

بازیابی بلادرنگ مسئله تخصیص پهلوگاه در پایانه‌ها با لحاظ عدم قطعیت زمان ورود و تخلیه/بارگیری کشتی‌ها

سعید شکری*^۱

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۲۴

*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۱۰

© نشریه صنعت حمل‌ونقل دریایی ۱۳۹۷، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه صنعت حمل‌ونقل دریایی است.

چکیده

در این پژوهش، مسئله تخصیص پهلوگاه دینامیک و ترکیبی در بنادر کانتینری، با لحاظ عدم قطعیت مطالعه شده است. در عمل، زمان واقعی ورود شناورها از مقدار مورد انتظار آنها انحراف دارد که این امر می‌تواند برنامه اولیه پهلوگیری را برهم زند و حتی آن را غیرعملی کند. در این کار، برنامه زمانبندی پهلوگیری اولیه داده شده در نظر گرفته می‌شود، و مسئله در بلادرنگ وقتی که داده‌های ورود واقعی معلوم شد، مجدداً ابتدا با استفاده از مدل زمانبندی اولیه و سپس با استفاده از الگوریتم بازیابی بلادرنگ حل می‌شود. برای حل مسئله از الگوریتم ژنتیک با هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌های تحقق‌یافته زمانبندی به‌روزشده استفاده می‌شود. همچنین راهبرد قطعیت که بندر باید بپذیرد و برای بیشینه کردن درآمدهای خود به کار گیرد، به‌عنوان محدودیت در الگوریتم بازیابی ترکیب، و در مورد آن بحث شد. با بررسی نتایج اولیه مربوط به دو رویکرد زمانبندی مجدد و الگوریتم بازیابی در مقایسه با برنامه اولیه پهلوگاه، مشاهده می‌شود که الگوریتم بازیابی می‌تواند به‌طور موفق برای حل مسئله در بلادرنگ مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: مسئله تخصیص پهلوگاه، پایانه کانتینری، عدم قطعیت، بازیابی بلادرنگ، الگوریتم ژنتیک.

حمل و نقل دریایی شاخه‌ای از حمل و نقل است که نقش کلیدی در تجارت جهانی ایفا می‌کند. پایانه‌های کانتینری در بنادر دریایی، پل اتصال میان حمل و نقل دریایی و زمینی کالاها در زنجیره جهانی حمل و نقل کالا می‌باشند. یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی که یک پایانه کانتینری با آن مواجه است، چگونگی تخصیص اسکله به شناورهای فراخوانده می‌باشد تا منابع محدود پهلوگاهی بیشترین کارایی خود را داشته باشند. از این رو با استفاده از اطلاعاتی از قبیل زمان ورود شناورها که معمولاً از پیش تخمین زده شده است، برنامه‌ای جهت پهلوگیری بهینه آنها تنظیم می‌شود. با این وجود، به دلایل مختلفی مانند عدم اطمینان شامل نامساعد بودن آب و هوا، زمان ورود و تخلیه/ بارگیری واقعی شناورها اغلب از مقدار مورد تخمین منحرف می‌شود که این امر می‌تواند باعث ایجاد اختلال در برنامه اولیه پهلوگاه شود و حتی در برخی موارد آن را غیرعملی سازد. معمولاً در این موارد، اسکله با استفاده از اطلاعات دقیق‌تر مجدداً با به کارگیری مدل زمانبندی اولیه به شناورها تخصیص داده می‌شود؛ اما در صورتی که در تخصیص مجدد، برنامه اولیه پهلوگیری مد نظر قرار نگیرد، با توجه به پیوستگی موجود بین برنامه پهلوگاه با سایر برنامه‌های عملیاتی بندر، وجود انحراف میان برنامه تخصیص مجدد و برنامه اولیه، باعث ایجاد اختلال و خسارت‌هایی در سایر برنامه‌های عملیاتی بندر خواهد شد. در این پژوهش تلاش شده است تا برنامه پهلوگاه پس از مشخص شدن زمان دقیق‌تر ورود شناورها، به‌طور بلادرنگ با کمترین انحراف از برنامه اولیه، بازیابی شود. بندر شهید رجایی واقع در استان هرمزگان به‌عنوان بندر مورد مطالعه انتخاب شد و با استفاده از اطلاعات واقعی، الگوریتم ژنتیک جهت حل مسئله به کار گرفته شد. پس از بررسی اطلاعات موجود مشخص شد به‌طور میانگین برای هر شناور بین زمان ورود واقعی و زمان ورود پیش‌بینی شده، بیش از ۱۰ ساعت انحراف وجود دارد که مسلماً برنامه اولیه پهلوگیری را دچار اختلال خواهد کرد. از این رو، مسئله تخصیص پهلوگاه مجدداً یک‌بار توسط مدل مبنای اولیه و بار دیگر توسط مدل بازیابی بلادرنگ با استفاده از زمان ورود دقیق‌تر حل شد.

۱-۱- مروری بر ادبیات

سه نوع مختلف از مسائل تصمیم‌گیری در پایانه‌های کانتینری وجود دارد: مسائل طراحی^۲، مسائل برنامه‌ریزی عملیاتی^۳، و مسائل کنترل بلادرنگ^۴. مسائل طراحی باید توسط طراحان تسهیلات در نخستین مرحله از برنامه‌ریزی توسعه تسهیلات پایانه حل شود. بیشترین مسائل به سرمایه‌گذاری در ساختار و تسهیلات مربوط می‌شوند. از آنجایی که منابع پایانه‌های کانتینری بسیار محدود و گران هستند، استفاده از منابع و تأثیرات سیستم‌های برنامه‌ریزی عملیاتی باید به‌دقت به‌منظور پیشینه کردن عملکرد کلی تسهیلات پایانه ارزیابی گردد. طی عملیات تخلیه/بارگیری واقعی، تصمیمات روی تطبیق امور تخلیه/بارگیری با منابع مورد نیاز باید در بلادرنگ صورت گیرد. این مطلب به‌عنوان مسائل کنترل بلادرنگ اشاره دارد (Gunther and K.K.H., 2013). مسئله تخصیص پهلوگاه که مسئله مورد مطالعه در این پژوهش است، از مسائل برنامه‌ریزی عملیاتی در پایانه‌های کانتینری می‌باشد؛ اما تعهد واقعی تخصیص منابع در بلادرنگ انجام شده و از حوادث خاص و یا شرایط ویژه موجب شده است.

مسئله تخصیص پهلوگاه با عدم قطعیت مواجه است؛ عدم قطعیت در زمان ورود کشتی و متغیر بودن مقدار محموله. ژن و همکاران^۵ (Zhen, and et al. 2011) و ژن و چانگ^۶ (Zhen and Chang, 2012) دو راهبرد بلادرنگ و واکنشی جهت مقابله با عدم قطعیت در زمان ورود کشتی ارائه دادند. راهبرد بلادرنگ راهبردی است که با وارد کردن عنصر عدم قطعیت در هنگام آماده‌سازی مدل زمانبندی (زمانبندی مبنا) انجام می‌شود، در حالی که راهبرد واکنشی راهبردی است که با ایجاد تنظیمات در برنامه پایه انجام می‌شود.

۱) رویکرد بلادرنگ که در آن برنامه زمانبندی مبنا همراه با درجه خاصی از پیش‌بینی عدم قطعیت و تغییرپذیری در اطلاعات و رخدادهای اختلال در طول اجرای واقعی زمانبندی، توسعه داده شده است. روش‌های مبتنی بر پایداری بلادرنگ می‌تواند به دو بخش مجزا تقسیم شود: بهینه‌سازی تصادفی و بهینه‌سازی استوار. هر کدام از این روش‌ها به صراحت مجموعه‌ای از تمام حالت‌های ممکن تحقق یافته را، که توسط مجموعه عدم قطعیت U توصیف شده‌اند، در نظر می‌گیرد. درحالی‌که روش بهینه‌سازی تصادفی، قصد یافتن راه‌حلی را دارد که به‌طور میانگین در بهترین حالت عمل کند (Birge, 2001)، روش بهینه‌سازی استوار بسیار محافظه‌کارانه است و جهت یافتن راه‌حلی که بهترین عملکرد را برای بدترین حالت دارد، جستجو می‌کند (Bertsimas and Melvyn, 2003).

² Design problems

³ Operational planning problems

⁴ Real time control problems

⁵ Zhen et al

⁶ Zhen & Chang

(۲) رویکرد واکنشی یا مدیریت اختلال یا الگوریتم آنلاین، مبتنی بر راهبرد صبر و مشاهده می‌باشد و با تعدیل زمانبندی در پاسخگویی بلادرنگ به تغییر داده در طول اجرای زمانبندی مینا، بررسی می‌شود. عملکرد این رویکرد به شیوه‌ای که داده‌ها آشکار می‌شود بستگی دارد. یک معیار رایج برای سنجیدن عملکرد الگوریتم واکنشی نسبت مقایسه‌ای است که از طریق جداسازی مقادیر راه‌حل حاصل شده توسط الگوریتم با راه‌حل بهینه مسئله قطعی به دست می‌آید (Albers, 2003). بنابراین، ممکن است گفته شود درحالی که مدیریت اختلال و زمانبندی مجدد دو رویکرد واکنشی جهت اصلاح یک برنامه زمانبندی مینای موجود هستند، در اهداف اصلی خود اختلاف دارند. برای یک زمانبندی مینای داده‌شده، زمانبندی مجدد به شناسایی یک زمانبندی که از لحاظ تابع هدف اصلی بهینه است برمی‌گردد. از سوی دیگر مدیریت اختلال، بر کمینه کردن انحراف زمانبندی اصلاح شده از برنامه زمانبندی مینا تمرکز دارد (Bierlaire, 2012).

۱-۲- بیان مسئله

مسئله این پژوهش از نیازهای واقع‌گرایانه بندر شهید رجایی در استان هرمزگان، ناشی می‌شود. مسئله تخصیص دینامیک و ترکیبی پهلوگاه، در بنادر کانتینری جهت بررسی اجرایی بودن برنامه زمانبندی مینای داده شده در بلادرنگ مطالعه شده است. زمانبندی مینا می‌تواند هر راه‌حل عملی برای BAP باشد یا می‌تواند توسط حل نسخه قطعی مسئله بدون احتساب هرگونه عدم‌اطمینان به دست آمده باشد. در این بخش مدل ارائه شده توسط یومانگ به عنوان مدل مینای حل نسخه قطعی مسئله تخصیص پهلوگاه، بدون احتساب هرگونه عدم‌اطمینان معرفی می‌شود (Umang and et al., 2012). فهرستی از پارامترهای ورودی استفاده شده در مدل‌سازی مسئله قطعی در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): پارامترهای ورودی در تعیین زمانبندی مینا

N	مجموعه شناورها
M	مجموعه مقاطع
i	$i=1, \dots, N$ شناورهایی که در بندر پهلو می‌گیرند
k	$k=1, \dots, M$ مقاطع در طول اسکله
A_i	زمان ورود مورد انتظار شناور i
e_i	زمان رهسپاری تخمین شده شناور i
U_i	حداکثر آستانه زمان ورود شناور i
D_i	عمق آب‌خور شناور i
L_i	طول شناور i
Q_i	مقدار بار شناور i (تخلیه/بارگیری)
W_i	مجموعه انواع بار، بارگیری به یا تخلیه از شناور i لیست شده از $w=1$ تا $w= W_i $
h_k^w	زمان تخلیه/بارگیری برای مقدار واحد از نوع محموله W برای شناور پهلو گرفته در مقطع k
d_k	عمق آب‌خور مقطع k
l_k	طول مقطع k
b_k	مختصات شروع مقطع k
L	طول کل اسکله
B	عدد ثابت بزرگ

فاصله مکانی ایمن بین دو شناور مجاور به طور ضمنی در طول شناور در نظر گرفته شده است. همچنین به طور مشابه فاصله زمانی لازم بین دو شناور متوالی به طور ضمنی در زمان تخلیه/بارگیری در نظر گرفته شده است.

علاوه بر این، ضریب x_{ikp} می‌تواند با پردازش داده‌ها تعیین شود؛ به گونه‌ای که اگر شناور i پهلو گرفته در نقطه شروع مقطع k ، مقطع p را نیز اشغال کند برابر ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ خواهد بود. جهت مدل کردن مسئله، متغیرهای تصمیم در جدول (۲) تعریف شده‌اند.

جدول (۲): متغیرهای تصمیم

زمان ورود شناور i	$0 \leq$	a_i
زمان شروع خدمت‌رسانی به شناور i	$0 \leq$	m_i
کل زمان خدمت‌رسانی به شناور i	$0 \leq$	h_i
در صورتی که مقطع k مقطع شروع شناور i باشد معادل ۱ و در غیر این صورت ۰	باینری	s_k^i
در صورتی که شناور i مقطع k را اشغال کند معادل ۱ و در غیر این صورت ۰	باینری	x_{ik}
در صورتی که شناور i بدون هیچ همپوشانی فضایی در مجاور شناور j پهلو گیرد معادل ۱ و در غیر این صورت ۰	باینری	y_{ij}
در صورتی که خدمت‌رسانی شناور i قبل از شروع خدمت‌رسانی شناور j تمام شود معادل ۱ و در غیر این صورت ۰	باینری	z_{ij}
در صورتی که شناور i با توجه به زمان ورود ریسک‌گریز باشد معادل ۱ و در غیر این صورت ۰	باینری	r_i

مسئله به صورت زیر فرمول‌بندی شده است:

معادله (۱)		$\min \sum_{i \in N} (m_i - a_i + h_i)$
معادله (۲)	$\forall i \in N,$	$s.t. m_i - a_i \geq 0$
معادله (۳)	$\forall i \in N,$	$a_i = A_i r_i + U_i (1 - r_i)$
معادله (۴)	$\forall i, j \in N, i \neq j,$	$\sum_{k \in M} (b_k s_k^j) + B(1 - y_{ij}) \geq \sum_{k \in M} (b_k s_k^i) + L_i$
معادله (۵)	$\forall i, j \in N, i \neq j,$	$m_j + B(1 - z_{ij}) \geq m_i + h_i$
معادله (۶)	$\forall i, j \in N, i \neq j,$	$y_{ij} + y_{ji} + z_{ij} + z_{ji} \geq 1$
معادله (۷)	$\forall i \in N,$	$\sum_{k \in M} s_k^i = 1$
معادله (۸)	$\forall i \in N,$	$\sum_{k \in M} (b_k s_k^i) + L_i \leq L$
معادله (۹)	$\forall i \in N, \forall k \in M,$	$\sum_{p \in M} (x_{ikp} s_p^i) = x_{ik}$
معادله (۱۰)	$\forall i \in N, \forall k \in M,$	$(d_k - D_i) x_{ik} \geq 0$
معادله (۱۱)	$\forall i \in N, \forall k \in M, \forall w \in W^i$	$h_i \geq h_k^{iw} (l_k / L_i) Q_i x_{ik}$
معادله (۱۲)	$\forall i \in N, \forall k \in M,$	$s_k^i \in \{0, 1\}$
معادله (۱۳)	$\forall i \in N, \forall k \in M,$	$x_{ik} \in \{0, 1\}$
معادله (۱۴)	$\forall i, j \in N,$	$y_{ij} \in \{0, 1\}$
معادله (۱۵)	$\forall i, j \in N,$	$z_{ij} \in \{0, 1\}$

تابع هدف (معادله ۱) مجموع زمان خدمت‌دهی به شناورهای پهلو گرفته را کمینه می‌کند. محدودیت (۲) تضمین می‌کند که هر شناور فقط بعد از ورود خدمت‌رسانی می‌شود. محدودیت (۳) تعیین می‌کند که کدام شناورها نسبت به زمان ورود ریسک‌گریزتر هستند. محدودیت‌های (۴) تا (۶)، محدودیت‌های عدم‌همپوشانی برای هر دو شناور پهلوگیرنده در بندر هستند، تا تضمین کنند هیچ دو شناوری در زمان و فضا هم‌پوشانی ندارند. محدودیت (۷) تضمین می‌کند که هر شناور می‌تواند تنها یک مقطع شروع داشته باشد. محدودیت (۸) اطمینان می‌دهد که شناور پهلو گرفته از کل طول اسکله تجاوز نکند. محدودیت (۹) اطمینان می‌دهد که هر شناور تنها تعدادی از مقاطع را اشغال می‌کند که توسط طول خود و مقطع شروع تعیین شده باشد. محدودیت (۱۰) اطمینان می‌دهد که عمق آب‌خور شناور از عمق آب‌خور هیچ یک از مقاطع اشغال شده تجاوز نکند. محدودیت (۱۱) مجموع زمان تخلیه/بارگیری برای هر کدام از شناورهای مورد نظر را تعیین می‌کند. در نهایت، محدودیت‌های (۱۲) تا (۱۵) دامنه متغیرهای تصمیم را تعریف می‌کنند.

همان طور که گفته شد، در عمل زمان واقعی ورود شناورها از مقدار تخمین شده آنها انحراف دارد که این امر می‌تواند به‌طور بالقوه زمانبندی مینا را مختل کند و منجر به غیرعملی شدن آن شود. در این تحقیق، BAP در محاسبه بلادرنگ برای انحراف در زمان ورود شناورها، با معرفی محدودیت‌ها و متغیرهای اضافی به مدل موردنظر حل شده است. وقتی که یک زمانبندی پهلوگیری مینا برای شناورهای ورودی به بندر توسعه داده می‌شود، مقامات بندر منابع مختلفی مانند نیروی انسانی، تجهیزات تخلیه/بارگیری و در دسترس بودن محموله وابسته به الزامات پهلوگیری بیش از افق برنامه‌ریزی به آن اختصاص می‌دهد. در صورت اختلالات، این منابع نیازمند تخصیص مجدد فضا و یا زمان است و این امر هزینه‌های افزونی به بندر تحمیل می‌کند. از این رو، برای زمانبندی مینای داده شده، هدف ما کمینه کردن مجموع کل هزینه‌های خدمات پهلوگیری شناور در بندر، و هزینه‌های متناقض زمانبندی مجدد در صورت اختلال می‌باشد؛ چنانکه توسط مجموع وزنی انحراف فضا و زمان زمانبندی به‌روزر شده از نسخه اصلی آن اندازه‌گیری شود.

۲- تجزیه و تحلیل داده‌ها

۲-۱- توسعه مدل

۲-۱-۱- ملاحظات مربوط به زمان تخلیه/بارگیری

همان طور که معلوم شد، زمان عملیات یک کشتی از جمله متغیرهای ورودی اصلی و اساسی در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی مسئله تخصیص پهلوگاه می‌باشد. کاهش این زمان که در زمان حضور کشتی‌ها در بندر تأثیر بسزایی دارد، از اهداف مشترک صاحبان کشتی و متصدیان پایانه به‌شمار می‌رود. با توجه به روابط به‌کار گرفته شده در این پژوهش و اغلب پژوهش‌های موجود در ادبیات موضوع، کل زمان صرف شده از زمان پهلوگیری کشتی تا زمان ترک پهلوگاه، به‌عنوان زمان تخلیه و بارگیری در نظر گرفته شده است.

عوامل مختلفی در تعیین زمان عملیات یک کشتی در پهلوگاه مؤثر هستند که از جمله مهم‌ترین و اساسی‌ترین آنها یکی میزان حجم عملیات تخلیه و بارگیری موجود در هر کشتی و دیگری نحوه تخصیص جرثقیل‌ها به کشتی در طول مدت عملیات تخلیه و بارگیری می‌باشد. از سوی دیگر تعیین نحوه تخصیص جرثقیل‌ها به کشتی‌های پهلو گرفته در اسکله، پیش از مشخص شدن برنامه زمانبندی تخصیص پهلوگاه به کشتی‌ها، کاری بسیار دشوار می‌باشد و با پیچیدگی‌هایی همراه است که خود به تنهایی مقوله و مبحث گسترده‌ای می‌باشد و فراتر از دامنه این پژوهش است و به مباحثی مانند تخصیص یا توالی عملیات جرثقیل‌ها ارجاع می‌شود. در پژوهش حاضر جهت تخمین میزان زمان عملیات کشتی‌های مورد مطالعه، تنها به در نظر گرفتن مقدار بار کشتی بر حسب واحد کانتینرهای ۲۰ فوتی (TEU) بسنده شد و زمان تخلیه/بارگیری ثابت و مفروض در نظر گرفته شده است.

در برآورد زمان تخلیه/بارگیری، مقدار بار کشتی به‌عنوان متغیر مستقل و زمان تخلیه/بارگیری به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از رگرسیون خطی در حالت خطی با ثابت و به‌کارگیری نرم‌افزار آماری SPSS رابطه بین این دو متغیر برآورد شده است.

$$h_i = \alpha Q_i + \beta \quad \text{معادله (۱۶)}$$

در رابطه بالا، h_i زمان تخلیه/بارگیری شناور i ، α و β مقادیر ثابتی هستند که توسط رگرسیون به‌دست می‌آیند و Q_i بار شناور i بر حسب TEU می‌باشد.

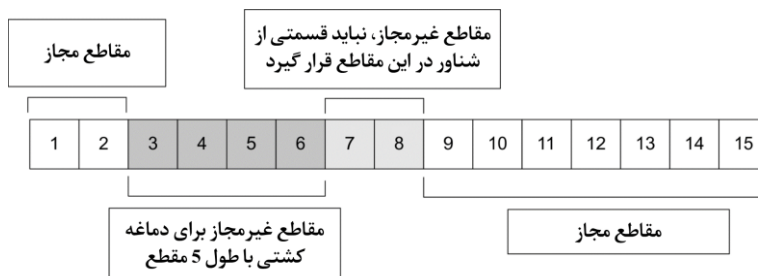
۲-۱-۲- ملاحظات مربوط به محدودیت‌های عمق آب‌خور

برای هر مقطع اسکله، عمق آب‌خور مقطع d_k محدود است. عمق آب‌خور شناور D_i توسط انتخاب بیشترین مقدار از بین عمق آب‌خور ورود و عمق آب‌خور خروج تعریف می‌شود:

$$D_i = \max(D_i^{ar}, D_i^{dep}) \quad \text{معادله (۱۷)}$$

در بیشتر مسائل تخصیص پهلوگاه جهت اجتناب از پیچیدگی مسئله هنگام تخصیص پهلوگاه، عمق آب‌خور شناور مورد نظر در طول مدت عملیات تخلیه/بارگیری ثابت فرض می‌شود؛ در حالی که در واقعیت چنین نیست و در بیشتر موارد عمق آب‌خور لحظه ورود شناور با عمق آب‌خور لحظه خروج آن متفاوت است. به‌علاوه، در اغلب موارد عمق آب‌خور مقاطع مختلف در راستای اسکله یکسان فرض می‌شود، در صورتی که ممکن است تعدادی از مقاطع به دلایل مختلفی از جمله ناهمواری‌های کف دریا و یا عدم لایروبی بموقع، عمق آب‌خوری کمتر از سایر مقاطع در راستای اسکله داشته باشند که این موضوع می‌تواند برنامه زمانبندی را در مرحله اجرا دچار مشکل سازد. مدل ارائه‌شده در این پژوهش به گونه‌ای کدنویسی شده است که وجود محدودیت عمق آب‌خور

در هر طول مشخصی از اسکله به آسانی در نظر گرفته شود. شایان ذکر است که محدودیت‌های عمق آب‌خور برای یک مقطع مشخص، تخصیص مقاطع دیگر در راستای اسکله را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مسئله در شکل (۱) نشان داده شده است:

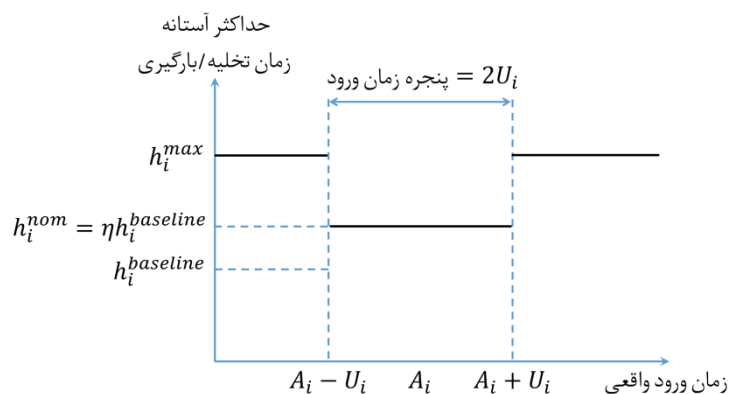


شکل (۱): موقعیت مجاز پهلوگیری برای شناوری که نیازمند ۵ مقطع طولی می‌باشد. در اینجا مقاطع ۷ و ۸ محدودیت عمق آب‌خور دارند

شکل بالا به وضوح نشان می‌دهد که پهلوگیری در مقاطع ۷ و ۸ به دلایل ناهمواری کف دریا محدود شده است؛ این محدودیت‌ها به سایر موقعیت‌های پهلوگیری وابسته به طول شناور اعمال نبر می‌شوند (موقعیت‌های ۳ تا ۶ در شکل (۱)).

۲-۱-۳- اعمال تابع جریمه برای شناورهای تأخیری

علاوه بر محدودیت‌های ذکر شده، در این مدل برخی توافقات قراردادی مشخص بین مدیران پایانه و شرکت‌های کشتیرانی به صراحت در نظر گرفته شده‌اند. در عمل، در پایانه کانتینری مقامات بندر و خطوط کشتیرانی یک موافقتنامه دارند که بیشترین آستانه زمان فرآیند و زمان رهسپاری برای هر شناور ورودی را در صورتی که ورود آن در داخل یک پنجره زمانی مشخص باشد، تضمین می‌کند (Hendriks and et al., 2010). به عبارت دیگر، هرگاه زمان پردازش شناور زیر مقدار اسمی معین است، در صورتی که زمان ورود واقعی a_i شناور i در پنجره زمان ورود $[A_i - U_i, A_i + U_i]$ قرار گیرد، ممکن است توافقات مشابهی اجرا شود. مقدار زمان تخلیه/بارگیری اسمی هر شناور می‌تواند به‌عنوان یک فاکتور η برابر بزرگ‌تر از زمان تخلیه/بارگیری شناور در برنامه زمانبندی مبنا یا کمترین زمان تخلیه/بارگیری h_i^{min} شناور i برای ارجح‌ترین مکان پهلوگیری شناور در امتداد اسکله در نظر گرفته شود. در صورتی که ورود شناور خارج از پنجره ورود باشد، چنانچه توسط کم اهمیت‌ترین ترجیح مکان پهلوگیری شناور در امتداد اسکله داده شده باشد، زمان پردازش توسط بیشترین مقدار زمان تخلیه/بارگیری محدود شده است. شکل (۲) بیشترین آستانه پوشش زمان تخلیه/بارگیری را برای مقادیر مختلف زمان ورود واقعی نشان می‌دهد.



شکل (۲): پوشش زمان تخلیه/بارگیری برای تغییرات مقادیر زمان ورود

جهت مدل کردن ریاضی این مسئله، یک متغیر تصمیم دودویی کمکی اضافی $\theta_i(t)$ تعریف می‌کنیم، تا در صورتی که زمان t در داخل پنجره زمان ورود شناور i قرار گیرد برابر ۱، و در غیر این صورت برابر ۰ است. این نتایج در زیر آمده است:

معادله (۱۸)

$$h_i \leq \eta h_i^{min} + M(1 - \theta_i(t))$$

معادله (۱۹)

$$a_i + M(1 - \theta_i(t)) \geq A_i - U_i$$

معادله (۲۰)

$$a_i \leq A_i + U_i + M(1 - \theta_i(t))$$

معادله (۲۱)

$$\sum_{t=A_i-U_i}^{A_i+U_i} \theta_i(t) = 2U_i + 1$$

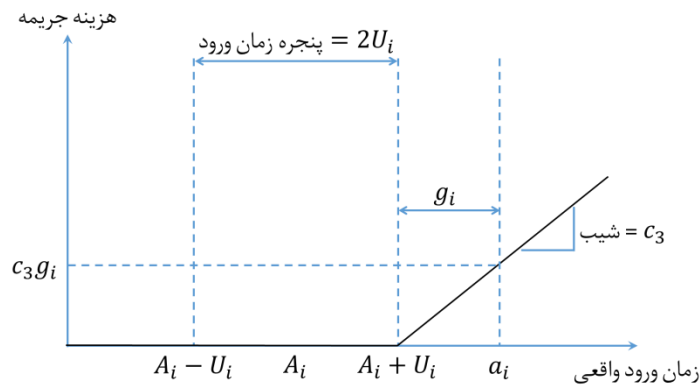
یک آنالیز از کل هزینه متحمل شده بندر تحت حالت‌های اختلال متفاوت برای یک زمانبندی مبنای داده شده، باید ما را به یافتن راهبرد قیمت‌گذاری مناسبی قادر سازد که بندر می‌تواند جهت کسب درآمد از شناورهایی که دیر می‌رسند اتخاذ کند. برای مثال، می‌تواند توافقات قراردادی میان مدیران بندر و خطوط کشتیرانی باشد که مطابق آن در صورتی که زمان ورود واقعی کشتی آنسوی انتهای سمت راست پنجره زمانی ورود خود که توسط $A_i + U_i$ معلوم شده باشد، ممکن است بندر هزینه‌های زیادی را به متصدیان شناور وارد کند. این امر در مطالعه سبک سنگین کردن بین درآمد به دست آمده توسط بندر از شناورهای دیر کرده در ورود و هزینه‌های متحمل شده توسط بندر به دلیل زمانبندی مجدد در صورت اختلال، جالب خواهد بود. هزینه جریمه P_i تحمیل شده بر شناور i می‌تواند هر تابع پیچیده تأخیر g_i آنسوی انتهای سمت راست پنجره ورود باشد. این امر به صورت گرافیکی در شکل ۳ توضیح داده شده است که در آن جهت سادگی برای مقدار واحد بار یک رابطه خطی فرض شده است. برای رابطه خطی داریم:

معادله (۲۲)

$$g_i = \text{maximum}(a_i - (A_i + U_i), 0)$$

معادله (۲۳)

$$P_i = c_3 g_i$$



شکل (۳): هزینه جریمه برای تغییرات مقادیر زمان ورود

در اینجا، c_3 پارامتری است که می‌تواند از مطالعه عمیق نتایج بازیابی BAP در بلادرنگ تعیین شود که این بحث خارج از حوزه مطالعه این پژوهش می‌باشد.

اولویت خدمات مختلف μ_i برای پهلوگیری شناورهای وارده به بندر در نظر گرفته می‌شود. در عمل، اگر یک شناور با اولویت بالاتر دیر برسد، هنوز هم می‌تواند به شناوری با اولویت خدمت کمتر ترجیح داده شود. از این رو، به صراحت اولویت‌های خدمت شناورها در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در هر لحظه از زمان داده شده در افق برنامه‌ریزی، تابع هدف به کمینه رساندن مجموع کل هزینه خدمت زمانبندی تحقق یافته و هزینه زمانبندی مجدد داده شده از طریق مجموع وزنی انحراف تأخیر رهسپاری و انحراف مکان پهلوگیری از برنامه زمانبندی مبنای اصلی، برای تمام شناورهای اختصاص داده نشده در همان لحظه از زمان می‌باشد. فرض کنید $b_i(k')$ نشان‌دهنده شروع مکان پهلوگیری شناور i و e'_i نشان‌دهنده زمان رهسپاری شناور i در زمانبندی مبنای باشد.

در نهایت هزینه تابع هدف از طریق زیر به دست می‌آید:

$$\text{معادله (۲۴)} \quad \min Z = \sum_{i \in N_u} (m_i - A_i + h_i) + \sum_{i \in N} (c_1 |b_i(k') - b_i(k)| + c_2 \mu_i |e'_i - e_i|)$$

به شرط محدودیت‌های مربوط به مسئله تخصیص پهلوگاه قطعی و محدودیت‌های (۱۸)-(۲۳). در اینجا، c_1 و c_2 به ترتیب پارامترهای وزن‌دهی برای انحراف فضا و زمان هستند.

۲-۲- فرض‌های پژوهش

فرض‌های اصلی این الگوریتم بازیابی برای مسئله تخصیص پهلوگاه می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود:

- (۱) همان‌طور که بحث شد، عملکرد هر الگوریتم بلادرنگ وابستگی زیادی به شیوه معلوم شدن داده‌ها دارد. در این الگوریتم، فرض شد که هر شناور وارده زمان دقیق ورود خود را در یک مدت زمان ثابت مشخص قبل از زمان ورود واقعی منتشر شود، زمانبندی پهلوگیری هر بار که زمان ورود هر شناوری به‌روز شده و از مقدار مورد انتظار آن انحراف داشته باشد، مجدداً بهینه می‌شود. یک‌بار که زمان ورود شناور به‌روز شد، تخصیص پهلوگیری آن توسط بهینه‌سازی مجدد کل شناورهای اختصاص داده نشده در زمانبندی با تابع هدف (۲۴) مشخص می‌شود و تخصیص شناورهای مذکور از آن به بعد بدون تغییر باقی می‌ماند. از این رو، در هر لحظه داده شده در افق برنامه‌ریزی H، زمانبندی پهلوگیری همه شناورها که زمان ورود دقیق آنها به‌روز شده است ثابت و غیرقابل تغییر در نظر گرفته شده است.
- (۲) هنگامی که اطلاعات تأخیر ورود در بلادرنگ تنها τ ساعت قبل از ورود واقعی منتشر شود، زمانبندی پهلوگیری هر بار که زمان ورود هر شناوری به‌روز شده و از مقدار مورد انتظار آن انحراف داشته باشد، مجدداً بهینه می‌شود. یک‌بار که زمان ورود شناور به‌روز شد، تخصیص پهلوگیری آن توسط بهینه‌سازی مجدد کل شناورهای اختصاص داده نشده در زمانبندی با تابع هدف (۲۴) مشخص می‌شود و تخصیص شناورهای مذکور از آن به بعد بدون تغییر باقی می‌ماند. از این رو، در هر لحظه داده شده در افق برنامه‌ریزی H، زمانبندی پهلوگیری همه شناورها که زمان ورود دقیق آنها به‌روز شده است ثابت و غیرقابل تغییر در نظر گرفته شده است.
- (۳) در فرآیند بهینه‌سازی، تنها شناورهای اختصاص داده نشده در آن لحظه از زمان، در نظر گرفته شده‌اند. زمان ورود هر شناور اختصاص داده نشده که به آن لحظه به‌روز نشده است، در صورتی که زمان فعلی t کمتر از $A_i - \tau$ باشد، معادل با مقدار مورد انتظار آن و یا در غیر این صورت معادل با $t + \tau$ فرض شده است. محدودیت‌های زمان تخلیه/بارگیری بر همین روال اعمال شده‌اند.
- (۴) در محاسبه مقدار انحراف میان زمانبندی اولیه و زمانبندی اصلاح شده، فاصله بین دو پایانه کانتینری ۱ و ۲ در بندر شهید رجایی، به‌طور میانگین ۲۵۰۰ متر فرض شده است.
- (۵) در محاسبه ضریب تخلیه/بارگیری، بار کشتی به‌عنوان تنها عامل تأثیرگذار مورد استفاده قرار گرفت، در حالی که در واقعیت این ضریب می‌تواند تابع عوامل مختلفی از جمله ظرفیت جرتقیل‌های اسکله، طول شناور، ظرفیت محوطه انبار و ظرفیت سایر تجهیزات مورد استفاده باشد.
- (۶) در تابع هدف (۳-۲۴) پارامتر $c_1 = 0.002$ و پارامتر $c_2 = 1$ انتخاب شده‌اند، که نشان می‌دهد جابجایی نزدیک به ۵۰۰ متر در مکان پهلوگیری شناور، معادل با ۱ ساعت تأخیر اضافی در نظر گرفته شده است. پنجره ورود جهت اعمال محدودیت‌های زمان تخلیه/بارگیری، U_i برای همه شناورها برابر ۸ ساعت انتخاب شده است، پارامتر τ مربوط به انتشار اطلاعات ورود برابر ۵ ساعت، و پارامتر η معادل ۱٫۲ فرض شده است، مگر اینکه به طریق دیگری مشخص شده باشند. اولویت شناور μ_i برای همه شناورهای ورودی دقیقاً معادل ۱ انتخاب شده است.
- (۷) در لحظه ابتدای افق برنامه‌ریزی، هیچ شناوری در اسکله پهلو نگرفته و اسکله خالی می‌باشد.

۳-۲- علت انتخاب روش

مدل‌های ارائه شده را نمی‌توان با نرم‌افزارهای رایج حل مسائل برنامه‌ریزی ریاضی، نظیر گمز، یا لینگو حل نمود؛ زیرا پایه و اساس برنامه‌ریزی پهلوگاه از ایده «مسئله برش»^۸ گرفته شده است. زمان حل اینگونه مسائل با افزایش ابعاد مسئله به‌شدت افزایش می‌یابد. در واقع این قبیل مسائل جزء دسته‌بندی مسائل با زمان حل نامایی می‌باشند. در نتیجه برای اینکه بتوان در زمان معقول به یک جواب بهینه کلی و یا نزدیک آن رسید، باید از روش‌های فراابتکاری استفاده شود. در این پژوهش برای حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک^۹ استفاده می‌شود.

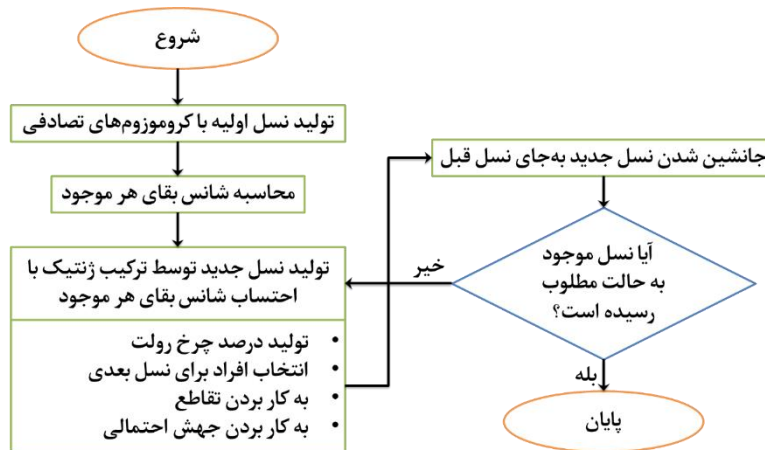
در این پژوهش، روش ابتکاری الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله تخصیص پهلوگاه پیوسته و دینامیک بر روی نرم‌افزار متلب کدنویسی شده و در موارد متعددی مورد آزمون قرار گرفته است.

۴-۲- الگوریتم ژنتیک

در الگوریتم‌های ژنتیک ابتدا به‌طور تصادفی یا الگوریتمیک، چند جواب برای مسئله تولید می‌گردد که این مجموعه جواب جمعیت اولیه نامیده می‌شود. هر جواب یک کروموزوم نامیده می‌شود. سپس با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک پس از انتخاب کروموزوم‌های بهتر، کروموزوم‌ها با هم ترکیب، و جهشی در آنها ایجاد می‌شود. در نهایت نیز جمعیت فعلی با جمعیت جدیدی که از ترکیب و جهش در کروموزوم‌ها حاصل شده است، ترکیب می‌شوند. شکل (۴) فرآیند یک الگوریتم ژنتیک را جهت حل یک مدل به تصویر می‌کشد.

^۸ Cutting Stock Problem (CSP)

^۹ Genetic Algorithm



شکل (۴): فرآیند الگوریتم

در مسئله مورد نظر این پژوهش یک کروموزوم که شامل متغیرهای تصمیم مسئله می‌باشد، جهت نمایش یک راه‌حل منحصر به فرد استفاده شده است. نمایش تصویری کروموزوم به‌طور معمول ذره رشته‌هایی با طول ثابت هستند. هر موقعیت در کروموزوم، که ژن هم نامیده می‌شود، نشان‌دهندهٔ قسمتی از راه‌حل است. مقدار یک ژن نشان‌دهندهٔ تصمیمی برای یک قسمت از راه‌حل می‌باشد. برای هر راه‌حل، تصمیم‌گیری در رابطه با مقدار متغیرهای تصمیم مهم است. در صورت معلوم شدن این مقادیر، زمان انتظار و تخلیه/بارگیری همه شناورهای آن راه‌حل محاسبه می‌شود. جهت محاسبه با کدنویسی، لازم است زمان آماده به خدمت پهلوگاه، زمان ورود شناورها، همچنین زمان تخلیه/بارگیری شناورها در پهلوگاه‌های مختلف، در نظر گرفته شوند.

در این مسئله هر کروموزوم یک ردیف درایه دارد که از نظر طولی تعداد درایه‌های آن با تعداد شناورهای موجود در مسئله برابر است. مقدار هر درایه در طول کروموزوم، نشان‌دهندهٔ عددی برای تصمیم‌گیری است که با استفاده از آن ترتیب خدمت‌دهی به شناورهای متناظر مطابق با راه‌حل مورد نظر مشخص خواهد شد. در این پژوهش، مقادیر درایه‌های کروموزوم نشان‌دهندهٔ مقادیر واقعی جهت خدمت‌دهی نیستند و تنها برای مقایسه جهت تصمیم‌گیری ترتیب خدمت‌دهی در پهلوگاه، استفاده می‌شوند.

برای مثال اگر مسئله‌ای از دو مقطع و ده شناور داشته باشیم، کروموزومی با طولی از ۱۰ ژن خواهیم داشت. در زیر مثالی از نمایش یک کروموزوم جهت به تصویر کشیدن یک راه‌حل مسئله آمده است:

جدول (۳): نمونه کروموزوم

V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}
۰/۲	۰/۱۲	۰/۳۴	۰/۵۶	۰/۳۱	۰/۷۷	۰/۲۳	۰/۱	۰/۱۴	۰/۳۲

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمایش جواب به صورت پیوسته می‌باشد. در کروموزوم نمایش داده شده، لازم است ابتدا درایه‌ها با توجه به مقدار آنها مرتب شوند که در نهایت همین ترتیب نتیجه شده نشان‌دهنده ترتیب ورود شناورها می‌باشد. در مثال بالا مشاهده می‌شود که در میان درایه‌های کروموزوم راه‌حل، بیشترین مقدار مربوط به درایه متناظر با شناور ششم می‌باشد (۰/۷۷)؛ بنابراین شناور ششم به‌عنوان اولین شناور ورودی در اسکله خدمت‌دهی خواهد شد. به همین صورت با مقایسه سایر درایه‌ها، قابل مشاهده است که بعد از درایه متناظر با شناور ششم، درایه متناظر با شناور چهارم بیشترین مقدار را دارد. در نتیجه بعد از شناور ششم شناور چهارم به‌عنوان شناور دوم در اسکله خدمت‌دهی خواهد شد و به همین صورت ترتیب خدمت‌دهی سایر شناورها نیز مشخص می‌شود. بنابراین جواب به صورت زیر خواهد بود:

جدول (۴): ترتیب خدمت‌دهی مشخص شده توسط نمونه کروموزوم

ترتیب	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
شناور	V_6	V_4	V_3	V_{10}	V_5	V_7	V_1	V_9	V_2	V_8
جواب	۰/۷۷	۰/۵۶	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۲۳	۰/۲	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱

در ادامه بعد از انجام سایر مراحل الگوریتم (انتخاب^{۱۰}، تقاطع^{۱۱}، جهش^{۱۲} و ...)، جمعیت جدید آماده وارد کردن به نسل بعدی می‌شود. انتظار می‌رود هر چقدر نسل‌های بیشتری تولید شوند، متوسط مقدار برازش افراد در هر نسل بالاتر رود. این انتظار به علت این حقیقت است که نامناسب‌ترین افراد به احتمال زیاد در نسل‌های جدیدتر ناپدید می‌شوند، در حالی که مناسب‌ترین آنها به احتمال زیاد زنده مانده و دوباره به تولید افراد بیشتر نوع مشابه در نسل‌های بعدی ادامه می‌دهند. همین مراحل تا آنجایی تکرار می‌شود که به نسل مطلوب مسئله برسد و الگوریتم پایان یابد.

۳- نتیجه‌گیری

در این بخش، برخی از نتایج اولیه حل مسئله تخصیص پهلوگاه ارائه می‌شود. همه آزمایش‌ها برای یک نمونه از اندازه $|N|=101$ شناور و $|M|=2$ مقطع برای یک حالت ورود انباشته در مدت یک ماه انجام شده که نتایج هر هفته به صورت جداگانه ارائه شده است. زمانبندی مبنا از راه حل BAP قطعی برای ورودهای دینامیک شناور و آرایش ترکیبی پهلوگاه، توسعه‌یافته در چارچوب بنادر فله به‌دست آمده است. لازم به ذکر است که زمان‌های ارائه‌شده در جدول (۲)، بر حسب ساعت و موقعیت مکانی بر حسب متر می‌باشند.

جدول (۵): مقایسه نتایج یک شناور به‌طور میانگین در هر سه زمانبندی

D_p	انحراف مکانی با زمانبندی اولیه	انحراف زمانی با زمانبندی اولیه	زمان انتظار	
-	-	-	۱۵/۸۲	تخصیص اولیه
۱۵/۶۸	۱۴/۱۴	۷۷۰/۹۱	۵/۵۱	تخصیص مجدد
۱۵/۲۹	۱۴/۵۰	۳۹۴/۰۴	۵/۷۳	تخصیص بازبازی شده

با استفاده از نتایج ارائه‌شده در جدول (۲)، مشاهده می‌شود که در برنامه پهلوگاه بازبازی شده نسبت به برنامه تخصیص مجدد، با وجود تغییر نامحسوس در مقادیر مربوط به زمان پهلوگیری، انحراف موقعیت پهلوگیری از برنامه تخصیص اولیه به اندازه ۴۸/۸۹ درصد کاهش داشته است. پارامتر D_p نیز به مقدار ۲/۴۹ درصد کاهش داشته است.

همچنین علاوه بر موارد ذکر شده، طبق پنجره زمانی پیشنهادی، تعداد ۱۰ شناور از ۱۰۱ شناور مورد بررسی، با بیش از ۸ ساعت تأخیر رسیده‌اند که بندر می‌تواند با جریمه شناورهای مذکور طبق تابع جریمه در نظر گرفته شده، در جهت جبران خسارت ناشی از عدم قطعیت و کسب درآمد، اقدام کند.

به‌طور خلاصه، در این پژوهش، مسئله بازبازی زمانبندی مبنای پهلوگیری در بلادرنگ هنگامی که اختلال رخ دهد حل شده است. مدل مورد نظر، مدل تخصیص پهلوگاه دینامیک ترکیبی توسعه‌یافته با در نظر گرفتن محدودیت‌های عمق آب‌خور و برخی توافقات قراردادی مشخص میان متصدیان پایانه و شناورها می‌باشد. تا جایی که دانش ما می‌رسد، محققان بسیار کمی جهت مطالعه مسئله بازبازی بلادرنگ با استفاده از رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی در عملکرد بندر تلاش کرده‌اند. در این پژوهش یک رویکرد بازبازی مبتنی بر بهینه‌سازی با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک جهت حل BAP در بلادرنگ برای زمانبندی مبنای داده شده ارائه شد. نتایج اولیه نشان‌دهنده این است که الگوریتم ارائه‌شده می‌تواند به‌طور موفق جهت کمینه کردن اثر اختلالات در بلادرنگ به‌کار گرفته شود.

پیشنهادات:

تحلیل عمیق‌تر براساس آزمایش‌های عددی گسترده نیازمند یافتن مقادیر مناسب پارامترهای ورودی متفاوت C_1 و C_2 به ترتیب مربوط به هزینه جابه‌جایی شناور در طول اسکله و تأخیر رهسپاری شناور با توجه به زمانبندی مبنا، و پارامترهای مربوط به توابع هزینه و محدودیت‌های زمان تخلیه/بارگیری می‌باشد که می‌تواند درآمدهای به‌دست آمده بندر را بیشینه کند.

¹⁰ Selection

¹¹ Crossover

¹² Mutation

توسعه فرمول‌بندی استوار برای مسئله تخصیص پهلوگاه با درجه مشخص از پیش‌بینی تأخیرها و تغییرپذیری در اطلاعات است. الگوریتم بازیابی می‌تواند در هر دو مورد فرمول‌بندی قطعی و استوار به کار گرفته شود و عملکرد از لحاظ از دست دادن درآمد در مرحله برنامه‌ریزی و صرف‌جویی بازیابی در صورت اختلالات، مورد مقایسه قرار گیرد.

عدم قطعیت در زمان ورود کشتی سبب کمبود و یا بی‌استفاده ماندن امکانات می‌شود؛ از این رو به احتمال زیاد در یک زمان مشخص پایانه‌ای منابعی دارد که بی‌استفاده مانده‌اند در حالی که پایانه دیگر با کمبود منابع مواجه شده است. ارائه راهکاری در جهت هماهنگی و همکاری بیشتر بین پایانه‌های مجاور، می‌تواند در بهره‌برداری بهینه‌تر از منابع پایانه‌ای مؤثر باشد.

مراجع

1. Günther, H.O. K. K. H. (2013). Container Terminals and Automated Transport Systems. Vol. 53, No. 9.
2. Zhen, L., Lee, L. H., Chew. E. P. (2011). "A decision model for berth allocation under uncertainty". Eur. J. Oper. Res., Vol. 212, No. 1, pp. 54–68.
3. Zhen, L., Chang, D.F. (2012). "A bi-objective model for robust berth allocation scheduling". Comput, Ind. Eng., Vol. 63, No. 1, pp. 262–273.
4. Birge, J. R. (2001). "Introduction to Stochastic Programming • Stochastic optimization". No. December, pp. 1–12.
5. Kall, P., Mayer, J. (2005). "Stochastic linear programming: models, theory and computation". Int. Ser. Oper. Res. Manag. Sci.
6. Wallace, S., Ziemba, W. (2005). Applications of stochastic programming.
7. "Technical Note - Convex Programming with Set- Inclusive Constraints and Applications to Inexact Linear Programming". (1973).
8. Bertsimas, D., Melvyn, S. (2003). "Robust discrete optimization and network flows". Math. Program.
9. Nemirovski, A. (1998). "Robust convex optimization". Vol. 23, No. 4, pp. 769–805.
10. Nemirovski, (1999). "Robust solutions of uncertain linear programs". Vol. 25, pp. 1–13.
11. Ben-tal, A. Nemirovski, (2000). "Robust solutions of Linear Programming problems contaminated with uncertain data". Vol. 424, pp. 411–424.
12. Sim, M. (2004). "The Price of Robustness". Vol. 52, No. 1, pp. 35–53.
13. Albers, S. (2003). "Online algorithms: a survey". Math. Program. 97, pp. 3–26.
14. Bierlaire, M. (2012). "Real Time Recovery in Berth Allocation Problem in Bulk Ports". No. April.
15. Umang, N., Bierlaire, M. Vacca, I. (2012). "Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports". Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev., Vol. 54, pp. 14–31.
16. Hendriks, M. Laumanns, M. Lefebber, E. Udding, J.T. (2010). "Robust cyclic berth planning of container vessels". OR Spectr, Vol. 32, No. 3, pp. 501–517.