

**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 شدۀ راه­های حمل و نقل آبی وارد می­کند، که عدم استفادۀ کارآمد باعث زیان در رقابت و هم چنین افزایش حجم تولید گازهای گلخانه­ای و در نتیجه آلودگی محیط زیست می­شود. در این زمینه، مسألۀ برنامه­ریزی حمل و نقل آبی، پیشنهاد می­شود؛ که هدفش برنامه­ریزی ورود و خروج کشتی­ها از طریق آبراه­های 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**: مسألۀ برنامه­ریزی حمل و نقل آبی، حمل و نقل دریایی، پایانۀ کانتینر

**1. مقدمه**

رشد ترافیک دریایی، اداره­کنندگان بندر را مجبور می­کرد تا برای کاهش زمان انتظار هنگام دسترسی به زیرساخت­هایشان، 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 بندرشانگهای 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 برنامۀ 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 گلخانه 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، رابطۀ 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 CO2 انتشار یافته، کاهش زمان انتظار کشتی است. Song (2014) گازهای گلخانه­ای ساطع شده (CO2, CH4, N2O, 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 زمینۀ مسیرهای 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 وسیلۀ 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 نظریۀ صف پرداختند. Taylor et al. (2005) سیستمی نرم افزاری را برمبنای 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 شدۀ 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 برنامه­زمان­بندی پیچیده و مسألۀ 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 طرفۀ کشتی در کانال کیل پرداختند. آن­ها کانال را به عنوان مجموعه­ای دیگر از بخش­های کانال و کناره­گیری در نظر گرفتند. آن­ها فرمول ریاضی برای طراحی مسیر خطی و حمل و نقل شبکه­ای ارائه کردند. هدف مدل­شان 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 شبکۀ خطی رودخانۀ 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 تنگۀ 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 مسألۀ برنامه­ریزی آبراه در نظر گرفته شده است، رویکردهای پیشنهادی به موارد خاصی که به آبراه­های مطالعه شده یا مسیرهای طراحی شده برای بازدید از پایانه­های 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 رودخانۀ 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[[1]](#footnote-1) بزرگ نمی­توانند وارد شوند مهم نیست عمق اسکله چقدر است. به همین دلیل آبراه ورودی مهم­ترین قسمت جهت برقراری ارتباط است. برای مثال، دهانۀ آبراه عمیق یانگ تسه به عنوان ورودی اصلی بندر شانگهای به سه پروژۀ نظارتی در مقیاس بزرگ و پیچیده تبدیل شد. مسیر اصلی 7 متر (1998) بود که به طور جدی با توسعۀ صنعت حمل و نقل شانگهای محدود شده بود. در نهایت، عمق آن به 12. متر (2010) رسید که اجازۀ 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:

- مسألۀ برنامه¬ریزی حمل و نقل آبی (WSSP) را به منظور برنامه¬ریزی حمل و نقل در مسیر آبراه¬ها پیشنهاد شد. این مسأله به صورت برنامه¬ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP) و با در نظر گرفتن موقعیت واقعی در یانگ تسه، شانگهای، مدل شد. در این راستا، بررسی در گروه بین¬المللی بندر شانگهای (SIPG) انجام شد، تعداد زیادی از کشتی¬ها هر روز از این آبراه عبور می¬کنند و نسبت زیادی از آن¬ها نمی¬توانند در زمان مناسب عبور کنند نه به دلیل محدودیت¬های جغرافیای یانگ تسه بلکه به دلیل درفت، وسعت و جهت¬یابی در شب.

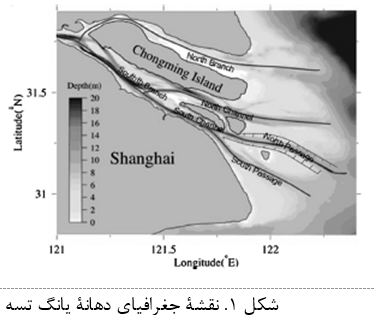
- همان طور که Kontovas and Psaraftis (2011) نشان دادند سیاست¬های مشترکی در پایانه¬ها برای کاهش زمان انتظار کشتی و در نتیجه کاهش گازهای گلخانه¬ای استفاده شد. بنابراین، ما الگوریتم¬های ابتکاری را ارزیابی کرده و برمبنای سیاست¬های مشتری که در پایانه¬های کشتی¬های کانتینر استفاده می¬شود توسعه دادیم. این امر به ما اجازه می¬دهد تا بهبود عملیاتی و زیست محیطی را با استفاده از کاهش زمان انتظار که می¬تواند با استفاده از تکنیک¬های پیچیده¬تر مانند شبیه¬سازی تبرید (SA) در این کار پیشنهاد می¬شود به دست آورد. در این حالت، SA پیشنهاد داده شده، اجازه می¬دهد تا گازهای گلخانه¬ای غیرضروری ایجاد شده توسط زمان انتظار کشتی¬ها کاهش یابد. علاوه بر این، مقایسه با مدل اجرا شده در CPLEX و الگوریتم¬های ابتکاری نشان می¬دهند که SA قادر است تا برنامه¬هایی با کیفیت بالا ارائه دهد که به عنوان بخشی از سیستم پشتیبان تصمیم¬گیری (DSS) استفاده شوند. در این کاربرد واقعی، DSS برای تأیید تمام کشتی¬ها و بهبود زمان انتسابشان استفاده می¬شود.

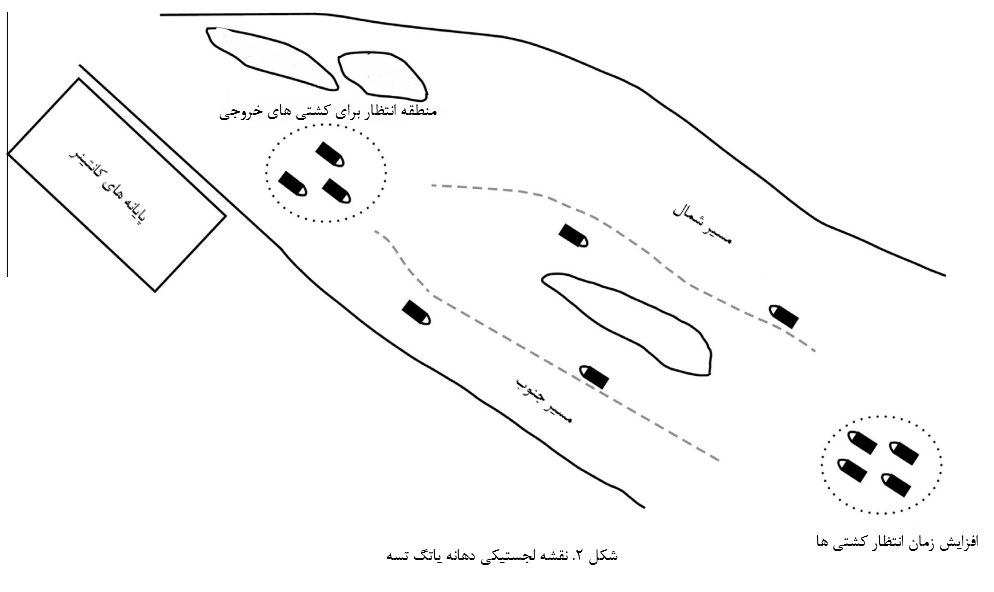
- یک مقیاس مناسب برمبنای داده¬های ارائه شده به وسیلۀ پایانۀ کشتی کانتینر وایگاوکیو (شانگهای) ارائه شد. از سوی دیگر، چون این مسأله می¬تواند به به سناریوهای دیگر ترجمه شود، این معیار، مسألۀ دیگری از ابعاد مختلف را شامل می¬¬شود.

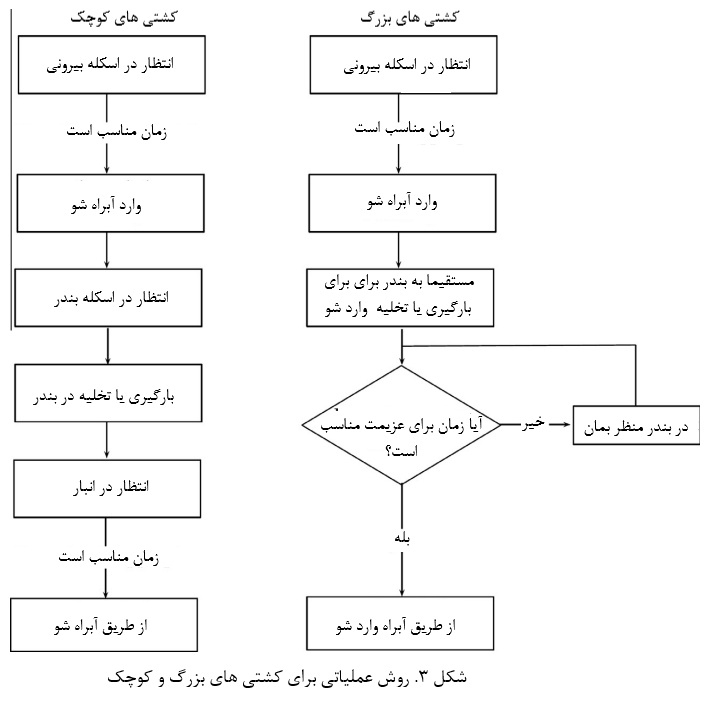
ادامۀ این مقاله به صورت زیر سازمان­دهی می­شود. بخش 2 ویژگی­های خاص یانگ تسه را معرفی می­کند. فرمول­بندی ریاضی مسألۀ برنامه­ریزی حمل و نقل آبی در بخش 3 ارائه می­شود. در بخش 4، روش­های حل برای حل این مسأله پیشنهاد شده است. پس از آن در بخش 5، عملکرد هدفمان در سناریوهای واقعی تحلیل می­شود. در نهایت، بخش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

**2. حوزۀ 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.





****

**2.1 تنظیمات پایه**

دهانۀ 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 کشتی­های کانتینر است که میانگین رشد 16.5 درصدی کشتی­های کانتینر را در سال 2010 (Yap and Lam, 2013) داشته است و یکی از بزرگترین گردش­های مالی را در سال­های اخیر (UNCTAD, 2014) داشته­است. در شکل 1، نقشۀ جغرافیایی دهانه، نشان داده شده است که چندین آبراه مانند آبراه عمیق که به عنوان مسیر شمال، مسیر جنوب، آبراه شاخۀ شمالی و مسیر شاخۀ جنوبی را شامل می­شود. از تمام این­ها، مسیر شمال و جنوب، مهم­ترین هستند زیرا آن­ها ورودی به پایانه­های وایگاوکیو می­باشند. مسیر شمال که هم چنین مسیر دهانۀ عمیق یانگ تسه نامیده می­شود 12.5 متر عمق دارد و جز سه پروژۀ 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 اندازۀ 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 فلوچارت 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 اسکلۀ 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 اندازۀ 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 دربارۀ 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 محاسبۀ 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 محاسبۀ ظرفیت مسیر عمیق دهانۀ 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 دهانۀ 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.

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

**2.2 تأثیر جزر و مدی**

همان طور که در مطالعۀ 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 کانتینر وجود دارد در نظر گرفته می­شود.

برای داشتن مزایای مناسب وضعیت جزر و مدی در دهانۀ 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 کنترل­کننده­های برنامه­ریز باتجربۀ 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 پیچیدۀ مسألۀ برنامه­ریزی کشتی آبراه در یانگ تسه، جدی­تر هم می­شود. به علاوه، در این شرایط، بسیاری از زمان تقریبی ورود (ETA) و زمان تخمین زدۀ خروج (ETDs) می­تواند به دلیل درست در نظر گرفتن زمان درست جزر و مد، شکست بخورد. که منجر به افزایش حجم کار کنترل برنامۀ کشتی می­شود به طوری که مجبور به چک کردن و بهبود برنامۀ اصلی گزارش شده از شرکت­های حمل و نقل هستند. این یکی از انگیزه­های توسعه در DSS است که اپراتورها را برای ارائۀ برنامه­های زمانی شدنی با شرایط وابسته به زمان حمایت می­کند.

**3. فرموله کردن مسأله**

مسألۀ برنامه­ریزی زمانی آبراه کشتی (WSSP) مجموعه­ای از وسایل یا کشتی­ها را در نظر می­گیرد که به مجموعۀ کشتی­های ورودی و کشتی­های خروجی ، مجموعۀ مسیر­های آبراه و مجموعۀ بازه­های زمانی تقسیم می­شوند. از آن جا که این مسأله، مسألۀ عملیاتی روزانه است، افق زمانی را یک روزه و تغییر سطح جزر و مد را نیز در طی این بازۀ زمانی در نظر می­گیریم. علاوه بر این، در WSSP برای هر کشتی ، زمان تخیمنی برای ورود به بندر داده شده است، Estimated Time of Departure، ، که عرض، طول، درفت و بسته به تخصیص آبراه ، زمان عبور می­باشد. از سویی دیگر، هر آبراه بازۀ زمانی در دسترس ، عرض ، عمق آب که به بازۀ زمانی بستگی دارد. تابع هدف WSSP، تعیین برنامۀ 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:

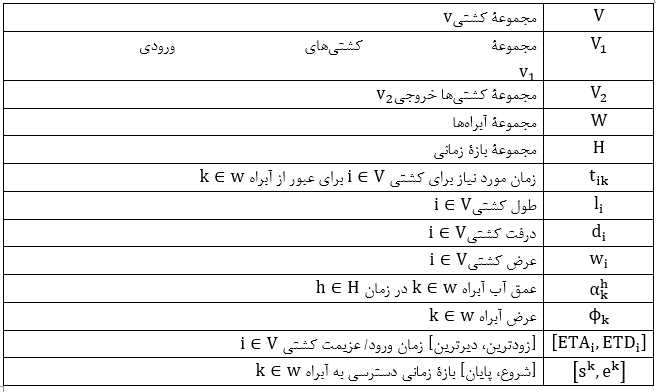
(الف) هر کشتی می­تواند تنها پس از ورودش در زمان برنامه­ریزی شود و از طریق آبراه تا زمانی که زمان عزیمتش برسد برود.

(ب) هر کشتی می­تواند تنها به آبراه تخصیص داده شود پس از آن که در زمان در دسترس قرار می­گیرد و در مدت زمان تا در دسترس قرار ندارد.

(ج) درفت کشتی ، باید در عمق­ترین جای آب از آبراه تخصیص داده شده باشد ، ، .

(د) زیرمجموعه­ای از کشتی­های ورودی و خروجی، ، می­توانند مسیر آبراه را به صورت همزمان طی کنند اگر جمع عرضشان به علاوۀ فاصلۀ امن مناسب، بزرگتر از عرض آبراه نباشد. یعنی، اگر فاصلۀ اطمینان، نادیده گرفته شود. (در غیراینصورت ممکن است داده­ها برای تعریف نامناسب باشند.)

مدل کردن این مسأله می­تواند ایده­هایی را از مدل کردن مسأله­های مسیر حمل و نقل بگیرد، منظور مسألۀ 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:

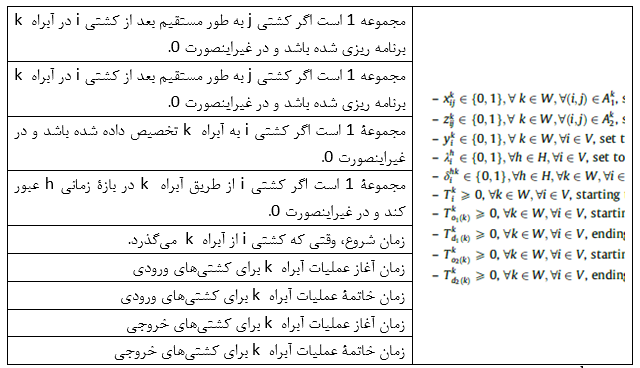


گراف­های زیر برای هر آبراه تعریف می­شوند. برای هر آبراه، یک جهت ورودی و یک جهت خروجی وجود دارد:

-گراف برای هر تولید می­شود که با و که بردارهای اضافی برای نشان دادن آبراه و هستند.

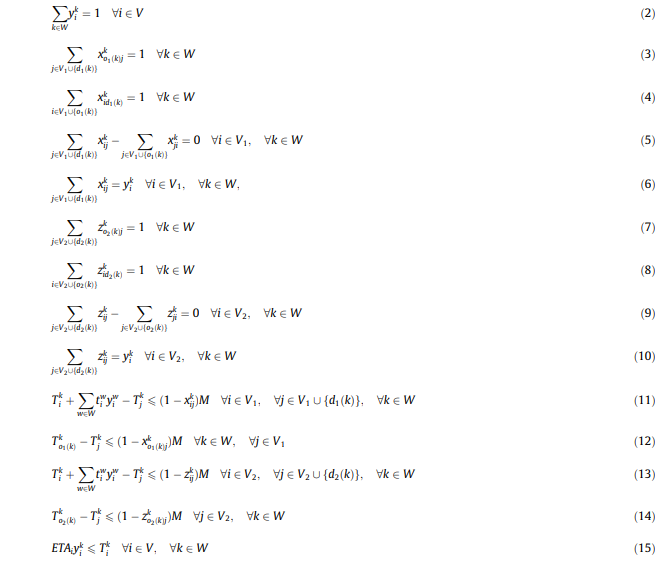
-گراف برای هر تولید می­شوند که با و که بردارهای اضافی برای نشان دادن آبراه و هستند.

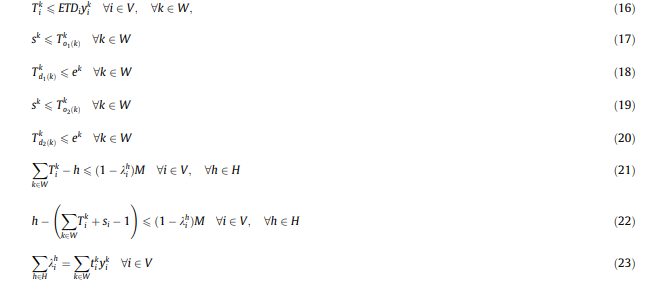
متغیرهای تصمیم که در این فرمول­بندی ریاضی استفاده می­شوند به صورت زیر تعریف می­شوند:

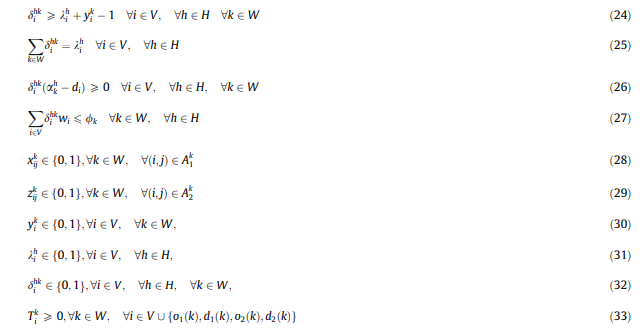


سپس فرمول­بندی مدل ریاضی برای WSSP به صورت زیر می­شود:









تابع هدف (1)، کل زمان مورد نیاز برای کشتی­ها جهت عبور از آبراه­ها را حداقل می­سازد. محدودیت­های (2)، هر کشتی باید به یکی و تنها یکی از آبراه­ها 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 و 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 و را مشخص می­کند. محدودیت­های (11) و (12) الویت هر توالی را برای کشتی­های ورودی برای هر آبراه مشخص می­کند. محدودیت­های (13) و (14) الویت­های هر توالی را برای کشتی­های خروجی برای هر آبراه 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 و را مشخص می­کنند. محدودیت­های (23) ارتباط بین متغیرهای و کل زمان مورد نیاز برای عبور از آبراه را مشخص می­کند. محدودیت­های (24) و (25) ارتباط بین و 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 محددودیت­های اضافی و متغیر اضافی خطی شود به طوری که برای هر ، اگر باشد مساوی شود و در غیراینصورت 0. محدودیت­های اضافی به صورت زیر است:



M یک عدد ثابت بسیار بزرگ است.

بنابراین، فرمول­بندی MILP برای WSSP به صورت زیر است:



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 ارائۀ تئوری زیر مشخص کنیم:

**تئوری 1.** WSSP، NP- hard است.

اثبات این مسآله 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 وسیلۀ 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; Solomon, 1987) و Multi-Depot Multiple Travelling Salesmen Problem (MD-mTSP, Yang, 1995) با در نظر گرفتن هم وسیلۀ نقلیه و هم فروشنده، NP- hard هستند. برای سادگی اجازه دهید نسخۀ 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 به طوری که . به علاوه، بیایید 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 بازۀ 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/ انیار و بازدید توسط مشتری/ کشتی است. با استفاده از مثال اسباب­بازی r-WSSP با دو کشتی و و یک آبراه مانند ، جواب شدنی ترتیب ورود کشتی و بعدی را نشان می­دهد که به یک MD-VRPTW با جواب ترجمه می­شود، به طوری که در این مورد انبار و آبراه در r-WSSP را نشان می­دهد.

همان طور که اشاره شد، چندگراف را برای هر انبار/آبراه با گرۀ مبدأ و مقصد داریم به طوری که مجموعه با کشتی­ها/ مشتری­ها و این گره­ها همان طور که ذکر شد یعنی تشکیل شده­اند و زمان مسافرت به صورت کمان 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 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. مدل¬های 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 مسألۀ روزانۀ 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 راه حل­های ابتکاری برای بهره بردن از کیفیت جواب پیشنهاد می­کند.

**4.1 الگوریتم حریصانه**

در زمینۀ WSSP، جواب S به صورت مجموعه­ای از سه تایی تعریف می­شود به طوری که کشتی اختصاص داده شده به آبراه را نشان می­دهد و زمان شروع برای عبور از آبراه در زمان برنامه­ریزی می­شود. به علاوه، از و تشکیل شده است که : متناظر با کشتی­ها ورودی و متناظر را کشتی­های خروجی است.

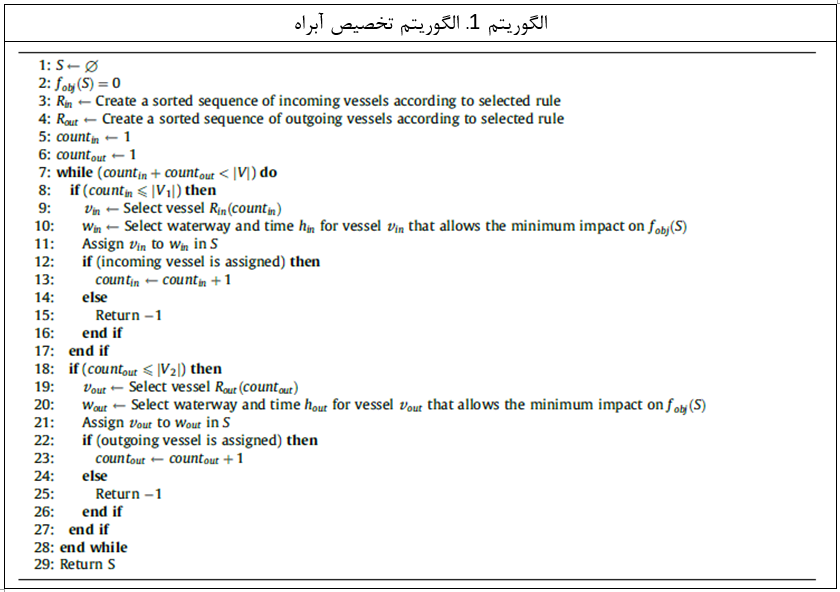
برای تعیین تخصیص آبراه کشتی و برنامه زمانی، ابتدا دو توالی از ترتیب ورود و برای کشتی­های ورودی و خروجی را به ترتیب در نظر می­گیریم. در این راستا، پایانه­های کشتی­های کانتینر، قوانین صفی دارند که زمانی که کشتی­ها وارد می­شوند استفاده می­شود. بنابراین، و برای مرتب کردن کشتی­ها با استفاده از قوانین خاص 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 می¬شود. منطق پشت این عمل این است که موقعیت¬هایی را که اپراتورهای پایانه می¬توانند برای ترتیب ورود در آبراه به صورت پویا مشخص کنند بدون استراتژی مشخص می¬شود.

- آن که اول می¬آید، اول خدمت می¬گیرد (FCFS). قانون متداولی است که در پایانه¬های 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 می¬شود. برمبنای ایجاد الویت کشتی¬ها برطبق زمان ورودشان است. یعنی؛ کشتی¬هایی که زودتر وارد می¬شوند برای دسترسی به آبراه¬ها در الویت عبور از یکی از آن¬ها هستند.

- طول کوتاه¬ترین بازۀ زمانی (STW). کشتی¬ها با در نظر گرفتن بازۀ زمانی مرتب می¬شوند. در این مورد، کشتی¬ با کم¬ترین بازۀ زمانی از اولین آبراه عبور می¬کند. اساس این استراتژی این است که الویت برای این کشتی-ها در مسیرهای رفت و آمدشان بازه¬های زمانی کوتاهی برای برآوردن بازۀ زمانی مسیر می¬باشد.

قوانین قبلی اجازۀ 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.



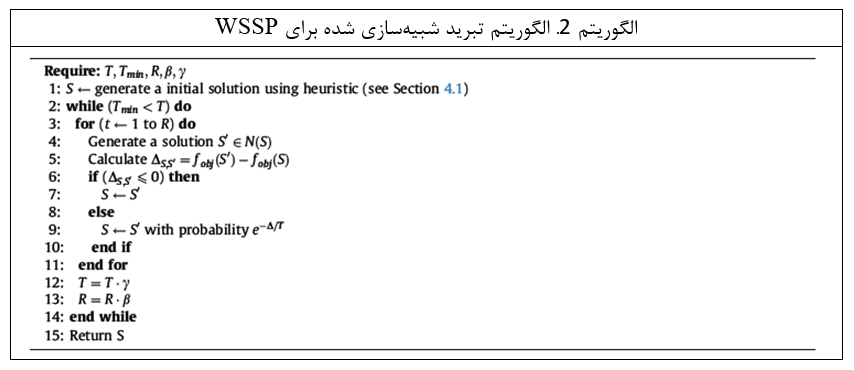
همان طور که در الگوریتم 1 نشان داده شده است، جواب آغازین S خالی است (خط1). مقدار تابع هدف تخصیص داده شده صفر گذاشته می­شود (خط 2). یکبار این مورد، بسته به قانون داده شده، گشتاور کشتی­های وارد شده و خارج شده و به ترتیب، انجام می­شود (خطوط 3-4). به عنوان مثال، با استفاده از قانون FCFS، اولین عنصر کشتی­های ورودی ، 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، برطیق 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 شبیه¬سازی 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 پایۀ 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 تایع هدف ایجاد نکند، می­تواند با توجه به احتمال پذیرفته شود و این بستگی به بدتر شدن مقدار تابع هدف دارد. احتمال پذیرش به صورت 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، ، به صورت تصادفی با استفاده از حرکت معاوضه­ای (یعنی دو کشتی ورودی و خروجی با تبادل مواضع خود در توالی) تولید می­شود. برای هر دما، R تکرار اجرای می­شود. پس از اجرای تکرارهای R، کاهش می­یابد، که . به علاوه، تعداد تکرارهای R در هر درجه حرارت به روز رسانی می­شود که . الگوریتم SA کامل، تا زمانی که درجه جرارت به آستانۀ معین برسد اجرا می­شود.



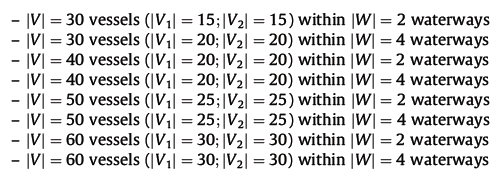
**ساختار همسایگی با دو گزینه**: ساختار همسایگی استفاده شده در این کار برمبنای حرکت از دو گزینه است. به این معنا که جواب داده شده، S، همسایگی با دو گزینه، ، از همسایگی که با معاوضۀ دو کشتی ورودی به دست می­آید تشکیل شده است و با معاوضۀ دو کشتی خروجی به همان صورت یعنی که 

**5. آزمایش¬های محاسباتی**

این بخش به ارائۀ 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 16GB تجهیز شده است انجام می­شود. برای شبیه­سازی تبرید، آزمایش­های اولیه با پارامترهای زیر مشخص می­شوند: 

**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 پایانۀ Waigaoqiao ارائه می­شود دسترسی داریم. علاوه بر این، چون این مسأله می­تواند به سناریوهای دیگری هم ترجمه شود، مثال­های مسألۀ 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.



پنج مسألۀ نمونه برای هر مجموعه ایجاد شده است، بنابراین، به طور کلی 40 مسألۀ نمونه داریم. چون این یک مسألۀ روزانه است، مجموعه­ای از افق برنامه­ریزی یک روز تقسیم بر 48 بازۀ 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 دهانۀ یانگ تسه در نظر گرفتیم جایی که -مطابق با شرکت­کنندگان- تعدادی از فرضیات با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایشان مجبورند زمانی که مجموعۀ مثال­ها ایجاد شوند استفاده شوند:

1. کشتی با نمی­تواند از طریق آبراه­ها به بازه­های زمانی مربوط به شب به بندر دسترسی داشته باشد.

2. کشتی با درفتش تا 1 متر برای امن بودن افزایش دارد.

3. حداکثر دو کشتی می­توانند از طریق آبراه در همان بازۀ 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 نقطۀ 3 گفته شد، باید محدودیت­های زیر را برای مدل ریاضی در نظر بگیریم:



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

**5.2 مقایسۀ بین الگوریتم¬های ابتکاری**

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

جدول 1 و 2 این نتایج را به وسیلۀ الگوریتم­های حریصانه 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 براین، مواردی که FCFS-G و STW-G جوابی متعلق به این مجموعه از نمونۀ مدل­ها 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 ارائۀ 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 الگوریتم¬های ابتکاری و بحث**

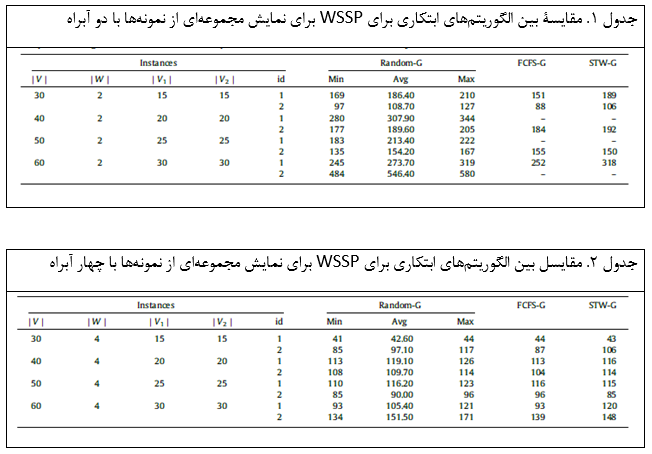
در این بخش، مقایسه­ای بین مدل ریاضی اجرا شدۀ MILP در CPLEX و پیشنهاده شده انجام می­دهیم. رویکرد SA برای مقداردهی اولیه الگوریتم پیشنهاد شده در این کار استفاده می­شود:

1. الگوریتم شبیه¬سازی تبرید با استفاده از Random-G به عنوان روشی برای مقداردهی اولیه (SARG)

2. الگوریتم شبیه¬سازی تبرید با استفاده از FCFS-G به عنوان روشی برای مقداردهی اولیه (SAFCFS-G)

3. الگوریتم شبیه¬سازی تبرید با استفاده از STW-G به عنوان روشی برای مقداردهی 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.

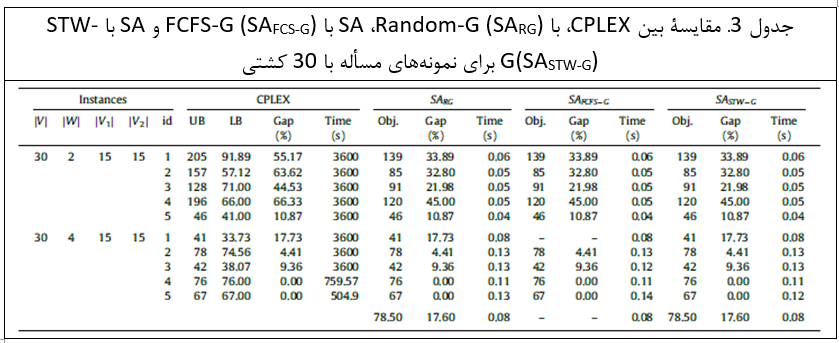


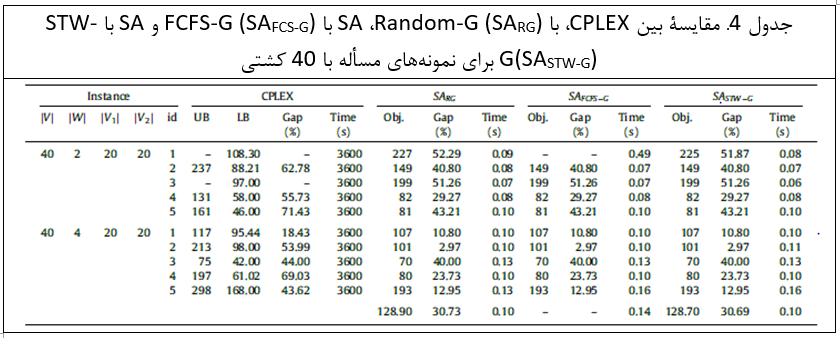
جدول 3-6 نتایج محاسبات ارائه شده توسط CPLEX را بر حسب کران بالا (UB)، کران پایین (LB)، خطای نسبی (Gap(%)) و زمان محاسباتی (زمان (s)) ارائه می­کند. برای رویکردهای SA، مقدار تابع هدف (Obj)، خطای نسبی و متوسط زمان محاسباتی (زمان (s)) گزارش می­شوند.

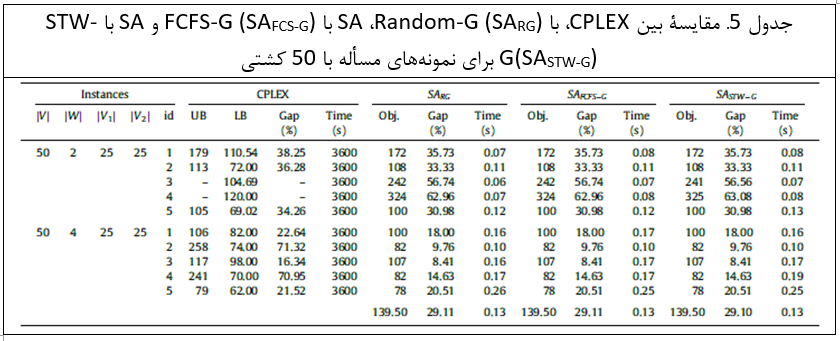
نتایج نشان داده شده در جدول (3)، نشان می­دهد که برای نمونۀ CPLEX، SARG و SASTW-G عملکرد مشابهی را برحسب مقدار تابع هدف نشان می­دهند. در این راستا، SA استفاده شده در FCFS-G به عنوان روش مقدار دهی اولیه، برای رسیدن به جواب در دسترس نیست. علاوه بر این، در این نمونه­ها که CPLEX قادر به حل آن­ها به صورت بهینه (304-4 و 304-5) 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، مجموعه­ی از نمونه­ها با در نظر گرفتن 60 کشتی ارائه نمی­کند. این مورد هم چنین اغلب کمتر برای SAFCFS اتفاق می­افتد. به علاوه، باید توجه شود که SARG و SASTW-G عملکرد مشابهی را نشان می­دهند. در این حالت، SASTW-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 ارائۀ جواب بهینه نیاز دارد. SARG و SASTW-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 براین، استراتژی­های متداول صف مانندFCFS-G (GapFCFS(%)) و STW-G (GapSTW(%)) نسبت به مقادیر میانگین توسط SARG و SASTW محاسبه می­شوند. منطق پشت این مورد، مقایسۀ 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، ارائۀ می­شود.

علاوه بر این، SARG و SASTW عملکرد مشابهیرا نسبت به میانگین، بر حسب بهترین جواب ارائه شده برای کوچکترین نمونه (جدول 7 را ببینید) نشان می­دهند. باید نشان دهد که زمانی که اندازۀ سناریوها افزایش می­یابد، از نظر کیفیت جواب­های ارائه شده توسط SASTW کمی بهتر می­شود (جدول 8 را ببینید). علاوه براین، SASTW استواری بهتری را به وسیلۀ 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، SASTW 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 برمبنای سیاست­های صف؛ اثرات کلی مثبتی برحسب مجاز دانستن عملیات مداوم­تر، کاهش ساطع شدن گازهای گلخانه­ای در ذخیرۀ سوخت کشتی­ها و در نتیجه زمان انتظار کوتاه­تر و جایز دانستن بیشتر رقابت­های فزاینده و مؤثر چندین کشتی دارد.

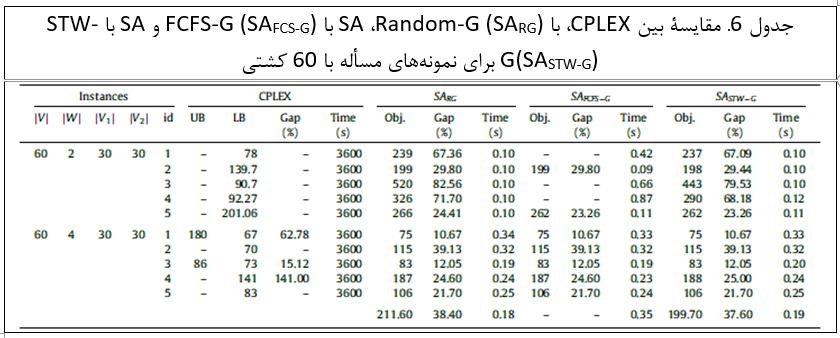
علاوه براین، زمانی که SA با در نظر گرفتن الگوریتم­های ابتکاری با استفاده از سیاست­های سنتی مطالعه می­شود، به طور خاص با دانستن سیاست FCFS، SA قادر است تا در بهترین حالت جواب 26.86 درصد را نسبت به FCFS-G و 60 درصد بهتر از STW-G با زمان1 ثانیه ارائه کند. این درصد بهبودها زمان انتظار غیرضروری را با دربرگرفتن هزینه­های سوخت، گازهای گلخانه­ای و زمان معمول مسیر تجاری و ... در نظر می­گیرند. در این زمینه، به وسیلۀ 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.







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 CO2 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 SASTW نسبت به SARG با مقدار تابع هدف نشان داده می­شود. همان طور که می­توان بررسی کرد، در تمام موارد SASTW جواب­های با حداقل همان کیفیت بر روی میانگیننسبت به SARG 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، SAFCFS-G 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.



**6. نتیجه¬گیری و تحقیق بیشتر**

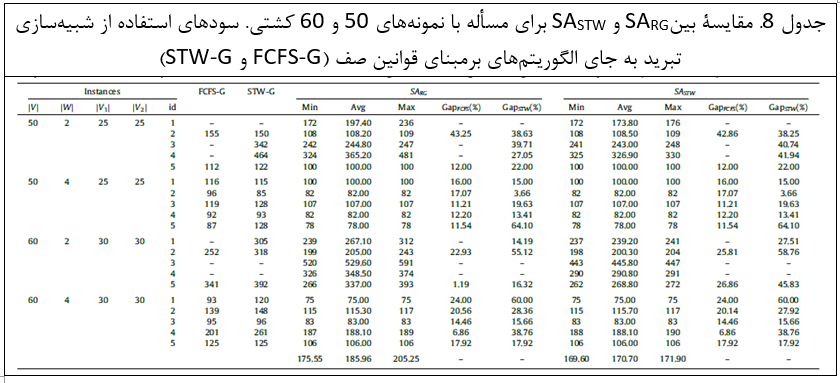
در این کار، مسألۀ برنامه­ریزی زمانی آبراه کشتی (WSSP) را با هدف برنامه­ریزی رفت و آمد کشتی در طول آبراه ارائه می­کنیم. در پرتو تجزیه و تحلیل ارائه شده، در می­یابیم که حل این مسأله می­تواند راه حل برنده- برنده منجر شود که زمان انتظار کشتی­ها را کاهش دهد و منجر به صرفه­جویی اقتصادی، عملیاتی و زیست محیطی 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 برنامۀ CPLEX حل می­نماییم. به علاوه، چون این فرمول­بندی برای جواب شدنی با محدودیت زمانی منطقی برای تعدادی از سناریوها در دسترس نیست، الگوریتم ابتکاری حریصانه برمبنای استفاده از قوانین صف مانند الگوریتم تبرید شبیه­سازی شده (SA) پیشنهاد می­شود. به منظور ارزیابی عملکردشان، یک مجموعۀ معیار برای مسائل واقعی از دهانۀ یانگ تسه در نظر گرفته می­شود.

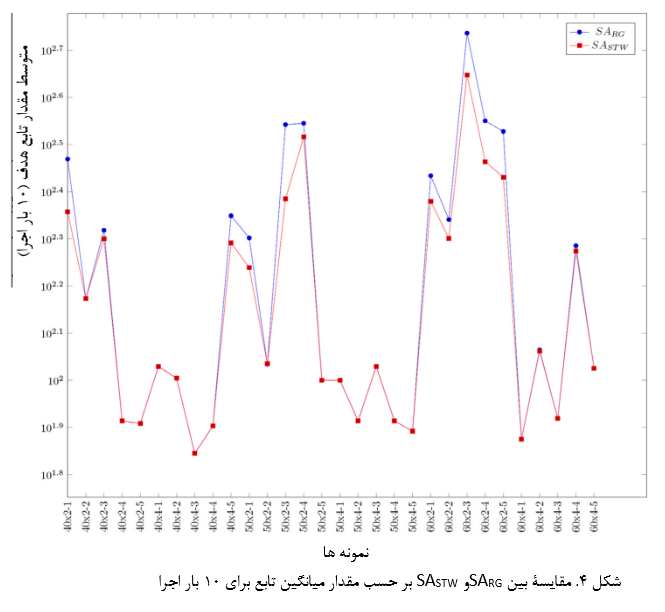
از آزمایش­های محاسباتی انجام شده در این مقاله، می­توان استنباط کرد که این مسأله برای حل حتی برای مسأله با اندازۀ کوچک با استفاده از حل کلی پیشنهاد شده نیز مشکل است. با این وجود، رویکردهای SA در این کار پیشنهاد می­شود که قادر است جواب­های با کیفیت بالا در زمان کوتاه محاسباتی ارائه دهد. بررسی­های تجربی هم چنین نشان می­دهد که رویکردهای SA برای مسائل استفاده شدۀ 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 سویی 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، مقایسۀ 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 برنامۀ 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 دامنۀ بازۀ زمانی ممکن بر بقیۀ 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 استفاد 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 نگه 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، مرحلۀ 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 ارائۀ 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.

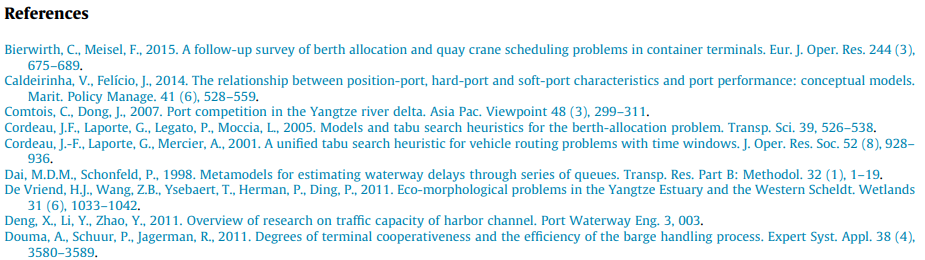


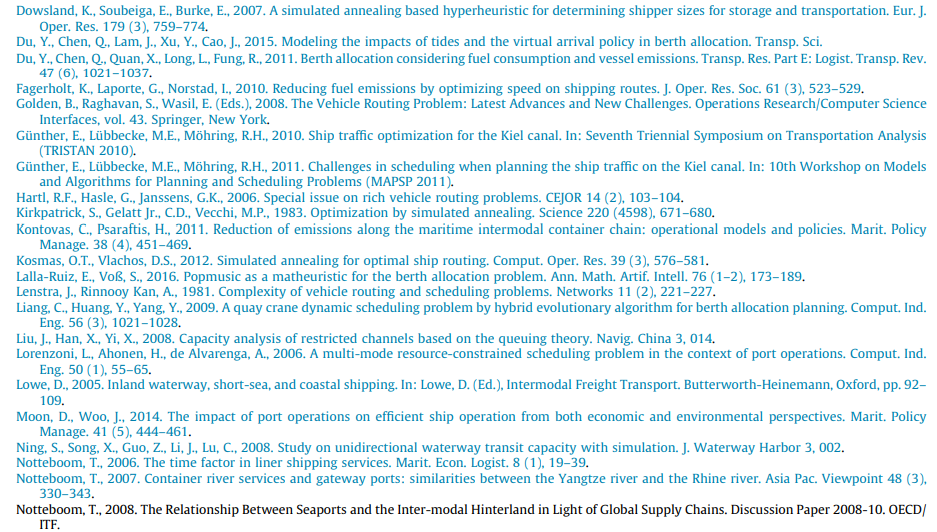


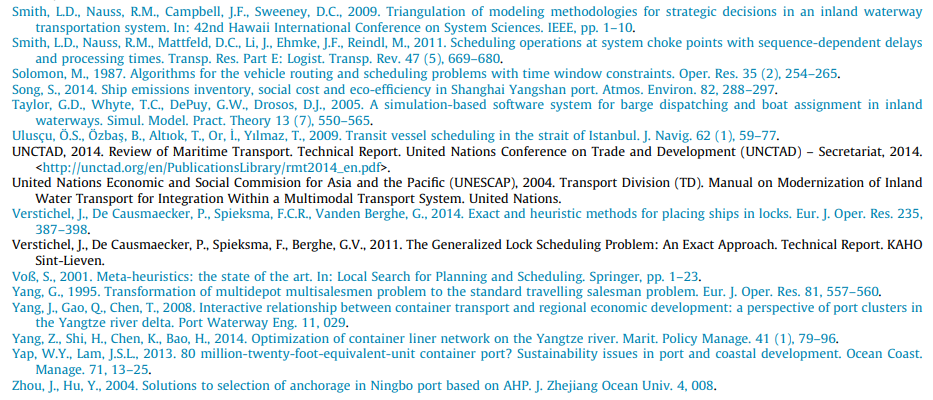
****

**سپاسگزاری­ها**

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







1. - قسمتی از کشتی که زیر آب است [↑](#footnote-ref-1)