

برنامه‌ریزی تخصیص پهلوگاه در پایانه کانتینری بندر شهید رجایی

علی داداشی^{۱*}، عبدالرضا شیخ‌الاسلامی^۱، عرفان بابایی تیرکلایی^۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۱۲

*نویسنده مسئول

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۲

© نشریه صنعت حمل‌ونقل دریایی ۱۳۹۵، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه صنعت حمل‌ونقل دریایی است.

چکیده:

پایانه‌های کانتینری مکان‌هایی هستند که در آن، محموله‌ها با استفاده از تجهیزات خاص از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر منتقل می‌شوند. یکی از مهم‌ترین مسائل در برنامه‌ریزی عملیات ساحلی در پایانه‌های کانتینری، مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه است، طوری که برنامه پهلودهی کشتی‌ها تأثیر بسزایی در برنامه‌های جرثقیل‌ها، محوطه، انبار و مسیربایی کامیون‌ها دارد. در این پژوهش یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط به منظور برنامه‌ریزی پهلوگاه با رویکرد مرکب و بازمان ورود دینامیک که قادر به برنامه‌ریزی هم‌زمان چند پایانه در یک بندر می‌باشد، پیشنهاد شده است. برای ارزیابی مدل پیشنهادی ابتدا نتایج وضع موجود عملیات تخلیه و بارگیری بندر شهید رجایی با نتایج حاصل از مدل پیشنهادی مقایسه شده است. نتایج نشان داده‌اند مدل پیشنهادی به‌طور متوسط باعث کاهش ۵۰ درصدی مقدار تأخیر خروج کشتی‌ها در بندر کانتینری می‌شود. به منظور ارزیابی مدل ارائه‌شده در این پژوهش، در یک آزمایش دیگر، به مقایسه این مدل با مدل گسسته پیشنهادی موجود در ادبیات موضوع پرداخته شده است. نتایج نشان داده‌اند مدل پیشنهادی می‌تواند مقدار تأخیر خروج کشتی‌ها را به مقدار فراوانی در مقایسه با مدل گسسته مذکور کاهش دهد. در نتیجه بندر موردنظر می‌تواند با افزایش جلب رضایت شرکت‌های کشتیرانی در رقابت با بنادر نزدیک خود، موفق‌تر عمل نموده و بهره‌وری و سوددهی بالاتری داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: حمل‌ونقل دریایی، برنامه‌ریزی پهلوگاه، تخصیص پهلوگاه، پایانه کانتینری

۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، گروه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه علم و صنعت ایران، Sheikh@Iust.ac.ir

۲ دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، E.babae@In.iut.ac.ir

۱- مقدمه

حمل و نقل دریایی، اسکلت و موتور کلیدی تجارت بین‌المللی است به طوری که حدود ۸۰٪ تجارت بین‌المللی کالا از نظر حجم و ۷۰٪ از نظر ارزش بولی توسط کشتی از طریق دریا و راه‌های آبی جابه‌جا می‌شوند. این سهم برای کشورهای در حال توسعه بیشتر از کشورهای توسعه یافته است (آنکتاد، ۲۰۱۲). از بین تمامی زیرساخت‌های مورد نیاز، بنادر و پایانه‌های کانتینری نقش مهم‌تری را ایفا می‌کنند. پایانه‌های کانتینری مکان‌هایی هستند که در آن، محموله‌ها با استفاده از تجهیزات خاص از نقطه‌ای به نقطه دیگر منتقل می‌شوند، در این‌گونه پایانه‌ها عملیات مختلفی از جمله پهلوگیری کشتی‌ها و تخلیه و بارگیری آنها انجام می‌شود که چگونگی انجام این عملیات در قالب مسائل گوناگونی از جمله مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. از بین تمامی منابع پایانه‌ها، پهلوگاه‌ها نقش بسیار مهمی را دارا می‌باشند، به طوری که برنامه پهلودهی کشتی‌ها تأثیر بسزایی در برنامه‌های جرثقیل‌ها، محوطه، انبار و مسیریابی کامیون‌ها دارد (دئو و همکاران، ۲۰۱۱). برنامه‌ریزی صحیح پهلوگیری کشتی‌ها می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش زمان حضور کشتی‌ها در بندر و استفاده حداکثری از منابع پایانه‌ای داشته باشد که این امر باعث افزایش تعداد کانتینرهای جابجا شده در واحد زمان می‌شود. در نتیجه بندر مورد نظر می‌تواند با افزایش جلب رضایت شرکت‌های کشتیرانی در رقابت با بنادر نزدیک خود، موفق‌تر عمل نموده و بهره‌وری و سوددهی بالاتری داشته باشد (دئو و همکاران، ۲۰۱۱). مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه^۱ (BSP) یا مسئله تخصیص پهلوگاه^۲ (BAP) عبارت است از تعیین فضا، زمان شروع و زمان پایان پهلوگیری هر کشتی که وارد پایانه می‌شود، کشتی‌ها معمولاً در طول زمان می‌رسند و اپراتورهای پایانه‌ها نیاز دارند هرچه سریع‌تر به هر کشتی فضای از اسکله را اختصاص دهند (تئوفانیس و همکاران، ۲۰۰۹). مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه دارای سه سطح عملیاتی و کنترلی می‌باشد که عبارت‌اند از: سطوح استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی. در سطح استراتژیک، تعداد و طول پهلوگاه‌ها و اسکله‌هایی که در بندر باید در دسترس باشند مشخص می‌شوند. این سطح معمولاً در زمان ساخت و توسعه بندر در نظر گرفته می‌شود. در سطح تاکتیکی، تصمیم‌های میان‌مدت گرفته می‌شود، برای مثال اختصاص ویژه گروهی از پهلوگاه‌ها به کشتی‌های مشخص. در سطح عملیاتی نیز، تخصیص فضای اسکله به یک سری از کشتی‌هایی که می‌خواهند در یک بازه زمانی مشخص در بندر مربوطه پهلو بگیرند. این بازه زمانی معمولاً بیشتر از ۷ تا ۱۰ روز نیست. در سطح عملیاتی مسئله BAP معمولاً به صورت یک مسئله بهینه‌سازی فرموله می‌شود، بعد از حل مسئله، نتایج برنامه‌ریزی به صورت نمودار فضا-زمان ارائه می‌شود (تئوفانیس و همکاران، ۲۰۰۹).

پارامترها و محدودیت‌های متعددی در این مسئله نقش دارند که تفاوت مدل‌های ارائه شده در واقع تفاوت فرضیاتی است که بر روی پارامترها و محدودیت‌های مسئله در نظر گرفته شدند. بیروث و میسل (۲۰۰۹) بر اساس تفاوت فرضیات در محدودیت‌های مکانی و محدودیت‌های زمانی پژوهش‌های موجود در ادبیات این مسئله را طبقه‌بندی کردند.

محدودیت‌های زمانی محدودیت‌هایی هستند که به زمان ورود کشتی‌ها مربوط و به دودسته زمان ورود استاتیک و زمان ورود دینامیک تقسیم می‌شوند. در زمان ورود استاتیک فرض می‌شود در ابتدای افق زمانی تمامی کشتی‌ها در بندر وجود دارند. در زمان ورود دینامیک فرض می‌شود که کشتی‌ها به مرور زمان وارد بندر می‌شوند و در ابتدای افق زمانی لزوماً در بندر وجود ندارند.

محدودیت‌های مکانی موقعیت‌های پهلوگیری عملی کشتی‌ها را با توجه به تقسیم‌بندی از پیش تعیین شده اسکله^۳ به پهلوگاه‌ها محدود می‌کنند. محدودیت‌های مکانی به سه دسته گسسته، پیوسته و مرکب تقسیم می‌شوند. در رویکرد گسسته، اسکله‌ی اصلی به پهلوگاه‌های مجزایی تفکیک می‌شود. در هر پهلوگاه و در زمان واحد تنها یک کشتی می‌تواند مورد سرویس‌دهی قرار گیرد. در رویکرد پیوسته، هیچ تقسیم‌بندی در اسکله اصلی صورت نمی‌گیرد یعنی کشتی‌ها می‌توانند در موقعیت‌های دلخواه در طول اسکله پهلوگیری نمایند. در رویکرد مرکب نیز مانند رویکرد گسسته، اسکله اصلی به پهلوگاه‌هایی تقسیم می‌شود، با این تفاوت که کشتی‌های بزرگ می‌توانند بیش از یک پهلوگاه را اشغال نمایند یا کشتی‌های کوچک می‌توانند یک پهلوگاه را به اشتراک گذارند.

۱-۱- ادبیات تحقیق

ایمای و همکاران (۲۰۰۱)، مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه را علاوه بر حالت استاتیک، در حالت دینامیک نیز فرمول‌بندی کردند. در حالت استاتیک، با توجه به افق برنامه‌ریزی مدل‌ها، تعداد بسیار زیادی متغیر تصمیم وجود داشت. این مدل به گونه‌ای در نظر گرفته شد که خدمت‌دهی کشتی‌ها به صورت متوالی و پی‌درپی،

¹ Berth Scheduling Problem

² Berth allocation problem

³ Quay

⁴ Berth

بدون وقفه انتقال کشتی به اسکله دیگر انجام شود. با ارضاء این محدودیت، مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه در حالت استاتیک به صورت مسئله سه‌بعدی عدد صحیح فرمول‌بندی شد. کوردنو و همکاران (۲۰۰۵) از روش مسئله مسیریابی وسایط نقلیه با پنجره زمانی برای مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه در دو حالت گسسته و پیوسته با فرض زمان رسیدن دینامیک استفاده کردند و همچنین دو الگوریتم جستجوی ممنوعه^۱ برای حل هر یک از مدل‌ها ارائه دادند. هنس و همکاران (۲۰۰۸)، مدلی برای مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه در حالت گسسته و با فرض زمان رسیدن دینامیک و با هدف حداقل نمودن مجموع هزینه‌های حضور کشتی در بندر ارائه کردند. از سه الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک، ممتیک^۲ و جستجوی همسایگی متغیر^۳ برای حل استفاده شده است و نتایج باهم مقایسه شدند، نتایج نشان داد الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر بر الگوریتم‌های دیگر برتری دارد. بورکال و همکاران (۲۰۱۱)، پنج مدل گسسته و دینامیک برنامه‌ریزی پهلوگاه را مرور و مقایسه کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که روش کوردنو و همکاران (۲۰۰۵) با ارتقا به وجود آمده از دید محاسباتی دارای برتری قابل توجهی نسبت به روش‌های دیگر بوده و در همه نمونه‌ها نسبت به روش‌های دیگر در زمان کمتری به جواب رسیده است. گلیاس و همکاران (۲۰۰۹)، یک مدل جدید دینامیک و گسسته و چند هدف ارائه دادند، در این پژوهش کشتی‌ها در گروه‌های متفاوتی بر اساس نوع اولویت تقسیم‌شده‌اند که زمان سرویس (حداکثر رضایت مشتریان) هر گروه به صورت یک هدف مجزا همراه با زمان سرویس کل کشتی‌ها کمینه می‌گردد. به عنوان مثال اگر کشتی‌ها بر اساس اولویت به سه گروه تقسیم شوند مسئله تبدیل به یک مدل با چهار هدف می‌شود که سه هدف مربوط به کمینه کردن زمان سرویس هر یک از گروه‌ها و هدف چهارم مربوط به کمینه کردن زمان سرویس کل کشتی‌ها می‌باشد. برای حل مسئله یک الگوریتم ابتکاری بر پایه الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شد، همچنین نشان داده شده است که الگوریتم پیشنهادی توانایی حل نمونه‌های بزرگ را نیز دارد.

لی و همکاران (۱۹۹۸)، از روش برنامه‌ریزی ماشین با الگوی چند کار روی یک پردازنده^۴، برای مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه در حالت پیوسته استفاده کردند، این روش به آنها اجازه می‌داد که از الگوریتم اولین برازش کاهنده^۵ که در مسئله بسته‌بندی صندوق بسیار مشهور است، استفاده کنند. لیم (۱۹۹۸) ابتدا مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه را در حالت پیوسته فرمول‌بندی کرد و نشان داد که مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه، یک مسئله NP-hard بوده و به سادگی قابل حل نیست. زمان رسیدن کشتی‌ها دینامیک فرض شد و زمان پهلوگیری کشتی‌ها برابر با زمان رسیدن آنها فرض شده و تنها موقعیت مکانی آنها به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. کیم و مون (۲۰۰۳) یک مدل خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه در حالت پیوسته و دینامیک ارائه دادند. آنها نشان دادند در عمل استفاده از نرم‌افزار تجاری لیندو برای حل مسائل بزرگ زمان‌بر است، در نتیجه الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده را پیشنهاد دادند. مدل آنها در ادبیات برنامه‌ریزی پهلوگاه به عنوان مدل پایه در کارهایی چون دو و همکاران (۲۰۱۲) و ژو و همکاران (۲۰۱۲) به کار گرفته شده است.

برنامه‌ریزی مرکب پهلوگاه با زمان تخلیه و بارگیری ثابت توسط مورسی و تتو (۲۰۰۶)، دایی و همکاران (۲۰۰۸) و چن و هسیه (۱۹۹۹) مورد مطالعه قرار گرفت. در پژوهش مورسی و همکاران (۲۰۰۶) نواحی پهلوگیری کشتی‌ها در یک سطح تاکتیکی معین شده‌اند. در این پژوهش فضای هر اسکله را در طول اسکله پیوسته و هر اسکله را نسبت به اسکله دیگر گسسته در نظر گرفته شد. مدل مرکب پیشنهادی آنها یک مدل غیرخطی و هدف آن دستیابی به برنامه‌ریزی استوار با توجه توزیع‌های احتمالی زمان ورود کشتی‌ها و زمان تخلیه بارگیری بوده است. ایمای و همکاران (۲۰۰۷) استفاده بهینه از ظرفیت خدمات خطوط کانتینری برای کشتی‌های عظیم در بنادر ژاپن را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه در حالت گسسته که در آن اجازه داده می‌شود دو کشتی به صورت هم‌زمان در یک پهلوگاه پهلوگیری نمایند مورد بررسی قرار گرفت که در واقع حالت مرکب را در برنامه‌ریزی پهلوگاه تداعی می‌نماید. یومانگ و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل مرکب به منظور برنامه‌ریزی پهلوگاه در پایانه‌ی فله ارائه دادند. در مدل پیشنهادی این پژوهش اسکله‌ها نسبت به هم گسسته در نظر گرفته شده‌اند و هر کشتی می‌تواند بیش از یک اسکله را اشغال کند. در ادامه، آنها دو روش حل دقیق و یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله پیشنهاد دادند.

صفازاده و ابراهیم‌نژاد (۱۳۷۹) افزایش بهره‌وری بنادر را از دیدگاه تخصیص اسکله، تجهیزات و اماکن بندری به روش‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح و جستجوی جهت‌دار مورد بررسی قرار داده و با استفاده از یک روش ابتکاری مدل بهینه تخصیص منابع را برای یک مسئله فرضی با حجم کم ارائه نمودند. نجفی و صفازاده (۱۳۸۵) با بهره‌گیری از تئوری صف، طول و تعداد اسکله‌های مورد نیاز بندر شهید رجایی را با در نظر گرفتن سال ۱۳۹۴ به عنوان افق طرح برآورد نمودند. در این پژوهش ابتدا تئوری صف مناسب برای شرایط موجود بندر شهید رجایی با استفاده از اطلاعات سال ۱۳۸۳ تعیین شد و سپس با استفاده از آن، تعداد

¹ Tabu Search

² Memetic Algorithm

³ Variable Neighborhood Search

⁴ multiple-job-on-one-processor

⁵ First Fit Decreasing

اسکله‌های مورد نیاز تعیین شدند. شیخ‌الاسلامی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی ساختار پایانه‌های کانتینری و تشریح و طبقه‌بندی انواع تجهیزات به کار گرفته در پایانه‌های کانتینری پرداختند. در این پژوهش همچنین به مرور آثار و ادبیات مربوط به برنامه‌ریزی تخصیص پهلوگاه و مسائل دیگر پایانه‌های کانتینری پرداخته شده است. فرتاش و شیخ‌الاسلامی (۱۳۹۱) در مقاله خود یک مدل مرکب برنامه‌ریزی پهلوگاه برای بندر شهید رجایی پیشنهاد دادند. مدل مذکور قادر به برنامه‌ریزی هم‌زمان دو پایانه بندر شهید رجایی بوده، در این پژوهش فضای هر اسکله را در طول اسکله پیوسته و هر اسکله را نسبت به اسکله دیگر گسسته در نظر گرفته شد. مدل پیشنهادی فرتاش در سال ۱۳۹۱ یک مدل غیرخطی بوده است. برای حل مسئله نیز از یک الگوریتم فرا ابتکاری بر پایه الگوریتم جستجوی میله‌ای^۱ پیشنهاد شد.

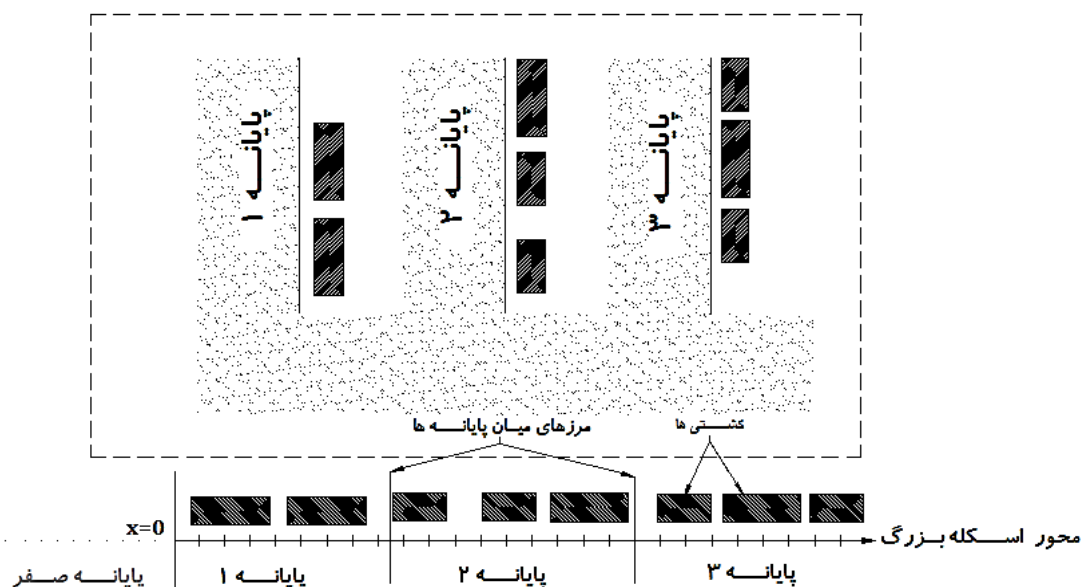
هدف این پژوهش ارائه یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط جهت برنامه‌ریزی دینامیک و هم‌زمان چند پایانه، به طوری که اسکله هر پایانه در طول خود به صورت پیوسته و هر پایانه از پایانه دیگر به صورت گسسته در نظر گرفته شده باشد. بنا به دانش نگارندگان، در ادبیات مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه، مدل مرکب این پژوهش اولین مدل مرکبی (پیوسته-گسسته) است که ضمن در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به عمق آب‌خور اسکله‌ها، خطی بودن مدل ریاضی برنامه‌ریزی پهلوگاه را نیز حفظ می‌کند.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش فرض شده است کشتی‌ها در طول زمان وارد بندر می‌شوند و باید به محض رسیدن در زودترین زمان ممکن پهلو داده شوند؛ بنابراین اولین فرض، دینامیک بودن زمان ورود کشتی‌ها می‌باشد، چراکه در واقعیت هم همین‌گونه است. فرض بعدی در مورد نحوه برخورد با منابع پهلوگاهی می‌باشد. از بین دو نوع رویکرد گسسته و پیوسته، رویکرد پیوسته باعث بهره‌وری بیشتر از منابع پهلوگاهی می‌شود و همچنین موجب درگیری منابع بیشتری از اسکله در مقایسه با رویکرد گسسته می‌شود؛ بنابراین در این پژوهش ترجیح داده شد از رویکرد پیوسته استفاده شود؛ اما از آنجایی که بندر مورد مطالعه شامل دو پایانه‌ی جدا از هم می‌شود، برای برنامه‌ریزی هم‌زمان پهلوگاه‌های دو پایانه، به طوری که فضای اسکله‌ی هر پایانه به صورت پیوسته در نظر گرفته شود نیاز به یک رویکرد مرکب برای برخورد با محدودیت مکانی مربوط به فضای اسکله می‌باشد. در این پژوهش برای برنامه‌ریزی یک پایانه به صورت تنها، از مدل کیم و مون (۲۰۰۳) با کمی تغییر، به عنوان مدل پایه استفاده شد و برای برنامه‌ریزی هم‌زمان چند پایانه، این مدل گسترش داده می‌شود. کیم و مون (۲۰۰۳) یک مدل دینامیک و پیوسته برای برنامه‌ریزی پهلوگاه ارائه دادند، آنها فرض کردند که: هیچ‌گونه عدم قطعیتی در زمان ورود و زمان تخلیه و بارگیری کشتی‌ها وجود ندارد، در ابتدای افق زمانی هیچ کشتی در پایانه وجود ندارد و طول هر کشتی شامل طول واقعی آن کشتی به اضافه یک فاصله ایمن برای پهلوگیری در نظر گرفته شده است.

مدل کیم و مون (۲۰۰۳) قادر به برنامه‌ریزی هم‌زمان چند پایانه جدا از هم نمی‌باشد. از آنجایی که بندر کانتینری شهید رجایی شامل دو پایانه جدا از هم است، برای توسعه مدل آنها از رویکرد پیوسته به رویکرد مرکب به منظور برنامه‌ریزی هم‌زمان چند پایانه فرض‌هایی صورت گرفته است. همان‌طور که گفته شد، در مسئله مربوط به مطالعه موردی، پایانه‌ها جدا از هم باید هم‌زمان برنامه‌ریزی شوند، برای توسعه مدل ابتدا فرض می‌شود پایانه‌ها به هم چسبیده هستند، بنابراین یک اسکله بزرگ فرضی شامل چند پایانه چسبیده به هم موجود است. برای هر نقطه موجود در اسکله بزرگ فرضی یک مختصات در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است در مرزهای بین پایانه‌های موجود در اسکله بزرگ فرضی، موانع فرضی قرار دارند. این موانع باعث می‌شوند که هر کشتی فقط در یک پایانه جای بگیرد. همچنین جهت سهولت مدل‌سازی و خطی شدن مدل، یک پایانه فرضی با طول صفر و به نام پایانه صفر فرض شده است (شکل ۱). این پایانه وجود خارجی ندارد و فقط برای سهولت در مدل‌سازی فرض شده است. مورد دیگری که در این پژوهش در نظر گرفته شده است تفاوت عمق پایانه‌هاست. برای هر پایانه یک عمق در نظر گرفته شده است که در طول اسکله، آن پایانه ثابت در نظر گرفته می‌شود. ناگفته نماند در صورت تفاوت عمق در طول اسکله هر پایانه، آن پایانه را به چند قسمت بر اساس اختلاف در عمق تقسیم نمود و هر قسمت را یک پایانه مستقل در نظر گرفت. در ادامه ابتدا به معرفی نمایه‌های استفاده شده در مدل ریاضی پرداخته شده است و سپس مدل ریاضی ارائه شده است.

¹ Beam Search



شکل (۱): نمایش شماتیک برنامه ریزی هم‌زمان چند پایانه جدا از هم

۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

۳-۱- تعریف مسئله

ابتدا نمادهای ریاضی و پارامترها و متغیرها تعریف شده و سپس فرمولاسیون ریاضی مدل مسئله ارائه می‌گردد. تابع هدف (۱) مسئله کمینه کردن تأخیر خروج کل کشتی‌ها میباشد. مجموعه محدودیت‌های (۲) تا (۴) تضمین می‌کنند که هیچ‌گونه تداخلی در منحنی فضا- زمان برنامه‌ریزی پهلوگاه وجود ندارد. مجموعه محدودیت‌های (۵) تضمین می‌کنند که هیچ کشتی قبل از ورود به بندر، پهلو داده نمی‌شود. در واقع ابتدا کشتی باید وارد بندر شود سپس پهلو گیرد. مجموعه محدودیت‌های (۶) تضمین می‌کنند که هر کشتی فقط در یک پایانه پهلو داده می‌شود. مجموعه محدودیت‌های (۷) و (۸) تضمین می‌کنند که طول یک کشتی کاملاً در یک پایانه واقع شود، به عبارت دیگر اگر پاشنه کشتی i در پایانه k واقع شد حتماً سر کشتی i نیز در پایانه k واقع شود. مجموعه محدودیت‌های (۹) تضمین می‌کنند که عمق آب‌خور هیچ کشتی بیشتر از عمق پایانه‌ای که در آن پهلو داده می‌شود نباشد. مجموعه محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۲) فضای مجاز برای جواب‌ها را مشخص می‌کنند.

مجموعه‌ها	
مجموعه کشتی‌ها	$V: \{1, 2, \dots, n\}$
مجموعه پایانه‌ها	$Q = \{0, 1, 2, \dots, P\}$
پارامترها:	
زمان تخمینی ورود کشتی i	a_i
زمان خروج قراردادی کشتی i	R_i
زمان تخمینی تخلیه و بارگیری کشتی i	h_i
طول کشتی i این طول شامل فاصله ایمن کشتی برای پهلوگیری نیز می‌باشد	l_i
یک عدد بسیار بزرگ	M
عمق پایانه k	D_k
مختصات نقطه‌ی پایانی پایانه k	L_k
عمق آب‌خور کشتی i	d_i
متغیرهای تصمیم:	
زمان پهلوگیری کشتی i	y_i
مکان پهلوگیری کشتی i	x_i
متغیر صفر/یک، اگر کشتی i در پایانه k پهلو گیرد یک، در غیر این صورت صفر	δ_{ik}
اگر کشتی i قبل از کشتی j پهلو بگیرد یک، در غیر این صورت صفر	α_{ij}
اگر کشتی i در سمت چپ کشتی j پهلو بگیرد یک، در غیر این صورت صفر	β_{ij}
$\text{Minf} = \sum_{i \in V} (y_i + h_i - R_i) \quad (1)$	
Subject to	
$y_i + h_i \leq y_j + M(1 - \alpha_{ij})$	$\forall i, j \in V, i \neq j \quad (2)$
$x_i + l_i \leq x_j + M(1 - \beta_{ij})$	$\forall i, j \in V, i \neq j \quad (3)$
$\beta_{ij} + \beta_{ji} + \alpha_{ij} + \alpha_{ji} \geq 1$	$\forall i, j \in V, i \neq j \quad (4)$
$y_i \geq a_i$	$\forall i \in V \quad (5)$
$\sum_{k \in Q} \delta_{ik} = 1$	$\forall i \in V \quad (6)$
$x_i \geq (\delta_{ik}) \times L_{k-1}$	$\forall i \in V, \forall k \in Q, k > 0 \quad (7)$
$x_i + l_i \leq \sum_{k \in Q} \delta_{ik} \times L_k$	$\forall i \in V \quad (8)$
$(d_i - D_k) \times \delta_{ik} \leq 0$	$\forall i \in V, \forall k \in Q \quad (9)$
$\delta_{ik} \in \{0, 1\}$	$\forall i \in V, \forall k \in Q \quad (10)$
$x_i \geq 0$	$\forall i \in V \quad (11)$
$\beta_{ij}, \alpha_{ij} \in \{0, 1\}$	$\forall i, j \in V, i \neq j \quad (12)$

۳-۲- نتایج محاسباتی

مورد مطالعاتی این پژوهش بندر کانتینری شهید رجایی است. مسئله پیش روی ما، یک مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط بوده که به راحتی می‌توان از طریق روش‌های دقیق برای افق زمانی یک‌هفته‌ای به حل مسئله پرداخت و اعتبارسنجی و صحت‌گذاری آن را مورد بررسی قرار داد. از همین رو،

به منظور ارزیابی مدل پیشنهادی از داده‌های ثبت شده در عملیات تخلیه و بارگیری مربوط به پایانه‌های کانتینری بندر شهید رجایی استفاده شده است. در این مجموعه داده‌ها، داده‌های مربوط به زمان ورود پیش‌بینی شده، زمان ورود واقعی، زمان پهلوگیری، زمان شروع عملیات تخلیه و بارگیری، زمان اتمام تخلیه و بارگیری، زمان خروج کشتی‌ها و حجم عملیات تخلیه و بارگیری هر کشتی به تفکیک وجود دارند. بنابراین مدل در نرم‌افزار GAMS کد نویسی و توسط حل کننده CPLEX اجرا شد، نتایج و خروجی‌های حاصل از این حل کننده مورد بررسی قرار گرفت که هم از لحاظ روابط ریاضی و جواب منطقی درست بوده است.

به منظور ارزیابی تأثیر مدل پیشنهادی در کاهش تأخیر خروج کشتی‌ها در این بخش، نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با نتایج ثبت شده عملیات تخلیه و بارگیری بندر کانتینری شهید رجایی مقایسه می‌شود. بدین منظور ۲۶ نمونه به صورت تصادفی از مجموعه داده‌های تخلیه و بارگیری بندر کانتینری شهید رجایی انتخاب شده است. نمونه‌ها از لحاظ تقاضا به سه دسته، تقاضای کم (با اندازه نمونه کمتر از ۲۰ کشتی، نمونه‌های L1 تا L8)، متوسط (با اندازه نمونه بین ۲۰ تا ۳۰ کشتی، نمونه‌های M1 تا M9) و زیاد (با اندازه نمونه بیشتر از ۳۰ کشتی، نمونه‌های H1 تا H9) تقسیم شده‌اند.

همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده است مدل پیشنهادی به طور قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش تأخیر خروج کشتی‌ها و بهبود عملکرد پایانه‌ها می‌شود. به طوری که مدل پیشنهادی به طور متوسط باعث کاهش ۴۲، ۵۰ و ۵۷ درصدی مقدار تأخیر خروج کشتی‌ها، به ترتیب برای تقاضاهای کم، متوسط و زیاد می‌شود.

جدول (۱): نتایج مقایسه مدل هیبریدی پیشنهادی با وضع موجود بندر کانتینری شهید رجایی

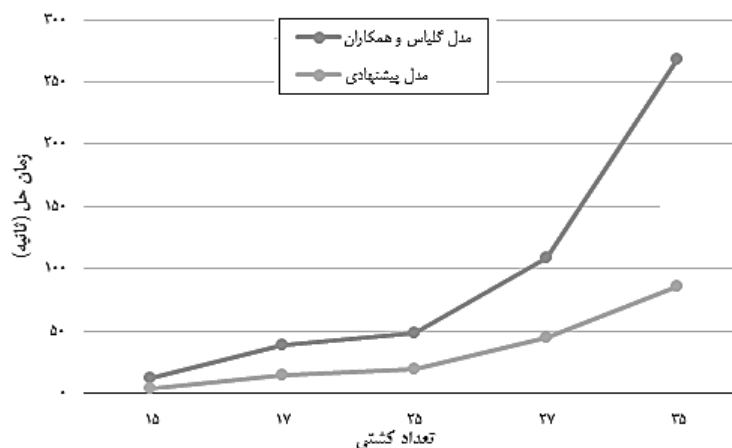
شناسه نمونه	تعداد کشتی	مقدار تأخیر خروج کل (ساعت)		
		وضع موجود	مدل پیشنهادی	درصد بهبود
L ₁	۱۴	۷۵	۵۲	۳۱
L ₂	۱۵	۱۳۱	۶۸	۴۸
L ₃	۱۶	۱۰۹	۶۱	۴۴
L ₄	۱۷	۱۰۷	۷۴	۳۱
L ₅	۱۸	۲۷۵	۱۴۶	۴۷
L ₆	۱۸	۳۰۷	۲۰۷	۳۳
L ₇	۱۹	۱۱۸	۵۶	۵۳
L ₈	۲۰	۱۰۹	۵۴	۵۰
میانگین	-	-	-	۴۲
M ₁	۲۱	۱۲۰	۹۷	۱۹
M ₂	۲۳	۱۸۸	۱۲۶	۳۳
M ₃	۲۳	۲۲۲	۱۴۰	۳۷
M ₄	۲۴	۱۰۲	۶۲	۳۹
M ₅	۲۷	۲۸۴	۹۵	۶۷
M ₆	۲۷	۳۴۷	۱۳۱	۶۲
M ₇	۲۸	۲۲۸	۷۵	۶۷
M ₈	۲۸	۳۵۸	۱۳۲	۶۳
M ₉	۲۹	۲۷۱	۹۲	۶۶
میانگین	-	-	-	۵۰
H ₁	۳۰	۱۸۳	۷۵	۵۹
H ₂	۳۰	۱۳۷	۸۹	۳۵
H ₃	۳۱	۷۹	۴۵	۴۳
H ₄	۳۱	۶۰۹	۳۱۹	۴۸
H ₅	۳۳	۳۵۱	۱۲۹	۶۳
H ₆	۳۵	۶۶۳	۲۲۹	۶۶

H ₇	۳۵	۲۰۶	۸۶	۵۸
H ₈	۳۶	۶۵۴	۲۱۷	۶۷
H ₉	۳۹	۵۹۸	۲۵۲	۵۸
میانگین	-	-	-	۵۷

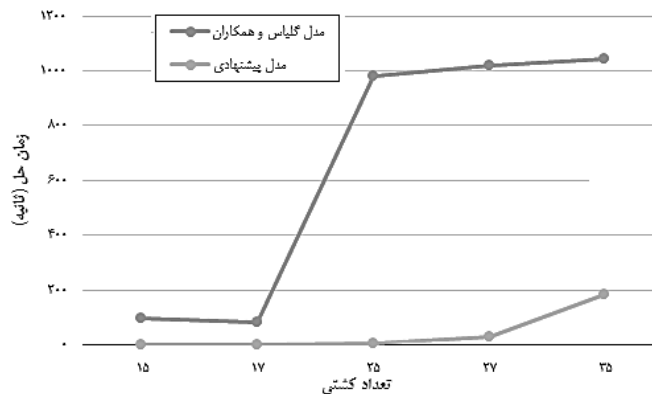
مدل پیشنهادی این پژوهش یک مدل با رویکرد مرکب است که اسکله‌های جدا از هم را به صورت واحدهای گسسته و فضای پهلوگاهی هر اسکله را به صورت پیوسته در نظر می‌گیرد. در بخش قبل ذکر شد که رویکرد پیوسته باعث بهره‌وری بیشتر از منابع پهلوگاهی می‌شود و همچنین موجب درگیری منابع بیشتری از اسکله در مقایسه با رویکرد گسسته می‌شود. در نتیجه برای ارزیابی مدل ارائه‌شده، در این پژوهش به مقایسه مدل پیشنهادی با یک مدل گسسته موجود در ادبیات مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه پرداخته می‌شود. بدین منظور مدل گسسته پیشنهادی گلیاس و همکاران (۲۰۰۹) انتخاب شده است. علت انتخاب این مدل از بین سایر مدل‌های گسسته موجود در ادبیات این موضوع، شباهت فرضیات اولیه این مدل (زمان ورود دینامیک، امکان خالی در نظر گرفتن بندر در ابتدای افق زمانی و ...) به مدل پیشنهادی ما در این پژوهش و سهولت اعمال محدودیت‌های مربوط به بندر شهید رجایی در این مدل گسسته بوده است. در پژوهش گلیاس و همکاران (۲۰۰۹) کشتی‌ها در گروه‌های متفاوتی بر اساس نوع اولویت تقسیم شده‌اند که زمان سرویس (حداکثر رضایت مشتریان) هر گروه به صورت یک هدف مجزا همراه با زمان سرویس کل کشتی‌ها کمینه می‌گردد. به عنوان مثال اگر کشتی‌ها بر اساس اولویت به سه گروه تقسیم شوند مسئله تبدیل به یک مدل با چهار هدف می‌شود که سه هدف مربوط به کمینه کردن زمان سرویس هر یک از گروه‌ها و هدف چهارم مربوط به کمینه کردن زمان سرویس کل کشتی‌ها می‌باشد. به منظور مقایسه مدل آنها با مدل مرکب پیشنهادی، در شرایط یکسان، توابع هدف مربوط به هر یک از گروه‌ها در مدل گلیاس و همکاران (۲۰۰۹) حذف شده است، در نتیجه مدل آنها تبدیل به یک مدل تک هدف می‌شود. محدودیت مربوط به عمق و طول اسکله نیز به آن اضافه شده است.

جهت صحت‌گذاری بر مدل پیشنهادی یک نمونه آماری ۶ هفته‌ای از کل بازه زمانی در دسترس (۲۰۰۸-۲۰۱۲) به صورت تصادفی انتخاب می‌شود به صورتی که کمترین و بیشترین تعداد کشتی‌ها در نمونه‌ها مشخص شده است. به دلیل وجود روند در میزان اختلاف بین توابع هدف دو مدل به راحتی می‌توان با استفاده از رگرسیون خطی برای هر دو هفته چنین روندی را تخمین زد و نتیجه‌گیری کرد.

نتایج این مقایسه در شکل‌های (۲) و (۳) در غالب نمودار آمده است. در شکل (۲) مقادیر تابع هدف این دو مدل مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش تقاضا مدل این پژوهش نتایج بسیار بهتری نسبت به مدل گلیاس و همکاران (۲۰۰۹) ارائه می‌دهد. این موضوع نشان از برتری مدل مرکب در افزایش رضایت مشتری با کاهش زمان انتظار کشتی‌ها و همچنین سود بیشتر اپراتورهای پایانه‌ها در اثر استفاده مطلوب‌تر از منابع پهلوگاهی نسبت به مدل گسسته گلیاس و همکاران دارد. در شکل (۳) مقادیر زمان حل این دو مدل در شرایط تقاضای متفاوت مقایسه شده که نتایج نشان می‌دهند که مدل این پژوهش، زمان به مراتب کمتری نسبت به مدل گلیاس و همکاران برای حل نیاز دارد.



شکل (۲) مقایسه مقادیر تابع هدف مدل گلیاس و همکاران و مدل پژوهش



شکل (۳) مقایسه مقادیر زمان حل مدل گلیاس و همکاران و مدل پژوهش

۴- نتیجه گیری

هدف اصلی این پژوهش ارائه روشی جهت بهبود عملکرد پایانه‌های کانتینری بندر شهید رجایی بوده است. بدین منظور کاهش تأخیر خروجی کشتی‌ها از بندر به‌عنوان تابع هدف مسئله در نظر گرفته شده است و یک مدل دینامیک و مرکب جهت برنامه‌ریزی هم‌زمان پایانه‌های کانتینری بندر شهید رجایی ارائه شده است. در آزمایش اول برای ارزیابی مدل پیشنهادی نتایج وضع موجود عملیات تخلیه و بارگیری بندر شهید رجایی با نتایج حاصل از مدل پیشنهادی مقایسه شده است. نتایج نشان داده‌اند مدل پیشنهادی به‌طور متوسط باعث کاهش ۴۲، ۵۰ و ۵۷ درصدی مقدار تأخیر خروج کشتی‌ها، به ترتیب برای تقاضاهای کم، متوسط و زیاد می‌شود. در نتیجه بندر موردنظر می‌تواند با افزایش جلب رضایت شرکت‌های کشتیرانی در رقابت با بنادر نزدیک خود، موفق‌تر عمل نموده و بهره‌وری و سوددهی بالاتری داشته باشد.

در آزمایش دوم این پژوهش به‌منظور ارزیابی مدل ارائه‌شده به مقایسه این مدل با یک مدل گسسته موجود در ادبیات مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه پرداخته می‌شود. بدین منظور مدل گسسته پیشنهادی گلیاس و همکاران (۲۰۰۹) انتخاب شده است. طبق مقایسه‌ای که بین مدل پیشنهادی با یک مدل گسسته صورت گرفت، مدل پیشنهادی جواب‌های بسیار بهتری نسبت به مدل گسسته ارائه داده است، این موضوع نشان از برتری مدل مرکب در افزایش رضایت مشتری با کاهش زمان انتظار کشتی‌ها و همچنین سود بیشتر اپراتورهای پایانه‌ها در اثر استفاده مطلوب‌تر از منابع پهلوگاهی نسبت به مدل گسسته گلیاس و همکاران دارد. همچنین زمان حل مدل پیشنهادی به‌مراتب کمتر از زمان حل مدل گسسته بوده است.

پژوهش‌های آینده می‌توانند با در نظر گرفتن هر یک از موارد زیر مدل پیشنهادی ارائه‌شده در این پژوهش را گسترش دهند و به واقعیت نزدیک‌تر کنند. (۱) در نظر گرفتن تأثیر مکان پهلوگیری و برنامه‌ی جرثقیل‌ها بر زمان تخلیه و بارگیری کشتی‌ها، (۲) استفاده از روش‌های اولویت‌دهی به کشتی‌ها به‌منظور در نظر گرفتن اولویت کشتی‌ها بنا به سیاست‌های مسئولان بنادر، (۳) در نظر گرفتن عدم قطعیت در زمان ورود و زمان تخلیه و بارگیری کشتی‌ها و (۴) ارائه مدل برنامه‌ریزی هم‌زمان پهلوگاه و محوطه و یا پهلوگاه و جرثقیل.

مراجع

- ۱- شیخ‌الاسلامی عبدالرضا، ایلاتی غلامرضا، کباری محمد، ۱۳۹۰. "بررسی ساختار پایانه‌های کانتینری دریایی، انواع تجهیزات هندلینگ و سیستم‌های پایانه‌ای متداول در آن‌ها،" فصلنامه دریا و کشتی.
- ۲- صفار زاده محمود، ابراهیم نژاد امیر، ۱۳۷۹. "مدل بهینه تخصیص تجهیزات و امکانات در بنادر" چهارمین کنفرانس بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، ICOPMAS، بندرعباس.
- ۳- فرتاش هما، شیخ‌الاسلامی عبدالرضا، ۱۳۹۱. "تخصیص پهلوگاه در پایانه کانتینری با هدف کاهش زمان حضور کشتی‌ها در بندر با الگوریتم جستجوی میله‌ای (مطالعه موردی: بندر شهید رجایی)" دوازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران.
- 4- UNCTAD. Review of maritime transport 2012. In, New York, New York and Geneva, 2012.
- 5- Bierwirth, C., & Meisel, F. (2010). A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 615-627.
- 6- Buhrkal, K., Zuglian, S., Ropke, S., Larsen, J., Lusby, R. (2011). Models for the discrete berth allocation problem: A computational comparison. *Transportation Research Part E*, 47(4), 461-473.
- 7- Chen, C.-Y., & Hsieh, T.-W. (1999). A time-space network model for the berth allocation problem. Paper presented at the 19th IFIP TC7 conference on system modeling and optimization, Cambridge, England.
- 8- Cordeau, J. F., Laporte, G., Legato, P., & Moccia, L. (2005). Models and tabu search heuristics for the berth allocation problem. *Transportation Science*, 39, 526-538.
- 9- Dai, J., Lin, W., Moorthy, R., & Teo, C.-P. (2008). Berth allocation planning optimization in container terminals Supply chain analysis (pp. 69-104): Springer.
- 10- Du, Y., Chen, Q., Quan, X., Long, L., & Fung, R. Y. (2011). Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 1021-1037.
- 11- Golias MM, B. M., Theofanis S. (2009). Berth scheduling by customer service differentiation: a multiobjective approach. *Transp Res Part E*, 45, 878-892.
- 12- Hansen, P., Oğuz, C., & Mladenović, N. (2008). Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation. *European Journal of Operational Research*, 191(3), 636-649.
- 13- Imai, A., Nishimura, E., & Papadimitriou, S. (2001). The dynamic berth allocation problem for a container port. *Transportation Research. Part B: Methodological*, 35(4), 401-417.
- 14- Imai, A., Nishimura, E., Hattori, M., & Papadimitriou, S. (2007). Berth allocation at indented berths for mega-containerships. *European Journal of Operational Research*, 179(2), 579-593.
- 15- Kim, K., & Moon, K. (2003). Berth scheduling by simulated annealing. *Transportation Research Part B*, 37, 541-560.
- 16- Li, C. L., Cai, X., & Lee, C. Y. (1998). Scheduling with multiple-job-on-one-processor pattern. *IIE Transactions on Scheduling and Logistics*, 30(5), 433-445.
- 17- Lim, A. (1998). The berth planning problem. *Operations Research Letters*, 22(2), 105-110.
- 18- Moorthy, R., & Teo, C. P. (2006). Berth management in container terminal: The template design problem. *OR Spectrum*, 28, 495-518.
- 19- Nitish Umang, M. B., Ilaria Vacca. (2013). Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports. *Transportation Research Part E*, 54, 14-31.
- 20- Theofanis, S., Boile, M., & Golias, M. (2009). Container terminal berth planning. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2100(1), 22-28.
- 21- Xu, Y., Chen, Q., & Quan, X. (2012). Robust berth scheduling with uncertain vessel delay and handling time. *Annals of Operations Research*, 192(1), 123-140.