

بهینه‌سازی مسئله تخصیص ناوگان، مسیریابی و سوخت‌گیری در حمل‌ونقل دریایی

مهسا لشگری*، علی‌اکبر اکبری

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی تهران جنوب

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/jmst.2019.135211.2174](https://doi.org/10.22113/jmst.2019.135211.2174)

چکیده

حمل‌ونقل دریایی عمده‌تأ شامل مسائلی چون تخصیص ناوگان، مسیریابی کشتی و مسائل مربوط به سوخت‌گیری کشتی‌ها هست. باید اشاره کنیم که مسئله تخصیص ناوگان، تعیین مسیر و برنامه‌ریزی کشتی‌ها باهدف حداقل‌سازی هزینه‌ها سروکار دارند. در سال‌های اخیر بیشتر شرکت‌های حمل‌ونقل دریایی با شرایط بازاری دشواری از لحاظ سوخت‌گیری و قیمت سوخت مواجه گردیده‌اند. با توجه به اینکه تقریباً ۶۰ درصد هزینه‌های کشتی به سوخت آن اختصاص دارد، پس هزینه‌های سوخت ناوگان به‌عنوان عمده‌ترین هزینه حمل‌ونقل دریایی محسوب می‌گردد. با توجه به شرایط رقابتی و عدم قطعیت‌های مختلف موجود در چنین مسائلی، بررسی یکپارچه تخصیص ناوگان، مسیریابی و سوخت‌گیری امری ضروری است. بر این اساس در پژوهش حاضر مسئله حمل‌ونقل دریایی لاینر، که در آن تصمیمات مربوط به انتخاب ناوگان، تعیین مسیر بهینه هر شناور، انتخاب سرعت حرکت آن بین بنادر مختلف و سیاست سوخت‌گیری مربوطه در شرایط عدم قطعیت قیمت و مصرف سوخت به‌صورت یکپارچه اتخاذ می‌شود، مورد مطالعه قرار گرفته است. وجود وابستگی سوخت‌گیری به مسیریابی و تخصیص با توجه به نیاز به سوخت‌گیری در طی مسیر کشتی اهمیت و ضرورت بررسی این دو موضوع به‌صورت یکپارچه را فراهم می‌سازد. بدین منظور مدل برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح خطی بارو یکرد مبتنی بر سناریو توسعه داده شده است. حل و تجزیه و تحلیل‌های مربوطه در خصوص نمونه مسائل مختلف و مزیت‌های رویکرد یکپارچه و تصادفی بر حالتی که پارامترهای مدل قطعی فرض می‌شود؛ از طریق شبیه‌سازی و دیگر روش‌ها نشان داده است.

واژگان کلیدی: مسیریابی کشتی، سیاست موجودی، تخصیص ناوگان، بهینه‌سازی سرعت کشتی

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: Mahsa.lashgari@ymail.com

۱. مقدمه

حمل و نقل دریایی یکی از بخش‌های مهم زنجیره تامین جهانی است. تقریباً ۸۰ درصد کالاها در دنیا از طریق دریا جابه‌جا می‌گردد (UNCTAD, 2012b). تحقیق و توسعه در حوزه‌های کشتیرانی، بندرها و اسکله‌ها زمینه دستیابی به چشم‌انداز بیست‌ساله جمهوری اسلامی ایران در صنایع حمل و نقل دریایی را فراهم می‌نماید.

حمل و نقل دریایی عمدتاً شامل مسائلی چون تخصیص ناوگان، مسیریابی کشتی و مسائل مربوط به سوخت‌گیری کشتی است. با توجه به اینکه تقریباً ۶۰ درصد هزینه‌های کشتی به سوخت آن اختصاص دارد، پس هزینه‌های سوخت ناوگان به‌عنوان عمده‌ترین هزینه حمل و نقل دریایی محسوب می‌گردد. بطوریکه یکی از چالش‌های اخیر که حمل و نقل دریایی با آن مواجه گشته است، چگونگی کاهش هزینه سوخت در محیطی با نوسانات قیمت سوخت است. باید اشاره داشت که هزینه‌های سوخت‌گیری عمدتاً وابسته بر قیمت سوخت که خود تابعی از محل سوخت‌گیری یا بندر مربوطه است.

یک عامل مهم دیگر در مطالعات مدل‌های سوخت‌گیری، میزان سرعت کشتی است، با توجه به این موضوع که سرعت کشتی یک عامل تعیین‌کننده میزان مصرف سوخت است. به‌بیان دیگر با افزایش سرعت میزان مصرف سوخت افزایش می‌یابد. و از طرفی کاهش سرعت نیز تأثیرگذار بر زمان‌بندی کشتی‌ها است؛ و نقض محدودیت‌های زمانی منجر به پرداخت هزینه‌های جریمه‌ای می‌گردد.

یکی از اولین پژوهش‌ها در زمینه بهینه‌سازی سرعت توسط (Ronen, 1982) بوده که یک فرمول مصرف درجه ۳ برای نرخ مصرف سوخت کشتی ارائه کرده است. تا ۲۰۰۹، توجه نسبتاً کمی به بهینه‌سازی سرعت شده؛ این قضیه ممکن است به دلیل قیمت پایین سوخت بوده باشد. اما با افزایش قیمت سوخت

و اهمیت آن در حمل و نقل دریایی میزان مطالعات طی مرور زمان افزایش یافته است. در ادامه مروری بر برخی تحقیقات صورت گرفته خواهیم داشت.

(Yao and Zhishuang, 2012) استراتژی مدیریت سوخت را برای یک سرویس خدمات حمل و نقل لاینر در نظر گرفته‌اند. استراتژی مدیریت سوخت شامل سه عنصر است: انتخاب بنادر سوخت‌گیری (محل سوخت‌گیری)، تعیین میزان سوخت‌گیری (مقدار سوخت) و تنظیم سرعت کشتی. از آنجاکه این سه عنصر باهم مرتبط هستند، پس بهینه‌سازی آن‌ها مشترک برای دستیابی به استراتژی مدیریت سوخت برای یک سرویس خدماتی ضروری است. همچنین در یک مدل مناسب نمایش رابطه بین نرخ مصرف سوخت و سرعت کشتی مهم است. در این مقاله بیان شده که این رابطه برای اندازه‌های مختلف کانتینرها متفاوت بوده و یک مدل تجربی برای بیان این ارتباط در اندازه‌های مختلف کانتینر بر اساس داده‌های واقعی حاصل از شرکت حمل و نقل دریایی فراهم شده است. همچنین اهمیت استفاده از مدل نرخ مصرف مناسب در استراتژی مدیریت سوخت ذکر شده و سپس یک مدل برنامه‌ریزی سطحی برای تعیین استراتژی مدیریت سوخت مطلوب گسترش داده شده است. همان‌طور که بیان شد، یکی از موضوعات مهم در حمل و نقل دریایی، مسیریابی است. تقریباً ۷۰ درصد کالاها در دنیا از طریق دریا جابه‌جا می‌گردند، اما به نسبت تحقیقات کمی در زمینه مسیریابی کشتی صورت گرفته است (Psaraftis, 1999).

گزارش‌های اخیر تجارت جهانی و حمل و نقل سازمان ملل نشان می‌دهد که حدود ۸۰ درصد حجم تجارت جهانی از طریق دریا صورت می‌گیرد. در حمل و نقل دریایی یافتن مسیر بهینه و همچنین نوسانات هزینه‌های سوخت به‌طور قابل ملاحظه‌ای نیاز به بهینه‌سازی مسیر و حداقل سازی هزینه‌های عملیاتی را تقویت می‌کند، مسیریابی کشتی به معنی توالی بندرهایی است که در نظر دارد یک کشتی در

نام هست. N_i و N_j ($i \neq j$) ممکن است بنادر مشابهی را نشان دهند. در اینجا در نظر داریم مسافت بین دو بندر i تا j را با تعیین بهترین مسیر و تنها با یک کشتی طی کنیم. البته در کل شبکه ممکن است برای خدمت‌رسانی نیاز به بیش از یک کشتی باشد. و چون مسئله تخصیص ناوگان یک تصمیم تاکتیکی بوده، بنابراین فرض شده که تعداد کشتی‌های تخصیص‌یافته مشخص است. هنگامی که یک کشتی وارد بندری می‌شود بر اساس موجودی سوخت اخیر آن و تمام اطلاعات در دسترس در مورد سوخت‌دهی یا عدم سوخت‌دهی بندر و همین‌طور قیمت سوخت در بندر تصمیم‌گیری راجع سوخت‌گیری گرفته می‌شود. در این مدل سیاست موجودی $(S_i(p), S_i(p))$ در خصوص سوخت‌گیری بکار گرفته شده؛ که بر اساس این سیاست موجودی سوخت در بندرهایی که امکان سوخت‌رسانی داشته باشند بررسی شده و اگر موجودی سوخت کمتر از $S_i(p)$ باشد کشتی به میزان $S_i(p)$ در بندر i می‌تواند سوخت‌گیری کند، و در غیر این صورت نمی‌تواند سوخت‌گیری کند. به بیان دیگر $S_i(p)$ حد پایینی برای میزان سوخت موجود در تانکر هست. همچنین باید بیان داشت که p قیمت اخیر سوخت هست. در این مدل کمبود سوخت مجاز هست، هرچند با هزینه جریمه بالایی آن را محدود ساخته‌ایم. بعلاوه همان‌طور که ذکر شد تغییرات قیمت سوخت با تغییر بندر تغییر کرده و نسبت به تغییرات زمانی حساس نیست. می‌توان تغییرات قیمت سوخت را بندر به بندر یا زمان به زمان در نظر گرفت. به دلیل اینکه زمان سفر بین بندرها به متغیر سرعت وابسته هست، پس مدل‌سازی تغییرات قیمت براساس تغییرات زمان به میزان قابل‌توجهی ابعاد مسئله را افزایش می‌دهد. از همه مهم‌تر، متوجه شدیم که مقابله با این چالش‌های اضافی ضروری نیست، چراکه در عمل، قبل از ورود به بندر بعدی اپراتورهای کشتی به چندین تأمین‌کننده سوخت نزدیک شده و مذاکراتی درباره قیمت سوخت

این بندرها بارگیری و تخلیه بار را در یک محدوده زمانی مشخص داشته باشد. بهینه‌سازی به دنبال مسیر بهتر جهت حداقل سازی هزینه‌ها هست (Karinah and kjeldise, 2011). حدود ۸۰ درصد تحقیقات در این حوزه به صورت مجزا به مسئله مسیریابی پرداخته است. و در حدود ۲۰ درصد پژوهش‌ها در حمل و نقل دریایی به مسئله مسیریابی و سوخت‌گیری در کنار هم پرداخته‌اند. البته ما در این مسئله در نظر داشتیم؛ مسیریابی بدون مسیرهای از پیش تعیین شده (مسیریابی متغیر) و سوخت‌گیری را مورد بحث و بررسی قرار دهیم. باید اشاره کرد که تا حال مسئله مسیریابی (متغیر) و سوخت‌گیری با بررسی موجودی سوخت، انتخاب مکان بهینه سوخت‌گیری، تعیین میزان بهینه سوخت‌گیری، تعداد مناسب کشتی و سرعت آنها با در نظر گرفتن پنجره زمانی و با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها به صورت یکپارچه دیده نشده است. همچنین باید اشاره کرد از مهم‌ترین نوآوری‌های این مدل‌سازی قیمت غیرقطعی سوخت و سناریوهای مختلف آن در کنار تمامی این مفروضات می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش فرض براینست که شرکت کشتیرانی دارای سیستم ناوگانی هست بطوریکه، هر کشتی از یک بندر (بندر مبدأ) شروع به حرکت، و سپس از میان بنادر (هر بندر فقط یک‌بار) عبور کرده و در نهایت به بندر آخر (بندر مقصد) روانه شده است؛ و هدف کاهش تعداد کشتی‌های بکار گرفته، یافتن کوتاه‌ترین مسیر و سرعت بهینه، تعیین بهترین بندرها برای سوخت‌گیری از جهت قیمت سوخت و در نهایت حداقل سازی هزینه‌ها هست. البته در نظر دارد که تمامی بنادر تنها یک‌بار و در پنجره زمانی مربوطه ملاقات شوند. N مجموعه بنادر بوده که N_1 اولین بندر و بندر مبدأ بوده که شروع حرکت تمامی کشتی‌ها از این محل می‌باشد، و همین‌طور N_i بندر

قبل از سوخت‌گیری واقعی انجام می‌دهند. هنگامی که آن‌ها بر سر قیمت توافق یابند، قیمت به ندرت به هنگام رسیدن کشتی به بندر تغییر می‌کند. این به دلیل رابطه کسب‌وکار طولانی‌مدت میان شرکت کشتیرانی و تأمین‌کنندگان سوخت هست. به این دلیل تصمیم به مدل‌سازی تغییرات قیمت براساس تغییر بندر نموده‌ایم. قبلاً نشان داده است که مصرف سوخت روزانه از فرمول $\bar{F} = k_1 * V^3 + k_2$ پیروی می‌کند، بطوریکه k_1 و k_2 دو عدد ثابت و V سرعت کشتی هست. با توجه به این نرخ مصرف سوخت غیرقطعی، یک سیاست سوخت‌گیری مناسب از تمام شدن سوخت در بین مسیر بین دو بندر جلوگیری می‌نماید. البته در این پژوهش فرض کرده‌ایم که مصرف سوخت وابسته به نوع کشتی با توجه به اندازه کشتی نیز هست. به قراری این فرمول بدین شکل است: $\bar{F}_m = k_{1m} * V_m^3 + k_{2m}$ که m نوع کشتی با توجه به اندازه آن را مشخص می‌سازد. نرخ مصرف سوخت تابعی درجه سه هست؛ که با در نظر گرفتن مجموعه سرعت‌های قابل انتخاب برای کشتی می‌توان تقریب خطی آن را فراهم ساخت. در ادامه پارامترها، متغیرها، مفروضات و مدل آورده شده است:

۱. به مفروضات مسئله در ادامه اشاره شده است.
۲. تعداد کشتی‌های در دسترس مشخص هست.
۳. محدودیت زمانی توزیع گسسته پیروی می‌کند.
۴. سیاست سوخت‌گیری رسیدن به بندرها وجود دارد.
۵. تصمیم‌گیری راجع سوخت به قیمت سوخت وابسته است.
۶. مصرف سوخت وابسته به اندازه و سرعت کشتی هست.
۷. به تمامی بنادر تنها باید فقط یک‌بار خدمت‌رسانی شود.
۸. تمامی کشتی‌ها از یک نقطه مبدأ شروع به حرکت کرده و در نقطه مقصد به سفر خود خاتمه می‌دهند.
۹. در بندر مبدأ حتماً تمامی کشتی‌ها سوخت‌گیری داشته باشند. مدل ریاضی در زیر آورده شده است:

جدول شماره ۱ مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها

مجموعه‌ها:	پارامترها:
N مجموعه بنادر	q_i بندر i امکان سوخت‌رسانی دارد یا خیر
R سناریو قیمت	τ_1 هزینه جریمه نقض محدودیت موجودی (برحسب واحد پولی)
G_m مجموعه انتخاب‌های ممکن سرعت V_m	τ_2 هزینه جریمه نقض محدودیت زمان (برحسب واحد پولی)
V_m مجموعه سرعت‌های حرکت ممکن بین بنادر	F هزینه ثابت سوخت‌گیری (برحسب واحد پولی)
M مجموعه انواع کشتی‌ها	h هزینه نگهداری هر تن موجودی سوخت (برحسب واحد پولی)
نمادها:	M عدد بزرگ
i اندیس بندر	\bar{N} تعداد کشتی در دسترس
j اندیس بندر	K_{1m} ضریب معادله مصرف سوخت
G اندیس سرعت انتخابی	K_{2m} ضریب معادله مصرف سوخت
m اندیس کشتی	متغیرها:
پارامترها:	$Z_{i,j,m}^{g,r}$ اگر سرعت حرکت انتخاب شود برابر یک در غیر این صورت صفر است.
p_i^f قیمت سوخت در بندر i تحت سناریو r	$X_{i,2,m}^f$ میزان زمانی که کشتی m دیرتر از برنامه به بندر i می‌رسد.
$d_{i,j}$ فاصله بین بندر i و j	$Y_{i,m}^f$ اگر سوخت کشتی m هنگام رسیدن به بندر i از حداقل میزان کمتر باشد، برابر یک است در غیر این صورت برابر صفر است.
$C_{i,m}$ میزان مصرف سوخت در بندر i توسط کشتی m	$B_{i,m}^f$ اگر کشتی m در بندر i سوخت‌گیری کند، برابر یک در غیر این صورت صفر است.
V_m^g سرعت کشتی m	$I_{i,1,m}^f$ موجودی سوخت کشتی m هنگام ورود به بندر i تحت سناریو r
$C'_{i,j,m}$ هزینه رفت‌وآمد بین بندرها i و j در کشتی m	$I_{i,1,m}^{r}$ موجودی مثبت سوخت کشتی m هنگام ورود به بندر i تحت سناریو r
π^r احتمال وقوع سناریوی r قیمت	$I_{i,2,m}^f$ موجودی سوخت کشتی m هنگام خروج به بندر i تحت سناریو r
t_i کل زمان در بندر i	F_m^g میزان مصرف سوخت در سرعت V_m^g
e_i زودترین زمان رسیدن به بندر i	$A_{i,m}^f$ زمان رسیدن کشتی m به بندر i
l_i دیرترین زمان رسیدن به بندر i	Z_m^r اگر از کشتی m استفاده گردد، برابر یک در غیر این صورت صفر است.
W_m ظرفیت سوخت کشتی m	
F'_m هزینه خرید یا اجاره کشتی	
n تعداد کل بندرها	
u_j متغیر حذف زیر تور	

$$\text{Min} \sum_{r \in R} \pi^r \left[\begin{array}{l} \sum_{i,j \in N} \sum_{m \in M} c'_{i,j} x'_{i,j,m} + \sum_{m \in M} f' z'^r_m \\ + \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} (I'_{i,2,m} - I'_{i,1,m} + c_{i,m}) \times p_i^r \\ + \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} f B'_{i,m} \times Q_i^r \\ + \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} (h I'_{i,2,m} + \tau_1 Y'_{i,m}) \\ + \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} \tau_2 (X'_{i,1,m} + X'_{i,2,m}) \end{array} \right] - (I'_{n+1,m} P'_{n+1,m})$$

$$I'_{1,1,m} = 0 \quad \forall i = 1, r \in R, m \in M \quad (1)$$

$$I'_{j,2,m} \leq S'_{j,m} - C_{j,m} + M \times \left(2 - B'_{j,m} - \sum_{i \in N} X'_{i,j,m} \right) \quad \forall j \in N, m \in M, r \in R \quad (2)$$

$$I'_{j,2,m} \geq S'_{j,m} - C_{j,m} - M \times \left(2 - B'_{j,m} - \sum_{i \in N} X'_{i,j,m} \right) \quad \forall j \in N, m \in M, r \in R \quad (3)$$

$$I'_{j,2,m} \leq I'_{j,1,m} - C_{j,m} + M \times \left(B'_{j,m} + 1 - \sum_{i \in N} X'_{i,j,m} \right) \quad \forall j \in N, m \in M, r \in R \quad (4)$$

$$I'_{j,2,m} \geq I'_{j,1,m} - C_{j,m} - M \times \left(B'_{j,m} + 1 - \sum_{i \in N} X'_{i,j,m} \right) \quad \forall j \in N, m \in M, r \in R \quad (5)$$

$$I'_{j,2,m} \leq S'_{j,m} - C_{j,m} + M \times (2 - B'_{j,m} - Z_m^r) \quad \forall i = 1, m \in M, r \in R \quad (6)$$

$$I'_{j,2,m} \geq S'_{j,m} - C_{j,m} - M \times (2 - B'_{j,m} - Z_m^r) \quad \forall i = 1, m \in M, r \in R \quad (7)$$

$$B'_{i,m} = Z_m^r \quad \forall i = 1, m \in M, r \in R \quad (8)$$

$$I'_{i,1,m} \leq I'_{i,1,m} + M Y'_{i,m} \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (9)$$

$$I'_{i,1,m} \geq I'_{i,1,m} - M Y'_{i,m} \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (10)$$

$$I'_{i,1,m} \geq -M(1 - Y'_{i,m}) \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (11)$$

$$I'_{i,1,m} \leq -M(1 - Y'_{i,m}) \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (12)$$

$$I'_{j,1,m} \geq I'_{i,2,m} - \bar{F}_m^g \times d_{i,j} - M(1 - Z_{i,j,m}^{g,r}) \quad \forall (i,j) \in N, g \in G, i \neq j, m \in M, r \in R \quad (13)$$

$$I'_{j,1,m} \leq I'_{i,2,m} - \bar{F}_m^g \times d_{i,j} + M(1 - Z_{i,j,m}^{g,r}) \quad \forall (i,j) \in N, g \in G, i \neq j, m \in M, r \in R \quad (14)$$

$$I'_{i,1,m} \leq s'_{i,m} + M(1 - B'_{i,m}) \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (15)$$

$$I'_{i,1,m} \geq s'_{i,m} + M B'_{i,m} \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (16)$$

$$\sum_{g \in G} Z_{i,j,m}^{g,r} = X'_{i,j,m} \quad \forall (i,j) \in N, i \neq j, m \in M, r \in R \quad (17)$$

$$-M \sum_{i \in N} X'_{i,j,m} \leq I'_{i,1,m} \leq M \sum_{i \in N} X'_{i,j,m} \quad \forall j \in N, m \in M, r \in R \quad (18)$$

$$B'_{i,m} \leq Z'_m \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (19)$$

$$B'_{i,m} \leq Q_i \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (20)$$

$$s'_{i,m} \leq S'_{i,m} \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (21)$$

$$S'_{i,m} \leq W_m + M(1 - B'_{i,m}) \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (22)$$

$$I'_{i,1,m} + M Y'_{i,m} \geq 0 \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (23)$$

$$A'_{i,m} + t_i + \sum_{g \in G} Z_{i,j,m}^{g,r} \times d_{i,j} / V_m^g \leq A'_{j,m} + M(1 - X'_{i,j,m}) \quad \forall (i,j) \in N, i \neq j, m \in M, r \in R \quad (24)$$

$$A_{i,m}^r + t_i + \sum_{g \in G} Z_{i,j,m}^{g,r} \times d_{i,j}/V_m^g \geq A_{j,m}^r - M(1 - X_{i,j,m}^r) \quad \forall (i,j) \in N, i \neq j, m \in M, r \in R \quad (25)$$

$$e_j \leq A_{j,m}^r + X_{i,1,m}^r + M(1 - X_{i,j,m}^r) \quad \forall j \in M, m \in M, r \in R \quad (26)$$

$$l_j \geq A_{j,m}^r + X_{i,1,m}^r - M(1 - X_{i,j,m}^r) \quad \forall j \in M, m \in M, r \in R \quad (27)$$

$$Z_{i,j,m}^{g,r} = Z_{i,j,m}^{g,r'} \quad \forall (i,j) \in N, (r,r') \in R, m \in M \quad (28)$$

$$S_{i,m}^r = S_{i,m}^{r'} \quad \forall i \in N, (r,r') \in R, m \in M \quad (29)$$

$$s_{i,m}^r = s_{i,m}^{r'} \quad \forall i \in N, (r,r') \in R, m \in M \quad (30)$$

$$B_{i,m}^r = B_{i,m}^{r'} \quad \forall i \in N, (r,r') \in R, m \in M \quad (31)$$

$$G_{n,n+1} = G_{n,0} \quad (32)$$

$$d_{n,n+1} = d_{n,0} \quad (33)$$

$$Z_{n,n+1,m}^{g,r} = Z_{n,0,m}^{g,r} \quad (34)$$

$$\bar{F}_m^g = K_{1,m}(V_m^g)^3 + K_{2,m} \quad (35)$$

$$\sum_{j=2}^{N-1} X_{1,j,m}^r = Z_m^r \quad \forall i = 1, m \in M, r \in R \quad (36)$$

$$\sum_{i=2}^{N-1} X_{1,N,m}^r = Z_m^r \quad \forall j = N, m \in M, r \in R \quad (37)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} X_{i,p,m}^r = \sum_{j=2}^N X_{p,j,m}^r \quad \forall p \in \{2,3 \dots N-1\}, m \in M, r \in R \quad (38)$$

$$X_{1,N,m}^r = 0 \quad \forall i = 1, j = N, m \in M, r \in R \quad (39)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{m \in M} X_{i,j,m}^r = 1 \quad \forall j \in \{2,3 \dots N-1\}, r \in R \quad (40)$$

$$\sum_{j=1}^{N-1} \sum_{m \in M} X_{N,j,m}^r = 0 \quad \forall i = N, r \in R \quad (41)$$

$$X_{i,j,m}^r = 0 \quad \forall i \in \{2,3 \dots N\}, j = 1, m \in M, r \in R \quad (42)$$

$$X_{i,j,m}^r \leq Z_m^r \quad \forall (i,j) \in N, m \in M, r \in R \quad (43)$$

$$X_{i,j,m}^r = 0 \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (44)$$

$$\sum_{j=2}^{N-1} \sum_{m \in M} X_{1,j,m}^r = \sum_{m \in M} Z_m^r \quad \forall i = 1, r \in R \quad (45)$$

$$\sum_{i=2}^{N-1} \sum_{m \in M} X_{i,N,m}^r = \sum_{m \in M} Z_m^r \quad \forall j = N, r \in R \quad (46)$$

$$\sum_{i=2}^{N-1} \sum_{m \in M} X_{i,N,m}^r = 1 \quad \forall i \in \{2,3 \dots, N-1\}, r \in R \quad (47)$$

$$u_{i,m}^r - u_{j,m}^r + \sum_{m \in M} nX_{i,j,m}^r \leq n - 1 \quad \forall (i,j) \in N, r \in R \quad (48)$$

$$1 \leq u_{i,m}^r \leq n \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (49)$$

$$\sum_{i=2}^{N-1} \sum_{m \in M} X_{i,j,m}^r \leq \bar{N} \quad \forall i = 1, r \in R \quad (50)$$

$$-MB_{i,m}^r \leq S_{i,m}^r \leq MB_{i,m}^r \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (51)$$

$$-MB_{i,m}^r \leq s_{i,m}^r \leq MB_{i,m}^r \quad \forall i \in N, m \in M, r \in R \quad (52)$$

$$a_{i,m}^r = 0 \quad \forall i = 1, m \in M, r \in R \quad (53)$$

$$S_{i,m}^r \geq 0, X_{1,i,m}^r \geq 0, X_{2,i,m}^r \geq 0, I_{i,2,m}^r \geq 0, \bar{F}_m^r \geq 0, A_{i,m}^r \geq 0, I_{i,m}^r \geq 0 \quad (54)$$

$$Y_{i,m}^r, Z_{i,j,m}^{g,r}, B_{i,m}^r, X_{i,j,m}^r, Z_m^r \in \{0,1\} \quad (55)$$

تابع هدف کل هزینه خدمت‌رسانی را حداقل می‌سازد، که شامل هزینه ثابت و متغیر سوخت‌گیری، هزینه نگهداری سوخت، هزینه جریمه نقض محدودیت‌های پنجره زمانی و حداقل میزان موجودی سوخت، هزینه جابه‌جایی میان بندرها و هزینه ثابت استفاده از هر کشتی هست. هزینه ثابت سوخت‌گیری در میان تمامی بندرها ثابت در نظر گرفته شده است. و همین‌طور هزینه نگهداری نیز ثابت و برای موجودی سوخت کشتی هنگام خروج از یک بندر هست. برای سوخت باقی در انتهای مسیر فرض شده که بتوان سوخت را فروخت و درآمدی حاصل ساخت. و اما محدودیت‌های مدل: محدودیت ۱ بیان می‌دارد موجودی اولیه سوخت هر کشتی در بندر مبدأ تحت سناریوهای مختلف قیمت صفر هست. محدودیت ۲-۵ نشان می‌دهد اگر کشتی m در بندر i سوخت‌گیری کند، پس موجودی سوخت هنگام خروج از مبدأ سطح بالای سوخت منهای میزان مصرف در بندر i هست و در غیر این صورت یعنی عدم سوخت‌گیری موجودی سوخت هنگام خروج از مبدأ برابر موجودی سوخت هنگام رسیدن به بندر i منهای میزان مصرف در بندر i هست. محدودیت ۶-۷ میزان موجودی سوخت هنگام خروج از مبدأ را نشان می‌دهد. محدودیت ۸ بیان می‌دارد که هر کشتی بکار گرفته شده در طول مسیر حتماً باید در نقطه مبدأ سوخت‌گیری اولیه را داشته باشد. محدودیت‌های ۹-۱۲ برای محاسبه موجودی ورودی به بندرها و جلوگیری از منفی بودن این موجودی هنگام مواجهه با کمبود سوخت هست، زیرا منفی بودن میزان موجودی سوخت در عمل بی‌مفهوم است. محدودیت‌های ۱۳ و ۱۴ موجودی سوخت هنگام ورود به Z با کم کردن میزان سوخت مصرفی کشتی بین i و Z را نشان می‌دهد، البته اگر از i به Z حرکتی داشته باشیم. محدودیت ۱۵ و ۱۶ اطمینان می‌سازد که

تصمیم سوخت‌گیری تنها هنگامی که موجودی سوخت کمتر یا مساوی نقطه سفارش باشد گرفته شود. محدودیت ۱۷ اطمینان می‌سازد که برای طی مسیر بین دو بندر در صورت عبور، تنها و حتماً یک سرعت انتخاب گردد. محدودیت ۱۸ نشان می‌دهد موجودی ورودی هر بندر در صورت ورود به آن بندر محاسبه گردد. محدودیت ۱۹ بیان می‌دارد تنها کشتی‌های مورد استفاده در طول مسیر می‌توانند سوخت‌گیری داشته باشند. محدودیت ۲۰ سوخت‌گیری را تنها به بندرهایی که قادر به سوخت‌دهی باشند محدود می‌سازد. محدودیت ۲۱ بیان می‌دارد سطح بالای سوخت بیشتر از نقطه سفارش هست. محدودیت ۲۲ سطح سفارش را با ظرفیت سوخت‌گیری کشتی محدود ساخته است. محدودیت ۲۳ مربوط به تابع هدف و پرداخت جریمه به دلیل کمبود موجودی سوخت هست. محدودیت ۲۴-۲۷ مربوط به پنجره زمانی هست، و هنگامی که کشتی زودتر یا دیرتر از برنامه به بندر مربوطه برسد باید جریمه بپردازد. محدودیت‌های ۲۸-۳۴ نشان می‌دهند که در تصمیمات کلان انتخاب سرعت بین دو بندر، نقاط سفارش سوخت و میزان سفارش و... مستقل از سناریو قیمت هستند. محدودیت ۳۵ فرمول نرخ مصرف سوخت کشتی m را نشان می‌دهد. محدودیت ۳۶ نشان می‌دهد تمامی کشتی‌ها از بندر مبدأ شروع به حرکت می‌کنند. محدودیت ۳۷ نشان می‌دهد مجموع m کشتی بکار گرفته شده در نهایت به بندر مقصد بازمی‌گردد. محدودیت ۳۸ بیان می‌دارد که به هر بندری با هر کشتی وارد شده‌ایم باید با همان کشتی از بندر خارج شویم. محدودیت ۳۹ نشان می‌دهد بین بندر مبدأ و مقصد حرکت مستقیمی وجود ندارد. محدودیت ۴۰ بیان می‌کند که به هر نقطه Z میانی تنها از یک بندر می‌توان وارد شد. محدودیت‌های ۴۱ و ۴۲ وجود هرگونه حرکتی از

در ادامه به بررسی اعتبار و صحت مدل ارائه شده با روش‌های مختلف پرداخته شده است.

۳. نتایج

در این بخش برای نشان دادن صحت مسئله یک مثال عددی که توسط نرم‌افزار GAMS حل شده، قرار داده شده است. و همان‌طور که انتظار می‌رفت، تمامی محدودیت‌ها در این مثال تأمین شده‌اند. در این نمونه فرض شده که شرکت کشتیرانی با سه کشتی با اندازه‌های متفاوت قصد خدمت‌رسانی به بندرهایی در آمریکا-آفریقا-اروپا را دارد. مبدأ این کشتی‌ها Newyork و مقصد آن‌ها Montreal هست. هدف این شرکت یافتن مسیر بهینه، بهترین بندرها برای سوخت‌گیری، انتخاب کشتی مناسب، محاسبه زمان خروج و ورود به بندرها، میزان مصرف سوخت، انتخاب سرعت بهینه حرکت کشتی و موجودی سوخت هر کشتی هست. پارامترهای این مثال عددی در جدول ۲ آورده شده است. در شکل ۱ مسیر حرکت و بندرهایی که در آن‌ها سوخت‌گیری شده (خط چین) مشخص شده است. و دیگر نتایج طبق جداول ۳ تا ۵ قرار شده است.

مقصد به بنادر دیگر و از بنادر دیگر به مبدأ را محدود می‌سازند. محدودیت ۴۳ نشان می‌دهد مسیر بین بندرهای i به j با کدام کشتی طی شده است و اینکه مسیر بین i و j حتماً توسط یک کشتی خدمت‌رسانی گردد. محدودیت ۴۴ حرکت بین دو بندر یکسان را محدود می‌سازد. محدودیت‌های ۴۵ و ۴۶ نشان می‌دهند مجموعه کشتی‌های بکار گرفته از نقطه مبدأ در انتها به بندر مقصد می‌روند. محدودیت ۴۷ نشان می‌دهد از هر نقطه i به نقاط دیگر تنها یک بار و توسط یک کشتی می‌توان وارد شد. محدودیت ۴۸ و ۴۹ به جهت حذف زیر تور در مدل قرار داده شده است. محدودیت ۵۰ تعداد کشتی‌های مورد استفاده را کمینه می‌سازد. محدودیت‌های ۵۱ و ۵۲ سطح موجودی و نقطه سفارش سوخت در نقاط سوخت‌گیری شده را نشان می‌دهند. محدودیت ۵۳ نشان می‌دهد زمان در نقطه شروع برای بندر مبدأ صفر هست. محدودیت‌های ۵۴ متغیرهای مثبت و محدودیت‌های ۵۵ متغیرهای صفر و یک را نشان می‌دهند.

جدول ۲- پارامترهای مثال عددی با هشت بندر

پارامتر	مقدار پارامتر
تعداد بندرها	۸
تعداد کشتی	۳
اندازه کشتی‌ها	۷۰۰۰, ۵۰۰۰, ۴۰۰۰ (TEUs)
سرعت‌های انتخابی	۱۹, ۱۸, ۱۷
هزینه ثابت سوخت‌گیری در بندرها	۱۰۰۰۰۰
هزینه نگهداری	۵۰
متوسط قیمت سوخت	\$۱۲۰



شکل ۱ مسیر حرکت کشتی یک (۴۰۰۰ TEUs) در نمونه‌ای با هشت بندر

مشاهده می‌شود در نقاط ۱، ۲، ۴، ۵ و ۷ که بندرها قادر به سوخت‌رسانی هستند، سوخت‌گیری شده است. در ادامه در جدول ۳ مقدار موجودی سوخت $S_{i,m}$ برای کشتی یک در نقاطی که اقدام به سوخت‌گیری داشته، آورده شده است. و همچنین در جدول ۴ میزان موجودی ورودی به هر بندر $I_{i,1,m}$ که نیاز به سوخت‌گیری نبوده بررسی شده است.

همان‌طور که می‌بینیم در این نمونه برای خدمت‌رسانی از بندر مبدأ تا مقصد از یک کشتی استفاده شده و کشتی نیز با کمبود سوخت مواجه نشده است. بعلاوه با توجه به اطلاعات حاصله از نرم‌افزار GAMS کشتی در بندرهایی که موجودی ورودی سوخت کمتر از نقطه سفارش بوده اقدام به سوخت‌گیری داشته و در نقاطی که موجودی ورودی مناسب بوده، سوخت‌گیری نکرده است. بطوریکه

جدول ۳- نتایج مثال عددی با هشت بندر جدول ۴- نتایج مثال عددی با هشت بندر

متغیر $I_{i,1,m}$ مقدار متغیر	
۱۴۱۷۵۰	$I_{3,1,m}$
۱۲۸۳۹۰	$I_{6,1,m}$
۹۰	$I_{8,1,m}$
متغیر S_i مقدار متغیر (Kg)	
۲۸۵۵۲،۲۵۳	S_1
۱۳۲۶۱۰	S_2
۲۷۶۶۷۰	S_4
۱۱۳۰۶۰	S_5
۱۴۵۵۴۰	S_7

جدول ۵- زمان رسیدن به بندرها به ترتیب عبور از بندرها

بندر	زمان رسیدن
New York-۱	
Jacksonville-۲	۶۱,۹۴۱
Liverpool-۷	۲۹۳,۴۱۲
Southampton-۶	۳۳۹,۹۴۱
Abidjan-۵	۵۵۴,۲۳۵
Santos-۴	۷۵۳,۷۶۵
Cristobel-۳	۱۰۳۳
Montreal-۸	۱۲۲۴,۵۲۹

$$E(TC) \cong A + \sum B_i/n$$

حال نتایج حاصل از این شبیه سازی را در جدول ۶ و ۷ نشان داده ایم.

جدول ۶- نتایج حاصل از شبیه سازی

A	E(B)
۶۸۹۲۹۰۱۲,۶۵	۴۸۸۶۹۵۶۷,۳۹

جدول ۷- مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و مدل حل شده

GAMS

E(TC) حاصل از شبیه سازی	E(TC) حاصل از نمونه حل شده در GAMS
۱۱۷۷۹۸۵۸۰	۱۴۸۴۲۰۰۰۰

با توجه به نتایج حاصله، اختلاف این دو هزینه کل E(TC) کمتر از ده درصد بوده که این اختلاف کم کار آیی و اعتبار مدل را در واقعیت اثبات می کند. در ادامه به جهت بررسی بیشتر اعتبار مدل، آزمون فرض t نیز با $\alpha = 0.05$ و $\mu = 49527380$ (مقدار قسمت متغیر تابع هدف نمونه را نشان می دهد؛ در واقع دو مقدار متغیر هدف باهم مقایسه شده اند.) با استفاده از نرم افزار MINITAB انجام شده است. و همان طور که از شکل ۴ مشاهده می شود، میانگین حاصل از شبیه سازی در فاصله اطمینان حاصل شده قرار می گیرد.

با توجه به تغییرات قیمت سوخت، در ادامه با روش شبیه سازی درصد بررسی مدل باقیمت های متفاوت سوخت خواهیم بود. به بیان دیگر با حذف احتمالات سناریوی قیمت، داده های تصادفی به مدل داده شده تا میزان نزدیکی مدل حاصل را با واقعیت بسنجیم. در این قسمت به جهت اعتبارسنجی مدل، یک نمونه مسئله حل شده در نظر گرفته شده است. جواب به دست آمده را X فرض می کنیم. تابع هدف به ازای این X مقداری اختیار خواهد کرد. بخشی از تابع هدف تحت تأثیر عدم قطعیت نیست آن قسمت جدا شده و مقدار آن به ازای X را A می نامیم. بخش دیگر تابع هدف تحت تأثیر عدم قطعیت است مثل هزینه سوخت گیری و... این بخش با B نشان داده شده است. مقدار کل تابع هدف در واقع برابر است با:

$$E(TC) = A + E(B)$$

که در این رابطه مقدار E(B) از طریق شبیه سازی حاصل می گردد. فرض کنید؛ پارامترهای غیرقطعی که به ازای \bar{X} (بخشی از X است که در محاسبه B شرکت دارد) را می سازند در برداری مثل a قرار گیرند:

$$E(TC) = A + E(a\bar{X})$$

با در نظر گرفتن احتمال برداری a، آن را به صورت تصادفی تولید می کنیم. حاصل ضرب $a\bar{X}$ را B_i می نامیم. n تا B_i تولید کرده و نتایج زیر حاصل می گردد:

One-Sample T: bb

Test of mu = 49527380 vs not = 49527380

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
bb	18	48869567	1663969	392201	(48042095, 49697040)	-1.68	0.112

شکل ۲ نتایج آزمون فرض شبیه‌سازی در نرم‌افزار MINITAB

متوسط قیمت سوخت در هر پنج سناریو یکسان در نظر گرفته شده است. بعلاوه، مشاهده می‌شود که بندری با پایین‌ترین قیمت سوخت ممکن است؛ بندر بهینه برای سوخت‌گیری نباشد. به دلیل اینکه نیازهای مختلف دیگری برای سوخت‌گیری در هر بخش مسیریابی وجود دارد. همچنین از جدول ۸ مشاهده می‌شود که تفاوت چشمگیری در سرعت پنج سناریو وجود ندارد. به دلیل اینکه سرعت وابسته به محدودیت‌های پنجره زمانی رسیدن به بنادر می‌باشد. پس مشاهده می‌شود که تصمیم‌گیری راجع بندر سوخت‌گیری بیشتر تحت تاثیر قیمت سوخت در میان بنادر می‌باشد. و همچنین سرعت کشتی اغلب تحت تاثیر پنجره‌های زمانی موجود در مدل بوده است. پس دریافتیم که تصمیم‌گیری همزمان سرعت و سوخت‌گیری کشتی می‌تواند هزینه کل را بهینه سازد.

در این قسمت به تحلیل حساسیتی بر نمونه شامل ۱۲ بندر پرداخته شده است. در این قسمت تاثیر قیمت سوخت مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. پنج سناریو برای قیمت سوخت کشتی در میان تمامی بنادر مورد ارزیابی بوده است. (۱) قیمت یکسان در تمامی بنادر (۲) افزایش قیمت سوخت در طول مسیر سرویس‌دهی (۳) کاهش قیمت سوخت در طول مسیر سرویس‌دهی (۴) افزایش و سپس کاهش قیمت (۵) کاهش و سپس افزایش قیمت. برای اینکه این مقایسات عادلانه باشد قیمت متوسط قیمت سوخت (\$120/ton) در تمامی بنادر یکسان در نظر گرفته شده است. باور داریم که این پنج حالت، شرایط واقعی تغییرات قیمت سوخت را در بنادر منعکس می‌کنند. جدول ۷ نتایج این پنج سناریو را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که قیمت-های سوخت متفاوت به بنادر سوخت‌گیری بهینه و هزینه سوخت‌گیری مختلف منجر می‌گردد. اگرچه

جدول ۸ بررسی اثر قیمت سوخت کشتی

قیمت‌های یکسان		افزایش قیمت‌ها		کاهش قیمت‌ها		افزایش - کاهش		کاهش - افزایش		بندر
میزان سوخت‌گیری	سرعت کشتی	میزان سوخت-گیری	سرعت کشتی	میزان سوخت-گیری	سرعت کشتی	میزان سوخت-گیری	سرعت کشتی	میزان سوخت-گیری	سرعت کشتی	
۴۲۵۵۱۱		۲۰۵۷۴۷۰		۲۷۵۰۵۶۰		۲۶۵۵۲۲۱		۱۶۴۷۳۹۰		Dubai-۱
	۱۷		۱۷		۱۷		۱۷		۱۷	Bangkok-۲
۳۵۸۷۴۰	۱۷	۶۴۳۸۰۰	۱۷	۸۷۶۵۲۰	۲۳		۱۷	۳۰۰۹۸۰	۱۸	Durban-۳
	۱۷		۱۷		۱۸		۱۷		۱۷	Tokyo-۴
۲۶۶۳۸۰	۱۷	۱۹۴۷۵۰	۱۸		۱۸	۴۲۲۳۳۰	۱۹	۲۰۷۷۹۰	۱۷	Mumbai-۵
	۱۷		۱۷		۱۷		۱۷		۱۷	Colombo-۶
۶۷۶۳۶	۱۷	۱۵۶۵۵۰	۱۷		۱۸	۴۶۰۶۳	۱۷	۲۴۹۳۳۰	۱۷	Hongkong-۷
	۱۷		۱۷		۱۷		۱۷		۱۷	Singapore-۸
۲۰۳۸۴۰	۱۷	۲۲۷۱۱۰	۱۸	۵۳۸۴۰۰	۲۳	۲۲۵۱۳۰	۱۷	۱۹۳۸۳۰	۱۷	Melbourne-۹
	۱۷		۱۷		۱۷		۱۷		۱۷	Auckland-۱۰
۲۴۸۶۲۰	۱۷	۳۵۷۶۶۰	۱۷	۹۸۰۸۵۰	۱۸	۳۲۴۹۳۰	۱۷	۱۶۹۰۰۰	۱۷	Salalah-۱۱
										Dalian-۱۲
۳۴۴۷۵۰۰۰۰		۷۵۰۱۰۰۰۰۰		۶۲۰۳۴۰۰۰۰		۸۰۴۳۳۰۰۰۰		۴۶۶۷۷۰۰۰۰		هزینه کل

بهبود را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از جدول نشان می‌دهد، نبود محدودیت زمانی هزینه‌ها را به سه دلیل کاهش می‌دهد؛ یک کاهش کل میزان سوخت‌گیری (از ۳۲۰۶۹۰۰ به ۲۰۶۰۹۵۹ کاهش داشته) و دو کاهش تعداد کشتی‌های بکارگرفته شده (از ۳ به ۲) و سه، کاهش تعداد مکان‌های سوخت‌گیری. به عبارت دیگر با آزاد کردن محدودیت زمانی، ترجیح داده شده است با کاهش تعداد کشتی‌ها و میزان سوخت‌گیری زمان رسیدن به بندر را افزایش دهد، چون محدودیت و جریمه‌ای در این خصوص وجود ندارد.

در این قسمت تاثیر پنجره زمانی رسیدن به بندر بررسی شده است. پنجره زمانی، زمان رسیدن به بندر را محدود می‌سازد. در این جا دو وضعیت مختلف مورد مقایسه واقع شده‌اند؛ در یک حالت پنجره زمانی (زمان رسیدن به بندر باید در این پنجره زمانی باشد) براساس برنامه‌ریزی و زمانبندی شرکت کشتیرانی وجود دارد. و در حالت دوم؛ محدودیت پنجره زمانی آزاد شده است. همچنین فرض شده که هزینه جریمه در حالت آزادسازی محدودیت اعمال نمی‌گردد. جدول ۹ این دو استراتژی مدیریت سوخت‌گیری

جدول ۹ بررسی اثر پنجره زمانی

مدل بدون پنجره زمانی			مدل با پنجره زمانی			بندر
سرعت کشتی	مقدار سوخت‌گیری	هزینه کل	سرعت کشتی	مقدار سوخت‌گیری	هزینه کل	
	۲۷۵۰۶۹	۴۳۹۰۸۰۰۰۰		۱۹۱۱۳۰۰	۶۹۴۷۸۰۰۰۰	Dubai-۱
۱۸			۱۷			Bangkok-۲
۱۷	۳۷۵۹۱۰	کل مقدار	۲۳	۵۳۲۳۰۰	کل مقدار سوخت-	Durban-۳

۱۸		سوخت‌گیری	۱۷		گیری	Tokyo-۴
۲۳			۱۷	۱۳۹۷۵۰		Mumbai-۵
۱۸			۱۷			۶ Colombo-
۱۷	۱۸۱۹۵۰		۱۹	۱۸۲۴۶۰		۷ Hongkong -
۱۷			۱۷			۸ Singapore -
۱۷	۱۹۳۸۳۰	۲۰۶۰۹۵۹	۱۷	۲۰۳۸۴۰	۳۲۰۶۹۰۰	۹ Melbourne -
۱۸			۱۷			۱۰ Auckland-
۱۷	۱۰۳۴۲۰۰		۱۷	۲۲۷۲۵۰		Salalah-۱۱
						Dalian-۱۲

۴. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه حمل و نقل دریایی بخش مهمی از زنجیره تامین جهانی بوده و یکی از مهم‌ترین انواع حمل‌ونقلی می‌باشد. و همینطور با توجه به تمرکز اندک محققان به این حوزه، موضوع در این راستا انتخاب گردیده است. همچنین باید اشاره کرد که مسیریابی و تخصیص ناوگان و مسئله سوخت‌گیری با توجه به قیمت بالای سوخت کشتی از مهم‌ترین مسائل در این حوزه می‌باشند. در خصوص اهمیت سوخت‌گیری باید بیان داشت که حدود ۶۰ درصد هزینه‌های کشتی به سوخت آن اختصاص دارد. این مسائل ما را به پژوهش در این راستا سوق داده است. هدف این مدل‌سازی، کاهش تعداد کشتی‌های بکار گرفته در طول خدمت‌رسانی، یافتن کوتاه‌ترین مسیر، انتخاب بندرهای مناسب برای سوخت‌گیری و میزان سوخت‌گیری در هر بندر و در نهایت حداقل‌سازی هزینه‌های کل می‌باشد.

این مدل‌سازی بگونه‌ای می‌باشد که کشتی از نقطه مبدا شروع به حرکت کرده و به دنبال کوتاه‌ترین مسیر برای خدمت‌رسانی به تمامی بنادر می‌باشد. در

طول مسیریابی موجودی سوخت کشتی در نقاطی که قادر به سوخت‌رسانی باشند، بررسی شده و اگر موجودی کمتر از نقطه سفارش S_i باشد اقدام به سوخت‌گیری می‌کند. باید اشاره کرد که هزینه جریمه‌ای در هدف در صورت تمام شدن موجودی سوخت در طول مسیر منظور شده است. همچنین در این مدل فرمولی برای مصرف کشتی که وابسته به سرعت کشتی می‌باشد، ارائه گشته است. و بدلیل اینکه با تغییر سرعت امکان تغییر در پنجره زمانی خدمت‌رسانی می‌باشد؛ محدودیت‌هایی برای پنجره زمانی مدل و همینطور هزینه جریمه‌ای در صورت نقض این محدودیت‌ها در تابع هدف منظور شده است.

در انتها به برخی نتایج و دستیابی‌های مهم این پژوهش اشاره می‌کنیم:

مسیر حرکت کشتی، بنادر سوخت‌رسان و سرعت کشتی در استراتژی مدیریت سوخت به جهت کاهش کل هزینه‌ها بهینه گردیده است. قیمت سوخت در بنادر سوخت‌رسان برای انتخاب بنادر بهینه مورد-بررسی قرار گرفته است. تصمیمات مربوط به انتخاب بندر تحت تأثیر قیمت سوخت و تصمیمات مربوط

منابع

- Choi, B.C., Lee, K., Leung, J.Y.T., Pinedo, M.L., Briskorn, D. (2012) "Container Scheduling: Complexity and Algorithms", *Prod. Oper. Manag.* 21 (1), 115–128.
- Guericke. (2014) "Liner Shipping Network Design Decision Support and Optimization Methods for Competitive Networks", M.Sc THESIS. Paderborn University.
- Karinah, kjeldisen. (2011) "routing and scheduling in liner shipping", phd, department of economic and business and social science university.
- Psaraftis, H. (1999) "Foreword to the focused issue on maritime transportation", *Transportation Science*, vol. 33.
- Ronen. (1982) "The effect of oil price on the optimal speed of ships", *Journal of the Operational Research Society*, 33(11):1035–1040.
- Sheng, Ek Peng Chew, Loo Hay Lee. (2015) "(s,S) policy model for liner shipping refueling and sailing speed optimization problem", *Transportation Research Part E* 76–92.
- UNCTAD (2010b). *Review of Maritime Transportation 2010*. United Nations.
- Yao, Zhishuang. (2012) "A study on bunker fuel management for the shipping liner services", *Computers & Operations Research* 39,1160–117.

به سرعت تحت تأثیر محدودیت‌های پنجره‌های زمانی (زمان رسیدن به بندرها) مدل می‌باشد. با چشم‌پوشی از محدودیت‌های پنجره زمانی، میزان کل سوخت دریافتی کشتی‌ها در مسیر افزایش می‌یابد.

اما در خصوص مطالعات آتی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد؛ (۱) بررسی مدل در شرایط غیرقطعی مانند؛ بروز بلاای طبیعی (زلزله، سیل و ..)، تغییرات آب و هوایی، مشکلات مکانیکی کشتی، تراکم بار در بندرها و... که مدل با تغییراتی مواجه می‌گردد. (۲) گسترش سطح عملیاتی مدل برای پیش‌بینی قیمت سوخت در بندرها. (۳) در نظر گرفتن برخی نگرانی‌های مربوط به محیط‌زیست؛ مانند کاهش گازهای گلخانه‌ای (کربن دی‌اکسید...). (۴) همین‌طور در حمل‌ونقل دریایی غالباً کشتی‌ها بارهای حجیم و سنگین را منتقل می‌کنند، در این مدل‌سازی به دلیل گستردگی کار اشاره‌ای به تخلیه و بارگیری کشتی‌ها نشده است، در مطالعات بعدی می‌توان این موضوع را در قالب Pick up و delivery مورد بررسی قرارداد. (۵) در این مدل‌سازی برای بررسی موجودی سوخت سیاست (s,S) موردنظر قرار گرفته، اما با در نظر گرفتن یک نقطه سفارش اطمینان می‌توان به مدل بهبود بخشید. (۶) همچنین برای حل مدل در ابعاد بزرگ می‌توان مدل را با روشی فرا ابتکاری حل نمود.

Fleet deployment, ship routing and refueling optimization problem

Mahsa Lashgari*, Ali Akbar Akbari

Faculty of industrial engineering, Islamic Azad university south Tehran

(DOI): [10.22113/jmst.2019.135211.2174](https://doi.org/10.22113/jmst.2019.135211.2174)

Abstract

Marine transportation mainly includes fleet allocation, ship routing and refueling issues. It is noted that the issue of fleet allocation, route design and planning of ships is aimed at minimizing the costs. In recent years, most shipping companies have faced difficult market conditions in terms of refueling and fuel prices. Given that approximately 60 percent of the cost of the ship is dedicated to its fuel, so fleet fuel costs are considered as the largest shipping cost. In these issues often competitive conditions and uncertainty have been considered, that causes complexity of the problem. In this study a liner marine transportation company is evaluated, that transfers cargo between different ports. The company requires determining some decisions such as finding the optimal route, refueling and ship speed policy under price and fuel consumption uncertainty. Interactions of refueling and routing and allocation due to the need of refueling during the ship routes provides the importance and the need to examine these two issues together. So in this problem, we are going to define the ship routing while, we are going to determine the location of refueling and the speed of the ships based on the fuel prices.

Keywords: Ship Routing, Inventory , Fleet Deployment, Ship Speed Optimization

List of tables & figures

- Fig1. The route of the ship (4,000 TEUs), with eight ports
- Fig2. Results of the simulation hypothesis test in the MINITAB software
- Chart1. Set, parameters and variables.
- Chart 2. Example's Numerical parameters with eight ports
- Chart 3. Example's Numerical results with eight ports
- Chart 4. Results of a numerical example with eight ports
- Chart 5. Time to arrive at ports, respectively, crossing ports
- Chart 6. Simulation results
- Chart 7. Comparison of the results of simulation and solved GAMS model

*Corresponding author, E-mail: Mahsa.lashgari@ymail.com