

## بهینه‌سازی حمل‌ونقل گاز طبیعی مایع با در نظر گرفتن تنوع محصول

بهاره شفیعی‌پور عمرانی<sup>1</sup>، علیرضا رشیدی کمیجان<sup>2</sup>، کامران جمالی فیروزآبادی<sup>3</sup>

1. کارشناس ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه، گروه مهندسی صنایع، فیروزکوه، ایران
2. استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه، گروه مهندسی صنایع، فیروزکوه، ایران (نویسنده مسئول)  
پست الکترونیکی: Rashidi@azad.ac.ir
3. استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه، گروه مهندسی صنایع، فیروزکوه، ایران

### چکیده

تقاضا برای انرژی در طول چند دهه گذشته افزایش یافته است. صنعت گاز طبیعی مایع<sup>1</sup> به عنوان یکی از راه‌های صدور گاز به مناطق دور دست شناخته شده که با توجه به فاصله مناطق تولید و مصرف گاز طبیعی، مزایای اقتصادی و زیست محیطی استفاده از گاز نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی و توسعه تکنولوژی مایع‌سازی گاز مورد توجه واقع شده است. از آنجا که مقدار زیادی از پول سرمایه‌گذاری شده در صنعت گاز طبیعی مایع صرف حمل‌ونقل می‌شود، تصمیم برای مسیریابی و زمان‌بندی کشتی‌ها اهمیت بسیاری دارد. در این مطالعه بر روی بنادر مبدا و مقصد و حمل‌ونقل، از زنجیره تأمین گاز طبیعی مایع تمرکز شده و هدف از این تحقیق ارائه یک مدل کارآمدتر با هدف به حداقل رساندن هزینه‌ی ارسال گاز طبیعی از بنادر اولیه به بنادر مقصد، با در نظر گرفتن تنوع محصول بوده است. برای حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط پیشنهادی از روش شاخه و کران (نرم‌افزار GAMS<sup>2</sup>) استفاده شده است. با استفاده از نتایج حاصله می‌توان مسیریابی دقیق هر یک از کشتی‌ها، تعداد هر نوع محصول که توسط هر کشتی بارگیری شده و زمان‌بندی حرکت کشتی‌ها از بندر اولیه به بنادر مقصد و از مقصد به یکی از بنادر مبدا را مشخص نمود.

واژگان کلیدی: زنجیره تأمین گاز طبیعی مایع، فرآیند مایع‌سازی، زمان‌بندی، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

1 Liquefied Natural Gas (LNG)

2 General Algebraic Modeling System

## مقدمه:

بر اساس این موارد در ادامه ادبیات موضوع، مدل، متغیرها و پارامترهای آن، محدودیت‌ها و تابع هدف ارائه شده‌است. سپس مدل مورد بررسی حل شده و نتایج حاصل و تجزیه و تحلیل نتایج بیان شده، در پایان نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات بعدی مطرح شده‌است.

## ادبیات موضوع

در تحقیقات انجام شده در زمینه حمل‌ونقل گاز طبیعی مایع فقط یک محصول در نظر گرفته شده‌است ولی آنچه که در این پژوهش انجام شده مدلی با هدف حداقل کردن هزینه‌های حمل با در نظر گرفتن تنوع محصول می‌باشد. ممکن است یک بندر به چند نوع محصول نیاز داشته باشد به جای آن که از چند کشتی برای حمل جداگانه‌ی آن‌ها استفاده شود، از یک کشتی با ظرفیتی متناسب با تقاضا برای جابه‌جایی انواع گاز طبیعی مایع کمک گرفته شده‌است [6].

موارد ذیل از جمله پژوهش‌هایی هستند که در زمینه‌ی حمل‌ونقل دریایی ارائه شده‌اند: فوداستاد<sup>1</sup> (2008) [7] مدلی را برای پنج سطح از زنجیره تأمین گاز طبیعی مایع با هدف ماکزیمم کردن سود حاصل از فروش با کسر هزینه‌های مربوط به سفر، سوخت‌گیری، مایع‌سازی گاز طبیعی و برعکس؛ ارائه داد. محدودیت‌ها در این مدل ظرفیت تولید، موجودی و ظرفیت بنادر برای بارگیری و تخلیه می‌باشند. دو مطالعه برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین گاز طبیعی مایع توسط گرونهاوگ و کریستینسن (2008) [2] و گرونهاوگ، کریستینسن، دساونیرز و دسروسیر<sup>2</sup> (2010) [3] انجام شده‌است. آن‌ها محدودیت‌های موجودی (در دو بندر تولید و مصرف) و تولید متغیر را در نظر گرفته‌اند. در مدل پیشنهادی، هر کشتی حامل گاز طبیعی مایع می‌تواند به بیش از یک ترمینال برای تبدیل

در طی دهه‌ی گذشته، تقاضا برای انرژی در سراسر جهان افزایش یافته به طوری که در سال‌های 2005 تا 2030 افزایش 50 درصدی برآورد شده‌است. ظرفیت تولید گاز طبیعی مایع به 290 میلیون تن در سال رسیده‌است [12]، بنابراین دولتمردان باید از ابزارها و تکنیک‌های علمی برای تأمین تقاضا بهره‌گیرند.

انتقال گاز طبیعی به واسطه ماهیت گازی آن عموماً با دشواری مواجه است و استفاده از خطوط لوله با مشکلات زیادی روبرو می‌شود. با توجه به تکنولوژی‌های موجود برای انتقال گاز به فواصل دور دست، روش مایع‌سازی گاز طبیعی به عنوان یک روش اقتصادی و قابل اطمینان توانسته دشواری‌های حمل گاز را تا مقدار زیادی رفع کند. روشن است که برای تهیه، حمل‌ونقل و مصرف گاز طبیعی مایع باید در زمینه‌ها و مراحل مختلفی سرمایه‌گذاری و فعالیت کرد که مقدار زیادی از پول سرمایه‌گذاری شده برای حمل‌ونقل گاز طبیعی مایع مصرف می‌شود. بنابراین در تحقیق حاضر به بهینه‌سازی دو سطح از زنجیره‌ی تأمین یعنی ذخیره‌سازی در بنادر اولیه، حمل‌ونقل و در نهایت ذخیره‌سازی در بنادر مقصد پرداخته شده‌است. هدف از ارائه مدل کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل گاز طبیعی مایع برای هر بندر به‌طور جداگانه می‌باشد. از جمله محدودیت‌های مدل می‌توان به ظرفیت تخلیه‌ی بنادر مقصد، تقاضای هر یک از بنادر، ظرفیت بنادر بارگیری، تعداد کشتی‌های برابر در بنادر مبدا در انتهای دوره برنامه‌ریزی، بارگذاری حداقل یک کارگو در بندر مقصدی که کشتی به سوی آن حرکت می‌کند و خالی کردن تمامی کارگوهای یک کشتی در صورت خروج از بندر مبدا اشاره کرد.

1 Fodstad

2 Grønhaug, Christiansen, Desaulniers and Desrosiers

حاصل گردد. هدف این مقاله حداقل کردن کلیه هزینه‌های توزیع می‌باشد. استالهان و همکارانش<sup>4</sup> (2011) [6] به بررسی مسیریابی کشتی در مقیاس بزرگ و مسئله مدیریت موجودی (برای تولیدکننده و توزیع‌کننده گاز طبیعی مایع) می‌پردازند. هدف، ایجاد یک برنامه تحویل سالانه طبق قرارداد با کمترین هزینه می‌باشد. برای حل این مدل از الگوریتم جستجوی محلی با شروع چندگانه استفاده می‌شود، که از طریق آن مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها بدست می‌آید. ویلادا و اولایا<sup>5</sup> (2012) [5] در مقاله‌ی خود تأثیر گسترش ظرفیت حمل‌ونقل و افزایش انعطاف‌پذیری بازار گاز طبیعی مایع را ارزیابی می‌کنند. تابع هدف حداکثر کردن سود حاصل از فروش و مینیمم‌سازی هزینه‌های مربوط به تقاضای گاز طبیعی مایع می‌باشد. بیرسلی اوقلو<sup>6</sup> (2012) [9] مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای یافتن منابع بهینه و افزایش تقاضای گاز طبیعی مایع در کشور ترکیه ارائه داد. تابع هدف این مدل تنها حداقل کردن هزینه‌های نگهداری، موجودی و خرید گاز طبیعی مایع نیست بلکه ریسک مربوط به حمل‌ونقل و ریسک کشورهای عرضه‌کننده را نیز شامل می‌شود. محدودیت‌های آن تقاضا، موجودی بنادر، ظرفیت هر کشتی و بنادر می‌باشند. لیم و همکاران<sup>7</sup> (2013) [13] به بررسی تکنیک‌های بهینه‌سازی گاز طبیعی مایع پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود بهبود عملکرد کارخانه مایع‌سازی و زنجیره ارزش آن را مدنظر قرار ندادند. جتو<sup>8</sup> (2013) [10] ارزیابی اقتصادی

مجدد به گاز مراجعه کند. فاگرهالت و هالورسن-ویبر<sup>1</sup> (2009) [4] به بررسی مسئله‌ی کسب و کار گاز طبیعی مایع پرداختند. فرض بر این است که محموله‌ها برای هر قرارداد بلند مدت، از قبل تولید شده‌اند. آن‌ها مسئله را به مسیریابی و برنامه‌ریزی موجودی تجزیه کردند و فرصت‌های بازار را در نظر گرفتند. الین<sup>2</sup> و هالورسن-ویبر (2010) [1] به مسئله مسیریابی کشتی و زمان‌بندی آن می‌پردازند. آن‌ها در این مقاله محدودیت‌های ظرفیت اسکله در دوره‌های 8 ساعته، میزان موجودی و میزان تقاضا را در نظر می‌گیرند و از طریق برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح با بکارگیری متغیرهای صفر/یک، مدل‌سازی را برای سه سطح از زنجیره تأمین گاز طبیعی مایع انجام می‌دهند. تابع هدف، هزینه‌ی سرویس‌دهی و جریمه‌ی نقض پنجره زمانی داخلی را حداقل می‌کند. راک و همکاران<sup>3</sup> (2011) [11] مدل خطی عدد صحیح را برای انتقال گاز طبیعی مایع ارائه دادند. این مدل مسئله را با تکرار زیر مسئله، با افق‌های زمانی کوتاه‌تر توسط شاخه و کران، با توجه به تصمیمات ساخته شده در زیر افق‌های قبلی حل می‌کند. آن‌ها برای حل این مدل از یک الگوریتم هیورستیک استفاده کردند. حامدی و زنجیرانی فراهانی (2011) [8] مطالعه موردی زنجیره تأمین LNG را با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و با بکارگیری متغیرهای صفر/یک، مدل‌سازی کردند. آن‌ها زنجیره عرضه‌ی شش مرحله‌ای را برای مدل‌سازی بکار گرفتند. محدودیت‌ها شامل تقاضا، ظرفیت بنادر، تعادل میان ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌باشند. به دلیل پیچیدگی محدودیت‌ها، راه‌حل ارائه شده یک الگوریتم هیورستیک می‌باشد تا با کمک آن نزدیک‌ترین جواب به جواب بهینه

4 Stslhåne

5 Villada and Olaya

6 Biresselioglu

7 Lim et al.

8 Getu

1 Christiansen and Fagerholt

2 Elin

3 Rakke et al.

- کشتی می‌تواند از بندر مبدا خارج شود و بار خود را در چند بندر تخلیه نماید.  
- کشتی زمانی به بندر مقصد می‌رسد که بتواند بدون معطلی تخلیه شود. طبیعی است در صورت ترافیک در بندر مورد نظر، کشتی زمان انتظار خود را در بندری که قرار دارد (و می‌خواهد از آن‌جا به بندر شلوغ برسد) سپری می‌کند.

### اندیس‌ها و مجموعه‌ها

نمادهای به‌کار گرفته شده در مدل به صورت زیر

است:

$I$  مجموعه تمام بنادر بارگیری (مبدا)

$i, i' \in I$ ، اندیس بندر بارگیری

$I$  مجموعه تمام بنادر تخلیه (مقصد)

$j, j' \in I$ ، اندیس بندر تخلیه

$T$  مجموعه تمام موقعیت‌های زمانی

$T = \{1, \dots, T_{max}\}$  و  $T_{max} = 10$

$t, t' \in T$ ، اندیس زمان

$G$  مجموعه تمام محصولات (انواع گازهای

تجزیه شده مانند متان، اتان، اکتان، هگزان و ...)

$G = \{1, 2, 3, \dots\}$

$g \in G$ ، اندیس محصول

$V$  مجموعه تمام کشتی‌ها

$v \in V$ ، اندیس کشتی

$i_v$  بندر مبدا اولیه کشتی  $v$

$V_i$  مجموعه کشتی‌هایی که در آغاز دوره برنامه‌ریزی

در بندر  $i$  هستند.

### پارامترها

پارامترهای ورودی شامل موارد زیر است:

هر طرح را با توجه به سرمایه، هزینه‌های عملیاتی و سودآوری مورد تجزیه و تحلیل قرار داد، او عملکرد فرآیند را تحت شرایط مختلف بررسی نمود.

### شرح مدل

افق زمانی برنامه‌ریزی شده برای رفت و برگشت کشتی‌ها به یکی از بنادر مبدا، 10 روز در نظر گرفته شده است. در ادامه، اجزای مدل بیان شده است.

### مفروضات مدل

مفروضات مدل بدین ترتیب می‌باشد:

- در ابتدای دوره برنامه‌ریزی، تمام کشتی‌ها در بنادر مبدا هستند.

- در ابتدای دوره برنامه‌ریزی، تمام کارگوهای کشتی‌ها (محموله‌ها) کاملاً پر هستند.

- محموله‌های کشتی  $v \in V$ ، بر حسب تعداد کارگو در نظر گرفته شده است.

- هر کشتی پس از تخلیه کامل کارگوها به یکی از بنادر مبدا باز می‌گردد.

- در انتهای دوره برنامه‌ریزی، به تعداد برابر کشتی در هر بندر مبدا خواهد بود.

- هر کشتی پس از خروج از بندر مبدا و بازگشت به یکی از بنادر مبدا، دیگر خارج نمی‌شود.

- کمبود مجاز نیست.

- چنانچه محموله‌ی ارسالی بیشتر از تقاضا باشد، این محموله اضافی (محموله نقطه‌ای<sup>1</sup>) در بازار آزاد به فروش می‌رسد.

- در صورتی که بخواهیم بار یک کارگو را در بندر مقصد خالی کنیم، تمام محتویات آن کارگو تخلیه می‌شود.

1- محدودیت اول تضمین می‌کند یک کشتی در طول افق برنامه‌ریزی حداکثر یک بار از بندر مبدا خود خارج شود.

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} X_{ijvt} \leq 1 \quad \forall i, v \in V_i \quad (1)$$

2- محدودیت دوم تضمین می‌کند در یک دوره زمانی، یک کشتی از بندر  $j$  حداکثر می‌تواند یا به سمت بندر تخلیه دیگری نظیر  $j'$  یا به سمت یکی از بندرهای مبدا حرکت کند.

$$\sum_{\substack{j' \in J \\ j' \neq j}} Y_{j'jvt} + \sum_{t \in T} Z_{jivt} \leq 1 \quad \forall j, v, t \quad (2)$$

3- محدودیت سوم تضمین می‌کند سفر یک کشتی از افق برنامه‌ریزی فراتر نرود.

$$\sum_{t=T_{\max}+2}^{T_{\max}} Z_{jivt} \leq 0 \quad \forall i, j, v \quad (3)$$

4- اگر یک کشتی بخواهد در زمان  $t$  بندر  $j$  را ترک کند باید در زمان مناسبی قبل از  $t$  بندری را به مقصد  $j$  ترک کرده و به  $j$  رسیده باشد.

$$\sum_{\substack{j' \in J \\ j' \neq j}} Y_{j'jvt} + \sum_{t \in T} Z_{jivt} = X_{ijv(t-\tau_{ijv})} + \sum_{\substack{j' \in J \\ j' \neq j}} Y_{j'jv(t-\tau_{j'jv})} \quad \forall j, v, t, i = i_v \quad (4)$$

5- محدودیت زیر، ظرفیت تخلیه بندر  $j$  را نشان می‌دهد.

$$\sum_{t \in T} \sum_{v \in V_i} X_{ijv(t-\tau_{ijv})} + \sum_{\substack{j' \in J \\ j' \neq j}} \sum_{v \in V_{j'}} Y_{j'jv(t-\tau_{j'jv})} \leq Cap_j \quad \forall j, t \quad (5)$$

6- محدودیت بعدی تضمین می‌کند در انتهای دوره برنامه‌ریزی، به تعداد برابر کشتی در هر بندر مبدا خواهد بود.

$$\sum_{j \in J} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} Z_{jivt} = \sum_{j \in J} \sum_{v \in V_i} \sum_{t \in T} X_{ijvt} \quad \forall i \quad (6)$$

7- اگر کشتی  $v$  از مبدا خود  $i_v$  خارج شود، حتماً باید به یک مبدا مانند  $i'$  بازگردد.

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{v \in V} Z_{jivt} = \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} X_{ijvt} \quad \forall i, v \in V_i \quad (7)$$

$T_{ijv}$  مدت زمانی که طول می‌کشد کشتی  $v$  مسیر  $i$  به  $j$  را طی کند.

$T'_{jj'v}$  مدت زمانی که طول می‌کشد کشتی  $v$  مسیر  $j$  به  $j'$  را طی کند.

$T''_{jiv}$  مدت زمانی که طول می‌کشد کشتی  $v$  مسیر  $j$  به  $i$  را طی کند.

$NC_v$  تعداد کارگوهای کشتی  $v$

$Cost_{ijv}$  هزینه حرکت کشتی  $v$  از بندر  $i$  به  $j$

$Cost'_{jj'v}$  هزینه حرکت کشتی  $v$  از بندر  $j$  به  $j'$

$Cost''_{jiv}$  هزینه حرکت کشتی  $v$  از بندر  $j$  به  $i$

$Cap_j$  ظرفیت تخلیه بندر  $j$

$D_{jg}$  تقاضای بندر  $j$  برای محصول  $g$

$T^0$  زمان تخلیه

متغیرهای تصمیم

مدل ارائه شده در این تحقیق شامل متغیرهای تصمیم به صورت زیر است:

$X_{ijvt}$  متغیر صفر/یک نشان دهنده این که آیا کشتی  $v$  در دوره  $t$  بندر  $i$  را به مقصد  $j$  ترک می‌کند یا خیر.

$Y_{j'jvt}$  متغیر صفر/یک نشان دهنده این که آیا کشتی  $v$  در دوره  $t$  بندر  $j$  را به مقصد  $j'$  ترک می‌کند یا خیر.

$Z_{jivt}$  متغیر صفر/یک نشان دهنده این که آیا کشتی  $v$  در دوره  $t$  بندر  $j$  را به مقصد  $i$  ترک می‌کند یا خیر.

$C_{ijvg}$  تعداد کارگوهای محصول  $g$  که توسط کشتی  $v$  از سفر  $i$  به  $j$  تخلیه می‌شوند.

$C'_{jj'vg}$  تعداد کارگوهای محصول  $g$  که توسط کشتی  $v$  از سفر  $j$  به  $j'$  تخلیه می‌شوند.

محدودیت‌ها

محدودیت‌های مدل به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$C'_{jj'vg} \geq 0, \text{integer} \quad \forall j, j', v, g \quad (18)$$

### تابع هدف

تابع هدف این مدل پیشنهادی شامل کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل کشتی حامل گاز طبیعی مابین بندر مبدا  $i$  به بندر  $j$ ، از بندر  $j'$  به بندر  $i'$  و در نهایت بازگشت به یکی از بنادر مبدا می‌باشد.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{v \in V_i} \sum_{t \in T} \text{Cost}_{ijvt} X_{ijvt} \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{j' \in J} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \text{Cost}'_{jj'vt} Y_{jj'vt} \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \text{Cost}''_{jivt} Z_{jivt} \end{aligned} \quad (19)$$

### حل مدل و تحلیل نتایج

با توجه به اینکه دسترسی به اطلاعات گاز طبیعی مابین وجود ندارد مسئله با ارقام فرضی کوچک حل شده‌است که پاسخ بدست آمده از مدل قابل تعمیم می‌باشد. در این تحقیق 3 بندر مبدا و 3 بندر مقصد در نظر گرفته شده که در هر بندر مبدا 3 کشتی قرار دارد. هر کشتی با توجه به تقاضا برای 4 نوع محصول، می‌تواند به چندین بندر در طی دوره زمانی برنامه‌ریزی سفر کند و بار خود را در آن بنادر تخلیه کند و در نهایت به یکی از بنادر مبدا بازگردد. موقعیت زمانی برای رفت و برگشت کشتی‌ها به یکی از بنادر مبدا 10 روز در نظر گرفته شده‌است. ممکن است در طول افق برنامه‌ریزی چندین کشتی در یک بندر بار خود را تخلیه کنند و از طرفی به هر یک از بنادر مقصد ممکن است چندین کشتی در طول دوره برنامه‌ریزی شده سفر کنند.

مدل توسط نرم‌افزار GAMS کدنویسی شد. جدول‌های 1 و 2 تعداد کارگوی تخلیه شده از هر محصول توسط هر کشتی، با توجه به تقاضای هر بندر را نشان می‌دهد.

8- محدودیت زیر تضمین می‌کند اگر یک کشتی از

بندر مبدا خود خارج شد، تمام کارگوها را خالی کند.

$$\sum_{j \in J} \sum_{g \in G} C_{ijvg} + \sum_{j' \in J} \sum_{g \in G} C'_{jj'vg} = N C_v \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} X_{ijvt} \quad \forall v, i = i_v \quad (8)$$

9- محدودیت بعدی مربوط به تقاضای هر بندر برای

محصولات مختلف می‌باشد.

$$\sum_{i \in I} \sum_{v \in V_i} C_{ijvg} + \sum_{j' \in J} \sum_{v \in V} C'_{jj'vg} \geq D_{jg} \quad \forall j, g \quad (9)$$

10- محدودیت زیر نشان می‌دهد که اگر یک کشتی

از بندر  $i$  به مقصد  $j$  حرکت کند، حتماً باید حداقل یک کارگو در آن بندر خالی نماید.

$$\sum_{t \in T} X_{ijvt} \leq \sum_{g \in G} C_{ijvg} \quad \forall i, j, v \in V_i \quad (10)$$

11- محدودیت زیر نشان می‌دهد که اگر یک کشتی

از بندر  $j$  به مقصد  $j'$  حرکت کند، حتماً باید حداقل یک کارگو در آن بندر خالی نماید.

$$\sum_{t \in T} Y_{jj'vt} \leq \sum_{g \in G} C'_{jj'vg} \quad \forall j, j' \in J, j \neq j', v \quad (11)$$

12 و 13- دو محدودیت بعدی مکمل محدودیت‌های

10 و 11 هستند.

$$\sum_{g \in G} C_{ijvg} \leq M \sum_{t \in T} X_{ijvt} \quad \forall i, j, v \in V_i \quad (12)$$

$$\sum_{g \in G} C'_{jj'vg} \leq M \sum_{t \in T} Y_{jj'vt} \quad \forall j, j' \in J, j \neq j', v \quad (13)$$

14 و 15 و 16- نشان دهنده نوع متغیرها هستند که

جزء اعداد باینری (صفر و یک) می‌باشند.

$$X_{ijvt} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, v, t \quad (14)$$

$$Y_{jj'vt} \in \{0,1\} \quad \forall j, j', v, t \quad (15)$$

$$Z_{jivt} \in \{0,1\} \quad \forall j, i, v, t \quad (16)$$

17 و 18- نشان دهنده نوع متغیرها هستند که جزء

اعداد صحیح غیرمنفی می‌باشند.

$$C_{ijvg} \geq 0, \text{integer} \quad \forall i, j, v, g \quad (17)$$

همان‌طور که در جداول 1 و 2 مشاهده می‌شود تقاضای تمامی بنادر به طور کامل برآورده می‌شوند. تعداد محصولات ارسال‌شده با توجه به تعداد کشتی‌های در دسترس و ظرفیت آن‌ها منطقی و بهینه است، از این رو به شیوه‌ای منطقی از تمامی کشتی‌ها و ظرفیت آن‌ها استفاده می‌شود.

جدول 3: دوره زمانی رسیدن به بنادر مبدا و مقصد

دوره	دوره	دوره	دوره	
زمانی	زمانی	زمانی	زمانی	
رسیدن	حرکت	رسیدن	حرکت	
به بندر	از بندر	به بندر	از بندر	
مبدا	مقصد	مقصد	مبدا	
9	4	3	1	$v_1$
11	9	6	5	$v_2$
10	8	7	6	$v_3$
11	7	6	4	$v_4$
6	5	2	1	$v_5$
11	10	9	7	$v_6$
9	7	6	3	$v_7$
11	10	9	8	$v_8$
5	3	2	1	$v_9$

همان‌طور که در شکل‌های 1، 2 و 3 و جداول 3 و 4 ملاحظه می‌شود، تمامی کشتی‌ها به بنادر مقصد سفر می‌کنند و نهایتاً به یکی از بنادر مبدا باز می‌گردند؛ این اتفاق در تمامی دوره‌های زمانی رعایت شده است. هیچ کشتی را نمی‌توان یافت که هم‌زمان در دو یا چند بندر حضور داشته باشد و این بدان معناست که مدل پیشنهادی منطقی می‌باشد. همچنین با توجه به اشکال 1، 2 و 3 و جدول 4 ملاحظه می‌شود که هر کشتی بعد از بارگیری در دوره‌ی زمانی مشخص به سوی یک یا چند بندر مقصد حرکت کرده بعد از تخلیه کامل بار، به سوی یکی از بنادر مبدا باز می‌گردد. با استفاده از دوره‌های

جدول 1: تعداد کارگوی تخلیه‌شده از هر محصول با توجه

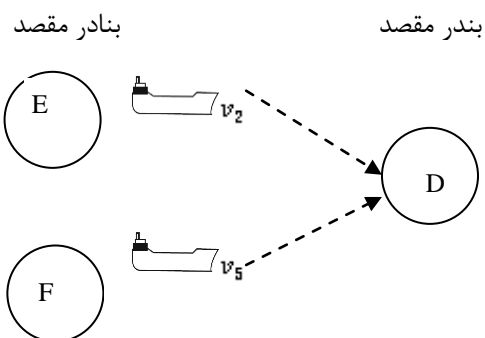
به تقاضای هر بندر

تعداد محصولات تخلیه‌شده				تعداد تقاضا برای هر محصول				بنادر مقصد
$g_4$	$g_3$	$g_2$	$g_1$	$g_4$	$g_3$	$g_2$	$g_1$	
3	4	1	4	3	4	1	4	D
2	2	3	2	2	2	3	2	E
1	1	4	1	1	1	4	1	F

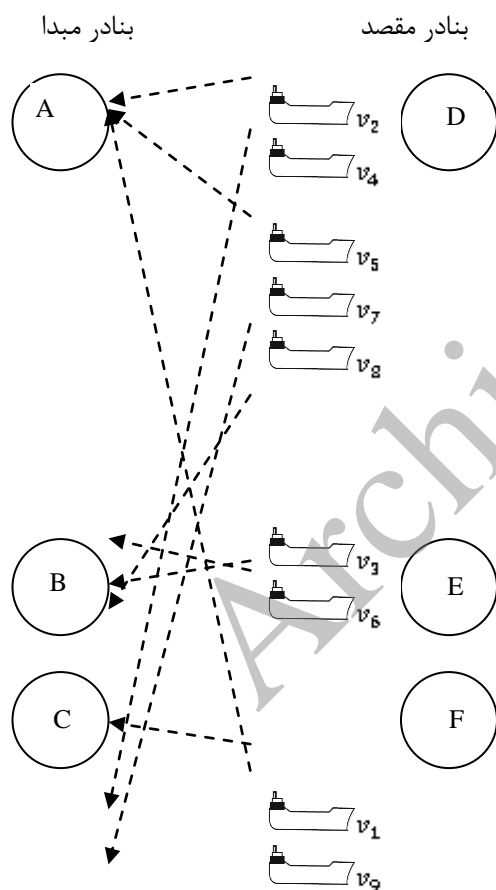
جدول 2: تعداد کارگوی حمل‌شده‌ی محصولات به بنادر

مقصد توسط کشتی‌ها

بنادر مقصد			محصولات - کشتی‌ها
F	E	D	
1			$v_1 - g_1$
1			$v_1 - g_2$
1			$v_1 - g_3$
1			$v_1 - g_4$
		1	$v_2 - g_1$
	1		$v_2 - g_3$
	2		$v_3 - g_1$
	1		$v_3 - g_2$
	2		$v_3 - g_4$
		2	$v_4 - g_1$
1			$v_5 - g_2$
		3	$v_5 - g_3$
	2		$v_6 - g_2$
	2		$v_6 - g_3$
		3	$v_7 - g_4$
		1	$v_8 - g_1$
		1	$v_8 - g_2$
		1	$v_8 - g_3$
2			$v_9 - g_2$



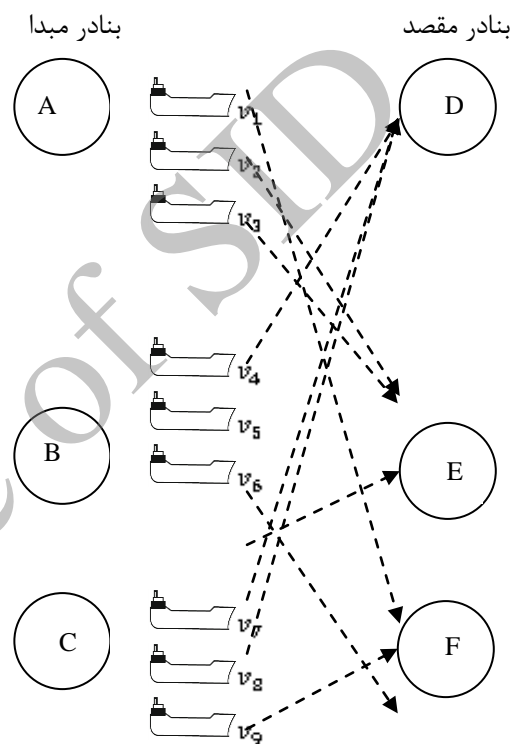
شکل 2: دیاگرام مسیر رفت کشتی‌ها بین بنادر مقصد



شکل 3: دیاگرام مسیر برگشت کشتی‌ها از بنادر مقصد به

بنادر مبدا

زمانی جدول 3 می‌توان مسیر حرکت هر یک از کشتی‌ها را مطابق با جدول 4 رسم نمود. در این جدول مسیر حرکت کشتی‌ها و دوره‌ی زمانی سفر آن‌ها از بنادر مبدا به بنادر مقصد، مابین بنادر مقصد، از بنادر مقصد به بنادر مبدا نشان داده شده است.



شکل 1: دیاگرام مسیر رفت کشتی‌ها از بنادر مبدا به بنادر مقصد



جدول 4: مسیر حرکت کشتی‌ها در طول افق برنامه‌ریزی شده

افق زمانی برنامه‌ریزی شده											دوره زمانی شروع به حرکت	کشتی‌ها	مسیرها
11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1			
											1	v <sub>1</sub>	A.F
											4		F.A
											1	v <sub>5</sub>	B.F
											3		F.D
											5		D.A
											1	v <sub>9</sub>	C.F
											3		F.C
											3	v <sub>7</sub>	C.D
											7		D.C
											4	v <sub>4</sub>	B.D
											7		D.C
											5	v <sub>2</sub>	A.E
											7		E.D
											9		D.A
											6	v <sub>3</sub>	A.E
											8		E.B
											7	v <sub>6</sub>	B.E
											10		E.B
											8	v <sub>8</sub>	C.D
											10		D.B

کشتی‌ها و کاهش تعداد آن‌ها، هزینه‌های حمل‌ونقل کاهش یافته و به تمامی تقاضاها پاسخ داده می‌شود. پس همواره باید میان تقاضا، تعداد کشتی و ظرفیت آن‌ها تعادل وجود داشته باشد.

با افزایش تعداد بنادر متقاضی، تعداد کشتی‌ها و ظرفیت آن‌ها مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد و از تمامی کشتی‌ها برای حمل‌ونقل استفاده می‌شود. با افزایش تعداد و ظرفیت کشتی‌ها مدل تقاضای بنادر مختلف را کاملاً تأمین می‌کند.

تعداد محصولاتی که به بنادر مقصد فرستاده می‌شود، طبق تقاضای بنادر می‌باشد. چنانچه تنوع محصولاتی که به بنادر مقصد فرستاده می‌شود افزایش یابد، باید تعداد کشتی‌ها و یا ظرفیت آن‌ها نیز افزایش یابد. با کاهش تنوع محصولات و با ثابت نگه داشتن ظرفیت کشتی‌ها، تقاضای بنادر نیز کاهش می‌یابد و باعث بهبود در مقدار تابع هدف خواهد شد. با کاهش تنوع محصولات، مدل تقاضای بنادر مختلف را کاملاً تأمین می‌کند.

اگر از ظرفیت کشتی‌های گاز طبیعی مایع کاسته شود جواب بهینه‌ای حاصل نخواهد شد، ولی با افزایش این پارامتر هزینه‌های حمل‌ونقل به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. مدل با استفاده از چند کشتی از مجموعه‌ی کشتی‌ها مسئله را حل می‌کند و به تقاضا برای محصولات مختلف پاسخ می‌دهد

جدول 5 نشان می‌دهد که مقدار عددی تابع هدف که حداقل نمودن هزینه‌ها می‌باشد با مسیر طی شده همه کشتی‌ها هم‌خوانی دارد.

جدول 5: هزینه‌های طی نمودن مسیر کشتی‌ها

کل هزینه	هزینه پیمودن مسیر		
75	10	A.E.v <sub>2</sub>	مسیر رفت از بنادر مبدا به مقصد
	6	A.E.v <sub>3</sub>	
	7	A.F.v <sub>1</sub>	
	12	B.D.v <sub>4</sub>	
	6	B.E.v <sub>6</sub>	
	8	B.F.v <sub>5</sub>	
	9	C.D.v <sub>7</sub>	
	10	C.D.v <sub>8</sub>	
	7	C.F.v <sub>9</sub>	
8	4	E.D.v <sub>2</sub>	مسیر مابین بنادر مقصد
	4	F.D.v <sub>5</sub>	
51	5	D.A.v <sub>2</sub>	مسیر برگشت از بنادر مقصد به مبدا
	5	D.A.v <sub>5</sub>	
	6	D.B.v <sub>8</sub>	
	5	D.C.v <sub>4</sub>	
	7	D.C.v <sub>7</sub>	
	5	E.B.v <sub>3</sub>	
	6	E.B.v <sub>6</sub>	
	5	F.A.v <sub>1</sub>	
	7	F.C.v <sub>9</sub>	
134	مجموع هزینه‌ها		

جدول 6: تغییر در مقدار پارامترها و تأثیر آن بر روی تابع هدف

افزایش یا کاهش پارامترها	مقدار تابع هدف	درصد کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل

با تحلیل حساسیت مدل نتایج جدول 6 حاصل می‌شود. تعداد کشتی‌های حامل LNG بر روی برآوردن تقاضا تأثیر می‌گذارد، چنانچه در دوره زمانی مشخص تعداد کشتی‌ها کاهش یابد مدل قادر به حل نخواهد بود و تقاضا تأمین نمی‌شود. در صورتی‌که با افزایش ظرفیت

توجه به این که گاز طبیعی مایع موضوعی جدید در زمینه صنعت گاز می‌باشد، برای گسترش مدل ارائه شده می‌توان محورهای متعددی برشمرد که بعضی از مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر است:

-مدل مورد بحث در این پژوهش را می‌توان برای تمامی سطوح زنجیره تأمین گاز طبیعی مایع در نظر گرفت،

-تقاضا در افق‌های زمانی غیرقطعی باشد یعنی در هر دوره از دوره‌ی پیشین متمایز بوده و هنگام رویارویی با افزایش تقاضا از کشتی‌های اجاره‌ای استفاده شود،

-لحاظ کردن سایر هزینه‌ها از جمله ذخیره‌سازی، مایع‌سازی گاز طبیعی و تبدیل مجدد آن به گاز، اجاره بهای کشتی‌ها، جریمه‌ی ناشی از دیرکرد در تحویل و موجودی،

-هر کشتی در طول دوره‌ی زمانی پس از بازگشت به یکی از بنادر مبدا بتواند مجدداً از آن بندر خارج شود،

-بنادر مقصد در صورت تکمیل ظرفیت دارای زمان انتظار متفاوتی باشند،

-در نظر گرفتن کمبود در میزان تولید و کمبودی که در اثر تبخیر گاز طبیعی مایع در طول سفر ایجاد می‌شود،

در انتهای دوره برنامه‌ریزی تعداد کشتی‌هایی که باید به بنادر مبدا بازگردند، با توجه به ظرفیت بنادر مبدا مشخص شود.

#### منابع و مراجع

1. Elin E, Halvorsen-Weare, Kjetil Fagerholt, 2010. Routing and scheduling in a liquefied natural gas shipping problem with inventory and berth constraints. *Ann Oper Res DOI*, 10, 1-20.

کاهش تعداد کشتی‌ها و افزایش ظرفیت کشتی‌های موجود	69	48/5 درصد کاهش
افزایش تعداد بنادر متقاضی، تعداد کشتی‌ها و ظرفیت آن‌ها	101	24/6 درصد کاهش
افزایش تنوع محصولات و ظرفیت کشتی‌ها	120	10/4 درصد کاهش
کاهش تنوع محصولات	92	31/3 درصد کاهش
افزایش ظرفیت کشتی‌ها	76	43/3 درصد کاهش

#### جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق به بهینه‌سازی دو سطح از زنجیره‌ی تأمین گاز طبیعی مایع با در نظر گرفتن تنوع محصول، پرداخته شد. تابع هدف کمینه کردن هزینه‌های حمل‌ونقل گاز طبیعی مایع می‌باشد. تعداد هر محصول که در هر کشتی بارگیری می‌شود، مسیری که هر کشتی باید از بندر مبدا حرکت کند تا به بنادر مقصد برسد، زمان‌بندی سفر کشتی‌ها با توجه به افق زمانی تعیین‌شده و تعداد محصولی که در هر بندر مقصد تخلیه می‌شود خروجی‌های مدل می‌باشند. با استفاده از مدل ریاضی پیشنهادی به دلیل پخش و توزیع منطقی و مناسب محصولات مورد تقاضا، هزینه‌های حمل‌ونقل گاز طبیعی مایع را تا حد ممکن کاهش می‌دهد و باعث ایجاد سیستم منطقی و اصولی در مسیریابی می‌شود.

مدل برای افق زمانی 10 روزه نوشته و با استفاده از نرم‌افزار GAMS کد نویسی و حل شد.

- Reza Esmaeilian, 2008. A distribution planning model for natural gas supply chain: A case study. *Energy Policy*(2009), 37, 799–812.
9. Mehmet Efe Biresselioglu, MuhittinHakanDemir, CansuKandemir, 2012. Modeling Turkey's future LNG supply security strategy. *Energy Policy* (2012), 46, 144–152.
  10. M. Getu, S. Mahadzir, N.V.D. Long, M.Y. Lee, 2013. Techno-economic analysis of potential natural gas liquid (NGL) recovery processes under variations of feed compositions, *Chem. Eng. Res. Des.* 91 (2013) 1272–1283.
  11. Rakke, J., Stslhåne, M., Moe, C., Andersson, H., Christiansen, M., Fagerholt, K., et al., 2011. A rolling horizon heuristic for creating a liquefied natural gas annual delivery program. *Transportation Research Part C*, 19(5), 896–911.
  12. Wensheng Cao, Clive Beggs, Iqbal M. Mujtaba, 2014. Theoretical approach of freeze seawater desalination on flake ice maker utilizing LNG cold energy. 2015, 22–32.
  13. W. Lim, K. Choi, I, 2013. Moon, Current status and perspectives of liquefied natural gas (LNG) plant design, *Ind. Eng. Chem. Res.* 52 (2013) 3065–3088.
  2. Grønhaug, R., & Christiansen, M., 2008. Supply chain optimization for the liquefied natural gas business. In L. Bertazzi, J. v. Nunen, & M. Speranza (Eds.), *Innovations in distribution logistics. Lecture notes in economics and mathematical systems*, 195–218.
  3. Grønhaug, R., Christiansen, M., Desaulniers, G., & Desrosiers, J., 2010. A branch-and-price method for a liquefied natural gas inventory routing problem. *Transportation Science*, 44(3), 400–415.
  4. Halvorsen-Weare, E. & Fagerholt, K., 2009. Routing and scheduling in a liquefied natural gas shipping problem with inventory and berth constraints. *Annals of Operations Research*, doi:10.
  5. Juan Villada, Yris Olaya, 2012. A simulation approach for analysis of short-term security of natural gas supply in Colombia. *Energy Policy* (2013), 53, 11–26.
  6. Magnus Stålhane, Jørgen Glomvik Rakke, Christian Rørholt Moe, Henrik Andersson, Marielle Christiansen, Kjetil Fagerholt, 2011. A construction and improvement heuristic for a liquefied natural gas inventory routing problem. *Computers & Industrial Engineering* (2012), 62, 245–255.
  7. Marte Fodstad, Kristin Tolstad Uggen, Frode Rømo and Arnt-Gunnar Lium, 2008. Profit Maximization in the LNG-Value Chain by Combining Market Prices and Ship Routing. *SINTEF Technology and Society, Applied Economics and Operations Research*, 2782- 2793.
  8. Maryam Hamedi, Reza Zanjirani Farahani, Mohammad Moattar Hussein, Gholam