاله زِنگ و همکارانش تعداد جرثقیل–ساعت مورد نیاز کشتی‌ها، بخشی از داده‌های ورودی مسئله درنظر گرفته شده است اما در این مقاله تعداد جرثقیل–ساعت مورد نیاز برای هر کشتی براساس تعداد کانتینرهایی که بایستی تخلیه/بارگیری شوند (TEU) محاسبه می‌شود.
- محدودیت (۳)، اطمینان می‌دهد که در هر بازه زمانی، مجموع جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده به کشتی‌ها حداکثر به تعداد جرثقیل‌های موجود در بندر است.
- محدودیت (٤)، تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده شده به هر کشتی را کنترل می‌کند. هر کشتی حداقل تعداد جرثقیلی را درخواست می‌کند و بر اساس طول کشتی، می‌تواند حداکثر

تعداد جرثقیلی را بپذیرد. این محدودیت، کنترل می‌کند که تعداد جرثقیل تخصیص داده شده به کشتی از حداقل تعداد جرثقیل کمتر نباشد و از حداکثر تعداد جرثقیل هم بیشتر نباشد.

- محدودیت (۵)، پارامتر $r_{it}$ را محاسبه می‌کند.
- محدودیت (٦)، بیان می‌کند 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. به این معنی که اگر این محدودیت رعایت نشود، پاسخ مدل شدنی است اما ترجیح بر این است که این محدودیت رعایت شود. در صورتی از این محدودیت صرف‌نظر می‌شود که پاسخ ناشی از آن، هزینه به‌مراتب کم‌تری را به بندر تحمیل کند.
- محدودیت (۷) و (۸) نحوه محاسبه دو پارامتر $Z_{ij}^{x}, Z_{ij}^{y}$ را نشان می‌دهد.
- محدودیت (۹) تداخل کشتی‌ها را بررسی می‌کند. این محدودیت بررسی می‌کند که کشتی‌ها در برنامه پهلوگاه، تداخل زمانی یا مکانی با کشتی‌های دیگر نداشته باشد.
- محدودیت (۱۰) پویا بودن مدل‌سازی را نشان می‌دهد. اگر زمان ورود کشتی‌ها از قبل مشخص نباشد و همه کشتی‌ها در زمان ثابتی وارد بندر شوند، مدل‌سازی از نوع ایستا و در حالتی که زمان ورود کشتی‌ها از قبل مشخص است و زمان شروع پهلوگیری کشتی‌ها پس از زمان ورود آن‌ها باشد، مدل‌سازی مسئله از نوع مدل‌سازی پویا خواهد بود.
- 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 (۱٤) جنس متغیرها (باینری یا عدد صحیح بودن) را نشان می‌دهند.

### ٤-۳ مدل‌سازی ریاضی بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه

حل مدل BAQCAP، به یک برنامه اولیه برای پهلوگیری کشتی‌های منتج می‌شود. در مدل BAQCAP فرض شده تمام داده‌ها قطعی هستند و هیچ‌گونه عدم قطعیتی وجود ندارد؛ به این معنی که همه کشتی‌ها دقیقاً در همان زمانی که اعلام کردند وارد بندر می‌شوند، تمام اطلاعاتی که کشتی‌ها گزارش می‌دهند قطعی و بدون تغییر هستند و هیچ‌گونه خرابی یا شرایط پیش‌بینی‌نشده‌ای رخ نمی‌دهد؛ اما در حین اجرای برنامه ممکن است اتفاقاتی رخ دهد که باعث انحراف از برنامه اولیه شود و برنامه اولیه را با اختلال مواجه کند. این اختلال می‌تواند از منابع مختلفی منتج شود؛ به‌عنوان‌مثال تأخیر در رسیدن کشتی به بندر، مشکلات فنی، خرابی ماشین‌آلات در بندر (جرثقیل اسکله)، شرایط بدِ آب‌وهوایی، پدیده جزر و مد دریا و ... . بعد از رخ دادن اختلال و انحراف از برنامه اولیه، نیاز است که برنامه اولیه مورد بازبینی و بازیابی قرار گیرد تا هم هزینه کم‌تری به بندر تحمیل شود و هم برنامه‌های اولیه قابل اجرا باشند.




شکل ۱) اختلال در برنامه اولیه پهلوگاه

در شکل ۱ نمایی از یک برنامه اولیه مشاهده می‌شود که دچار اختلال شده است. محور افقی این نمودار، اسلات‌های مکانی و محور عمودی اسلات‌های زمانی را نشان می‌دهد. همان‌طور که

مشاهده می‌شود کشتی شماره ٤ به اندازه چهار اسلات زمانی دیرتر وارد بندر شده و موجب وقوع یک اختلال در برنامه اولیه پهلوگاه گردیده است. این اختلال به وجود آمده، عملیات کشتی-های شماره ۲ و ۷ را نیز مختل کرده و این دو کشتی نیز نمی‌توانند در زمان و مکان برنامه‌ریزی‌شده، پهلوگیری کنند.

دو روش کلی برای بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه وجود دارد؛ برنامه‌ریزی مجدد و مدیریت اختلال. در روش برنامه‌ریزی مجدد، تمام کشتی‌هایی که از نظر زمانی بعد از کشتی مختل شده پهلوگیری می‌کنند با مدل BAQCAP دوباره برنامه‌ریزی شوند. در روش مدیریت اختلال، برنامه اولیه به‌گونه‌ای بازیابی می‌شود که کمترین تأثیر منفی را از پدیده اختلال بگیرد؛ بنابراین تابع هدف در مدل ریاضی مدیریت اختلال، کمینه کردن هزینه‌های ناشی از اختلاف برنامه بازیابی شده با برنامه اولیه است. برای مدیریت اختلال در برنامه پهلوگاه، باید یک مدل ریاضی مدل‌سازی شود تا با کمک آن برنامه اولیه بازیابی شود. این مدل، مدل بازیابی برنامه اولیه تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله (RBAQCAP)[۱۰] نام می‌گیرد.

بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه تحت شرایط اختلال، به‌صورت کلی با ۳ روش انجام می‌گیرد:

- روش انتقال به بالا: همه کشتی‌های باقی‌مانده در برنامه اولیه به‌اندازه زمان اختلال، در محور زمان به جلو انتقال داده شوند.
- روش بازیابی سراسری: برنامه عملیات جانب دریا برای همه کشتی‌های باقی‌مانده در برنامه اولیه، بازیابی می‌شوند.
- روش بازیابی محلی: برنامه پهلوگاه فقط برای کشتی‌هایی که از پدیده اختلال متأثر شده‌اند، بازیابی می‌شوند.

واضح است که روش انتقال به بالا به پاسخ‌های بسیار ضعیفی منتج می‌شود اما ساده‌ترین روش محسوب می‌شود. هدف این مقاله مقایسه دو روش بازیابی سراسری و محلی است.

### ۳-۵ فرض‌های مسئله

در این مقاله مدل مدیریت اختلال با این فرض مدل‌سازی می‌شود که در هر بازه زمانی تنها یک کشتی با پدیده اختلال مواجه می-شود.

### ۳-٦ تعریف پارامترها

نمادها و علائم استفاده‌شده در مدل مدیریت اختلال در جدول ۳ تعریف می‌شوند:

**جدول ۳. نمادها و پارامترهای مدل RBAQCAP**

| | |
|---|---|
| $t_d$ | زمانی که پدیده اختلال رخ می‌دهد. |
| $N'$ | تعداد کشتی‌هایی که عملیات تخلیه/بارگیری‌شان در زمان رخ دادن اختلال، تمام نشده است. |
| $x_i'$ | مکان پهلوگیری کشتی $i$ در برنامه جدید وقتی‌که اختلال رخ می‌دهد. |
| $y_i'$ | زمان شروع پهلوگیری کشتی $i$در برنامه جدید وقتی‌که اختلال رخ می‌دهد. |
| $e_i'$ | زمان اتمام عملیات تخلیه/بارگیری کشتی $i$ در برنامه جدید وقتی‌که اختلال رخ می‌دهد. |
| $z_{ij}^{x'}$ | متغیر باینری؛ اگر در برنامه جدید کشتی $i$ ازنظر مکانی قبل از کشتی $j$ پهلوگیری کند برابر ۱ است، در غیر این صورت برابر ۰ است. |
| $z_{ij}^{y'}$ | متغیر باینری؛ اگر در برنامه جدید کشتی $i$ ازنظر زمانی قبل از کشتی $j$ پهلوگیری کند برابر ۱ است، در غیر این صورت برابر ۰ است. |
| $r_{it}'$ | متغیر باینری. در برنامه جدید، 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. در برنامه جدید، 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. |

### ۳-۷ مدل‌سازی مدیریت اختلال

مدل مدیریت اختلال تا حدود زیادی مشابه با مدل برنامه‌ریزی اولیه می‌باشد. تابع هدف در مدل مدیریت اختلال، کمینه کردن

هزینه بازیابی برنامه اولیه می‌باشد. هزینه‌های بازیابی شامل موارد زیر می‌باشد:

- هزینه ناشی از پهلوگیری در مکان غیر بهینه
- هزینه تأخیر در اعزام کشتی نسبت به برنامه اولیه
- هزینه طولانی‌تر شدن عملیات تخلیه/بارگیری

تفاوت تابع هدف در مدل مدیریت اختلال و مدل برنامه‌ریزی اولیه، در محاسبه دو هزینه تأخیر در اعزام کشتی و هزینه عملیات تخلیه/بارگیری است.

- در مدل برنامه‌ریزی اولیه، تأخیر در اعزام کشتی نسبت به موعد مقرر معرفی شده توسط شرکت کشتیرانی محاسبه می‌شود اما در مدل مدیریت اختلال، نسبت به برنامه اولیه محاسبه می‌شود.
- در مدل برنامه‌ریزی اولیه، کل هزینه عملیات تخلیه/بارگیری کشتی محاسبه می‌شود اما در مدل مدیریت اختلال، تنها هزینه مازاد عملیات تخلیه/بارگیری نسبت به برنامه اولیه محاسبه می‌شود.

محدودیت‌های مدل مدیریت اختلال مشابه با محدودیت‌های مدل BAQCAP می‌باشد.

$$Min \sum_{i\in N'}\left\{C_{1i}|x'_i-b_i|+C_{2i}(e'_i-e_i)^+ + C_3\left(\sum_{t=1}^{T}r'_{it}-\sum_{t=1}^{T}r_{it}\right)^+\right\} \quad (۱۵)$$

$$\sum_{t\epsilon T}\sum_{q=1}^{Q} q\times r'_{itq}=\left\lceil\frac{NC_i}{MPH}\right\rceil, \quad \forall\, i\in N' \quad (۱۶)$$

$$\sum_{i\in N'}\sum_{q=1}^{Q} q\times r'_{itq}\le Q, \quad \forall\, t\epsilon T \quad (۱۷)$$

$$\sum_{q=1}^{Q} r'_{itq}=r'_{it}, \quad \forall\, i\in N' \quad \forall\, t\epsilon T \quad (۱۸)$$

$$\sum_{t\epsilon T} r'_{it}=e'_i-y'_i, \quad \forall\, i\in N' \quad (۱۹)$$

$$\sum_{t\epsilon T}\sum_{q=1}^{Q} q\times r'_{itq}\ge w_i, \quad \forall\, i\in N' \quad (۲۰)$$

$$q_i^{min}\le\sum_{q=1}^{Q} q\times r'_{itq}\le q_i^{max}, \quad \forall t\in T, \forall\, i\in N' \quad (۲۱)$$

$$x'_i+l_i\le x'_j+M\left(1-z_{ij}^{x'}\right), \quad \forall\, i,j\in N',\ i\ne j \quad (۲۲)$$

$$e'_i\le y'_j+M\left(1-z_{ij}^{y'}\right), \quad \forall\, i,j\in N',\ i\ne j \quad (۲۳)$$

$$z_{ij}^{x'}+z_{ji}^{x'}+z_{ij}^{y'}+z_{ji}^{y'}\ge 1, \quad \forall i,j\in N',\ i\ne j \quad (۲۴)$$

$$y'_i\ge a_i, \forall\, i\in N' \quad (۲۵)$$

$$x'_i+l_i\le L, \forall\, i\in N' \quad (۲۶)$$

## ٤. حل مدل‌های ریاضی

در این مقاله از دو الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO)[11] و جستجوی ممنوعه (TS)[12] استفاده می‌شود.

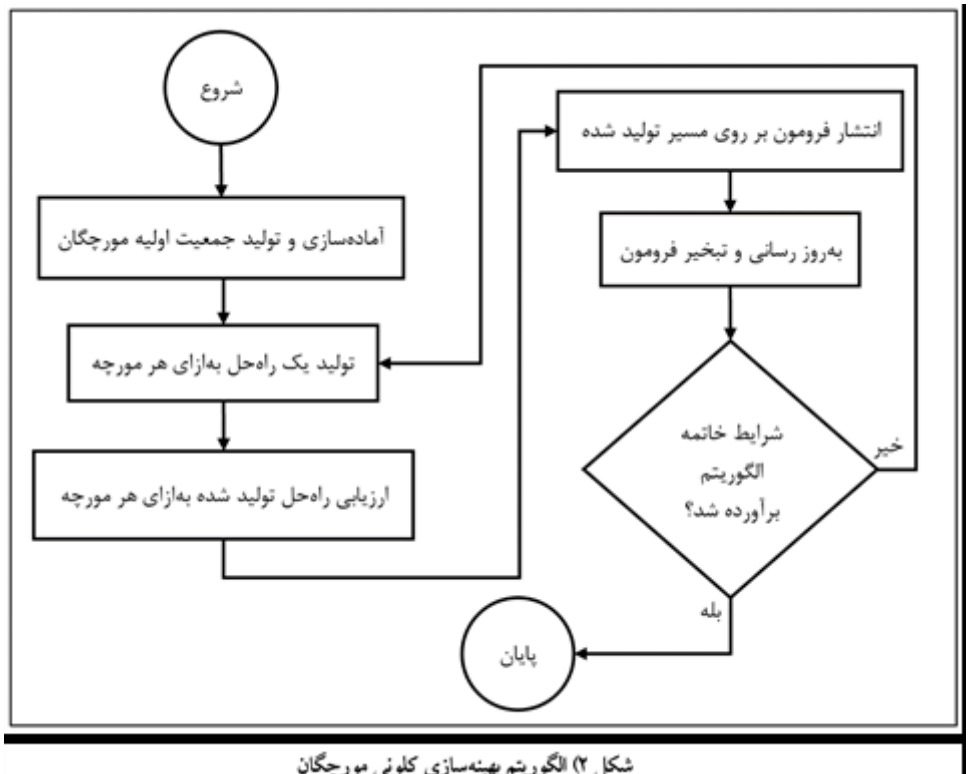
### ٤-١ الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO)

الگوریتم ACO، با الهام از حرکت جمعی مورچگان توسعه یافته است. مطالعات نشان می‌دهد مورچه‌ها حشرات اجتماعی‌ای هستند که در کلونی‌ها زندگی می‌کنند و رفتار آن‌ها بیشتر در جهت بقاء کلونی است تا در جهت بقاء یک جزء آن. یکی از مهم‌ترین و جالب‌ترین رفتار مورچه‌ها، رفتار آن‌ها برای یافتن غذا است و به‌ویژه چگونگی پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر میان منابع غذایی و آشیانه. در دنیای واقعی، مورچه‌ها ابتدا به‌طور تصادفی به این‌سو و آن‌سو می‌روند تا غذا بیابند. سپس به لانه برمی‌گردند و ردّی از فرومون به‌جا می‌گذارند. مورچه‌های دیگر وقتی این مسیر را می‌یابند، پرسه زدن را رها کرده و آن را دنبال می‌کنند. سپس اگر به غذا برسند به خانه بازمی‌گردند و رد دیگری از خود در کنار رد قبل برجای می‌گذارند و به عبارتی مسیر قبل را تقویت می‌کنند. لذا وقتی یک مورچه مسیر کوتاهی را از خانه تا غذا بیابد، بقیه مورچه‌ها با احتمال زیادی همان مسیر را دنبال می‌کنند و با تقویت مداوم آن مسیر و تبخیر ردهای دیگر، به‌مرور همه مورچه‌ها هم مسیر می‌شوند. هدف الگوریتم کلونی مورچگان تقلید این رفتار مورچه‌ها است. شکل ۲ نمایی ساده از الگوریتم ACO را نشان می‌دهد.

در مرحله تولید راه‌حل، هر کشتی که احتمال بیشتری برای انتخاب شدن داشته باشد دارای شانس بیشتر هم هست. احتمال انتخاب هر کشتی بر اساس رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود.

$$p_{i\to j}^{k}=\begin{cases}\dfrac{(\tau_{ij})^{\alpha}\times(\eta_{ij})^{\beta}}{\sum_{m\epsilon\mathcal{N}_i^k}(\tau_{im})^{\alpha}\times(\eta_{im})^{\beta}}, & j\epsilon\mathcal{N}_i^k\\ 0, & j\notin\mathcal{N}_i^k\end{cases} \quad (۲۷)$$

در رابطه (۲۷)، پارامتر $p_{i\to j}^{k}$ احتمال انتخاب کشتی $j$اُم بعد از کشتی $i$اُم توسط مورچه $k$اُم را نشان می‌دهد. پارامتر $\tau_{ij}$مقدار فرومون پخش‌شده در مسیر $i,j$ را نشان می‌دهد. پارامتر $\eta_{ij}$ اطلاعات اکتشافی[۱۳] مسئله را نشان می‌دهد. پارامتر $\mathcal{N}_i^k$ مجموعه کشتی‌هایی را نشان می‌دهد که هنوز توسط مورچه $k$اُم بازدید نشده‌اند. دو پارامتر $\alpha,\beta$ وزن تأثیر دو پارامتر فرومون و اطلاعات هیوریستیک مسئله را نشان می‌دهد.




**شکل ۲) الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان**

با در اختیار داشتن پارامتر $p_{i\to j}^{k}$ برای همه کشتی‌ها، می‌توان با استفاده از روند زیر راه‌حلی که هر مورچه تولید می‌کند را ایجاد کرد:

۱. ابتدا یک کشتی تصادفی انتخاب می‌شود.

۲. یکی از کشتی‌های انتخاب‌نشده، انتخاب می‌شود.

۳. اگر کشتی‌ای انتخاب‌نشده‌ای وجود داشته باشد، به مرحله ۲ مراجعه شود؛ در غیر این صورت به مرحله ٤ مراجعه شود.

٤. پایان.

در مرحله ۱ و ۲، کشتی‌ها متناسب با مقدار احتمالشان ($p_{i\to j}^{k}$) و با روش انتخاب چرخ گردان (RWS)[۱٤] انتخاب می‌شوند که در پیوست شماره ۱ توضیح داده می‌شود.

مرحله انتشار فرومون یکی از مراحل مهم در الگوریتم کلونی مورچگان است. در این مرحله به ازای هر مورچه و بر اساس مقدار برازندگی تابع هدف، فرومون منتشر می‌شود. برای انتشار فرومون از رابطه (۲۸) استفاده می‌شود. در رابطه (۲۸)، پارامتر Q یک عدد ثابت است که نمایانگر مقدار فرومونی است که هر مورچه بر روی مسیری که می‌پیماید، منتشر می‌کند. این مقدار

برای هر مسئله مقدار متفاوتی دارد که باید مقدار بهینه آن محاسبه شود.

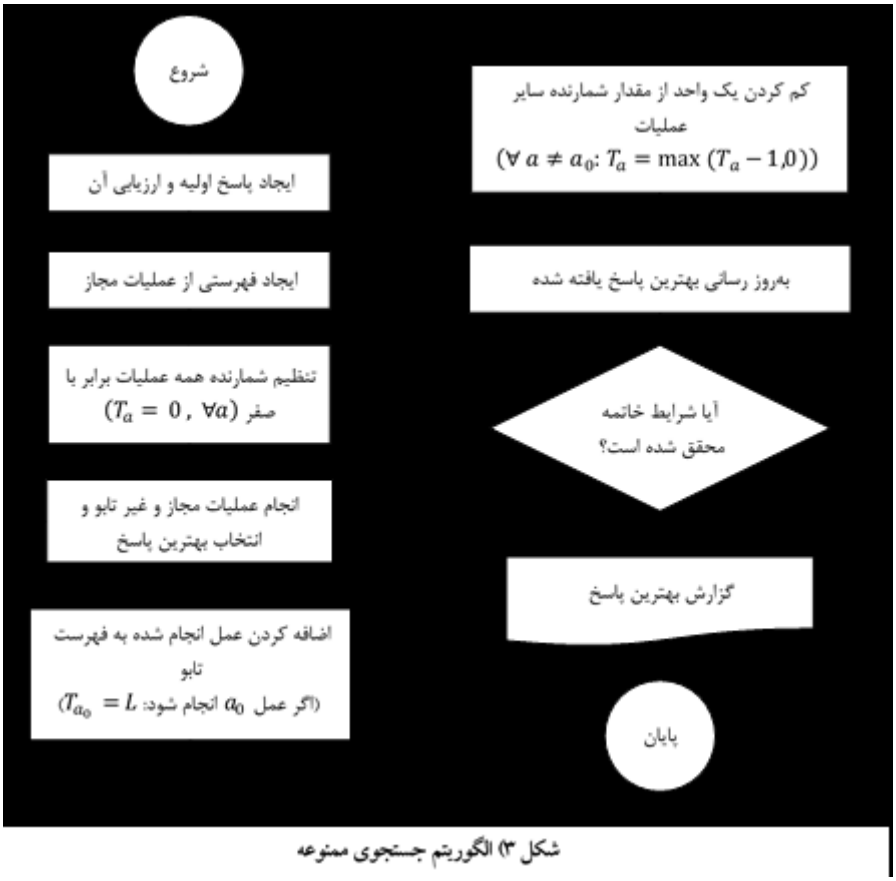
$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \frac{Q}{\text{مقدار برازندگی تابع هدف در راه‌حل پیشین}} \quad (۲۸)$$

مرحله تبخیر فرومون یکی دیگر از مراحل مهم الگوریتم کلونی مورچگان است. در این مرحله بایستی مقداری از فرومون‌های تولید شده روی زمین تبخیر شوند. برای این منظور از رابطه (۲۹) استفاده می‌شود. پارامتر $\rho$ نرخ تبخیر فرومون رو نشان می‌دهد که دارای دامنه $0 < \rho < 1$ است.

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \times \tau_{ij} \quad (۲۹)$$

### ۲-٤ الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS)

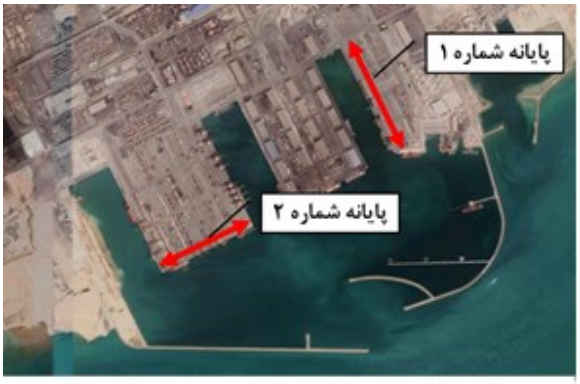
این الگوریتم از یک راه‌حل شروع می‌کند و با جستجو در اطراف آن نقطه به‌دنبال پاسخ بهینه می‌گردد. جستجو در اطراف پاسخ بهینه، با کمک لیست از عملیاتی تعیین می‌شود که اصطلاحاً به آن لیست عملیات مجاز گفته می‌شود. این فرایند جستجو و انتخاب تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که شرایط خاتمه الگوریتم محقق گردد. شرط خاتمه الگوریتم در این مقاله عدم تغییر در پاسخ نهایی الگوریتم پس از تعداد تکرار مشخص است. این الگوریتم از یک لیست ممنوعه استفاده می‌کند تا در جستجوهای بعدی، از پاسخ‌های موجود در لیست ممنوعه استفاده نشود. الگوریتم جستجوی ممنوعه امید دارد که با استفاده از این لیست ممنوعه، از بهینه محلی خارج‌شده و بتواند به سمت بهینه سراسری حرکت کند. شکل ۳، روند اجرای الگوریتم جستجوی ممنوعه را نشان می‌دهد. لیست عملیات مجاز در این مقاله، انواع روش‌های عملگر جهش (جایگزینی، جابجایی و معکوس کردن) است. طول لیست ممنوعه برابر با تعداد کشتی‌ها در نظر گرفته می‌شود.




شکل ۳) الگوریتم جستجوی ممنوعه

### ٤-٣ داده‌های مورد استفاده

این مقاله برای برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه و ارزیابی دو روش بازیابی محلی و سراسری، از داده‌های ورود و خروج کشتی‌ها در بندر شهید رجایی استفاده می‌کند. بندر شهید رجایی دو پایانه کانتینری دارد که در جدول ٤ اطلاعات این دو پایانه کانتینری گزارش می‌شود. شکل ٤ جانمایی پایانه‌های کانتینری در بندر شهید رجایی را نمایش می‌دهد. این مقاله برای ایجاد تنوع در مجموعه داده‌ها و دقت بیشتر در نتایج به‌دست‌آمده، از داده‌های هر دو پایانه استفاده می‌کند. ازآنجاکه دسترسی به برخی از داده‌ها امکان‌پذیر نبود، مقدار آن‌ها مطابق با دیگر مقالات فرض شدند. این داده‌ها در جدول ٥ گزارش شدند.




**شکل ٤) جانمایی پایانه‌های کانتینری در بندر شهید رجایی**

**جدول ٤. اطلاعات پایانه‌های کانتینری بندر شهید رجایی**

| پایانه‌های کانتینری | طول پهلوگاه (متر) | تعداد جرثقیل اسکله |
|---|---|---|
| **پایانه شماره ۱** | ۱۱٦۰ | ۱۰ |
| **پایانه شماره ۲** | ۱۱۱۰ | ۸ |

### ٤-٤ استخراج داده از بانک داده‌ها

پیچیدگی حل مدل BAQCAP رابطه مستقیمی با تعداد کشتی‌ها برای برنامه‌ریزی دارد؛ هرچه تعداد کشتی‌ها بیشتر باشد، پیچیدگی حل مدل بیشتر می‌شود. درنتیجه داده‌های نمونه بر اساس تعداد کشتی‌ها (۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ٤۰) دسته‌بندی می‌شوند. از طرف دیگر برای افزایش تنوع در داده‌ها، به ازای هر تعداد کشتی، ٥ مجموعه داده استخراج و بررسی می‌شود. داده‌های بندر شهید رجایی از سال ۲۰۰٥ تا ۲۰۱۱ در اختیار نویسندگان این مقاله قرار گرفت و 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.

**جدول ٥. داده‌های فرض شده**

| داده | داده تولیدشده |
|---|---|
| حداکثر تعداد جرثقیل اسکله | متناسب با طول کشتی، تعداد حداکثر جرثقیل اسکله محاسبه‌شده است. به ازای هر ٥۰ متر، یک جرثقیل اسکله می‌تواند پهلوگیری کند. $q_i^{max} = \frac{L}{50}$ |
| حداقل تعداد جرثقیل اسکله | حداقل تعداد جرثقیل اسکله برای همه کشتی‌ها برابر با ۱ در نظر گرفته‌شده است. $q_i^{min} = 1$ |
| فاصله ایمن بین کشتی‌ها | مقدار فاصله ایمن بین کشتی‌ها برابر با ۲۰ متر در نظر گرفته‌شده است. |
| محل بهینه پهلوگیری کشتی | محل بهینه کشتی با استفاده از توزیع یکنواخت گسسته تولیدشده است. $b_i = U(1, L)$ |
| 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. $d_i = a_i + \left\lceil \frac{C_i}{q_i^{max}} \right\rceil$ |
| $C_{1i}$ | $\frac{100 l_i}{230}$ $(US\$)$ |
| $C_{2i}$ | $\frac{20000 l_i}{230}$ $(US\$)$ |
| $C_3$ | $200\ US\$$ |
| سرعت عملیات تخلیه/بارگیری کانتینرها | $30 \frac{Movement}{Hour}$ |

## ٥. نتایج و تفسیر آن‌ها

### ۵-۱ حل مدل BAQCAP

برای حل مدل BAQCAP، ترتیب برنامه‌ریزی کشتی‌ها بهینه-سازی می‌شوند؛ درواقع، مدل BAQCAP به دنبال بهترین ترتیب برنامه‌ریزی کشتی‌ها است و به همین منظور از الگوریتم-های فراابتکاری استفاده می‌شود تا بهترین پاسخ محاسبه شود. نتایج خام حل مدل BAQCAP برای هر دو پایانه کانتینری بندر شهید رجایی در پیوست شماره ۲ گزارش شدند.

اعتبارسنجی برخی از مقالات برنامه‌ریزی پهلوگاه، با مقایسه نتایج الگوریتم‌های فراابتکاری و روش برنامه‌ریزی براساس زمان ورود (FCFS)[۱۵] انجام گردیده است. در روش FCFS کشتی‌هایی که زودتر به پهلوگاه می‌رسند، زودتر پهلوگیری می‌کنند. این روش بهترین ترتیب برنامه‌ریزی کشتی‌ها را، ترتیب ورود کشتی-ها می‌داند. اعتبارسنجی مقاله حاضر نیز به همین صورت انجام می‌گیرد.

جهت مقایسه الگوریتم‌ها، ابتدا بایستی نتایج حل مدل‌ها توسط الگوریتم‌ها را نرمال‌سازی کرد. نرمال‌سازی نتایج در این مقاله با استفاده از رابطه شماره (۳۰) انجام می‌گیرد. در رابطه شماره (۳۰) ابتدا بهترین پاسخ از میان پاسخ‌های موجود محاسبه شده و سپس با استفاده از رابطه شماره (۳۰) درصد فاصله از بهترین پاسخ محاسبه می‌گردد.

$$\text{فاصله از بهترین پاسخ} = \frac{\text{بهترین پاسخ} - \text{پاسخ الگوریتم}}{\text{بهترین پاسخ}} \times 100 \qquad (۳۰)$$

جدول ٦ و ۷، درصد فاصله از بهترین پاسخ را بین دو الگوریتم جستجوی ممنوعه و کلونی مورچگان و روش FCFS نشان می‌دهد. در جدول ٦، پاسخ الگوریتم‌ها و در جدول ۷، زمان اجرای الگوریتم‌ها مقایسه شدند. شکل ۵ و ٦، به‌ترتیب پاسخ الگوریتم‌ها و زمان اجرای الگوریتم‌ها را در قالب نمودار مقایسه می‌کند. برای محاسبه اعداد جدول ٦ و ۷، میانگین درصد فاصله از بهترین پاسخ در بین ۵ مجموعه داده محاسبه گردیده و به‌ازای تعداد کشتی گزارش گردیده است. به‌عنوان مثال در جدول ٦، عدد نمایش داده شده برای الگوریتم TS به‌ازای ۲۰ عدد کشتی (۲٪/٦) میانگین درصد فاصله از بهترین پاسخ به‌ازای ۵ مجموعه داده است.

**جدول ٦. مقایسه پاسخ الگوریتم‌ها**

| تعداد کشتی | پایانه شماره ۱ | | | پایانه شماره ۲ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | TS | ACO | FCFS | TS | ACO | FCFS |
| ۲۰ | ۲/۶۰٪ | ۰/۲۰٪ | ۸/۲۳٪ | ۱/۳۸٪ | ۰/۵۹٪ | ۱۷/۰۷٪ |
| ۲۵ | ۰/۲۵٪ | ۱/۹۳٪ | ۱۰/۶۰٪ | ۲/۹۶٪ | ۴/۲۲٪ | ۱۶/۸۸٪ |
| ۳۰ | ۰/۷۸٪ | ۳/۹۹٪ | ۹/۹۶٪ | ۰/۰۱٪ | ۳/۴۰٪ | ۱۲/۰۱٪ |
| ۳۵ | ۰/۰۰٪ | ۴/۱۸٪ | ۱۰/۶۵٪ | ۱/۰۳٪ | ۲/۷۳٪ | ۶/۲۳٪ |
| ۴۰ | ۰/۰۰٪ | ۸/۶۵٪ | ۱۱/۹۰٪ | ۰/۷۲٪ | ۵/۴۱٪ | ۱۱/۲۱٪ |

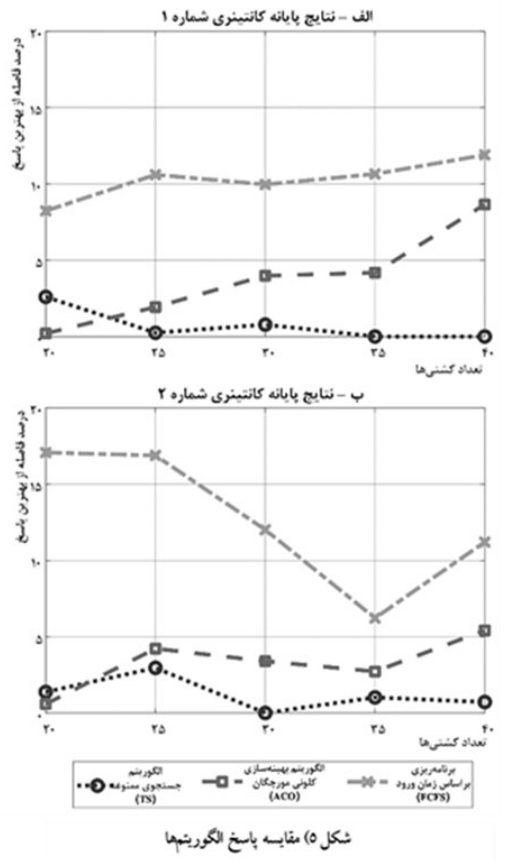
از آن‌جا که در روش FCFS هیچ عملیات ریاضی برای یافتن پاسخ بهینه انجام نمی‌گیرد، زمان رسیدن به پاسخ نهایی بسیار سریع است اما در الگوریتم‌های فراابتکاری برای رسیدن به پاسخ بهینه، عملیات ریاضی مختلفی انجام می‌گردد و اجرای این عملیات ریاضی منجر به صرف زمان می‌شود؛ بنابراین برای مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌ها، صرفاً الگوریتم‌های فراابتکاری مورد توجه قرار گرفتند و از زمان روش FCFS صرف‌نظر می-شود. محور عمودی این نمودارها، فاصله از بهترین پاسخ را براساس درصد نشان می‌دهد؛ هر چه اعداد این نمودار پایین‌تر باشد، یعنی به پاسخ بهینه یافت شده نزدیک‌تر است.

همان‌طور که در نمودار ۵ مشاهده می‌شود، الگوریتم جستجوی ممنوعه در اغلب موارد نتایج بهتری را گزارش می‌دهد. نمودار ۵ نشان می‌دهد که هر چه تعداد کشتی‌ها بیشتر شود، پاسخ

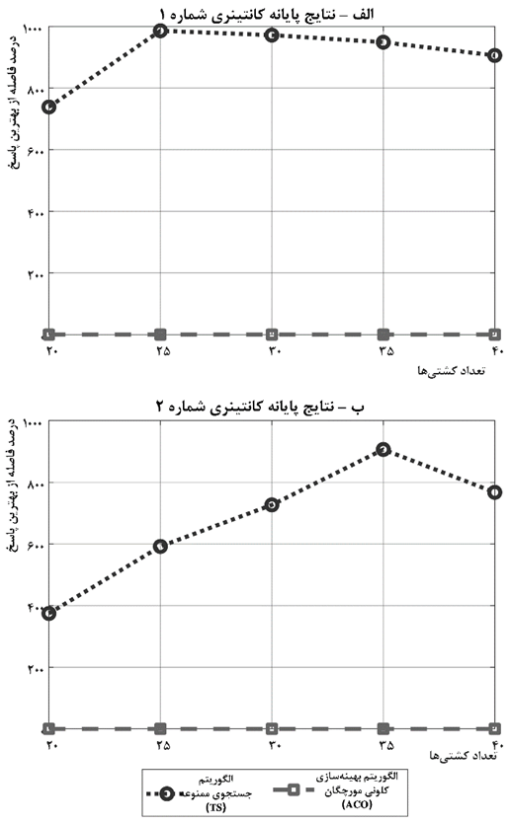
الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان، از پاسخ بهینه فاصله بیشتری می‌گیرد و در مقابل عملکرد الگوریتم جستجوی ممنوعه بهتر می‌شود. با توجه به نمودار ۵ می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که در تعداد پایین کشتی‌ها (تعداد ۲۰ کشتی)، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم جستجوی ممنوعه دارد. از طرفی دیگر، در نمودار ٦ که زمان اجرای دو الگوریتم را مقایسه می‌کند، الگوریتم کلونی مورچگان کاملاً نسبت به الگوریتم جستجوی ممنوعه ارجحیت دارد. در همه موارد، الگوریتم کلونی مورچگان به‌مراتب سریع‌تر از الگوریتم جستجوی ممنوعه به پاسخ بهینه رسیده است.

**جدول ۷. مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌ها**

| تعداد کشتی | پایانه شماره ۱ | | پایانه شماره ۲ | |
|---|---|---|---|---|
| | TS | ACO | TS | ACO |
| ۲۰ | ۷۳۸٪ | ۰٪ | ۳۷۵٪ | ۰٪ |
| ۲۵ | ۹۸۶٪ | ۰٪ | ۵۹۲٪ | ۰٪ |
| ۳۰ | ۹۷۲٪ | ۰٪ | ۷۲۷٪ | ۰٪ |
| ۳۵ | ۹۴۹٪ | ۰٪ | ۹۰۶٪ | ۰٪ |
| ۴۰ | ۹۰۶٪ | ۰٪ | ۷۶۷٪ | ۰٪ |




شکل ۵) مقایسه پاسخ الگوریتم‌ها




**شکل ٦. مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌ها**

### ۲-۵ بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه

هدف از مدیریت اختلال، بازیابی برنامه کشتی‌هایی است که در برنامه اولیه پس از وقوع اختلال پهلوگیری می‌کنند، به‌گونه‌ای که کم‌ترین هزینه و جریمه به بندر تحمیل شود. از طرفی، پیچیدگی حل مسئله رابطه مستقیمی با تعداد کشتی‌ها دارد؛ هرچه تعداد کشتی‌های باقی‌مانده پس از وقوع اختلال بیشتر باشد، بازیابی برنامه سخت‌تر می‌شود. به همین دلیل، نتایج خامی که به دست می‌آید بر اساس تعداد کشتی‌های باقی‌مانده در برنامه اولیه دسته-بندی می‌شوند. در پیوست شماره ۳، نتایج خام به‌دست‌آمده از حل مدل مدیریت اختلال با روش‌های بازیابی محلی و سراسری گزارش می‌شود.

جهت مقایسه دو روش حل مدل مدیریت اختلال (بازیابی محلی و بازیابی سراسری)، ابتدا باید یک اختلال ساختگی در برنامه اولیه ایجاد شود. به همین جهت ابتدا کشتی‌ها را بر اساس زمان پهلوگیری‌شان مرتب کرده و سپس کشتی‌های مضرب ۵ به‌عنوان کشتی‌های دارای اختلال انتخاب می‌شوند (کشتی‌های پنجم، دهم، پانزدهم و ...). زمان ورود این کشتی‌ها به مدت 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 از مدل مدیریت اختلال و دو روش بازیابی سراسری و محلی، بازیابی می‌شوند.

در روش بازیابی سراسری، برنامه پهلوگیری تمام کشتی‌هایی که زمان شروع پهلوگیری‌شان پس از وقوع اختلال باشد بازیابی می-شود. اما در روش بازیابی محلی، فقط برنامه پهلوگیری کشتی-هایی بازیابی می‌شود که وقوع اختلال بر روی برنامه آن‌ها تأثیر گذاشته باشد. برای اولین بار در مقاله (Zeng, Yang et al. 2011) از روش بازیابی محلی برای بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه استفاده شد. نتایج عددی حاصل از مقاله زنگ و همکارانش عملکرد بهتر روش بازیابی سراسری را نشان می‌دهد. 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 (پارامتر $n$ برای تعداد به‌روزرسانی حد بالای زمانی و پارامتر $n'$ برای 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 $i, i'$ مقداردهی اولیه می‌شوند ($i = 1, i' = 1$).

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 ($i = i + 1$) و به مرحله ٤ مراجعه شود.

٤) 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 ($i' = i' + 1$) و به مرحله ٦ مراجعه شود.

٦) 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 (۳۱) و (۳۲) انجام می‌گیرد.

$$TimeStep = \frac{t_e - t_c}{n}, t_i^u = t_i^u + TimeStep \quad (۳۱)$$

$$SpaceStep = \frac{L - S_c}{n'}, S_{i'}^u = S_{i'}^u + SpaceStep \quad (۳۲)$$

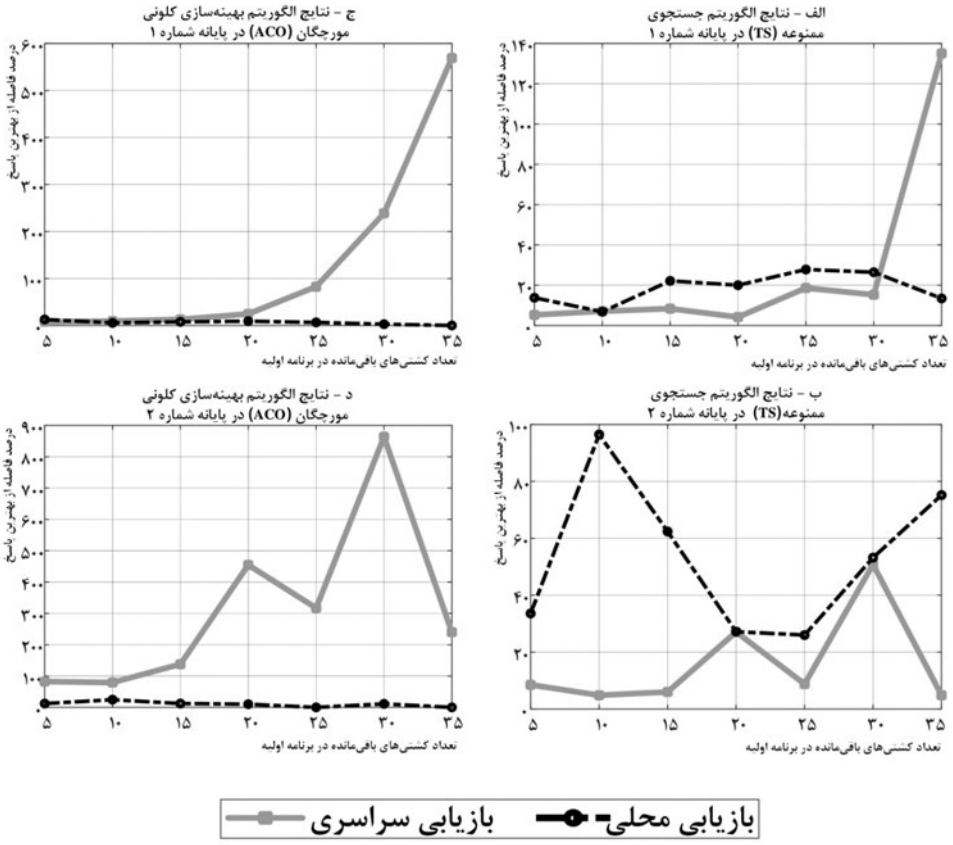
در روابط (۳۱) و (۳۲) پارامتر $t_c$ زمان شروع اختلال، پارامتر $S_c$ مکان شروع اختلال، پارامتر $t_i^u$ حد بالای پنجره زمانی در تکرار iاُم و پارامتر $S_{i'}^u$ حد بالای پنجره مکانی در تکرار $i'$اُم را نشان می‌دهد.

در جدول‌های ۸ و۹، نتایج مقایسه دو روش بازیابی سراسری و بازیابی محلی برای هر دو پایانه کانتینری بندر شهید رجایی

مقایسه شدند. ستون اول این دو جدول، تعداد کشتی‌های باقی-مانده در برنامه اولیه پهلوگاه پس از وقوع اختلال را نشان می‌دهد و اعداد جدول، درصد فاصله از بهترین پاسخ پیدا شده را گزارش می‌دهد که با استفاده از رابطه (۳۰) 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.

در شکل‌های ۷ و ۸ دو روش بازیابی سراسری و محلی در قالب نمودار با بکدیگیر مقایسه می‌شوند. همان‌طور که در ابن نمودارها قابل مشاهده است، عملکرد روش‌های بازیابی سراسری و محلی کاملاً وابسته به الگوریتم فراابتکاری‌ای است که از آن استفاده می‌شود؛ درصورتی‌که از الگوریتم جستجوی ممنوعه استفاده گردد روش بازیابی سراسری عملکرد بهتری خواهد داشت و درصورتی‌که از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان استفاده گردد روش بازیابی محلی عملکرد بهتری خواهد داشت. از نظر زمان رسیدن به پاسخ نهایی، با هر دو الگوریتم فرا ابتکاری روش بازیابی محلی عملکرد بهتری خواهد داشت. مقاله حاضر، برخلاف نتایج مقاله (Zeng, Yang et al. 2011)، نشان می-دهد که روش بازیابی محلی هم از نظر زمان اجرا و هم از نظر پاسخ نهایی، عملکرد بهتری دارد. در مقاله زِنگ و همکارانش به معرفی روش بازیابی محلی در بازیابی عملیات جانب دریا پرداخته شده، سپس برای نشان دادن عملکرد این روش صرفاً از داده‌های یک هفته‌ای ورود و خروج کشتی‌ها استفاده کردند؛ اما مقایسه دو روش بازیابی سراسری و محلی در این مقاله با داده-های ۵۰ هفته‌ای ورود و خروج کشتی‌ها استفاده شده است.

نتایج مقاله (Zeng, Yang et al. 2011) روش بازیابی محلی را در حالتی پیشنهاد می‌دهد که تعداد کشتی‌های باقی‌مانده پس از وقوع اختلال، زیاد باشد؛ یعنی اگر اختلال در ابتدای افق زمانی اجرای برنامه پهلوگاه رخ دهد بازیابی محلی در مدت زمان کمتری برنامه را بازیابی می‌کند اما روش بازیابی سراسری به پاسخ‌های بهتری منتج می‌شود. در مقابل، اگر اختلال در اواسط یا انتهای افق زمانی اجرای برنامه پهلوگاه رخ دهد روش بازیابی سراسری در مدت زمان نسبتاً کم، نتایج بهتری را گزارش می‌دهد. نتایج مقاله حاضر می‌تواند این نتیجه‌گیری را با چالش مواجه کند؛ چرا که اگر برای بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان استفاده شود، عملکرد روش بازیابی محلی به‌مراتب بهتر از عملکرد روش بازیابی سراسری است (هم از نظر مدت زمان اجرا و هم از نظر پاسخ نهایی).




**شکل ۷. مقایسه پاسخ روش‌های بازیابی**

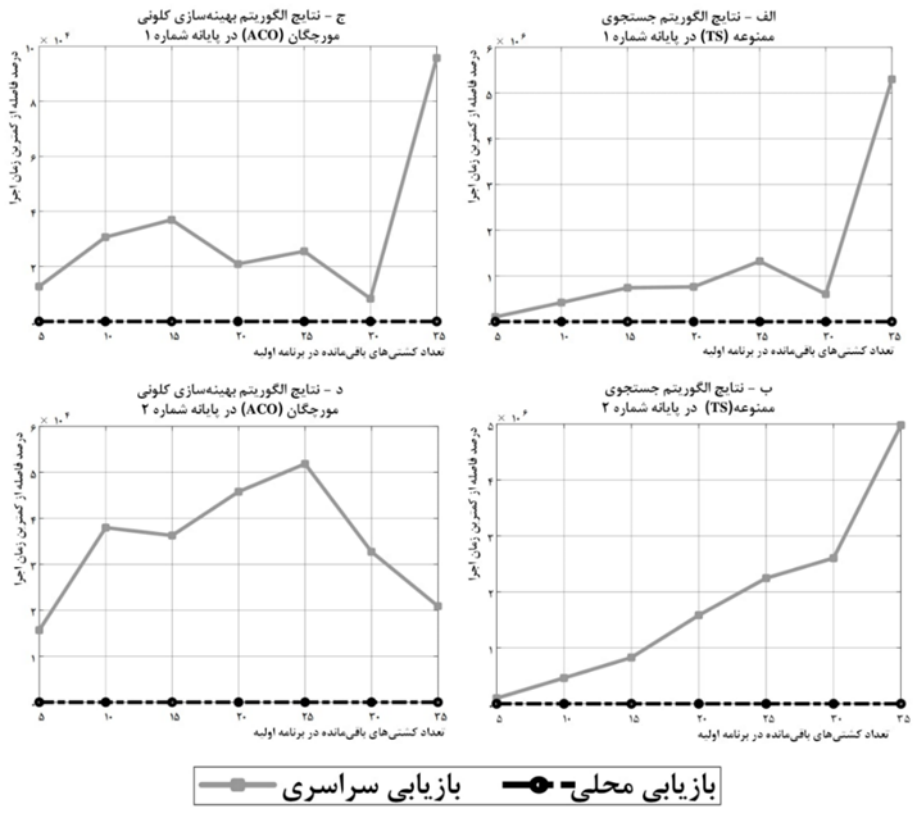
**جدول ۸. مقایسه پاسخ بهینه الگوریتم‌ها**

| تعداد کشتی‌های باقی‌مانده در برنامه اولیه پس از وقوع اختلال | پایانه شماره ۱ | | | | پایانه شماره ۲ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | الگوریتم TS | | الگوریتم ACO | | الگوریتم TS | | الگوریتم ACO | |
| | بازیابی سراسری | بازیابی محلی | بازیابی سراسری | بازیابی محلی | بازیابی سراسری | بازیابی محلی | بازیابی سراسری | بازیابی محلی |
| ۵ | ۵/۳٪ | ۱۳/۸٪ | ۷/۹٪ | ۱۲/۸٪ | ۸/۵٪ | ۳۳/۶٪ | ۸۲/۶٪ | ۱۲/۳٪ |
| ۱۰ | ۷/۱٪ | ۶/۸٪ | ۹/۴٪ | ۵/۶٪ | ۴/۹٪ | ۹۶/۵٪ | ۷۹/۵٪ | ۲۴/۶٪ |
| ۱۵ | ۸/۴٪ | ۲۲/۲٪ | ۱۲/۹٪ | ۷/۸٪ | ۶/۰٪ | ۶۲/۴٪ | ۱۳۷/۸٪ | ۱۲/۴٪ |
| ۲۰ | ۴/۲٪ | ۲۰/۰٪ | ۲۴/۷٪ | ۹/۲٪ | ۲۷/۱٪ | ۲۷/۲٪ | ۴۵۴/۷٪ | ۱۰/۳٪ |
| ۲۵ | ۱۸/۶٪ | ۲۷/۸٪ | ۸۲/۶٪ | ۶/۷٪ | ۸/۸٪ | ۲۶/۰٪ | ۳۱۷/۱٪ | ۰/۰٪ |
| ۳۰ | ۱۵/۳٪ | ۲۶/۴٪ | ۲۳۸/۸٪ | ۲/۸٪ | ۵۰/۸٪ | ۵۳/۲٪ | ۸۶۳/۷٪ | ۱۱/۴٪ |
| ۳۵ | ۱۳۵/۱٪ | ۱۳/۴٪ | ۵۶۹/۰٪ | ۰/۰٪ | ۴/۹٪ | ۷۵/۲٪ | ۲۴۰/۱٪ | ۰/۰٪ |

**جدول ۹. مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌ها**

| تعداد کشتی‌های باقی‌مانده در برنامه اولیه پس از وقوع اختلال | پایانه شماره ۱ | | | | پایانه شماره ۲ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | الگوریتم TS * | | الگوریتم ACO | | الگوریتم TS ** | | الگوریتم ACO | |
| | بازیابی سراسری* | بازیابی محلی | بازیابی سراسری | بازیابی محلی | بازیابی سراسری** | بازیابی محلی | بازیابی سراسری | بازیابی محلی |
| ۵ | ۰/۱۰٪ | ۰٪ | ۱/۳٪ | ۰/۰٪ | ۰/۱۰٪ | ۰٪ | ۱/۵۷٪ | ۰٪ |
| ۱۰ | ۰/۴۲٪ | ۰٪ | ۳/۱٪ | ۰/۰٪ | ۰/۴۶٪ | ۰٪ | ۳/۸۰٪ | ۰٪ |
| ۱۵ | ۰/۷۴٪ | ۰٪ | ۳/۷٪ | ۰/۰٪ | ۰/۸۳٪ | ۰٪ | ۳/۶۳٪ | ۰٪ |
| ۲۰ | ۰/۷۶٪ | ۰٪ | ۲/۱٪ | ۰/۰٪ | ۱/۵۸٪ | ۰٪ | ۴/۵۸٪ | ۰٪ |
| ۲۵ | ۱/۳۲٪ | ۰٪ | ۲/۵٪ | ۰/۰٪ | ۲/۲۵٪ | ۰٪ | ۵/۱۹٪ | ۰٪ |
| ۳۰ | ۰/۶۰٪ | ۰٪ | ۰/۸٪ | ۰/۰٪ | ۲/۶۰٪ | ۰٪ | ۳/۲۷٪ | ۰٪ |
| ۳۵ | ۵/۳۰٪ | ۰٪ | ۹/۶٪ | ۰/۰٪ | ۴/۹۸٪ | ۰٪ | ۲/۰۹٪ | ۰٪ |

* اعداد ضرب در $10^6$ **اعداد ضرب در $10^4$




**شکل ۸ مقایسه زمان اجرای روش‌های بازیابی**

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، برنامه‌ریزی برنامه اولیه پهلوگاه و مقایسه روش‌های بازیابی آن در شرایط وقوع اختلال مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج عددی نشان می‌دهند که در برنامه‌ریزی برنامه اولیه پهلوگاه،

الگوریتم جستجوی ممنوعه پاسخ‌های بهتری را گزارش می‌دهد اما الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان در زمان به‌مراتب پایین‌تری مدل برنامه‌ریزی پهلوگاه را حل می‌کند. برخلاف مقاله (Zeng, Yang et al. 2011)، نتایج این مقاله نشان می‌دهد که روش بازیابی محلی هم از نظر پاسخ بهینه و هم از نظر زمان اجرای الگوریتم، عملکرد بهتری نسبت به روش بازیابی سراسری دارد. در مطالعات آینده می‌توان با تمرکز بر روش بازیابی محلی، یک روش بازیابی را توسعه داد و صرفاً برنامه کشتی‌هایی را بازیابی کرد که از پدیده اختلال متأثر می‌شوند. همچنین نتایج این مقاله نشان می‌دهد که الگوریتم‌های فراابتکاری تأثیر بسیار زیادی بر روی عملکرد روش‌های بازیابی می‌گذارند؛ بنابراین در مطالعات آینده می‌توان روش‌های بازیابی را با کمک دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری مورد بررسی قرار داد تا بهترین روش بازیابی و بهترین الگوریتم فراابتکاری برای این منظور شناخته شود.

## ۷. پی‌نوشت‌ها

1. Berth Allocation Problem (BAP)
2. Quay Crane Assignment Problem (QCAP)
3. Integrates Models
4. Regular uncertainty
5. Disruption
6. Disruption Management
7. Global Recovery
8. Local Recovery
9. Berth Allocation and Quay Crane Assignment Problem (BAQCAP)
10. Recovery of Berth Allocation and Quay Crane Assignment in the original Plan (RBAQCAP)
11. Ant Colony Optimization algorithm (ACO)
12. Taboo Search algorithm (TS)
13. Heuristic Information
14. Roulette Wheel Selection (RWS)
15. First Come First Service (FCFS)

## پیوست ۱) روش انتخاب چرخ گردان (RWS)

در روش انتخاب چرخ گردن ابتدا باید احتمال انتخاب شدن هرکدام از اعضای جمعیت محاسبه شود. برای محاسبه احتمال هرکدام از اعضای جمعیت از روش بولتزمان استفاده می‌شود. برای محاسبه احتمال در روش بولتزمان از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$p_i = \frac{e^{\text{مقدار برازندگی عضو موردنظر}}}{\sum e^{\text{مقدار برازندگی هر عضو جامعه}}}$$

حال برای انتخاب یک عضو از جمعیت، روند زیر اجرا می‌شود:

۱) جمع تجمعی احتمال انتخاب شدن همه اعضا محاسبه می‌شود. ($C_i = \sum_1^i p_i$)

۲) یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱، با کمک توزیع احتمالی یکنواخت تولید می‌شود. ($r = U(0,1)$)

۳) اولین عضوی که در شرط $r \leq C_i$ صدق کند، به‌عنوان عضو منتخب انتخاب می‌شود.

عضو خروجی = $\min\{i \mid r \leq C_i\}$

## ۸. مراجع


– حسن‌نایبی, ع.ر, س. ح. ذگردی, م. امین ناصری و م. یقینی (۲۰۱۸). "بهینه سازی استراتژی‌های مدیریت اختلال در خطوط راه آهن شهری با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر." فصلنامه مهندسی حمل و نقل ۹(۳): ٤٥١-٤٧١.

– Bierwirth, C. and F. Meisel (2010). "A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals." European Journal of Operational Research 202(3): 615-627.

– Bierwirth, C. and F. Meisel (2015). "A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals." European Journal of Operational Research 244(3): 675-689.

problems." Computers & Industrial Engineering 97: 258-275.

– Lu, Z.-q. and L.-f. Xi (2010). "A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time." European Journal of Operational Research 207(3): 1327-1340.

– Lv, X., J. G. Jin and H. Hu (2020). "Berth allocation recovery for container transshipment terminals." Maritime Policy & Management: 1-17.

– Rodrigues, F. and A. Agra (2021). "An exact robust approach for the integrated berth allocation and quay crane scheduling problem under uncertain arrival times." European Journal of Operational Research.

– Rodriguez-Molins, M., M. Salido and F. Barber (2014). "Robust scheduling for berth allocation and quay crane assignment problem." Mathematical Problems in Engineering 2014.

– Schepler, X., N. Absi, D. Feillet and E. Sanlaville (2019). "The stochastic discrete berth allocation problem." EURO Journal on Transportation and Logistics 8(4): 363-396.

– Xiang, X., C. Liu and L. Miao (2018). "Reactive strategy for discrete berth allocation and quay crane assignment problems under uncertainty." Computers & Industrial Engineering 126: 196-216.

– Yan, S., C.-C. Lu, J.-H. Hsieh and H.-C. Lin (2019). "A dynamic and flexible berth allocation model with stochastic vessel arrival times." Networks and Spatial Economics 19(3): 903-927.

– Zeng, Q., Z. Yang and X. Hu (2011). "Disruption recovery model for berth and quay

– Carlo, H. J., I. F. Vis and K. J. Roodbergen (2015). "Seaside operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions." Flexible Services and Manufacturing Journal 27(2): 224-262.

– Iris, Ç. and J. S. L. Lam (2019). "Recoverable robustness in weekly berth and quay crane planning." Transportation Research Part B: Methodological 122: 365-389.

– Kim, A., H.-J. Park, J.-H. Park and S.-W. Cho (2021). "Rescheduling Strategy for Berth Planning in Container Terminals: An Empirical Study from Korea." Journal of Marine Science and Engineering 9(5): 527.

– Lee, C.-Y. and D.-P. Song (2017). "Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities." Transportation Research Part B: Methodological 95: 442-474.

– Li, M. Z., J. G. Jin and C. X. Lu (2015). "Real-time disruption recovery for integrated berth allocation and crane assignment in container terminals." Transportation Research Record 2479(1): 49-59.

– Li, Q., S. Tong, C. Yang and N. Wang (2009). Optimization of operation scheme of container terminal based on disruption management. International Conference on Transportation Engineering 2009.

– Liu, C., X. Xiang and L. Zheng (2020). "A two-stage robust optimization approach for the berth allocation problem under uncertainty." Flexible Services and Manufacturing Journal 32(2): 425-452.

– Liu, C., L. Zheng and C. Zhang (2016). "Behavior perception-based disruption models for berth allocation and quay crane assignment

crane scheduling in container terminals." Engineering Optimization 43(9): 967-983.

– Zhang, Q., Q. Zeng and H. Yang (2016). "A lexicographic optimization approach for berth schedule recovery problem in container terminals." Transport 31(1): 76-83.

– Zhen, L., L. H. Lee and E. P. Chew (2011). "A decision model for berth allocation under uncertainty." European Journal of Operational Research 212(1): 54-68.

– Zhou, P.-f. and H.-g. Kang (2008). "Study on berth and quay-crane allocation under stochastic environments in container terminal." Systems Engineering-Theory & Practice 28(1): 161-169.

علی امیدوارپناه احمدآبادی، درجه کارشناسی مهندس عمران را در سال ۱۳۹۵ از موسسه آموزش عالی آپادنا و درجه کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را از دانشگاه علم‌وصنعت اخذ نمود. در حال حاضر در صنعت حمل‌ونقل مشغول به پژوهش و فعالیت علمی است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان حمل‌ونقل دریایی، لجستیک و حمل‌ونقل کالا، کاربرد الگوریتم‌های ابتکار/فراابتکاری در حمل‌ونقل، هوش مصنوعی و داده کاوی است.

عبدالرضا شیخ‌الاسلامی کندلوس درجه کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی عمران را به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۷۲، ۱۳۷٤ و ۱۳۸۵ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان حمل‌ونقل دریایی، حمل‌ونقل ریلی، حمل‌ونقل هوایی، ایمنی در حمل‌ونقل، لجستیک و زنجیره تامین است. ایشان در حال حاضر عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران دنشگاه علم–وصنعت هستند. در سابقه اجرایی ایشان استانداری هرمزگان، ریاست دفتر رئیس جمهور، وزارت تعاون کار رفاه و امور اجتماعی وجود دارد.