فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۵، شماره ۳، بهار ۱۴۰۳، ص. ۳۷۰۸-۳۶۸۵

مقاله علمی-پژوهشی

برنامه‌ریزی عملیات جانب دریا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تکاملی

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

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

E-mail: Sheikh@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

چکیده

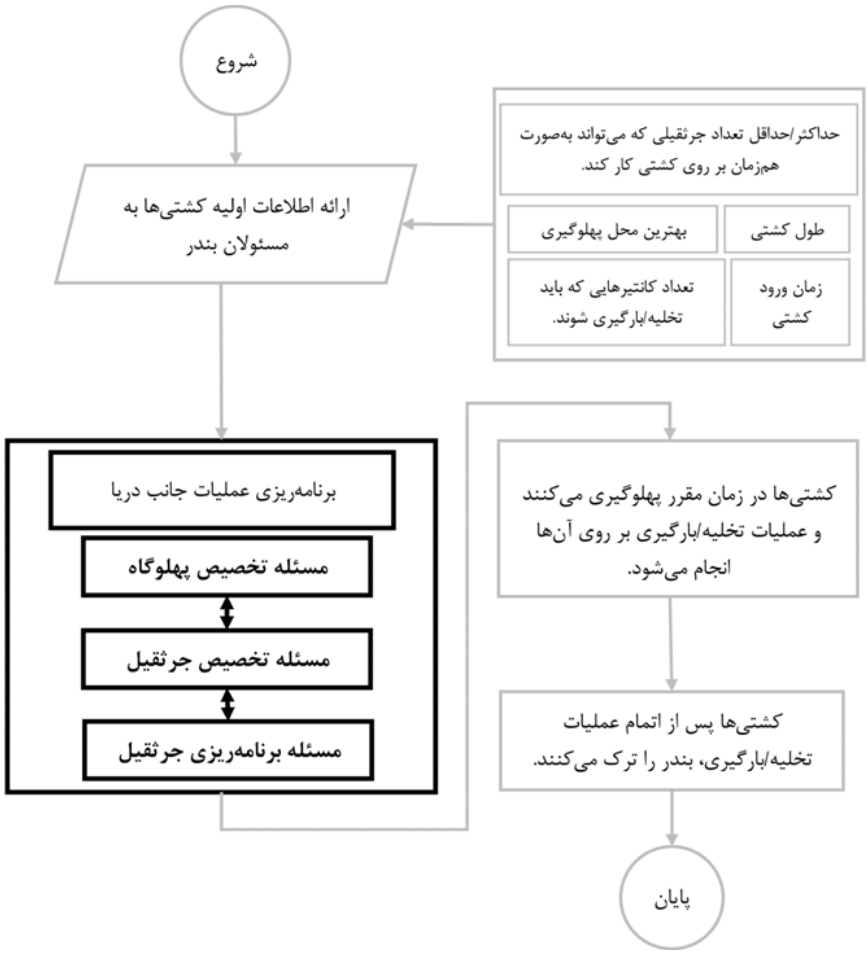
مسائل عملیات جانب دریا در پایانه‌های کانتینری شامل سه مسئله می‌شوند؛ مسئله تخصیص پهلوگاه، مسئله تخصیص جرثقیل اسکله و مسئله برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله. مقاله حاضر هر سه مسئله عملیات جانب دریا را به‌صورت ادغامی و در دو مرحله حل می‌کند. در مرحله اول دو مسئله تخصیص پهلوگاه و تخصیص جرثقیل اسکله در یک مدل ریاضی مدل‌سازی و حل می‌شوند. در مرحله دوم، مسئله برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله در یک مدل ریاضی جداگانه مدل‌سازی و با کمک الگوریتم ابتکاری برنامه‌ریزی پویا حل می‌شود. با توجه به NP-Hard بودن مسائل عملیات جانب دریا، از الگوریتم‌های ابتکاری/فراابتکاری برای حل آن‌ها استفاده می‌شود. مقاله حاضر برای اولین بار از نسخه تکاملی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (EPSO) برای حل مسائل عملیات جانب دریا استفاده کرده است. برای مقایسه عملکرد این الگوریتم، نتایج آن با نتایج نسخه اولیه همان الگوریتم (PSO) و الگوریتم ژنتیک(GA) مقایسه می‌شود. نتایج عددی این مقاله نشان می‌دهد که الگوریتم EPSO، تقریباً پاسخ‌هایی مشابه با الگوریتم GA (با ۱٪ اختلاف) دارد؛ اما ازنظر زمان اجرا، سرعت بیشتری نسبت به الگوریتم GA دارد. در مقایسه با الگوریتم PSO، حدود ۶٪، پاسخ‌های بهتری گزارش می‌دهد اما ازنظر زمان اجرا، اندکی آهسته‌تر عمل می‌کند. اعتبارسنجی مقاله حاضر با داده‌های واقعی ورود و خروج کشتی‌ها در هر دو پایانه کانتینری بندر شهید رجایی انجام گرفته است.

واژه‌های کلیدی: عملیات جانب دریا، مسئله تخصیص پهلوگاه، مسئله تخصیص جرثقیل اسکله، مسئله برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تکاملی

۱. مقدمه

با کانتینری شدن حمل‌ونقل کالا و به‌تبع آن رونق تجارت جهانی، اهمیت بنادر بیش از گذشته شده است. چراکه حدود ۸۰ درصد حجم و بیش از ۷۰٪ ارزش تجارت بین‌الملل از طریق دریا جابجا می‌شوند (Malekahmadi, Alinaghian et al. 2020). مدیریت بندر نقش مهمی در حمل‌ونقل دریایی ایفا می‌کند. یکی از راهبردهای اصلی برای مدیریت کارآمد بنادر، به حداقل رساندن زمان موردنیاز برای تخلیه/بارگیری کشتی‌ها است (Sirimanne, Hoffman et al. 2019). ازاین‌رو، بهینه‌سازی مسائل عملیات جانب دریا که ارتباطی مستقیمی با مدت‌زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها دارد، دارای اهمیت زیادی است.

مسائل عملیات جانب دریا شامل سه مسئله می‌شوند؛ مسئله تخصیص پهلوگاه (BAP)[1]، مسئله تخصیص جرثقیل اسکله (QCAP)[2] و مسئله برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله (QCSP)[3]. هر سه مسئله عملیات جانب دریا ابتدا به‌صورت ریاضی مدل‌سازی می‌شوند و با حل مدل‌های ریاضی اطلاعات پهلوگیری کشتی‌ها مشخص می‌شود. با حل مسئله تخصیص پهلوگاه، زمان و مکان پهلوگیری کشتی‌ها مشخص می‌شود. مسئله تخصیص جرثقیل اسکله تعداد جرثقیل‌هایی که در هر بازه زمانی باید عملیات تخلیه بارگیری یک کشتی را انجام دهند مشخص می‌شود؛ و در انتها با حل مسئله برنامه‌ریزی جرثقیل‌های اسکله مشخص می‌شود که کدام جرثقیل‌ها باید بر عملیات تخلیه/بارگیری کشتیِ مشخصی را انجام دهند. شکل ۱ روند برنامه‌ریزی و اجرای عملیات جانب دریا را نشان می‌دهد.

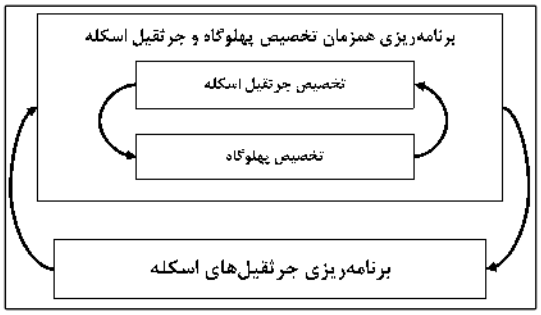


شکل ۱. روند برنامه‌ریزی و اجرای عملیات جانب دریا

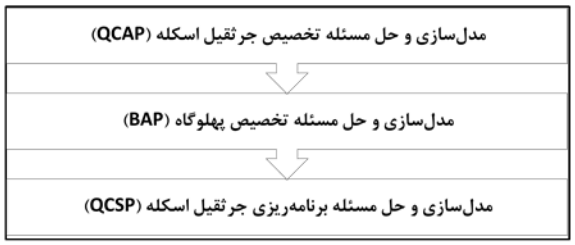
۲. ادبیات پژوهش

۲-۱ مبانی پژوهش

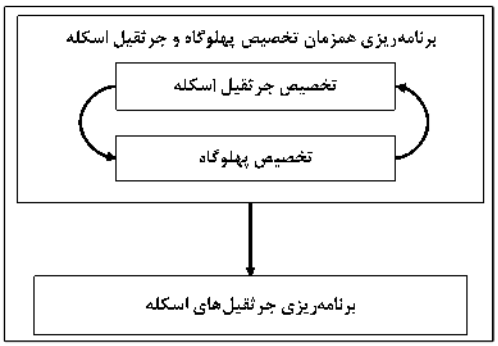
به‌صورت کلی مدل‌سازی عملیات جانب دریا به دو نحو انجام می‌گیرد؛ مدل‌سازی ادغامی و مدل‌سازی سلسله مراتبی. در مدل‌سازی ادغامی، مسائل عملیات جانب دریا در یک مدل ریاضی مدل‌سازی می‌شوند و هر سه مسئله به‌صورت هم‌زمان حل می‌شود. در مدل‌سازی سلسله مراتبی، ابتدا یکی از مسائل حل می‌شود، سپس خروجی مسئله به‌عنوان ورودی مسئله دوم در نظر گرفته می‌شود و مسئله دوم حل می‌شود. راه‌حل مسئله دوم به‌عنوان ورودی مسئله سوم در نظر گرفته می‌شود و درنهایت با حل مسئله سوم، عملیات جانب دریا برنامه‌ریزی می‌شود. بسیاری از مقالات رویکرد بینابینی داشتند و از هر دو روش گفته شده استفاده کردند و در دو مرحله عملیات جانب دریا را مدل‌سازی و حل کردند. این دسته از مدل‌ها را با عنوان مدل‌های دومرحله‌ای می‌شناسند. شکل ۲، هر سه رویکرد مدل‌سازی عملیات جانب دریا نشان داده می‌دهد.



الف - برنامه‌ریزی ادغامی



ب - برنامه‌ریزی سلسله مراتبی



ج - برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای

شکل ۲. انواع روش‌های مدل‌سازی برنامه‌ریزی عملیات جانب دریا

مدل‌های برنامه‌ریزی پهلوگاه با کمک ٤ معیار دسته‌بندی می‌شوند؛ نوع پهلوگاه، زمان ورود کشتی‌ها، زمان تخلیه/بارگیری و تابع هدف.

- پهلوگاه‌هایی که در مقالات مختلف مدل‌سازی ریاضی شدند چهار نوع هستند: پهلوگاه گسسته، پیوسته، ترکیبی و یا تورفته[٤]. اگر کشتی‌ها بتوانند در هر بخشی از اسکله پهلوگیری کنند، پهلوگاه‌ها را به‌صورت پیوسته در نظر می‌گیرند. اگر طول اسکله به چندین پهلوگاه تقسیم شود و در هرکدام از این پهلوگاه‌ها تنها یک کشتی بتواند پهلوگیری کند، پهلوگاه را به‌صورت گسسته در نظر می‌گیرند. اگر طول اسکله به پهلوگاه‌های مجزایی تقسیم شود اما هر کشتی بتواند دو یا چند پهلوگاه را اشغال کند، پهلوگاه‌ها را از نوع ترکیبی در نظر می‌گیرند. دسته دیگری از مدل‌ها هستند که پهلوگاه‌های تورفته را مدل‌سازی ریاضی کردند. در این پهلوگاه‌ها می‌توان از هر دو طرف تخلیه/بارگیری کشتی‌ها را انجام داد.
- زمان ورود کشتی‌ها به سه صورت حالت ایستا، پویا و موعد مقرر نظر گرفته می‌شوند. اگر زمان ورود کشتی‌ها ثابت باشد، ایستا محسوب می‌شود. اگر زمان ورود کشتی‌ها متغیر باشد از نوع پویا و اگر برای کشتی‌ها زمان مشخصی برای ترک بندر در نظر گرفته شود، از نوع موعد مقرر محسوب می‌شوند. در برخی از مقالات حالات دیگری هم در نظر گرفته شده است. به‌عنوان‌مثال کشی‌ها به‌صورت دوره‌ای وارد بندر شوند (مثلاً هفته‌ای یک بار و در زمان مشخص).
- زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها به دو حالت ثابت و وابسته در نظر گرفته می‌شود. در حالت ثابت، زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها جزئی از ورودی‌های مسئله است و وابسته به حل مسئله نیست؛ اما در حالت وابسته، زمان تخلیه/بارگیری وابسته به حل مسئله است. تقریباً در همه مقالاتی که مسائل عملیات جانب دریا به‌صورت ادغامی مدل‌سازی شدند، از حالت وابسته استفاده شده است. معمولاً مدت‌زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها وابسته به مواردی از قبیل محل پهلوگیری، تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده شده در هر بازه زمانی، تعداد کانتینرها و ... وابسته است.
- عملیات جانب دریا معمولاً با استفاده از مدل‌های ریاضی برنامه‌ریزی می‌شود که در آن‌ها معمولاً به دنبال کمینه یا بیشینه کردن مقدارهای عددی هستند. تابع هدف در مدل‌های ریاضی نشان می‌دهد که با تغییر متغیرهای مسئله، برنامه تا چه اندازه به سمت بهتر شدن حرکت می‌کند. در مدل‌های عملیات جانب دریا معمولاً به دنبال کمینه‌سازی زمان انتظار کشتی‌ها، مدت‌زمان تخلیه/بارگیری، تأخیر اعزام کشتی‌ها، هزینه‌های عملیاتی بندر، هزینه حمل کانتینرهای کشتی در بندر با کمک انتخاب مکان بهینه پهلوگیری و ... هستند.

مسائل عملیات جانب دریا از نوع مسائل NP-Hard محسوب می‌شود؛ یعنی برای حل آن‌ها روش‌های ریاضی یا عددی‌ای وجود ندارد که بتواند در مدت‌زمان معقول مسئله را حل کند. برای حل این دسته از مسائل، معمولاً از الگوریتم‌های ابتکاری/فراابتکاری استفاده می‌شود. عملکرد الگوریتم‌های ابتکاری/فراابتکاری را معمولاً با دو شاخص مقایسه می‌کنند (Wawrzyniak, Drozdowski et al. 2020): زمان اجرا و پاسخ الگوریتم. عملکرد الگوریتم‌های ابتکاری/فراابتکاری در هر مسئله متفاوت است؛ ازاین‌روی یک مسئله باید با الگوریتم‌های مختلف حل شود تا الگوریتمی که بهترین عملکرد را در حل مسئله دارد شناسائی شود.

بر مبنای جستجوها و دانسته‌های نویسندگان مقاله حاضر، تاکنون مسائل عملیات جانب دریا با استفاده از نسخه تکاملی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (EPSO)[٥] حل نشده است. این مقاله قصد دارد مسائل عملیات جانب دریا را مدل‌سازی و با استفاده از الگوریتم EPSO حل کند تا خلأ اشاره شده را پوشش دهد. در ادامه، ادبیات مسائل عملیات جانب دریا و بخشی از مقالات مرتبط با آن مرور می‌شوند. در بخش سوم مقاله، مسائل عملیات جانب دریا به‌صورت دومرحله‌ای مدل‌سازی می‌شوند. در بخش چهارم مقاله فلوچارت حل مسائل عملیات جانب دریا ترسید

شده و الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی (GA، PSO و EPSO) توضیح داده می‌شوند. در بخش پنجم با استفاده از داده‌های ورود و خروج کشتی‌ها، مسائل عملیات جانب دریا حل شده و عملکرد الگوریتم EPSO مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش انتهایی مقاله، یافته‌های پژوهشی به‌صورت خلاصه جمع‌بندی و ارائه می‌شوند.

۲-۲ مروری بر مطالعات گذشته

مطالعات فراوانی تا کنون مسائل عملیات جانب دریا را مطالعه کردند. از بین تمام مقالات مروری که در این حوزه نگارش شده‌اند، دو مقاله (Bierwirth and Meisel 2010) و (Bierwirth and Meisel 2015) برای مطالعه پیشنهاد می‌شوند. در دو مقاله مروری پیشنهادی، تعداد اندک مقالاتی که مسائل عملیات جانب دریا را به‌صورت ادغامی مدل‌سازی کرده باشند مشهود است. در این بخش تمرکز بر روی مقالاتی است که مسائل عملیات جانب دریا را به‌صورت ادغامی مدل‌سازی کردند.

دو مقاله (Daganzo 1989) و (Park and Kim 2003) اولین مقالاتی بودند که روش مدل‌سازی ادغامی را در مسائل عملیات جانب دریا استفاده کردند. در مقاله (Daganzo 1989) یک مدل یکپارچه برای دو مسئله QCAP و QCSP مدل‌سازی شد. در مقاله (Park and Kim 2003) مسائل عملیات جانب دریا به‌صورت دومرحله‌ای مدل‌سازی و حل شدند. آن‌ها برای اولین بار از این روش مدل‌سازی استفاده کردند. در مرحله اول دو مسئله BAP و QCAP را در یک مدل ریاضی یکپارچه، مدل‌سازی و با استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ حل کردند. در مرحله دوم باوجود اطلاعاتی که از مرحله اول به دست آمد، مسئله QCSP را با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا حل کردند. در دهه اخیر (۲۰۱۰ – ۲۰۲۰) تمرکز پژوهشگران به مدل‌سازی ادغامی مسائل جانب دریا افزایش پیدا کرده است و سعی بر آن است که در این بخش، مقالات مدل‌سازی ادغامی مورد بررسی قرار گیرند.

در مقاله (Chang, Jiang et al. 2010) یک مدل ادغامی برای دو مسئله BAP و QCAP پیشنهاد شد تا مصرف انرژی جرثقیل‌های اسکله را کاهش دهد. تابع هدف مدل پیشنهادی مقاله، کمینه‌سازی سه پارامتر بوده است؛ انحراف محل پهلوگیری کشتی و مقدار بهینه آن، تأخیر در زمان شروع/پایان پهلوگیری کشتی و میزان مصرف انرژی جرثقیل‌های اسکله. در مقاله یادشده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای حل مدل ریاضی استفاده شد.

در مقاله (Lee and Qiu Wang 2010) دو مسئله BAP و QCSP به‌صورت ادغام دومرحله‌ای مدل‌سازی شدند. در مرحله اول زمان و مکان پهلوگیری کشتی محاسبه شد و در مرحله دوم باهدف کمینه‌سازی زمان اتمام عملیات تخلیه/بارگیری جرثقیل‌های اسکله برنامه‌ریزی شدند. مدل‌های مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شدند.

در مقاله (Zeng, Yang et al. 2011) هر سه مسئله عملیات جانب دریا در دو مرحله حل شدند. در مرحله اول دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت یکپارچه و در قالب یک مدل مدل‌سازی شدند. در مرحله دوم، مسئله برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله در یک مدل جداگانه مدل‌سازی شد. زِنگ و همکارانش مدل‌های پیشنهادی‌شان را با کمک الگوریتم جستجوی ممنوعه حل کردند.

در مقاله (Vacca, Salani et al. 2013) دو مسئله BAP و QCAP را در سطح تاکتیکی و در قالب یک مدل ادغامی یکپارچه مدل‌سازی شدند. واکا و همکارانش از الگوریتم شاخه و قیمت برای حل مدلشان استفاده کردند و ادعا کردند که برای اولین بار از این الگوریتم برای حل مسئله تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله استفاده شده است. مطالعه آن‌ها نیز نشان داد که استفاده از رویکرد ادغامی در مدل‌سازی نسبت به رویکرد سنتی به پاسخ‌های بهتری منتج می‌شود.

در مقاله (Unsal and Oguz 2013) مدل برنامه‌ریزی محدودیتشان را که ابتدا برای QCSP پیشنهاد شده بود گسترش دادند تا جرثقیل‌های اسکله را به کشتی‌ها تخصیص دهند. روش

برنامه‌ریزی محدودیت مشابه با مدل برنامه‌ریزی ریاضی و روش‌های بهینه‌سازی می‌باشد، اما تمرکز اصلی بر روی امکان‌پذیر بودن پاسخ‌های مدل ریاضی است. نتایج عددی آن‌ها نشان داد روش برنامه‌ریزی محدودیت به پاسخ‌های مناسبی می‌رسد درحالی‌که زمان محاسبات را کاهش می‌دهد. تابع هدف آن‌ها کمینه‌سازی زمان اتمام تخلیه/بارگیری همه کشتی‌ها بود. تابع هدف مشابهی در مقاله‌های (Diabat and Theodorou 2014)، (Theodorou and Diabat 2015) و (Al-Dhaheri and Diabat 2017) موردبررسی قرار گرفته است و با دو الگوریتم ژنتیک و آزادسازی لاگرانژ حل شده است.

در مقاله (Meisel and Bierwirth 2013) یک چارچوب برای مدل‌سازی هر سه مسئله عملیات جانب دریا پیشنهاد شد. نتایج عددی نشان می‌دهد مدل‌سازی ادغامی نتایج بهتری نسبت به رویکرد مدل‌سازی سلسله مراتبی ارائه می‌دهد.

در مقاله (Ursavas 2014) هر سه مسئله عملیات جانب دریا در قالب یک مدل یکپارچه مدل‌سازی شدند. مدل پیشنهادی دارای دو هدف کمینه‌سازی هزینه نیروی انسانی و مدت‌زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها بود و جرثقیل‌هایی با ویژگی‌های متفاوت در نظر گرفته شدند. در مقاله مذکور برای حل مدل ریاضی از الگوریتم ابتکاری شاخه و حد (B&B) استفاده شده است.

در مقاله (Lalla-Ruiz, González-Velarde et al. 2014) دو مسئله BAP و QCAP در سطح تاکتیکی و به‌صورت ادغامی مدل‌سازی شدند. مدل پیشنهادی دارای هدف کاهش هزینه‌های از جابجایی کانتینر بین کشتی‌ها در فرایند ترانسشیپمنت بود. رویز و همکارانش برای حل مدلشان از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند و نشان دادند که الگوریتم ژنتیک در زمان کمتر، به پاسخ‌های بهینه‌تری می‌رسد.

در مقاله (Ilati, Sheikholeslami et al. 2014) علاوه بر دو مسئله BAP و QCAP، مسئله تخصیص کشتی‌های یدک‌کش را هم مدل‌سازی کردند. در مقاله مذکور، محدودیت عمق آبخور کشتی‌ها نیز در نظر گرفته شده است. ایلاتی و همکارانش ابتدا مسئله BAP، سپس مسئله تخصیص یدک‌کش و درنهایت مسئله QCAP حل‌شده است.

در مقاله (Türkoğulları, Taşkın et al. 2014) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح باینری پیشنهاد شد که دو مسئله BAP و QCAP را به‌صورت هم‌زمان حل می‌کرد. در ادامه، محدودیت‌های مسئله QCSP، بدون آنکه تابع هدف تغییر کند، به مدل اولیه اضافه شد. درنهایت، یک مدل ادغامی حاصل شد که هر سه مسئله عملیات جانب دریا را در خود جای داده است. تابع هدف در مدل پیشنهادی، کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از سه پارامتر بود؛ تأخیر در اعزام کشتی، انتظار کشتی برای پهلوگیری و عدم پهلوگیری کشتی‌ها در محل مناسب. مقاله مذکور نشان داد، در مسائل بزرگ‌مقیاس مدل ادغامی BAP + QCAP می‌تواند به نتایج بهتری نسبت به مدل ادغامی BAP+QCAP+QCSP منتج شود. به همین دلیل برای مسائل بزرگ‌مقیاس، الگوریتم پس-پردازش پیشنهاد می‌دهد؛ در الگوریتم پس-پردازش ابتدا مدل BAP + QCAP حل می‌شود و سپس با کمک پاسخ به‌دست‌آمده، مدل BAP + QCAP + QCSP حل می‌شود. حل مدل‌ها در مقاله مذکور با استفاده از الگوریتم صفحات برش انجام گرفته است. در مقاله (Türkoğulları, Taşkın et al. 2016) مقاله پیشین را برای حالتی‌که تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده شده به کشتی در زمان تغییر می‌کند، توسعه داد.

در مقاله (Han, Gong et al. 2015) از روش مدل‌سازی ادغامی دومرحله‌ای برای حل مسائل عملیات جانب استفاده شده. مرحله اول دو مسئله BAP و QCAP را باهدف کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از پهلوگیری در محل نامناسب و مدت‌زمان عملیات تخلیه/بارگیری کشتی را مدل‌سازی می‌کند. مرحله دوم مسئله QCSP را باهدف کمینه‌سازی حرکت جرثقیل‌های اسکله و با استفاده از خروجی‌های مرحله اول مدل‌سازی می‌کند. در

مقاله یادشده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای حل مدل‌های ریاضی استفاده شد.

در مقاله (Iris, Pacino et al. 2015) دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت ادغامی مدل‌سازی شدند. آیریس و همکارانش نشان دادند که اگر بتوان تعداد جرثقیل‌های یک کشتی خاص را در بازه‌های زمانی تغییر داد، هزینه‌ها کاهش پیدا می‌کنند.

در مقاله (Liu, Zheng et al. 2016) مسائل عملیات جانب دریا در قالب دو مرحله موردمطالعه قرار گرفتند؛ مرحله تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله و مرحله برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله. در مرحله اول دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، مدل‌سازی و با استفاده از الگوریتم آزادسازی-ثابت سازی، حل می‌شود. در مرحله دوم مسئله QCSP مدل‌سازی و با استفاده از الگوریتم ابتکاری برنامه‌ریزی پویا حل می‌شود.

در مقاله (Iris, Pacino et al. 2017) دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت ادغامی مدل‌سازی و با الگوریتم ابتکاری "جستجوی محلی بزرگ تطبیقی" حل شد. نتایج عددی آن‌ها نشان داد الگوریتم ابتکاری پیشنهادی در بیشتر موارد عملکرد مناسبی دارد.

در مقاله (Agra and Oliveira 2018) هر سه مسئله عملیات جانب دریا به‌صورت ادغامی مدل‌سازی و با الگوریتم ابتکاری افق نورد حل شد.

در مقاله (Correcher, Alvarez-Valdes et al. 2019) دو مسئله BAP و QCAP با فرض ثابت بودن تعداد جرثقیل‌های هر کشتی در هر بازه زمانی، به‌صورت ادغام یکپارچه مدل‌سازی شدند. کروچر و همکارانش مسئله QCSP را در نیز در مدل پیشنهادی‌شان جای دادند. آن‌ها برای حل مدلشان از الگوریتم شاخه و برش استفاده کردند. نتایج عددی آن‌ها نشان می‌دهد که مدل را تا ٤٠ عدد کشتی می‌توان با این روش حل کرد و به جواب بهینه رسید.

در مقاله (Hsu, Chiang et al. 2019) دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت یکپارچه و در یک مدل ریاضی ادغام شدند. در مقاله مذکور برای حل مدل ریاضی از الگوریتم ژنتیک ترکیبی استفاده شد و نتایج نشان دادند که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، از الگوریتم ژنتیک پایه عملکرد بهتری دارد.

در مقاله (Rodrigues and Agra 2021) هر سه مسئله BAP، QCAP و QCSP در قالب یک مدل ادغامی یکپارچه و با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان ورود کشتی‌ها مدل‌سازی و حل شدند. مدل پیشنهادی هر دو نوع جرثقیل (همگن و غیر همگن)، محدودیت عمق آبخور و شرایط جزر و مد دریا را نیز در نظر می‌گیرد. در مقاله مذکور یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر PSO توسعه‌یافته که نتایج عددی، عملکرد بهتر الگوریتم توسعه‌یافته را نسبت به الگوریتم پایه PSO نشان می‌دهد. نتایج مقاله نشان می‌دهد در حالتی‌که جرثقیل‌ها از نوع غیر همگن هستند، حل مسئله سخت‌تر می‌شود.

در مقاله (Lujan, Vergara et al. 2021) یک مدل ادغامی بهینه‌سازی فازی برای دو مسئله BAP و QCAP و با در نظر گرفتن دو اسکله معرفی شد و مدل پیشنهادی در نرم‌افزار تجاری CPLEX حل شد. مدل پیشنهادی مذکور به یک برنامه پهلوگاه منجر می‌شود که دیر یا زودتر رسیدن کشتی را پشتیبانی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که اگر تعداد کشتی‌ها کم باشد (کم‌تر از ٥)، می‌توان از نرم‌افزار CPLEX برای حل مدل استفاده کرد، اما با زیادتر شدن تعداد کشتی‌ها، حل مدل سخت‌تر شده و دیگر نمی‌توان از CPLEX استفاده کرد.

در مقاله (Xiang and Liu 2021) دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت ادغامی مدل‌سازی شدند. خیانگ و لیو عدم قطعیت در دو پارامتر را در نظر گرفتند؛ زمان ورود کشتی‌ها و تعداد کانتینرهای اعلامی کشتی‌ها. آن‌ها برای حل مدلشان مسئله را به دو قسمت تقسیم و هرکدام را به‌صورت مجزا حل کردند؛ مسئله اصلی (قطعی) و زیر مسئله (تصادفی). نتایج عددی نشان

می‌دهد مدل پیشنهادی‌شان عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های قطعی و سراسر استوار دارد.

مقالات گفته شده به‌صورت خلاصه در جدول ۱ خلاصه شده‌اند. با دقت در جدول ۱، می‌توان مشاهده کرد که تعداد اندکی از مقالات هر سه مسئله عملیات جانب دریا را بصورت همزمان بررسی کرده‌اند. مقاله حاضر قصد دارد هر سه مسئله عملیات جانب دریا را به‌صورت ادغام دومرحله‌ای مدل‌سازی و حل کند. تا آنجا که نویسندگان این مقاله جستجو و مطالعه کردند، تاکنون هیچ مقاله‌ای عملکرد نسخه تکاملی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات(EPSO) را در حل مسائل عملیات جانب دریا بررسی نکرده است. مقاله حاضر با مقایسه عملکرد الگوریتم EPSO با عملکرد دو الگوریتم ژنتیک(GA) و نسخه اولیه الگوریتم PSO، خلأ پژوهشی یادشده را پوشش می‌دهد.

۳. مدل‌سازی ریاضی برنامه اولیه پهلوگاه

مسائل برنامه‌ریزی شامل سه مسئله می‌شوند؛ BAP, ACQP, QCSP. در این مقاله این مسئله در دو مرحله مدل‌سازی و حل می‌شوند:

– مرحله اول) دو مسئله BAP و QCAP در یک مدل ادغامی یکپارچه مدل‌سازی شده و با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری حل می‌شود. مدل مرحله اول، با نام مدل تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله(BAQCAP)[۶] شناخته می‌شود.

جدول ۱. خلاصه مقالات گذشته

مقاله	مدل‌سازی						روش حل						
	BAP	QCAP	QCSP	ادغامی	برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای	آزادسازی لاگرانژ	روش‌های ابتکاری	الگوریتم جستجوی ممنوعه	نرم‌افزارهای تجاری	روش دقیق	PSO	الگوریتم ژنتیک	EPSO
(Daganzo 1989)		*	*	*						*			
(Park and Kim 2003)	*	*	*		*	*	*						
(Chang, Jiang et al. 2010)	*	*		*								*	
(Lee and Qiu Wang 2010)	*		*		*							*	
(Zeng, Yang et al. 2011)	*	*	*	*	*			*					
(Vacca, Salani et al. 2013)	*	*		*			*						
(Unsal and Oguz 2013)		*	*	*					*				
(Diabat and Theodorou 2014)		*	*	*								*	
(Theodorou and Diabat 2015)		*	*	*		*							
(Al-Dhaheri and Diabat 2017)		*	*	*		*							
(Meisel and Bierwirth 2013)	*	*	*	*			*						
(Ursavas 2014)	*	*	*	*			*						
(Lalla-Ruiz, González-Velarde et al. 2014)	*	*		*								*	
(Ilati, Sheikholeslami et al. 2014)	*	*			*				*				
(Türkoğulları, Taşkın et al. 2014)	*	*	*	*			*						
(Han, Gong et al. 2015)	*	*	*		*						*		
(Iris, Pacino et al. 2015)	*	*		*			*						
(Liu, Zheng et al. 2016)	*	*	*		*		*						
(Iris, Pacino et al. 2017)	*	*		*			*						
(Agra and Oliveira 2018)	*	*	*	*			*						
(Correcher, Alvarez-Valdes et al. 2019)	*	*	*	*			*						
(Hsu, Chiang et al. 2019)	*	*		*								*	

مقاله	مدل‌سازی			روش حل							
	QCSP	QCAP	BAP	ادغامی	برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای	آزادسازی لاگرانژ	روش‌های ابتکاری	الگوریتم جستجوی ممنوعه	نرم‌افزارهای تجاری	روش دقیق	PSO	الگوریتم ژنتیک	EPSO
(Rodrigues and Agra 2021)	*	*	*	*							*		
(Lujan, Vergara et al. 2021)		*	*	*					*				
(Xiang and Liu 2021)		*	*	*			*						
مقاله حاضر	*	*	*		*						*	*	*

– مرحله دوم) با استفاده از اطلاعات به دست آمده از مرحله قبل، مسئله QCSP مدل‌سازی و با استفاده از الگوریتم ابتکاری برنامه‌ریزی پویا حل می‌شود.

۳-۱ فرض‌های مسئله

فرض‌های در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی دومرحله‌ای از قرار زیر هستند:

- **فرض‌های مدل BAQCAP**

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

۲) هر کشتی بر اساس محل انبار کانتینرهایش، محل بهینه پهلوگیری دارد.

۳) کشتی‌ها می‌توانند در هر محلی از پهلوگاه تخلیه/بارگیری کنند.

٤) جرثقیل‌های اسکله می‌توانند قبل از اتمام تخلیه/بارگیری کشتی، به کشتی دیگری تخصیص یابند.

- **فرض‌های مدل QCSP**

۱) جرثقیل‌های اسکله بر روی مسیر ریلی حرکت می‌کنند و درنتیجه نمی‌توانند از هم سبقت بگیرند.

۲) زمان جابجایی و نصب جرثقیل‌های اسکله در نظر گرفته نشده است.

۳) برای همه کانتینرهایی که تخلیه/بارگیری می‌شوند، وسیله حمل حاضر است که بین کشتی و محوطه بارچینی کانتینرها رفت‌وآمد دارد.

۳-۲ مدل‌سازی BAQCAP

پیش از مدل‌سازی مدل BAQCAP، ابتدا نمادها و علائم موردنیاز بایستی تعریف شوند. نمادهای این مدل به دو دسته تقسیم می‌شود؛ داده‌های ورودی مسئله و متغیر تصمیم. در دو جدول ۲ و ۳ هر دو دسته نمادهای گفته شده معرفی شدند. مدل مسئله BAQCAP دارای یک تابع هدف و ۱۳ محدودیت می‌باشد. تابع هدفی مدل پیشنهادی که در رابطه (۱) نشان داده می‌شود، کمینه‌سازی هزینه‌های پهلوگیری کشتی‌ها است. هزینه‌های در نظر گرفته شده در این مقاله، شامل ۳ عبارت می‌شود:

۱) هزینه پهلوگیری کشتی‌ها در محل غیر بهینه

۲) هزینه تأخیر در اعزام کشتی

۳) هزینه تخلیه/بارگیری کشتی‌ها توسط جرثقیل‌های اسکله.

جدول ۲. نمادهای معرف متغیر تصمیم در مدل BAQCAP

محل پهلوگیری ابتدای کشتی i	x_i
محل پهلوگیری انتهای کشتی i $\left(B_i = x_i + l_i +\right.$ فاصله ایمنی$\left.\right)$	B_i
زمان شروع پهلوگیری کشتی i	y_i
زمان اتمام عملیات تخلیه/بارگیری کشتی i	e_i
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}^{x}

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.	z_{ij}^{y}
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_{it}
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.	r_{itq}

جدول ۳. نمادهای معرف اطلاعات کشتی

طول کل پهلوگاه که به قسمت‌های $\delta = 10$ متری تقسیم می‌شود.	L
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
طول کشتی i که به قسمت‌های $\delta = 10$ متری تقسیم می‌شود.	l_i
تعداد کانتینرهای کشتی i که باید در بندر تخلیه/بارگیری شوند.	NC_i
موعد مقرر اعزام کشتی i از بندر	d_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.	b_i
حداقل تعداد جرثقیل موردنیاز برای خدمات‌رسانی به کشتی i	q_i^{min}
حداکثر تعداد جرثقیلی که می‌تواند به کشتی i خدمات‌رسانی کند.	q_i^{max}
هزینه اضافی حمل بر مبنای فاصله، ناشی از عدم پهلوگیری کشتی در بهترین محل پهلوگیری‌اش $(\frac{\text{واحد پول}}{\text{متر}})$	C_{1i}
جریمه ناشی از اعزام شدن کشتی دیرتر از موعد مقرر $(\frac{\text{واحد پول}}{\text{ساعت}})$	C_{2i}
هزینه عملیات تخلیه/بارگیری کشتی توسط جرثقیل‌های اسکله در هر ساعت	C_3
تعداد جرثقیل–ساعت موردنیاز برای تخلیه/بارگیری کشتی i	w_i
عدد بزرگ	M

مدل BAQCAP شامل دو دسته محدودیت است؛ محدودیت‌های (۲) تا (٦) که محدودیت‌های مسئله QCAP و محدودیت‌های (۷) تا (۱۳) که محدودیت‌های مسئله BAP را نشان می‌دهد.

- در رابطه (۲) نحوه محاسبه متغیر r_{itq} انجام می‌شود. در مقالات گذشته تعداد جرثقیل–ساعت موردنیاز کشتی‌ها، بخشی از داده‌های ورودی مسئله در نظر گرفته می‌شوند اما در این مقاله تعداد جرثقیل–ساعت موردنیاز برای هر کشتی بر اساس تعداد کانتینرهایی که بایستی تخلیه/بارگیری شوند (TEU) محاسبه می‌شود.
- در رابطه (۳)، محدودیت تعداد جرثقیل‌های موجود در بندر مدل‌سازی شده است.
- رابطه (٤)، تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده را محدود به حداقل و حداکثر تعدادی می‌کند که می‌توان به آن کشتی تخصیص داد.
- رابطه (٥)، پارامتر r_{it} را محاسبه می‌کند.
- کشتی‌ها در تمام مدتی که در پهلوگاه هستند باید حداقل یک جرثقیل بر روی آن‌ها فعالیت کند. رابطه (٦)، این محدودیت را کنترل می‌کند. محدودیت (٦) از نوع محدودیت نرم محسوب می‌شود.
- دو رابطه (۷) و (۸) دو پارامتر Z_{ij}^{x}, Z_{ij}^{y} را بر اساس محل و زمان پهلوگیری کشتی محاسبه می‌کند.
- رابطه (۹) محدودیت تداخل کشتی‌ها را کنترل می‌کند.

• رابطه (۱۰) زمان شروع پهلوگیری را کنترل می‌کند. بدیهی است که زمان شروع پهلوگیری کشتی‌ها باید بعد از رسیدن کشتی‌ها به بندر باشد.

• رابطه (۱۱) محدودیت طول پهلوگاه را در مدل ریاضی در نظر می‌گیرد.

• رابطه (۱۲)، افق زمانی موردنظر در برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. این محدودیت نیز از نوع محدودیت نرم محسوب می‌شود.

• دو رابطه (۱۳) و (۱٤) جنس متغیرها (باینری یا عدد صحیح بودن) را نشان می‌دهند.

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

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

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

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

$$\sum_{q=1}^{Q} r_{itq} = r_{it}, \quad \forall\, i,t \quad (٥)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

۳-۳ مدل‌سازی QCSP

نمادهای استفاده شده در مدل QCSP در جدول ٤ ارائه شدند. تمام این نمادها متغیرهای تصمیم مدل ریاضی را نشان می‌دهند.

جدول ٤. نمادهای مدل QCSP

r_{itk}	متغیر باینری. اگر جرثقیل شماره k، در اسلات زمانی t بر روی کشتی i فعالیت کند برابر ۱ است در غیر این صورت برابر ۰ است.
S_{tk}	متغیر باینری. اگر جرثقیل k، در اسلات زمانی t، تازه نصب‌شده باشد برابر ۱ است در غیر این صورت برابر ۰ است.
W_{itk}	متغیر باینری. اگر $r_{itk} \ge r_{i,t,k-1}$ برابر ۱ است در غیر این صورت برابر ۰ است. این متغیر سمت چپ‌ترین (اولین) جرثقیلی که به کشتی i تخصیص داده‌شده را نشان می‌دهد.
L_{itk}	متغیر باینری. اگر $r_{itk} \ge r_{i,t,k-1}$ برابر ۱ است در غیر این صورت برابر ۰ است. این متغیر سمت چپ‌ترین (اولین) جرثقیلی که به کشتی i تخصیص داده‌شده را نشان می‌دهد.
R_{itk}	متغیر باینری. اگر $r_{itk} \ge r_{i,t,k+1}$ برابر ۱ است در غیر این صورت برابر ۰ است. این متغیر سمت راست‌ترین (آخرین) جرثقیلی که به کشتی i تخصیص داده‌شده را نشان می‌دهد.
Z_{ij}	متغیر باینری. اگر در خط پهلوگاه، کشتی i پیش از کشتی j پهلوگرفته باشد برابر ۱ است در غیر این صورت برابر ۰ است. این متغیر توالی کشتی‌ها را در خط پهلوگاه نشان می‌دهد.

روابط (۱۵) تا (۳۱) مدل ریاضی QCSP را نشان می‌دهد. تابع هدف مدل QCSP کمینه‌سازی تعداد نصب‌های جرثقیل اسکله است که در رابطه (۱۵) مدل‌سازی شده است.

• هر جرثقیل در هر اسلات زمانی تنها می‌تواند بر روی یک کشتی فعالیت کند. این محدودیت در رابطه (١٦) مدل‌سازی گردیده است.

• اگر اولین و آخرین جرثقیلی که در طول اسکله قرار دارد، بر روی یک کشتی فعالیت کند، قطعاً چپ‌ترین یا راست‌ترین جرثقیلی است که بر روی آن کشتی کار می‌کند. دو رابطه (١٧) و (١٨) این محدودیت را مدل‌سازی می‌کنند. این دو محدودیت مقدار دو متغیر تصمیم L_{itk} و R_{itk} را کنترل می‌کند.

• تمام جرثقیل‌هایی که در اولین بازه زمانی شروع به کار می‌کنند، نصب جدید محسوب می‌شوند. این محدودیت در رابطه (١٩) مدل‌سازی گردید.

• محاسبه پارامتر L_{itk} در دو رابطه (٢٠) و (٢١) انجام می‌گیرد.

• محاسبه پارامتر R_{itk} در دو رابطه (٢٢) و (٢٣) انجام می‌گیرد.

• پارامتر W_{itk} (نصب جدید بودن جرثقیل‌های اسکله در هر اسلات زمانی) در دو رابطه (٢٤) و (٢٥) محاسبه می‌شود.

• در هر بازه زمانی، تنها یک جرثقیل می‌تواند راست‌ترین یا چپ‌ترین جرثقیل اسکله محسوب شود. روابط (٢٦) و (٢٧) این محدودیت را مدل‌سازی می‌کند. واضح است که این دو محدودیت، درواقع دو پارامتر L_{itk} و R_{itk} را کنترل می‌کنند.

• رابطه (٢٨) دو مدل BAQCAP و QCSP را به هم متصل می‌کند. این رابطه برابر بودن تعداد جرثقیل در مدل دو مدل را کنترل می‌کند.

• جرثقیل‌های اسکله معمولاً بر روی مسیر ریلی حرکت می‌کنند، درنتیجه نمی‌توانند از یکدیگر سبقت بگیرند. این محدودیت با عنوان "محدودیت عدم عبور جرثقیل‌های اسکله" شناخته می‌شود که در رابطه (٢٩) مدل‌سازی گردیده است.

$$\boldsymbol{Min} \sum_{k=1}^{Q}\sum_{t=1}^{T} \boldsymbol{S_{tk}} \quad (١٥)$$

$$\sum_{i=1}^{N} r_{itk} \le 1 \;\; \forall t = 1,2,\dots,T \;, \forall k = 1,2,\dots,N \quad (١٦)$$

$$L_{it1} = r_{it1}, \;\; \forall i \;, t \quad (١٧)$$

$$R_{itQ} = r_{itQ} \;, \quad \forall i, t \quad (١٨)$$

$$W_{i,1,k} = r_{i,1,k}, \quad \forall i, k \quad (١٩)$$

$$1 - \left(r_{itk} - r_{it,k-1}\right) \le M \times (1 - L_{itk}), \quad \forall k = 2,\dots,Q \;. \forall i, t \quad (٢٠)$$

$$r_{itk} - r_{it,k-1} \le M \times L_{itk}, \quad \forall k = 2,\dots,Q \;\forall i, t \quad (٢١)$$

$$1 - \left(r_{itk} - r_{it,k+1}\right) \le M \times (1 - R_{itk}), \quad \forall k = 1,\dots,Q-1 \;. \forall i, t \quad (٢٢)$$

$$r_{itk} - r_{it,k+1} \le M \times R_{itk}, \quad k = 1,\dots,Q-1, \forall i, t \quad (٢٣)$$

$$1 - \left(r_{itk} - r_{i,t-1,k}\right) \le M \times (1 - W_{itk}), \quad t = 2,\dots,T \;, \forall i, k \quad (٢٤)$$

$$r_{itk} - r_{i,t-1,k} \le M \times W_{itk}, \quad t = 2,\dots,T \;, \forall i, k \quad (٢٥)$$

$$\sum_{k=1}^{Q} L_{itk} = r_{it}, \quad \forall i, t \quad (٢٦)$$

$$\sum_{k=1}^{Q} R_{itk} = r_{it}, \quad \forall i, t \quad (٢٧)$$

$$\sum_{k=1}^{Q} r_{itk} = \sum_{q=1}^{Q} q \times r_{itq}, \quad \forall i, t \quad (٢٨)$$

$$\sum_{k=1}^{Q} k \times R_{itk} \le \sum_{k=1}^{Q} k \times L_{jtk} + M \times \left(1 - Z_{ij}\right), \quad \forall t, \forall i, j, x_i < x_j \quad (٢٩)$$

$$s_{tk} = \sum_{i=1}^{N} w_{itk}, \quad \forall \, t, k \quad (٣٠)$$

$$r_{itk} = 1 \; or \; 0, \quad \forall i, j, t, k \quad (٣١)$$

٤. حل مدل QCSP

برای حل مدل QCSP بایستی ٢ پارامتر در اختیار باشد:

١) زمان و محل پهلوگیری کشتی‌ها

٢) تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده شده به کشتی در هر بازه زمان

با در اختیار داشتن این دو پارامتر، می‌توان مدل QCSP را حل کرد. حل مدل QCSP با کمک الگوریتم ابتکاری برنامه‌ریزی

پویا[۷] انجام می‌گیرد. پیش از حل مدل QCSP باید دو عبارت حالت[۸] و مرحله[۹] تعریف شوند؛

- مرحله: کل بازه زمانی به تعدادی زیر بازه تقسیم می‌شوند که در هرکدام از این زیر بازه‌ها، مجموع تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده به کشتی‌ها ثابت است. به هرکدام از این زیر بازه‌ها، مرحله گفته می‌شود. هر مرحله با دو واقعه قابل تعریف است:

۱) پهلوگیری هر کشتی جدید، به معنی ایجاد یک مرحله جدید است. به‌عنوان‌مثال مرحله‌های ۱، ۲، ۳، ۵، ٦ و ۷ در شکل ٤، این‌گونه تعریف‌شده‌اند.

۲) تغییر در تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده به کشتی ها، یک مرحله جدید ایجاد می‌کند. مرحله ٤ در شکل ۳ اینگونه تعریف شده است.

- حالت: به توالی چپ‌ترین جرثقیل‌های تخصیص یافته به کشتی‌ها در هر مرحله، حالت گویند.

روش برنامه‌ریزی پویا، از یک تابع به نام معادله بازگشتی[۱۰] برای محاسبه تابع هدف مدل ریاضی استفاده می‌کند. در رابطه (۳۲) معادله بازگشتی نوشته شده است. نمادهایی که در معادله بازگشتی استفاده شده در جدول ۵، توضیح داده شده‌اند.

$$S_{n,i} = min[S_{n,(j,i)} + S_{n-1,j}] \qquad (۳۲)$$

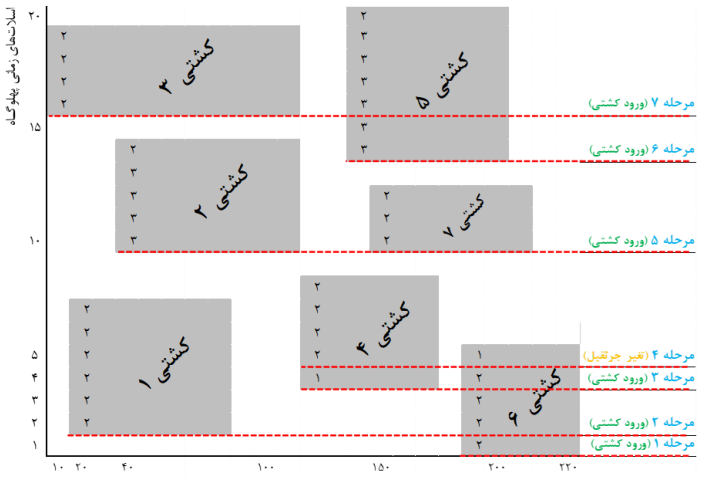
با تعاریف گفته شده، برای حل مدل QCSP از فلوچارت نشان داده شده در شکل ٤ استفاده می‌شود.

جدول ۵. پارامترهای معادله بازگشتی

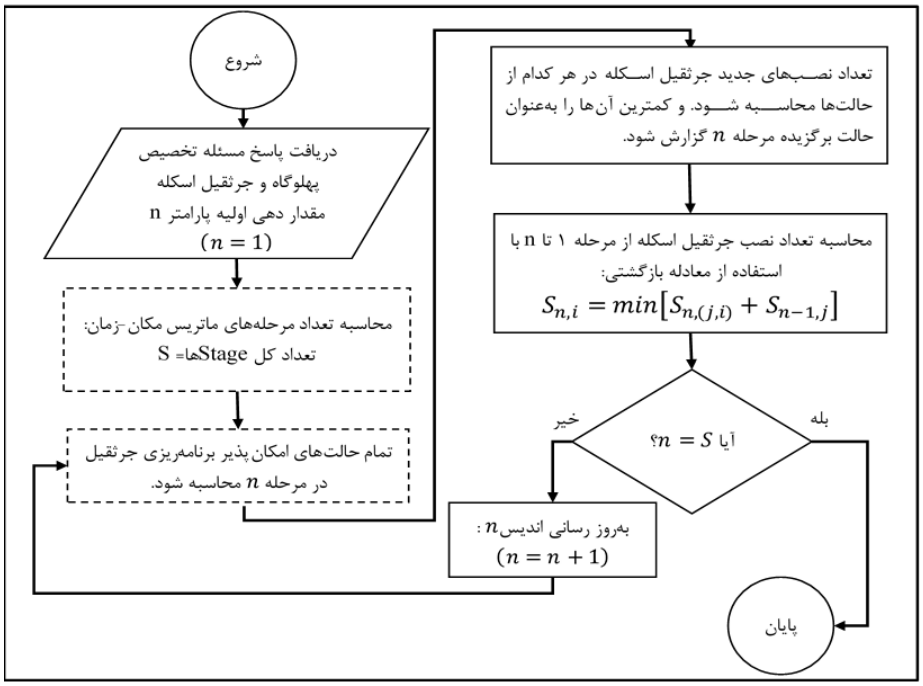
کم‌ترین مقدار زمان جابجایی جرثقیل‌ها از مرحله ۱ تا n، در شرایطی که حالت مرحله n، i باشد.	$T_{n,i}$
زمان جابجایی جرثقیل‌ها در مرحله n در شرایطی که حالت مرحله n، i و حالت مرحله $n-1$، j باشد.	$T_{n,(j,i)}$
کم‌ترین مقدار زمان جابجایی جرثقیل‌ها از مرحله ۱ تا $n-1$، در شرایطی که حالت مرحله $n-1$، j باشد.	$T_{n-1,j}$

۵. حل مدل‌های ریاضی

برای حل مدل BAQCAP، از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود. با در اختیار داشتن اطلاعاتی که از حل مدل BAQCAP به دست می‌آید، می‌توان مدل QCSP را با استفاده از الگوریتم ابتکاری برنامه‌ریزی پویا حل کرد. همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، مقاله حاضر به‌دنبال بررسی عملکرد الگوریتم EPSO در حل مسائل عملیات جانب دریا است. به همین منظور، مدل BAQCAP با استفاده از ۳ الگوریتم GA، PSO و EPSO حل می‌شود و درنهایت عملکرد این سه الگوریتم با هم مقایسه می‌شوند. علت انتخاب الگوریتم GA، فراگیر بودن استفاده از این الگوریتم است و الگوریتم PSO، به این دلیل انتخاب گردید که الگوریتم پایه برای الگوریتم EPSO می‌باشد. در ادامه، هر سه الگوریتم گفته شده، توضیح مختصر داده می‌شوند.



شکل ۳. تعریف مرحله در برنامه عملیات تخصیص پهلوگاه

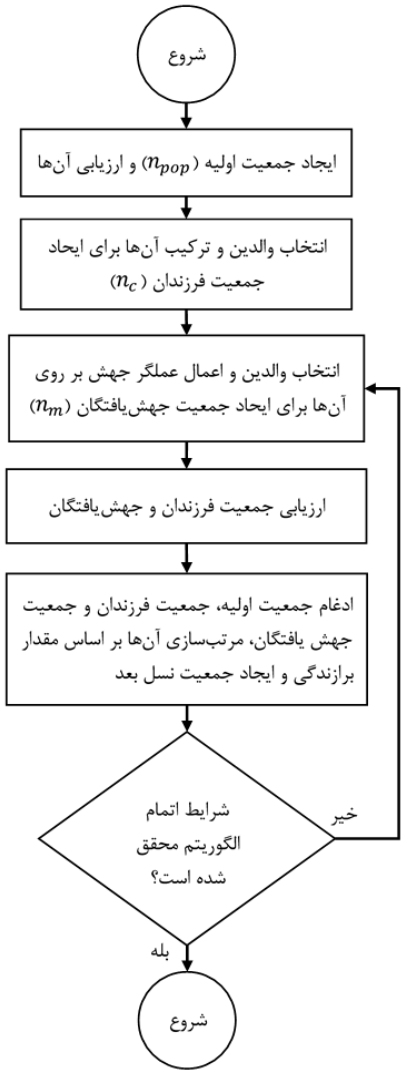


شکل ٤. فولچارت برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله (QCSP)

۵-۱ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک(GA)[11]، یک الگوریتم فراابتکاری تکاملی محسوب می‌شود.

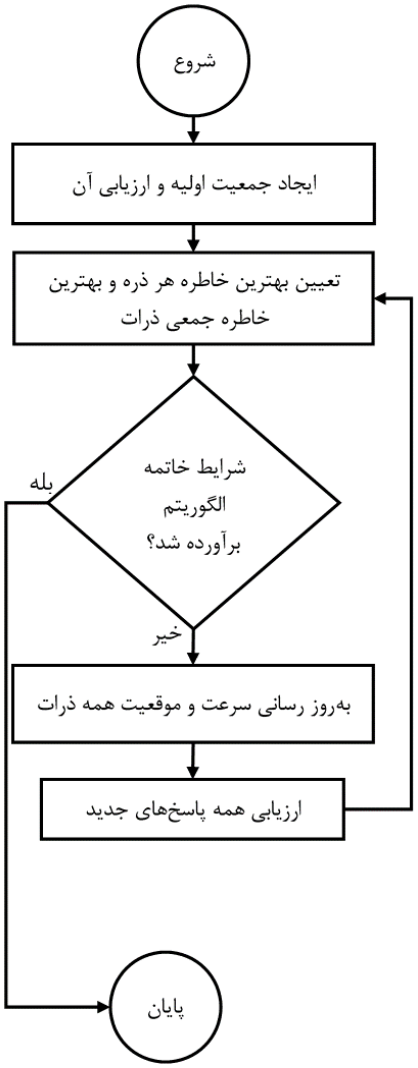
الگوریتم ژنتیک با ایجاد تعدادی پاسخ اولیه شروع به‌کار می‌کند؛ سپس در هر مرحله اجرای الگوریتم، پاسخ‌های اولیه بهتر می‌شوند. این فرایند تا جایی تکرار می‌شود که شرایط خاتمه الگوریتم محقق شوند. شکل ۵، فلوچارت اجرای الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.مقاله حاضر برای ترکیب والدین از سه روش ترکیب نقطه‌ای، ترکیب دونقطه‌ای و ترکیب یکنواخت به‌صورت تصادفی و با احتمال برابر استفاده می‌کند. عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی شامل سه روش جایگزینی، درج کردن و معکوس کردن می‌باشد که به‌صورت تصادفی و با احتمال برابر اعمال می‌شوند. شرط خاتمه الگوریتم در این مقاله، عدم تغییر پاسخ بهینه الگوریتم پس از ۲۰ تکرار متوالی است.



شکل ۵. فلوچارت الگوریتم ژنتیک

۵-۲ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات(PSO)[۱۲] یک الگوریتم جستجوی جمعی است. درPSO ، ذرات در فضای جستجو جاری می‌شوند و تغییر مکان ذرات در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگانشان است؛ بنابراین موقعیت دیگر توده ذرات روی چگونگی جستجوی یک ذره اثر می‌گذارد. نتیجه مدل‌سازی این رفتار اجتماعی فرایند جستجویی است که ذرات به سمت نواحی موفق میل می‌کنند. ذرات از یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش به‌دست‌آمده به سمت بهترین همسایگان خود می‌روند. اساس کار PSO بر این اصل استوار



شکل ٦. فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

است که در هرلحظه هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرارگرفته است و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند. شکل ٦، فلوچارت الگوریتم PSO را نشان می‌دهد.

روند اجرای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به شرح زیر است:

۱) ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آن

۲) تعین بهترین خاطره‌های هر ذره و بهترین خاطره جمعی

۳) اگر شرایط خاتمه برآورده شود، به مرحله ٦ مراجعه شود؛ در غیر این صورت به مرحله ٤ مراجعه شود.

٤) سرعت و موقعیت هر ذره به‌روزرسانی شود.

٥) همه پاسخ‌های جدید ارزیابی شوند و به مرحله ۲ مراجعه شود.

٦) پایان

در مرحله چهارم باید موقعیت هر ذره به‌روزرسانی شود. برای به‌روزرسانی موقعیت هر ذره باید از رابطه (۳۳) استفاده شود:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (۳۳)$$

در رابطه (۳۳)، پارامتر $x_i(t+1)$ موقعیت ذره iاُم را در تکرار $t+1$ را نشان می‌دهد و پارامتر $v_i(t+1)$ سرعت ذره iاُم را در تکرار $t+1$ را نشان می‌دهد. برای محاسبه سرعت ذره، از رابطه (۳٤) استفاده می‌شود:

$$v_i(t+1) = w \times v_i(t) + r_1 c_1\left(P_i.best - x_i(t)\right) + r_2 c_2\left(P_g.best - x_i(t)\right) \quad (۳٤)$$

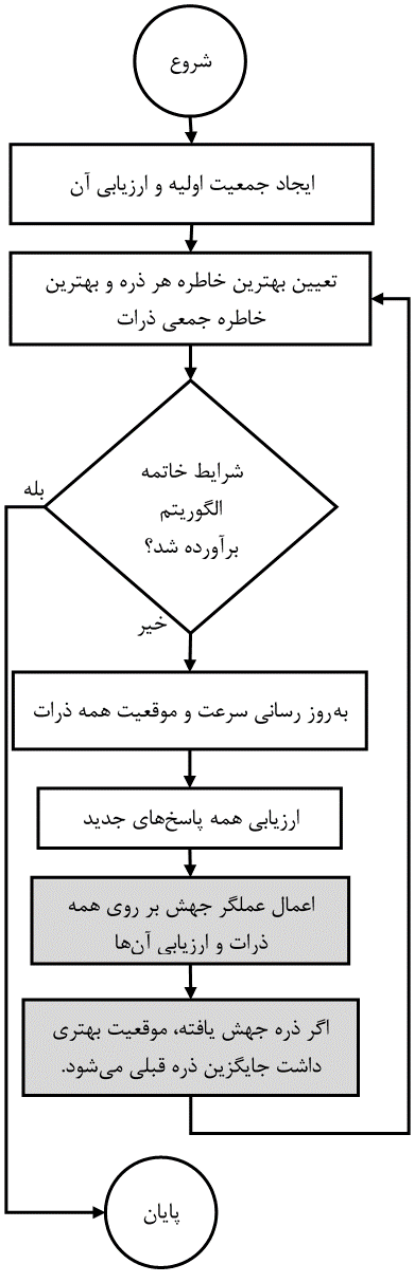
در رابطه (۳٤) پارامتر w ضریب اینرسی را نشان می‌دهد که تمایل ذره برای ادامه دادن ذره در همان سرعت پیشین را نشان می‌دهد. دو پارامتر r_1, r_2 اعداد تصادفی هستند که با استفاده از توزیع یکنواخت احتمالی ساخته می‌شوند ($r_1, r_2 = U(0,1)$). پارامتر c_1 ضریب یادگیری شخصی و پارامتر c_2 ضریب یادگیری جمعی را نشان می‌دهد. سه پارامتر w, c_1, c_2 برای هر مسئله مقدار متفاوتی دارند و باید مقدار بهینه آن‌ها برای هر مسئله محاسبه شود. در مقاله (Poli, Kennedy et al. 2007) مقدار بهینه این سه پارامتر محاسبه شده که در جدول ٦ گزارش شده است.

جدول ٦. تنظیم پارامتر دو الگوریتم PSO و EPSO

	w	c_1	c_2
مقدار بهینه	۰/۷۲۹۸	۱/۴۹۶۲	۱/۴۹۶۲

۵-۳ الگوریتم EPSO

الگوریتم EPSO، نسخه تکاملی الگوریتم PSO محسوب می‌شود که در مقاله (Miranda and Fonseca 2002) و برای مسئله بهینه‌سازی سیستم قدرت معرفی شد. این الگوریتم خصوصیات الگوریتم‌های تکاملی و الگوریتم ازدحام ذرات را در کنار یکدیگر دارد. در این الگوریتم پس از به‌روزرسانی موقعیت هر ذره در مرحله ٤، عملگرهای جهش بر روی آن‌ها اعمال می‌شود. نمایی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تکاملی در شکل ۸ نمایش داده‌شده است. در شکل ۷، دو مستطیل خاکستری که با رنگ متفاوت مشخص شدند، مواردی هستند که به الگوریتم PSO پایه اضافه شده و قابلیت تکاملی به آن داده است.



شکل ۷. الگوریتم بهینه‌سازی ازداحام ذرات تکاملی (EPSO)

٤-٥ داده‌های مورد استفاده

داده‌های استفاده شده در این مقاله، داده‌های واقعی ورود و خروج کشتی‌ها در هر دو پایانه کانتینری بندر شهید رجایی است. اطلاعات موردنیاز دو پایانه کانتینری بندر شهید رجایی در جدول ۷، گزارش شده است.

برای مقایسه بهتر عملکرد الگوریتم EPSO، می‌بایست مجموعه داده‌ها متنوع استفاده شوند؛ ازاین‌رو داده‌های هر دو پایانه کانتینری و به‌ازای هر تعداد کشتی (۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ٤٠) ۵ نمونه داده در نظر گرفته شد. دسترسی به برخی از داده‌ها امکان‌پذیر نبود که مطابق با سایر مقالات در نظر گرفته شده است. این داده‌ها در جدول ۸، گزارش شده‌اند.

جدول ۷. اطلاعات پایانه‌های کانتینری بندر شهید رجایی

پایانه‌های کانتینری	طول پهلوگاه (متر)	تعداد جرثقیل اسکله
پایانه شماره ۱	۱۱٦۰	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. $q_i^{max} = \frac{L}{50}$
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 می شود. $d_i = a_i + \left\lceil \frac{C_i}{q_i^{max}} \right\rceil$
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	$30 \frac{Movement}{Hour}$

٦. نتایج و تفسیر آن‌ها

٦-١ کدبندی و کدگشایی راه‌حل

پاسخ مدل یک رشته از اعداد جایگشتی است که طول آن برابر با تعداد کشتی‌ها است و ترتیب برنامه‌ریزی کشتی‌ها را نشان می‌دهد. به‌عنوان‌مثال در شکل۹، هفت کشتی برای برنامه‌ریزی وجود دارند و اعدادی که در این شکل نشان داده می‌شوند ترتیب برنامه‌ریزی کشتی‌ها را نشان می‌دهند. مطابق با پاسخ نشان داده شده در شکل۸، ابتدا کشتی شماره ٤ برنامه‌ریزی می‌شود، سپس کشتی‌های شماره ۷، ۲، ۱، ٦، ۳ و ۵ برنامه‌ریزی می‌شوند.

۴	۷	۲	۱	۶	۳	۵

شکل ۸ کدبندی راه‌حل در الگوریتم ACO

٦-٢ حل مدل BAQCAP

در مدل ریاضی BAQCAP به دنبال بهترین ترتیب کشتی‌ها برای برنامه‌ریزی هستند که کم‌ترین هزینه را برای بندر داشته باشد. ابتدایی‌ترین راه برای حل مدل BAQCP، برنامه‌ریزی بر اساس زمان ورود کشتی‌ها به بندر(FCFS)[۱۳] است. در این روش کشتی‌ها بر اساس زمان ورودشان مرتب شده و به‌ترتیب

برنامه‌ریزی می‌شوند. به همین دلیل برای اعتبارسنجی الگوریتم‌های پیشنهادی و هم‌چنین مقایسه عملکرد الگوریتم EPSO، نتایج روش FCFS نیز در نظر گرفته می‌شود.

تمام کدهای نوشته‌شده در نرم‌افزار MATLAB R2019b نوشته‌شده است. اجرای کدها در یک سیستم رایانه شخصی انجام شده است که مشخصات آن به شرح زیر است:

- سیستم‌عامل: $Windows\ 10-64\ bit$
- واحد پردازنده مرکزی (CPU)

$$Core^{TM}\ i7-4790,\quad 3/60\ GHz$$

- حافظه دسترسی تصادفی (RAM): $16\ GB$

برای مقایسه نتایج الگوریتم الگوریتم‌های پیشنهادی، ابتدا می‌بایست نتایج حل مدل را نرمال‌سازی کرد. نرمال‌سازی نتایج این مقاله با استفاده از رابطه شماره (۳۵) انجام می‌گیرد. در رابطه شماره (۳۵) ابتدا بهترین پاسخ را از میان روش FCFS و الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی محاسبه می‌شود سپس با استفاده از رابطه (۳۵)، درصد فاصله از بهترین پاسخ محاسبه می‌گردد.

$$\text{فاصله از بهترین پاسخ} = \frac{\text{بهترین پاسخ} - \text{پاسخ الگوریتم}}{\text{بهترین پاسخ}} \times 100 \quad (۳۵)$$

نتایج خامی که از حل مدل BAQCAP به دست آمده پیوست شماره ۱ گزارش می‌شود. در جدول ۹، میانگین درصد فاصله از بهترین پاسخ برای روش‌های حل پیشنهادی و در هر دو پایانه کانتینری محاسبه شده است. اعداد این جدول، میانگین درصد فاصله از بهترین پاسخ در بین ۵ نمونه داده محاسبه گردیده و به‌ازای تعداد کشتی‌ها گزارش شده است. به‌عنوان‌مثال به‌ازای تعداد ۲۰ کشتی، در هر پایانه ۵ نمونه داده در نظر گرفته شده و عدد نشان داده‌شده در جدول ۸، میانگین درصد فاصله از بهترین پاسخ یافت شده در این ۵ نمونه داده را نشان می‌دهد. هرچه اعداد این جدول کوچک‌تر باشند، به این معنی است که به پاسخ بهینه یافت‌شده نزدیک‌تر می‌باشند. ردیف آخر این جدول، مقدار میانگین درصد فاصله از بهترین پاسخ برای کل نمونه داده‌ها محاسبه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم EPSO در همه موارد از الگوریتم PSO پاسخ‌های بهتری گزارش می‌دهد و به پاسخ بهینه یافت شده نزدیک‌تر است؛ در مقابل، تقریباً پاسخ‌های نزدیکی نسبت به الگوریتم ژنتیک ارائه می‌دهد(حتی در برخی از موارد به پاسخ بهینه یافت شده نزدیک‌تر است). به‌صورت میانگین پاسخ‌های الگوریتم EPSO در پایانه اول نزدیک به ۱/۰ درصد بهتر از الگوریتم ژنتیک است و در پایانه دوم حدود ٦٥/٠ درصد بیشتر از الگوریتم ژنتیک از پاسخ بهینه فاصله دارد. جدول ۹، به‌صورت مشابه زمان اجرای الگوریتم‌ها را با هم مقایسه می‌کند.

اعداد جدول ۱۰، سرعت بیشتر الگوریتم EPSO را نسبت به الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد؛ سرعت الگوریتم EPSO به‌صورت میانگین در هر دو پایانه کانتینری حدود ۳ برابر بیشتر از سرعت الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

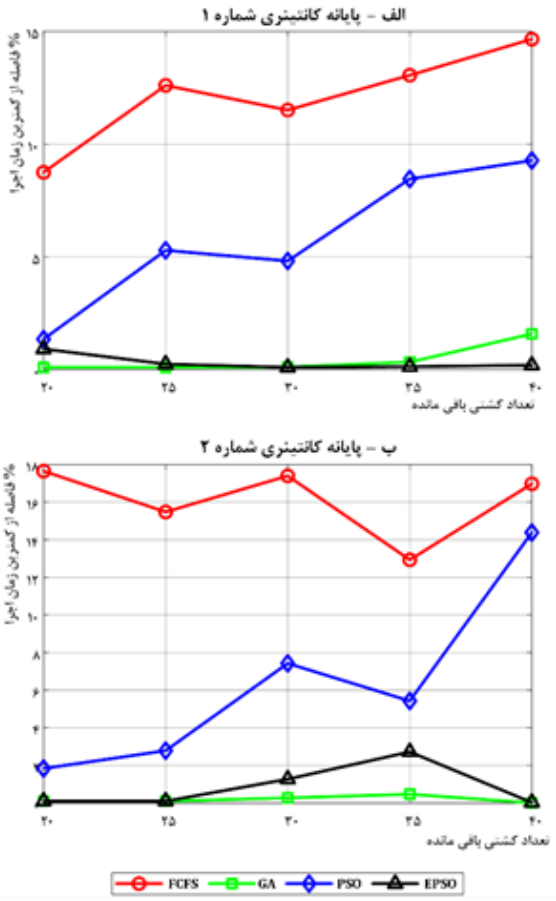
جدول ۹. مقایسه درصد فاصله از بهترین پاسخ یافت شده در بین الگوریتم‌های پیشنهادی

تعداد	پایانه کانتینری شماره ۱				پایانه کانتینری شماره ۲			
کشتی	FCFS	GA	PSO	EPSO	FCFS	GA	PSO	EPSO
۲۰	۸/۷۴٪	۰/۰۰٪	۱/۳۵٪	۰/۹۲٪	۱۷/۶۵٪	۰/۰۰٪	۱/۸۴٪	۰/۰۰٪
۲۵	۱۲/۶۰٪	۰/۰۰٪	۵/۲۹٪	۰/۲۵٪	۱۵/۴۸٪	۰/۰۰٪	۲/۷۸٪	۰/۰۰٪
۳۰	۱۱/۵۰٪	۰/۱۲٪	۴/۸۲٪	۰/۰۰٪	۱۷/۴۰٪	۰/۲۸٪	۷/۴۳٪	۱/۲۷٪
۳۵	۱۳/۰۵٪	۰/۳۳٪	۸/۴۵٪	۰/۱۳٪	۱۲/۹۴٪	۰/۴۷٪	۵/۴۳٪	۲/۷۲٪
۴۰	۱۴/۶۵٪	۱/۵۸٪	۹/۲۷٪	۰/۲۰٪	۱۶/۹۸٪	۰/۰۱٪	۱۴/۳۹٪	۰/۰۳٪
میانگین	۱۲/۱۱٪	۰/۴۱٪	۵/۸۴٪	۰/۳۰٪	۱۶/۰۹٪	۰/۱۵٪	۶/۳۷٪	۰/۸۰٪

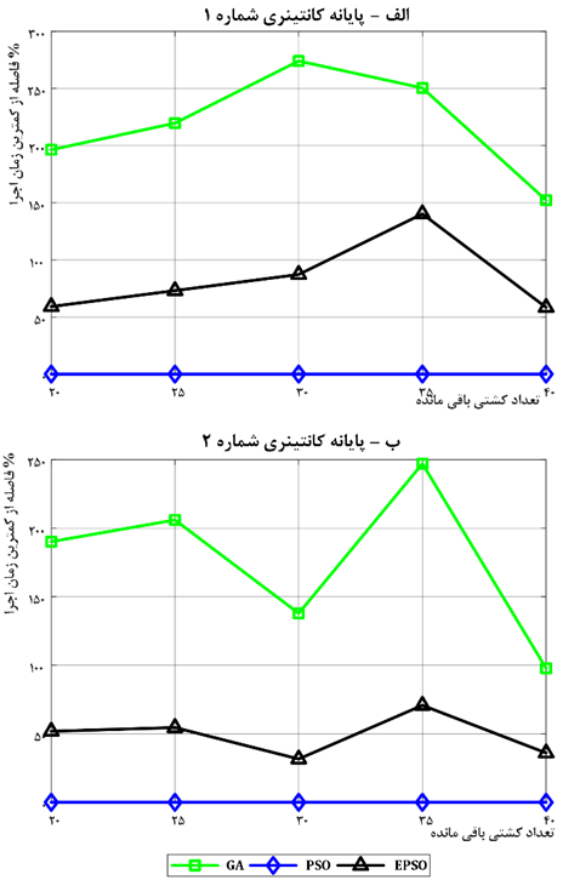
جدول ۱۰. درصد فاصله از کم‌ترین زمان اجرا در بین الگوریتم‌های پیشنهادی

تعداد کشتی	پایانه کانتینری شماره ۱			پایانه کانتینری شماره ۲		
	GA	PSO	EPSO	GA	PSO	EPSO
۲۰	۱۹۶٪	۰٪	۵۹٪	۱۹۰٪	۰٪	۵۲٪
۲۵	۲۲۰٪	۰٪	۷۳٪	۲۰۶٪	۰٪	۵۵٪
۳۰	۲۷۴٪	۰٪	۸۷٪	۱۳۸٪	۰٪	۳۲٪
۳۵	۲۵۰٪	۰٪	۱۴۰٪	۲۴۷٪	۰٪	۷۱٪
۴۰	۱۵۲٪	۰٪	۵۸٪	۹۸٪	۰٪	۳۶٪
میانگین	۲۱۹٪	۰٪	۸۴٪	۱۷۶٪	۰٪	۴۹٪

شکل‌های ۹ و ۱۰، اعداد دو جدول ۹ و ۱۰ را در قالب نمودار نشان می‌دهند. محور افقی این نمودار، تعداد کشتی‌های موجود در افق برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. محور عمودی این نمودارها، میانگین درصد فاصله از بهترین پاسخ یافت شده (اعداد موجود در جدول) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد کشتی‌ها و درنتیجه پیچیده‌تر شدن حل مدل‌ها، دو الگوریتم EPSO و GA عملکرد بهتری نشان می‌دهند و به پاسخ بهینه یافت شده نزدیک‌تر می‌شوند. مشاهده می‌شود که با افزودن عملگرهای جهش به الگوریتم PSO، عملکرد آن را به‌مراتب افزایش می‌دهد اما ازنظر زمان اجرا، کمی کندتر می‌شود.



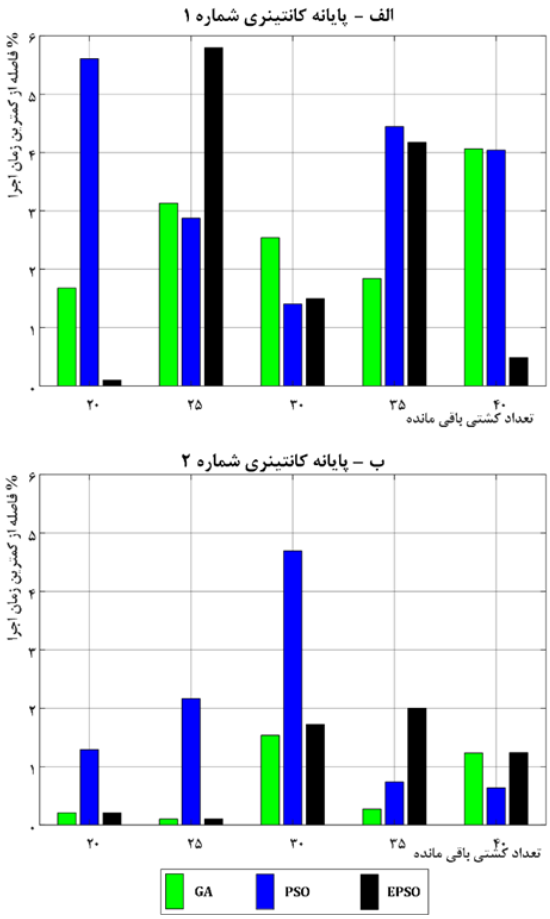
شکل ۹. مقایسه پاسخ الگوریتم‌ها در حل مدل BAQCAP



شکل ۱۰. مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌ها در مدل BAQCAP

۶-۳ حل مدل QCSP

حل مدل QCSP با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی پویا انجام می‌شود. همان‌طور که پیش‌ازاین گفته شد، برای حل مدل QCSP به اطلاعات به دست آمده از حل مدل BAQCAP نیاز است. ازآنجاکه مدل BAQCAP با الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف حل شده و به پاسخ‌های متفاوتی نیز منتج شده، می‌توان انتظار داشت که پاسخ‌های مدل QCSP با تغییر الگوریتم‌های فراابتکاری تغییر می‌کند. جدول ۱۱، نتایج حل مدل QCSP را به‌ازای اطلاعات به دست آمده از حل مدل BAQCAP و با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری را نشان می‌دهد. اعداد این جدول مشابه با دو جدول ۸ و ۹، نرمال‌سازی و محاسبه شدند. شکل ۱۱، اعداد جدول ۱۰ را در قالب نمودار میله‌ای نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. مقایسه پاسخ مدل QCSP

جدول ۱۱. مقایسه خروجی‌های الگوریتم در حل مدل QCSP

تعداد کشتی	پایانه کانتینری شماره ۱			پایانه کانتینری شماره ۲		
	GA	PSO	EPSO	GA	PSO	EPSO
۲۰	۲٪	۶٪	۰٪	۰٪	۱٪	۰٪
۲۵	۳٪	۳٪	۶٪	۰٪	۲٪	۰٪
۳۰	۳٪	۱٪	۱٪	۲٪	۵٪	۲٪
۳۵	۲٪	۴٪	۴٪	۰٪	۱٪	۲٪
۴۰	۴٪	۴٪	۰٪	۱٪	۱٪	۱٪
میانگین	۳٪	۴٪	۲٪	۱٪	۲٪	۱٪

با دقت به شکل ۱۱، می‌توان مشاهده کرد که هیچ قاعده خاصی برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها وجود ندارد؛ چراکه در برخی موارد الگوریتم EPSO منجر به پاسخ‌های بهتری در مدل QCSP شده و در برخی موارد دیگر، خلاف این موضع صادق است. این مسئله یکی از اشکالات روش مدل‌سازی دومرحله است. درواقع در این روش پاسخ مدل‌ها با هم هماهنگ نیستند.

۷. نتیجه‌گیری

مسائل عملیات جانب دریا شامل سه مسئله BAP، QCAP و QCSP می‌شوند که در مقاله حاضر به‌صورت دومرحله‌ای مدل‌سازی و حل شده‌اند. برای حل مدل BAQCAP برای اولین بار از نسخه تکاملی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (EPSO) استفاده شده است؛ و برای بررسی عملکرد الگوریتم EPSO، نتایج آن با دو الگوریتم GA و PSO مقایسه شد. نتایج عددی نشان می‌دهند پاسخ‌های الگوریتم EPSO تقریباً نزدیک به پاسخ‌های الگوریتم GA هستند تا جایی که در برخی موارد به پاسخ‌های بهتری نیز منتج می‌شود (به‌صورت میانگین ۱/۰٪ تا ٦/۰٪ پاسخ این دو الگوریتم با هم فاصله دارند)، اما سرعت الگوریتم EPSO حدود ۳ برابر الگوریتم GA می‌باشد. در مقایسه با الگوریتم PSO، در همه موارد به پاسخ‌های بهتری منتج شده و نزدیک به ٦٪ بهتر از الگوریتم PSO عمل می‌کند اما ازنظر زمان اجرا کندتر از الگوریتم PSO عمل می‌کند (این مسئله به خاطر حضور عملگرهای جهش در الگوریتمِ EPSO می‌باشد). ازاین‌رو برای حل مدل BAQCAP پیشنهاد می‌شود بجای الگوریتم PSO، از نسخه تکاملی آن استفاده شود و در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، اگر سرعت الگوریتم دارای اهمیت زیادی باشد، از الگوریتم EPSO استفاده شود. نتایج حل مدل QCSP قاعده خاصی را برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی نشان نمی‌دهد که دلیل آن مدل‌سازی دومرحله مسائل عملیات جانب دریا می‌باشد. در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود از روش ادغام یکپارچه برای مدل‌سازی هر سه مسئله عملیات جانب دریا استفاده شود تا بهتر بتوان عملکرد الگوریتم‌ها را مقایسه کرد.

۸. پی‌نوشت‌ها

1. Berth Allocation Problem (BAP)
2. Quay Crane Assignment Problem (QCAP)
3. Quay Crane Scheduling Problem (QCSP)
4. Indented Berth
5. Evolution Particle Swarm Optimization (EPSO)
6. Berth Allocation and Quay Crane Assignment Problem (BAQCAP)
7. Dynamic Programming
8. State
9. Stage
10. Recursive Equation
11. Genetic Algorithm (GA)
12. Particle Swarm Optimization (PSO)
13. First Come First Service (FCFS)

۹. مراجع

– Agra, A. and M. Oliveira (2018). "MIP approaches for the integrated berth allocation and quay crane assignment and scheduling problem." European Journal of Operational Research 264(1): 138-148.

– Al-Dhaheri, N. and A. Diabat (2017). "A Lagrangian relaxation-based heuristic for the multi-ship quay crane scheduling problem with ship stability constraints." Annals of Operations Research 248(1-2): 1-24.

– 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.

– Chang, D., Z. Jiang, W. Yan and J. He (2010). "Integrating berth allocation and quay crane assignments." Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 46(6): 975-990.

– Correcher, J. F., R. Alvarez-Valdes and J. M. Tamarit (2019). "New exact methods for the

– Lalla-Ruiz, E., J. L. González-Velarde, B. Melián-Batista and J. M. Moreno-Vega (2014). "Biased random key genetic algorithm for the tactical berth allocation problem." Applied Soft Computing 22: 60-76.

– Lee, D.-H. and H. Qiu Wang (2010). "Integrated discrete berth allocation and quay crane scheduling in port container terminals." Engineering Optimization 42(8): 747-761.

– Liu, C., L. Zheng and C. Zhang (2016). "Behavior perception-based disruption models for berth allocation and quay crane assignment problems." Computers & Industrial Engineering 97: 258-275.

– Lujan, E., E. Vergara, J. Rodriguez-Melquiades, M. Jiménez-Carrión, C. Sabino-Escobar and F. Gutierrez (2021). "A Fuzzy Optimization Model for the Berth Allocation Problem and Quay Crane Allocation Problem (BAP+ QCAP) with n Quays." Journal of Marine Science and Engineering 9(2): 152.

– Malekahmadi, A., M. Alinaghian, S. R. Hejazi and M. A. A. Saidipour (2020). "Integrated continuous berth allocation and quay crane assignment and scheduling problem with time-dependent physical constraints in container terminals." Computers & Industrial Engineering 147: 106672.

– Meisel, F. and C. Bierwirth (2013). "A framework for integrated berth allocation and crane operations planning in seaport container terminals." Transportation Science 47(2): 131-147.

– Miranda, V. and N. Fonseca (2002). New evolutionary particle swarm algorithm (EPSO) applied to voltage/VAR control. in Proc. 14th Power Syst. Comput. Conf, Citeseer.

time-invariant berth allocation and quay crane assignment problem." European Journal of Operational Research 275(1): 80-92.

– Daganzo, C. F. (1989). "The crane scheduling problem." Transportation Research Part B: Methodological 23(3): 159-175.

– Diabat, A. and E. Theodorou (2014). "An integrated quay crane assignment and scheduling problem." Computers & Industrial Engineering 73: 115-123.

– Han, X., X. Gong and J. Jo (2015). "A new continuous berth allocation and quay crane assignment model in container terminal." Computers & Industrial Engineering 89: 15-22.

– Hsu, H.-P., T.-L. Chiang, C.-N. Wang, H.-P. Fu and C.-C. Chou (2019). "A hybrid GA with variable quay crane assignment for solving berth allocation problem and quay crane assignment problem simultaneously." Sustainability 11(7): 2018.

– Ilati, G., A. Sheikholeslami and E. Hassannayebi (2014). "A simulation-based optimization approach for integrated port resource allocation problem." PROMET-Traffic&Transportation 26(3): 243-255.

– Iris, Ç., D. Pacino and S. Ropke (2017). "Improved formulations and an adaptive large neighborhood search heuristic for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem." Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 105: 123-147.

– Iris, Ç., D. Pacino, S. Ropke and A. Larsen (2015). "Integrated berth allocation and quay crane assignment problem: Set partitioning models and computational results." Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 81: 75-97.

– Park, Y.-M. and K. H. Kim (2003). "A scheduling method for Berth and Quay cranes." OR Spectrum 25(1): 1-23.

– Poli, R., J. Kennedy and T. Blackwell (2007). "Particle swarm optimization." Swarm intelligence 1(1): 33-57.

– 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.

– Sirimanne, S. N., J. Hoffman, W. Juan, R. Asariotis, M. Assaf, G. Ayala, H. Benamara, D. Chantrel, J. Hoffmann and A. Premti (2019). Review of maritime transport 2019, tech. rep.

– Theodorou, E. and A. Diabat (2015). "A joint quay crane assignment and scheduling problem: formulation, solution algorithm and computational results." Optimization Letters 9(4): 799-817.

– Türkoğulları, Y. B., Z. C. Taşkın, N. Aras and İ. K. Altınel (2014). "Optimal berth allocation and time-invariant quay crane assignment in container terminals." European Journal of Operational Research 235(1): 88-101.

– Türkoğulları, Y. B., Z. C. Taşkın, N. Aras and İ. K. Altınel (2016). "Optimal berth allocation, time-variant quay crane assignment and scheduling with crane setups in container terminals." European Journal of Operational Research 254(3): 985-1001.

– Unsal, O. and C. Oguz (2013). "Constraint programming approach to quay crane scheduling problem." Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 59: 108-122.

– Ursavas, E. (2014). "A decision support system for quayside operations in a container terminal." Decision Support Systems 59: 312-324.

– Vacca, I., M. Salani and M. Bierlaire (2013). "An exact algorithm for the integrated planning of berth allocation and quay crane assignment." Transportation Science 47(2): 148-161.

– Wawrzyniak, J., M. Drozdowski and É. Sanlaville (2020). "Selecting algorithms for large berth allocation problems." European Journal of Operational Research 283(3): 844-862.

– Xiang, X. and C. Liu (2021). "An almost robust optimization model for integrated berth allocation and quay crane assignment problem." Omega: 102455.

– Zeng, Q., Z. Yang and X. Hu (2011). "Disruption recovery model for berth and quay crane scheduling in container terminals." Engineering Optimization 43(9): 967-983.

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.