International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2014)

August 2014, Volume 25, Number 2
pp. 249-262

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

Routing offshare Suply Vessels: Kharg Region

H.R. Eskandari* **& E. Mahmudi**

Hamid Reza Eskandari, *School of Industrial Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*
Ehsan Mahmudi, *School of Industrial Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

KeyworXs

Offshare supply vessel,
Offshare platform supply,
Vehicle routing problem,
Soft time window,
Pickup and delivery

ABSTRACT

Logistics in oil industry is divided into two categories: upstream and downstream. Upstream logistics includes whole operation of supply onshore and offshore oil drilling and extracting facilities. Offshore supply vessels (OSVs), are widely used to supply offshore oil facilities. In this paper, OSVs routing to offshore facilities is studied. The purpose of this paper is to determine timing and sequencing of OSVs in order to supply oil facilities on time, regarding operational constraints. Some aspects of real world problem are considered in the model for the first time. These aspects include: Limited offshore oil rig storage capacity, without ability to use temporary added storage capacity, in presence of multiple vessels and soft time windows. The model formulation seeks to minimize both costs and platform waiting time. Results reveal that minimizing platform service times might increase offshore supply operational costs, but all platform demands are delivered on time.

© 2014 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 25, No. 2, All Rights Reserved

* **Corresponding author Hamid Reza Eskandari**
Email: *eskandari@modares.ac.ir*

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــــریت تولیـــد

شمـــــاره ۲، جلـــد ۲۵، شهـــریور ۱۳۹۳
صفحـــــه ۲۶۲-۲۵۰

نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید
دانشگاه علم و صنعت ایران

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

تعیین مسیر کشتی‌های پشتیبان فراساحل: موردکاوی منطقه خارک

حمیدرضا اسکندری* و احسان محمودی

کلمات کلیدی

کشتی‌های پشتیبان فراساحل
عملیات پشتیبانی فراساحل
مسأله تعیین مسیر وسایل نقلیه
پنجره زمانی نرم
تحویل و دریافت بار

چکیده:

لجستیک در صنعت نفت به دو بخش بالادستی و پایین‌دستی تقسیم می‌شود. لجستیک بالادستی مربوط به پشتیبانی تأسیسات نفتی خشکی و فراساحل است. برای پشتیبانی و تأمین تأسیسات فراساحل از «کشتی‌های پشتیبان فراساحل» استفاده می‌شود. در این مقاله مسأله تعیین مسیر کشتی‌های پشتیبان فراساحل در منطقه‌ی خارک (شمال غربی خلیج فارس) مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف این مقاله ارائه مدلی است که با توجه به محدودیت‌های عملیاتی موجود، زمان‌بندی و توالی حرکت کشتی‌های پشتیبان فراساحل را به نحوی تعیین کند که تقاضای تمام سکوها در زمان مناسب برآورده شود. در این مدل برای نخستین بار محدودیت مربوط به ظرفیت ذخیره‌سازی سکو بدون امکان استفاده از انبار موقت در عملیات انتقال بار بین سکو و کشتی، با فرض وجود چند کشتی و در حضور پنجره‌های زمانی نرم مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل علاوه بر تعیین مسیر کشتی‌های پشتیبان با کم‌ترین هزینه‌ی ممکن، زمان سرویس‌دهی سکوها نیز به حداقل می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که سرویس‌دهی به سکوها در کم‌ترین زمان ممکن، می‌تواند باعث افزایش در هزینه‌ی عملیاتی پشتیبانی از تأسیسات فراساحل گردد، اما این امکان فراهم می‌شود که تقاضای تمامی سکوها در کم‌ترین زمان ممکن برآورده شود.

۱. مقدمه

کشور ایران دارای سومین ذخایر بزرگ نفت و دومین ذخایر بزرگ گاز در دنیاست. میزان تولید نفت خام ایران حدود ۴ میلیون بشکه در روز است که از این میزان تولید، حدود ۸۶۲ هزار بشکه در روز توسط میادین نفتی فراساحل تولید می‌شود[۱]. از جمله مهم‌ترین بخش‌های هزینه در صنعت نفت و گاز، چه در دریا و چه در خشکی، هزینه‌های لجستیکی است. لذا بهینه‌سازی فرآیندهای لجستیکی می‌تواند منجر به کاهش چشم‌گیر در قیمت تمام شده‌ی محصول نهایی گردد[۲].

لجستیک در صنعت نفت به دو بخش کلی تقسیم می‌شود، بالادستی و پایین‌دستی. فعالیت‌های مربوط به تأمین خدمات مورد نیاز برای تأسیسات نفتی واقع در خشکی و دریا، به عنوان لجستیک بالادستی نفت شناخته می‌شود. فعالیت‌هایی که برای رساندن نفت و گاز به دست مشتری انجام می‌شود به عنوان لجستیک پایین دستی شناخته می‌شود. لجستیک بالادستی نفت که شامل پشتیبانی و تأمین تأسیسات فراساحل می‌باشد، عملیات پیچیده و دشواری است؛ چرا که این تأسیسات باید به صورت مداوم حمایت شوند و نیازهای آن‌ها تأمین شود تا تولید ادامه یابد. در این مقاله، به موضوع لجستیک بالادستی در صنعت نفت ایران در منطقه‌ی عملیاتی پرداخته می‌شود و مسأله‌ی رفت و برگشت کانتینرها از جزیره‌ی خارک به سکوهای نفتی واقع در شمال غربی خلیج فارس مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با گذشت زمان و افزایش عمر یک چاه نفت، میزان تولید کاهش می‌یابد. افت تولید در چاه تا جایی ادامه می‌یابد که بهره‌برداری از آن عملاً غیراقتصادی می‌شود. در ایران افت تولید سالانه از میادین واقع در خشکی معادل ۸ درصد و از

تاریخ وصول: ۹۰/۱۲/۱۷
تاریخ تصویب: ۹۱/۴/۲۶

*نویسنده مسئول مقاله: **دکتر حمیدرضا اسکندری**، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، eskandari@modares.ac.ir
احسان محمودی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ehsan.mahmoodi@modares.ac.ir

میادین فراساحل معادل ۱۲ درصد گزارش شده است[۳]. با کاهش میزان تولید میادین نفتی بالغ، حتی با فرض ثابت ماندن هزینه‌های لجستیکی، سهم این هزینه‌ها در قیمت تمام‌شده‌ی محصولات نفتی با گذشت زمان، افزایش پیدا می‌کند. به همین دلیل، مدیریت و کاهش هزینه‌های لجستیکی در بخش بالادستی صنعت نفت، از اهمیت فراوانی برخوردار است. هر چندکه مسائل لجستیکی مورد توجه شرکت‌های نفتی قرار دارد، اما در گذشته، هیچ گاه به عنوان موضوعی اصلی و حیاتی، بررسی نشده و نیاز به رقابت در عرصه‌های لجستیکی، بین شرکت‌های فعال در بخش بالادستی نفت، وجود نداشته است[۴].

برای پشتیبانی و تدارک تأسیسات فراساحل از کشتی و هلی‌کوپتر استفاده می‌شود. هلی‌کوپترها برای جابجایی سریع نفرات بین خشکی و دریا مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای جایجایی بار نیز می‌توان از هلی‌کوپتر استفاده کرد[۷-۵]. اما غالباً وظیفه‌ی حمل بار بین خشکی و تأسیسات فراساحل توسط کشتی‌های گوناگونی انجام می‌شود. یکی از گران‌ترین انواع کشتی‌هایی که در عملیات سرویس‌دهی به تأسیسات فراساحل نقش حیاتی دارد، «کشتی‌های تدارکاتی فراساحل(OSV)[۱]» هستند[۸]

هزینه‌ی حمل و نقل و جابجایی بار بین پایگاه ساحلی و تأسیسات نفتی فراساحل بسیار بالاست. به عنوان نمونه هزینه‌ی اجاره‌ی کشتی برای سرویس‌دهی به سکوها در خلیج فارس بین ۲ تا ۹ هزار دلار در روز است[۲]. این مبلغ برای دریای نروژ به حدود ۱۸۰۰۰ یورو می‌رسد. عدم سرویس‌دهی به موقع به سکوها ممکن است منجر به توقف عملیات تولید یا حفاری در سکو شود. هزینه‌ی توقف یا تأخیر در عملیات تأسیسات دریایی بسیار بالاتر از هزینه‌ی اجاره کشتی‌ها است و در حدود ۵ هزار یورو در ساعت تخمین زده می‌شود. با احتساب قیمت فعلی نفت، هزینه‌ی توقف در عملیات سکو، بین ۳ میلیون یورو در روز (برای سکوهای کوچک) تا ۱۲ میلیون یورو در روز (برای سکوهای بزرگ) برآورد می‌شود[۹]. با در نظر گرفتن هزینه‌ی تأخیر در عملیات سکو، اهمیت برنامه‌ریزی مناسب برای پشتیبانی تأسیسات فراساحل آشکار می‌گردد.

اولین مقاله که به طور خاص به موضوع ناوگان کشتی‌های پشتیبان فراساحل پرداخته، مسأله‌ای از دنیای واقعی است که سیاست بهینه برای انجام عملیات پشتیبانی در دریای نروژ را تعیین می‌کند. دست‌یابی به یک سیاست بهینه برای تعیین مسیر کشتی‌های پشتیبان در دریای نروژ، و نیز بررسی تأثیر هزینه‌ی توقف سرویس‌دهی در ساعات شب، هدف اصلی این مطالعه است. برای این منظور، شش سناریوی متفاوت طراحی شده که در آن‌ها ساعات بازگشایی تأسیسات و تعداد دفعات سرویس‌دهی به سکو در هفته، مقادیر متغیری به خود می‌گیرند. نهایتاً الگوریتمی ارائه شده که سیاست بهینه‌ی مسیریابی (کدام کشتی‌ها مورد استفاده قرار گیرند و زمان‌بندی حرکت آن‌ها چگونه است؟) برای هر سناریو را تعیین می‌کند. با در نظر گرفتن جنبه‌های کیفی، سیاستی پیشنهاد شده است که ۷ میلیون دلار صرفه‌جویی به همراه داشته است[۱۰].

در مطالعه‌ی دیگری، مسأله‌ی تعیین مسیر کشتی‌های پشتیبان برای سرویس‌دهی به تأسیسات فراساحل موجود در هالتنبنکن[۳] واقع در شمال غربی نوار ساحلی نروژ، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله نویسندگان، چگونگی تأثیر محدودیت ظرفیت ذخیره‌سازیِ تأسیسات فراساحل، بر مسیر بهینه‌ی کشتی‌های تدارکاتی را مورد مطالعه قرار می‌دهند. مدلی ساده شده از مسأله‌ی واقعی برای یک کشتی در قالب یک مسأله‌ی برنامه‌ریزی عدد مختلط ارائه شده است. این مدل شامل محدودیت‌هایی در مورد ظرفیت ذخیره‌سازی سکوها است تا این اطمینان ایجاد شود که ظرفیت کافی روی عرشه‌ی سکوها وجود دارد و انجام عملیات تحویل بار و جمع‌آوری کانتینرهای برگشتی از روی سکوها امکان‌پذیر است. این مدل، برای حل مسادلی با ابعاد واقعی و بر اساس داده‌های فراهم شده توسط شرکت استات اُیل‌اِی‌اِس‌اِی.[۴] مورد مورد استفاده قرار گرفته است[۹]

آزمایشات نشان می‌دهد که به منظور دست‌یابی به جواب بهینه‌ی مسأله‌ی تحویل بار و جمع‌آوری بار از روی سکوها، باید محدودیت‌های مربوط به ظرفیت سکو مورد ملاحظه قرار گیرد. علاوه بر این، برای دست‌یابی به جواب بهینه، رفتن دو کشتی به برخی سکوها ضروری است. مشکل مدل ارائه شده، عدم توانایی حل مسائل بزرگ در مدت زمان مناسب است.

علاوه بر موارد یاد شده، مسأله‌ی تعیین مسیر (VRP)[۵] با تحویل و دریافت بار برای سرویس‌دهی به سکوهای نفت و گاز فراساحل در دریای نروژ، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه فرض بر این است که یک کشتی باید به تنهایی همه‌ی سکوهای موجود را سرویس‌دهی نماید. در

[۲] داده‌ها از شرکت فلات قاره اخذ شده است.

[3] *Haltenbanken*
4 Statoil SAS
5 Vehicle Routing Problem

این مدل محدودیت‌های مربوط به ظرفیت کشتی و محدودیت مربوط به فضای در دسترس روی سکو در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله یک الگوریتم جست و جوی تابو برای حل مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱۱].

میزان بهره‌وری کشتی‌های پشتیبانی فراساحل در خلیج مکزیک موضوع تحقیق دیگری است که در آن، با بررسی جریان انجام کار و نحوه‌ی بهره‌برداری از کشتی‌های پشتیبان، ملزومات صنعت اکتشاف نفت و گاز فراساحل در خلیج مکزیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای تخمین تعداد کشتی‌های مورد نیاز از مصاحبه‌ها، داده‌های حاصل از اسناد برنامه‌ریزی و داده‌های بهره‌وری ناوگان مربوط به شرکت‌های نفت و گاز استفاده شده است[۱۳]. این مقاله اولین تحقیقی است که برای مدل‌سازی یکپارچه عملیات کشتی‌های پشتیبانی در خلیج مکزیک انجام شده و در آن توجه ویژه‌ای به چارچوب تحلیلی، فرضیات مدل و محدودیت‌های موجود می‌شود.

برنامه‌ریزی عملیاتی کشتی‌های تدارکاتی به دلیل عدم قطعیت مربوط به مقدار تقاضای سکوها و نیز شرایط آب و هوایی بسیار پیچیده است. در عملیات سرویس‌دهی به سکوها جزئیات عملیاتی متعددی وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرد. هر چند که در سال‌های اخیر، بهینه‌سازی مسائل لجستیکی در بخش بالادستی نفت، توسط شرکت‌های نفتی مورد توجه قرار گرفته، اما تحقیقات انجام شده در این زمینه بسیار اندک است. از آن‌جا که یکی از بخش‌های عمده‌ی هزینه در لجستیک بالادستی نفت، هزینه‌ی استفاده از کشتی‌های پشتیبان است، لذا بررسی و شناسایی ویژگی‌های لجستیکی این کشتی‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. منظور از خصوصیات لجستیکی، ظرفیت حمل بار، قابلیت‌های کشتی‌رانی و قابلیت‌های تخلیه و بارگیری است که در زمان صرف‌شده برای انجام عملیات و برنامه‌ریزی کشتی‌ها نقش عمده و تعیین کننده‌ای دارد [۱۲].

بنابر دانش ما، مدلی برای برنامه‌ریزی عملیاتی کشتی‌های پشتیبان فراساحل ارائه نشده است که محدودیت مربوط به ظرفیت ذخیره‌سازی سکو بدون امکان استفاده از انبار موقت را، هم‌زمان با پنجره‌های زمانی مربوط به تقاضای سکو و فرض حضور چند کشتی در ناوگان، در نظر گرفته باشند. با توجه به ویژگی‌های فوق، مدل ارائه شده در این مقاله، تحت عنوان «تعیین مسیر وسایل نقلیه با دریافت و تحویل بار و پنجره‌های زمانی (VRPDTW) و نیز ظرفیت محدود ذخیره‌سازی مشتری بدون امکان استفاده از انبار موقت در عملیات جابجایی بار»، تعریف می‌شود.

۲. توضیح مسأله

مسأله‌ی تعیین مسیر کشتی‌های پشتیبان فراساحل در منطقه‌ی عملیاتی خارک، بسیار پیچیده بوده و تحت تأثیر عدم قطعیت ناشی از شرایط محیطی قرار می‌گیرد. روش کلی کار به این صورت است که، در ابتدای هر هفته، تقاضای سکوها به پایگاه ساحلی اعلام می‌شود. سپس بر مبنای تقاضای اعلام شده و تعداد و نوع کشتی‌های در دسترس، برنامه‌ریزی عملیاتی کشتی‌ها تعیین می‌شود. آن‌چه را که سکو به آن نیاز دارد می‌توان به دو دسته‌ی کلی تقسیم کرد:

- دسته نخست، کالاهایی هستندکه به وسیله‌ی کانتینر حمل می‌شوند و می‌توانند در اندازه و وزن‌های متفاوتی باشند؛
- دسته‌ی دوم، کالاهایی هستند که به صورت فله و توسط مخازن واقع در زیر عرشه، حمل می‌شوند.

بخش عمده‌ای از کالاهای حمل شده به سکو باید از روی آن جمع‌آوری شده و به پایگاه ساحلی بازگردند. این بار برگشتی شامل ابزار و تجهیزات کرایه شده، فاضلاب و کانتینرهای خالی است. بازگرداندن بارهای اضافی از روی سکو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که با تجمع بارها بر روی سکو ممکن است ادامه‌ی عملیات حفاری یا تولید امکان پذیر نباشد. به این ترتیب هر سکو دو نوع تقاضا دارد: یکی مربوط به دریافت بار از پایگاه ساحلی خارک است و دیگری مربوط به باری است که باید از روی سکو جمع‌آوری شده و به پایگاه ساحلی برگردانده شوند.

پس از اعلام تقاضا از سوی سکوها، پیش‌بینی‌های آب و هوایی بررسی می‌شود تا معین گردد که در چه زمان‌هایی امکان انجام عملیات وجود ندارد. چرا که، انجام عملیات جابجایی کانتینرها بین کشتی و سکو تنها در صورت مناسب بودن شرایط آب و هوایی امکان‌پذیر است. در نهایت توالی حرکت کشتی‌ها به سمت سکوها، تعیین می‌شود. پیش‌بینی دقیق زمان رفت و برگشت حرکت کشتی‌ها، با توجه به عدم قطعیت ناشی از شرایط آب و هوایی امکان‌پذیر نیست.

این امکان وجود دارد که یک کشتی، بیش از مدت زمان پیش‌بینی شده، پای سکو بماند و این باعث می‌شود که کشتی با تأخیر نسبت به زمان مورد انتظار، به پایگاه ساحلی برگردد. از آن‌جا که هزینه‌ی تأخیر در عملیات سکو بسیار بالاست، گاهی لازم می‌شود که علاوه بر کشتی‌های موجود، تعدادی کشتی به صورت کوتاه‌مدت اجاره شوند تا برآوردن

تقاضای سکو به تأخیر نیفتد.

زمانی که یک کشتی به سکو می‌رسد، در صورتی که ارتفاع موج در کنار سکو بیشتر از حد مجاز نباشد، در آن‌جا لنگر می‌اندازد. در این زمان عملیات انتقال کانتینرها به سکو آغاز می‌شود. چنان‌چه فضای خالی روی سکو بیشتر از فضای کانتینرهایی باشد که باید به سکو منتقل شوند، مشکلی در تحویل کانتینرها به سکو وجود ندارد. مشکل زمانی پیش می‌آید که روی سکو فضای خالی کافی برای دریافت همه‌ی کانتینرها وجود نداشته باشد. در این مورد باید عملیات انتقال کانتینرها به سکو، هم‌زمان با انتقال کانتینرها از سکو به کشتی انجام شود. یعنی هنگامی که جرثقیل، کانتینری را به سکو منتقل می‌کند، یک کانتینر خالی را از سکو به کشتی منتقل کند تا فضای کافی برای کانتینر بعدی به وجود آید.

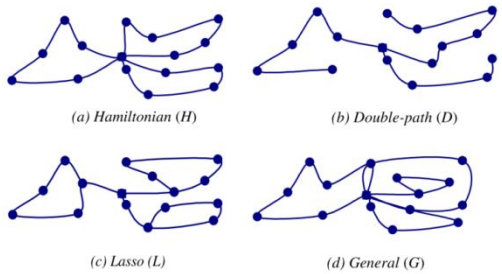
از آن‌جا که در دریا امکان استفاده از انبار موقت وجود ندارد، چنان چه کشتی کاملاً پر به سوی یک سکوی کاملاً پر برود، امکان انجام عملیات انتقال کانتینر بین سکو و کشتی وجود نخواهد داشت. این محدودیت را «عدم امکان استفاده از انبار موقت» می‌نامیم.

این مسأله با آن‌چه در عملیات جابجایی بار، روی زمین اتفاق می‌افتد متفاوت است. روی زمین، انجام هم‌زمان عملیات تحویل بار به مشتری و دریافت بار برگشتی الزامی نیست. چرا که استفاده از فضای اضافی همواره امکان‌پذیر است (مثلاً امکان استفاده از فضای بیرون انبار به صورت موقت وجود دارد). بنابراین در روی زمین، حتی اگر یک وسیله‌ی پر به یک انبار کاملاً پر برسد، انجام هر دو سرویس تحویل بار و دریافت بار از مشتری امکان‌پذیر است. اما در دریا، چنان چه یک کشتی کاملاً پر به یک سکوی کاملاً پر برسد امکان جابجایی کانتیر بین سکو و کشتی، وجود ندارد.

با توجه به ویژگی‌های عنوان شده، مسأله‌ی تعیین مسیر کشتی‌های تدارکاتی، زیرمجموعه‌ای از مسأله‌ی تعیین مسیر وسایل نقلیه با دریافت و تحویل بار می‌باشد که همه‌ی کانتینرها در پایگاه ساحلی به کشتی‌ها تحویل داده می‌شود و همه‌ی کانتینرهای جمع‌آوری شده از روی سکوها به پایگاه ساحلی برگردانده می‌شود. ضمن اینکه برای سرویس‌دهی به یک سکو، بازه‌ی زمانی مشخصی وجود دارد. این بازه‌های زمانی تحت تأثیر شرایط آب و هوایی تعیین می‌شوند. هم‌چنین هر سکو، تقاضایی دارد که باید در زمان معین برآورده شود. این بازه‌ی زمانی به صورت پنجره‌های زمانی نرم در نظر گرفته شده‌اند. به این مفهوم که، چنان چه در سرویس‌دهی به سکو، تأخیری پیش آید، هزینه‌ی این تأخیر در تابع هدف مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

شکل کلی مسأله در دایره‌ی «تعیین مسیر وسایل نقلیه با تحویل و دریافت بار و پنجره‌های زمانی (VRPPDTW) قرار می‌گیرد؛ البته باید محدودیت‌های عملیاتی مخصوص به این حوزه را نیز در مدل ریاضی وارد کرد.

برای VRPPD[1] می‌توان از استراتژی‌ها متفاوتی استفاده کرد که هر یک، شکل‌های متفاوتی را برای مسیرهای طی شده ایجاد می‌کند. مسیرهای ایجاد شده توسط استراتژی همیلتونی[2]، استراتژی مسیر دوگانه[3]، استراتژی مسیر کمند مانند[4] و استراتژی کلی در شکل ۱ مشاهده می‌شود[۱۴]. استفاده از مدل‌هایی که شکل از پیش تعیین شده برای مسیرها در نظر می‌گیرند، متداول است[۹]. گیبروفسکایا و همکاران [۱۵]، به این موضوع اشاره می‌کنند که ایجاد مدل‌هایی که بتواند مسیرهایی، بدون شکل از پیش تعیین شده ایجاد کند، می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ها گردد.



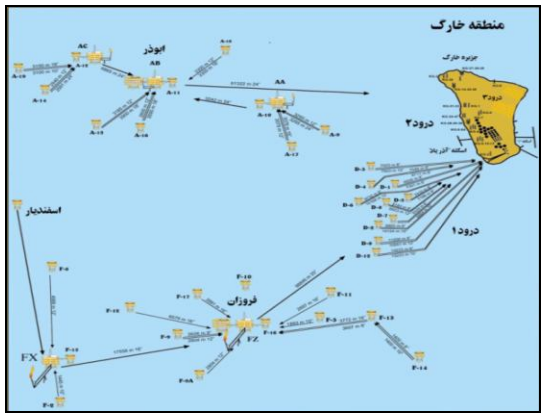
شکل ۱. شکل مسیر در استراتژی‌های گوناگون [۱۴]

با توجه به ویژگی‌های مسأله، مدل ارائه شده در این مقاله برنامه‌ی حرکت کشتی‌ها[5] را، به نحوی تعیین می‌کند که هزینه‌های عملیاتی کشتی‌ها و هزینه‌ی ناشی از تأخیر در سرویس‌دهی به سکوها به حداقل برسد؛ ضمن این‌که، توالی حرکت کشتی‌ها به نحوی تعیین می‌شود که هر سکو در کمترین زمان ممکن سرویس‌دهی شود.

در مدل ارائه شده، جنبه‌ها و جزئیات عملیاتی مانند تحویل کالا به سکوهای فراساحل، بازگرداندن بار اضافی از روی سکوها، ظرفیت کشتی‌ها، ظرفیت سکوها، عدم امکان استفاده از انبار موقت در عملیات جابجایی کانتینر بین کشتی و سکو، شرایط آب و هوایی (بازه‌های زمانی که در آن سرویس‌دهی به سکو امکان‌پذیر نمی‌باشد) و قابلیت‌های

1 Vehicle Routing Problem with Pick up and Delivery
2 Hammiltonian
3 Double Path Strategy
4 Lasso shape strategy
5 Fleet planning

عملیاتی کشتی‌ها (این‌که آیا یک کشتی قابلیت سرویس‌دهی به یک سکوی معین را دارد یا خیر)، مد نظر قرار می‌گیرد.
علاوه بر این، در مدل این فرض می‌شود که هر سکو می‌تواند بیش از یک بار توسط کشتی‌ها مورد ملاقات قرار گیرد. یعنی این امکان در مدل وجود دارد که یک کشتی، عملیات تحویل بار به سکو را انجام دهد و کشتی دیگری کانتینرهای خالی را از روی سکو به ساحل بازگرداند. البته این مدل جنبه‌های تصادفی را در نظر نمی‌گیرد.
در منطقه‌ی عملیاتی خارک، چهار میدان نفتی ابوذر، اسفندیار، درود و فروزان قرار دارد (شکل۲). مسؤولیت پشتیبانی از سکوهای نفتی ایران در خلیج فارس بر عهده شرکت نفت فلات قاره است. این شرکت تعداد پنج کشتی برای پشتیبانی تأسیسات فراساحل در منطقه‌ی عملیاتی خارک در اختیار دارد. در این‌جا هدف تعیین توالی بهینه برای تعیین مسیرهای طی شده توسط هر یک از کشتی‌هاست.



شکل ۲. نقشه میادین نفتی در منطقه خارک

۳. فرضیات مدل و علایم

مسأله به صورت شبکه‌ای از نقاط در نظر گرفته شده است. کشتی‌ها از گره مبدأ (جزیره خارک) بارگیری کرده و پس از طی مسیر تعیین شده، به گره مبدأ باز می‌گردند. تمام تقاضای سکوها باید در یک دوره برنامه‌ریزی برآورده شود. عملیات تحویل بار به سکو و جمع‌آوری کانتینرهای خالی از روی سکو می‌تواند به صورت همزمان یا جداگانه انجام شود. حداقل یک کشتی باید به هر سکو برود. میزان تقاضای سکوها برای هر دوره‌ی برنامه‌ریزی از پیش تعیین شده است. در هر دوره‌ی برنامه‌ریزی، پنجره‌های زمانی که در آن‌ها شرایط آب و هوایی مناسب نیست، مشخص است. زمان سفر کشتی‌ها بین نقاط مختلف شبکه از پایگاه ساحلی به سکوها و بین سکوها، ثابت و معین فرض شده است. زمان انجام سرویس در هر سکو معین است. هزینه‌ی عملیاتی کشتی‌ها معین است. هزینه‌ی ناشی از تأخیر در عملیات کشتی‌ها در هر ساعت معین است. انتقال بار بین سکوها انجام نمی‌شود (کانتینرهای جمع‌آوری شده از روی سکوها نمی‌توانند به سکوی دیگری منتقل شوند و باید به پایگاه ساحلی برگردانده شوند). ظرفیت کشتی‌ها معین است. ظرفیت سکوها برای نگهداری بار محدود و معین است. زمانی که یک کشتی کاملاً پر، به یک سکوی کاملاً پر برسد، امکان انجام عملیات انتقال بار به سکوها غیرممکن می‌شود. امکان استفاده از انبار موقت در عملیات جابجایی بار بین سکوهای فراساحل و کشتی وجود ندارد.
مسأله‌ی تعیین مسیر کشتی‌های سرویس‌دهنده به سکوهای نفتی دریایی، بر روی یک شبکه تعریف شده است. گره‌های این شبکه نشان‌دهنده‌ی سکوها و بنادر هستند. وسایل نقلیه در این مسأله، کشتی‌هایی هستند که به سکوها سرویس‌دهی می‌کنند و هر یک ظرفیت محدودی معادل Q_k دارند. هر سکو، یک تقاضای برای ارسال کانتینرهای خالی به پایگاه ساحلی و یک تقاضای برای دریافت کانتینرهای پر دارد. هم‌چنین، هر سکو یک ظرفیت ذخیره‌سازی در دسترس دارد. یک کمان به صورت (i,j) برای هر جفت از نقاط i,j تعریف می‌شود. c_{ijk} زمان مسافرت کشتی k بین دو نقطه i,j را نشان می‌دهد.
برای بیان این مطلب که یک سکوی خاص ممکن است بیش از یک بار توسط کشتی‌ها مورد ملاقات قرار گیرد، به هر سکوی i، دو گره اختصاص می‌یابد؛ یکی i و یکی $n+i$ که n نشان‌دهنده‌ی تعداد سکوهاست. هم‌چنین، تعداد کانتینرهای برگشتی از روی سکوی $n+i$ یعنی p_{n+i} را مساوی p_i (تعداد کانتینرهای برگشتی از روی سکوی i) قرار می‌دهیم. دو حالت متفاوت برای هر سکو امکان‌پذیر است:

۱- اگر سکوی i، تنها یک بار مورد ملاقات قرار بگیرد، در این صورت عملیات تحویل کانتینرهای پر به سکو و جمع‌آوری کانتینرهای خالی از روی سکو می‌تواند به طور هم‌زمان انجام شوند. به این ترتیب گره i، مورد ملاقات قرارگرفته و گره $n+i$ مورد ملاقات قرار نگرفته است.
۲- اگر سکوی i دو بار مورد ملاقات گیرد، عملیات تحویل کانتینرهای پر به سکو در گره i و جمع‌آوری کانتینرهای خالی از روی سکو در گره $n+i$ انجام خواهد شد.

برای نشان دادن حالات ممکن از متغیر y_i استفاده شده که یک متغیر باینری است و زمانی که برابر یک باشد به این

معنی است که عملیات تحویل کانتینرهای پر به سکو و جمع‌آوری کانتینرهای خالی از روی سکو به طور هم‌زمان انجام شده است؛ چنان‌چه y_i برابر صفر باشد، عملیات تحویل کانتینرهای پر به سکو و جمع‌آوری کانتینرهای خالی از روی سکو به صورت جداگانه انجام شده است.

برای نشان دادن ترتیب رفتن یک کشتی به سکوها در یک مسیر، از متغیرهای باینری جریان استفاده شده است. x_{ijk} یک متغیر باینری است که چنان‌چه کشتی k بلافاصله پس از گره i به گره j برود مقدار یک گرفته و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

مجموعه‌ها

نقاط تحویل بار	$D = \{1,2,3,\dots,n\}$
نقاط جمع آوری بار	$P = \{n+1, n+2, n+3, \dots, 2n\}$
مجموعه‌ی نقاط تحویل و جمع‌آوری بار	$N = D \cup P$
مجموعه‌ی کشتی‌های موجود	K
مجموعه‌ی نقاطی که یک کشتی می تواند برای سرویس‌دهی به آن نقاط برود	$N_k = P_k \cup D_k$
زیرمجموعه‌ای از D که کشتی K می‌تواند به آن‌جا سفر کند	D_k
زیرمجموعه‌ای از P که کشتی K می‌تواند به آن‌جا سفر کند	P_k
تمام گره‌های ممکن برای کشتی K	$V_k = N_k \cup \{o(k), d(k)\}$
کلیه‌ی کمان‌های ممکن برای کشتی K ام	$A_k \subset V_k \times V_k$
شبکه‌ی نقاط ممکن برای کشتی K ام	$G_k = (V_k, A_k)$
ظرفیت کشتی K ام	Q_k
مجموعه‌ی بازه‌های زمانی	$T = \{1,2,\dots 12\}$

پارامترها

میزان کالای تقاضا شده توسط سکوی i	d_i
میزان کالای برگشتی از روی سکوی i	p_{n+i}
زمان سفر بین نقاط $i,j \in V_k$	t_{ijk}
هزینه‌ی سفر بین نقاط $i,j \in V_k$	c_{ijk}
هزینه‌ی تأخیر در سرویس‌دهی به سکو i در واحد زمان	DC_i
کل تعداد کانتینرهای‌روی کشتی پس از ترک گره i	$L^{--}_{i,k}$
کانتینرهای روی کشتی که باید به سکو تحویل شوند	$L^{d}_{--i,k}$
کانتینرهای روی کشتی که باید از روی سکو جمع‌آوری شوند	L^{p}_{i--}
زمان انجام عملیات تخلیه و بارگیری در سکو	S_i
اگر در بازه زمانی t ام ($t \in T$) بتوان سکوی i ام را سرویس‌دهی کرد برابر ۱ و درغیر این‌صورت برابر صفر است.	$\tau_{(i,t)}$
پایان فرصت اعلام شده توسط سکو برای دریافت سرویس	TF_i

متغیرهای تصمیم

متغیرهای دودویی جریان: اگر وسیله‌ی نقلیه k ام، گره jام را بلافاصله بعد از گره i ام ملاقات کند برابر یک است و در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد.	x_{ijk}

متغیرهای وابسته:

زمان آغاز سرویس‌دهی کشتی k ام به گره i ام	T_{ik}
بار موجود بر روی وسیله نقلیه k بعد از ترک گره i	L_{ik}
چنان‌چه سرویس‌دهی به سکو پس از سررسید اعلام شده انجام شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است	Z_i
چنان‌چه عملیات تخلیه و بارگیری سکوی i به طور هم‌زمان انجام شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود	Y_i
میزان اختلاف زمان سرویس‌دهی به سکو با زمان سررسید اعلام شده توسط سکو	Dev_i
انحراف مثبت زمان سرویس‌دهی سکو از زمان سررسید اعلام شده توسط سکو	$DevP_i$
انحراف منفی زمان سرویس‌دهی سکو از زمان سررسید اعلام شده توسط سکو	$DevN_i$

۴. فرمول‌بندی

در ادامه مدل ریاضی برای تعیین مسیر کشتی‌های پشتیبان فراساحل ارائه شده است. ابتدا محدودیت‌ها سپس تابع هدف مدل آمده است. برخی محدودیت‌ها غیرخطی هستند که در ادامه شکل خطی‌شده آن‌ها آمده است.

$$\sum_k \sum_{j \in N_k \cup \{d(k)\}} x_{ijk} = 1 \quad i \in D \qquad (۱)$$

$$\sum_k \sum_{j \in N_k \cup \{d(k)\}} x_{ijk} = 1 - y_{i-n} \quad i \in P \qquad (۲)$$

$$\sum_{j \in D_k \cup \{d(k)\}} x_{o(k),j,k} = 1 \quad k \in K \qquad (۳)$$

$$\sum_{i \in N_k \cup \{o(k)\}} x_{ijk} - \sum_{i \in N_k \cup \{d(k)\}} x_{jik} = 0 \quad k \in K, j \in I \qquad (۴)$$

$$\sum_{i\in N_k\cup\{o(k)\}} x_{i,d(k),k} = 1 \quad k\in K \tag{۵}$$

$$ivk_{i,k} = \sum_{j\in N_k} x_{ijk} \qquad k\in K, i\in N_k \tag{۶}$$

$$s_i + t_{ijk} - T_{jk} \le (1-x_{ijk})\times T \quad k\in K,(i,j)\in A_k \tag{۷}$$

$$T_{i,k} \ge t \times ivk_{i,k} \quad k\in K, i\in N_k, t\in T : \tau_{(i,t)} = 0 \tag{۸}$$

$$Dev_i = \sum_{k\in K} T_{i,k} - TF_i \qquad k\in K, i\in N_k \tag{۹}$$

$$Dev_i = DevP_i - DevN_i \tag{۱۰}$$

$$DevP_i \le BigM \times Z_i \tag{۱۱}$$

$$DevN_i \le BigM \times (1-Z_i) \tag{۱۲}$$

$$L^a_{o(k),k} = LO_k \quad k\in K \tag{۱۳}$$

$$L^p_{o(k),k} = 0 \quad k\in K \tag{۱۴}$$

$$\begin{aligned} &L^a_{j,k} - (L^a_{i,k} - d_j) \le (1-x_{ijk})\times L \\ &k\in K, i\in N_k, j\in D_k \\ &L^a_{j,k} - (L^a_{i,k} - d_j) \ge (x_{ijk}-1)\times L \\ &k\in K, i\in N_k, j\in D_k \end{aligned} \tag{۱۵}$$

$$\begin{aligned} &x_{ijk}\left(L^p_{j,k} - (L^p_{i,k} + p_j y_j)\right) = 0 \\ &k\in K, i\in N_k j\in D_k \end{aligned} \tag{۱۶}$$

$$\begin{aligned} &L_{j,k} - (L_{i,k} - L^a_{jk} + L^p_{jk}\times y_j) \le (1-x_{ijk})\times \\ &k\in K, i\in N_k j\in D_k \end{aligned} \tag{۱۷}$$

$$\begin{aligned} &L_{j,k} - (L_{i,k} - L^a_{jk} + L^p_{jk}\times y_j) \ge (x_{ijk}-1)\times L \\ &k\in K, i\in N_k j\in D_k \end{aligned} \tag{۱۸}$$

$$\begin{aligned} &L_{j,k} - \left(L_{i,k} + L^p_{jk}(1-y_{j-n})\right) \le (1-x_{ijk})\times L \\ &k\in K, i\in N_k, j\in P_k \end{aligned} \tag{۱۹}$$

$$\begin{aligned} &L^a_{i,k} \ge d_j + (x_{ijk}-1)\times L \\ &k\in K, i\in N_k, \quad j\in D_k \end{aligned} \tag{۲۰}$$

$$\begin{aligned} &Q_k - L_{i,k} \ge y_j \times p_j - d_j + (x_{ijk}-1)\times L \\ &k\in K, i\in N_k, j\in D_k \end{aligned} \tag{۲۱}$$

$$\begin{aligned} &Q_k - L_{i,k} \ge (1-y_{j-n})\times p_{j-n} + (x_{ijk}-1)\times L \\ &k\in K, i\in N_k, j\in P_k \end{aligned} \tag{۲۲}$$

$$\begin{aligned} &(Q_k - L_{ik}) + cap_j - 1 \ge (x_{ijk}-1)\times L \\ &k\in K, i\in N_k j\in D_k \quad i\in N_k, j\in D_k, k\in K \end{aligned} \tag{۲۳}$$

$$L^a_{i,k} \le ivk_{i,k} \times BigM \tag{۲۴}$$

$$L^p_{i,k} \le ivk_{i,k} \times BigM \tag{۲۵}$$

$$L_{ik} \le ivk_{i,k} \times BigM \tag{۲۶}$$

$$d_i - p_i y_i \le Cap_i \qquad i\in D \tag{۲۷}$$

$$L_{i,k} \le Q_k \qquad i\in N_k, k\in K \tag{۲۸}$$

$$DevP_i, DevN_i, L^a_{i,k}, L^p_{i,k}, L_{ik} \ge 0; \quad i\in N_k, k\in K \tag{۲۹}$$

$$Dev_i \quad free\ variable; \quad i\in N_k \tag{۳۰}$$

$$x_{ijk}, z_i, y_i \quad binary \quad i,j\in N_k, k\in K, (i,j)\in A_k \tag{۳۱}$$

تابع هدف:

$$min \sum_{k\in K}\sum_{(i,j)\in A_k} c_{ijk}x_{ijk} + \sum_{i\in N_k} DevP_i \times DC_i \tag{۳۲}$$

معادله‌ی (۱) بیان می‌کند که هر سکو حداقل یک بار توسط کشتی‌ها مورد ملاقات قرار می‌گیرد. معادله‌ی (۲) بیان می‌کند که، چنان‌چه متغیر دودویی y_i برابر یک شد، عملیات تحویل کانتینرهای پر به سکو و جمع‌آوری کانتینرهای خالی از روی سکو باید به طور هم‌زمان انجام شود. معادلات (۳) تا (۵)، پیوستگی مسیر حرکت کشتی را از مبدأ به سمت مقصد تضمین می‌کند. معادله‌ی (۶)، برای محاسبه‌ی مقدار متغیر واسط $ivk_{(i,k)}$ اضافه شده است. اگر این متغیر یک باشد، به این مفهوم است که کشتی k به سکوی i ام رفته است.

معادلات (۷) و (۸)، محدودیت مربوط به پنجره‌های زمانی را نشان می‌دهند. بازه‌ی برنامه‌ریزی در مدل ارائه شده ۷۲ ساعت می‌باشد که به ۶ بازه ۱۲ ساعته تقسیم شده است. بر اساس فرض مدل، بازه‌های زمانی که در آن سرویس‌دهی به سکو امکان‌پذیر نمی‌باشد، برای یک بازه‌ی ۷۲ ساعته از قبل معین است. معادله‌ی (۷) بیان می‌کند که چنان‌چه پارامتر $\tau_{(i,t)}$ برابر صفر باشد، از آن‌جا که امکان سرویس‌دهی به سکو در بازه tام وجود ندارد، این سرویس باید در بازه $t+1$ ام انجام شود.

همان‌گونه که گفته شد، هزینه‌ی تأخیر در عملیات سکوها بسیار بالا است. این میزان هزینه با توجه به ظرفیت تولید سکو متفاوت است. بر مبنای دانش ما، مدل‌های ارائه شده در این زمینه به مدل‌سازی هزینه‌ی ناشی از تأخیر در عملیات سکو نپرداخته‌اند. در این‌جا فرض شده که این هزینه متناسب با میزان زمانی است که از سررسید اعلام شده توسط سکو گذشته باشد. به عبارتی، به ازای هر واحد زمانی که در سرویس‌دهی به سکو تأخیر ایجاد شود،

هزینه‌ای معادل DC_i به تابع هدف افزوده می‌شود.
متغیر Dev_i نشان‌دهنده‌ی میزان انحراف از سررسید سرویس‌دهی به سکوی i می‌باشد. چنان‌چه این متغیر مثبت باشد هزینه‌ی تأخیر در عملیات سکو که برابر $DC_i \times Dev_i$ است، باید به تابع هدف افزوده شود. اگر متغیر Dev_i منفی باشد، گویای این مطلب است که سکو قبل از زمان سررسید خود سرویس‌دهی شده است. معادله‌ی (۹) برای محاسبه‌ی Dev_i در مدل وارد شده است.

$$\text{Delay cost for platform } i = \begin{cases} DC_i \times Dev_i & \text{if } Dev_i > 0 \\ 0 & \text{if } Dev_i < 0 \end{cases} \qquad (۳۳)$$

بر مبنای محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۲)، چنان‌چه کشتی پس از سررسید اعلام شده به سکو برسد (یعنی $Dev_i > 0$)، متغیر $Dev P_i$ مقداری برابر Dev_i می‌گیرد و هزینه‌ای معادل $DC_i \times Dev P_i$ به تابع هدف مسأله افزوده می‌شود. همان گونه که در بخش علایم آمده، برای بار روی کشتی، سه متغیر در نظر گرفته شده است. این متغیرها شامل $L_{i,k}$، $L^p_{i,k}$ و $L^a_{i,k}$ می‌باشد. هر یک از این متغیرها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$L_{i,k}$: کل بار موجود روی عرشه کشتی k ام پس ازترک گره i را نشان می‌دهد. $L^a_{i,k}$، تعداد کانتینرهای تحویلی روی عرشه کشتیk ام پس از ترک گره i را نشان می‌دهد. $L^p_{i,k}$، تعداد کانتینرهای برگشتی روی عرشه کشتی k ام پس از ترک گره i را نشان می‌دهد.
پس داریم:

$$L_{i,k} = L^p_{i,k} + L^a_{i,k} \qquad (۳۴)$$

هنگامی که یک کشتی از مبدأ خود در پایگاه ساحلی به سمت سکوها حرکت می‌کند، تمام یا بخشی از ظرفیت آن پر از کانتینرهایی می‌باشد که آماده تحویل به سکوها هستند. محدودیت معادله‌ی (۱۳) گویای این مطلب است که بار کانتینرهای آماده‌ی تحویل روی کشتی k ام، پس از ترک پایگاه ساحلی برابر بار اولیه روی کشتی می‌باشد. معادله‌ی (۱۴) نیز این محدودیت را نشان می‌دهد که بار برگشتی روی کشتی kام پس از ترک پایگاه ساحلی برابر صفر است.
هنگامی که یک کشتی پس از سرویس‌دهی به یکی از تأسیسات دریایی آنجا را ترک می‌کند، بار روی آن نسبت به قبل متفاوت شده است. چرا که این کشتی تعدادی از کانتینرهای برگشتی را از سکو تحویل گرفته و تعدادی کانتینر نیز به آن تحویل داده است.
معادلات (۱۵) و (۱۶) بار قابل تحویل موجود بر روی کشتی را در گره‌هایی محاسبه می‌کند که در آن‌ها، عملیات تحویل کانتینرهای پر به سکو و جمع‌آوری کانتینرهای خالی از روی سکو به طور هم‌زمان انجام می‌شود. معادله‌ی (۱۷)، بار برگشتی موجود بر روی کشتی را پس از ترک گره‌هایی محاسبه می‌کند که در آن‌ها فقط عملیات جمع‌آوری کانتینر از روی سکو انجام می‌شود. یک کشتی تنها در صورتی می‌تواند به یک سکو برود که کانتینر کافی برای تحویل به سکو را داشته باشد. این محدودیت در معادله‌ی (۲۰) اعمال شده است.
در معادله‌ی (۲۱) و (۲۲)، به محدودیت فضای خالی روی کشتی توجه شده است؛ چرا که اگر قرار باشد یک کشتی در یک گره باری را از روی سکو تحویل بگیرد، فضای خالی موجود روی سکو قبل از رسیدن به گره مورد نظر باید بیشتر از خالص تعداد کانتینری باشد که کشتی تحویل می‌گیرد. معادله‌ی (۲۳)، یک محدودیت عملیاتی را نشان می‌دهد؛ این محدودیت به این واقعیت اشاره دارد که اگر یک کشتی کاملاً پر به یک سکوی کاملاً پر برسد عملاً امکان جابجایی کانتینرها بین سکو و کشتی وجود نخواهد داشت.
معادلات (۲۴)، (۲۵) و (۲۶) این اطمینان را در مدل ایجاد می‌کنند که اگر کشتی k به سکوی i نرود، مقادیر متغیرهای $L^p_{i,k}$ و L_{ik}، $L^a_{i,k}$ باید برابر صفر باشد. معادله‌ی (۲۷)، این محدودیت را نشان می‌دهد که خالص بار تحویل گرفته شده توسط سکو (باری که به سکو منتقل شده منهای باری که از سکو به کشتی منتقل شده)، باید کوچکتر از فضای خالی موجود روی سکو باشد. معادله‌ی (۲۸) عنوان می‌کند که بار روی کشتی باید از ظرفیت کشتی کمتر باشد. معادله (۲۹) نیز بیان می‌کندکه تعداد کانتینرهای قابل تحویل موجود روی عرشه‌ی کشتی، تعداد کانتینرهای برگشتی موجود روی عرشه‌ی کشتی و کل تعداد کانتینرهای موجود روی عرشه‌ی کشتی، باید همواره مقادیری مثبت باشند.
معادله‌ی (۳۲)، تابع هدف مدل را نشان می‌دهد. این مدل، دو هدف را دنبال می‌کند. نخست به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی و سپس، به حداقل رساندن هزینه‌ی ناشی از تأخیر در عملیات سکوها. به این ترتیب هدف نهایی مدل، تعیین تعداد کشتی‌های مورد نیاز و تعیین توالی حرکت کشتی‌ها، با پنجره‌های زمانی نرم و با درنظر گرفتن تحویل کانتینرها به

سکو و جمع آوری کانتینرهای برگشتی از روی سکوها می‌باشد.

مسأله VRPPDTW یک مسأله NP-Hard محسوب می‌شود، چرا که شکل کلی‌تر مسأله فروشنده دوره‌گرد (TSP)۶است. در حضور پنجره‌های زمانی، حتی یافتن یک جواب موجه برای مسأله، خود به یک مسأله NP-hard تبدیل می‌شود، چرا که یافتن یک جواب موجه برای مسأله TSP با پنجره‌های زمانی، خود یک مسأله NP-Complete است[۱۶]. در این‌جا، با توجه به ابعاد مسأله‌ی واقعی، ۸۴ متغیر تصمیم و ۵۰۰۵ محدودیت در مدل وجود دارد. حل مسأله به کمک نرم‌افزار CPLEX10.1 انجام شده است.

۵. طراحی آزمایشات

در ادامه برای بررسی تأثیر سه عامل متفاوت بر مدل، هشت سناریو طراحی شده است. این سه عامل در ادامه توضیح داده شده‌اند:

۱- **حجم تقاضای سکو**: برای بررسی تأثیر تغییر در حجم تقاضای سکوها بر نحوه‌ی برنامه‌ریزی و حرکت کشتی‌ها، دو حالت متفاوت برای تقاضای سکوها در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ میزان تقاضای سکوها در شرایط تقاضای زیاد و کم آمده است.

۲- **مواجهه با شرایط بد آب و هوایی**: منظور از شرایط بد آب و هوایی زمان‌هایی است که به دلیل بالارفتن ارتفاع موج در پای سکو، کشتی ناگزیر است مدتی پای سکو منتظر بماند. در صورتی که بدانیم در بازه‌ی مورد نظر، احتمال برخورد با شرایط بد آب و هوایی وجود دارد، در نظر گرفتن این عامل باعث تغییر عمده در برنامه‌ی حرکت کشتی‌های خواهد شد. جزئیات مربوط به مواجهه یا عدم مواجهه با شرایط بد آب‌وهوایی، در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳- **به حداقل رساندن زمان سرویس‌دهی به سکوها علاوه بر به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی:** در مدل‌های کلاسیک VRP و سایر مدل‌های موجود، اغلب هدف به حداقل رساندن هزینه، مورد توجه بوده است. اما، از آن‌جا که در موضوع مورد مطالعه در این مقاله، باید تمام تقاضای مشتریان (که در این‌جا سکوهای فراساحل هستند) به موقع برآورده شود، لذا برای تأخیر در سرویس‌دهی به سکوها، هزینه‌ای در تابع هدف مدل در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، تأثیر این تغییر در تابع هدف، بر شکل مسیرها و برنامه‌ی حرکت کشتی‌ها سنجیده شده است. جدول ۳، تنظیمات انجام شده بر روی پارامترهای ورودی را برای هر یک از سناریوها نشان می‌دهد. از آن‌جا که سه عامل و برای هر عامل دو حالت در نظر گرفته شده، در کل هشت سناریو تعریف شده است.

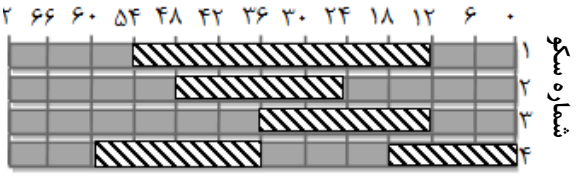
جدول ۱. میزان تقاضای سکوها

	میزان تقاضای سکو برای دریافت کالا		میزان تقاضای سکو برای جمع‌آوری بار از روی سکو	
	کم	زیاد	کم	زیاد
سکو۱	۱۰	۲۰	۱۵	۳۲
سکو۲	۳۵	۴۵	۲۰	۳۸
سکو۳	۲۳	۴۰	۴۲	۵۵
سکو۴	۱۲	۲۸	۶۸	۸۰

جدول ۲. بازه‌ی برنامه‌ریزی

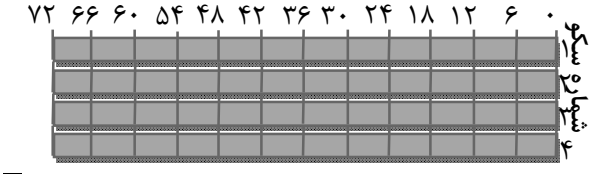
مواجهه با شرایط بد آب و هوایی در افق برنامه‌ریزی×

زمان (ساعت)



عدم مواجهه با شرایط بد آب و هوایی در افق برنامه‌ریزی

زمان (ساعت)



×بازه‌های هاشورخورده زمان‌هایی را نشان می دهد که به دلیل شرایط بد آب و هوایی امکان انجام عملیات وجود ندارد.

6 - Travelling Salesman Problem

جدول ۳. تنظیمات انجام‌شده در هر یک از سناریوها

سناریو	مواجهه با شرایط بد آب و هوایی	حجم تقاضای سکوها	به حداقل رساندن زمان سرویس‌دهی به سکوها علاوه بر به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی
۱	------	کم	----------
۲	------	کم	✓
۳	------	زیاد	----------
۴	------	زیاد	✓
۵	✓	کم	----------
۶	✓	کم	✓
۷	✓	زیاد	----------
۸	✓	زیاد	✓

جدول ۴: مشخصات کشتی‌های پشتیبان فراساحل۱

مشخصه کشتی	کشتی ۱	کشتی ۲	کشتی ۳	کشتی ۴	کشتی ۵
سرعت (گره دریایی)	۱۵	۱۲	۱۰	۱۸	۱۸
ظرفیت کشتی (تعداد کانتینر متوسط)	۸۰	۹۰	۱۰۰	۸۰	۷۰
هزینه عملیاتی در هر کیلومتر (دلار)[۲]	۱۰۰	۹۸	۹۰	۱۰۰	۱۰۵

جدول ۵. فاصله گره‌های شبکه از یکدیگر (کیلومتر)

از	به پایگاه ساحلی	گره (۱)	گره (۲)	گره (۳)	گره (۴)
پایگاه ساحلی	-	۹/۷	۹۸/۹	۹۶	۸۱
گره (۱)	۹/۷	-	۹۲	۹۰	۷۸
گره (۲)	۹۸/۹	۹۲	-	۱۷/۶	۶۶
گره (۳)	۹۶	۹۰	۱۷،۶	-	۵۶
گره (۴)	۸۱	۷۸	۶۶	۵۶	-

[۱۰] داده‌ها از شرکت فلات قاره اخذ شده است.

[2] http://www.marcon.com/marcon2c.cfm?SectionGroupsID=29/Supply & Tug Supply Boat Market Report August 2011

۶. نتایج مدل‌سازی

در جدول ۶ مقادیر تابع هدف و زمان حل مدل ریاضی توسط نرم‌افزار CPLEX10.1 خلاصه شده است.

جدول ۶. مقدار تابع هدف و زمان حل مدل در هر یک از سناریوها

سناریو	هزینه عملیاتی (بدون احتساب هزینه تأخیر)	تعداد سکوهایی که با تأخیر سرویس‌دهی می‌شوند	زمان حل مدل بر حسب دقیقه
س۱	۳۵۲۵۳	۲	۴۰
س۲	۳۵۵۷۷	۰	۵۸
س۳	۳۶۹۴۱	۲	۴۳
س۴	۳۷۲۶۵	۰	۶۹
س۵	۳۵۲۵۳	۲	۳۴
س۶	۳۵۲۵۳	۱	۴۲
س۷	۳۶۹۴۱	۲	۳۸
س۸	۳۸۱۵۲	۱	۴۵

هم‌چنین در جدول ۶ نتایج حل مدل در سناریوهای (۱) تا (۸) آمده است. خط افقی در مرکز هر ردیف محور زمان را نشان می‌دهد. بازه برنامه‌ریزی، ۷۲ ساعت (از ۶ صبح ۲۰۱۲/۱/۱ تا ۶ صبح ۲۰۱۲/۱/۴) در نظر گرفته شده است. هر یک از خطوط خارج شده از محور زمان، ورود یا خروج کشتی به یک سکو را نشان می‌دهد.

مقایسه سناریو (۱) و (۲) مشخص می‌کند که با حجم کم تقاضای سکوها، اضافه کردن هدف دوم به مسأله باعث شده هزینه‌ی پشتیبانی از سکوها، از ۳۵۲۵۳ به مقدار ۳۵۵۷۷ افزایش پیدا کند، اما در مقابل در سناریوی، دوم تمامی سکوها در زمان مناسب سرویس‌دهی شده‌اند؛ در حالی که در سناریو (۱)، تقاضای دو عدد از سکوها پس از زمان اعلام شده برآورده می‌شود. البته برآورده نشدن تقاضا در سررسید اعلام شده توسط سکو، لزوماً به مفهوم توقف عملیات سکو نیست، اما ریسک قطع عملیات سکو را به شدت بالا می‌برد و باعث می‌شود، برآوردن تقاضا در زمانی قبل از سررسید اعلام شده توسط سکو، برای برنامه‌ریزان این حوزه بسیار مهم باشد.

از مقایسه‌ی سناریوهای (۳) و (۱) می‌توان گفت، در صورتی که حجم تقاضای سکوها زیاد باشد، تعداد کشتی‌های مورد نیاز برای پشتیبانی سکوها از ۲ به ۳ افزایش یافته و مقدار هزینه‌ها از

۳۵۲۵۳ به ۳۶۹۴۱ می‌رسد. به این ترتیب روشن است که افزایش در حجم تقاضای سکوها برای دریافت و تحویل کانتنیر، هزینه‌های عملیاتی را به شدت افزایش می‌دهد.

از مقایسه‌ی سناریوهای (۴) و (۳) مشخص می‌شود، در شرایطی که حجم تقاضای سکوها زیاد باشد، به حداقل رساندن زمان سرویس‌دهی به کشتی‌ها در کنار به حداقل رساندن هزینه، منجر به افزایش در هزینه‌ها از ۳۶۹۴۱ در سناریو (۳) به ۳۷۲۶۵ در سناریو (۴) شده، اما از سوی دیگر باعث شده تقاضای سکوها در سناریو (۴) به موقع برآورده شود، در حالی که در سناریو (۳) برخی از تقاضاها دیرتر از زمان اعلام شده توسط سکو برآورده می‌شود. البته هزینه‌ی محاسبه شده در سناریو (۳)، تنها مربوط به هزینه‌های عملیاتی است و هزینه‌ی ناشی از تأخیر در عملیات سرویس‌دهی به سکوها در آن لحاظ نشده است.

مقایسه‌ی سناریوهای (۵) و (۱) نشان می‌دهد که در نظر گرفتن شرایط بد آب و هوایی در مدل باعث شده که توالی حرکت کشتی‌ها به سوی سکوها تغییر کند، اما هزینه‌ی انجام عملیات نسبت به سناریو (۱) تغییر نمی‌کند. به عبارت دیگر، اگر امکان پیش‌بینی دقیق شرایط آب و هوایی وجود داشته باشد، این امکان وجود دارد که برنامه‌ریزی کشتی‌ها به نحوی انجام شود که هزینه‌ها افزایش پیدا نکند. هر چند که امکان پیش‌بینی دقیق شرایط آب و هوایی برای بازه‌های طولانی وجود ندارد، اما در بازه‌های کوتاه‌مدت (نظیر بازه مورد نظر ما که سه روز در نظر گرفته شده) با دقت نسبتاً خوبی می‌توان شرایط آب و هوایی و میزان ارتفاع موج را برآورد کرد[۱۷]. نتایج مدل در سناریوهای (۵)، (۶)، (۷) و (۸) نشان می‌دهد که، در صورت وجود شرایط بد و آب و هوایی، برنامه‌ریزی حرکت کشتی‌ها امکان تغییر چندانی ندارد. به عبارتی، محدودیت‌هایی که به دلیل شرایط بد آب و هوایی ایجاد می‌شود، زمان در دسترس برای سرویس‌دهی به سکوها را محدود می‌کند.

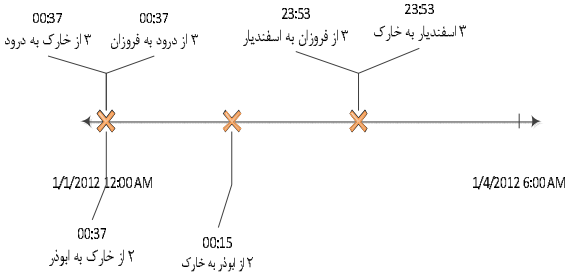
تفاوت نتایج به دست آمده در سناریو (۵) و (۶) این است که در سناریو (۵) انجام عملیات تحویل بار به سکو و جمع‌آوری کانتینرهای اضافی از روی سکو به صورت جدا در نظر گرفته شده است. در حالی که در سناریو (۶) برای به حداقل رساندن زمان انجام عملیات، تمام عملیات تحویل بار به سکو و جمع‌آوری بار از روی سکو باید به صورت هم زمان انجام شود که باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در وقت می‌شود.

مقایسه‌ی سناریوهای (۵) و (۷) نیز نشان می‌دهد که با افزایش در حجم تقاضای سکو، تعداد کشتی‌های مورد نیاز برای انجام عملیات از دو کشتی به سه عدد افزایش می‌یابد. این افزایش در تعداد کشتی‌ها به منظور برآوردن تقاضای اضافی سکوهاست. هم‌چنین در سناریوی (۷)، از کشتی‌های بزرگ‌تر و سریع‌تر استفاده شده است.

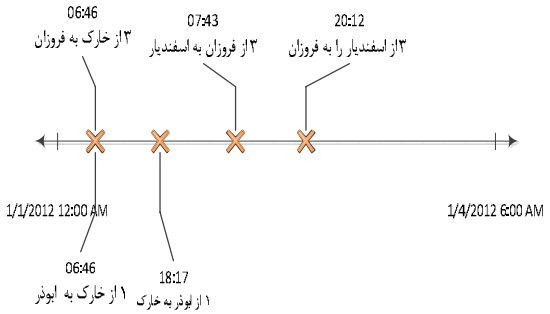
مقایسه سناریوی (۷) و (۸) نیز آشکار می‌کند که، به حداقل رساندن زمان سرویس‌دهی به سکوها در کنار به حداقل رساندن هزینه، می‌تواند تأثیر جالب دیگری هم داشته باشد. تفاوت سناریو (۷) و (۸) در این است که در سناریوی (۸)، به جای کشتی (۲) از کشتی (۱) استفاده شده که کوچکتر است اما سرعت بیش‌تری دارد. کشتی‌های کوچکتر غالباً هزینه عملیاتی بیش‌تری را برای ما ایجاد می‌کنند؛ اما از سویی می‌توانند باعث کاهش در هزینه‌ها گردند. منبع این کاهش هزینه، مربوط به تجهیزات کرایه‌ای است که کارشان بر روی سکو تمام شده و باید به پایگاه ساحلی بر گردند.

در واقع بخشی از هزینه‌های ناشی از تأخیر در سرویس‌دهی به موقع سکو، مربوط به همین تجهیزات کرایه‌ای است. به این ترتیب در سناریوی (۸)، مدل تلاش می‌کند تا ضمن برآوردن تقاضای سکوها با استفاده از کشتی‌های کوچکتر اما سریع‌تر، در کم‌ترین زمان ممکن سکوها را سرویس‌دهی نماید.

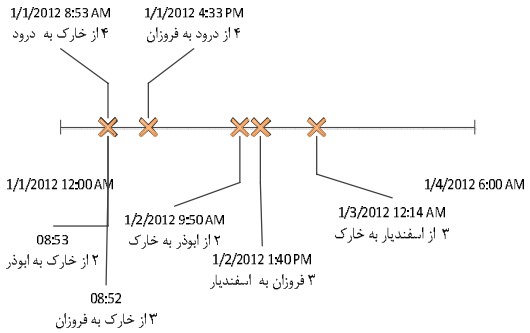
به این ترتیب می‌توان گفت که لحاظ کردن شرایط آب و هوایی برای برنامه‌ریزی واقع بینانه تأثیر بسزایی دارد. از سوی دیگر الگوی تقاضای سکوها نیز می‌تواند مسیر حرکت کشتی‌ها و توالی حرکت آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.



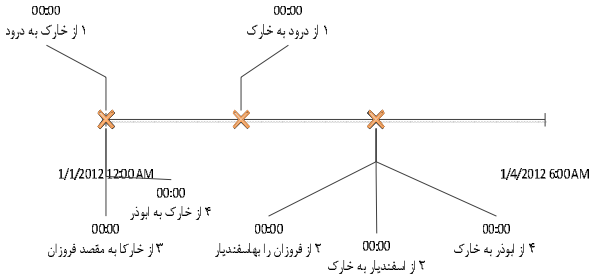
شکل ۳. نتایج مدل در سناریو ۱



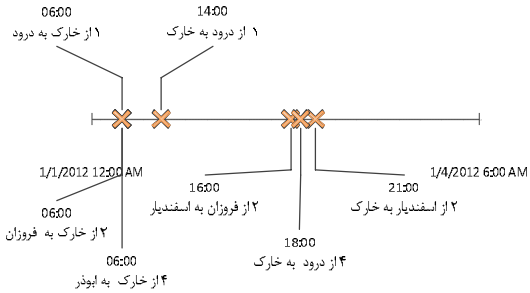
شکل ۴. نتایج مدل در سناریو ۲



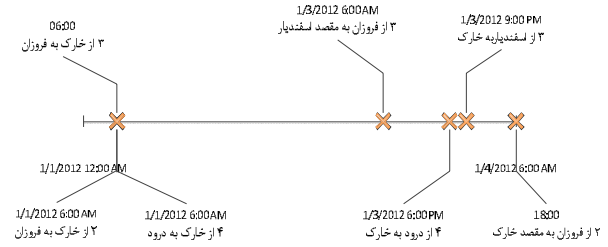
شکل ۵. نتایج مدل در سناریو ۳



شکل ۹ نتایج مدل در سناریو ۷



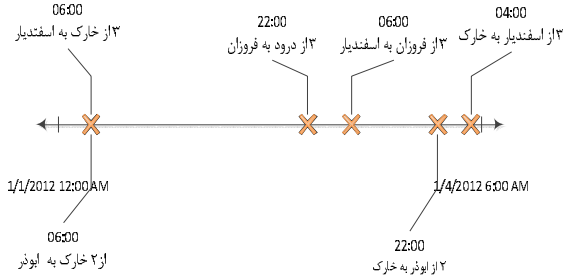
شکل ۶. نتایج مدل در سناریو ۴



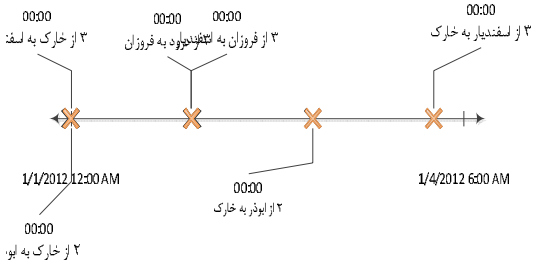
شکل ۱۰. نتایج مدل در سناریو ۸

۷. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی برای برنامه‌ریزی عملیاتی کشتی‌های پشتیبان فراساحل ارائه شده است. از آن‌جا که عملیات پشتیبانی تأسیسات فراساحل تحت تأثیر عدم قطعیت ناشی از شرایط آب و هوایی و تقاضای سکوها قرار دارد، فرضیاتی برای ساده‌سازی مسأله در نظر گرفته شده و مسأله در قالب VRPPDTW مدل شده است. ویژگی مدل در این است که ظرفیت محدود ذخیره‌سازی سکو بدون امکان استفاده از انبار موقت در عملیات جابجایی بار بین سکو و کشتی، در حضور پنجره‌های زمانی را در نظر می‌گیرد. نتایج مدل نشان می‌دهد که در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی در مدل، بر توالی حرکت کشتی‌ها و شکل مسیرها تأثیر دارد. از آن‌جا که هزینه‌ی عملیات کشتی‌های پشتیبان فراساحل بسیار بالاست، درصد کمی افزایش در بهره‌برداری از کشتی‌های پشتیبان فراساحل، منجر به صرفه‌جویی مبالغ زیادی خواهد شد. برای نزدیک شدن مدل به مسأله‌ی دنیای واقعی، باید تغییرات دیگری در مدل ایجاد شود. در مدل فرض شده که تمام تقاضای سکو به شکل کانتینر حمل می‌شود. این در حالی است که تقاضای فله سکوها نیز باید در نظر گرفته شود. هم‌چنین امکان استفاده از ظرفیت خالی برخی سکوها به عنوان انبار موقت، باید در مدل وارد شود. هم‌چنین پارامترهای مربوط به آب و هوا و



شکل ۷. نتایج مدل در سناریو ۵



شکل ۸. نتایج مدل در سناریو ۶

تقاضای سکوها باید به صورت احتمالی فرض شود. در این‌جا، به دلیل کوچک بودن مسأله‌ی مورد بررسی در دنیای واقعی، امکان استفاده از نرم‌افزارهای تجاری وجود دارد؛ این در حالی است که برای حل مسائل بزرگتر نیاز به توسعه و ایجاد الگوریتم‌های ابتکاری است. در این مقاله، تنها مدیریت و برنامه‌ریزی ناوگان کشتی‌های پشتیبان مورد توجه بوده است. این در حالی است که مقولات دیگری نظیر تعیین اندازه‌ی بیهنه ناوگان نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

مراجع

[1] EIA, "*Iran's Energy Data*", U.S. Energy information administration, 30-Jun-2010.[Online].Available:http://www.eia.gov/countries/country-data.cfm?fips=IR.

[2] Devlin, J., Yee, P., "*Trade Logistics in Developing Countries: the Case of the Middle East and North Africa*", The World Economy, Vol. 28, No. 3, Mar. 2005, pp. 435–456.

[3] Azadi, K., Yarmohammad, M., "*Analysis of Iran's Crude Oil Export Future Capacity*", Energy Policy, Vol. 39, No. 6, Jun. 2011, pp. 3316–3326.

[4] Kaiser, M. J., "*An Integrated Systems Framework for Service Vessel Forecasting in the Gulf of Mexico*", Energy, Vol. 35, No. 7, Jul. 2010, pp. 2777–2795.

[5] Menezes, F, Porto, O., Reis, M.L., Moreno, L., Aragao, M.P., Uchoa, E., Abeledo, H., Nascimento, N.C., "*Optimizing Helicopter Transport of Oil Rig Crews at Petrobras*", INTERFACES, Vol. 40, No. 5, Sep. 2010, pp. 408–416.

[6] Galvão, R.D., Guimarães, J., "*The Control of Helicopter Operations in the Brazilian Oil Industry: Issues in the Design and Implementation of a Computerized System*", European Journal of Operational Research, Vol. 49, No. 2, Nov. 1990, pp. 266–270.

[7] Romero, M., Sheremetov, L., Soriano, A., "*A Genetic Algorithm for the Pickup and Delivery Problem: An Application to the Helicopter Offshore Transportation*", in Theoretical Advances and Applications of Fuzzy Logic and Soft Computing, Vol. 42, Springer Berlin / Heidelberg, 2007, pp. 435–444.

[8] Kaiser, M. J., "*An Integrated Systems Framework for Service Vessel Forecasting in the Gulf of Mexico*", Energy, Vol. 35, No. 7, Jul. 2010, pp. 2777–2795.

[9] Aas, B., Gribkovskaia, I., Halskau, Sr. Ø, Shlopak, A., "*Routing of Supply Vessels to Petroleum Installations*", International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 37, No. 2, Mar. 2007, pp. 164–179.

[10] Fagerholt, K., Lindstad, H., "*Optimal Policies for Maintaining a Supply Service in the Norwegian Sea*", Omega, Vol. 28, No. 3, 2000, pp. 269–275.

[11] Gribkovskaia, I., Laporte, G., Shlopak, A., "*A Tabu Search Heuristic for a Routing Problem Arising in Servicing of Offshore Oil and Gas Platforms*", Journal of the Operational Research Society, Vol. 59, No. 11, pp. 1449–1459, Aug. 2007.

[12] Aas, B., Halskau, Sr. Ø., Wallace, S. W., "*The Role of Supply Vessels in Offshore Logistics*", Maritime Economics *38;* Logistics, Vol. 11, Sep. 2009, pp. 302–325.

[13] Kaiser, M.J., Snyder, B., "*An Empirical Analysis of Offshore Service Vessel Utilization in the US Gulf of Mexico*", International Journal of Energy Sector Management, Vol. 4, No. 2, 2010, pp. 152–182.

[14] Hoff, A., Gribkovskaia, I., Laporte, G., Løkketangen, A., "*Lasso Solution Strategies for the Vehicle Routing Problem with Pickups and Deliveries*", European Journal of Operational Research, Vol. 192, No. 3, Feb. 2009, pp. 755–766.

[15] Gribkovskaia, I., Halskau, sr. Ø., Laporte, G., Vlček, M., "*General Solutions to the Single Vehicle Routing Problem with Pickups and Deliveries*", European Journal of Operational Research, Vol. 180, No. 2, Jul. 2007, pp. 568–584.

[16] Cordeau, J.F., Laporte, G., Potvin, J.Y., Savelsbergh, M.W.P., "*Chapter 7 Transportation on Demand*", in *Transportation*, Vol. Volume 14, Elsevier, 2007, pp. 429–466.

[17] Agrawal, J.D., Deo, M.C., "*On-Line Wave Prediction*" Marine Structures, Vol. 15, No. 1, Jan. 2002, pp. 57–74.