

## مساله برنامه‌ریزی حمل و نقل آبی

### چکیده

یکی از مهم‌ترین موضوعات مرتبط با بندر، دسترسی به راه‌های آبی و مدیریت ترافیک‌شان است. این مورد، فشار زیادی به طور خاص بر ظرفیت محدود شده راه‌های حمل و نقل آبی وارد می‌کند، که عدم استفاده کارآمد باعث زیان در رقابت و هم چنین افزایش حجم تولید گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه آلودگی محیط زیست می‌شود. در این زمینه، مسأله برنامه‌ریزی حمل و نقل آبی، پیشنهاد می‌شود؛ که هدفش برنامه‌ریزی ورود و خروج کشتی‌ها از طریق آبراه-های مختلف برای ورود یا ترک بندر به طوری که زمان انتظار حداقل شود، است. از سویی دیگر، این تابع هدف مانع ایجاد گلوگاه یا تراکم از طریق برنامه‌ریزی ترافیک آبراه می‌شود و از سوی دیگر، در حالی که کشتی‌ها در بندر برای ورود یا خروج منتظر هستند گازهای گلخانه‌ای ناشی از آن‌ها کاهش می‌یابد. مدلی ریاضی و ابتکاری پیشنهاد می‌شود. سناریوهای واقعی برمبنای دلتای یانگ تسه (شانگهای) برای ارزیابی عملکرد الگوریتم ابتکاری و بهبود عملیات در دنیای واقعی ارائه می‌شود.

**کلمات کلیدی:** مسأله برنامه‌ریزی حمل و نقل آبی، حمل و نقل دریایی، پایانه کانتینر

### 1. مقدمه

رشد ترافیک دریایی، اداره‌کنندگان بندر را مجبور می‌کند تا برای کاهش زمان انتظار هنگام دسترسی به زیرساخت-هایشان، به طور مؤثری آن‌ها بخواهند سهم بازارشان را افزایش داده (Verstichel et al., 2011)، و گازهای

گلخانه‌ای کشتی‌ها را کاهش دهند (کار Du et al., 2011, 2015 را ببینید) که این امر منجر به افزایش گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های مضر و ارتقاء موقعیت بندر در سلسله مراتب بندر از طریق افزایش دسترسی بندر شده است (Caldeirinha and Felício, 2014). در این راستا، همان طور که (Notteboom (2006 نشان داد 93.6 درصد برنامه‌های تأخیر به دلیل دسترسی به بندر و عملیات پایانه است. این ویژگی حتی زمانی که پایانه‌های کانتینر مانند بندر شانگهای جایی که \_ با توجه به تعداد مشارکت‌کنندگان \_ تعداد زیادی کشتی به صورت روزانه برای تعمیر از آبراه یانگ تسه دلتا می‌گذرند وجود دارد ارزشمندتر می‌شود. بنابراین، از آن جا که آبراه‌ها نقش مهمی را در پایانه‌های کانتینر دریایی (Notteboom, 2008) بازی می‌کند، آن‌ها به صورت کارا جهت اجتناب از گلوگاه‌ها یا ازدحام به دنبال راهی هستند که بتواند جهت زیان ناشی از رقابت به کار روند. به علاوه، استفاده از آبراه‌های داخلی به عنوان یک حالت حمل و نقل در پایانه‌های کشتی‌رانی، زمانی که ادغام فزاینده‌اش را با دیگر روش‌های حمل و نقل با چندین برنامه حمل شبکه‌ای در نظر می‌گیریم (Lowe, 2005, UNESCAP1) آشکارتر می‌شود. این مورد وجهی را برای مقابله با محدودیت‌های لجستیکی و فضایی در نظر می‌گیرد و موضوعاتی مرتبط با بندر را به اقتصاد جهانی اضافه می‌کند.

از یکسو، از دیدگاه لجستیک سبز، اپراتورهای پایانه به کاهش گازهای گلخانه‌ای علاقمند هستند در حالی که به حفظ کیفیت خدمات نیز توجه دارند و از سویی دیگر، شرکت‌های حمل و نقل به خدمات هموار برای اجتناب از زمان انتظار غیرضروری نیاز دارند به طوری که باعث تأثیر منفی اقتصادی و زیست محیطی مربوط به مصرف سوخت و زمان طی مسیر، می‌شود. تعدادی از آثار در ادبیات تخصصی، رابطه بین زمان انتظار کشتی و گازهای ساطع شده را مطالعه کردند. (Du et al. (2011 نشان دادند که زمان انتظار کشتی‌ها، تأثیر مهمی بر حجم گازهای ساطع شده دارد، به طوری که جریان عملیات می‌تواند به شرکت‌های حمل و نقل برای کاهش گازهای گلخانه‌ای و هم چنین به بندرها برای کنترل آن‌ها کمک نماید. در همان راستا، (Kontovas and Psaraftis (2011 کاهش گازهای ساطع شده در شبکه‌های کانتینر دریایی را بررسی کردند که نشان می‌داد یکی از گزینه‌های اصلی برای کاهش CO<sub>2</sub> انتشار یافته، کاهش زمان انتظار کشتی است. (Song (2014 گازهای گلخانه‌ای ساطع شده (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, )

PM10, PM2,5, NOx, SOx, CO and HC) را مطالعه کرد و هزینه‌های اجتماعی متناظر با آن‌ها را در بندر یانگشان در جنوب شانگهای چین مطالعه کرد. در کارشان، آن‌ها زمان انتظار کشتی در لنگرگاه و هم چنین اسکله را به صورت جداگانه برای ارزیابی گازهای گلخانه‌ای ساطع شده در نظر گرفتند. این نتایج نشان می‌دهد اگرچه که زمان انتظار در لنگرگاه تأثیر بیشتری نسبت به اسکله دارد، اما هر دو فعالیت منبع ساطع کردن گازهای گلخانه‌ای هستند. (Fagerholt et al. (2010) در زمینه مسیره‌های حمل و نقل نشان داد که زمان انتظار بیشتر کشتی‌ها پتانسیل بیشتری نسبت به کاهش افزایش مصرف سوخت دارند؛ این بر اهمیت زمان انتظار جهت مصرف و ساطع کردن گازهای گلخانه‌ای تأکید دارد. بنابراین، بهبود دسترسی به آبراه با اجتناب از زمان انتظار غیرضروری در ورودشان می‌تواند تنها منجر به صرفه‌جویی هزینه‌های اجتماعی و عملیاتی شود اما سطح کیفیت زیست محیطی در حداقل کردن گازهای ساطع شده، را افزایش می‌دهد.

در برنامه‌ریزی‌ها همواره تأخیر حمل و نقل دریایی برای دسترسی به بندر، بهره‌وری پایانه و به طور خاص در پایانه‌های همراه با ازدحام اثرگذار خواهد بود، به طوری که تأثیر زیادی به وسیله دسترسی به عملیات مرتبط با راه‌های آبی خواهد داشت. به طور عمومی، آبراه می‌تواند به عنوان یک مسیر محدود پر شده با آب تعریف شود، یعنی مسیری با رودخانه‌های داخلی، دریاچه‌ها یا خلیج‌هایی که قابل کشتیرانی هستند. یک آبراه معمولی از آب‌های با قابلیت کشتیرانی، کمک‌های ناوبری و شرایط آبی تشکیل شده است. اغلب آبراه‌های طبیعی هم چنین آبراه‌های مصنوعی می‌توانند به عنوان ظرفیت راه‌های حمل و نقل محدود شده، بسته به ویژگی‌های خاصشان، ارجاع داده شود. آن‌ها باید چندین شرط را تأمین کنند به طوری که به کشتی‌ها خدمت رسانی کنند. اول از همه، یک آبراه واجد شرایط باید عمق کافی داشته باشد. دوم این که، عرض آبراه یک معیار بسیار مهمی است. معمولاً یک آبراه، دو طرفه است و عرض آن باید بیش از مجموع وسعت دو کشتی در جهت مخالف با عرض اضافی به دلیل ایمنی باشد، اما بعضی اوقات تنها یک کشتی می‌تواند از آن عبور کند.

فقط تعداد کمی بر توجه به برنامه‌ریزی آبراه تمرکز دارد. (Dai and Schonfeld 1998)، به تخمین تأخیرات آبراه با استفاده از متامدل و نظریه صف پرداختند. (Taylor et al. (2005) سیستمی نرم افزاری را بر مبنای شبیه‌سازی

برای اعزام باربری کوچک و تخصیص قایق در آبراه داخلی توسعه دادند. تعدادی از آثار دیگر، به بررسی استفاده از قفل پرداخته‌اند. (Smith et al. 2009) آبراه Upper Mississippi River را بررسی کردند. این آبراه داخلی اصلی با 29 قفل است. آن‌ها مدل شبیه‌سازی شده گسسته‌ای را به عنوان روش مناسب برای بهبود استراتژی ورود-اول، خدمات-اول استفاده کردند. (Smith et al. 2011) قوانین تصمیم‌گیری پیچیده‌ای را براساس یک برنامه-زمان‌بندی پیچیده و مسأله یکپارچه‌ای را برای بهبود عملکرد قفل پیشنهاد دادند. (Verstichel et al. 2014) موقعیت کشتی‌ها را در حفره‌ها مطالعه کردند؛ آن‌ها فرمول‌بندی ریاضی و رویکرد حلی برای آن ارائه کردند. کارهای دیگر بر توجه‌شان بر برنامه‌ریزی عبور و مرور در کانال تمرکز دارد. (Günther et al. 2010, 2011) بر عبور و مرور دو طرفه کشتی در کانال کیل پرداختند. آن‌ها کانال را به عنوان مجموعه‌ای دیگر از بخش‌های کانال و کناره-گیری در نظر گرفتند. آن‌ها فرمول ریاضی برای طراحی مسیر خطی و حمل و نقل شبکه‌ای ارائه کردند. هدف مدل-شان حداقل کردن زمان کل مسیر کشتی‌ها است این زمان شامل قفل کردن و زمان انتظار برای کناره‌گیری می‌باشد. (Yang et al. 2014) مدل برنامه‌ریزی عدد صحیحی را برای بهینه کردن شبکه خطی رودخانه یانگ تسه ارائه کردند. آن‌ها یانگ تسه محدوده شده را تنها با یک کانال آب نسبت به گزینه‌های دیگر و تمام صف بندرها در کنار آب را در نظر گرفتند. رویکردشان به کاهش هزینه‌های حمل و نقل کمک می‌کند به طوری که هزینه‌های عملیات و سوخت در مسیر انتخاب شده کاهش یابند. آن‌ها همان عملیات مشابه را در هر بندر در نظر گرفتند. (Ulusçu et al. 2009) ترافیک را در تنگه استانبول مطالعه کردند و الگوریتم را برای برنامه‌ریزی کشتی‌های وارده با ملاحظات خاص به تنگه توسعه دادند.

با این وجود این واقعیت که در مرور ادبیات مرتبط یک یا چند مسأله برنامه‌ریزی آبراه در نظر گرفته شده است، رویکردهای پیشنهادی به موارد خاصی که به آبراه‌های مطالعه شده یا مسیرهای طراحی شده برای بازدید از پایانه-های در طول آن‌ها محدود شده است. در این راستا، در این کار، هدف ما، نشان دادن یک روش عمومی برای پرداختن به برنامه‌ریزی عبور و مرور در طول آبراه‌ها است. علاوه بر این، هم چنین این مفهوم به ما اجازه می‌دهد تا به سناریوی حمل و نقل خاصی بپردازیم که در آبراه‌های ورودی در بندر شانگهای (چین) اتفاق می‌افتد. آبراه ورودی،

یک آبراهی است که دریا یا رودخانه اصلی ورودی را و آب بندر را به یکدیگر متصل می‌سازد. به طور گسترده، اذعان می‌کند که یک معیار برای انتخاب بندر، ارتباطش است و این که می‌تواند به روش ساده‌ای با استفاده از عمق آب عملیاتی شود. با این وجود، اگر یک بندر آبراه ورودی با شرایط عمق خوب و عرض مناسب نداشته باشد، کشتی‌ها با درفت<sup>۱</sup> بزرگ نمی‌توانند وارد شوند مهم نیست عمق اسکله چقدر است. به همین دلیل آبراه ورودی مهم‌ترین قسمت جهت برقراری ارتباط است. برای مثال، دهانه آبراه عمیق یانگ تسه به عنوان ورودی اصلی بندر شانگهای به سه پروژه نظارتی در مقیاس بزرگ و پیچیده تبدیل شد. مسیر اصلی 7 متر (1998) بود که به طور جدی با توسعه صنعت حمل و نقل شانگهای محدود شده بود. در نهایت، عمق آن به 12 متر (2010) رسید که اجازه عبور پنجمین و ششمین نسل کانتینر را می‌دهد.

بحث قبلی به وضوح اهمیت اقتصادی، عملیاتی و محیط زیست را نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی کشتی‌ها در امتداد آبراه دارد. این امر منجر به نیاز به مدل‌های ریاضی و رویکردهای حل آن می‌شود. با این هدف ذهنی، نوآوری‌های اصلی این مقاله عبارتند از:

- مسأله برنامه‌ریزی حمل و نقل آبی (WSSP) را به منظور برنامه‌ریزی حمل و نقل در مسیر آبراه‌ها پیشنهاد شد. این مسأله به صورت برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP) و با در نظر گرفتن موقعیت واقعی در یانگ تسه، شانگهای، مدل شد. در این راستا، بررسی در گروه بین‌المللی بندر شانگهای (SIPG) انجام شد، تعداد زیادی از کشتی‌ها هر روز از این آبراه عبور می‌کنند و نسبت زیادی از آن‌ها نمی‌توانند در زمان مناسب عبور کنند نه به دلیل محدودیت‌های جغرافیای یانگ تسه بلکه به دلیل درفت، وسعت و جهت‌یابی در شب.

- همان طور که Kontovas and Psaraftis (2011) نشان دادند سیاست‌های مشترکی در پایانه‌ها برای کاهش زمان انتظار کشتی و در نتیجه کاهش گازهای گلخانه‌ای استفاده شد. بنابراین، ما الگوریتم‌های ابتکاری را ارزیابی کرده و بر مبنای سیاست‌های مشتری که در پایانه‌های کشتی‌های کانتینر استفاده می‌شود توسعه دادیم. این امر به ما اجازه می‌دهد تا بهبود عملیاتی و زیست محیطی را با استفاده از کاهش زمان انتظار که

---

1 - قسمتی از کشتی که زیر آب است

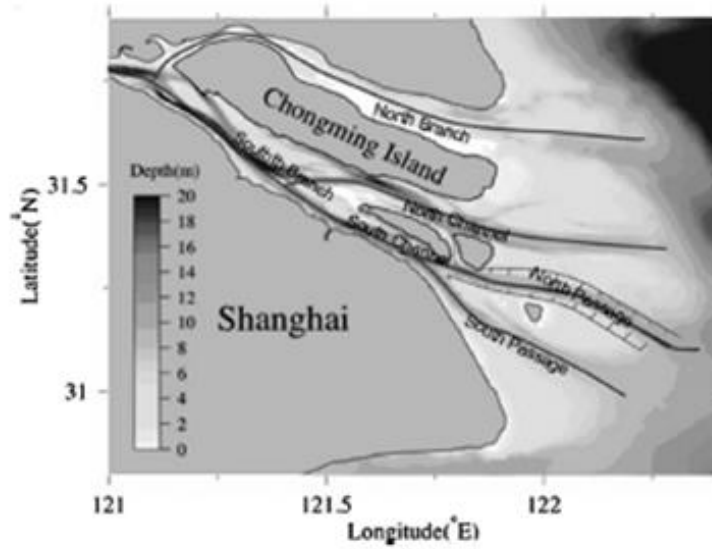
می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های پیچیده‌تر مانند شبیه‌سازی تبرید (SA) در این کار پیشنهاد می‌شود به دست آورد. در این حالت، SA پیشنهاد داده شده، اجازه می‌دهد تا گازهای گلخانه‌ای غیرضروری ایجاد شده توسط زمان انتظار کشتی‌ها کاهش یابد. علاوه بر این، مقایسه با مدل اجرا شده در CPLEX و الگوریتم‌های ابتکاری نشان می‌دهند که SA قادر است تا برنامه‌هایی با کیفیت بالا ارائه دهد که به عنوان بخشی از سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری (DSS) استفاده شوند. در این کاربرد واقعی، DSS برای تأیید تمام کشتی‌ها و بهبود زمان انتسابشان استفاده می‌شود.

- یک مقیاس مناسب بر مبنای داده‌های ارائه شده به وسیله پایانه کشتی کانتینر و ایگاوکیو (شانگهای) ارائه شد. از سوی دیگر، چون این مسأله می‌تواند به به سناریوهای دیگر ترجمه شود، این معیار، مسأله دیگری از ابعاد مختلف را شامل می‌شود.

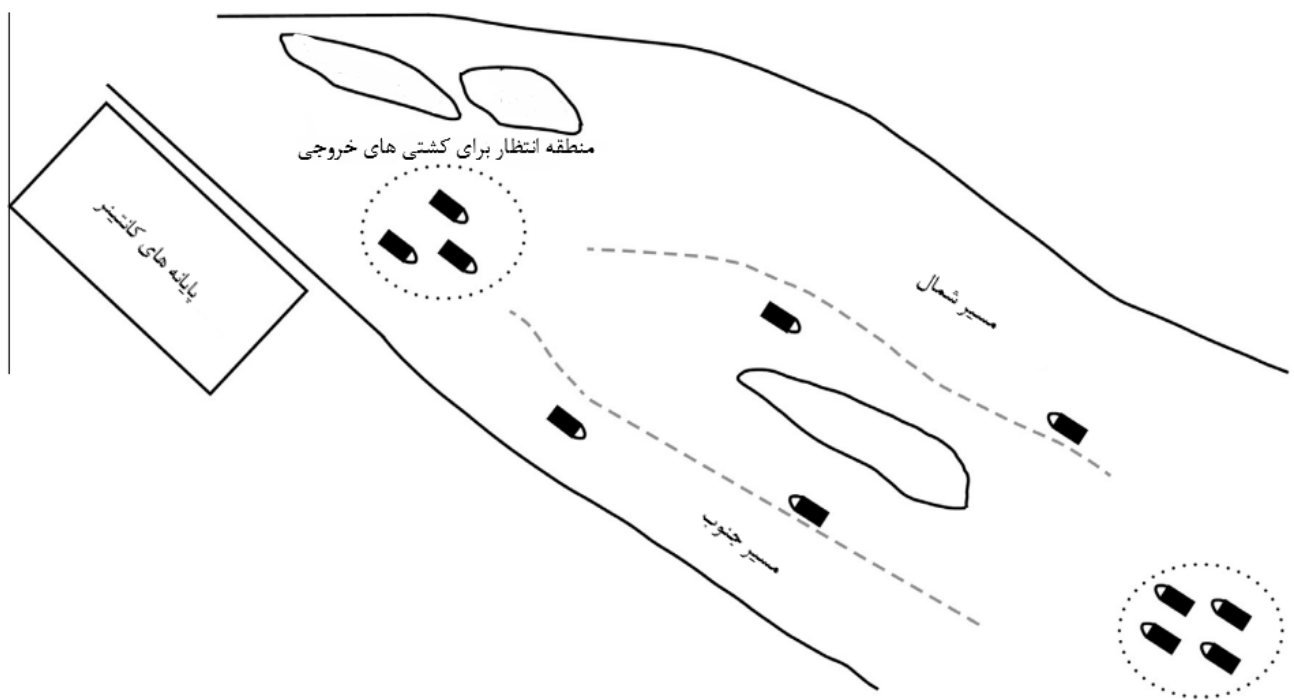
ادامه این مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی می‌شود. بخش 2 ویژگی‌های خاص یانگ تسه را معرفی می‌کند. فرمول‌بندی ریاضی مسأله برنامه‌ریزی حمل و نقل آبی در بخش 3 ارائه می‌شود. در بخش 4، روش‌های حل برای حل این مسأله پیشنهاد شده است. پس از آن در بخش 5، عملکرد هدف‌مان در سناریوهای واقعی تحلیل می‌شود. در نهایت، بخش 6 نتایج اصلی که از کار ما به دست آمده را ارائه می‌کند و چندین پیشنهاد برای کارهای آتی دارد.

## 2. حوزه مطالعاتی: رود یانگ تسه

در حالی که این مقاله گرایش به تدوین و فرموله کردن دارد به نظر می‌رسد داشتن کاربرد خاص همان طور که در این بخش توضیح داده می‌شود دارای اهمیت می‌باشد.

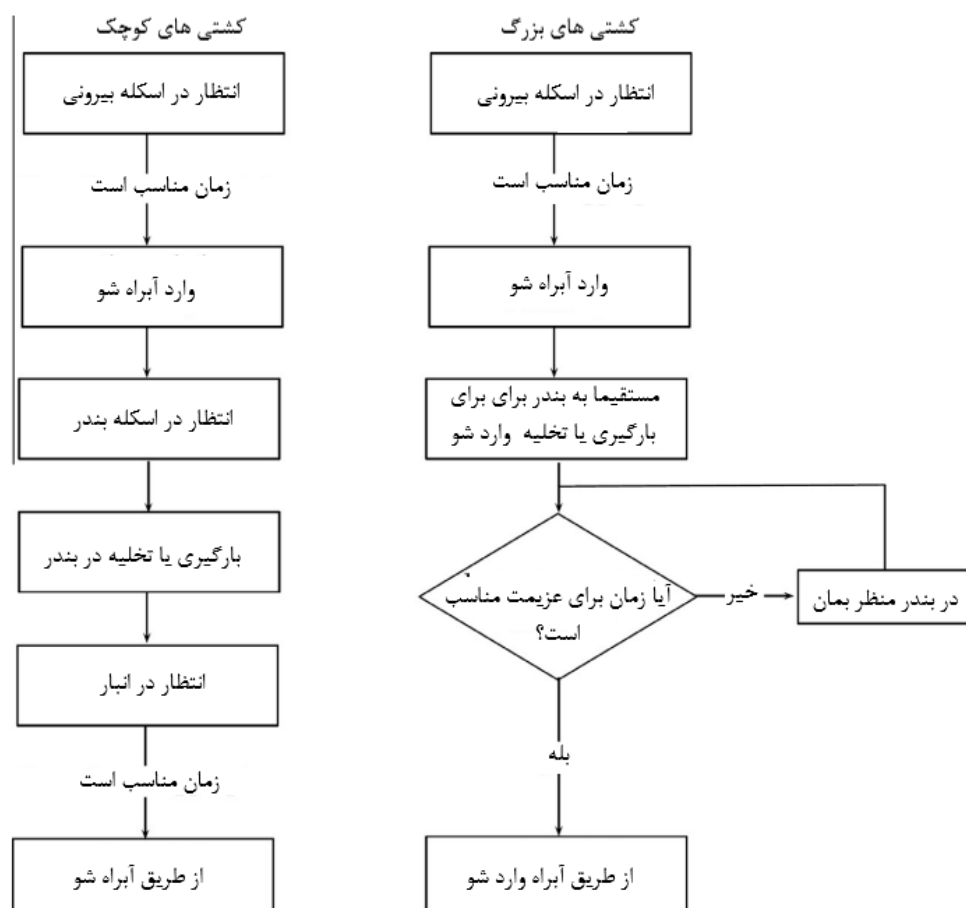


شکل ۱. نقشه جغرافیای دهانه یانگ تسه



شکل ۲. نقشه لجستیکی دهانه یانگ تسه

افزایش زمان انتظار کشتی ها



شکل ۳. روش عملیاتی برای کشتی های بزرگ و کوچک

## 2.1 تنظیمات پایه

دهانه رود یانگ تسه، یکی از مناطق حیاتی در چین برای حمل و نقل است (Notteboom, 2007; Comtois and Dong, 2007 را ببینید). بندر شانگهای واقع در چین، بندر اصلی کشتی های کانتینر است که میانگین رشد 16.5 درصدی کشتی های کانتینر را در سال 2010 (Yap and Lam, 2013) داشته است و یکی از بزرگترین گردش های مالی را در سال های اخیر (UNCTAD, 2014) داشته است. در شکل 1، نقشه جغرافیایی دهانه، نشان داده شده است که چندین آبراه مانند آبراه عمیق که به عنوان مسیر شمال، مسیر جنوب، آبراه شاخه شمالی و مسیر شاخه جنوبی را شامل می شود. از تمام این ها، مسیر شمال و جنوب، مهم ترین هستند زیرا آن ها ورودی به پایانه های وایگاوکیو می باشند. مسیر شمال که هم چنین مسیر دهانه عمیق یانگ تسه نامیده می شود 12.5 متر عمق دارد و



جز سه پروژه پیچیده و مقیاس بزرگ ذکر شده در بالاست. عرض مسیر شمالی، اندکی بیشتر از 80 متر است که تا حد زیادی محدودیت‌های ظرفیت این مسیر را دارد. با این وجود، به عنوان یک مسیر آبی دو طرفه در نظر گرفته می‌شود. از سوی دیگر، مسیر جنوبی، عمق 5.5 متر دارد و عرضش 250 متر است که به اندازه کافی برای حرکت دو کشتی کافی است.

روش‌های منظم که کشتی‌ها باید برای عبور در طول مسیرهای شمالی و جنوبی داشته باشند با استفاده از شکل 2 توصیف می‌شود. مسیرها به دو معبر تقسیم می‌شوند که هر مسیر برای عبور دو کشتی در جهت‌های عکس یکدیگر می‌باشد. این مورد، به عرض عمق و شرایط وابسته به زمان، بستگی دارد. دو حوزه وجود دارد: یعنی لنگرگاه بیرونی و لنگرگاه اسکله؛ برای کشتی‌ها به منظور انتظار برای شرایط جزر و مدی یا اگر لازم باشد گردش در مسیر. علاوه بر این، برای اختصاص مسیر به کشتی‌ها، آن‌ها درفت‌ها را یعنی کشتی‌های کوچک (تا 7 متر) یا کشتی‌های بزرگتر (بیش از 7 متر) دسته‌بندی کردند. بسته به نوع کشتی، روش ورود و عبور اختصاص یافته با فلوجارت نشان داده شده در شکل 3 مشخص می‌شود. برای کشتی‌های کوچک، آن‌ها در ابتدا، مجبورند تا در لنگرگاه بیرونی صبر کنند و سپس از طریق مسیر آبراه با محدودیت‌های کمتر بروند. پس از آن، آن‌ها در لنگرگاه بندر برای پهلوگیری منتظر می‌مانند. هنگامی که اسکله اختصاص داده شده در دسترس قرار گیرد، آن‌ها محموله را بارگیری یا تخلیه می‌کنند. به محض این که آن‌ها عملیات حمل و نقل را تمام کردند، مجبورند تا در لنگرگاه بندر در منطقه‌ای برای مدت زمان مناسب منتظر بمانند تا اگر نیاز است ترک دهانه انجام شود. روش مورد استفاده برای کشتی‌ها بزرگ تا حدی ساده‌تر ادامه پیدا می‌کند. کشتی‌های بزرگ که می‌خواهند به بندر شانگهای دسترسی داشته باشند از طریق مسیر شمال وارد می‌شوند چون مسیر جنوب، به اندازه کافی برای عبور آن‌ها عمیق نیست. پس از آن که آن‌ها سرانجام بعد از انتظار در لنگرگاه بیرونی عبور کردند، مستقیماً به اسکله برای بارگیری و تخلیه اقدام می‌کنند. آن‌ها برای عزیمت آماده هستند، مدیران پایانه‌ها مجبورند تا مناسب‌ترین زمان را برای عزیمت آن‌ها مشخص کنند. در این راستا، کشتی‌ها مجبورند تا در اسکله بمانند تا زمان مناسب فرارسد.

در ادبیات مربوط، اکثر کارها درباره آبراه‌ها در چین بر ارزیابی ظرفیت با استفاده از رویکردهای شبیه‌سازی تمرکز دارند. (Deng et al. 2011) روش‌های ریاضی با استفاده از تئوری صف و روش‌های تجربی توسط تمرین‌کنندگان برای محاسبه ظرفیت آبراه‌ها معرفی کردند. مدل‌های (Liu et al. (2008) and Ning et al. (2008) برای شبیه‌سازی مسیر کشتی‌ها، ویژگی‌های متفاوتی را در نظر می‌گیرد که برای منعکس شدن در مدل ریاضی مشکل هستند. (Yang et al. 2008) مدل شبیه‌سازی را برای محاسبه ظرفیت مسیر عمیق دهانه یانگ تسه توصیف کردند و ظرفیت آن را تا 2024 پیش‌بینی کردند. این مدل، چندین فاکتور مانند شرایط جغرافیایی، شرایط آب و هوایی و زمان کنترل ترافیک و غیره را در نظر می‌گیرد. (Zhou and Hu 2004)، تحقیق توالی کشتی‌هایی که از مسیر شمالی دهانه یانگ تسه می‌گذرند را انجام دادند. به ترتیب الویت‌ها برای کشتی‌های مختلفی جهت عبور، روش سلسله مراتبی (AHP) برای در نظر گرفتن فاکتورهای مختلف موثر بر الویت کشتی‌ها در عبور از آبراه به کار برده شده است.

مطالعه عمیق این بررسی مختصر مرور ادبیات به ضرورت ساخت DSS برای کمک به سروسامان دادن به برنامه کشتی‌ها برای عبور از آبراه‌های دهانه یانگ تسه، اشاره دارد. بنابراین، یکی از اهداف این کار این است که یک راه حل مفهومی از ترکیب تجربه کارکنان و مدل‌های ریاضی پیشنهاد کرده و بخش مهمی از DSS را که می‌تواند برنامه کشتی را کنترل کند ارائه دهد.

## 2.2 تأثیر جزر و مدی

همان طور که در مطالعه انجام شده توسط (Du et al. 2015) دیده می‌شود در تعدادی از بندرها، اثر جزر و مدی (افزایش طبیعی سطح دریا) تأثیر مهمی در برنامه‌ریزی کشتی‌ها، زمان دسترسی به بندر هنگامی که زمان‌های انتظار طولانی‌تر است وجود دارد که هم از نظر عملیاتی و هم از نظر زیست محیطی فشار وارد می‌شود. این مورد در بندر شانگهای جایی که جزر و مدها بر عمق آبراه‌ها تأثیر می‌گذارد اتفاق می‌افتد. در طول دو قله جزر و مد روزانه، عمق آب از آبراه تا حد زیادی افزایش خواهد یافت. به عنوان مثال، در پایین جزر و مد، درفت می‌تواند به مسیر شمالی که

11 متر است دسترسی داشته باشد اما در اوج جزر، آن تا نزدیک 13 متر تغییر می‌کند. این امر به این دلیل که تفاوت آشکاری بین نسل سوم و چهارم خطوط کانالینر وجود دارد در نظر گرفته می‌شود.

برای داشتن مزایای مناسب وضعیت جزر و مدی در دهانه یانگ تسه، کسی باید الگوهای رفتاریش را پیش‌بینی کند. در این تحقیق، برای پرداختن به این موضوع، داده‌های جزر و مدی از سه نقطه مشاهده که Ji Gujiao, Chang Xing and Zhong Jun هستند در نظر گرفته می‌شود. این سه نقطه توسط کارشناسان جغرافیای و کنترل‌کننده-های برنامه‌ریز باتجربه کشتی پیشنهاد می‌شود. این نقاط، مشارکت‌کننده‌های زیادی برای تعیین این که آیا کشتی می‌تواند از آبراه با در نظر گرفتن جزر عبور کند یا خیر را در نظر گرفته است.

با توجه به شرایط جزر و مدی، موضوعات پیچیده مسأله برنامه‌ریزی کشتی آبراه در یانگ تسه، جدی‌تر هم می‌شود. به علاوه، در این شرایط، بسیاری از زمان تقریبی ورود (ETA) و زمان تخمین زده خروج (ETDS) می‌تواند به دلیل درست در نظر گرفتن زمان درست جزر و مد، شکست بخورد. که منجر به افزایش حجم کار کنترل برنامه کشتی می‌شود به طوری که مجبور به چک کردن و بهبود برنامه اصلی گزارش شده از شرکت‌های حمل و نقل هستند. این یکی از انگیزه‌های توسعه در DSS است که اپراتورها را برای ارائه برنامه‌های زمانی شدنی با شرایط وابسته به زمان حمایت می‌کند.

### 3. فرموله کردن مسأله

مسأله برنامه‌ریزی زمانی آبراه کشتی (WSSP) مجموعه‌ای از وسایل یا کشتی‌ها  $V = \{1, \dots, v\}$  را در نظر می‌گیرد که به مجموعه کشتی‌های ورودی  $V_1 = \{1, 2, \dots, v_1\}$  و کشتی‌های خروجی  $V_2 = \{1, 2, \dots, v_2\}$  مجموعه مسیرهای آبراه  $w = \{1, \dots, w\}$  و مجموعه بازه‌های زمانی  $H = \{1, \dots, h\}$  تقسیم می‌شوند. از آن جا که این مسأله، مسأله عملیاتی روزانه است، افق زمانی را یک روزه و تغییر سطح جزر و مد را نیز در طی این بازه زمانی در نظر می‌گیریم. علاوه بر این، در WSSP برای هر کشتی  $i \in \{V_1 \cup V_2\}$ ، زمان تخمینی برای ورود به بندر داده شده است، Estimated Time of Departure،  $ETD_i$ ، که  $w_i$  عرض،  $l_i$  طول،  $d_i$  درفت و بسته به

تخصیص آبراه  $k \in w$ ،  $t_{ik}$  زمان عبور می‌باشد. از سویی دیگر، هر آبراه  $k \in w$  بازه زمانی در دسترس  $[s^k, e^k]$ ، عرض  $\Phi_k$ ، عمق آب  $\alpha_k^h$  که به بازه زمانی  $h \in H$  بستگی دارد. تابع هدف WSSP، تعیین برنامه شدنی برای کشتی‌هایی است که مجبور به دسترسی/عزیمت به بندر از طریق آبراه‌ها را دارند به طوری که زمان انتظار کشتی‌ها پس از ورودشان حداقل شود و بنابراین کل زمان مورد نیاز برای کشتی‌ها که از آبراه عبور کنند حداقل شود. در این نقطه باید ترافیک ورودی و خروجی در طول آبراه شبیه‌سازی شود به طوری که محدودیت‌های مدل، برقرار شوند. فرضیات این مسأله به صورت زیر توصیف می‌شود:

(الف) هر کشتی  $i \in \{V_1 \cup V_2\}$  می‌تواند تنها پس از ورودش در زمان  $ETA_i$  برنامه‌ریزی شود و از طریق آبراه تا زمانی که زمان عزیمتش  $ETD_i$  برسد برود.

(ب) هر کشتی  $i \in \{V_1 \cup V_2\}$  می‌تواند تنها به آبراه  $k \in w$  تخصیص داده شود پس از آن که در زمان  $s^k$  در دسترس قرار می‌گیرد و در مدت زمان تا  $e^k$  در دسترس قرار ندارد.

(ج) درفت کشتی  $d_i$ ،  $i \in \{V_1 \cup V_2\}$  باید در عمق‌ترین جای آب از آبراه تخصیص داده شده باشد  $\alpha_k^h$ ،  $k \in w$ ،  $h \in H$ .

(د) زیرمجموعه‌ای از کشتی‌های ورودی و خروجی،  $V' \in \{V_1 \cup V_2\}$ ، می‌توانند مسیر آبراه  $k \in w$  را به صورت همزمان طی کنند اگر جمع عرضشان به علاوه فاصله امن مناسب، بزرگتر از عرض آبراه  $k \in w$  نباشد. یعنی،  $\sum_{i \in V'} w_i \leq \Phi_k$  اگر فاصله اطمینان، نادیده گرفته شود. (در غیراینصورت ممکن است داده‌ها برای تعریف  $w_i$  نامناسب باشند).

مدل کردن این مسأله می‌تواند ایده‌هایی را از مدل کردن مسأله‌های مسیر حمل و نقل بگیرد، منظور مسأله Multi-Depot Vehicle Routing، است؛ (Hartl et al., 2006; Golden et al., 2008) را ببینید. در این مدل ریاضی، تمام معیارهای زمانی، عدد صحیح در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، افق زمانی به بازه‌های زمانی گسسته تقسیم می‌شود. داده‌های ورودی مدل، به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

	مجموعه کشتی $V$	$V$
ورودی	مجموعه کشتی‌های $V_1$	$V_1$
	مجموعه کشتی‌ها خروجی $V_2$	$V_2$
	مجموعه آبراه‌ها	$W$
	مجموعه بازه زمانی	$H$
	زمان مورد نیاز برای کشتی $i \in V$ برای عبور از آبراه $k \in W$	$t_{ik}$
	طول کشتی $i \in V$	$l_i$
	دررفت کشتی $i \in V$	$d_i$
	عرض کشتی $i \in V$	$w_i$
	عمق آب آبراه $k \in W$ در زمان $h \in H$	$\alpha_k^h$
	عرض آبراه $k \in W$	$\phi_k$
	[زودترین، دیرترین] زمان ورود/ عزیمت کشتی $i \in V$	$[ETA_i, ETD_i]$
	[شروع، پایان] بازه زمانی دسترسی به آبراه $k \in W$	$[s^k, e^k]$

گراف‌های زیر برای هر آبراه تعریف می‌شوند. برای هر آبراه، یک جهت ورودی و یک جهت خروجی وجود دارد:

-گراف  $G^k = (v_1^k, A_1^k)$  برای هر  $k \in W$  تولید می‌شود که  $V_1^k = V_1 \cup \{O_1(k), d_1(k)\}$  با  $O_1(k)$  و  $d_1(k)$  که بردارهای اضافی برای نشان دادن آبراه  $k$  و  $A_1^k \subseteq v_1^k \times v_1^k$  هستند.

-گراف  $D^k = (v_2^k, A_2^k)$  برای هر  $k \in W$  تولید می‌شوند که  $V_2^k = V_2 \cup \{O_2(k), d_2(k)\}$  با  $O_2(k)$  و  $d_2(k)$  که بردارهای اضافی برای نشان دادن آبراه  $k$  و  $A_2^k \subseteq v_2^k \times v_2^k$  هستند.

متغیرهای تصمیم که در این فرمول‌بندی ریاضی استفاده می‌شوند به صورت زیر تعریف می‌شوند:

مجموعه 1 است اگر کشتی ز به طور مستقیم بعد از کشتی i در آبراه k برنامه ریزی شده باشد و در غیراینصورت 0.	
مجموعه 1 است اگر کشتی ز به طور مستقیم بعد از کشتی i در آبراه k برنامه ریزی شده باشد و در غیراینصورت 0.	
مجموعه 1 است اگر کشتی i به آبراه k تخصیص داده شده باشد و در غیراینصورت 0.	
مجموعه 1 است اگر کشتی i از طریق آبراه k در بازه زمانی h عبور کند و در غیراینصورت 0.	
زمان شروع، وقتی که کشتی i از آبراه k می گذرد.	
زمان آغاز عملیات آبراه k برای کشتی های ورودی	
زمان خاتمه عملیات آبراه k برای کشتی های ورودی	
زمان آغاز عملیات آبراه k برای کشتی های خروجی	
زمان خاتمه عملیات آبراه k برای کشتی های خروجی	

$$\begin{aligned}
& - x_{ij}^k \in (0, 1), \forall k \in W, \forall (i, j) \in A_1^k, \\
& - z_{ij}^k \in (0, 1), \forall k \in W, \forall (i, j) \in A_2^k, \\
& - y_i^k \in (0, 1), \forall k \in W, \forall i \in V, \text{ set } t \\
& - \delta_i^k \in (0, 1), \forall h \in H, \forall i \in V, \text{ set } t \\
& - \delta_i^k \in \{0, 1\}, \forall h \in H, \forall k \in W, \forall i \in V \\
& - T_i^k \geq 0, \forall k \in W, \forall i \in V, \text{ starting} \\
& - T_{o_1(k)}^k \geq 0, \forall k \in W, \forall i \in V, \text{ startir} \\
& - T_{d_1(k)}^k \geq 0, \forall k \in W, \forall i \in V, \text{ ending} \\
& - T_{o_2(k)}^k \geq 0, \forall k \in W, \forall i \in V, \text{ startir} \\
& - T_{d_2(k)}^k \geq 0, \forall k \in W, \forall i \in V, \text{ ending}
\end{aligned}$$

سیس فرمول بندی مدل ریاضی برای WSSP به صورت زیر می شود:

$$\text{minimize } \sum_{i \in V} \sum_{k \in W} (T_i^k - ETA_i + t_k) \cdot y_i^k \quad (1)$$

$$\sum_{k \in W} y_i^k = 1 \quad \forall i \in V \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V_1 \cup \{d_1(k)\}} x_{o_1(k)j}^k = 1 \quad \forall k \in W \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V_1 \cup \{o_1(k)\}} x_{id_1(k)}^k = 1 \quad \forall k \in W \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V_1 \cup \{d_1(k)\}} x_{ij}^k - \sum_{j \in V_1 \cup \{o_1(k)\}} x_{ji}^k = 0 \quad \forall i \in V_1, \quad \forall k \in W \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V_1 \cup \{d_1(k)\}} x_{ij}^k = y_i^k \quad \forall i \in V_1, \quad \forall k \in W, \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V_2 \cup \{d_2(k)\}} z_{o_2(k)j}^k = 1 \quad \forall k \in W \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V_2 \cup \{o_2(k)\}} z_{id_2(k)}^k = 1 \quad \forall k \in W \quad (8)$$

$$\sum_{j \in V_2 \cup \{d_2(k)\}} z_{ij}^k - \sum_{j \in V_2 \cup \{o_2(k)\}} z_{ji}^k = 0 \quad \forall i \in V_2, \quad \forall k \in W \quad (9)$$

$$\sum_{j \in V_2 \cup \{d_2(k)\}} z_{ij}^k = y_i^k \quad \forall i \in V_2, \quad \forall k \in W \quad (10)$$

$$T_i^k + \sum_{w \in W} t_w^m y_i^w - T_j^k \leq (1 - x_{ij}^k)M \quad \forall i \in V_1, \quad \forall j \in V_1 \cup \{d_1(k)\}, \quad \forall k \in W \quad (11)$$

$$T_{o_1(k)}^k - T_j^k \leq (1 - x_{o_1(k)j}^k)M \quad \forall k \in W, \quad \forall j \in V_1 \quad (12)$$

$$T_i^k + \sum_{w \in W} t_w^m y_i^w - T_j^k \leq (1 - z_{ij}^k)M \quad \forall i \in V_2, \quad \forall j \in V_2 \cup \{d_2(k)\}, \quad \forall k \in W \quad (13)$$

$$T_{o_2(k)}^k - T_j^k \leq (1 - z_{o_2(k)j}^k)M \quad \forall j \in V_2, \quad \forall k \in W \quad (14)$$

$$ETA_i y_i^k \leq T_i^k \quad \forall i \in V, \quad \forall k \in W \quad (15)$$

$$T_i^k \leq ETD_i y_i^k \quad \forall i \in V, \quad \forall k \in W, \quad (16)$$

$$s^k \leq T_{o_1(k)}^k \quad \forall k \in W \quad (17)$$

$$T_{d_1(k)}^k \leq e^k \quad \forall k \in W \quad (18)$$

$$s^k \leq T_{o_2(k)}^k \quad \forall k \in W \quad (19)$$

$$T_{d_2(k)}^k \leq e^k \quad \forall k \in W \quad (20)$$

$$\sum_{k \in W} T_i^k - h \leq (1 - \lambda_i^h) M \quad \forall i \in V, \quad \forall h \in H \quad (21)$$

$$h - \left( \sum_{k \in W} T_i^k + s_i - 1 \right) \leq (1 - \lambda_i^h) M \quad \forall i \in V, \quad \forall h \in H \quad (22)$$

$$\sum_{h \in H} \lambda_i^h = \sum_{k \in W} t_i^k y_i^k \quad \forall i \in V \quad (23)$$

$$\delta_i^{hk} \geq \lambda_i^h + y_i^k - 1 \quad \forall i \in V, \quad \forall h \in H \quad \forall k \in W \quad (24)$$

$$\sum_{k \in W} \delta_i^{hk} = \lambda_i^h \quad \forall i \in V, \quad \forall h \in H \quad (25)$$

$$\delta_i^{hk} (\alpha_k^h - d_i) \geq 0 \quad \forall i \in V, \quad \forall h \in H, \quad \forall k \in W \quad (26)$$

$$\sum_{i \in V} \delta_i^{hk} w_i \leq \phi_k \quad \forall k \in W, \quad \forall h \in H \quad (27)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \forall k \in W, \quad \forall (i, j) \in A_1^k \quad (28)$$

$$z_{ij}^k \in \{0, 1\}, \forall k \in W, \quad \forall (i, j) \in A_2^k \quad (29)$$

$$y_i^k \in \{0, 1\}, \forall i \in V, \quad \forall k \in W, \quad (30)$$

$$\lambda_i^h \in \{0, 1\}, \forall i \in V, \quad \forall h \in H, \quad (31)$$

$$\delta_i^{hk} \in \{0, 1\}, \forall i \in V, \quad \forall h \in H, \quad \forall k \in W, \quad (32)$$

$$T_i^k \geq 0, \forall k \in W, \quad \forall i \in V \cup \{o_1(k), d_1(k), o_2(k), d_2(k)\} \quad (33)$$

تابع هدف (1)، کل زمان مورد نیاز برای کشتی‌ها جهت عبور از آبراه‌ها را حداقل می‌سازد. محدودیت‌های (2)، هر کشتی  $i \in V$  باید به یکی و تنها یکی از آبراه‌ها  $k \in W$  تخصیص داده شود. محدودیت‌های (3) و (4) جریان‌های ورودی و خروجی به آبراه‌ها را برای ورود تعریف می‌کنند. حفاظت جریان برای رئوس باقی‌مانده توسط محدودیت‌ها (5) تأیید می‌شود. محدودیت‌های (6)، ارتباط بین بردارهای  $x_{ij}^k$  و  $y_i^k$  را مشخص می‌کند. محدودیت‌های (7) و (8) برای جریان‌های ورودی و خروجی برای ترک آبراه تعریف می‌شوند. حفاظت از جریان برای رئوس باقی‌مانده در محدودیت (9) نشان داده می‌شود. محدودیت (10) ارتباط بین  $z_{ij}^k$  و  $y_i^k$  را مشخص می‌کند. محدودیت‌های (11) و

(12) الویت هر توالی را برای کشتی‌های ورودی برای هر آبراه  $k \in W$  مشخص می‌کند. محدودیت‌های (13) و (14) الویت‌های هر توالی را برای کشتی‌های خروجی برای هر آبراه  $k \in W$  مشخص می‌کنند. بازه‌های زمانی به صورت محدودیت‌های (15) و (16) تعریف می‌شوند. بازه‌های زمانی آبراه به صورت محدودیت‌های (17)–(20) تعریف می‌شوند. محدودیت‌های (21) و (22)، ارتباط بین متغیرهای  $T_i^k$  و  $\lambda_i^h$  را مشخص می‌کنند. محدودیت‌های (23) ارتباط بین متغیرهای  $\lambda_i^h$  و کل زمان مورد نیاز برای عبور از آبراه  $t_i^k$  را مشخص می‌کند. محدودیت‌های (24) و (25) ارتباط بین  $\lambda_i^h$  و  $\delta_i^{hk}$  را مشخص می‌کند. محدودیت (26) تضمین می‌کند که عمق آب آبراه با رفتن کشتی‌ها در آن سرریز نمی‌شوند. محدودیت (27) تضمین می‌کند که عرض آبراه‌ها کمتر از کشتی‌هایی که به آن وارد می‌شوند نیست. تعریف متغیرهای تعریف شده در محدودیت‌های (28)–(33) نشان داده شده است.  $M$  یک عدد ثابت بسیار بزرگ است.

تابع هدف (1) نشان می‌دهد که این مسأله کوادراتیک است و می‌تواند با تعریف محدودیت‌های اضافی و متغیر اضافی خطی شود به طوری که برای هر  $k \in W, \forall i \in V, b_{ik} \geq 0$ ، اگر  $y_i^k = 1$  باشد مساوی  $T_i^k$  شود و در غیراینصورت 0. محدودیت‌های اضافی به صورت زیر است:

$$b_{ik} \leq y_i^k M \quad \forall i \in V, \forall k \in W \quad (34)$$

$$\sum_{k \in W} b_{ik} = \sum_{k \in W} T_i^k \quad \forall i \in V \quad (35)$$

$M$  یک عدد ثابت بسیار بزرگ است.

بنابراین، فرمول‌بندی MILP برای WSSP به صورت زیر است:

$$\text{minimize } \sum_{i \in V} \sum_{k \in W} (b_{ik} - (ETA_i + t_{ik}) \cdot y_i^k) \quad (36)$$

به طوری که محدودیت‌های (2)–(35) را نیز شامل می‌شود.

قبل از به اتمام رساندن این قسمت، باید به صورت صریح حالت پیچیدگی WSSP را با ارائه تئوری زیر مشخص کنیم:



تئوری 1. WSSP، NP-hard است.

اثبات این مسأله که WSSP، NP-hard است با کاهش آن به یک مسأله‌ای که NP-hard بودن آن قبل نشان داده شده است نشان داده می‌شود. این به وسیلهٔ MultiDepot Vehicle Routing Problem انجام می‌شود به طوری که (Time-Windows (MD-VRPTW, Cordeau et al., 2001) به دلیل این حقیقت که Vehicle Routing Problem with Time-Windows (VRPTW, Lenstra and Rinnooy Kan, 1981; Multi-Depot Multiple Travelling Salesmen Problem (MD-mTSP, Solomon, 1987) و Yang, 1995) با در نظر گرفتن هم وسیلهٔ نقلیه و هم فروشنده، NP-hard هستند. برای سادگی اجازه دهید نسخهٔ محدود از WSSP را در نظر بگیریم که به صورت r-WSSP نامیده می‌شود که ساده‌ترین مورد را تنها برای کشتی‌های ورودی (کشتی‌های خروجی در نظر گرفته نمی‌شوند) در نظر می‌گیرد یعنی  $V_2 = \emptyset$  به طوری که  $V_1 = V$ . به علاوه، بیا باید سناریوهای محدود شده را با حداکثر کردن عبور یک کشتی از طریق آبراه در زمان بدون محدودیت‌های ابعادی به دلیل عرض و درفت در نظر بگیریم.

هنگامی که این ملاحظات در نظر گرفته می‌شود، گام بعدی این نمایش، با متناظر کردن r-WSSP به MD-VRPTW محدود شده به یک وسیله (یعنی MD-mTSP در هر بازهٔ زمانی) انجام شود. در انجام این کار، با کشتی‌ها به عنوان مشتری و با آبراه‌ها شبیه انبارهای تنها با یک وسیله رفتار می‌شود. هر وسیله و مسیر معمولش، مسیر مربوط به آبراه‌ها را در r-WSSP نشان می‌دهد. از این‌رو، ارزیابی کشتی برای عبور از آبراه مانند عزیمت وسیله از آبراه/ انبار و بازدید توسط مشتری/ کشتی است. با استفاده از مثال اسباب‌بازی r-WSSP با دو کشتی  $v_1$  و  $v_2$  و یک آبراه مانند  $w_1$ ، جواب شدنی  $S = (v_1, v_2)$  ترتیب ورود کشتی  $v_1$  و بعدی  $v_2$  را نشان می‌دهد که به یک MD-VRPTW با جواب  $S = (d_1, v_1, v_2, d_1)$  ترجمه می‌شود، به طوری که در این مورد  $d_1$  انبار و  $w_1$  آبراه در r-WSSP را نشان می‌دهد.

همان طور که اشاره شد، چندگراف  $G^k = (V^k, A^k)$  را برای هر انبار/آبراه  $k \in W$  با گرهٔ مبدأ و مقصد داریم به طوری که مجموعه  $V^k$  با کشتی‌ها/ مشتری‌ها و این گره‌ها همان طور که ذکر شد یعنی  $V^k = N \cup$

$\{o(k), d(k)\}$  تشکیل شده‌اند و زمان مسافرت به صورت کمان  $A^k \subseteq V^k \times V^k$  تعریف می‌شوند. به علاوه، با فرض همان محدودیت‌ها به صورت MD-mTSP و MD-VRPTW با در نظر گرفتن تمام مشتری‌ها مجبور به دیدن و در نظر گرفتن هر گره در گراف هستیم که محدودیت‌های زمانی نیز دارد به صورتی که  $r$ -WSSP می‌تواند به MD-mTSP با بازه‌های زمانی یا MD-VRPTW با یک وسیله در هر انبار تبدیل شود. در این زمینه، آسان است تا MD-mTSP با بازه‌های زمانی یا MD-VRPTW جوابی در  $r$ -WSSP  $G^k = (V^k, E^k)$  داشته باشد. بنابراین، چون MD-mTSP و MD-VRPTW، NP-hard هستند آنگاه  $r$ -WSSP نیز NP-hard است. سرانجام، با داشتن محدودیت‌ها عرض و درفت، هم چنین کشتی‌های ایجاد شده در  $r$ -WSSP، می‌توانیم نتیجه بگیریم که WSSP، NP-hard است.

#### 4. مدل‌های حل برای WSSP

استفاده از یک پیشنهاد حل عمومی مانند CPLEX می‌تواند مقدار زمان محاسبات بیشتری برای حل WSSP به همراه داشته باشد. در این حالت، چون WSSP مسألهٔ روزانهٔ دنیای واقعی در بندر شانگهای است، حل مکرر این مورد به دلیل مقتضیات عملیاتی مانند نیاز کشتی‌ها به ورود قبل از ETAشان، تأخیر کشتی‌ها و تغییر بازه‌های زمانی مورد نیاز است. بنابراین، الگوریتم‌های ابتکاری جواب‌های با کیفیت بالا را بر حسب نیاز مقدار تابع هدف در زمان محاسباتی منطقی ارائه می‌کنند. برای پرداختن به این هدف، سه الگوریتم حریصانه را پیشنهاد می‌کنیم که دو تا از آن‌ها براساس سیاست‌های متداول می‌باشند. در این راستا، ارزیابی عملکردشان اجازه می‌دهد تا بستری از بهبود و نوآوری نسبت به تکنیک‌های پیچیده که می‌توانند بر حسب کاهش زمان انتظار و بنابراین بالا بردن کیفیت نهایی خدمت، رقابت و مراقبت‌های زیست محیطی ارائه دهند. از سوی دیگر، رویکرد شبیه‌سازی تبرید مزایایی را نسبت به سایر راه‌حل‌های ابتکاری برای بهره بردن از کیفیت جواب پیشنهاد می‌کند.

#### 4.1 الگوریتم حریمانه

در زمینه WSSP، جواب S به صورت مجموعه‌ای از سه تایی  $(\bar{v}, \bar{w}, \bar{h})$ ،  $\bar{v} \in N, \bar{w} \in W, \bar{h} \in H$  تعریف می‌شود. به طوری که  $\bar{v}$  کشتی اختصاص داده شده به آبراه  $\bar{w}$  را نشان می‌دهد و زمان شروع برای عبور از آبراه در زمان  $\bar{h}$  برنامه‌ریزی می‌شود. به علاوه، S از  $S_{in}$  و  $S_{out}$  تشکیل شده است که  $S = S_{in} \cup S_{out}$  متناظر با کشتی‌ها ورودی و  $S_{out}$  متناظر با کشتی‌های خروجی است.

برای تعیین تخصیص آبراه کشتی و برنامه زمانی، ابتدا دو توالی از ترتیب ورود  $R_{in}$  و  $R_{out}$  برای کشتی‌های ورودی و خروجی را به ترتیب در نظر می‌گیریم. در این راستا، پایانه‌های کشتی‌های کانتینر، قوانین صفی دارند که زمانی که کشتی‌ها وارد می‌شوند استفاده می‌شود. بنابراین،  $R_{in}$  و  $R_{out}$  برای مرتب کردن کشتی‌ها با استفاده از قوانین خاص استفاده می‌شوند. مثال‌هایی که به صورت زیر می‌آیند این مورد را توصیف می‌کنند:

- Random: جایگشتی از دو کشتی ورودی و خروجی، به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. منطق پشت این عمل این است که موقعیت‌هایی را که اپراتورهای پایانه می‌توانند برای ترتیب ورود در آبراه به صورت پویا مشخص کنند بدون استراتژی مشخص می‌شود.

- آن که اول می‌آید، اول خدمت می‌گیرد (FCFS). قانون متداولی است که در پایانه‌های کشتی کانتینر (Cordeau et al., 2005; Douma et al., 2011; Du et al., 2015; Lalla-Ruiz and Voß, 2016; Liang et al., 2009; Lorenzoni et al., 2006) را ببینید) استفاده می‌شود. بر مبنای ایجاد الویت کشتی‌ها بر طبق زمان ورودشان است. یعنی؛ کشتی‌هایی که زودتر وارد می‌شوند برای دسترسی به آبراه‌ها در الویت عبور از یکی از آن‌ها هستند.

- طول کوتاه‌ترین بازه زمانی (STW). کشتی‌ها با در نظر گرفتن بازه زمانی مرتب می‌شوند. در این مورد، کشتی‌ها با کم‌ترین بازه زمانی از اولین آبراه عبور می‌کنند. اساس این استراتژی این است که الویت برای این کشتی‌ها در مسیرهای رفت و آمدشان بازه‌های زمانی کوتاهی برای برآوردن بازه زمانی مسیر می‌باشد.

قوانین قبلی اجازه به دست آوردن جایگشت کشتی‌های کانتینر ورودی و خروجی برای عبور از طریق آبراه‌ها را می‌دهد. سه الگوریتم ابتکاری وجود دارد که می‌تواند با استفاده از این قوانین در این روش‌ها استفاده شود که کشتی‌ها به طوری تکراری به بهترین آبراه ممکن با در نظر گرفتن مقدار تابع هدف تخصیص داده شوند، آبراه انتخاب شده برای هر کشتی، اثر مقدار تابع هدف را حداقل می‌سازد.

#### الگوریتم 1. الگوریتم تخصیص آبراه

```

1:  $S \leftarrow \emptyset$ 
2:  $f_{obj}(S) = 0$ 
3:  $R_{in} \leftarrow$  Create a sorted sequence of incoming vessels according to selected rule
4:  $R_{out} \leftarrow$  Create a sorted sequence of outgoing vessels according to selected rule
5:  $count_{in} \leftarrow 1$ 
6:  $count_{out} \leftarrow 1$ 
7: while ( $count_{in} + count_{out} < |V|$ ) do
8:   if ( $count_{in} \leq |V_1|$ ) then
9:      $v_{in} \leftarrow$  Select vessel  $R_{in}(count_{in})$ 
10:     $w_{in} \leftarrow$  Select waterway and time  $h_{in}$  for vessel  $v_{in}$  that allows the minimum impact on  $f_{obj}(S)$ 
11:    Assign  $v_{in}$  to  $w_{in}$  in  $S$ 
12:    if (incoming vessel is assigned) then
13:       $count_{in} \leftarrow count_{in} + 1$ 
14:    else
15:      Return -1
16:    end if
17:  end if
18:  if ( $count_{out} \leq |V_2|$ ) then
19:     $v_{out} \leftarrow$  Select vessel  $R_{out}(count_{out})$ 
20:     $w_{out} \leftarrow$  Select waterway and time  $h_{out}$  for vessel  $v_{out}$  that allows the minimum impact on  $f_{obj}(S)$ 
21:    Assign  $v_{out}$  to  $w_{out}$  in  $S$ 
22:    if (outgoing vessel is assigned) then
23:       $count_{out} \leftarrow count_{out} + 1$ 
24:    else
25:      Return -1
26:    end if
27:  end if
28: end while
29: Return  $S$ 

```

همان طور که در الگوریتم 1 نشان داده شده است، جواب آغازین  $S$  خالی است (خط 1). مقدار تابع هدف تخصیص داده شده  $f_{obj}$  صفر گذاشته می‌شود (خط 2). یکبار این مورد، بسته به قانون داده شده، گشتاور کشتی‌های وارد شده و خارج شده  $R_{in}$  و  $R_{out}$  به ترتیب، انجام می‌شود (خطوط 3-4). به عنوان مثال، با استفاده از قانون FCFS، اولین عنصر کشتی‌های ورودی  $R_{in}(1)$ ، اولین کشتی وارد شده به آبراه ورودی است که به عنوان اولین کشتی ورودی برنامه‌ریزی می‌شود. با جایگشت تعریف شده، کشتی‌های ورودی و خروجی در یک زمان به بهترین آبراه ممکن به صورت فهرست مرتب شده (خطوط 8-17؛ خطوط 18-27) تخصیص داده می‌شوند. بهترین آبراه ممکن، برطبق اثر جواب تابع هدف تعیین می‌شود (خط 10 برای کشتی‌های ورودی، خط 20 برای کشتی‌های خروجی). هر

کشتی به آبراه تخصیص داده می‌شود که مقدار تابع هدف جواب را تا آن لحظه افزایش می‌دهد. لازم به ذکر است که برای تخصیص هر کشتی به آبراه محدودیت‌های ابعادی (درفت، عرض) مانند محدودیت زمانی باید برقرار شوند (خط 12 و خط 22). در غیراینصورت جواب نشدنی (خط 15؛ خط 25) در نظر گرفته می‌شود. بسته به قوانین استفاده شده در الگوریتم 1، الگوریتم‌های ابتکاری متفاوتی می‌توانند توسعه یابند. در این راستا، نام‌های الگوریتم‌های به کار برده شده در این کار از نام قوانین یعنی Random Greedy (Random-G), First-Come First-Served Greedy (FCFS-G) و Shortest Time Windows length Greedy (STW-G) گرفته شده است.

## 4.2 شبیه‌سازی تبرید

شبیه‌سازی تبرید (SA, Kirkpatrick et al., 1983) به الگوریتم فراابتکاری با جستجوی محلی مشهور است که با بسط جواب محلی اولیه با حرکت به سوی جواب‌های داخلی برحسب مقدار تابع هدف کار می‌کند (Voß, 2001). این مورد به طور موفقیت آمیزی در کنار مسائل حمل و نقل دریایی (Bierwirth and Meisel, 2015)؛ در مثال‌های مسیریابی کشتی‌ها از (Kosmas and Vlachos 2012) به کار برده شد، (Dowsland et al. 2007) SA را به عنوان روش حل برای این مسأله توسعه دادند. علاوه براین، انتخاب این رویکرد هم چنین با میل به اجتناب از افتادن در بهینگی محلی با مجاز دانستن حرکت به بدترین حالت به عنوان داشتن عملکرد محاسباتی سریع (همان طور که در بخش 5 برجسته می‌شود) توجیه می‌شود. در الگوریتم پایه SA نامزد حرکت به صورت تصادفی انتخاب می‌شود؛ اگر منجر به جواب بهینه نسبت به یک جریان شود، حرکت پذیرفته می‌شود. در صورتی که حرکت بهبودی در مقدار تابع هدف ایجاد نکند، می‌تواند با توجه به احتمال پذیرفته شود و این بستگی به بدتر شدن  $\Delta$  مقدار تابع هدف دارد. احتمال پذیرش به صورت  $e^{-\Delta/T}$  با استفاده از درجه حرارت  $T$  به عنوان پارامتر کنترل محاسبه می‌شود. برای حل این مسأله، رویکرد SA را پیشنهاد می‌کنیم که از ابتکارات مختلف در بخش قبلی ارائه شد استفاده می‌کند. در الگوریتم 2، شبه کد SA نشان داده شده است. جواب اولیه، (در خط 1) با استفاده از یکی از الگوریتم‌های ابتکاری

پیشنهاد شده (یعنی Random-G, FCFS-G, and STW-G) تولید می‌شود. همسایگی جواب،  $S'$ ، به صورت تصادفی با استفاده از حرکت معاوضه‌ای (یعنی دو کشتی ورودی و خروجی با تبادل مواضع خود در توالی) تولید می‌شود. برای هر دم،  $R$  تکرار اجرای می‌شود. پس از اجرای تکرارهای  $R$ ،  $T \leftarrow T \cdot \gamma$  کاهش می‌یابد، که  $0 < \gamma < 1$  است. 1. به علاوه، تعداد تکرارهای  $R$  در هر درجه حرارت  $R \leftarrow R \cdot \beta$  به روز رسانی می‌شود که  $0 < \beta < 1$ . الگوریتم SA کامل، تا زمانی که درجه حرارت به آستانه معین  $T_{min}$  برسد اجرا می‌شود.

الگوریتم 2. الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده برای WSSP
<p><b>Require:</b> <math>T, T_{min}, R, \beta, \gamma</math></p> <p>1: <math>S \leftarrow</math> generate a initial solution using heuristic (see Section 4.1)</p> <p>2: <b>while</b> (<math>T_{min} &lt; T</math>) <b>do</b></p> <p>3: <b>for</b> (<math>t \leftarrow 1</math> to <math>R</math>) <b>do</b></p> <p>4:   Generate a solution <math>S' \in N(S)</math></p> <p>5:   Calculate <math>\Delta_{SS'} = f_{obj}(S') - f_{obj}(S)</math></p> <p>6:   <b>if</b> (<math>\Delta_{SS'} \leq 0</math>) <b>then</b></p> <p>7:     <math>S \leftarrow S'</math></p> <p>8:   <b>else</b></p> <p>9:     <math>S \leftarrow S'</math> with probability <math>e^{-\Delta/T}</math></p> <p>10:   <b>end if</b></p> <p>11: <b>end for</b></p> <p>12: <math>T = T \cdot \gamma</math></p> <p>13: <math>R = R \cdot \beta</math></p> <p>14: <b>end while</b></p> <p>15: Return <math>S</math></p>

ساختار همسایگی با دو گزینه: ساختار همسایگی استفاده شده در این کار برمبنای حرکت از دو گزینه است. به این معنا که جواب داده شده،  $S$ ، همسایگی با دو گزینه،  $N(S)$ ، از همسایگی  $N(S_{in})$  که با معاوضه دو کشتی ورودی به دست می‌آید تشکیل شده است و  $N(S_{out})$  با معاوضه دو کشتی خروجی به همان صورت یعنی

$$N(S) = N(S_{in}) \cup N(S_{out})$$

$$N(S_{in}) = \{S_{in} \circ (i,j) : 1 \leq i,j \leq V_{in}, i \neq j\} \text{ and } N(S_{out}) = \{S_{out} \circ (i,j) : 1 \leq i,j \leq V_{in}, i \neq j\}.$$

## 5. آزمایش‌های محاسباتی

این بخش به ارائه آزمایشات تجربی جهت اعتبارسنجی مدل‌مان و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های ابتکاری پیشنهاد شده می‌پردازد. در انجام این کار، معیار مناسب، پیشنهاد می‌شود. مدل ریاضی در CPLEX با زمان 3600 ثانیه اجرا می‌شود. رویکردهای حل و مدل ریاضی، در کامپیوتری که با اینتل i7 3.5 GHz و رم GB16 تجهیز شده است انجام

می‌شود. برای شبیه‌سازی تبرید، آزمایش‌های اولیه با پارامترهای زیر مشخص می‌شوند:

$$T = 100, T_{min} = 1, R = 10, \gamma = 0.9, \text{ and } \beta = 0.9.$$

### 5.1 نسل مسأله

به منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهاد شده (اجرا شده در CPLEX) و الگوریتم‌های ابتکاری پیشنهاد شده در این کار، معیار مناسب پیشنهاد داده می‌شود. مثال این مسأله، برمبنای داده‌های ارائه شده توسط بندر شانگهای (چین) است. در این راستا، در کنار اطلاعات جغرافیایی، برای ایجاد معیار مناسب، به داده‌های ابتکاری مرتبط با ترافیک حمل و نقل و معیارهای جزر و مد در دهانه که توسط پایانه Waigaoqiao ارائه می‌شود دسترسی داریم. علاوه بر این، چون این مسأله می‌تواند به سناریوهای دیگری هم ترجمه شود، مثال‌های مسأله ایجاد شده در اندازه‌های مختلف را داریم. از این رو، بر طبق اطلاعات ارائه شده، پارامترهایی را برای هر مورد بر طبق حداقل و حداکثر درفت، طول و عرض کشتی در نظر می‌گیریم و به صورت تصادفی اطلاعات کشتی‌ها را با استفاده از توزیع یکنواخت گسسته ایجاد می‌کنیم. به علاوه، همان طور که در بالا نشان داده شد، باید داده‌ها را از حداقل تا حداکثر سطوح جزر و مد آبراه‌ها، ارائه شده توسط مدیران پایانه در نظر بگیریم. در ادامه، مجموعه‌ای از نمونه‌های تولید شده برای ارزیابی WSSP فهرست شده‌اند.

- $|V| = 30$  vessels ( $|V_1| = 15; |V_2| = 15$ ) within  $|W| = 2$  waterways
- $|V| = 30$  vessels ( $|V_1| = 20; |V_2| = 20$ ) within  $|W| = 4$  waterways
- $|V| = 40$  vessels ( $|V_1| = 20; |V_2| = 20$ ) within  $|W| = 2$  waterways
- $|V| = 40$  vessels ( $|V_1| = 20; |V_2| = 20$ ) within  $|W| = 4$  waterways
- $|V| = 50$  vessels ( $|V_1| = 25; |V_2| = 25$ ) within  $|W| = 2$  waterways
- $|V| = 50$  vessels ( $|V_1| = 25; |V_2| = 25$ ) within  $|W| = 4$  waterways
- $|V| = 60$  vessels ( $|V_1| = 30; |V_2| = 30$ ) within  $|W| = 2$  waterways
- $|V| = 60$  vessels ( $|V_1| = 30; |V_2| = 30$ ) within  $|W| = 4$  waterways

پنج مسأله نمونه برای هر مجموعه ایجاد شده است، بنابراین، به طور کلی 40 مسأله نمونه داریم. چون این یک

مسأله روزانه است، مجموعه‌ای از افق برنامه‌ریزی یک روز تقسیم بر 48 بازه زمانی را داریم.

سناریوی یانگ تسه - ملاحظات اضافی: به علاوه، اگر چه مدل ریاضی اضافی می‌تواند در این سناریوها استفاده شود که اجازه می‌دهد بیش از دو کشتی از آبراه در همان زمان عبور کنند، در این کار ما سناریوی خاصی را در دهانه یانگ تسه در نظر گرفتیم جایی که -مطابق با شرکت‌کنندگان- تعدادی از فرضیات با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایشان مجبورند زمانی که مجموعه مثال‌ها ایجاد شوند استفاده شوند:

1. کشتی  $i \in V$  با  $l_i > 275$  نمی‌تواند از طریق آبراه‌ها به بازه‌های زمانی مربوط به شب  $[t, t']$  به بندر دسترسی داشته باشد.

2. کشتی  $i \in V$  با  $l_i > 150$  درفتش تا 1 متر برای امن بودن افزایش دارد.

3. حداکثر دو کشتی می‌توانند از طریق آبراه در همان بازه زمانی عبور کنند.

باید توجه شود که ملاحظات به تصویر کشیده شده در نقاط 1 و 2 زمانی که مثال‌هایی از مسأله ایجاد می‌شود توجه شوند. با این وجود، برای در نظر گرفتن آنچه که در نقطه 3 گفته شد، باید محدودیت‌های زیر را برای مدل ریاضی در نظر بگیریم:

$$\sum_{i \in V_1} \delta_i^{hk} \leq 1 \quad \forall k \in W, \quad \forall h \in H \quad (37)$$

$$\sum_{i \in V_2} \delta_i^{hk} \leq 1 \quad \forall k \in W, \quad \forall h \in H \quad (38)$$

محدودیت‌های 37 و 38 اجازه نمی‌دهند که بیش از یک کشتی، از طریق آبراه در همان بازه زمانی و از نوع کشتی ورودی یا خروجی باشد.

## 5.2 مقایسه بین الگوریتم‌های ابتکاری

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های ابتکاری پیشنهاد شده در این کار (Random-G, FCFS-G, and STW-G)، مقایسه رفتارشان برحسب مقدار تابع هدف در این بخش ارائه شده است.

جدول 1 و 2 این نتایج را به وسیله الگوریتم‌های حریمانه برای مجموعه‌ای از نمونه‌های پیشنهاد شده در این کار تشریح می‌کند. این الگوریتم‌ها 10 بار اجرا شدند. برای Random-G، بدترین (Max)، میانگین (Avg) و بهترین



(Min) مقادیر تابع هدف، گزارش شده است. باید توجه شود که FCFS-G و STW-G قطعی هستند از این رو، موقعیت مشابهی را بدون توجه به تعداد تکرارها ایجاد کردند. از آن جا که زمان محاسباتی مورد نیاز برای الگوریتم‌ها خیلی کم است (حدود 0.001 ثانیه) آن‌ها در جدول‌ها گنجانده نشده‌اند.

در این جدول‌ها، می‌توان FCFS-G و STW-G را بررسی نمود که نمی‌توانند جواب در برخی از موارد ارائه کنند. به عبارت دیگر، Random-G نمی‌تواند جوابی برای تعدادی از موارد ارائه دهد، از این رو، مزیتی برای داشتن زمان اجرای کوتاه مدت دارد، Random-G اجرا می‌شود تا این که جواب به دست آید. علاوه بر این، مواردی که FCFS-G و STW-G جوابی متعلق به این مجموعه از نمونه‌مدل‌ها ارائه می‌کنند که برای دو آبراه قابل دستیابی است. این مورد، حالتی را به وجود می‌آورد که چندین محدودیت باید در نظر گرفته شوند مانند زمان کوتاه بازه‌های زمانی، درفت و عرض کشتی، زمان انتقال کشتی و تعداد زیاد کشتی‌ها. به علاوه، این نتایج نشان می‌دهد که برای استراتژی‌های متداول به صورتی که در این کار پیشنهاد شده است؛ نمونه مشکل می‌شود زمانی که آبراه کمی برحسب ارائه جواب‌های شدنی وجود دارد. در پرتو این نتایج، استفاده از Random-G در سناریوهای عملی به جای استفاده از FCFS-G و STW-G توصیه می‌شود به طوری که جواب شدنی در تمام موارد ارائه دهد. در این حالت، همان طور که در تعدادی از کارها نشان داده شد ( Cordeau et al., 2005; Liang et al., 2009; Lorenzoni et al., 2006; Douma et al., 2011; Kontovas and Psaraftis, 2011 را ببینید) سیاست FCFS به صورت متداول در پایانه‌های کانتینر زمانی که برنامه‌ریزی کشتی‌ها انجام می‌شود صورت می‌گیرد. در این مورد، استفاده از این استراتژی‌ها می‌تواند زمانی که تعدادی از این موارد را به دلیل این که آن‌ها قادر به ایجاد جواب شدنی نیستند در نظر می‌گیریم موفقیت آمیز باشد. بنابراین، استفاده‌شان می‌تواند برای مدیران پایانه‌ها یا DSS با استفاده از قوانین‌شان مورد نیاز باشد تا بازه‌های زمانی نرم را در نظر بگیرند یا تعداد کشتی‌هایی که در روز آینده برای گذشتن از طریق آبراه جهت دسترسی به پایانه مورد نیاز می‌باشد.

### 5.3 برنامه-ریزی ریاضی و نتایج الگوریتم‌های ابتکاری و بحث

در این بخش، مقایسه‌ای بین مدل ریاضی اجرا شده MILP در CPLEX و پیشنهاد شده انجام می‌دهیم. رویکرد SA برای مقاردهی اولیه الگوریتم پیشنهاد شده در این کار استفاده می‌شود:

1. الگوریتم شبیه-سازی تبرید با استفاده از Random-G به عنوان روشی برای مقاردهی اولیه (SARG)
2. الگوریتم شبیه-سازی تبرید با استفاده از FCFS-G به عنوان روشی برای مقاردهی اولیه (SAFCFS-G)
3. الگوریتم شبیه-سازی تبرید با استفاده از STW-G به عنوان روشی برای مقاردهی اولیه (SASTW-G)

به علاوه، مقایسه بین رویکردهای SA و قوانین صف متداول برای برنامه‌ریزی به منظور ارزیابی سودهای استفاده شده SA نیز ارائه می‌شود.

جدول ۱. مقایسه بین الگوریتم‌های ابتکاری برای WSSP برای نمایش مجموعه‌ای از نمونه‌ها با دو آبراه

Instances					Random-G			FCFS-G	STW-G
V	W	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	id	Min	Avg	Max		
30	2	15	15	1	169	186.40	210	151	189
				2	97	108.70	127	88	106
40	2	20	20	1	280	307.90	344	-	-
				2	177	189.60	205	184	192
50	2	25	25	1	183	213.40	222	-	-
				2	135	154.20	167	155	150
60	2	30	30	1	245	273.70	319	252	318
				2	484	546.40	580	-	-

جدول ۲. مقایسه بین الگوریتم‌های ابتکاری برای WSSP برای نمایش مجموعه‌ای از نمونه‌ها با چهار آبراه

Instances					Random-G			FCFS-G	STW-G
V	W	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	id	Min	Avg	Max		
30	4	15	15	1	41	42.60	44	44	43
				2	85	97.10	117	87	106
40	4	20	20	1	113	119.10	126	113	116
				2	108	109.70	114	104	114
50	4	25	25	1	110	116.20	123	116	115
				2	85	90.00	96	96	85
60	4	30	30	1	93	105.40	121	93	120
				2	134	151.50	171	139	148

جدول 3-6 نتایج محاسبات ارائه شده توسط CPLEX را بر حسب کران بالا (UB)، کران پایین (LB)، خطای نسبی (Gap) و زمان محاسباتی (زمان (S)) ارائه می‌کند. برای رویکردهای SA، مقدار تابع هدف (Obj)، خطای نسبی و متوسط زمان محاسباتی (زمان (S)) گزارش می‌شوند.

نتایج نشان داده شده در جدول (3)، نشان می‌دهد که برای نمونه  $4 = |W|$  CPLEX،  $S_{ARG}$  و  $S_{ASTW-G}$  عملکرد مشابهی را بر حسب مقدار تابع هدف نشان می‌دهند. در این راستا، SA استفاده شده در FCFS-G به عنوان روش مقدار دهی اولیه، برای رسیدن به جواب در دسترس نیست. علاوه بر این، در این نمونه‌ها که CPLEX قادر به حل آن‌ها به صورت بهینه (4-304 و 5-304) است، SA به زمان محاسباتی کمتری بدون توجه به روش مقداردهی اولیه نیاز دارد. از جدول 4-6، می‌توان به این مورد اشاره کرد که CPLEX جواب بهینه‌ای برای نمونه‌ها، به طور خاص، مجموعه‌ای از نمونه‌ها با در نظر گرفتن 60 کشتی ارائه نمی‌کند. این مورد هم چنین اغلب کمتر برای  $S_{FCFS}$  اتفاق می‌افتد. به علاوه، باید توجه شود که  $S_{ARG}$  و  $S_{ASTW-G}$  عملکرد مشابهی را نشان می‌دهند. در این حالت،  $S_{ASTW-G}$  عملکرد کمی بهتری نسبت به متوسط مقدار تابع هدف نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن زمان محاسباتی، الگوریتم SA، به طور متوسط، کمتر از 0.35 ثانیه برای ارائه جواب بهینه نیاز دارد.  $S_{ARG}$  و  $S_{ASTW-G}$  (جدول 3-6 را ببینید) عملکرد مشابهی را نشان می‌دهد. از این رو، به منظور ارزیابی بیشتر در عمق هر دو روش با استفاده از بهترین، متوسط و بدترین مقدار با 10 بار اجرا، جدول‌های 7 و 8 جزئیات محاسبات را نشان می‌دهند. علاوه بر این، استراتژی‌های متداول صف مانند  $FCFS-G$  (GapFCFS) و  $STW-G$  (GapSTW) نسبت به مقادیر میانگین توسط  $S_{ARG}$  و  $S_{ASTW}$  محاسبه می‌شوند. منطق پشت این مورد، مقایسه عادلانه با توجه به  $FCFS-G$  و  $STW-G$  است که با توجه به قطعی بودن این الگوریتم‌ها و در نتیجه، همان مقدار تابع هدف به طور متوسط، ارائه می‌شود.

علاوه بر این،  $S_{ARG}$  و  $S_{ASTW}$  عملکرد مشابهی را نسبت به میانگین، بر حسب بهترین جواب ارائه شده برای کوچکترین نمونه (جدول 7 را ببینید) نشان می‌دهند. باید نشان دهد که زمانی که اندازه سناریوها افزایش می‌یابد، از نظر کیفیت جواب‌های ارائه شده توسط  $S_{ASTW}$  کمی بهتر می‌شود (جدول 8 را ببینید). علاوه بر این،  $S_{ASTW}$  استواری بهتری را به وسیله مقادیر بدتر و متوسط تابع هدف نشان می‌دهد. این ویژگی مربوط به زمانی است که این

الگوریتم باید به طوری مشترک با دیگر الگوریتم‌ها به طور مشترک اجرا شود. به علاوه،  $SA_{STW}$  رقابتی‌تر از نقطه نظر شرکت‌های حمل و نقل است و کشتی‌ها باید بیشتر منتظر باشند و این اثر منفی‌تر بر روی سودهای اقتصادی‌شان دارد چون آن‌ها هزینه‌های سوخت بیشتری با ساطع کردن نامطلوب گازهای گلخانه‌ای و هم چنین تأخیر در مسیرهای تجاری‌شان برای گذشتن از سایر پایانه‌ها را دارند. سرانجام، از نقطه نظر اپراتور، سودهای استفاده از رویکردهای  $SA$  پیشنهاد شده به جای استراتژی‌های حریصانه بر مبنای سیاست‌های صف؛ اثرات کلی مثبتی بر حسب مجاز دانستن عملیات مداوم‌تر، کاهش ساطع شدن گازهای گلخانه‌ای در ذخیره سوخت کشتی‌ها و در نتیجه زمان انتظار کوتاه‌تر و جایز دانستن بیشتر رقابت‌های فزاینده و مؤثر چندین کشتی دارد.

علاوه بر این، زمانی که  $SA$  با در نظر گرفتن الگوریتم‌های ابتکاری با استفاده از سیاست‌های سنتی مطالعه می‌شود، به طور خاص با دانستن سیاست  $FCFS$ ،  $SA$  قادر است تا در بهترین حالت جواب  $26.86$  درصد را نسبت به  $FCFS-G$  و  $60$  درصد بهتر از  $STW-G$  با زمان  $1$  ثانیه ارائه کند. این درصد بهبودها زمان انتظار غیرضروری را با دربرگرفتن هزینه‌های سوخت، گازهای گلخانه‌ای و زمان معمول مسیر تجاری و ... در نظر می‌گیرند. در این زمینه، به وسیله کارهای مرتبط، اگر ورود و خروج به پایانه‌ها را از طریق آبراه به عنوان قسمتی از مسیر در نظر بگیریم، کاهش زمان انتظار، همان طور که توسط (Fagerholt et al. 2010) نشان داده شده، پتانسیل کاهش مصرف سوخت و بنابراین ساطع شدن گازهای گلخانه‌ای را با خود به همراه خواهد داشت.

جدول 3. مقایسه بین CPLEX،  $SA_{RG}$  (Random-G)،  $SA_{FCFS-G}$  (FCFS-G) و  $SA_{STW-G}$  (STW-G) برای نمونه‌های مسأله با 30 کشتی

Instances				CPLEX				$SA_{RG}$			$SA_{FCFS-G}$			$SA_{STW-G}$			
$ V $	$ W $	$ V_1 $	$ V_2 $	id	UB	LB	Gap (%)	Time (s)	Obj.	Gap (%)	Time (s)	Obj.	Gap (%)	Time (s)	Obj.	Gap (%)	Time (s)
30	2	15	15	1	205	91.89	55.17	3600	139	33.89	0.06	139	33.89	0.06	139	33.89	0.06
				2	157	57.12	63.62	3600	85	32.80	0.05	85	32.80	0.05	85	32.80	0.05
				3	128	71.00	44.53	3600	91	21.98	0.05	91	21.98	0.05	91	21.98	0.05
				4	196	66.00	66.33	3600	120	45.00	0.05	120	45.00	0.05	120	45.00	0.05
				5	46	41.00	10.87	3600	46	10.87	0.04	46	10.87	0.04	46	10.87	0.04
30	4	15	15	1	41	33.73	17.73	3600	41	17.73	0.08	-	-	0.08	41	17.73	0.08
				2	78	74.56	4.41	3600	78	4.41	0.13	78	4.41	0.13	78	4.41	0.13
				3	42	38.07	9.36	3600	42	9.36	0.13	42	9.36	0.12	42	9.36	0.13
				4	76	76.00	0.00	759.57	76	0.00	0.11	76	0.00	0.11	76	0.00	0.11
				5	67	67.00	0.00	504.9	67	0.00	0.13	67	0.00	0.14	67	0.00	0.12
									78.50	17.60	0.08	-	-	0.08	78.50	17.60	0.08

جدول 4. مقایسه بین CPLEX، SA<sub>RG</sub> (Random-G)، SA<sub>FCFS-G</sub> (FCFS-G) و SA<sub>STW-G</sub> (STW-G) برای نمونه‌های مسئله با 40 کشتی

Instance				CPLEX				SA <sub>RG</sub>			SA <sub>FCFS-G</sub>			SA <sub>STW-G</sub>			
V	W	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	id	UB	LB	Gap (%)	Time (s)	Obj.	Gap (%)	Time (s)	Obj.	Gap (%)	Time (s)	Obj.	Gap (%)	Time (s)
40	2	20	20	1	-	108.30	-	3600	227	52.29	0.09	-	-	0.49	225	51.87	0.08
				2	237	88.21	62.78	3600	149	40.80	0.08	149	40.80	0.07	149	40.80	0.07
				3	-	97.00	-	3600	199	51.26	0.07	199	51.26	0.07	199	51.26	0.06
				4	131	58.00	55.73	3600	82	29.27	0.08	82	29.27	0.08	82	29.27	0.08
				5	161	46.00	71.43	3600	81	43.21	0.10	81	43.21	0.10	81	43.21	0.10
40	4	20	20	1	117	95.44	18.43	3600	107	10.80	0.10	107	10.80	0.10	107	10.80	0.10
				2	213	98.00	53.99	3600	101	2.97	0.10	101	2.97	0.10	101	2.97	0.11
				3	75	42.00	44.00	3600	70	40.00	0.13	70	40.00	0.13	70	40.00	0.13
				4	197	61.02	69.03	3600	80	23.73	0.10	80	23.73	0.10	80	23.73	0.10
				5	298	168.00	43.62	3600	193	12.95	0.13	193	12.95	0.16	193	12.95	0.16
									128.90	30.73	0.10	-	-	0.14	128.70	30.69	0.10

جدول 5. مقایسه بین CPLEX، SA<sub>RG</sub> (Random-G)، SA<sub>FCFS-G</sub> (FCFS-G) و SA<sub>STW-G</sub> (STW-G) برای نمونه‌های مسئله با 50 کشتی

Instances				CPLEX				SA <sub>RG</sub>			SA <sub>FCFS-G</sub>			SA <sub>STW-G</sub>			
V	W	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	id	UB	LB	Gap (%)	Time (s)	Obj.	Gap (%)	Time (s)	Obj.	Gap (%)	Time (s)	Obj.	Gap (%)	Time (s)
50	2	25	25	1	179	110.54	38.25	3600	172	35.73	0.07	172	35.73	0.08	172	35.73	0.08
				2	113	72.00	36.28	3600	108	33.33	0.11	108	33.33	0.11	108	33.33	0.11
				3	-	104.69	-	3600	242	56.74	0.06	242	56.74	0.07	241	56.56	0.07
				4	-	120.00	-	3600	324	62.96	0.07	324	62.96	0.08	325	63.08	0.08
				5	105	69.02	34.26	3600	100	30.98	0.12	100	30.98	0.12	100	30.98	0.13
50	4	25	25	1	106	82.00	22.64	3600	100	18.00	0.16	100	18.00	0.17	100	18.00	0.16
				2	258	74.00	71.32	3600	82	9.76	0.10	82	9.76	0.10	82	9.76	0.10
				3	117	98.00	16.34	3600	107	8.41	0.16	107	8.41	0.17	107	8.41	0.17
				4	241	70.00	70.95	3600	82	14.63	0.17	82	14.63	0.17	82	14.63	0.19
				5	79	62.00	21.52	3600	78	20.51	0.26	78	20.51	0.25	78	20.51	0.25
									139.50	29.11	0.13	139.50	29.11	0.13	139.50	29.10	0.13

به علاوه (Moon and Woo 2014) نشان دادند که بهبود کارایی در عملیات بندر، کارایی عملیاتی کشتی‌ها را به کاهش هزینه‌های عملیاتی و ساطع شدن گاز CO<sub>2</sub> خواهیم داشت. مطابق فوق، بنابراین، منافع استفاده از SA نه تنها کاهش هزینه‌ها را با خود به همراه دارد هم چنین رضایت شرکت‌های حمل و نقل را نیز با خود به همراه خواهد داشت. در شکل 4، مزایای SA<sub>STW-G</sub> نسبت به SA<sub>RG</sub> با مقدار تابع هدف نشان داده می‌شود. همان طور که می‌توان بررسی کرد، در تمام موارد SA<sub>STW-G</sub> جواب‌های با حداقل همان کیفیت بر روی میانگین نسبت به SA<sub>RG</sub> ارائه می‌شود. این مورد بینشی فراهم می‌کند که STW-G همیشه نمی‌تواند جواب خودش را نسبت به Random-G ارائه کند، در رویکرد SA در این کار، STW-G قادر است تا عملکرد خیلی رقابتی را نسبت به بهترین، متوسط و بدترین جواب داشته باشد. از سوی دیگر، SA<sub>FCFS-G</sub> در شکل نشان داده نشده است، چون جواب شدنی در تعدادی از موارد ارائه

نمی‌کند، که نشان می‌دهد تحت این استراتژی، تعدادش از کشتی‌ها قادر به برنامه‌ریزی در افق زمانی 1 روزه نیستند. این ویژگی همان طور که قبلاً نشان داده شد مهم است، این قانون به صورت مشترک در تعدادی از پایانه‌های کانتینر استفاده می‌شود.

جدول 6. مقایسه بین CPLEX، با Random-G ( $SA_{RG}$ )، SA، FCFS-G ( $SA_{FCFS-G}$ ) و SA- STW-  $G(SA_{STW-G})$  برای نمونه‌های مسأله با 60 کشتی

Instances				CPLEX				$SA_{RG}$			$SA_{FCFS-G}$			$SA_{STW-G}$			
V	W	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	id	UB	LB	Gap (%)	Time (s)	Obj.	Gap (%)	Time (s)	Obj.	Gap (%)	Time (s)	Obj.	Gap (%)	Time (s)
60	2	30	30	1	-	78	-	3600	239	67.36	0.10	-	-	0.42	237	67.09	0.10
				2	-	139.7	-	3600	199	29.80	0.10	199	29.80	0.09	198	29.44	0.10
				3	-	90.7	-	3600	520	82.56	0.10	-	-	0.66	443	79.53	0.10
				4	-	92.27	-	3600	326	71.70	0.10	-	-	0.87	290	68.18	0.12
				5	-	201.06	-	3600	266	24.41	0.10	262	23.26	0.11	262	23.26	0.11
60	4	30	30	1	180	67	62.78	3600	75	10.67	0.34	75	10.67	0.33	75	10.67	0.33
				2	-	70	-	3600	115	39.13	0.32	115	39.13	0.32	115	39.13	0.32
				3	86	73	15.12	3600	83	12.05	0.19	83	12.05	0.19	83	12.05	0.20
				4	-	141	141.00	3600	187	24.60	0.24	187	24.60	0.23	188	25.00	0.24
				5	-	83	-	3600	106	21.70	0.25	106	21.70	0.24	106	21.70	0.25
									211.60	38.40	0.18	-	-	0.35	199.70	37.60	0.19

## 6. نتیجه‌گیری و تحقیق بیشتر

در این کار، مسأله برنامه‌ریزی زمانی آبراه کشتی (WSSP) را با هدف برنامه‌ریزی رفت و آمد کشتی در طول آبراه ارائه می‌کنیم. در پرتو تجزیه و تحلیل ارائه شده، در می‌یابیم که حل این مسأله می‌تواند راه حل برنده-برنده منجر شود که زمان انتظار کشتی‌ها را کاهش دهد و منجر به صرفه‌جویی اقتصادی، عملیاتی و زیست محیطی هم برای شرکت‌های پایانه‌های کانتینر و هم برای شرکت‌های حمل و نقل شود. به منظور حل این مسأله، فرمول‌بندی ریاضی MILP را توسعه می‌دهیم و آن را به منظور پیشنهادات کلی با برنامه CPLEX حل می‌نماییم. به علاوه، چون این فرمول‌بندی برای جواب شدنی با محدودیت زمانی منطقی برای تعدادی از سناریوها در دسترس نیست، الگوریتم ابتکاری حریمانه برمبنای استفاده از قوانین صف مانند الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA) پیشنهاد می‌شود. به منظور ارزیابی عملکردشان، یک مجموعه معیار برای مسائل واقعی از دهانه یانگ تسه در نظر گرفته می‌شود.

از آزمایش‌های محاسباتی انجام شده در این مقاله، می‌توان استنباط کرد که این مسأله برای حل حتی برای مسأله با اندازه کوچک با استفاده از حل کلی پیشنهاد شده نیز مشکل است. با این وجود، رویکردهای SA در این کار پیشنهاد

می‌شود که قادر است جواب‌های با کیفیت بالا در زمان کوتاه محاسباتی ارائه دهد. بررسی‌های تجربی هم چنین نشان می‌دهد که رویکردهای SA برای مسائل استفاده شده روزمره سازگار است. در این راستا، آن چه که می‌تواند برجسته باشد تلاش محاسباتی است که به طور قوی تحت تأثیر ابعاد مثال قرار نمی‌گیرد چون جواب‌های شدنی با تلاش محاسباتی مشابه را برای نمونه‌های مختلف ارائه می‌دهد. این ویژگی باعث می‌شود که ارزش SA برای موارد عملی، از یک سو، تعداد کشتی‌هایی که می‌تواند به دلیل تأخیرها یا تغییر در مسیرها تغییر کند و از سوی دیگر، تعداد آبراه‌هایی که کشتی‌ها مجاز به عبور از آن‌ها هستند می‌تواند وابستگی به این که چگونه آن‌ها برنامه‌ریزی می‌شوند یا در پایانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند را تغییر دهد. به عبارت دیگر، مقایسه SA با سیاست‌های صف متداول استفاده شده در پایانه‌های کانتینرها نشان می‌دهد که بهبود آشکاری می‌تواند بر حسب کاهش زمان انتظار کشتی‌های غیرضروری به دست آید. این مورد صرفه‌جویی بیشتر رفت و آمد کشتی و سودهای اقتصادی و استراتژیک را مجاز می‌داند هم چنین افزایش در سطح کیفیت محیط زیست از طریق کاهش گازهای گلخانه‌ای را به همراه دارد. به علاوه، نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که از دورنمای پایانه‌های کشتی‌های کانتینر، بهبود در مدیریت ترافیک در طول مسیر آبراه‌ها نه تنها در بالا بردن سطح رقابتی بودن پایانه‌ها مؤثر است بلکه در کاهش هزینه‌ها و ساطع شدن گازهای گلخانه‌ای خطوط حمل و نقل با کاهش زمان انتظار در مسیرهای روتین را با خود به همراه دارد. از سوی دیگر، با توجه به در نظر نگرفتن محدودیت‌های جزر و مدی و ابعادی، ETAS و ETDS اشتباه هم چنین زمان انتظار طولانی برای کشتی‌ها به منظور دسترسی به آبراه را منجر می‌شود. تمام این موارد، جدا از صرفه‌جویی زمانی برای کنترل‌های برنامه زمانی کشتی SIPG است چون آن‌ها مجبور هستند تا تمام کشتی‌های گزارش شده را چک کنند و روابطشان و در نهایت برنامه زمانی نامناسب را بهبود دهند.

به علاوه، در کنار سودهای بالقوه به کار بردن این رویکردهای حل برای موارد واقعی، این رویکردها می‌توانند هم چنین به عنوان ابزار مناسب در مذاکرات بین اپراتورهای پایانه و شرکت‌های حمل و نقل استفاده شود به طوری که بر روی برنامه‌های زمانی آن‌ها نیز توافق شده است. اپراتورهای پایانه، قادر است تا دورنمایی از این که چگونه دامنه بازه زمانی ممکن بر بقیه برنامه‌های کشتی‌ها اثرگذار است به دست آورد در حالی که مذاکرات به دست آمده است.

در این دورنما، استفاده از تکنیک‌های دقیق، می‌تواند از نتایج محاسباتی با استفاده از CPLEX دیده شود که نیاز به تلاش محاسباتی بیشتر بر حسب زمان اجرا است به طوری که باعث تأخیر یا آهسته شدن فرآیند تصمیم‌گیری در طی مذاکرات بین اپراتورهای پایانه و شرکت‌های حمل و نقل می‌شود. از این رو، استفاده از تکنیک‌های تقریبی به صورت آن‌هایی که در این کار پیشنهاد شدند برای سریع‌تر شدن تمام برنامه‌ها مناسب هستند به طوری که پایانه می‌تواند ننگه داشته شود و شرکت‌های حمل و نقل بدون به خطر انداختن عملکرد یا قراردادشان تقریباً بر روی آن موافق هستند.

با در نظر گرفتن نوآوری‌های بیان شده در این مقاله، مرحله بعدی تحقیق ما بر تحلیل تمرکز دارد طوری که اثرات جزر و مدی را زمان انتظار کشتی در نظر بگیرد. یکی دیگر از موضوعات تحقیق آینده این است که این رویکرد با عملیات مرتبط دیگر در پایانه‌های کانتینر مانند برنامه‌ریزی بندر و استقرار اسکله ترکیب شود. از سوی دیگر، در یک سطح استراتژیک‌تر، کاربرد ابزار مربوطه را برای حمایت از تصمیم‌گیرندگان برای گزینه‌های متفاوت وزنی زمانی که بحث در مورد ارائه دسترسی مناسب به بندر و پایانه‌ها در مورد مسیرهای حمل و نقل ظرفیت محدود شده است، را جستجو می‌کنیم. مثالی در ذهن ما، به مورد بحث فعلی از لایروبی رودخانه البه با دسترسی آن با بندر هامبورگ، آلمان اشاره دارد. در نهایت، از نقطه نظر الگوریتمیک، ساختارهای همسایگی متفاوت و اثراتشان بر عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را بررسی خواهیم کرد. این روش به ما کمک می‌کند تا با در نظر گرفتن سناریو، روش هوشمندی برای ساختار انتخاب همسایگی در شیوه‌ای سازگار را ارائه کنیم.

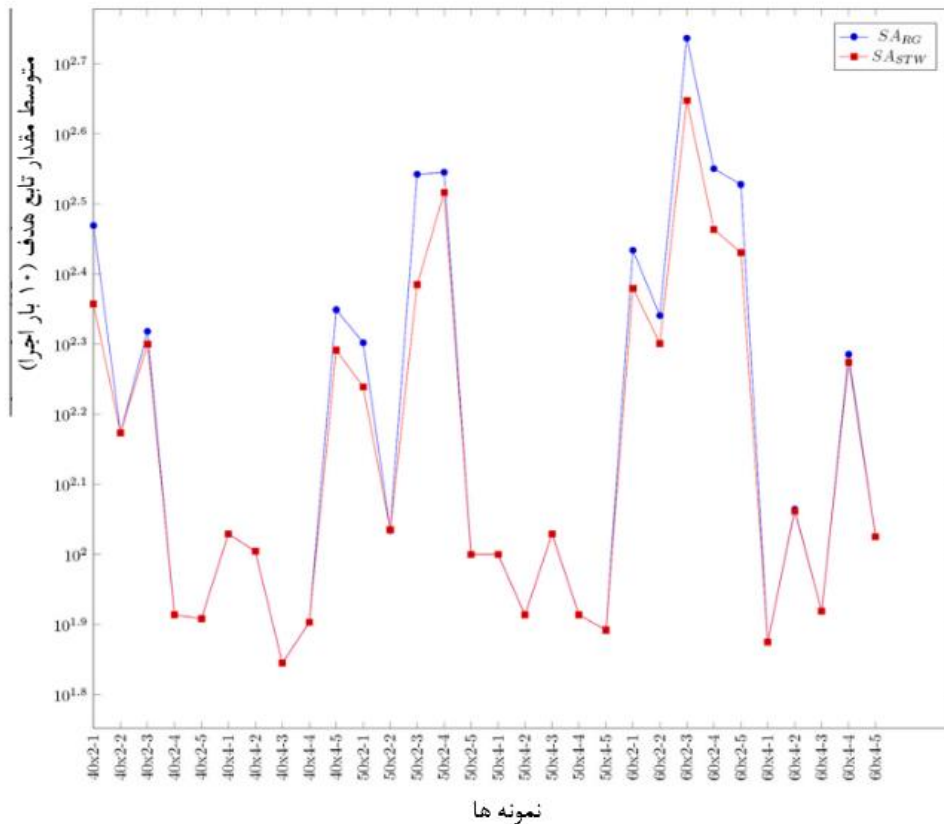


جدول 7. مقایسه بین SARG و SASTW برای مسأله با نمونه‌های 30 و 40 کشتی. سودهای استفاده از شبیه‌سازی تبرید به جای الگوریتم‌های برمبنای قوانین صف (FCFS-G و STW-G)

Instances				id	FCFS-G	STW-G	S <sub>Acc</sub>				S <sub>Strw</sub>					
V	W	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>				Min	Avg	Max	Gap <sub>proc</sub> (%)	Gap <sub>strw</sub> (%)	Min	Avg	Max	Gap <sub>proc</sub> (%)	Gap <sub>strw</sub> (%)
30	2	15	15	1	151	189	139	140.00	142	7.86	35.00	139	139.50	141	8.24	35.48
				2	88	106	85	85.00	85	3.53	24.71	85	85.30	86	3.17	24.27
				3	93	112	91	91.00	91	2.20	23.08	91	91.00	91	2.20	23.08
				4	138	167	120	120.50	121	14.52	38.59	120	120.30	121	14.71	38.82
				5	47	49	46	46.00	46	2.17	6.52	46	46.00	46	2.17	6.52
30	4	15	15	1	44	43	41	41.00	41	7.32	4.88	41	41.00	41	7.32	4.88
				2	87	106	78	78.00	78	11.54	35.90	78	78.00	78	11.54	35.90
				3	45	45	42	42.00	42	7.14	7.14	42	42.00	42	7.14	7.14
				4	83	87	76	76.00	76	9.21	14.47	76	76.00	76	9.21	14.47
				5	70	75	67	67.00	67	4.48	11.94	67	67.00	67	4.48	11.94
40	2	20	20	1	-	-	227	280.50	356	-	-	225	228.50	234	-	-
				2	184	192	149	149.10	150	23.41	28.77	149	149.20	150	23.32	28.69
				3	237	273	199	205.60	261	15.27	32.78	199	199.50	201	18.80	36.84
				4	99	105	82	82.00	82	20.73	28.05	82	82.00	82	20.73	28.05
				5	102	96	81	81.00	81	25.93	18.52	81	81.00	81	25.93	18.52
40	4	20	20	1	113	116	107	107.00	107	5.61	8.41	107	107.00	107	5.61	8.41
				2	104	114	101	101.00	101	2.97	12.87	101	101.00	101	2.97	12.87
				3	78	83	70	70.00	70	11.43	18.57	70	70.00	70	11.43	18.57
				4	89	84	80	80.00	80	11.25	5.00	80	80.00	80	11.25	5.00
				5	-	265	193	221.30	251	-	19.75	193	195.10	200	-	35.83
							103.70	108.20	116.40	-	-	103.60	103.97	104.75	-	-

جدول 8. مقایسه بین SARG و SASTW برای مسأله با نمونه‌های 50 و 60 کشتی. سودهای استفاده از شبیه‌سازی تبرید به جای الگوریتم‌های برمبنای قوانین صف (FCFS-G و STW-G)

Instances				id	FCFS-G	STW-G	S <sub>Acc</sub>				S <sub>Strw</sub>					
V	W	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>				Min	Avg	Max	Gap <sub>proc</sub> (%)	Gap <sub>strw</sub> (%)	Min	Avg	Max	Gap <sub>proc</sub> (%)	Gap <sub>strw</sub> (%)
50	2	25	25	1	-	-	172	197.40	236	-	-	172	173.80	176	-	-
				2	155	150	108	108.20	109	43.25	38.63	108	108.50	109	42.86	38.25
				3	-	342	242	244.80	247	-	39.71	241	243.00	248	-	40.74
				4	-	464	324	365.20	481	-	27.05	325	326.90	330	-	41.94
				5	112	122	100	100.00	100	12.00	22.00	100	100.00	100	12.00	22.00
50	4	25	25	1	116	115	100	100.00	100	16.00	15.00	100	100.00	100	16.00	15.00
				2	96	85	82	82.00	82	17.07	3.66	82	82.00	82	17.07	3.66
				3	119	128	107	107.00	107	11.21	19.63	107	107.00	107	11.21	19.63
				4	92	93	82	82.00	82	12.20	13.41	82	82.00	82	12.20	13.41
				5	87	128	78	78.00	78	11.54	64.10	78	78.00	78	11.54	64.10
60	2	30	30	1	-	305	239	267.10	312	-	14.19	237	239.20	241	-	27.51
				2	252	318	199	205.00	243	22.93	55.12	198	200.30	204	25.81	58.76
				3	-	-	520	529.60	591	-	-	443	445.80	447	-	-
				4	-	-	326	348.50	374	-	-	290	290.80	291	-	-
				5	341	392	266	337.00	393	1.19	16.32	262	268.80	272	26.86	45.83
60	4	30	30	1	93	120	75	75.00	75	24.00	60.00	75	75.00	75	24.00	60.00
				2	139	148	115	115.30	117	20.56	28.36	115	115.70	117	20.14	27.92
				3	95	96	83	83.00	83	14.46	15.66	83	83.00	83	14.46	15.66
				4	201	261	187	188.10	189	6.86	38.76	188	188.10	190	6.86	38.76
				5	125	125	106	106.00	106	17.92	17.92	106	106.00	106	17.92	17.92
							175.55	185.96	205.25	-	-	169.60	170.70	171.90	-	-



شکل ۴. مقایسه بین SAR و SASTW بر حسب مقدار میانگین تابع برای ۱۰ بار اجرا

## سپاسگزاری‌ها

بخشی از این کار توسط صندوق توسعه منطقه‌ای اروپا؛ وزارت اقتصاد و رقابت اسپانیا (-project TIN2015-70226-R) تأمین اعتبار شد. ادوارد لالا رویز از تأمین مالی انجام شده توسط مؤسسه فناوری تحقیقات، نوآوری و جامعه اطلاعات (ACIISI) بابت همکاری 85 درصدی از صندوق اجتماعی اروپایی قدردانی می‌کند. از اپراتورهای پایانه Waigaoqiao برای ارائه داده‌ها نیز تشکر می‌شود.

## References

- Bierwirth, C., Meisel, F., 2015. A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *Eur. J. Oper. Res.* 244 (3), 675–689.
- Caldeirinha, V., Felício, J., 2014. The relationship between position-port, hard-port and soft-port characteristics and port performance: conceptual models. *Marit. Policy Manage.* 41 (6), 528–559.
- Comtois, C., Dong, J., 2007. Port competition in the Yangtze river delta. *Asia Pac. Viewpoint* 48 (3), 299–311.
- Cordeau, J.F., Laporte, G., Legato, P., Moccia, L., 2005. Models and tabu search heuristics for the berth-allocation problem. *Transp. Sci.* 39, 526–538.
- Cordeau, J.-F., Laporte, G., Mercier, A., 2001. A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *J. Oper. Res. Soc.* 52 (8), 928–936.
- Dai, M.D.M., Schonfeld, P., 1998. Metamodels for estimating waterway delays through series of queues. *Transp. Res. Part B: Methodol.* 32 (1), 1–19.
- De Vriend, H.J., Wang, Z.B., Ysebaert, T., Herman, P., Ding, P., 2011. Eco-morphological problems in the Yangtze Estuary and the Western Scheldt. *Wetlands* 31 (6), 1033–1042.
- Deng, X., Li, Y., Zhao, Y., 2011. Overview of research on traffic capacity of harbor channel. *Port Waterway Eng.* 3, 003.
- Douma, A., Schuur, P., Jagerman, R., 2011. Degrees of terminal cooperativeness and the efficiency of the barge handling process. *Expert Syst. Appl.* 38 (4), 3580–3589.
- Dowland, K., Soubeiga, E., Burke, E., 2007. A simulated annealing based hyperheuristic for determining shipper sizes for storage and transportation. *Eur. J. Oper. Res.* 179 (3), 759–774.
- Du, Y., Chen, Q., Lam, J., Xu, Y., Cao, J., 2015. Modeling the impacts of tides and the virtual arrival policy in berth allocation. *Transp. Sci.*
- Du, Y., Chen, Q., Quan, X., Long, L., Fung, R., 2011. Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions. *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.* 47 (6), 1021–1037.
- Fagerholt, K., Laporte, G., Norstad, I., 2010. Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes. *J. Oper. Res. Soc.* 61 (3), 523–529.
- Golden, B., Raghavan, S., Wasil, E. (Eds.), 2008. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. Operations Research/Computer Science Interfaces, vol. 43. Springer, New York.
- Günther, E., Lübbecke, M.E., Möhring, R.H., 2010. Ship traffic optimization for the Kiel canal. In: *Seventh Triennial Symposium on Transportation Analysis (TRISTAN 2010)*.
- Günther, E., Lübbecke, M.E., Möhring, R.H., 2011. Challenges in scheduling when planning the ship traffic on the Kiel canal. In: *10th Workshop on Models and Algorithms for Planning and Scheduling Problems (MAPSP 2011)*.
- Hartl, R.F., Hasle, G., Janssens, G.K., 2006. Special issue on rich vehicle routing problems. *CEJOR* 14 (2), 103–104.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr., C.D., Vecchi, M.P., 1983. Optimization by simulated annealing. *Science* 220 (4598), 671–680.
- Kontovas, C., Psaraftis, H., 2011. Reduction of emissions along the maritime intermodal container chain: operational models and policies. *Marit. Policy Manage.* 38 (4), 451–469.
- Kosmas, O.T., Vlachos, D.S., 2012. Simulated annealing for optimal ship routing. *Comput. Oper. Res.* 39 (3), 576–581.
- Lalla-Ruiz, E., Voß, S., 2016. Popmusic as a metaheuristic for the berth allocation problem. *Ann. Math. Artif. Intell.* 76 (1–2), 173–189.
- Lenstra, J., Rinnooy Kan, A., 1981. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks* 11 (2), 221–227.
- Liang, C., Huang, Y., Yang, Y., 2009. A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning. *Comput. Ind. Eng.* 56 (3), 1021–1028.
- Liu, J., Han, X., Yi, X., 2008. Capacity analysis of restricted channels based on the queuing theory. *Navig. China* 3, 014.
- Lorenzoni, L., Ahonen, H., de Alvarenga, A., 2006. A multi-mode resource-constrained scheduling problem in the context of port operations. *Comput. Ind. Eng.* 50 (1), 55–65.
- Lowe, D., 2005. Inland waterway, short-sea, and coastal shipping. In: *Lowe, D. (Ed.), Intermodal Freight Transport*. Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 92–109.
- Moon, D., Woo, J., 2014. The impact of port operations on efficient ship operation from both economic and environmental perspectives. *Marit. Policy Manage.* 41 (5), 444–461.
- Ning, S., Song, X., Guo, Z., Li, J., Lu, C., 2008. Study on unidirectional waterway transit capacity with simulation. *J. Waterway Harbor* 3, 002.
- Notteboom, T., 2006. The time factor in liner shipping services. *Marit. Econ. Logist.* 8 (1), 19–39.
- Notteboom, T., 2007. Container river services and gateway ports: similarities between the Yangtze river and the Rhine river. *Asia Pac. Viewpoint* 48 (3), 330–343.
- Notteboom, T., 2008. *The Relationship Between Seaports and the Inter-modal Hinterland in Light of Global Supply Chains*. Discussion Paper 2008-10. OECD/ITF.
- Smith, L.D., Nauss, R.M., Campbell, J.F., Sweeney, D.C., 2009. Triangulation of modeling methodologies for strategic decisions in an inland waterway transportation system. In: *42nd Hawaii International Conference on System Sciences*. IEEE, pp. 1–10.
- Smith, L.D., Nauss, R.M., Mattfeld, D.C., Li, J., Ehmke, J.F., Reindl, M., 2011. Scheduling operations at system choke points with sequence-dependent delays and processing times. *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.* 47 (5), 669–680.
- Solomon, M., 1987. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Oper. Res.* 35 (2), 254–265.
- Song, S., 2014. Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port. *Atmos. Environ.* 82, 288–297.
- Taylor, G.D., Whyte, T.C., DePuy, G.W., Drosos, D.J., 2005. A simulation-based software system for barge dispatching and boat assignment in inland waterways. *Simul. Model. Pract. Theory* 13 (7), 550–565.
- Ulusçu, Ö.S., Özbaş, B., Altıok, T., Or, İ., Yılmaz, T., 2009. Transit vessel scheduling in the strait of Istanbul. *J. Navig.* 62 (1), 59–77.
- UNCTAD, 2014. *Review of Maritime Transport*. Technical Report. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) – Secretariat, 2014. <[http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2014\\_en.pdf](http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2014_en.pdf)>.
- United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (UNESCAP), 2004. *Transport Division (TD). Manual on Modernization of Inland Water Transport for Integration Within a Multimodal Transport System*. United Nations.
- Verstichel, J., De Causmaecker, P., Spieksma, F.C.R., Vanden Berghe, G., 2014. Exact and heuristic methods for placing ships in locks. *Eur. J. Oper. Res.* 235, 387–398.
- Verstichel, J., De Causmaecker, P., Spieksma, F., Berghe, G.V., 2011. *The Generalized Lock Scheduling Problem: An Exact Approach*. Technical Report. KAHO Sint-Lieven.
- Voß, S., 2001. Meta-heuristics: the state of the art. In: *Local Search for Planning and Scheduling*. Springer, pp. 1–23.
- Yang, G., 1995. Transformation of multidepot multisalesmen problem to the standard travelling salesman problem. *Eur. J. Oper. Res.* 81, 557–560.
- Yang, J., Gao, Q., Chen, T., 2008. Interactive relationship between container transport and regional economic development: a perspective of port clusters in the Yangtze river delta. *Port Waterway Eng.* 11, 029.
- Yang, Z., Shi, H., Chen, K., Bao, H., 2014. Optimization of container liner network on the Yangtze river. *Marit. Policy Manage.* 41 (1), 79–96.
- Yap, W.Y., Lam, J.S.L., 2013. 80 million-twenty-foot-equivalent-unit container port? Sustainability issues in port and coastal development. *Ocean Coast. Manage.* 71, 13–25.
- Zhou, J., Hu, Y., 2004. Solutions to selection of anchorage in Ningbo port based on AHP. *J. Zhejiang Ocean Univ.* 4, 008.