مدل بومی بهینه‌سازی تخصیص پهلوگاه در پایانه‌های کانتینری (مطالعهٔ موردی: بندر شهید رجایی)

کوروش وکیل منفرد*[1]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۰ *نویسنده مسئول تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۰۶

© نشریهٔ صنعت حمل‌ونقل دریایی ۱۳۹۸، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریهٔ صنعت حمل‌ونقل دریایی است.

چکیده

تأخیر در پهلوگیری و انتظار در بندر یکی از پیامدهای تراکم منفی ترافیک بندری است که از آن می‌توان به عنوان دلیل اصلی نارضایتی مشتریان یک پایانه کانتینری نام برد. مدل ارائه شده در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی دینامیک و گسسته پهلوگاه می‌باشد که علاوه بر در نظر گرفتن محدودیت‌های مختص بندر شهیدرجایی ایران مثل محدودیت‌های عمق آبخور و طول محدود هر پهلوگاه جهت کمینه کردن زمان انتظار کشتی‌ها در بندر، با استفاده از استراتژِی زمان ورود متغیر به دنبال کمینه‌کردن مصرف سوخت کشتی‌ها نیز می‌باشد. جهت ارزیابی مدل مذکور، دو مسئله با داده‌های واقعی در نظر گرفته شده است، نتایج حاکی از آن است که، مقدار زمان انتظار کشتی‌ها با استفاده از مدل پیشنهادی در مقایسه با مقدار اتفاق‌افتاده واقعی به میزان ۴۰٪ در نمونهٔ شماره ۱ و ۵۵٪ در نمونهٔ شمارهٔ ۲ بهبود یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد با به‌کارگیری استراتژی زمان ورود متغیر، می‌توان مصرف سوخت کشتی‌ها و در نتیجهٔ آن، هزینه‌ها را کاهش داد. در پایان نشان داده شده است که مقدار کل آلاینده‌های تولید شده با به‌کارگیری استراتژی ارائه‌شده در این پژوهش کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی دینامیکی، پهلوگیری کشتی‌ها، بندر شهید رجایی، تخصیص اسکله.

۱. کارشناس عمران ادارهٔ کل بنادر و دریانوردی استان گیلان، Kourosh.vm@Gmail.Com

۱- مقدمه

امروزه با توجه به پیشرفت فناوری ساخت کشتی‌ها و تولید کشتی‌های بزرگ‌تر و همچنین افزایش تواتر حمل‌ونقل به دلیل افزایش رونق اقتصادی، مسئله تخصیص اسکله در پایانه‌های کانتینری بیش از پیش مورد توجه قرار دارد. به دلیل تنوع تجهیزات تکنولوژیکی و سطوح و لایه‌های مختلف پایانه‌ها، مدل‌های بهینه‌سازی زیادی برای برنامه‌ریزی عملیات گوناگون در پایانه‌های کانتینری ساخته شده است. بخشی از عملیات اجرایی در پایانه‌های کانتینری به پهلوگیری کشتی‌ها در اسکله‌ها مربوط می‌شود که به منظور برنامه‌ریزی این عملیات باید به هر کشتی، فضای خاصی از اسکله برای پهلوگیری و زمان مشخصی برای تخلیه و بارگیری اختصاص داده شود. مسئله تخصیص فضای اسکله و زمان خدمت‌دهی به کشتی‌هایی که باید تخلیه و یا بارگیری شوند عمدتاً با عنوان «مسئله تخصیص اسکله[۱]» (BAP) مطرح می‌شود. هدف از حل این مسئله، بهینه‌سازی و به حداقل رساندن زمان و هزینهٔ انتظار، تخلیه و بارگیری و موارد دیگری می‌باشد.

۲- ۱- ادبیات پژوهش

مسئله تخصیص اسکله (BAP) به صورت‌های مختلف و بر مبنای فرضیات متعدد، مدل شده است. پارامترها و محدودیت‌های متعددی در این مسئله نقش دارند، که تفاوت مدل‌های ارائه‌شده در واقع تفاوت فرضیاتی است که بر روی پارامترها و محدودیت‌های مسئله در نظر گرفته شده‌اند. بیرورث و میسل بر اساس تفاوت فرضیات در محدودیت‌های مکانی و زمانی، پژوهش‌های موجود در ادبیات این مسئله را طبقه‌بندی کرده‌اند (Bierwirth & Meisel, 2010).

۲-۱- ۱- محدودیت‌های زمانی

محدودیت‌های زمانی محدودیت‌هایی هستند که به زمان ورود کشتی‌ها، زمان تخلیه‌وبارگیری و زمان خروج مربوط می‌شوند. زمان ورود کشتی‌ها در ادبیات موضوع از دیدگاه پویایی به دو دسته زمان ورود استاتیک و دینامیک تقسیم می‌شود. همچنین در برخی از پژوهش‌ها زمان ورود را به عنوان پارامتر و در برخی دیگر به عنوان متغیر تصمیم، در نظر می‌گیرند.

زمان ورود استاتیک: در این حالت هیچ زمان ورود خاصی برای کشتی‌ها داده نشده است و ممکن است کشتی‌ها در اسکله در صف انتظار باشند و بلافاصله پس از خالی شدن اسکله در آن پهلوگیری نمایند و یا اینکه کشتی در اسکله نباشد اما می‌تواند با افزایش شتاب حرکت خود، پیش از زمان رسیدن مورد انتظار وارد بندر شود.

زمان ورود دینامیک: در این حالت با وجود اینکه ممکن است کشتی‌ها هنگام برنامه‌ریزی برای پهلوگیری در لنگرگاه حضور نداشته باشند، اما زمان ورود مشخصی برای کشتی‌ها در نظر گرفته می‌شود، از این رو کشتی‌ها نمی‌توانند پیش از زمان ورود پیش‌بینی‌شده وارد اسکله شوند و پهلوگیری نمایند.

زمان ورود کنترل شده: علاوه بر زمان ورود استاتیک و دینامیک که بیرورث و میسل در طبقه‌بندی مسئله BAP آوردند یک حالت دیگر برخورد با زمان ورود به نام زمان ورود کنترل‌شده در ادبیات BAP وجود دارد. در این حالت، زمان ورود کشتی‌ها، متغیر در نظر گرفته می‌شود و با توجه هدف مسئله بهینه می‌گردد (Golias et al., 2010; Du et al. 2011).

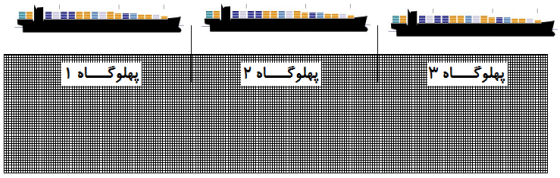
۲-۱-۲- محدودیت‌های مکانی

محدودیت‌های مکانی موقعیت‌های پهلوگیری عملی کشتی‌ها را با توجه به تقسیم‌بندی از پیش تعیین‌شدهٔ اسکله به پهلوگاه‌ها محدود می‌کند. محدودیت‌های مکانی شامل این موارد می‌باشد:

طرح گسسته: در این حالت اسکل× اصلی به پهلوگاه‌های مجزایی تفکیک می‌شود. در هر پهلوگاه و در زمان واحد تنها یک کشتی می‌تواند مورد سرویس‌دهی قرارگیرد. این تقسیم‌بندی می‌تواند از ساختار اسکلهٔ اصلی تبعیت نماید (شکل (۱)).

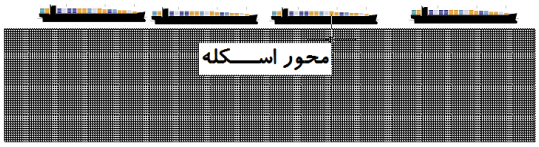
---

[۱] Berth Allocation Problem



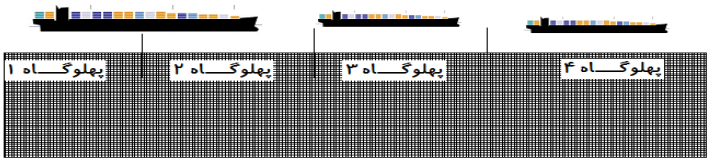
شکل (۱): نمایش طرح گسسته مسئله تخصیص پهلوگاه

طرح پیوسته: در این حالت هیچ تقسیم‌بندی در اسکلهٔ اصلی صورت نمی‌گیرد یعنی کشتی‌ها می‌توانند در موقعیت‌های دلخواه در طول اسکله پهلوگیری نمایند (شکل(۲)). برنامه‌ریزی اسکله برای استفادهٔ بهتر از فضای اسکله اصلی در طرح پیوسته، پیچیده‌تر از طرح گسسته است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، هیچ تقسیم‌بندی در راستای محور اسکله وجود ندارد.

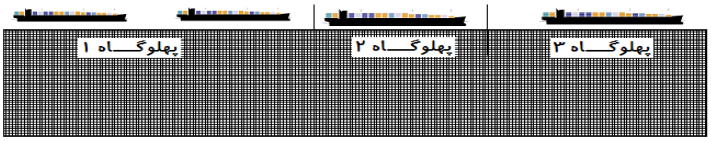


شکل (۲): نمایش طرح پیوسته مسئله تخصیص پهلوگاه

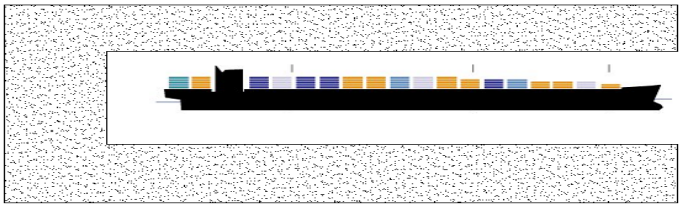
طرح مرکب: در این حالت نیز مانند حالت گسسته، اسکلهٔ اصلی به پهلوگاه‌هایی تقسیم می‌شود، با این تفاوت که کشتی‌های بزرگ می‌توانند بیش از یک پهلوگاه را اشغال نمایند (شکل (۳–الف))، و در عین حال کشتی‌های کوچک می‌توانند یک پهلوگاه را به اشتراک گذارند (شکل (۳–ب))، زمانی که دو پهلوگاه روبروی هم از دو طرف عمل سرویس‌دهی به یک کشتی را انجام دهند، یک اسکلهٔ دندانه‌دار پدید می‌آید (شکل (۳–ج)).



شکل (۳–الف)



شکل (۳–ب)



شکل (۳–ج)

۲-۳- مدل پایه مسئله تخصیص پهلوگاه

مدلی که در این پژوهش به عنوان مدل پایه استفاده شده است، از پژوهش گلیاس و همکاران گرفته شده است (Golias et, al., 2014). گلیاس و همکاران در سال ۲۰۱۴ یک مدل دینامیک و گسسته جهت برنامه‌ریزی پهلوگاه با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های مربوط به زمان ورود و تخلیه‌وبارگیری کشتی‌ها ارائه دادند. در این بخش، با حذف محدودیت‌های مربوط به عدم‌قطعیت‌های موجود در مسئله که در پژوهش گلیاس و همکاران در سال ۲۰۱۴ در نظر گرفته شده است، مدل مذکور از فضای غیرقطعی به فضای قطعی انتقال داده شده و در ادامه، مدل پایه و ساده‌شدهٔ آن معرفی گردیده است.

فرضیات مدل ساده‌شدهٔ گسسته گلیاس و همکاران در سال ۲۰۱۴ به این شرح می‌باشند: (۱) کشتی‌ها در طول زمان وارد بندر می‌شوند یا به عبارت دیگر زمان ورود دینامیک، (۲) هیچ‌گونه عدم‌قطعیتی در زمان ورود و زمان تخلیه‌وبارگیری کشتی‌ها وجود ندارد، (۳) در ابتدای افق زمانی هیچ کشتی در پایانه وجود ندارد، (۴) طول هر کشتی شامل طول واقعی آن کشتی به اضافهٔ یک فاصلهٔ ایمن برای پهلوگیری در نظرگرفته شده است و (۵) پهلوگاه‌ها دارای عمق آبخور و طول کافی برای پهلوگیری کشتی‌های مختلف می‌باشند.

نمایه‌هایی که در مدل مذکور استفاده شده‌اند به این شرح می‌باشند:

مجموعه ها:

مجموعه پهلوگاه‌ها $I = \{1, 2. . , K\}$

مجموعه کشتی ها $J = \{1, 2. . , N\}$

پارامترها:

A_j زمان تخمینی ورود کشتی j

H_j زمان تخمینی تخلیه‌وبارگیری کشتی j

M یک عدد بسیار بزرگ

متغیرهای تصمیم:

St_j زمان پهلوگیری کشتی j

x_{ij} متغیر صفر و یک، اگر کشتی j در پهلوگاه i پهلو گیرد یک، در غیر این‌صورت صفر

f_j اگر کشتی j اولین کشتی باشد که در پهلوگاه تخصیص یافته‌ش پهلو گرفته باشد یک، در غیر این‌صورت صفر

e_j اگر کشتی j آخرین کشتی باشد که در پهلوگاه تخصیص یافته‌ش پهلو گرفته باشد یک، در غیر این‌صورت صفر

β_{ab} اگر $x_{ia} = x_{ib}$ و کشتی b بلافاصله بعد از کشتی a سرویس داده شود یک، در غیر این‌صورت صفر

تابع هدف و محدودیت‌های مدل پایه به شرح زیر است:

$$Min \sum_{j \in J} (St_j - A_j) \qquad (۱)$$

$$Subject\ to:$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = ۱ \qquad \forall j \in J \qquad (۲)$$

$$f_b + \sum_{a \neq b \in J} \beta_{ab} = ۱ \qquad \forall b \in J \qquad (۳)$$

$$e_a + \sum_{a \neq b \in J} \beta_{ab} = ۱ \qquad \forall a \in J \qquad (۴)$$

$$f_a + f_b \leq ۲ - x_{ia} - x_{ib} = ۱ \qquad \forall i \in I, a, b \in J, a \neq b \qquad (۵)$$

$$e_a + e_b \leq ۲ - x_{ia} - x_{ib} = ۱ \qquad \forall i \in I, a, b \in J, a \neq b \qquad (۶)$$

$$\beta_{ab} - 1 \leq x_{ia} - x_{ib} \leq 1 - \beta_{ab} \qquad \forall i \in I, a, b \in J, a \neq b \qquad (۷)$$

$$St_j \geq A_j \qquad \forall j \in J \qquad (۸)$$

$$St_b \geq St_a + H_a - M(1 - \beta_{ab}) \qquad \forall a, b \in J, a \neq b \qquad (۹)$$

تابع هدف (۱) مسئله کمینه‌کردن زمان انتظار کل کشتی‌ها می‌باشد. مجموعه محدودیت‌های (۲) تضمین می‌کنند که هر کشتی فقط توسط یک پهلوگاه سرویس داده می‌شود. مجموعه محدودیت‌های (۳) تضمین می‌کنند که هر کشتی یا به عنوان اولین کشتی سرویس داده می‌شود و یا بعد از کشتی‌های دیگر. مجموعه محدودیت‌های (۴) تضمین می‌کنند هر کشتی یا به عنوان آخرین کشتی سرویس داده می‌شود و یا قبل از کشتی‌های دیگر. مجموعه محدودیت‌های (۵) و (۶) تضمین می‌کنند در هر پهلوگاه فقط یک کشتی می‌تواند به عنوان اولین کشتی و همچنین یک کشتی به عنوان آخرین کشتی سرویس داده شود. مجموعه محدودیت‌های (۷) تضمین می‌کنند یک کشتی می‌تواند بعد از یک کشتی دیگر سرویس داده شود اگر و تنها اگر هر دو کشتی‌ها به یک پهلوگاه تخصیص یافته باشند. مجموعه محدودیت‌های (۸) 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 (۹) تضمین می‌کنند که هیچ‌گونه تداخل زمانی در برنامه پهلوگیری کشتی‌ها در یک پهلوگاه وجود نداشته باشد.

۲-٤- گسترش و بومی‌سازی مدل پایه

در مدل پایهٔ گلیاس و همکاران در سال ۲۰۱۴ فرض شده است که هیچ محدودیتی برای عمق آبخور هر یک از پهلوگاه‌ها وجود ندارد و مدل مذکور قادر به نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به عمق آبخور پهلوگاه‌ها نیست. این در حالی است که بندر کانتینری شهید رجایی ایران در ناحیه کم‌عمق ساحلی خلیج فارس قرار دارد و از بنادر با عمق‌کم به‌حساب می‌آید. قرارگرفتن این بندر در ناحیه کم‌عمق باعث ایجاد محدودیت برای کشتی‌هایی که عمق آبخور زیادی دارند، شده است (Sheikholeslami et, al., 2014). در بندر شهید رجایی هر یک از پهلوگاه‌ها دارای عمق آبخور می‌باشند، به‌طوریکه هر پهلوگاه قادر به سرویس دادن به کشتی‌های مختلف نمی‌باشد. محدودیت مربوط به عمق آبخور پهلوگاه‌ها به ترتیب زیر فرموله شده است:

$$(D_i - d_j)x_{ij} \geq 0 \qquad \forall i \in I, j \in J \qquad (۱۰)$$

در محدودیت (۱۰)، d_j عمق آبخور کشتی j و D_i عمق پهلوگاه i می‌باشد، این محدودیت تضمین می‌کند که پهلوگاه i عمق آبخور کافی برای پهلوگیری کشتی j را داشته باشد. در واقع این محدودیت اجازهٔ پهلوگیری به کشتی‌هایی که عمق آبخور بیشتری از یک پهلوگاه دارند را در پهلوگاه مورد نظر نمی‌دهد.

فرض دیگری که در مدل پایهٔ گلیاس و همکاران در سال ۲۰۱۴ وجود دارد این است که هیچ محدودیتی برای طول هر یک از پهلوگاه‌ها وجود ندارد و مدل مذکور قادر به در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به طول آبخور پهلوگاه‌ها نیست. در حالی‌که در بندر شهید رجایی ایران پهلوگاه‌هایی وجود دارند که طول آنها از برخی از کشتی‌ها کوچک‌تر است. بنابراین برخلاف فرض مدل پایه، در واقعیت همهٔ پهلوگاه‌های بندر مورد مطالعه قادر به سرویس‌دهی به همهٔ کشتی‌ها نیستند و تنها قادر به سرویس‌دهی به کشتی‌هایی می‌باشند که طول آنها از طول پهلوگاهی که در آن خدمت‌دهی می‌شوند کوچک‌تر باشد. در نتیجه در این بخش محدودیت مربوط به طول پهلوگاه‌ها به صورت زیر مدل شده است:

$$(L_i - l_j)x_{ij} \geq 0 \qquad \forall i \in I, j \in J \qquad (۱۱)$$

در محدودیت (۱۱)، l_j طول کشتی j به اضافه یک فاصله ایمن برای پهلوگیری می‌باشد و L_i طول پهلوگاه i می‌باشد، این محدودیت تضمین می‌کند که پهلوگاه i که کشتی j در آن پهلو می‌گیرد دارای طول کافی برای جای دادن کشتی مذکور باشد. در واقع اجازهٔ پهلوگیری به کشتی‌هایی که طول بیشتری از یک پهلوگاه دارند را در پهلوگاه موردنظر نمی‌دهد.

۲-۵- مدلسازی مصرف سوخت

در فرمولاسیون مسئله تخصیص پهلوگاه اکثر پژوهش‌های موجود در این زمینه، زمان ورود کشتی‌ها را به صورت پارامتر ثابت در نظر می‌گیرند. در واقع زمان ورود تخمینی هر کشتی، بر اساس زمان خروج کشتی با در دست داشتن زمان خروج کشتی از بندر مبدأ، مسافت میان دو بندر و سرعت متوسط حرکت کشتی موردنظر به‌دست می‌آید.

$$A_j = DT_j + \frac{m}{S_j} \quad (۱۲)$$

در رابطه (۱۲)، A_j و DT_j وS_j به ترتیب زمان ورود تخمینی به بندر مخرج، زمان خروج از بندر مبدأ و سرعت کشتی j می‌باشد. m نیز مسافت بین بنادر مبدأ و مقصد می‌باشد. در اینجا پیش از مدلسازی مصرف سوخت کشتی‌های کانتینری و اضافه کردن محدودیت‌های مربوط به مصرف سوخت به مدل تخصیص پهلوگاه با زمان ورود متغیر، در مورد رابطهٔ بین سرعت حرکت و میزان مصرف سوخت آنها بحث می‌شود.

۲-۵-۱- بهینه‌سازی مصرف سوخت

مصرف سوخت کشتی‌ها در درجه اول به طراحی و ساختمان کشتی بستگی دارد و از طرف دیگر به سرعت حرکت کشتی حساسیت بسیار زیادی دارد. به طوری‌که که با افزایش سرعت، مصرف سوخت به طور غیرخطی افزایش می‌یابد. در ادبیات موضوع روابط متعددی برای مصرف سوخت کشتی‌ها پیشنهاد شده است. روابطی که بر اساس داده‌های واقعی و یا آزمایش‌های متعدد شرکت‌های تولید کنندهٔ کشتی استخراج شده است. لانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ بر اساس داده‌های موجود یک رابطه خطی برای مصرف سوخت پیشنهاد داده‌اند (Lang & Veenstra, 2010). مدل پیشنهادی آنها یک مدل رگرسیون خطی با ضریب ثابت است، در مدل پیشنهادی آنها متغیر وابستهٔ مصرف سوخت در واحد زمان و متغیر مستقل سرعت کشتی می‌باشد.

$$r_F = C_0 + C_1.S \quad (۱۳)$$

در رابطه (۱۳)، r_F مقدار مصرف سوخت در واحد زمان، C1و C0 ضرایب رگرسیون می‌باشند. سرعت حرکت کشتی نیز با S نشان داده شده است.

تحقیقات مختلف نشان داده است که رابطهٔ بین مصرف سوخت و سرعت، خطی نیست. بنابراین مدل رگرسیون خطی که لانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ در پژوهش خود استفاده کرده‌اند، نمی‌تواند یک مدل دقیقی در سطح عملیاتی باشد.

هوقس در سال ۱۹۹۶ در پژوهش خود ادعا کرده‌است که مصرف سوخت کشتی‌ها متناسب است با توان سوم سرعت کشتی می‌باشد (Hughes, 1996)، که بعدها این موضوع به قانون توان سوم معروف شده است. ادعای مذکور توسط پژوهش‌های دیگر نیز تصدیق شده است و بسیاری از پژوهش‌ها از این قانون استفاده کرده‌اند (Du et al., 2011).

با توجه به مطالب ذکر شده، در حالت کلی می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$r_F = C_0 + C_1.S^{\mu} \quad (۱۴)$$

در رابطه فوق μ توان سرعت می‌باشد که بسته به نوع کشتی یا پارامترهای دیگر می‌تواند هر عددی باشد.

برای تبدیل مقدار مصرف سوخت در واحد زمان به مقدار مصرف کل سوخت کافی است که رابطهٔ فوق در زمان ضرب شود، در نتیجه خواهیم داشت:

$$F = r_F.t = (C_0 + C_1.S^{\mu}).\frac{m}{S}$$

$$F = C_0.\frac{m}{S} + C_1.S^{\mu-1}.m \quad (۱۵)$$

برای یافتن مقدار سرعت بهینه کافی است که از رابطه فوق مشتق بگیریم:

$$\frac{d_F}{d_s} = -C_0\frac{m}{S^2} + C_1.m.(\mu-)S^{\mu-2} \quad (۱۶)$$

با صفر قرار دادن مقدار مشتق تابع سوخت، مقدار سرعت بهینهٔ حرکت به‌دست می‌آید:

$$\frac{d_F}{d_s} = 0$$

$$S^* = \left(\frac{C_0}{C_1(\mu-1)}\right)^{\frac{1}{\mu}} \quad (17)$$

رابطه‌های فوق نشان می‌دهند، در صورتی که سرعت حرکت کشتی از مقدار سرعت بهینه بیشتر باشد، با کاهش سرعت می‌توان در مصرف سوخت صرفه جویی کرد و همچنین اگر سرعت حرکت کشتی کمتر از سرعت بهینه باشد، با افزایش سرعت می‌توان مصرف سوخت را کاهش داد.

۲-۵-۲- مدلسازی زمان ورود متغیر

جهت مدلسازی مسئله، فرض می‌شود که اپراتورهای بندر کانتینری می‌توانند سرعت حرکت کشتی‌ها را تعیین کنند و از خطوط کشتیرانی بخواهند که با سرعت تعیین‌شده حرکت کنند. در نتیجه زمان رسیدن کشتی‌ها به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود. در گام بعدی زمان ورود هر کشتی محدود به بازهٔ زمان ورود حداکثر A_j^{max} و زمان ورود حداقل A_j^{min} می‌شود. زمان ورود حداقل و حداکثر هر کشتی در واقع با تقسیم مسافت بین بندر مبدأ و مقصد بر به ترتیب سرعت حداکثر و سرعت حداقل هر کشتی به‌دست می‌آید. در نتیجه محدودیت زیر باید به مدل اضافه شود:

$$A_j^{min} \le A_j \le A_j^{max} \qquad \forall j \in J \quad (18)$$

۲-۵-۳ - مسئله تخصیص پهلوگاه با در نظر گرفتن مصرف سوخت

این مدل یک مدل برنامه‌ریزی دینامیک و گسسته پهلوگاه با در نظر گرفتن مصرف سوخت کشتی‌ها و زمان ورود متغیر می باشد.

فرمولاسیون مدل مذکور به صورت زیر می‌باشد:

$$\min f^1 = \sum_{j\in J} C_{0j} A_j + C_{1j} m_j A_j^{1-\mu_j} \quad (19)$$

$$\min f^2 = \sum_{j\in J} (St_j - A_j) \quad (20)$$

$$Subject\ to:$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} = 1 \qquad \forall j \in J \quad (21)$$

$$f_b + \sum_{a\neq b\in J} \beta_{ab} = 1 \qquad \forall b \in J \quad (22)$$

$$e_a + \sum_{a\neq b\in J} \beta_{ab} = 1 \qquad \forall a \in J \quad (23)$$

$$f_a + f_b \le 3 - x_{ia} - x_{ib} = 1 \qquad \forall i \in I, a, b \in J, a \neq b \quad (24)$$

$$e_a + e_b \le 3 - x_{ia} - x_{ib} = 1 \qquad \forall i \in I, a, b \in J, a \neq b \quad (25)$$

$$\beta_{ab} - 1 \le x_{ia} - x_{ib} \le 1 - \beta_{ab} \qquad \forall i \in I, a, b \in J, a \neq b \quad (26)$$

$$St_j \ge A_j \qquad \forall j \in J \quad (27)$$

$$St_b \ge St_a + H_a - M(1 - \beta_{ab}) \qquad \forall a, b \in J, a \neq b \quad (28)$$

$$(D_i - d_j)x_{ij} \ge 0 \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (29)$$

$$(L_i - l_j)x_{ij} \ge 0 \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (30)$$

$$A_j^{min} \leq A_j \leq A_j^{max} \qquad \forall j \in J \qquad (۳۱)$$

مسئله تخصیص پهلوگاه به صورت یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه فرموله شده است. تابع هدف (۱۹)، مربوط به کمینه کردن مصرف سوخت کشتی‌ها به صورت زیر می‌باشد، تابع هدف (۲۰)، مسئله کمینه کردن زمان انتظار کل کشتی‌ها می‌باشد. مجموعه محدودیت‌های (۲۱)، تضمین می‌کنند که هر کشتی فقط توسط یک پهلوگاه سرویس داده می‌شود. مجموعه محدودیت‌های (۲۲)، تضمین می‌کنند که هر کشتی یا به عنوان اولین کشتی سرویس داده می‌شود و یا بعد از کشتی‌های دیگر. مجموعه محدودیت‌های (۲۳)، تضمین می‌کنند هر کشتی یا به عنوان آخرین کشتی سرویس داده می‌شود و یا قبل از کشتی‌های دیگر. مجموعه محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵)، تضمین می‌کنند در هر پهلوگاه فقط یک کشتی می‌تواند به عنوان اولین کشتی و همچنین یک کشتی به عنوان آخرین کشتی سرویس داده شود. مجموعه محدودیت‌های (۲۶)، تضمین می‌کنند یک کشتی می‌تواند بعد از یک کشتی دیگر سرویس داده شود اگر و تنها اگر هر دو کشتی‌ها به یک پهلوگاه تخصیص یافته باشند. مجموعه محدودیت‌های (۲۷)، تضمین می‌کنند که هیچ کشتی قبل از ورود به بندر پهلو داده نمی‌شود. در واقع ابتدا کشتی باید وارد بندر شود سپس پهلو می‌گیرد. مجموعه محدودیت‌های (۲۸)، تضمین می‌کنند که هیچ‌گونه تداخل زمانی در برنامه پهلوگیری کشتی‌ها در یک پهلوگاه وجود نداشته باشد. در محدودیت (۲۹)، d_j عمق آبخور کشتی j و D_i عمق پهلوگاه i می‌باشد، این محدودیت تضمین می‌کند که پهلوگاه i عمق آبخور کافی برای پهلوگیری کشتی j را داشته باشد. در واقع این محدودیت اجازهٔ پهلوگیری به کشتی‌هایی که عمق آبخور بیشتری از یک پهلوگاه دارند در پهلوگاه مورد نظر را نمی دهد. در محدودیت (۳۰)، l_j طول کشتی j به اضافه یک فاصلهٔ ایمن برای پهلوگیری می‌باشد و L_i طول پهلوگاه i می‌باشد، این محدودیت تضمین می‌کند که پهلوگاه i که کشتی j در آن پهلو می‌گیرد دارای طول کافی برای جای دادن کشتی مذکور باشد. در واقع اجازهٔ پهلوگیری به کشتی‌هایی که طول بیشتری از یک پهلوگاه دارند را در پهلوگاه موردنظر نمی‌دهد.

۲-۶- برآورد زمان تخلیه و بارگیری

زمان تخلیه‌وبارگیری یکی از مهم‌ترین پارامترهای مسئله تخصیص پهلوگاه است، به‌طوری که اپراتورهای ترمینال همواره به دنبال روش‌هایی هستند که با استفاده از پایگاه داده‌های موجود بهترین برآورد را از مقدار واقعی زمان تخلیه‌وبارگیری نتیجه دهد. حالات مختلف در نظر گرفتن زمان‌های تخلیه و بارگیری کشتی‌ها در مدل‌های بهینه‌سازی مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه به این شرح‌اند: (۱) ثابت، از پیش تعیین‌شده و تغییرناپذیر، (۲) وابسته به موقعیت‌های پهلوگیری کشتی‌ها، (۳) وابسته به تعداد جرثقیل‌هایی که به کشتی‌ها سرویس می‌دهند، (۴) وابسته به برنامهٔ زمان‌بندی کار جرثقیل‌های اختصاص یافته و (۵) ترکیب حالات (۲)، (۳) و (۴).

در پژوهش‌های موجود در ادبیات مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه برای برآورد زمان تخلیه‌وبارگیری عواملی چون مقدار بار کشتی، موقعیت پهلوگیری کشتی‌ها، تعداد جرثقیل‌های اختصاص یافته به هر کشتی، برنامهٔ زمان‌بندی جرثقیل‌ها و ... در نظر گرفته شده است. اما در این پژوهش تنها به مقدار بار کشتی برحسب واحد کانتینرهای ۲۰ فوتی (TEU) بسنده شده است و زمان تخلیه‌وبارگیری ثابت و از پیش تعیین‌شده فرض شده است.

۲-۷- خروجی نرم‌افزار

مقدار بار کشتی به عنوان متغیر مستقل و زمان تخلیه‌وبارگیری به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود. رابطهٔ بین این دو متغیر با استفاده از رگرسیون خطی در دو حالت خطی با ثابت و خطی بدون ثابت ($c = 0$) و به‌کارگیری نرم‌افزار آماری SPSS برآورد شد. رابطهٔ (۱۲)، رابطهٔ رگرسیون خطی بین زمان تخلیه‌وبارگیری و مقدار بار کشتی را نشان می‌دهد.

$$h_i = a \times load_i + c \qquad (۳۲)$$

با تحلیل نتایج مدلسازی زمان‌تخلیه و بارگیری و با توجه به اینکه هر دو مدل ارائه‌شده با سطح اطمینان نزدیک به ۱۰۰٪ معنی‌دار می‌باشند، باید یک مدل را به منظر برآورد زمان تخلیه‌وبارگیری انتخاب کنیم. نتایج تحلیل نشان می‌دهند که مدل رگرسیون خطی بدون ضریب ثابت نسبت به مدل خطی با ضریب ثابت، از ضریب همبستگی بالاتری برخوردار است، در نتیجه مدل خطی بدون ضریب ثابت قادر است با قدرت بیشتری نسبت به مدل رقیبش، تغییرات را نشان دهد. از این رو، در این پژوهش از مدل رگرسیون خطی بدون ضریب ثابت از رابطهٔ (۳۳) به منظور برآورد زمان تخلیه‌وبارگیری استفاده می‌شود:

$$h_i = ۰.۰۱۲ \times load_i \quad (۳۳)$$

۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

۳-۱- ارزیابی مدل تخصیص دینامیک پهلوگاه

در این پژوهش، از مدل گلیاس و همکاران در سال ۲۰۱۰ به عنوان مدل پایه استفاده شد. سپس مدل پایه با اضافه کردن محدودیت‌های مربوط به عمق آبخور و طول پهلوگاه گسترش یافت و به واقعیت نزدیک‌تر شد و بومی‌سازی گردید. در این بخش، مدل تخصیص دینامیک پهلوگاه (بدون در نظر گرفتن مصرف سوخت کشتی‌ها) با توجه به خصوصیات بندر شهید رجایی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

برای این منظور از داده‌های تخلیه‌وبارگیری دو مسئله با افق زمانی یک هفته‌ای استفاده شده است. چون افق زمانی در هر دو نمونه برابر و ثابت است، اندازه نمونه تداعی کننده میزان تقاضای نمونه در بندر می‌باشد. داده‌های ورودی مسئله شمارهٔ ۱ برای ۱۷ کشتی، شامل زمان ورود، طول، بار و زمان تخلیه‌وبارگیری برای هر کشتی می باشد. طول هر کشتی، شامل طول واقعی آن کشتی به اضافه ۵٪ طول کشتی به منظور در نظر گرفتن فاصله ایمن پهلوگیری در نظر گرفته شده است. جهت برآورد زمان تخلیه‌وبارگیری هر کشتی نیز از رابطه (۳۳) استفاده شده است و داده‌های ورودی نمونهٔ شمارهٔ ۲ برای ۲۵ کشتی، شامل زمان ورود، طول، بار و زمان تخلیه‌وبارگیری برای هر کشتی در نظر گرفته شده است.

با بررسی دقیق داده‌های ورودی و خروجی‌های حاصل از حل مدل در نمونه‌های شمارهٔ ۱ و ۲ می‌توان دریافت که هیچ‌گونه تداخل زمانی بین پهلوگیری و تخلیه‌وبارگیری کشتی‌ها وجود ندارد، همچنین هیچ کشتی در پهلوگاهی که عمق آبخور آن کمتر از کشتی مورد نظر می‌باشد پهلو داده نشده است و همچنین خروجی‌های هر دو مسئله با کلیه محدودیت‌های دیگر مطابقت دارند و جواب‌های به‌دست‌آمده منطقی و بهینه هستند.

مطابق نتایج به‌دست‌آمده، مقدار زمان انتظار کشتی‌ها در نمونهٔ شمارهٔ ۱ با استفاده از مدل پیشنهادی ۳۸ ساعت به‌دست آمد که در مقایسه با مقدار اتفاق افتادهٔ واقعی برای نمونهٔ شمارهٔ ۱ یعنی ۶۳ ساعت، به میزان ۴۰٪ بهبود حاصل شده است. مقدار زمان انتظار کشتی‌ها در نمونهٔ شمارهٔ ۲ با استفاده از مدل پیشنهادی ۵۹ ساعت به‌دست آمد که در مقایسه با مقدار اتفاق افتادهٔ واقعی برای نمونهٔ شمارهٔ ۲ یعنی ۱۳۱ ساعت، به میزان ۵۵٪ بهبود حاصل شده است.

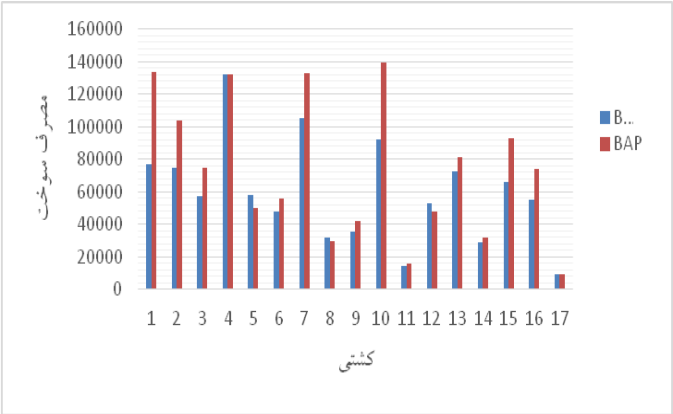
۳-۲- ارزیابی مدل تخصیص دینامیک پهلوگاه با در نظر گرفتن مصرف سوخت

با توجه به اینکه حدود ۶۰٪ هزینه‌های عملیاتی یک کشتی و حدود ۳۰٪ کل هزینه‌های یک شرکت کشتیرانی را هزینه سوخت تشکیل می‌دهد. بهینه‌سازی مصرف سوخت برای شرکت‌های کشتیرانی اهمیت بسزایی دارد. در نتیجه شرکت‌های کشتیرانی برای کاهش هزینه‌های عملیاتی خود به دنبال راه‌هایی برای کاهش مصرف سوخت می‌باشند، از طرفی حفظ محیط زیست و کاهش آلاینده‌های تولیدشده توسط کشتی‌ها مستلزم کاهش مصرف سوخت است. در این پژوهش، از داده‌های موجود پژوهش وانگ و منگ در سال ۲۰۱۲ جهت برآورد رابطهٔ بین متوسط مصرف سوخت کشتی‌ها و سرعت استفاده شده است. به این منظور از دو مدل رگرسیونی خطی و درجهٔ توانی جهت برآورد رابطهٔ مصرف سوخت با سرعت کشتی‌ها استفاده شده است (Wang and Meng, 2012). نتایج نشان داد که مدل رگرسیون توانی از نظر آماری مدل قوی‌تری است لذا در این پژوهش، از این مدل جهت برآورد مصرف سوخت استفاده شد.

$$r_i = ۰.۰۰۰۰۵ \times S_i^{۲.۰۹} \quad (۳۴)$$

برای این منظور از داده‌های تخلیه‌وبارگیری یک مسئله با افق زمانی یک هفته‌ای با ۱۷ کشتی استفاده شد. نتایج نشان داد که با توجه به اینکه استراتژی زمان ورود متغیر، دیگر کشتی‌ها در بندرگاه منتظر پهلوگیری نمی‌مانند و به جای انتظار در پهلوگاه با سرعت کمتری حرکت می‌کنند تا مصرف سوخت آنها و در نتیجهٔ آن، هزینه نیز کاهش یابد، زمان انتظار، مصرف سوخت آنها و در نتیجه مقدار آلاینده‌های تولیدشده کشتی‌ها با به‌کارگیری این استراتژی کاهش یافت.

در شکل (۴) به مقایسهٔ مصرف سوخت ۱۷ کشتی در دو استراتژی مختلف پرداخته شده است، همان‌طورکه مشاهده می‌شود، مصرف سوخت کشتی‌های مختلف با به‌کارگیری استراتژی مسئله تخصیص پهلوگاه با در نظر گرفتن مصرف سوخت (BAPF) کاهش می‌یابد.



شکل (٤): مقایسهٔ مصرف سوخت کشتی‌ها در استراتژی‌های مختلف

همان‌طورکه پیش‌تر بیان شد، با کاهش مصرف سوخت کشتی‌ها تولید آلاینده‌های مختلف نیز کاهش می‌یابد. رابطهٔ بین آلایندهٔ تولیدشده و مصرف سوخت در رابطهٔ (۳۵) نشان داده شده است:

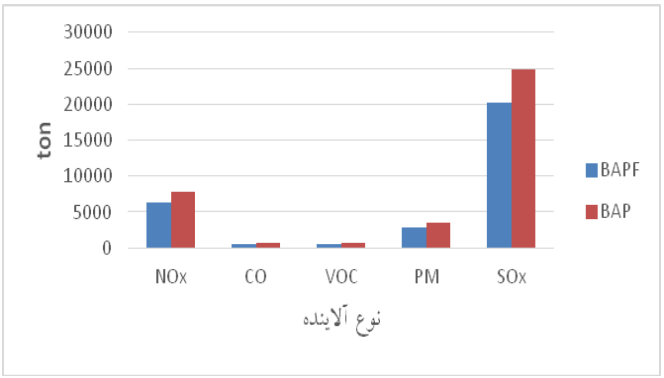
$$E_i = x_i \times F \qquad (۳۵)$$

در رابطهٔ (۳۵)، E_i مقدار آالایندهٔ تولیدشده می‌باشد و واحد آن کیلوگرم است. x_i فاکتور تبدیل مقدار مصرف سوخت به مقادیر آلایندهٔ تولیدشده می‌باشد، این فاکتور برای گازهای مختلف و وسایل مختلف مقادیر متفاوتی دارد، مقادیر x_i آن در جدول (۱) نشان داده شده است (Pitana et al., 2010). F مقدار مصرف کل سوخت بر حسب تن می‌باشد.

جدول (۱) مقادیر فاکتور آلایندگی

نوع آلاینده	NOx	CO	CO2	VOC	PM	SOx
مقدار x_i	۶/۲۵	۰/۶	۳۲۰۰	۰/۵	۲/۰۸	۲۰

مقادیر آلایندهٔ تولیدشده، در استراتژی مسئله تخصیص پهلوگاه با در نظر گرفتن مصرف سوخت (BAPF) و استراتژی تخصیص بدون در نظر گرفتن مصرف سوخت (BAP) در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، مقدار کل آلاینده‌های تولیدشده با به‌کارگیری استراتژی ارائه شده در این پژوهش، کاهش می‌یابد.



شکل (۵) مقایسه مقادیر آلاینده‌های تولید شده در استراتژی‌های مختلف

٤- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش ارائه مدلی گسسته و دینامیک برای مسئله پهلودهی کشتی‌ها با در نظر گرفتن مصرف سوخت کشتی‌ها و حل آن به منظور کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش تولید آلاینده‌های گازی می‌باشد. در این پژوهش مدلی جهت برنامه‌ریزی تخصیص پهلوگاه ارائه شد که علاوه بر کمینه نمودن تأخیر خروج کشتی‌ها، مصرف سوخت کشتی‌ها را نیز بهینه می‌کند، تا سرعت کشتی‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شود که علاوه بر بهینه شدن مصرف سوخت، زمان انتظار آنها جهت پهلوگیری در پایانه‌های کانتینری نیز حداقل شود. با توجه به اینکه بندر کانتینری شهید رجایی ایران در ناحیه کم‌عمق ساحلی خلیج فارس قرار دارد و از بنادر با عمق کم به حساب می‌آید، قرار گرفتن این بندر در ناحیه کم‌عمق باعث ایجاد محدودیت برای کشتی‌هایی که عمق آبخور زیادی دارند می‌شود. در این پژوهش محدودیت‌های مربوط به عمق آبخور و طول پهلوگاه به مدل اضافه شد و موجب گردید که مدل به واقعیت نزدیک‌تر و بومی‌سازی گردد و بنابراین، در نظر گرفتن مصرف سوخت و استراتژی زمان ورود متغیر، موجب گردید که دیگر کشتی‌ها در بندرگاه‌ها منتظر پهلوگیری نمانند و به جای انتظار در پهلوگاه، با سرعت کمتری حرکت کنند تا مصرف سوخت آنها و در نتیجه هزینه‌ها نیز کاهش و همچنین تولید انواع مختلف آلاینده‌ها در شهرهای بندری در نتیجهٔ عدم‌توقف طولانی‌مدت کشتی‌ها در لنگرگاه‌ها کاهش یابد.

مراجع

1. C. Bierwirth, F. Meisel. (2010). "A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals". European Journal of Operational Research, vol. 202, pp. 615-627.
2. M. Golias, M. Boile, S. Theofanis, C. Efstathiou. (2010). "The Berth-Scheduling Problem". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2166, pp. 20-27.
3. Y. Du, Q. Chen, X. Quan, L. Long, R. Y. Fung. (2011). "Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions". Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 47, pp. 1021-1037.
4. M. Golias, I. Portal, D. Konur, E. Kaisar, G. Kolomvos. (2014). "Robust berth scheduling at marine container terminals via hierarchical optimization". Computers & Operations Research, vol. 41, pp. 412-422.

A. Sheikholeslami, G. Ilati, M. Kobari. (2014). "The continuous dynamic berth allocation problem at a marine container terminal with tidal constraints in the access channel". INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL ENGIN EERING, vol. 12, pp. 344-353.

5. N. Lang, A. Veenstra. (2010). "A quantitative analysis of container vessel arrival planning strategies". OR spectrum, vol. 32, pp. 477-499.
6. C. Hughes. (1996). Ship performance: technical, safety, environmental and commercial aspects: Informa Pub, 1996.
7. Y. Du, Q. Chen, X. Quan, L. Long, R. Y. Fung. (2011). "Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions". Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 47, pp. 1021-1037.
8. S. Wang and Q. Meng. (2012). "Sailing speed optimization for container ships in a liner shipping network". Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 48, pp. 701-714.
9. T. Pitana, E. Kobayashi, N. Wakabayashi. (2010). "Estimation of exhaust emissions of marine traffic using Automatic Identification System data (case study: Madura Strait area, Indonesia)". in OCEANS 2010 IEEE-Sydney, 2010, pp. 1-6.